# 第 4 章　辽河西部凹陷古近系油源精细对比

辽河探区西部凹陷位于渤海湾盆地东北部的辽河断陷西南部（图 4.1），长 135km，宽 15km~30km，面积 2560km$^2$，是辽河断陷三个凹陷中最大的一个。

西部凹陷北邻大民屯凹陷，西接西部凸起，东靠中央凸起，向南延伸至辽东湾。总的地质、地形特点为东陡西缓，北高南低，北窄南宽，东断西超，为一向南东方向倾斜的狭长形箕状凹陷（图 4.1）。古近纪为西部凹陷的主要发育时期，经历了拱张、初陷、深陷、再陷和萎缩等构造发展演化期，沉积了房身泡组、沙河街组和东营组地层。

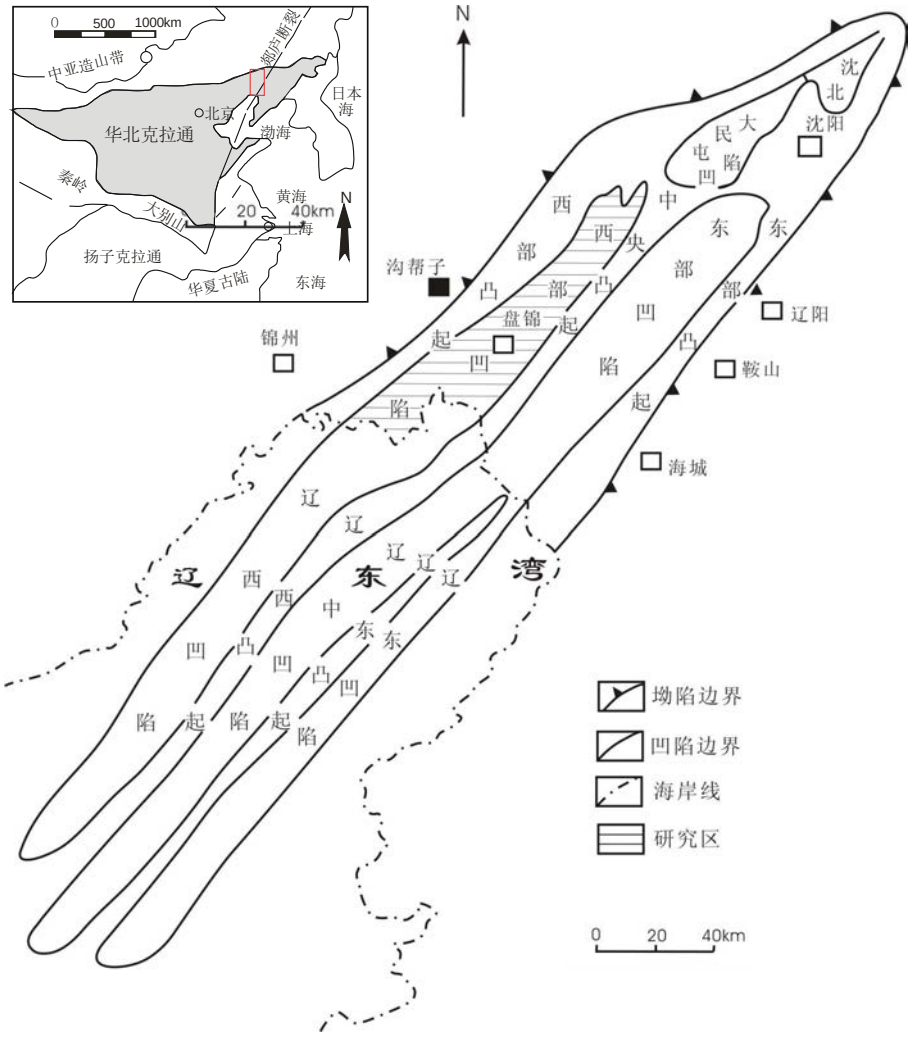



图 4.1 西部凹陷地理位置示意图(据石油地质志, 1987 [210] )

**Fig. 4.1 Location of the Western Depression of the Liaohe Basin**

## 4.1　地质概况

西部凹陷自燕山运动以来处于区域性构造活动期。沙四段沉积早期是在中生界盆地基础上发育起来的坳断坳型盆地，北部牛心坨洼陷是沉降最强的地区，湖盆面积广、深度大；在沙四段沉积晚期，高升“隆起”的两侧相对沉陷，形成陈家洼陷、台安洼陷的初始形态。沙三段沉积时期是在沙四期坳断型盆地基础上发育的断陷型盆地，断续发育了三个沉积洼陷，即盘山洼陷、清水洼陷和鸳鸯沟洼陷，其中以南部清水洼陷为沙三期面积最广，深度最大的湖盆。沙三末期西部凹陷区域回返并遭受轻微剥蚀，在沙一段沉积时期重新转变为稳定的沉降期，至东营时期盆地再次较大幅度的沉降。而此时北部牛心坨构造快速抬升，致使其沙一段和沙三段上部地层遭受剥蚀，至渐新世末基本上停止拉张运动，进入东营期的坳陷阶段。

大量构造、沉积研究认为，西部凹陷沙四时期为干旱-半干旱气候条件下的咸水-半咸水沉积环境，湖盆水体相对较浅而宁静，水介质呈现弱碱性。沙四早期，湖盆水体较浅，在牛心坨洼陷主要接受少量来自中央凸起物源的供给，水体为半咸水-微咸水；沙四晚期，沉积范围相对广泛，在曙光-兴隆台古潜山隆起带以北的陈家、台安和牛心坨三个洼陷，水体相对封闭，淡水注入少，陆屑供应不充分，为咸水-半咸水浅水湖湾环境、湖湾-浅湖和湖相环境。在陈家、台安和牛心坨洼陷这三个咸水洼陷中，牛心坨洼陷水体比较深且略淡。在古潜山隆起带以南的清水洼陷，水体相对开放，为淡水湖相环境。沙三时期古气候总体是从早期半干旱向晚期半潮湿转变，水体逐渐淡化。沙三早、中期，气候转为温暖湿润．水量较丰富，蒸发减弱，因盆地急剧下沉，湖面上升，湖水加深加宽，沉积物分异明显，沉积具有快速沉降和快速充填的特点。在北部，陈家洼陷水体相对广而深，水质可能比牛心坨、台安洼陷淡，而台安洼陷水体相对较浅，水质达到微咸水标准；南部，清水和鸳鸯沟洼陷主要为淡水沉积。沙三晚期，基底沉降幅度较小，整个湖盆水体开始明显变浅，淡水注入造成湖盆水体淡化，至沙二时期，水介质全面淡化。沙一时期基底又开始快速沉降，但幅度远小于沙三段，导致沉积厚度或水域覆盖的面积都小于沙三时期，水体为微咸水-淡水环境。东营沉积时期，湖盆中心逐渐向南退缩，直到湖盆消失，大量淡水注入，湖泊为淡水环境，发育浅水生物。总体而言，西部凹陷水体范围的三次扩展与收缩，其规模逐渐变小，最大深水区的水体深度也逐渐变浅。沙三时期以来以淡水为主体，间或有微咸水介质。西部凹陷的南部清水洼陷在两个大的沉积旋回中均处于沉积中心的位置，为烃源岩沉积的最佳场所（表 4.1）。

表 4.1 西部凹陷烃源岩主要地质特征

**Tab. 4.1 Geological characteristics of the source rocks in the Western Depression**

| 层段 | | 沉积 环境 | 水介质 | 物源供应 | 岩性组合 | 分布地区 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 东营组 | $SQ_8$ | 泛滥平原 | 淡水 | 相对充足 | 灰色-灰绿色泥岩 | 清水和鸳鸯沟洼陷 |
| 沙一、二段 | $SQ_7$ | 浅湖-半深湖 | 微咸水/淡水 | 相对不足 | 褐灰色钙质页岩、白云质泥岩、油页岩 | 清水和鸳鸯沟洼陷（较 $SQ_6$ 变广、厚） |
| | $SQ_6$ | | 淡水 | 相对充足 | 深灰色泥岩 | 清水和鸳鸯沟洼陷（面积和厚度不如沙三段） |
| 沙三段 | $SQ_5$ | 深湖-半深湖 | 淡水 | 相对充足 | 灰色泥岩、油页岩、碳质泥岩、煤层 | 清水洼陷 |
| | $SQ_4$ | | 微咸水/淡水 | 相对充足 | 深灰色泥岩 | 清水洼陷/牛心坨和盘山-陈家洼陷 |
| | $SQ_3$ | | 微咸水/淡水 | 相对充足 | 深灰色泥岩和油页岩 | 清水洼陷和鸳鸯沟洼陷/牛心坨、陈家和盘山洼陷 |
| 沙四段 | $SQ_2$ | 浅水湖湾 | 咸水/半咸水 | 不足 | 深灰、褐灰色泥岩 | 牛心坨和陈家洼陷/西斜坡曙光地区 |
| | $SQ_1$ | | 半咸水/微咸水 | 较少 | 褐灰色白云质泥岩、泥质白云岩、钙质泥岩、油页岩等 | 牛心坨洼陷 |

### 4.1.1 地层和层序

（1）地层

受辽河断陷演化阶段性和沉积旋回控制，西部凹陷新生界自下而上依次发育了古近系房身泡组、沙河街组、东营组和馆陶组等地层（图 4.2）。其中与烃源岩和岩性地层油气藏关系最为密切的是沙河街组。新生界各组段发育及分布特征如下：

①房身泡组（Ef）

下段为玄武岩段，岩性为辉石玄武岩、橄榄玄武岩和少量凝灰岩。上段为暗紫色泥岩夹砂岩、炭质泥岩和煤层。本组顶部绝对年龄值 46.4Ma，下段测值 56.4Ma~65.0Ma。全区分布广泛，厚度变化 0m~1200m（高参 1 井，1204m 未穿）。与前古近系呈角度不整合接触。

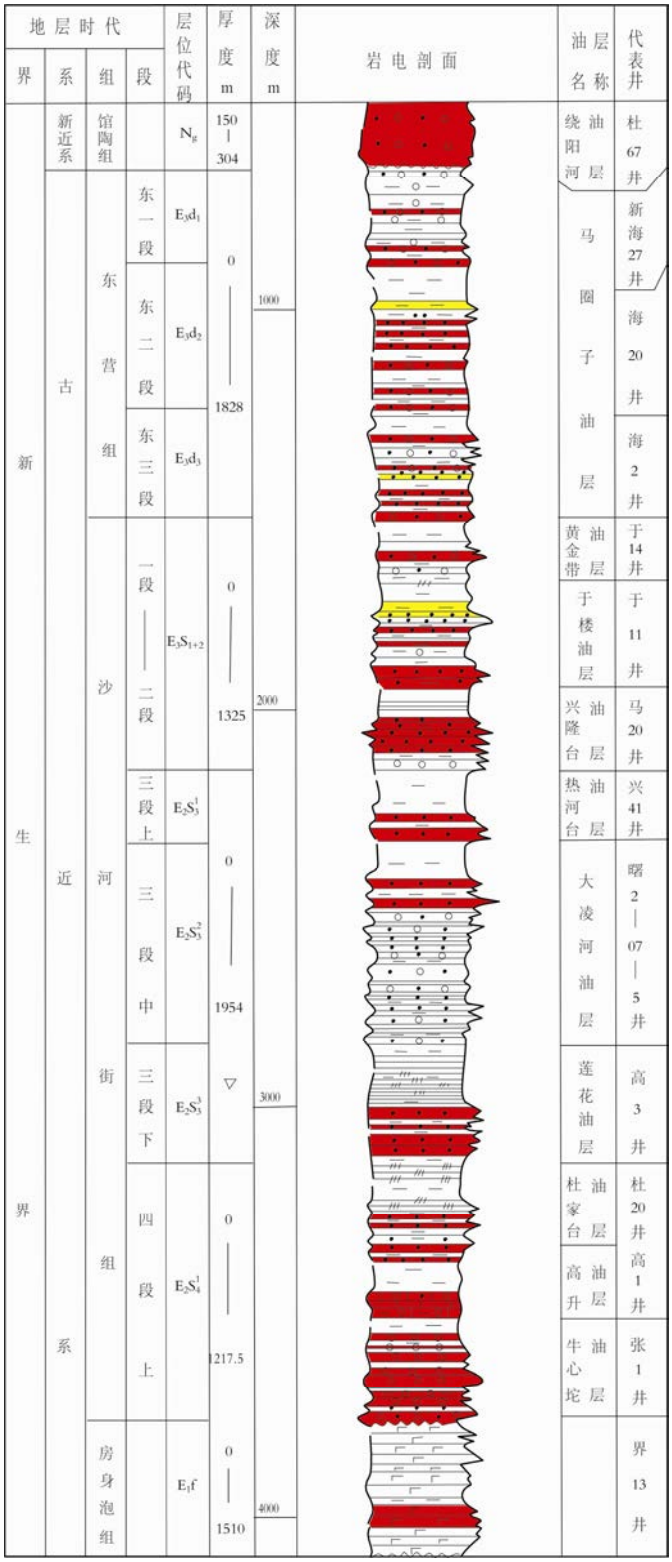



图 4.2　西部凹陷古近系地层序列图（据刘世会, 2006[211]）

**Fig. 4.2 Stratigraphy of the Palegene in the Western Depression**

②沙河街组四段（$Es_4$）

沙河街组四段是辽河断陷裂陷形成湖盆的初期产物，西部凹陷深层仅见沙四上段地层（杜家台油层），岩性以中-薄层层状砂岩为主夹暗色泥岩，顶部发育所谓“上特殊岩性段”，即钙质泥岩、油页岩与暗色泥岩呈薄互层段。在凹陷中心地区，该段被砂泥岩薄互层取代。沙四段上亚段最大揭示厚度 646m，与下伏地层房身泡组为假整合-角度不整合接触。据最新地震资料，陈家洼陷、台安洼陷和清水洼陷中心缺失沙四段，牛心坨洼陷有少量残留，厚约 350m，而牛心坨洼陷以北地区沙四段分布广泛，在牛心坨隆起区厚达 850m。沙四段化石以光滑南星阶、土星介、中华扁卷螺等组合为主。

③沙河街组三段（$Es_3$）

沙三段地层形成于辽河断陷深陷期，此时西部凹陷水域广阔，呈东陡西缓的箕状深水湖盆，此期沉积厚度巨大，分布范围广，沉积以厚层状暗色泥岩为主。沙三段自下而上可细分为沙三段下亚段、沙三中亚段和沙三上亚段三个亚段。沙三段是西部凹陷重要油气产层莲花油层、大凌河油层和热河台油层分布的层位，其中莲花油层分布于沙三段下亚段，大凌河油层分布于沙三段中亚段，热河台油层分布于沙三段上亚段。

沙三段下亚段在全凹陷分布很广，在凹陷边缘部位主要发育灰白色厚层砂砾岩、长石砂砾岩及钙质砂岩。在西部凹陷中部主要以灰黑色泥岩夹油页岩、钙质页岩薄互层为主。本段地层厚度一般为 200m~300m，揭示最大厚度为 465m。化石组合以隐瘤华北介、中国华北介为主。

沙三段中亚段沉积时期是全凹陷沉降速率最大的时期，该地层在全凹陷均有分布，主要以深灰、褐灰色泥岩和灰白色砂岩互层为特征。本段地层厚度一般 500m~700m，揭示最大厚度达 1082m 以上。化石组合以深水生态的华北介和兴隆台纺锤玻璃介为特征。

沙三段上亚段沉积时期，由于在沙三段上亚段沉积末期遭受剥蚀的缘故，在凹陷内分布相对较局限，岩性主要为灰黑色泥岩。本段地层厚度一般为 250m~350m。化石以渤海藻为主。

沙三段在整个西部凹陷均有分布，残留地层北部薄，南部厚；西部斜坡薄，洼陷中心厚，且发育多个沉降中心。沙三段地震解释厚度大于 2500m，最大钻井揭示厚度 2089m（未穿），与下伏沙四段上亚段为整合或假整合接触。

④沙河街组一、二段（$Es_{1+2}$）

沙河街组二段是盆地扩张早期（第二旋回早期）底部粗粒充填沉积的产物，分布局限。岩性主要为浅灰白、肉红色砂砾岩、长石砂岩、钙质砂岩，局部砂岩夹泥岩、泥岩、

鲕粒灰岩、生物灰岩等，与下伏沙三段呈假整合-整合接触。化石组合以椭圆拱星介、丰富丽星介及粒皱锥藻为代表。

沙河街组一段是盆地扩张中晚期的沉积物，在全盆地广泛分布。根据岩性可分为下、中、上三部分。以暗色泥岩为主，与砂岩、砂砾岩呈不等厚互层。该段下部发育钙质页岩，中部夹油页岩或生物灰岩、鲕灰岩等，上部以暗色泥岩为主夹油页岩、钙片页岩及薄层砂岩，向南至浅海地区发育厚层状暗色泥岩。化石组合以薄球藻、西营介、金星介科为主。

沙一、二段厚度一般为 400m~500m，最大厚度 1069.5m（牛 24 井），底部测得火山岩绝对年龄 36.9Ma，平均沉积速度 283m/Ma。

⑤东营组（Ed）

东营组沉积时期处于西部凹陷构造演化阶段的萎缩期，根据化石组合与岩电性特征，东营组可进一步细分为上、中、下三段：

东营组三段下部为灰色泥岩段和灰绿色粗砂岩互层段，中部为褐灰色泥岩，向盆地边缘的泥岩逐渐相变成灰色、灰绿色砂岩及砂砾岩，上部为大量的褐灰色炭质泥岩段沉积。

东营组二段下部以深灰色泥岩和灰白色砂岩互层为特征，上部以褐灰色泥岩段为主。

东营组一段，主要为无化石的灰色泥岩与粗碎屑砂岩互层为主。

东营组最大揭示厚度 2067.5m 未穿（清 20 井），与沙一段呈整合接触，古生物化石主要集中在东营组中、下部，以圆球藻类、广饶小豆介和具角华花介组合为代表。

（2）层序划分

以往的研究表明，西部凹陷古近系存在 5 个区域性不整合面（角度不整合或角度不整合到假整合过渡）和 7 个局部性不整合面。据此，朱筱敏等将西部凹陷古近系划分为以区域性不整合面为边界的 4 个二级层序和以区域性或局部性不整合面为边界的 11 个三级层序（附表 A.2）。

### 4.1.2　构造特征及构造发展史

（1）西部凹陷构造特征

最近漆家福等通过对 83 条格架地震剖面和沙四段底界、沙三段底界、沙一、二段底界、东营组底界、馆陶组底界和明化镇组底界 6 个构造层的解释，以东营期构造变形特征的差异为主导因素，并结合沙三期的沉积和构造特征划分出以下 9 个构造单元（图 4.3）：①西部斜坡区；②双台子构造带；③清水洼陷区；④盘山-陈家洼陷区；⑤兴隆

台潜山构造带；⑥冷家压扭构造带；⑦牛心坨-台安洼陷区；⑧牛心坨反转构造带；⑨中央凸起南部倾没带。

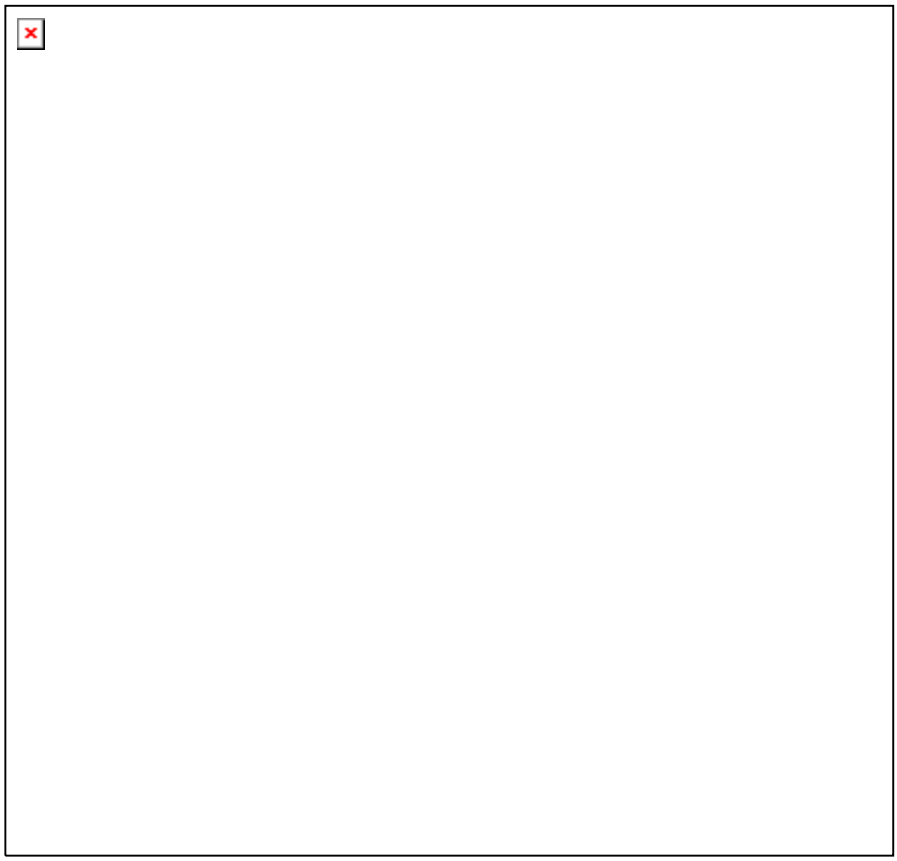


图 4.3 西部凹陷测网及构造单元划分图(据漆家福, 2008[212])

**Fig. 4.3 Tectonic classification of the Western Depression with seismic grid background.**

漆家福等人根据台安-大洼断裂主干断层的产状、位移量沿走向的变化及受后期走滑作用改造的方式、程度的差异，指出凹陷结构沿走向（南北向）的差异十分明显，因而将西部凹陷从南到北划分为：南区（清水洼陷所在的区域）、中南区（兴隆台-陈家洼陷所在的区域）、中北区（台安-牛心坨洼陷所在的区域）和北区（牛心坨反转构造带所在的区域）4 个区。各区构造形态特征如下：

①南区：南区是西部凹陷中 “东断西超或东断西翘” 复式半地堑特征最为典型的区域，凹陷从东南部的清水洼陷过渡到西北部的西部斜坡，沉积层的厚度逐渐减小。台安大洼断层（南部还包括海外河断层和海南断层）是东南部清水洼陷的主控断层，鸳鸯沟断层、鸳北断层和欢南盘西断层共同组成坡-洼过渡带的控制性断层，共同构成断层坡折带，该坡折带的断层主要在沙三时期活动，必将对沙三的沉积和储层起重要的控制作用。

陡坡带主要发育陡坡阶梯式断层（铲式扇）构造样式，其中台安大洼断层倾角较缓，其它的分支断层倾角较大，最后都收敛到台安大洼断层上，构成上宽下窄的扇形，断层倾向北或北西。

清水洼陷的中央轴线部位，断层很不发育。清水洼陷轴线以西的区域，剖面中浅层（沙一、二段及其以上地层）主要发育盆倾阶梯式断块构造和背斜构造（双台子背斜）。阶梯式断层近东西走向，倾向南。深层断层不太发育。

斜坡带下部构造层（沙三段-沙四段）主要发育“多米诺”式断块构造，断层走向北东，倾向北西。西部斜坡带上部构造层（沙一、二段及以上地层）断层不太发育，整体表现为向东南倾斜的楔形。

②中南区：中南区整体还表现出“东断西超”的复式半地堑特征，但东侧的相对沉降幅度明显小于南区。在兴隆台潜山发育的区域，凹陷沉降幅度最大的区域在剖面中部的盘山洼陷。

③中北区：中北区台安-牛心坨洼陷区剖面构造形态在东西方向具有明显的差异，以陈家-台安西断裂为界，东侧发育西倾的阶梯式正断层，切割沙二段底界及沙三段上部层位，个别断层切割至明化镇组底界，主要形成于东营期，馆陶期以后具有继承性；主边界断裂为台安-大洼断裂，控制东营组和沙三段的沉积，在馆陶期发生反转；东段发育馆陶组底界、沙一、二段底界两期不整合面，沙三段底界被台安-大洼断裂破坏。西侧发育东倾的阶梯式正断层，部分断层仅切割沙三段和沙四段，形成于沙三期，以阶梯式断层组合为主，局部表现为地堑式或地垒式结构、“入”字型结构、反“y”字型结构，部分断层仅切割至东营组底界，少量断层切割至明化镇组底界，具有新生性和继承性；发育馆陶组底界、沙一、二段底界、沙四段底界三期不整合面，不整合面自洼陷向斜坡逐渐超覆，使其下伏地层遭受剥蚀，甚至尖灭。

④北区：北区在剖面上构造形态具有两侧压扭性逆冲，中间阶梯式正断特征。西侧发育正花状构造，由 3-4 条逆断层组成，主断层主体西倾，倾角自上而下逐渐变陡，根部近直立，使中生界地层逆冲在沙三段、沙四段之上，东倾反向断层主要发育在中生界层序内部，向上切割至明化镇组底界。东侧发育平缓的冲起背斜构造，由牛心坨东逆断层和台安-大洼断裂组成，其中，牛心坨东逆断层切割台安-大洼断裂，使中生界逆冲在沙三段、沙四段之上，并切割至明化镇组底界，但断距不大；台安-大洼断裂发生正反转，使馆陶组、明化镇组自西向东逆冲，最大断距可达 150m。在两侧压扭性断裂带之间发育一向斜构造，其两翼产状平缓，核部开阔，并伴有阶梯状正断层组合，倾向 SW，

倾角 40°左右。从地层缺失情况分析，压扭性构造活动主要发生在东营组沉积后，并持续至明化镇组早期。

（2）盆地构造演化

根据凹陷构造解析、平衡剖面研究、沉降史分析、剥蚀量恢复和原形盆地复原等方面综合研究工作，漆家福等认为，西部凹陷新生界沙四段、沙三段、沙一二段、东营组和馆陶组-第四系 5 个构造层代表新生代盆地形成和演化的 5 个阶段（附表 A.3）。

裂陷 I 期（$Es_4$）：盆地的沉积-沉降中心位于西部凹陷的北部牛心坨隆起区一带；盆地表现为“拗断”特征，沉降-沉积作用可能基本不受断层控制，NE 向基底正断层（如双台子断层、兴西断层等）发育，凹陷的边界断层（台安-大洼断裂）不是盆地的主控断层。

裂陷 II 期（$Es_3$）：台安-大洼断裂是这一阶段盆地的主控边界断层；盆地整体是在台安-大洼断裂铲式正断层控制下发育的东南断-北西超的半地堑；盆地边界断层控制沉降-沉积作用，次级基底断层活动减弱，盖层断层不太发育；盆地的轴向为北东向。

裂陷 III 期（$Es_{1+2}$）：边界断层活动，对盆地沉降-沉积有一定控制，但盆地总体上表现为断拗结构，沉降-沉积中心位于轴部，盆地分布范围广；台安-大洼断裂受深断裂走滑活动改造；与伸展、走滑相关的部分盖层断裂发育。

裂陷 IV 期（Ed）：深断裂走滑活动强烈导致盆地局部反转，差异升降明显，南部表现为张扭的特征（走滑拉分），中部为张扭-压扭的过渡，北部则表现为压扭；地壳弱伸展叠加基底走滑活动诱导的拉分控制着这一时期的沉降-沉积作用；边界断层台安-大洼断裂对盆地的演化不起主控作用，盆地南部受走滑拉分影响发育南掉、走向东西的阶梯式断层；盆地整体结构形态在这一时期形成，是构造单元划分的主要依据。

拗陷阶段（新近纪-第四系）：以拗陷变形为主要特征；对东营期的走滑变形有明显的继承作用，表现为馆陶组底反射层被压扭性断层和张扭性断层错断；北部继承压扭性构造，发育反转逆断层，台安-牛心坨洼陷边界断裂发生正反转、牛心坨西断裂、牛心坨东断裂、台安中断裂继承式反转，幅度 150m；南部继承张扭性构造，发育正断层。

## 4.2 样品和实验

对于高成熟勘探区辽河西部凹陷，在分析和整理该区的地化数据库的基础上，本着样品的验证和补充，以及紧随勘探进展的原则，采集 56 个油砂和 75 个原油样品，而对于烃源岩的采样除了考虑上述因素外，对辽河西部凹陷 863 口取心井 50000 余个岩心段仔细观察，分别对不同层序、不同构造沉积相带的各种岩性、颜色的烃源岩样品（宏观

A、B、C、D、E 五大类）进行了取样分析，共计获得 168 个岩心、岩屑样品。通过采用一系列地化分析测试，包括 Rock-Eval、有机碳丰度、全岩及干酪根的显微组分和镜检、干酪根元素分析、干酪根和原油或油砂同位素、烃源岩和油砂抽提物以及原油的色谱-色质分析等（表 4.2），进行原油和烃源岩地球化学特征的研究，并在此基础上进行精细油源对比，这为精细勘探成熟区的资源评价提供了可靠的依据。

表 4.2 辽河西部凹陷实验样品概况

**Tab. 4.2 Experimental analysis details of the Western Depression**

| 分析化验项目 | | 样品数 | 分析化验项目 | | 样品数 |
|---|---|---|---|---|---|
| 烃源岩 | 制备 | 76 | 油砂 | 抽提 | 56 |
| | 磨片 | 76 | | 族组分分离 | 56 |
| | Rock-eval | 168 | | GC | 55 |
| | TOC | 168 | | 饱和烃 GC-MS | 30 |
| | 全岩显微组分 | 76 | | 芳烃 GC-MS | 24 |
| | 全岩镜检(*Ro*) | 44 | 原油 | 族组分分离 | 75 |
| | 干酪根制备 | 49 | | GC | 75 |
| | 干酪根显微组分 | 49 | | 饱和烃 GC-MS | 23 |
| | 干酪根镜检(*Ro*) | 48 | | 芳烃 GC-MS | 13 |
| | 干酪根元素分析 | 46 | 原油/油砂抽提物碳同位素 | | 29 |
| | 干酪根同位素 | 29 | | | |
| | 抽提 | 161 | | | |
| | 族组分分离 | 74 | | | |
| | GC | 74 | | | |
| | 饱和烃 GC-MS | 42 | | | |
| | 芳烃 GC-MS | 34 | | | |
| 合　计 | | 2361 项次 | | | |

## 4.3　结果与讨论

### 4.3.1　西部凹陷烃源岩地球化学特征

(1) 有机质丰度和类型

①有机质丰度

在我国石油勘探工作与研究中，已经建立了一些评价有机质丰度的标准，表 4.3 为黄第藩等在大量分析资料的基础上，提出的我国陆相烃源岩有机质丰度评价标准，它比较适用于成熟度较低-中等的湖相烃源岩。本次研究也参照此烃源岩评价标准。

在辽河西部凹陷 863 口取心井 50000 余个岩心段仔细观察的基础上，分别对不同层系、不同沉积相带的各种岩性、颜色的烃源岩样品（宏观 A、B、C、D、E 五大类）进行了取样分析，兼顾对原有实验分析样品的验证和补充原则，选取了 168 个岩心、岩屑样品。通过采用对具有广泛代表性的样品进行先进的仪器分析，对以往完成的分析测试数据进行校验的方法，筛选出 1820 个样品的有效实验分析数据，分层序、分类型进行有机质丰度的评价。

**表 4.3 陆相生油岩有机质丰度评价标准（据黄第藩等, 1990[213]）**

**Tab. 4.3 Organic matter abundance evaluation standard for terrestrial source rocks**

| 烃源岩级别 | 有机质丰度参数 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 有机碳 (%) | 氯仿沥青“A” (%) | 总烃 ($10^{-6}$) | 生烃潜量 (mg/g) | 总烃转化率 （%） |
| 好烃源岩 | ＞1.0 | ＞0.1 | ＞500 | ＞6.0 | ＞8 |
| 较好烃源岩 | 1.0～0.6 | 0.1～0.05 | 500～200 | 6.0～2.0 | 8～3 |
| 较差烃源岩 | 0.6～0.4 | 0.05～0.01 | 200～100 | 2.0～0.5 | 3～1 |
| 非烃源岩 | ＜0.4 | ＜0.01 | ＜100 | ＜0.5 | ＜1 |

从西部凹陷各层序烃源岩有机质丰度分布来看，西部凹陷各层序烃源岩有机碳含量中值均在 1.5%以上，生烃潜量在 2.0mg/g 以上，氯仿沥青“A”在 0.08%以上，总烃普遍在 $300\times10^{-6}$ 以上，基本都达到较好烃源岩以上的评价标准（图 4.4）。沙四段 $SQ_1$ 和 $SQ_2$ 明显较其它各层段高，均达到好烃源岩的标准。其中以 $SQ_1$ 残余有机碳更高，其中位数可达到 2%以上，而 $SQ_2$ 的生烃潜量和可溶有机质部分的氯仿沥青“A”和总烃较高；沙三段上部 $SQ_5$ 有机碳含量中位数达到 1.81%，生烃潜量达到 3.98mg/g，总烃也达到了 $439\times10^{-6}$，其次为 $SQ_4$，其有机碳和生烃潜量也都很高，下部的 $SQ_3$ 虽然在 TOC 和生烃潜量方面不如前两个层序的烃源岩，但从 TOC 达到 1.6%的指标来看，仍不失为好烃源岩；沙一、二段烃源岩在各项有机质丰度指标上均不如沙三段，其有机碳含量中位数在 1.5%，生烃潜量在 2.6mg/g，氯仿沥青“A” 0.08%，总烃 $283\times10^{-6}$，其中上部 $SQ_7$ 要好于下部的 $SQ_6$，这可能与 $SQ_7$ 分布的一套褐色油页岩有关。

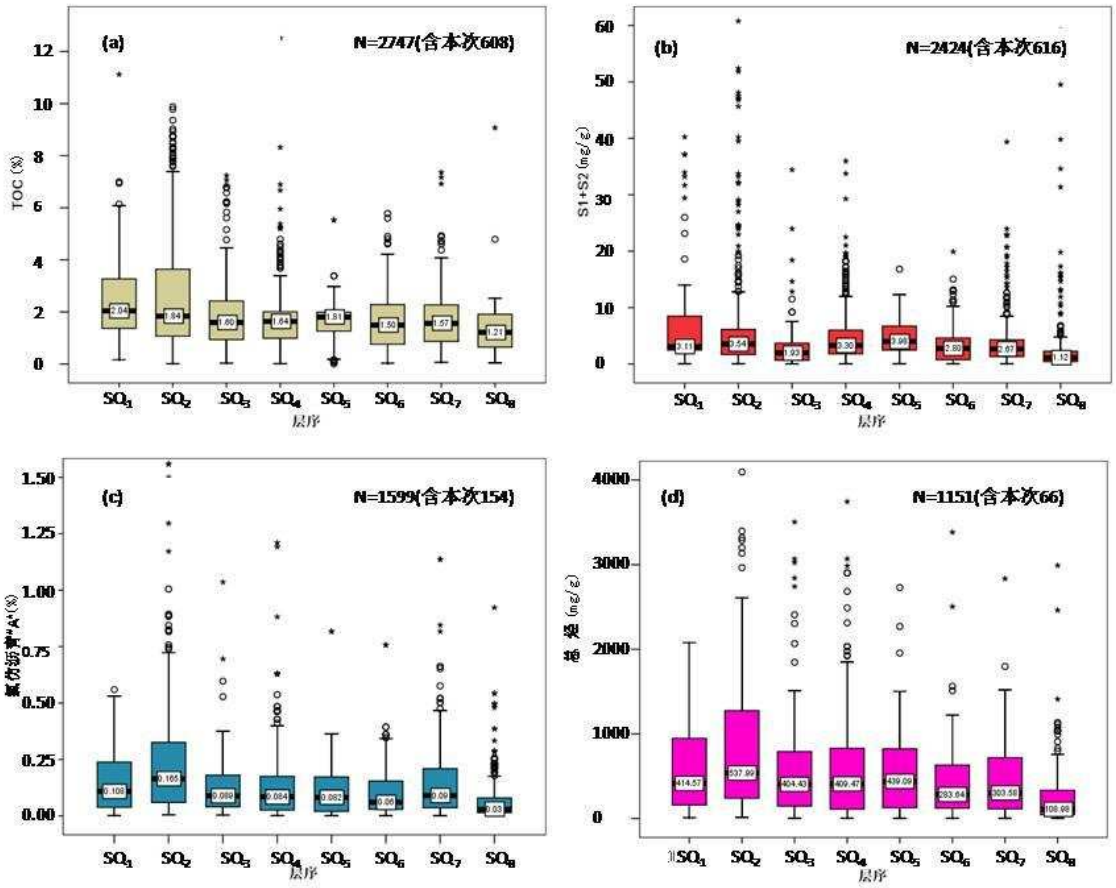



图 4.4 西部凹陷各层序烃源岩有机质丰度分布图

**Fig. 4.4 Organic matter abundance distribution of the Western Depression (in terms of sequences)**

从西部凹陷各宏观岩石类型烃源岩有机质丰度分布来看，各类烃源岩（A、B、C、D 和 E 类）与有机碳含量有着非常明显的对应关系（图 4.5），A+B 类烃源岩（褐色油页岩和褐色钙质页岩）有机碳含量非常高，其有机碳含量中值达到 2%以上，其中 A 类烃源岩有机碳含量中值达 7%，属非常好的烃源岩，C 类烃源岩（深灰色泥岩）虽有机碳含量较前两类有所降低，但其中值仍达到了 1.7%，仍为好烃源岩，D 类烃源岩（灰色-浅灰色泥岩）有机碳含量中值为 0.9%，为较好烃源岩，E 类烃源岩（绿灰色泥岩）有机碳含量最低，中值为 0.24%，按照评价标准属较差烃源岩。

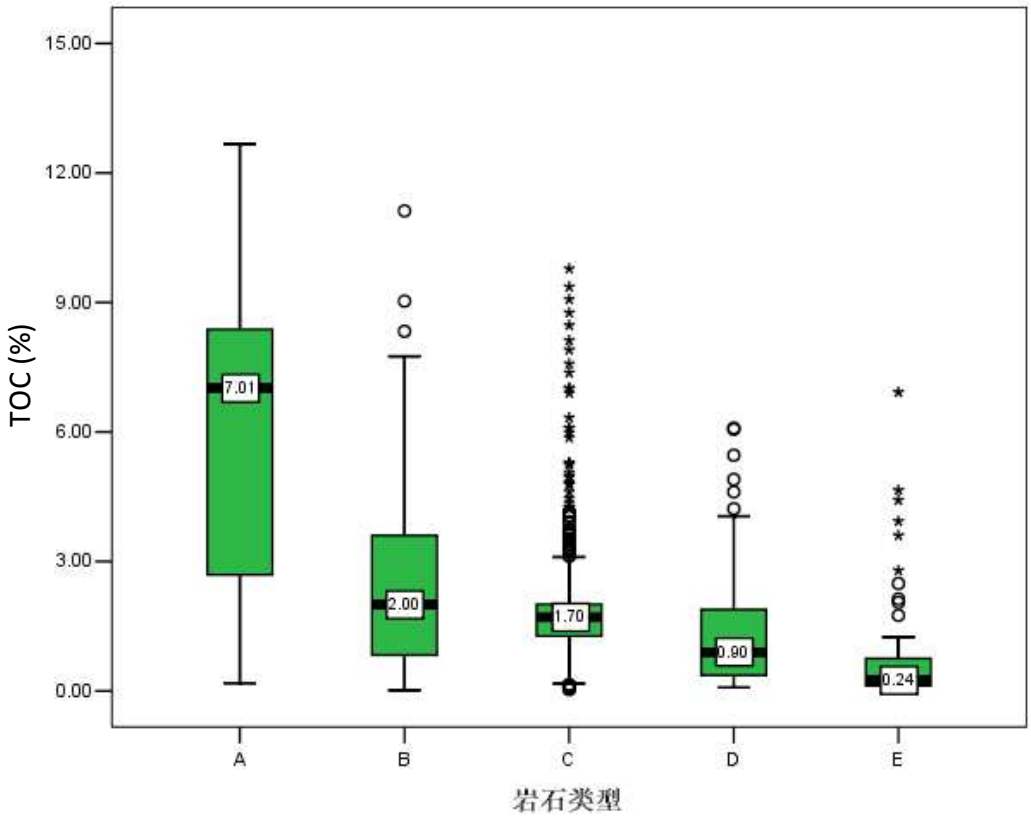



图 4.5 西部凹陷各类烃源岩有机碳含量分布图

**Fig. 4.5 TOC distribution of the source rocks in the Western Depression (in terms of lithologic types)**

综合上述各有机质丰度参数特征，按照陆相生油岩评价标准，从烃源岩分布层序来看，认为 $SQ_1$、$SQ_2$、$SQ_5$、$SQ_4$ 和 $SQ_7$ 为好烃源岩分布层序，$SQ_3$ 为分布有较好烃源岩层序，$SQ_6$ 为较差烃源岩发育层序，$SQ_8$ 为非烃源岩发育层序；从岩石类型来看，A+B 类烃源岩为优质烃源岩（TOC 中值在 2.0%以上），可能对油气生成贡献最大。

②有机质类型

有机质类型是烃源岩的质量指标，本次研究根据干酪根元素分析、显微组分组成、岩石热解参数和生物标志物组成特征采用三类四型的分类方案来进行西部凹陷的烃源岩有机质类型的评价，评价标准见表 4.4。

表 4.4 有机质类型划分指标汇总表[199]

**Tab. 4.4 Standard parameters for organic matter classification**

| 指标 \ 类型 | | | Ⅰ型 (腐泥型) | Ⅱ型 | | Ⅲ型 (腐殖型) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Ⅱ$_1$型 (腐殖-腐泥型) | Ⅱ$_2$型 (腐泥-腐殖型) | |
| 干酪根 | 元素分析 | H/C 原子比 | ＞1.5 | 1.5～1.2 | ＜1.2～0.9 | ＜0.9 |
| | | O/C 原子比 | ＞0.1 | 0.1～0.2 | ＞0.2～0.3 | ＜0.3 |
| | 镜检 | 壳质组，% | ＞70～90 | 70～50 | ＜50～10 | ＜10 |
| | | 镜质组，% | ＜10 | 10～20 | ＞20～70 | ＞70～90 |
| | | 类型指数 Ti | ＞80 | 80～40 | 40～0 | ＜0 |
| | 碳同位素 | $\delta^{13}C$，‰ | ＜-28 | -28～-26.5 | -26.5～-25 | ＞-25 |
| 岩石热解参数 | | 氢指数，mg/g | ＞500 | 500～350 | ＜350～100 | ＜100 |
| | | 类型指数 $S_2/S_3$ | ＞20 | 20～5 | ＜5～2.5 | ＜2.5 |

(a) 岩石热解特征

西部凹陷各层序烃源岩热解参数的分布如图 4.6 所示。沙四段 $SQ_1$ 和 $SQ_2$ 的有机质类型最好，以Ⅰ-Ⅱ$_1$型为主，其余依次为 $SQ_7$，$SQ_5$，$SQ_4$，$SQ_6$，$SQ_3$，多为Ⅱ$_1$-Ⅱ$_2$型，最差的有机质类型当属东营组 $SQ_8$ 烃源岩，主要为Ⅲ型。

(b) 干酪根元素组成特征

西部凹陷各层序烃源岩干酪根元素组成见图 4.7。沙四段 $SQ_2$ 的 H/C 原子比较高，一般>1.2，O/C 原子比<0.2，有机质类型主要为Ⅰ型和Ⅱ$_1$型；$SQ_1$ 的有机质类型与 $SQ_2$ 相似，但有少部分样品 H/C 原子比较低，有机质类型以Ⅱ$_1$型为主。沙三段 H/C 原子比分布在 0.9～1.2，有机质类型主要为Ⅱ$_1$和Ⅱ$_2$型。从层序上看，$SQ_5$ 主要为Ⅱ$_1$型，$SQ_4$ 类型较复杂，多种类型共存，从Ⅰ-Ⅱ$_2$型均有分布；$SQ_3$ 类型稍差，部分为Ⅲ型。沙一、二段中 $SQ_7$ 的有机质类型较好，主要为Ⅱ$_1$型；而 $SQ_6$ 数据较散，有机质类型多样，其有机质类型与 $SQ_4$ 相似，从Ⅰ-Ⅱ$_2$类型均有分布；东营组 $SQ_8$ 类型普遍较差，多为Ⅲ型。

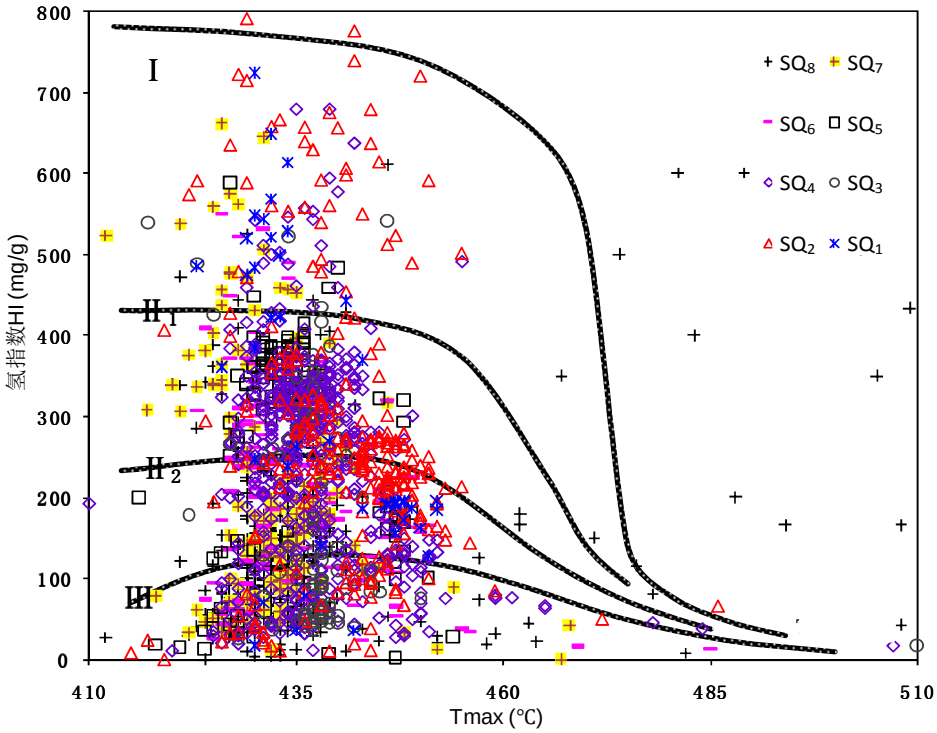



图 4.6 西部凹陷各层序烃源岩热解有机质类型图[219]

**Fig. 4.6 Organic matter types based on Rock-Eval data (in terms of sequences)**

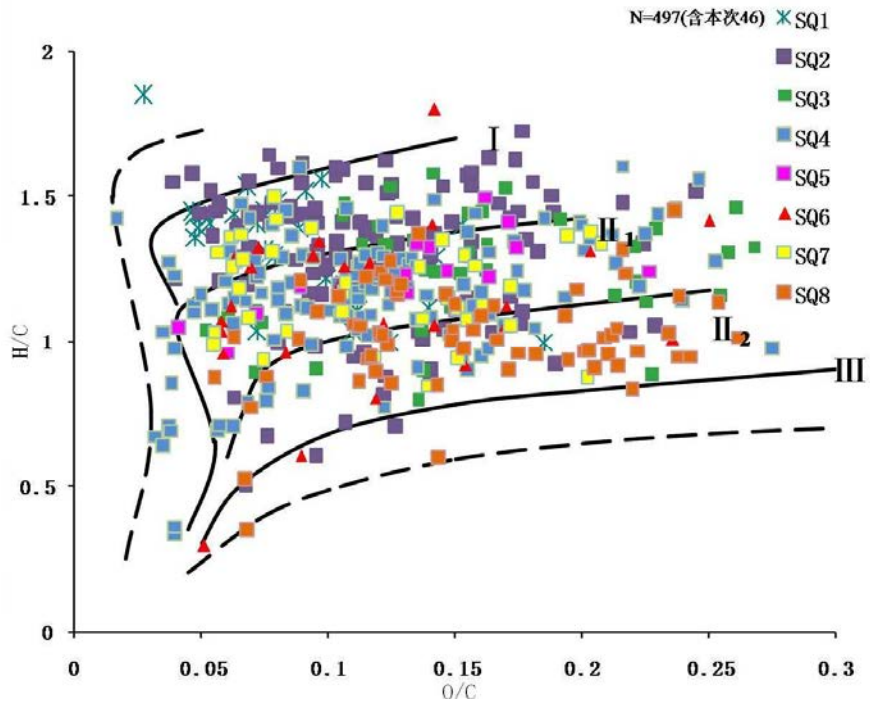



图 4.7 西部凹陷各层序烃源岩干酪根 O/C 与 H/C 关系图[34]

**Fig. 4.7 Kerogen classification based on the elemental composition (in terms of sequences)**

(c) 显微组分组成特征

采用了全岩光片分析鉴定和干酪根显微组分分析相结合的方法，从显微组分的形态、光学性质和组成角度研究有机质的性质，与有机地球化学方法相互补充，进行生烃母质的恢复及烃源岩生烃潜力的评价。

显微组分观察和定量统计表明，中生界烃源岩中镜质组较多（附录 C 图版Ⅰ$_{1\sim3}$），腐泥组很少，多为III型有机质。沙四段 $SQ_1$ 和 $SQ_2$ 烃源岩显微组分主要以腐泥组为主，岩石具有清晰的纹层结构，荧光下可见基质为矿物沥青基质，藻类物质充分降解形成的富有机质“暗层”与矿物沥青基质“亮层”交替出现。在顺层切面上可见藻类体呈团块状（附录 C 图版Ⅰ$_{4\sim8}$，Ⅱ$_1$）；镜质组含量低于 10%～20%，少部分样品以壳质组为主，可见大量高等植物花粉散布于矿物沥青基质之中，含量达 60%以上（附录 C 图版Ⅰ$_6$）。沙三段 $SQ_3$ 镜质组含量很低，多低于 20%（图版Ⅱ$_{2\sim7}$）；$SQ_5$ 以腐泥组为主，少部分镜质组含量较高；$SQ_4$ 中富藻类体岩石类型与其它类型岩石交替出现。沙一、二段 $SQ_6$ 和 $SQ_7$ 的显微组分组成变化较大（附录 C 图版Ⅱ8，III$_{1\sim2}$）。东营组 $SQ_8$ 壳质组含量非常低，一般少于 10%，而镜质组含量较高（附录 C 图版III$_{3\sim5}$）。

根据西部凹陷 700 余个干酪根显微组分组成分析样品的统计结果（图 4.8，表 4.5），沙四段 $SQ_1$ 和 $SQ_2$ 的类型指数为 27～84，属Ⅰ-Ⅱ$_1$ 型有机质。沙三段 $SQ_3$ 的类型指数-35～51，为Ⅱ$_2$ 型为主的有机质；$SQ_4$ 的组成较复杂，在图 4.8 中有数个聚落，各种有机质类型岩石的比例相当；$SQ_5$ 以腐泥组分为主，少部分样品的镜质组含量较高，干酪根类型指数-18～72，以Ⅱ$_1$ 型有机质为主。沙一、二段 $SQ_6$ 和 $SQ_7$ 干酪根类型指数均值分别为 44 和 47，主要属Ⅱ$_1$-Ⅱ$_2$ 型有机质。东营组 $SQ_8$ 的干酪根类型指数仅为-10，属典型III型有机质。

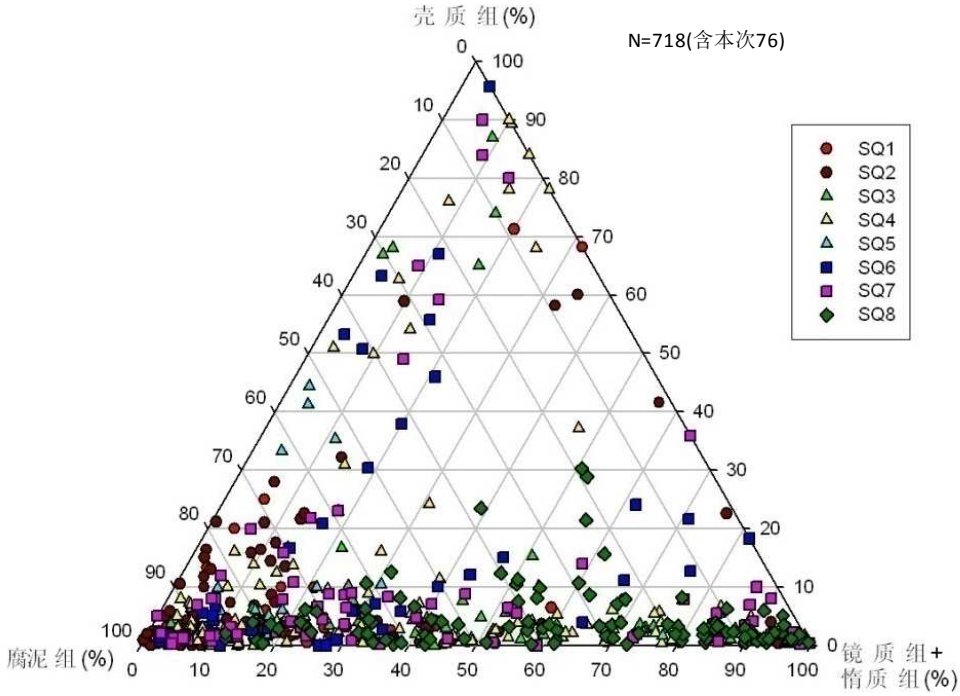



图 4.8 西部凹陷各层序烃源岩干酪根显微组分三角图

**Fig. 4.8 Kerogen maceral ternary plot of the Western Depression (in terms of sequences)**

西部凹陷五类不同岩性的烃源岩的有机质类型多为$\text{II}_1$型和$\text{II}_2$型（图 4.9），其中 A 类烃源岩有机质类型最好，主要是Ⅰ型；B 类烃源岩稍差，主要为$\text{II}_1$型，C 类烃源岩有机质类型变化较大，从Ⅰ型到$\text{II}_2$型均有分布，主要以$\text{II}_1$和$\text{II}_2$型为主；D 类烃源岩类型与 C 类烃源岩相似，反映了西部凹陷烃源岩颜色的深浅只是受有机质丰度的影响，而与有机质类型无直接关系；E 类烃源岩类型为$\text{II}_1$和$\text{II}_2$型。各类型岩石在层序中的比例和分布变化直接决定了各个层序有机质类型的宏观表达。

综合以上各种参数指标对有机质类型的分析，从各层序来看，以沙四段 $SQ_2$ 有机质类型最好，主要为Ⅰ型；其次为 $SQ_1$、$SQ_7$ 和 $SQ_5$，以$\text{II}_1$型有机质为主；再次为 $SQ_4$、$SQ_6$ 和 $SQ_3$，主要为$\text{II}_2$型有机质；最差为 $SQ_8$ 和中生界，为III型有机质。从烃源岩岩石类型来看，A 类和 B 类烃源岩有机质类型很好，为Ⅰ-$\text{II}_1$型；其余依次为 C、D 和 E 类，以$\text{II}_1$和$\text{II}_2$型有机质为主，有少部分 C 类烃源岩为Ⅰ型有机质。

表 4.5 西部凹陷干酪根显微组分组成

**Tab. 4.5 Kerogen maceral composition of the Western Depression**

| 层段 | 层序 | 腐泥组% | 壳质组% | 镜质组% | 惰质组% | 类型指数 TI | 类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 东营组 | $SQ_8$ | 36.55/13.25～55.95 | 2.60/1.20～4.50 | 43.13/23.90～62.30 | 7.40/3.10～16.60 | -10.45/-53.50～22.90 | III |
| 沙一、二段 | $SQ_7$ | 64.04/16.2～84.80 | 4.85/1.60～8.80 | 21.00/7.00～53.64 | 2.13/0.65～5.55 | 46.70/-30.10～77.30 | $II_1$ |
| | $SQ_6$ | 61.40/28.90～85.53 | 5.56/1.88～20.90 | 18.20/7.21～52.04 | 2.45/0.39～5.05 | 44.57/-17.75～66.30 | $II_2$ |
| 沙三段 | $SQ_5$ | 68.81/52.50～79.86 | 5.95/4.76～10.09 | 18.10/9.69～27.12 | 1.00/0.35～2.00 | 61.05/-18.55～72.05 | $II_1$ |
| | $SQ_4$ | 66.20/34.5～86.50 | 2.65/1.25～5.95 | 20.70/7.69～43.6 | 2.10/0.70～5.00 | 40.50/-2.70～69.60 | $II_2$ |
| | $SQ_3$ | 45.59/17.00～70.10 | 3.00/1.10～6.20 | 34.95/14.58～61.35 | 4.00/1.00～10.50 | 17.10/-35.40～51.50 | $II_2$ |
| 沙四段 | $SQ_2$ | 82.93/62.50～91.60 | 2.20/1.00～5.00 | 9.795/5.00～30.10 | 1.60/0.70～3.60 | 74.20/27.00～87.30 | I |
| | $SQ_1$ | 80.77/70.00～93.89 | 2.34/1.67～3.77 | 9.70/3.10～19.00 | 2.30/1.00～6.50 | 57.15/21.50～84.00 | $II_1$ |

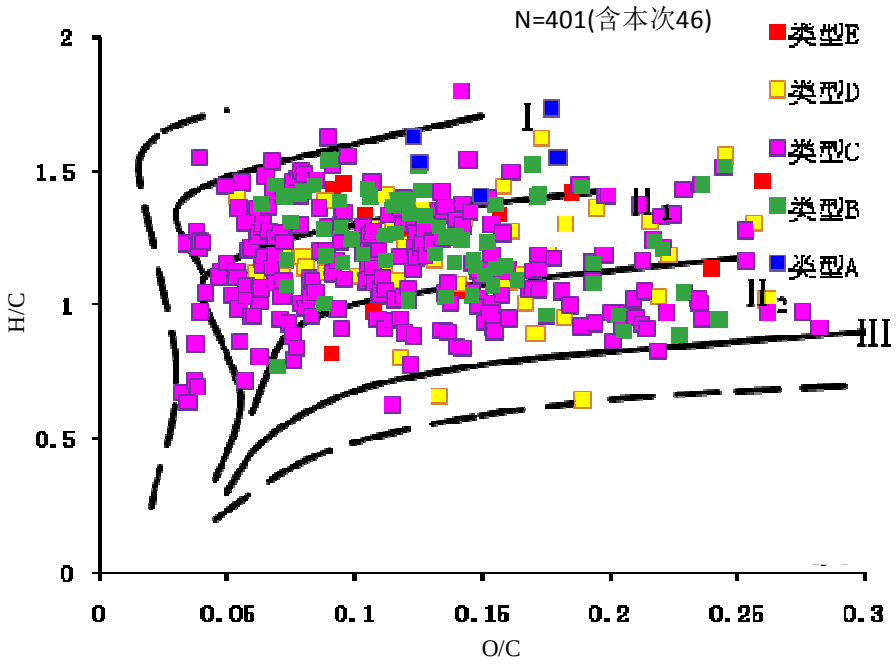



图 4.9 西部凹陷各类烃源岩干酪根 O/C 与 H/C 关系图

**Fig. 4.9 Kerogen classification based on the elemental composition (in terms of lithologic types)**

(2) 干酪根碳同位素组成特征

稳定碳同位素的组成特征反映了有机质的性质(类型)。一般来讲，来源于藻类等低等水生生物的有机质，其干酪根和原油的同位素值较低；而来源于高等陆源植物的有机质，其干酪根及原油的同位素值较高。当母岩来源相同，环境条件和演化程度相似时，在母质干酪根、原油、抽提物及其组分中的同位素值存在以下变化规律：$\delta^{13}C_{饱和烃}<\delta^{13}C_{原油}<\delta^{13}C_{芳烃}<\delta^{13}C_{非烃}<\delta^{13}C_{沥青质}<\delta^{13}C_{干酪根}$。烃源岩的抽提物同位素比相应的原油重，但比原油的沥青质和干酪根要轻。

干酪根在热降解过程中，富重碳同位素的二氧化碳与富轻碳同位素的甲烷同系物同时产生、释放。这种补偿效应，使得干酪根自身的碳同位素变化不大[45]，其数值主要取决于原始生源物质的性质，即与干酪根的类型有关。西部凹陷各层序烃源岩干酪根碳同位素组成与 H/C 原子比的关系见图 4.10，可以看出干酪根碳同位素组成与 H/C 原子比呈现很好的负相关关系，反映该区干酪根同位素组成主要受有机质类型的影响，即干酪根碳同位素越重，有机质类型越差。

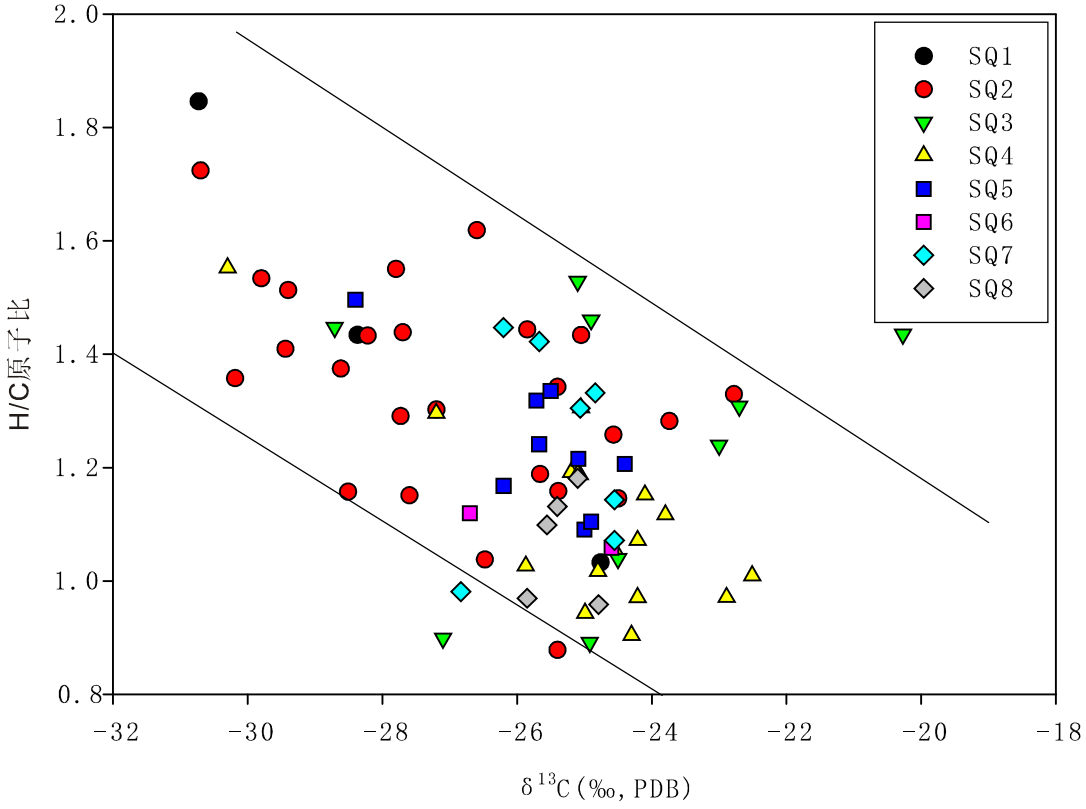



图 4.10 干酪根同位素与 H/C 原子比相关图

**Fig. 4.10 Relationships of carbon isotope vs. H/C atomic ratio for the Western Depression kerogen (in terms of sequences)**

从图 4.11 可见，西部凹陷的深部地层多为菌藻类生源，而浅部地层高等植物输入成分较多：沙四段 $SQ_1$ 和 $SQ_2$ 干酪根碳同位素很轻，多分布在-30.0‰～-28.0‰，其中 $SQ_1$ 碳同位素更轻，H/C 原子比很高，显然是来源于低等水生生物贡献为主的有机质类型，$SQ_2$ 干酪根极高的 H/C 原子比和略偏重的碳同位素组成，Pr/$nC_{17}$ 较低，反映了处于半封闭湖湾环境，以菌藻类贡献为主；沙三段 $SQ_5$ 的碳同位素较轻，中位数在-26.5‰，其它层序 $SQ_3$ 和 $SQ_4$ 碳同位素较重，中位数为-25.0‰；沙一、二段 $SQ_7$ 碳同位素较轻，为-26.5‰，$SQ_6$ 碳同位素更轻，从其离散的分布特征来看，应以藻类生源为主，混有少部分高等植物；东营组碳同位素值更重，反映其生源为藻类和高等植物混合输入，高等植物略占优势。

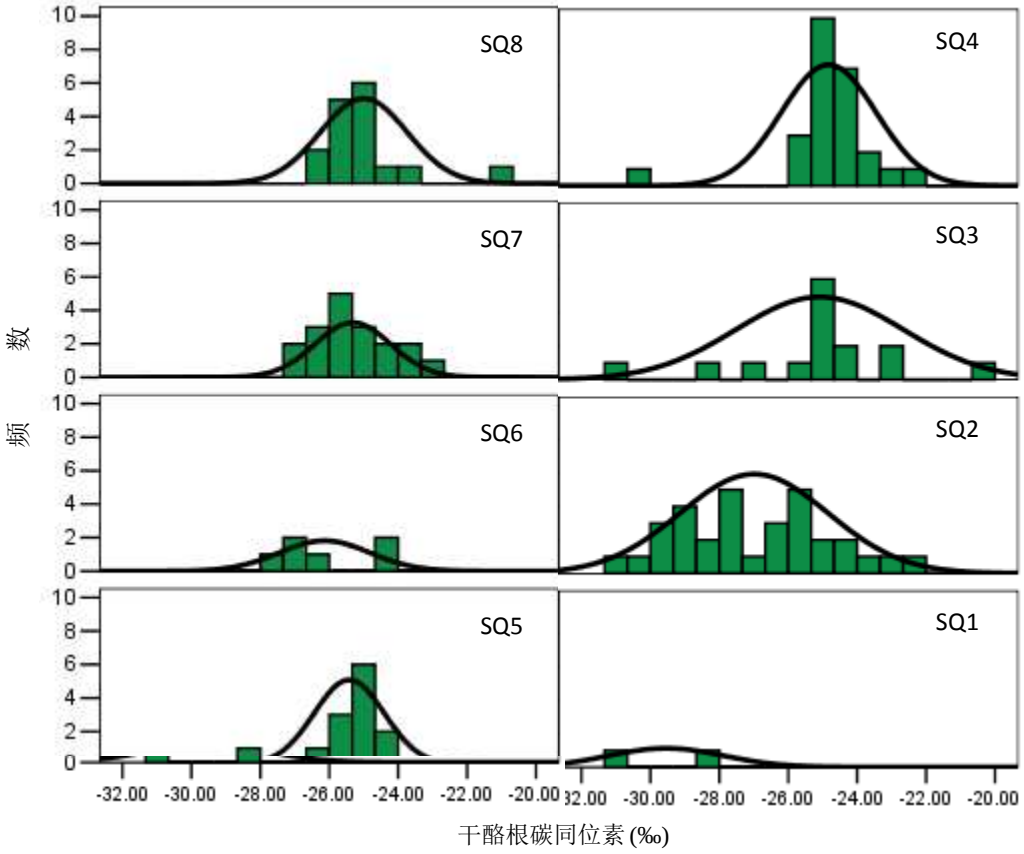



图 4.11 各层序干酪根碳同位素的分布图

**Fig. 4.11 Carbon isotope distribution of the Western Depression (in terms of sequences)**

(3)可溶有机质化学组成与分布特征

①氯仿沥青族组成

本次工作研究从西部凹陷选出具代表性的样品 74 个进行抽提、族组分分离和色谱分析，在此基础上，进一步开展饱和烃色谱/质谱分析 43 个，芳烃色谱/质谱分析 35 个。

此外，从前人 1124 个样品的抽提和族组分数据中挑选出样品层位、产地具有代表性且各项试验测试资料齐全的分析数据 501 个。

据西部凹陷 1124 个源岩样品抽提物族组成统计结果（表 4.6），饱和烃含量分布在 1.66%～83.55%，置信区间在 12.01%～41.16%，中值为 27.12%；芳烃含量在 1.05%～37.00%，置信区间在 7.90%～19.60%，中值 13.56%；非烃+沥青质含量 6.73%～93.89%之间，置信区间为平均为 26.95%～68.70%，中值为 44.92%；饱和烃与芳烃的比值置信区间为 1.04%～3.44%，中值为 2.02%。各层序烃源岩的族组成较相似（图 4.12），即沥青质含量都很低，主要差别在于饱和烃、芳烃和非烃间的差异。从层序上来说，以 $SQ_1$ 和 $SQ_8$ 的饱和烃含量较低，可能与它们被钻揭并分析样品的成熟度较低有关。但总体而言，从 $SQ_2$ 到 $SQ_8$ 烃源岩氯仿沥青”A”族组成有比较明显的变化，即随着层位的变浅，从沙四段、沙三段、沙一、二段到东营组的氯仿沥青“A”中值分别从 0.13%、0.09%、0.08%逐渐减少到 0.03%，总烃从 476.28、417.66、293.61 减少到 108.98。对各层段内部的层序而言，沙四段的 $SQ_2$ 氯仿沥青”A”和总烃含量高于 $SQ_1$，沙三段的 $SQ_5$ 高于 $SQ_4$ 和 $SQ_3$，沙一、二段的 $SQ_7$ 高于 $SQ_6$，东营组 $SQ_8$ 最低。这与前面论述的有机质丰度分布一致，共同反映了该区各层序烃源岩有机质丰度的变化规律。

表 4.6 烃源岩抽提物族组成特征

**Tab. 4.6 Fractionations characteristics of the source rock extracs in the Western Depression**

| 层段 | 层序 | 氯仿沥青“A” (%) | 沥青质(%) | 饱和烃(%) | 芳烃(%) | 非烃(%) | 总烃(mg/g) | 饱/芳 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ed | $SQ_8$ | 0.03/0.01 | 8.8/5.4 | 22.8/14.0 | 13.1/9.4 | 34.9/28.9 | 109.0/45.5 | 1.7/1.1 |
| | | ～0.08 | ～14.3 | ～36.2 | ～16.5 | ～43.5 | ～333.5 | ～2.8 |
| $Es_{1+2}$ | $SQ_7$ | 0.08/0.04 | 6.8/2.8 | 19.8/12.0 | 14.2/11.2 | 46.9/32.7 | 303.6/113.2 | 1.5/1.0 |
| | | ～0.21 | ～10.7 | ～33.4 | ～16.9 | ～58.0 | ～730.2 | ～2.2 |
| | $SQ_6$ | 0.08/0.03 | 6.7/4.4 | 26.2/16.5 | 15.7/12.4 | 43.8/30.4 | 283.6/122.9 | 1.7/1.1 |
| | | ～0.15 | ～9.9 | ～36.4 | ～19.6 | ～54.9 | ～631.1 | ～2.3 |
| $Es_3$ | $SQ_5$ | 0.09/0.03 | 7.8/4.7 | 28.2/20.8 | 15.3/12.1 | 32.7/24.6 | 439.1/127.9 | 2.3/1.4 |
| | | ～0.212 | ～12.1 | ～40.9 | ～18.6 | ～46.7 | ～823.9 | ～2.8 |
| | $SQ_4$ | 0.09/0.02 | 7.1/3.4 | 30.9/19.2 | 15.5/11.0 | 35.9/26.3 | 409.5/111.5 | 1.9/1.4 |
| | | ～0.19 | ～12.0 | ～40.1 | ～18.9 | ～47.6 | ～829.0 | ～2.9 |
| | $SQ_3$ | 0.10/0.05 | 7.2/3.8 | 25.5/15.5 | 13.0/9.6 | 40.3/31.1 | 404.4/146.3 | 2.0/1.4 |
| | | ～0.18 | ～12.8 | ～37.2 | ～16.2 | ～50.9 | ～802.4 | ～3.3 |
| $Es_4$ | $SQ_2$ | 0.15/0.07 | 4.1/2.2 | 27.6/18.4 | 12.4/8.8 | 39.2/30.7 | 538.0/240.5 | 2.2/1.5 |
| | | ～0.32 | ～8.2 | ～37.9 | ～16.3 | ～55.6 | ～1274.6 | ～3.3 |
| | $SQ_1$ | 0.11/0.04 | 4.8/3.3 | 31.4/19.3 | 10.7/7.9 | 32.4/23.6 | 414.6/160.0 | 2.9/2.3 |
| | | ～0.21 | ～9.8 | ～41.2 | ～13.5 | ～37.4 | ～947.5 | ～3.4 |

注：中位数/95%置信区间

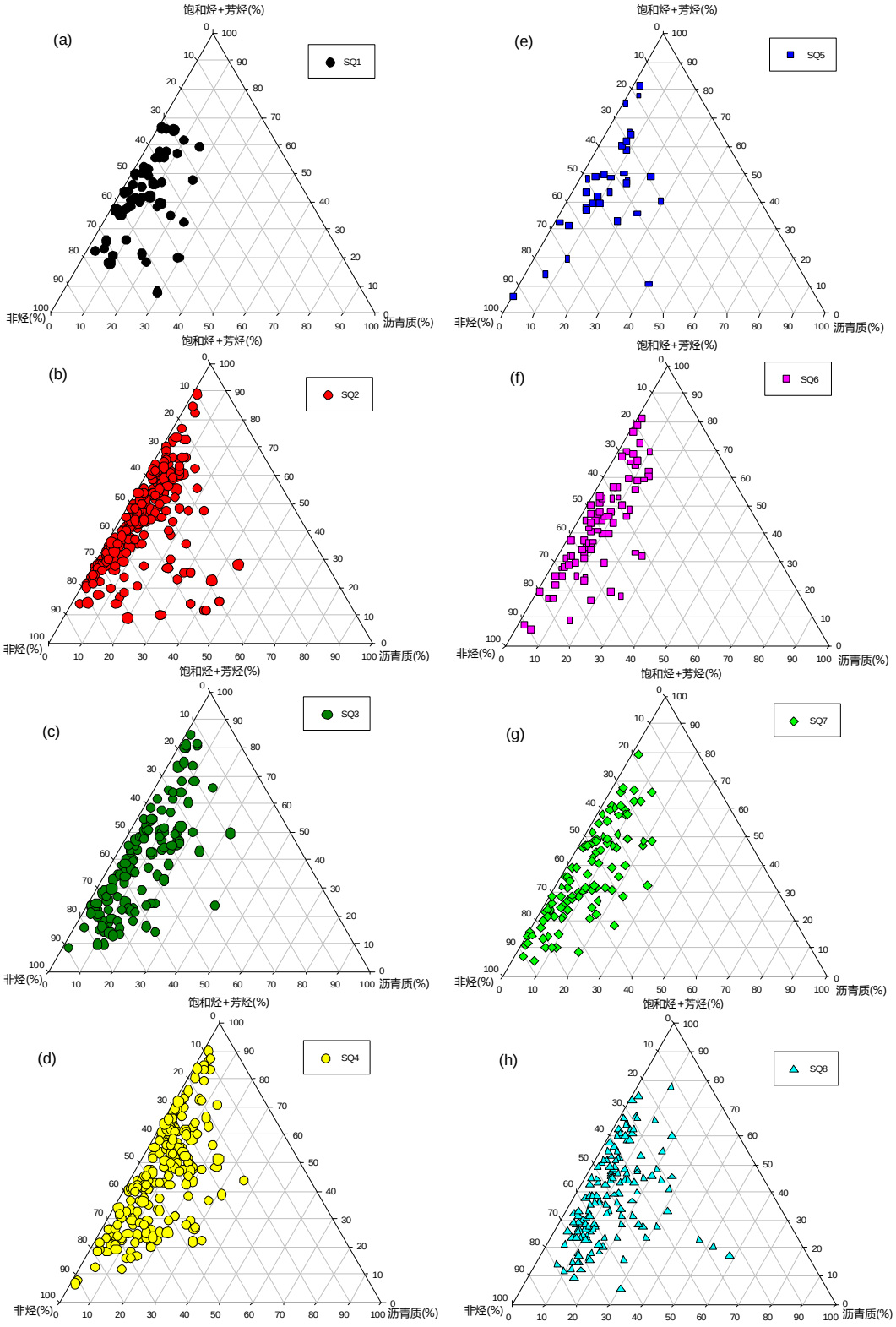


图 4.12 西部凹陷各层序烃源岩抽提物族组分三角图（N=1124）

**Fig. 4.12 Fractionations ternary plots of the source rock extracts in terms of sequences**

②饱和烃色谱特征

由表 4.7 可见，在西部凹陷烃源岩中，正构烷烃系列碳数分布范围一般在 $C_{10}$～$C_{35}$之间；色谱分布的峰型主要是前峰型和双峰型，后峰型非常少见（图 4.13）；主峰碳多为 $nC_{23}$，只有 $SQ_5$ 样品的主峰碳偏前，为 $nC_{17}$，$SQ_8$ 的主峰碳偏后，为 $nC_{27}$；$C_{21-}/C_{22+}$ 置信区间多在 0.33～1.13。烃源岩的 CPI 和 OEP 多大于 1，且 CPI 和 OEP 的变化主要与分析样品来自的构造部位有关，$SQ_5$ 和 $SQ_6$ 样品较多地来自凹陷中心附近，所以 CPI、OEP 值最低。Pr/Ph 比值的分布明显呈两段式，$SQ_1$-$SQ_3$ 等下部层序 Pr/Ph 均小于 1，$SQ_4$-$SQ_8$ 的 Pr/Ph 大于 1，尤以 $SQ_8$ 的 Pr/Ph 最高，平均达 1.46，反映出烃源岩沉积环境和有机质生源输入自下而上由强还原、低等生物生源为主逐渐向弱还原和高等植物生源输入增加的转变。

表 4.7 各层序烃源岩饱和烃色谱参数特征

**Tab. 4.7 Chromatographic parameters of source rock extracts (in terms of sequences)**

| 层段 | | MAX-PEAK | $C_{21}^-/C_{22}^+$ | $C_{(21+22)}/C_{(28+29)}$ | Pr/Ph | Pr/$nC_{17}$ | Ph/$nC_{18}$ | CPI | OEP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ed | $SQ_8$ | 27/19 ～29 | 0.44/0.33 ～0.9 | 0.86/0.64 ～1.34 | 1.46/1.03 ～2.14 | 1.76/0.87 ～2.91 | 0.79/0.65 ～1.28 | 1.96/1.58 ～2.33 | 1.91/1.34 ～2.42 |
| $Es_{1+2}$ | $SQ_7$ | 23/22 ～27 | 0.69/0.42 ～0.8 | 1.47/0.74 ～1.87 | 1.35/0.67 ～2.16 | 1.53/0.83 ～2.16 | 1.00/0.58 ～1.92 | 1.59/1.30 ～2.16 | 1.57/1.22 ～2.24 |
| | $SQ_6$ | 23/19 ～23 | 0.69/0.56 ～1.13 | 1.69/1.32 ～2.68 | 1.30/0.66 ～2.10 | 1.01/0.71 ～1.61 | 0.67/0.51 ～1.18 | 1.33/1.17 ～1.51 | 1.20/1.12 ～1.26 |
| $Es_3$ | $SQ_5$ | 19/17 ～24 | 0.98/0.63 ～2.54 | 1.27/0.86 ～2.29 | 1.19/0.85 ～1.64 | 1.02/0.86 ～1.48 | 0.92/0.61 ～2.28 | 1.50/1.20 ～1.88 | 1.11/0.95 ～1.19 |
| | $SQ_4$ | 23/19 ～29 | 0.68/0.48 ～1.01 | 1.32/0.90 ～2.54 | 1.14/0.67 ～1.52 | 1.23/0.64 ～2.27 | 1.26/0.65 ～2.71 | 1.57/1.25 ～2.55 | 1.50/1.11 ～2.83 |
| | $SQ_3$ | 23/17 ～27 | 0.54/0.35 ～0.98 | 1.08/0.53 ～1.81 | 0.82/0.41 ～1.28 | 1.07/0.71 ～1.62 | 1.86/0.86 ～4.95 | 1.63/1.28 ～2.14 | 1.43/1.13 ～2.41 |
| $Es_4$ | $SQ_2$ | 23/17 ～27 | 0.55/0.35 ～0.92 | 1.03/0.70 ～1.98 | 0.73/0.36 ～1.11 | 1.08/0.58 ～1.59 | 2.16/0.96 ～4.55 | 1.50/1.19 ～2.36 | 1.35/1.13 ～2.76 |
| | $SQ_1$ | 23/23 ～27 | 0.57/0.43 ～0.85 | 1.09/0.82 ～2.02 | 0.81/0.63 ～0.98 | 1.53/1.02 ～2.05 | 2.64/1.80 ～4.37 | 1.69/1.46 ～2.07 | 1.92/1.46 ～2.42 |

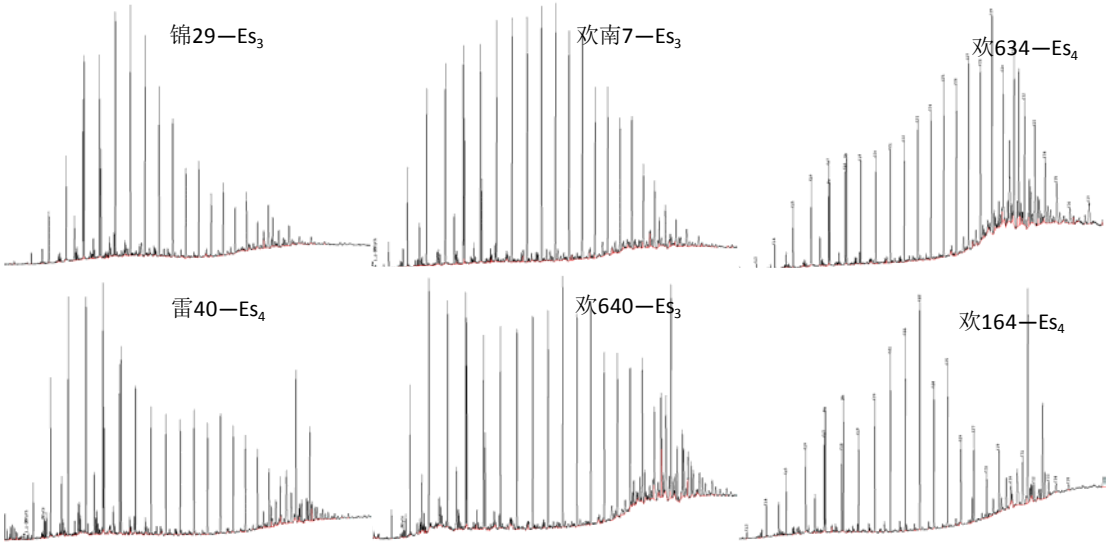



图 4.13 西部凹陷烃源岩饱和烃色谱图

**Fig. 4.13 Aliphatic chromatograms of the source rock extracts in the Western Depression**

正如前面所指出的，OEP 的变化反映了样品成熟度的变化，而 Pr/Ph 反映了沉积环境和生源的变化。根据烃源岩 Pr/Ph-OEP 关系图，并结合层序分布特征将西部凹陷烃源岩分成了五个区域（图 4.14），沙四段 $SQ_1$ 烃源岩主要分布在②区，Pr/Ph 一般小于 1，OEP 在 1.5 以上，具有奇偶优势，反映其为还原环境形成的成熟度较低的烃源岩；$SQ_2$ 主要分布在①②区，Pr/Ph 一般小于 1，反映其为还原环境的烃源岩，成熟度有高有低。沙三段 $SQ_3$ 主要分布在②区，为还原环境下成熟度稍低的烃源岩；$SQ_4$ 分布范围较广①②③区均有分布，反映其既有还原环境形成的成熟烃源岩，又有弱还原环境形成的成熟度稍低的烃源岩；$SQ_5$ 主要分布在①区，为还原环境形成的成熟度较高的烃源岩。沙一、二段 $SQ_6$ 烃源岩主要分布在①⑤区，反映其为还原-弱还原环境形成的成熟烃源岩；$SQ_7$ 主要分布在①②区，为还原环境下的成熟-成熟度较低的烃源岩。东营组 $SQ_8$ 主要分布在④区，为弱还原环境形成的成熟度较低烃源岩。

由此可见，西部凹陷烃源岩抽提物饱和烃色谱反映由深部向浅部，从 $SQ_1$、$SQ_2$、$SQ_3$→$SQ_4$→$SQ_5$→$SQ_6$→$SQ_7$→$SQ_8$ 的顺序，沉积环境由强还原→还原-弱还原→还原→还原-偏氧化→还原→偏氧化呈旋回性变化，总体而言，下部层序烃源岩形成于较强还原的沉积环境，而上部层序为偏氧化环境。在较强还原条件下形成烃源岩具有有机质母质类型较好，以低等水生生物生源为主，兼有少量陆生高等植物生源双重输入的特征。已分析的样品中，$SQ_5$ 和 $SQ_6$ 成熟度较高，$SQ_2$、$SQ_3$、$SQ_4$、$SQ_7$ 既有成熟度较高烃源岩，又有成熟度稍低的烃源岩，已分析的 $SQ_1$ 和 $SQ_8$ 烃源岩样品成熟度都较低。

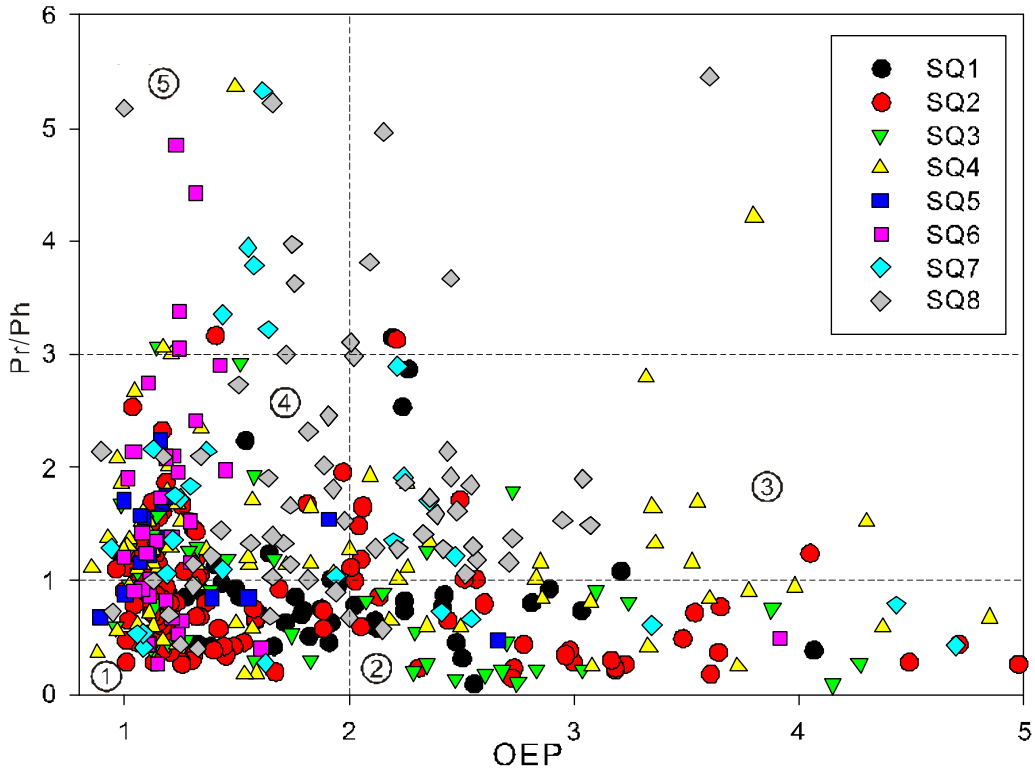



图 4.14 西部凹陷各层序烃源岩饱和烃 Pr/Ph 与 OEP 相关图

**Fig. 4.14 Relationships of Pr/Ph vs. OEP for the source rocks of the Western Depression (in terms of sequences)**

③生物标志物组成特征

生物标志物或生物标记物定义为分子化石，其含义是这些化合物最初来自生物体。生物标记化合物是由碳、氢和其它元素组成的复杂的有机化合物。它们存在于岩石和沉积物中，与生物体的母体有机分子的结构差别很小或者根本没有差别。不同类型有机质（海洋或湖泊藻类、细菌和高等植物）、不同沉积环境（海相或湖相、淡水或咸水）、不同热演化程度（图 4.15）都有着不同的生物标志物组合。西部凹陷各层序生物标志物参数分布列于表 4.8。

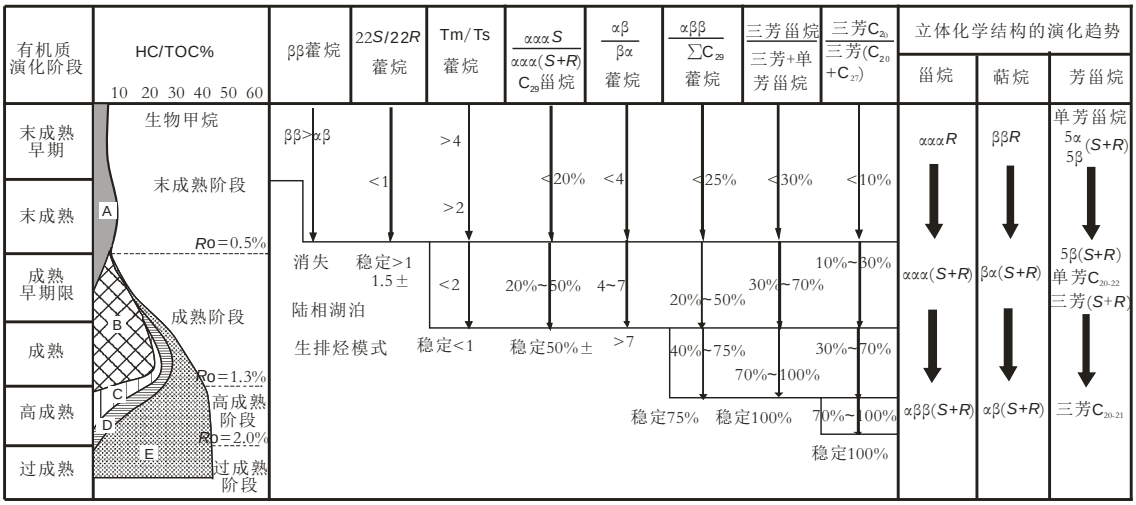



图 4.15 不同热演化程度生物标志化合物的适用范围（秦建中, 2005[199]）

**Fig. 4.15 Predict range by biomarker parameters**

表 4.8 各层序烃源岩饱和烃甾萜类生物标志物参数特征表

**Tab. 4.8 Biomarkers distribution of the source rocks in the Western Depression (in terms of Formations)**

| 参数 \ 层序 | $SQ_1$ | $SQ_2$ | $SQ_3$ | $SQ_4$ | $SQ_5$ | $SQ_6$ | $SQ_7$ | $SQ_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 伽马蜡烷指数 | 0.14 | 0.25 | 0.21 | 0.10 | 0.12 | 0.10 | 0.15 | 0.11 |
| ααα$C_{29}$ 甾烷 20*S*/(20*S*+20*R*) | 0.15 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.19 | 0.40 | 0.05 | 0.23 |
| $C_{29}$ 甾烷 ββ/ (αα+ββ) | 0.25 | 0.3 | 0.28 | 0.32 | 0.26 | 0.23 | 0.27 | 0.26 |
| Tm/Ts | 1.98 | 1.64 | 1.77 | 0.94 | 1.79 | 4.63 | 3.64 | 2.49 |
| $C_{31}$ 藿烷 22*S*/(22*S*+22*R*) | 0.54 | 0.59 | 0.55 | 0.56 | 0.53 | 0.58 | 0.44 | 0.47 |
| (藿烷+莫烷) $C_{29}/C_{30}$ | 0.31 | 0.24 | 0.31 | 0.40 | 0.32 | 1.10 | 0.16 | 0.46 |
| $C_{29}$ 藿烷/莫烷 | 3.61 | 4.57 | 5.62 | 5.00 | 5.15 | 3.27 | 1.54 | 5.90 |
| ααα20*R* 甾烷 $C_{27}/C_{29}$ | 0.84 | 0.49 | 0.62 | 0.99 | 0.93 | 0.59 | 1.31 | 0.30 |
| 三环萜烷/藿烷 | 0.05 | 0.3 | 0.38 | 0.48 | 0.09 | 0.33 | 0.12 | 0.13 |
| 规则甾烷/藿烷 | 0.72 | 0.43 | 0.88 | 0.39 | 0.72 | 0.18 | 1.73 | 0.81 |
| (孕甾烷＋升孕甾烷)/ααα20*R*$C_{29}$ 甾烷 | 1.85 | 0.29 | 0.13 | 0.31 | 0.05 | -- | -- | 0.08 |

注：平均值（去掉最大值和最小值）

1）甾类化合物

西部凹陷烃源岩样品中检测出的甾烷系列化合物以规则甾烷为主，含有一定量的重排甾烷。从该区规则甾烷分布指纹曲线来看，其规则甾烷的分布有 3 种不同的形态（图

4.16，附图 B.9）：(A)不对称“V”型($C_{27}$, $C_{28}$<$C_{29}$)；(B)近直线型($C_{27}$>$C_{28}$>$C_{29}$)；(C)“L”型($C_{27}$>$C_{28}$≈$C_{29}$)；(D)反“L”形($C_{27}$≈C28<C29)。由表 4.7，图 4.16 来看，西部凹陷烃源岩抽提物中甾烷组成 ααα20R $C_{27}/C_{29}$ 比值总体大于 0.5，只有 $SQ_8$ 最低，平均值仅为 0.30，分布在Ⅲ区（图 4.16），呈直线形和反“L”形分布；沙一、二段的 $SQ_7$ 最高，达到 1.31，分布在Ⅰ区（图 4.16），呈“L”型分布，指示生源主要为水生浮游生物的贡献为主，生油母质类型非常好；其次为沙三段的 $SQ_4$、$SQ_5$ 和沙四段的 $SQ_1$，其 ααα20*R*$C_{27}/C_{29}$ 比值为 0.96～0.99，分布在Ⅰ区（图 4.16），呈“V”型，孕甾烷含量也较高，反映其生源为藻类为主、混有少部分高等植物的双重生源的性质，生油母质类型较好；再次为沙三段的 $SQ_3$ 和沙一、二段的 $SQ_6$，呈不对称“V”型分布，孕甾烷含量很低；沙四段的 $SQ_2$ 主要分布在Ⅱ区（图 4.16），ααα20*R*$C_{29}$ 占优势，但考虑到沙四段 $SQ_2$ 沉积时期为咸化强还原环境，且 ααα20*R*$C_{28}$ 明显较其它层序高，而且莫烷和孕甾烷含量又较高，它应是高盐度还原环境菌藻生源输入的反映。此外，在西部凹陷烃源岩中亦检测出的 4α-甲基甾烷，属于 24-乙基构型，主要分布在沙一、二段的 $SQ_7$，较丰富的 4-甲基甾烷可能指示有机质的输入以水生浮游生物为主，其中淡水沟鞭藻的贡献尤为突出[214]。

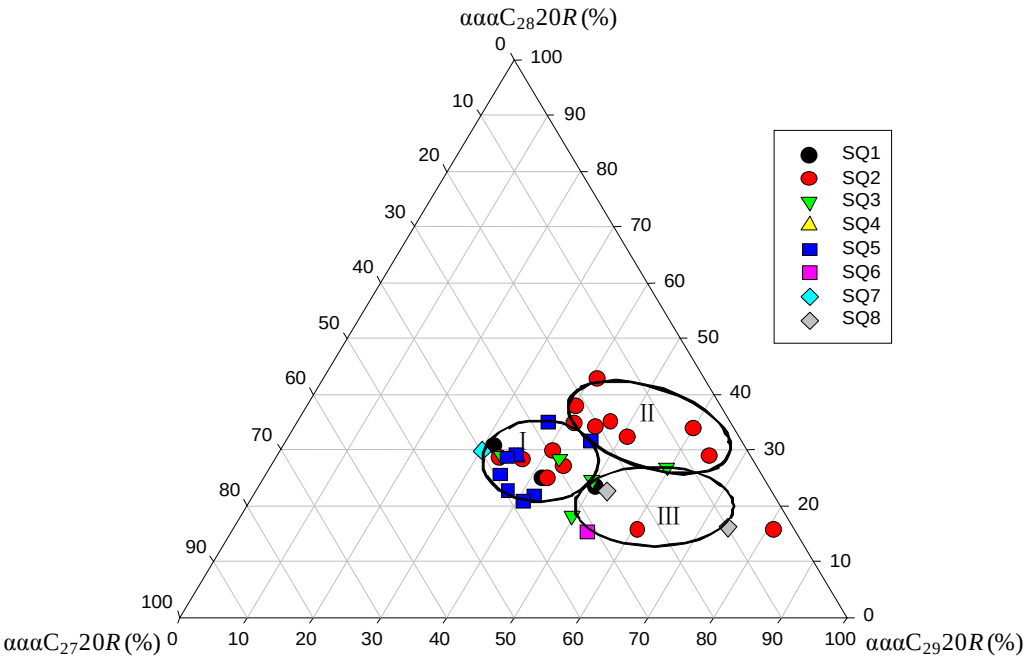



图 4.16 西部凹陷烃源岩规则甾烷组成三角图

**Fig. 4.16 Steranes ternary plot of the source rocks of the Western Depression**

ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)与 *R*o 的相关性分析见图 4.17，两者相关系数达到 0.70 以上，因此 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)可以作为烃源岩成熟度评价的辅助指标。ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)值为 0.3 时对应 *R*o=0.5，即成熟门限。

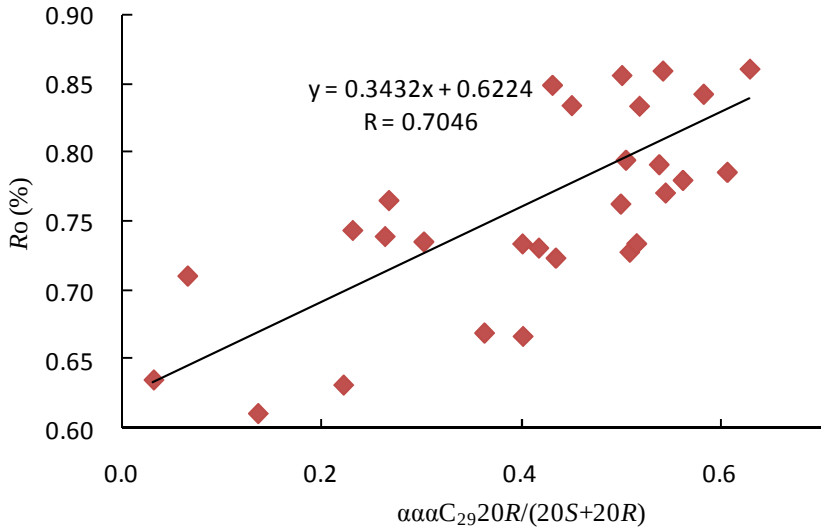



图 4.17　西部凹陷烃源岩生标参数 ααα$C_{29}$ 20*S*/(20*S*+20*R*)与 *R*o 相关图

**Fig. 4.17 Cross plot of ααα$C_{29}$ 20*S*/(20*S*+20*R*) vs. *R*o for the source rocks**

2）萜类化合物

由表 4.7 还可以看到，西部凹陷烃源岩萜类化合物分布具有如下特征：伽玛蜡烷指数以 $SQ_2$ 和 $SQ_3$ 最高，平均值高达 0.25，反映为咸化环境下的烃源岩；其次为 $SQ_1$、$SQ_7$，伽玛蜡烷指数平均为 0.15，反映半咸化沉积环境；其它层序如 $SQ_5$、$SQ_6$ 和 $SQ_8$，伽玛蜡烷平均值约为 0.10，为淡水-微咸水环境的产物。$SQ_1$、$SQ_4$、$SQ_3$、$SQ_6$ 和部分 $SQ_2$ 烃源岩的三环萜烷含量较高，三环萜烷/藿烷比值在 0.3 以上（图 4.18），反映为菌藻类生源；其它各层序三环萜烷含量均较低，其中 $SQ_2$ 的孕甾烷和升孕甾烷含量较高，而 $SQ_5$ 的孕甾烷和升孕甾烷含量较低。莫烷含量在 $SQ_3$ 和 $SQ_8$ 的含量很低，而在 $SQ_1$、$SQ_7$ 中含量很高，其它各层序都比较高。五环三萜中三降藿烷含量大于三降新藿烷含量(Tm>Ts)，体现在 Tm/Ts 值在 1.54～4.99 之间，均大于 1。

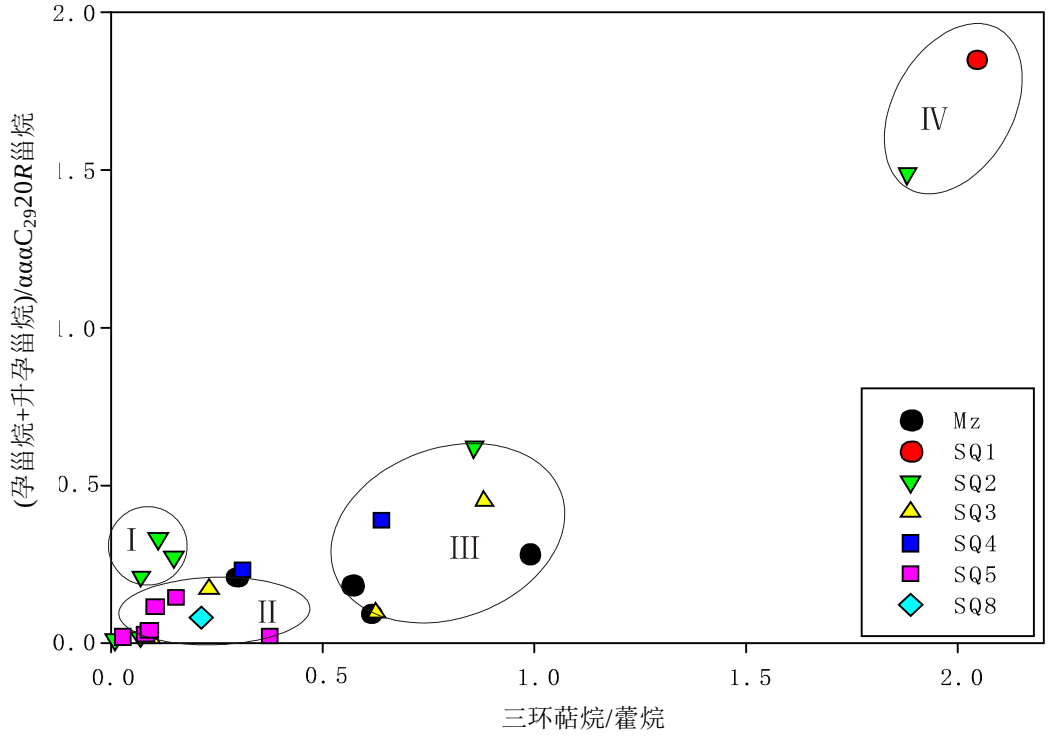



图 4.18 三环萜烷/藿烷与孕甾烷+升孕甾烷/ααα20*R*$C_{29}$ 相关图

**Fig. 4.18 Relationship between tricyclicterpanes/hopanes and ($C_{21}$+$C_{22}$) sterane/ααα20*R*$C_{29}$ sterane**

3）类胡萝卜烷类

在西部凹陷 $SQ_2$、$SQ_3$、$SQ_5$、$SQ_7$ 烃源岩中普遍检测有 β-胡萝卜烷系列化合物（附图 B.9），这类化合物的生物先质类胡萝卜素普遍存在于光合细菌中[68]。强还原环境有利于类胡萝卜素的保存及其向 β-胡萝卜烷的转化。

4）芳烃馏分化合物

a）菲系列化合物

菲系列化合物参数常用于成熟度研究方面。Radke 等[77]提出用甲基菲指数（$MPI_1$, $MPI_2$）作为成熟度参数。西部凹陷烃源岩 $MPI_1$ 与镜质体反射率 *R*o 关系如图 4.19，相关系数可达到 0.78，验证了甲基菲指数作为成熟度参数的适用性。结合附图 B.9 $MPI_1$ 随深度的变化可见，$SQ_6$ 和 $SQ_4$ 烃源岩样品成熟度最高，其次为 $SQ_5$、$SQ_2$、$SQ_3$ 和 $SQ_7$，而 $SQ_1$ 和 $SQ_8$ 的成熟度最低，反映了由于构造部位和钻揭深度差异造成的研究样品的成熟度差别。

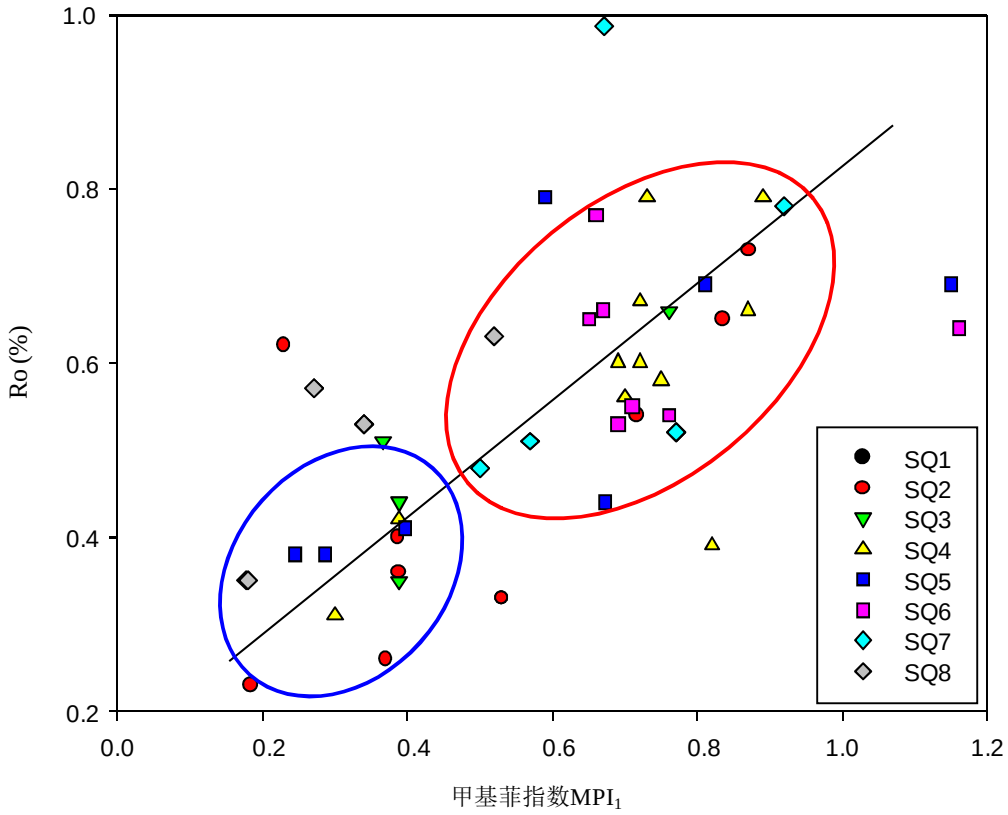



图 4.19　西部凹陷烃源岩甲基菲指数与 *Ro* 相关图

**Fig. 4.19 Cross plot of $MPI_1$ vs. *Ro***

b）三芴系列化合物

二苯并噻吩（硫芴）和烷基二苯并噻吩系列连同芴、二苯并呋喃（氧芴）以及它们的甲基同系物即所谓“三芴系列”。“三芴系列”可能来自相同的先质物，其基本骨架相似，都有一个五元环。这些化合物芳香性较差，易于发生取代反应，弱氧化或弱还原环境中以氧化为特征，氧芴含量较高；在正常环境中，α-碳原子被氢饱和，芴系列含量较为丰富；在强还原环境中，则可被还原成硫芳烃，以硫芴占优势。

从图 4.20 显示出，西部凹陷烃源岩的芴含量一般低于 30%，指示很少处于较深水正常还原环境中，硫芴含量多分布在 30%～60%范围内，集中在三角图中部（Ⅱ、Ⅲ区），属于淡水-微咸水湖相的还原-弱还原环境，沙四段 $SQ_1$ 的三芴分布主要位于Ⅱ区，$SQ_2$ 和沙三段 $SQ_4$、$SQ_5$ 的三芴分布位于Ⅲ区。$SQ_2$ 和 $SQ_3$ 部分样品硫芴含量大于 70%（Ⅰ区），处于咸水-半咸水强还原环境。东营组 $SQ_8$ 样品硫芴含量非常低，小于 30%（Ⅳ区），属于淡水偏氧化环境。

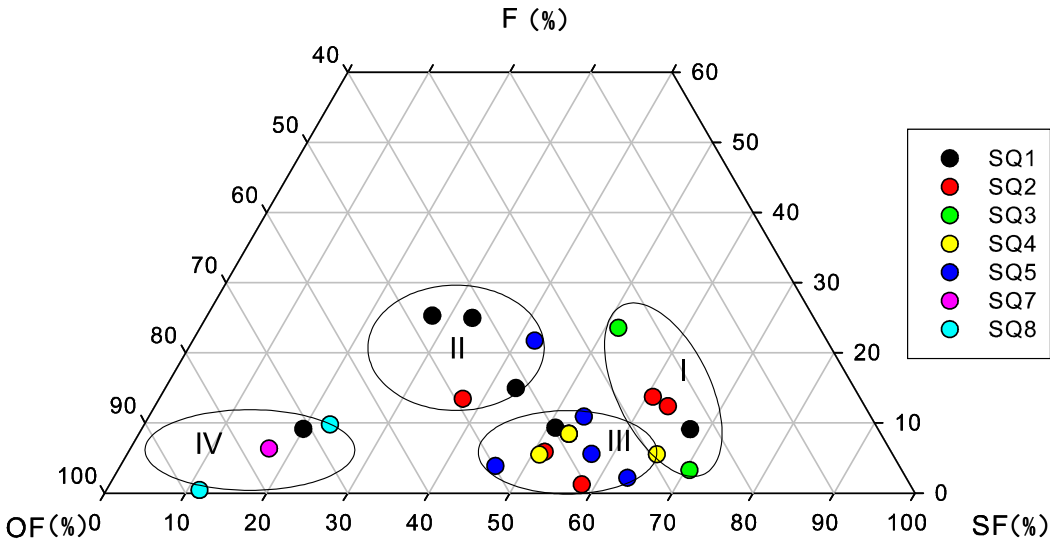



图 4.20 西部凹陷烃源岩三芴系列组成三角图

**Fig. 4.20 Aromatic compounds ternary plot for the source rocks of the Western Depression**

c）脱羟基维生素 E

维生素 E 是一类含氧化合物，主要来源于高等植物，藻类和细菌，在成岩作用早期阶段，由于粘土矿物的催化作用脱羟基转化成脱羟基维生素 E(MTTCs)。在原油和生油岩中发现的 MTTCs 通常有四个，由于维生素 E 稳定性差，极易被氧化，咸化还原环境可能有利于维生素 E 的形成、保存和转化。因此，高含量 MTTCs 的出现，可表征咸化强还原水介质条件的存在。此外，MTTCs 还是有机质演化程度不高的标志，因而常发现于较低成熟度的原油和生油岩中[220]。其热演化规律是随着成熟度的增加而减少，达到一定成熟度后完全消失。其中 β-和 γ-MTTCs 对热成熟度的变化很敏感，对于成熟度不高的样品，β-MTTCs 含量少于 γ-MTTCs，成熟度稍高的样品，β-MTTCs 含量大于 γ-MTTCs，也可以利用 δ-构型 MTTCs 来判断成熟度，一般认为，随着埋深增加，热演化程度加大，δ-MTTCs 逐渐增多。

对于西部凹陷各层序烃源岩来说，脱羟基维生素 E 主要分布在 $SQ_1$、$SQ_2$、$SQ_3$、$SQ_5$、$SQ_7$，指示其为还原环境的低成熟度烃源岩。δ-MTTCs 在各层序中有着非常明显的变化，因此，选取 δ-MTTCs 的含量可以反映水介质咸化的程度。从附图 B.9 可以看出，沙四段 $SQ_2$ 和沙三段 $SQ_3$ 的 δ-MTTCs 的含量较高，反映为半咸-咸化环境的烃源岩。$SQ_1$、$SQ_5$ 和 $SQ_7$ 的 δ-MTTCs 的含量较高，为微咸-半咸化环境的烃源岩，其它各层序为淡水-微咸化环境烃源岩。

d）三芳甾烷化合物

三芳甾烷类在西部凹陷烃源岩中也被普遍检出（附图 B.9）。芳香甾烷来源于类似浮游植物活有机体的甾醇先质物。一般在低成熟样品中丰富，高成熟样品中贫乏。干酪根类型好的样品比类型差的样品更富集芳香甾烷。芳香甾烷的芳构化程度和 C-C 单键的断裂反应均与热演化程度有关，该项参数所反映的不同层序烃源岩的成熟度分布特征与前述 $MPI_1$ 参数吻合。

e）芘和苯并[e]芘化合物

芘来源于陆源高等植物的多种醌色素，在缺氧的还原环境下形成，可以表征有机质的陆源性质。此外芘还是一个成熟度参数，具有在浅层中丰富，深层中消失的演化趋势。但其适用范围是低成熟到中成熟热演化阶段，在生油高峰期或高成熟阶段的样品中无芘。西部凹陷的烃源岩也毫无例外具有这种演化趋势（附图 B.9），体现在芘/苯并[e]芘比值在浅部高达 3.5，随着深度增加，该比值迅速下降，到 3000m 含量甚微，比值仅为 0.1，尔后，芘完全消失了。

综合上述研究，西部凹陷各层序烃源岩的地化特征生物标志物分布和组合具有明显的区别（附表 A.4），它是原始沉积环境、有机母质和演化程度的反映，因此，可以作为区别原油成因和来源的标志。

应该注意到，生物标志物的特征主要取决于原始沉积环境和生源输入，不同层序，甚至同一层序内的烃源岩实际上是沉积环境和生源输入时空变化的综合产物。所以，各层序的烃源岩生物标志物的组成虽然具有一定的规律性，但烃源层判识需要综合反映沉积环境、生源输入和成熟度的多种地球化学特征才能确定。从而为精细油源对比工作奠定坚实的基础。

### 4.3.2　西部凹陷原油地球化学特征及成因类型

在原有辽河西部凹陷地化数据库的基础上，结合勘探进展，先后系统补充采取了原油和油砂样品 133 个，并对其进行一系列实验测试。除采用本次实测的实验数据外，通过对原有分析数据进行比较和甄别，在研究中采用的样品达 631 个，分析化验项目达 1482 项，分析数据涵盖整个西部凹陷的各含油气构造和各套油层。图 4.21 为本次进行分析研究所采用样品的分布情况。

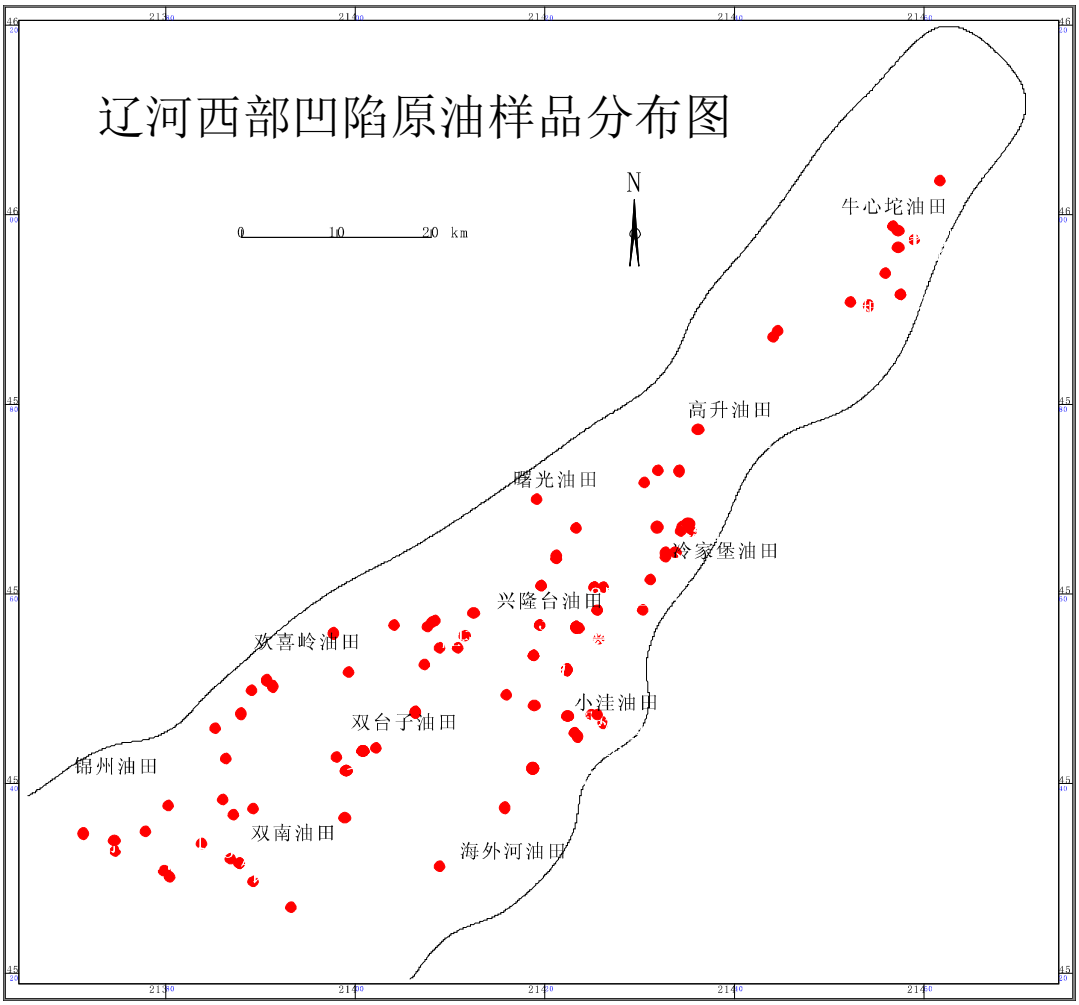



图 4.21 西部凹陷原油样品分布图

**Fig. 4.21 Sample location map and oil fields distribution of the Western Depression**

（1）原油物性及族组成特征

①原油物性

西部凹陷原油物性在垂向层位上表现出一定的差异性，Ng、$Es_{1+2}$ 原油的比重大，胶质沥青质含量高，凝固点低，物性均较差，其中 $Es_{1+2}$ 原油的粘度和含蜡量都很高，物性更差；Ed 和 $Es_3$ 原油比重、粘度、胶质沥青质含量较大，凝固点较低，含蜡量少，物性较好；潜山和 $Es_4$ 原油比重小，胶质沥青质含量低，凝固点高，含蜡量较少，物性总体很好，仅 $Es_4$ 粘度较大，使其物性较潜山差些；整个西部凹陷原油的含硫量普遍较低，$Es_4$ 原油含硫量较高，平均为 0.18%，潜山、$Es_3$ 和 $Es_{1+2}$ 次之（表 4.9）。

表 4.9 西部凹陷原油物性参数统计表

**Tab. 4.9 Physical parameter of the crude oil in the Western Depression**

| 层位 | 比重 (g/cm$^3$) | 粘度 (mPa*s) | 凝固点 (℃) | 含蜡量 (%) | 胶质沥青质 (%) | 含硫量 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ng | 0.94～0.99 | 132.36～201.48 | -13～7 | 4.59～5.44 | 25.66～40.92 | |
| | 0.96/2 | 166.92/2 | -3/2 | 5.02/2 | 33.29/2 | |
| Ed | 0.70～1.00 | 0.017049.96 | -40～49 | 0.77～39.27 | 1.52～59.32 | 0.03～0.22 |
| | 0.86/137 | 546.11/147 | 11.63/145 | 7.04/142 | 22.16/90 | 0.10/7 |
| $Es_{1+2}$ | 0.57～1.04 | 0.85～31596 | -45～50 | 0.02～25.42 | 2.59～39.43 | 0.02～0.65 |
| | 0.90/1390 | 1185.53/1360 | 3.32/1362 | 22.13/323 | 27.99/780 | 0.15/25 |
| $Es_3$ | 0.56～1.01 | 0.01～34301.04 | -72～80.5 | 0.42～64 | 2.75～47.72 | 0～0.66 |
| | 0.87/1322 | 475.04/1285 | 16.72/1272 | 7.57/1257 | 21.91/649 | 0.15/76 |
| $Es_4$ | 0.73～1.04 | 0.32～19206 | -35～67.5 | 1.12～58 | 2.43～48.99 | 0.03～1.21 |
| | 0.87/598 | 608.12/602 | 21.46/612 | 9.50/608 | 22.96/540 | 0.18/60 |
| 潜山 | 0.74～1.02 | 0.75～14543.13 | -21～52 | 1.10～29.71 | 0.66～54.66 | 0.02～1.53 |
| | 0.85/343 | 447.41/336 | 27.47/337 | 12.24/332 | 17.15/290 | 0.16/61 |
| 平均 | 0.56～1.04 | 0.01～3430.04 | -72～80.5 | 0.02～64 | 0.66～59.32 | 0～1.53 |
| | 0.90/3792 | 752.92/3732 | 13.00/3730 | 7.52/2664 | 23.85/2351 | 0.16/228 |

在西部凹陷的边部牛心坨油田、高升油田、冷家堡油田、小洼油田、锦州油田，及欢喜岭油田的部分地区；以及垂向埋深小于 2000m 的地区，原油比重一般大于 0.89g/cm$^3$，胶质和沥青质的含量大于 26%（图 4.22）。而在凹陷的中部兴隆台油田、曙光油田、双台子-双南油田，欢喜岭油田和海外河油田的部分地区；以及垂向埋深一般 2000m 的地区，原油比重一般小于 0.89g/cm$^3$，胶质和沥青质的含量小于 26%，为正常原油（图 4.22）。

总体上，西部凹陷的边浅部原油比重大，胶质和沥青质含量高；而中深部多为常规原油。若将西部凹陷原油的物性数据投到比重-凝固点相关图的图板上（图 4.23），则可以清晰的看出，西部凹陷的原油宏观上多为中质油和稠油。

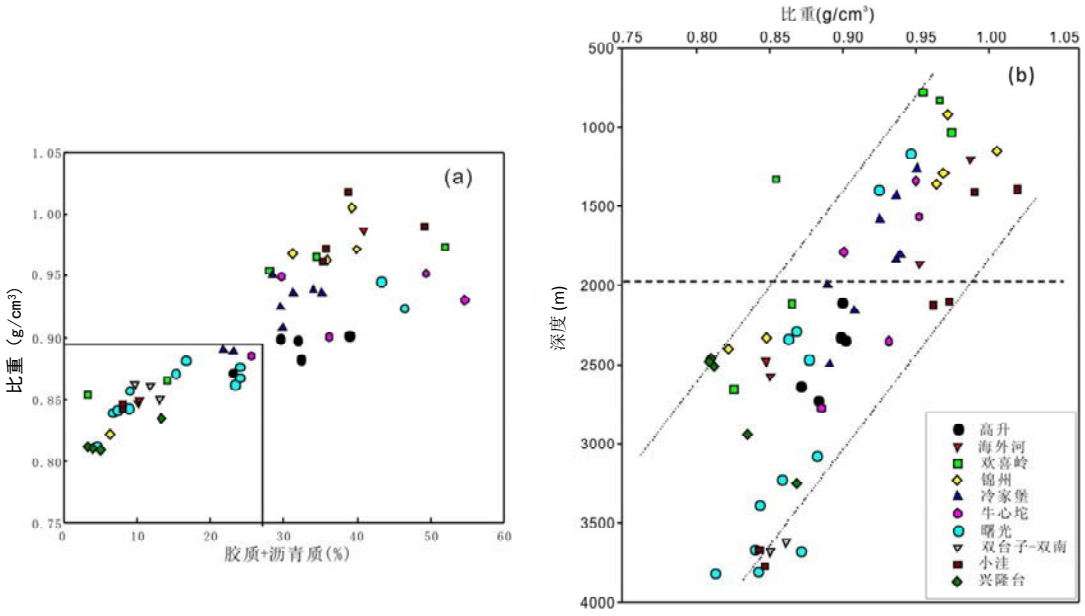



图 4.22 西部凹陷原油比重与胶质、沥青质含量关系图

**Fig. 4.22 Relationships of the physical parameters of the Western Deprssion crude oil**

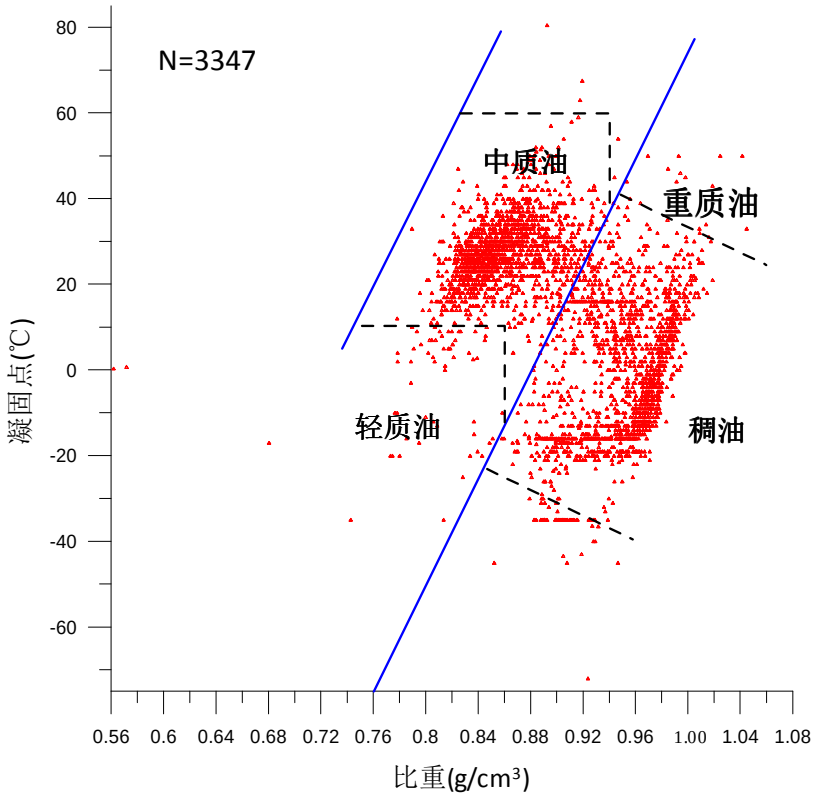



图 4.23 西部凹陷原油比重与凝固点的相关图

**Fig. 4.23 Cross plot of freezing point vs. density for crude oil of the Western Depression**

②原油族组成特征

原油的族组成含量一般受源岩的沉积背景、母质组成及类型、原油的演化程度、原油遭受的后期改造作用等因素的影响，因此，原油的族组成具有丰富的地球化学内涵。在有机质性质相近的前提下，成熟度高的原油具有较高的烃类和较低的极性组分[215]。

根据原油的族组成可明显将西部凹陷的原油分为两大群落（图 4.24）：①第一类原油，饱和烃含量介于 30%和 60%之间，芳烃和非烃、沥青质含量较高，主要分布在兴隆台古潜山、冷家堡油田的沙二段；②第二类原油，饱和烃含量大于 60%，非烃+沥青质含量很低的，其分布具有广泛性，几乎遍布整个西部凹陷，多见于北部高升、牛心坨油田的沙三、四段、中生界；冷东的沙三段、中生界；曙光油田的沙三、四段、潜山；锦州油田的沙一、二段。

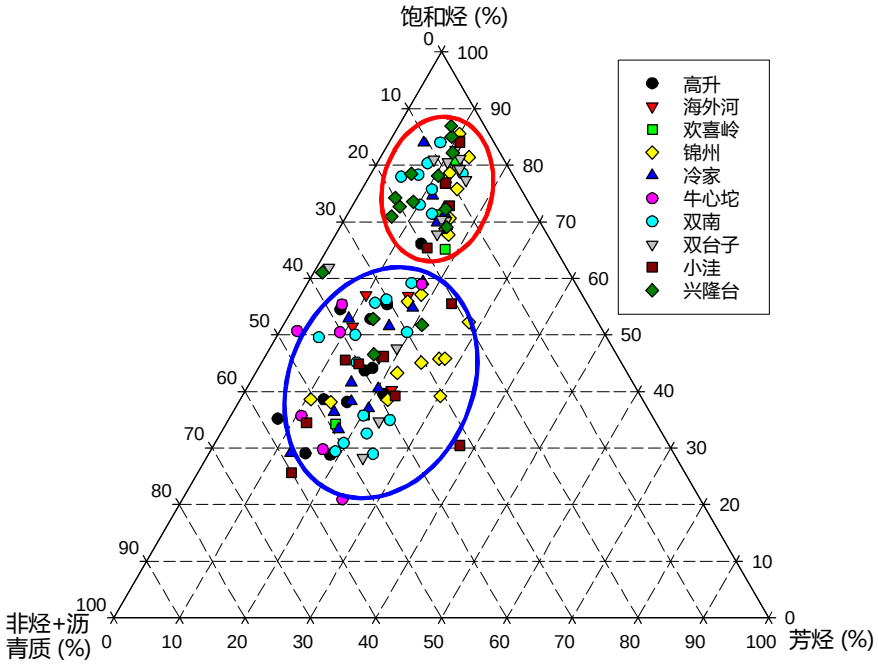



图 4.24 西部凹陷原油族组成特征三角图

**Fig. 4.24 Fractionation ternary plot for the crude oil of the Western Depression**

西部凹陷原油的物性和族组成特征有很好的对应关系（图 4.25，图 4.26），原油的饱和烃含量愈低（10%～50%），非烃+沥青质含量愈高，原油的比重愈大（0.85～1.03g/cm$^3$），对应的主要为重质稠油，分布范围较广，牛心坨、高升、冷家、小洼和锦州地区均有分布；而原油的饱和烃含量愈高（50%～80%），比重愈小（0.76g/cm$^3$～0.92g/cm$^3$），分布较局限，集中在兴隆台、欢喜岭和双台子-双南地区。此外原油的含硫量随比重的升高而呈增加趋势（图 4.26），相对比重 0.80g/cm$^3$～0.85g/cm$^3$ 的轻质原

油，含硫量一般小于 0.3%，主要是潜山和东营组原油；比重 0.90g/cm$^3$ 以上的重质油、稠油，含硫量可达 0.5%，主要分布在沙河街组。

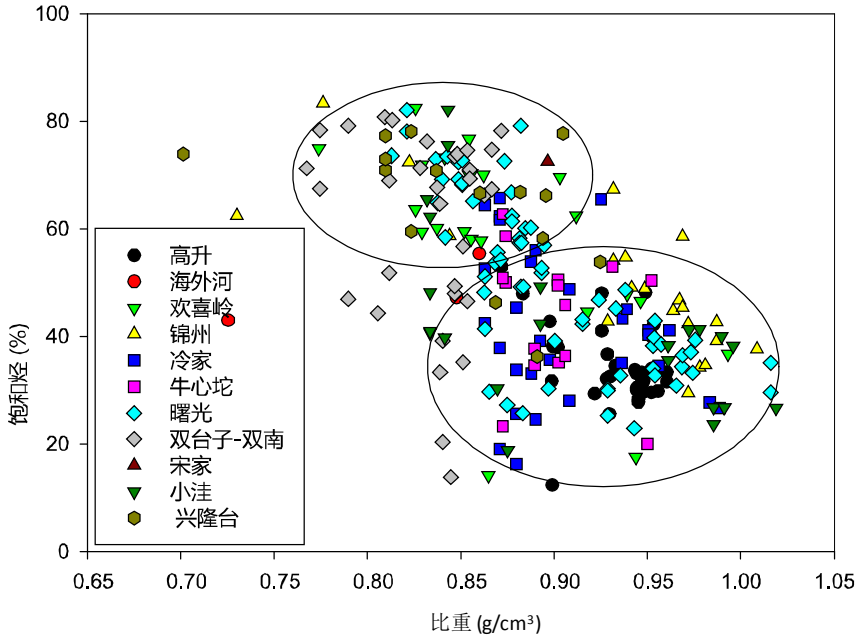



图 4.25 西部凹陷原油比重与饱和烃相关图

**Fig. 4.25 Relationship between aliphatic fractionation and density for the crude oil**

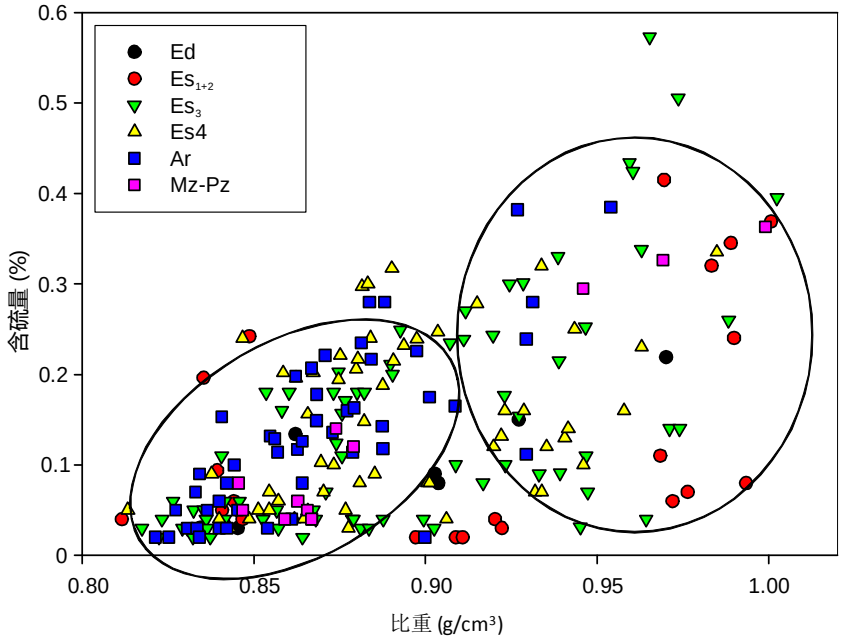



图 4.26 西部凹陷原油含硫量与比重相关图

**Fig. 4.26 Relationship between sulphur content and density for the crude oil**

（2）原油碳同位素组成特征

原油的碳同位素组成取决于原始有机质性质、生成环境和演化程度，不同成因的石油其同位素组成有较大差异，主要表现为腐泥型有机质生成的原油富含轻碳同位素，其 $\delta^{13}C$ 值偏轻，而由腐殖型有机质生成的原油则富含重碳同位素，其 $\delta^{13}C$ 值偏重。成熟度的影响主要表现为由同一烃源岩中的有机质在低演化阶段生成的原油，其碳同位素值偏低，而高演化阶段生成的原油则 $\delta^{13}C$ 值偏高。另外生物降解也会影响碳同位素的分布形式。

①全油碳同位素组成特征

西部凹陷的全油碳同位素组成基本上分布在-30.0‰～-25.0‰之间。从 $\delta^{13}C$ 随层位的变化关系可以清楚的看出碳同位素总体上是随着层位的加深而变轻（图 4.27）。在浅部的东营组、沙一、二段和沙三段的 $\delta^{13}C$ 主要集中在-27.0‰，沙四段和潜山的原油稍低，中值在-27.7‰左右，其中沙四段具有较宽的分布范围；Mz 的原油明显不同于其它各层序轻，其中值非常低，为-28.6‰，反映了中生界原油来源于不同的母质。

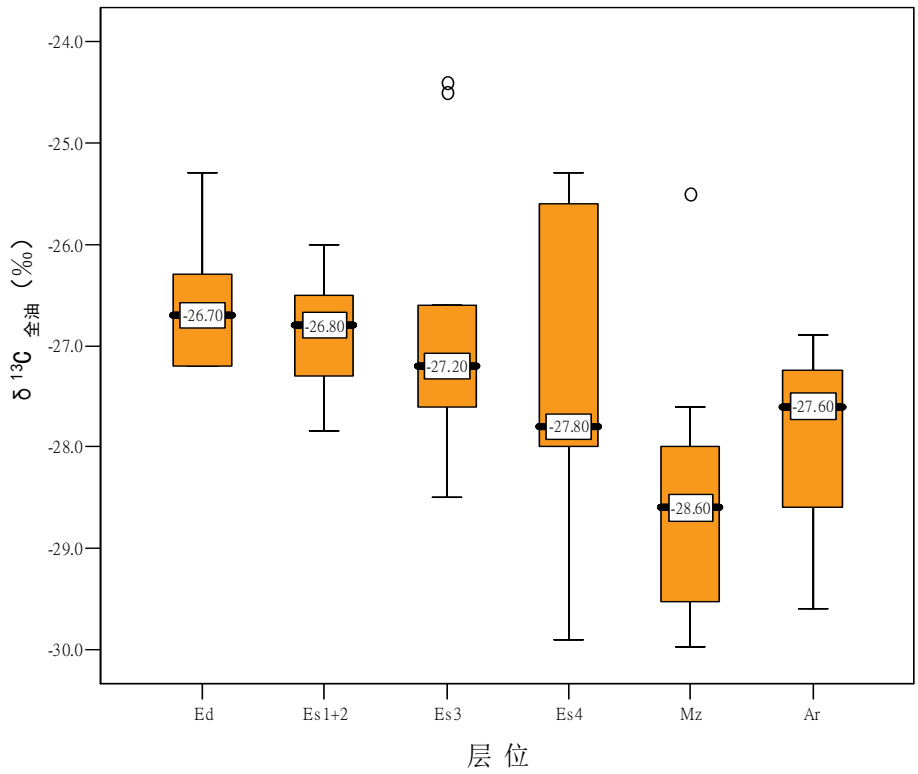



图 4.27 西部凹陷全油碳同位素组成随层位的变化图

**Fig. 4.27 Crude oil carbon isotopes variation in the Western Depression formations**

从全油碳同位素在各油区的分布情况来看（图 4.28），大致有三种不同的分布形式：1）牛心坨原油碳同位素中值为-27.4‰；2）高升和曙光油田原油碳同位素很低，约为-29.0‰；3）冷家和小洼油田为-27.8‰；4）兴隆台、双台子-双南和海外河约为-27.0‰；5）而欢喜岭和锦州的原油碳同位素分布范围较宽，可能与生物降解改造有关。总体上，最北部的牛心坨碳同位素较重，向南高升和曙光油田碳同位变轻，再向南部碳同位素又有变重的趋势，特别是在中部更重，由此推断边部碳同位的变重和分布范围的变宽可能是由于生物降解改造所致。

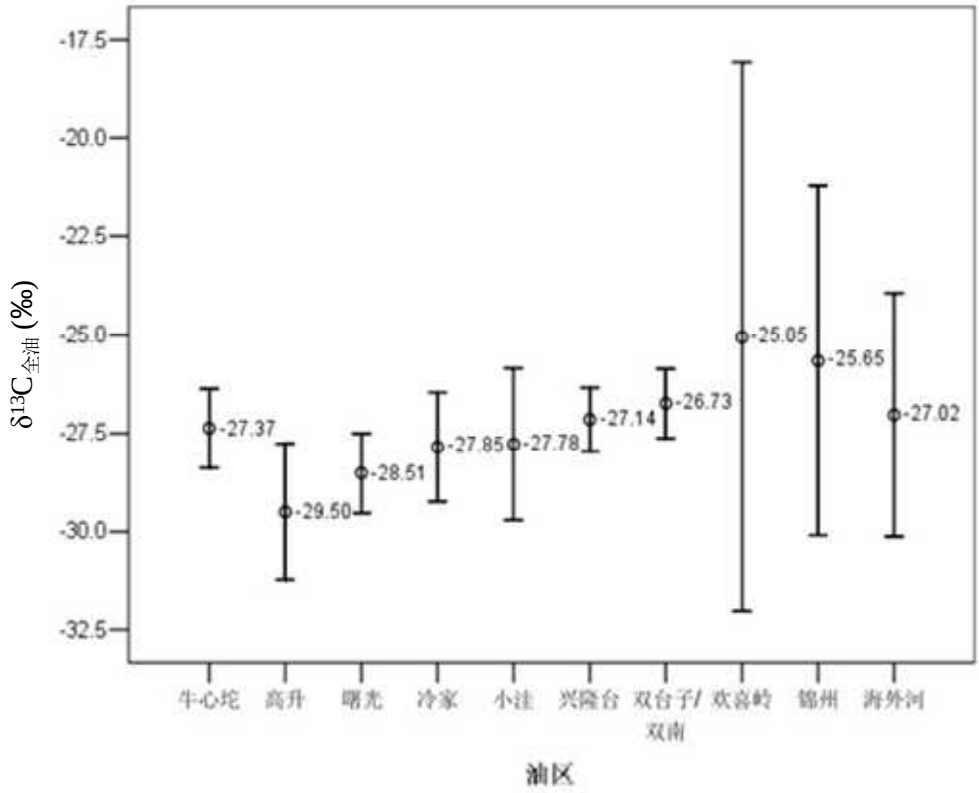



图 4.28 西部凹陷全油碳同位素组成在各油区的分布特征

**Fig. 4.28 Crude oil carbon isotopes variation in the Western Depression oil feilds**

②原油单体烃同位素特征

与总碳同位素相比，由单体烃分子系列的碳同位素判识油气源及成因更为清楚，它能区别原油的混合特征。

西部凹陷原油正构烷烃单体碳同位素组成特征为低碳数富含重碳同位素，高碳数富含轻碳同位素（图 4.29）。地区分布特征是北部高升地区碳同位素偏轻，可能指示咸化半深湖相的烃源岩贡献；中部兴隆台、冷家地区碳同位素较重，可能反映淡水环境烃

源岩的贡献，并且可能有高等植物输入，南部齐家、欢喜岭地区碳同位素居中，表明其烃源岩特征可能介于前二者之间。

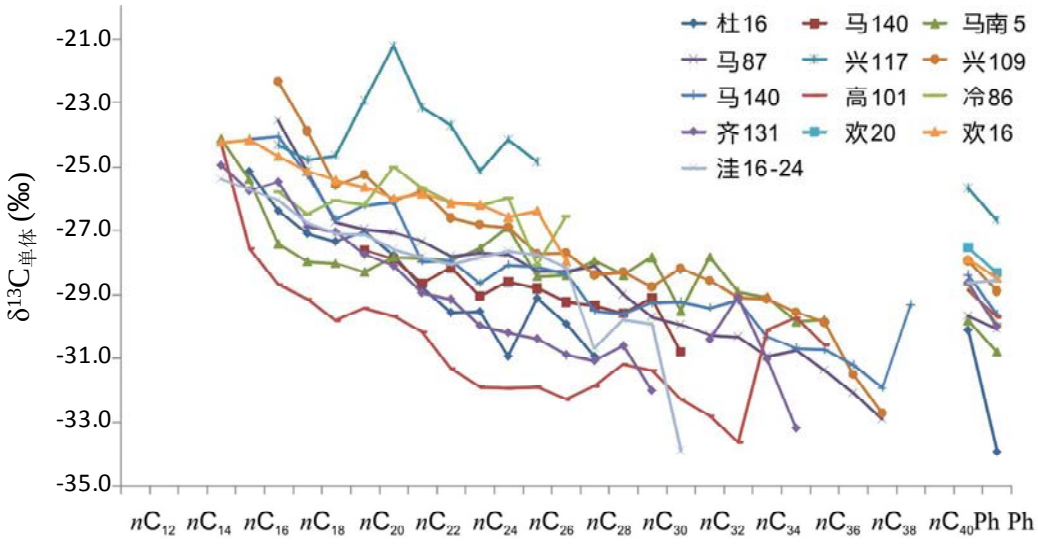



图 4.29 西部凹陷原油正构烷烃单体碳同位素组成

**Fig. 4.29 Carbon isotopes composition of n-alkane monomeric series for the crude oil**

（3）原油饱和烃色谱特征

不同地区、不同层位原油色谱面貌具较大差异（图 4.30），反映了西部凹陷原油在母岩沉积环境、生源、成熟度、次生蚀变等方面存在的差异。

在北部，宋家地区中生界原油饱和烃主峰碳偏后，Pr/Ph 比大于 1，包络线光滑，CPI 和 OEP 趋于 1。牛心坨油田谱图以后峰型面貌为主，Pr/Ph 比小于 1，南部沙四段具奇碳优势，而 Ar 无奇偶优势；北部沙三段 $Es_3$ 饱和烃包络线光滑，而沙四段和中生界出现 UCM 峰。这与东濮凹陷沙河街组未成熟生油岩中正构烷烃相似，它也由两个峰构成，一个是 $C_{23}$ 以前为低碳数群，其主峰为 $C_{18}$ 或 $C_{20}$，在 $C_{23}$ 以后为高碳群，其主峰碳为 $C_{28}$ 或 $C_{29}$[216]。

在高升、雷家和曙光-杜家台以前峰型（$nC_{17}$）为主，Pr/Ph 比小于 1，沙三段具奇碳优势，尤以高升优势更为明显，且其沙四段亦具奇偶优势，而雷家和曙光-杜家台沙四段、沙一、二段和中生界无奇偶优势。在凹陷边部的样品出现 UCM 峰。

在凹陷南部的中间的兴隆台、双台子-双南和海外河油田沙河街组原油主峰碳偏前，Pr/Ph 大于 1，烷烃包络线光滑，无奇偶优势。而在海外河油田以北出现 UCM 峰，部分饱和烃消失。

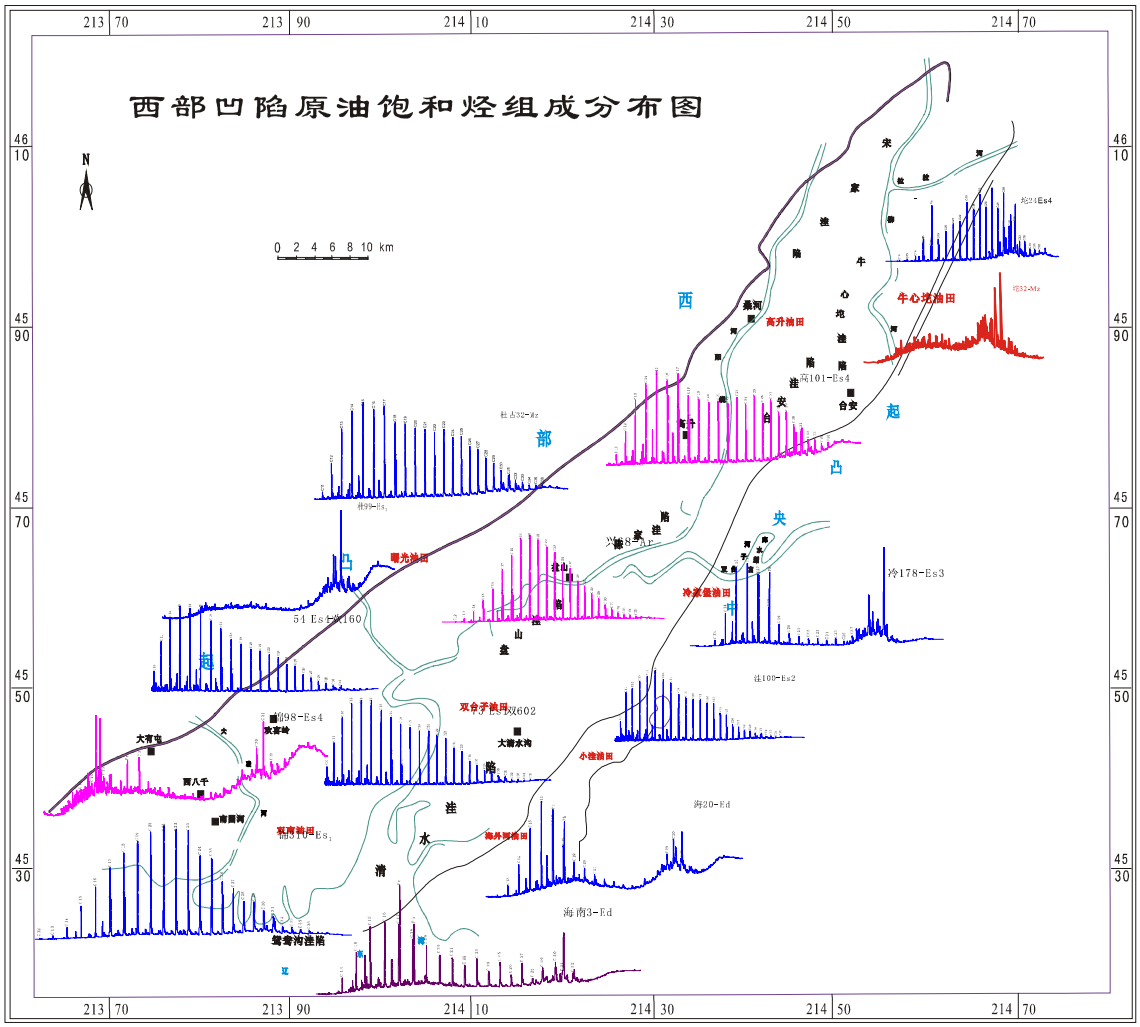



图 4.30 西部凹陷原油烷烃组成平面分布图

**Fig. 4.30 Alkanes chromatography of the Western Depression crude oil**

凹陷南部靠边位置的冷家、小洼、小洼和欢喜岭油田总体上呈双峰型的面貌，Pr/Ph 小于 1，部分原油具奇碳优势，存在 UCM 峰，且部分的正构烷烃消失，显示出降解的特征；而锦州油田主峰碳为 $nC_{22}$、Pr/Ph 大于 1，且多为呈现 UCM 峰，表现为混源特征。

Mello 等的研究表明，Pr/Ph 比更多地反映生物组成与环境化学之间的相互关系。在淡水环境中光合作用形成的生物体与甲烷菌含有姥鲛烷的先体物质，随着水体盐度的增加具植烷来源的细菌变得越来越多，因此咸水环境中植烷先体物质的丰度明显增加。因而，极低的 Pr/Ph 比反映了一种咸化环境[36]。根据本研究的饱和烃色谱参数 Pr/Ph-Ph/$nC_{18}$ 相关图（图 4.31）可以看出，西部凹陷原油母岩的沉积环境主要有氧化（Ⅰ型）和还原（Ⅱ型）两种类型，其分布总体上深部层位的原油母岩的还原性更强，浅部

还原性较弱；平面上表现为北部的 Pr/Ph 普遍较南部偏低，反映了北部原油母岩的还原性较南部强。

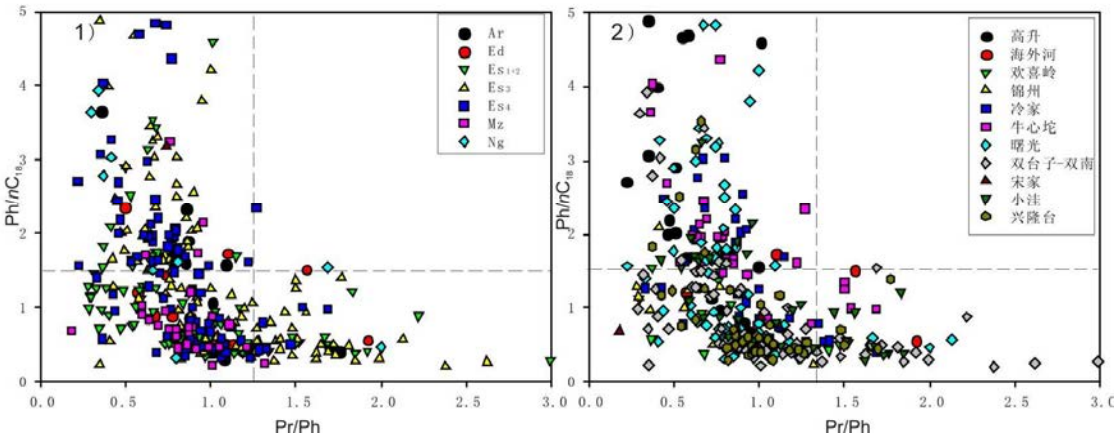



图 4.31 Pr/Ph-Ph/$n$C$_{18}$ 相关图 1)按层位分布；2)地区分布

**Fig. 4.31 Relationship of the raios of Ph/$n$C$_{18}$ vs. Pr/Ph for the crude oil**

（4）原油生物标志物组成特征

西部凹陷原油生物标志物组成见表 4.10。

表 4.10 西部凹陷原油甾萜类生物标志物组成特征

**Tab. 4.10 Biomarkers distribution of the Western Depression crude oil**

| 层段 | 伽马蜡烷/$C_{30}$ 藿烷 | 规则甾烷 $C_{29}$ 20*S*/(20*S*+20*R*) | 甾烷 $C_{29}$ ββ/(αα+ββ) | Tm/Ts | $C_{31}$ 藿烷 22*S*/(22*S*+22*R*) | (藿烷+莫烷)/$C_{30}$ | $C_{29}$ 藿烷/莫烷 | 规则甾烷 20*R*$C_{27}$/$C_{29}$ | 三环萜烷/藿烷 | 规则甾烷/藿烷 | (孕甾烷+升孕甾烷)/规则甾烷 20*R*$C_{29}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 牛心坨 | 0.17 | 0.22 | 0.25 | 2.77 | 0.55 | 0.27 | 17.98 | 0.71 | 0.07 | 0.83 | 0.02 |
| 高升 | 0.29 | 0.25 | 0.23 | 3.82 | 0.55 | 0.26 | 4.81 | 0.50 | 0.08 | 1.12 | 0.00 |
| 曙光 | 0.27 | 0.36 | 0.35 | 1.71 | 0.57 | 0.30 | 19.69 | 0.62 | 0.13 | 0.39 | 0.13 |
| 冷家 | 0.14 | 0.36 | 0.32 | 2.16 | 0.56 | 0.35 | 7.01 | 0.60 | 0.11 | 0.52 | 0.06 |
| 小洼 | 0.26 | 0.44 | 0.38 | 1.51 | 0.56 | 0.32 | 7.85 | 0.78 | 0.22 | 0.40 | 0.15 |
| 兴隆台 | 0.11 | 0.42 | 0.41 | 0.61 | 0.58 | 0.37 | 10.06 | 0.80 | 0.32 | 0.34 | 0.30 |
| 双台子-双南 | 0.22 | 0.38 | 0.41 | 0.93 | 0.58 | 0.33 | 11.43 | 0.89 | 0.31 | 0.39 | 0.29 |
| 欢喜岭 | 0.23 | 0.36 | 0.35 | 0.85 | 0.57 | 0.33 | 10.25 | 0.73 | 0.21 | 0.31 | 0.17 |
| 锦州 | 0.21 | 0.36 | 0.40 | 0.95 | 0.57 | 0.38 | 8.57 | 0.89 | 0.27 | 0.33 | 0.26 |
| 海外河 | 0.18 | 0.49 | 0.35 | 1.02 | 0.56 | 0.37 | 7.44 | 0.65 | 0.28 | 0.47 | 0.13 |

注：中值

①甾类化合物

西部凹陷部分原油虽然发生了一定程度的生物降解损失了正构烷烃，但是原油的甾萜烷分布仍完整，可做指纹对比。原油甾烷系列主要由 $C_{27}$-$C_{29}$ 规则甾烷组成（图 4.32），部分原油检测出 4-甲基甾烷。孕甾烷含量以兴隆台、双台子-双南和锦州较高，而高升和冷家较低（表 4.9）。

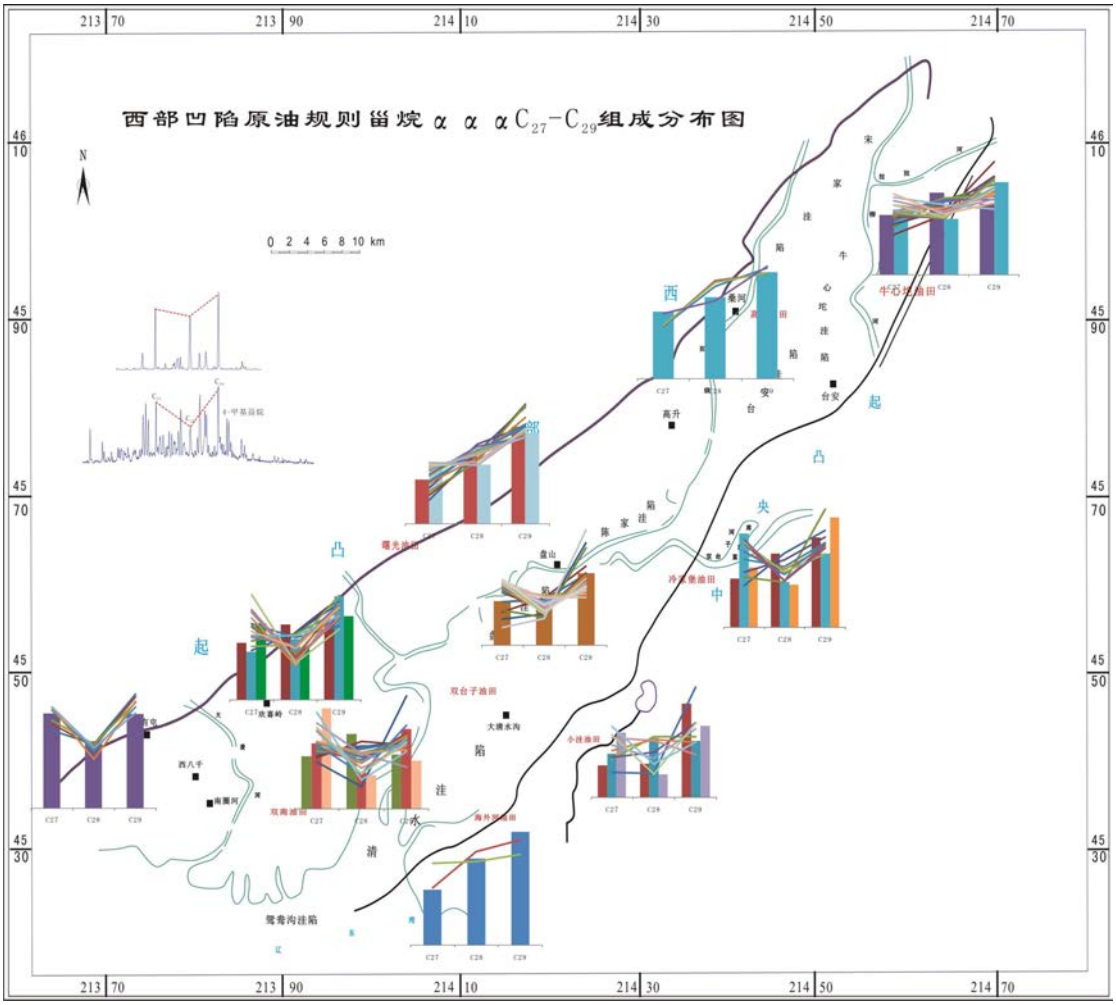



图 4.32 西部凹陷原油规则甾烷组成分布图

**Fig. 4.32 Steranes distribution of the Western Depression crude oil**

规则甾烷 $C_{27}$-$C_{29}$ 可以很好的反映生油母质来源，西部凹陷原油 $C_{27}$-$C_{29}$ 规则甾烷的分布（图 4.32）主要以直线斜坡型 $C_{27}$<$C_{28}$<$C_{29}$ 为主，凹陷南部少数以 $C_{28}$ 规则甾烷占优势，垂向上 $C_{27}$ 规则甾烷占优势的主要分布在浅层（Ed、$Es_{1+2}$）。对于不同油区、层段而言，其甾烷的分布与组成存在一定的差异，其分布主要有两种类型：

Ⅰ型（直线斜坡型 $C_{27}<C_{28}<C_{29}$）：认为该类型原油或源于高等植物输入的母质，或来源于墨角藻目的分子参与烃源岩的生物构成[117]。平面上以牛心坨、高升、杜家台、曙光、冷家和海外河油田的原油为主；垂向上主要以潜山为主，部分分布在沙三、四段的原油中。

Ⅱ型（Ⅴ型：$C_{28}<C_{27}/C_{29}$）：有机质具有菌藻类及高等植物双重输入的特征，只不过是沉积水体等环境较好，加上细菌的活动可使有机质发生腐泥化，增强生烃能力。平面上主要分布在牛心坨、欢喜岭、锦州、小洼、兴隆台、双台子-双南油田油田；垂向上主要是东营组和沙一、二段。

从反映生源信息的参数 $\alpha\alpha\alpha20R C_{27}/C_{29}$ 与色谱参数 Pr/Ph 的相关图（图 4.33）可以看出，西部凹陷的原油多数分布在Ⅱ区，反映了偏还原环境下生源以规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha20R C_{27}$ 占优势的藻类生源为主。

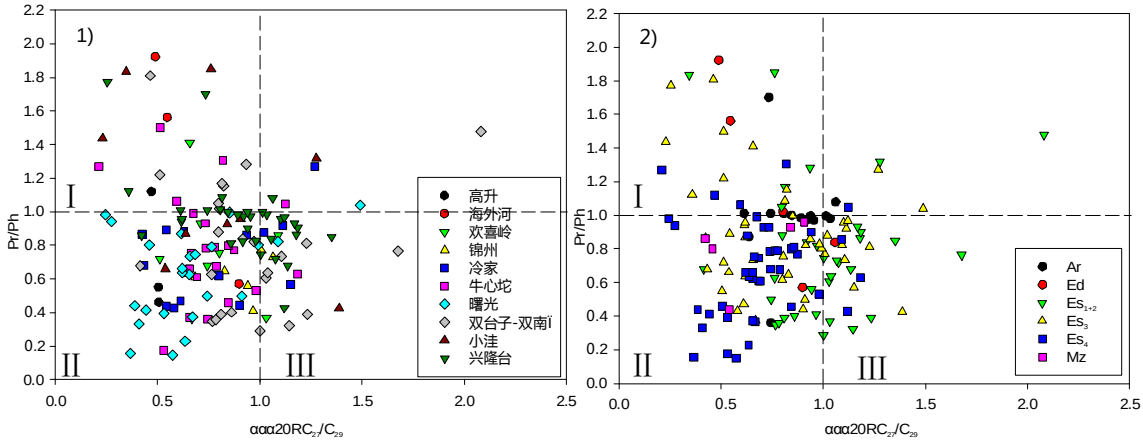



图 4.33 甾烷 $\alpha\alpha\alpha20R C_{27}/C_{29}$-Pr/Ph 相关图

1）油区；2）层位

**Fig. 4.33 Relationship of Pr/Ph vs. $\alpha\alpha\alpha20R C_{27}/C_{29}$**

4-甲基甾烷主要在锦州油田原油中检出，此外小洼、双南和兴隆台的部分原油中也有分布，在曙光和冷家原油中有微量的检出。认为来源于淡水湖相沉积环境的沟鞭藻[126]。

②萜类化合物

在北部牛心坨、高升、西部斜坡带的曙杜地区原油各油层（中生界除外）具有高丰度的伽马蜡烷，Ts/Tm 较小，一般低于 1，反映了原油母质生成于还原高盐环境，而中生界原油生成于偏氧化环境。

在东部陡坡带的冷东地区原油具中等含量的伽马蜡烷，在层位上浅层沙二段原油伽马蜡烷值很低，向深部伽马蜡烷值增高，到沙三段具有很高丰度的伽马蜡烷值，本区

Ts/Tm 均小于 1，反映为母源总体为还原环境；而小洼地区原油在浅部东营组和沙二段伽马蜡烷值很低，Ts/Tm 值大于 1，深部沙三段到中生界伽马蜡烷值很高，Ts/Tm 小于 1，到太古界伽马蜡烷值又有所降低，而 Ts/Tm 仍小于 1，但 Ts、Tm 的丰度降低，从而表明小洼的各油层原油具有不同来源，浅部东营组和沙二段为偏氧化环境下生成的原油，而深部沙三段和太古界原油来源于还原环境，至于太古界伽马蜡烷值、Ts 和 Tm 丰度的降低可能是由于热演化造成（图 4.34）。

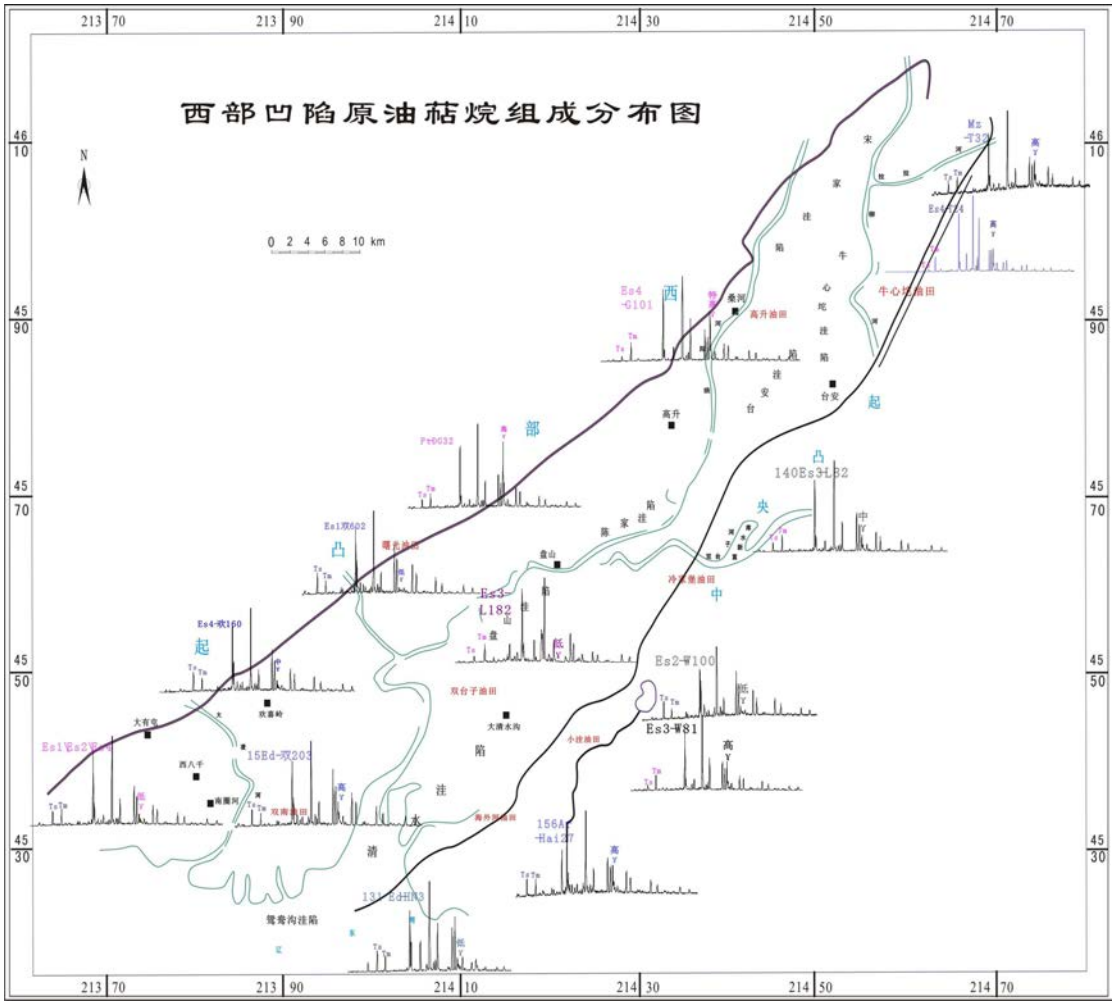



图 4.34　西部凹陷原油萜烷组成分布图

**Fig. 4.34 Terpanes distribution of the Western Depression crude oil**

在靠近洼陷中心的齐欢地区几乎无伽马蜡烷存在，Ts/Tm 比值大于 1，从而反映母源环境为偏氧化。

西部凹陷原油的三环萜烷含量普遍较低（表 4.9），一般三环萜烷/藿烷的比值小于 0.32。兴隆台、双台子-双南和锦州的三环萜烷含量较高，牛心坨、高升和冷家的含量较低，从而显示前者偏于藻类生源，而后者具细菌生源。

此外，在西部凹陷的原油中检测到了奥利烷，其在冷东油区的分布具有非常高的丰度，西斜坡靠近洼陷带原油样品中也检测出中等含量奥利烷，在小洼油田也有少量显示（图 4.35），这与前面该区甾烷呈“V”型分布具双重生源一致，而对于北部的以 $C_{29}$ 占优势的直线型分布，则否定其高等植物输入，考虑到其沉积环境为还原咸化，认为该类原油是很可能来源于墨角藻[217]。

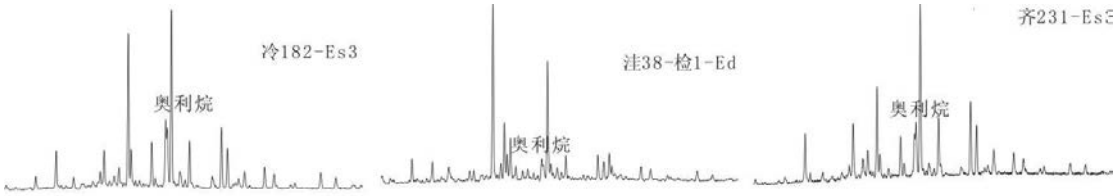



图 4.35 西部凹陷原油奥利烷质量色谱图

**Fig. 4.35 Oleanane distribution of the Western Depression crude oil**

在小洼降解稠油样品中有检测出异常高丰度的 17α,21β(H)-25 降藿烷，此外在海外河油田和曙光的部分原油样品中也有中等含量的发现（图 4.36），它可以作为原油降解的有效指标，但对于 UCM 拱峰过高和过低情况下的降解油的判识不是很准确。

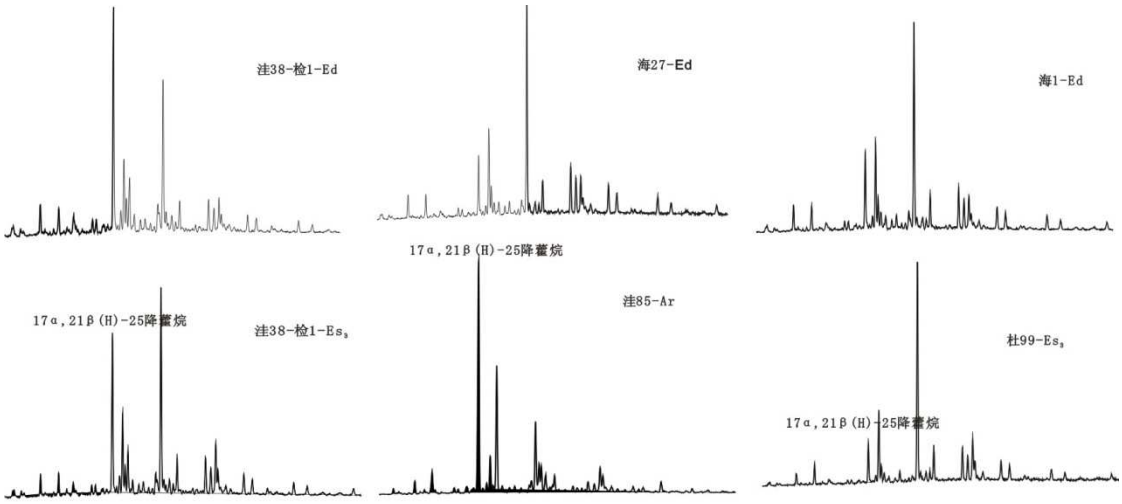



图 4.36 西部凹陷原油 17α, 21β(H)-25 降藿烷质量色谱图

**Fig. 4.36 25-norhopane distribution of the Western Depression crude oil**

③类胡萝卜烷系列

一般认为，由类胡萝卜烷系列化合物的检测可反映生油母质色素生源的输入和沉积环境的差别。此外类胡萝卜烷化学稳定性较低，极易遭沉积过程的氧化破坏和成熟作用的影响。本次在西部凹陷部分原油中检测到完整的类胡萝卜烷系列化合物，尤其 $C_{40}$β-胡萝卜烷含量相当丰富，可作为该区原油的重要标志，类胡萝卜烷主要分布在牛心坨油田北部、高升、冷家、小洼和曙光油田（图 4.37）。这些地区的原油成熟度较低，高丰

度的类胡萝卜烷系列化合物的存在主要反映了烃源岩的沉积环境特征，推测其源岩形成于还原环境，有利于有机质保存。

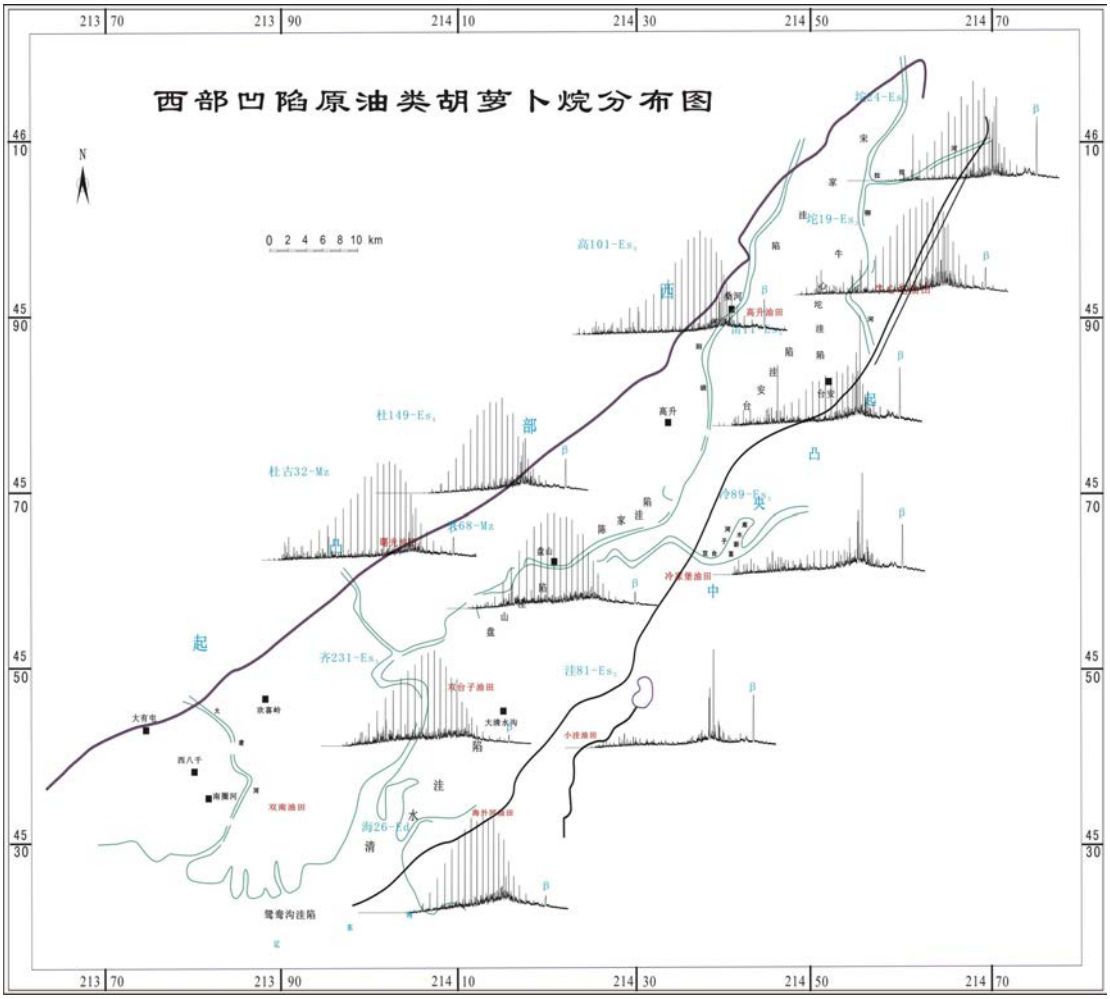



图 4.37 西部凹陷原油类胡萝卜烷分布图

**Fig. 4.37 Carotane distribution of the Western Depression crude oil**

④菲系列和三芳甾烷系列化合物

根据甲基菲指数 $MPI_1$、$MPI_2$ 随成熟度的增加而增加的原理，做二者的相关图（图 4.38），可以看出 $MPI_1$ 与 $MPI_2$ 和基于甲基菲的 4 个异构体相对丰度提出的另一对成熟度参数 $F_1$ 与 $F_2$ 分布呈现明显的正相关关系。关于两类参数的实用性，包建平[218]曾做过探讨，认为 $F_1$ 和 $F_2$ 较 $MPI_1$ 和 $MPI_2$ 在反映有机质热演化程度方面更为有效。从本次的实验数据来看，双台子−双南、兴隆台、高升原油成熟度较高；而冷东、曙光和小洼地区的原油成熟度较低；牛心坨原油的成熟度高低均有。

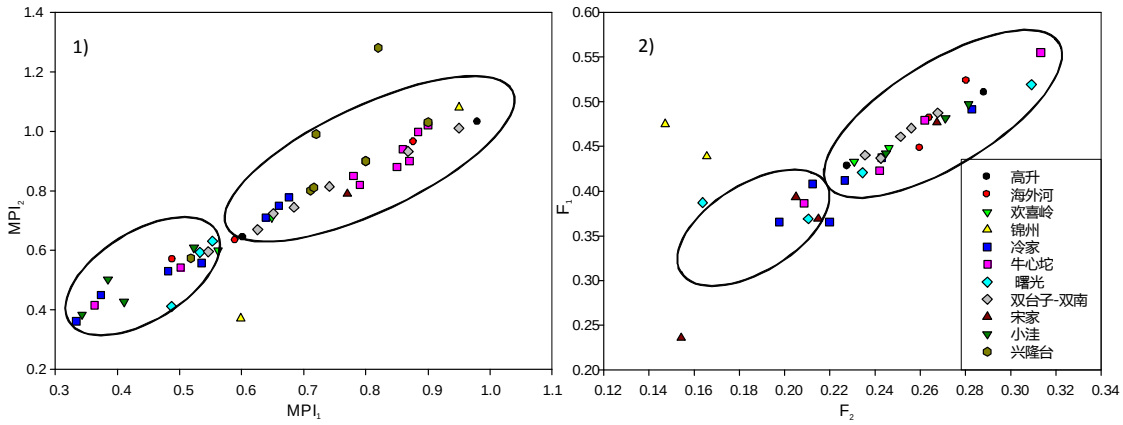



图 4.38 西部凹陷原油甲基菲指数相关图

1) $MPI_1$ 与 $MPI_1$ 相关图; 2) $F_1$ 和 $F_2$ 相关图

**Fig. 4.38 Methylphenanthrene indexes correlations**

五环芳烃苝来源于高等植物的多种醌色素，在缺氧的环境下形成，可以表征有机质的陆源性质，此外它还是一个成熟度参数，一般在浅层中富集，深层中消失的演化趋势。从图 4.39 可以看出，在深度 1300m 时，该比值可以达到 2，随深度增加迅速下降，到 4300m 基本消失。可见其适用范围在中低成熟演化阶段。

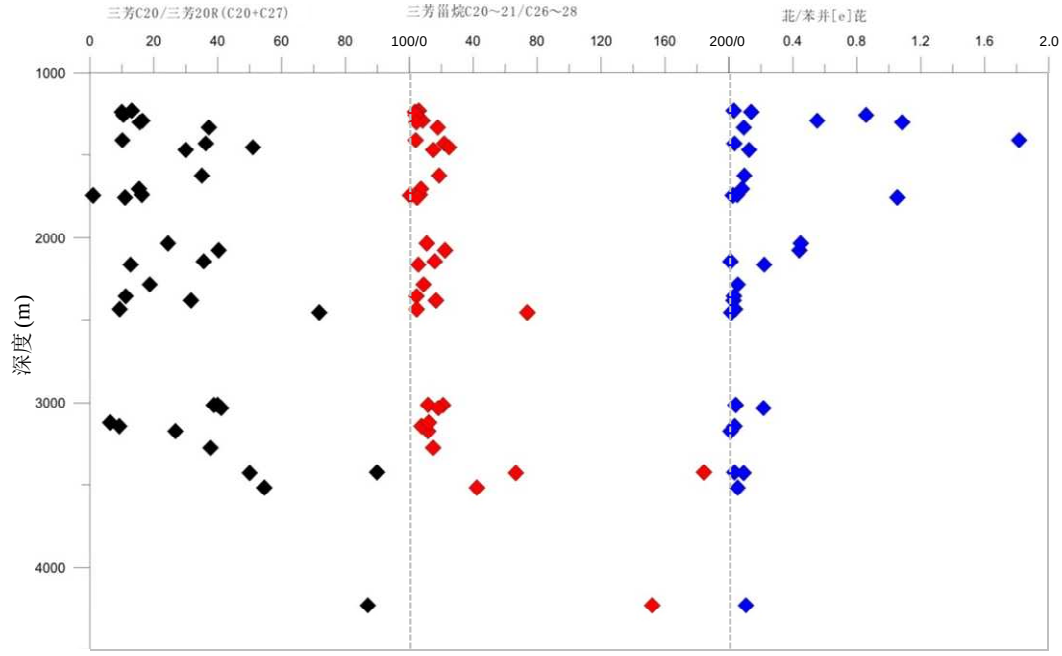



图 4.39 三芳甾烷 $C_{20}/C_{20}+C_{27}$，三芳甾烷 $C_{20-21}/C_{26-28}$，苝/苯并[e]芘随深度的变化图

**Fig. 4.39 Triaromatic Steroids parameters and pyrene/benzopyrene variation by depth**

⑤含硫化合物

辽河西部凹陷不同油区原油的“三芴系列”组成存在很大的差异（图 4.40）其中以硫芴含量变化最为显著。牛心坨、高升和曙光地区硫芴含量较高，属于半咸化、咸化湖相烃源岩贡献的可能性较大；小洼、兴隆台、锦州和海外河样品的氧芴和硫芴含量更明显地指向淡水环境烃源岩的贡献，这与前面的推断一致。

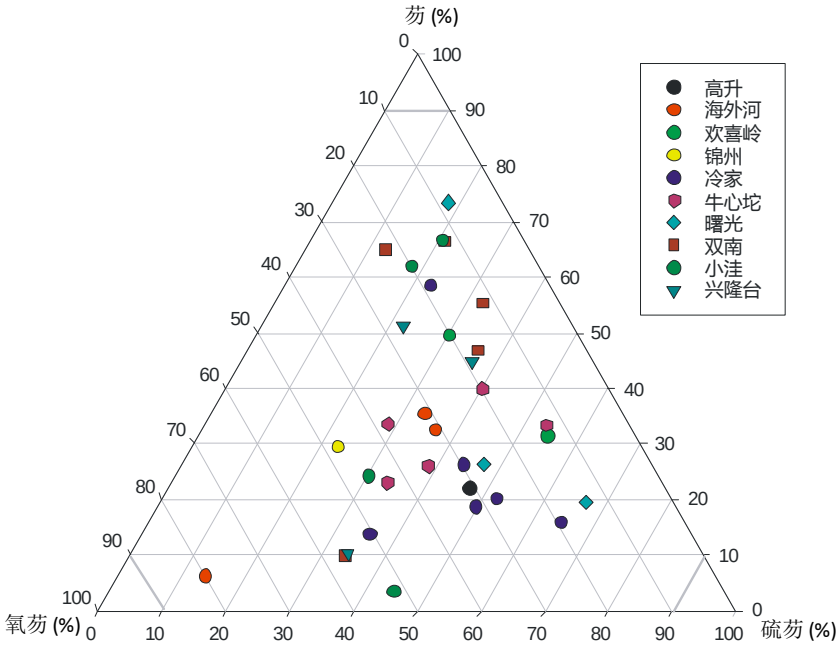



图 4.40 西部凹陷原油三芴系列组成三角图

**Fig. 4.40 Aromatic compounds ternary plot for the Western Depression crude oil**

从伽玛蜡烷指数与硫芴/氧芴(SF/OF)的相关图（图 4.41）来看，沙四段和沙一、二段的伽玛蜡烷值高，一般大于 0.2，SF/OF 比值较高，反映为咸化-半咸化环境；沙三段和东营组伽玛蜡烷含量较低，SF/OF 比值分布较分散，其中东营组 SF 含量非常低，这也与宏观上沙四段原油含硫量普遍偏高相一致。

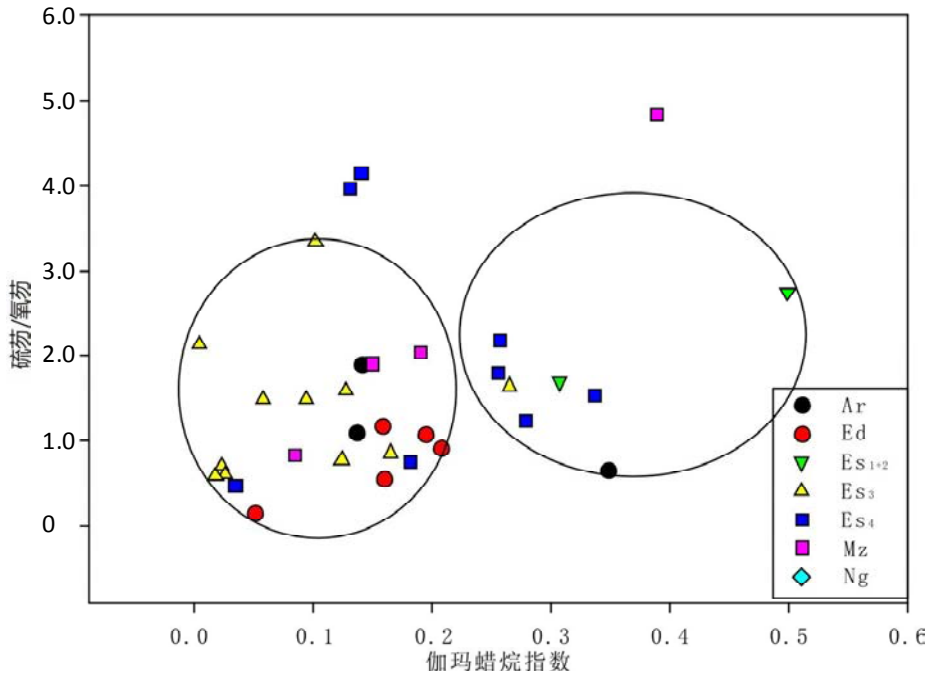



图 4.41 原油伽玛蜡烷指数和硫芴/氧芴的相关图

**Fig. 4.41 Relationship between Gammacerane/$C_{30}$ αβ hopane and SF/OF**

⑥脱羟基维生素 E

一般认为该系列化合物在原油中检出，意味与咸水-半咸水湖相烃源岩有关。该系列化合物主要分布在牛心坨和冷东地区的原油中，此外在高升、曙光、海外河的部分原油样品中有分布（图 4.42）。另外在 1400m～3200m 的范围内的原油样品均检测到脱羟基维生素 E，且多数分布在 2000m～2400m 的深度区间。

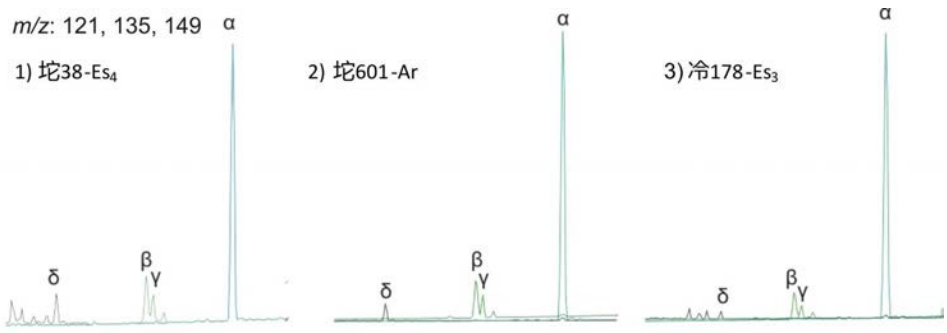



图 4.42 西部凹陷原油脱羟基维生素 E 质量色谱图

**Fig. 4.42 Dihydroxylated Vitamin E (MTTCs) distribution of the Western Depression crude oil**

（5）原油成因类型及其分布

①原油成因类型划分

综合上述原油的物性、族组成、全油碳同位素、烷烃、芳烃及生物标志化合物特征的研究，认为西部凹陷的原油具有多种生源环境和母质类型，原油数据（126 个）在伽马蜡烷指数、Pr/Ph、$C_{24}$ 四环萜烷/($C_{24}$ 四环萜烷+$C_{26}$ 三环萜烷)、$C_{24}$ 四环萜烷/三环萜烷和 ααα20*R*$C_{28}$/$C_{29}$ 等比值的差异最大，因此选这五个参数作为坐标轴，基于 Pirouette 4.0 软件，将原油分成三大类（图 4.43），第Ⅰ类原油（图 4.44 黄色）的伽马蜡烷指数明显很高，Pr/Ph 很低，ααα20*R*$C_{28}$/$C_{29}$ 比值偏高，表明为高盐还原环境且以藻类输入为主的生源，而第Ⅱ类（图 4.44 粉色）和Ⅲ类原油（图 4.44 蓝色）伽马蜡烷指数很低，其中第Ⅱ类原油的 $C_{24}$ 四环萜烷明显比第Ⅲ类原油低，且 Pr/Ph 稍高，ααα20*R*$C_{28}$/$C_{29}$ 比值也偏高，但都低于第Ⅰ类原油，反映了第Ⅱ类原油可能来源于咸化还原环境有机质，而第Ⅲ类原油来源于淡水还原环境，它们的有机质均为藻类和高等植物双重生源，只是第Ⅲ类原油的高等植物输入更多些。

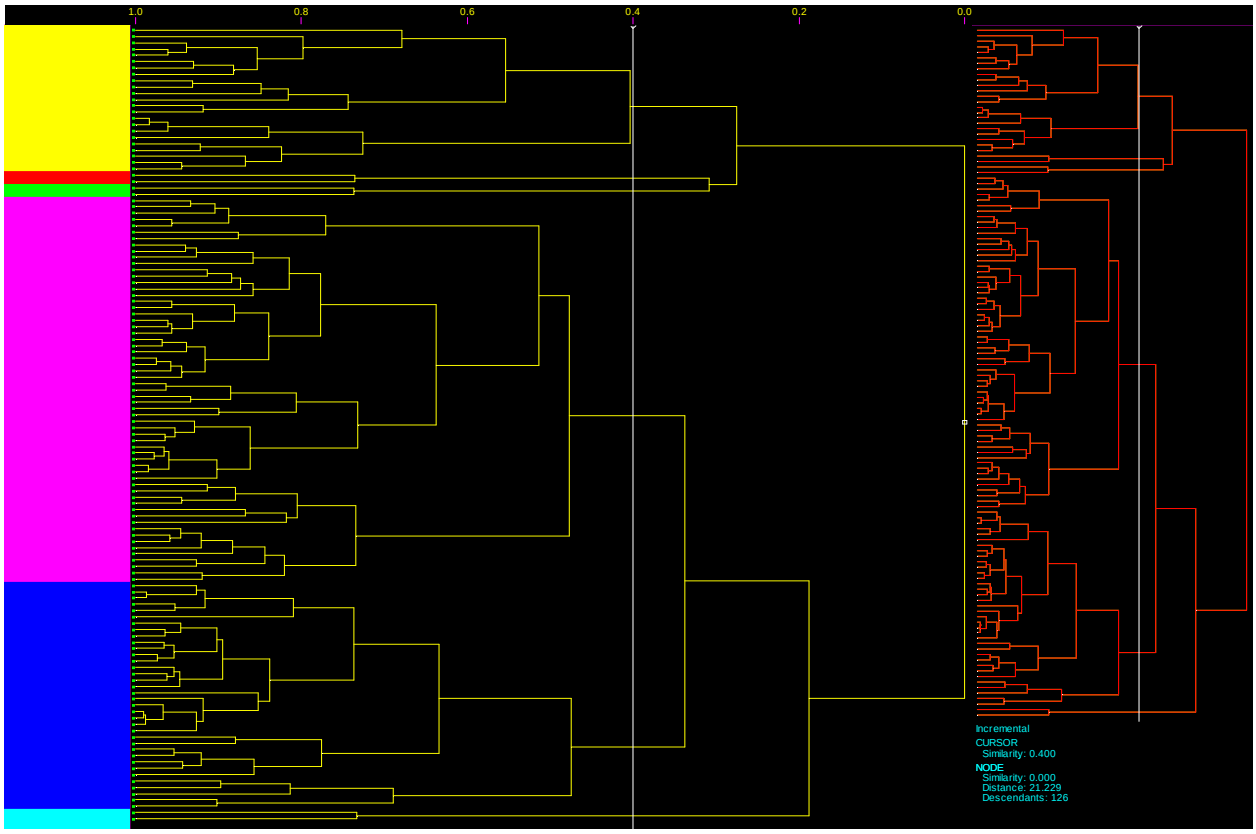



图 4.43　基于 Pirouette 对原油的分类

**Fig. 4.43 Crude oil classification by Pirouette**

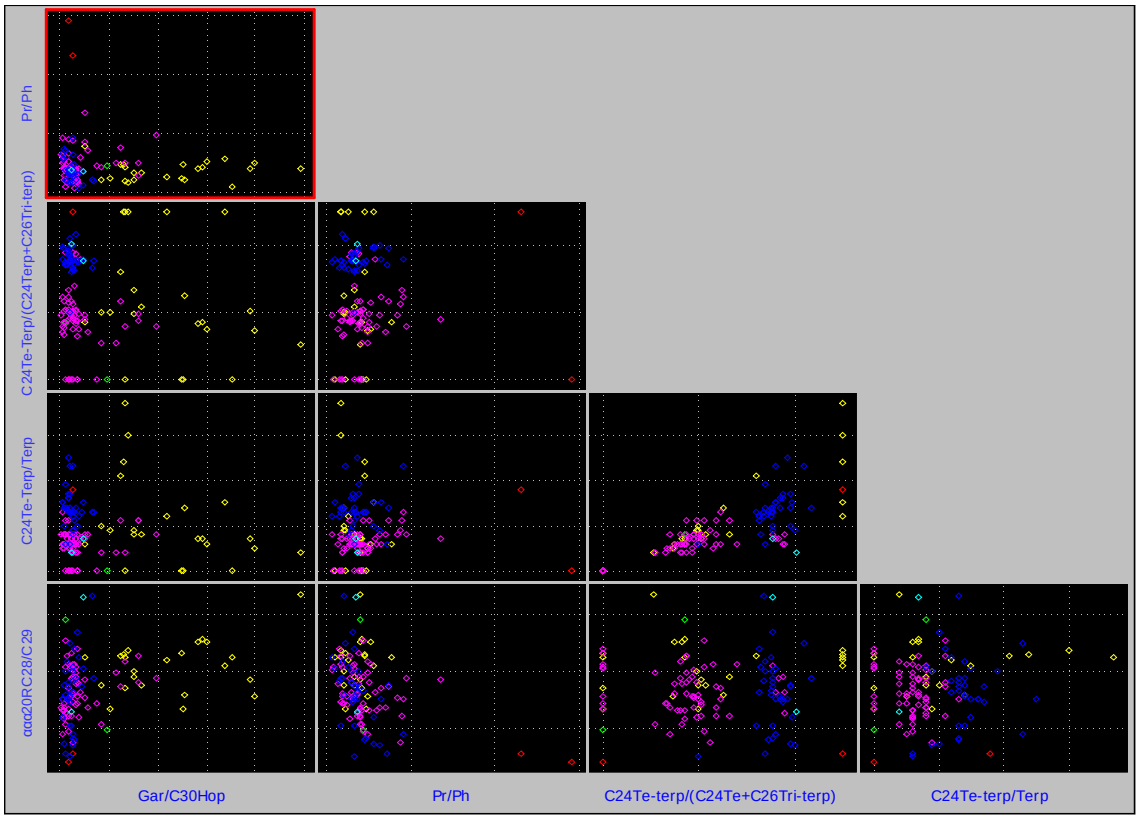



图 4.44 原油分类参数相关图

**Fig. 4.44 Parameters correlations for classifying the Western Depression crude oils**

此外，从甾烷 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$，规则甾烷 $\alpha\alpha\alpha C_{29}20S/(20S+20R)$，藿烷 $C_{31}22S/(22S+22R)$，$C_{32}$ 藿烷$(S/R)$，升藿烷指数，三环萜烷/藿烷，规则甾烷/17α(H)藿烷（$C_{29}$-$C_{33}$），重排藿烷/$C_{29}$Ts，（孕甾烷＋升孕甾烷）/$\alpha\alpha\alpha 20RC_{29}$，Ts/Tm 和甲基菲指数等成熟度参数中筛选出甾烷异构体 $\alpha\alpha\alpha C_{29}$ $20S/(20S+20R)$和 Ts/Tm 参数作为划分原油成熟度的主要指标。可以据此再进一步将原油中划分出未熟-低熟油和成熟原油（图 4.45）：北部地区（如牛心坨、高升油田）原油的 $C_{31}$ 升藿烷 $22S/(22S+22R)$、孕甾烷、升孕甾烷及地质构型甾烷异构体的含量都比较低，属未熟-低熟原油；而南部的小洼、锦州，西斜坡的曙光、中部的兴隆台原油的地质构型甾烷异构体丰富，说明成熟度相对较高。

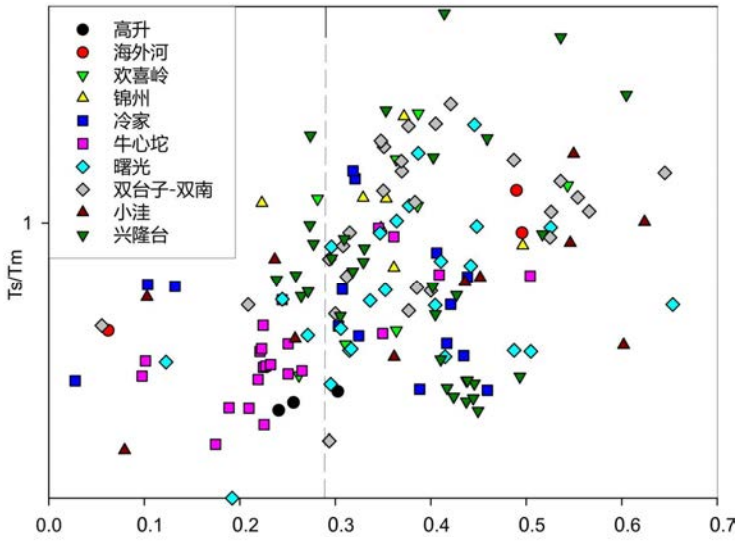



图 4.45 Ts/Tm 与 αααC$_{29}$ 20*S*/(20*S*+20*R*)相关图

**Fig. 4.45 Cross plot of Ts/Tm vs. αααC$_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)**

值得注意的是，如前面章节指出，西部凹陷原油有相当部分显示出了降解稠化等次生蚀变特征。无论何种环境或生源的源岩所形成的不同成熟度的原油均有可能遭受降解蚀变，依据色谱面貌和反映生物降解的生物标志物组成特征还将原油划分出遭生物降解成因的原油亚类，其分类结果如图 4.46 所示。

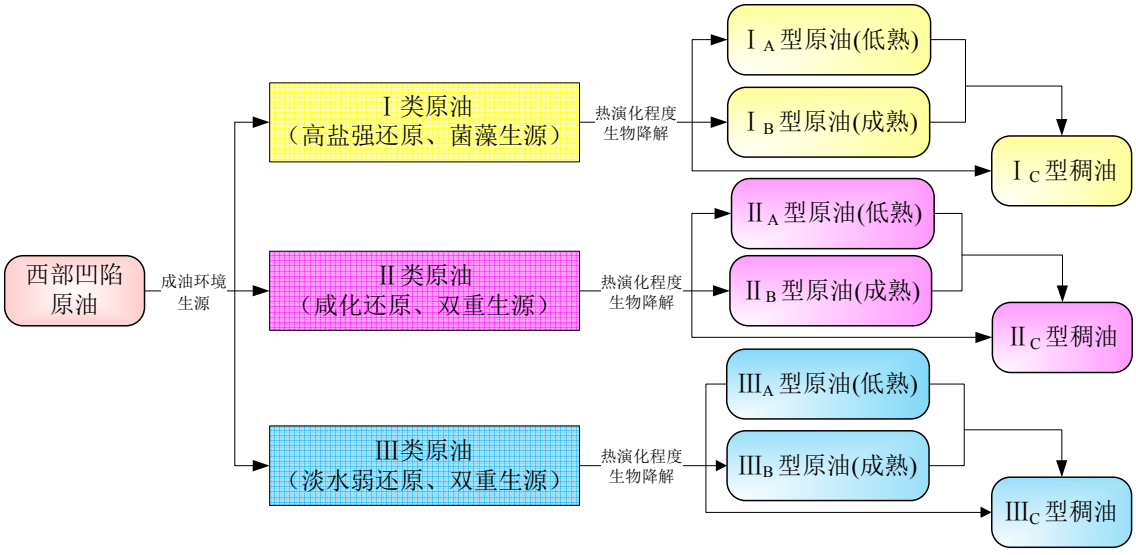



图 4.46　西部凹陷原油成因类型图

**Fig. 4.46 Genetic types of the Western Depression crude oils**

②各类原油的地球化学特征及分布

第Ⅰ类原油的伽马蜡烷指数很高，平均 2.2，Pr/Ph<0.8，Ts/Tm 较低，平均 0.39，$C_{24}$ 四环萜烷/($C_{24}$ 四环萜烷+$C_{26}$ 三环萜烷)和 $C_{24}$ 四环萜烷/三环萜烷很高，分别为 0.72 和 0.17，解释为高盐强还原生油环境；原油的规则甾烷 ααα$C_{27}$/$C_{29}$ 和规则甾烷 ααα$C_{28}$/$C_{29}$ 都较高，分别为 0.77 和 0.78，三环萜烷/萜烷比值较低，仅 0.18，原油的碳同位素值较重，最低达-26.7‰，平均-27.3‰，反映了该类原油为菌藻类生源，主要分布在西部凹陷的北部（附图 B.12，附图 B.13）。

第$Ⅰ_A$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值很低，为 0.10~0.26，平均为 0.21，$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.20~0.27，$MPI_1$ 和 MPR 都很低，分别为 0.39 和 0.98，基于 $MPI_1$ 计算的 $R_C$ 为 0.6，反映为未熟-低熟原油，主要分布在高升油田的沙三段和沙四段，雷家、牛心坨北部的沙四段。

第$Ⅰ_B$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值较高，为 0.36，平均为 0.21；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也稍高，为 0.26；$MPI_1$ 亦较高，为 0.45，基于它计算的 $R_C$ 为 0.7，说明这类原油为成熟原油，仅出现在牛心坨油田南部的沙三段和沙四段。

第$Ⅰ_C$型原油：饱和烃含量为 20.0%~26.4%，明显低于$Ⅰ_A$型（44.3%）和$Ⅰ_B$型（52.2%）原油，而非烃和沥青质的含量较高，为 47.2%~52.2%，$Ⅰ_A$型原油平均为 36.1%，$Ⅰ_B$型更低，为 20.9%；色谱图呈明显的 UCM 拱峰，且检测到 25-降藿烷，认为属降解原油，主要分布于牛心坨油田北部和雷家的沙四段。

第Ⅱ类原油的伽马蜡烷指数较高，平均 0.8，0.8<Pr/Ph<1，Ts/Tm 较高，平均 0.6，$C_{24}$ 四环萜烷/($C_{24}$ 四环萜烷+$C_{26}$ 三环萜烷)和 $C_{24}$ 四环萜烷/三环萜烷较低，分别为 0.48 和 0.09，解释为咸化强还原生油环境；原油的规则甾烷 ααα$C_{27}$/$C_{29}$ 和规则甾烷 ααα$C_{28}$/$C_{29}$ 都较低，分别为 0.65 和 0.63，三环萜烷/萜烷比值较高，平均为 0.39，另外还检测到奥利烷，原油的碳同位素值较轻，一般为-28.4‰，反映了该类原油为高等植物和藻类双重生源，主要分布在西部凹陷的中南段（附图 B.10-附图 B.13）。

第$Ⅱ_A$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值很低，为 0.03~0.30，平均为 0.21；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.22~0.38（平均 0.27）；$MPI_1$ 和 MPR 都很低，分别为 0.52 和 1.01，基于 $MPI_1$ 计算的 $R_C$ 为 0.6 左右，反映为未熟-低熟原油，主要分布在兴隆台和冷家北的东营组、沙一、二段和沙三段。

第$Ⅱ_B$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值较高，分布在 0.28~0.63，平均为 0.42；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也稍高，平均为 0.38；$MPI_1$ 亦较高，为 0.62，基于它计算的 $R_C$ 为 0.8，说明这类原油为成熟原油，分布于曙光的东营组，兴隆台的沙一、二段、沙三段和沙四段，冷家北部的沙三段和西斜坡过渡带的沙四段。

第$\text{II}_\text{C}$型原油：比重普遍偏高，平均达 0.97g/cm$^3$，远高于$\text{II}_\text{A}$型和$\text{II}_\text{B}$型的 0.88g/cm$^3$；饱和烃含量平均为 33.0%，明显低于$\text{II}_\text{A}$型（50.6%）和$\text{II}_\text{B}$型原油（59.2%），而非烃和沥青质的含量较高，为 28.7%~62.3%，平均为 41.4%，$\text{II}_\text{A}$型原油平均为 32.2%，$\text{II}_\text{B}$型更低，为 22.6%；色谱图呈明显的 UCM 拱峰，且检测到 25-降藿烷，认为属降解原油，主要分布于大洼的东营组、沙一、二段和沙三段，齐曙地区和冷家南部的沙一、二段和沙三段，兴隆台的沙一、二段，以及西斜坡边部的沙四段。

第III类原油的伽马蜡烷指数很低，Pr/Ph 较高，平均达 0.95，Ts/Tm 很高，平均 0.84，$C_{24}$四环萜烷/($C_{24}$四环萜烷+$C_{26}$三环萜烷)和 $C_{24}$四环萜烷/三环萜烷较低，分别为 0.44 和 0.08，解释为淡水弱还原生油环境；原油的规则甾烷 ααα$C_{27}$/$C_{29}$和规则甾烷 ααα$C_{28}$/$C_{29}$都较高，分别为 0.99 和 0.76，三环萜烷/萜烷比值较高，平均为 0.44，(孕甾烷+升孕甾烷)/ ααα20*R*$C_{29}$也较 II 类原油高，达到 0.54，另外还检测到奥利烷，原油的碳同位素值较重，平均达-26.2‰，反映了该类原油的生源以淡水藻类为主，兼有少量高等植物输入的特征，主要分布在西部凹陷的中南段（附图 B.10-附图 B.12）。

第$\text{III}_\text{A}$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值很低，为 0.06~0.49，平均为 0.27；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.23~0.36（平均 0.29）；$\text{MPI}_1$很低，分别为 0.54，基于它计算的 $R_\text{C}$ 为 0.6，反映为未熟-低熟原油，该类原油在西部凹陷分布局限，仅分布在海南南部的东营组，欢喜岭和锦州油田西部的沙一、二段。

第$\text{III}_\text{B}$型原油：ααα20*R*$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)比值较’高，平均为 0.41；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较高，为 0.42，$\text{MPI}_1$亦较高，为 0.69，基于它计算的 $R_\text{C}$ 为 0.8，说明这类原油为成熟原油，主要分布在海南北部东营组，双南的东营组、沙一、二段和沙三段，欢喜岭油田东部的沙一、二段和锦州油田东部的沙三段。

第$\text{III}_\text{C}$型原油：比重普遍偏高，平均达 0.97g/cm$^3$，远高于$\text{III}_\text{A}$型原油的 0.89g/cm$^3$和$\text{III}_\text{B}$型的 0.85g/cm$^3$；色谱图呈明显的 UCM 拱峰，且检测到 25-降藿烷，认为属降解原油，该类原油在西部凹陷南部的分布较为广泛，主要分布在海南北部的东营组，双台子的沙一、二段和锦州西部的沙三段。

总体上第一类原油主要分布在西部凹陷的北部，第 II 类原油广泛分布于凹陷的中南段，而第III类原油主要分布在西部凹陷西斜坡的南段，反映了生油环境和生源类型具有区域性差异；关于成熟度，北部低熟油分布在沙四段，成熟油多在沙三段；而南部多为成熟油，低熟油仅分布在浅层的东营组和沙一、二段。此外还发现小洼油田的沙三段和曙光油田的沙四段、以及双台子油田的原油具有混源油的特征。另外生物降解主要发生在凹陷边部的浅层原油中。

### 4.3.3 西部凹陷油源对比

通过上述对烃源岩和各类原油地化特征的研究，得出精细油源对比的结果（如附表A.3）：第Ⅰ类原油主要来源于牛心坨-台安洼陷，其中第$Ⅰ_A$型原油主要来源于牛心坨洼陷的$SQ_1$烃源岩；第$Ⅰ_B$型原油来源于台安洼陷$SQ_2$的成熟烃源岩；第$Ⅰ_C$型原油为$Ⅰ_A$和$Ⅰ_B$型原油的混合。第Ⅱ类原油主要来源于盘山-陈家洼陷，其中第$Ⅱ_A$型原油来源于盘山-陈家洼陷$SQ_3$的低熟烃源岩；第$Ⅱ_B$型原油主要来源于盘山-陈家洼陷$SQ_4$成熟烃源岩；第$Ⅱ_C$型原油为$Ⅱ_A$和$Ⅱ_B$型原油的混合。第Ⅲ类原油多来源于清水洼陷，其中第$Ⅲ_A$型原油主要来源于清水洼陷$SQ_6$的低熟烃源岩；第$Ⅲ_B$型原油来源于清水洼陷的$SQ_4$烃源岩；第$Ⅲ_C$型原油为$Ⅲ_A$和$Ⅲ_B$型原油的混合。

## 4.4 小结

（1）基于烃源岩的岩石类型和层序地层格架的烃源岩分布，研究了各层序烃源岩的有机质丰度、类型和抽提物地球化学特征。从显微组分特征及组成、碳同位素组成、饱和烃色谱面貌、生物标志物分布以及芳烃分子标记物分布特征等方面，揭示了西部凹陷沙河街组下部层序烃源岩主要形成于咸化-强还原沉积环境和以藻类、菌藻类生源输入为主；上部层序烃源岩则以淡水的弱还原-弱氧化环境沉积并以藻类输入为主，兼有高等植物输入的特征。

（2）基于 1000 余个原油样品分析数据，对西部凹陷原油的物性和地球化学特征进行了综合研究，根据反映原油母岩沉积环境、生源输入、成熟度和原油次生蚀变的参数，把西部凹陷原油的成因类型划分为成 3 大类 9 个亚类，在此基础上结合烃源岩地化特征和生烃洼陷的分布，进行了三级层序格架下的精细油源对比，从而为成熟勘探区的资源评价提供重要依据。

# 第5章 结 论

通过本次研究有效的解决了油源对比所面临的两大难题：一是前寒武系沉积有机质高演化程度、低有机质丰度和有机地化信息，以及一些污染和覆盖的问题；另一方面是如何在高成熟勘探区复杂构造背景下进行精细油源对比。

对前寒武系有机质的研究主要以燕山地区中新元古界为例，通过采用储层有机包裹体成分分析和干酪根催化加氢方法有效获得和恢复了地化信息，进而研究原油和烃源岩有机质的生源、沉积环境，从而进行油源对比。认为中元古界下马岭组、铁岭组和雾迷山组的烃类包裹体和大部分原油来自洪水庄组泥页岩，主要是深水还原环境下，经厌氧细菌改造的有机质；少部分原油来自高于庄组白云岩，为海相浅水环境下，以蓝绿藻为主要生源的有机质，此外原油多是在生油窗范围生成，少数成熟度稍高可能是由于辉绿岩侵入时热烘烤所致。在此基础上重建油气成藏史，指出高于庄组烃源岩在 ca.1327Ma 前进入生油窗，发生一次充注，但鉴于有机质类型稍差和有机碳丰度不高，本次充注规模不是很大；在洪水庄组自印支期即开始生烃，到燕山期达到生烃高峰，此时在强烈的构造运动作用下发生对第一次充注古油藏的调整改造以及第二次大规模油气充注，形成现今油气分布形式，考虑到洪水庄组巨大的生烃潜力以及强烈的构造活动，认为除了出露的遭受破坏的古油藏外，有望发现地下保存良好的油气圈闭。

关于高成熟探区的油源对比选用辽河西部凹陷这一典型复杂构造区带，对其烃源岩在层序地层格架下进行有机质丰度、类型和抽提物地球化学特征的研究，主要从显微组分特征及组成、碳同位素组成、饱和烃色谱面貌、生物标志物分布以及芳烃分子标记物分布特征等方面，揭示了西部凹陷沙河街组下部层序烃源岩主要形成于咸化-强还原沉积环境下以菌藻类生源输入为主；上部层序烃源岩则是在淡水弱还原环境下沉积，具有以藻类为主、兼有高等植物输入的特征。而对该区的原油，主要对 1000 余个原油样品地化数据进行统计分析（Pirouette 软件），基于反映原油母岩沉积环境、生源输入、成熟度和原油次生蚀变的参数，把西部凹陷原油的成因类型划分为成 3 大类 9 个亚类，并进行精细油源对比，其结果为：对第Ⅰ类高盐还原环境下生成的菌藻类生源的原油来说，主要分布在凹陷的北部，其中第$Ⅰ_A$型原油主要来源于牛心坨洼陷的 $SQ_1$ 未熟烃源岩；第$Ⅰ_B$型原油来源于台安洼陷 $SQ_2$ 的成熟烃源岩；第$Ⅰ_C$型原油为$Ⅰ_A$和$Ⅰ_B$型原油的混合。对第Ⅱ类咸化还原环境下双重生源的原油来说，主要分布于凹陷的中南段，其中第$Ⅱ_A$型原油来源于盘山-陈家洼陷 $SQ_3$ 的低熟烃源岩；第$Ⅱ_B$型原油主要来源于盘山-陈家洼陷 $SQ_4$ 成熟烃源岩；第$Ⅱ_C$型原油为$Ⅱ_A$和$Ⅱ_B$型原油的混合。而对第Ⅲ类淡水弱还原环境下以藻类生源为主的原油来说，主要分布于凹陷西斜坡的南段，其中第$Ⅲ_A$型原油

主要来源于清水洼陷 $SQ_6$ 的低熟烃源岩；第$III_B$型原油来源于清水洼陷的 $SQ_4$ 烃源岩；第$III_C$型原油为$III_A$和$III_B$型原油的混合。从而确定了西部凹陷主要含油气区带油气与沙河街组具体的三级层序烃源岩的成因关系，这将为高成熟探区的油气资源评价提供了重要的依据。

# 参 考 文 献

[1] Zhang Shuan-Hong, Zhao Yue, Liu Xiao-Chun, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic–ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle. Lithos, 2009, 110 (1-4): 229-246.

[2] Thompson K F M. Light hydrocarbons in subsurface sediments. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43: 657-672.

[3] Schaefer R.G, Leythaeuser D. Analysis of trace amounts of hydrocarbons ($C_2$-$C_8$) from rock and crude oil samples and its application in petroleum geochemistry. Physics and Chemistry of The Earth, 1980, 12: 149-156.

[4] Schaefer R G, Weiner B, Leythaeuser D. Determination of sub-nanogram per gram quantities of light hydrocarbons ($C_2$-$C_9$) in rock samples by hydrogen stripping in the flow system of a capillary gas chromatograph. Anal. Chem, 1978, 50: 1848-1854.

[5] Hunt J M. Origin of gasoline range alkanes in the deep sea. Nature, 1975, 254: 411-413.

[6] Thompson K F M. Classification and thermal history of petroleum based on light hydrocarbons. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47 (2): 303-316.

[7] Mango F D. An invariance in the isoheptanes of petroleum. Science, 1987, 237: 514-517.

[8] Mango F D.The origin of light hydrocarbons in petroleum: A kinetic test of the steady-state catalytic hypothesis. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54 (5): 1315-1323.

[9] Mango F D. Transition metal Catalysis in the Generation of petroleum and natural gas. Geochim Cosmochm Acta, 1992, 56: 553-555.

[10] Mango F D. The origin of light hydrocarbons in petroleum: ring preference in the closure of carbocyclic rings. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 895-901.

[11] Halpern H I. Development and applications of light hydrocarbons-based star diagrams. AAPG Bulletin, 1995, 79: 801-815.

[12] George S C, Boreham C J, Minifie S A, et al. The effect of minor to moderate biodegradation on $C_5$ to $C_9$ hydrocarbons in crude oils. Organic Geochemistry, 2002, 33 (12): 1293-1317.

[13] 林壬子,张敏,徐中一.轻质油中 $C_1$-$C_7$ 轻烃的地球化学特征.石油天然气学报, 1989, 11 (1): 150-161.

[14] 王培荣,张大江,肖廷荣等.江汉盆地原油轻烃的地球化学特征.石油勘探与开发, 2005, 32 (3): 45-471.

[15] Leythaeuser D, Schaefer R G, Cornford C, et al. Generation and migration of light hydrocarbons ($C_2$-$C_7$) in sedimentary basins. Organic Geochemistry, 1979, 1 (4): 191-204.

[16] Snowdon L R. Immature oil and condensate modification of hydrocarbon generation model for terrestrial organic matter. AAPG Bull, 1982, 66 (6): 775-788.

[17] 沈平,陈践发,彭韵硕.轻烃中 $C_6$ 族组成和芴系化合物与沉积环境的关系.沉积学报, 1992, 10 (1): 68-751.

[18] 王祥,张敏,黄光辉.典型海相油和典型煤成油轻烃组成特征及地球化学意义.天然气地球科学, 2008, 19 (1): 18-22.

[19] 胡惕麟,戈葆雄,张义纲等. 源岩吸附烃和天然轻烃指纹参数的开发和应用.石油实验地质, 1990, 12 (4): 378-379.

[20] 王培荣,徐冠军,肖廷荣等.用 $C_7$ 轻烃参数判识烃源岩沉积环境的探索.石油勘探与开发, 2007, 34 (2): 156-159.

[21] Philippi G T. The deep subsurface temperature controlled origin of the gaseous and gasoline-range hydrocarbons of petroleum. Geochim Cosmochim Acta, 1975, 39 (10): 1353-1373.

[22] Thompson K F M. Fractionated aromatic petroleums and the generation of gas-condensates. Organic Geochemistry, 1987, 11 (6): 573-590.

[23] 王廷栋,王海清,李绍基等.以凝析油轻烃和天然气碳同位素特征判断气源.西南石油学院学报, 1989, 11 (3): 1-15.

[24] 朱扬明,张春明.Mango 轻烃参数在塔里木原油分类中的应用.地球化学, 1999, 28 (1): 26-33.

[25] Mango F D. Transition metal catalysis in the generation of natural gas. Organic Geochemistry, 1996, 24 (10-11): 977-984.

[26] 张敏,张俊.Mango 轻烃参数的开发与应用.石油勘探与开发, 1998, (25): 26-28.

[27] Bement W O, Levey R A, Mango F D. The temperature of oil generation as defined with $C_7$ chemistry maturity parameter (2,4-DMP/2,3-DMP ratio). In: Grimalt J O, Dorronsoro C (Eds.), Organic Geochemistry: Developments and Applications to Energy, Climate, Environment and Human History. A.I.G.O.A. Donostia-San Sebastian, 1995, 505-507.

[28] Barker C E, Pawlewicz M J. An empirical determination of the minimum number of measurements needed to estimate the mean random vitrinite reflectance of disseminated organic matter. Organic Geochemistry, 1993, 20 (6): 643-651.

[29] 李广之,吴向华.异构比 $i\mathrm{C}_4/n\mathrm{C}_4$ 和 $i\mathrm{C}_5/n\mathrm{C}_5$ 的石油地质意义.物探与化探, 2002, 26 (2): 135-139.

[30] 侯读杰,王培荣,林壬子等.茂名油页岩裂解气轻烃组成和热演化特征.石油天然气学报, 1989, 11 (4): 7-11.

[31] 徐志明,王廷栋,姜平等.原油水洗作用与高凝固点原油的成因探讨.地球化学, 2000, 29 (6): 556-561.

[32] 林壬子.轻烃技术在油气勘探中的应用.武汉:中国地质大学出版社,1990.

[33] 李守军.正构烃、姥鲛烷对沉积环境的指示意义——以山东济阳坳陷为例.石油大学学报:自然科学版, 1999, 23 (5): 14-23.

[34] Tissot B, Deroo G, Hood A. Geochemical study of the Uinta Basin: formation of petroleum from the Green River formation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1978, 42 (10): 1469-1485.

[35] Shen Guoying, Fan Shanfa, Lin Dehan, et al. The geochemistry of *n*-alkanes with an even-odd predominance in the Tertiary Shahejie Formation of northern China. Physics and Chemistry of The Earth, 1980, 12: 115-121.

[36] Mello M R, Telnaes N, Gaglianone P C, et al. Organic geochemical characterisation of depositional palaeoenvironments of source rocks and oils in Brazilian marginal basins. Organic Geochemistry, 1988, 13 (1-3): 31-45.

[37] Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediment. Organic Geochemistry, 1987, 11 (6): 513-527.

[38] 朱扬明,苏爱国,梁狄刚等.柴达木盆地咸湖相生油岩正构烷烃分布特征及其成因.地球化学, 2003, 32 (2): 117-123.

[39] Tissot B, Pelet R, Roueache J, et al. Alanes as geochemical fossils indicators of geological environments. In: Campos R, Goni J. Advances in Organic Geochemistry. Madrid: Enadimsa, 1977, 117-154.

[40] 罗宪婴,赵宗举,孟元林.正构烷烃奇偶优势在油源对比中的应用——以塔里木盆地下古生界为例. 石油实验地质. 2007, 29 (1): 74-77.

[41] 王铁冠. 我国一些地区原油与生油岩中某些沉积环境生物标志物初探.见:王铁冠. 生物标志物地球化学研究. 武汉:中国地质大学出版社,1990, 55-65.

[42] Goosens J, De leeuw J W, Schenck P A, et al. Tocopherols as likely precursors of pristane in ancient sediments and crude oils. Nature, 1984, 312: 440-442.

[43] Chappe G, Albrecht P. Polar lipids of archaebacteria in sediment and petroleum. Science, 1982, 217: 65-66.

[44] 黄第藩,李晋超.陆相沉积中的未熟石油及其意义.石油学报, 1987, 8 (1): 1-9.

[45] 周光甲. 陆相块断湖盆油气生成的地球化学模式. 石油与天然气地质,1992, 13 (4): 359-370.

[46] 周光甲.陆相块断盆地中低熟原油.有机地球化学论文集.北京:地质出版社, 1987.

[47] 王秉海.胜利油区地质研究与勘探实践.东营:石油大学出版社,1992.

[48] Brassell S C, Comet P A, Eglinton G, et al. The origin and fate of lipids in the Japan. Trench Physics and Chemistry of The Earth, 1980, 12: 375-392.

[49] 韩方,方伟,李荣.异构烷烃分析及在石油地质研究中的应用.大庆石油地质与开发, 2000, 19 (2): 15-17.

[50] Cardoso J N, Watts C D, Maxwell J R, et al. A biochemical study of the Abu Dhabi algal mats: a simplified ecosystem. Chem. Geol, 1978, 23: 273-291.

[51] Philp R. P, Brown S, Calvin M, et al. Hydrocarbon and fatty acid distributions in recently deposited algal mats at Laguna Guerrero, Baja California. In: Environmental Biogeochemistry and Geomicrobiology/ The Aquatic Environment, 1978, 255-270.

[52] De Leeuw J W, Sinninghe D J S, Klok J, et al. Biochemistry of Gavish Sabkha sediments I: Studies on neutral reducing sugars and lipid moieties by gas chromatography-mass spectrometry. In: Hypersaline Ecosystems-The Gavish Sabkha Ecological Studies, 1985, 53: 350-367.

[53] Dembitsky V M, Dor I, Shkrob I, et al. Branched alkanes and other apolar compounds produced by the cyanobacterium Microcoleus vaginatus from the Negev Desert. Russian Journal of Bioorganic Chemistry, 2001, 27: 110-119.

[54] Kenig F, Simons D H, Anderson K B. Distribution and origin of ethyl-branched alkanes in a Cenomanian transgressive shale of the Western Interior Seaway (USA). Organic Geochemistry, 2001, 32 (7): 949-954.

[55] Fowler MG, Douglas A G. Saturated hydrocarbon biomarkers in oils of Late Precambrian age from Eastern Siberia. Organic Geochemistry, 1987, 11: 201-213.

[56] Summons R E. Branched alkanes from ancient and modern sediments: Isomer discrimination by GC/MS with multiple reaction monitoring. Organic Geochemistry, 1987, 11 (4): 281-289.

[57] Warton B, Alexander R, Kagi R I. Identification of some single branched alkanes in crude oils. Organic Geochemistry, 1997, 27 (7-8): 465-476.

[58] Hoffmann C F, Foster C B, Powell T G, et al. Hydrocarbon biomarkers from Ordovician sediments and the fossil alga Gloeocapsomorpha prisca Zalessky. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51 (10): 2681-2697.

[59] Shiea J, Brassell S C, Ward D M. Mid-chain branched mono- and dimethyl-alkanes in hot spring cyanobacterial mats: A direct biogenic source for branched alkanes in ancient sediments? Organic Geochemistry, 1990, 15 (3): 223-231.

[60] Fulco A J. Fatty acid metabolism in bacteria. Prog. Lipid Res, 1983, 22: 133-160.

[61] Thiel V, Jenisch A, Wörheide G, et al. Mid-chain branched alkanoic acids from “living fossil” demosponges: a link to ancient sedimentary lipids? Organic Geochemistry, 1999, 30 (1): 1-14.

[62] Musayev I A, Kurashova E K, Simanyuk R N, et al. Hydrocarbons from West Siberian crude oils. Petroleum Chemistry U.S.S.R., 1985, 25: 76-82.

[63] Kurashova E K, Musayev I A, Smirnov M B, et al. Hydrocarbons of Khar'yag crude oil. Petroleum Chemistry U.S.S.R., 1989, 29: 206-220.

[64] Sugiyama T, Matsuura H, Sasada H, et al. Characterization of fatty acids in the sebum of goats according to sex and age. Agricultural and Biological Chemistry 1986, 50: 3049-3052.

[65] Warton B, Alexander R, Kagi R I. The effect of maturation on the distribution of monoethylalkanes in Late Cretaceous sedimentary rocks and crude oils from the Gippsland Basin, Australia. Organic Geochemistry, 1998, 29 (1-3): 593-604.

[66] Kenig F, Simons D H, Crich D, et al. Structure and distribution of branched aliphatic alkanes with quaternary carbon atoms in Cenomanian and Turonian black shales of Pasquia Hills (Saskatchewan, Canada). Organic Geochemistry, 2005, 36 (1): 117-138.

[67] Dutkiewicz A, Volk H, Ridley J, et al. Geochemistry of oil in fluid inclusions in a middle Proterozoic igneous intrusion: implications for the source of hydrocarbons in crystalline rocks. Organic Geochemistry, 2004, 35 (8): 937-957.

[68] Summons R E, Powell T G, Boreham C J. Petroleum geology and geochemistry of the Middle Proterozoic McArthur Basin, Northern Australia: III. Composition of extractable hydrocarbons. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52 (7): 1747-1763.

[69] 陈建平,梁狄刚,王绪龙等.彩南油田多源混合原油的油源(二)——原油地球化学特征、分类与典型原油油源.石油勘探与开发, 2003,5: 34-38.

[70] Rontani J F, Giusti G. Study of the biodegradation of poly-branched alkanes by a marine bacterial community. Marine Chemistry, 1986, 20 (2): 197-205.

[71] Radke M, Rullkötter J, Vriend S P. Distribution of naphthalenes in crude oils from Java Sea: source and maturation effects. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58 (17): 3675-3689.

[72] Alexander R, Kagi R I, Rowland S J, et al. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some Ancient sediments and petroleum. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1985, 49 (2): 385-395.

[73] Aarssen B G K, Bastow T P, Alexander R, et al. Distributions of methylated naphthalenes in crude oils: indicators of maturity, biodegradation and mixing. Organic Geochemistry, 1999, 30 (10): 1213-1227.

[74] 丁安娜,惠荣耀,张中宁.准格尔盆地白家海凸起湖相原油与烃源岩芳烃地球化学特征.石油勘探与开发, 1997, 24 (3): 15-20.

[75] 朱扬明.生油岩五环芳烃的热演化及成熟度参数.地质地球化学, 1998, (1): 75- 80.

[76] 李美俊,王铁冠.原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用.石油实验地质, 2005, 27 (6): 606-611.

[77] Radke M, Welte D H, Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbon: influence of the organic matter type. Organic Geochemistry, 1986, 10 (1-3): 51-63.

[78] 任拥军,李瑞雪.西藏措勒盆地地下白垩统海相灰岩的芳烃地球化学特征.沉积学报, 2001, 19 (2): 283-286.

[79] Norgate C M, Boreham C J, Wilkins A J. Changes in hydrocarbon maturity indices with coal rake and type, Buller coalfield, NewZealand. Organic Geochemistry, 1999, 30 (8): 985-1010.

[80] 卢双舫,赵锡嘏,王子文等.煤成烃生成和运移的模拟实验-芳烃产物的特征及其意义.石油学报, 1996, 1: 47-53.

[81] 陈致林,李素娟,王忠.低-中成熟演化阶段芳烃成熟度指标的研究.沉积学报, 1997, 2: 192-197.

[82] Fisher S J, Alexander R, Kagi R I, et al. Aromatic hydrocarbons as indicators of petroleum biodegradation and multiple accumulation events in North Western Australian Oil Reservoirs. In: Proceedings of the WA Basins Symposium, Perth, WA, 1998.

[83] George S C, Lisk M, Summons R E, et al. Constraining the oil charge history of the South Pepper oilfield from the analysis of oil-bearing fluid inclusions. Organic Geochemistry, 1998, 29 (1-3): 985-1010.

[84] Radke M, Leythaeuser D, Teichmüller M. Relationship between rank and composition of aromatic hydrocarbons for coals of different origins. Organic Geochemistry, 1984, 6: 423-430.

[85] Ahmed M, Smith J W, George S C. Effects of biodegradation on Australian Permain coals. Organic Geochemistry, 1999, 30: 1311-1322.

[86] Rowland S J, Alexander R, Kagi R I, et al. Microbial degradation of aromatic components of crude oils: a comparison of laboratory and field observations. Organic Geochemistry, 1986, 9: 153-161.

[87] Bayona J M, Albaiges J, Solanas A M, et al. Selective aerobic degradation of methylsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons in petroleum by pure microbial cultures. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1986, 23: 289-303.

[88] 孟仟祥,房嬛,徐永昌等.柴达木盆地石炭系烃源岩和煤岩生物标志物特征及其地球化学意义.沉积学报, 2004, 22 (4): 730-736.

[89] 王铁冠,何发岐,李美俊等.烷基二苯并噻吩类:示踪油藏充注途径的分子标志物. 科学通报, 2005, 50 (2): 176-182.

[90] 姜乃煌,朱光有,张水昌等.原油似甲基二苯并噻吩含量与沉积环境及次生变化的关系.地学前缘, 2008, 15 (2): 186-193.

[91] 张敏,张俊.塔里木盆地原油噻吩类化合物的组成特征及地球化学意义.沉积学报, 1999, 17 (1): 121-126.

[92] 包建平,王铁冠,陈发景.烃源岩中烷基二苯并噻吩组成及地球化学意义.石油大学学报, 1996, 20 (1): 19-23.

[93] Hughes W B, Holba A G, Leon I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59 (17): 3581-3598.

[94] 罗健,程克明,付立新等.烷基二苯并噻吩——烃源岩热演化新指标.石油学报, 2001, 22 (3): 27-32.

[95] Chakhmakchev A, Suzuki M, Takayama K. Distrubution of alkylated dibenzothiophenes in petroleum as a tool for maturity assessments. Organic Geochemistry, 1997, 26 (7): 483-490.

[96] Santamaria O D, Horsfield B, Di P R, et al. Influence of maturity on distributions of benzo-and dibenzothiophenes in Tithonian source rocks and crude oils, Sonda de Campeche, Mexico. Organic Geochemistry, 1988, 28 (7-8): 423-439.

[97] 李素梅,庞雄奇,金之钧等.沉积物中NSO杂环芳烃的分布特征及其地球化学意义.地球化学, 2001, 30 (4): 346-352.

[98] 孟仟祥,张松林,崔明中等.不同沉积环境湖相低熟原油的芳烃分布特征.沉积学报, 1999, 17 (1): 112-120.

[99] 李林强,林壬子.利用芳烃化合物研究东濮凹陷西斜坡地区原油成熟度.沉积学报, 2005, 22 (2): 361-365.

[100] 妥进才.柴达木盆地第三系芳烃的地球化学——二环芳烃与多环芳烃的关系. 石油实验地质, 1996, 18 (4): 406-412.

[101] 张立平,黄第藩.某些海相烃源岩中多环芳烃的组成特征.石油勘探与开发, 1997, 24 (2): 10-14.

[102] Lu Shantan, Kaplan I R. Diterpanes, triterpanes, steranes and aromatic hydrocarbons in natural bitumens and pyrolysates from different humic coals. Geochimic et Cosmochimica Acta. 1992, 56: 2761-2788.

[103] Larter S R. Reservoir geochemistry as a reservoir appraisal and management tool, and evaluation. AAPG Bulletin, 1995, 79 (8): 271-282.

[104] 黎茂稳.油气二次运移研究的基本思路和几个应用实例.石油勘探与开发, 2000, 27 (4): 11-19.

[105] 王传远,段毅,杜建国.母源、沉积环境和成熟度对中性含氮化合物分布的影响.新疆石油地质, 2008, 29 (3): 209-302.

[106] 朱扬明,傅家谟,盛国英等.塔里木盆地不同成因原油吡咯氮化合物的地球化学意义.科学通报,1997, 42 (23): 2528-2531.

[107] Clegg H, Wilkes H. Carbazole distributions in carbonate and clastic source rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61 (24): 5335-5345.

[108] 李素梅,王铁冠,张爱云等.原油中吡咯类化合物的地球化学特征及其意义.沉积学报, 1999, 17 (2): 312-317.

[109] Zhang Chunming, Zhang Yuqing, Zhang Min, et al. Carbazole distributions in rocks from non-marine depositional environments. Organic Geochemistry, 2008, 39 (7): 868-878.

[110] Horsfield B, Clegg H, Wilkes H, et al. Maturity control of carbazole distributions in petroleum systems. Naturwissenschaften, 1998, 85: 233-237.

[111] Li Maowen, Yao Huanxin, Stasiuk L D, et al. Effect of maturity and petroleum expulsion on pyrrolic nitrogen compound yields and distributions in Duvernay formation petroleum-source rocks in central Alberta, Canada. Organic Geochemistry, 1997, 26 (11-12): 731-744.

[112] 王青春,朱扬明,贺萍等.中性含氮化合物的演化及地化意义.地质地球化学, 2002, (4): 15-19.

[113] Beach F, Peakman T M, Abbott G D, et al. Laboratory thermal alteration of triaromatic steroid hydrocarbons. Organic Geochemistry, 1989, 14 (1): 109-111.

[114] 张水昌,Moldowan J M, Li Maowen.分子化石在前寒纪地层中的异常分布及其生物学意义.中国科学.D 辑, 2001, 31 (4): 34-37.

[115] 梁狄刚,陈建平.中国南方高、过成熟区海相油源对比问题.石油勘探与开发, 2005, 32 (2): 8-14.

[116] 王培荣,周光甲.生物标志物地球化学.荆州:江汉石油学院分析测试研究中心, 2000.

[117] 王培荣,徐冠军,边立曾等.海黍子马尾藻(Sargassum muticum)中甾醇类化合物的研究.科学通报.2006, 51 (14): 1702-1709.

[118] 妥进才,邵宏吮,黄杏仁.盐湖相生油岩中某些地球化学参数与沉积环境的关系. 沉积学报, 1994, 12 (3):114-119.

[119] Tanncnpum E, Ruth E, Kapbo L R. Steranes and triterpanes generated from kerogen pyrolysis in the absence and presence of minerals. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50: 805-812.

[120] 潘志清,黄第藩,林壬子.原油和生油岩中完整短链甾类系列化合物($C_{20}$-$C_{26}$)的发现及其意义.沉积学报, 1991, 9 (2): 106-113.

[121] Li Maowen, Jiang Chunqing. Bakken/Madison petroleum systems in the Canadian Williston Basin. Part 1: $C_{21}$-$C_{26}$ 20-*n*-alkylpregnanes and their triaromatic analogs as indicators for Upper Devonian Mississippian epicontinental black shale derived oils. Organic Geochemistry, 2001, 32: 667-675.

[122] 王作栋,孟仟祥,陶明信等.烃源岩中 $C_{19}$-$C_{29}$ 甾烷系列和 25-降藿烷系列的检出及其地质意义.沉积学报, 2009, 27(1): 180-185.

[123] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc., 1993.

[124] 黄杏珍,邵宏舜,顾树松等.柴达木盆地的油气形成与寻找油气田方向. 兰州:甘肃科学技术出版社, 1993.

[125] Schenck P A. 作为沉积环境指标的生物标志物//中国科学院地球化学研究所有机地球化学研究室研究年报——生物标志物和干酪根.贵阳:贵州人民出版社, 1986.

[126] 陈致林,李素娟.甲藻甾烷——一种生源和沉积环境的生物标志物.石油勘探与开发. 1994, 21(3): 60-64.

[127] 吉利明,郑建京,孟仟祥等.沉积有机质中甾烷、4-甲基甾烷植物花粉来源的直接证据. 地球化学, 2000, 29(2): 175-179.

[128] Summons R E, Volkman J K., Boreham C J. Dinosterane and other steroidal hydrocarbons of dinoflagellate origin in sediments and petroleum. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51 (11): 3075-3082.

[129] Goodwin N S, Mann A L, Patience R L. Structure and significance of $C_{30}$ 4-methyl steranes in lacustrine shales and oils. Organic Geochemistry, 1988, 12 (5): 495-506.

[130] Wolff G A, Lamb N A, Maxwell J R. The origin and fate of 4-methyl steroid hydrocarbons. I. Diagenesis of 4-methyl sterenes. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50 (3): 335-342.

[131] 罗斌杰,王有孝,孟仟祥等.原油、煤和沉积物中二环烷烃的地球化学意义.中国科学. 1990, B(4): 419-430.

[132] Alexander R, Kagi R I, Noble R, et al. Identification of some bicyclic alkanes in petroleum. Organic Geochemistry, 1984, 6: 63-72.

[133] 张枝焕,杨藩,李东明等.中国新生界咸水湖相烃源岩和原油生物标志物组合特征.沉积学报, 1998, 16 (3): 119-131.

[134] Ourisson G. Frontiers of organic geochemistry: some unresolved problems. Organic Geochemistry, 1990, 16 (1-3): XXI-XXIV.

[135] 傅家谟,盛国英.中国分子有机地球化学研究进展.沉积学报, 1992, 19 (3): 25- 39.

[136] 傅家谟,盛国英,许家友等.应用生物标志化合物参数判识古沉积环境.地球化学, 1991, 1: 1-12.

[137] Mackenzie A S, Brassell S C, Eglinton G, et al. Chemical fossils: the geological fate of steroids. Science, 1982, 217: 491-504.

[138] 金强,查明.柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究.地质科学, 2000, 35 (4): 465-473.

[139] 史继扬,向明菊,周友平.生物标志物藿烷类的单体碳稳定同位素研究.沉积学报, 2006, 18 (2): 310-318.

[140] Summons R E, Jahnke L L. Identification of the methylhopanes in sediments and petroleum. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54 (1): 247-251.

[141] Brocks J J, Buick R, Summons R E, et al. A reconstruction of Archean biological diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-year-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley Basin, Western Australia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67 (22): 4321-4335.

[142] Eigenbrode J L, Freeman K H, Summons R E. Methylhopane biomarker hydrocarbons in Hamersley Province sediments provide evidence for Neoarchean aerobiosis. Earth and Planetary Science Letters, 2008, 273 (3-4): 323-331.

[143] 王广利,王铁冠,张林晔等.2-甲基藿烷:陆相湖盆中古沉积环境的分子化石.地质学报, 2006, 80 (6): 902-909.

[144] Nytoft H P, Lutnæs B F, Johansen J E. 28-Nor-spergulanes, a novel series of rearranged hopanes. Organic Geochemistry, 2006, 37 (7): 772-786.

[145] Moldowan J M, Fago F J, Robert M K, et al. Rearranged hopanes in sediments and petroleum. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55 (11): 3333-3353.

[146] 王春江,傅家谟,盛国英等.18α(H)-新藿烷及 17α(H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用. 科学通报, 2000, 45 (13): 1366-1372.

[147] 赵孟军,张水昌.17α(H)-重排藿烷在塔里木盆地中的指相意义.石油勘探与开发, 2001, 28 (1): 36-38.

[148] 张文正,杨华,候林慧等.鄂尔多斯盆地延长组不同烃源岩 17α(H)-重排藿烷的分布及其地质意义. 中国科 D 辑: 地球科学, 2009, 39 (10): 1438-1445.

[149] 朱扬明,钟荣春,蔡勋育等.川中侏罗系原油重排藿烷类化合物的组成及成因探讨.地球化学, 2007, 36 (3): 253-260.

[150] Volkman J K, Alexander R, Kagi R I, et al. Demethylated hopanes in crude oils and their applications in petroleum geochemistry. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47: 785-794.

[151] 陈义贤,黄永松.检出于重油中的25-降藿烷系列化合物//中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放实验室研究年报.北京:科学出版社, 1988: 70-76.

[152] Peters K E, Moldowan J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum. Organic Geochemistry, 1991, 17: 47-61.

[153] Moldowan J M, McCaffrey M A. A novel microbial hydrocarbon degradation pathway revealed by hopane demethylation in a petroleum reservoir. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 1891-1894.

[154] Chosson P, Connan J, Dessort D, et al. In vitro biodegradation of steranes and terpanes: a clue to understanding geological situations. In: Moldowan J M, Albrecht P, Philp R P (Eds.), Biological Markers in Sediments and Petroleum. Prentice Hall Inc., 1992: 320-349.

[155] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide. second ed. Wiley, New York: Prentice Hall Inc., 2005.

[156] 倪春华.25-降藿烷系列化合物及其在油藏地球化学研究中的应用.江苏地质,2008, 32 (1): 50-54.

[157] Blanc P H, Connan J. Origin and occurrence of 25-norhopanes: a statistical study. Organic Geochemistry, 1992, 18 (6): 813-828.

[158] Bennett B, Fustic M, Farrimond P, et al. 25-Norhopanes: Formation during biodegradation of petroleum in the subsurface. Organic Geochemistry, 2006, 37 (7): 787-797.

[159] 包建平,梅博文.25-降藿烷系列的“异常”分布及其成因.沉积学报, 1997, 15 (2): 179-183.

[160] 杜宏宇,王铁冠,胡剑梨等.三塘湖盆地上二叠统烃源岩中的 25-降藿烷系列与微生物改造作用.石油勘探与开发, 2004, 31 (1): 42-44.

[161] 包建平.未降解原油和生油岩中的降藿烷系列.科学通报, 1996, 41 (20): 1875-1878.

[162] 曾宪章,梁狄刚.中国陆相原油和生油岩生物标志物.兰州:甘肃省科学技术出版社, 1989.

[163] 宋一涛,李树清.济阳坳陷富含伽玛蜡烷生油岩及其原油特征和成因探讨.石油技术, 1989, 11 (5): 1-10.

[164] 张枝焕,杨藩,李东明等.中国新生界咸化湖相有机地球化学研究进展.地球科学进展, 2000, 15 (1): 65-70.

[165] Alberdi M, López L. Biomarker 18α(H)-oleanane: a geochemical tool to assess Venezuelan petroleum systems. Journal of South American Earth Sciences, 2000, 13 (8): 751-759.

[166] Wei Z, Moldowan J M, Peters K E, et al. The abundance and distribution of diamondoids in biodegraded oils from the San Joaquin Valley: implications for biodegradation of diamondoids in petroleum reservoirs. Organic Geochemistry, 2007, 38: 1910-1926.

[167] Azevedo D A, Tamanqueira J B, Dias J C M, et al. Multivariate statistical analysis of diamondoid and biomarker data in selected oil samples from Brazilian basins. Fuel, 2008, 87: 2122-2130.

[168] Wingert W S. GC-MS analysis of diamondoid hydrocarbons in Smackover Petroleum. Fuel, 1992, 71: 37-43.

[169] Chen J H, Fu J M, Sheng D H, et al. Diamondoid hydrocarbon ratios: novel maturity indices for highly mature crude oils. Organic Geochemistry, 1996, 25: 179-190.

[170] 曾凡刚,程克明.利用双金刚烷指标研究下古生界海相碳酸盐岩的热成熟度. 地质地球化学,1998, 26 (3): 16-20.

[171] 李景贵,崔明中,张谦.双金刚烷指标作为下古生界高、过成熟阶段碳酸盐岩成熟度衡量标尺的讨论.石油勘探与开发,1998, 25 (2): 83-85.

[172] Bennett B, Jiang C, Larter S R. Identification and occurrence of 25-norbenzohopanes in biodegraded bitumen from Palaeozoic carbonates in northern Alberta. Organic Geochemistry, 2009, 40 (6): 667-670.

[173] 施伟军,蒋宏,席斌斌等.油气包裹体成分及特征分析方法研究.石油实验地质, 2009, 31 (6): 643-648.

[174] 刘德汉,卢焕章,肖贤明.油气包裹体及其在石油勘探和开发中的应用.广州: 广东科技出版社,2007.

[175] 卢焕章,范宏瑞,倪培等. 流体包裹体.北京:科学出版社,2004.

[176] Liu K, Eadington P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconst ructing hydrocarbon charge history. Organic Geochemistry, 2005, 36: 1023-1036.

[177] 张金亮,常象春.民和盆地致密砂岩油藏油气充注史及含油气系统研究.特种油气藏, 2000, 7 (4): 5-8.

[178] 程光煦.拉曼布里渊散射——原理及应用.北京:科学出版社,2001.

[179] 宫色.储层有机包裹体成分分析方法的建立及其应用研究:(博士学位论文). 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 2006.

[180] 王兴光,苗洪波,李建臣等.原油与其烃源岩中甾萜类化合物指标的差异.大庆石油地质与开发, 2008, 27 (1): 18-21.

[181] 李素梅,庞雄奇,刘可禹等.一种快速检测油包裹体的新方法——颗粒包裹烃定量荧光分析技术及其初步应用.石油实验地质, 2006, 28 (4): 386-390.

[182] Liu K, George S C, Li S, et al. Total Scanning Fluorescence (TSF) as an effective screening tool for delineating oil families. 22nd International Meeting on Organic Geochemistry. Seville, Spain, 2005: 1128-1129.

[183] 周建伟,李术元,钟宁宁.利用催化加氢热解技术提取沉积有机质中生物标志化合物.石油学报, 2006, 27 (1): 58-63.

[184] Roedder, E. Reviews in Mineralogy. 12: Fluid Inclusions. Washington, DC: Mineralogical Society of America Pr., 1984.

[185] Siljeström S, Hode T, Lausmaa J, Sjövall P, et al. Detection of organic biomarkers in crude oils using ToF-SIMS. Organic Geochemistry, 2009, 40 (1): 135-143.

[186] Volk H, Fuentes D, Fuerbach A, et al. First on-line analysis of petroleum from single inclusion using ultrafast laser ablation. Organic Geochemistry, 2010, 41 (2): 74-77.

[187] Wang Tieguan. Geochemical characteristics of Longtangou bituminous sandstone in Lingyuan, eastern Yanshan region, north China—approach to a Precambrian reservoir bitumen. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 5 (1-4): 373-379.

[188] 朱士兴,黄学光,孙淑芬.华北燕山中元古界长城系研究的新进展.地层学杂志, 2005, 29 (S1): 437-449.

[189] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geologic time scale with special reference to Precambrian and Neogen. Episodes, 2004, 27 (2): 83-100.

[190] 乔秀夫,高林志,张传恒.中朝板块中、新元古界年代地层柱与构造环境新思考.地质通报, 2007, 26 (5): 503-509.

[191] 王铁冠.中石化海相油气勘探前瞻性重大研究项目《华北地台下组合含油性研究及区带预测》年度汇报会议, 2008.

[192] Philippi G T. On the depth, time and mechanism of petroleum generation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1965, 29 (9): 1021-1049.

[193] Hoering T C. The organic geochemistry of Precambrian rocks. In: P.H. Abelson (Editor), Researches in Geochemistry, 2nd ed. Wiley, New York, NY, 1967.

[194] Hoering T C, Navale V. A search for molecular fossils in the kerogen of Precambrian sedimentary rocks. Precambrian Research, 1987, 34 (3-4): 247-267.

[195] Li Chao, Peng Ping'an, Sheng Guoying, et al. Precambrian organic matter. Chinese Science Bulletin, 2000, 45 (4): 295-304.

[196] 王铁冠,黄光辉,徐中一.辽西龙潭沟元古界下马岭组底砂岩古油藏探讨.石油与天然气地质, 1988, (3): 278-287.

[197] 郝石生,冯石.华北地区震旦亚界古地温演化及冀中地区原生油气藏形成条件初探.华东石油学院学报, 1982, 1: 1-17.

[198] 郝石生.冀辽坳陷中-上元古界原生油气远景.石油与天然气地质, 1984, 5 (4): 342-348.

[199] 秦建中等.中国烃源岩.北京:科学出版社, 2005.

[200] George S C, Ruble T E, Dutkiewicz A, et al. Assessing the maturity of oil trapped in fluid inclusions using molecular geochemistry data and visually-determined fluorescence colours. Applied Geochemistry, 2001, 16 (4): 451-473.

[201] Sivan P, Datta G C, Singh R R. Aromatic biomarkers as indicators of source, depositional environment, maturity and secondary migration in the oils of Cambay Basin, India. Organic Geochemistry, 2008 39 (11): 1620-1630.

[202] Pu Fan, Philp R P, Zhenxi Li, et al. Biomarker distributions in crude oils and source rocks from different sedimentary environments. Chemical Geology, 1991, 93 (1-2): 61-78.

[203] Volkman J K, Alexander R, Kagi R I, et al. Biodegradation of aromatic hydrocarbons in crude oils from the Barrow Sub-basin of Western Australia. Organic Geochemistry, 1984, 6: 619-632.

[204] Ludwig B, Hussler G, Wehrung P, et al. $C_{26}$-$C_{29}$ triaromaticsteroid derivatives in sediments and petroleum. Tetrahedron Letters, 1981, 22: 3313-3316.

[205] Sánchez O, Ferrera I, Vigués N, et al. Role of cyanobacteria in oil biodegradation by microbial mats. International Biodeterioration & Biodegradation, 2006, 58 (3-4): 186-195.

[206] Schwark L, Empt P. Sterane biomarkers as indicators of palaeozoic algal evolution and extinction events. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 240 (1-2): 225-236.

[207] Li Jinggui, Philp R P, Cui Mingzhong. Unusual *n*-alkane distributions in extracts from marine carbonate rocks at high levels of maturity and overmaturity. Chinese Journal of Geochemistry, 2002, 4: 322-333.

[208] 汪本善,史继杨,张丽杰等.东濮盆地生油层排烃过程中某些生物标志化合物的特征//中国科学院地球化学研究所有机地球化学开放实验室研究年报.贵阳: 贵州人民出报社, 1986:162-168.

[209] 王振平,赵锡嘏.塔里木盆地源岩排烃模拟实验及视排油效率.石油实验地质, 1995, 17 (4): 376.

[210] 辽河油田石油地质志编写组.中国石油地质志 (卷三)——辽河油田.北京:石油工业出版社, 1987.

[211] 刘世会.辽河坳陷勘探成果及部署图.辽河油田勘探开发研究院, 2008, K04001740.

[212] 漆家福,童亨茂,于福生.辽河西部凹陷构造演化及其对油气成藏地质条件的控制作用(文字报告).辽河油田勘探开发研究院, 2008.

[213] 黄第藩,李晋超,周翁红等.陆相有机质演化和成烃机理.北京:石油工业出版社, 1984.

[214] 曾凡刚,程克明.华北地区下古生界海相烃像岩饱和烃生物标志物地球化学特征.地质地球化学, 1998, 26 (3): 25-32.

[215] 常俊合,李新军,吕红玉等.东濮凹陷文留潜山构造文古 2 井原油地球化学特征和油源研究.石油与天然气地质, 2004, 25 (1): 44-48.

[216] 黄醒汉.东濮凹陷第三系石油地质综合研究论文集.华东石油学院(内刊), 1986: 104-120.

[217] Nygård C A, Ekelund N G A. Photosynthesis and UV-B Tolerance of the Marine Alga Fucus vesiculosus at Different Sea Water Salinities. Journal of Applied Phycology, 2006 (18): 461-467.

[218] 包建平,王铁冠,周玉琦等.甲基菲比值与有机质热演化的关系.江汉石油学院学报,1992, 14 (4): 8-13.

[219] Espitalié J, Deroo G, Marquis F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications: Deuxieme partie. Rev. Ins. Fr. Pet. 1985 (40): 755-784.

[220] 张水昌, 黄汝昌, 于新科. 盐湖盆地沉积有机质中的脱羟基维生素 E. 沉积学报, 1990, 8(1):57-63.

[221] Connan J, Nissenaum A, Dessort D. Molecular archaeology: Export of Dead Sea asphalt to Cannan and Egypt in the Chalcolithic-Early Bronze Age (4th-3rd millennium BC). Geochimical et Cosmochimica Acta. 1992 (56): 2743-2759.

[222] Rashby SE, Sessions AL, Summons RE, Newman DK. Biosynthesis of 2-methylbacteriohopanepolyols by an anoxygenic phototroph. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. 2007(104): 15099-15104.

[223] Doughty DM, Hunter RC, Summons RE, Newman DK. 2-Methylhopanoids are maximally produced in akinetes of Nostoc punctiforme: geobiological implications. Geobiology 2009(7):524-532.

[224] Welander PV, Coleman ML, Sessions AL, Summons RE, & Newman DK.Identification of a methylase required for 2-methylhopanoid production and implications for the interpretation of sedimentary hopanes. Proc Natl Acad Sci U S A. 2010, 107(19): 8537-8542.

# 附录 A 表 A.1 燕山地区中元古界特征化合物定量分析总表

| 样品 / 化合物 | Reservoir rock EOMs, Oil 及油苗、沥青 | | | | | | | | 烃源岩 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 下马岭组 | | | 铁岭组 | | | 洪水庄组 | 雾迷山组 | 洪水庄组 | | 高于庄组 | |
| | JQ2-16EOM-3 | KC-HP-3EOM-3 | PQ-SD-21FI oil | JQ2-22EOM-3 | JQ2-24EOM-4 | KC-TS-9FI oil | JQ2-29EOM-4 | JQ1-w-3EOM-3 | JQ1-H-48 | KC2-5_CH | JQ3-191 | GR151-1_CH |
| 2 + 3-甲基烷烃 ($C_{14}$-$C_{20}$) | 12776.06 | 7686.02 | 4110.03 | 14467.56 | 9301.79 | 2214.42 | 17628.41 | 1192.96 | 954.77 | 300.47 | | 215.90 |
| 7 + 8 + 9-甲基十七烷 | 1205.24 | 931.86 | 265.53 | 1414.98 | 1048.05 | 158.63 | 1764.35 | 246.71 | 74.68 | 66.49 | | 45.84 |
| 孕甾烷 + 升孕甾烷 | nd. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | | 3.37 |
| $C_{27}$-$C_{29}$ 甾烷 | nd. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | | 12.89 |
| $C_{29}$ 甾烷 | nd. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | n.d. | | 10.30 |
| $C_{14}$ αβ 二环倍半萜 | 20.24 | 13.75 | 13.62 | 51.39 | 17.89 | 58.91 | 12.78 | 1.89 | 82.28 | 0.18 | nd. | n.d. |
| $C_{15}$ αβ 二环倍半萜 | 23.24 | 17.33 | 11.62 | 56.34 | 19.17 | 82.72 | 19.46 | 3.59 | 110.70 | 36.45 | 1.46 | 6.64 |
| 补身烷 + 升补身烷 | 62.87 | 50.38 | 25.28 | 200.22 | 41.44 | 203.06 | 49.64 | 15.38 | 266.67 | 269.98 | 2.52 | 22.81 |
| $C_{19}$ 13α (H) 三环萜烷 | 28.43 | 51.39 | 8.30 | 278.77 | 49.36 | 69.88 | 21.78 | 24.14 | 99.42 | 420.94 | n.d. | n.d. |
| $C_{19}$ + $C_{20}$ 三环萜烷 | 63.93 | 78.06 | 9.45 | 195.59 | 114.18 | 81.90 | 46.47 | 50.31 | 140.40 | 70.11 | 6.27 | 12.72 |
| 三环萜烷 | 145.04 | 244.17 | 22.22 | 363.15 | 347.50 | 282.44 | 172.59 | 138.51 | 269.56 | 139.11 | 19.22 | 44.81 |
| 藿烷 | 104.62 | 92.57 | 10.10 | 69.05 | 130.15 | 184.92 | 137.02 | 42.55 | 27.47 | 30.39 | 5.74 | 13.81 |
| $C_{24}$ 四环萜烷 | 20.85 | 55.02 | 1.36 | 51.33 | 60.36 | 26.12 | 28.51 | 51.41 | 25.35 | 17.85 | 1.35 | 1.81 |
| $C_{29}$ αβ 藿烷 | 54.77 | 95.61 | 3.71 | 64.28 | 68.95 | 68.45 | 44.48 | 11.69 | 18.22 | 11.04 | 5.12 | 10.18 |
| $C_{30}$ αβ 藿烷 | 80.70 | 97.18 | 4.96 | 91.19 | 88.64 | 96.23 | 66.84 | 13.95 | 26.43 | 19.01 | 6.93 | 19.46 |
| $C_{31}$ 2α- 甲基藿烷 | 1.80 | 2.71 | 0.39 | 1.04 | 3.88 | 1.64 | 3.51 | 1.52 | | 0.36 | 0.84 | 1.65 |
| $C_{31}$ 3β-甲基藿烷 | 1.90 | 3.44 | 0.08 | 1.95 | 3.49 | 3.51 | 3.09 | 1.04 | | 0.07 | 0.72 | 0.33 |
| Ts | 43.54 | 92.69 | 3.69 | 41.14 | 100.79 | 76.92 | 59.81 | 58.65 | 23.40 | 23.77 | 2.37 | 3.58 |
| $C_{29}$ Ts | 37.52 | 71.01 | 2.63 | 25.18 | 72.74 | 58.82 | 58.53 | 22.75 | 16.76 | 16.82 | 1.54 | 3.47 |
| $C_{29}$ 重排藿烷 | 18.44 | 40.17 | 1.87 | 14.47 | 47.90 | 34.72 | 41.96 | 9.07 | 20.40 | 7.77 | 0.95 | 0.89 |
| $C_{30}$ 重排藿烷 | 29.87 | 48.42 | 1.76 | 15.39 | 63.71 | 49.13 | 65.47 | 13.10 | 25.71 | 15.03 | 1.38 | 1.54 |
| 伽马蜡丸 | 7.29 | 9.40 | 0.53 | 5.12 | 10.20 | 13.49 | 9.08 | 4.59 | | 6.79 | | 3.98 |
| 二苯并噻吩 | 2384.72 | 315.61 | 21.14 | 212.49 | 149.21 | 19.41 | 150.02 | 298.70 | 124.67 | 3.03 | 24.72 | 93.31 |
| 二苯并呋喃 | 1588.76 | 228.51 | 1.52 | 108.81 | 83.62 | 1.40 | 71.34 | 553.14 | 18.34 | 5.05 | 10.12 | 144.00 |

注：单位，ng/g ；n.d.,未检测到；tr.,痕量。

# 附录 A 表 A.2 西部凹陷层序划分方案（据朱筱敏等，2008）

| 地层 | | | | 油层 | 地层时代 Ma | 二级层序划分 | 三级层序划分 | 层序底界面上下地层的接触关系 | 构造演化阶段 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 系 | 组 | 段 | 亚段 | | | | | | |
| 新近系 | 馆陶组 | | | | 24.6 | | | 区域性角度不整合（界面下地层被强烈削截） | 坳陷阶段 |
| 古近系 | 东营组 | 一段 | | | 30.8 | Ⅳ | $SQ_{11}$ | 局部不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | 持续-衰减阶段晚期 |
| | | 二段 | | | 33.5 | | $SQ_{10}$ | 局部不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | |
| | | | | | | | $SQ_9$ | 局部不整合（以界面上地层局部上超为主） | |
| | | 三段 | | | 36 | | $SQ_8$ | 区域性微角度到较大角度不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层上超普遍） | |
| | 沙河街组 | 一段 | 上 | | 38 | Ⅲ | $SQ_7$ | 局部不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | 持续-衰减阶段早期 |
| | | | 中 | | | | | | |
| | | | 下 | | | | $SQ_6$ | 区域性（除清水凹陷外）不整合接触（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | |
| | | 二段 | | | | | | | |
| | | 三段 | 上 | 热河台 | 43 | Ⅱ | $SQ_5$ | 局部不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | 深陷阶段 |
| | | | 中 | 大凌河 | | | $SQ_4$ | 局部不整合（界面下地层局部视削截、界面上地层局部上超） | |
| | | | 下 | 莲花 | | | $SQ_3$ | 区域性微角度到角度不整合（界面下地层局部视削截，界面上地层上超现象普遍） | |
| | | 四段 | 上 | 杜家台 | 45.4 | Ⅰ | $SQ_2$ | 较大范围的角度不整合（界面下地层削截、界面上地层上超） | 张裂阶段 |
| | | | | 高升 | | | $SQ_1$ | 区域性角度不整合（界面下地层被强烈削截） | |
| | | | | 牛心坨 | | | | | |
| 盆地基底或房身泡组 | | | | | | | | | |

# 附录 A 表 A.3 西部凹陷构造演化阶段表（据漆家福等，2008）

| 地层 | | 底界年龄(Ma) | 构造演化阶段 | | | 构造作用方式 | 断层活动 | 构造圈闭形成演化 | 构造样式 | 沉降中心分布 | 代表性事件 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 系 | 组段 | | 阶段 | 期 | | | | | | | |
| 新近系 | Nm | 5.1 | 拗陷 | 拗陷 | | | | | | 清水洼陷南部 | |
| | Ng | 23.3 | | | | | | | | 清水洼陷南部 | |
| 古近系 | Ed | 36 | 裂陷 | 裂陷Ⅳ期 | 差异升降 | 走滑 | | | 阶梯断块、陡坡铲式扇、负花状构造、正花状构造、反转构造 | 3 个：清水洼陷、牛心坨－台安洼陷、盘山－陈家洼陷 | 构造单元主要形成和定型期；圈闭主要形成和定型期；油气主导运移期；末期形成区域性不整合 |
| | $Es_{1-2}$ | 38 | | 裂陷Ⅲ期 | 断拗过渡 | | | | | 3 个：清水洼陷、牛心坨－台安洼陷、盘山－陈家洼陷 | 区域性盖层的重要形成期； |
| | $Es_3$ | 43 | | 裂陷Ⅱ期 | 强烈断陷 | 伸展 | | | | 3 个：清水洼陷、盘山－陈家洼陷、牛心坨－台安洼陷 | 洼陷格局和西部斜坡初步形成；烃源岩的重要形成期；早期圈闭主要形成期 |
| | $Es_4$ | 45.4 | | 裂陷Ⅰ期 | 初始裂陷 | | | | 伸展断块、多米诺式断块 | 多个：牛心坨地区最大 | 烃源岩的重要形成期；早期圈闭主要形成期 |

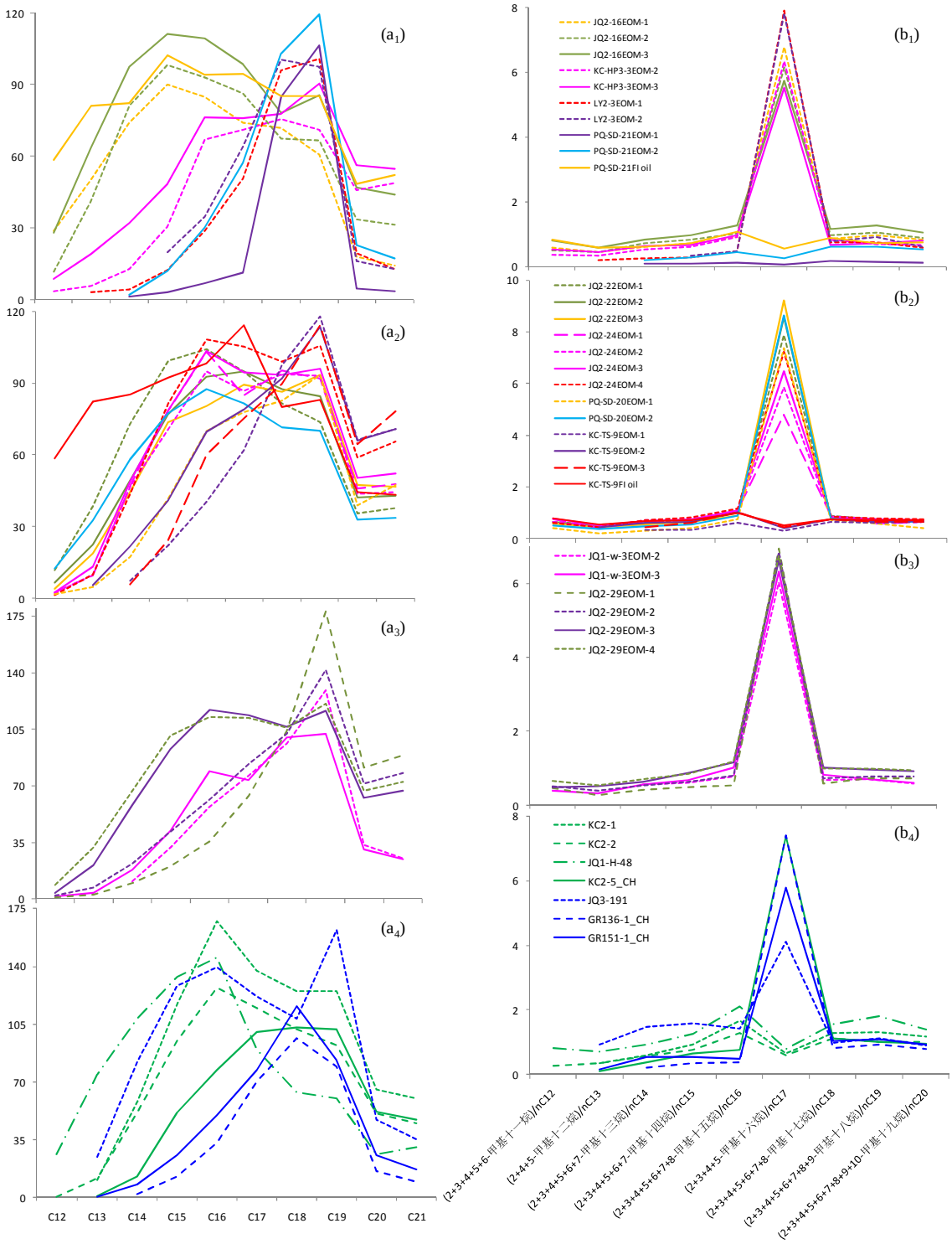
# 附录 A 表 A.4 西部凹陷各层序烃源岩地化特征

| 层段 | 三级层序 | 烃源岩地化特征 | | | 综合评价 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 生源及有机质类型 | 沉积环境特征 | 成熟度特征 | |
| 东营组 | $SQ_8$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$偏重；主峰碳偏后 $nC_{27}$, $C_{21}^-/C_{22}^+$很低；规则甾烷反“L”型, ααα$C_{27}$/ $C_{29}$很低，平均 0.30；莫烷含量很低；Ⅲ型干酪根 | 具明显姥鲛烷优势，氧芴含量大于 70% | *R*o 一般小于 0.5，具明显奇偶优势，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)<0.3, $C_{29}$αββ/(ααα+αββ)<0.25, Tm/Ts 很高 | 藻类和高等植物生源、偏氧化环境，成熟度较低 |
| 沙一、二段 | $SQ_7$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$较轻；$C_{21}^-/C_{22}^+$较高；规则甾烷“L”型, ααα$C_{27}$/ $C_{29}$很高，检测有丰富的 4-甲基甾烷；$Ⅱ_1$型干酪根 | Pr/Ph 较低，伽玛蜡烷含量较高，检测有类胡萝卜烷和 MTTCs | *R*o 一般小于 0.5，具奇偶优势，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)<0.3，$C_{29}$αββ/(ααα+αββ)<0.25, Tm/Ts 很高，δ-MTTCs 很低，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也很小 | 藻类生源、半咸化还原环境，成熟度高-低均有 |
| | $SQ_6$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$轻；$C_{21}^-/C_{22}^+$较高；规则甾烷 $C_{29}$ 高的不对称“V”型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$较低，平均 0.59；三环萜烷/藿烷较高；$Ⅱ_1$-$Ⅱ_2$型干酪根 | Pr/Ph 稍高 | *R*o 接近 0.5，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.3，$C_{29}$αββ/(ααα+αββ) ≥0.25, Tm/Ts 较低，$MPI_1$ 较高 | 细菌水生生源、还原-偏氧化环境，成熟度高 |
| 沙三段 | $SQ_5$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$较轻，主峰碳偏前 $nC_{17}$, $C_{21}^-/C_{22}^+$很高，中值达 2.54，规则甾烷“V”型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$很高，平均 0.93；三环萜烷/藿烷很低；$Ⅰ$-$Ⅱ_1$型干酪根 | Pr/Ph 较低，伽玛蜡烷含量中等，检测有类胡萝卜烷和 MTTCs, 硫芴含量较高 | *R*o>0.5，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.3, $C_{29}$αββ/(ααα+αββ) ≥0.25, Tm/Ts 较低，$MPI_1$ 较高，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也较高 | 菌藻类生源、微咸化还原环境，成熟度很高 |
| | $SQ_4$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$较重；$C_{21}^-/C_{22}^+$较高；规则甾烷“V”型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$很高，平均 0.99，孕甾烷含量也很高；三环萜烷/藿烷很高；$Ⅱ_1$-$Ⅱ_2$型干酪根 | Pr、Ph 均势，氧芴和硫芴含量适中 | *R*o>0.5，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.3，$C_{29}$αββ/(ααα+αββ) ≥0.25, Tm/Ts 很低，$MPI_1$ 很高，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也非常高 | 藻类生源、还原-弱还原环境，成熟度高-低均有 |
| | $SQ_3$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$较重，规则甾烷 $C_{29}$ 高的不对称“V”型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$较低，孕甾烷和莫烷含量也很低，但三环萜烷/藿烷很高；在台安洼陷检测有奥利烷；$Ⅱ_2$型干酪根 | 具 Ph 优势，高伽玛蜡烷含量，检测有类胡萝卜烷和 MTTCs，硫芴含量较高 | *R*o>0.5，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.3，$C_{29}$αββ/(ααα+αββ) ≥0.25, Tm/Ts 较低，δ-MTTCs 很高，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也较高 | 菌藻类生源为主，台安洼陷混有少量高等植物、咸化强还原环境，成熟度较高-低 |
| 沙四段 | $SQ_2$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$轻，H/C 原子比很高，规则甾烷斜线型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$较低，孕甾烷含量较高，三环萜烷/藿烷较高；$Ⅰ$-$Ⅱ_1$型干酪根 | Pr/Ph 很低，高伽玛蜡烷含量，检测有类胡萝卜烷和 MTTCs, 硫芴含量较高 | *R*o>0.5，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.3, $C_{29}$αββ/(ααα+αββ) ≥0.25, Tm/Ts 很低，δ-MTTCs 很高，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也较高（北部较低） | 菌藻类生源为主、咸化强还原环境，成熟度很高-低 |
| | $SQ_1$ | $\delta^{13}C_{干酪根}$ 很轻，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$较高，规则甾烷“V”型，孕甾烷和莫烷含量较高，三环萜烷/藿烷很低；$Ⅱ_1$型干酪根 | Pr/Ph 很低，中伽玛蜡烷含量，检测有 MTTCs, 硫芴含量较高 | *R*o<0.5，具明显奇偶优势，甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)<0.3，$C_{29}$αββ/(ααα+αββ)<0.25,Tm/Ts 很高，δ-MTTCs 很低，三芳甾烷 $C_{20\sim21}/C_{26\sim28}$ 也很小 | 藻类生源为主、半咸化还原环境，成熟度较低 |
| 中生界 | Mz | 规则甾烷反“L”型，ααα$C_{27}$/ $C_{29}$很低，孕甾烷和莫烷含量也很低，但三环萜烷/藿烷很高；Ⅲ型干酪根 | Pr/Ph 较高，较高伽玛蜡烷含量 | 甾烷 ααα$C_{29}$20*S*/(20*S*+20*R*)≥0.35 | 高等植物和细菌生源、干旱半咸化还原环境，成熟度很高 |

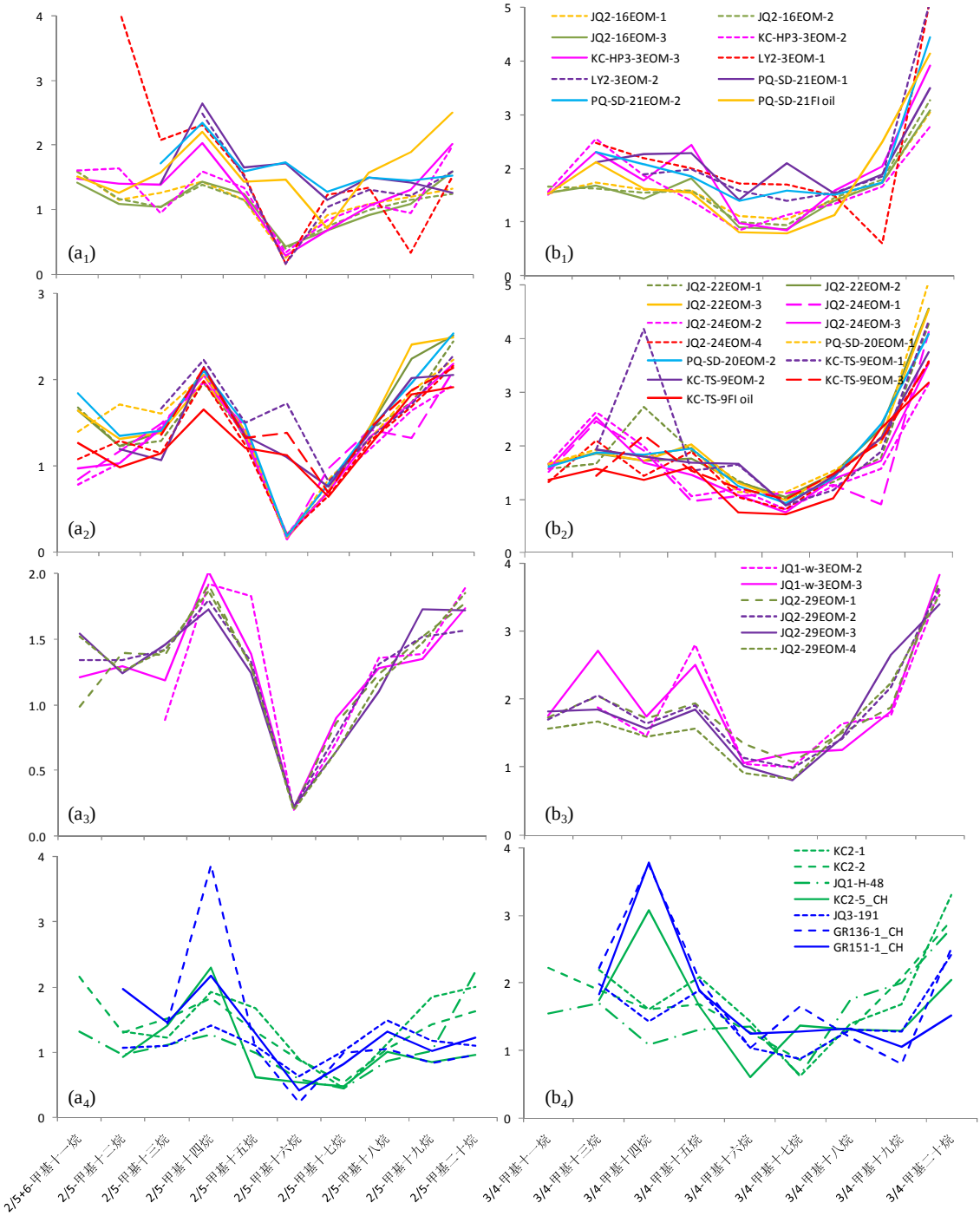
## 附录 A 表 A.5 西部凹陷油源对比结果统计表

| 原油类别 | 原油分布情况 | 原油特征 | 烃源岩地化特征 | 相应的烃源岩 |
|---|---|---|---|---|
| Ⅰ型原油 | 西部凹陷的北部 | 伽玛蜡烷指数很高，平均 2.2；Pr/Ph＜0.8；Ts/Tm 较低，平均 0.39；$C_{24}$四环萜烷含量很高，为高盐强还原生油环境。<br>规则甾烷 ααα20R$C_{27}$/$C_{29}$和规则甾烷 ααα20R$C_{28}$/$C_{29}$都较高，分别为 0.77 和 0.78；三环萜烷/萜烷比值较低，仅为 0.18；原油的碳同位素值较重，最低达-26.7 ‰，平均为-27.3‰，反映为菌藻类生源。 | | 牛心坨-台安洼陷 |
| $Ⅰ_A$型原油 | $Es_3$高升<br>$Es_4$高升、雷家、牛心坨北部 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很低，为 0.10～0.26；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.20～0.27；$MPI_1$和 MPR 都很低，基于 $MPI_1$ 计算的 $R_C$ 仅为 0.6，反映为未熟-低熟油。 | 菌藻类生源、高盐强还原环境，成熟度较低 | $SQ_1$牛心坨洼陷 |
| $Ⅰ_B$型原油 | $Es_3$、$Es_4$牛心坨南部 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很高，为 0.36；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也稍高，为 0.26；$MPI_1$亦较高，基于它计算的 $R_C$ 达 0.7 以上，反映为成熟原油。 | 菌藻类生源为主、高盐强还原环境，成熟度稍高 | $SQ_2$台安洼陷 |
| $Ⅰ_C$型原油 | $Es_4$牛心坨北部<br>$Es_4$雷家 | 饱和烃含量为 20.0%～26.4%，明显低于$Ⅰ_A$型原油（44.3%）和$Ⅰ_B$型（52.2%）原油，而非烃和沥青质的含量较高，为 47.2%～52.2%，$Ⅰ_A$型原油平均为 36.1%，$Ⅰ_B$型更低，仅为 20.9%；色谱图存在明显的 UCM 拱峰，且检测出 25-降藿烷，认为属降解型原油。 | 菌藻类生源为主、高盐强还原环境，成熟度高-低 | $SQ_1$牛心坨洼陷<br>$SQ_2$台安洼陷 |
| Ⅱ型原油 | 西部凹陷的中南段 | 伽玛蜡烷指数较高，平均 0.8；0.8＜Pr/Ph＜1.0；Ts/Tm 较高，平均 0.6；$C_{24}$四环萜烷含量较低，为咸化强还原生油环境。<br>规则甾烷 ααα20R$C_{27}$/$C_{29}$和规则甾烷 ααα20R$C_{28}$/$C_{29}$都较低，分别为 0.65 和 0.63；三环萜烷/萜烷比值较高，平均 0.39；另外还检测到奥利烷；原油的碳同位素值较轻，一般为-28.4‰，反映为藻类和高等植物双重生源。 | | 盘山-陈家洼陷 |
| $Ⅱ_A$型原油 | Ed 兴隆台、冷家北<br>$Es_{1+2}$兴隆台北、冷家北<br>$Es_3$冷家北 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很低，为 0.03～0.30；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.22～0.38；$MPI_1$和 MPR 都很低，基于 $MPI_1$ 计算的 $R_C$ 仅为 0.6，反映为未熟-低熟油。 | 藻类和高等植物生源、咸化强还原环境，成熟度较低 | $SQ_3$盘山-陈家洼陷 |
| $Ⅱ_B$型原油 | Ed 曙光、兴隆台南<br>$Es_{1+2}$兴隆台南<br>$Es_3$兴隆台、冷家北<br>$Es_4$兴隆台、西斜坡过渡带 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很高，为 0.28～0.63；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也稍高，平均 0.38；$MPI_1$亦较高，基于它计算的 $R_C$ 为 0.8，反映为成熟原油。 | 藻类为主，兼有高等植物的生源、还原环境，成熟度较高 | $SQ_4$盘山-陈家洼陷 |
| $Ⅱ_C$型原油 | Ed 大洼<br>$Es_{1+2}$齐曙、兴隆台、冷家南、大洼<br>$Es_3$齐曙、冷家南、大洼<br>$Es_4$西斜坡边部 | 比重普遍偏高，普遍达 0.97g/$cm^3$，远高于$Ⅱ_A$型和$Ⅱ_B$型原油的 0.88g/$cm^3$；饱和烃含量为平均为 33.0%，明显低于$Ⅱ_A$型原油（50.6%）和$Ⅱ_B$型（59.2%）原油，而非烃和沥青质的含量较高，平均为 41.4%，$Ⅱ_A$型原油平均为 32.2%，$Ⅱ_B$型更低，仅为 22.6%；色谱图存在明显的 UCM 拱峰，且检测出 25-降藿烷，认为属降解型原油。 | 藻类和高等植物双重生源、咸化强还原环境，成熟度高-低均有 | $SQ_3$和$SQ_4$盘山-陈家洼陷 |
| Ⅲ型原油 | 西部凹陷的西斜坡南段 | 伽玛蜡烷指数很低；Pr/Ph 较高，平均达 0.95；Ts/Tm 很高，平均 0.84；$C_{24}$四环萜烷含量较低，为淡水弱还原生油环境。<br>规则甾烷 ααα20R$C_{27}$/$C_{29}$和规则甾烷 ααα20R$C_{28}$/$C_{29}$都较高，分别为 0.99 和 0.76；三环萜烷/萜烷比值较高，平均 0.44；(孕甾烷+升孕甾烷)/ααα20R$C_{29}$较Ⅱ类原油高，达到 0.54，另外还检测到奥利烷；原油的碳同位素值较重，平均达-26.2‰，反映生源以淡水藻类为主，兼有少量高等植物输入。 | | 清水洼陷 |
| $Ⅲ_A$型原油 | Ed 海南南部<br>$Es_{1+2}$欢喜岭和锦州的西部 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很低，为 0.06～0.49；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也较低，分布在 0.23～0.36；$MPI_1$很低，基于它计算的 $R_C$ 仅为 0.6，反映为未熟-低熟油。 | 淡水藻类为主，兼有少量高等植物输入，淡水弱还原环境，成熟度较低 | $SQ_6$清水洼陷 |
| $Ⅲ_B$型原油 | Ed 海南北部、双南<br>$Es_{1+2}$欢喜岭东部、双南<br>$Es_3$锦州东部、双台子-双南 | ααα20R$C_{29}$*S*/*S*+*R* 比值很高，平均为 0.41；$C_{29}$ββ/(αα+ββ)也稍高，为 0.42；$MPI_1$亦较高，基于它计算的 $R_C$ 为 0.8，反映为成熟原油。 | 淡水藻类为主，兼有少量高等植物输入，淡水弱还原环境，成熟度较高 | $SQ_4$清水洼陷 |
| $Ⅲ_C$型原油 | Ed 海南北部<br>$Es_{1+2}$双台子<br>$Es_3$锦州西部 | 比重普遍偏高，平均达 0.97g/$cm^3$，远高于$Ⅲ_A$型（0.89g/$cm^3$）和$Ⅲ_B$型（0.85g/$cm^3$）原油；色谱图存在明显的 UCM 拱峰，且检测出 25-降藿烷，认为属降解型原油。 | 淡水藻类为主，兼有少量高等植物输入，淡水弱还原环境，成熟度高-低 | $SQ_4$和$SQ_6$清水洼陷 |

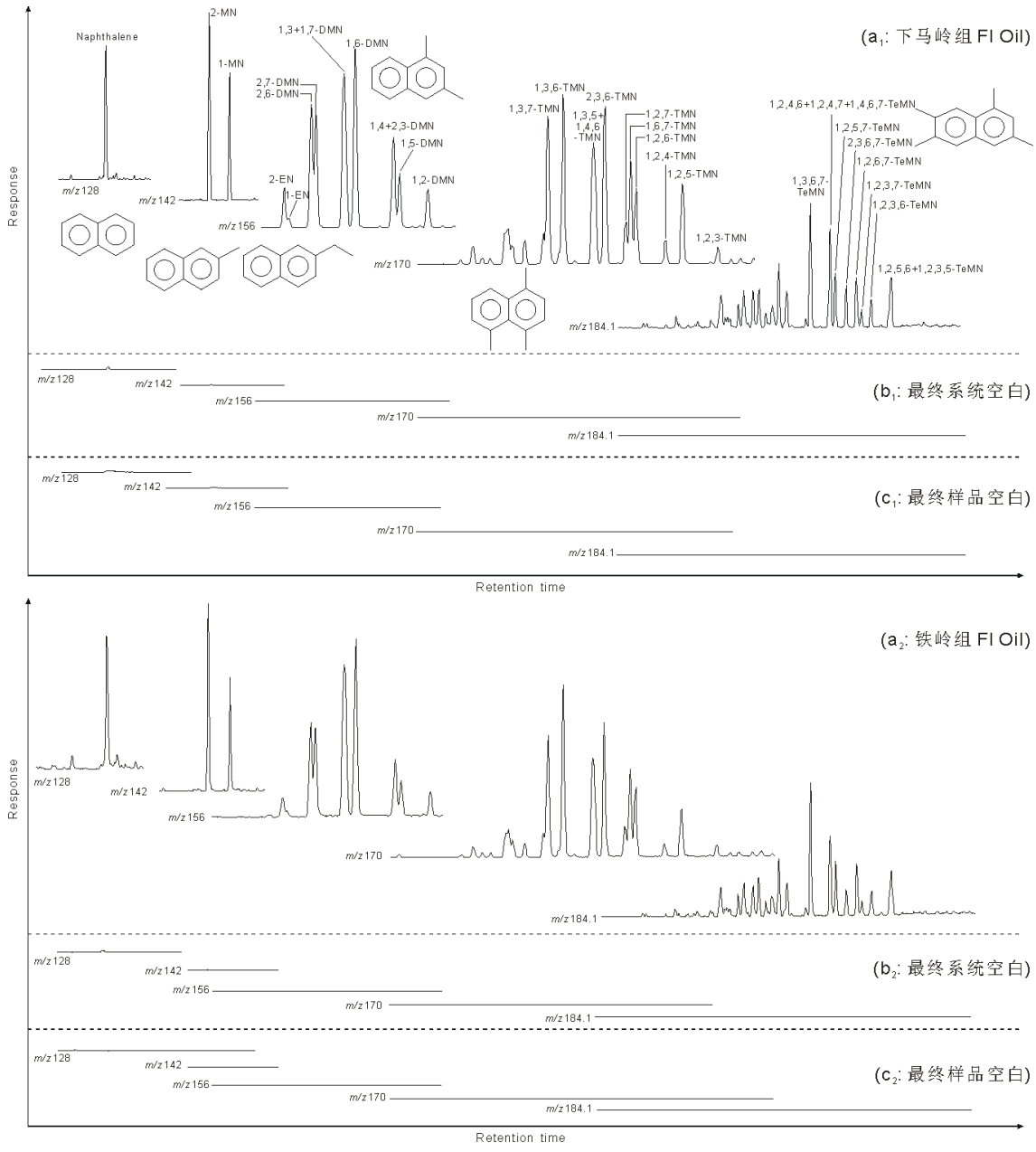
# 附录 B 图 B. 1 燕山地区样品支链烷烃参数分布图（1）



# 附录 B 图 B. 2 燕山地区样品支链烷烃参数分布图（2）

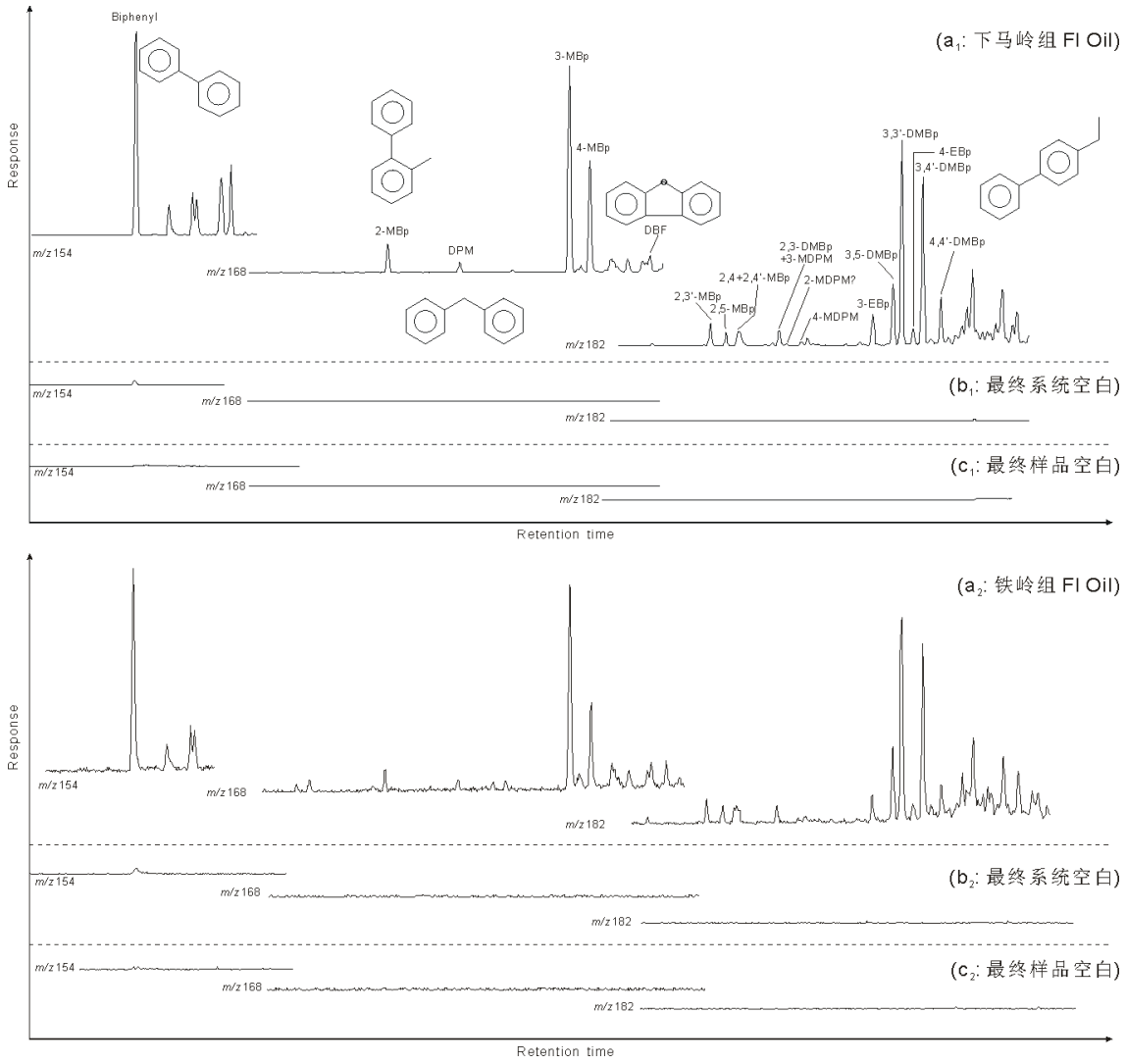


# 附录 B 图 B. 3 燕山地区含油包裹体及其空白样品萘系列化合物



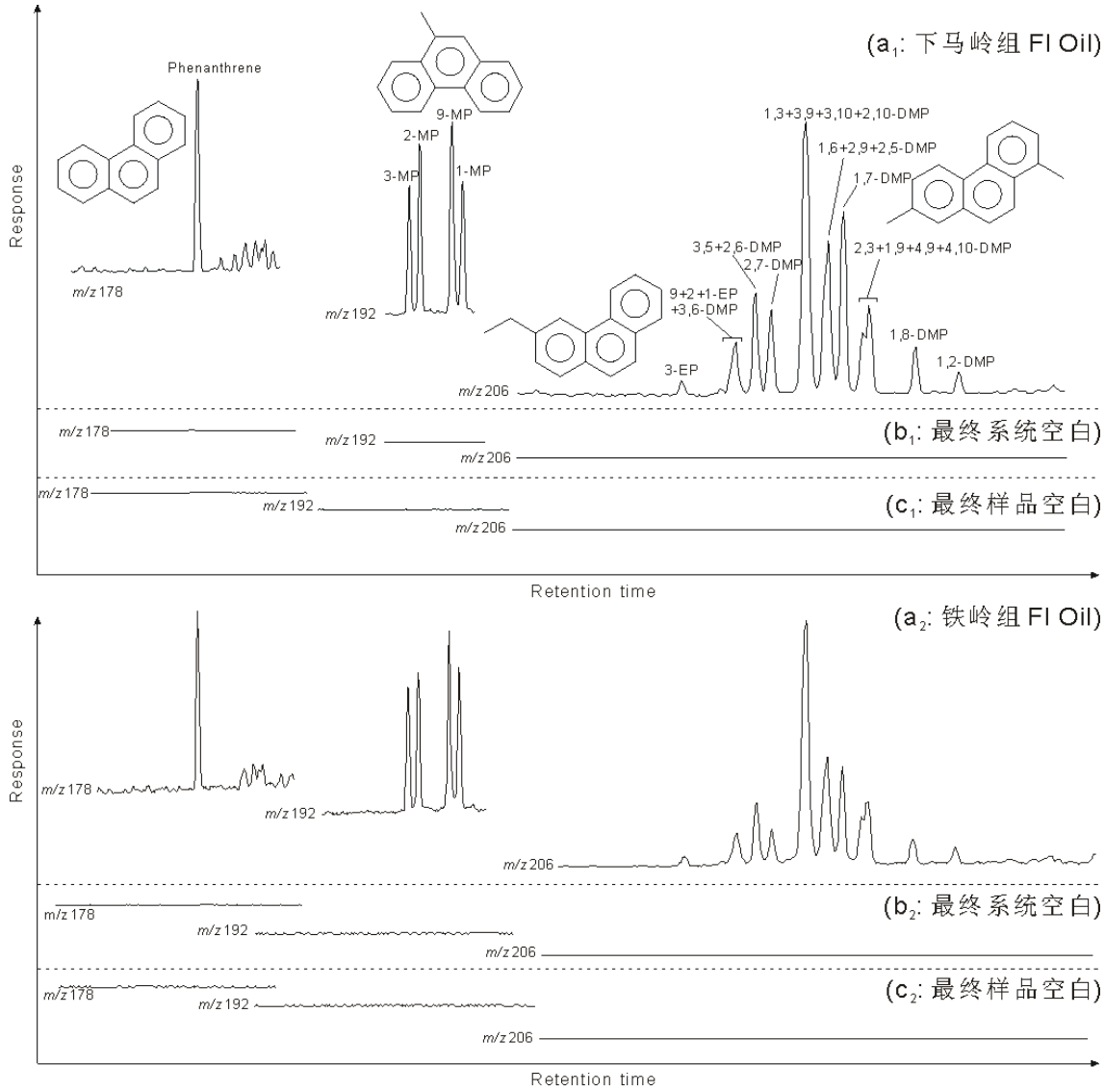

注：部分 *m/z* 128, 142, 156, 170 和 184.1 色质图，包括下马岭组和铁岭组含油包裹体 (a1, a2), 系统空白(b1, b2)和最终的样品空白 (c1, c2), 显示萘系列化合物的分布情况：萘(naphthalene),甲基萘(MN), 乙基萘(EN), 二甲基萘(DMN), 三甲基萘(TMN) 和四甲基萘 (TeMN)

# 附录 B 图 B. 4 燕山地区含油包裹体及其空白样品联苯系列化合物



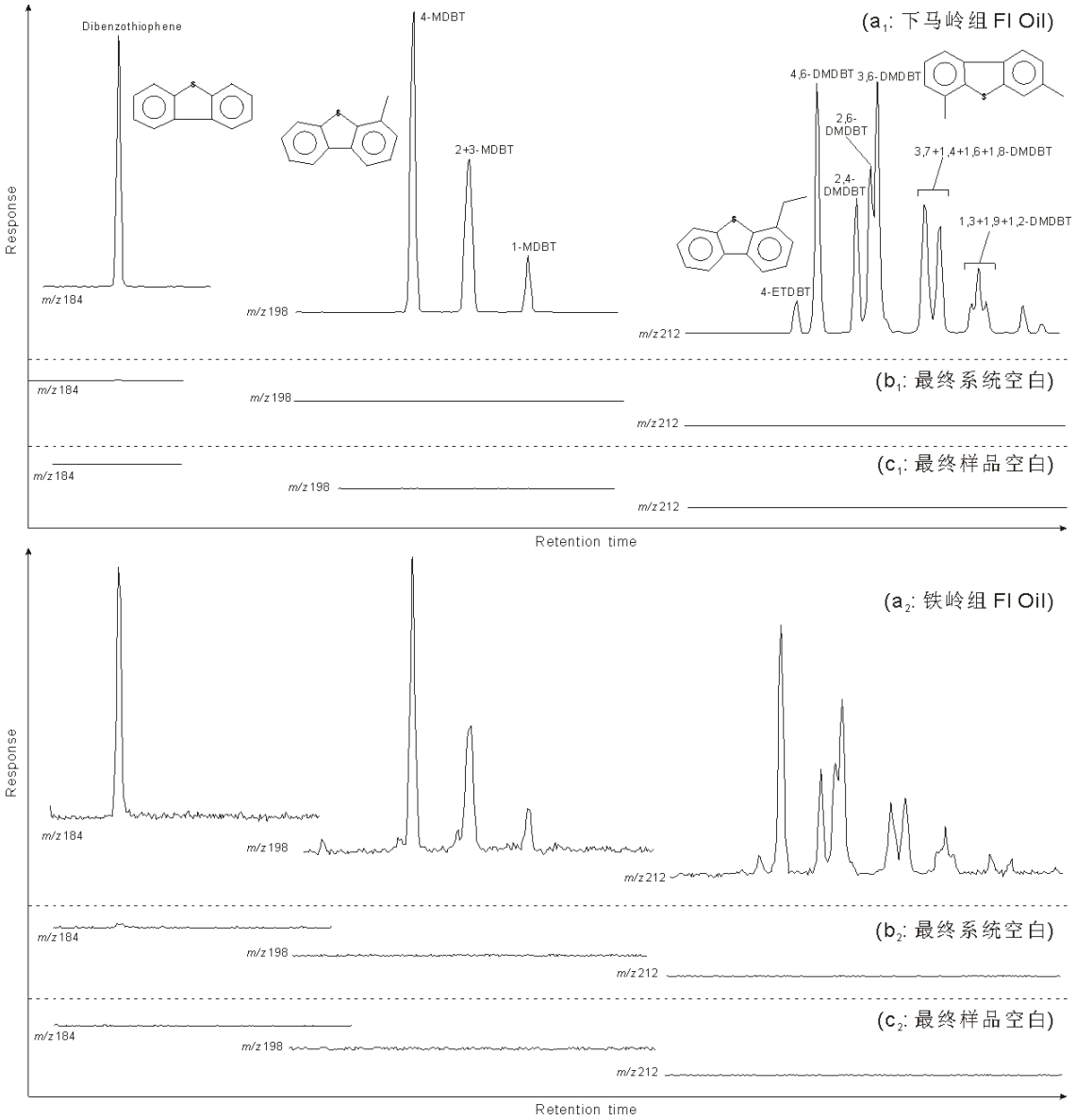

注：部分 *m/z* 154, 168 和 182 色质图，包括下马岭组和铁岭组含油包裹体 (a1, a2)，系统空白(b1, b2)和最终的样品空白 (c1, c2)，显示联苯系列化合物的分布情况：联苯(biphenyl)，二苯甲烷(DPM)，甲基联苯(MBp)，二苯并呋喃(DBF)，甲基二苯甲烷(MDPM)，乙基联苯(EBp)和二甲基联苯(DMBp)

# 附录 B 图 B. 5 燕山地区含油包裹体及其空白样品菲系列化合物



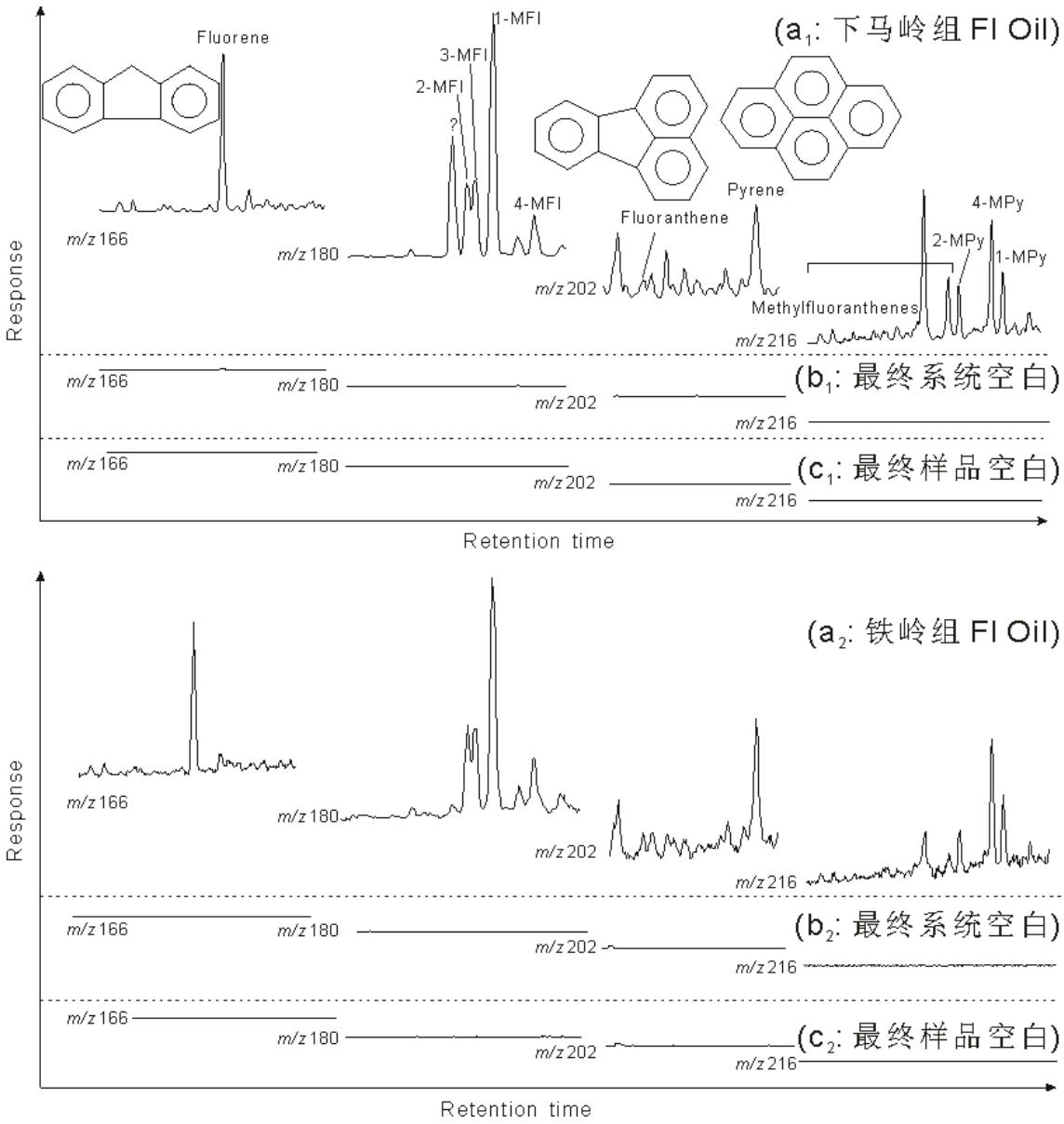

注：部分 *m/z* 178, 192 和 206 色质图，包括下马岭组和铁岭组含油包裹体 (a1, a2)，系统空白(b1, b2)和最终的样品空白 (c1, c2)，显示菲系列化合物的分布情况：菲(phenanthrene),甲基菲(MP)，乙基菲(EP)和二甲基菲(DMP)

# 附录 B 图 B.6 燕山地区含油包裹体及其空白样品二苯并噻吩系列化合物



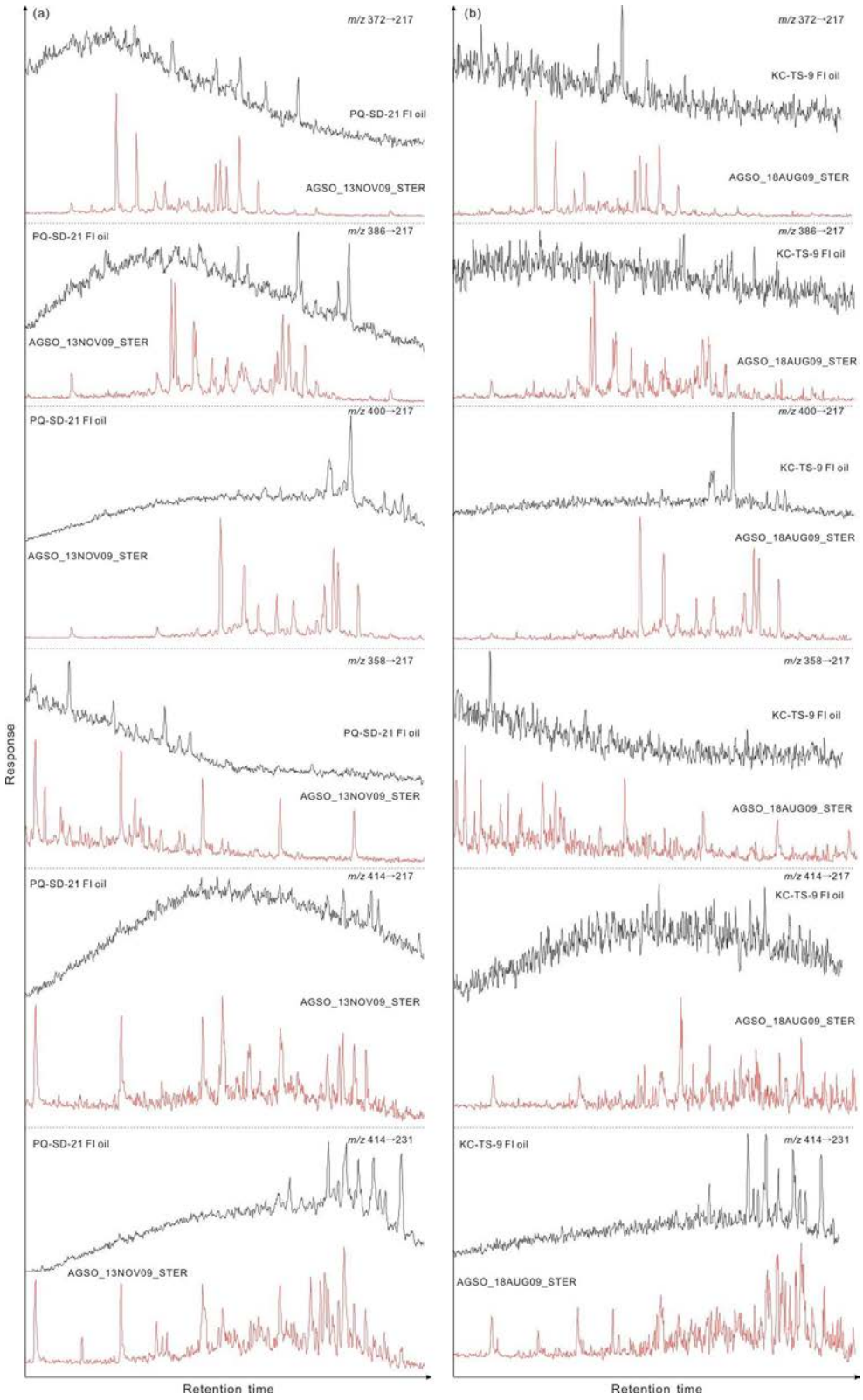

注：部分 *m/z* 184, 198 和 212 色质图，包括下马岭组和铁岭组含油包裹体 (a1, a2)，系统空白(b1, b2)和最终的样品空白 (c1, c2)，显示二苯并噻吩系列化合物的分布情况：二苯并噻吩(dibenzothiophene)，甲基二苯并噻吩(MDBT)，乙基二苯并噻吩(EDBT)和二甲基二苯并噻吩(DMDBT).

# 附录 B 图 B. 7 燕山地区含油包裹体及其空白样品芴、荧蒽、芘系列化合物

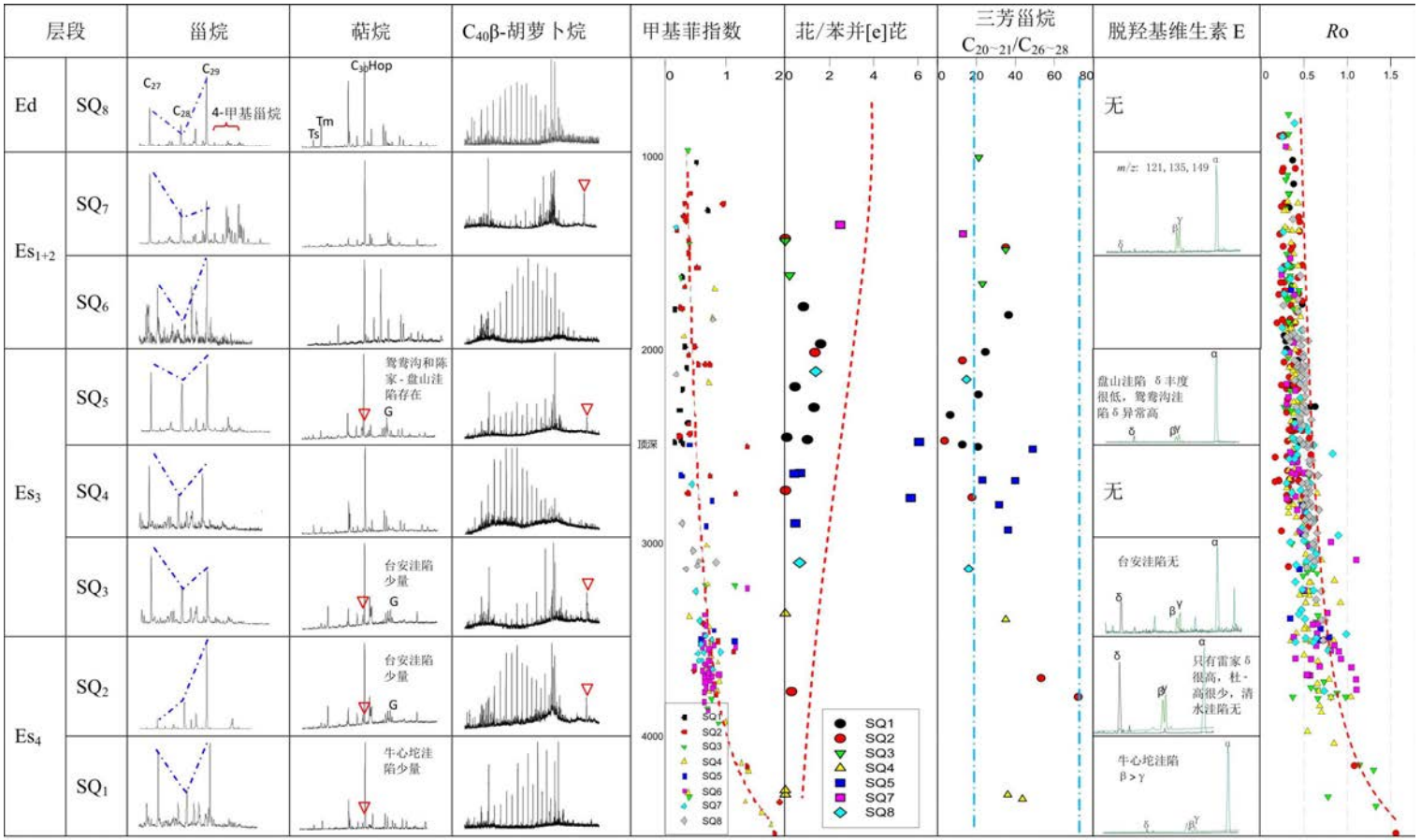



注：部分 *m/z* 184, 198 和 212 色质图，包括下马岭组和铁岭组含油包裹体 (a1, a2)，系统空白(b1, b2)和最终的样品空白 (c1, c2)，显示芴、荧蒽和芘系列化合物的分布情况：芴(fluorine)，甲基芴(MFl)，荧蒽(fluoranthene)，芘(pyrene)，甲基芘(MPy)和甲基荧蒽(methylfluoranthenes)

# 附录 B 图 B.8 燕山地区含油包裹体及标样甾烷分布图

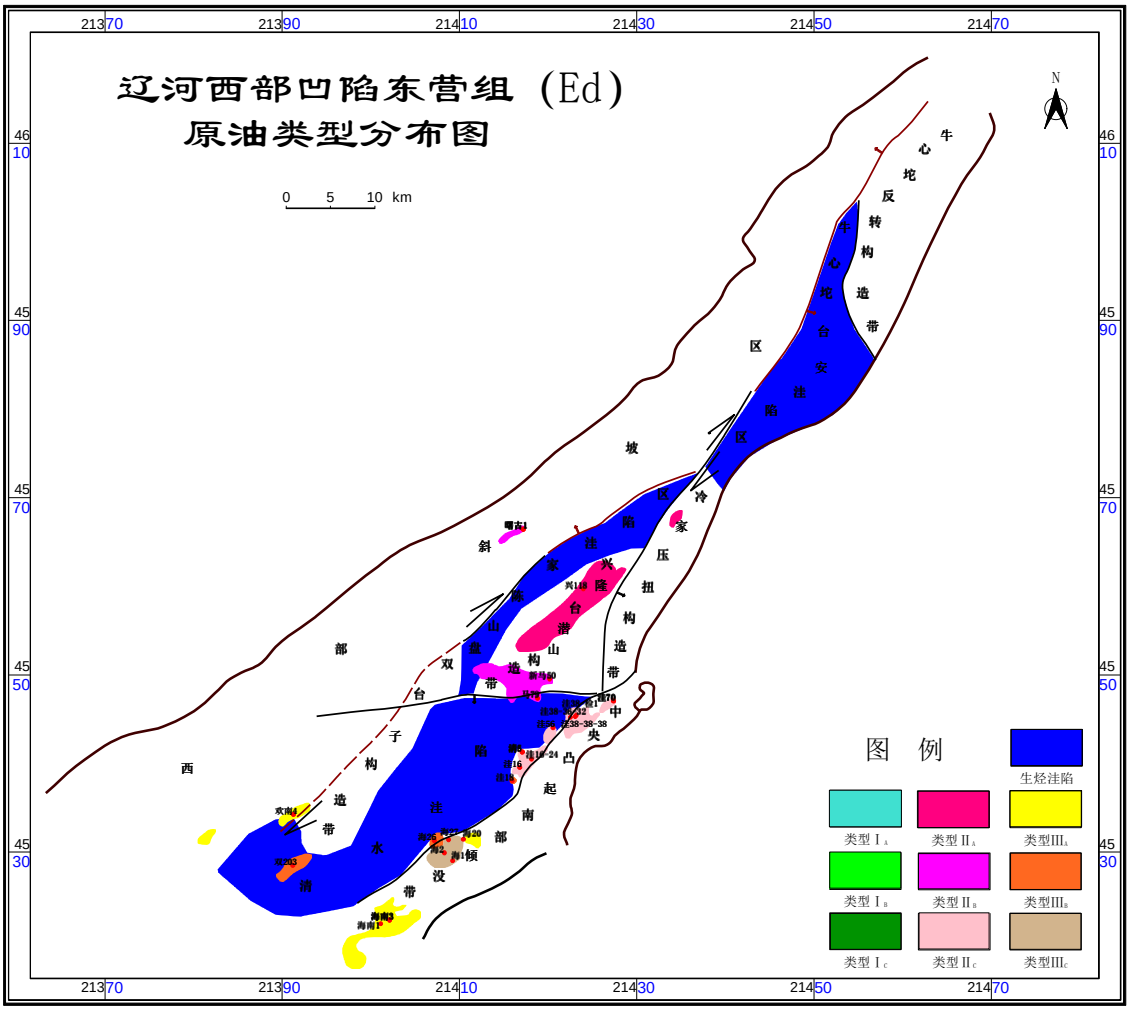


# 附录 B 图 B.9 西部凹陷烃源岩生物标志化合物在层序上的分布图



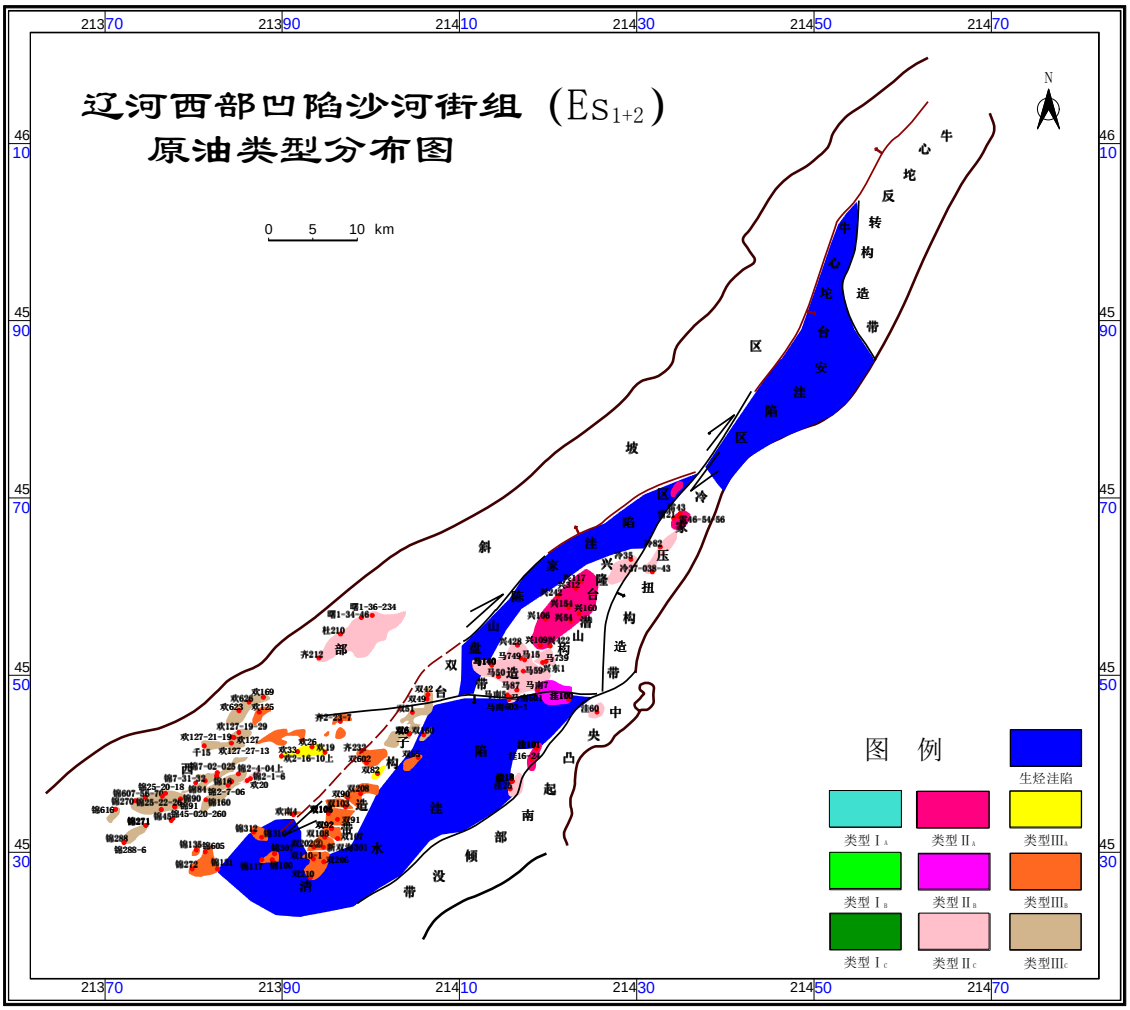
# 附录 B 图 B.10 辽河西部凹陷古近系原油类型分布图

## ——东营组（Ed）



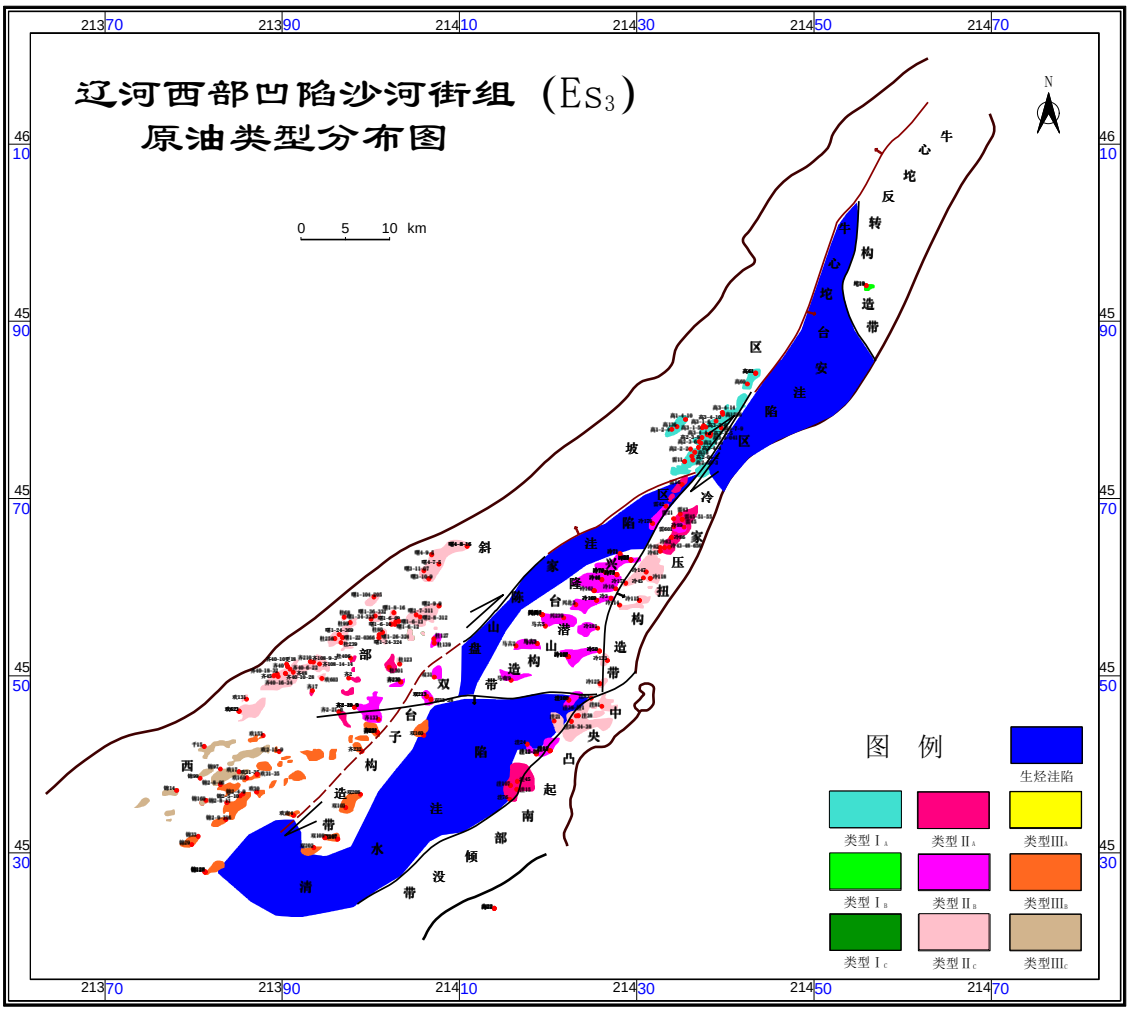
# 附录 B 图 B. 11 辽河西部凹陷古近系原油类型分布图

## ——沙河街组（$Es_{1+2}$）



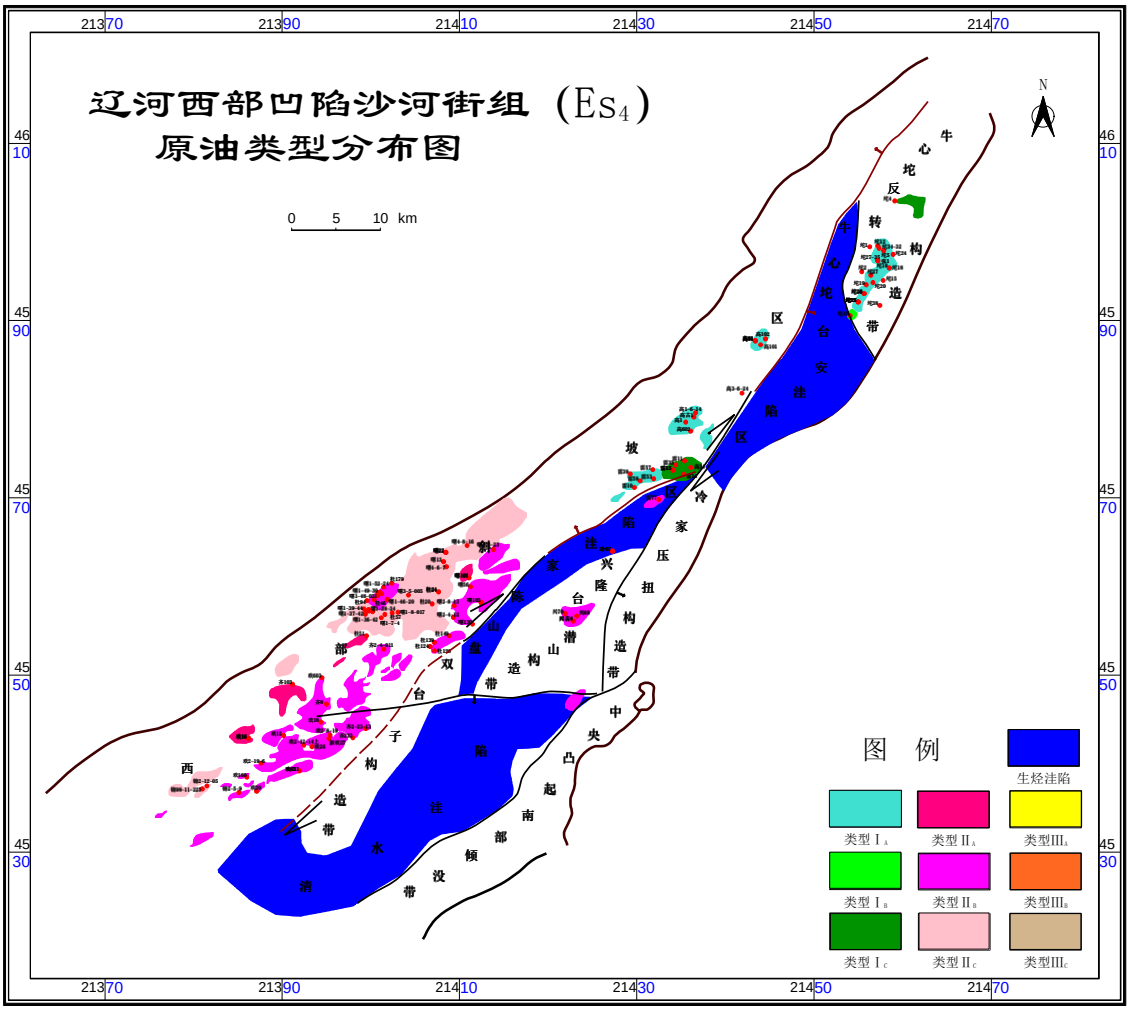
# 附录 B 图 B.12 辽河西部凹陷古近系原油类型分布图

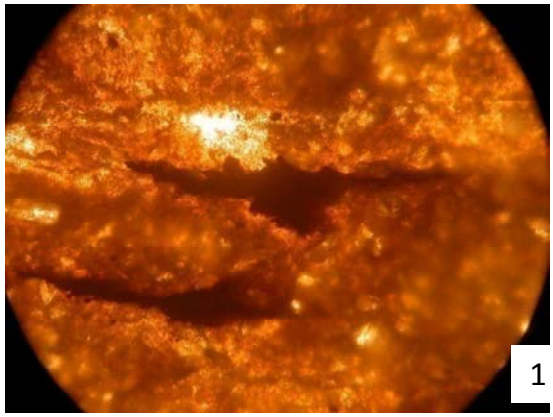
## ——沙河街组（$Es_3$）

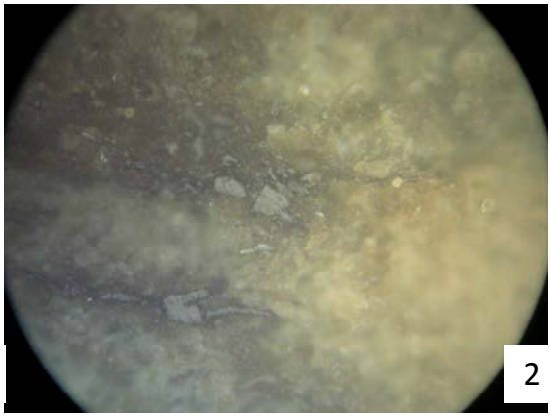


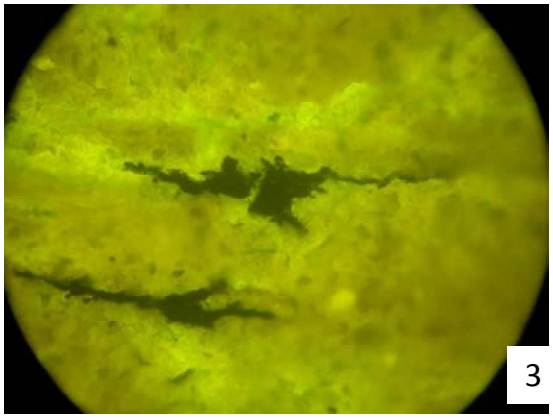
# 附录 B 图 B.13 辽河西部凹陷古近系原油类型分布图

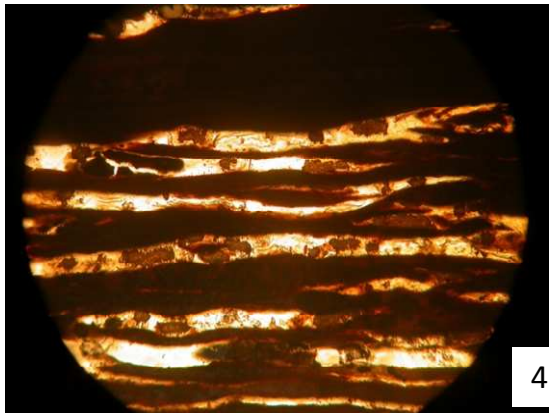
## ——沙河街组（$Es_4$）

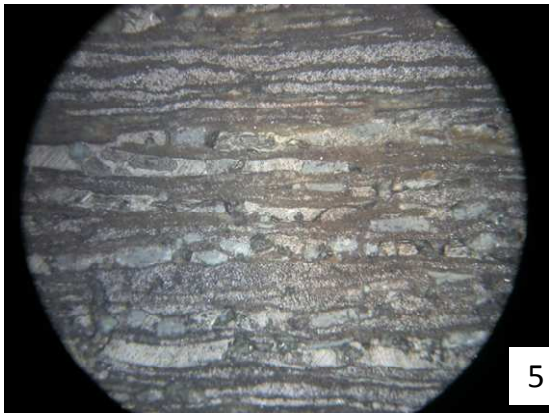


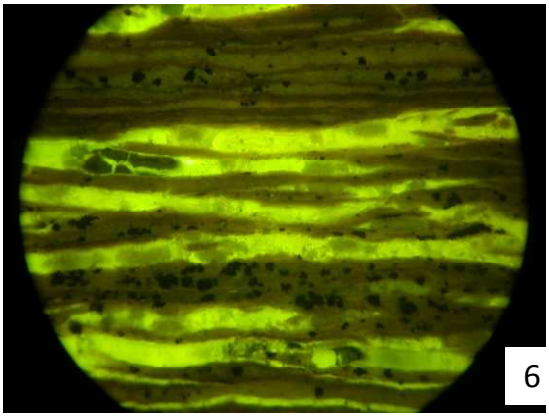

1


2

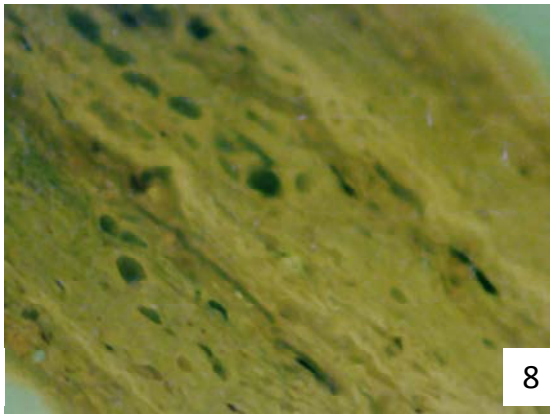

3

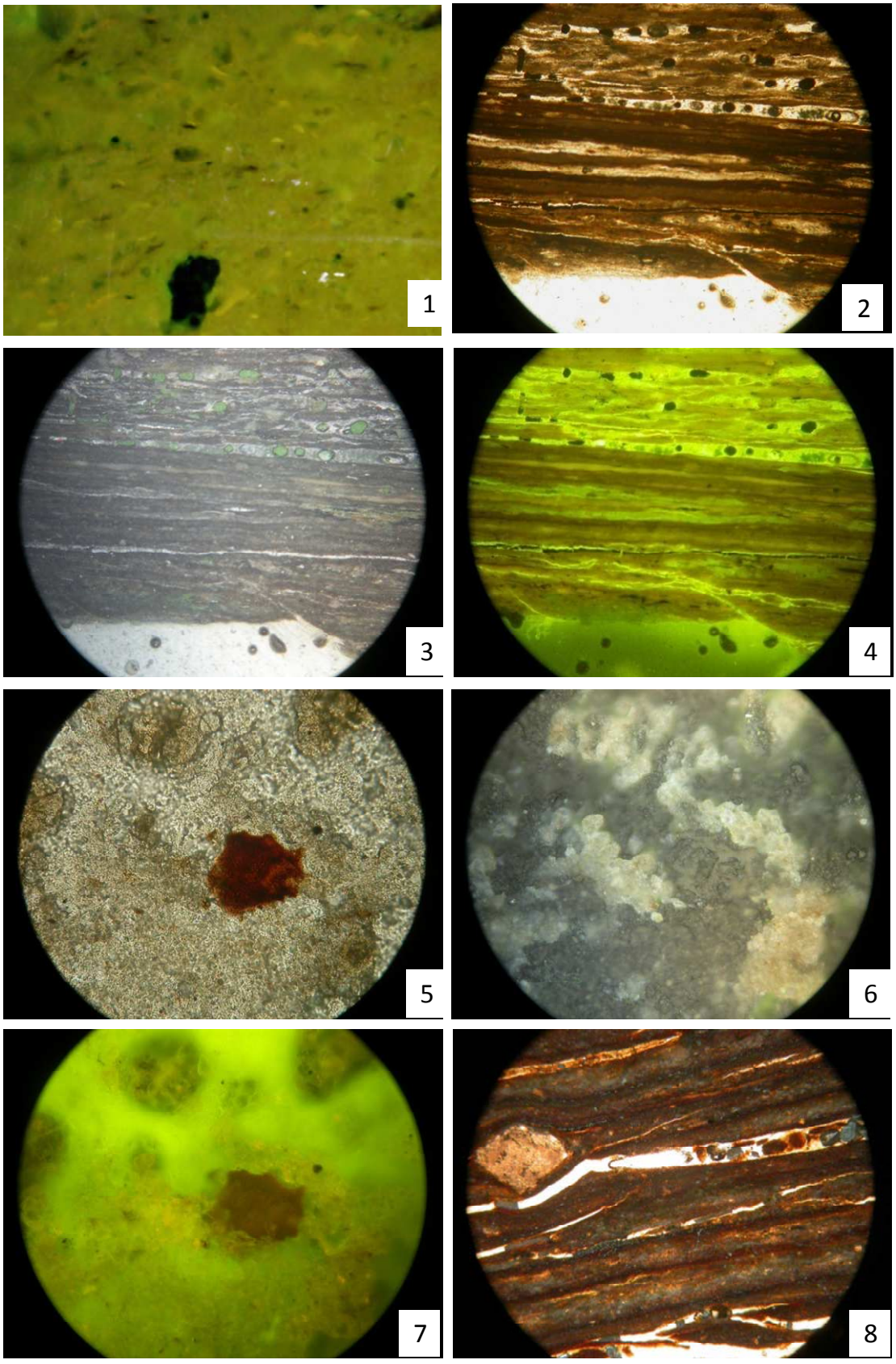

4

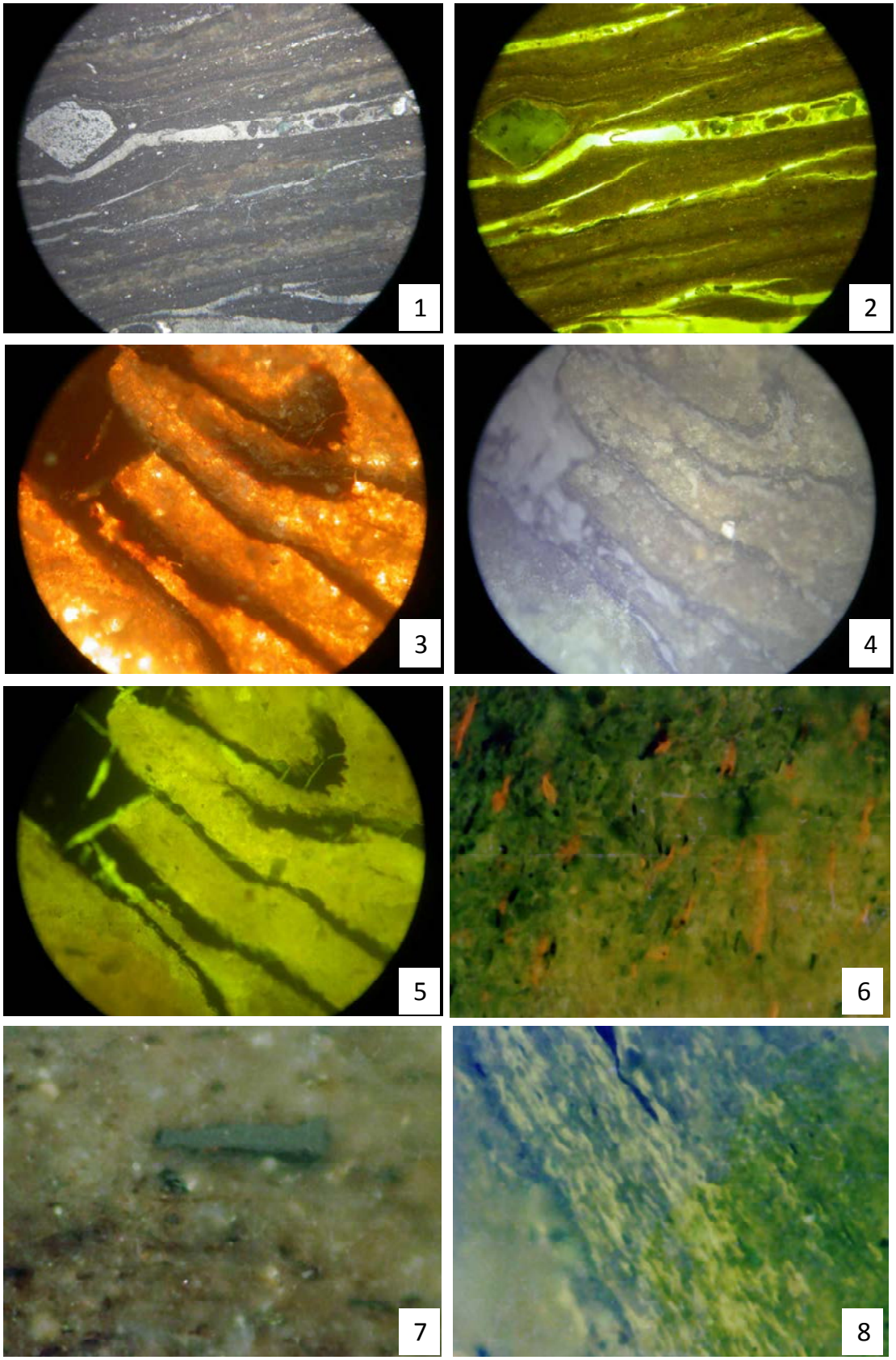

5


6


7


8


1
2
3
4
5
6
7
8


1
2
3
4
5
6
7
8

# 图 版 说 明

## 图 版 Ⅰ

1.无结构镜质体和矿物沥青基质.冷 137 井，1701.2m，中生界，灰黑色煤层，透射光，×200

2.同 1，反射光，×200

3.同 1，荧光，×200

4.富有有机质的纹层结构.高 8 井，1435.8m，沙四段， 灰褐色油页岩，透射光，×100

5.同 4， 反射光，×100

6.同 4， 荧光，×100

7.结构藻类体和矿物沥青基质.张 1 井，1450m，沙四段， 泥岩，荧光，×500

8.无结构藻类体.张 1 井，1200m，沙四段，泥岩，荧光，×500

## 图 版 Ⅱ

1.壳屑体、矿物沥青基质. 张 1 井，1200m，沙四段，泥岩，荧光，荧光，×500

2.富藻类体的纹层结构.双 202 井，4641.9m，沙三段，深灰色泥岩，透射光，×100

3.同 2，反射光，×100

4.同 2，荧光，×100

5.无结构镜质体.曙 74 井，1034.6m，沙三段，深灰色灰质泥岩，透射光，×500

6.同 5，反射光，×500

7.同 5，荧光，×500

8.烃源岩的纹层结构.马 31 井，2172.7m，沙一、二段，褐灰色灰质页岩，透射光，×100

## 图 版 Ⅲ

1.同图版Ⅱ-8，反射光，×100

2.同 1，荧光，×100

3.无结构镜质体.海 20 井，1787m，东营组，绿灰色泥岩，透射光，×200

4.同 3，反射光，×200

5.同 3，荧光，×200

6.孢子体、碎屑镜质体. 双 101 井，2702.8m，东营组，泥岩，荧光，×500

7.无结构镜质体和碎屑镜质体. 双 101 井，2706.3m，东营组，泥岩，荧光，×500

8.无结构藻类体、矿物沥青基质. 张 1 井，1430m，沙四段，泥岩，荧光，×500

# 致　谢

本论文工作是在导师钟宁宁教授和 Simon George 副教授的悉心指导下完成的。在攻读博士学位期间，钟老师在论文选题、工作进展和论文撰写方面给予了我细致、深入的指导。钟老师严谨的治学态度、追求创新的精神以及严于律己的工作作风，使我不仅在学业上有很大提高，更教会了我为人处世的道理。Simon 老师在我赴澳学习的这段时间除了在科研上的悉心指导外，还在生活上给予了我无微不至的关怀和照顾，他淡泊名利和对待科研一丝不苟的态度都深深的影响着我。在此，向我的导师们致以最诚挚的敬意和衷心的感谢！

另外，感谢朱雷、朱丹老师在做辽河项目实验时的耐心指导，还有特别感谢澳大利亚 CSIRO 的 Herbert Volk, Ahmed Manzur, 宫色和 David Fuentes 在有机包裹体成分分析上给予的悉心指导和无私帮助，感谢 Macquarie University 的 Peter Wieland 和 Nigel Wilson 在实验过程中给予的大力支持。

在论文的开展过程中，还得到了中国石油大学姜振学、刘洛夫、黄志龙、张枝焕等多位老师给予的宝贵意见，Macquarie University 的 Kelsie Dadd, JaneYang, Kristina Willis 等在日常生活和学习工作中也提供了很多的帮助，期间还得到了王新伟、肖芝华、彭波、刘岩、赵冰、宋涛、张彦启、齐雯、秦静、王萍、于轶星、Jessica Coffey, Paul Sargent Bray, Ellen Woolfenden, David Smith 等同学、朋友们的鼓励和支持，在此一并表示诚挚谢意！

最后，特别感谢我的家人一直以来对我学习的支持，感谢所有关心、帮助我的同学和朋友。

# 个人简历

母国妍，女，1980 年 10 月出生，汉族，辽宁省葫芦岛市（县）人。2003 年 7 月毕业于辽宁工程技术大学资源与环境工程学院（系）地质工程专业，获学士学位；2006 年 4 月毕业于辽宁工程技术大学能源资源与环境工程学院（系）资源勘查专业，获硕士学位；2006 年进入中国石油大学（北京）资源与信息工程学院（系），攻读能源资源与环境地球化学专业博士学位，期间，于 2008 年在澳大利亚 Macquarie Unviersity 注册入学，攻读地学博士学位。

# 攻读博士学位期间发表学术论文

1 刘宝[1]，**母国妍**[2]，张宁[3]. 天然气地球科学，2005 年，16 (6): 747-751. 主办单位：中国科学院资源环境科学信息中心。中文核心期刊检索号：ISSN.1672-1926.0.2005-06-011。（本博士学位论文第 4 章）

2 **母国妍**[1]，钟宁宁[2]，刘宝[3]. 石油实验地质, 2008 年, 30 (6): 611-616. 主办单位：中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院。中国自然科学核心期刊检索号：SYSD.0.2008-06-017。（本博士学位论文第 4 章）

3 **MU Guoyan**[1], ZHONG Ningning[2], LIU Bao[3]. Chinese Journal of Geochemistry, 2009 年，28 (3): 328-334. 主办单位：中国科学院地球化学研究所。EI 检索期刊，本文 EI 检索号：10009426。（本博士学位论文第 4 章）

4 **母国妍**[1]，钟宁宁[2]，刘宝[3]，于天财[4]，刘岩[5]. 石油学报，2010 年，31 (2): 218-224. 主办单位：中国石油学会。EI 检索期刊，本文 EI 检索号：02532697。（本博士学位论文第 4 章）

5 **Guoyan MU**[1], Ningning ZHONG[2], Bao LIU[3]. 第一届油气资源博士生国际学术论坛，2007 年 8 月. 主办单位：中国石油大学（北京）。会议论文（本博士学位论文第 4 章）

6 **母国妍**[1], 钟宁宁[2], 刘宝[3]. 第十一届全国有机地球化学学术会议，2007 年 10 月. 主办单位：中国石油学会。会议论文（本博士学位论文第 4 章）

7 **Guoyan Mu**[1], Ningning Zhong[2]. The 94th AAPG Annual Convention and Exhibition. June, 2009. 主办单位：American Association of Petroleum Geologists (AAPG). 国际会议论文（本博士学位论文第 4 章）

8 **Guoyan Mu**[1], Simon C.George[2], Manzur Ahmed[3], Ningning Zhong4. The 24th International Meeting on Organic Geochemistry, September, 2009.主办单位：Association of Organic Geochemists (EAOG). 国际会议论文（本博士学位论文第 3 章）