

鄂尔多斯盆地西南缘奥陶系泥页岩与碳酸盐岩 生物标志物特征对比

王万春 王晓锋 郑建京 王作栋

(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 兰州 730000)

摘要 通过采集鄂尔多斯盆地西南缘4个剖面奥陶系马家沟群碳酸盐岩和平凉组泥页岩样品,对其中可溶有机质饱和烃与芳烃组分进行GC-MS分析,对比研究了马家沟群碳酸盐岩和平凉组泥页岩生物标志化合物特征。结果表明,马家沟群与平凉组正构烷烃分布形式及峰型特征、生物标志化合物参数Pr/Ph、伽马蜡烷/C₃₀- $\alpha\beta$ 藿烷、C₂₀₋₂₉三环萜烷/(C₂₀₋₂₉三环萜烷+C₂₇₋₃₅藿烷),以及甲基菲指数(MPI)均存在明显差异,这些差异反映了其沉积环境与成熟度的不同,对于马家沟群与平凉组来源油的识别具有参考价值。马家沟群正构烷烃分布形式与甾/藿比值以及C₂₈/C_{29 $\alpha\alpha$ 20R甾烷比值之间的对应关系,反映了母质输入的细微差别。Ts/(Ts+Tm)与伽马蜡烷/C₃₀- $\alpha\beta$ 藿烷比值之间的关系,C₂₉甾烷 $\alpha\beta$ /($\alpha\beta$ + $\alpha\alpha$)比值变化与重排藿烷与重排甾烷丰度的关系,反映上述成熟度参数明显受沉积环境影响。}

关键词 鄂尔多斯盆地 马家沟群 平凉组 生物标志化合物

第一作者简介 王万春 女 1962年出生 博士 副研究员 油气地球化学 E-mail: lgas@lzb.ac.cn

中图分类号 P593 **文献标识码** A

在鄂尔多斯盆地西南部地区,广泛分布着沉积厚度巨大、沉积类型多样的奥陶系地层,包括下奥陶统冶里—亮甲山组,中奥陶统马家沟群和平凉组,上奥陶统背锅山组^[1-2]。其中马家沟群是鄂尔多斯盆地奥陶系的主体,其顶底界面均为区域不整合,是一个独立的沉积地层单元。马家沟群包括六个组,即马家沟一组至六组。在鄂尔多斯盆地西南部地区,马家沟一组、三组和五组,部分为开阔海相沉积,部分为云坪相沉积;马家沟二组、四组和六组为开阔海相沉积^[1]。鄂尔多斯盆地西南缘中奥陶统平凉组,为台地、斜坡和深海相沉积,厚度可达数千米^[3]。

鄂尔多斯盆地西南部地区马家沟群岩性为石灰岩和白云岩^[1],平凉组岩性以笔石页岩、砂岩为主,其次为灰岩和白云岩^[4]。两套地层不仅岩性不同,热演化程度也不同。南缘露头马家沟群镜质体反射率R₀值在0.92%~1.21%^[5],属成熟—高成熟演化阶段;而平凉组在盆地西南缘平凉剖面,R₀值在0.57%~0.94%^[4,6],属成熟演化阶段。对该地区中奥陶统马家沟群和平凉组沉积环境^[1,4,7]、烃源岩地球化学特征^[8-9]、以及生烃潜力评价^[5,10-11]等方面已有卓有

成效的研究,但对生物标志化合物特征对比研究较少。本文依据鄂尔多斯盆地西南缘4个露头剖面马家沟群和平凉组样品,详细对比研究其生物标志化合物特征及其石油地质意义。

1 样品与实验

在鄂尔多斯盆地西南缘银洞山庄、段家峡、铁瓦殿、岐山4个剖面,采集了奥陶系马家沟群和平凉组岩石样品共28个,在马家沟一组至六组均采集了样品。采样剖面位置见图1。

对所采集样品进行了有机碳分析、热解生烃分析、有机溶剂抽提与族组分分离,饱和烃、芳烃色谱—质谱分析。岩石样品清洗去除表面污染物后,粉碎到100目以下。有机溶剂抽提用氯仿在索氏抽提器上抽提72小时。氯仿沥青“A”沉淀沥青质后,采用活化4小时后的氧化铝和硅胶的混合充填层析柱,用正己烷分离饱和烃,二氯甲烷分离芳烃,甲醇分离非烃。

对饱和烃与芳烃进行了GC-MS分析。所用气相色谱—质谱联用仪为6890N-GC/5973N-MSD,分析条件为:色谱柱为HP-5(30 m×0.25 mm×0.25 μ m)弹性

收稿日期: 2014-10-24; 收修改稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国家重点基础研究发展规划计划(973计划)项目(2012CB214801); 国家科技重大专项(2011ZX05005-001); 甘肃省重点实验室专项(1309RTSA041) [Foundation: National Key Basic Research Program of China (973 Program), No. 2012CB214801; National Science and Technology Major Project, No. 2011ZX05005-001; Key Laboratory Fund of Gansu Provincial, No.1309RTSA041]

石英毛细管柱;载气为高纯氮,载气流量为 1.2 mL/min;色谱进样口温度为 280℃,程序升温起始温度 80℃,以 4℃/min 的升温速率升至 290℃,恒温 30 min;质谱离子源为 EI 源,离子源温度为 230℃,离子源电离能为 70 eV。化合物根据色谱保留时间、质谱图标准图谱以及文献资料对比确定。

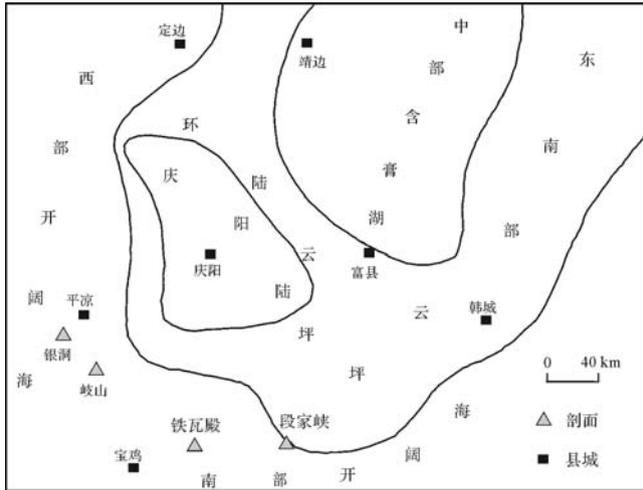


图1 采样剖面及奥陶系马家沟三期岩相分布图
(据冯增昭等,1999, 改编)

Fig.1 Location of sampling sections and distribution of lithofacies paleogeography of Majiagou Member 3 of the Ordovician system (modified after Feng, *et al.*, 1999)

2 生物标志物特征对比

2.1 正构烷烃

正构烷烃的分布形式可以反映原始有机母质输入特征。早期的研究认为,正构烷烃呈前单峰型、主峰碳在 nC_{15} - nC_{17} 的范围内,反映藻类和细菌为主要生源的有机母质输入;正构烷烃呈后单峰型、主峰碳在 nC_{27} - nC_{31} 的范围内,反映陆生高等植物为主要生源的有机母质输入;正构烷烃分布曲线为双峰型反映混合型的有机母质输入^[12]。另外,正构烷烃分布形式也可以指示烃源岩的成熟度,成熟度较低时,以双峰分布,至高成熟阶段之后,高分子量的正构烷烃裂解为低分子的产物,正构烷烃呈前单峰型分布^[12]。

马家沟群灰岩及灰质泥岩中正构烷烃碳数分布范围为 nC_{14} - nC_{33} ,主峰碳的相对丰度明显高于两侧碳的丰度,峰型尖锐。其中少部分样品呈前单峰型(nC_{17} 为主峰)分布,其低碳数正构烷烃与高碳数正构烷烃的比值($\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$)大于 1.2;大部分样品呈后峰($nC_{23} \sim nC_{25}$ 为主峰)大于前峰的双峰型分布(图2),其 $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 比值小于 0.8(表1)。平凉

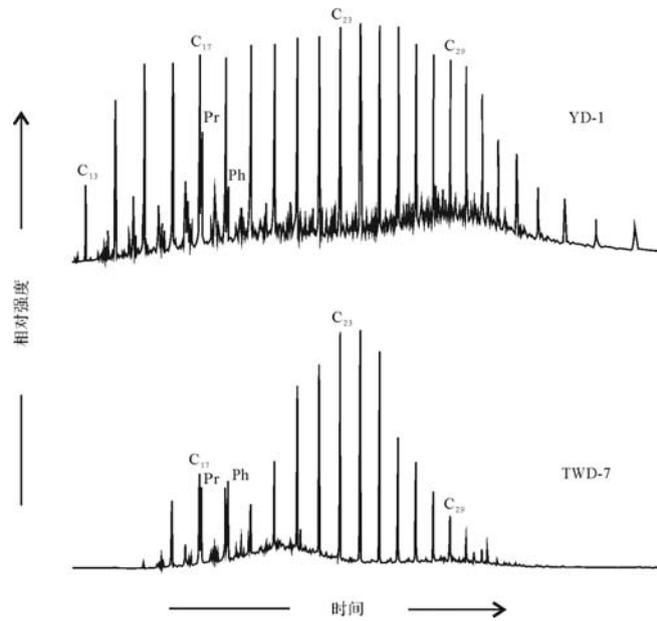


图2 平凉组与马家沟群饱和烃总离子流图
Fig.2 TICs of saturated hydrocarbons of Pinliang and Majiagou formations

组泥页岩、泥质灰岩正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{13} \sim nC_{35}$,与马家沟群不同的是,主峰碳与两侧碳的相对丰度差异不明显,峰型圆满,多数样品正构烷烃呈单峰型分布,主峰碳为 nC_{23} 或 nC_{24} (图2), $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 比值为 0.47~1.37(表1)。

马家沟群大部分样品呈后峰大于前峰的双峰型分布,显示为混源生源母质输入。但由于奥陶纪还没有出现陆生高等植物,而且其后峰主峰碳为 $nC_{23} \sim nC_{25}$,与高等植物来源正构烷烃主峰为 $nC_{27} \sim nC_{31}$ 也不同。王祥等^[13]在塔里木盆地寒武纪烃源岩,李景贵^[14]在鄂尔多斯盆地与四川盆地高过成熟海相碳酸盐岩中,也发现正构烷烃呈双峰型分布,认为可能主要与藻类输入有关。藻类生烃研究表明,一些海洋浮游藻和底栖藻,热降解后正构烷烃以低碳数烃为主的前峰型分布,主峰碳在 nC_{15} - nC_{17} ^[15-16];另一些海洋浮游藻热降解后正构烷烃以双峰型分布,且峰型尖锐,前峰为 nC_{18} ,后峰为 nC_{29} ^[17-18]。故马家沟群正构烷烃的双峰型分布,与海洋浮游藻类为主的有机母质输入有关。

鄂尔多斯盆地西南部地区马家沟群主体为开阔海相沉积,沉积有机质主要来自海洋浮游植物(浮游藻类)、其次为海洋浮游动物和细菌。有机质在沉积界面和浅埋藏阶段,被微生物的生物化学作用改造,大部分原始有机质被微生物分解和选择吸收,其剩余

表1 正构烷烃与类异戊二烯烷烃参数
Table 1 The parameters of n-alkanes and isoprenoid alkanes

采样地点	样品编号	层位	有机碳 /%	氯仿“A” /10 ⁻⁶	正构烷烃			类异戊二烯烷烃		
					CPI	OEP	$\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
银洞山庄	YD-1	平凉组	0.36	261.2	0.95	0.99	0.75	2.07	0.56	0.28
	YD-2	平凉组	0.53	196.4	1.04	1.03	0.58	2.00	0.18	0.10
	YD-3	平凉组	0.25	114.2	1.01	1.02	0.47	2.15	0.34	0.17
	YD-4	平凉组	0.46	194.0	0.99	0.97	0.59	2.00	0.45	0.24
	YD-5	平凉组	0.38	140.9	1.02	1.03	0.76	2.00	0.19	0.10
	YD-6	平凉组	0.41	292.8	1.01	0.99	1.37	2.44	0.33	0.15
段家峡	DJX-1	马1	0.29	53.1	1.03	1.01	2.02	1.45	0.25	0.20
	DJX-2	马1	0.19	68.3	0.89	0.92	1.95	1.30	0.20	0.18
	DJX-3	马1顶	0.22	31.3	1.03	0.99	0.75	1.20	0.34	0.30
	DJX-4	马2	0.11	26.8	1.01	0.96	1.94	1.09	0.70	0.85
	DJX-5	马3	0.27	53.3	1.03	0.99	3.53	1.42	0.25	0.20
	DJX-6	马4	0.06	10.2	1.13	1.02	0.34	0.95	0.78	0.88
	DJX-7	马4	0.36	47.1	1.10	0.96	1.20	1.46	0.28	0.20
	DJX-8	马3	0.27	52.0	1.39	0.99	1.81	1.05	0.30	0.34
	DJX-9	马3	0.21	30.4	1.00	0.99	2.48	1.23	0.33	0.34
铁瓦殿	TWD-1	马1	0.01	10.7	1.11	1.04	0.93	1.32	0.86	0.80
	TWD-2	马2	0.03	12.6	1.07	1.02	0.55	1.05	0.39	0.63
	TWD-3	马3	0.08	5.9	1.01	1.02	0.63	1.00	0.95	1.08
	TWD-4	马3	0.09	13.6	1.12	1.05	0.89	1.13	0.69	0.64
	TWD-5	马4	0.02	11.2	1.03	1.10	1.31	1.20	0.73	0.66
	TWD-6	马3	0.03	7.8	0.93	0.97	0.54	0.88	0.74	1.00
	TWD-7	马3	0.23	9.4	1.10	1.02	0.41	1.00	0.85	1.10
岐山	QS-1	马6底	0.18	10.7	1.14	1.13	0.60	1.13	0.97	0.97
	QS-2	马5顶	0.12	8.8	1.09	1.03	0.71	1.00	0.77	0.86
	QS-3	马5顶	0.28	13.2	1.24	1.15	0.47	1.00	0.73	0.79
	QS-4	马5顶	0.24	11.9	1.08	0.99	0.88	1.13	0.88	0.84
	QS-5	马5	0.01	6.3	1.33	1.47	0.40	0.83	1.11	0.80
	QS-6	马5底	0.02	7.2	1.07	1.01	0.41	1.00	0.50	0.42

的有机质还原、缩聚形成不溶有机质干酪根和可溶有机质。在微生物分解有机质的过程中,其本身残留体也成为沉积有机质的重要组成部分^[19]。微生物(细菌)对低碳数烷烃的生物化学改造,不仅造成低碳数烷烃丰度下降^[20],而且对各种烃类等有机大分子的形成具有重要的影响和作用^[21],由此也可能造成正构烷烃呈后峰大于前峰的双峰型分布(图2)。因此,马家沟群正构烷烃的双峰型分布,是海洋浮游藻类与细菌为主的有机母质输入的结果。鄂尔多斯盆地西南部马家沟群与平凉组正构烷烃峰型的显著差异,对于马家沟群与平凉组来源油的识别具有借鉴意义。

2.2 无环类异戊二烯烷烃

样品中均检出了丰富的无环类异戊二烯烷烃,其中主要为姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph),其次有降姥鲛烷(*i*C₁₈)。姥鲛烷和植烷是常用的古环境标志物,在强还原的沉积环境中,具有植烷优势,而在氧化环境中,常具有姥鲛烷优势。研究表明,Pr/Ph 比值<0.8 指示

水体封闭的厌氧环境;Pr/Ph 比值>1 指示较弱的氧化环境;Pr/Ph 比值>3 一般为有陆源有机质输入的氧化环境^[12,22]。马家沟群样品 Pr/Ph 比值为 0.83~1.46,显示弱还原—弱氧化沉积环境。平凉组样品 Pr/Ph 比值为 2.00~2.44,显示弱氧化沉积环境。Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈关系图与 Pr/Ph 比值显示的结果一致(图3)。鄂尔多斯盆地西南部马家沟群与平凉组 Pr/Ph 比值的显著差异,对于马家沟群与平凉组来源油的识别也具有参考价值。

2.3 三环萜烷

三环萜烷的生物先质是原核生物(细菌和蓝藻)^[23]以及 *Tasmanite* 藻^[24-25]。马家沟群样品中检出了 C₁₉~C₂₆和 C₂₈~C₃₀的 13β(H), 14α(H) 三环萜烷系列,其中部分样品中 C₂₅~C₂₆、C₂₈~C₃₀的三环萜烷相对丰度较高;平凉组样品中的三环萜烷包括 C₁₉~C₂₆和 C₂₈~C₂₉的 13β(H), 14α(H) 三环萜烷系列,其中 C₂₅~C₂₆、C₂₈~C₂₉的三环萜烷相对丰度很低(图

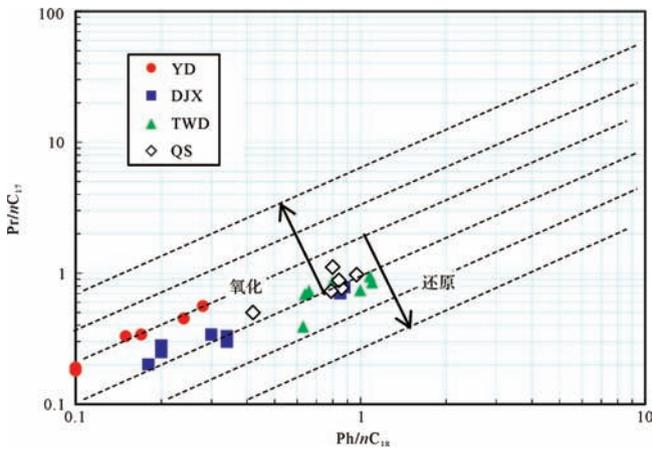


图 3 Pr/nC₁₇与 Ph/nC₁₈关系图

Fig.3 Relationship between Pr/nC₁₇ and Ph/nC₁₈

4)。三环萜烷系列化合物的检出反映了原始有机质中细菌与藻类的输入。在 C₁₉~C₂₆的三环萜烷中,马家沟群大部分样品以 C₂₃为主峰,少数以 C₂₁为主峰;平凉组样品均以 C₂₃为主峰。

2.4 伽马蜡烷

伽马蜡烷是 C₃₀的三萜类,该化合物经常出现在高盐度的陆相咸水或海相沉积物中,其前生物是四膜虫醇(*Tetrahymanol*),由生存于沉积层底部厌氧环境中的以硫细菌为食物源的纤毛虫合成^[26]。一般认为高含量的伽马蜡烷是高盐度水体沉积的标志^[12],也

有研究认为伽马蜡烷是水体密度分层的标志^[26]。马家沟群样品伽马蜡烷/C₃₀-αβ藿烷比值为 0.08~0.24。平凉组样品伽马蜡烷/C₃₀-αβ藿烷比值为 0.03~0.11。平凉组样品相对丰度较低的伽马蜡烷,与其相对较高的 Pr/Ph 比值一样,反映了低盐度弱氧化沉积环境。马家沟群样品丰度相对较高的伽马蜡烷和相对较低的 Pr/Ph 比值,则反映了弱还原的沉积环境。另外,马家沟群样品伽马蜡烷/C₃₀-αβ藿烷比值分布范围较宽(表 2),反映了沉积时的水体密度分层^[26]。

2.5 重排藿烷

重排藿烷类是指与正常藿烷有相同的碳环骨架,而甲基侧链碳位有所不同的一类生物标志物,已发现的重排藿烷有 18α(H)-22, 29, 30-三降藿烷(Ts), 18α(H)-新藿烷的 C₂₉及 C₃₀同系物,17α(H)-重排藿烷系列,以及 C₂₉-C₃₄的 21-甲基-28 降藿烷系列^[27-29]。源岩中的藿烷,来源于细菌,如蓝细菌、真菌以及厌氧细菌^[12]。重排藿烷与 C₂₇-C₃₀17α(H)-藿烷一样,起源于氧化至亚氧化环境的细菌有机质,因细菌藿烷类先质仅在 D 环经历了氧化作用,并在酸性介质环境和黏土矿物催化下才易于发生重排而形成重排藿烷^[27-29]。我国陆相原油,特别是煤系来源原油中重排藿烷系列化合物丰富,其形成机制与氧化性且富含黏土的沉积环境关系密切^[30-31]。

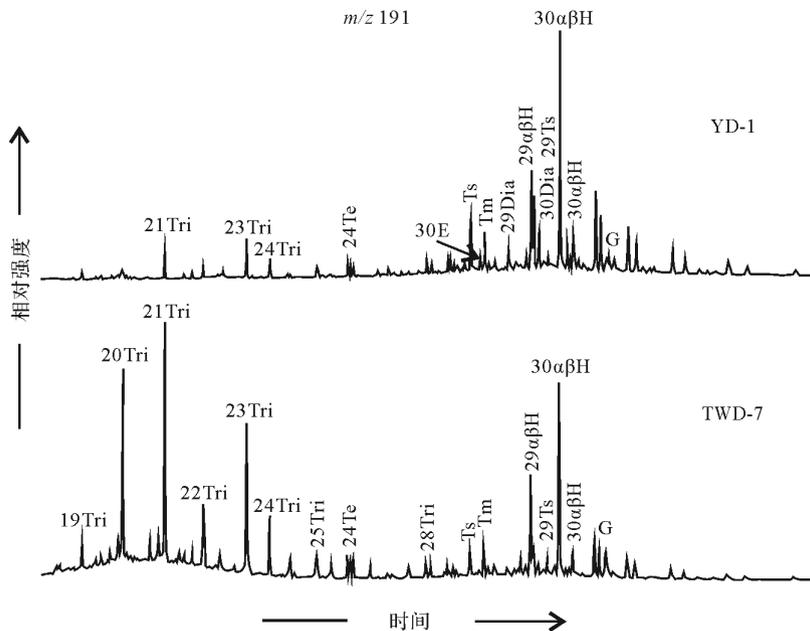


图 4 平凉组与马家沟群饱和烃 m/z 191 质量色谱图,显示三环萜烷(Tri)、藿烷(H)、重排藿烷(Dia)、早洗脱的重排藿烷(E)、伽马蜡烷(G)及 Ts、Tm 和 C₂₉Ts 的分布

Fig.4 M/z 191 mass chromatograms of saturated hydrocarbons of the Pingliang and Majiagou formations, displaying the distribution of tricyclic terpanes(Tri), hopanes(H), diahopanes(Dia), early-eluting rearranged hopane(E), gammacerane(G), Ts, Tm and C₂₉Ts

表2 三环萜烷、藿烷及甾烷参数

Table 2 Parameters of tricyclic terpanes, hopanes and steranes

采样地点	样品编号	伽马蜡烷	三环萜烷/(三	$C_{29}Ts/(C_{29}Ts+$	$Ts/(Ts+Tm)$	C_{32} 藿烷	$C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 甾烷	C_{29} 甾烷	甾烷/藿烷
		$/C_{30}\alpha\beta$ 藿烷	环萜烷+藿烷)	$C_{29}\alpha\beta$ 藿烷)		$22S/(22S+22R)$	$20S/(20S+20R)$	$\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$	
银洞山庄	YD-1	0.05	0.18	0.42	0.59	0.60	0.47	0.53	1.08
	YD-2	0.03	0.22	0.47	0.69	0.63	0.47	0.53	0.97
	YD-3	0.06	0.21	0.42	0.66	0.60	0.46	0.49	0.89
	YD-4	0.08	0.26	0.42	0.56	0.60	0.42	0.50	1.19
	YD-5	0.03	0.24	0.43	0.57	0.63	0.41	0.47	0.84
	YD-6	0.11	0.26	0.33	0.51	0.61	0.40	0.50	1.03
段家峡	DJX-1	0.19	0.44	0.13	0.41	0.63	0.39	0.41	1.09
	DJX-2	0.21	0.38	0.12	0.28	0.61	0.36	0.40	1.28
	DJX-3	0.10	0.36	0.14	0.40	0.67	0.38	0.40	0.69
	DJX-4	0.20	0.46	0.12	0.23	0.56	0.40	0.43	1.22
	DJX-5	0.22	0.53	0.15	0.29	0.58	0.38	0.41	1.49
	DJX-6	0.22	0.30	0.16	0.29	0.55	0.36	0.39	0.94
	DJX-7	0.09	0.74	0.19	0.42	0.56	0.39	0.44	1.02
	DJX-8	0.20	0.27	0.15	0.25	0.50	0.38	0.43	1.35
	DJX-9	0.22	0.76	0.22	0.40	0.59	0.38	0.40	0.59
铁瓦殿	TWD-1	0.20	0.37	0.12	0.26	0.58	0.37	0.40	1.22
	TWD-2	0.24	0.58	0.22	0.59	0.60	0.41	0.40	0.24
	TWD-3	0.16	0.72	0.20	0.41	0.61	0.38	0.41	1.02
	TWD-4	0.11	0.45	0.30	0.47	0.57	0.45	0.50	0.95
	TWD-5	0.08	0.55	0.29	0.53	0.57	0.43	0.49	0.73
	TWD-6	0.13	0.65	0.27	0.53	0.60	0.40	0.49	0.92
	TWD-7	0.13	0.62	0.19	0.46	0.59	0.39	0.42	0.77
岐山	QS-1	0.14	0.52	0.19	0.35	0.59	0.41	0.40	0.83
	QS-2	0.21	0.50	0.16	0.35	0.57	0.37	0.41	1.04
	QS-3	0.18	0.54	0.19	0.37	0.58	0.38	0.41	1.29
	QS-4	0.18	0.48	0.15	0.35	0.61	0.38	0.41	1.38
	QS-5	0.13	0.39	0.24	0.48	0.61	0.44	0.43	0.43
	QS-6	0.09	0.36	0.38	0.56	0.62	0.45	0.52	0.92

平凉组样品中检出了丰富的重排藿烷化合物,有 $Ts, C_{29}Ts, C_{29} \sim C_{30}$ 的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷,和 C_{30} 早洗脱的重排藿烷。其中 $C_{29}Ts$ 在重排藿烷类化合物中相对丰度最高,其次为 Ts 和 C_{30} 的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷(图4), C_{29} 的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷和 C_{30} 早洗脱的重排藿烷相对丰度最低。马家沟群大部分样品仅有 Ts , 部分样品有 $C_{29}Ts$, 少数样品除 Ts 和 $C_{29}Ts$ 外,也检出了 $C_{29} \sim C_{30}$ 的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷和 C_{30} 早洗脱的重排藿烷,但相对丰度很低。马家沟群无 $C_{29}Ts$ 或 $C_{29}Ts$ 丰度很低的样品中, $Ts < Tm$, $C_{29}Ts$ 丰度较高的样品中, $Ts > Tm$ (图5)。平凉组样品中丰富的重排藿烷化合物,与其弱氧化且富含黏土矿物的沉积环境有关^[32]。

2.6 甾烷与重排甾烷

C_{27}, C_{28}, C_{29} 正常甾烷的生物先质主要为藻类,尽管 C_{29} 正常甾烷与高等植物输入有关^[33],但本文所研究的样品没有高等植物母质输入,因此 C_{27}, C_{28}, C_{29}

甾烷相对丰度的变化可能反映了不同藻类输入的差异。样品中均检出了 $C_{27} \sim C_{29}$ 正常甾烷、孕甾烷和升孕甾烷,在平凉组样品中检出了丰度较高的重排甾烷(图6)。 $C_{27} \sim C_{29}$ 正常甾烷的相对丰度在马家沟群和平凉组样品中差别不大,但马家沟群样品具有相对较高的孕甾烷和升孕甾烷丰度,表明其沉积环境的盐度相对较高^[12]。平凉组样品具有相对较高的重排甾烷丰度,高丰度的重排甾烷是粘土矿物催化的产物^[12],也有研究表明重排甾烷生成受沉积环境的氧化—还原性影响,在弱氧化—氧化环境条件下,重排甾烷含量显著提高^[34]。

值得注意的是,平凉组样品中不仅重排甾烷丰富,而且 $C_{29}5\alpha(H), 14\beta(H), 17\beta(H)$ 地质型甾烷的丰度高于 $5\alpha(H), 14\alpha(H), 17\alpha(H)$ 生物型甾烷的丰度。马家沟群大部分样品 $C_{29}\alpha\beta\beta$ 甾烷的丰度低于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 甾烷的丰度,但是在 $C_{29}Ts$ 丰度较高,以及 $Ts > Tm$ 的少部分样品中, $C_{29}\alpha\beta\beta$ 甾烷相对于 $C_{29}\alpha\alpha\alpha$

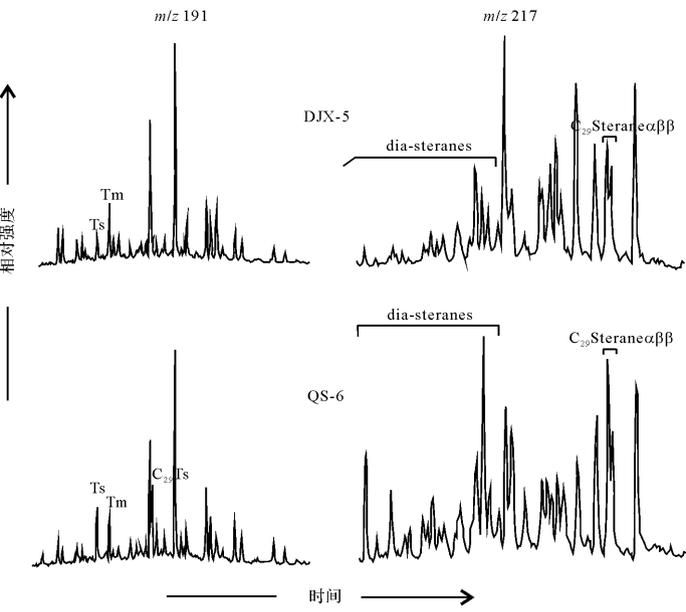


图 5 马家沟群样品重排甾烷与重排甾烷分布差异
Fig.5 Different distributions of diahopanes and diasteranes of Majiagou Formation samples

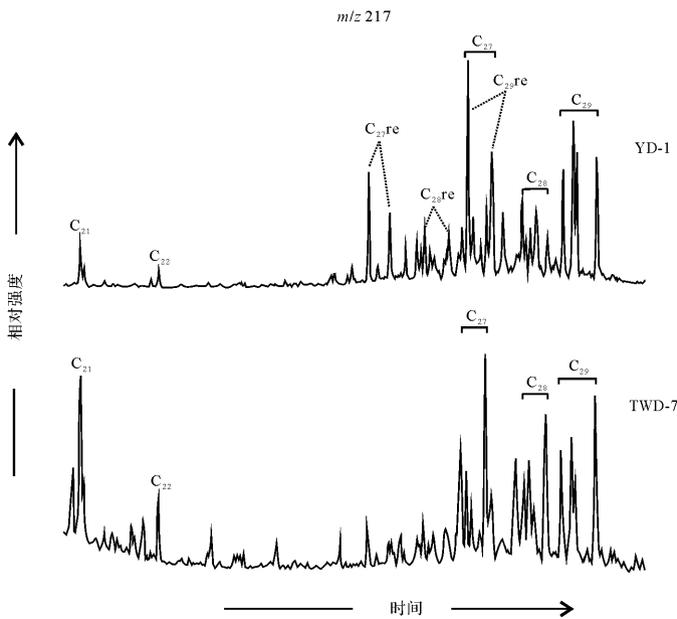


图 6 平凉组与马家沟群饱和烃 m/z 217 质量色谱图 (显示孕甾烷(C_{21}), 孕甾烷(C_{22}), 重排甾烷(C_{27re} - C_{29re}), 甾烷($C_{27} \sim C_{29}$)) 的分布)

Fig.6 M/z 217 mass chromatograms of saturated hydrocarbons of the Pingliang and Majiagou formations, displaying the distribution of pregnane(C_{21}), homopregnane(C_{22}), rearranged steranes(C_{27re} - C_{29re}) and steranes($C_{27} \sim C_{29}$)

甾烷的丰度升高(图 5),而且这些样品中重排甾烷比较丰富,表明 C_{29} 甾烷的 $\alpha\beta\beta$ 异构体的生成,可能与重排甾烷的生成机理类似。同样的现象在塔里木盆

地下古生界海相烃源岩^[35]和陆东凹陷上侏罗统烃源岩^[34]中也存在。塔里木盆地重排甾烷丰度相对低的寒武系样品, C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值为 0.38; 重排甾烷丰度相对高的上奥陶统样品,上述比值为 0.42(依据文献^[35]中图版 1 计算得到)。

2.7 菲系列化合物

芳烃组分中菲系列化合物是目前研究原油和烃源岩成熟度应用最广的组分。甲基菲(methylphenanthrene, MP)有 5 种异构体,即 3-, 2-, 9-, 1-和 4-MP; 4-MP 在自然界的含量不多,一般只能检测到前 4 种异构体。甲基菲中 α 位的 9-和 1-取代基热稳定性低于 β 位的 3-和 2-取代基,故随温度升高或成熟度增加, 9-和 1-甲基菲减少, 3-和 2-甲基菲丰度增加^[36]。但是,上述异构体在 II 型干酪根为主的源岩中,随成熟度升高出现不规律变化^[37-38]。这是由于除成熟度外,甲基菲的分布也受其母源的影响。1-甲基菲在 III 型干酪根,特别是富含树脂体的煤岩中富集^[39], 9-甲基菲在 I、II 型干酪根中富集^[40-41]。3-和 2-甲基菲通常在高成熟的 I、II 型干酪根中富集^[37]。本文所研究奥陶系平凉组和马家沟组均为 I、II 型干酪根,母质输入以藻类和菌类为主,因此,母质输入对甲基菲指数变化影响小。

图 7 为银洞剖面平凉组(YD-4)和段家峡剖面马家沟群(DJX-3)样品中菲系列化合物的质量色谱图。其中平凉组菲的相对丰度高,甲基菲的 4 个异构体即 3-, 2-, 9-, 1-MP 相对丰度差异较小,以 9-MP 略占优势;而马家沟群菲的相对丰度明显降低,以甲基菲和二甲基菲占优势。甲基菲的 4 个异构体中,2-MP 相对丰度明显增高。样品甲基菲指数(MPI)及由此计算所得 R_o 值^[36], 甲基菲分布系数(MPDF)及由此计算所得 R_o 值^[42]见表 3。马家沟群 MPI 与 MPDF 值明显高于平凉组,表明马家沟群成熟度高,已进入热演化的成熟阶段;而平凉组则处于热演化的成熟阶段。

3 生物标志物相对丰度变化及其石油地质意义

3.1 源岩母质输入特征

甾烷/甾烷的比值被用于指示来自真核生物(主要为藻类与高等植物)与细菌有机质输入的相对量^[43]。平凉组甾烷/甾烷比为 0.84~1.19,马家沟群甾烷/甾烷比为 0.24~1.49。马家沟群甾烷/甾烷比与正构烷烃分布形式有一定关系。正构烷烃以前单峰分布的样品, $\sum nC_{21-}/\sum nC_{22+}$ 比值高于 1.2, 甾烷/甾烷比值多高于 1.0;

表3 芳烃化合物参数

Table 3 Parameters of aromatic hydrocarbons

采样地点	样品编号	层位	MPI ₁	MPI ₂	MPI ₃	MPR	MPDF ₁	MPDF ₂	R _c /%	R _o /%
银洞山庄	YD-1	平凉组	0.30	1.26	0.68	0.89	0.41	0.50	0.58	0.75
	YD-2	平凉组	0.84	1.80	1.08	1.20	0.52	0.57	0.90	0.99
	YD-3	平凉组	0.98	1.68	0.66	1.10	0.49	0.57	0.99	0.99
	YD-4	平凉组	0.53	1.65	0.98	1.33	0.49	0.55	0.72	0.93
	YD-5	平凉组	0.78	1.61	0.90	1.29	0.47	0.56	0.87	0.89
	YD-6	平凉组	0.52	1.17	0.67	0.89	0.40	0.47	0.71	0.73
段家峡	DJX-1	马1	1.77	2.82	1.48	1.88	0.60	0.75	1.46	1.18
	DJX-2	马1	1.61	2.81	1.60	1.85	0.61	0.72	1.36	1.20
	DJX-3	马1顶	1.92	2.77	1.52	1.97	0.60	0.73	1.55	1.18
	DJX-4	马2	1.27	1.98	1.16	1.36	0.54	0.61	1.16	1.04
	DJX-5	马3	1.43	2.90	1.44	1.91	0.59	0.79	1.26	1.16
	DJX-6	马4	1.25	2.16	1.08	1.51	0.49	0.66	1.15	0.93
	DJX-7	马4	1.29	2.51	1.21	1.46	0.55	0.76	1.17	1.07
	DJX-8	马3	1.87	3.15	1.65	2.10	0.62	0.79	1.52	1.22
	DJX-9	马3	1.93	3.05	1.54	2.21	0.61	0.81	1.55	1.20

注: $MPI_1 = m[1.5(3-MP+2-MP)]/m(P+9-MP+1-MP)$; $MPI_2 = m[3(2-MP)]/m(P+9-MP+1-MP)$; $MPR = m(2-MP)/m(1-MP)$; $MPI_3 = m(3-MP+2-MP)/m(9-MP+1-MP)$; $MPDF_1 = m(3-MP+2-MP)/m(3-MP+2-MP+9-MP+1-MP)$; $MPDF_2 = m(2 \times 2-MP)/m(3-MP+2-MP+9-MP+1-MP)$; $R_c = 0.6MPI_1 + 0.4$; $R_o = -0.166 + 2.242MPDF_1$

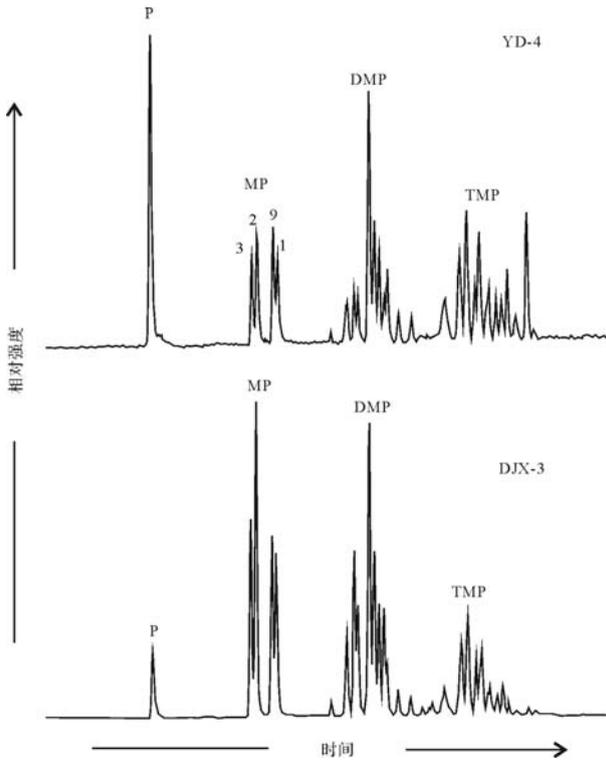


图7 菲系列质量色谱图

Fig.7 Mass chromatograms of phenanthrene series

有机质输入。原始沉积层中细菌对藻类的降解,对各种烃类等有机大分子的形成具有重要作用^[21]。低 $\Sigma nC_{21-}/\Sigma nC_{22+}$ 比值对应低的甾/藿比值,反映了细菌对低碳数烃的降解和高碳数烃的生成以及细菌对沉积有机质的贡献。

研究表明, C_{28} 甾烷丰度的增加,可能与包括硅藻、颗石藻和沟鞭藻等浮游植物的有机质输入有关^[43]。马家沟群样品随甾/藿比值升高, $C_{28}/C_{29}\alpha\alpha\alpha$ 20R 甾烷比值也升高(图8),表明甾/藿比值高的样品有机母质可能以浮游藻类来源占优势。

3.2 源岩热演化特征

多数样品的 CPI 和 OEP 值均接近 1.0(表1),表明样品均已达到成熟演化阶段以上。 C_{32} 升藿烷的异构体比值 $22S/(22S+22R)$ 也是常用的成熟度参数^[12],其热平衡值在 0.57~0.62^[44]。所有样品 C_{32} 升藿烷 $22S/(22S+22R)$ 比值均已达到热平衡值(表2),反映已达到成熟演化阶段以上。

T_s 是最稳定的萜烷,其非对应异构体 $17\alpha(H)-22,29,30$ -三降藿烷(T_m)稳定性较差,因此 $T_s/(T_s+T_m)$ 是常用的成熟度参数。但如上所述,重排藿烷 T_s 的丰度不仅与成熟度有关,也反映了原始沉积环境的氧化—还原性与特殊催化条件。因此,与页岩来源的原油相比,碳酸盐岩来源的原油具有低的 $T_s/(T_s+T_m)$ 比值^[12]。平凉组样品 $T_s/(T_s+T_m)$ 比值在 0.51~0.69;马家沟群样品 $T_s/(T_s+T_m)$ 比值在 0.23~0.59

而正构烷烃以后峰大于前峰的双峰型分布的样品, $\Sigma nC_{21-}/\Sigma nC_{22+}$ 比值低于 0.8,甾/藿比值大部分低于 1.0。较高的甾/藿比值可能反映了较多的藻类有机质输入,而低的甾/藿比值则可能代表了以菌类为主的

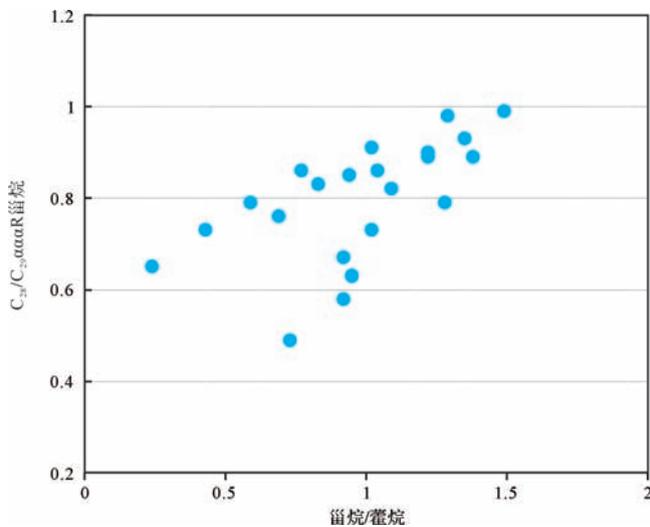


图 8 甾烷/藿烷比值与 C_{28}/C_{29} $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷关系图

Fig.8 Relationship between sterane/hopane ratios and C_{28}/C_{29} $\alpha\alpha\alpha 20R$ steranes

(表 2)。Ts/(Ts+Tm) 比值随伽马蜡烷/ C_{30} - $\alpha\beta$ 藿烷比值升高而降低(图 9),反映随沉积环境盐度升高, Ts/(Ts+Tm) 比值降低,且碳酸盐岩 Ts/(Ts+Tm) 比值受沉积环境的影响更大。平凉组样品也显示较高的 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}\alpha\beta$ 藿烷) 比值,而马家沟群样品显示较低的 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}\alpha\beta$ 藿烷) 比值,与 Ts/(Ts+Tm) 比值一致(表 2)。

在高成熟阶段, C_{20-30} 三环萜烷/(C_{20-30} 三环萜烷+ C_{27-35} 藿烷) 比值随着原油成熟度增加不断升高,是有效的成熟度参数^[45],该比值的升高一方面是因为成熟度升高时,由于酪根释放的三环萜烷高于藿烷,另一方面是由于三环萜烷较藿烷具有更高的抗热降解能力^[23,46]。平凉组样品上述比值为 0.18~0.26,平均 0.23。马家沟群样品上述比值在 0.27~0.76,平均 0.50(表 2)。另外,Cassani *et al.*^[37] 研究认为 C_{23}/C_{21} 三环萜烷比值随成熟度增加下降。马家沟群样品具有相对高的 C_{20-29} 三环萜烷/(C_{20-29} 三环萜烷+ C_{27-35} 藿烷) 比值和低的 C_{23}/C_{21} 三环萜烷比值,也表明马家沟群样品的成熟度高于平凉组(图 10)。

4 结论与认识

(1) 鄂尔多斯盆地西南缘马家沟群大部分样品正构烷烃呈后峰大于前峰的双峰型分布,峰型尖锐;少数样品呈前单峰型分布。其中正构烷烃呈双峰型分布的样品,甾/藿比和 C_{28}/C_{29} $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷比值低,反映母质输入以菌类为主;正构烷烃呈前单峰型

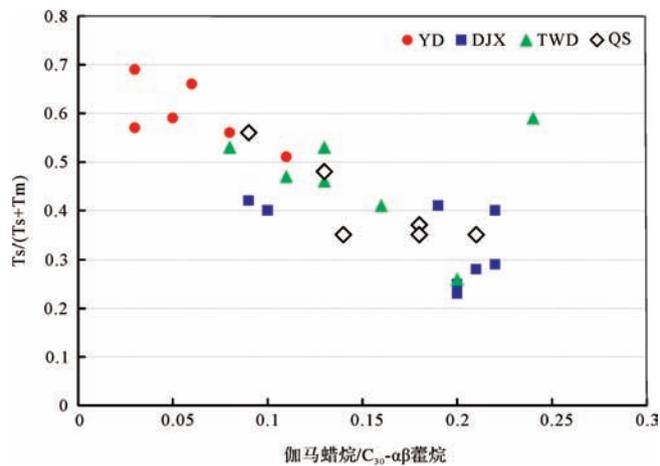


图 9 Ts/(Ts+Tm) 与伽马蜡烷/ C_{30} - $\alpha\beta$ 藿烷比值关系图

Fig.9 Correlation between Ts/(Ts+Tm) and gamacerane/ C_{30} - $\alpha\beta$ hopane ratios

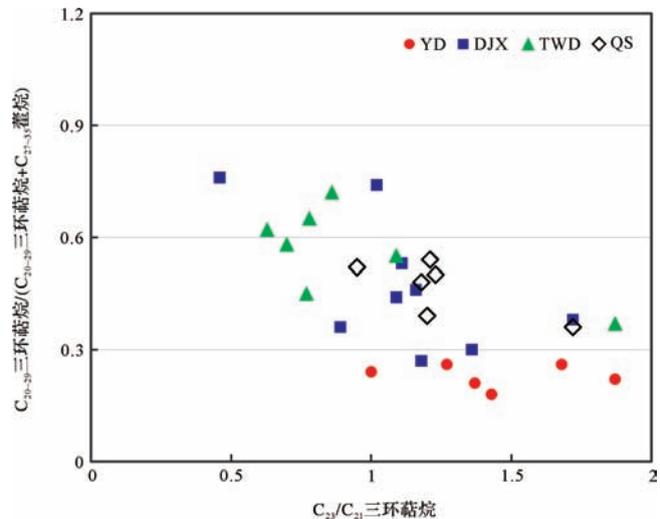


图 10 C_{23}/C_{21} 三环萜烷与 C_{20-29} 三环萜烷/(C_{20-29} 三环萜烷+ C_{27-35} 藿烷) 比值关系图

Fig.10 Correlation between C_{23}/C_{21} tricyclic terpanes and C_{20-29} tricyclic terpanes/(C_{20-29} tricyclic terpanes + C_{27-35} hopanes) ratios

分布的样品,甾/藿比和 C_{28}/C_{29} $\alpha\alpha\alpha 20R$ 甾烷比值高,反映母质输入以藻类为主。平凉组样品正构烷烃呈单峰型分布,峰型圆满。

(2) Pr/Ph 和伽马蜡烷/ C_{30} - $\alpha\beta$ 藿烷比值反映马家沟群沉积环境为弱还原—弱氧化环境,平凉组沉积环境为弱氧化环境。

(3) 马家沟群的成熟度参数 Ts/(Ts+Tm) 及 $C_{29}Ts/(C_{29}Ts+C_{29}\alpha\beta$ 藿烷) 比值远低于平凉组,与样品的实际成熟度大相径庭。但 Ts/(Ts+Tm) 与伽马蜡烷/ C_{30} - $\alpha\beta$ 藿烷比值之间呈负相关关系,反映上述参数受

沉积环境影响。 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 比值在重排藿烷和重排甾烷丰度高的样品中相对较高,表明造成 C_{29} 甾烷 $\alpha\beta\beta$ 异构体与重排藿烷和重排甾烷丰度升高的因素相同,可能受沉积环境的氧化—还原性控制。因此,应用上述生标参数对不同沉积环境烃源岩进行成熟度对比时须谨慎。

(4) C_{20-29} 三环萜烷/(C_{20-29} 三环萜烷+ C_{27-35} 藿烷)与甲基菲指数(MPI)能够反映研究区烃源岩热演化程度。

(5) 马家沟群与平凉组饱和烃不同的正构烷烃峰型特征、差异明显的生物标志化合物参数、菲系列化合物相对丰度及甲基菲指数,对于马家沟群与平凉组来源油的识别具有借鉴意义。

参考文献 (References)

- 冯增昭,鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟组岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 1-8. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou Age of Ordovician in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(1): 1-8.]
- 曹金舟,冯乔,赵伟,等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶纪层序地层分析[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 286-292. [Cao Jinzhou, Feng Qiao, Zhao Wei, et al. Sequence stratigraphy of Ordovician strata in the south part of Ordos area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 286-292.]
- 冯增昭,鲍志东,康祺发,等. 鄂尔多斯奥陶纪古构造[J]. 古地理学报, 1999, 1(3): 83-94. [Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Kang Qifa, et al. Palaeotectonics of Ordovician in Ordos [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1(3): 83-94.]
- 倪春华,周小进,王果寿,等. 鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 38-46. [Ni Chunhua, Zhou Xiaojin, Wang Guoshou, et al. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation, southern margin of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 38-46.]
- 朱建辉,吕剑虹,缪九军,等. 鄂尔多斯西南缘下古生界烃源岩生烃潜力评价[J]. 石油实验地质, 2011, 33(6): 662-670. [Zhu Jianhui, Lü Jianhong, Miao Jiujun, et al. Hydrocarbon generation potential of lower Paleozoic source rocks in southwestern margin of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(6): 662-670.]
- Chen Mengjin, Ning Ning, Hu Guoyi, et al. Characteristics of hydrocarbon sources and controlling factors of their formation in Pingliang Formation, West Ordos Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S 1): 103-112.
- 周进高,张帆,郭庆新,等. 鄂尔多斯盆地奥陶统马家沟组障壁潟湖沉积相模式及有利储层分布规律[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 64-71. [Zhou Jingao, Zhang Fan, Guo Qingxin, et al. Barria-lagoon sedimentary model and reservoir distribution regularity of Lower-Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 64-71.]
- 夏新宇,洪峰,赵林,等. 鄂尔多斯盆地奥陶统碳酸盐岩有机相类型及生烃潜力[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 638-643. [Xia Xinyu, Hong Feng, Zhao Lin, et al. Organic facies type and hydrocarbon potential of carbonates in Majiagou Fm. Lower Ordovician in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 638-643.]
- 刘德汉,杨秀珍,孙永革,等. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统碳酸盐—蒸发盐地球化学特征和生气规律[J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 93-104. [Liu Dehan, Yang Xiuzhen, Sun Yongge, et al. Geochemical characteristics and gas-producing rules from carbonate-evaporate formation of Lower Ordovician series in east Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(2): 93-104.]
- 李剑锋,徐正球,马军,等. 鄂尔多斯盆地古生界奥陶系碳酸盐岩生烃能力研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(4): 702-706. [Li Jianfeng, Xu Zhengqiu, Ma Jun, et al. Study on hydrocarbon-producing potential of carbonate rocks in Ordovician of Lower Paleozoic in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(4): 702-706.]
- 谢增业,胡国艺,李剑,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系烃源岩有效性识别[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(2): 29-32. [Xie Zengye, Hu Guoyi, Li Jian, et al. A study on validity identification of source rock by new experimental techniques for Ordovician in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 29-32.]
- Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide [M]. 2nd Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 1-1155.
- 王祥,张敏,黄光辉. 塔中地区典型烃源岩地球化学特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(2): 447-449. [Wang Xiang, Zhang Min, Huang Guanghui. Geochemical characteristics of typical hydrocarbon source rocks in Tazhong area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(2): 447-449.]
- 李景贵. 高过成熟海相碳酸盐岩抽提物不寻常的正构烷烃分布及其成因[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 8-11. [Li Jinggui. Unusual distribution and its origin of n-alkanes in extracts of marine carbonate rocks with high maturity and over maturity [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 8-11.]
- 王睿勇,周文,吴庆余,等. 聚胞藻热模拟产烃研究[J]. 南京大学学报: 自然科学, 1999, 35(5): 523-531. [Wang Ruiyong, Zhou Wen, Wu Qingyu, et al. The study on pyrolyzed hydrocarbons of blue-green algae *Synechocystis* [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 1999, 35(5): 523-531.]
- 孟庆强,马亮帮,邹安德,等. 不同藻类热模拟实验的生烃特征对比[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 281-285, 291. [Meng Qingqiang, Ma Liangbang, Zou Ande, et al. Comparison of characteristics of hydrocarbon generation for different alga [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(3): 281-285, 291.]
- 宋一涛,李树唐. 颗石藻生烃的热模拟实验研究—I. 烃的产率、性质及烯烃、烷烃的特征[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 95-106. [Song Yitao, Li Shuqing. Experimental study on simulating hydrocarbon-generation of *coccolithophoridaes* by heating- I generation rate and property of hydrocarbons, characteristic of alkenes and alkanes [J]. Geological Journal of Universities, 1995, 1(2): 95-106.]
- 黄第藩,赵孟军. 下古生界海相原油之中蜡的成因分析——干酪

- 根 PY-GC 分析提供的证据[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 12-20. [Huang Difan, Zhao Mengjun. The genesis of marine oils with Middle wax from Lower Palaeozoic-evidence obtained from kerogen's PY-GC analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 12-20.]
- 19 段毅. 海洋和沼泽沉积有机地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 10-92. [Duan Yi. Marine and Swamp Depositional Organic Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2008: 10-92.]
- 20 Wu Qingyu, Zhang Bin, Song Yitao, et al. Effects of hydrolysis and bacterial degradation in the cells on hydrocarbons and biomarkers generated by pyrolysis of green alga *Chlorella protothecoides*[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(9): 749-753.
- 21 吴庆余, 宋一涛, 盛国英, 等. 微生物成烃的分子有机地球化学研究[J]. 中国科学基金, 1997(2): 97-103. [Wu Qingyu, Song Yitao, Sheng Guoying, et al. Study of molecular organic geochemistry on hydrocarbons originated from micro-organisms[J]. Bulletin of National Science Foundation of China, 1997(2): 97-103.]
- 22 Peters K E, Clark M E, das Gupta U, et al. Recognition of an Infra-cambrian source rock based on biomarkers in the Bahewala-1 oil, India[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(10): 1481-1494.
- 23 Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum[C]//Bjørøy M, Albrecht C, Cornford C, et al. Advances in organic geochemistry. New York: John Wiley and Sons, 1983: 659-676.
- 24 Simoneit B R T, Leif R N, de Aquino Neto F R, et al. On the presence of tricyclic terpane hydrocarbons in Permian *Tasmanite* algae[J]. Naturwissenschaften, 1990, 77(8): 380-383.
- 25 Greenwood P F, Arouri K R, George S C. Tricyclic terpenoid composition of *Tasmanites* kerogen as determined by pyrolysis GC-MS[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(7): 1249-1263.
- 26 Sinninghe Damsté J S, Kenig F, Koopmans M P, et al. Evidence for gammacerane as an indicator of water column stratification [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(9): 1895-1900.
- 27 Nytoft H P, Lutnaes B F, Johansen J E. 28-nor-spergulanes, a novel series of rearranged hopanes [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(7): 772-786.
- 28 Moldowan J M, Fago F J, Carlson R M K, et al. Rearranged hopanes in sediments and petroleum[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(11): 3333-3353.
- 29 Farrimond P, Bevan J C, Bishop A N. Hopanoid hydrocarbon maturation by an igneous intrusion[J]. Organic Geochemistry, 1996, 25(3/4): 149-164.
- 30 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[J]. 地球化学, 2007, 36(3): 253-260. [Zhu Yangming, Zhong Rongchun, Cai Xunyu, et al. Composition and origin of rearranged hopanes in Jurassic oils of central Sichuan Basin[J]. Geochimica, 2007, 36(3): 253-260.]
- 31 赵孟军, 张水昌. 17 α (H)-重排藿烷在塔里木盆地中的指相意义[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(1): 36-38. [Zhao Mengjun, Zhang Shuichang. The special sedimentary facies indicated by 17 α (H)-diahopanes in Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration & Development, 2001, 28(1): 36-38.]
- 32 黄海平, 卢松年, 袁佩兰. 古代沉积物中新检出的重排藿烷及其在油气勘探上的意义[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(3): 23-28. [Huang Haiping, Lu Songnian, Yuan Peilan. The new discovered di-hopanes in the Paleozoic sediments and their significance in petroleum exploration[J]. Natural Gas Geoscience, 1994, 5(3): 23-28.]
- 33 Kashirtsev V A, Moskvina V I, Fomin A N, et al. Terpanes and steranes in coals of different genetic types in Siberia[J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51(4): 404-411.
- 34 朱扬明, 张春明, 张敏, 等. 沉积环境的氧化还原性对重排藿烷形成的作用[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 103-108. [Zhu Yangming, Zhang Chunming, Zhang Min, et al. The effect of oxidation-reduction nature of depositional environments on the formation of diasteranes[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 103-108.]
- 35 Zhang Shuichang, Moldowan J M, Li Maowen, et al. The abnormal distribution of the molecular fossils in the pre-Cambrian and Cambrian; Its biological significance[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 45(3): 193-200.
- 36 Radke M, Welte D H, Willsch H. Geochemical study on a well in the Western Canada Basin; relation of aromatic distribution pattern to maturity of organic matter[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(1): 1-10.
- 37 Radke M, Welte D H, Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons; Influence of the organic matter type[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/2/3): 51-63.
- 38 Cassini F, Gallango O, Talukdar S, et al. Methylphenanthrene maturity index of marine source rock extracts and crude oils from the Maracaibo Basin[J]. Organic Geochemistry, 1988, 13(1/2/3): 73-80.
- 39 Heppenheimer H, Steffens K, Püttmann W, et al. Comparison of resinite-related aromatic biomarker distributions in Cretaceous-Tertiary coals from Canada and Germany[J]. Organic Geochemistry, 1992, 18(3): 273-287.
- 40 Isaksen G H. Molecular indicators of lacustrine freshwater depositional environments[C]//Manning D. Advances and Applications in Energy and the Natural Environment. Manchester: Manchester University Press, 1991: 361-364.
- 41 Budzinski H, Garrigues P, Connan J, et al. Alkylated phenanthrene distributions as maturity and origin indicators in crude oils and rock extracts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(10): 2043-2056.
- 42 Kvalheim O M, Christy A A, Telnaes N, et al. Maturity determination of organic matter in coals using the methylphenanthrene distribution [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51(7): 1883-1888.
- 43 Moldowan J M, Talyzina N M. Biogeochemical evidence for dinoflagellate ancestors in the Early Cambrian [J]. Science, 1998, 281(5380): 1168-1170.
- 44 van Duin A C T, Sinninghe Damsté J S, Koopmans M P, et al. A kinetic calculation method of homohopane maturation; Applications in the reconstruction of burial histories of sedimentary basins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(12): 2409-2429.
- 45 Farrimond P, Bavan J C, Bishop A N. Tricyclic terpane maturity parameters: response to heating by an igneous intrusion[J]. Organic Ge-

ochemistry, 1999, 30(8Pt 2): 1011-1019.

46 Peters K E, Moldowan J M, Sundararaman P. Effects of hydrous pyrolysis on biomarker thermal maturity parameters: Monterey Phosphat-

ic and Siliceous Members[J]. Organic Geochemistry, 1990, 15(3): 249-265.

Contrasting Biomarker Characteristics of Ordovician Mud Shale and Carbonate Rocks in South-western Margin of Ordos Basin

WANG WanChun WANG XiaoFeng ZHENG JianJing WANG ZuoDong

(Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Carbonate rocks of the Majiagou Formation and mud shale rocks of the Pingliang Formation of the Ordovician system were sampled from 4 sections in the south-western margin of the Ordos Basin. GC-MS analyses were made on the saturated and aromatic hydrocarbons of the dissolved organic matter extracted from the rock samples. Contrasting studies were made on the biomarker characteristics of carbonate of the Majiagou and mud shale of the Pingliang formations. The results show that there exist obvious differences in the n-alkane distribution types, peak patterns, biomarker ratios of Pr/Ph, gamacerane/C₃₀- $\alpha\beta$ -hopane, C₂₀₋₂₉ tricyclic terpanes/(C₂₀₋₂₉ tricyclic terpanes + C₂₇₋₃₅ hopanes), and methylphenanthrene index (MPI) between carbonate of the Majiagou and mud shale of the Pingliang formations. These differences are the results of different depositional environments and thermal maturities of the Majiagou and Pingliang formations and are significant for the discriminating of oils derived from the Majiagou and the Pingliang formations. The corresponding relations among the n-alkane distribution types, the sterane/hopane ratio and the C₂₈/C₂₉ $\alpha\alpha\alpha$ 20R ratio of steranes in the Majiagou Formation reflect subtle differences in organic matter sources. Correlations between Ts/(Ts + Tm) and gamacerane/C₃₀- $\alpha\beta$ -hopane ratios, and between C₂₉-sterane $\alpha\beta\beta$ /($\alpha\beta\beta$ + $\alpha\alpha\alpha$) ratio and abundances of rearranged hopanes and steranes suggest obvious influence of depositional environment on these maturity parameters.

Key words: Ordos Basin; Majiagou Formation; Pingliang Formation; biomarkers