

鄂尔多斯盆地西峰地区延长组烃源岩两环烷烃分布特征及其生源

吉利明¹, 梁晓飞^{1,2}, 贺 聪^{1,2}, 吴远东^{1,2}

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室,
甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:鄂尔多斯盆地西南部西峰地区三叠系延长组烃源岩检出丰富的两环烷烃, 主要为 $C_{12} \sim C_{14}$ 和 C_{15} 、 C_{16} 两组两环烷烃。其相对丰度表现出 3 种源岩模式: ①以低碳数两环烷烃为主, 出现于长 7¹ 和长 8¹ 段非烃源岩; ②两组两环烷烃都很丰富, 出现于长 7³ 段富有机质烃源岩; ③以高碳数两环烷烃为主, 主要发现于长 7³ 段烃源岩, 也见于长 7² 和长 8¹ 段。尽管长 7 段热演化程度基本一致, 但补身烷异构化指数变化明显, 表明补身烷重排不仅受热演化的影响, 而且受有机质来源和沉积环境的控制。延长组烃源岩具有明显的高补身烷优势, 反映了烃源岩的还原性沉积环境。烃源岩高丰度 C_{15} 、 C_{16} 两环烷烃的检出则指示该地区晚三叠世发育淡水湖泊。葡萄藻不仅是该地区中生界石油的重要母质来源, 而且可能是这些两环类标志物的直接生源。

关键词:两环烷烃; 延长组; 烃源岩; 生物标志物; 三叠系; 葡萄藻; 西峰地区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:P618.13; TE122.1 **文献标志码:**A

Distribution of Bicyclic Alkanes of Source Rocks of Yanchang Formation in Xifeng Area of Ordos Basin and Their Biological Sources

Ji Li-ming¹, LIANG Xiao-fei^{1,2}, HE Cong^{1,2}, WU Yuan-dong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources of Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A lot of bicyclic alkanes are detected from source rocks of Triassic Yanchang Formation in Xifeng area of southwestern Ordos Basin. They are two groups of bicyclic alkanes mainly including $C_{12} \sim C_{14}$ and C_{15} , C_{16} . The relative abundances of the two groups have three kinds of source rock patterns: ①there are mainly bicyclic alkanes with lower carbon number, which are detected from non-source rocks of Chang-7¹ and Chang-8¹ sections; ②the two groups both are very rich, and are detected from organic-rich source rocks of Chang-7³ section; ③there are mainly bicyclic alkanes with higher carbon number, which are detected from source rocks of Chang-7³, Chang-7² and Chang-8¹ sections. Although the thermal evolutions of Chang-7 section are similar, the change of drimane isomerization index is significant, so that drimane rearrangement is effected not only by the thermal evolution, but also by the source of organic matter and the depositional environment. The source rocks of Yanchang Formation have an obvious advantage of homodrimane, so that the depositional environment is reductive. C_{15} , C_{16} bicyclic alkanes of source rocks with high

收稿日期:2014-10-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41172131);甘肃省油气资源研究重点实验室专项项目(1309RTSA041)

作者简介:吉利明(1963-),男,陕西咸阳人,研究员,博士研究生导师,理学博士, E-mail: jilimin@lzb.ac.cn.

abundance are detected in the area, indicating that freshwater lake develops in Late Triassic. *Botryococcus braunii* is an important parent material of Mesozoic oil in the area, and also may be the direct biological sources of these bicyclic biomarkers.

Key words: bicyclic alkane; Yanchang Formation; source rock; biomarker; Triassic; *Botryococcus braunii*; Xifeng area; Ordos Basin

0 引言

鄂尔多斯盆地延长组烃源岩地球化学研究发现,延长组沉积有机质含有较丰富的两环烷烃(包括两环倍半萜),而由混合型母质为主的陆相沉积中的两环倍半萜通常被认为来自于高等植物^[1-2]。Alexander 等认为两环萜烷是细菌代谢的产物,是成岩作用初期细菌藿烷在微生物参与下,发生降解开环形成的带官能团且具两环结构的产物,以及在成岩作用后期经脱官能团和重排演化而形成的多种异构体化合物^[3]。 $8\beta(\text{H})\text{-C}_{20}$ 高补身烷曾发现于藻煤之中,指示 $8\beta(\text{H})\text{-补身烷}$ 系列可能具有多种前身体,包括菌藻类母质输入和长侧链三环萜烷、8,14-断藿烷和藿烷系列降解或开环的衍生物等^[4]。某些重排补身烷被认为源于被子植物奥利醇的降解或奥利烷的开环^[5]。此外,实验室培养的葡萄藻中也检测出 $\text{C}_{14}\sim\text{C}_{16}$ 双环萜烷, C_{20} 双环萜烷和 C_{15} 、 C_{16} 、 C_{20} - $8\beta(\text{H})\text{-补身烷}$ 等19种双环萜烷^[6],因此,葡萄藻也成为地质体中这些两环萜烷的可能来源。总之,两环萜烷具有多种成因,细菌和藻类有机质母质输入及其生物降解产物均可能是其重要来源。

虽然葡萄藻(*Botryococcus braunii*) 在细胞形态上难以区别为不同的类型,但依据其产生明显不同的烃类,可区分为A、B和L等3个化学种。化学种A能产生正构烷烃、类异戊二烯烷烃、环烷烃以及丰富的直链 $\text{C}_{23}\sim\text{C}_{31}$ 为主的正构二烯烃和三烯烃^[6-7]。化学种B主要产生 $\text{C}_{30}\sim\text{C}_{37}$ 三萜烯类(葡萄藻烯)^[7-9];葡萄藻烷是化学种B独有的代谢产物——葡萄藻烯完全还原的衍生物,已在中国茂名油页岩等沉积物中发现^[10];此外,化学种B还能合成特殊结构的三萜烯——角鲨烯^[11-12]。化学种L则产称为Lycopadiene的四萜烯^[7,13]。这些研究表明,葡萄藻除了能直接合成两环萜化合物,还能够产生丰富的萜烯类化合物,他们在成岩作用和细菌降解过程中也可能成为两环类化合物的间接来源。本文选择鄂尔多斯盆地西南部西峰地区不同钻井延长组烃源岩,系统研究了有机地球化学和生物标志物,详细鉴定和分析了两环烷烃与两环倍半萜的分布特征,

结合微体古生物研究资料探讨了其成因。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是位于华北西部中生代大型盆地,古生代之前属于华北地台的西部边缘海;中三叠世,由于古地中海的退出,该地区开始形成陆相拗陷型盆地;进入湖盆发育阶段,中晚三叠世发育的延长组湖相-三角洲相沉积厚度超过1 000 m,其中,暗色泥岩、碳质泥岩及油页岩是本地区中生界油气的重要来源,各种砂岩层及砂体往往形成石油储层^[14-15]。依据岩性、电性、标志层及含油气特征,延长组自上而下划分为10个油层组(长1~长10);各油层组根据内部沉积旋回和岩性组合特点,可进一步细分为2~3个油层段^[16]。延长组沉积明显受区域构造活动控制,自长10期盆地开始发育至长1期末盆地消亡,构成完整的沉积旋回。长9期、长7期及长4+5期存在3次水进过程,其中,长7期为最大湖泛期,形成了盆地内广泛分布的重要烃源岩。

西峰油田位于鄂尔多斯盆地西南部(图1),其主力油源是延长组长7段深湖—半深湖相富含有机质泥岩与油页岩,而其下紧邻的以砂岩沉积为主的长8¹段成为该地区主要石油储层^[17-19]。该地区延长组长8—长7段有机地球化学研究表明:延长组长8²、长8¹及长7¹段有机质相对贫乏,但含有较多的陆源有机质,为滨浅湖及三角洲相沉积;长7²段和长7³段不仅有机质丰度高,而且类型好,形成于深湖—半深湖相还原环境的富有机质暗色泥岩及油页岩中含大量来源于低等水生生物和浮游藻类的腐泥型有机质^[20-24]。为了全面反映两环烷烃在延长组不同沉积阶段和不同沉积环境的分布,选择延长组长8—长7段不同层位、不同生烃潜力的样品进行生物标志物分析。

2 样品分析

研究区烃源岩样品主要采自西30井和西44井延长组长8—长7段,并以其他钻井的主要烃源岩层长7³段样品为补充,包括西40井、宁4井和正5井及邻区的木9井和镇42井(图1)。

其在总离子流图上处于 20 min 之前的正构烷烃 nC_{12} 与 nC_{16} 之间(图 2)。在质荷比为 123 的质量色谱图上经常出现 $C_{12} \sim C_{14}$ 和 C_{15} 、 C_{16} 两组两环烷烃,其相对丰度变化较大,一般 $C_{12} \sim C_{14}$ 两环烷烃较低,甚至不出现,但个别样品 $C_{12} \sim C_{14}$ 两环烷烃可明显高于 C_{15} 、 C_{16} 两环烷烃。源岩中两环类化合物丰度至少与其他萜类化合物相当,许多样品中远超过其他萜类化合物的丰度。依据现有文献资料在质荷比为 123 的质量色谱图上确定了化合物的结构特征^[3,25-26]。

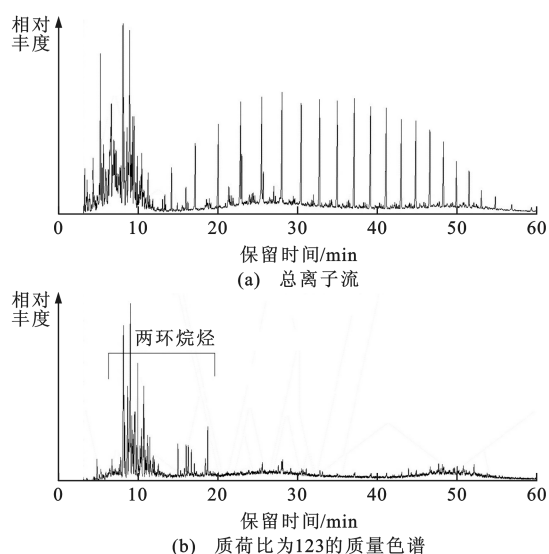


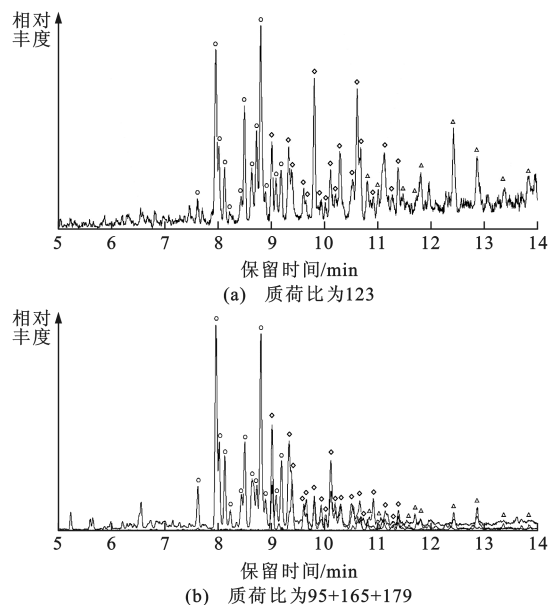
图 2 烃源岩饱和烃总离子流和质量色谱

Fig. 2 Total Ion and Mass Chromatograms of Saturated Hydrocarbons of Source Rocks

部分烃源岩样品中检出的 $C_{12} \sim C_{14}$ 低碳数两环类生物标记物类型极为丰富,包括两环倍半萜和两环烷烃,在质量色谱特征上能够确认的化合物达 40 个,其中, C_{12} 、 C_{13} 和 C_{14} 化合物分别为 13、18 和 9 个。低碳数两环烷烃和两环倍半萜化合物以 C_{12} 和 C_{13} 为主, C_{14} 不仅数量少,而且丰度较低(图 3)。高碳数两环萜化合物包括 C_{15} 补身烷和 C_{16} 高补身烷系列生物标志物,一般以 C_{15} 补身烷更为丰富,依据保留时间和质量色谱特征可辨认出 13 个化合物(图 4)。

3.2 两环烷烃分布模式

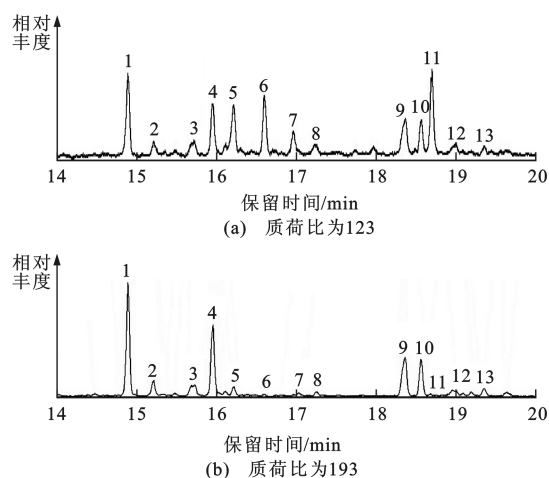
烃源岩中两环烷烃和两环倍半萜的分布差异较大,表现出 3 种源岩模式:①以低碳数两环化合物($C_{12} \sim C_{14}$)为主,高碳数两环化合物(C_{15} 、 C_{16})丰度较低(图 5);②低碳数与高碳数两环化合物都很丰富;③以高碳数两环化合物为主,低碳数两环化合物丰度很低,甚至未出现。源岩模式①的样品比较少,出现于延长组长 7^1 和长 8^1 段,有机碳含量(质量分



峰号○为二甲基全氢萜,分子式为 $C_{12}H_{22}$,分子量为 166,质谱基峰为 95;峰号◇为三甲基全氢萜,分子式为 $C_{13}H_{24}$,分子量为 180,质谱基峰为 165;峰号△为四甲基全氢萜,分子式为 $C_{14}H_{26}$,分子量为 194,质谱基峰为 179

图 3 烃源岩 $C_{12} \sim C_{14}$ 两环烷萜质量色谱

Fig. 3 Mass Chromatograms of $C_{12} \sim C_{14}$ Bicyclic Terpenes in Source Rocks



峰号 1 为 4,4,8,8,9-五甲基全氢萜;峰号 2、3 为 4,4,8,8,10-五甲基全氢萜;峰号 4 为 4,4,8,9,9-五甲基全氢萜;峰号 5 为 8β(H)-补身烷;峰号 6、7 为 4,4,9,9,10-五甲基全氢萜;峰号 8 为 4,4,10-三甲基-9-乙基全氢萜;峰号 9 为 4,4,8,10-四甲基-9-乙基全氢萜;峰号 10 为 4,4,8,9-四甲基-8-乙基全氢萜;峰号 11 为 8β(H)-高补身烷;峰号 12 为 2,4,4,10-四甲基-9-乙基全氢萜;峰号 13 为 4,4,8,10-四甲基-9-乙基全氢萜;峰号 1~8 分子式为 $C_{15}H_{28}$,分子量为 208;峰号 9~13 分子式为 $C_{16}H_{30}$,分子量为 222;峰号 1~4、9、10、12 和 13 质谱基峰为 193,峰号 5~8 和 11 质谱基峰为 123

图 4 烃源岩 C_{15} 、 C_{16} 两环烷萜质量色谱

Fig. 4 Mass Chromatograms of C_{15} and C_{16} Bicyclic Terpenes in Source Rocks

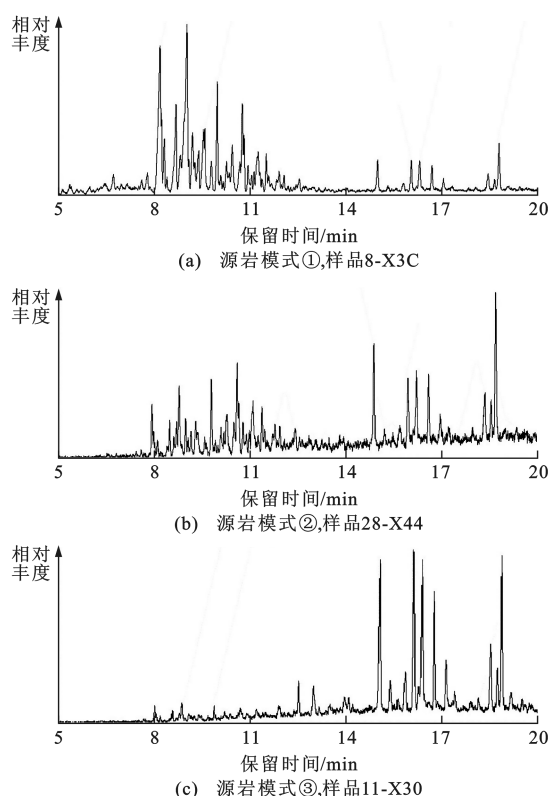


图5 烃源岩两环烷烃和两环倍半萜分布模式

Fig. 5 Distribution Patterns of Bicyclic Alkanes and Bicyclic Sesquiterpenoids of Source Rocks

数,下同)小于1%,有机质类型差,为非烃源岩;源岩模式②的样品出现于长 7^3 段,有机质类型较好,即可以是烃源岩,也可能是低有机碳含量的非烃源岩,一般含丰富的砂质碎屑;源岩模式③的样品占分析样品的多数,主要为长 7^3 段的富有机质烃源岩,也见于长 7^2 和长 8^1 段,有机质类型好。表1列出了所有研究样品的各种生物标志物参数值。两环倍半萜的相关指标是根据质荷比为123的质量色谱计算得到的。两环倍半萜相对丰度($\sum(C_{15}-C_{16})/(5 \times C_{30} \alpha\beta)$ 值)是5个最丰富高碳数两环倍半萜平均丰度与藿烷 $C_{30} \alpha\beta$ -五环三萜(源岩中丰度最高的藿烷)丰度的比值,补身烷异构化指数(重排补身烷/补身烷值)是两个重排补身烷丰度之和与补身烷丰度之比。

重排补身烷是补身烷在热演化过程发生甲基重排的异构体,常见的2个化合物为4,4,8,8,9-五甲基十氢化萜和4,4,8,9,9-五甲基十氢化萜,两者丰度之和与补身烷丰度的比值通常被认为是反映原油热成熟度的敏感指标;在一定沉积条件下,热演化程度与重排化合物的丰度成正比^[2,27-29]。西峰地区延长组烃源岩主要集中于长7段,虽然不同井位现今地层埋深不同,但在地史上经受的热演化程度基本一致(镜质体反射率介于0.76%~0.94%)。数据

显示,延长组烃源岩重排补身烷/补身烷值变化较大,分布在0.938~2.818之间(表1),而且即使在同一口钻井中,该参数并未随深度的增加而增大,表明烃源岩重排补身烷/补身烷值可能不仅仅受热演化程度的影响,而且湖相沉积中频繁的陆源有机质输入量变化以及氧化-还原条件的改变都可能直接或间接影响补身烷的异构化程度。

延长组烃源岩高补身烷/补身烷值分布在0.926~3.875之间,平均值为1.914(表1),具有明显的高补身烷优势;一般认为丰富的高补身烷可能代表沉积古环境具有较高的盐度,或者指示缺氧的还原环境^[1,30]。大量研究表明,中晚三叠世鄂尔多斯湖盆是一个典型的以淡水为主的大型内陆湖泊,烃源岩高补身烷优势可能主要反映延长组还原性的沉积古环境。二环倍半萜在淡水湖泊、沼泽环境中相对丰度最高,向淡水—微咸水湖泊及咸水湖泊环境演化时其相对丰度降低,且咸水环境形成的原油中 $C_{12} \sim C_{14}$ 二环萜烷的相对丰度较大^[2]。西峰地区延长组烃源岩中高相对丰度 $C_{15} \sim C_{16}$ 两环烷烃的检出指示了淡水湖泊环境。

4 两环烷烃可能生源

Metzger等研究葡萄藻抽提物和加热分解产物,检测出双峰形正构烷烃及系列类异戊二烯烷烃、烯烃、环烷烃、甾烷和萜烷等生物标志物^[8,10-11,31-34]。其中,萜烷类包括三环二萜烷及五环三萜烷,并且从采自美国和法国2个同属于化学种A的淡水葡萄藻培养样品提取物中检测出丰富的两环萜烷,包括 $C_{14} \sim C_{16}$ 、 C_{20} 两环萜烷^[6]。不同培养阶段出现的两环萜烷的丰度和结构有所变化:早期生长的葡萄藻以 C_{15} 两环萜烷为主,主峰为 C_{15} 补身烷,其次是 C_{16} 高补身烷;成熟葡萄藻则以 C_{20} 两环萜烷为主,包括多个 C_{20} 高补身烷异构体。该类化合物在现代葡萄藻体中大量发现,表明葡萄藻可能是地质体及原油中两环萜烷的可能生源之一。鄂尔多斯盆地延长组烃源岩丰富的 $C_{14} \sim C_{16}$ 两环倍半萜的检出在一定程度上指示:葡萄藻不仅是该地区中生界原油的重要母质来源^[35],而且可能是这些两环类标志物的直接生源,可能属于能够产生两环类化合物的化学种A葡萄藻。延长组烃源岩中未发现培养葡萄藻中大量出现的 C_{20} 双环萜烷,可能原因有:①它们的生长环境不同;②烃源岩中带长侧链的 C_{20} 双环萜可能被完全降解。

倍半萜类在沉积记录中分布广泛,在各种沉积环境均有发现,但由于有机质来源不同,不同沉积物

表 1 烃源岩烷烃地球化学参数

Tab.1 Geochemical Parameters of Alkane of Source Rocks

井号	层位	样品 编号	井深/ m	Pr/ Ph 值	两环烷烃				三环/ 藿烷值	藿烷			
					$\Sigma(C_{15}-C_{16})/$ $(5 * C_{30} \alpha\beta)$ 值	重排补身烷/ 补身烷值	高补身烷/ 补身烷值	分布 模式		Tm/ Ts 值	$\Sigma(C_{27}+C_{29})/$ ΣC_{31+} 值	γ -蜡烷/ $(0.5C_{31} \alpha\beta)$ 值	$C_{31} \alpha\beta/$ $[22S/22(S+R)]$ 值
X30	长 7 ³	3-X30	1 851.6	1.118	7.067	1.480	0.926	③	0.132	1.385	2.370	0.308	0.556
		3-3X30	1 853.1	1.423	1.689	2.400	0.933	③	0.156	1.900	1.667	0.194	0.548
		11-X30	1 859.3	1.833	2.933	2.112	1.000	③	0.160	2.467	1.794	0.294	0.588
	长 8 ¹	7-X30	1 865.1	1.514	3.000	2.092	1.636	①	0.306	1.029	0.861	0.180	0.580
		24-X30	1 867.8	3.818	4.000	2.818	2.364	②	0.111	2.944	2.031	0.227	0.591
		8-X30	1 877.3	1.509	3.000	1.890	1.889	①	0.4046	0.722	0.944	0.793	0.548
		47-X30	1 883.6	4.182	2.255	1.476	2.952	②	0.082	0.276	1.100	0.224	0.603
		49-X30	1 885.1	0.952	0.182	1.666	3.000	③	0.500	0.371	1.355	0.360	0.580
		51-X30	1 886.4	1.230	0.172	1.500	3.167	③	0.274	2.559	2.035	0.280	0.570
X44	长 7 ¹	1-X44	1 969.0	1.500	0.258	1.500	3.444	①	0.140	5.101	0.948	0.569	0.586
	长 7 ²	40-X44	1 979.3	1.135	1.640	3.000	1.917	③	0.058	4.625	1.200	0.348	0.587
	长 7 ³	8-X44	2 018.0	1.467	0.874	1.560	1.583	②	0.079	0.947	1.455	0.207	0.590
		12-X44	2 020.0	1.500	2.436	1.260	1.630	③	0.150	1.000	1.954	0.229	0.543
		13-X44	2 020.5	1.444	0.815	1.858	1.524	②	0.124	0.782	1.016	0.196	0.552
		19-X44	2 023.6	1.333	2.171	2.134	1.750	②	0.098	0.273	1.198	0.290	0.549
		23-X44	2 026.0	1.588	0.982	2.100	1.580	②	0.078	2.500	1.225	0.162	0.590
		28-X44	2 028.4	1.605	1.400	2.538	1.429	②	0.111	0.253	0.877	0.173	0.580
		37-X44	2 032.6	1.276	8.000	1.500	1.333	③	0.342	0.875	3.000	0.200	0.567
		40-3X44	2 034.0	1.563	0.046	1.334	2.800	③	0.156	0.900	2.750	0.194	0.581
		45-X44	2 036.9	1.643	0.697	1.626	1.455	③	0.071	1.583	1.300	0.211	0.579
	长 8 ²	46-X44	2 117.7	4.250	2.600	1.812	3.875	②	0.157	0.900	2.557	0.188	0.581
X40	长 7 ³	84-X40	2 136.5	1.588	2.600	2.428	1.143	②	0.156	4.000	1.616	0.294	0.545
		86-X40	2 152.0	1.667	1.600	1.608	2.000	③	0.236	2.632	2.476	0.193	0.516
N4	长 7 ³	36-N4	1 576.6	1.455	0.8261	1.800	1.474	③	0.048	1.923	1.375	0.167	0.556
Zh42	长 7 ³	88-Zh42	2 189.2	1.846	1.310	1.810	2.476	③	0.130	3.133	1.892	0.167	0.556
M9	长 7 ³	94-M9	2 311.9	0.973	3.480	2.600	1.200	③	0.102	3.917	2.043	0.206	0.529
Zh5	长 7 ³	102-Zh5	1 399.0	1.000	0.590	0.938	1.188	③	0.100	0.706	2.167	0.295	0.600

中倍半萜类的分布和组成存在显著差异。一般认为补身烷系列化合物来源于细菌等微生物有机质的输入,碳数组成为 C₁₄ ~ C₁₆^[36];来源于陆源有机质的桉叶油烷等碳数组成为 C₁₅,4 β (H)-桉叶油烷是典型的高等植物来源的生物标志化合物,被认为来源于植物组分 β -桉叶油醇^[37]。

两环烷烃在澳大利亚不同时代非海相原油中普遍存在。Philp 等认为他们是不同程度细菌降解的产物,而原油中同时检出的系列单不饱和和三环二萜化合物(C₂₀H₃₄)可能是其直接来源,并认为 8 β (H)-锥满烷是由锥满醇合成的,很可能为细菌成因^[37]。

王铁冠曾在藻煤中发现了 8 β (H)-C₂₀ 高补身烷,认为长侧链 8 β (H)-补身烷系列可能具有多种前身物,包括菌藻类母质输入与长侧链三环萜烷、8,4-断藿烷和藿烷系列的降解和开环衍生物等^[4]。虽然葡萄藻中藿烷含量极低,但采自美国的化学种 A 葡萄藻和采自中国抚仙湖的葡萄藻株中已检测出分布完整的长侧链三环萜烷^[6],因此,葡萄藻不仅能够直接合成两环倍半萜,而且其生物降解产物也是两环萜化化合物的可能来源。

西峰地区延长组长 8—长 7 段的有机壁微体化石已发现丰富的 *Botryococcus braunii*,化石的高含

量层段恰好是本地区主要烃源岩层延长组长 7²—长 7³ 段^[35], 进一步指示作为重要成烃母质的葡萄藻可能是烃源岩中两环萜烷的生源之一。中国柴达木盆地第三系原油中也曾检出丰富的两环萜烷, 除较高丰度的 C₁₆ 高补身烷外, 同样显示出 C₁₅ 补身烷的优势^[2], 之后在该地区第三系生油岩中也发现丰富的与成烃母质直接相关的葡萄藻^[38]。西峰地区延长组烃源岩中以 C₁₅ 补身烷为优势的大量 C₁₄~C₁₆ 两环萜烷的检出, 可能反映了本地区三叠系葡萄藻母质输入的特征。

5 结 语

(1) 鄂尔多斯盆地西峰地区三叠系延长组烃源岩含有包括两环倍半萜在内的丰富的两环烷烃, 主要出现 C₁₂~C₁₄ 和 C₁₅、C₁₆ 两组两环烷烃, 相对丰度表现出 3 种源岩模式: ①低碳数两环烷烃为主, 分布于长 7¹ 和长 8¹ 段非烃源岩; ②两组两环化合物均很丰富, 出现于长 7³ 段富有机质烃源岩; ③以高碳数两环化合物为主, 主要发现于长 7³ 段烃源岩, 也见于长 7² 和长 8¹ 段 I 型和 II₁ 型有机质中。

(2) 研究区延长组长 7 段烃源岩热演化程度基本一致, 镜质体反射率介于 0.76~0.94, 但补身烷异构化指数变化较大, 分布在 0.938~2.818 之间, 同一口钻井中随深度增加也未显示规律性的变化, 表明补身烷重排作用不仅受热演化程度的影响, 而且深湖相沉积中陆源有机质输入量变化以及氧化-还原条件的改变都可能对其产生影响。

(3) 延长组烃源岩高补身烷/补身烷值分布在 0.926~3.875 之间, 具有明显的高补身烷优势, 指示了较强的还原性沉积古环境。延长组烃源岩中高丰度 C₁₅、C₁₆ 两环烷烃的检出指示了淡水湖泊环境。

(4) 葡萄藻不仅能够直接合成两环倍半萜, 而且其代谢产物中的三环萜及藿烷等生物降解也是两环萜化合物的可能来源。延长组源岩中大量葡萄藻化石的发现指示其可能是该地区两环烷烃和两环倍半萜的重要生物来源。

参考文献:

References:

[1] FAN P, PHILP R P, MENG Q X, et al. Biomarkers Indicating Sedimentary Paleoenvironments[J]. Science in China: Series B, 1989, 32(2): 242-256.

[2] LUO B J, WANG Y X, MENG Q X, et al. Geochemistry of Bicyclic Alkanes in Sediments, Coal and Crude Oils [J]. Science in China: Series B, 1991, 34(3): 363-376.

[3] ALEXANDER R, KAGI R I, NOBLE R, et al. Identification of Some Bicyclic Alkanes in Petroleum[J]. Organic Geochemistry, 1984, 6: 63-72.

[4] 王铁冠. 生物标志物地球化学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990.

WANG Tie-guan. Study on Biomarker Geochemistry[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1990.

[5] NYTOFT H P, SAMUEL O J, KILDAHL-ANDERSEN G, et al. Novel C₁₅ Sesquiterpanes in Niger Delta Oils: Structural Identification and Potential Application as New Markers of Angiosperm Input in Light Oils[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(5): 595-603.

[6] 宋一涛, 李树靖. 不同生长时间丛粒藻的正构烷烃、烯烃和双环萜烷的 GC/MS 研究[J]. 质谱学报, 1994, 15(4): 16-27.

SONG Yi-tao, LI Shu-zheng. GC/MS Study on *n*-alkanes, Alkenes and Bicyclic Terpanes of *Botryococcus Braunii* with Different Growing Periods[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 1994, 15(4): 16-27.

[7] ZHANG Z H, METZGER P, SACHS J P. Biomarker Evidence for the Co-occurrence of Three Races (A, B and L) of *Botryococcus Braunii* in El Junco Lake, Galapagos[J]. Organic Geochemistry, 2007, 38(9): 1459-1478.

[8] METZGER P, BERKALOFF C, CASADEVALL E, et al. Alkadiene- and Botryococcene-producing Races of Wild Strains of *Botryococcus Braunii* [J]. Phytochemistry, 1985, 24(10): 2305-2312.

[9] HWANG R J, HEIDRICK T, MERTANI B, et al. Correlation and Migration Studies of North Central Sumatra Oils[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(12): 1361-1379.

[10] BRASSELL S C, EGLINTON G, MO F J. Biological Marker Compounds as Indicators of the Depositional History of the Maoming Oil Shale[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(4): 927-941.

[11] OKADA S, DEVARENNE T P, CHAPPELL J. Molecular Characterization of Squalene Synthase from the Green Microalga *Botryococcus Braunii*, Race B[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2000, 373(2): 307-317.

[12] ACHITOUV E, METZGER P, RAGER M N, et al. C₃₁-C₃₄ Methylated Squalenes from a Bolivian Strain of *Botryococcus Braunii* [J]. Phytochemistry, 2004, 65(23): 3159-3165.

[13] METZGER P, ALLARD B, CASADEVALL E, et al. Structure and Chemistry of a New Chemical Race of *Botryococcus Braunii* (Chlorophyceae) That Produces

- Lycopadiene, a Tetraterpenoid Hydrocarbon[J]. Journal of Phycolgy, 1990, 26(2): 258-266.
- [14] 邓南涛, 张枝焕, 任来义, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组油页岩地球化学特征及分布规律[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 432-437.
- DENG Nan-tao, ZHANG Zhi-huan, REN Lai-yi, et al. Geochemical Characteristics and Distribution Rules of Oil Shale from Yanchang Formation, Southern Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(4): 432-437.
- [15] 刘岩, 周文, 邓虎成. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组含气页岩地质特征及资源评价[J]. 天然气工业, 2013, 33(3): 19-23.
- LIU Yan, ZHOU Wen, DENG Hu-cheng. Geological Characteristics of Gas-bearing Shales in the Yanchang Formation and Its Resource Assessment in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3): 19-23.
- [16] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷12, 长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- Editorial Committee of Petroleum Geology of Changqing Oilfield. Petroleum Geological Records in China: Volume 12, Changqing Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [17] 付金华, 罗安湘, 喻建, 等. 西峰油田成藏地质特征及勘探方向[J]. 石油学报, 2004, 25(2): 25-29.
- FU Jin-hua, LUO An-xiang, YU Jian, et al. Geological Features of Reservoir Formation and Exploration Strategy of Xifeng Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 25-29.
- [18] 吉利明, 祝幼华. 鄂尔多斯盆地西南部甘肃西峰地区延长组孢粉组合及古气候研究[J]. 微体古生物学报, 2013, 30(4): 367-378.
- JI Li-ming, ZHU You-hua. Spore-pollen Assemblages and Paleoclimate of the Yanchang Formation in the Xifeng Area, Southwestern Ordos Basin, Gansu Province, NW China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2013, 30(4): 367-378.
- [19] 刘震, 朱文奇, 夏鲁, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田延长组长8段岩性油藏动态成藏过程[J]. 现代地质, 2013, 27(4): 895-906.
- LIU Zhen, ZHU Wen-qi, XIA Lu, et al. Research on Oil Accumulation Process of Lithologic Reservoir in Chang-8 Member of Yanchang Formation, Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. Geoscience, 2013, 27(4): 895-906.
- [20] 吉利明, 吴涛, 李林涛. 鄂尔多斯盆地西峰地区延长组烃源岩干酪根地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 424-428.
- JI Li-ming, WU Tao, LI Lin-tao. Geochemical Characteristics of Kerogen in Yanchang Formation Source Rocks, Xifeng Area, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 424-428.
- [21] 吉利明, 宋之光, 李剑峰. 鄂尔多斯盆地三叠系原油葡萄藻母质输入的生物标志物特征[J]. 微体古生物学报, 2008, 25(3): 281-290.
- JI Li-ming, SONG Zhi-guang, LI Jian-feng. Characteristic of Biomarkers Originating from *Botryococcus* in the Triassic Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks and Crude Oils in the Ordos Basin[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2008, 25(3): 281-290.
- [22] 吉利明, 李剑峰, 宋之光. 鄂尔多斯盆地延长组葡萄藻的石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 156-165.
- JI Li-ming, LI Jian-feng, SONG Zhi-guang. Petroleum Geological Significance of *Botryococcus* in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 156-165.
- [23] 吉利明, 祝幼华, 王少飞. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组葡萄藻形态特征[J]. 古生物学报, 2008, 47(2): 185-194.
- JI Li-ming, ZHU You-hua, WANG Shao-fei. Studies of Modality Assemble of *Botryococcus* from the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, Northwest China[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2008, 47(2): 185-194.
- [24] 吉利明, 徐金鲤, 宋之光. 鄂尔多斯盆地延长组湖相蓝藻及其油源意义[J]. 微体古生物学报, 2012, 29(3): 270-281.
- JI Li-ming, XU Jin-li, SONG Zhi-guang. Lacustrine Cyanobacteria from the Yanchang Formation in Ordos Basin and Its Implication of Oil Source[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2012, 29(3): 270-281.
- [25] WESTON R J, PHILP R P, SHEPPARD C M, et al. Sesquiterpanes, Diterpanes and Other Higher Terpanes in Oils from the Taranaki Basin of New Zealand[J]. Organic Geochemistry, 1989, 14(4): 405-421.
- [26] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [27] TRINDADE L A F, BRASSELL S C. Geochemical Assessment of Petroleum Migration Phenomena on a Regional Scale: Case Studies from Brazilian Marginal Basins[J]. Organic Geochemistry, 1992, 19(1/2/3): 13-27.
- [28] ZHANG C M, LI S T, YANG J M, et al. Petroleum Migration and Mixing in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology,

- 2004, 21(2): 215-224.
- [29] GORDADZE G N, OKUNOVA T V, GIRUTS M V, et al. Petroleum C₁₅ Polyalkyl Substituted Bicyclo [4. 4. 0] Decanes (Sesquiterpanes) as Oil Maturity Indicators (Illustrated by the Example of Jurassic and Cretaceous Oils of Kalmykia) [J]. Petroleum Chemistry, 2011, 51(2): 117-122.
- [30] AL-AROURI K R, MCKIRDY D M, BOREHAM C J. Oil-source Correlations as a Tool in Identifying the Petroleum Systems of the Southern Taroom Trough, Australia [J]. Organic Geochemistry, 1998, 29 (1/2/3): 713-734.
- [31] 王修垣, 赵 苓, 宋一涛. 几株丛粒藻烃类的气相色谱-质谱分析 [J]. 微生物学报, 1996, 36(4): 284-291.
WANG Xiu-yuan, ZHAO Ling, SONG Yi-tao. Gas Chromatography-mass Spectrometric Analyses of Hydrocarbons Produced by Different Strains of *Botryococcus Braunii* [J]. Acta Microbiologica Sinica, 1996, 36(4): 284-291.
- [32] 陈致林, 李素娟, 周光甲. 现代葡萄藻热解生成的油、气和生物标志物特征 [J]. 陆相石油地质, 1992(1): 48-53.
CHEN Zhi-lin, LI Su-juan, ZHOU Guang-jia. Characteristics of the Oil, Gas and Biomarkers from Living *Botryococcus* Pyrogenation [J]. Petroleum Geology on Terrestrial Sediment, 1992(1): 48-53.
- [33] AUDINO M, GRICE K, ALEXANDER R, et al. Macro-
- rocyclic Alkanes in Crude Oils from the Algaenan of *Botryococcus Braunii* [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(8): 979-984.
- [34] AUDINO M, GRICE K, ALEXANDER R, et al. Macro-cyclic Alkanes in Crude Oils and Sediment Extracts: Enrichment Using Molecular Sieves [J]. Organic Geochemistry, 2004, 35(5): 661-663.
- [35] JI L M, YAN K, MENG F W, et al. The Oleaginous *Botryococcus* from the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, Northwestern China: Morphology and Its Paleoenvironmental Significance [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 38(5): 175-185.
- [36] ALEXANDER R, KAGI R I, WOODHOUSE G W, et al. The Geochemistry of Some Biodegraded Australian Oils [J]. Australian Petroleum Exploration Association Journal, 1983, 23: 53-63.
- [37] PHILIP R P, GILBERT T D, FRIEDRICH J. Bicyclic Sesquiterpenoids and Diterpenoids in Australian Crude Oils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, 45(7): 1173-1180.
- [38] 周凤英, 彭德华, 边立增, 等. 柴达木盆地未熟—低熟石油的生烃母质研究新进展 [J]. 地质学报, 2002, 76(1): 107-113.
ZHOU Feng-ying, PENG De-hua, BIAN Li-zeng, et al. Progress in the Organic Matter Study of Immature Oils in the Qaidam Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(1): 107-113.

《地球科学与环境学报》2015 年度约稿函

尊敬的各位专家学者:

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家的支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括:

- 1、中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源。
- 2、特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬。
- 3、发表周期短。
- 4、对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表。
- 5、刊登综述类论文。
- 6、可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址:西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码:710064

电 话:029-82334686

E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn; jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部