



南黄海盆地二叠系高-过成熟烃源岩的生物标志化合物特征及其地质意义

吴 飘, 陈建文, 赵青芳, 张银国, 梁 杰, 蓝天宇, 薛 路, 可 行

Characteristics of biomarkers and the geological significance in highly to over-mature Permian source rocks in the South Yellow Sea Basin

WU Piao, CHEN Jianwen, ZHAO Qingfang, ZHANG Yinguo, LIANG Jie, LAN Tianyu, XUE Lu, and KE Xing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023041401>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海盆地二叠系地震-沉积相分析及烃源岩分布预测

Seismic and sedimentary facies analysis and prediction of favorable Permian source rocks in the South Yellow Sea basin
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(3): 96

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

南黄海崂山隆起石炭系一下二叠统孔隙型碳酸盐岩储层预测

Prediction of pore-dominated Carboniferous-Lower Permian carbonate reservoir at the Laoshan Uplift, South Yellow Sea Basin
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 136

下扬子陆域海相古-中生界烃源岩控制因素及其对南黄海盆地的启示

MARINE PALEO-MESOZOIC HYDROCARBON SOURCE ROCKS ON LAND OF THE LOWER YANGTZE PLATFORM AND THEIR IMPLICATIONS FOR OIL AND GAS EXPLORATION IN THE SOUTH YELLOW SEA BASIN
海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 138

南黄海崂山隆起石炭系-下二叠统海相碳酸盐岩叠前三参数反演储层预测

Prestack three-term seismic inversion for prediction of Carboniferous-lower Permian carbonate reservoir on the Central uplift of South Yellow Sea basin
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(3): 186

南黄海古生界烃源特征及资源潜力评估

Geochemical characteristics and hydrocarbon generation potentials of Paleozoic source rocks in the Southern Yellow Sea basin
海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(3): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吴飘, 陈建文, 赵青芳, 等. 南黄海盆地二叠系高-过成熟烃源岩的生物标志化合物特征及其地质意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(4): 150-166.

WU Piao, CHEN Jianwen, ZHAO Qingfang, et al. Characteristics of biomarkers and the geological significance in highly to over-mature Permian source rocks in the South Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(4): 150-166.

南黄海盆地二叠系高-过成熟烃源岩的生物标志化合物特征及其地质意义

吴飘^{1,2}, 陈建文^{1,2,3,4}, 赵青芳^{1,2}, 张银国^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 蓝天宇^{1,2,5}, 薛路^{1,2,3}, 可行^{1,2,4}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 河海大学海洋学院, 南京 210098

4. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

5. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 南黄海盆地二叠系烃源岩的生烃层系多、热演化程度高、沉积环境变化大, 前人极少从生物标志化合物的角度探讨烃源岩的差异。本文通过对 CSDP-2 井二叠系 16 个成熟-过成熟烃源岩样品进行有机地球化学分析, 剖析了四套烃源岩的饱和烃、芳香烃馏分中生物标志化合物的组成、演化规律及地质意义。结果表明, 二叠系不同层系烃源岩的甾烷系列、三芳甾烷系列、烷基二苯并噻吩系列化合物和 β -胡萝卜素烷的相对丰度具有显著差异, 据此可将其分为栖霞组下段和龙潭组-大隆组泥岩、栖霞组上段和孤峰组硅质岩、孤峰组硅质泥岩 3 类烃源岩。研究显示, 栖霞组下段和龙潭组-大隆组泥岩烃源岩沉积于淡水氧化或微咸水贫氧环境, 有机质来源于浮游生物和陆生高等植物; 栖霞组上段-孤峰组烃源岩沉积于还原咸水或静水硫化环境, 其中硅质岩烃源岩的有机质来源于浮游生物和硅藻, 硅质泥岩烃源岩的有机质来源于浮游生物、硅藻和陆生高等植物。此外, 甲基菲指数、烷基二苯并噻吩参数 (4-MDBT/DBT、MDBI、4,6-/1,4-DMDBT) 可作为上二叠统烃源岩的成熟度指标, 但不能作为中—下二叠统烃源岩的成熟度指标。

关键词: 高-过成熟烃源岩; 生物标志化合物; 二叠系; 孤峰组; 南黄海盆地

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023041401

Characteristics of biomarkers and the geological significance in highly to over-mature Permian source rocks in the South Yellow Sea Basin

WU Piao^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2,3,4}, ZHAO Qingfang^{1,2}, ZHANG Yinguo^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, LAN Tianyu^{1,2,5}, XUE Lu^{1,2,3}, KE Xing^{1,2,4}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

4. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

5. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The Permian source rocks in the South Yellow Sea Basin (SYSB) are characterized by multi-sets of hydrocarbon-generating strata, high thermal evolution degrees, and dramatic changes in sedimentary environment. However, at present, little is known about the biomarker differences of the source rocks. Through organic geochemical analysis with 16 mature to over-mature source rock samples in the four sets of Permian source rocks of the CSDP-2 well in the SYSB, the compositions, evolution law, and geological significance of biomarkers in the alkane and aromatic hydrocarbon fractions are clarified. Biomarker parameters show that the relative abundance of the compounds in sterane series,

资助项目: 国家专项海洋地质调查项目 (DD20221723, DD20190818, DD20160152); 国家自然科学基金青年基金项目“二连盆地白垩统富火山组分的咸水湖相烃源岩地质地球化学特征及其有机质富集机制” (42102188), “下扬子北部陆缘区早寒武世古海洋氧化还原状态的演化: 来自黑色页岩的沉积记录” (ZR2022MD054); 崂山实验室“十四五”科技创新项目 (LSKJ202203401, LSKJ202203404)

作者简介: 吴飘 (1990—), 男, 博士, 从事油气地球化学研究, E-mail: wupiao0921@163.com

通讯作者: 陈建文 (1965—), 男, 研究员, 从事海域油气资源调查评价与研究, E-mail: jwchen2012@126.com

收稿日期: 2023-04-14; **改回日期:** 2023-04-28. 周立君编辑

triarylsterane series, alkyl dibenzothiophene series, and the β -carotene varied greatly in different sets of source rocks in the Permian of SYBS. Three types of source rocks could be classified, namely, mudstones in the Lower Qixia Formation and the Longtan to Dalong Formation, chert in the Upper Qixia to Gufeng Formation, and siliceous mudstones in the Gufeng Formation. The research proved that mudstones in the Lower Qixia Formation, the Longtan Formation, and the Dalong Formation are deposited in oxic fresh or dysoxic brackish water conditions, in which the organic matter mainly derived from plankton and terrestrial higher planters. Source rocks in the Upper Qixia Formation and the Gufeng Formation are deposited in anoxic saline or euxinic sulfidic environment, in which the organic matter in chert is derived from plankton and diatom, whereas that in siliceous mudstones is derived from plankton, diatom, and terrestrial higher planters. Besides that, we proposed that the methylphenanthrene indexes and the alkyl dibenzothiophene parameters (4-MDBT/DBT, MDBI, 4,6-/1,4-DMDBT) could be used as maturity scale for the Upper Permian source rock, but cannot be used for the Middle and Lower Permian source rocks.

Key words: highly to over-mature source rocks; biomarker characteristics; Permian; Gufeng Formation; South Yellow Sea Basin

探索高-过成熟烃源岩在母质来源、沉积环境和成熟度演化方面的生物标志化合物特征是油气地球化学领域的重要科学问题^[1]。由于高-过成熟烃源岩的类异戊二烯烷烃、甾烷和萜烷等常规生物标志物已经趋同^[2-3], 众多学者致力于探究其芳烃化合物的组成和演化规律, 但至今形成的具有广泛适用性的指标极少。梁狄刚等^[3]认为我国南方地区海相高-过成熟烃源岩的三芳甾烷类不受成熟度影响, 能有效地区分不同层系、不同岩性的烃源岩。但包建平等^[4]认为高热演化会使三芳甾烷类标志物的分布和组成出现趋同现象。Alexander 等^[5]、朱扬明等^[6-7]和宋长玉等^[8]认为 9-/1-MP(甲基菲)、2,6-/2,10-DMP(二甲基菲)、1,7-/1,9-DMP、1,2,5-/1,3,6-TMN(三甲基萘)、1,2,5,6-TeMN(四甲基萘)/TeMN 比值是表征有机质输入的有效指标, 但上述参数也受成熟度影响^[9], 在高-过成熟阶段是否具有生源意义因地制宜。烷基萘、烷基菲、烷基二苯并噻吩系列化合物常用于高成熟烃源岩的成熟度表征^[10-12], 但其成熟度适用范围^[9, 13-14]、在不同地区的适用性^[1, 15]等都存在较大争议。因此, 高-过成熟烃源岩的饱和烃生物标志物参数具有趋同性, 而芳烃化合物参数的影响因素存在复杂性和地区差异性, 在使用时需要结合地质背景评价饱和烃和芳烃化合物指标的有效性。

南黄海盆地是下扬子地台在海域的延伸^[16], 其二叠系发育栖霞组、孤峰组、龙潭组、大隆组四套烃源岩。前人对下扬子陆域二叠系烃源岩的沉积相^[17]和地球化学特征^[18-21]开展了大量研究, 总体认为二叠系以龙潭组底为界可分为两大沉积旋回^[22], 下部栖霞组-孤峰组以开阔台地-深水陆棚环境为主, 烃源岩属于中等—极好的混合型高-过成熟烃源岩, 上部龙潭组-大隆组以三角洲-深水陆棚环境为主, 烃源岩属于好—很好的腐殖型成熟-高成熟烃源岩^[2, 23]。南黄海盆地二叠系烃源岩的研究主要关注生烃潜力评价^[24-26]和沉积环境演化^[27-29]。蔡来星

等^[26-27]认为栖霞组-孤峰组沉积于强还原条件的浅海陆棚相和潮坪相, 烃源岩为高-过成熟的好—极好级别混合型烃源岩^[30]; 而龙潭组-大隆组为强还原条件的三角洲相、潮坪相、浅海陆棚相沉积, 烃源岩为成熟-高成熟的中等—好级别腐殖型烃源岩。Chen 等^[31]认为栖霞组沉积于低生产力的氧化性海水环境, 孤峰组硅质岩沉积于高生产力的贫氧-缺氧海水环境, 而龙潭组下段泥岩形成于低生产力的贫氧微咸水环境。上述研究主要依据基础有机地球化学数据和无机元素数据, 对二叠系烃源岩的生物标志化合物特征讨论较少, 因而南黄海盆地二叠系烃源岩的有机质来源和油源对比尚存在争议^[30]。本文依据 CSDP-2 井二叠系 16 个泥岩和硅质岩样品的有机地球化学数据, 探讨四套高演化烃源岩的生物标志化合物特征差异, 这对扬子板块海相高-过成熟烃源岩的评价和南黄海盆地二叠系油气勘探具有重要意义。

1 地质背景

南黄海盆地位于下扬子地块东部, 是叠合于下扬子地台前震旦系变质岩基底之上、由新元古代震旦纪—中生代海相残留盆地和晚中生代—新生代陆相断陷盆地等构成的多旋回叠合盆地^[32-33]。古生界盆地北侧为千里岩隆起, 南侧为勿南沙隆起, 由北往南可分为烟台拗陷、崂山隆起、青岛拗陷 3 个二级构造单元, 呈现“两拗一隆”的构造格局^[16, 34](图 1)。二叠系广泛分布于该盆地的青岛拗陷^[33]和崂山隆起^[16], 不仅是盆地内重要的区域性烃源岩层, 而且发育有致密砂岩储层^[35], 具备形成大型气田的物质基础^[16]。截止目前, 该盆地共有 5 口探井钻遇二叠系, 其中位于崂山断隆带西侧的 CSDP-2 井在龙潭组见到多层油气显示, 而关于其油气来源为上二叠统或下二叠统烃源岩尚未达成一致认识^[30]。

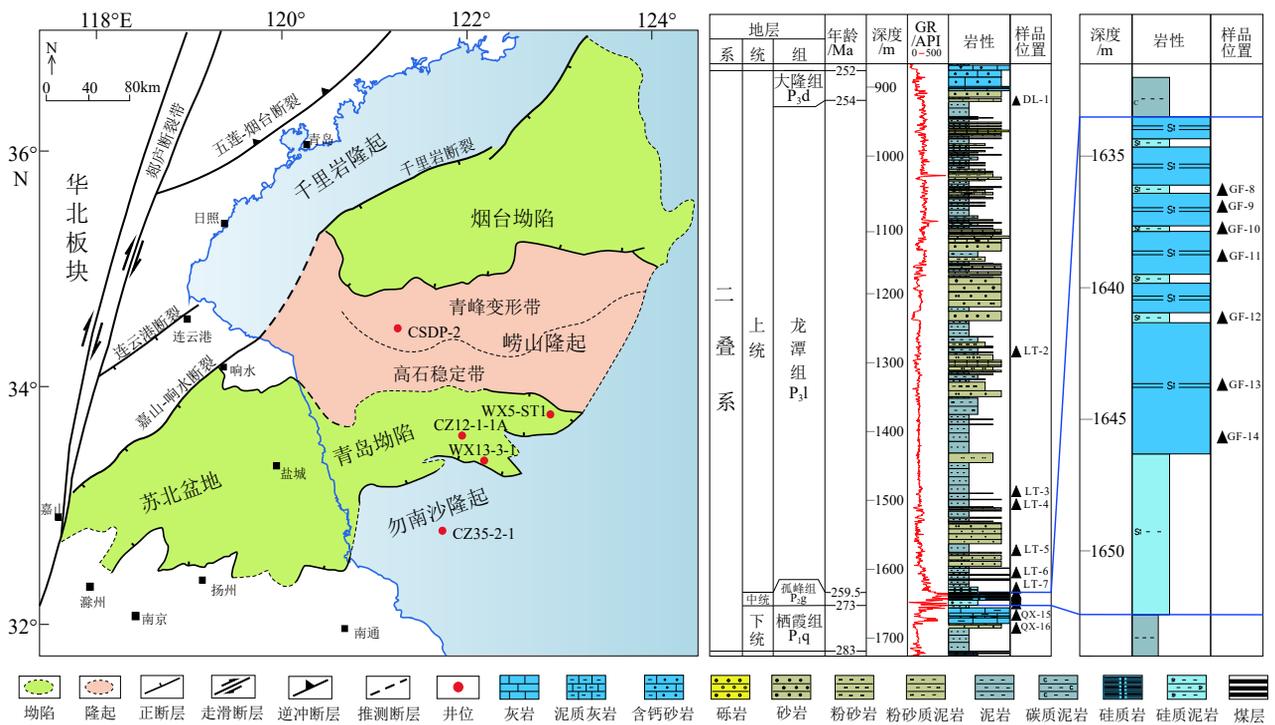


图1 南黄海盆地构造单元划分及CSDP-2井二叠系地层柱状图^[37]

Fig.1 Division of structural units in the South Yellow Sea Basin and the Permian stratigraphic histogram of the CSDP-2 well^[37]

CSDP-2井钻遇二叠系841.9 m(图1)。其中,栖霞组分布于井段1652.43~1717.9 m,上段为台地相黑灰色钙质硅质泥岩或泥灰岩,下段为浅海陆棚相灰色泥岩,发育多种化石,如腕足类、蜓类及部分有孔虫^[27]。孤峰组分布于井段1633.5~1652.43 m,岩性为黑色硅质岩、硅质泥岩和少量灰色泥岩,产菊石等化石^[30]。龙潭组分布于井段921~1633.5 m,下段岩性为大套黑色、灰黑色泥岩和泥质粉砂岩,底部夹多套煤层,为潮坪相沉积;中段为深灰色泥岩、泥质粉砂岩和灰色细砂岩、粉砂岩,为三角洲前缘-三角洲平原沉积;上段为深灰色粉砂质泥岩夹浅灰色细砂岩、粉砂岩,见丰富的植物碎屑^[25]和腕足类、头足类等化石^[36],总体属于三角洲前缘-三角洲平原沉积^[29]。大隆组分布于井段876~921 m,下段岩性为灰色含灰粉-细砂岩和黑色碳质泥岩,上段岩性以灰白色钙质细砂岩为主,可见大量植物碎屑及菊石、腹足类化石^[25],为潮坪相沉积。

2 样品及实验方法

共选取CSDP-2井二叠系16件泥岩、硅质泥岩和硅质岩岩芯样品进行地球化学分析,取样位置如图1所示。DL-1至LT-7及QX-16样品为泥岩,GF-8、GF-10、GF-12样品为硅质泥岩,GF-9、GF-11、GF-13、GF-14样品为硅质岩,QX-15样品为钙质硅

质泥岩。分析项目包括有机碳分析、岩石热解分析、饱和烃色谱分析、饱和烃色谱-质谱分析、芳烃色谱-质谱分析、干酪根显微组分分析、干酪根碳同位素测试和干酪根镜质体反射率测试。

(1)岩石总有机碳分析采用干烧重量法使用CS-230H碳硫分析仪测定,测试绝对误差不超过0.03%。热解分析用油岩综合评价仪OGE-II进行,分析参数主要包括液态烃含量 S_1 、热解烃含量 S_2 和最高热解峰温 T_{max} ,其中 S_2 的相对双差不超过50%或20%, T_{max} 的偏差不超过5℃。干酪根显微组分分析和镜质体反射率测试在Zeiss Axio Scope.A1显微镜上进行,对样品采用化学分离法和重液浮选法分离出干酪根,然后将干酪根固结成型进行打磨和抛光,选用×50油浸镜头测试均质镜质体或基质镜质体的随机反射率,测试点数不少于30个;采用目估法统计显微组分所占面积的百分比,其中镜质组和腐泥组组分含量误差不超过7%。干酪根碳同位素在MAT 253稳定同位素质谱仪上测定,测试误差不超过±0.2‰。

(2)饱和烃色谱分析采用美国Agilent公司生产的6890GC气相色谱仪。烃源岩样品经过碎样后进行索氏抽提48 h,然后通过柱层析法分离获取饱和烃和芳烃族组分。气相色谱仪的色谱柱为HP-5MS(30m×0.25mm×0.25μm),升温程序为:升温50℃,恒温1 min;再从50℃以20℃/min的速率升至120℃,

然后以 3 °C/min 的速率升至 310 °C, 恒温 15 min。载气为氦气, 流速为 1 mL/min, 相关参数采用基于色谱峰面积积分的方式进行计算。

(3) 饱和烃/芳烃气相色谱-质谱分析采用美国 Agilent 公司生产的 6890GC/5975MSD 气相色谱-台式质谱联用仪。其中, 质谱仪采用 EI 电离方式, 电子能力为 70 eV。以全扫描/多离子选择性扫描 (m/z 50–580) 的方式采集数据, 相关参数采用基于质谱峰面积积分的方式进行计算。

3 烃源岩评价及生物标志化合物特征

3.1 烃源岩评价

本次测试烃源岩样品的总有机碳 (TOC)、岩石热解、干酪根镜质体反射率 R_o 、干酪根类型指数 TI、干酪根碳同位素数据如表 1 所示, 结合前人研究数据^[26, 30] 绘制 CSDP-2 井二叠系烃源岩的有机质丰度、有机质类型和有机质成熟度评价图 (图 2)。该井大隆组烃源岩以泥岩为主, TOC 为 0.19%~4.08%, 平均值为 1.54%, R_o 为 0.71%~0.94%, T_{max} 为 453~481 °C, 干酪根碳同位素为 -23.6‰, 按照古生界海相烃源岩生烃潜力评价方法^[38] 其属于中等质

量的 III 型成熟烃源岩。龙潭组烃源岩以泥岩和碳质泥岩为主, 烃源岩的 TOC 为 0.3%~10.6%, 平均值 1.9%, R_o 为 0.83%~1.8%, T_{max} 为 462~512 °C, 干酪根碳同位素为 -26.5‰~-23.1‰, 综合评价为中等质量的 III 型成熟-高成熟烃源岩。孤峰组烃源岩主要为硅质岩和硅质泥岩, TOC 为 3%~16.3%, 平均值 10.6%, R_o 为 1.76%~2.16%, T_{max} 为 515~553 °C, 干酪根碳同位素为 -28.4‰~-26.6‰, 是一套极好的 II 型高-过成熟烃源岩。栖霞组上段钙质泥岩的 TOC 为 0.73%~14.2%, 平均值为 3.81%, 下段黑灰色泥岩 TOC 为 0.57%~1.1%, 平均值为 0.81%, 整段烃源岩的 TOC 平均值为 2.81%, R_o 为 1.8%~2.24%, T_{max} 为 458~520 °C, 干酪根碳同位素为 -25.9‰, 是一套好—很好的 II₂—III 型高-过成熟烃源岩。

3.2 饱和烃生物标志化合物特征

3.2.1 正构烷烃及类异戊二烯烷烃

CSDP-2 井二叠系烃源岩的正构烷烃及类异戊二烯烷烃参数见表 2, 饱和烃馏分的总离子流图 (TIC) 见图 3。样品的正构烷烃碳数分布为 nC_{15} – nC_{35} , 其中 nC_{11} – nC_{14} 的正构烷烃基本缺失, 这可能与饱和烃馏分在氯仿沥青抽提和族组分分离过程中存在轻烃损失有关。通常认为低碳数正构烷烃

表 1 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的基本地球化学数据
Table 1 Bulk geochemical data of the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

样品号	深度/m	层位	岩性	TOC/%	S_1 /(mg/g)	S_2 /(mg/g)	$T_{max}/^{\circ}C$	HI/(mg/g)	R_o /%	干酪根 $\delta^{13}C$ /‰	干酪根类型指数 TI	干酪根类型
DL-1	920.6	大隆组	泥岩	0.19	0.02	0.02	453	1	0.70	-23.60	9.2	III
LT-2	1285.48	龙潭组	泥岩	1.21	/	0.23	482	23	1.47	-23.08	-30.8	III
LT-3	1488.58	龙潭组	泥岩	1.39	0.05	0.34	480	33	1.61	-24.79	1.42	III
LT-4	1507.48	龙潭组	泥岩	0.94	0.03	0.28	487	23	1.74	-23.24	32.4	III
LT-5	1574.18	龙潭组	泥岩	1.48	0.07	0.32	484	24	1.47	-26.39	49.3	II ₂
LT-6	1607.08	龙潭组	泥岩	1.13	0.01	0.03	462	4	1.80	-25.57	-25.1	III
LT-7	1628.3	龙潭组	碳质泥岩	6.58	0.12	0.70	546	31	2.02	-26.47	12.1	II ₂
GF-8	1636.3	孤峰组	硅质泥岩	12.2	0.16	1.02	514.7	10.2	2.1	-27.60		II ₁
GF-9	1637.0	孤峰组	硅质岩	14	0.10	2.08	529.7	16		-27.54		II ₁
GF-10	1637.8	孤峰组	硅质泥岩	11.2	0.17	2.28	553	32	2.10	-26.64	31.64	II ₂
GF-11	1638.9	孤峰组	硅质岩	11.4	0.15	1.80	535	17.6		-27.56		II ₁
GF-12	1641.2	孤峰组	硅质泥岩	9.08	0.19	1.97	529.6	24.4		-26.84		II ₂
GF-13	1643.7	孤峰组	硅质岩	-	0.01	0.08	434.1	40	1.41	-28.37		II ₁
GF-14	1645.7	孤峰组	硅质岩	16.3	0.20	1.83	533.8	12.9		-27.04	59	II ₂
QX-15	1668	栖霞组	钙硅质泥岩	1.38	0.12	0.32	491.2	36.8	1.53			
QX-16	1673.48	栖霞组	泥岩	14.2	0.18	3.54	497	44	2.07	-25.97	54.7	III

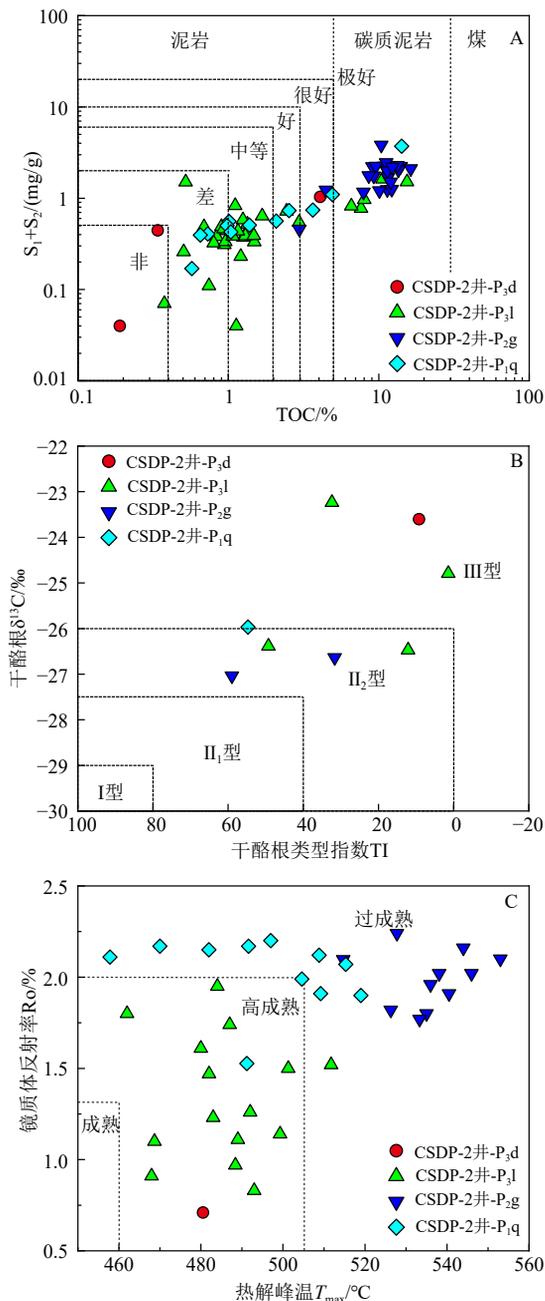


图2 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩有机质丰度、类型和成熟度评价图

Fig.2 Evaluation of organic matter abundance, type, and maturity for the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

(nC_{14} – nC_{19})是藻类生源输入的标志,高碳数正构烷烃(nC_{27} – nC_{31})主要来源于陆生高等植物^[39],龙潭组、孤峰组、栖霞组烃源岩的正构烷烃均存在以低碳数占优势的单峰形分布和以高碳数占优势的单峰形分布,但高碳数占优势的样品的干酪根碳同位素值反而显著低于低碳数占优势的样品(表1,表2)。上述现象表明,本次分析样品的正构烷烃分布受轻烃损失等因素影响已无法反映有机质来源。值得

注意的是,孤峰组7件烃源岩样品的TIC图均在 nC_{29} 处出现了不可分辨的(UCM)鼓包,且碳优势指数CPI值为1.12~1.41(平均值1.24), nC_{25} – nC_{35} 系列化合物呈现出明显的奇数碳优势。通常认为 nC_{25} – nC_{35} 奇数碳优势分布指示着低成熟度及高等植物角质蜡的生源特征^[40],然而孤峰组烃源岩已处于高-过成熟阶段。这种不寻常的正构烷烃分布与四川盆地和鄂尔多斯盆地下古生界、前寒武系烃源岩抽提物的正构烷烃分布类似^[41]。根据前人热模拟实验的结果^[42-43],这类正构烷烃可能主要来源于高-过成熟烃源岩中的藻类,反映出孤峰组沉积时期存在较强的藻类生源输入。

二叠系烃源岩的Pr/Ph值为0.21~0.65,大隆组烃源岩的Pr/ nC_{17} 为1.46,Ph/ nC_{18} 为0.88,龙潭组烃源岩的Pr/ nC_{17} 为0.37~0.81(平均值为0.53),Ph/ nC_{18} 为0.44~0.89(平均值为0.63),栖霞组-孤峰组烃源岩的Pr/ nC_{17} 为0.17~0.45(平均值为0.32),Ph/ nC_{18} 为0.25~0.72(平均值为0.43)。在Pr/ nC_{17} -Ph/ nC_{18} 图上(图4),龙潭组、孤峰组和栖霞组烃源岩主要分布在还原环境和水生动植物生源区域,这与干酪根碳同位素显示的II₂—III型干酪根特征相悖,说明Pr/Ph、Pr/ nC_{17} 、Ph/ nC_{18} 参数可能受到轻烃损失或高-过成熟度等因素的影响而无法反映沉积环境或有机质来源。

3.2.2 甾萜烷及β-胡萝卜素

CSDP-2井二叠系烃源岩的甾萜烷和β-胡萝卜素参数如表2所示,甾萜烷质量色谱图如图3所示。栖霞组、孤峰组和龙潭组烃源岩的甾萜烷成熟度参数20S/(20S+20R)- $\alpha\alpha\alpha$ -C₂₉甾萜烷分别为0.39~0.5、0.5~0.59和0.41~0.53,β/(β+α)-C₂₉甾萜烷为0.38~0.45,表现出β/(β+α)-C₂₉甾萜烷参数和栖霞组烃源岩的20S/(20S+20R)- $\alpha\alpha\alpha$ -C₂₉甾萜烷参数明显低于其平衡值(分别为0.67~0.71和0.52~0.55)的现象。这与前人提出的C₂₉甾萜烷成熟度参数在高-过成熟阶段存在“倒转”现象一致^[44]。

龙潭组、大隆组和栖霞组下段烃源岩的 $\alpha\alpha\alpha$ 20RC₂₇、 $\alpha\alpha\alpha$ 20RC₂₈、 $\alpha\alpha\alpha$ 20RC₂₉规则甾萜烷主要表现为“L”形或“V”形分布,饱和烃TIC图中基本未检测到β-胡萝卜素,甾萜烷系列及β-胡萝卜素化合物丰度具有“四高三低”的特征(表3),即C₂₇甾萜烷与C₂₉甾萜烷丰度相当或略高(C₂₇/C₂₉ST \geq 0.83)、4甲基甾萜烷丰度高(4MS/C₂₉ST \geq 0.1)、孕甾萜烷丰度高(C₂₁₋₂₂/C₂₉ST \geq 0.2)、重排甾萜烷丰度高(Dia.C₂₇/C₂₇ST \geq 0.22)、C₂₈甾萜烷丰度低(C₂₈/C₂₉ST $<$ 0.8)、甾萜比值偏低(S/H $<$ 1)、β-胡萝卜素/ nC_{max} $<$ 0.1。与之不同

表 2 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩饱和烃组分的生物标志化合物参数

Table 2 The biomarker parameters of the saturated fractions in the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

样品号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
DL-1	0.39	1.46	0.88	nC_{22}	1.06	1.15	0.68	0.15	0.64	0.97	0.41	0.51	0.55	0.49	1.19	0.73	0.41	0.27	0.57	0.24	0.05
LT-2	0.50	0.63	0.89	nC_{25}	1.14	1.12	0.23	0.18	0.67	0.97	0.41	0.53	0.71	0.49	1.09	0.71	0.56	0.26	0.75	0.18	0.03
LT-3	0.18	0.48	0.53	nC_{21}	1.03	1.01	0.63	0.26	0.59	1.11	0.45	0.45	0.24	0.49	1.04	0.80	0.27	0.22	0.39	0.28	0.09
LT-4	0.35	0.38	0.44	nC_{20}	1.01	1.10	0.71	0.14	0.60	1.04	0.45	0.41	0.43	0.51	1.21	0.80	0.39	0.25	0.52	0.38	0.03
LT-5	0.26	0.50	0.59	nC_{23}	1.11	1.17	0.32	0.19	0.59	1.03	0.41	0.52	0.31	0.47	0.95	0.69	0.28	0.23	0.50	0.31	0.02
LT-6	0.22	0.81	0.74	nC_{27}	1.15	1.12	0.12	0.22	0.61	0.92	0.40	0.52	0.51	0.52	0.92	0.72	0.38	0.22	0.51	0.21	0.03
LT-7	0.23	0.37	0.57	nC_{19}	1.09	1.18	0.53	0.22	0.56	1.00	0.41	0.52	0.24	0.55	0.83	0.62	0.22	0.22	0.44	0.31	0.05
GF-8	0.40	0.24	0.35	nC_{25}	1.02	1.27	0.25	0.18	0.63	0.87	0.42	0.53	0.13	0.51	0.56	0.75	0.07	0.13	0.48	0.13	0.37
GF-9	0.52	0.24	0.39	nC_{18}	1.02	1.21	0.59	0.18	0.76	0.71	0.42	0.52	0.32	0.51	0.52	0.92	0.09	0.13	0.96	0.08	0.55
GF-10	0.21	0.38	0.43	nC_{19}	1.04	1.25	0.77	0.10	0.50	1.34	0.38	0.59	0.15	0.53	0.83	0.58	0.17	0.24	0.29	0.35	0.17
GF-11	0.40	0.17	0.28	nC_{18}	1.03	1.30	0.78	0.16	0.76	0.65	0.42	0.50	0.31	0.49	0.54	0.96	0.09	0.13	1.00	0.09	0.50
GF-12	0.65	0.21	0.25	nC_{18}	0.95	1.17	0.57	0.16	0.50	0.96	0.44	0.51	0.04	0.60	0.70	0.63	0.03	0.17	0.34	0.30	0.22
GF-13	0.53	0.44	0.72	nC_{25}	1.04	1.12	0.55	0.22	0.82	0.52	0.43	0.52	0.49	0.44	0.53	1.01	0.09	0.02	1.63	0.04	1.62
GF-14	0.41	0.25	0.41	nC_{18}	1.04	1.26	0.59	0.21	0.79	0.54	0.43	0.52	0.46	0.50	0.52	0.98	0.09	0.02	1.49	0.06	1.07
QX-15	0.40	0.40	0.43	nC_{29}	1.02	1.41	0.37	0.18	0.73	0.71	0.41	0.50	0.40	0.52	0.61	0.98	0.13	0.03	1.01	0.07	0.47
QX-16	0.30	0.45	0.60	nC_{19}	1.08	1.20	0.82	0.23	0.69	0.99	0.40	0.42	0.61	0.48	1.26	0.73	0.47	0.27	0.59	0.26	0.03

注: A: Pr/Ph, B: Pr/ nC_{17} , C: Ph/ nC_{18} , D: 主峰碳, E: OEP, F: CPI, G: nC_{21}/nC_{22}^+ , H: 伽马蜡烷/ $\alpha\beta C_{30}$ 藿烷, I: $ETR=(C_{28}TT+C_{29}TT)/(C_{28}TT+C_{29}TT+Ts)$, J: Ts/Tm, K: $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)$, L: $C_{29}\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$, M: $C_{23}TT/C_{30}H$, N: $C_{24}Tet/C_{26}TT$, O: $C_{27}/C_{29}ST$, P: $C_{28}/C_{29}ST$, Q: $C_{21-22}ST/C_{29}ST$, R: $Dia.C_{27}/C_{27}ST$, S: S/H, T: $4MS/C_{29}ST$, U: β -胡萝卜烷/ nC_{max} 。

表 3 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的生物标志化合物特征

Table 3 The biomarkers characteristics of the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

层位	大隆组	龙潭组	孤峰组		栖霞组	
			硅质泥岩	硅质岩	上段	下段
$\alpha\alpha C_{27-29}ST$	L形	L形	V形	反L形	反L形	L形
$C_{27}/C_{29}ST$	>0.83	>0.83	0.6~0.83	<0.6	<0.6	>0.83
$4MS/C_{29}ST$	≥ 0.1	≥ 0.1	≥ 0.1	<0.1	<0.1	≥ 0.1
$C_{21-22}/C_{29}ST$	≥ 0.2	≥ 0.2	<0.2	<0.2	<0.2	≥ 0.2
$Dia.C_{27}/C_{27}ST$	≥ 0.22	≥ 0.22	0.1~0.22	<0.1	<0.1	≥ 0.22
$C_{28}/C_{29}ST$	<0.8	<0.8	<0.8	>0.9	>0.9	<0.8
S/H	<1	<1	<1	≥ 1	≥ 1	<1
β -胡萝卜烷/ nC_{max}	<0.1	<0.1	0.1~0.5	≥ 0.5	≥ 0.5	<0.1
DBT/P	0.13	0.03~0.46	0.11~1.2	0.48~0.84	0.06	0.03
DBTs/(DBTs+F _s)	0.33	0.09~0.76	0.63~0.90	0.86~0.94	0.43	0.2
三芳甾烷系列	缺失	缺失	微量	微量	微量	缺失

的是,孤峰组和栖霞组上段硅质岩的规则甾烷主要表现为“反L”形分布,饱和烃总离子流图中检测出了丰富的 β -胡萝卜烷,甾烷系列及 β -胡萝卜烷化合

物丰度具有“四低三高”的特征,即 $C_{27}/C_{29}ST < 0.6$ 、 $4MS/C_{29}ST < 0.1$ 、 $C_{21-22}/C_{29}ST < 0.2$ 、 $Dia.C_{27}/C_{27}ST < 0.1$ 、 $C_{28}/C_{29}ST > 0.9$ 、 $S/H \geq 1$ 、 β -胡萝卜烷/ $nC_{max} \geq$

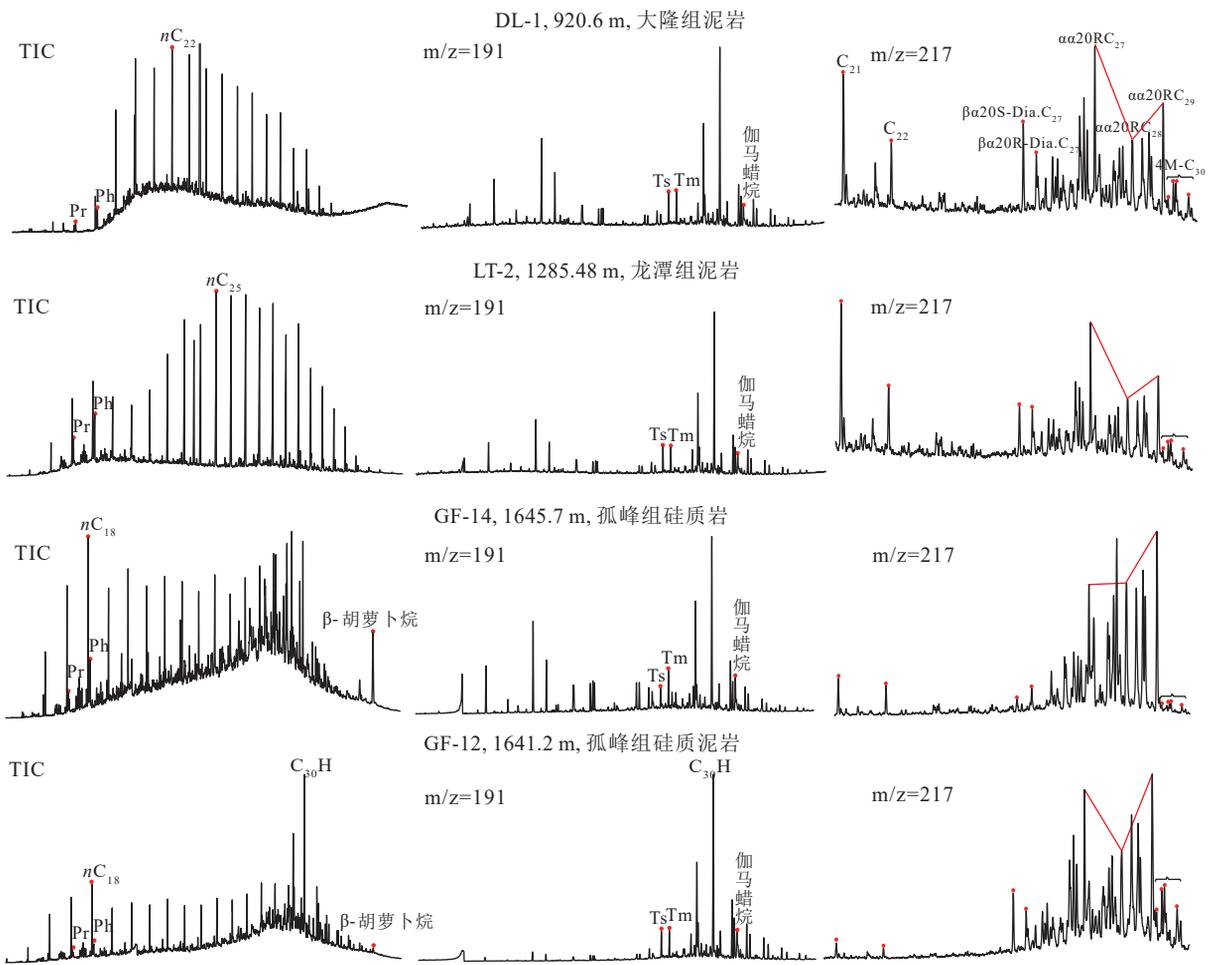


图3 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩饱和烃馏分总离子流图 (TIC)、甾萜烷 ($m/z=191, 217$) 质量色谱图

Fig.3 The total ion chromatograms (TIC) and mass chromatograms of steranes ($m/z=217$) and terpanes ($m/z=191$) of the saturated fractions in the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

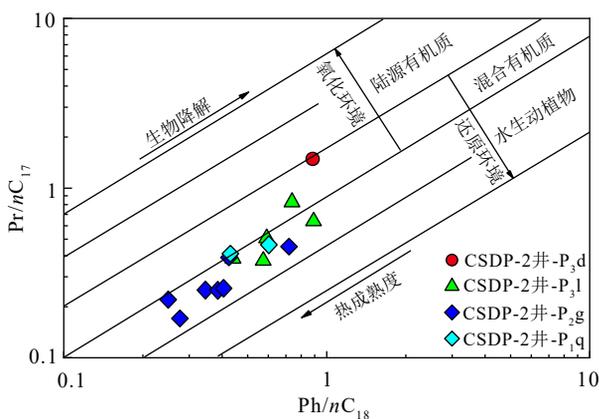


图4 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的 Pr/nC_{17} - Ph/nC_{18} 交汇图

Fig.4 Crossplot of Pr/nC_{17} and Ph/nC_{18} for the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

0.5。孤峰组硅质泥岩烃源岩的规则甾烷表现为“V”形分布,饱和烃总离子流图中检测到中等丰度的 β -胡萝卜素,其甾烷系列及 β -胡萝卜素化合物突

出的特征是 C_{27} 甾烷、重排甾烷和 β -胡萝卜素丰度中等($0.6 < C_{27}/C_{29}ST < 0.83, 0.1 < Dia.C_{27}/C_{27}ST < 0.22, 0.1 < \beta\text{-胡萝卜素}/nC_{max} < 0.5$), 而 $4MS/C_{29}ST, C_{28}/C_{29}ST, S/H$ 参数与龙潭组泥岩类似, $C_{21-22}/C_{29}ST$ 值与孤峰组硅质岩类似。

CSDP-2 井二叠系烃源岩的甾烷组成中三环甾烷的碳数分布范围为 $C_{19}-C_{31}$, 均呈现出以 C_{23} 三环甾烷($C_{23}TT$)为主峰的近正态分布(图3), 且烃源岩的 $C_{23}TT/C_{30}H$ 主体为 $0.13 \sim 0.71, C_{24}Tet/C_{26}TT$ 为 $0.44 \sim 0.60, ETR$ 值为 $0.5 \sim 0.82$, 未表现出明显的差异。五环三甾烷中藿烷系列均以 $C_{30}H$ 为主峰、 $C_{29}H$ 为次主峰, 呈近正态分布, C_{31-35} 升藿烷系列含量较低, 且随碳数增加呈递减趋势。栖霞组-孤峰组烃源岩的 Ts/Tm 为 $0.52 \sim 1.34$, 平均值为 0.81 , 龙潭组-大隆组烃源岩的 Ts/Tm 为 $0.92 \sim 1.1$, 平均值为 1.0 。四套烃源岩的伽马蜡烷指数为 $0.1 \sim 0.26$, 未表现出明显差异。这些特征与我国南方地区海相古生界烃源岩的甾烷化合物特征具有相似性^[2],

说明 CSDP-2 井二叠系烃源岩的萘烷系列分布出现了趋同现象。

3.3 芳烃化合物特征

CSDP-2 井二叠系四套烃源岩的芳烃馏分总离子流图如图 5 所示,芳烃化合物参数如表 4 所示。龙潭组、大隆组和栖霞组下段烃源岩的芳烃馏分中菲系列化合物占优势,三芴系列表现为芴>硫芴>氧芴,二苯并噻吩/菲 (DBT/P) 为 0.03~0.46(平均

值为 0.1), C_0 - C_2 同系物的二苯并噻吩系列化合物(DBTs)相对于 C_0 - C_2 同系物的芴系列化合物(Fs)的含量比值 DBTs/(DBTs+Fs) 为 0.09~0.76(平均值 0.25),且未检测到三芳甾烷系列化合物。与之不同的是,栖霞组上段-孤峰组烃源岩的芳烃馏分中二苯并噻吩系列化合物占绝对优势,三芴系列表现为硫芴>芴>氧芴, DBT/P 为 0.06~1.2(平均值为 0.57), DBTs/(DBTs+Fs) 为 0.43~0.94(平均值 0.81),三芳甾烷系列的相对含量 (TARs/P) 为 0~0.04(平均值为 0.01)。

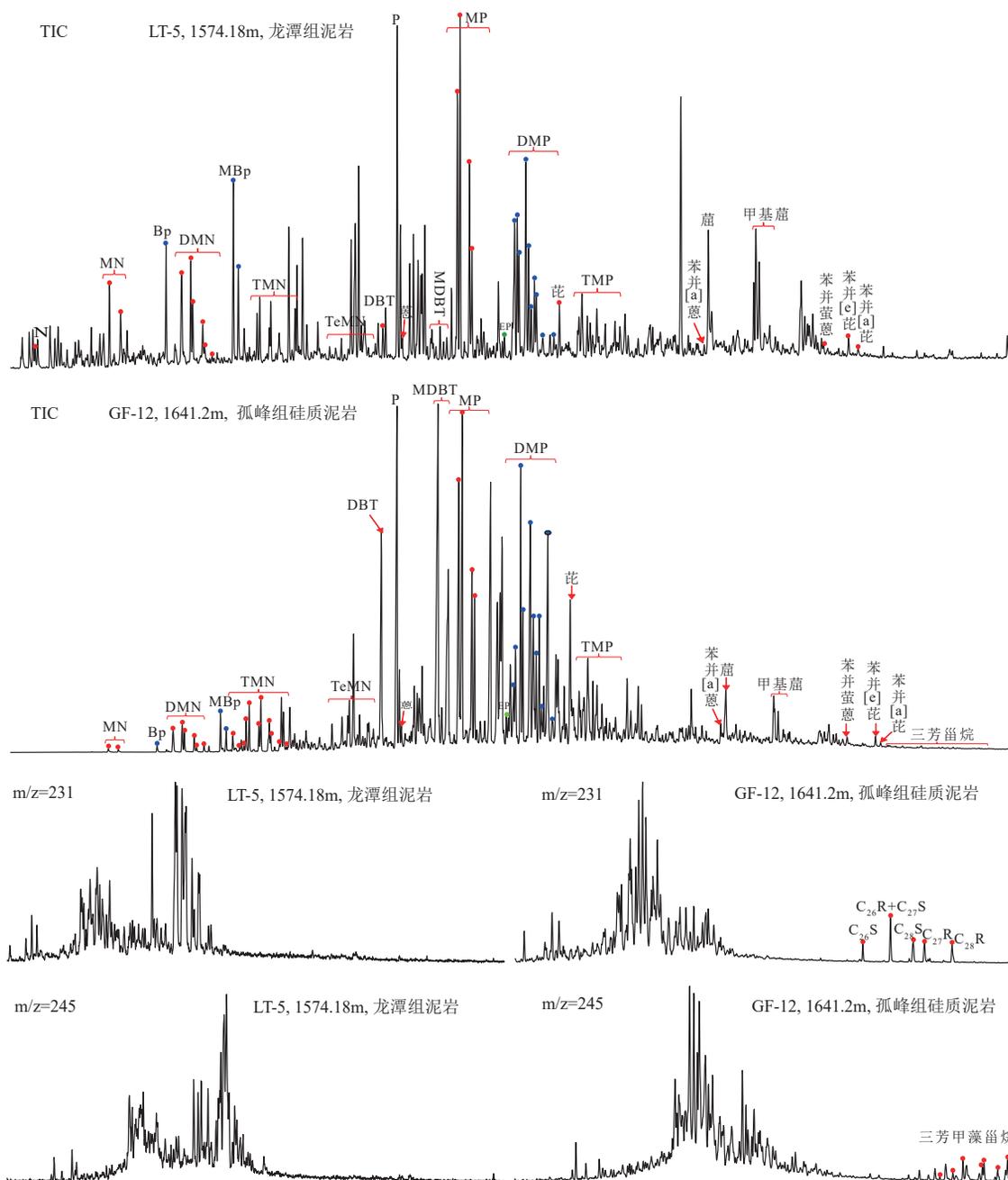


图 5 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩芳烃组分的总离子流图 (TIC), 三芳甾烷 ($m/z=231$) 和甲基三芳甾烷 ($m/z=245$) 质量色谱图

Fig.5 Total ion chromatogram (TIC), and the mass chromatograms of triaromatic sterane ($m/z=231$) and methyl triaromatic sterane ($m/z=245$) of the aromatic fractions in the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

表4 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩芳香烃组分的相关参数
Table 4 Parameters of aromatic fractions of the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

样品号	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
DL-1	0.52	0.28	0.53	0.72	0.56	0.33	0.83	1.43	0.33	0.35	0.13	0
LT-2	0.70	0.38	1.43	1.44	1.55	0.52	2.58	6.29	0.13	0.10	0.03	0
LT-3	0.70	0.38	1.26	1.54	1.38	0.42	1.52	3.99	0.15	0.12	0.04	0
LT-4	0.72	0.41	1.41	1.46	1.61	0.49	2.06	5.52	0.13	0.09	0.04	0
LT-5	0.70	0.39	1.25	1.55	1.41	0.41	1.24	5.21	0.09	0.12	0.03	0
LT-6	0.69	0.39	0.82	1.81	0.92	0.41	1.10	5.20	0.19	0.20	0.04	0
LT-7	0.70	0.38	1.14	1.62	1.23	0.48	2.04	6.79	0.76	0.14	0.46	0
GF-8	0.68	0.37	1.34	1.50	1.47	0.53	2.99	5.74	0.63	0.14	0.11	0.35%
GF-9	0.66	0.36	1.08	1.65	1.18	0.50	2.52	5.24	0.91	0.21	0.59	0.03%
GF-10	0.72	0.40	1.42	1.45	1.59	0.49	2.13	7.28	0.90	0.22	1.20	0
GF-11	0.69	0.38	1.33	1.50	1.48	0.50	2.63	6.31	0.93	0.17	0.70	0.03%
GF-12	0.68	0.38	1.11	1.64	1.23	0.47	2.06	4.89	0.88	0.21	0.63	4.1%
GF-13	0.67	0.37	0.98	1.71	1.09	0.50	2.36	5.58	0.86	0.27	0.48	0.4%
GF-14	0.72	0.41	1.41	1.46	1.58	0.51	2.66	5.77	0.94	0.17	0.84	0.07%
QX-15	0.72	0.41	1.47	1.42	1.68	0.48	2.28	5.14	0.43	0.13	0.06	0.14%
QX-16	0.75	0.41	1.65	1.31	1.81	0.51	2.55	7.26	0.20	0.09	0.03	0

注: A: $F1=(2-MP+3-MP)/(2-MP+3-MP+1-MP+9-MP)$, B: $F2=2-MP/(2-MP+3-MP+1-MP+9-MP)$, C: $MPI-1=1.5*(2-MP+3-MP)/(P+1-MP+9-MP)$, D: $Rc=0.4+0.6*MPI-1$ 或 $Rc=2.3-0.6*MPI-1$, E: $MPI-2=3*2-MP/(P+1-MP+9-MP)$, F: $MDBI=4-MDBT/(DBT+4-MDBT+2-MDBT+3-MDBT+1-MDBT)$, G: $MDR=4-MDBT/DBT$, H: 4,6-/1,4-DMDBT, I: $DBTs/(DBTs+Fs)$, J: $DBFs/(DBFs+Fs)$, K: DBT/P , L: $TARs/P$ 。

上述特征说明, 栖霞组上段-孤峰组和栖霞组下段-龙潭组-大隆组烃源岩的沉积环境和藻类供给量具有显著差异。此外, 四套烃源岩均检测出较丰富的蒽、苯并蒽、蒾、芘系列等典型的高等植物生源的稠环芳烃化合物^[8, 45-47], 反映出烃源岩的有机质来源中存在不同比例的高等植物输入。

4 生物标志化合物的地质意义

4.1 烃源岩的成熟度演化

常规甾萜烷成熟度参数在高温演化阶段仍具有适用性的指标主要为三降藿烷比 (Ts/Tm) 和重排甾烷参数 ($Dia.C_{27}/C_{27}ST$)^[39], 成熟度升高会造成上述参数增大。但 $Dia.C_{27}/C_{27}ST$ 和 Ts/Tm 除受成熟度影响外, 还受黏土矿物含量、氧化还原条件和水体酸度影响^[48], 在黏土矿物含量丰富的酸性环境中含量偏高, 而在碳酸盐岩烃源岩或原油中比值普遍较低。本次测试烃源岩的饱和烃馏分中 $Dia.C_{27}/C_{27}ST$ 和 Ts/Tm 与样品深度并无明显正相关关系, 说明 $Dia.C_{27}/C_{27}ST$ 和 Ts/Tm 因受岩性、沉积环境或高成

熟度的趋同效应^[3] 等因素影响无法反映成熟度差异。芳烃成熟度参数中萘系列、菲系列和二苯并噻吩系列对有机质成熟度指示作用的理论依据主要包括成熟阶段的甲基重排反应和高演化阶段的脱甲基反应^[9, 12, 40]。一般认为, 甲基菲参数 $MPI-1$ 、 $MPI-2$ 、 $F1$ 和 $F2$ 可综合评价 Ro 在 0.65%~2.0% 范围内的有机质成熟度^[14, 49], 烷基萘和烷基二苯并噻吩可以评价高成熟阶段的有机质成熟度, 但具体的成熟度评价范围因地而异^[14, 50-51]。上述芳烃成熟度指标也受沉积环境和有机质类型的影响, 例如甲基菲指数适用于煤和 III 型干酪根有机质^[10-11, 14], 但在淡水-微咸水环境中该指数偏低, 在咸水强还原环境中该指数偏高^[8]; 烷基萘参数易受生物降解和烷基萘的绝对浓度等因素影响^[14]; $MDR(4-MDBT/DBT)$ 和 $MDBI$ 适用于 II 型和 III 型有机质的成熟度表征^[52], 但沉积环境的还原性增强容易引起 4-MDBT 的富集^[50]。

如图 6 所示, 根据前人研究数据^[30], 大隆组-龙潭组烃源岩的镜质体反射率 Ro 随深度增加呈单调递增的趋势, 在孤峰组-栖霞组上段 (1630~1670 m) 由于岩浆热液流体上涌^[30], 烃源岩的 Ro 在约 40 m 的深度内由 1.7% 左右迅速增加至 2.0% 以上, 栖霞

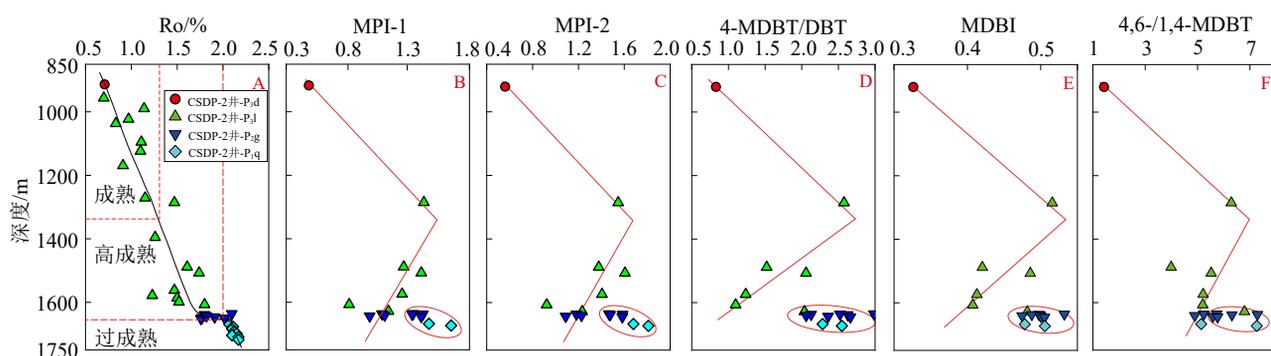


图 6 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的样品深度与镜质体反射率 R_o 、甲基菲参数、烷基二苯并噻吩参数的相关关系
Fig.6 The correlation relationships of the sample depth to the vitrinite reflectance R_o , parameters of alkyl phenanthrene, and parameters of alkyl dibenzothiophene for the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

组下段 R_o 随深度变化的斜率恢复正常。本次研究发现, CSDP-2 井龙潭组-大隆组烃源岩的甲基菲指数(MPI-1、MPI-2)和甲基二苯并噻吩参数(4-MDBT/DBT、MDBI)、二甲基二苯并噻吩参数(4,6-/1,4-DMDBT)随深度变化明显存在两阶段关系(图 6)。在 876~1350 m 深度段, MPI-1、MPI-2、4-MDBT/DBT、MDBI、4,6-/1,4-DMDBT 均表现为随深度增加而增大; 在 1350~1630 m 深度段, 上述参数随深度增加而减小。然而, F1 和 F2 参数随深度增加并未出现减小的趋势(表 4)。上述现象与前人提出的 MPI-1 指数^[11]、MDBI^[53]、MDR^[52, 54] 随成熟度增加呈现两阶段变化特征一致。这说明 CSDP-2 井二叠系烃源岩中的甲基菲和甲基二苯并噻吩在 1350 m 以上深度随成熟度增加表现为甲基重排作用, 而 1350 m 以下深度(即约 $R_o > 1.35\%$)随成熟度增加主要表现为脱甲基作用, 由此导致菲(P)和二苯并噻吩(DBT)化合物的含量增加而造成 MPI-1、MPI-2、4-MDBT/DBT、MDBI、4,6-/1,4-DMDBT 参数随深度变化呈负相关的趋势。因此, 甲基菲指数和甲基二苯并噻吩参数可有效评估南黄海盆地龙潭组-大隆组烃源岩的成熟度。

孤峰组-栖霞组烃源岩的 MPI-1、MPI-2、4-MDBT/DBT、MDBI、4,6-/1,4-DMDBT 相比龙潭组-大隆组烃源岩偏高, 且明显偏离参数随深度的演化趋势(图 6)。针对该现象, 本文利用氧化还原性指标二苯并噻吩/菲(DBT/P)^[55] 与上述参数进行拟合, 发现孤峰组烃源岩的 DBT/P 与 MPI-1、F1、4-MDBT/DBT、4,6-/1,4-DMDBT 参数之间存在明显的正相关(图 7)。这说明孤峰组烃源岩的甲基菲和甲基二苯并噻吩成熟度参数主要受沉积环境影响, 水体还原性逐渐增强使得 3-MP、2-MP、4-MDBT、4,6-DMDBT 化合物的相对丰度逐渐增加进而造成 MPI-1、F1、4-MDBT/DBT、4,6-/1,4-DMDBT 逐渐增大。因此, 甲

基菲指数和烷基二苯并噻吩参数不能用于评估南黄海盆地孤峰组烃源岩的成熟度。

4.2 烃源岩的有机质来源

CSDP-2 井二叠系烃源岩的甾烷系列化合物尚未出现趋同现象, 且与成熟度无明显相关性, 因而该系列化合物参数可用于反映烃源岩的有机质来源。通常认为 C_{27} 规则甾烷来源于低等生物如浮游动物及浮游植物, C_{29} 甾烷既可来源于陆相高等植物^[56], 又可来源于蓝绿藻^[57] 和褐藻^[58], C_{28} 甾烷通常与含有叶绿素 c 的特定浮游植物(如硅藻、颗石藻和沟鞭藻等)有关, 其丰度随地层年龄的减小而增加, 上古生界烃源岩或原油的 $C_{28}/C_{29}ST$ 一般为 0.4~0.7^[59]。本次测试的样品中栖霞组上段-孤峰组烃源岩的 $C_{28}/C_{29}ST$ 多大于 0.7, 且随 $C_{27}/C_{29}ST$ 的增加而降低(图 8A), 而栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩的 $C_{28}/C_{29}ST$ 普遍小于 0.8, 且随 $C_{27}/C_{29}ST$ 增加而增加(图 8A), 说明栖霞组上段-孤峰组和栖霞组下段、龙潭组-大隆组烃源岩的 C_{28} 甾烷来源存在差异。4-甲基甾烷通常来源于海相和非海相的甲藻(如沟鞭藻)或细菌, 在淡水环境中其丰度相对于咸水环境更丰富^[39]。β-胡萝卜烷主要与缺氧的、盐湖相或高局限性海相环境有关^[39], 其前驱物与耐盐的单细胞藻类杜氏藻属(*Dunaliella*)有关^[60]。如图 8B、8C 所示, 栖霞组上段-孤峰组烃源岩的 $C_{28}/C_{29}ST$ 与 $4MS/C_{29}ST$ 呈明显负相关性、与 β-胡萝卜烷/ nC_{max} 呈明显正相关性, 而栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩的 $C_{28}/C_{29}ST$ 与 $4MS/C_{29}ST$ 存在较弱的正相关性、与 β-胡萝卜烷/ nC_{max} 无明显相关性, 这说明栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩中的 C_{28} 甾烷来源于淡水的甲藻类生物, 而栖霞组上段-孤峰组烃源岩中 C_{28} 甾烷与杜氏藻等耐盐性的藻类有关。元素地球化学研究表明, CSDP-2 井孤峰组硅质岩主要

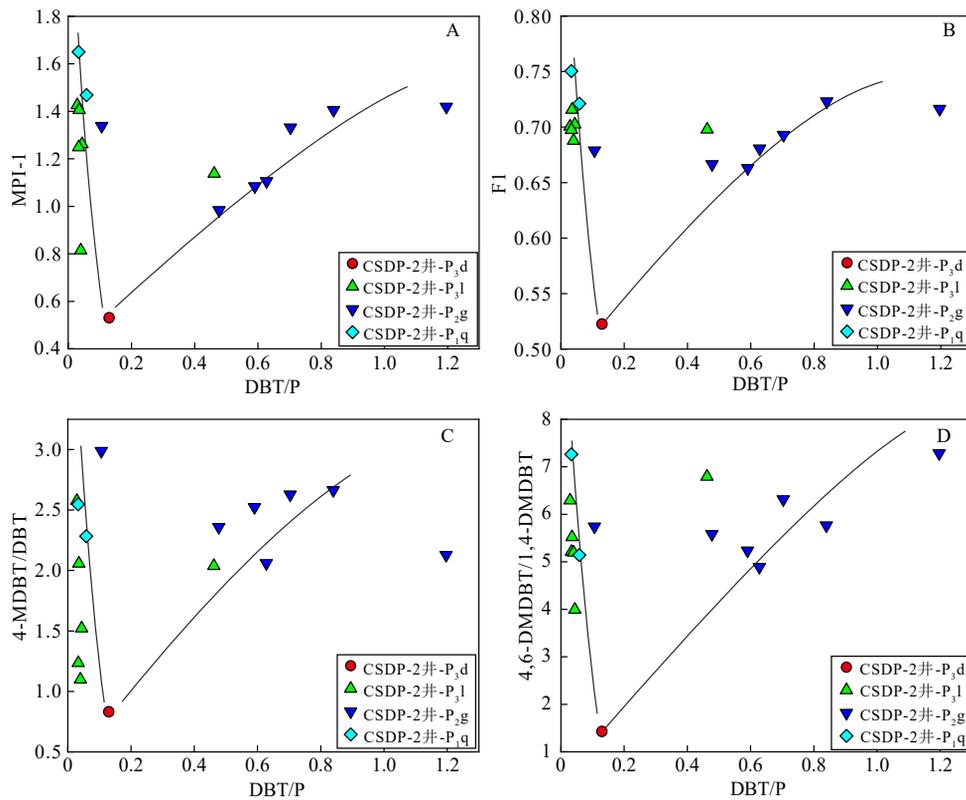


图7 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的二苯并噻吩/菲 (DBT/P) 与甲基菲、烷基二苯并噻吩参数的相关关系
Fig.7 Correlations of DBT/P vs parameters of methyl phenanthrene and alkyl dibenzothiophene for the Permian source rocks in Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

为上升流成因^[61],而硅藻在上升洋流富营养的冷海水中往往最富集^[62],因此孤峰组硅质岩中丰度极高的 C_{28} 甾烷意味着沉积时期海水中可能出现了硅藻类浮游植物的繁盛。这从 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷三角图 (图 8D) 上栖霞组上段-孤峰组硅质岩落在浮游生物-陆生植物与硅藻生物的过渡区,而孤峰组硅质泥岩和龙潭组-大隆组泥岩主要落在浮游生物-陆生植物区域也能得到证实。

如前所述,本次测试样品的 $\text{Dia.C}_{27}/\text{C}_{27}\text{ST}$ 并不能反映成熟度差异,但对比不同岩性烃源岩的 $\text{Dia.C}_{27}/\text{C}_{27}\text{ST}$ 发现该比值明显表现为泥岩 > 硅质泥岩 > 硅质岩 (图 8E),说明 CSDP-2 井二叠系烃源岩的 $\text{Dia.C}_{27}/\text{C}_{27}\text{ST}$ 主要受黏土矿物含量影响。 C_{21-22} 孕甾烷来源于微生物活动过程中产生的生物激素孕甾醇和孕甾酮,以及热演化过程中的规则甾烷侧链断裂^[63]。CSDP-2 井栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩的 $C_{21-22}/C_{29}\text{ST}$ 和 $\text{Dia.C}_{27}/\text{C}_{27}\text{ST}$ 呈明显正相关性,而栖霞组上段-孤峰组烃源岩的 $C_{21-22}/C_{29}\text{ST}$ 与 $\text{Dia.C}_{27}/\text{C}_{27}\text{ST}$ 无明显相关性 (图 8E),说明栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩中的 C_{21-22} 孕甾烷主要来源于规则甾烷的热降解,该时期水体中的微生物活动并不明显,而栖霞组上段-孤峰组烃源岩的

C_{21-22} 孕甾烷主要来源于微生物。

规则甾烷/藿烷反映真核生物 (主要是藻类和高等植物) 与原核生物 (主要是细菌) 对烃源岩的贡献。一般而言,高 S/H 值 (≥ 1) 反映有机质主要来源于浮游生物或底栖藻类^[64],而低 S/H 值则指示陆生的或经微生物改造的有机质^[65]。三芳甾烷和三芳甲甾烷是甲甾烷芳构化的产物,其来源与沟鞭藻^[66]、海相疑源类胞囊或球状甲甾^[62] 等浮游藻类有关。栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩的 $S/H < 1$,且芳烃馏分中未检测到三芳甾烷,而栖霞组上段-孤峰组硅质岩的 $S/H > 1$ 、硅质泥岩的 $S/H < 1$ (图 8F),且芳烃馏分中存在微量的三芳甾烷系列化合物 (图 5)。结合 C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷三角图、S/H 值和三芳甾烷含量特征,可以认为栖霞组下段和龙潭组-大隆组烃源岩中的有机质主要来源于浮游生物和陆生高等植物,而栖霞组上段-孤峰组钙质/硅质岩的有机质来源于浮游生物和硅藻,硅质泥岩的有机质来源于浮游生物、硅藻和陆生高等植物。此外,四套烃源岩饱和烃馏分中的 S/H 与 $4\text{MS}/\text{C}_{29}\text{ST}$ 存在明显的负相关性 (图 8F),而与 $C_{28}/\text{C}_{29}\text{ST}$ 存在较明显的正相关性,说明孤峰组沉积时期硅藻类生物繁盛是造成海水的初级生产力升高的主要因素,陆源淡

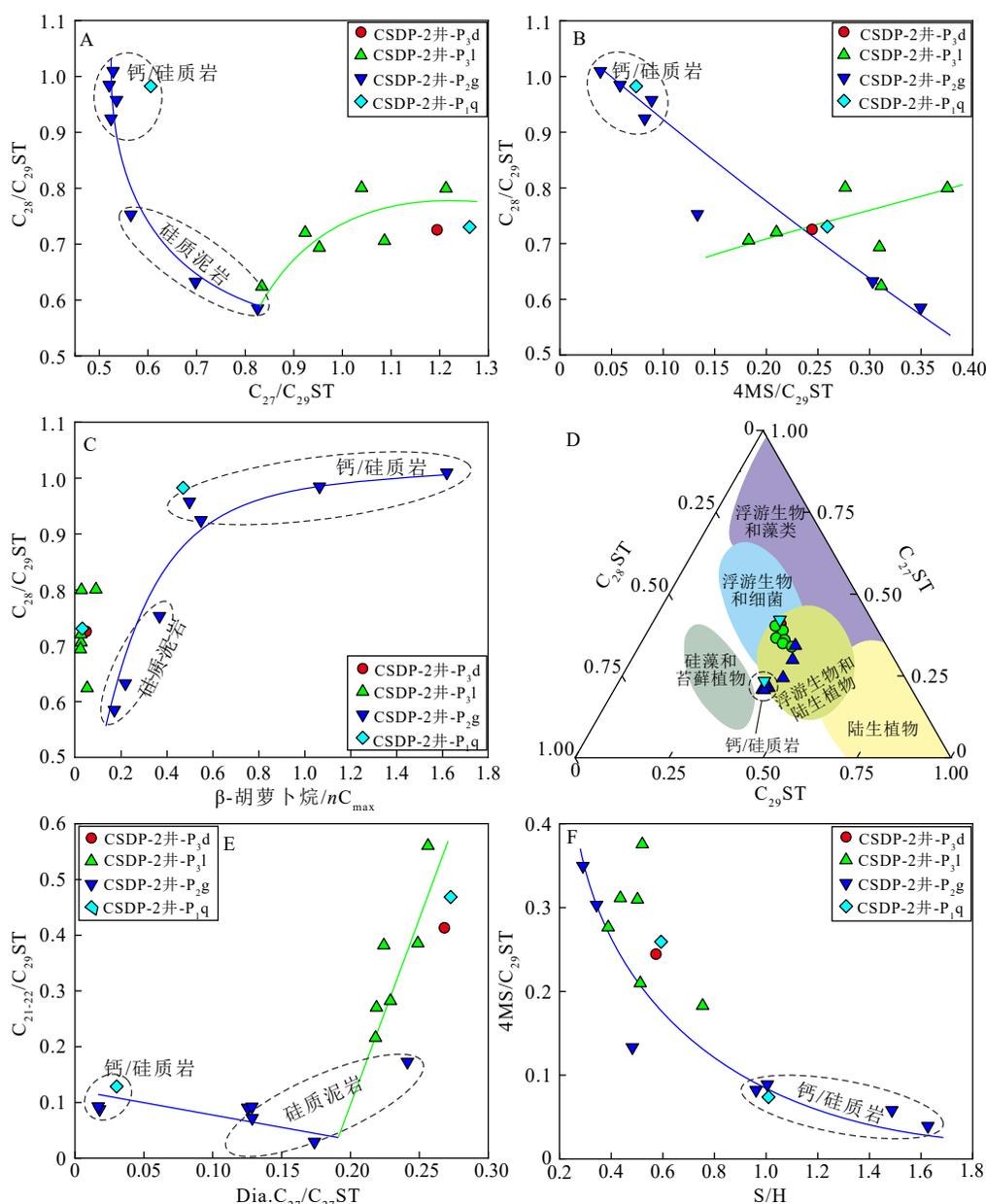


图 8 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的甾烷及 β -胡萝卜素相关参数散点图

A: C_{28}/C_{29} 甾烷与 C_{27}/C_{29} 甾烷; B: C_{28}/C_{29} 甾烷与 4-甲基甾烷/ C_{29} 甾烷; C: C_{28}/C_{29} 甾烷与 β -胡萝卜素/ nC_{max} ; D: C_{27} - C_{28} - C_{29} 甾烷相对含量三角图, 底图据文献 [67]; E: C_{21-22} 孕甾烷/ C_{29} 甾烷与 C_{27} 重排甾烷/ C_{27} 甾烷; F: C_{28}/C_{29} 甾烷与甾/藿。

Fig.8 Scatter plots among relative parameters of sterane and β -carotane in the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

A: $C_{28}/C_{29}ST$ vs $C_{27}/C_{29}ST$; B: $C_{28}/C_{29}ST$ vs $4MS/C_{29}ST$; C: $C_{28}/C_{29}ST$ vs β -carotene/ nC_{max} ; D: $C_{27}ST$ - $C_{28}ST$ - $C_{29}ST$ relative content triangle; template is from reference [67]; E: $C_{21-22}/C_{29}ST$ vs $Dia.C_{27}/C_{27}ST$; F: S/H vs $4MS/C_{29}ST$.

水及黏土矿物的输入可能会引起“稀释效应”而造成海水初级生产力降低。

4.3 烃源岩的沉积环境

CSDP-2 井二叠系烃源岩的二苯并噻吩系列化合物丰度差异显著, 且与成熟度无明显相关性, 因而该系列化合物参数可用于评价烃源岩的沉积环

境。通常在盐湖相、海相碳酸盐烃源岩的三芴系列中硫芴含量较高, 在沼泽相煤或煤成油的三芴系列中氧芴含量较高, 在陆相淡水、微咸水湖相烃源岩的三芴系列中芴的含量较高 [68-69]。李水福等 [70] 指出利用 C_0 - C_2 同系物统计的 $DBTs/(DBTs+Fs)$ 与 $DBFs/(DBFs+Fs)$ 的关系图可以有效地区分氧化、还原环境以及介于其间的过渡环境。Hughes 等 [55] 认

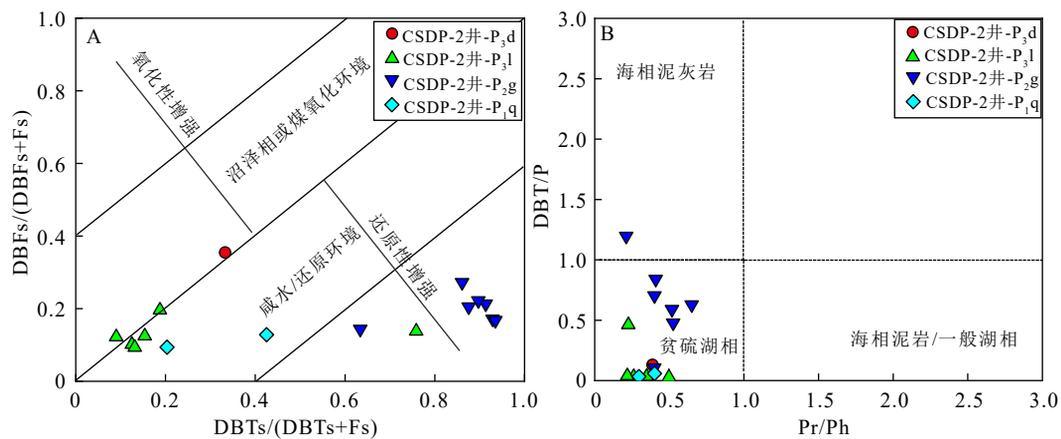


图9 南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩的二苯并噻吩系列化合物相关参数散点图

A: 二苯并噻吩系列/(二苯并噻吩系列+芴系列)和二苯并呋喃系列/(二苯并呋喃系列+芴系列), 图版据文献 [70]; B: 姥鲛烷/植烷 (Pr/Ph) 和二苯并噻吩/菲, 图版据文献 [55]。

Fig.9 Scatter plots among relative parameters of the dibenzothiophene series compounds in the Permian source rocks of Well CSDP-2, South Yellow Sea Basin

A: DBTs/(DBTs+F_s) vs. DBFs/(DBFs+F_s); template is from reference [70]; B: Pr/Ph vs. DBT/P; template is from reference [55].

为 DBT/P 反映了沉积环境中与有机质结合的活性硫的含量, 利用 DBT/P-Pr/Ph 可区分不同成熟度和不同岩性烃源岩的沉积环境。孤峰组烃源岩的三芴系列中硫芴含量高, 在 DBTs/(DBTs+F_s)-DBFs/(DBFs+F_s) 相对关系图版上样品全落入强还原高盐环境 (图 9A), 且部分样品的噻吩硫含量达到了富含硫的标准 (图 9B), β-胡萝卜素异常丰富 (图 8C), 这些特征都说明孤峰组沉积于深水陆棚或盆地相强还原高盐环境。栖霞组烃源岩样品在 DBTs/(DBTs+F_s)-DBFs/(DBFs+F_s) 相对关系图版上落入正常咸水还原环境 (图 9A), 且噻吩硫含量较低、β-胡萝卜素含量中等 (图 9B, 8C), 说明栖霞组烃源岩沉积于台地相或浅水陆棚相正常还原性浅海环境。龙潭组-大隆组烃源岩的三芴系列中芴含量较高, 在 DBTs/(DBTs+F_s)-DBFs/(DBFs+F_s) 相对关系图版上样品主要落入沼泽相氧化环境和正常海相环境 (图 9A), 且样品的噻吩硫含量和 β-胡萝卜素含量极低 (图 9B, 8C), 说明龙潭组-大隆组烃源岩沉积于沼泽相或潮坪相等淡水氧化或微咸水贫氧环境。少数龙潭组底界烃源岩样品的噻吩硫含量较高, 预示着龙潭组底部为还原环境, 说明孤峰组晚期可能存在缓慢的海退过程, 也可能与 CSDP-2 井在龙潭组早期为沉积洼地 [29] 有关。

5 结论

(1) 南黄海盆地上二叠统烃源岩的甲基菲指数 (MPI-1、MPI-2)、烷基二苯并噻吩参数 (4-MDBT/

DBT、MDBI、4,6-/1,4-DMDBT) 随深度增加呈两阶段变化特征, 可作为有效的成熟度指标; 中下二叠统烃源岩的上述参数受还原环境影响普遍偏高, 不能用于反映烃源岩的有机质成熟度。

(2) 根据甾烷系列、三芳甾烷系列、烷基二苯并噻吩系列化合物和 β-胡萝卜烷的相对丰度特征, 可将南黄海盆地 CSDP-2 井二叠系烃源岩分为 3 类: 龙潭组-大隆组和栖霞组下段泥岩烃源岩、栖霞组上段-孤峰组钙质/硅质岩烃源岩和孤峰组硅质泥岩烃源岩。

(3) 南黄海盆地龙潭组-大隆组和栖霞组下段泥岩烃源岩沉积于淡水氧化或微咸水贫氧环境, 有机质来源于浮游生物和陆生高等植物; 栖霞组上段-孤峰组硅质泥岩和硅质岩烃源岩沉积于还原-强还原高盐度环境, 其中硅质岩的有机质来源于浮游生物和硅藻, 硅质泥岩的有机质来源于浮游生物、硅藻和陆生高等植物。

致谢: 在论文撰写过程中受到了程熊博士、丁文静博士、赵子斌博士的帮助, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] 左兆喜, 曹剑, 胡文瑛, 等. 高演化有机质的芳烃成熟度表征: 基于焦沥青反射率和拉曼参数的优选 [J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 65(12): 2335-2357. [ZUO Zhaoxi, CAO Jian, HU Wenxuan, et al. Characterizing the maturity of highly evolved organic matter based on aromatic hydrocarbons and optimization with pyrobitumen reflectance

- and Raman spectral parameters [J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(12): 2335-2357.]
- [2] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二): 南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. *海相油气地质*, 2009, 14(1): 1-15. [LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 2): Geochemical Characteristics of Four Suits of Regional Marine Source Rocks, South China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(1): 1-15.]
- [3] 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高、过成熟区海相油源对比问题[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(2): 8-14. [LIANG Digang, CHEN Jianping. Oil-source correlations for high and over matured marine source rocks in South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(2): 8-14.]
- [4] 包建平, 倪春华, 朱翠山, 等. 高演化地质样品中三芳甾类标志物及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 2020, 38(04): 898-911. [BAO Jianping, NI Chunhua, ZHU Cuishan, et al. Triaromatic Steroids and Their Geochemical Significance in Highly Mature Geological Samples in the North Guizhou Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(04): 898-911.]
- [5] Alexander R, Larcher A V, Kagi R I, et al. The use of plant derived biomarkers for correlation of oils with source rocks in the cooper/eromanga basin system, Australia [J]. *The APPEA Journal*, 1988, 28(1): 310-324.
- [6] 朱扬明, 顾圣啸, 李颖, 等. 四川盆地龙潭组高热演化烃源岩有机质生源及沉积环境探讨[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 35-44. [ZHU Yangming, GU Shengxiao, LI Ying, et al. Biological organic source and depositional environment of over-mature source rocks of Longtan Formation in Sichuan basin [J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 35-44.]
- [7] 朱扬明, 张洪波, 傅家谟, 等. 塔里木不同成因原油芳烃组成和分布特征[J]. *石油学报*, 1998, 19(3): 33-37. [ZHU Yangming, ZHANG Hongbo, FU Jiemo, et al. Distribution and Composition of Aromatic Hydrocarbon in Various Oils From Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(3): 33-37.]
- [8] 宋长玉, 金洪蕊, 刘璇, 等. 烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(02): 183-187. [SONG Changyu, JIN Hongrui, LIU Xuan, et al. Distribution of Methyl Phenanthrene in Sediments and its impacting on maturity parameters [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(02): 183-187.]
- [9] 李颖, 朱扬明, 郝芳, 等. 四川盆地北部上三叠统须家河组高成熟煤系烃源岩芳烃热演化与应用[J]. *中国科学:地球科学*, 2015, 58(11): 1960-1969. [LI Ying, ZHU Yangming, HAO Fang, et al. Thermal evolution and applications of aromatic hydrocarbons in highly mature coal-bearing source rocks of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northern Sichuan Basin [J]. *Science China:Earth Sciences*, 2015, 58(11): 1960-1969.]
- [10] Alexander R, Kagi R I, Rowland S J, et al. The effects of thermal maturity on distributions of dimethylnaphthalenes and trimethylnaphthalenes in some ancient sediments and petroleum [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(2): 385-395.
- [11] Radke M, Welte D H, Willsch H. Geochemical study on a well in the western Canada Basin: relation of the aromatic distribution pattern to maturity of organic matter [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(1): 1-10.
- [12] 李美俊, 王铁冠. 原油中烷基萘的形成机理及其成熟度参数应用[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(6): 606-611,623. [LI Meijun, WANG Tieguan. The generating mechanism of methylated naphthalene series in crude oils and the application of their maturity parameter [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(6): 606-611,623.]
- [13] 王保忠, 王传尚, 汪啸风, 等. 海相高过成熟页岩芳烃特征及页岩气意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3705-3716. [WANG Baozhong, WANG Chuanshang, WANG Xiaofeng, et al. Characteristics of Aromatic Compounds in High-over Matured Marine Shale and Its Significance to Shale Gas [J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3705-3716.]
- [14] 王崇敬, 张鹤, 李世宇, 等. 基于分子标志物的有机质成熟度评价参数选择及其适用范围分析[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(4): 202-211. [WANG Chongjing, ZHANG He, LI Shiyu, et al. Maturity parameters selection and applicable range analysis of organic matter based on molecular markers [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(4): 202-211.]
- [15] 陈治军, 张亚雄, 王永昌, 等. 多芳烃参数定量评价烃源岩成熟度的方法: 以银额盆地中生界烃源岩为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 139-149. [CHEN Zhijun, ZHANG Yaxiong, WANG Yongchang, et al. Quantitative assessment of source rock maturity with multiple aromatic parameters: a case study of Mesozoic source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 139-149.]
- [16] 陈建文, 雷宝华, 梁杰, 等. 南黄海盆地油气资源调查新进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(3): 1-23. [CHEN Jianwen, LEI Baohua, LIANG Jie, et al. New progress of petroleum resources survey in South Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(3): 1-23.]
- [17] 杜叶龙, 李双应, 孔为伦, 等. 安徽泾县—南陵地区二叠纪沉积相与沉积环境分析[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(4): 431-444. [DU Yelong, LI Shuangying, KONG Weilun, et al. The Permian sedimentary facies and depositional environment analysis the Jingxian-Nanling region of Anhui [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(4): 431-444.]
- [18] 丁江辉, 张金川, 石刚, 等. 皖南地区上二叠统大隆组页岩沉积环境与有机质富集机理[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 158-172. [DING Jianghui, ZHANG Jinchuan, SHI Gang, et al. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanisms of the Upper Permian Dalong Formation shale, southern Anhui Province, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 158-172.]
- [19] 丁江辉, 孙金声, 张金川, 等. 皖南地区大隆组页岩生物标志化合物特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 235-251. [DING Jianghui, SUN Jinsheng, ZHANG Jinchuan, et al. Characteristics and geological significance of biomarker for the upper Permian Dalong Formation shale in southern Anhui Province [J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 235-251.]
- [20] 葛海霞, 张枝焕. 下扬子黄桥-句容地区二叠系-下三叠统油源分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(26): 140-151. [GE Haixia, ZHANG Zhihuan. Oil-source analysis of Permian-lower Triassic crude oils from Huangqiao and Jurong area in Lower Yangtze Region [J]. *Science*

- Technology and Engineering*, 2015, 15 (26): 140-151.]
- [21] 宋换新, 文志刚, 包建平. 巢湖地区二叠系栖霞组和三叠系南陵湖组石灰岩生物标志物特征与生烃潜力: 以平顶山和马家山剖面为例[J]. 海相油气地质, 2015, 20 (2): 21-28. [SONG Huanxin, WEN Zhigang, BAO Jianping. Characteristics of biomarkers and hydrocarbon potential in lower Permian Qixia and lower Triassic Nanlinghu limestone: cases from Pingdingshan and Majiashan outcrops in Chao-hu, Anhui [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20 (2): 21-28.]
- [22] 江纳言, 贾蓉芬, 王子玉, 等. 下扬子区二叠纪古地理和地球化学环境[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-214. [JIANG Nayan, JIA Rongfen, WANG Ziyu, et al. Permian palaeogeography and geochemical environment in Lower Yangtze Region, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 1-214.]
- [23] 廖志伟. 下扬子地区二叠纪晚期沉积环境演化与烃源岩发育特征研究[D]. 南京大学博士学位论文, 2016. [LIAO Zhiwei. A study of source rock features and sedimentary environmental evolution during the late Permian in Lower Yangtze Region, Southeastern China[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2016.]
- [24] Cai L X, Xiao G L, Guo X W, et al. Assessment of Mesozoic and Upper Paleozoic source rocks in the South Yellow Sea Basin based on the continuous borehole CSDP-2 [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 101: 30-42.
- [25] 蔡来星, 王蛟, 郭兴伟, 等. 南黄海中部隆起中—古生界沉积相及烃源岩特征: 以CSDP-2井为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2017, 47 (4): 1030-1046. [CAI Laixing, WANG Jiao, GUO Xingwei, et al. Characteristics of sedimentary facies and source rocks of Mesozoic-Paleozoic in Central Uplift of South Yellow Sea: A case study of CSDP-2 Coring Well [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2017, 47 (4): 1030-1046.]
- [26] 蔡来星, 肖国林, 郭兴伟, 等. 南黄海盆地科学钻探CSDP-2井上古生界—中生界烃源岩评价及海相油气勘探前景[J]. 石油学报, 2018, 39 (6): 660-673. [CAI Laixing, XIAO Guolin, GUO Xingwei, et al. Evaluation of Upper Paleozoic and Mesozoic source rocks in Well CSDP-2 and marine oil & gas exploration prospect in the South Yellow Sea Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39 (6): 660-673.]
- [27] 蔡来星, 郭兴伟, 徐朝晖, 等. 南黄海盆地中部隆起上古生界沉积环境探讨[J]. 沉积学报, 2018, 36 (4): 695-705. [CAI Laixing, GUO Xingwei, XU Chaohui, et al. Depositional Environment of Upper Paleozoic in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36 (4): 695-705.]
- [28] 袁勇, 陈建文, 梁杰, 等. 应用多属性聚类分析方法研究南黄海盆地二叠系沉积特征[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32 (10): 44-50. [YUAN Yong, CHEN Jianwen, LIANG Jie, et al. Application of multiple attributes cluster analysis to Permian deposits in the South Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32 (10): 44-50.]
- [29] 李文强. 南黄海盆地中部隆起晚二叠世—早三叠世沉积演化[D]. 中国石油大学(华东)硕士学位论文, 2019. [LI Wenqiang. Sedimentary evolution of the Late Permian-Early Triassic in the central uplift of the South Yellow Sea Basin[D]. Master Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2019.]
- [30] Cai L X, Zhang X H, Guo X W, et al. Effective hydrocarbon-bearing geological conditions of the Permian strata in the South Yellow Sea Basin, China: Evidence from borehole CSDP-2 [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 196: 107815.
- [31] Chen G, Chang X C, Guo X W, et al. Geochemical characteristics and organic matter enrichment mechanism of Permian black mudstone in the South Yellow Sea Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109248.
- [32] 雷宝华, 张银国, 王明健, 等. 南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42 (2): 131-143. [LEI Baohua, ZHANG Yinguo, WANG Mingjian, et al. Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42 (2): 131-143.]
- [33] 张训华, 杨金玉, 李刚, 等. 南黄海盆地基底及海相中、古生界地层分布特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57 (12): 4041-4051. [ZHANG Xunhua, YANG Jinyu, LI Gang, et al. Basement structure and distribution of Mesozoic-Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57 (12): 4041-4051.]
- [34] 陈建文, 施剑, 刘俊, 等. 南黄海海相中—古生界地震地质条件[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32 (10): 1-8. [CHEN Jianwen, SHI Jian, LIU Jun, et al. Seismic Geological conditions of the Marine Meso-Paleozoic in the South Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32 (10): 1-8.]
- [35] 袁勇, 陈建文, 梁杰, 等. 南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41 (5): 181-193. [YONG Yuan, JIANWEN Chen, JIE Liang, et al. Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (5): 181-193.]
- [36] 谭思哲, 高顺莉, 葛和平, 等. 南黄海盆地二叠系烃源岩孢粉相特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45 (3): 691-700. [TAN Sizhe, GAO Shunli, GE Heping, et al. Palynofacies Characteristics and formation environment of Permian source rock in South Yellow Sea Basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2015, 45 (3): 691-700.]
- [37] Hu P P, Yang F L, Li S Z, et al. Opposite thrust systems under the Subei-South Yellow Sea Basin: A synthesis on the closure of the eastern Tethyan Ocean [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022 (231): 104075.
- [38] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. 地质学报, 2012, 86 (7): 1132-1142. [CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86 (7): 1132-1142.]
- [39] Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. The Biomarker Guide. Volume 2. Biomarkers and Isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [40] 包建平, 王铁冠, 王金渝. 下扬子地区海相中、古生界有机地球化学[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996: 140. [BAO Jianping, WANG Tieguan, WANG Jinyu. Marine Mesozoic-Paleozoic organic geochemistry in the Lower Yangtze region[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1996: 140.]

- [41] 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 Jingui. 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.]
- [42] 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 Baoquan, CAI Bin, FANG Jie. A simulation experiment of petroleum origin on Kerogen from shales of the Lower Xiamalin Formation in the Upper Proterozoic [J]. Experimental Petroleum Geology, 1990, 12(2): 147-161.]
- [43] 黄第藩, 赵孟军. 下古生界海相原油之中蜡的成因: 干酪根PY-GC分析提供的证据[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 12-20. [HUANG Difan, ZHAO Mengjun. The genesis of marine oils with middle wax from Lower Palaeozoic: evidences obtaining from Kerogen's PY-GC Analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 12-20.]
- [44] 陈世加, 王廷栋, 黄清德, 等. C₂₉甾烷成熟度指标“倒转”及其地质意义[J]. 天然气地球科学, 1997, 8(1): 28-30. [CHEN Shijia, WANG Tingdong, HUANG Qingde, et al. C₂₉ Sterane maturity index 'reversal' and its geological significance [J]. Natural Gas Geoscience, 1997, 8(1): 28-30.]
- [45] 郭小文, 何生, 石万忠. 珠江口盆地番禺低隆起轻质原油芳烃地球化学特征[J]. 石油学报, 2008, 29(1): 52-57. [GUO Xiaowen, HE Sheng, SHI Wanzhong. Aromatic geochemistry characteristics of light oils from Panyu Lower Uplift in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(1): 52-57.]
- [46] 刘亚洲, 刚文哲, 陈果, 等. 鄂尔多斯盆地盐池—定边地区长7段烃源岩芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 818-828. [LIU Yazhou, GANG Wenzhe, CHEN Guo, et al. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbons of Chang7 source rocks from the Yanchi-Dingbian area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 818-828.]
- [47] 孟江辉, 张敏, 姚明君. 不同沉积环境原油的芳烃组成特征及其地质地球化学意义[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(1): 228-231. [MENG Jianghui, ZHANG Min, YAO Mingjun. Features of aromatic composition in crude under different sedimentary environments and its geochemical meanings [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2008, 30(1): 228-231.]
- [48] Bennett B, Olsen S D. The influence of source depositional conditions on the hydrocarbon and nitrogen compounds in petroleum from central Montana, USA [J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(6): 935-956.
- [49] 陈琰, 包建平, 刘昭茜, 等. 甲基菲指数及甲基菲比值与有机质热演化关系: 以柴达木盆地北缘地区为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 508-512. [CHEN Yan, BAO Jianping, LIU Zhaoqian, et al. Relationship between methylphenanthrene index, methylphenanthrene ratio and organic thermal evolution: Take the northern margin of Qaidam Basin as an example [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 508-512.]
- [50] 陈治军, 张佳琪, 牛凌燕, 等. 芳烃参数在湖相烃源岩成熟度评价中的适用性: 以银根—额济纳旗盆地中生界烃源岩为例[J]. 石油学报, 2020, 41(8): 928-939. [CHEN Zhijun, ZHANG Jiaqi, NIU Lingyan, et al. Applicability of aromatic parameters in maturity evaluation of lacustrine source rocks: a case study of Mesozoic source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(8): 928-939.]
- [51] 王辉. 辽河西部凹陷沙河街组泥岩中多环芳烃分布特征及其地球化学意义[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(6): 39-47. [WANG Hui. Distribution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in Shahejie Formation mudstone, the Western Sag, Liaohe Basin and its geochemical significance [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(6): 39-47.]
- [52] 魏志彬, 张大江, 张传禄, 等. 甲基二苯并噻吩分布指数(MDBI)作为烃源岩成熟度标尺的探讨[J]. 地球化学, 2001, 30(3): 242-247. [WEI Zhibin, ZHANG Dajiang, ZHANG Chuanlu, et al. Methyl dibenzothiophenes distribution index as a tool for maturity assessments of source rocks [J]. *Geochimica*, 2001, 30(3): 242-247.]
- [53] 吴小奇, 周小进, 陈迎宾, 等. 四川盆地川西坳陷上三叠统须家河组烃源岩分子地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 854-865. [WU Xiaoqi, ZHOU Xiaojin, CHEN Yingbin, et al. Molecular characteristics of source rocks in Upper Triassic Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 854-865.]
- [54] 吴嘉, 齐雯, 罗情勇, 等. 二甲基二苯并噻吩生成实验及地球化学意义[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 260-267. [WU Jia, QI Wen, LUO Qingyong, et al. Experiments on the generation of dimethyldibenzothiophene and its geochemical implications [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(2): 260-267.]
- [55] 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.
- [56] Volkman J K. A review of sterol markers for marine and terrigenous organic matter [J]. *Organic geochemistry*, 1986, 9(2): 83-99.
- [57] Matsumoto G, Torii T, Hanya T. High abundance of algal 24-ethylcholesterol in Antarctic lake sediment [J]. *Nature*, 1982, 299(5878): 52-54.
- [58] Huang W Y, Meinschein W G. Sterols as ecological indicators [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(5): 739-745.
- [59] Grantham P J, Wakefield L L. Variations in the sterane carbon number distributions of marine source rock derived crude oils through geological time [J]. *Organic geochemistry*, 1988, 12(1): 61-73.
- [60] Ye Z W, Jiang J G, Wu G H. Biosynthesis and regulation of carotenoids in *Dunaliella*: Progresses and prospects [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, 26(4): 352-360.
- [61] 吴飘, 陈建文, 张银国, 等. 南黄海地区二叠系孤峰组硅质烃源岩的地球化学特征及上升流成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 1-21. [WU Piao, CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo, et al. Geochemical characteristics and upwelling origin of siliceous source rocks in the Permian Gufeng Formation of the South Yellow Sea area [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(1): 1-21.]
- [62] 张水昌, MOLDOWAN J. M., LI M W, 等. 分子化石在寒武-前寒武纪地层中的异常分布及其生物学意义[J]. 中国科学(D辑), 2002, 45(3): 193-200. [ZHANG Shuichang, MOLDOWAN J. M., LI Maowen, et al. The abnormal distribution of the molecular fossils in

- the pre-Cambrian and Cambrian: its biological significance [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(3): 193-200.]
- [63] 黄第藩, 张大江, 李晋超. 论4-甲基甾烷和孕甾烷的成因[J]. 石油勘探与开发, 1989(3): 8-15. [HUANG Difan, ZHANG Dajiang, LI Jinchao. On origin of 4-methyl steranes and pregnanes [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1989(3): 8-15.]
- [64] 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.
- [65] Tissot B P, Welte D H. *Petroleum Formation and Occurrence*[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 1984.
- [66] Volkman J K, Kearney P, Jeffrey S W. A new source of 4-methyl sterols and 5 α (H)-stanols in sediments: prymnesiophyte microalgae of the genus *Pavlova* [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 15(5): 489-497.
- [67] 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.
- [68] 许婷, 侯读杰, 曹冰, 等. 东海盆地西湖凹陷轻质原油芳烃地球化学特征[J]. 沉积学报, 2017, 35(1): 182-192. [XU Ting, HOU Dujie, CAO Bing, et al. Characteristics of aromatic geochemistry in light oils from Xihu Sag in East China Sea Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(1): 182-192.]
- [69] Zhang M, Philp P. Geochemical characterization of aromatic hydrocarbons in crude oils from the Tarim, Qaidam and Turpan Basins, NW China [J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(4): 448-457.
- [70] 李水福, 何生. 原油芳烃中三芴系列化合物的环境指示作用[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 45-50. [LI Shuifu, HE Sheng. Geochemical characteristics of dibenzothiophene, dibenzofuran and fluorene and their homologues and their environmental indication [J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 45-50.]