

鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩三环萜烷成因探讨

林舒敏^{1,2}, 张敏^{1,2}, 李洪波^{1,2}

1. 油气地球化学与环境湖北省重点实验室 (长江大学资源与环境学院), 武汉 430100

2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室 (长江大学), 武汉 430100

摘要 【目的】鄂尔多斯盆地煤系烃源岩发育, 其饱和烃中三环萜烷含量丰富, 但其三环萜烷分布模式在研究区表现出较大的差异性, 因此探讨其差异性的主控因素具有重要意义。【方法】利用气相色谱和色谱-质谱分析技术, 对鄂尔多斯盆地上古生界 26 个煤系烃源岩样品饱和烃进行了详细地剖析。【结果】根据三环萜烷 (TT) 的分布特征将研究区烃源岩样品划分为三种不同类型的分布模式。I 类烃源岩以 C₁₉TT 为主峰, C₁₉TT、C₂₀TT、C₂₁TT 含量逐渐减小的变化趋势, 同时该类样品中 Pr/Ph 比值高, 介于 1.19~3.84, 平均值为 2.99、C₂₄ 四环萜烷含量也较丰富, C₂₄ 四环萜烷/C₂₆TT 比值介于 2.39~32.54, 平均值为 9.80、C₂₈ 三环萜烷和 C₂₉ 三环萜烷缺失, 这类样品主要是腐殖煤和炭质泥岩, 揭示出湖沼相沉积环境之特征; 与之相反的 II 类烃源岩的三环萜烷以 C₂₃TT 为主峰, C₁₉TT、C₂₀TT、C₂₁TT 含量是逐渐增大的, 而 Pr/Ph 比值低, 比值主要介于 0.34~0.90, 平均值为 0.61、C₂₄ 四环萜烷含量不丰富, C₂₄ 四环萜烷/C₂₆TT 比值主要介于 0.42~0.77, 平均值为 0.54、C₂₈ 三环萜烷和 C₂₉ 三环萜烷含量丰富, 这类样品除了煤系泥岩之外还有腐殖煤和炭质泥岩, 其沉积环境与 I 类烃源岩差异迥然; III 类烃源岩的三环萜烷分布介于 I 类和 II 类烃源岩之间, 一方面三环萜烷的主峰碳为 C₂₃TT, 另一方面 C₁₉TT、C₂₀TT、C₂₁TT 相对含量又依次降低并呈阶梯状分布的特征, 此外 Pr/Ph 比值为 2.07、C₂₄ 四环萜烷/C₂₆TT 比值为 3.53, 两者均介于 I 类烃源岩和 II 类烃源岩之间。【结论】随着烃源岩热演化程度的增加, 三环萜烷的总量展示了逐渐增大的变化趋势, 但不同类型烃源岩的三环萜烷分布模式并没有发生明显变化, 说明研究区煤系烃源岩三环萜烷的不同分布模式受有机质热演化程度影响较小, 而主要受控于沉积环境和母质类型。

关键词 三环萜烷; 主控因素; 沉积环境; 煤系烃源岩; 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 林舒敏, 女, 1999 年出生, 硕士研究生, 有机地球化学, E-mail: 18299104807@163.com

通信作者 张敏, 男, 教授, 博士生导师, 石油地质学和油气地球化学, E-mail: zmjpu@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

煤系烃源岩 (煤、炭质泥岩、泥岩) 是含油气盆地中一类形成于过渡环境条件的重要的烃源岩, 有机前身物主要来自高等植物输入^[1]。煤系烃源岩作为油气尤其是天然气的主要贡献者, 其基础地球化学和分子地球化学研究引起广泛的关注^[2-5]。傅家谟和刘德汉等率先在富含藻质体的烛藻煤和含腐泥组的残植煤中检出三环萜烷^[6]; 其后程克明研究吐哈盆地时发现其泥岩和煤普遍含有三环萜烷, 且利用三环/四环萜烷指纹对比图得出中、下侏罗统煤和下侏罗统煤系泥岩与台北凹陷“弧形带”原油具有相同的分布特征, 表明其存在一定亲属关

系^[7]。大量文献资料表明煤系烃源岩中广泛分布三环萜烷^[8-13]，三环萜类化合物具有良好的稳定性和生物降解能力，是油源对比、判断有机质来源和演化程度的重要手段。

鄂尔多斯盆地是华北克拉通西部边缘最稳定的一个大型多旋回克拉通盆地^[14]。盆内煤炭资源丰富，煤系烃源岩发育，煤生烃潜力大^[15]。目前，研究鄂尔多斯盆地煤系烃源岩三环萜烷地球化学特征的文献有限，研究涉及的内容大多限于鄂尔多斯盆地烃源岩评价或煤系烃源岩中气体的地球化学特征研究^[16-19]。对三环萜烷详细解剖的文章较少，而典型的煤及煤成油中富含 C₁₉ 三环萜烷 (TT)，C₂₃ 及以上碳数的三环萜烷含量极低，C₁₉TT、C₂₀TT、C₂₁TT 相对含量依次降低，呈阶梯状分布型态^[20-21]。本文对鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩三环萜烷的研究发现其分布模式存在多样性，一种与典型沼泽相煤系烃源岩三环萜烷分布一致，以 C₁₉TT 为主峰，C₂₃TT 含量较低，C₂₄ 四环萜烷 (TeT) 含量丰富；饶有兴趣的是许多腐殖煤样品三环萜烷以 C₂₃TT 为主峰，C₁₉TT 含量相对较低，C₂₄ 四环萜烷 (TeT) 含量较低，对其分布模式与成因的探讨目前文献上少有报道。本次研究不仅丰富和完善了三环萜烷的成因理论，而且为生物标志化合物在油气勘探中的应用提供新的地球化学参数。

1 地质背景与实验

1.1 地质概况

鄂尔多斯盆地是华北克拉通西部边缘最稳定的一个大型多旋回克拉通盆地^[14]。鄂尔多斯盆地是华北地台西端的一个次级构造单元，它包括伊盟隆起、渭北隆起、伊陕斜坡、西缘逆冲带、晋西挠褶带和天环拗陷等 6 个二级构造单元^[22]。盆地晚古生代经历了海相沉积为主的陆表海盆地、海陆过渡相为主的近海湖盆及陆相碎屑岩沉积为主的内陆拗陷湖盆的古地理演化过程^[23]。鄂尔多斯盆地二叠系由下至上发育了二叠统的太原组和山西组、中二叠统的下石盒子组、上石盒子组和上二叠统石千峰组 (图 1)。

鄂尔多斯盆地山西组沉积时期为陆表海背景下的海陆过渡沉积演化阶段，海陆过渡三角洲体系广泛发育，到下石盒子组时期才完全进入陆相湖盆的沉积演化阶段^[24]。山西组时期盆地水体由北部向中部缓慢加深，依次发育扇缘泥炭沼泽相、岸后泥炭沼泽相、三角洲平原泥炭沼泽相和湖滨泥炭沼泽相^[25]。

1.2 样品与实验

文中研究所涉及的煤系烃源岩取自乌达、保德、柳林、澄城、韩城 5 个野外露头剖面，以及伊盟隆起中部的苏 27 井、陕北斜坡带东北部的榆 20 井与双 1 井，岩性为煤、炭质泥岩、泥岩。对 26 个样品进行全岩显微组分分析、镜质体反射率测定、岩石热解、有机碳测定、

抽提、族组分分离和 GC-MS 定量分析，样品实验的 GC-MS 分析条件见文献^[26]，部分主要生标参数见表 1。

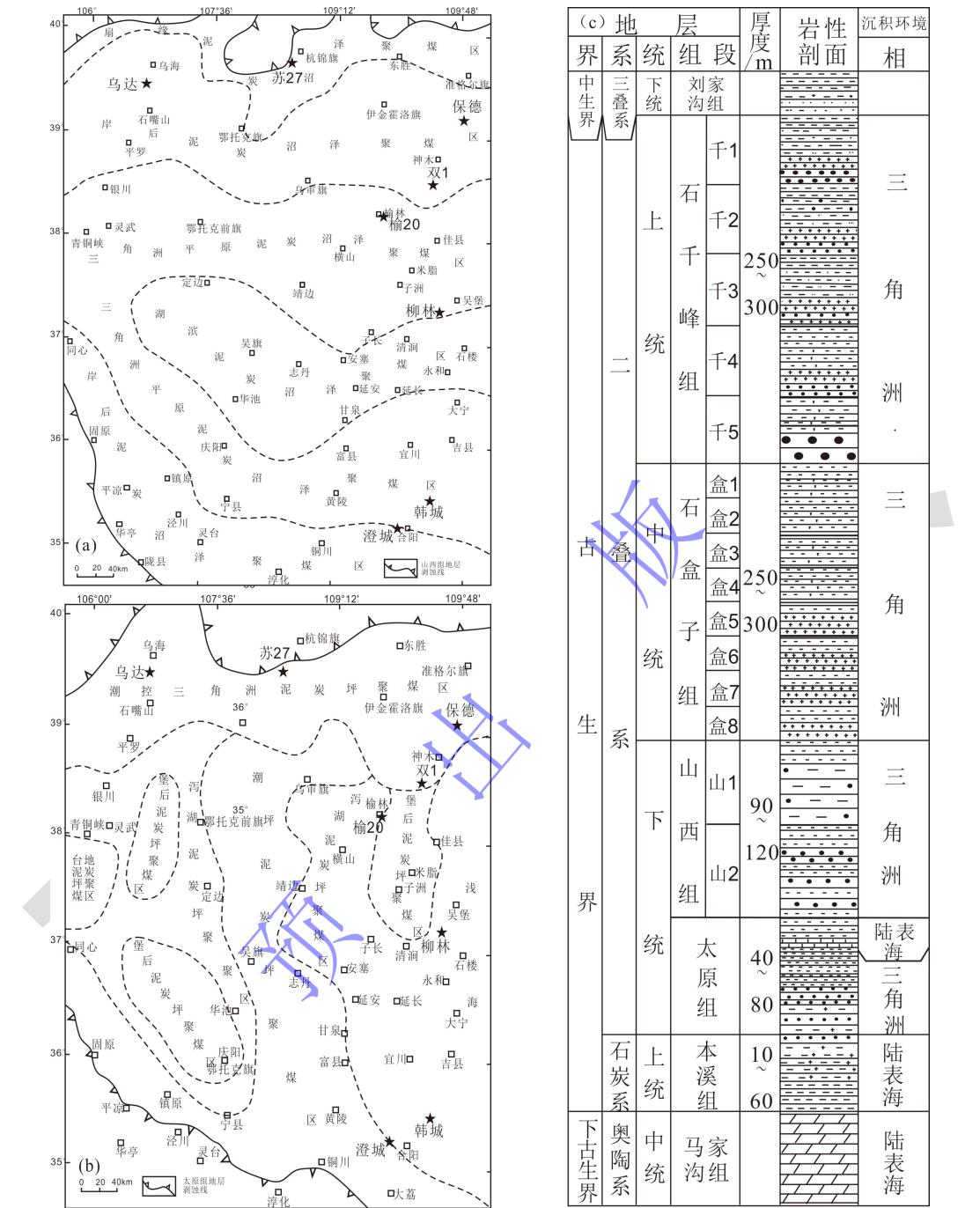


图 1 鄂尔多斯盆地下二叠统聚煤环境及取样井分布图与研究区综合柱状图（据文献^[24]修改）
(a) 鄂尔多斯盆地下二叠统山西组聚煤环境及取样井分布图；(b) 鄂尔多斯盆地下二叠统太原组聚煤环境及取样井分布图；
(c) 研究区综合柱状图

Fig.1 The distribution map of coal accumulation environment and sampling wells in the Lower Permian of the Ordos Basin and the comprehensive histogram of the study area (modified from reference ^[24])
(a) coal-accumulating environment and sampling well distribution map of the Lower Permian Shanxi Formation in the Ordos Basin; (b) coal-accumulating environment and sampling well distribution map of the Lower Permian Taiyuan Formation in the Ordos Basin; (c) the comprehensive histogram of the study area

表 1 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩主要生物标志化合物参数

Table 1 Parameters of main biomarker compounds of the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

三环萜烷 分布模式	井号/样品名	深度/m	层位	岩性	TOC/%	R _o /%	T _{max} /℃	Pr/Ph	C ₁₉ TT/ C ₂₃ TT	C ₁₉ -C ₂₁ TT/ C ₂₃ -C ₂₅ TT	Σ 三环萜烷 /C ₃₀ H	G/C ₃₀ H	C ₂₄ TeT/C ₂₆ TT
I 类	WD-1	地表露头	P _{1s}	煤	51.95	0.66	441	3.84	8.16	9.06	0.28	0.02	32.54
	WD-2	地表露头	P _{1t}	煤	63.03	0.87	463	1.19	5.56	5.82	9.70	0.13	2.60
	BD-1	地表露头	P _{1s}	煤	43.88	0.68	432	2.86	14.29	14.74	0.22	0.02	6.76
	BD-2	地表露头	P _{1t}	煤	38.48	0.66	435	5.29	3.11	2.68	0.34	0.03	5.63
	BD-3	地表露头	P _{1t}	炭质泥岩	10.89	/	434	2.28	5.14	3.50	0.22	0.03	11.61
	苏 27 井 SU-1	3 157.37~3 158.08	P _{1s}	煤	44.09	/	446	2.10	2.80	3.25	2.32	0.06	7.07
	苏 27 井 SU-2	3 185.06~3 185.38	P _{1s}	炭质泥岩	6.85	/	450	3.35	1.42	1.97	5.08	0.12	2.39
II 类	WD-3	地表露头	P _{1s}	泥岩	1.82	/	543	0.71	0.55	1.43	2.99	0.16	2.34
	WD-4	地表露头	P _{1t}	泥岩	4.42	/	518	1.13	0.21	1.16	4.25	0.16	0.55
	WD-5	地表露头	C _{2y}	泥岩	1.44	0.87	505	0.90	0.09	1.01	4.64	0.14	0.51
	WD-6	地表露头	C _{2y}	煤	65.26	0.94	537	0.90	0.10	0.94	3.42	0.16	0.50
	WD-7	地表露头	C _{2j}	泥岩	3.11	/	565	0.63	0.11	1.02	4.47	0.19	0.51
	WD-8	地表露头	C _{2j}	煤	39.94	/	499	0.34	0.03	0.75	4.99	0.21	0.51
	LL-1	地表露头	P _{1s}	煤	54.54	1.13	472	0.97	0.98	1.71	3.44	0.23	0.77
	LL-2	地表露头	P _{1t}	炭质泥岩	10.00	1.23	521	0.54	0.08	0.93	7.56	0.17	0.51
	HC-1	地表露头	P _{1t}	炭质泥岩	17.39	1.33	562	0.32	0.07	0.84	9.18	0.16	0.48
	CC-1	地表露头	P _{1s}	炭质泥岩	6.91	1.58	521	0.63	0.23	1.08	3.63	0.15	0.46
	CC-2	地表露头	P _{1t}	煤	46.96	1.59	494	0.72	0.28	1.11	3.31	0.15	0.47
	CC-3	地表露头	C _{2b}	煤	33.18	1.63	517	0.65	0.07	0.81	4.62	0.16	0.46
	双 1 井 S-1	2 619.35~2 619.47	P _{1s}	泥岩	1.14	1.03	478	0.45	0.07	0.71	2.65	0.17	0.42
	双 1 井 S-2	2 697.68~2 697.77	P _{1s}	煤	33.05	1.15	478	0.48	0.18	0.82	3.02	0.15	0.54
	榆 20 井 Y-1	2 696.11~2 701.95	P _{2sh}	泥岩	2.20	1.16	486	0.52	0.11	0.83	3.51	0.17	0.60
	榆 20 井 Y-2	2 733.60~2 734.84	P _{1s}	煤	62.66	1.12	475	0.39	0.13	0.78	3.37	0.18	0.50
	榆 20 井 Y-3	2 744.40~2 749.41	P _{1s}	炭质泥岩	23.54	1.20	474	0.39	0.08	0.71	4.79	0.18	0.62
	苏 27 井 SU-3	3 155.03~3 155.97	P _{1s}	泥岩	2.51	0.82	455	0.83	0.34	1.05	3.25	0.10	0.77
III 类	苏 27 井 SU-4	3 184.46~3 185.06	P _{1s}	煤	63.14	0.86	450	2.07	0.91	1.55	6.20	0.13	3.53

研究所涉及煤岩 TOC 介于 33.05%~65.26%，显微组分富含镜质组、惰质组和腐泥组，少量壳质组；TI 指数介于 -69.4~-41.8；以 III 型干酪根为主，符合腐殖煤的特征； R_o 介于 0.66%~1.63%， T_{max} 范围为 432 °C~537 °C。

炭质泥岩 TOC 介于 6.85%~23.54%，显微组分主要含镜质组和腐泥组，少量惰质组和壳质组；TI 指数介于 -69.4~-13.5，以 III 型干酪根为主； R_o 介于 1.20%~1.58%， T_{max} 范围为 434 °C~562 °C。

泥岩 TOC 介于 1.14%~4.42%，显微组分主要为镜质组和腐泥组，几乎不含惰质组和壳质组；TI 指数介于 -8.8~21.4；以 II₁ 型和 III 型干酪根为主。 R_o 介于 0.82%~1.16%， T_{max} 范围为 455 °C~565 °C。

2 结果与讨论

2.1 三环萜烷分布模式

鄂尔多斯盆地上古生界 26 个煤系烃源岩样品，利用三环萜烷（TT）的地球化学特征，将鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系的煤系烃源岩样品划分为三种类型（图 2）。

I 类烃源岩以煤岩样品 BD-2 和炭质泥岩样品苏 27 井 3 185.06~3 185.38 m(SU-2)为例，以 $C_{19}TT$ 为主峰， $C_{19}TT$ 、 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 相对含量依次降低，呈阶梯状分布， C_{24} 四环萜烷（TeT）含量丰富， $C_{28}TT$ - $C_{29}TT$ 缺失。

II 类烃源岩以煤岩样品 WD-8、炭质泥岩样品 HC-1、泥岩样品榆 20 井 2 696.11~2 701.95 m(Y-1)为例，主峰为 $C_{23}TT$ ， $C_{19}TT$ 、 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 相对含量依次增加，呈正态分布， $C_{24}TeT$ 含量不丰富，但存在较丰富的 $C_{28}TT$ - $C_{29}TT$ 。

III 类烃源岩为煤岩苏 27 井 3 184.46~3 185.06 m(SU-4)，以 $C_{23}TT$ 为主峰， $C_{19}TT$ 、 $C_{20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 相对含量依次降低，呈阶梯状分布， $C_{24}TeT$ 含量丰富。

综上所述，在研究的煤系烃源岩中三环萜烷存在三种分布模式，I 类煤岩和炭质泥岩均表现出湖沼相的分布特征，该分布模式与典型煤系烃源岩三环萜烷分布模式一致^[20-21]。但还存在位于 WD-6、WD-8、LL-1、CC-2、CC-3 和双 1 井 2 697.68~2 697.77 m(S-2)、榆 20 井 2 733.60~2 739.84 m(Y-2) 部分腐殖煤样品，其三环萜烷分布有明显的特殊性，表现出以 $C_{23}TT$ 为主峰，此分布模式一般出现于湖相或海相中烃源岩中，在腐殖煤中出现此种三环萜烷的分布模式文献少有报道，其成因有待进一步的探讨。III 类炭质泥岩的分布模式介于 I 类和 II 类之间，呈过渡形式的分布。

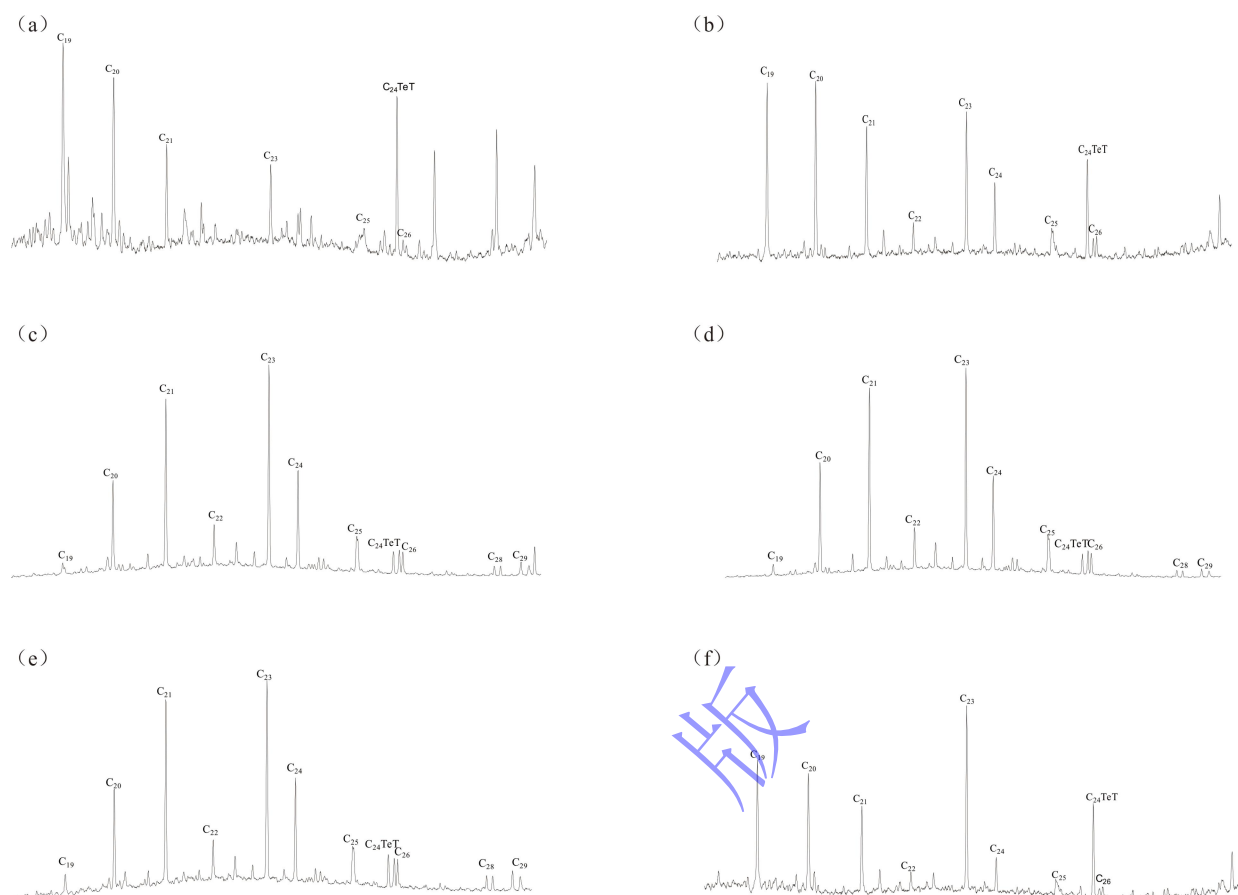


图2 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩样品三环萜烷分布(m/z 191)

(a) I类, BD-2, P_{1t} , 煤; (b) I类, SU-2, 3 185.06~3 185.38 m P_{1s} , 炭质泥岩; (c) II类, WD-8, C_{2j} , 煤; (d) II类, HC-1, P_{1t} , 炭质泥岩; (e) II类, Y-1, 2 696.11~2 701.95 m, P_{2sh} , 泥岩; (f) III类, SU-4, 3 184.46~3 185.06 m, P_{1s} , 煤

Fig.2 Tricyclic terpene distribution of the Upper Paleozoic coal-measure source rock samples in the Ordos Basin (m/z 191)

(a) type I, BD-2, P_{1t} , coal; (b) type I, SU-2 3 185.06~3 185.38 m, P_{1s} , carbon mudstone; (c) type II, WD-8 C_{2j} coal; (d) type II, HC-1, P_{1t} , carbon mudstone; (e) type II, Y-1 2 696.11~2 701.95 m, P_{2sh} , mudstone; (f) type III, SU-4, 3 184.46~3 185.06 m, P_{1s} , coal

2.2 三环萜烷组成特征与成熟度关系

因本文样品镜质体反射率 R_o 数据有限,且 R_o 与成熟度指标 T_{max} 有较好的正相关关系(图 3a), 因此用 T_{max} 可以代替 R_o 表征样品的成熟度。

随着成熟度的增高,三环萜烷会优先从干酪根或沥青质中释放出,且其热稳定性强于藿烷,导致三环萜烷的相对丰度高于藿烷^[27-28]。本次研究分析的 26 件煤系烃源岩样品随着热演化程度的增大(图 3b), I 类煤岩和炭质泥岩 Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 比值主体介于 0.22~0.34, 平均值为 0.27; II 类煤系烃源岩 Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 主体比值介于 2.65~7.56, 平均值为 3.99; III 类炭质泥岩 Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 比值介于 I 类和 II 类分布模式之间,其值为 6.20(表 1)。本文所研究样品的镜质体反射率 R_o 范围跨度较大,介于 0.66%~1.63%,整体表现出随着成熟度的增大,三环萜烷总量有明显的增加。

I 类煤岩和炭质泥岩的 C_{19} - C_{21} TT/ C_{23} - C_{25} TT 介于 1.97~14.74，平均值为 5.86、 C_{19} TT/ C_{23} TT 介于 1.42~14.29，平均值为 5.78；II 类煤系烃源岩的 C_{19} - C_{21} TT/ C_{23} - C_{25} TT 主体介于 0.71~1.08，平均值为 0.94、 C_{19} TT/ C_{23} TT 主体介于 0.03~0.34，平均值为 0.16；III 类炭质泥岩的 C_{19} - C_{21} TT/ C_{23} - C_{25} TT 为 1.55、 C_{19} TT/ C_{23} TT 为 0.91 均介于 I 类和 II 类之间（表 1）。其中，I 类煤岩和炭质泥岩的 R_o 介于 0.66%~0.87%， T_{max} 介于 432 °C~463 °C 小范围地变化，但 C_{19} - C_{21} TT/ C_{23} - C_{25} TT 和 C_{19} TT/ C_{23} TT 含量有明显的增大幅度。相反，在 II 类煤系烃源岩中，其成熟度跨度较大， R_o 介于 0.82%~1.63%， T_{max} 介于 455 °C~565 °C，但其 C_{19} - C_{21} TT/ C_{23} - C_{25} TT 和 C_{19} TT/ C_{23} TT 随成熟度的增加含量未有明显变化，说明成熟度对三环萜烷的分布模式影响较小。陈哲龙等^[29]对准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩的加水热模拟实验分析表明当成熟度处于成熟—高成熟阶段，随着成熟度的增大不同碳数的三环萜烷含量以及三环萜烷总量均明显改变，但成熟度对 C_{19} - C_{23} TT 的分布样式影响不大，此结论与本文研究不谋而合。而在腐殖煤样品中有两种分布模式，一种以 C_{19} TT 为主峰， C_{24} TeT 含量丰富；另一种以 C_{23} TT 为主峰， C_{24} TeT 含量不丰富。分布模式存在差异的原因可能与沉积环境和母质类型有关^[30-31]（图 3c, d）。

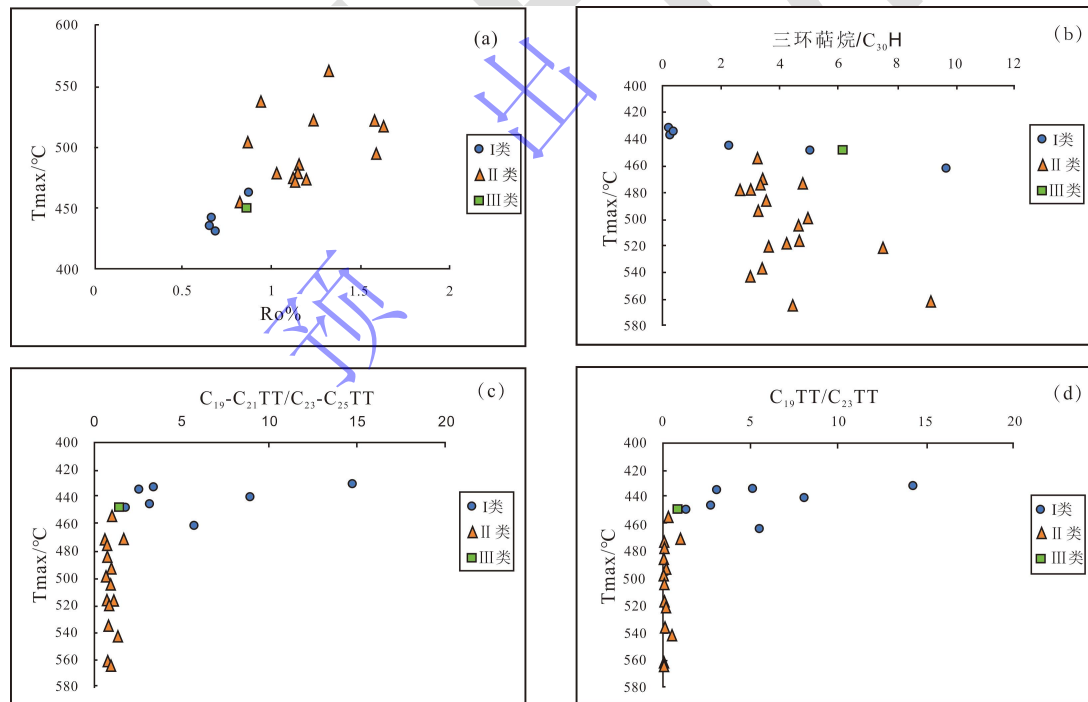


图3 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩 R_o 、 Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 、 $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ 和 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 与 T_{max} 的关系

(a) R_o 与 T_{max} 关系；(b) Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 与 T_{max} 关系；(c) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ 与 T_{max} 关系；(d) $C_{19}TT/C_{23}TT$ 与 T_{max} 关系

Fig.3 Relationship between the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

(a) R_o vs. T_{max} ; (b) Σ tricyclic terpane/ $C_{30}H$ vs. T_{max} ; (c) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ vs. T_{max} ; (d) $C_{19}TT/C_{23}TT$ vs. T_{max}

2.3 三环萜烷组成特征与沉积环境关系

从沉积学角度来看,研究区广泛发育泥炭沼泽相、泥炭坪相体系,沉积水体表现为淡—微咸水沉积环境。类异戊二烯烷烃中姥鲛烷和植烷的比值 (Pr/Ph)、 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 、伽马蜡烷指数 (G/C_{30H}) 以及含硫芳烃化合物相对丰度常用来表示烃源岩沉积时的氧化还原性和咸度^[32-35]。 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 关系图显示不同分布模式煤系烃源岩所处沉积环境的氧化还原性存在差异 (图 4a): I 类煤岩和炭质泥岩大体处于氧化型沉积环境; II 类煤系烃源岩大体处于还原—强还原型沉积环境中; III 类炭质泥岩为氧化型沉积环境; 因此,有机质沉积时水体的氧化还原性是影响不同分布模式煤系烃源岩三环萜烷相对丰度的因素。研究区中腐殖煤存在着两种差异迥然的分布模式,主要现在 $C_{19}TT$ 和 $C_{23}TT$ 的相对丰度上,故此选择 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 的比值分别与 Pr/Ph 比值、 G/C_{30H} 比值和 $DBT/PHEN$ 比值的相关关系来研究不同环境参数与单个三环萜烷比值的内在联系。鄂尔多斯盆地上古生界不同岩性煤系烃源岩样品姥植比变化幅度较大,介于 0.32~5.29,暗示其沉积环境存在明显的差异性,具体表现为 I 类煤岩和炭质泥岩 Pr/Ph 值相对较高,主体大于 2.0,平均值为 2.99; II 类煤系烃源岩 Pr/Ph 值相对较低,主体小于 1.0,平均值仅为 0.61; III 类炭质泥岩 Pr/Ph 值介于 I 类和 II 类煤系烃源岩之间, Pr/Ph 值为 2.07。研究区煤系烃源岩 Pr/Ph 这种变化趋势导致了样品中三环萜烷的分布模式发生了有规律的变化。具体而言,三环萜烷单个化合物的相对比值如 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值随着 Pr/Ph 值呈现出正相关关系,因此, Pr/Ph 和 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值可以很好地将研究区煤系烃源岩分成三种类型 (表 1、图 4b)。

伽马蜡烷 (G) 能较好反映沉积环境的盐度和水体分层程度^[36]。三类烃源岩的 G/C_{30H} 比值介于 0.02~0.23,平均值为 0.14,整体上研究区介于淡—微咸水沉积环境。I 类煤岩和炭质泥岩的 G/C_{30H} 比值介于 0.02~0.13,平均值为 0.06,相对较低以淡水为主; II 类煤系烃源岩的 G/C_{30H} 比值介于 0.10~0.23,平均值为 0.17,相对较高以微咸水为主 (表 1)。三类煤系烃源岩三环萜烷的相对丰度与水体的咸化程度有较好的负相关性,水体咸化程度的高低影响 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值变化;即随着水体咸度的增加, $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值逐渐减小 (图 4c)。

三萜系列化合物中的二苯并噻吩 (DBT) 结合其他指标如菲 ($PHEN$)、姥植比 (Pr/Ph) 等可进一步判识研究区中的成煤环境^[37]。I 类煤岩和炭质泥岩的 $DBT/PHEN$ 比值分布集中,主体介于 0.001 7~0.068 8,平均值为 0.023 1,表示样品中含硫化合物的含量相对较低;相反 II 类煤系烃源岩的 $DBT/PHEN$ 比值分布跨度较大,介于 0.001 6~0.667 8,平均值为 0.118 4,样品中含硫化合物的含量相对较高,暗示这些样品的成烃母质在相对还原的环境中生成。由

此可知，II类煤系烃源岩 DBT/PHEN 比值平均值是 I 类煤岩和炭质泥岩 DBT/PHEN 比值平均值的 5 倍，表明 II 类煤系烃源岩还原性强于 I 类煤岩和炭质泥岩（表 1、图 4d）。

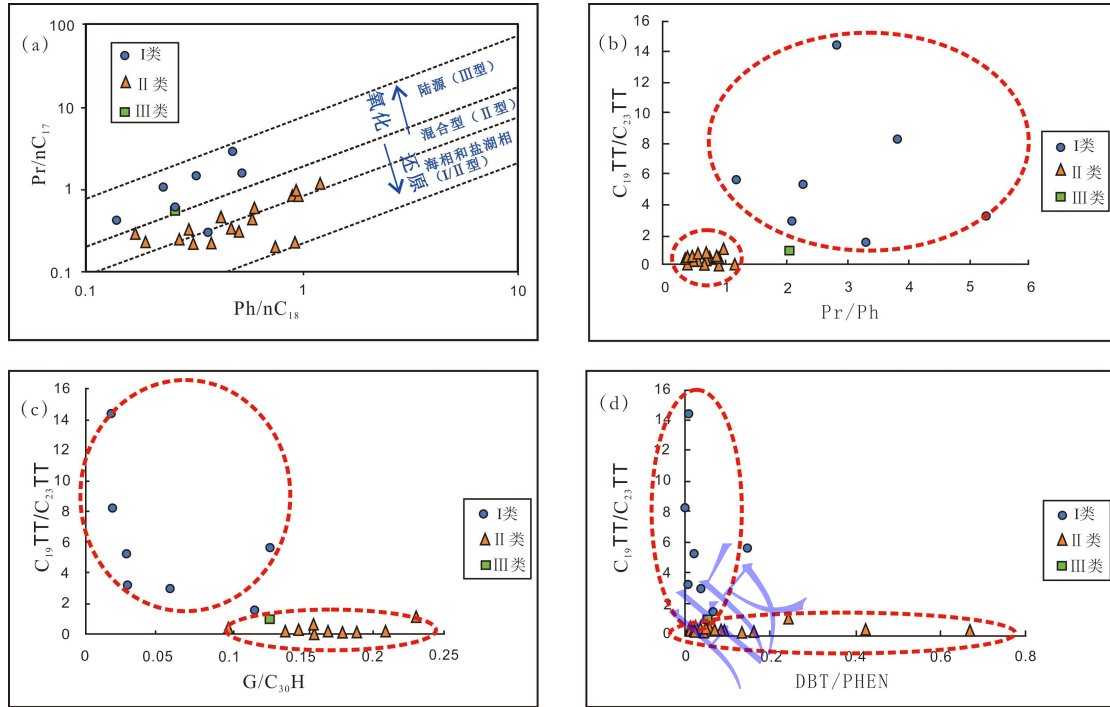


图 4 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 、 $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ 与 Pr/Ph 、 $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$ 、 DBT/PHEN 的关系

(a) Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 关系；(b) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ 与 Pr/Ph 关系；(c) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ 与 $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$ 关系；(d) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ 与 DBT/PHEN 关系

Fig.4 Relationship between the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

(a) Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} ; (b) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ vs. Pr/Ph ; (c) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ vs. $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$; (d) $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ vs. DBT/PHEN

为了更好的研究三环萜烷系列相对丰度的变化，选用三环萜烷参数 $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 研究沉积环境对其分布模式的影响。三类煤系烃源岩烃样品三环萜烷的相对丰度与沉积环境的氧化还原性有较好的正相关性（图 5a）：I 类煤岩和炭质泥岩 Pr/Ph 比值主体大于 2.0， $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 比值主体介于 1.97~5.82，平均值为 3.44，低碳数三环萜烷含量异常丰富，该比值较高；II 类煤系烃源岩 Pr/Ph 比值分布集中主体小于 1.0， $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 比值主体介于 0.71~1.08，平均值为 0.89，高碳数的三环萜烷化合物含量大于低碳数的三环萜烷；III 类炭质泥岩 Pr/Ph 值为 2.07， $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 为 1.55 均介于 I 类和 II 类煤系烃源岩之间（表 1）。与图 4b 结果相同， Pr/Ph 值的含量同样影响着 $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 参数的变化，表明沉积环境的氧化还原性不仅对三环萜烷的单个化合物（ C_{19}TT 、 C_{23}TT ）分布模式产生影响，而且对低碳数（ $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}$ ）和高碳数（ $\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ ）的三环萜烷分布模式同样产生影响。 $\text{C}_{19}\text{-C}_{21}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{-C}_{25}\text{TT}$ 比值与指示水体盐度的参数 $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$ 和表征成煤环境的参数 DBT/PHEN 也有较好的负相关性，其变化趋势与 $\text{C}_{19}\text{TT}/\text{C}_{23}\text{TT}$ 比值一致（图 5b, c）。且

烷基二苯并噻吩与烷基二苯并呋喃的比值 (MDBTs/MDBFs) 也能推断环境类型^[37-39]。I 类煤岩和炭质泥岩的甲基二苯并噻吩含量较少, MDBTs/MDBFs 比值低于 1.0, 介于 0.008~0.794; II 类煤系烃源岩的甲基二苯并噻吩含量丰富, MDBTs/MDBFs 比值高于 1.0, 主体介于 1.189~8.515。且 $C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$ 与 MDBTs/MDBFs 特征和 $C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$ 与 DBT/PHEN 特征类似 (表 1、图 5d)。

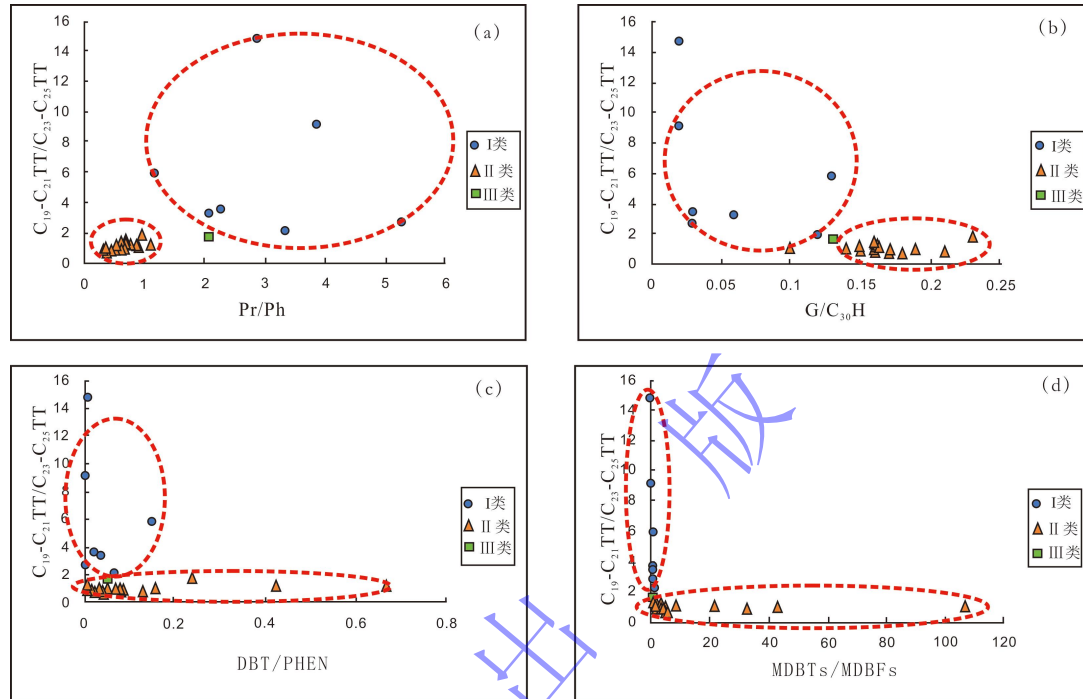


图 5 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$)与 Pr/Ph 、 $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$ 、 DBT/PHEN 、 $\text{MDBTs}/\text{MDBFs}$ 的关系

(a) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) 与 Pr/Ph 关系; (b) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) 与 $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$ 关系; (c) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) 与 DBT/PHEN 关系; (d) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) 与 $\text{MDBTs}/\text{MDBFs}$ 关系

Fig.5 Relationship between the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

(a) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) vs. Pr/Ph ; (b) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) vs. $\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$; (c) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) vs. DBT/PHEN ; (d) ($C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$) vs. $\text{MDBTs}/\text{MDBFs}$

综上所述,从三环萜烷单化合物比值和三环萜烷系列化合物的比值可以看出,这些比值与沉积环境参数,诸如姥植比 (Pr/Ph)、伽马蜡烷指数 ($\text{G}/\text{C}_{30}\text{H}$) 和含硫芳烃化合物 (DBT/PHEN 、 $\text{MDBTs}/\text{MDBFs}$) 均有较好的相关关系,暗示三环萜烷分布模式明显受到沉积环境的影响:在偏氧化的沉积环境中, $C_{19}\text{TT}/C_{23}\text{TT}$ 值和 $C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$ 值相对含量高;在偏还原的沉积环境中, $C_{19}\text{TT}/C_{23}\text{TT}$ 值和 $C_{19}\text{-}C_{21}\text{TT}/C_{23}\text{-}C_{25}\text{TT}$ 值相对含量较低。与此同时沉积学的观点也支持此种现象, I 类煤岩和炭质泥岩主要发育于泥炭沼泽,为沼泽相; II 类煤系烃源岩主要分布在泥炭坪和泥炭沼泽,主要为海相和沼泽相^[24],但部分样品虽然为沼泽相却表现出 II 类分布模式,结合姥藿烷与植烷、三环萜烷、伽马蜡烷、二苯并噻吩和菲等分子地球化学特征,这种现象可能与煤系烃源岩遭受海水作用有关^[40-41]。

2.4 三环萜烷组成特征与母质来源关系

在沉积环境中可能存在海水的作用导致煤系烃源岩三环萜烷的三种分布模式,下面将从母质来源研究其分布模式的特征。甾烷化合物可以为有机质来源提供一定的资料,如 C_{27} 规则甾烷丰度较高表明有机质主要来源于低等水生生物,而 C_{29} 规则甾烷生源组成比较复杂,既可能来自高等植物,也可能来自于低等浮游生物(例如蓝绿藻等)^[42-44]。三环萜烷单化合物比值($C_{19}TT/C_{23}TT$)和三环萜烷系列化合物的比值($C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT$)均与 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷有较明显的负相关性(图 6a, b)。I 类煤岩和炭质泥岩的 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷值均小于 1.0,介于 0.1~0.71; II 类煤系烃源岩的 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷值介于 0.75~1.32; III 类炭质泥岩的 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷值为 0.48(表 1)。II 类煤系烃源岩的 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷值高于 I 类,表明 I 类煤岩和炭质泥岩陆源有机质的输入多于 II 类煤系烃源岩,而 II 类煤系烃源岩主要是微生物对高等植物的改造作用形成的细菌或/和藻类成烃。

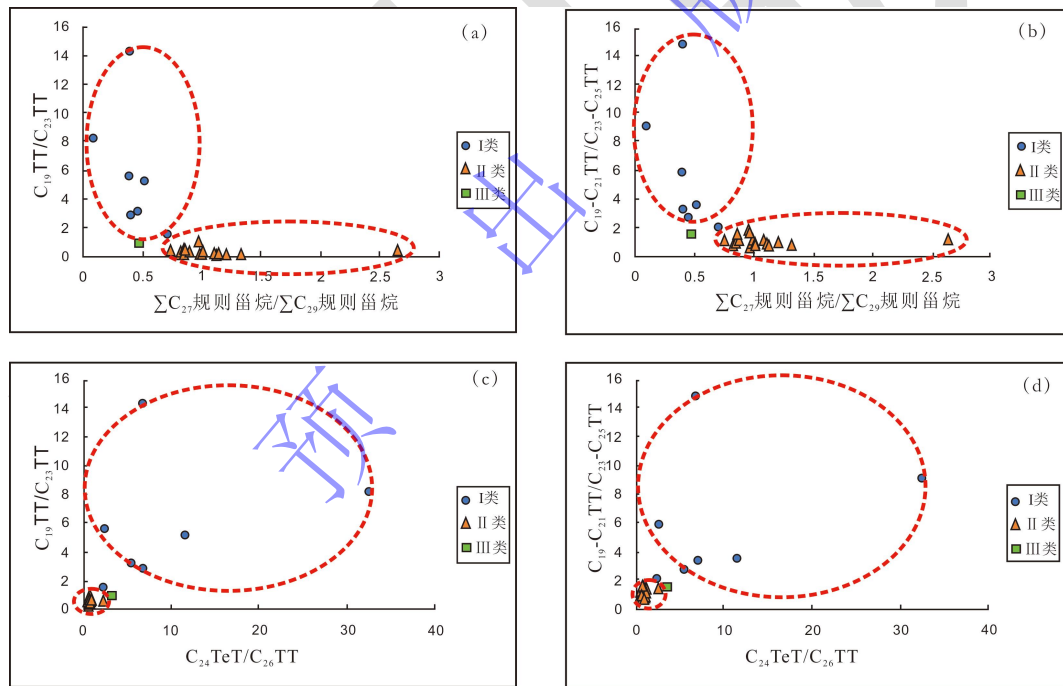


图 6 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 与 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷、 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 、 $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ 与 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷、 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 的关系

(a) $C_{19}TT/C_{23}TT$ 与 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷关系; (b) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ 与 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷关系; (c) $C_{19}TT/C_{23}TT$ 与 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 关系; (d) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ 与 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 关系

Fig.6 Relationship between the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

(a) $C_{19}TT/C_{23}TT$ vs. ΣC_{27} regular sterane/ ΣC_{29} regular sterane; (b) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ vs. ΣC_{27} regular sterane/ ΣC_{29} regular sterane; (c) $C_{19}TT/C_{23}TT$ vs. $C_{24}TeT/C_{26}TT$; (d) $(C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT)$ vs. $C_{24}TeT/C_{26}TT$

C_{24} 四环萜烷 (TeT) 通常被认为来源于陆源高等植物输入,且 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 是判断有机质母质来源的一个常用生源指标^[45-46]。同样三环萜烷单化合物比值($C_{19}TT/C_{23}TT$)和三

环萜烷系列化合物的比值 ($C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT$) 相关图均与 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 有良好的正相关性。I 类煤岩和炭质泥岩的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值均大于 1.0, 介于 2.39~32.54; II 类煤系烃源岩的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值主体分布小于 1.0, 介于 0.42~0.77 (表 1)。I 类煤岩和炭质泥岩的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值明显高于 II 类分煤系烃源岩, 表明 I 类煤岩和炭质泥岩陆源有机质输入较 II 类煤系烃源岩多, II 类煤系烃源岩主要为高等植物经微生物改造后的低等水生生物成烃, 唯独 WD-3 样品的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值与 II 类其他样品有区别, 其 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值为 2.34, 大于 1.0, 表明微生物对高等植物的改造作用不完全, 导致其母质来源仍表现为高等植物的输入 (图 6c, d)。

2.5 讨论

单一的因素难以解释鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩三环萜烷分布与形成, 须将煤系烃源岩形成的时空差异、主要沉积相、沉积环境、生源母质等因素的研究综合起来, 才能阐明具有差异性分布模式的形成及变化的主控因素。

晚古生代进入克拉通盆地的发育时期, 由于海水的快速入侵及缓慢退去, 在空间上形成了各种成煤环境, 而泥炭沼泽与泥炭坪是鄂尔多斯盆地的两大基本成煤环境^[24,47]。陆相淡水成煤环境——泥炭沼泽, 成煤植物主要为陆地森林、淡水水生草本, 煤的硫份含量较低; 滨海咸水成煤环境——泥炭坪, 成煤植物主要为潮汐适盐植物, 煤的硫份含量较高^[48]。I 类烃源岩主要分布在泥炭沼泽, 沉积环境为偏氧化型, 淡水为主, 硫份含量较低; 生源母质主要为陆源高等植物。II 类烃源岩主要分布于泥炭坪 (瀉湖泥炭坪和潮坪泥炭坪) 和泥炭沼泽, 沉积环境为弱还原—强还原型, 微咸水, 硫份含量较高; 生源母质主要为低等水生生物和陆源高等植物混源。III 类烃源岩主要分布在泥炭坪 (潮控三角洲泥炭坪), 沉积环境为氧化型, 淡水—微咸水, 硫份含量较低, 处于 I 类烃源岩和 II 类烃源岩之间的过渡 (表 2)。而泥炭坪与一般泥炭沼泽有很大差别, 它属于海相沉积, 泥炭坪的水深很浅, 且成煤植物在周期性潮汐作用下与正常陆生植物存在差异, 导致煤层的硫份高^[49]。由于泥炭坪主要受潮汐流的影响, 海水规律性地侵入及退出, 使得微生物活跃, 并强烈降解部分高等植物遗体。虽碱性沼泽水体大量溶解并流失植物木质纤维经降解后形成的腐殖质, 但仍有部分残留形成煤基质。另有化学性质稳定, 不易被降解的类脂化合物在此强还原条件下保存, 由于水动力条件的加强使多层型树皮体分离形成碎片状树皮体, 并在海水和沼泽的反复交换下富集成煤^[50]。

为了更好地研究鄂尔多斯盆地上古生界煤系形成的时空及岩性差异, 选择乌达剖面进一步探讨其沉积环境及其生源母质对三环萜烷分布模式的影响。石炭系的乌达剖面煤岩和泥岩样品三环萜烷分布模式均为 II 型, 且均分布于泥炭坪相。虽然石炭系样品岩性不同, 但沉积

环境及其生源母质对三环萜烷分布模式的影响有相似性,具体表现在石炭系乌达剖面样品的 $C_{19}TT/C_{23}TT$ 比值介于 0.03~0.11, 平均值为 0.08; $C_{19}-C_{21}TT/C_{23}-C_{25}TT$ 比值介于 0.75~1.02, 平均值为 0.93; Σ 三环萜烷/ $C_{30}H$ 比值介于 3.42~4.99, 平均值为 4.38。根据表征沉积环境的参数诸如 Pr/Ph (比值均小于 1.0)、 $G/C_{30}H$ (比值介于 0.14~0.21)、总硫蒽/总氧蒽 (比值均大于 1.0, 最高达 47.22) 以及生源母质相关参数诸如 ΣC_{27} 规则甾烷/ ΣC_{29} 规则甾烷 (比值介于 0.87~0.99) 和 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ (比值均小于 1.0) (表 3) 揭示研究区石炭系沉积环境为还原—强还原型、微咸水、硫分含量较高, 而生烃母质主要为低等水生生物, 与泥炭坪相特征符合。早二叠世早期, 由于地壳沉降, 来自盆地东西部的海侵进一步向北部及中央隆起侵入, 形成各种海相环境的泥炭坪。到早二叠世山西期, 在大规模海退的背景下, 进入陆相成煤阶段, 以潮控三角洲泥炭坪、瀉湖泥炭坪等为主体的成煤环境逐步被三角洲平原和岸后泥炭沼泽取代^[24,51]。乌达剖面太原组腐殖煤和泥岩样品, 虽均位于潮控三角洲泥炭坪相, 但其三环萜烷分布模式差异迥然, 腐殖煤表现为 I 型, 泥岩表现为 II 型。出现此种现象的原因是腐殖煤和泥岩在沉积时沉积环境的氧化还原性、水体咸度、富硫物质含量以及生烃母质的变化造成三环萜烷分布的差异性。而山西组腐殖煤和泥岩样品均位于岸后泥炭沼泽, 同理因为沉积环境的改变导致其三环萜烷分布差异迥然, 其沉积环境由弱还原—弱氧化型逐渐为偏氧化型, 淡水为主, 氧蒽含量增加, 生源母质以低等水生生物和高等植物混源为主。乌达剖面石炭系至二叠系, 沉积相由泥炭坪相向泥炭沼泽相转化, 在地史时期当地壳抬升或者海退时, 泥炭坪缓慢上升, 水介质或逐渐淡化或高盐度化, 随着陆源物质的堆积, 瀉湖逐渐演变为陆生植物繁衍的泥炭沼泽^[50]。沉积相的转化较好地解释其沉积环境及生源母质的变化, 同时也说明了其是影响三环萜烷分布模式的重要因素。

综上所述, 结合煤系烃源岩时空差异及主要沉积相、沉积环境、生源母质等因素可知鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩三环萜烷分布模式差异性是由于研究区沉积环境及沉积相的改变所造成, 又受到沉积环境对母质类型改造的影响。

表 2 鄂尔多斯盆地上古生界煤系烃源岩不同类型三环萜烷分布模式地质—地球化学参数

Table 2 Geological-geochemical parameters of different types of tricyclic terpane distribution patterns in the Upper Paleozoic coal-measure source rocks in the Ordos Basin

三环萜烷分布模式	主要特征 沉积相	沉积环境	生源母质	三环萜烷分布特征
I 类	泥炭沼泽	Pr/Ph 介于 1.19~3.84, 平均值为 2.99; G/C ₃₀ H 介于 0.02~0.13, 平均值为 0.06; 总硫蒽/总氧蒽介于 0.01~0.94, 平均值为 0.31	ΣC ₂₇ 规则甾烷/ΣC ₂₉ 规则甾烷介于 0.10~0.71, 平均值为 0.43; C ₂₄ 四环萜烷/C ₂₆ TT 介于 2.39~32.54, 平均值为 9.80	C ₁₉ TT/C ₂₃ TT 介于 1.42~14.29, 平均值为 5.78; C ₁₉ ~C ₂₁ TT/C ₂₃ ~C ₂₅ TT 介于 1.97~14.74, 平均值为 5.86; Σ 三环萜烷/C ₃₀ H 介于 0.22~0.34, 平均值为 0.27
II 类	泥炭坪、 泥炭沼泽	Pr/Ph 主体介于 0.34~0.90, 平均值为 0.61; G/C ₃₀ H 介于 0.10~0.23, 平均值为 0.17; 总硫蒽/总氧蒽主体介于 1.22~9.43, 平均值为 3.58	ΣC ₂₇ 规则甾烷/ΣC ₂₉ 规则甾烷介于 0.75~1.32, 平均值为 1.08; C ₂₄ 四环萜烷/C ₂₆ TT 主体介于 0.42~0.77, 平均值为 0.54	C ₁₉ TT/C ₂₃ TT 主体介于 0.03~0.34, 平均值为 0.16; C ₁₉ ~C ₂₁ TT/C ₂₃ ~C ₂₅ TT 主体介于 0.71~1.08, 平均值为 0.94; Σ 三环萜烷/C ₃₀ H 介于 2.65~7.56, 平均值为 3.99
III 类	泥炭坪	Pr/Ph 比值为 2.07; G/C ₃₀ H 比值为 0.13; 总硫蒽/总氧蒽比值为 0.28	ΣC ₂₇ 规则甾烷/ΣC ₂₉ 规则甾烷 比值为 0.48; C ₂₄ 四环萜烷/C ₂₆ TT 比值为 3.53	C ₁₉ TT/C ₂₃ TT 比值为 0.91; C ₁₉ ~C ₂₁ TT/C ₂₃ ~C ₂₅ TT 比值为 1.55; Σ 三环萜烷/C ₃₀ H 比值为 6.20

表 3 乌达剖面不同时代、不同岩性煤系烃源岩分子化合物参数

Table 3 Molecular compound parameters of coal-measure source rocks with different ages and lithology in the Wuda section

三环萜烷分布模式	样品	层位	沉积相	岩性	C ₁₉ TT/ C ₂₃ TT	C ₁₉ ~C ₂₁ TT/ C ₂₃ ~C ₂₅ TT	Σ 三环萜烷/C ₃₀ H	Pr/Ph	G/C ₃₀ H	总硫蒽/总氧蒽	ΣC ₂₇ 规则甾烷/ ΣC ₂₉ 规则甾烷	C ₂₄ TeT/C ₂₆ TT
I 类	WD-1	P _{1s}	岸后泥炭沼泽	煤	8.16	9.06	0.28	3.84	0.02	0.01	0.10	32.54
II 类	WD-3	P _{1s}	岸后泥炭沼泽	泥岩	0.55	1.43	2.99	0.71	0.16	0.04	0.86	2.34
I 类	WD-2	P _{1t}	潮控三角洲泥炭坪	煤	5.56	5.82	9.7	1.19	0.13	0.94	0.40	2.60
II 类	WD-4	P _{1t}	潮控三角洲泥炭坪	泥岩	0.21	1.16	4.25	1.13	0.16	1.43	1.09	0.55
II 类	WD-5	C _{2y}	瀉湖泥炭坪	泥岩	0.09	1.01	4.64	0.9	0.14	1.39	0.87	0.51
II 类	WD-6	C _{2y}	瀉湖泥炭坪	煤	0.10	0.94	3.42	0.9	0.16	1.24	0.99	0.50
II 类	WD-7	C _{2j}	潮坪泥炭坪	泥岩	0.11	1.02	4.47	0.63	0.19	47.22	0.99	0.51
II 类	WD-8	C _{2j}	潮坪泥炭坪	煤	0.03	0.75	4.99	0.34	0.21	8.80	0.99	0.51

3 结论

(1) 厘定了鄂尔多斯上古生界煤系烃源岩三环萜烷的分布特征, 提出了三环萜烷存在三种分布模式, 且不同的三环萜烷分布模式差异性明显。

(2) 系统剖析了成熟度与三环萜烷分布模式的相关关系, 研究发现尽管三环萜烷总量受成熟度的影响, 但是研究区煤系烃源岩中三环萜烷的分布模式基本不受成熟度的影响。

(3) I类煤岩和炭质泥岩为偏氧化型的沉积环境, 表现在其 Pr/Ph 值较高、G/C₃₀H 比值较低、C₂₄ 四环萜烷含量异常丰富、C₂₉ 规则甾烷相对含量较高, 明显与陆源高等植物输入有关; II类煤系烃源岩三环萜烷分布特征正好与 I类煤岩和炭质泥岩相反; III类炭质泥岩三环萜烷分布特征处于 I类和 II类煤系烃源岩之间。

(4) 导致 II类煤系烃源岩的三环萜烷分布模式形成的主要原因是, 这类煤系烃源岩在沉积后将受到海水的作用使其沉积环境变得较为还原环境, 成烃母质主要为低等水生生物和高等植物经微生物改造后的菌藻类成烃, 这与 I类煤系烃源岩以原始陆源高等植物为生烃母质形成的三环萜烷差异迥然。

致谢 在成文过程中, 审稿专家们和编辑在文章的内容、结构、讨论等方面做出了耐心地修改与补充, 并提出了建设性的意见, 在此一并表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] 李劭杰. 南海北部盆地煤系烃源岩形成模式研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. [Li Shaojie. Study on the Formation modes of coal-measure source rocks in the northern basins of South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.]
- [2] Xu Y C, Shen P. A study of natural gas origins in China[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(10): 1604-1614.
- [3] Huang S P, Liao F R, Wu X Q. Geochemical characteristics of Carboniferous-Permian coal-formed gas in Bohai Bay Basin[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2010, 28(1): 13-24.
- [4] 李剑, 姜正龙, 罗霞, 等. 准噶尔盆地煤系烃源岩及煤成气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 365-374. [Li Jian, Jiang Zhenglong, Luo Xia, et al. Geochemical characteristics of coal-measure source rocks and coal-derived gas in Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 365-374.]
- [5] 李剑, 郝爱胜, 齐雪宁, 等. 中国西北地区侏罗系煤成气地球化学特征与勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(6): 866-879, 924. [Li Jian, Hao Aisheng, Qi Xuening, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of Jurassic coal-formed gas in Northwest China[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(6): 866-879, 924.]
- [6] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990. [Fu Jiamo, Liu Dehan, Sheng Guoying. Coal-derived hydrocarbon geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1990.]
- [7] 程克明. 吐哈盆地油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. [Cheng Keming. Petroleum generation in Tuha Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.]
- [8] 李素梅, 王铁冠, 郑红菊, 等. 柏各庄凸起侏罗系烃源岩地球化学特征[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 182-186. [Li Sumei, Wang Tieguan, Zheng Hongju, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic hydrocarbon source rocks in the Baigezhuang Uplift[J]. Experimental Petroleum Geology, 1998, 20(2): 182-186.]
- [9] 陈建平, 赵长毅, 王兆云, 等. 西北地区侏罗纪煤系烃源岩和油气地球化学特征[J]. 地质论评, 1998, 44(2): 149-159. [Chen

- Jianping, Zhao Changyi, Wang Zhaoyun, et al. Organic geochemical characteristics of oil, gas and source rocks of Jurassic coal measures in northwestern China[J]. Geological Review, 1998, 44(2): 149-159.]
- [10] Cheng Q S, Zhang M, Huang G H, et al. The contribution of bacteria to organic matter in coal-measure source rocks[J]. Acta Geochimica, 2019, 38(3): 364-375.
- [11] Cheng Q S, Huang G H, Zhang M, et al. Distribution and source significance of 2-methylalkanes in coal-measure source rocks, Northwest China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 174: 257-267.
- [12] 朱翠山, 郭稚弧, 包建平, 等. 三塘湖盆地煤成油地球化学特征[J]. 江汉石油学院学报, 2001, 23 (1): 9-13. [Zhu Cuishan, Guo Zhihu, Bao Jianping, et al. Geochemical characteristics of coal-derived oil in Santanghu Basin[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2001, 23(1): 9-13.]
- [13] Meng J H, Zhang M, Zhao H J, et al. Geochemical evidence for coal and carbonaceous mudstone as the possible major oil source rock in the Jurassic Turpan Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2012, 86(5): 1171-1181.
- [14] 刘池洋, 赵红格, 谭成仟, 等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏(矿)系统[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (2): 131-142. [Liu Chiyang, Zhao Hongge, Tan Chengqian, et al. Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization/reservoiring system in the Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(2): 131-142.]
- [15] 敖卫华, 黄文辉, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地北部煤系有机显微组分特征与生烃潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41 (增刊1): 91-97. [Ao Weihua, Huang Wenhui, Yao Yanbin. Macerals' characteristics and hydrocarbon generation potential of coal-bearing series in the northern Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(Suppl.1): 91-97.]
- [16] 翁凯, 李鑫, 李荣西, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界烃源岩评价及有利区预测[J]. 特种油气藏, 2012, 19 (5): 21-25. [Weng Kai, Li Xin, Li Rongxi, et al. Evaluation of Upper Paleozoic source rocks and favorable region prediction in the southeast of Ordos Basin[J]. Special Oil Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 21-25.]
- [17] 王明健, 孟祥君, 陈晔, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界烃源岩地球化学特征[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32 (9): 26-31. [Wang Mingjian, Meng Xiangjun, Chen Xi, et al. Geochemistry and evaluation of Upper Paleozoic source rock on Yimeng Uplift, Ordos Basin[J]. Marine Geological Frontiers, 2016, 32(9): 26-31.]
- [18] 戴金星, 李剑, 罗霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J]. 石油学报, 2005, 26 (1): 18-26. [Dai Jinxing, Li Jian, Luo Xia, et al. Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 18-26.]
- [19] 李贤庆, 胡国艺, 李剑, 等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界天然气地球化学特征[J]. 石油天然气学报, 2008, 30 (4): 1-4. [Li Xianqing, Hu Guoyi, Li Jian, et al. The geochemical characteristics of Upper Paleozoic natural gases in the central and eastern parts of the Ordos Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008, 30(4): 1-4.]
- [20] 朱扬明. 塔里木盆地陆相原油的地球化学特征[J]. 沉积学报, 1997, 15(2): 26-30. [Zhu Yangming. Geochemical characteristics of terrestrial oils of the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(2): 26-30.]
- [21] 朱扬明, 梅博文, 金迪威. 塔里木盆地中生界煤层的地球化学特征[J]. 新疆石油地质, 1998, 19 (1): 27-31. [Zhu Yangming, Mei Bowen, Jin Diwei. Geochemical characteristics of Mesozoic coal seam in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1998, 19(1): 27-31.]
- [22] 张渝昌. 中国含油气盆地原型分析[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997. [Zhang Yuchang. Prototype analysis of petroliferous basins in China[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1997.]
- [23] 陈洪德, 侯中健, 田景春, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学与盆地构造演化研究[J]. 矿物岩石, 2001, 21 (3): 16-22. [Chen Hongde, Hou Zhongjian, Tian Jingchun, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectono-sedimentary evolution in Ordos Basin during Late Palaeozoic[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 16-22.]
- [24] 陈全红, 李文厚, 郭艳琴, 等. 鄂尔多斯盆地早二叠世聚煤环境与成煤模式分析[J]. 沉积学报, 2009, 27 (1): 70-76. [Chen Quanhong, Li Wenhui, Guo Yanqin, et al. The analysis of coal accumulating environment and coal forming models in early Permian, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 70-76.]
- [25] 陈洪德, 李洁, 张成弓, 等. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示[J]. 岩石学报, 2011, 27 (8): 2213-2229. [Chen Hongde, Li Jie, Zhang Chengong, et al. Discussion of sedimentary environment and its geological enlightenment of Shanxi

- Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2213-2229.]
- [26] 陈小慧. 松辽盆地南部梨树断陷深层油气成因与成藏研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012. [Chen Xiaohui. Study on the origin and accumulation of deep oil and gas in Lishu fault Depression in southern Song-Liao Basin[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.]
- [27] Tuo J C, Wang X B, Chen J F. Distribution and evolution of tricyclic terpanes in lacustrine carbonates[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(11): 1429-1435.
- [28] Aquino Neto F R, Trendel J M, Restle A, et al. Occurrence and Formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum[M]//Bjorøy M. *Advances in organic geochemistry 1981*. Chichester: Wiley Heyden, 1983.
- [29] 陈哲龙, 柳广弟, 卫延召, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38 (2): 311-322. [Chen Zhelong, Liu Guangdi, Wei Yanzhao, et al. Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(2): 311-322.]
- [30] 肖洪, 李美俊, 杨哲, 等. 不同环境烃源岩和原油中 C₁₉-C₂₃ 三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J]. *地球化学*, 2019, 48 (2): 161-170. [Xiao Hong, Li Meijun, Yang Zhe, et al. Distribution patterns and geochemical implications of C₁₉-C₂₃ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environment[J]. *Geochemistry*, 2019, 48(2): 161-170.]
- [31] 张敏, 项威, 张文俊, 等. 库车坳陷侏罗系腐殖煤三环萜烷异常分布原因探究[J/OL]. *长江大学学报 (自然科学版)*. <https://doi.org/10.16772/j.cnki.1673-1409.20230307.002>. [Zhang Min, Xiang Wei, Zhang Wenjun, et al. Study on the reasons for the abnormal distribution of Jurassic humic coal tricyclic terpanes in Kuqa Depression[J/OL]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*. <https://doi.org/10.16772/j.cnki.1673-1409.20230307.002>.]
- [32] 金洪蕊. 济阳坳陷车镇凹陷原油类型及其地球化学特征[J]. *四川地质学报*, 2021, 41 (3): 421-424. [Jin Hongrui. Types and their geochemical characteristics of crude oil in the Chezhen Sag, Jiyang Depression[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2021, 41(3): 421-424.]
- [33] Connan J, Cassou A M. Properties of gases and petroleum liquids derived from terrestrial Kerogen at various maturation levels[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(1): 1-23.
- [34] 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南: 古代沉积物和石油中分子化石的解释[M]. 姜乃煌, 译. 北京: 石油工业出版社, 1995. [Peters K E, Moldowan J M. *The biomarker guide*[M]. Jiang Naihuang, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995.]
- [35] 姜乃煌, 黄第藩, 宋浮庆, 等. 不同沉积环境地层中的芳烃分布特征[J]. *石油学报*, 1994, 15 (3): 42-50. [Jiang Naihuang, Huang Difan, Song Fuqing, et al. Distribution characteristics of aromatics in formations under different sedimentary environments[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 15(3): 42-50.]
- [36] Moldowan J M, Albrecht P, Philp R P. Biological markers in sediments and petroleum[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.
- [37] Hughes W B, Holba A G, Dzou L I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3581-3598.
- [38] 孟江辉, 刘洛夫, 张敏, 等. 原油芳烃的沉积环境指示作用[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40 (6): 901-907. [Meng Jianghui, Liu Luofu, Zhang Min, et al. Indicative function of aromatic hydrocarbon in crude oil on depositional environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(6): 901-907.]
- [39] Radke M, Vriend S P, Ramanampisoa L R. Alkyldibenzofurans in terrestrial rocks: Influence of organic facies and maturation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(2): 275-286.
- [40] 张敏, 黄光辉, 李洪波, 等. 四川盆地上三叠统须家河组气源岩分子地球化学特征: 海侵事件的证据[J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2013, 43 (1): 72-80. [Zhang Min, Huang Guanghui, Li Hongbo, et al. Molecular geochemical characteristics of gas source rocks from the Upper Triassic Xujiahe Formation indicate transgression events in the Sichuan Basin[J]. *Science China (Series D): Earth Sciences*, 2013, 43(1): 72-80.]
- [41] 孟仟祥, 房嫒, 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[J]. *沉积学报*, 2004, 22 (4): 729-736. [Meng Qianxiang, Fang Xuan, Xu Yongchang, et al. Biomarkers and geochemical significance of Carboniferous

- source rocks and coals from Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 729-736.]
- [42] Moldowan J M, Sundararaman P, Schoell M. Sensitivity of biomarker properties to depositional environment and/or source input in the Lower Toarcian of SW-Germany[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(4/5/6): 915-926.
- [43] 马立元, 尹航, 陈纯芳, 等. 鄂尔多斯盆地红河油田原油地球化学特征及油源分析[J]. *沉积学报*, 2015, 33(2): 416-425. [Ma Liyuan, Yin Hang, Chen Chunfang, et al. Research of geochemistry characteristics and source of crude oils from the Honghe oilfield in the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(2): 416-425.]
- [44] 吉利明, 梁晓飞, 贺聪, 等. 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[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, 37(1): 76-84. [Ji Liming, Liang Xiaofei, He Cong, et al. Distribution of bicyclic alkanes of source rocks of Yanchang Formation in Xifeng area of Ordos Basin and their biological sources[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, 37(1): 76-84.]
- [45] 包建平, 朱翠山, 倪春华. 北部湾盆地不同凹陷原油生物标志物分布与组成特征[J]. *沉积学报*, 2007, 25(4): 646-652. [Bao Jianping, Zhu Cuishan, Ni Chunhua. Distribution and composition of biomarkers in crude oils from different sags of Beibuwan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4): 646-652.]
- [46] Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [47] 刘焕杰, 桑树勋, 郭英海, 等. 我国含煤沉积学若干问题及展望[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 129-132. [Liu Huanjie, Sang Shuxun, Guo Yinghai, et al. Some problems and prospect for China on coal-bearing sedimentology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 129-132.]
- [48] 桑树勋, 陈世悦, 刘焕杰. 华北晚古生代成煤环境与成煤模式多样性研究[J]. *地质科学*, 2001, 36(2): 212-221. [Sang Shuxun, Chen Shuyue, Liu Huanjie. Study on diversity of Late Paleozoic coal-forming environments and models in North China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(2): 212-221.]
- [49] 刘焕杰. 潮坪成煤环境初论—三汇坝地区晚二叠世龙潭组含煤建造沉积环境模式[J]. *中国矿业学院学报*, 1982(2): 66-71. [Liu Huanjie. A preliminary study of coal-forming environment of Tidal Flats-models of sedimentary environment of Upper Permian coal-bearing Longtan Formation in Sanhuiba[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1982(2): 66-71.]
- [50] 陈其爽, 陈能贵. 中国南方晚二叠世乐平煤的成因及成煤物质[J]. *海相油气地质*, 1996, 1(2): 29-33. [Chen Qishi, Chen Nenggui. Origin and precursors of Late Permian Leping coal in southern China[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 1996, 1(2): 29-33.]
- [51] 展翅飞, 黄光辉, 展宏图, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界煤系环境研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2014, 11(2): 24-26. [Zhan Chifei, Huang Guanghui, Zhan Hongtu, et al. Research of Upper Paleozoic coal measure environment of eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2014, 11(2): 24-26.]

Origin of Tricyclic Terpane in the Upper Paleozoic Coal-measure Source Rocks in the Ordos Basin

LIN ShuMin^{1,2}, ZHANG Min^{1,2}, LI HongBo^{1,2}

1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment (School of Resources and Environment, Yangtze University), Wuhan 430100, China

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan 430100, China

Abstract: [Objective] Coal-measure source rocks in Ordos Basin are developed, and the content of tricyclic terpane in saturated hydrocarbons is rich. However, the distribution patterns of tricyclic terpane show important differences in the study area. Therefore, it is of great significance to explore the main controlling factors for these

differences. **[Methods]** Saturated hydrocarbons of 26 coal-measure source rock samples in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin were analyzed in detail by gas chromatography and chromatography–mass spectrometry. **[Results and Discussions]** According to the distribution characteristics of tricyclic terpanes (TTs), the source rock samples in the study area were divided into three types of distribution patterns. The C_{19} TT is the main peak of the type I source rock, and the content of C_{19} TT, C_{20} TT and C_{21} TT gradually decreases. At the same time, the Pr/Ph ratio is high, and the ratio distribution range is between 1.19 and 3.84, with an average value of 2.99. The content of C_{24} tetracyclic terpane is also rich in this type of sample. The ratio distribution range of C_{24} tetracyclic terpane/ C_{26} tricyclic terpane is between 2.39 and 32.54, with an average value of 9.80. Both C_{28} tricyclic terpane and C_{29} tricyclic terpane are absent. This kind of sample is mainly humic coal and carbonaceous mudstone, revealing the characteristics of a lacustrine facies sedimentary environment. By contrast, the tricyclic terpanes of type II source rocks are dominated by C_{23} TT, and the content of C_{19} TT, C_{20} TT and C_{21} TT gradually increases, whereas the Pr/Ph ratio is low and the ratio distribution range is mainly within the range of 0.34 and 0.90, with an average value of 0.61. The content of C_{24} tetracyclic terpane is not abundant, and the ratio distribution range of C_{24} tetracyclic terpane/ C_{26} tricyclic terpane is mainly between 0.42 and 0.77, with an average value of 0.54. Both the C_{28} tricyclic terpane and C_{29} tricyclic terpane are abundant. In addition to coal-measure mudstone, humic coal and carbonaceous mudstone are present in these samples, and their sedimentary environment is quite different from that of type I source rocks. The distribution of tricyclic terpanes in type III source rocks is in the middle of the type I and type II source rocks. The main peak carbon of tricyclic terpane is C_{23} TT, whereas the relative content of C_{19} TT, C_{20} TT and C_{21} TT decreases in turn with a stepwise distribution. In addition, the Pr/Ph ratio is 2.07 and the C_{24} tetracyclic terpane/ C_{26} tricyclic terpane is 3.53, both of which are between the type I and type II source rocks. **[Conclusions]** The results reveal that with an increase of the thermal evolution degree of source rocks, the total amount of tricyclic terpanes shows a gradually increasing trend, although the distribution patterns of tricyclic terpanes in different types of source rocks have not changed significantly. To put it another way, the different distribution patterns of tricyclic terpanes in coal-measure source rocks in the study area are less affected by the thermal evolution degree of organic matter. Rather, they are mainly controlled by the sedimentary environment and parent material type.

Key words: tricyclic terpanes; main controlling factors; sedimentary environment; coal-measure source rock; Ordos Basin