准噶尔盆地吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征及油源分析

温旺彪[1]，赵红静[1*]，王志勇[2]，金颖[2]，王杰[2]，甘应星[2]，刘锋[2]，郭雅婷[1]

1. 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室，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

第一作者，E-mail：510090148@qq.com

* 通信作者，E-mail：zhaohjdh@yangtzeu.edu.cn

2024-08-10 收稿；2024-10-17 修回；2024-10-23 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41302121；42072119)

中图分类号：P618.13　　文章编号：2096-8523(2025)03-0165-17　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240443

摘　要：近年，准噶尔盆地吉南凹陷井井子沟组常规砂岩油藏勘探取得了重要进展，三级储量过亿吨，勘探潜力巨大，中二叠统芦草沟组作为凹陷内主力源岩层，目前研究相对薄弱。利用多项地球化学测试手段，对芦草沟组不同层段烃源岩地球化学特征进行了对比，并据此厘定了二叠系油气来源。结果表明：①依据测井曲线特征可将芦草沟组分为 3 段，其中芦一段、芦二段发育优质烃源岩，母质类型为Ⅰ～$Ⅱ_1$型，处于低熟–成熟阶段，且芦二段生烃能力更强；芦三段主体为“非–一般”烃源岩，母质类型亦为Ⅰ～$Ⅱ_1$型，受上覆火成岩影响，局部成熟度较高。②基于分子地球化学特征，芦草沟组沉积期整体处于偏还原环境中，有机质保存条件较好，但不同层段水体咸化程度有异，芦一段>芦三段>芦二段。在生物组成方面，证明了芦草沟组存在绿藻和蓝细菌(蓝藻)2 种特征生烃母质，前者证据是与年代相关的生物标志物(C_{28} 甾烷)，后者证据为 β-胡萝卜烷和中链单甲基烷烃的检出，芦一段、芦三段成烃生物中显示出蓝藻的主要贡献，芦二段则具有较高的绿藻和陆源高等植物输入，湖盆水体盐度的差异是影响蓝、绿藻繁盛的关键因素。③芦一段和芦二段烃源岩具有特征的高丰度 C_{30}αα-藿烷(受控于热演化程度)，C_{30}αα/αβ 有望成为判识成熟度的新指标。④吉南凹陷二叠系存在 3 种类别不同的原油，A、B 类原油分别对应芦一段和芦二段烃源岩，C 类原油显示非芦草沟组油源特征，主要来自井井子沟组上部泥岩。研究成果对吉南凹陷未来油气勘探与开发具有参考意义。

关键词：油源对比；地球化学特征；芦草沟组；吉南凹陷；烃源岩

阜康断裂带周围广泛发育中二叠统芦草沟组厚层优质烃源岩，油气资源潜力巨大，过去勘探主要集中在断裂带西段，并发现了北三台、甘河、彩南等多个中小型油田[1]，近年随着勘探领域的持续扩大，研究人员于断裂带东段下盘发现了吉南凹陷，并认为其具备规模成藏的烃源岩条件[2]。2017 年至今，中国地质调查局与吐哈油田分公司先后分别在研究区部署了多口风险探井，钻探过程中油气显示活跃，并首次于萨探 1 井烃源岩之下的井井子沟组获得日产 26.3 m^3 的高产油流[3]，这种“上生下储”型油气藏的发现开辟了吉南凹陷二叠系油气勘探新领域，勘探意义重大。然而，吉南凹陷作为近年新发现的含油气区，其勘探和研究程度均较低，由于海西、燕山、喜马拉雅等多期构造运动的叠加改造使得地层破

著录信息：温旺彪，赵红静，王志勇，等. 准噶尔盆地吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征及油源分析 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：165-181.
WEN Wangbiao，ZHAO Hongjing，WANG Zhiyong，et al. Oil-source correlations and geochemical characteristics of source rock from the Permian Lucaogou Formation in the Jinan Sag，Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(3)：165-181.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

碎[4]，不仅使吉南凹陷油藏形成条件苛刻，也使油藏特征变复杂，因此目前针对吉南凹陷的研究主要集中在构造与地层演化、原型盆地演化关系[5]、油气成藏特征与成藏模式及富集主控因素等方面[1-3]，而对于准东地区芦草沟组烃源岩和原油地球化学特征的研究也主要集中在与其相邻的吉木萨尔凹陷、阜康凹陷等地[6-7]。迄今为止，针对吉南凹陷优质烃源岩的分布、原油特征及来源层系尚未进行系统剖析，仅少数学者进行了单一的有机地球化学特征研究，认为吉南凹陷芦草沟组母质类型为Ⅰ～Ⅱ$_1$型，成熟度高，生烃潜力大，沉积于湿润–半干旱、淡水–半咸水、弱还原–弱氧化至还原环境中[1-3, 8]，但尚未揭示不同亚段烃源岩地球化学特征差异，且除芦草沟组外，关于其他层位烃源岩对二叠系的原油是否存在贡献尚不明确，因此深入剖析烃源岩及原油地球化学特征尤为重要。基于总有机碳、岩石热解、组分碳同位素及饱和烃和芳烃气相色谱–质谱等实验结果，笔者对芦一段、芦二段和芦三段烃源岩的地球化学特征、生烃潜力、沉积环境和生烃母质等信息进行研究，并结合多参数指标对原油进行分类，厘清不同类型原油特征与来源，以期为该地区页岩油资源的勘探开发提供一定的理论依据。

1　研究区地质概况

阜康断裂带位于准噶尔盆地东南缘，是由多条断裂组成的复杂构造带，阜康断裂带可分为 3 段，博格达山北缘弧顶部位为中段，两翼分别为东段和西段（图 1a）[9]，受燕山–喜马拉雅构造活动影响，阜康断裂带东段在南北方向形成上盘冲断带和下盘逆掩带[1]，吉南凹陷是位于下盘逆掩带的 NW–SE 走向的箕状断陷，北部与吉木萨尔凹陷隔凸相望，南临阜康断裂带东段上盘，东临古西凸起，西接三台凸起，勘探面积约为 600 km^2（图 1b）。

准东地区在二叠纪整体处于伸展构造体制，博格达山前构造沉降幅度大，向北沉降幅度减小[10]，此时期吉南凹陷位于主沉降区，二叠系沉积厚度大，在此背景下，除下二叠统金沟组被剥蚀外，其余二叠系层位保存较完整[10]。印支期–燕山期，受多期构造挤压活动，上三叠统、上侏罗统及上白垩统均遭受强烈剥蚀[11]。喜山期，在强大的南北向挤压应力下，博格达山强烈隆升，阜康断裂带上盘发育逆冲推覆构造，并发育一系列南倾的逆冲断层，将中、新生界卷入且强烈变形，而下盘逆掩带的吉南凸起未发生明显变化[12]。钻井揭示吉南凹陷二叠系自下而上分别为乌

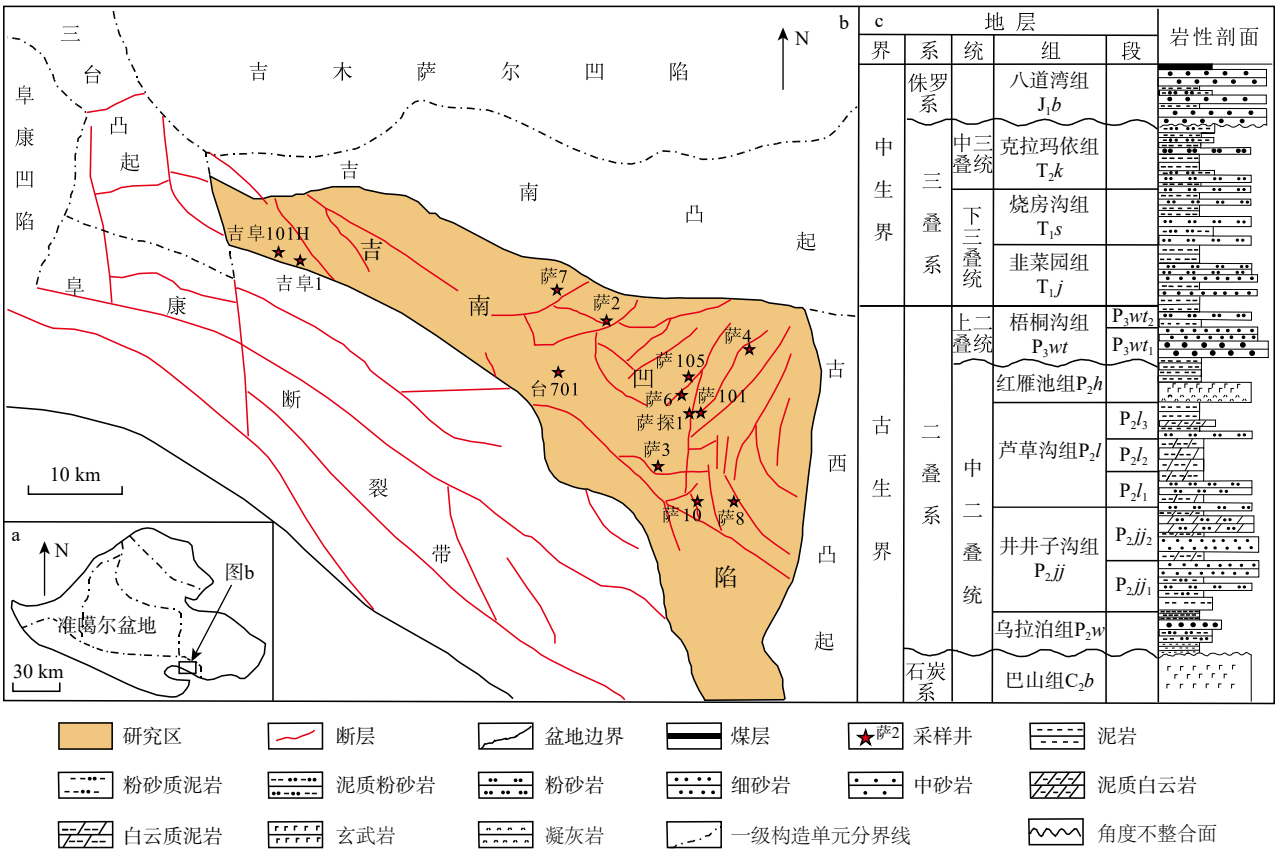


图 1　吉南凹陷区域地质构造和取样井位图（a，b）及地层综合柱状图（c）（据文献 [8] 修改）

Fig. 1　Regional geological structure and sampling well map (a, b) and stratigraphic column (c) in the Jinan Sag

拉泊组、井井子沟组、芦草沟组、红雁池组和梧桐沟组(图 1c)，其中芦草沟组为主要的生烃层系，厚度大于 200 m 的面积约为 340 m^2[3]，区域上向南具有加厚的沉积特征，岩性为油页岩夹薄层粉砂岩、泥质白云岩、砂质页岩等。

2 样品及实验方法

本次研究样品所涉及的井位见图 1b，烃源岩样品均采自芦草沟组，原油和油砂样品分别采自井井子沟组、芦草沟组、红雁池组和梧桐沟组。对样品开展的测试分析项目包括总有机碳测定、岩石热解分析、镜质体反射率测定、稳定碳同位素测定及饱和烃和芳烃色谱–质谱(GC-MS)分析，其中总有机碳由 Leco CS-230 碳硫仪进行测试分析，岩石热解参数由 OGE-VI 油气评价工作站获取，镜质体反射率测定在 Zeiss AxioScope.A1 显微镜上进行，组分碳同位素数据由 DELTA PLUS V 稳定同位素质谱仪获得。在 GC-MS 分析中，首先将样品粉碎至 3810 mm 以下，然后用索氏抽提法抽提 72 h 后获得抽提物，再用柱层析法将可萃取有机质分离为饱和烃、芳烃和极性化合物，检测依据为石油天然气行业标准《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》(SY/T5119-2008)[13]，之后对饱和烃和芳烃馏分开展 GC-MS 分析，执行标准为《气相色谱质谱法测定沉积物和原油中生物标志物》(GB/T18606-2017)[14]，测试仪器为 Agilent 6890GC/5975iMS，色谱柱为 HP-5ms(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。初始温度为 50℃，恒温 1 min 以后以 20℃/min 升温到 120℃，再以 3℃/min 升温到 310℃，恒温 10 min。载气为 He，采用恒流模式，流量为 1 mL/min，检测方式为全扫描加多离子检测。

3 烃源岩地球化学特征

与岩石骨架相比，烃源岩富含有机质，有机质岩石物理性质与岩石骨架具明显差异，而该差异正是利用测井曲线识别与评价烃源岩的岩石物理基础，一般认为，有机碳含量越高的岩层在测井曲线上的异常越大，即测井响应特征常表现出“三高一低”的特点[15]。对比不同取样井间的测井曲线变化特征可以看出(图 2)，声波时差(AC)及电阻率(RD)在纵向上的变化趋势呈现一致性，表现为随着地层埋深的变浅，二者均呈现先上升后降低的 3 段式变化特征，由此可以将芦草沟组自下而上划分为芦一段、芦二段和芦三段。

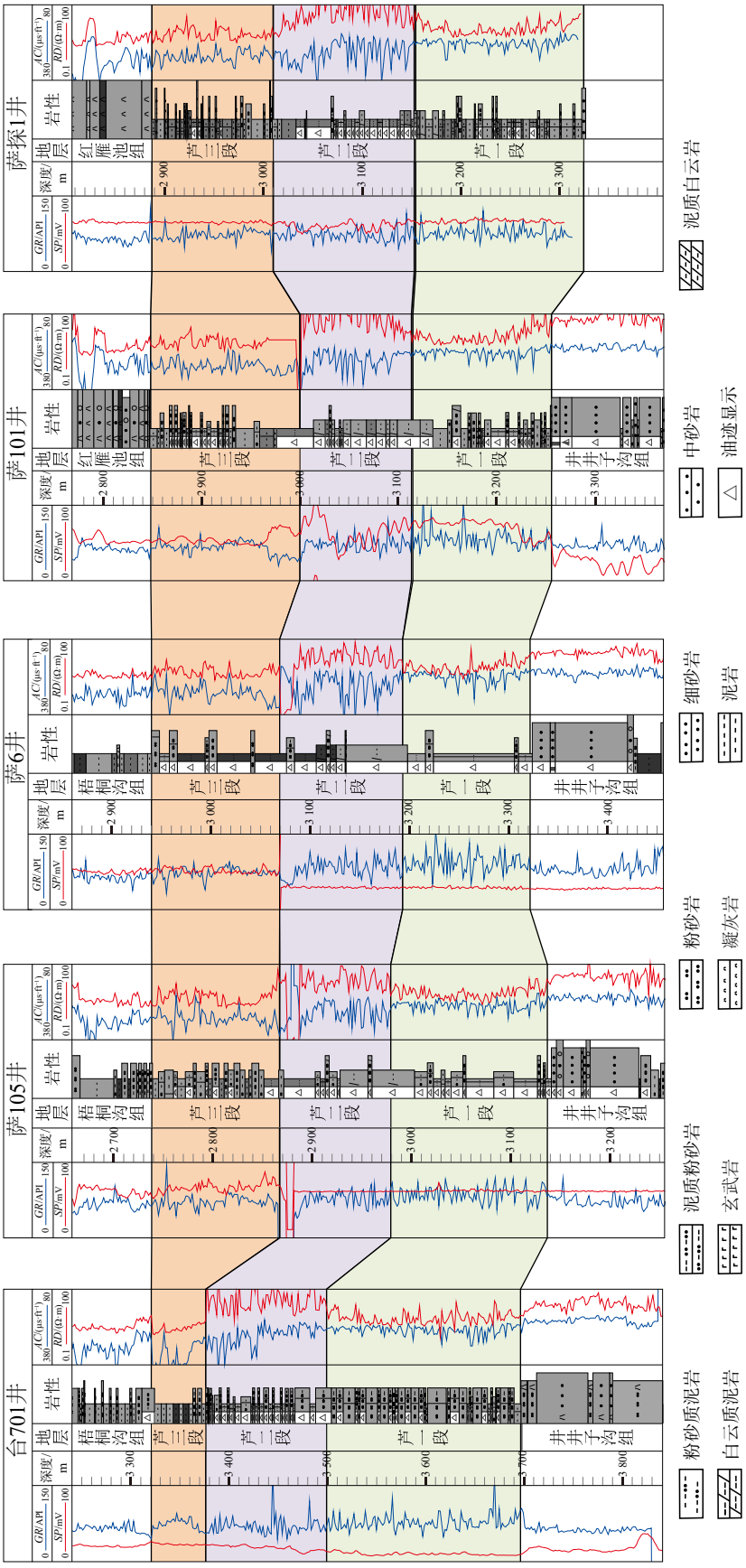
3.1 有机质丰度

有机碳含量(w(TOC))、生烃潜量(S_1+S_2)及氯仿沥青“A”含量是有机质丰度优劣评价的重要指标[16]，根据对有机质丰度评价参数的统计分析表明(表 1)，芦草沟组烃源岩的有机质富集程度在纵向上出现了明显的非均质性。芦一段烃源岩 w(TOC)为 2.81%～11.51%(平均为 5.62%)，(S_1+S_2)为 13.71～86.19 mg/g(平均为 37.56 mg/g)，w(氯仿沥青“A”)为 0.30%～0.47%(平均为 0.38%)，依据《烃源岩地球化学评价方法》(SY/T5735-2019)[17]，属于“优质”烃源岩(图 3a)；芦二段烃源岩 w(TOC)为 2.21%～24.70%(平均为 8.61%)，(S_1+S_2)为 12.33～238.26 mg/g(平均为 64.90 mg/g)，w(氯仿沥青“A”)为 0.15%～2.48%(平均为 0.64%)，相较芦一段，芦二段烃源岩 w(TOC)、(S_1+S_2)等值更高，表明其烃源岩品质更好，生烃能力更强(图 3a)；芦三段烃源岩各项有机质丰度指标最低，w(TOC)为 0.52%～1.67%(平均为 0.96%)，(S_1+S_2)为 0.16～0.51 mg/g(平均为 0.33 mg/g)，w(氯仿沥青“A”)为 0.01%～0.09%(平均为 0.04%)，在(S_1+S_2)–w(TOC)图解中(图 3a)，仅一个样品达到“好”烃源岩标准，其余均为“一般”烃源岩，在氯仿沥青“A”频率分布直方图中(图 3b)，有 50% 的样品属于“非”烃源岩，50% 为“一般”烃源岩，综合认为芦三段主要发育“非–一般”烃源岩。

3.2 有机质类型与成熟度

有机质类型决定了烃源岩的产物特征，是烃源岩评价的重要方面。芦一段烃源岩氢指数(I_H)为 404.98～854.78 mg/g(平均为 595.64 mg/g)，降解率(D)为 40.14%～72.07%(平均为 51.82%)；芦二段烃源岩氢指数(I_H)为 358.01～960.51 mg/g(平均为 667.99 mg/g)，降解率(D)为 30.44%～82.85%(平均为 58.31%)；芦三段烃源岩氢指数(I_H)为 13.51～87.04 mg/g(平均为 37.13 mg/g)，降解率(D)为 1.26%～7.53%(平均为 3.42%)。整体上，芦二段烃源岩 I_H 与 D 的值最高，芦一段次之，芦三段最低(表 1)。有机质类型判别结果表明(图 4)，芦一段和芦二段烃源岩有机质类型好，为Ⅰ～$Ⅱ_1$型，倾向于生油，芦三段烃源岩有机质类型较差，主要为Ⅲ型，倾向于生气。

有机质成熟度的高低决定了有机质向油气转化的程度，镜质体反射率(R_o)及最大热解峰温(T_{max})是定量评价的常用指标[16-17]。芦一段烃源岩 T_{max} 介于 431～442℃(平均为 438℃)，R_o 为 0.64%～0.66%(平均为 0.65%)；芦二段烃源岩 T_{max} 介于 433～448℃



GR. 自然伽马；*SP*. 自然电位；*AC*. 声波时差；*RD*. 深双侧向电阻率

图 2　吉南凹陷中二叠统芦草沟组连井剖面（井位见图 1）

Fig. 2　Profile from the Middle Permian Lucaogou Formation in the Jinan Sag

表 1　吉南凹陷芦草沟组烃源岩有机地球化学数据

Table 1　Geochemical parameters of the source rocks of the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

层位	w(TOC)/%	T_{max}/℃	(S_1+S_2)/(mg·g^{-1})	I_H/(mg·g^{-1})	D/%	R_o/%	w(氯仿沥青“A”)/%
芦三段P_2l_3	0.52 ~ 1.67 0.96(9)	436~500 461(9)	0.16~0.51 0.33(9)	13.51~87.04 37.13(9)	1.26~7.53 3.42(9)	1.25~1.36 1.30(4)	0.01~0.09 0.04(6)
芦二段P_2l_2	2.21~24.70 8.61(46)	433~448 442(46)	12.33~238.26 64.90(46)	358.01~960.51 667.99(46)	30.44~82.85 58.31(46)	0.56~0.91 0.75(22)	0.15~2.48 0.64(36)
芦一段P_2l_1	2.81~11.51 5.62(10)	431~442 438(10)	13.71~86.19 37.56(10)	404.98~854.78 595.64(10)	40.14~72.07 51.82(10)	0.64~0.66 0.65(3)	0.30~0.47 0.38(3)

注：w(TOC)= [0.83×(S_0+S_1+S_2)+S_4]/10；S_0为气态烃；S_1为游离烃；S_2为热解烃；S_4为有机二氧化碳；T_{max}为最大热解峰温；I_H为氢指数，I_H=S_2/w(TOC)×100%；D为降解率，D=CP/w(TOC)×100%，CP为有效碳；R_o为镜质体反射率；w(氯仿沥青“A”)为可溶有机质抽提质量分数；$\frac{0.52 \sim 1.67}{0.96(9)}$ 表示 $\frac{\text{平均值}-\text{最大值}}{\text{平均值(样品个数)}}$；下同

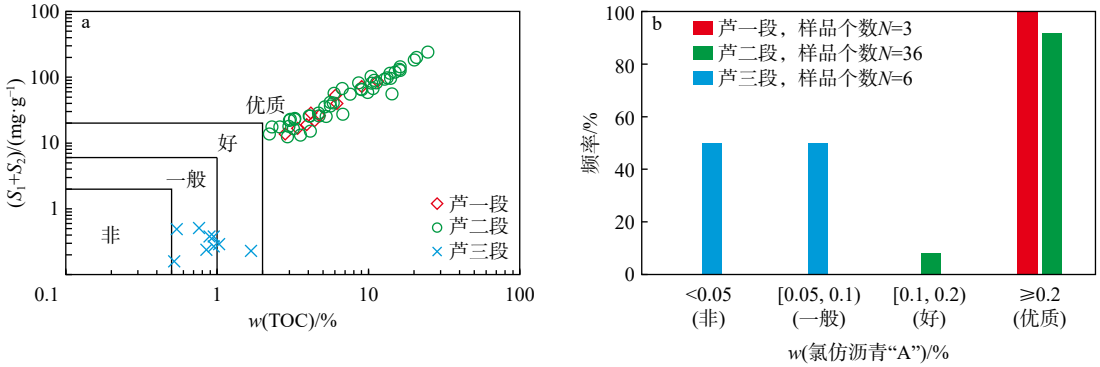


图 3　吉南凹陷芦草沟组烃源岩有机质丰度评价

Fig. 3　Evaluation of organic matter abundance of the source rocks from the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

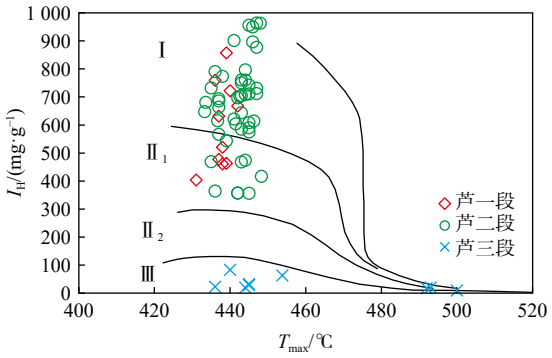


图 4　吉南凹陷芦草沟组烃源岩有机质类型划分（Ⅰ，Ⅱ$_1$，Ⅱ$_2$和Ⅲ均为有机质类型编号；下同）

Fig. 4　Classification of organic matter types of the source rocks from the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

(平均为 442℃)，R_o 为 0.56% ~ 0.91%(平均为 0.75%)，芦一段和芦二段有机质总体表现出低熟–成熟的特征；芦三段烃源岩 T_{max} 为 436 ~ 500℃(平均为 461℃)，R_o 介于 1.25% ~ 1.36% 之间(平均为 1.30%)(表 1)，T_{max} 值揭示芦三段样品于低熟–高成熟阶段均有分布，但 R_o 表明其有机质为成熟–高成熟阶段，二者指示结果存在较大差异，从样品分布特征来看，本次芦三段泥岩涉及的深度变化范围有限(2892.46 ~ 2941.25 m)，所以 T_{max} 值波动较大的原因可能与热解烃 S_2 值偏低导致的误差相关，另外需要注意的是，虽然岩石热解参数能有效判别有机质类型，但当成熟度较高时，利用热解参数识别有机质类型的准确性有待商榷，因为高成熟烃源岩具有特殊性，其生烃潜量、氢指数和氧指数等结果普遍偏低，评价结果基本显示为类型偏差的Ⅲ型烃源岩[18]，因此上述评价结果不能真实反映芦三段有机质特征，本研究将利用分子地球化学方法判别其有机质类型。

通常来说，烃源岩的变质程度随埋深的增加而有规律地增加，称为希尔特定律[19]，但芦三段烃源岩的热演化程度出现了显著的倒转现象，一般认为，这种违反希尔特定律的现象是由于受到了异常热源的影响所导致的[20]。火山活动会对烃源岩的形成、发育以及生烃演化作用产生重大影响，岩浆活动形成的火山岩体及侵入岩体会带来强大的热源，这种异常热源的烘烤乃至接触作用会加速下伏地层沉积有机质的演化，导致有机质提前进入成熟甚至过成熟阶段[20]。在吉南凹陷东北部，芦草沟组上覆地层红雁池组中普遍发育火山岩，平均厚度高达 134 m[2]，该地层沉积形成时期，准噶尔盆地及邻区地壳活动强烈，火山活动广泛且频繁[21]，其中红雁池组泥岩实测 R_o 为 1.28% ~ 2.10%(平均为 1.61%，样品个数

N=4), 有机质同样显示出高成熟特征, 因此芦三段与红雁池组泥岩热演化程度异常的原因与火山活动密切相关, 而在较高的成熟度下, 烃类会发生大量裂解, 所以这种异常热源作用也是导致芦三段烃源岩 TOC 含量、生烃潜量等值较低的根本原因。

4　烃源岩形成条件

4.1　沉积环境

沉积有机质中姥鲛烷(Pr)、植烷(Ph)主要来源于陆生植物叶片、古细菌和微生物等[22], 其比值常用于判断沉积环境的氧化还原条件, Pr/Ph 值小于 0.5 指示强还原环境; Pr/Ph 值为 [0.5, 1.0), 指示还原环境; Pr/Ph 值为 [1.0, 2.0], 指示弱还原–弱氧化环境; Pr/Ph 值大于 2.0, 指示偏氧化环境[22]。芦一段 Pr/Ph 值介于 0.48 ~ 1.09(平均为 0.84); 芦二段 Pr/Ph 值介于 0.60 ~ 1.05(平均为 0.84); 芦三段 Pr/Ph 值介于 0.38 ~ 0.99(平均为 0.74)。芦草沟组绝大多数样品 Pr/Ph 值介于 0.5 ~ 1.0 之间, 具明显植烷优势, 说明烃源岩发育时期主体处于还原环境, 个别样品的 Pr/Ph 值低于 0.5, 指示了强还原或高盐度环境(表 2)。一般而言, 咸化湖盆环境中有机质的破坏量主要由保存环境决定, 保存环境趋于还原会降低有机质的破坏量[23], 芦草沟组偏还原的沉积古环境, 促进了有机质的保存。

SHANMUGAN[24] 提出的 Pr/nC_{17}–Ph/nC_{18} 交汇图在评价烃源岩母质类型、沉积环境等方面得到了广泛的应用, 研究区芦一段数据点在该图版中位于咸化湖盆/还原环境区域, 芦二段与芦三段中有 38% 的样品处于混合型有机质、半氧化–半还原区域(图 5), 说明芦草沟组烃源岩沉积时期的还原性随时间有所减弱, 芦三段烃源岩母质类型为腐泥型或

表 2　吉南凹陷芦草沟组（P_2l）烃源岩生物标志化合物参数统计

Table 2　Biomarkers parameter statistics of the source rocks from the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

层位	nC_{21}-/nC_{22+}	*TAR*	短链/%	中链/%	长链/%	7-+8-MeC_{17}/nC_{max}	Pr/Ph
芦三段P_2l_3	0.44~1.22 0.80(7)	0.38~1.43 0.79(7)	23.37~46.93 34.97(7)	38.52~55.39 45.31(7)	14.18~28.19 19.75(7)	0.01~0.27 0.12(7)	0.38~0.99 0.74(7)
芦二段P_2l_2	0.33~1.14 0.63(29)	0.30~2.14 0.95(29)	17.52~42.36 28.60(29)	44.63~57.40 50.28(29)	10.78~33.53 20.82(29)	0.01~0.28 0.05(29)	0.60~1.05 0.84(29)
芦一段P_2l_1	1.64~2.55 2.07(4)	0.19~0.34 0.25(4)	53.06~64.24 58.20(4)	25.93~33.25 30.48(4)	8.65~14.31 11.01(4)	0.13~0.36 0.21(4)	0.48~1.09 0.84(4)

层位	Pr/nC_{17}	Ph/nC_{18}	β-胡萝卜烷/nC_{max}	伽马蜡烷/C_{30}藿烷	C_{24}TeT/C_{26}TT	(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{21}TT	C_{31}22S/(22S+22R)
芦三段P_2l_3	0.57~0.79 0.71(7)	0.47~1.25 0.77(7)	0.11~0.93 0.42(7)	0.22~0.30 0.25(7)	0.82~0.92 0.86(7)	0.61~1.39 1.05(7)	0.58~0.61 0.60(7)
芦二段P_2l_2	0.22~2.29 0.73(29)	0.18~5.01 0.94(29)	0~1.75 0.35(29)	0.07~0.29 0.20(29)	0.63~2.78 1.51(29)	0.85~2.00 1.36(29)	0.47~0.54 0.52(29)
芦一段P_2l_1	0.85~1.26 1.02(4)	1.39~4.36 2.22(4)	1.06~3.59 1.86(4)	0.40~0.42 0.41(4)	0.98~1.05 1.01(4)	0.78~1.23 0.97(4)	0.49~0.51 0.50(4)

层位	C_{29}αββ/(αββ+ααα)	C_{29}20S/(20S+20R)	C_{30}αα/αβ	甾烷/藿烷	C_{27}St/%	C_{28}St/%	C_{29}St/%
芦三段P_2l_3	0.36~0.44 0.39(7)	0.47~0.52 0.49(7)	0.04~0.05 0.04(7)	0.22~0.31 0.26(7)	12.34~20.33 15.78(7)	32.54~39.38 37.10(7)	44.78~50.18 47.41(7)
芦二段P_2l_2	0.18~0.27 0.22(29)	0.14~0.26 0.20(29)	0.06~0.11 0.09(29)	0.12~0.55 0.30(29)	12.43~26.39 18.28(29)	32.56~55.15 41.62(29)	28.85~51.56 39.85(29)
芦一段P_2l_1	0.23~0.26 0.25(4)	0.15~0.23 0.19(4)	0.09~0.11 0.10(4)	0.32~0.40 0.36(4)	8.33~14.22 11.90(4)	33.22~43.36 38.44(4)	43.76~55.11 49.66(4)

层位	C_{28}/ C_{29}St/%	C_{35}/(C_{31}-C_{35})	*MPR*	*MPI*-3	∑三环萜烷/∑藿烷	C_{21+22}孕甾烷/规则甾烷	C_{29}降藿烷/C_{29}降莫烷
芦三段P_2l_3	0.65~0.88 0.78(7)	0.03~0.06 0.05(7)	1.57~1.89 1.72(7)	1.01~1.31 1.18(7)	0.11~0.25 0.17(7)	0.14~0.24 0.18(7)	6.17~7.90 6.94(7)
芦二段P_2l_2	0.68~1.91 1.01(29)	0.03~0.06 0.04(29)	0.74~1.26 0.99(24)	0.60~0.97 0.78(24)	0.03~0.16 0.07(29)	0.02~0.08 0.03(29)	2.65~4.44 3.60(29)
芦一段P_2l_1	0.60~1.00 0.79(4)	0.06~0.08 0.07(4)	0.50~1.24 0.86(4)	0.71~0.83 0.74(4)	0.04~0.08 0.06(4)	0.01~0.08 0.03(4)	2.56~3.21 2.86(4)

注: *TAR*为陆水生比值, *TAR*=(nC_{27}+nC_{29}+nC_{31})/(nC_{15} + nC_{17} + nC_{19}); 短链= [∑(nC_{14}-nC_{20})/∑(nC_{min}-nC_{max})]×100%; 中链= [∑(nC_{21}-nC_{26})/∑(nC_{min}-nC_{max})]×100% ; 长链= [∑(nC_{27}-nC_{40})/∑(nC_{min}-nC_{max})]×100%; Me为单甲基十七烷; Pr为姥鲛烷; Ph为植烷; nC_{max}为正构烷烃主峰碳; TeT为四环萜烷; TT为三环萜烷; C_{30}αα为C_{30}-αα藿烷; C_{30}αβ为C_{30}-αβ藿烷; St为规则甾烷; C_{35}/(C_{31}-C_{35})为升藿烷指数; *MPR*为甲基菲比值, *MPR*=2-MP/1-MP; *MPI*-3为甲基菲指数, *MPI*-3=(3-MP+2-MP)/(9-MP+1-MP), MP为甲基菲; 1-MP为1-甲基菲; 2-MP为2-甲基菲; 3-MP为3-甲基菲; 9-MP为9-甲基菲; 下同

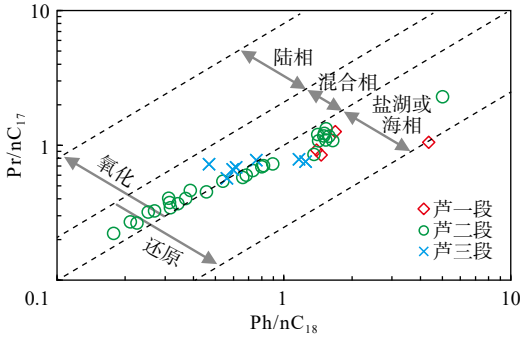


图 5　Pr/nC_{17}–Ph/nC_{18} 关系图

Fig. 5　Cross plot of Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18}

含腐殖的腐泥型。

伽马蜡烷主要来源于食菌纤毛虫在分层水体条件下合成的四膜虫醇，而水体分层通常由盐度分层导致，因此伽马蜡烷的富集可以作为水体分层、高盐度沉积环境的标志[25]。芦草沟组不同层段烃源岩中伽马蜡烷含量存在显著差异(图 6a ~ c，表 2)，指示水体咸化和分层程度有所区别，由图 7 可知，芦一段形成于咸水水体分层环境中，芦二段为淡水–半咸水水体分层环境，芦三段为微咸–半咸水水体分层环境。芦二段较差的水体分层条件主要与相对较高的陆源高等植物输入相关[8]，陆源高等植物被陆源水体携带，并大量注入湖盆，导致了沉积水体的更加循环和较差的分层。

β-胡萝卜烷是由类胡萝卜素结构的色素衍生而来的一种全饱和的 C_{40} 双环烷，来源于 β-胡萝卜烯，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 胡萝卜烷被广泛接受为指示缺氧、盐湖相或局限性海相环境[26-27]。芦一段烃源岩中最富集该化合物(β-胡萝卜烷/ nC_{max} 为 1.06 ~ 3.59，平均为 1.86)；芦二段烃源岩 β-胡萝卜烷含量相对最低(β-胡萝卜烷/ nC_{max} 为 0 ~ 1.75，平均为 0.35)；芦三段 β-胡萝卜烷含量介于芦一段和芦二段之间(β-胡萝卜烷/ nC_{max} 为 0.11 ~ 0.93，平均为 0.42)。β-胡萝卜烷指数与伽马蜡烷指数指示结果一致，即芦一段沉积期具有最强的缺氧和咸化程度，其次为芦三段，而芦二段缺氧和咸化程度最低。

4.2　成烃生物

正构烷烃的分布与组成特征可以用于评价有机质来源。菌藻类等低等生物的正构烷烃以短链为主(<nC_{21})，沉水或浮水型等水生植物的正构烷烃以中链为主(nC_{21} ~ nC_{25})，高等植物的正构烷烃则集中在长链 nC_{27} ~ nC_{31}[28]。在表 2 和图 6b，c 中，芦一段烃源岩正构烷烃以短链为主(主峰碳为 nC_{15}、nC_{17})，其参数 nC_{21}-/nC_{22+}和 *TAR* 值分别介于 1.64 ~ 2.55(均值 2.07)、0.19 ~ 0.34(均值 0.25)，表明成烃生物中细菌或藻类等低等水生生物的主要贡献；芦二段烃源岩中链正构烷烃占据主要优势(主峰碳为 nC_{21}、nC_{23}、

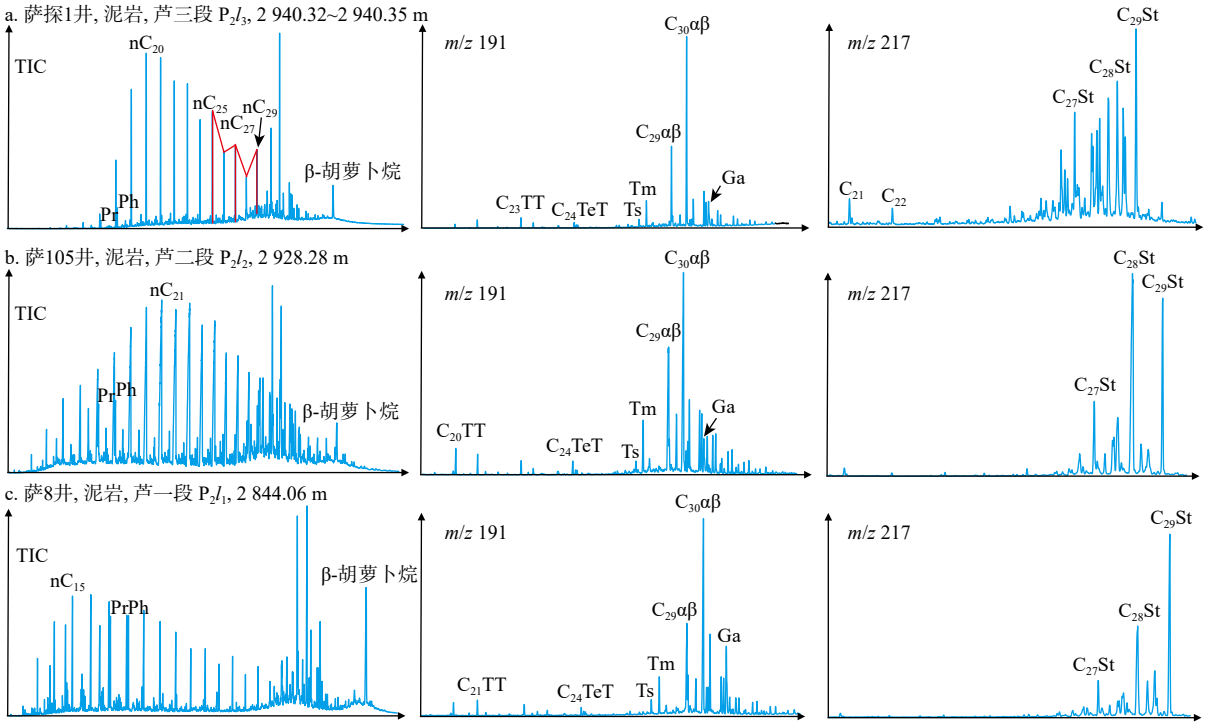


图 6　吉南凹陷芦草沟组不同层段烃源岩生物标志物质量色谱图（TIC 为总离子流图；*m/z* 为质荷比；Ga 为伽马蜡烷；Ts 和 Tm 分别为 18α(H) 和 17α(H)–三降藿烷；下同）

Fig. 6　Mass chromatograms of biomarkers of the source rocks in different intervals of the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

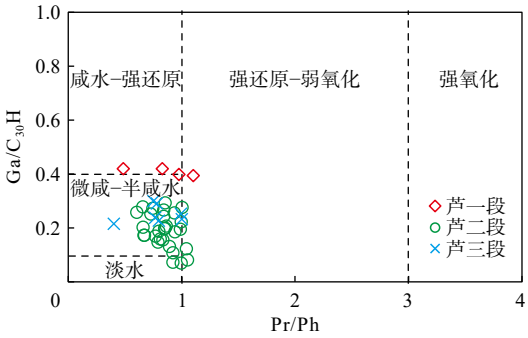


图 7　Ga/C_{30}H−Pr/Ph 关系图

Fig. 7　Cross plot of Ga/C_{30}H vs. Pr/Ph

nC_{25}), nC_{21}-/nC_{22+}和 *TAR* 值分别为 0.33 ~ 1.14(均值 0.63)、0.30 ~ 2.14(均值 0.95), 反映成烃生物中水生植物的主要来源。芦三段样品基本处于高成熟阶段, 因此利用正构烷烃参数无法准确反映生物输入的相对比例, 但值得注意的是, 在 GC−MS 中, 芦三段部分样品的 nC_{25} ~ nC_{29} 系列化合物存在一定奇数碳优势(图 6a), 而高碳数奇碳优势往往代表低成熟度和高等植物角质蜡的生源特征[16], 因此这种特殊分布的正构烷烃更可能受控于特定生源, 刘宝泉等[29] 和黄第藩等[30] 在对下马岭组页岩干酪根(镜下鉴定为腐泥型)和现代浮游蓝藻的热解生烃模拟实验中发现, 藻类在高温热解阶段可以产生较大浓度的蜡质烃, 使其正构烷烃在高碳数部位具明显奇碳优势(nC_{25} ~ nC_{29}), 李景贵[31] 在四川盆地和鄂尔多斯盆地下古生界、前寒武系高成熟烃源岩抽提物中也发现了类似的特征, 对比鄂尔多斯盆地下奥陶统抽提物和下马岭组页岩干酪根热解产物中的正构烷烃分布(图 8), 芦三段样品与其非常类似, 由此可推测, 这种不寻常的正构烷烃主要来源于高成熟烃源岩中的浮游蓝藻[30]。

萜烷系列化合物中的 C_{19}TT 和 C_{20}TT 源自维管植物产生的二萜类化合物, 通常代表高等植物的贡献, 高丰度的 C_{24}TeT 常在煤系地层或富含高等植物输入的沉积有机质中检出, 也可指示陆源有机质的输入[32-33], 芦二段烃源岩 C_{24}TeT/C_{26}TT 和(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{21}TT 的值明显高于芦一段和芦三段, 说明该段烃源岩除来自藻类和微生物贡献外, 还含有较多陆源高等植物输入(图 9)。

C_{27} 甾烷主要来自浮游生物和红藻类, C_{28} 甾烷主要来自浮游植物, 如甲藻、沟鞭藻及绿藻等[34], C_{29} 甾烷代表高等植物的输入, 但在缺乏陆源有机质输入的情况下, C_{29} 甾烷的富集可能与蓝藻水华相关[35]。虽然许多藻类都能合成 C_{28} 甾烷, 但除绿藻外, 甲藻、硅藻等其余藻类在三叠纪以后才大量出现[36], 因此芦草沟组烃源岩中 C_{28} 甾烷的来源应为绿藻。结合前文, 芦草沟组沉积时期烃源岩母质中高等植物输入的比例随时间先增加后减少(图 9), 但 C_{29} 甾烷含量的变化却与之相反(表 2), 因此 C_{29} 甾烷并不完全来源于高等植物, 古微生物研究表明, 准东地区中二叠统烃源岩中较高丰度的 C_{29} 甾烷主要来源于蓝细菌(蓝藻)[37]。7-+8-单甲基十七烷的检出进一步证实了蓝藻在整个芦草沟组中广泛分布(图 10), 该化合物通常于蓝细菌席中检出[38], 因而被认定是蓝藻的典型生物标志化合物, 可用(7-+8-)MeC_{17}/nC_{max} 衡量其丰度[39]。研究区 7-+8-单甲基十七烷指数和 C_{29} 甾烷相对丰度相关性较好, 表征了二者的同源性(图 11a), 此外, 在 7-+8-单甲基十七烷含量较高的样品中, β-胡萝卜烷也更为富集(图 11b), 这一现象说明蓝藻也可能是芦草沟组胡萝卜烷类化合物的主要生源[40]。规则甾烷分布和变化特征的分析表明, 芦一段和芦三段样品的甾烷在质谱图中显示出阶梯升

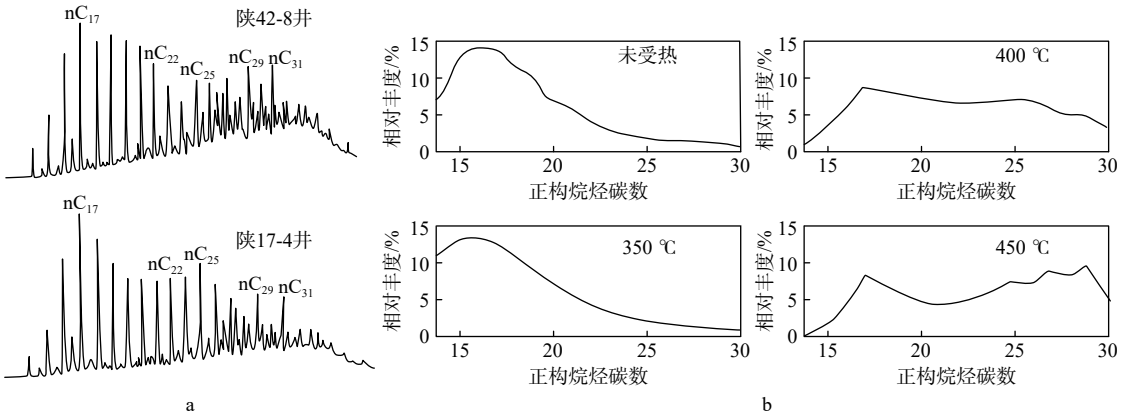


图 8　鄂尔多斯盆地下奥陶统碳酸盐岩样品抽提物 (a) 及下马岭组页岩干酪根热解产物中正构烷烃分布 (b)(据文献 [31] 修改)

Fig. 8　Distribution of n-alkanes of carbonate samples from the Lower Ordovician (a) and kerogen pyrolysis products from the Xiamaling Formation shale (b) in Ordos Basin

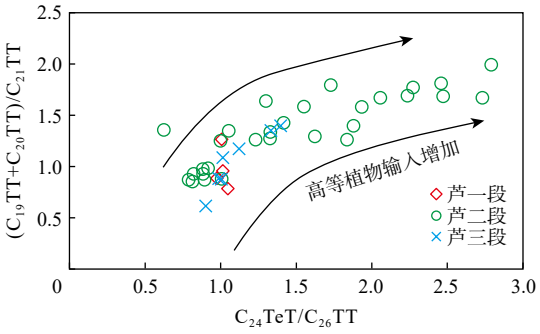


图 9　$(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{21}TT$ 和 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 关系图

Fig. 9　Cross plot of $(C_{19}TT+C_{20}TT)/C_{21}TT$ vs. $C_{24}TeT/C_{26}TT$

高，总体更富集 C_{29} 甾烷，芦二段除了呈“上升型”分布外，部分样品呈倒“V”型分布，C_{28} 甾烷占一定优势(图 6)，因此蓝藻和绿藻在芦草沟组不同演化阶段中的输入量存在显著差异。

4.3　生物−环境协同相应

准东地区二叠系芦草沟组原始沉积环境为残留海封闭后的咸化湖盆，发育半深湖−深湖相沉积[41]，而盐湖水体常呈现分层特性，这将导致能够适应不同盐度范围的宏观及微观生物种类依次繁盛和衰亡，从而形成随着盐湖演化相对应的生物演化序列[42]。吉南凹陷芦草沟组分别发育蓝藻和绿藻 2 种特征母质，对生烃具有重要意义，但其含量在各段内变化显著，从生物的耐盐度来看(图 12)，绿藻绝大多数倾向于在中等盐度的水体中富集，仅如杜氏藻属（*Dunaliella*）等少数绿藻能适应高盐环境，而蓝藻则更倾向于在高盐度的水体中富集，如嗜盐隐杆藻（*Aphanothece halophytica*）可在盐度高达 150‰ ~ 180‰的盐湖层状藻席中广泛分布[43]，由此可见，湖盆水体盐度的差异是影响不同生物生长速率和种类繁盛的关键因素。

芦草沟组沉积水体环境演化与成烃生物组成协同响应，表现生物组成指标 C_{28}/C_{29} 与在指征环境的 C_{35} 升藿烷指数、伽马蜡烷指数之间具有显著相关性(图 13a, b)。芦一段和芦三段沉积时期，水体盐度总体水平较高，还原性强，此时期不耐盐的藻类生长受到抑制，因而蓝藻成为优势类群种而大量勃发，生物标志化合物组成表现为低的 C_{28}/C_{29}（平均值分别为 0.79, 0.78）；芦二段沉积时期，水体盐度和还原性明显有所减弱，适宜的生存条件使得绿藻大量繁盛，导致 C_{28}/C_{29} 整体升高(平均为 1.01)(表 2)。

此外，由于海洋和湖泊中不同浮游藻类的生物化学大分子组成有很大差异(如它们细胞内的脂类化合物、碳水化合物、蛋白质等组成和含量不同)，因此不同门类的藻类其液态烃类化合物的特征和分布将存在明显不同，来源于蓝藻的液态烃类常以低碳数烷烃占优势，且常以 nC_{17} 为主峰，而真核绿藻类液态烃则以中−高碳数烷烃占优势，通常以 nC_{25} 为主峰[44]，这种烃类分布差异在芦草沟组烃源岩的正构烷烃分布中也得到了体现，进一步证实了芦草沟组中存在 2 种特征生烃母质。而对于不同类型的烃源岩，达到生油高峰时的产率也具有显著差异，例如杜氏藻型烃源岩生油高峰时的产率可达 836.31 mg/g TOC，而典型红藻型烃源岩的生油高峰产率仅为 363.71 mg/g TOC[45]，因此生物组成的差异性必然会体现在基本地球化学参数上，使得芦草沟组不同层段烃源岩具有不同的生油气能力。

4.4　热演化

甾烷和藿烷的立体异构化比值已被广泛地用于评价成熟度[46]，如 C_{31} 升藿烷 22S/(22S+22R)值在热演化过程中会从 0 增加到 0.6；C_{29}20S/(20S+20R)和 C_{29}ββ/(αα+ββ) 达其平衡值时分别为 0.5 和 0.7；17α, 21β(H)-藿烷与其相对应的 17β, 21α(H)-莫烷的比值也会随着成熟度的升高而增加。在芳烃系列化合物中，RADKE 等[47] 首先提出甲基菲比值(*MPR*=2-MP/1-MP)和甲基菲指数(*MPI*-3=(3-MP+ 2-MP)/(9-MP+1-MP))作为成熟度参数，在甲基菲异构体中，由于

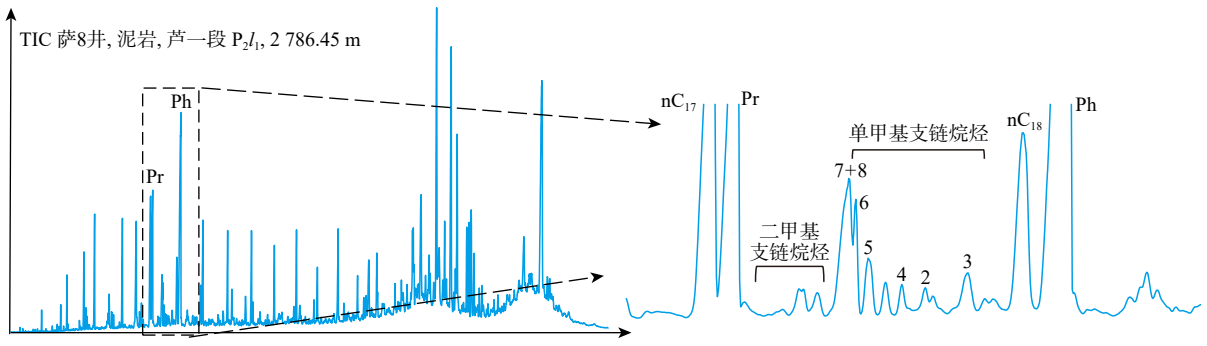


图 10　芦草沟组烃源岩典型样品的 7-+8-单甲基十七烷质量色谱图（2 ~ 8 均为单甲基烷烃位置）

Fig. 10　Mass chromatograms of 7- + 8- monomethyl hepadecanes from typical source rock samples of the Lucaogou Formation in the Jinan sag

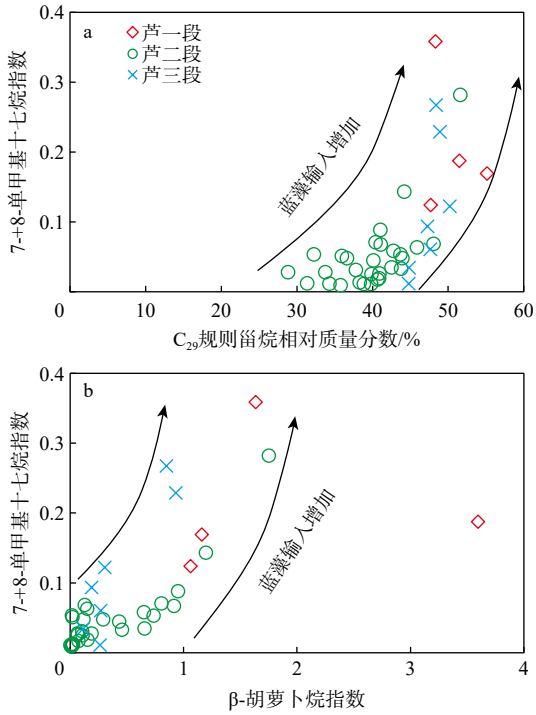


图 11　芦草沟组烃源岩成烃生物判别图

Fig. 11　Identification map of the biological source rocks from the Lucaogou Formation

α 位取代基的不稳定性高于 β 位取代基，因此随热成熟度增加，1-MP 和 9-MP 会向更稳定的 2-MP 和 3-MP 转化，通过分析饱和烃与芳烃中不同的成熟度指标可知，芦一段和芦二段烃源岩热演化程度整体低于芦三段，其成熟度为低成熟，而芦三段已达到或超过生油的主要时期（部分样品超过平衡区），显示出成熟或高成熟有机质特征（表 2，图 14a，b）。

众所周知，藿烷类化合物依据构型的变化可将其分为 4 个系列，分别为 ββ-构型藿烷、αβ-构型藿烷、βα-构型莫烷及 αα-构型藿烷，目前，前 3 种构型藿烷的地球参数已成功应用于石油勘探中并在油源对比、判别成熟度和油气运移等方面发挥着重要的作用，但鲜有学者关注 αα-构型藿烷的地球化学意义及其潜在的实用性，基于前人色谱–质谱特征研究，笔者在吉南凹陷芦草沟组烃源岩和二叠系油样中鉴定出了丰富的 C_{30}αα-藿烷（图 15），但在不同样品间，其相对丰度存在明显差异（表 2），基于分子力学计算的结果（αα-藿烷的稳定性要低于 αβ-和 βα-藿烷，但比 ββ-藿烷稳定）和藿烷异构体之间的转换机制[48-49]，笔者推测这种现象可能主要受控于热演化程度，C_{30}αα/αβ 与不同成熟度参数之间的相关性较好，表明 C_{30}αα/αβ 可能为潜在的热演化程度判识指标（图 16a，d）。在研究区，C_{30}αα-藿烷也可作为区分芦一段、芦二段（C_{30}αα/αβ>0.04）和芦三段烃源岩（C_{30}αα/αβ≤0.04）一种特有的生物标志化合物。

5　二叠系油气来源分析

原油中记录了大量的生物标志化合物，为油源对比提供了重要依据，本次研究从指纹谱图特征、有机质生物来源、沉积环境、成熟度等方面开展吉南凹陷二叠系油源对比，通过分析原油中有机地球化学组成特征，将吉南凹陷二叠系原油划分为 3 类，各类原油的地球化学指标和谱图分别表现出不同的特征（图 17，表 3）。

首先从热演化程度来看，吉南凹陷二叠系原油和油砂样品的有机质均处于低熟–成熟范畴，基于前述烃源岩地球化学特征，芦三段烃源岩与二叠系油样的成熟度不匹配（图 18a，b），且受火山岩的直接接触或烘烤作用，该段烃源岩的生烃能力基本丧失，其有效性较差，因此暂不考虑芦三段烃源岩对油藏的贡献。

3 类原油的迥异主要体现在成烃生物、沉积环境及一些特定的生物标志化合物等方面，研究选用了 $\Sigma nC_{21-}/\Sigma nC_{22+}$、*TAR*、伽马蜡烷指数、∑三环萜烷/∑藿烷、$C_{21+22}$ 孕甾烷/规则甾烷等地球化学参数，这些指标在不同类型的原油中具有相对明显的差异，作出不同类型原油各个参数相关性图可以看出

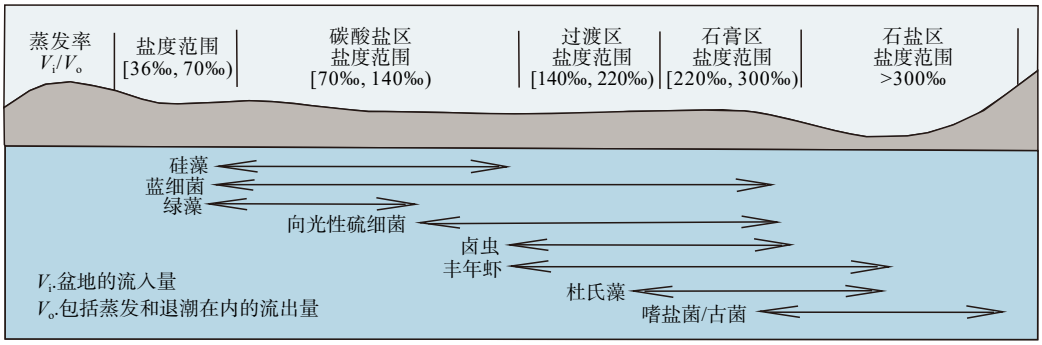


图 12　不同耐盐生物的典型盐度范围（据文献 [43] 修改）

Fig. 12　Typical salinity range of halotolerant organisms

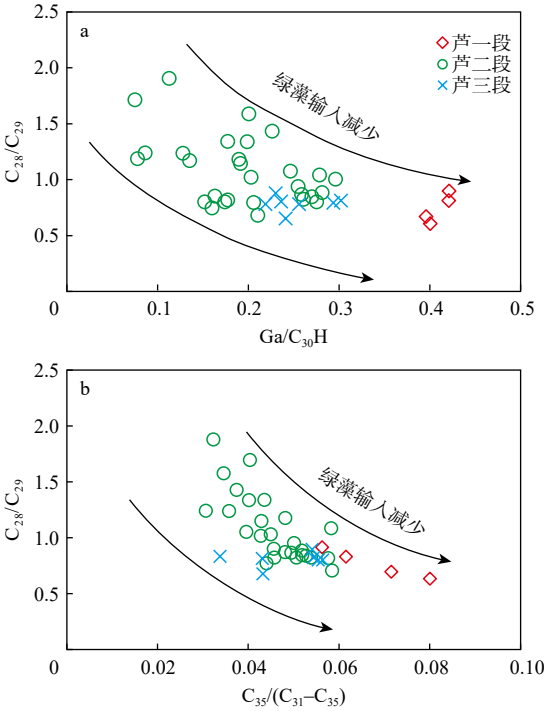


图 13　绿藻丰度随盐度变化相关关系

Fig. 13　Relationship between green algae abundance and water salinity

(图 19a, d)，A 类原油特征为具有中等的 ΣnC_{21}-/ΣnC_{22}+和 *TAR* 值，在 3 类原油中，伽马蜡烷含量最高，指示母质中低等水生生物的主要贡献和沉积期较高的水体咸度；B 类原油特征为具有最低的 ΣnC_{21}-/ΣnC_{22}+和最高的 *TAR* 值，伽马蜡烷含量相对较低，反映存在较高陆源有机质的输入和沉积期相对较低的水体咸化程度，A、B 类原油碳同位素差异不大，因此成烃生物和沉积环境是区分二者的主要标志。C 类原油生物标志化合物组成特征明显不同于前两类，首先，A、B 类原油中普遍含有一定丰度的 β-胡萝卜烷，但在 C 类原油中基本检测不到该化合物，其次，该类原油具有极高丰度的孕甾烷(C_{21}, C_{22})和三环萜烷系列化合物，同时在正构烷烃中，长链正构烷烃同系物含量极低，生物标志化合物组成表现为具有最高的∑三环萜烷/∑藿烷、C_{21+22} 孕甾烷/规则甾烷、ΣnC_{21-}/ΣnC_{22+}以及最低的 *TAR* 值，最后，组分碳同位素特征显示，C 类原油中各组分的碳同位素值均重于−30‰，相比 A 类和 B 类原油，C 类原油中各组分的碳同位素值明显偏重。

具有亲缘关系的原油与烃源岩应具有相似的生物标志化合物特征，通过对比 3 类原油与芦草沟组烃源岩指纹谱图特征和各类地球化学指标可以得出，A 类原油与芦一段烃源具有较好的亲缘性，B 类原油与芦二段烃源岩的特征十分相似，但 C 类原油存在非芦草沟组油源的特征，揭示可能存在其他烃源岩，针对该类原油，笔者认为它极有可能来自井井子沟组上部泥岩，原因如下：①从总有机碳和岩石热解

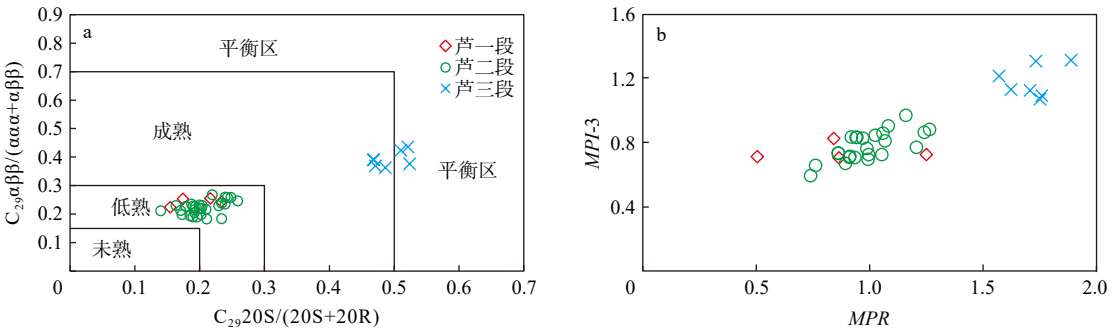


图 14　吉南凹陷芦草沟组烃源岩成熟度评价

Fig. 14　Maturity evaluation of the source rocks from the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

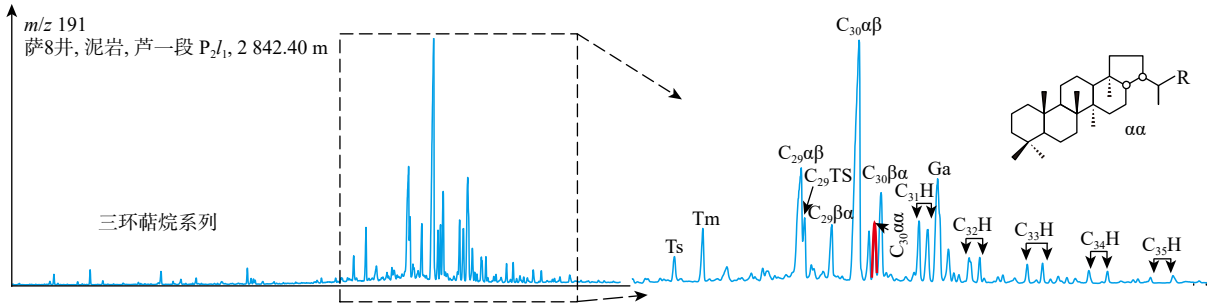


图 15　吉南凹陷芦草沟组烃源岩典型样品中 $C_{30}\alpha\alpha$-藿烷分布

Fig. 15　Distribution of $C_{30}\alpha\alpha$-hopane in typical source rock samples from the Lucaogou Formation in the Jinan Sag

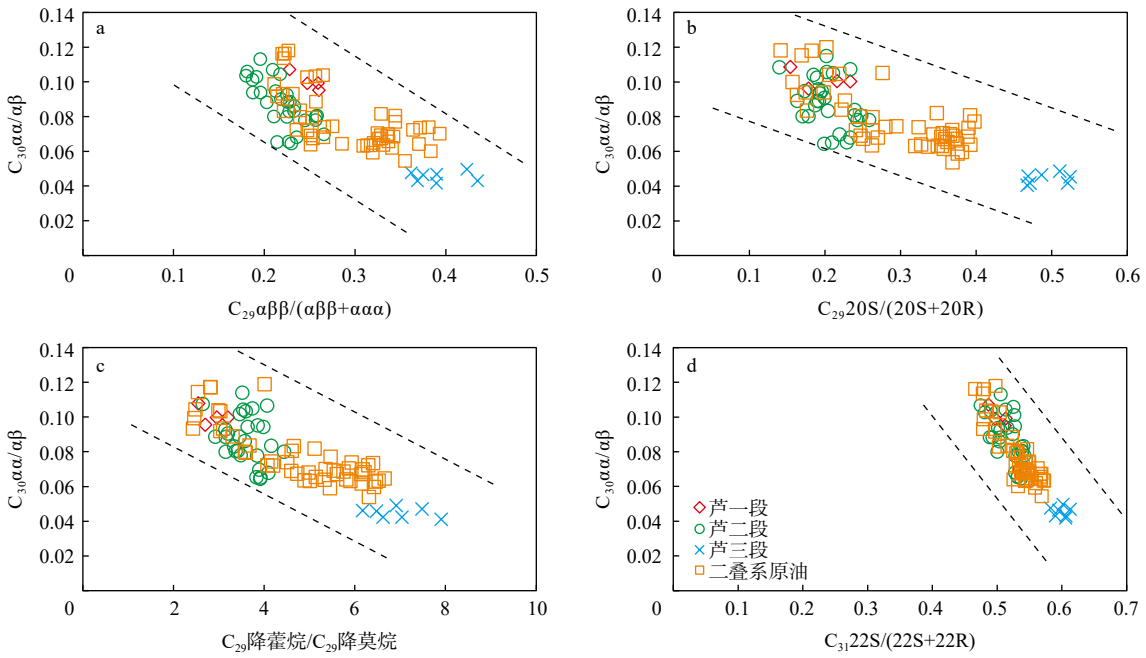


图 16　C_{30} αα/αβ 与不同成熟度指标相关关系图

Fig. 16　Correlation diagram of $C_{30}\alpha\alpha/\alpha\beta$ and different maturity indices

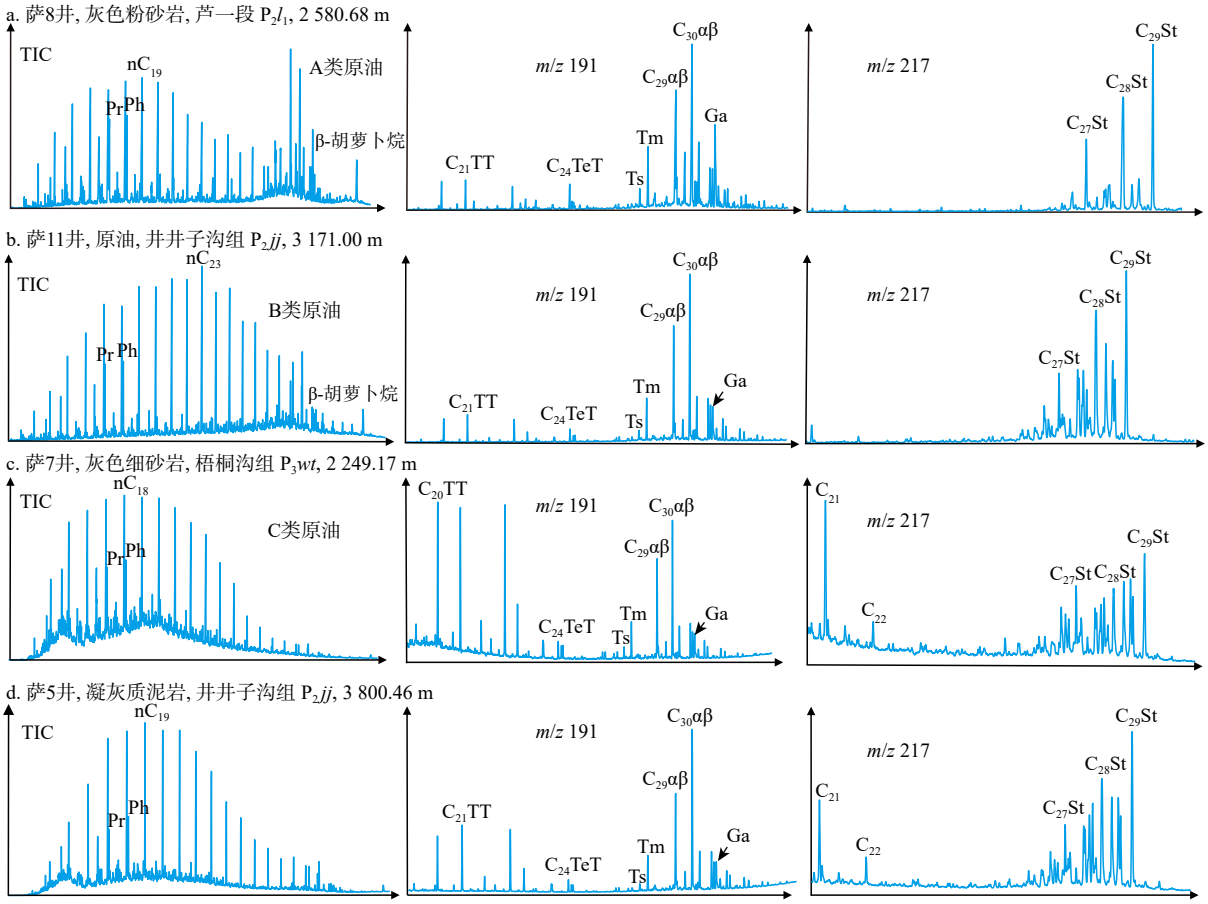


图 17　吉南凹陷二叠系不同类型原油 (a ~ c) 及井井子沟组泥岩 (d) 饱和烃色谱

Fig. 17　Saturated hydrocarbon chromatographs of different types of crude oil (a–c) and mudstone of P_2jj (d) from the Permian in the Jinan Sag

表 3　吉南凹陷二叠系不同类型原油生物标志化合物数据

Table 3　Data of biomarker compounds in different types of Permian crude oil in the Jinan sag

原油类别	$C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$	$C_{29}20S/(20S+20R)$	*MPR*	*MPI*-3	nC_{21-}/nC_{22+}	C_{29}降藿烷/C_{29}降莫烷
A	0.22~0.26 0.24(4)	0.18~0.22 0.20(4)	0.95~1.44 1.15(3)	0.65~0.80 0.75(3)	1.25~2.57 1.89(4)	2.43~3.04 2.82(4)
B	0.21~0.38 0.29(42)	0.14~0.40 0.29(42)	0.62~1.20 0.91(35)	0.46~0.96 0.66(35)	0.31~1.13 0.65(42)	2.46~6..65 4.90(42)
C	0.28~0.39 0.34(4)	0.29~0.39 0.34(4)	0.90~0.99 0.95(2)	0.75~0.81 0.78(2)	2.32~4.62 3.33(4)	4.16~6.42 5.26(4)
原油类别	**TAR**	**伽马蜡烷/C_{30}藿烷**	**Pr/Ph**	**C_{21+22}孕甾烷/规则甾烷**	**∑三环萜烷/∑藿烷**	**C_{30} αα/αβ**
A	0.13~0.41 0.26(4)	0.40~0.55 0.50(4)	0.31~0.97 0.68(4)	0.01~0.03 0.02(4)	0.11~0.20 0.15(4)	0.09~0.12 0.10(4)
B	0.32~2.28 0.92(42)	0.15~0.29 0.23(42)	0.62~1.22 0.87(42)	0.01~0.04 0.02(42)	0.05~0.28 0.14(42)	0.05~0.12 0.08(42)
C	0.02~0.08 0.05(4)	0.23~0.27 0.26(4)	0.84~1.10 0.93(4)	0.15~0.34 0.27(4)	0.79~1.40 1.19(4)	0.06~0.08 0.07(4)

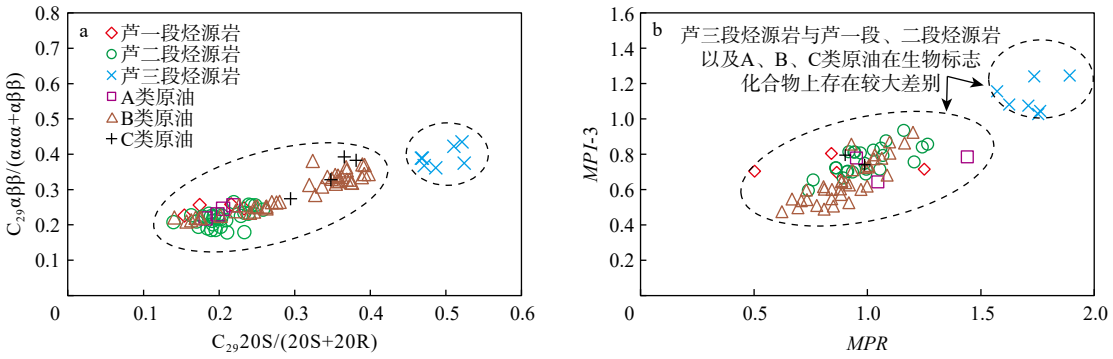


图 18　芦草沟组烃源岩与不同类型原油成熟度关系图

Fig. 18　Relationships between the source rocks from the Lucaogou Formation and the maturities of the three types of crude oil

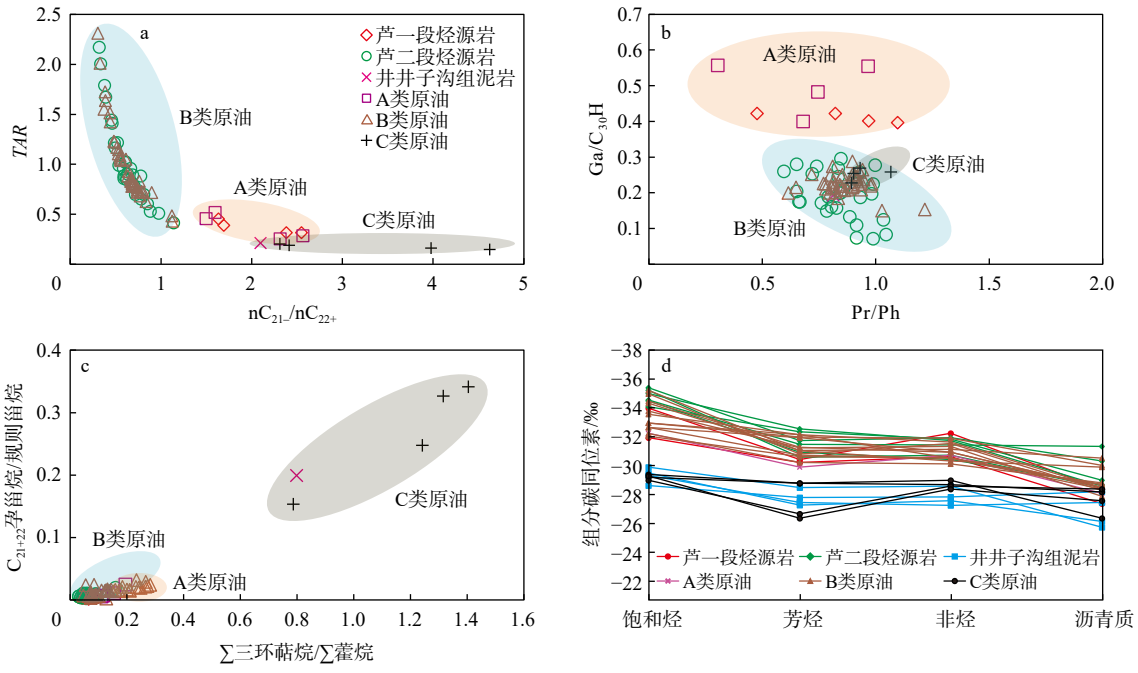


图 19　芦草沟组烃源岩与不同类型原油油源对比关系图

Fig. 19　Correlation diagram of the source rocks from the Lucaogou Formation and different types of crude oil

表 4　吉南凹陷井井子沟组烃源岩有机地球化学数据

Table 4　Organic geochemical data of source rocks from the Jingjingzigou Formation in the Jinan Sag

层位	w(TOC)/%	S_1/(mg·g^{-1})	S_2/(mg·g^{-1})	(S_1+S_2)/(mg·g^{-1})	I_H/(mg·g^{-1})	T_{max}/℃	优质烃源岩占比/%
井井子沟组	0.14~4.14 1.25(25)	0.04~13.70 7.32(25)	0.14~29.93 5.08(25)	0.18~28.91 7.32(25)	86.90~977.29 338.46(25)	423~447 436(25)	48

测试结果来看(表 4),井井子沟组中有 48% 的样品评价为“好–优质”的低熟–成熟烃源岩,因此不能排除区域上井井子沟组贡献烃的可能性。②对比组分碳同位素和生物标志化合物组成特征,该类原油与井井子沟组泥岩特性极为相似而又区别于芦草沟组,表征了与前者的亲缘性。③该类原油主要产自井井子沟组顶部和吉南凹陷北部梧桐沟组致密砂岩储层中,结合油气响应特征,井井子沟组中、下层段一般无油气显示,因此上部泥岩是最可能生烃的部位,同时研究区以北普遍缺失烃源岩层(芦草沟组)[1-3],所以不能排除井井子沟组泥岩生成的原油经短距离运移进入梧桐沟组下伏细砂岩的情况。

6　结　论

(1)芦一段和芦二段烃源岩均为有机质丰度高,有机质类型好(Ⅰ ~ Ⅱ$_1$),热演化程度为低熟–成熟的优质烃源岩,但芦二段显示出更强的生烃能力,芦三段烃源岩受上覆火成岩的影响,成熟度较高,其有机质丰度、生烃潜力等值较低,主要发育“非–一般”烃源岩,生物标志化合物揭示该段烃源岩有机质类型仍为Ⅰ ~ Ⅱ$_1$ 型。

(2)芦草沟组烃源岩生物来源总体组成特征表现为菌藻类、水生植物及陆生高等植物的混源型输入,其中细菌中蓝细菌占主要地位,藻类则以绿藻为主。不同演化阶段对应不同的成烃生物组成,芦一段和芦三段生油母质中蓝藻占比相对较高,芦二段则以绿藻输入为主,且高等植物的输入量明显有所提升,沉积水体盐度的差异是影响蓝藻和绿藻繁盛的关键因素。

(3)对 C_{30}αα-藿烷在地球化学中的应用进行了探讨,在研究区,C_{30}αα-藿烷是有效区分芦草沟组不同层段烃源岩的生物标志化合物,甾、藿烷中不同的成熟度指标与 C_{30}αα/αβ 具有较好的相关性表明,C_{30}αα/αβ 可作为判别成熟度的新指标。

(4)基于生物标志化合物及组分碳同位素组成特征,将吉南凹陷二叠系原油分为 3 类,A、B 类原油分别对应芦一段和芦二段烃源岩,C 类原油主要来自井井子沟组上部泥岩,其对二叠系油气资源的贡献不可忽视。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

[1] 李建忠,陈旋,杨润泽,等. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油气地质条件与源下成藏特征 [J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 491-503.
LI J Z, CHEN X, YANG R Z, et al. Petroleum geology and sub-source hydrocarbon accumulation of Permian reservoirs in Jinan Sag, eastern Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 491-503. (in Chinese with English abstract)

[2] 康积伦,杨润泽,马强,等. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油藏形成条件、成藏特征与勘探方向 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(32): 13788-13802.
KANG J L, YANG R Z, MA Q, et al. Formation conditions, accumulation characteristics and exploration direction of Permian reservoir in Jinan Sag, eastern Junggar Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(32): 13788-13802. (in Chinese with English abstract)

[3] 梁世君,罗劝生,康积伦,等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探 1 井风险勘探突破及意义 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 72-83.
LIANG S J, LUO Q S, KANG J L, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 72-83. (in Chinese with English abstract)

[4] 唐勇,宋永,何文军,等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148.
TANG Y, SONG Y, HE W J, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 132-148. (in Chinese with English abstract)

[5] 夏世威,马强,黄传炎,等. 准噶尔盆地东部吉木萨尔–吉南凹陷构造演化及原型盆地恢复 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 170-179.
XIA S W, MA Q, HUANG C Y, et al. Tectonic evolution and prototype basin reconstruction in the Jimsar and Jinan depressions, eastern Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 170-179. (in Chinese with English abstract)

[6] 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 Z F, DING X J, WANG Z Q, et al. Sedimentary paleoenvironment of source rocks of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6): 109-119. (in Chinese

with English abstract）

[7] 刘超威, 尤新才, 李辉, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组烃源岩地球化学特征与生烃潜力研究 [J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 338-346.
LIU C W, YOU X C, LI H, et al. Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potential of Lucaogou Formation source rocks in Fukang Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 338-346. (in Chinese with English abstract).

[8] 张妍, 吴欣松, 康积伦, 等. 准东吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机质富集机制 [J]. 天然气地球科学, 2024, 35(9): 1574-1589.
ZHANG Y, WU X S, KANG J L, et al. Mechanism of organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation, Jinan Sag, eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(9): 1574-1589. (in Chinese with English abstract)

[9] 张朝军, 何登发, 吴晓智, 等. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成与演化 [J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 47-58.
ZHANG C J, HE D F, WU X Z, et al. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 47-58. (in Chinese with English abstract)

[10] 吴孔友, 查明, 曲江秀, 等. 博格达山隆升对北三台地区构造形成与演化的控制作用 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 1-5.
WU K Y, ZHA M, QU J X, et al. Control of Bogeda Mountain uplift on the structural formation and evolution in Beisantai region[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2004, 28(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[11] 卢华复, 王胜利, 贾承造. 准噶尔南缘新生代断裂的形成机制 [J]. 地学前缘, 2007, 14(4): 168-174.
LU H F, WANG S L, JIA C Z. The mechanism of the southern Junggar Cenozoic thrusts[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 168-174. (in Chinese with English abstract)

[12] 王宗秀, 李涛, 张进, 等. 博格达山链新生代抬升过程及意义 [J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(3): 312-326.
WANG Z X, LI T, ZHANG J, et al. Cenozoic uplift process of Bogeda Mountain chain and its significance[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2008, 38(3): 312-326. (in Chinese withEnglish abstract).

[13] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 岩石中可溶有机物及原油族组分分析: SY/T5119-2008[S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Analysis method for fractions of rock extract and crude oil: SY/T5119-2008[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. (in Chinese)

[14] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 气相色谱–质谱法测定沉积物和原油中生物标志物: GB/T18606-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The test method for biomarkers in sediment and crude oil by GC-MS: GB/T18606-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

[15] 杨涛涛, 范国章, 吕福亮, 等. 烃源岩测井响应特征及识别评价方法 [J]. 天然气地球科学, 2013, 24(2): 414-422.
YANG T T, FAN G Z, LÜ F L, et al. The logging features and identification methods of source rock[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(2): 414-422. (in Chinese with English abstract)

[16] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
LU S F, ZHANG M. Oil and gas geochemistry [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008. (in Chinese)

[17] 国家能源局. 烃源岩地球化学评价方法: SY/T5735-2019[S]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Source rock geochemical evaluation methods: SY/T5735-2019[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019. (in Chinese)

[18] SUÁREZ-RUIZ I, FLORES D, MENDONÇA FILHO J G, et al. Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 99: 54-112.

[19] TAYLOR G H, TEICHMOLLER M, DAVIS A, et al. Organic petrology[M]. Berlin-Stuttgart: Borntraeger, 1998.

[20] SIGURDSSON H, HOUGHTON B, RYMER H, et al. Encyclopedia of volcanoes[M]. New York: Acad-emic Press, 1999.

[21] 方世虎, 贾承造, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义 [J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 108-121.
FANG S H, JIA C Z, GUO Z J, et al. New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 108-121. (in Chinese with English abstract)

[22] DIDYK B M, SIMONEIT B R T, BRASSELL S C, et al. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation[J]. Nature, 1978, 272: 216-222.

[23] 夏刘文, 曹剑, 徐田武, 等. 盐湖生物发育特征及其烃源意义 [J]. 地质论评, 2017, 63(6): 1549-1562.
XIA L W, CAO J, XU T W, et al. Development characteristics of biologies in saline lake environments and their implications for hydrocarbon source[J]. Geological Review, 2017, 63(6): 1549-1562. (in Chinese with English abstract)

[24] SHANMUGAN 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.

[25] MAGARA K. Thickness of removed sedimentary rocks, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of western Canada Basin[J]. AAPG Bulletin, 1976, 60(4): 554-565.

[26] HALL P B, DOUGLAS A G. The distribution of cyclicalkanes in two lacustrine deposits[M]. New York: Wiley, 1983: 576-587.

[27] 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.

[28] BAAS M, PANCOST R, VAN GEEL B, et al. A comparative study of lipids in Sphagnum species[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(6): 535-541.

[29] 刘宝泉, 蔡冰, 方杰. 上元古界下马岭组页岩干酪根的油气生成模拟实验 [J]. 石油实验地质, 1990, 12(2): 147-161.
LIU B Q, CAI B, FANG J. A simulation experiment of petroleum origin on kerogen from shales of the Lower Xiamalin Formation in the Upper Proterozoic[J]. Petroleum Geology & Expeximent, 1990, 12(2): 147-161. (in Chinese with English abstract)

[30] 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): 13-22.
HUANG D F, ZHAO M J. The genesis of marineoils with middle wax from Lower Palaeozoic: Evidences obtaining from kerogen's PY-GC analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 13-22. (in Chinese with English abstract)

[31] 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 J G. 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. (in Chinese with English abstract)

[32] PHILP R P, GILBERT T D. Biomarker distributions in Australian oils predominantly derived from terrigenous source material[J]. Organic Geochemistry, 1986, 10(1/2/3): 73-84.

[33] 岳上, 权永彬, 杜学斌, 等. 西湖凹陷中西部地区烃源岩生烃潜力及油源对比 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 87-98.
YUE S, QUAN Y B, DU X B, et al. Hydrocarbon generation potential and oil source comparison of source rocks in the central and western regions of Xihu Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 87-98. (in Chinese with English abstract)

[34] VOLKMAN J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(2): 83-99.

[35] 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.

[36] DAMSTÉ J S, MUYZER G, ABBAS B, et al. The rise of the rhizosolenid diatoms[J]. Science, 2004, 304: 584-587.

[37] DING X J, QU J X, IMIN A, et al. Organic matter origin and accumulation in tuffaceous shale of the Lower Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 696-706.

[38] HAN J, CALVIN M. Branched alkanes from blue-green algae[J]. Journal of the Chemical Society D(Chemical Communications), 1970(22): 1490-1491.

[39] BAUERSACHS T, KREMER B, SCHOUTEN S, et al. A biomarker and δ^{15}N study of thermally altered Silurian cyanobacterial mats[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40(2): 149-157.

[40] 符印, 王作栋, 张婷, 等. 烃源岩中类胡萝卜烷系列化合物的检出及其地质意义: 以三塘湖盆地马芦 1 井芦草沟组为例 [J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 1092-1106.
FU Y, WANG Z D, ZHANG T, et al. Detection and geological significance of carotenoid-derived alkanes in the source rocks: A case of Well Malu 1, Lucaogou Formation, Santanghu Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 1092-1106. (in Chinese with English abstract)

[41] 张义杰, 齐雪峰, 程显胜, 等. 准噶尔盆地晚石炭世和二叠纪沉积环境 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28(6): 673-675.
ZHANG Y J, QI X F, CHENG X S, et al. Approach to sedimentary environment of Late Carboniferous-Permian in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(6): 673-675. (in Chinese with English abstract)

[42] WARREN J K. Evaporites: A geological compendium[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.

[43] BARBE A, GRIMALT J O, PUEYO J J, et al. Characterization of model evaporitic environments through the study of lipid components[J]. Organic Geochemistry, 1990, 16(4/6): 815-828.

[44] 吴庆余, 章冰, 盛国英, 等. 藻类生物化学成分差异对其热解生烃产率和特征的影响 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1996, 15(2): 75-79.
WU Q Y, ZHANG B, SHENG G Y, et al. Study of molecular organic geochemistry on hydrocarbons thermally degraded form alege[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1996, 15(2): 75-79. (in Chinese with English abstract)

[45] 张瑞杰, 曹剑, 边立曾, 等. 古亚洲洋关闭期准噶尔湖发现“海退遗种”红藻及其成烃有效性 [J]. 中国科学(地球科学), 2024, 54(9): 2898-2916.
ZHANG R J, CAO J, BIAN L Z, et al. Red algal evidence for a marine regression during closure ofthe Paleo Asian Ocean in the Junggar Basin and its linkage to hydrocarbon generation[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2024, 54(9): 2898-2916. (in Chinese with English abstract)

[46] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs: N. J. Prentice Hall, 1993.

[47] RADKE M, WELTE D H. The methylphenanthrene index (MPI): A maturity parameter based on aromatic hydrocarbons[M]// BJOROY M. Advances in Organic Geochemistry. Chichester: John Wiley and Sons Incorporation, 1983: 504-512.

[48] DUIN A C T V , DAMSTE J S S , KOOPMANS M P , et al. A kinetic calculation method of homohopanoid matur-ation: Applications in the reconstruction of burial hist-ories of sedimentary basins[J]. Geochimica et Cosmoc-himica Acta, 1997, 61(12): 2409-2429.

[49] NYTOFT H P, BOJESEN-KOEFOED J A. 17α, 21α(H)-hopanes: Natural and synthetic[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(6): 841-856.

Summary for “准噶尔盆地吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩地球化学特征及油源分析”

Oil-source correlations and geochemical characteristics of source rock from the Permian Lucaogou Formation in the Jinan Sag, Junggar Basin

WEN Wangbiao[1]，ZHAO Hongjing[1*]，WANG Zhiyong[2]，JIN Ying[2]，WANG Jie[2]，GAN Yingxing[2]，LIU Feng[2]，GUO Yating[1]

1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China；
2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Hami Xinjiang 650500, China

First author，E-mail：510090148@qq.com

* Corresponding author， E-mail：zhaohjdh@yangtzeu.edu.cn

Abstract：[**Objective**] In recent years, significant progress has been made in the exploration of conventional sandstone reservoirs in the Jingjingzigou Formation of the Jinan Depression, Junggar Basin, with tertiary reserves exceeding 100 million tons and promising exploration prospects. Although the primary source rock, the Middle Permian Lucaogou Formation, has been identified based on previous research, studies on the geochemical characteristics of these source rocks and oil-source correlations remain limited. [**Methods**] This study combines a comprehensive set of tests, including total organic carbon (TOC), rock pyrolysis, and biomarker analysis, to investigate the geochemical properties of source rocks from various intervals of the Lucaogou Formation and to explore the oil-source correlations for the Middle Permian. [**Results**] The results indicate that the Lucaogou Formation can be divided into three sections based on logging curve characteristics. The P_2l_1 and P_2l_2 intervals are high-quality source rocks, characterized by high organic carbon content, hydrocarbon generation potential, and soluble organic matter, with organic matter types of Ⅰ-Ⅱ$_1$ and early-to-peak maturity, with P_2l_1 being superior. The P_2l_3 interval is predominantly composed of "non-general" source rocks with type Ⅰ-Ⅱ$_1$ organic matter and high maturity, influenced by the overlying environment. The molecular geochemical characteristics suggest that the source rocks formed in reducing environments. P_2l_1 corresponds to saline water, P_2l_1 represents fresh-brackish water, and P_2l_3 is intermediate, all conditions conducive to organic matter preservation. In terms of biological composition, the Lucaogou Formation contains two primary hydrocarbon-generating parent materials: Green algae and cyanobacteria. The presence of green algae is indicated by age-related biomarkers (C_{28} steranes), while cyanobacteria are identified by the presence of β-carotene and medium-chain monomethyl alkanes. The hydrocarbon-generating organisms differ across intervals: P_2l_1 and P_2l_3 are predominantly composed of aquatic organisms, particularly cyanobacteria, while P_2l_1 contains both aquatic (green algae) and terrestrial plant input. Variations in lake basin water salinity are a key factor influencing the proliferation of cyanobacteria and green algae in different source rock intervals. C_{30} αα-hopane is abundant in P_2l_1 and P_2l_1, but absent in P_2l_3. Based on the analysis of sterane and hopane isomerization parameters, the C_{30} αα/αβ ratio may serve as a potential maturity indicator. Permian crude oils in the Jinan Depression can be classified into three types. Type A and Type B correspond to the source rocks of P_2l_1 and P_2l_2, respectively, while Type C crude oil exhibits characteristics different from the P_2l source rocks and may be correlated with the mudstone of the Jingjingzigou Formation. [**Conclusion**] This study provides valuable insights for future oil and gas exploration and development in the Jinan Sag.

Key words: oil source correlation；geochemical characteristic；Lucaogou Formation；Jinan Sag；source rock

Received：2024-08-10；Revised：2024-10-17；Accepted：2024-10-23

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240443