

# 新疆准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征及意义

王炳凯<sup>1</sup>, 冯乔<sup>1</sup>, 田方正<sup>1</sup>, 张耀<sup>1</sup>, 徐子苏<sup>1</sup>, 李海斌<sup>1</sup>, 周海峰<sup>1</sup>,  
秦宇<sup>2</sup>, 田瑞聪<sup>3</sup>

WANG Bingkai<sup>1</sup>, FENG Qiao<sup>1</sup>, TIAN Fangzheng<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>, XU Zisu<sup>1</sup>, LI Haibin<sup>1</sup>,  
ZHOU Haifeng<sup>1</sup>, QIN Yu<sup>2</sup>, TIAN Ruicong<sup>3</sup>

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;
2. 大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质系, 陕西 西安 710069;
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi China;
3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China

**摘要:**通过地球化学分析测试技术对准噶尔盆地南缘芦草沟组烃源岩生物标志化合物特征进行研究,探讨其有机质的母质来源、沉积环境、有机质演化程度等方面的信息。芦草沟组烃源岩正构烷烃的轻碳优势和甾烷的C<sub>27-29</sub>含量关系等参数表明,母质来源主要为藻类等低等水生生物。平均1.0左右的烃源岩Pr/Ph值表明,弱氧化-弱还原的沉积环境,平均值为0.15的伽马蜡烷指数及较高含量的孕甾烷和升孕甾烷表明,沉积环境盐度较高,该沉积环境有利于有机质的富集。对甾烷的C<sub>29</sub>20S(20S+20R)和C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα)值和C<sub>31</sub>藿烷αβ22S/(22S+22R)值等成熟度参数进行分析表明,研究区烃源岩处于低成熟-成熟阶段。烃源岩有机质中四环萜烷的出现及较小的规则甾烷/17α(H)-藿烷比值等参数表明,烃源岩成岩早期有机质受到一定程度的生物降解作用。

**关键词:**准噶尔盆地南缘;芦草沟组;烃源岩;生物标志化合物

中图分类号:P534.46;P618.13 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)02/03-0304-10

**Wang B K, Feng Q, Tian F Z, Zhang Y, Xu Z S, Li H B, Zhou H F, Qin Y, Tian R C. The characteristics and significance of biomarker compounds in the Permian Lucaogou Formation hydrocarbon source rock on the southern margin of the Junggar Basin. Geological Bulletin of China, 2017, 36(2/3):304-313**

**Abstract:** The accuracy of the evaluation result for the surface outcrop hydrocarbon source rock in the lower exploration degree area by using the traditional method is doubtful. Based on a study of such biomarkers as GC and GCMS, the authors evaluated the sedimentary environment, source rock kerogen type and maturity of the Permian Lucaogou Formation on the southern margin of the Junggar Basin. The Pr/Ph ratio of the hydrocarbon source rocks with an average of about 1 shows weak oxidation and weak reduction of sedimentary environments. The average value 0.15 for the gammacerane index and the high content of pregnanes indicate that the sedimentary environment was of high salinity, which was favorable for the enrichment of organic matter to a certain salinity for a weak redox sedimentary environment. The sterane C<sub>29</sub>20S(20S+20R), C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα) and C<sub>31</sub> hopanes αβ22S/

收稿日期:2016-10-10;修订日期:2016-12-06

资助项目:国家自然科学基金项目《半地堑陆相沉积的解剖及地层分析和对比方法》(批准号:41428201)

作者简介:王炳凯(1991-),男,在读硕士生,从事地球化学方面研究。E-mail:wbk369@sohu.com

通讯作者:冯乔(1963-),男,教授,从事石油地质和油气地球化学方面研究。E-mail:fengqiao999@126.com

(22S+22R) values and some maturity parameter analysis show that the source rocks in the study area remain in the low mature to mature stage. Emergence of tetracyclic terpane organic matter in source rocks and small regular sterane/17 $\alpha$ (H)-hopane ratio parameters show that the early organic matter of the source rock was subjected to a certain degree of biodegradation.

**Key words:** southern margin of Junggar Basin; Lucaogou Formation; hydrocarbon source rocks; biological marker compound

生物标志化合物的概念最早由 Eglinton 等提出,指来源于活的生物体,具有有机质演化过程中碳骨架的稳定性和复杂的“指纹”特征<sup>[1-2]</sup>,可以提供母质来源、沉积环境、成熟度、油气运移、油源对比等方面的信息,被广泛应用于油气地球化学的研究。

准噶尔盆地是中国大型含油气盆地<sup>[3]</sup>,油气资源丰富,勘探程度低,勘探潜力大。在准噶尔盆地 60 多年的油气勘探开发历程里,西北缘地区作为新疆油田增储上产的主力地区,其南缘的油气勘探仍处于举步维艰的境地,到目前为止还没有发现大油气田,与其发育多套烃源岩的物质基础不匹配。中外学者历来对准噶尔盆地南缘给予高度评价(油气资源丰富),但目前南缘勘探效果甚微,仅用构造复杂来解释是无力的,其根本原因是相当多的沉积层中的有机物并没有转化成烃类<sup>[4]</sup>,关于有效烃源岩及生烃潜力的问题还需要深入研究。

准噶尔盆地南缘发育二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系 5 套烃源岩,其中二叠系是准噶尔盆地南缘,也是整个准噶尔盆地最主要的烃源岩发育层系<sup>[5]</sup>,在盆地的南缘主要发育中二叠统芦草沟组和红雁池组。由于研究区油气勘探程度低,仍处于油气勘探的初级阶段,目前的烃源岩评价主要还是采集地表露头样品。由于露头样品受到风化作用的影响,一些传统的烃源岩评价已不适合地表风化样品。因生物标志化合物受风化作用的影响较小,本文以准噶尔盆地南缘主要烃源岩(中二叠统芦草沟组)为例,对烃源岩生物标志化合物特征进行研究,揭示其油气地球化学意义,为该地区烃源岩的评价提供依据。

## 1 地质背景

准噶尔盆地是中国西北部一个大型前陆盆地,其南缘在构造位置上属于北天山山前凹陷带<sup>[6]</sup>。研究区位于准噶尔盆地南缘乌鲁木齐—吉木萨尔一带(图 1),该地区自晚古生代以来先后经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动,使得区内构造复杂,地层褶皱极为强烈<sup>[7]</sup>。

本次研究的二叠系芦草沟组烃源岩剖面位于准噶尔盆地南缘,天山山脉中段博格达山北麓(图 1)。研究区上二叠统主要为深湖—半深湖亚相沉积,是主要的沉积中心和沉降中心,芦草沟组沉积时期,在博格达山北麓形成深凹陷,物源主要来自南部的伊连哈尔比尕山,当时水生生物极为发育,有机质丰富,在滞留闭塞的半深湖—深湖环境,沉积了巨厚的烃源岩层<sup>[8]</sup>。侏罗纪末期强烈隆起,大型的逆冲断层作用导致二叠系烃源岩伴随博格达山系的形成出露地表<sup>[9]</sup>,使研究区烃源岩埋藏深度较浅。二叠系芦草沟组(P<sub>2</sub>l)岩性单一,以暗色泥岩、油页岩为主,夹薄层砂岩和白云岩,富含瓣鳃类、鱼类、介形虫、叶肢介、孢粉、植物碎屑等,地层总厚度超过 600m,在乌鲁木齐及其以东至大龙口一带有广泛的出露,是一套很好的生油岩系<sup>[10-12]</sup>。

前人对研究区二叠系芦草沟组泥页岩有机地球化学特征进行了大量的研究,但主要是从油页岩的角度进行考虑的。众多学者对该地区油页岩的主量、微量及稀土元素进行了系统分析,从不同角度探讨了准噶尔盆地芦草沟组油页岩的沉积环境及古气候条件,认为准噶尔盆地南缘芦草沟组油页岩形成于以淡水为主间或有半咸水介入的非海相弱还原环境<sup>[13-20]</sup>。另外,有学者对准噶尔盆地芦草沟组的储层特征、源储关系和油页岩的页岩气成气潜力进行了论述<sup>[21-25]</sup>。陈建平等<sup>[26]</sup>对准噶尔盆地南缘二叠系芦草沟组烃源岩进行的干酪根镜检表明,腐泥无定型和藻类体是主要的有机质,含量为 60%~75%,有机质以腐泥型(I 型)和腐殖—腐泥型(II<sub>1</sub>型)为主。杜治利等<sup>[27]</sup>以妖魔山与红雁池剖面为例,对该区二叠系芦草沟组烃源岩有机地球化学特征进行了系统研究,其中妖魔山剖面芦草沟组烃源岩有机碳含量(TOC)质量分数变化不大,范围介于 1.09%~18.91%之间,平均值为 5.54%,有机质丰度较高,大于 1.0%;氯仿沥青“A”质量分数介于 0.01%~0.04%之间,平均值为 0.03%,大于 0.01%;总烃质量分数介于 80.21~207.68mg/g 之间,平均值为 125.15mg/g,含量较低;有机质类型主要为 I 型与 II<sub>1</sub>型,烃源岩中壳质组的含量较高,多数为藻类体与

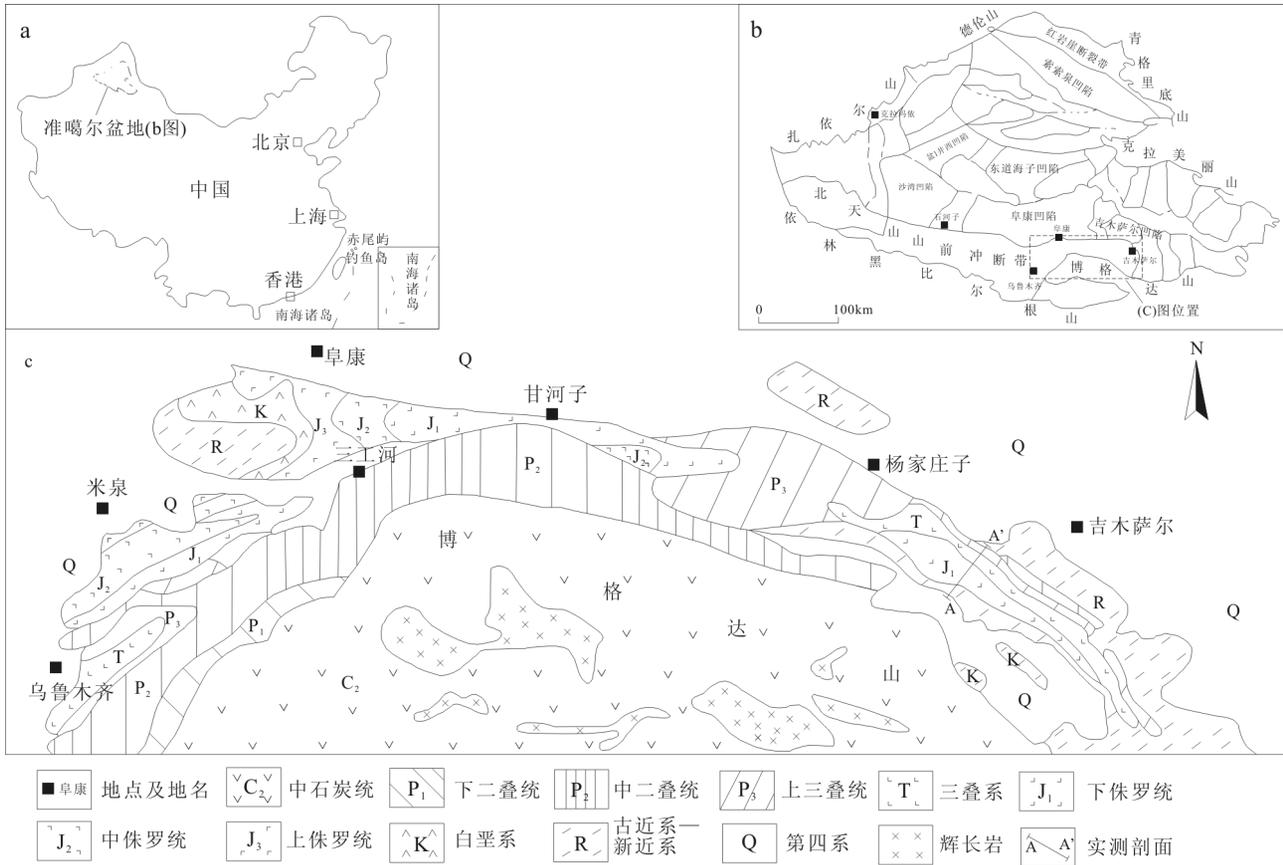


图1 研究区地质简图

Fig. 1 Sketch geological map showing general situation of the study area

壳屑体,生烃潜力较好;芦草沟组烃源岩R<sub>0</sub>为0.63%~0.71%,平均值为0.66%,演化程度较低,已经进入生油门限。

## 2 样品采集及分析

样品均采自准噶尔盆地南缘的西大龙口芦草沟组剖面,烃源岩的岩性主要为深灰色页岩。为降低现代有机物质的污染、减少因生物降解对沉积有机质的影响,采样时尽量选择新鲜的岩石样品。对采集的部分烃源岩样品进行详细的有机地球化学分析,分析测试在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成。

在样品粉碎前,先除去表面污染物,然后再用甲醇试剂清洗岩样表面,最后将岩样粉碎至100目。分析测试步骤如下。

(1)有机碳分析:取2g粉末样品,在105℃下干燥2h,然后用5%HCl在室温下浸泡12h以去除碳酸盐,沉淀过滤,再加入5%HCl在80℃下浸泡1h,之

后用蒸馏水清洗6次,沉淀过滤后在105℃下干燥2h,然后采用CS-400型有机碳分析测定有机碳含量,实验条件为室温。

(2)有机碳同位素分析:采用LECO CS-400碳硫分析仪,执行标准GB/T19145—2003。

(3)可溶有机质抽提和分离:根据有机碳含量的高低,取60~80g粉末样品不等,用二氯甲烷+甲醇(体积比9:1)混合溶剂索氏抽提72h,总抽提物先用正己烷溶解、沉淀、分离沥青质;去除沥青质的溶液用硅胶氧化铝层析柱进行族组分分离,分别用正己烷+二氯甲烷(体积比4:1)混合溶剂和二氯甲烷+甲醇(体积比1:1)混合溶剂淋洗填充柱,一次得到饱和烃、芳烃和非烃组分。总抽提物、总烃、饱和烃和芳烃采用溶液体积定容,取少量(2~4mL)干燥恒重,通过体积恒重法计算总质量,沥青质和非烃则干燥后直接称重。

(4)饱和烃气相色谱(GC):气相色谱仪为Agilent公司生产的7890A型色谱仪,配以氢火焰离子

检测器(FID),色谱柱为JW-DB-5型(30m×0.25mm×0.25μm);进样口和检测器的温度分别为290℃和300℃;样品采用无分流进样法,氮气为载气。饱和烃分析时,色谱柱箱初始温度为80℃,2min后以4℃/min升至290℃,并保持25min。

(5)饱和烃气相色谱-质谱(GC-MS):气相色谱-质谱(GC-MS)联用分析仪器为Thermo GC Ultra Trace-DSQII质谱仪,色谱分离柱为JW-DB-5型(30m×0.25mm×0.25μm);样品采用无分流进样法,进样室温度为290℃,色谱柱箱初始温度为80℃,2min后以4℃/min升至290℃,并保持25min,氮气为载气。质谱仪器的离子源为电子轰击源(70eV),扫描范围为50~650U。

### 3 有机地球化学基本特征

本次对7块烃源岩样品进行了有机碳含量、氯仿沥青“A”和有机碳同位素测试。

#### 3.1 有机碳含量(TOC)和氯仿沥青“A”

样品烃源岩有机碳含量分布范围为2.22%~11.8%(表1),绝大多数分布在2%~8%之间(图2),平均值为5.16%;氯仿沥青“A”含量范围为0.09%~0.25%(表1),平均值为0.18%;总烃含量范围为 $185.64 \times 10^{-6}$ ~ $597.36 \times 10^{-6}$ g/g(表1),平均值为 $346.98 \times 10^{-6}$ g/g。上述数据表明,研究区烃源岩有机质丰度高。研究区样品烃源岩饱和烃含量为5.15%~23.59%(表1),平均值为12.65%;芳烃含量较低,分布在4.26%~10%之间(表1),平均值为7.01%;沥青质含量为20.92%~55.97%(表1),平均值为36.70%;非烃含量为30.95%~62.1%(表1),平均值为43.64%。样品表现出非烃>沥青质>饱和烃>芳烃的特征,其中非烃和沥青质含量很高,可能是有机质演化程度较低的原因。

#### 3.2 有机碳同位素

烃源岩有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )是判断烃源岩有机质类型和母质来源的常用方法。胡见义等<sup>[28]</sup>根据中国陆相生油岩干酪根碳同位素的大量资料,提出用 $\delta^{13}\text{C}=-26\text{‰}$ 和 $\delta^{13}\text{C}=-27.5\text{‰}$ 作为区分Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ型干酪根的2个指标界限,研究区样品烃源岩干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值均小于 $-26\text{‰}$ 。黄汝昌<sup>[29]</sup>研究

表明,各种生物体中 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有不同的特征,陆生高等植物为 $-21.6\text{‰} \sim -26.7\text{‰}$ ,浮游生物为 $-27.6\text{‰} \sim -32.6\text{‰}$ ,植物类脂组为 $-28.7\text{‰} \sim -32\text{‰}$ ,藻类为 $-27\text{‰} \sim -32\text{‰}$ 。本次测试的芦草沟组烃源岩有机碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )值较低,分布在 $-26.83\text{‰} \sim -29.98\text{‰}$ 之间(表1),平均值为 $-27.91\text{‰}$ ,只有1个样品大于 $-27\text{‰}$ 。上述数据表明,研究区芦草沟组烃源岩干酪根类型总体为Ⅰ-Ⅱ型,有机质母质来源主要为藻类等低等水生生物。

初步研究表明,该地区烃源岩具有较大的生烃潜力,是一套很有利的烃源岩。

### 4 烃源岩生物标志化合物特征及意义

本次对7块烃源岩样品中的饱和烃进行了GC(气相色谱)、GCMS(气相色谱质谱)分析测试,所有样品中均检测出丰富的正构烷烃、异戊二烯烷烃、萜类化合物和甾类化合物。

#### 4.1 生物降解程度

由于测试的烃源岩样品均为剖面露头样品,长期暴露地表,烃源岩中的烃类极易受风化、微生物降解等破坏,相关结构发生改变,影响生物标志物参数的有效性。所以,在进行生物标志化合物的研究时,首先要对其生物降解程度进行判别。

生物降解是一个十分复杂的过程,各类化合物遭受降解的难易程度为:正构烷烃(最易)<类异戊二烯烷烃<藿烷(有25-降藿烷存在)<规则甾烷<藿烷(无25-降藿烷存在)<重排甾烷<芳香甾烷化合物<卟啉(最难)<sup>[30]</sup>。本次研究的芦草沟组剖面烃源岩样品拥有完整的正构烷烃,饱和烃色谱图中没有

表1 芦草沟组烃源岩有机质特征参数

Table 1 The characteristic parameters of organic matter of Lucaogou Formation source rocks

样品编号	岩性	W <sub>(TOC)</sub> /%	W <sub>(A)</sub> /%	HC /10 <sup>-6</sup>	W <sub>(族组成)</sub> /%				$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
					饱和烃	芳烃	非烃	沥青质	
XD025	深灰色页岩	2.22	0.09	185.64	11.42	9.5	39.34	39.74	-27.92
XD030	深灰色页岩	2.68	0.14	478.38	23.59	10	30.95	35.46	-27.41
XD034	深灰色页岩	4.71	0.21	213.1	5.15	4.26	54.29	36.3	-27.62
XD035	深灰色页岩	6.23	0.21	452.32	14.48	6.97	38.23	40.32	-27.28
XD036	深灰色页岩	5.95	0.23	272.4	7.39	4.55	32.09	55.97	-26.83
XD044	深灰色页岩	2.56	0.14	229.67	12.11	4.87	62.1	20.92	-28.3
XD056	深灰色页岩	11.8	0.25	597.36	14.4	8.9	48.48	28.22	-29.98

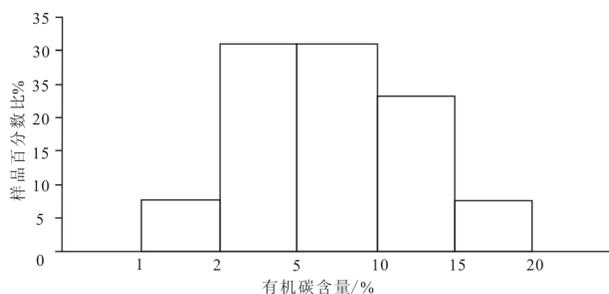


图2 芦草沟组烃源岩有机碳含量频率图

Fig. 2 The frequency of the organic carbon content of Lucaogou Formation source rocks

明显的未分离复杂化合物鼓包(UCM),同时样品中均检测到了姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)(图3),说明测试的样品没受到明显的降解作用,生物标志物参数是有效的。

#### 4.2 正构烷烃

正构烷烃主要来自活体生物的一类脂化合物,正构烷烃的分布和组合特征可以反映烃源岩有机质母质来源方面的信息,正构烷烃亦可以提供成熟度方面的信息<sup>[1-2]</sup>。西大龙口芦草沟组烃源岩正构烷

烃碳数分布范围主要在 $nC_{12} \sim nC_{32}$ ,其中 $nC_{13} \sim nC_{25}$ 低-中分子量正构烷烃占绝对优势,峰型主要为单峰前峰型,主峰碳以 $nC_{17}$ 为主(图3),没有明显的奇偶优势。一般认为, $nC_{21}$ 主要来自于低等水生生物(包括细菌和藻类),而 $nC_{22+}$ 则主要来自陆生高等植物。研究区烃源岩样品正构烷烃的轻重碳比 $\Sigma nC_{21-} / \Sigma nC_{22+}$ 值为2.57~4.61,平均值为3.28,具有轻碳优势,正构烷烃的 $(C_{21}+C_{22}) / (C_{28}+C_{29})$ 比值为10.4~24.32(表2),平均值为17.13,此低碳数优势分布特征反映出该地区烃源岩母质来源主要为低等水生生物。奇偶优势指数OEP分布在1.03~1.09之间(表2),平均值为1.06,正构烷烃没有明显的奇偶优势,但是存在一定的 $nC_{15}$ 和 $nC_{17}$ 的优势(图3)。研究表明,藻类合成的烃类碳数范围为 $C_{14} \sim C_{32}$ ,藻类合成的偶数和奇数同系物的比例接近于1,但通常存在 $nC_{15}$ 或 $nC_{17}$ 的优势,而细菌生成的烃类碳数为 $C_{10} \sim C_{30}$ ,且没有奇偶优势<sup>[2]</sup>。西大龙口芦草沟组烃源岩正构烷烃的分布特征反映母质来源以菌藻类等低等水生生物为主。碳优势指数CPI分布在1.24~1.36之间,平均值为1.29,表明烃源岩有机质成熟度较低。

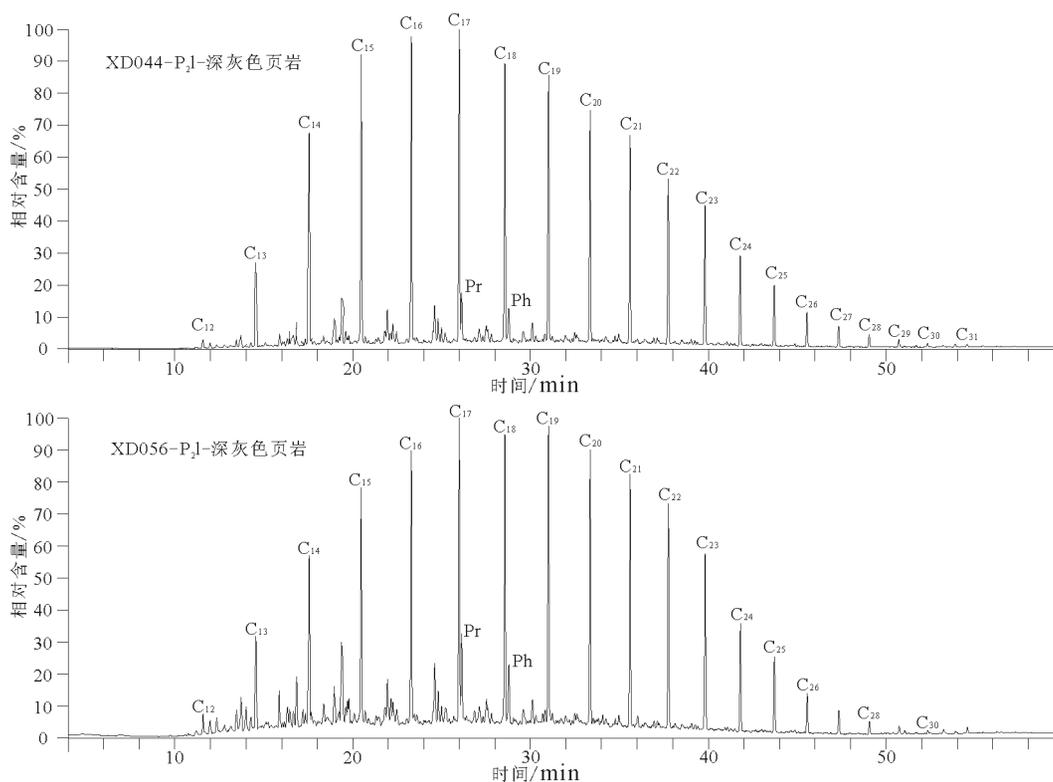


图3 芦草沟组烃源岩气相色谱图

Fig. 3 Gas chromatogram of Lucaogou Formation source rocks

表 2 芦草沟组烃源岩饱和烃气相色谱图参数

Table 2 Chromatogram parameters of Lucaogou Formation source rocks of saturated hydrocarbon

样品编号	主峰碳数	CPI	OEP	$\Sigma nC_{21}/\Sigma nC_{22+}$	$(C_{21}+C_{22})/(C_{28}+C_{29})$	Pr/Ph	Pr/nC <sub>17</sub>	Ph/nC <sub>18</sub>
XD025	nC17	1.36	1.03	3.13	10.4	0.93	0.17	0.22
XD030	nC17	1.24	1.08	2.87	14.98	0.99	0.23	0.25
XD034	nC17	1.27	1.09	3.05	15.95	1.15	0.29	0.27
XD035	nC18	1.28	1.06	2.57	16.92	1.14	0.34	0.28
XD036	nC17	1.27	1.07	4.61	24.32	1.22	0.15	0.14
XD044	nC17	1.26	1.05	3.73	16.73	1.12	0.16	0.16
XD056	nC17	1.32	1.06	2.98	20.59	1.23	0.31	0.27

### 4.3 类异戊二烯烷烃

所有样品中均检测出丰富的类异戊二烯烷烃,其中最丰富且最重要的是姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)。饱和烃中姥鲛烷和植烷的丰度受沉积环境、母质输入、成熟度、生物降解等方面的影响<sup>[31]</sup>。一般认为,在还原环境中显示植烷优势,Pr/Ph 值较低,而在氧化环境中则显示姥鲛烷优势,Pr/Ph 值较高<sup>[32]</sup>。西大龙口芦草沟组烃源岩中 Pr/Ph 指标分布范围为 0.93~1.23(表 2),平均值为 1.11,反映出该套烃源岩弱氧化-弱还原的沉积环境(图 4)。Pr/n-C<sub>17</sub> 和 Ph/n-C<sub>18</sub> 的值分别为 0.15~0.34 和 0.14~0.28(表 2),平均值分别为 0.24 和 0.23,显示正构烷烃占优势,生物降解程度低,干酪根主要为 II 型(图 4)。

### 4.4 萜类化合物

西大龙口剖面芦草沟组烃源岩中检测出了丰富的萜类化合物,主要有五环三萜、三环萜、四环萜、伽马蜡烷等(图 5),其相对丰度为五环三萜 > 三环萜 > 四环萜。

西大龙口剖面烃源岩样品有机质中含有丰富的五环三萜类烷烃,主要包括藿烷系列化合物及伽马蜡烷。其中藿烷系列化合物含量很高,碳数分布范围为 C<sub>27</sub>~C<sub>35</sub>,以 17 $\alpha$ (H)21 $\beta$ (H)-C<sub>30</sub>藿烷为主峰,C<sub>31</sub>~C<sub>35</sub>藿烷丰度依次降低,该系列化合物是地质体中最为常见的一类细菌生源标志物<sup>[14]</sup>。藿烷的 C<sub>31</sub> $\alpha$  $\beta$  22S(22S+22R)值通常用来判断有机质成熟度,一般在进入生油门限时达到平衡值,即 0.6 左右,该值小于 0.2 时,表示有机质未成熟;在 0.2~0.4 之间时,表示有机质处于低成熟阶段;大于 0.4 时,说明有机质已达到成熟阶段,此参数需要跟甾烷的成熟度参数结合起来应用。样品烃源岩中 C<sub>31</sub> $\alpha$  $\beta$

22S/(22S+22R)的范围为 0.48~0.57(表 3),均大于 0.4 小于 0.6,表明有机质均已达到成熟阶段。藿烷系列化合物中的 Ts/(Ts+Tm)也是常用的成熟度指标,因为 Ts 是比较稳定的化合物,而 Tm 则与热演化有关,随着热演化程度的增加,Ts/(Ts+Tm)的值逐渐增大,约在生油阶段晚期该值达到 0.5<sup>[10]</sup>。研究区烃源岩 Ts/(Ts+Tm)值为 0.2~0.31,平均值为 0.28,表明烃源岩处于低成熟阶段。研究发现,Tm 与 Ts 相对含量不仅与成熟度有关,还受环境的影响,氧化环境中有明显的 Ts 优势,还原环境中 Tm 优势显著<sup>[33]</sup>。样品烃源岩中有明显的 Tm 优势,Tm/Ts 值为 2.23~3.6,平均值为 2.54,表明烃源岩发育于还原环境。

三环萜烷具有较高的热稳定性和抗生物降解能力,主要来源于原生生物(细菌)的细胞膜及藻类等微生物,其和藿烷系列化合物的相对丰度和分布特征受沉积环境、母质类型和成熟度的控制,丰富的三环萜烷反映了较咸化沉积环境及菌藻类等低等生物输入<sup>[34]</sup>,较低的三环萜烷/藿烷的比值说明有机质成熟度较低。样品烃源岩中具有完整的 C<sub>19</sub>~C<sub>29</sub>的 13 $\beta$ (H)14 $\alpha$ (H)三环萜烷分布,其中以 C<sub>20</sub>、C<sub>21</sub>、C<sub>23</sub>、C<sub>24</sub>的丰度较高。三环萜烷/藿烷的值分布在 0.05~0.22 之间,平均值为 0.16,表明样品烃源岩成熟度较低。仅检测出了丰度较低的 C<sub>24</sub>-四环萜烷,其与 C<sub>26</sub>-三环萜烷共同溢出。有研究表明,四环萜烷可能是微生物降解作用的产物,在成岩作用早期,由生物降解作用打开藿烷的前驱物——藿烯中的五元环,随后经地球化学作用还原而成,具有一定的热稳定性<sup>[35]</sup>。研究区样品烃源岩有机质中出现的四环萜烷可能表明,成岩早期有机质受到了

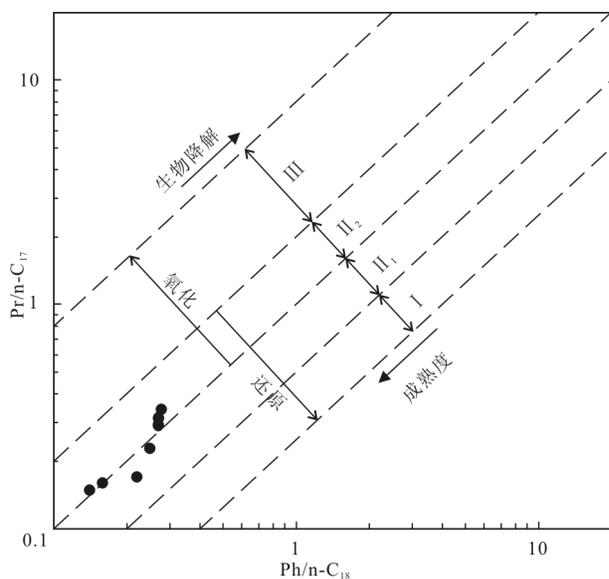


图4 芦草沟组烃源岩  $\text{Ph}/n\text{-C}_{18}$  和  $\text{Pr}/n\text{-C}_{17}$  相关图

Fig. 4 The  $\text{Ph}/n\text{-C}_{18}$  and  $\text{Pr}/n\text{-C}_{17}$  diagram of Lucaogou Formation hydrocarbon source rock

一定程度的生物降解作用。

伽马蜡烷是反映咸水环境的重要生物标志化合物,主要来源于原生生物和光合作用细菌的四膜

虫醇,通过还原作用形成。高含量的伽马蜡烷常被作为强还原超盐环境的指示,而且与水体的分层有关<sup>[36]</sup>。伽马蜡烷/ $\text{C}_{30}$ 藿烷的比值可以反映伽马蜡烷的相对含量,称为伽马蜡烷指数(GI)<sup>[37]</sup>。西大龙口芦草沟组烃源岩中普遍检测出中等丰度的伽马蜡烷,GI为0.11~0.26,平均值为0.15,样品烃源岩中伽马蜡烷的这种分布特征,说明该地区有机质沉积于微咸-半咸水环境中。

#### 4.5 甾类化合物

甾类化合物是重要的生物标志化合物,通常用来判识有机质的母质来源和成熟度<sup>[1-2]</sup>。研究区样品烃源岩中鉴定出来的甾类化合物主要有  $\text{C}_{27}$ 、 $\text{C}_{28}$  和  $\text{C}_{29}$  规则甾烷、孕甾烷、升孕甾烷,还有一定的重排甾烷(图6)。

规则甾烷主要包括  $\text{C}_{27}$ 、 $\text{C}_{28}$  和  $\text{C}_{29}$  甾烷,其相对含量可以反映有机质的生源构成。研究区样品烃源岩中的  $\text{C}_{27}$ 、 $\text{C}_{28}$  和  $\text{C}_{29}$  甾烷的相对含量分别为 16.76%~22.96%、36.57%~44.41% 和 34.68%~40.92% (表3),具有  $\text{C}_{29} > \text{C}_{28} > \text{C}_{27}$  的上升型分布特征或  $\text{C}_{29} = \text{C}_{28} > \text{C}_{27}$  的“厂”型分布特征(图6)。一般认为,  $\text{C}_{27}$  (和  $\text{C}_{28}$ ) 甾烷主要来源于藻类等低等水生生物

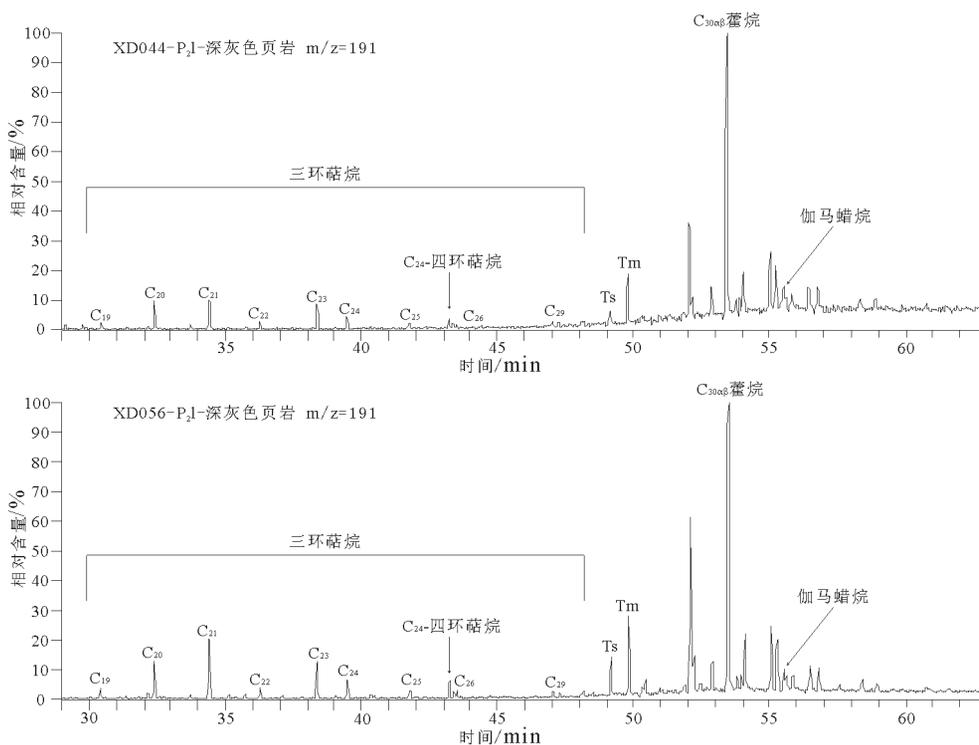


图5 芦草沟组烃源岩 191 质量色谱图

Fig. 5 The  $m/z$  191 mass chromatogram of Lucaogou Formation hydrocarbon source rock

表 3 芦草沟组烃源岩甾萜类生物标志物参数

Table 3 Chromatogram parameters of Lucaogou Formation source rocks of steroid and terpenoid compound biomarker compound

样品编号	A	B	C	D	E	F	G	规则甾烷相对组成/%			H	I
								C <sub>27</sub>	C <sub>28</sub>	C <sub>29</sub>		
XD025	0.05	0.48	0.26	0.28	2.34	0.98	0.12	16.76	44.41	38.82	0.23	0.17
XD030	0.17	0.56	0.15	0.28	2.23	0.33	0.46	16.83	36.57	46.6	0.33	0.31
XD034	0.22	0.54	0.13	0.29	2.23	0.22	0.76	21.37	37.69	40.93	0.35	0.41
XD035	0.17	0.56	0.11	0.28	2.63	0.2	0.59	22.2	38.05	39.75	0.36	0.42
XD036	0.17	0.54	0.11	0.2	3.6	0.22	0.56	22.52	42.81	34.68	0.27	0.37
XD044	0.17	0.55	0.15	0.3	2.45	0.46	0.29	17.43	42.08	40.5	0.26	0.24
XD056	0.21	0.57	0.12	0.31	2.3	0.23	0.57	22.96	41.08	35.95	0.32	0.35

注: A—三环萜烷/藿烷; B—C<sub>31</sub> α β 22S(22S+22R); C—GI; D—Ts/(Ts+Tm); E—Tm/Ts; F—甾烷/藿烷; G—孕甾烷/C<sub>27</sub>规则甾烷; H—C<sub>29</sub> α β β / (α β β + α α α); I—C<sub>29</sub>20S(20S+20R)

(不同的藻类含有不同特征的甾醇,其中硅藻、褐藻和绿藻富含 C<sub>29</sub>甾醇), C<sub>29</sub>甾烷通常来源于藻类和高等植物。结合正构烷烃的分布情况看,研究区样品中高含量的 C<sub>29</sub>甾烷应该来源于藻类,样品中甾烷的 C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>和 C<sub>29</sub>都比较高,这种特征总体反映了烃源岩有机质主要来源于藻类等水生生物。

规则甾烷/17 α (H)-藿烷比值可以反映真核生物(藻类和高等植物)与原核生物(细菌)对有机质的贡献。高含量的甾烷和高的甾烷/藿烷值(≥1)的有机质主要来源于浮游或底栖藻类生物等,与之相反,低含量的甾烷和低的甾烷/藿烷值(≤1)主要指示陆源或微生物改造过的有机质<sup>[7]</sup>。研究区样品烃源岩的甾烷/藿烷比值分布在 0.2~0.98 之间,平均值为 0.37,比值较小。通过参考其他参数,可以判断烃源岩中有机质受到微生物降解作用的影响。

甾烷化合物中,甾烷构型的比值可以作为成熟度的有效指标,其中 C<sub>29</sub>20S(20S+20R)和 C<sub>29</sub> α β β / (α β β + α α α)是最常用的成熟度参数。研究区样品中甾烷的 C<sub>29</sub>20S(20S+20R)和 C<sub>29</sub> α β β / (α β β + α α α)的值分别为 0.17~0.42 和 0.23~0.36,分析表明,样品基本处于低成熟-成熟阶段(图 7)。甾烷的成熟度参数 C<sub>29</sub>20S(20S+20R)和 C<sub>29</sub> α β β / (α β β + α α α)比藿烷系列的成熟度参数 C<sub>31</sub> α β 22S/(22S+22R)小很多,一般认为是有机质形成初期受到微生物降解作用的影响。

研究区样品中普遍检测出较高丰度的孕甾烷、升孕甾烷系列化合物,此类化合物生源也属于藻类。孕甾烷和升孕甾烷的相对含量也能反映沉积时水体的咸化程度。有关盐湖环境的研究发现,孕甾烷和 C<sub>27</sub>规则甾烷的相对丰度比较高甚至可达 1.0 以上。研究区样品中孕甾烷和升孕甾烷的含量都比较高,孕甾烷/C<sub>27</sub>规则甾烷的比值分布在 0.12~0.76 之间,说明沉积水体咸化程度较高。

一般认为,较低含量的重排甾烷与有机质成熟度低或沉积水体咸化有关<sup>[16]</sup>。研究区样品中重排甾烷含量极低(图 6),综合考虑,可能与有机质成熟度低和沉积水体咸化有很大的关系。

## 5 结论

(1)研究区芦草沟组烃源岩有机碳含量、氯仿沥青“A”和总烃含量均比较高,表明有机质丰度高。有机碳同位素和类异戊二烯烷烃的 Pr/n-C<sub>17</sub>和 Ph/n-C<sub>18</sub>的值均表明研究区烃源岩干酪根类型为 I—II 型。综合表明,研究区芦草沟组是一套很有利的烃源岩。

(2)研究区芦草沟组烃源岩较低的有机碳同位素值和甾烷的 C<sub>27-29</sub>含量关系表明,母质来源主要为藻类等水生生物;正构烷烃的轻碳优势和较丰富的三萜藿烷也表明母质来源受高等植物影响很小,主要来源于菌藻类等水生生物。综合分析,藻类等水生生物是研究区芦草沟组烃源岩的主要母质来源。

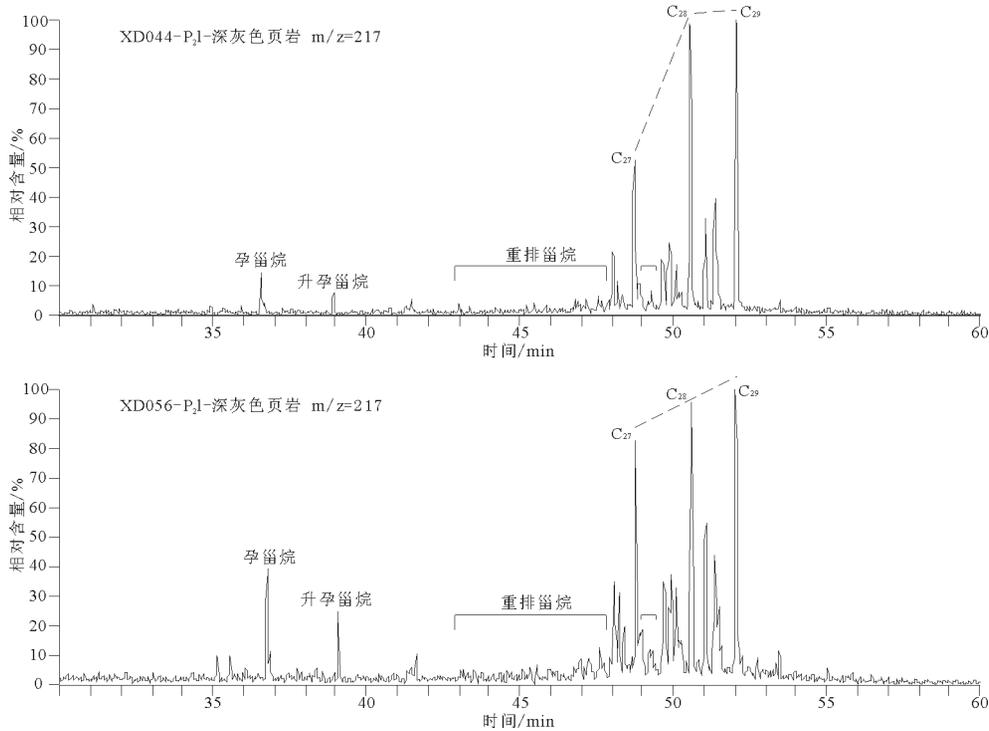


图6 芦草沟组烃源岩217质量色谱图

Fig. 6 The m/z 217 mass chromatogram of Lucaogou Formation hydrocarbon source rock

(3)研究区烃源岩 Pr/Ph 值、Ph/n-C18 和 Pr/n-C17 的关系图均表明,研究区为弱氧化-弱还原的古沉积环境;较高的伽马蜡烷指数、较低的重排甾烷及较高的孕甾烷和升孕甾烷含量,均表明水体盐度较高;Tm/Ts 值较大,较大的 Tm 优势,表明烃源

岩发育于还原环境。综合分析,研究区烃源岩形成于水体中氧气量适中的弱氧化-弱还原环境,水体中盐度较高导致还原环境增强。

(4)研究区烃源岩样品中正构烷烃的碳优势指数 CPI 值、Ts/(Ts+Tm) 值、三环萜烷/藿烷的值及甾烷的 C<sub>29</sub>20S (20S+20R)、C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα) 的值均表明烃源岩成熟度较低;C<sub>31</sub>藿烷 αβ 22S/(22S+22R) 值反映出烃源岩已进入成熟阶段。综合评价,研究区样品烃源岩有机质基本处于低熟-成熟阶段。

(5)研究区样品烃源岩有机质中四环萜烷的出现、较小的规则甾烷/17α(H)-藿烷比值及 C<sub>31</sub>藿烷 αβ 22S/(22S+22R) 值比甾烷的 C<sub>29</sub>20S (20S+20R) 和 C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα) 的值要高很多,都表明烃源岩成岩早期有机质受到了一定程度的生物降解作用。试猜想早期的生物降解降低了烃源岩生烃的活化能,使得该地区成熟度较低的烃源岩也能很好地生烃,有待进一步研究。

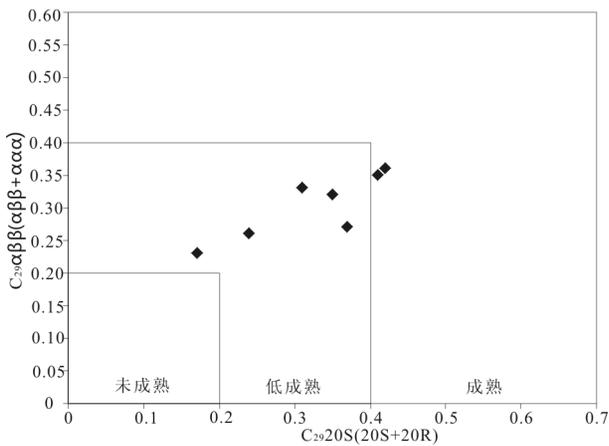


图7 芦草沟组烃源岩 C<sub>29</sub>20S(20S+20R) 和 C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα) 关系图

Fig. 7 The C<sub>29</sub>20S(20S+20R) and C<sub>29</sub>αββ/(αββ+ααα) diagram of the Lucaogou Formation hydrocarbon source rock

参考文献

[1]Peter K E,Moldowan M.The biomarker Guide:Interpreting Molecu-

- lar Fossils in Petroleum and Ancient Sediments[M].New Jersey:Pren-tice Hall Inc,1993.
- [2]卢双舫,张敏.油气地球化学[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [3]中国科学院地学部,新疆石油管理局.准噶尔盆地形成演化与油气生成[M].北京:科学出版社,1989:1-86.
- [4]赵殿栋,刘传虎.准噶尔盆地油气勘探潜力及方向[J].新疆石油地质,2005,26(1):1-5.
- [5]石油勘探开发研究院地质研究所.中国陆相油气生成[M].北京:石油工业出版社,1982:114-129.
- [6]成守德,王元龙.新疆大地构造演化基本特征[J].新疆地质,1998,16(2):97-107.
- [7]旷理雄,郭建华,梅廉夫,等.从油气勘探的角度论博格达山的隆起[J].吉林大学学报(地球科学版),2005,35(3):346-350.
- [8]Carroll A R, Brassell S C, Graham S A. Upper Permian lacustrine oil shales, southern Junggar basin, northwest China[J].AAPG Bulletin,1992,76:1874-1902.
- [9]高苑,王永莉,何大祥,等.准噶尔盆地东南缘油页岩有机地球化学特征及含气潜力[J].天然气地球科学,2013,24(6):1196-1204.
- [10]翟光明.中国石油地质志:卷15[M].北京:石油工业出版社,1993:57-98.
- [11]杨斌.准噶尔盆地生油岩评价[J].新疆石油地质,1982.
- [12]陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J].地质学报,2016,90(1):37-67.
- [13]王东营,汤达祯,苟明福,等.准噶尔南缘阜康地区芦草沟组油页岩地质特征[J].中国石油勘探,2007,2:18-22,71-72.
- [14]王东营,许浩,李婧婧,等.博格达山北麓大黄山地区芦草沟组油页岩地球化学特征与沉积环境分析[J].内蒙古石油化工,2008,3:62-65.
- [15]李婧婧,汤达祯,许浩,等.准噶尔盆地南缘大黄山矿区二叠系芦草沟组油页岩沉积特征[J].西安科技大学学报,2009,29(1):58-72.
- [16]李婧婧,陶树,刘晓华.博格达山北麓油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J].洁净煤技术,2012,1:102-112.
- [17]彭雪峰,汪立金,姜丽萍.准噶尔盆地东南缘二叠系芦草沟组沉积环境分析[J].新疆大学学报(自然科学版),2011,28(4):395-400.
- [18]彭雪峰,汪立金,姜丽萍.准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(2):121-127.
- [19]吴绍祖,屈迅,李强.准噶尔芦草沟组与黄山街组的古气候条件[J].新疆地质,2002,20(3):183-186.
- [20]张义杰,齐雪峰,程显胜,等.准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境[J].新疆石油地质,2007,28(6):673-675.
- [21]张慧,李琦,林鹏,等.柴窝堡凹陷红雁池及芦草沟组储层特征及控制因素[J].现代矿业,2013,7:52-55.
- [22]匡立春,胡文瑄,王绪龙,等.吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层初步研究:岩性与孔隙特征分析[J].高校地质学报,2013,19(3):529-535.
- [23]李红南,毛新军,胡广文,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层特征及产能预测研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2014,36(10):40-44.
- [24]任江玲,向宝力,廖建德,等.吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组源储关系与油气生成[C]//第十四届全国有机地球化学学术论文集.中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室,2013:508.
- [25]Tao S, Tang D Z, Li J J, et al. Indexes in evaluating the grade of Bogda Mountain oil shale in China[J]. Oil Shale, 2010, 27(2):179-189.
- [26]陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地南缘油气生产与分布规律-源岩地球化学特征与生烃史[J].石油学报,2015,36(7):767-780.
- [27]杜治利,刘洪军,张枝焕.准噶尔盆地南缘中二叠统烃源岩地球化学特征[J].西安石油大学学报,2016,31(3):1-7.
- [28]胡见义,黄第藩.中国陆相石油地质理论基础[M].北京:石油工业出版社,1991.
- [29]黄汝昌.中国低熟油及凝析气藏形成与分布规律[M].北京:石油工业出版社,1997:14-16.
- [30]陈文彬,付修根,谭富文,等.羌塘盆地上三叠统土门格拉组烃源岩生物标志物地球化学特征[J].现代地质,2014,28(1):216-223.
- [31]钟燕飞,郭江涛,王丽,等.松辽盆地松科1井青山口组沉积有机质特征及生烃潜力[J].地球化学,2009,38(5):487-497.
- [32]傅家谟,盛国英,徐家友,等.应用生物标志化合物参数判识古沉积环境[J].地球化学,1991,20(1):1-20.
- [33]孔庆云,周辉,李铁.生物标志化合物指标的探讨[J].大庆石油学院学报,1987,35(3):9-15.
- [34]高红梅,鲍志东,高福红.内蒙古东北拉布达林盆地上库力组烃源岩生物标志物特征[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(3):27-38.
- [35]黄绍甫,林金河,韦东,等.沉积岩和原油中四环萜烷的地化意义初探[J].沉积学报,1987,5(4):127-136.
- [36]Fu J M, Sheng G Y, Peng P A, et al. Peculiarities of salt lake sediments as potential source rocks in China[J]. Org. Geochem., 1996, 10(1/3):119-126.
- [37]冯乔,柳益群,郝建荣.三塘湖盆地芦草沟组烃源岩及其古环境[J].沉积学报,2004,22(3):513-517.