

文章编号:1000-0550(2025)04-1371-15

三塘湖盆地马朗凹陷芦草沟组烃源岩 β -胡萝卜素富集主控因素

甘应星¹,赵红静¹,王志勇²,金颖²,温旺彪¹,王杰²,刘锋²,王晓华²,徐桂芳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. 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院,新疆哈密 650500

摘要 【目的】二叠系芦草沟组二段系三塘湖盆地马朗凹陷主力烃源岩,具有高丰度的 β -胡萝卜素,但其含量在段内表现出较大的差异性。为进一步明确马朗凹陷芦二段 β -胡萝卜素的变化特征,进而探讨其富集的主控因素。【方法】基于气相色谱-质谱、总有机碳、岩石热解、镜质体反射率及微量元素分析等技术,对三塘湖盆地马朗凹陷芦页1井芦草沟组二段46件烃源岩样品进行分析,详细表征其地球化学特征。【结果】根据 β -胡萝卜素指数,纵向上将所考察的烃源岩自下而上分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ组,其中 β -胡萝卜素指数在Ⅰ组中相对最低,在Ⅱ组自下而上逐渐上升,而Ⅲ组中 β -胡萝卜素指数起伏较大;平面上靠近西南逆冲推覆带有两个高值中心。 β -胡萝卜素的相对含量在研究区是反映烃源岩品质的有效指标;马朗凹陷芦二段烃源岩有机质来源整体上以低等水生生物为主,但与Ⅰ组相比,Ⅱ和Ⅲ组有着更加丰富的原核生物供应,甾烷/藿烷、 C_{28} 甾烷/ C_{29} 甾烷和 $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ 等参数表明Ⅱ和Ⅲ组中 β -胡萝卜素与细菌以及具有植醇侧链的叶绿素a、b、c的藻类具有较强的亲缘性;通过 Pr/Ph 、 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷、长链三环萜烷比值(ETR)等参数判断出Ⅱ和Ⅲ组烃源岩沉积期水体盐度高,主要为还原环境,相较于Ⅰ组沉积时的还原至弱氧化-弱还原的环境以及水体盐度相对较低的条件更有利于 β -胡萝卜素的保存;同时Ⅲ组烃源岩沉积时期经历过一定强度的热液活动,导致 β -胡萝卜素含量波动较大。【结论】马朗凹陷芦二段 β -胡萝卜素的富集主要受到有机质来源与沉积环境的双重控制。

关键词 β -胡萝卜素;原核生物;咸水沉积;热液活动;芦草沟组;马朗凹陷

第一作者简介 甘应星,男,1999年出生,硕士研究生,油气地球化学,E-mail: ganyingxing@foxmail.com

通信作者 赵红静,女,教授,油气地球化学,E-mail: zhaohjd@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.100

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.100

0 引言

生物圈普遍存在四萜类(C_{40})类胡萝卜素种类的色素^[1-2]。由于其高度不饱和的化学结构,大多数类胡萝卜素易被氧化,在沉积物中很难被检测出来^[3],因此沉积物中的类胡萝卜素通常是饱和的同系物,如 β -胡萝卜素^[4]。 β -胡萝卜素最早在美国科罗拉多始新世绿河组页岩中被检测出来^[5-6],此外在克拉玛依原油的石炭系烃源岩^[4]、准噶尔盆地二叠统湖相油页岩^[7-8]、巴西含盐—高盐的局限性盆地地层^[9]等均检测出丰富的 β -胡萝卜素。甚至在某些情况下,沉积物中 β -胡萝卜素含量比正构烷烃、类异戊二烯烷烃

或其他饱和烃化合物更丰富,如中国准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组、风城组^[10-12]。

β -胡萝卜素是由类胡萝卜素结构的色素衍生而来的饱和烃,主要由 β -胡萝卜素在成岩阶段通过共轭双键的还原形成 β -胡萝卜素^[13],具有很高的易变性和易氧化性^[14]。 β -胡萝卜素只有在弱光、碱性、还原以及低温的条件下才能转化为 β -胡萝卜素,同时该反应还需要大量氢原子的加入^[15-16]。因其对氧化环境的敏感性和在沉积物中的低保存潜能,使得 β -胡萝卜素被广泛接受为指示缺氧、盐湖相^[17-18]或高局限性海相环境^[19]的指标。然而,南襄盆地泌阳凹陷烃源岩地球化学特征研究表明,有机质积累过程中 β -胡

收稿日期:2023-08-21;修回日期:2023-09-25;录用日期:2023-11-27;网络出版日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41302121,42072165)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41302121, 42072165]

萝卜烷浓度与沉积环境盐度不存在明确的相关性,认为 β -胡萝卜烷可能指示沉积环境中有机质来源^[20]。 β -胡萝卜素广泛分布于藻类、细菌和高等植物中,母质来源十分广泛^[21-22]。Jiang *et al.*^[4]认为 β -胡萝卜烷可以通过热降解转化为低分子量的同系物,其相对丰度可以作为热演化的有效指标。前人对准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩研究后认为 β -胡萝卜烷的形成和聚集受其前身物和沉积环境的影响,而不是受热成熟度的控制,并提出以蓝藻而非陆源有机质作为 β -胡萝卜烷的主要来源^[14,23]。此外,沉积环境中热液活动也可以破坏 β -胡萝卜素的保存,导致 β -胡萝卜烷含量显著降低^[15]。 β -胡萝卜烷的相对丰度也可用于烃源岩地球化学特征及油源对比,且已有较为成功的应用^[24-26]。

三塘湖盆地马朗凹陷二叠统芦草沟组烃源岩中检测到丰富的 β -胡萝卜烷,虽已得到应用,但其分布的非均质性和富集主控因素并未得到重视。本研究基于烃源岩有机地球化学特征及微量元素组成等方法来探讨马朗凹陷芦草沟组二段高含量 β -胡萝卜烷的主控因素,以期更好地辅助油源对比及油气勘探。

1 地质概况

三塘湖盆地是一个位于中国西北部呈北西—南东向展布的狭长盆地,东北部与蒙古国接壤,西部与准噶尔盆地相邻,南部与吐哈盆地隔山相望,面积约

$2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,是新疆维吾尔自治区重要的含油气盆地之一。可划分为三个构造单元:东北冲断隆起带、中央拗陷带和西南逆冲推覆带,中央拗陷带又可以继续划分为5个凹陷和4个凸起(图1a),盆地地层间存在多个区域性不整合^[28-29]。研究区马朗凹陷位于三塘湖盆地中央拗陷带的中东南部,与岔哈泉凸起和方方梁凸起毗邻,面积约为1400 km^2 ^[25]。芦草沟组自下至上可划分为芦一段、芦二段和芦三段,其中芦二段为火山灰与碳酸盐岩频繁的薄互层沉积,有机质丰度较高,既是良好的烃源岩,又是良好的储集层^[30](图1b)。受周缘火山活动的影响,三塘湖盆地芦草沟组沉积地层中的细粒沉积物以火山灰和碳酸盐岩为主^[31]。

2 实验分析与样品

本次研究样品取自马朗凹陷芦页1井(图1a),岩性为深灰色泥岩、泥质白云岩和深灰色凝灰质泥岩。对所有岩心样品进行了岩石热解(Rock-Eval)、总有机碳(TOC)和饱和烃气相色谱—质谱(GC-MS)分析,部分样品进行了微量元素含量检测。

TOC由碳硫分析仪测得,岩石热解实验参数 S_1 、 S_2 和 $T_{\max}$ 由OGE-VI油气评价工作站测定。经索氏抽提和硅胶/氧化铝柱层析得到饱和烃组分,GC-MS分析在Agilent 6890/5975 BMSD色谱/质谱联用仪上进行,所用色谱柱为HP-5MS(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)石英毛细管柱;升温程序:50 $^{\circ}\text{C}$ 恒温2 min,

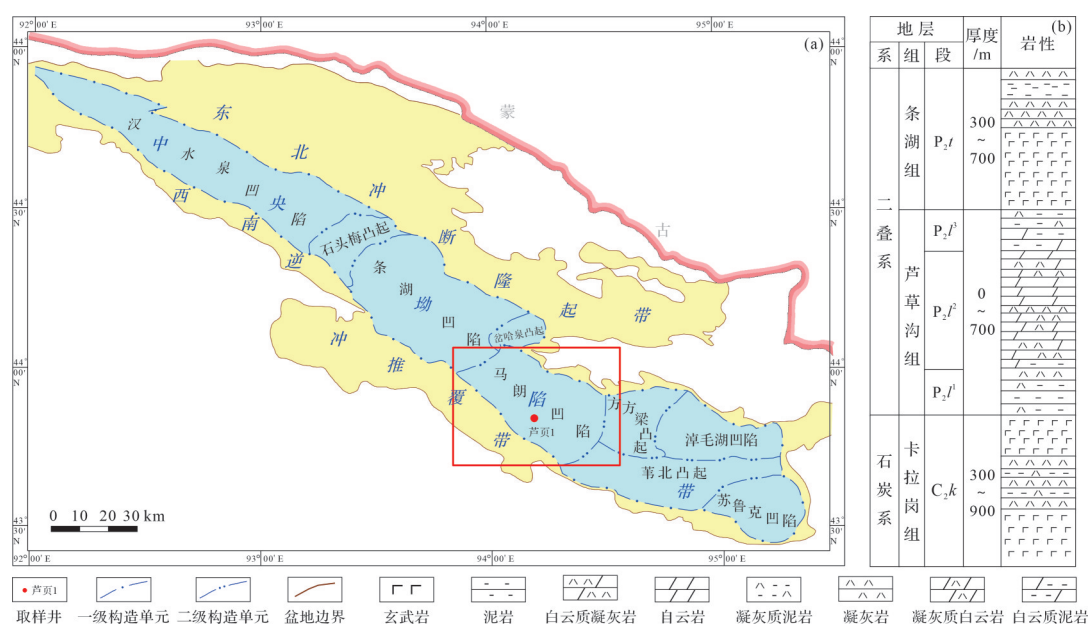


图1 三塘湖盆地区域构造分布(a)及岩性地层综合柱状图(b)(据文献[27]修改)

Fig.1 Regional structural distribution (a) and stratigraphic column (b) of Santanghu Basin (modified from reference [27])

以20 °C/min从50 °C升至100 °C,后以3 °C/min从100 °C升至315 °C,315 °C恒温16 min。进样口和离子源温度分别为300 °C和230 °C,载气为氦气,流速为1.04 mL/min,扫描范围为50~580 amu。检测方式为全扫描加多离子检测(MID),电离能量为70 eV。以上实验均在长江大学资源与环境学院油气地球化学与环境湖北省重点实验室完成,且各项测试分析均按照国家标准进行操作。部分TOC和岩石热解参数资料来自中石油吐哈油田分公司。

3 结果与讨论

3.1 胡萝卜素分布

β -胡萝卜素与 γ -胡萝卜素一般以共生状态存在,

都具有 C_{40} 类胡萝卜素结构和特征离子峰 m/z 125,不同的是 β -胡萝卜素有2个四烷基取代的环己烷,而 γ -胡萝卜素只有1个^[32]。 β -胡萝卜素的前身物很可能是由藻类、光合细菌或高等植物合成的类胡萝卜素^[21],类胡萝卜素来源广泛,在自然界中广泛分布。 β -胡萝卜素属于类胡萝卜素的类群,在成岩阶段通过共轭双键的还原形成 β -胡萝卜素^[23]。在研究 β -胡萝卜素时,一般利用 β -胡萝卜素指数来判断其丰度,即 β -胡萝卜素/ nC_{max} (nC_{max} 为正构烷烃主峰碳)^[14-15,23,26]。

3.1.1 纵向分布特征

高丰度的 β -胡萝卜素和 γ -胡萝卜素在三塘湖盆地马朗凹陷芦二段饱和烃馏分的总离子图(TIC)上清晰可见, β -胡萝卜素指数变化范围很广,介于0.05~3.76,平均为1.34(图2,3、表1)。结合TOC含

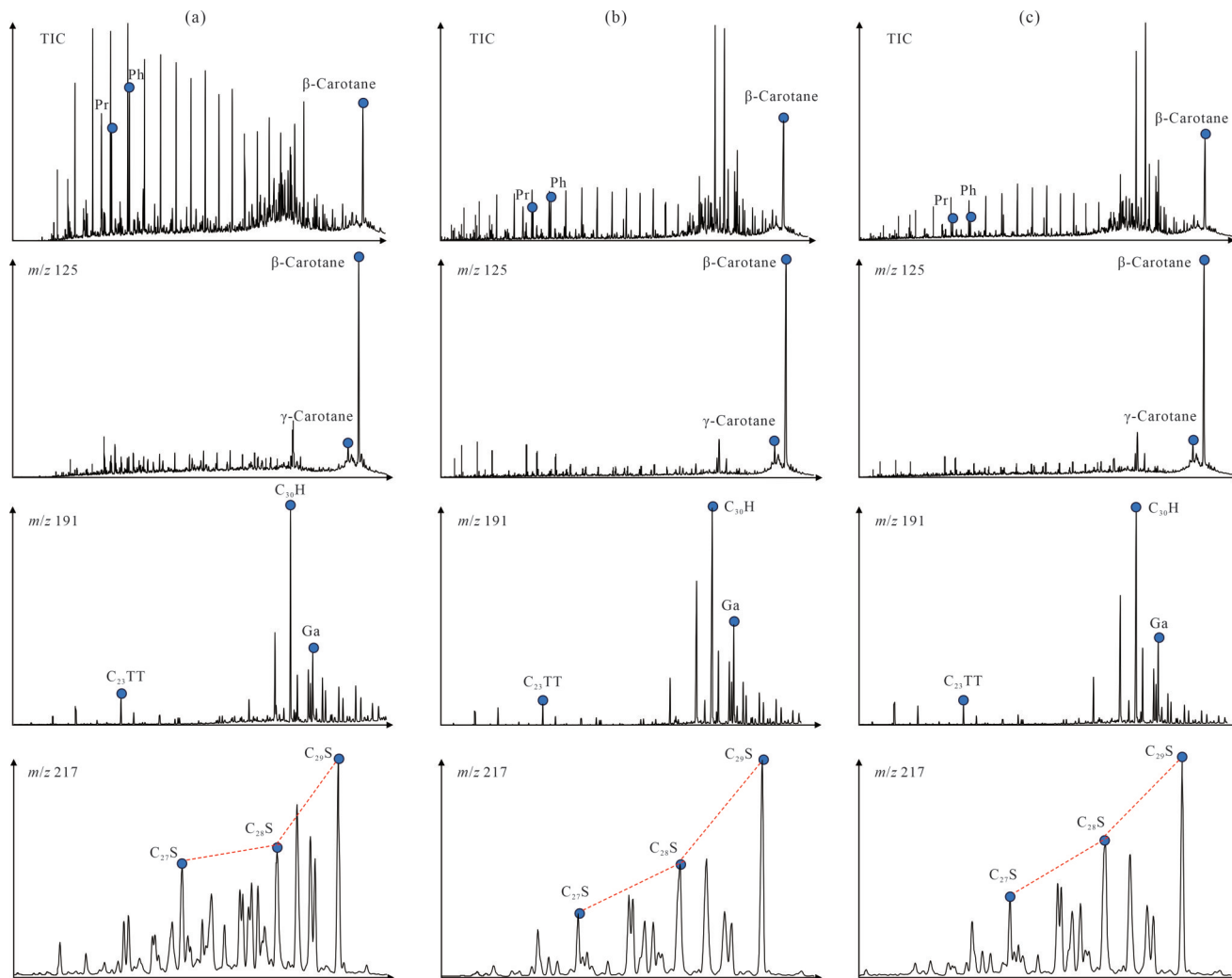


图2 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩饱和烃总面貌、胡萝卜素、萜烷和甾烷类化合物质量色谱图

(a) I组,3391.87 m,凝灰质泥岩;(b) II组,3317.63 m,白云质泥岩;(c) III组,3270.54 m,凝灰质泥岩

Fig.2 Mass chromatogram of total saturated hydrocarbons, carotenes, terpanes, and steranes in source rocks of the second member of the Permian Lucaogou Formation (P_2l^2) in Malang Sag

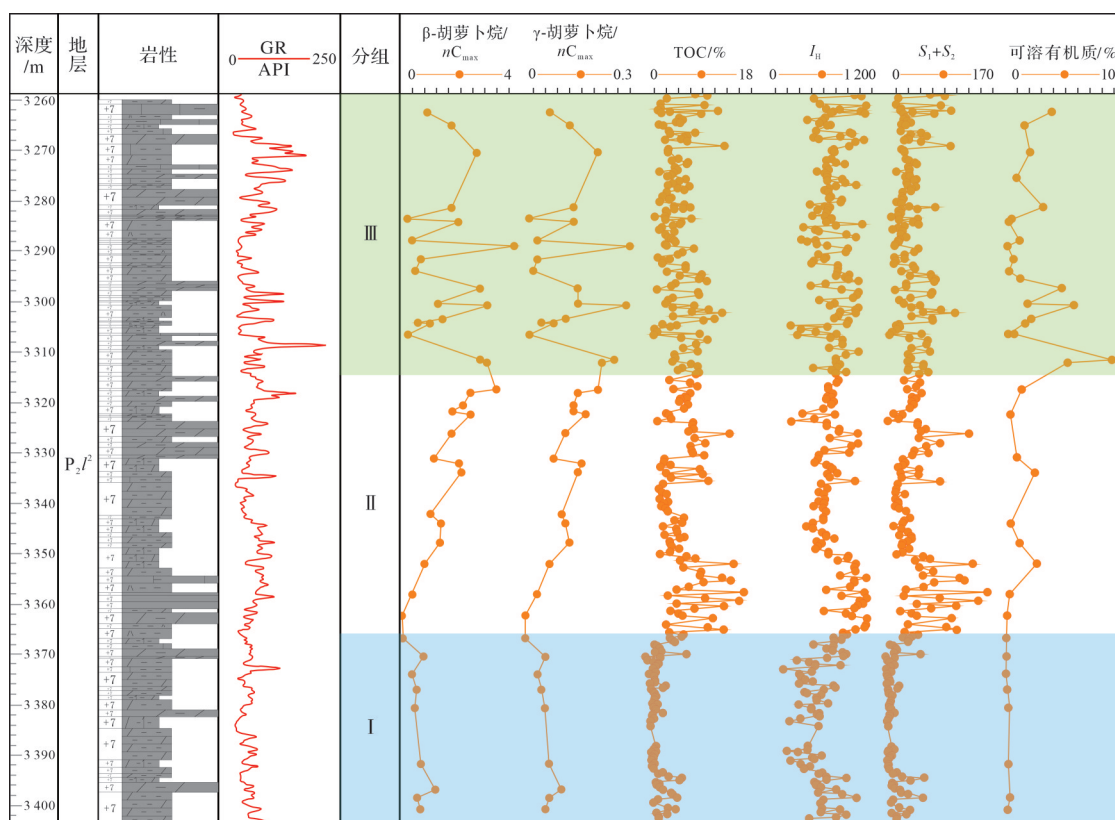


图3 马朗凹陷芦页1井芦草沟组二段烃源岩胡萝卜烷指数、TOC值以及岩石热解参数分布特征
Fig.3 Distribution of carotane index, total organic carbon (TOC), and rock pyrolysis parameters of source rocks in P_2I^2 of well Luye1, Malang Sag

量,纵向上自下而上可分为3组。第一组埋深介于3 367.03~3 400.95 m,β-胡萝卜素含量最低,β-胡萝卜素指数介于0.09~0.77,平均为0.52(I组,图2a、图3、表1);第二组样品埋深介于3 317.63~3 362.55 m,β-胡萝卜素指数介于0.05~3.13,自下而上持续增加(Ⅱ组,图2b、图3、表1);第三组埋深3 262.60~3 312.31 m,β-胡萝卜素含量高且变化幅度大,β-胡萝卜素指数在0.25~3.76之间波动(Ⅲ组,图2c、图3、表1)。γ-胡萝卜素含量和β-胡萝卜素含量之间具有非常好的正相关关系(图4a),表明这两种化合物的来源及演化途径可能相同。

通过岩石热解、TOC等分析发现,以最低丰度β-胡萝卜素为主要特征的Ⅰ组沉积物中TOC、生烃潜量(S_1+S_2)与可溶性有机质含量较Ⅱ组和Ⅲ组最低(图3)。Ⅱ组与Ⅲ组烃源岩有机质丰度整体上优于Ⅰ组烃源岩(图4b),Ⅱ组与Ⅲ组烃源岩TOC分布范围分别介于3.6%~8.1%(平均值为5.3%),1.5%~7.7%(平均值为4.5%);生烃潜量介于23.2~56.2 mg/g(平均值为37.8 mg/g),9.8~53.3 mg/g(平均值为31.4 mg/g),烃源岩等级评价为好—优质;而Ⅰ组烃源岩TOC介于

0.5%~3.6%,平均为1.7%,生烃潜量分布范围介于2.0~22.1 mg/g,平均为9.1 mg/g,烃源岩等级评价主要为较好,烃源岩品质较Ⅱ组和Ⅲ组稍差。研究区芦二段烃源岩β-胡萝卜素指数与TOC和生烃潜量呈正相关性(图4c,d),可能表明β-胡萝卜素的相对含量在研究区是反映烃源岩品质的有效指标。

3.1.2 平面分布特征

芦草沟组是三塘湖盆地主力烃源岩之一,主要分布于马朗凹陷和条湖凹陷,最大厚度位于马朗凹陷,该地层在盆地北部发育不全,向南厚度呈增加趋势。芦草沟组沉积早期及晚期湖盆范围和湖盆中心有所不同,纵向上分为三段,一段沉积期湖盆范围很广,湖泊呈一喇叭状向东开口。芦草沟组二、三段湖盆范围进一步扩大,条湖—马朗凹陷基本上全为湖泊相。研究表明,马朗凹陷芦二段烃源岩β-胡萝卜素平面分布有两个高值中心,均靠近西南逆冲推覆带,研究区东北部β-胡萝卜素指数较低,西南部较高;β-胡萝卜素含量总体呈现出以两个高值区为中心向周围逐渐降低的趋势(图5)。

表1 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩有机地球化学参数

Table 1 Organic geochemical parameters of source rocks from P₂^f in Malang Sag

β -胡萝卜素/ $nC_{\max}$		γ -胡萝卜素/ $nC_{\max}$	$C_{30}\beta\alpha H/C_{30}\alpha\beta H$	$C_{31}22S/(22S+22R)$	$C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S$ /(20S+20R)	$C_{29}\alpha\beta\beta$ /($\alpha\alpha\alpha+\alpha\beta\beta$)	$(nC_{21}+nC_{22})$ /($nC_{28}+nC_{29}$)	
P_2I^2	Ⅲ	0.25~3.76	0.02~0.27	0.22~0.29	0.57~0.60	0.43~0.46	0.26~0.34	2.56~5.99
		1.54(19)	0.12(19)	0.25(19)	0.58(19)	0.45(19)	0.30(19)	3.63(19)
	Ⅱ	0.05~3.13	0.01~0.19	0.17~0.25	0.57~0.61	0.44~0.49	0.29~0.38	2.55~6.53
		1.42(17)	0.11(17)	0.21(17)	0.59(17)	0.46(17)	0.33(17)	3.70(17)
	Ⅰ	0.09~0.77	0.01~0.07	0.21~0.28	0.57~0.59	0.43~0.48	0.25~0.37	1.91~4.32
		0.55(10)	0.05(10)	0.24(10)	0.58(10)	0.46(10)	0.31(10)	3.06(10)
nC_{17}/nC_{27}		$CPI(nC_{14-34})$	$CPI(nC_{14-22})$	$CPI(nC_{24-34})$	$\Sigma(nC_{17-23})/nC_{\max}$	S/H	C_{27}/C_{29}	
P_2I^2	Ⅲ	0.92~4.44	1.10~1.16	1.05~1.14	1.21~1.36	5.07~6.14	0.25~0.61	0.16~0.40
		1.75(19)	1.12(19)	1.08(19)	1.29(19)	5.51(19)	0.43(19)	0.34(19)
	Ⅱ	0.75~3.34	1.10~1.18	1.03~1.09	1.34~1.62	4.78~6.49	0.38~0.72	0.24~0.36
		1.79(17)	1.15(17)	1.07(17)	1.48(17)	5.64(17)	0.47(17)	0.29(17)
	Ⅰ	1.19~4.22	0.97~1.17	0.96~1.09	1.26~1.59	4.65~6.63	0.46~2.20	0.17~0.46
		2.52(10)	1.07(10)	0.99(10)	1.35(10)	5.72(10)	1.24(10)	0.33(10)
C_{28}/C_{29}		$(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$	TAR	$C_{24}TeT/C_{26}TT$	Pr/Ph	$C_{35}H/C_{34}H$	ETR	
P_2I^2	Ⅲ	0.66~1.00	0.45~0.86	0.12~0.71	0.64~1.25	0.59~0.94	0.50~0.78	0.72~0.94
		0.86(19)	0.62(19)	0.47(19)	0.87(19)	0.72(19)	0.66(19)	0.87(19)
	Ⅱ	0.63~0.86	0.42~0.90	0.18~0.66	0.51~1.37	0.46~0.76	0.49~0.73	0.77~0.92
		0.75(17)	0.69(17)	0.39(17)	0.85(17)	0.64(17)	0.65(17)	0.89(17)
	Ⅰ	0.51~0.72	0.35~1.02	0.12~0.80	0.34~1.29	0.50~1.05	0.52~0.56	0.55~0.82
		0.64(10)	0.71(10)	0.43(10)	0.67(10)	0.70(10)	0.54(10)	0.72(10)

注: $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值(样品数)}}$; CPI(*n*C₁₄₋₃₄)=0.5×[Σ odd(*n*C₁₅-*n*C₃₃)/Σ even(*n*C₁₄-*n*C₃₂)+ Σ odd(*n*C₁₅-*n*C₃₃)/Σ even(*n*C₁₆-*n*C₃₄)] ; CPI(*n*C₁₄₋₂₂)=0.5×[Σ odd(*n*C₁₅-*n*C₂₁)/Σ even(*n*C₁₄-*n*C₂₀)+ Σ odd(*n*C₁₅-*n*C₂₁)/Σ even(*n*C₁₆-*n*C₂₂)] ; CPI(*n*C₂₄₋₃₄)=0.5×[Σ odd(*n*C₂₅-*n*C₃₃)/Σ even(*n*C₂₄-*n*C₃₄)+ Σ odd(*n*C₂₅-*n*C₃₃)/Σ even(*n*C₂₆-*n*C₃₄)] ; TAR=(C₂₇+C₂₉+C₃₁)/(C₁₅+C₁₇+C₁₉) ; ETR=(C₂₈TT+C₂₉TT)/(C₂₈TT+C₂₉TT+Ts)。

3.2 富集因素分析

3.2.1 成熟度

成熟度是控制生物标志物形成和演化的重要因素之一^[14],明确研究区烃源岩成熟度对β-胡萝卜烷的富集是否产生影响则十分重要。研究层段内β-胡萝卜素烷指数整体上随埋深增加有减小趋势,但相关性不强,且在Ⅲ组内β-胡萝卜素烷指数变化较大(图6)。生物标志化合物中藿烷、甾烷异构化参数已广泛应用于原油和沉积有机质热成熟度的评价^[33],其中C₃₁22S/(22S+22R)、C₃₀βα藿烷/C₃₀αβ藿烷、C₂₉αββ/(ααα+αββ)和C₂₉ααα20S/(20S+20R)等参数在判断成熟度时较为常见。研究区芦二段C₃₁22S/(22S+22R)比值和C₃₀βα藿烷/C₃₀αβ藿烷比值分别介于0.57~0.61(平均为0.58)和0.17~0.29(平均为0.24);C₂₉αββ/(ααα+αββ)和C₂₉ααα20S/(20S+20R)参数比值分别介于0.25~0.38(平均为0.31)和0.41~0.49(平均为0.46)(表1)。芦二段*R*_o和*T*_{max}的分布范围分别

介于0.58%~0.70%(平均为0.64%),427℃~449℃(平均为440℃)(图6)。根据烃源岩有机质成烃演化阶段划分及判别指标^[34],上述热成熟度参数均表明马朗凹陷芦二段烃源岩处于低熟阶段(图7a),且反映芦二段Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ组烃源岩成熟度几乎没有差别(图6、图7b)。此外,研究层段本身埋深变化较小,烃源岩所经历的热演化程度差别较小,因此对其有机质组成的影响较弱,导致各成熟度参数在研究区芦二段纵向上没有太大变化。β-胡萝卜素烷指数与上述成熟度参数之间均没有明显相关性,且β-胡萝卜素烷丰度在有限的深度段内变化较大(图6),据此可基本排除热演化程度对研究区β-胡萝卜素烷丰度的影响。

3.2.2 有机质来源以及前身物

前人研究表明前身物的生物量(precursor biomass)对生物标志化合物的组成和分布有着很大的影响^[13,35]。总离子流图反映Ⅰ组沉积物在烃类分布上

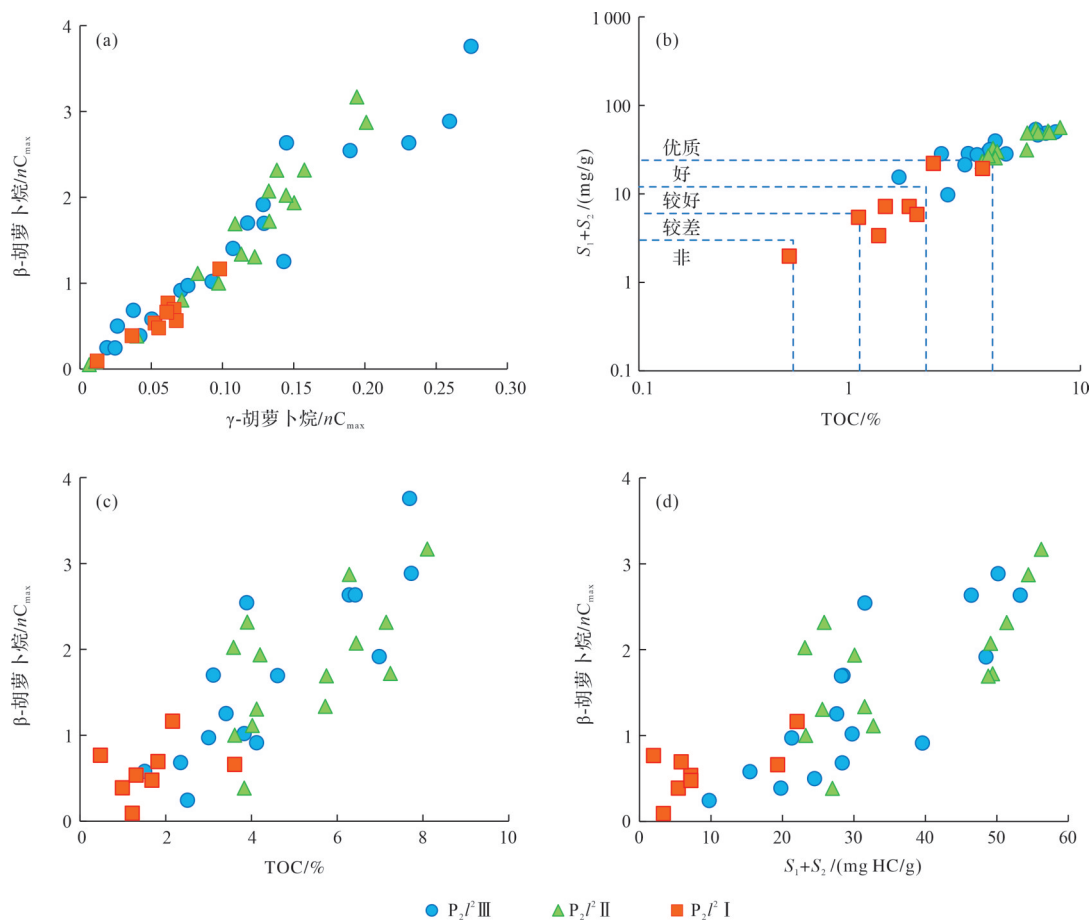


图4 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 β -胡萝卜素指数与 γ -胡萝卜素指数及有机质丰度相关性
(a) β -胡萝卜素指数与 γ -胡萝卜素指数交会图;(b)生烃潜量与TOC交会图;(c) β -胡萝卜素指数与TOC交会图;(d) β -胡萝卜素指数与生烃潜量交会图

Fig.4 Correlation between β -carotane and γ -carotane indices and organic matter abundance of the source rocks from P_2I in Malang Sag

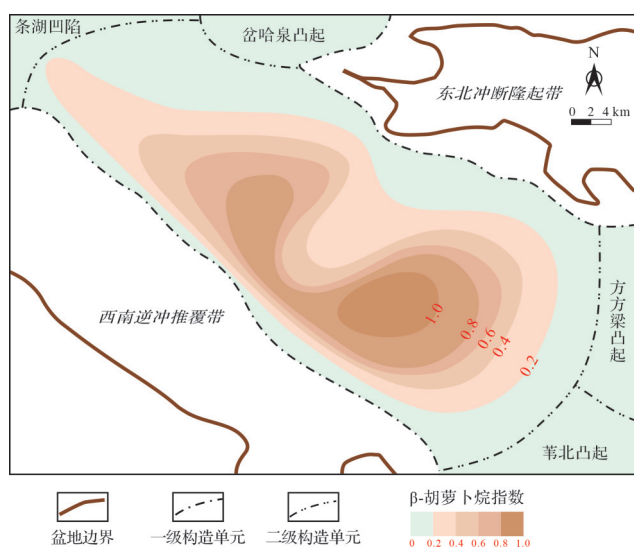


图5 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 β -胡萝卜素指数平面展布

Fig.5 Horizontal distribution of P_2I source rock β -carotane index in Malang Sag

以正构烷烃为主(图2a); II、III组烃源岩饱和烃中正构烷烃含量相对较低,但保存完整,且检测出高丰度的 β -胡萝卜素,最高者可高于正构烷烃主峰碳(图2b, c)。蒋中发等^[12]认为此现象可能是由于特殊生油母质所导致,同时期吉木萨尔凹陷西北缘风南地区风城组、芦草沟组烃源岩表现出同样的特征^[11-12]。

正构烷烃主峰碳分布为前峰型($<nC_{20}$)表示有机质来源以低等水生生物为主,后峰型($>nC_{23}$)指示有机质以陆源高等植物输入为主^[36];碳优势指数CPI明显高于1,表明奇碳优势,可指示高等植物源输入^[37]。通过对短链、长链正构烷烃CPI值[CPI(nC_{14-22})、CPI(nC_{24-34})]与正构烷烃CPI值[CPI(nC_{14-34})]比较,表明可以利用低、高碳数正构烷烃优势判断有机质来源^[13]。研究区芦草沟组二段烃源岩正构烷烃以短链正构烷烃同系物(nC_{17} 、 nC_{18} 、 nC_{21} 、 nC_{23})为主,长链奇数正构烷烃比例相对较低,其 nC_{17}/nC_{27} 、 $(nC_{21}+nC_{22})/(nC_{28}+nC_{29})$ 参

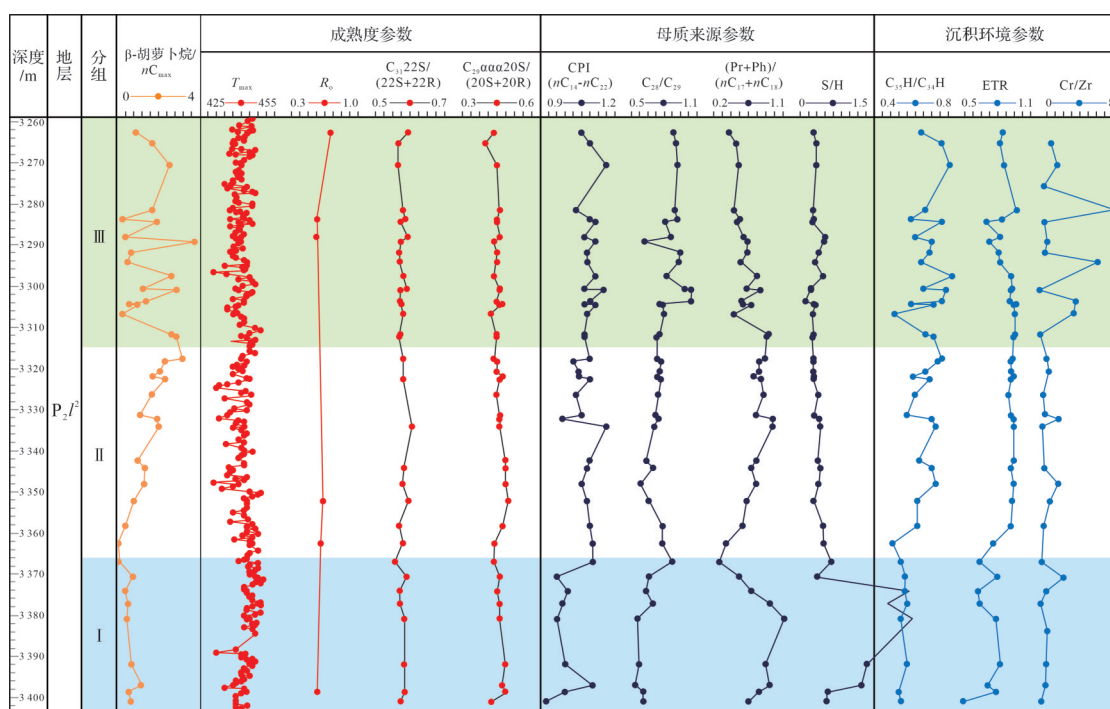


图6 马朗凹陷芦页1井芦草沟组二段烃源岩有机地球化学参数分布特征

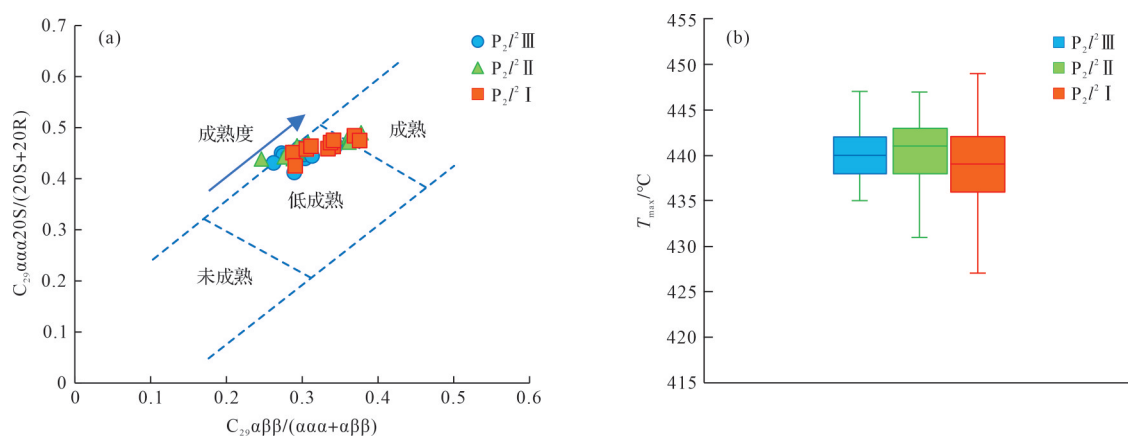
Fig.6 Distribution of organic geochemical characteristic parameters of P_2f_2 from well Luye1 in Malang Sag

图7 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩有机质成熟度对比

(a) $C_{29}\alpha\alpha\alpha/20S/(20S+20R)$ 参数交会图; (b) T_{max} 箱型图Fig.7 Comparison of organic matter maturity of source rocks from P_2f_2 in Malang Sag

数分别介于0.75~4.44(平均为1.95)、1.91~6.53(平均为3.53)(表1),显示出细菌或藻类的主要贡献^[13]。芦二段所有样品中 $CPI(nC_{14-34})$ 和 $CPI(nC_{14-22})$ 都接近于1; $CPI(nC_{24-34})$ 范围介于1.21~1.62,明显大于1(表1)。 $CPI(nC_{14-34})$ 与 $CPI(nC_{14-22})$ 之间存在较大的相似性,表明高碳数正构烷烃贡献小,结合本层段低热演化程度,可知高等植物对芦二段有机质贡献小,藻类等水生生物贡献大。

C_{27} 甾烷主要来源于浮游生物和红藻类^[38-39]。 C_{28} 甾烷被认为是由特定的浮游生物转化而来,例如含

有叶绿素 a、b 和 c 的藻类^[40-41]。 C_{29} 甾烷与维管植物和浮游藻类,如褐藻、绿藻、蓝藻等有很高的亲缘性。一般情况,高 C_{29} 甾烷含量指示高等植物输入,但是在陆源有机质输入不足的前提下, C_{29} 甾烷的富集与火山活动引起的蓝藻水华有关^[23]。芦二段中所有样品常规甾烷在质谱图中显示出阶梯升高,总体上更加富集 C_{28} 、 C_{29} 甾烷(图2)。研究区 C_{27}/C_{29} 甾烷与 C_{28}/C_{29} 甾烷呈较为明显正相关(图8a),说明 C_{28} 甾烷主要来自藻类,以浮游植物为主要有机质来源。在 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 甾烷三元图中显示的规则甾烷分布^[42](图8b),

表明芦二段烃源岩有机质来源主要为浮游生物、细菌以及陆生植物的混源输入,但更偏浮游生物优势。I组 C_{28}/C_{29} 甾烷参数比值介于0.51~0.72,平均为0.64,明显低于II组(0.63~0.86,平均为0.75)和III组(0.66~1.00,平均为0.86)(图6、表1),可能指示含有叶绿素a、b和c的藻类对I组有机质来源的贡献相对较少。

陆源水生比(TAR)和 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 常被用作评估沉积物中陆源有机质输入,其值越大反映陆源有机质贡献越大^[43-44]。芦二段中TAR值整体较低,介于0.12~0.80,平均为0.43(表1),说明高等植物贡献有限。I、II和III组中 β -胡萝卜素指数与高等植物输入参数TAR之间无明显相关性(图9a),表明高等植物有机质输入对研究区 β -胡萝卜素的来源贡献较小。三个层段中的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 参数比值无明显区别,总体介于0.34~1.37(平均为0.88)(表1)。但II组和III组中 β -胡萝卜素指数与 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 具有较为明显的负相关关系(图9b),且高 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 比值样品的 β -胡萝卜素指数均较低。 C_{24} 四环萜烷主要来源于陆源有机质输入,而且一般在淡水环境中较为富集^[45-46],表明以陆源有机质为主的淡水环境不利于 β -胡萝卜素的富集。

姥鲛烷和植烷通常被认为来源于具有植醇侧链的叶绿素a、b和c^[47-48],存在于所有的光合生物中。此外,来源于某些藻类、蓝细菌和产甲烷菌的生育酚也可能是姥鲛烷的潜在前身物^[49]。因此,姥鲛烷与植烷不仅可以指示沉积环境,还可以用于判断有机质来源。I组 β -胡萝卜素指数与 $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ 呈

现出较为离散的相关性(图6、图9c),表明I组沉积物中 β -胡萝卜素与叶绿素a、b和c或生育酚的亲缘性较差,但是II、III组中 β -胡萝卜素指数与 $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ 却表现出明显的正相关关系,尤其是II组相关性明显(图6、图9c),指示II、III组沉积物中 β -胡萝卜素与具有叶绿素a、b和c的藻类具有较好的亲缘性,与 C_{28}/C_{29} 甾烷参数指示意义相吻合。

甾烷类化合物主要来源于真核生物中的甾醇^[50],藿烷来源于细菌细胞膜中的前身物^[51],因此甾烷/藿烷比值(S/H)可以用来区分真核生物和原核生物对有机质来源的贡献。其中I组沉积物中S/H比值介于0.46~2.20(平均为1.24);明显高于II、III的0.38~0.72(平均为0.47)和0.25~0.61(平均为0.43)(图5、表1),表明I组有机质来源以真核生物为主;而II组和III组有机质来源中细菌的贡献较大。

不同有机质来源所形成的短链和中链正构烷烃分布特征不同,海洋藻类可以合成 nC_{17-23} 的正构烷烃, nC_{17} 丰度最高;蓝藻与海洋藻类合成的正构烷烃碳数分布范围相同,但 nC_{17} 或 nC_{19} 在蓝藻中丰度最高;光合细菌则对 nC_{17-23} 贡献较大^[52], $\Sigma(nC_{17-23})/nC_{max}$ 可以指示低等水生生物与光合细菌对有机质的贡献^[13]。综上,研究区芦二段有机质来源主要为低等水生生物,陆源有机质输入不足,且I组烃源岩中细菌对有机质来源的贡献较低。因此,I组 β -胡萝卜素指数与 $\Sigma(nC_{17-23})/nC_{max}$ 之间的离散关系(图9d)表明不是低等水生生物的影响,而反映出I组烃源岩中 β -胡萝卜素与光合细菌的亲缘性较差。II、III组烃

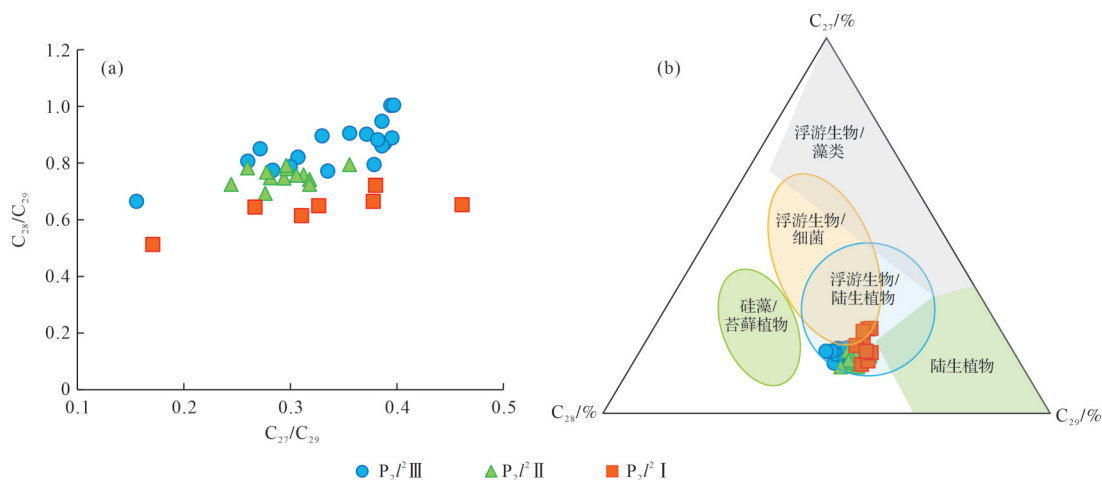


图8 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩规则甾烷参数相关性

(a) C_{27}/C_{29} 甾烷与 C_{28}/C_{29} 甾烷交会图; (b) 常规甾烷(C_{27} - C_{28} - C_{29})三元图解(据文献[42]修改)

Fig.8 Correlation between β -carotane and geochemical parameters indicating the origin of organic matter in the P2² source rocks in Malang Sag

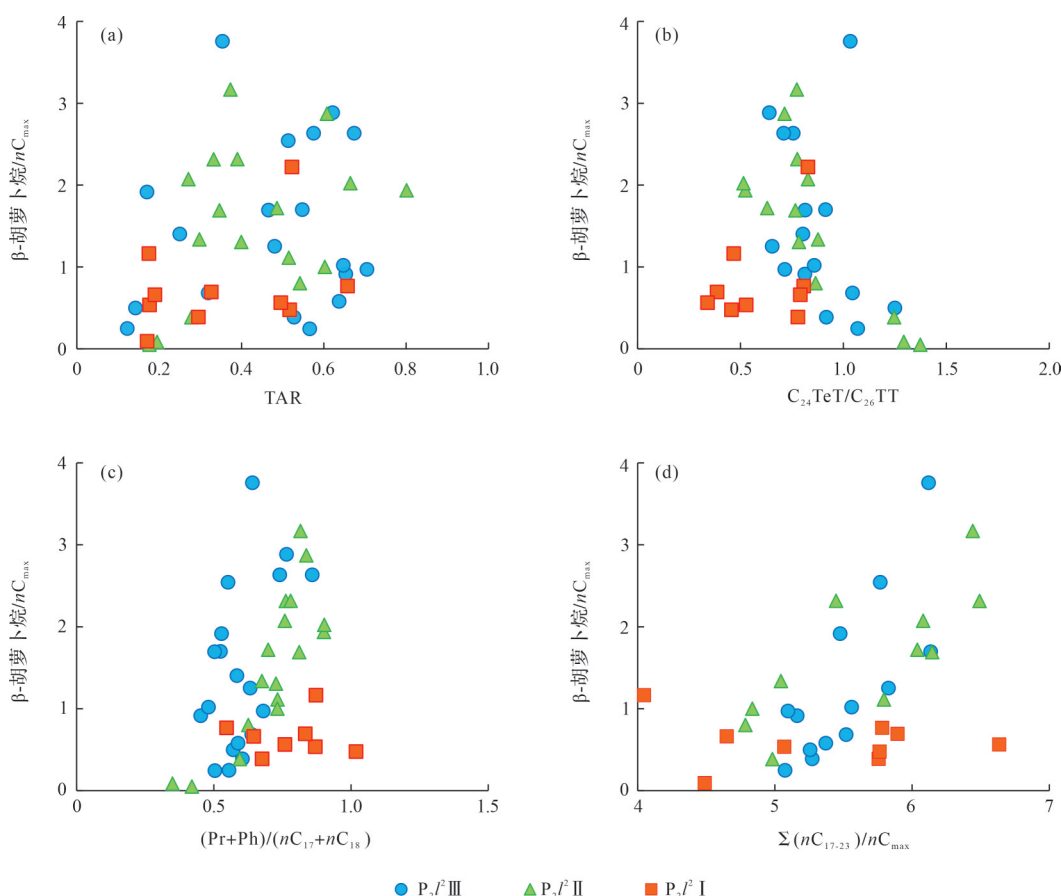


图9 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 β -胡萝卜烷指数与指示有机质来源参数相关性

(a) β -胡萝卜烷指数和TAR交会图;(b) β -胡萝卜烷指数与 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 交会图;(c) β -胡萝卜烷指数和 $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ 交会图;(d) β -胡萝卜烷指数与 $\Sigma(nC_{17-23})/nC_{max}$ 交会图

Fig.9 Correlation between β -carotane index and geochemical parameters indicating the origin of organic matter in the P_2I^2 source rocks in Malang Sag

源岩有机质中细菌的贡献较 I 组大,且 II、III 组的 β -胡萝卜烷指数与 $\Sigma(nC_{17-23})/nC_{max}$ 呈现出较为明显的正相关关系(图9d),指示光合细菌和低等水生生物对于 II、III 组中 β -胡萝卜烷较高的生源贡献。

3.2.3 沉积环境特征

β -胡萝卜烷是经过 β -胡萝卜素氢化合成而来。氢化过程对于缺氧环境中有机质的保存和生物分子形成生物标志物化合物至关重要,但该过程至今未被完全阐明^[13]。烃类骨架对氧化环境敏感,在还原性湖相沉积环境中更有利于保存^[53-54]。

一般来说,Pr/Ph 小于 1 指示强还原环境,比值越低指示沉积环境还原性越强;Pr/Ph 大于 1 代表氧化环境^[36]。研究区芦二段沉积物 Pr/Ph 整体小于 1 (0.46~1.05,平均为 0.68)(表 1),表明芦二段沉积时期整体为还原环境。但是在其底部,Pr/Ph 有较大的波动,分布范围介于 0.50~1.05(表 1),表明 I 组古沉

积环境在还原环境与弱氧化—弱还原环境波动。II、III 组沉积物中 Pr/Ph 介于 0.46~0.94,平均为 0.68,指示 II、III 组古沉积环境主要为还原环境。Shanmugan^[55]在 1985 年提出的利用 Pr/ nC_{17} 和 Ph/ nC_{18} 来评价烃源岩沉积环境的图版得到了广泛的应用。研究区芦二段 II、III 组数据点在该图版中主要位于藻类、还原环境区域(图 10),指示其沉积环境处于还原环境;I 组少数数据点位于弱氧化—弱还原区域,大部分在还原区域(图 10),指示其古沉积环境的波动性。

高丰度的 C_{35} 升藿烷通常被解释为沉积时期强还原(低 Eh)环境的一般性指标^[56],因此 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷可以用来指示烃源岩沉积时的氧化还原程度,高比值通常代表缺氧环境^[36]。研究区芦二段 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷比值,在 I 组经历了一段稳定低值的过程,均值为 0.54;II 组高于 I 组,分布范围介于 0.49~0.73,均

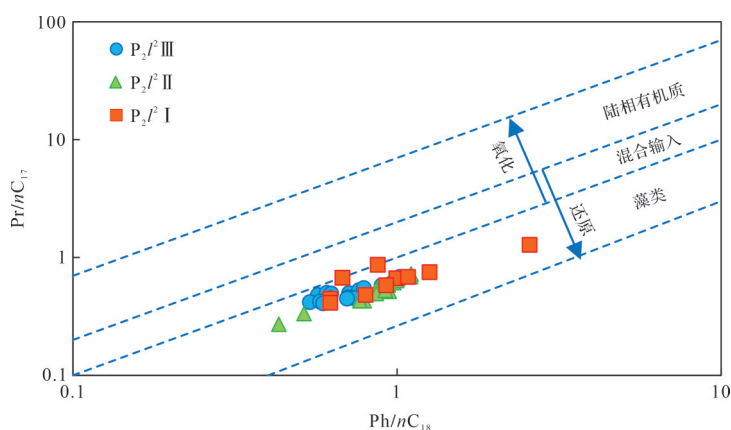


图10 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 交会图(据文献[55]修改)

Fig.10 Cross plots of Pr/nC_{17} - Ph/nC_{18} from the P_2f source rocks in Malang Sag (modified from reference [55])

值为0.65;Ⅲ组整体高于Ⅰ组,平均为0.65,但是在该层段 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷波动较大,有多个升降过程(图6、表1),说明Ⅲ组烃源岩沉积时水体环境发生过一定程度的变化。从 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷变化趋势来看,Ⅱ、Ⅲ组为 C_{35} 藿烷富集区,表明其沉积期还原性强;而Ⅰ组 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷比值低,指示沉积环境还原性较Ⅱ、Ⅲ组低,氧化程度相对较高。Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ组 β -胡萝卜素指数与 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷均呈现出明显的正相关关系(图11a),说明还原的沉积环境有利于 β -胡萝卜素的积累。

长链三环萜烷比值(ETR)是反映烃源岩沉积过程中水体盐度变化的有效指标,高ETR值指示咸水、强还原的沉积环境^[44,57]。芦二段ETR比值的分布特征在纵向上与 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷相似(图6)。同样在

Ⅰ组呈现出整体较低的特征,起伏波动较大,参数介于0.55~0.82,平均为0.72;Ⅱ组ETR值高于Ⅰ组且稳定,介于0.77~0.92,平均为0.89;Ⅲ组整体较高,但起伏较大,平均值0.87与Ⅱ组接近(表1)。根据ETR值的分布范围以及其变化规律,可以推测出芦二段沉积时期,其水体盐度普遍较高。相比于Ⅰ组,Ⅱ、Ⅲ组有着更高的盐度,但是Ⅲ组沉积水体盐度波动较大。芦二段 β -胡萝卜素指数与ETR之间有着较为明显的正相关关系(图10b),由于Ⅱ、Ⅲ组盐度整体较高,使得ETR集中于0.90附近,指示盐度较高的沉积环境有利于 β -胡萝卜素的积累。伽马蜡烷与水体底部厌氧环境中的纤毛虫有关,也是水体分层的标志^[36]。芦二段伽马蜡烷指数整体较高,平均为0.32,说明芦二段水体分层现象明显。

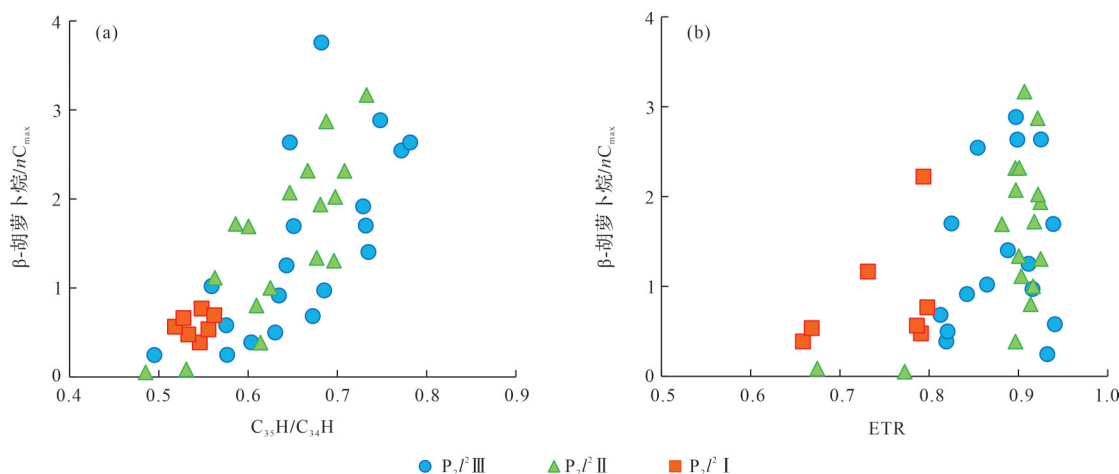


图11 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 β -胡萝卜素指数与指示沉积环境地化参数之间相关性

(a) β -胡萝卜素指数和 C_{35} 藿烷/ C_{34} 藿烷交会图; (b) β -胡萝卜素指数与ETR交会图

Fig.11 Correlation between β -carotane index and geochemical parameters indicating depositional environment of the P_2f source rocks in Malang Sag

热液活动可以破坏 β -胡萝卜素的保存,特别是在咸水/微咸水湖泊环境中, β -胡萝卜素烷的缺失可能意味着沉积过程中热液活动的影响^[15]。 Cr/Zr 是指示热液输入强度的一个可靠指标^[58-59]。Ⅲ组 β -胡萝卜素指数的起伏变化与 Cr/Zr 有着明显的对应关系(图6),马朗凹陷芦二段烃源岩 β -胡萝卜素指数与 Cr/Zr 呈明显的负相关性(图12),说明热液活动的影响可能是Ⅲ组中 β -胡萝卜素含量起伏变化的主要原因。

3.2.4 主控因素分析

芦草沟组沉积期为三塘湖盆地二叠纪最大湖侵时期,古水体盐度较高,对现今残余地层未见陆源碎屑供给,湖盆整体较为封闭^[60-61],芦二段岩性以泥灰岩、泥质云岩等碳酸盐岩为主,夹少量碳质泥岩、凝灰质泥岩等,咸化湖相富碳酸盐岩段分布稳定^[28]。咸化水体使得芦二段 β -胡萝卜素的保存具有良好的外在条件,即使 β -胡萝卜素含量最低的Ⅰ组,与其他盆地比较也具有相对较高的含量。

缺少陆源供给的封闭盐湖形成了分层的水体,火山喷发的气体和火山灰等细粒物质落入水中后,一方面形成了凝灰质沉积,另一方面大量的营养元素和微量金属元素使耐盐藻类浮游生物和细菌勃发,为 β -胡萝卜素的富集提供前提条件。藻类勃发快速消耗水体中的氧,引起湖中生物的大量死亡,形成富有机质沉积物。同时,由于浮游植物的光合作用消耗表层水体中大量的 CO_2 气体,诱发白云石等碳酸盐岩矿物的沉淀,在偏碱性水体的还原环境中,由于硫酸盐还原菌的作用,可使水体中 SO_4^{2-} 还原生成 H_2S ^[60], H_2S 的生成可能为 β -胡萝卜素向 β -胡萝卜素

的转化提供氢^[62]。因此,三塘湖盆地马朗凹陷芦二段 β -胡萝卜素的富集主要受到有机质来源与沉积环境的双重控制。

结合前文三塘湖盆地马朗凹陷芦二段 β -胡萝卜素平面分布特征(图5),推测高值区烃源岩沉积时藻类、细菌等有机质供给充足且保存于还原、高盐度的环境使得烃源岩品质较好,这一观点可为研究区后续的油气勘探提供一定参考。

4 结论

(1) 根据 β -胡萝卜素的含量,纵向上将马朗凹陷芦二段烃源岩自下而上分为三组,其中Ⅰ组 β -胡萝卜素含量相对较少,Ⅱ组 β -胡萝卜素含量自下而上逐渐升高,而Ⅲ组中 β -胡萝卜素含量波动大。平面上马朗凹陷芦二段烃源岩 β -胡萝卜素含量在东北部较低,西南部较高;靠近西南逆冲推覆带有两个高值中心。

(2) Ⅱ和Ⅲ组烃源岩中细菌和含有叶绿素a、b和c的藻类对 β -胡萝卜素的贡献较大;Ⅱ、Ⅲ组主要形成于高盐、还原的沉积环境;Ⅰ组沉积时期水体盐度相对较低,在还原环境与弱氧化—弱还原环境之间波动,这些条件使得Ⅰ组与Ⅱ、Ⅲ组中 β -胡萝卜素的前身物和/或类胡萝卜素结构的保存出现差异。Ⅲ组沉积期有着较为明显的热液活动,使得 β -胡萝卜素丰度出现较大的波动。因此,马朗凹陷芦二段 β -胡萝卜素的形成和聚集受其前身物和沉积环境的双重控制,未受热成熟度的影响,且 β -胡萝卜素的相对含量可以作为反映研究区烃源岩品质的有效指标。

致谢 衷心感谢三位审稿专家对本论文提出的许多建设性建议以及编辑部老师的修改。研究过程中得到了中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院的支持与帮助,在此表示真诚的感谢!

参考文献(References)

- [1] Eglinton G, Murphy M T J. Organic geochemistry: Methods and results[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1969: 425-437.
- [2] Goodwin T W. Distribution of carotenoids[M]//Goodwin T W. Chemistry and biochemistry of plant pigments. 2nd ed. London: Academic Press, 1976: 225-261.
- [3] Mackenzie A S. Applications of biological markers in petroleum geochemistry[M]//Brooks J, Welte D. Advances in petroleum geochemistry. London: Academic Press, 1984: 115-214.
- [4] Jiang Z S, Fowler M G. Carotenoid-derived alkanes in oils from

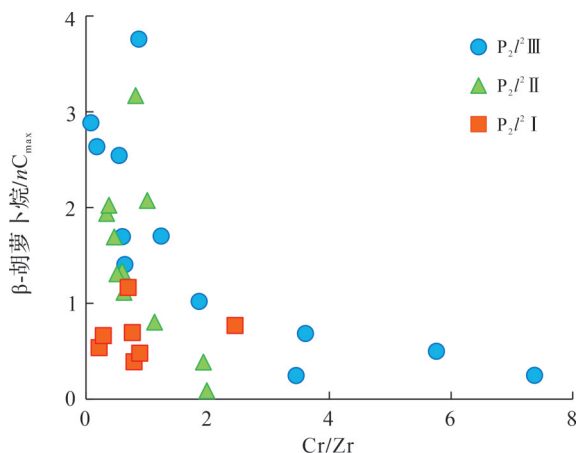


图12 马朗凹陷芦草沟组二段烃源岩 β -胡萝卜素指数与 Cr/Zr 比值之间相关性

Fig.12 Correlation between β -carotane index and Cr/Zr of the P_2f_2 source rocks in Malang Sag

- northwestern China[J]. *Organic Geochemistry*, 1986, 10(4/5/6): 831-839.
- [5] Murphy S M T J, McCormick A, Eglinton G. Perhydro- β -carotene in the Green River Shale[J]. *Science*, 1967, 157(3792): 1040-1042.
- [6] Gallegos E J. Identification of new steranes, terpanes, and branched paraffins in Green River shale by combined capillary gas chromatography and mass spectrometry[J]. *Analytical Chemistry*, 1971, 43(10): 1151-1160.
- [7] Carroll A R, Brassell S C, Graham S A. Upper Permian lacustrine oil shales, southern Junggar Basin, northwest China[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(12): 1874-1902.
- [8] Carroll A R. Upper Permian lacustrine organic facies evolution, southern Junggar Basin, NW China[J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(11): 649-667.
- [9] Mello M R, Koutsoukos E A M, Santos Neto E V, et al. Geochemical and micropaleontological characterization of lacustrine and marine hypersaline environments from Brazilian sedimentary basins[M]//Katz B J, Pratt L M. Source rocks in a sequence stratigraphic framework. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 17-34.
- [10] Fu J M, Sheng G Y. Biological marker composition of typical source rocks and related crude oils of terrestrial origin in the People's Republic of China: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 1989, 4(1): 13-22.
- [11] 黄攀,任江玲,李二庭,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷烃源岩和原油生物标志物与碳同位素组成及其意义[J]. *地球化学*, 2016, 45(3): 303-314. [Huang Pan, Ren Jiangling, Li Erting, et al. Biomarker and carbon isotopic compositions of source rock extracts and crude oils from Mahu Sag, Junggar Basin[J]. *Geochimica*, 2016, 45(3): 303-314.]
- [12] 蒋中发,丁修建,王忠泉,等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组烃源岩沉积古环境[J]. *岩性油气藏*, 2020, 32(6): 109-119. [Jiang Zhongfa, Ding Xiujian, Wang Zhongquan, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2020, 32(6): 109-119.]
- [13] Grba N, Šajnović A, Stojanović K, et al. Preservation of diagenetic products of β -carotene in sedimentary rocks from the Lopare Basin (Bosnia and Herzegovina)[J]. *Geochemistry*, 2014, 74(1): 107-123.
- [14] Ding X J, Gao C H, Zha M, et al. Depositional environment and factors controlling β -carotane accumulation: A case study from the Jimsar Sag, Junggar Basin, northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 833-842.
- [15] Wang Y C, Cao J, Tao K Y, et al. Absence of β -carotane as proxies of hydrothermal activity in brackish lacustrine sediments[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 587: 110801.
- [16] 马素萍,贺建桥,夏燕青. 油气形成过程中一个最明显的氧化还原反应实例:胡萝卜烷的形成[J]. *沉积学报*, 2004, 22(增刊1): 124-128. [Ma Suping, He Jianqiao, Xia Yanqing. An obvious example of redox reaction in the process of oil and gas generation: The formation of carotene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(Suppl. 1): 124-128.]
- [17] Hall P B, Douglas A G. The distribution of cyclic alkanes in two lacustrine deposits[M]//Bjorøy M, Albrecht C, Cornford C, et al. *Advances in organic geochemistry*. New York: Wiley, 1983: 576-587.
- [18] Moldowan J M, Seifert W K, Gallegos E J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1255-1268.
- [19] Requejo A G, Allan J, Creaney S, et al. Aryl isoprenoids and diaromatic carotenoids in Paleozoic source rocks and oils from the western Canada and Williston Basins[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1/2/3): 245-264.
- [20] Philp R P, Chen J H, Fu J M, et al. A geochemical investigation of crude oils and source rocks from Biyang Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(6): 933-945.
- [21] Anders D E, Robinson W E. Cycloalkane constituents of the bitumen from Green River Shale[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35(7): 661-678.
- [22] Brocks J J, Schaeffer P. Okenane, a biomarker for purple sulfur bacteria (Chromatiaceae), and other new carotenoid derivatives from the 1640 Ma Barney Creek Formation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(5): 1396-1414.
- [23] Ding W J, Hou D J, Jiang L, et al. High abundance of carotanes in the brackish-saline lacustrine sediments: A possible cyanobacteria source? [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219: 103373.
- [24] 隋阳,郭旭东,叶生林,等. 三塘湖盆地条湖组烃源岩地化特征及致密油源对比[J]. *新疆地质*, 2016, 34(4): 510-517. [Sui Yang, Guo Xudong, Ye Shenglin, et al. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rock and oil-source correlation of tight oil in Tiaohu Formation, Santanghu Basin[J]. *Xinjiang Geology*, 2016, 34(4): 510-517.]
- [25] 孟子园. 富深源物质的湖相烃源岩及其与有机质富集关系研究:以新疆北部二叠系芦草沟组为例[D]. 西安:西北大学, 2022: 115-135. [Meng Ziyuan. Deep-derived sediments-rich lacustrine hydrocarbon source rocks and their relationship with organic matter accumulation: Example from Permian Lucaogou Formation in northern Xinjiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2022: 115-135.]
- [26] 刘锋,赵红静,金颖,等. 吐哈盆地胜北洼陷中—下侏罗统致密油烃源岩评价及油源对比[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(3): 277-288. [Liu Feng, Zhao Hongjing, Jin Ying, et al. Source rock evaluation and oil-source correlation for Middle-Lower Jurassic tight oil in Shengbei Subsag, Turpan-Hami Basin[J]. *Xinjiang*

- Petroleum Geology, 2023, 44(3): 277-288.]
- [27] Wang W M, Lyu Q X, Fan T G, et al. Characteristics of the tuffaceous shale oil reservoir and its sweet spots: A case study of the Tiaohu Depression in the Santanghu Basin[J]. Unconventional Resources, 2022, 2: 192-199.
- [28] 陈旋, 刘小琦, 王雪纯, 等. 三塘湖盆地芦草沟组页岩油储层形成机理及分布特征[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1180-1189. [Chen Xuan, Liu Xiaoqi, Wang Xuechun, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of Lucaogou shale oil reservoir in Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8): 1180-1189.]
- [29] 梁世君, 罗劝生, 王瑞, 等. 三塘湖盆地二叠系非常规石油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 624-635. [Liang Shijun, Luo Quansheng, Wang Rui, et al. Geological characteristics and exploration practice of unconventional Permian oil resources in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 624-635.]
- [30] 潘永帅, 黄志龙, 郭小波, 等. 火山灰影响下的湖相富有机质页岩油成藏条件分析: 以三塘湖盆地条湖—马朗凹陷芦草沟组为例[J]. 地质学报, 2022, 96(3): 1053-1068. [Pan Yongshuai, Huang Zhilong, Guo Xiaobo, et al. Analysis of accumulation conditions of lacustrine organic-rich shale oil affected by volcanic ash: A case study of the Lucaogou Formation in the Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(3): 1053-1068.]
- [31] 黄志龙, 郭小波, 柳波, 等. 马朗凹陷芦草沟组源岩油储集空间特征及其成因[J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1115-1122. [Huang Zhilong, Guo Xiaobo, Liu Bo, et al. The reservoir space characteristics and origins of Lucaogou Formation source rock oil in the Malang Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1115-1122.]
- [32] 郭建军, 陈践发, 陈仲宇, 等. 古隆1井海相地层中高丰度胡萝卜素检出及意义[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 585-588. [Guo Jianjun, Chen Jianfa, Chen Zhongyu, et al. High abundance carotane from marine strata in well Gulong-1 in Tarim Basin and its geological significance[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 585-588.]
- [33] 彼得斯 K E, 沃尔特斯 C C, 莫尔多万 J M. 生物标志化合物指南(下册): 生物标志化合物和同位素在石油勘探与地史研究中的应用[M]. 2版. 张水昌, 李振西, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011: 138-160. [Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The biomarker guide [M]. 2nd ed. Zhang Shuichang, Li Zhenxi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 138-160.]
- [34] 侯读杰, 冯子辉. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. [Hou Dujie, Feng Zihui. Petroleum geochemistry[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [35] Bechtel A, Gruber W, Sachsenhofer R F, et al. Depositional environment of the Late Miocene Hausruck lignite (Alpine Foreland Basin): Insights from petrography, organic geochemistry, and stable carbon isotopes[J]. International Journal of Coal Geology, 2003, 53(3): 153-180.
- [36] Seifert W K, Moldowan J M. Use of biological markers in petroleum exploration[J]. Methods in Geochemistry and Geophysics, 1986, 24: 261-290.
- [37] Bray E E, Evans E D. Distribution of *n*-paraffins as a clue to recognition of source beds[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1961, 22(1): 2-15.
- [38] Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 43(5): 739-745.
- [39] Volkman J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(2): 83-99.
- [40] Knoll A H, Summons R E, Waldbauer J R, et al. The geological succession of primary producers in the oceans[M]//Falkowski P G, Knoll A H. Evolution of primary producers in the sea. Amsterdam: Academic Press, 2007: 133-163.
- [41] Mackenzie A S, Brassell S C, Eglinton G, et al. Chemical fossils: The geological fate of steroids[J]. Science, 1982, 217(4559): 491-504.
- [42] Hakimi M H, Abdullah W H, Alqudah M, et al. Organic geochemical and petrographic characteristics of the oil shales in the Lajjun area, Central Jordan: Origin of organic matter input and preservation conditions[J]. Fuel, 2016, 181: 34-45.
- [43] Bourbonniere R A, Meyers P A. Sedimentary geolipid records of historical changes in the watersheds and productivities of Lakes Ontario and Erie[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(2): 352-359.
- [44] Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, et al. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(8): 1015-1037.
- [45] 田金强, 邹华耀, 周心怀, 等. 辽东湾地区烃源岩生物标志物特征与油源对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 53-58. [Tian Jinqiang, Zou Huayao, Zhou Xinhui, et al. Biomarker characteristics of source rocks and oil-source correlation in Liaodong Bay[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(4): 53-58.]
- [46] 张涛, 李永飞, 孙守亮, 等. 辽宁金羊盆地羊D1井油砂地球化学特征及意义[J]. 地质通报, 2017, 36(4): 582-590. [Zhang Tao, Li Yongfei, Sun Shouliang, et al. Saturated hydrocarbon geochemical characteristics of the oil sand from YD1 well in Jin-yang Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 582-590.]
- [47] Didyk B M, Simoneit B R T, Brassell S C, et al. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation[J]. Nature, 1978, 272(5650): 216-222.
- [48] Powell T G. Petroleum geochemistry and depositional setting of lacustrine source rocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 1986, 3(3): 200-219.
- [49] Ten Haven H L, De Leeuw J W, Rullkötter J, et al. Restricted utility of the pristane/phytane ratio as a palaeoenvironmental in-

- dicator[J]. *Nature*, 1987, 330(6149): 641-643.
- [50] Seifert W K, Moldowan J M. Applications of steranes, terpanes and monoaromatics to the maturation, migration and source of crude oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(1): 77-95.
- [51] Ourisson G, Albrecht P, Rohmer M. The Hopanoids: Palaeochemistry and biochemistry of a group of natural products[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1979, 51(4): 709-729.
- [52] Vaz dos Santos Neto E, Hayes J M, Takaki T. Isotopic biogeochemistry of the Neocomian lacustrine and Upper Aptian marine-evaporitic sediments of the Potiguar Basin, Northeastern Brazil [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 28(6): 361-381.
- [53] Koopmans M P, Köster J, van Kaam-Peters H M E, et al. Diagenetic and catagenetic products of isorenieratene: Molecular indicators for photic zone anoxia[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1996, 60(22): 4467-4496.
- [54] Koopmans M P, de Leeuw J W, Sinninghe Damsté J S. Novel cyclised and aromatised diagenetic products of β -carotene in the Green River Shale[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 451-466.
- [55] Shanmugam G. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia[J]. *AAPG Bulletin*, 1985, 69(8): 1241-1254.
- [56] Peters K E, Moldowan J M. Effects of source, thermal maturity, and biodegradation on the distribution and isomerization of homohopanes in petroleum[J]. *Organic Geochemistry*, 1991, 17(1): 47-61.
- [57] Hao F, Zhou X H, Zhu Y M, et al. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(4): 323-339.
- [58] Li H, Liu Y Q, Yang K, et al. Hydrothermal mineral assemblages of calcite and dolomite-analcime-pyrite in Permian lacustrine Lucaogou mudstones, eastern Junggar Basin, Northwest China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 115(1): 63-85.
- [59] Zhang S H, Liu C Y, Liang H, et al. Paleoenvironmental conditions, organic matter accumulation, and unconventional hydrocarbon potential for the Permian Lucaogou Formation organic-rich rocks in Santanghu Basin, NW China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 185: 44-60.
- [60] 柳波, 吕延防, 孟元林, 等. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义: 以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 598-607. [Liu Bo, Lü Yanfang, Meng Yuanlin, et al. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: A case study of Permian Lucaogou Formation in Malang Sag, Santanghu Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 598-607.]
- [61] Hackley P C, Fishman N, Wu T, et al. Organic petrology and geochemistry of mudrocks from the lacustrine Lucaogou Formation, Santanghu Basin, Northwest China: Application to lake basin evolution[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2016, 168: 20-34.
- [62] Hebling Y, Schaeffer P, Behrens A, et al. Biomarker evidence for a major preservation pathway of sedimentary organic carbon [J]. *Science*, 2006, 312(5780): 1627-1631.

Main Controlling Factors for Lucaogou Formation β -Carotane Enrichment in the Malang Sag, Santanghu Basin

GAN YingXing¹, ZHAO HongJing¹, WANG ZhiYong², JIN Ying², WEN WangBiao¹, WANG Jie²,
LIU Feng², WANG XiaoHua², XU GuiFang²

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

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami, Xinjiang 650500, China

Abstract: [Objective] The Second member of the Permian Lucaogou Formation (P_2l^2) is the main source rock in the Malang Sag of the Santanghu Basin, with a high abundance of β -carotane. However, there is significant variation in its contents across the section. To further clarify the variation characteristics of β -carotane in P_2l^2 and explore the main controlling factors of its enrichment. [Methods] Organic geochemical analysis was conducted, and the investigated source rocks were divided into groups I, II and III from bottom to top based on the β -carotane index. The β -carotane index was low in group I and gradually increased from bottom to top in group II, whereas the β -carotane index in group III fluctuated greatly. There are two high-value centers in the plane near the Southwest Thrust Nappe. [Results] The results show that the relative content of β -carotane effectively reflects the quality of source rocks in the study area. The organic matter of the P_2l^2 source rocks in Malang Sag is composed of lower aquatic organisms. However, compared with the group I, groups II and III have a richer supply of prokaryote organic matter. The values of steranes/hopanes, C_{28} steranes/ C_{29} steranes, and $(Pr+Ph)/(nC_{17}+nC_{18})$ indicated that the precursors of β -carotane in groups II and III may be algae with phytol side chains of chlorophyll a, b, and c and bacteria. Based on the parameters of Pr/Ph , C_{35} hopanes/ C_{34} hopanes, and extended tricyclic terpane ratio (ETR), that the water salinity of source rocks in groups II and III is found to be high and primarily in a reducing environment. Compared with the fluctuating environment of weak oxidation-weak reduction during the deposition of group I and the relatively low salinity, this is more conducive to the preservation of β -carotane. A certain intensity of hydrothermal activity occurred during the deposition of group III source rocks, resulting in a large fluctuation of β -carotane content. [Conclusions] Therefore, the enrichment of P_2l^2 β -carotane in Malang Sag is controlled by the source of organic matter and sedimentary environment.

Key words: β -carotane; prokaryotes; brackish water deposition; hydrothermal activity; Lucaogou Formation; Malang Sag