

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.07.008

下扬子区二叠系烃源岩评价与生源环境

赵青芳^{1,2}, 谢德智^{3*}, 陈建文^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 张银国^{1,2}, 王建强^{1,2}, 董贺平^{1,2}, 袁勇^{1,2}
ZHAO Qingfang^{1,2}, XIE Dezhi^{3*}, CHEN Jianwen^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, ZHANG Yinguo^{1,2},
WANG Jianqiang^{1,2}, DONG Heping^{1,2}, YUAN Yong^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071;
 2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;
 3. 青海油田公司采油一厂, 青海 海西州 816499
1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, Shandong, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266071, Shandong, China;
3. PetroChina Qinghai Oilfield Company One Oil Production Factory, Haixizhou 816499, Qinghai, China

摘要:基于下扬子区海域-陆域钻井岩心和露头岩样,通过有机岩石学和有机地球化学方法,应用有效指标参数,从不同维度综合分析下扬子区上二叠统大隆组、龙潭组和下二叠统孤峰组、栖霞组 4 套烃源岩在纵向及平面上的有机地球化学特征、生烃潜力和生源环境。根据测试数据及前人研究资料,栖霞组和大隆组烃源岩的有机质丰度为中等—好级别,龙潭组烃源岩的有机质丰度为一般—中等级别,孤峰组烃源岩有机质丰度达到很好级别。下二叠统烃源岩有机质丰度在平面展布上表现出海域优于陆域的特点,上二叠统则反之。根据干酪根碳同位素特征,栖霞组烃源岩有机质类型最好,为 I~II 型;其他 3 套烃源岩均为 II~III 型母质类型。4 套烃源岩成熟度参数镜质体反射率主频分布范围为 1.3%~2.0%,均达到高热演化阶段,在平面展布上表现出明显的非均一性。二叠系 4 套烃源岩生物来源以低等水生生物为主,有机质均在贫氧的弱还原—弱氧化条件下保存,其中大隆组沉积的水体动荡频繁和生物变化较明显。综合认为,下扬子区二叠系烃源岩有机质丰度高,类型较好,具有形成大型油气田的良好物质基础,尤其是以往被忽略的孤峰组烃源岩评价等级被提高,是一套潜在的优质烃源岩,其对该区进一步的油气勘探具有重要的指导意义。

关键词:下扬子区;二叠系;烃源岩评价;生源环境

中图分类号:P534.46;P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)07-1154-12

Zhao Q F, Xie D Z, Chen J W, Liang J, Zhang Y G, Wang J Q, Dong H P, Yuan Y. Evaluation and biogenetic derivation and sedimentary environment of source rocks from Permian in the Lower Yangtze region. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42 (7): 1154-1165

Abstract: Based on drilling cores and outcrop samples of the land and ocean area in lower Yangtze region as the research object, by using the research methods of organic petrology and organic geochemistry, reveal the vertical and planar organic geochemical characteristics, hydrocarbon potential, biogenetic derivation and sedimentary environment of four groups of Permian source rocks in the Lower Yangtze region, i.e. the Upper Permian Dalong Formation and Longtan Formation, Lower Permian Qixia Formation and Gufeng

收稿日期:2021-08-10;修订日期:2021-11-10

资助项目:崂山实验室科技创新项目《中国海域重点盆地发育时空差异及其深部过程》(编号:LSKJ202203401),中国地质调查局项目(编号:DD20190818、DD20211353、DD20221723、DD20230317),国家自然科学基金项目《南黄海崂山隆起中南部海底渗漏烃类源区示踪与运移路径重建》(批准号:41776075)、《南黄海崂山隆起二叠系储层油气成藏破坏与流体演化过程还原研究》(批准号:42076220),山东省自然科学基金项目《南黄海盆地崂山隆起石炭系油气保存条件的主控因素分析》(编号:ZR2020MD071)

作者简介:赵青芳(1980-),女,硕士,高级工程师,从事海洋油气地球化学方面的研究。E-mail:zqingfang@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者:谢德智(1977-),男,工程师,从事油气田开发研究。E-mail:xdzerpqh@petrochina.com.cn

Formation. According to the results of the experiment test, combining previous research data, comprehensive analysis shows that the organic matter abundance of the source rocks of Qixia Formation and Dalong Formation are medium-good level, the source rocks of Longtan Formation belong to fair-medium level, the source rocks of Gufeng Formation achieve very good level. Judging from the organic matter abundance, the Lower Permian source rocks which in the Lower Yangtze ocean area are better than in the land area of which, while the Upper Permian source rocks are opposite feature. According to the characteristics of the carbon isotopes, the source rocks of Lower Permian Qixia Formation mainly constitute Type I-II kerogen and the other three groups of source rocks are Type II-III kerogen. Four groups of Permian source rocks have vitrinite reflectance values ranging mostly from 1.3% to 2.0%, suggesting a high-mature level with regard to hydrocarbon-generating. The results show obvious inhomogeneity in the spatial distribution of mature. Four groups of Permian source rocks have similar sterane and terpane characteristics, which biological sources mainly came from low aquatic organisms. Four groups of source rocks were setting in the weak reduction environment to weak oxidation environment, of which depositional environment is turbulent and biological change is obvious in the Dalong Formation. In summary, the Permian source rocks have high organic abundance and good types of organic matter, and provide the material basement for forming large oil and gas fields in the Lower Yangtze region. In particular, the Gufeng Formation source rocks, which have been neglected in the past, are a set of potential high-quality source rocks, which have important guiding significance for further oil and gas exploration in this area.

Key words: the Lower Yangzi region; Permian; source rock evaluation; biogenetic derivation and sedimentary environment

下扬子区为中国南方海相地层沉积和油气分布的重要地区之一,由多期构造运动和多类型盆地叠加而成,具有海相多期生烃和多期成藏的特点,并以晚期成藏为主(张建球,1996)。区内油气显示丰富,包括有地表油苗、井下油显示、井下油气流、地表固体沥青等(蔡东升等,2002;郭念发等,2002)。近些年来,下扬子区中—古生代海相油气勘探取得了系列突破,在二叠系获得工业性油流,如黄桥地区华泰3井发现的源自二叠系龙潭组自生自储型原油,栖霞组油藏的原油则来自于高成熟的烃源岩(田瑞聪等,2016;李飞,2017)。由此表明,下扬子区海相中—古生界生烃物质基础雄厚,下古生界母质来源以生成气态烃类为主,上古生界具有油气共生的成烃特征。下扬子区发育3套区域性海相中—古生界烃源岩,分别为下寒武统幕府山组、下志留统高家边组底部—上奥陶统五峰组和下三叠统青龙组下部—二叠系(陈代钊等,2011;黄保家等,2013;谭思哲等,2018)。

由于海域油气勘探成本高,下扬子区海域延伸部分南黄海盆地中—古生界烃源岩的研究,采用沉积相带、岩相古地理法由陆域向海域进行推测(孙晶等,2016)。目前,南黄海盆地有30口钻井,仅有5口钻井揭示了二叠纪地层,其中CSDP-2井钻遇地层最老,达志留系顶部,未钻穿。通过有机地球化学分析,认为志留系高家边组有利烃源岩发育在其底部(蔡来星等,2017)。

下扬子区陆域已有钻井资料分析显示,下寒武

统幕府山组因地层埋藏过深,有机质热演化程度达到成熟阶段,镜质体反射率 R_o 基本大于3.0%,即便是有所获意义也不大(徐春华等,2019)。下志留统高家边组底部—上奥陶统五峰组具有较好的生烃条件(潘继平等,2011;刘书磊,2012;贾东等,2016;张涛等,2016),但需要寻找有利的保存油气的构造部位。二叠系烃源岩的评价给出了宏观的定性结论,为一套中等—好的源岩,且前人研究多集中于大套系—二叠系,上、下二叠统,或套系内栖霞组、龙潭组的评价(郭念发等,1999;高林等,2009;廖志伟等,2016;张福榕等,2017),而针对套系内纵向上大隆组、龙潭组、孤峰组和栖霞组4套烃源岩特征的精细研究、评价指标的参数选择,以及不同岩性烃源岩特征的研究较少。为了对比下扬子区海相中—古生界海域和陆域烃源岩特征,鉴于下扬子区海域钻井揭示的地层,以及近年来二叠系所获油气突破,本文选择二叠系烃源岩为研究目的层,采用统一的有效评价指标参数,对套系内4套烃源岩进行平面和纵向上的评价及生源环境的讨论,为下扬子区古生界的资源效应和进一步油气勘探提供重要的依据和指导意义。

1 区域构造沉积特征

下扬子区行政区划隶属于江、浙、皖、赣、沪四省一市,构造上位于扬子板块东北部,面积约 $22.68 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。下扬子区北部边界为大别—苏鲁造山带,西部以郯庐断裂与华北地台板块和中

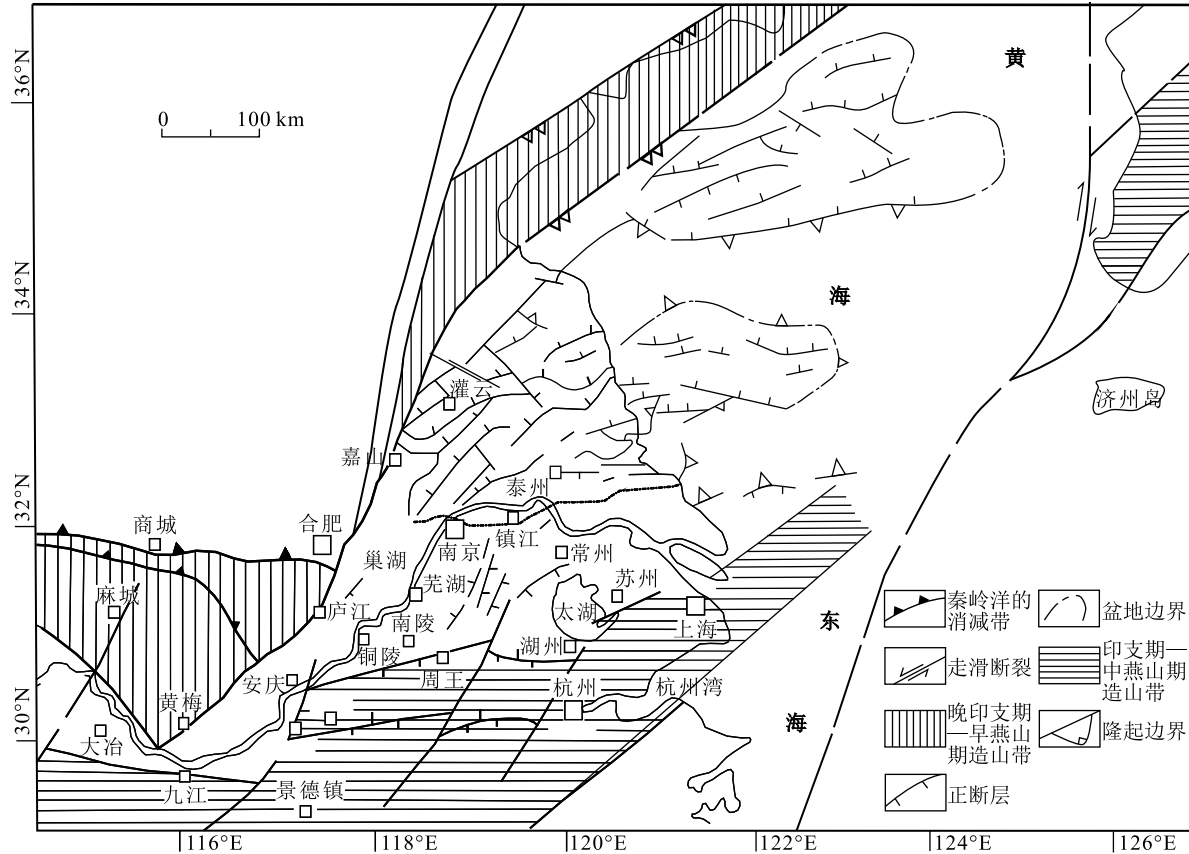


图1 下扬子地区构造纲要图(潘继平等,2011)

Fig. 1 Tectonic outline map of Lower Yangtze region

扬子块体相连,南和东南以江绍深断裂与华夏板块为界,向东一直延伸到海域的南黄海盆地(罗开平等,2016;田瑞聪等,2016;张银国等,2016)。其中,南黄海盆地不仅为下扬子板块海域的延伸部分,而且是下扬子地块的主体(陈建文等,2018;2022)。

下扬子地区主要经历了加里东运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动4次大的构造运动,形成了震旦纪—早三叠世海相沉积建造和中三叠世末

至今的陆相沉积建造组合,印支不整合面为海相建造和陆相建造的分界面(陈红等,2003)。区内海相地层发育较齐全,由下而上发育寒武系、奥陶系、志留系、上泥盆统、石炭系、二叠系和下三叠统,缺失中、下泥盆统。通过野外露头剖面、地震资料解释和钻井揭示,下扬子区二叠系发育4套烃源岩,分别为下二叠统的栖霞组和孤峰组、上二叠统龙潭组和大隆组,4套烃源岩以泥质岩为主,碳酸盐岩次之,夹含煤层系。各套烃源岩沉积特征见表1。

表1 下扬子区二叠系烃源岩岩性特征及厚度

Table 1 Lithological features and thickness of Permian source rock in the Lower Yangtze region

系	统	组	岩性特征	沉积相	厚度/m
二叠系	上统	大隆组	黑色硅质页岩及泥岩	盆地—深水陆棚相	0~200
		龙潭组	灰黑色泥(页)岩、炭质泥岩、灰色粉砂岩互层,夹煤层	滨海沼泽—三角洲相	0~350
	下统	孤峰组	黑色硅质泥岩、灰黑色粉砂质泥岩	深水盆地相	0~100
		栖霞组	深灰色泥晶、细粉晶灰岩,夹少量黑色泥岩薄层或条带	陆表海台地	0~450

(1) 栖霞组烃源岩

下扬子区在早二叠世由挤压应力场转变为拉伸应力场,发生了区域性断陷、沉降作用,栖霞组接受了大规模的海侵,广泛发育碳酸盐岩台地相沉积,而后海水开始退却,部分层段属于海陆过渡相沉积。栖霞组烃源岩以灰色—灰黑色灰岩为主,锤击有刺激性气味,部分夹薄层页岩、炭质页岩及少量粉砂岩,厚度一般在 50~100 m 之间,部分地区大于 200 m。

(2) 孤峰组烃源岩

中二叠世发生了更大规模的海侵,水体进一步加深,区域上发育一套深水盆地相沉积,放射虫等硅质生物发育。孤峰组岩性为黑色硅质泥岩,炭质页岩,以及灰质泥岩夹白云质灰岩,厚度一般为 30~60 m。

(3) 龙潭组烃源岩

晚二叠世早期发生了大规模的快速海退事件,使得上二叠统龙潭组沉积了一套海陆过渡相的碎屑岩沉积,泥质、粘土质含量明显增加,发育滨岸沼泽—三角洲相沉积的灰黑色泥(页)岩和炭质泥岩,夹煤线,局部为灰色细砂岩、泥质粉砂岩,厚度一般为 100~200 m。

(4) 大隆组烃源岩

晚二叠世大隆期又发生了一次大规模的海侵事件,发育一套灰黑色泥页岩、硅质泥页岩、炭质泥岩为主的盆地—深水陆棚相沉积,厚度一般为 40~50 m。

2 样品与分析方法

本文对下扬子区陆域 2 口钻井和海域延伸部分(南黄海盆地)4 口钻井的二叠系岩心样品(119 件)和野外露头样品(9 件),开展了表征烃源岩有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度等有机岩石学和有机地球化学分析测试。通过分析测试数据(岩石有机碳含量、热解参数、沥青反射率、生物标志物等评价烃源岩的关键参数),结合前人研究资料,从不同维度精细研究下扬子区海域—陆域二叠系 4 套烃源岩的地球化学特征和生源环境,尤其是对以往研究程度相对较低的孤峰组进行了详细的阐述,为该区进一步的油气勘探提供地质依据。

对于岩心和露头样品,首先将其粉碎至 80 目,加酸去除碳酸盐等无机碳成分,再用三氯甲烷进行

72 h 索氏抽提样品中的有机质,沉淀沥青质后,用硅胶/氧化铝柱色层分离进行族组分分离,然后对分离组分进行色谱(GC)和色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析。干酪根进行碳同位素质谱仪分析,进行全岩岩石热解分析和显微光度计检测,实验测试分析分别由长江大学和国家地质实验测试中心完成。

3 结果与讨论

根据下扬子区陆域和海域钻井岩心、野外露头样品实测数据,以及收集的研究区烃源岩地球化学指标参数资料(陈尚斌等,2011;周东升等,2012;黄保家等,2013;花彩霞等,2014;葛海霞等,2015;宋腾等,2017;2019;张福榕等,2017;徐菲菲等,2019;徐伟良等,2016),并结合区域地质背景,对下扬子区上古生界二叠系的 4 套烃源岩进行系统精细的分析和评价,4 套烃源岩分别为下二叠统栖霞组、孤峰组和上二叠统龙潭组、大隆组。

3.1 有机质丰度

3.1.1 纵向有机质丰度特征

有机质丰度是烃源岩评价最基础的指标之一,是烃源岩生烃的物质基础,决定着烃源岩能够生成烃类物质的多少。烃源岩中有机碳含量(TOC)、总烃含量(HC)和生烃潜力(S_1+S_2)、氯仿沥青“A”含量等是有机质丰度判识的常用指标。下扬子区采集的二叠系钻井岩心样品,无论是泥岩,还是灰岩中氯仿沥青“A”含量显示低值,均小于 0.02%,与其中所含总有机碳含量呈非相关性。下扬子区上古生界烃源岩在侏罗纪末—早白垩世已进入生油门限,并发生排烃和成藏过程(戴春山等,2005),而且烃源岩成熟度愈高,排烃强度愈大(张永昌等,2002),进而诠释了样品中氯仿沥青“A”含量的低值。根据采集样品的实测数据,结合前人在下扬子区采用的有机质丰度判识指标,本文将总有机碳含量和生烃潜力作为下扬子区二叠系烃源岩识别及丰度等级评价的指标参数。

下扬子区下二叠统栖霞组烃源岩 TOC 分布于 0.05%~14.2% 之间,主频分布于 0.5%~1% 之间。其中灰岩 TOC 分布范围为 0.05%~3.66% (均值 0.85%),泥岩 TOC 为 0.22%~3.98% (均值 1.36%),炭质泥岩 TOC 为 7.77%~14.2% (均值 9.73%)。由此表明,栖霞组灰岩的生油指标不亚于

泥岩,是一套好的生油层。下二叠统孤峰组烃源岩 TOC 分布范围为 0.87%~13.5%,主频分布于 2%~4%之间,是一套很好的烃源岩。其中泥岩 TOC 分布范围为 0.87%~5.99% (均值 3.21%),炭质泥岩 TOC 分布区间为 6.55%~13.5% (均值 9.8%)。

下扬子区上二叠统龙潭组烃源岩 TOC 分布范围为 0.18%~16% (均值 2.41%),主频分布在 1%~1.5%之间,属于好烃源岩。其中泥岩 TOC 为 0.18%~6% (均值 1.92%),炭质泥岩 TOC 为 6.58%~16% (均值 11.49%)。大隆组烃源岩 TOC 分布范围为 0.05%~14.2% (均值 3.08%),主频分布在 0.5%~1.0%和 2%~4%之间,属于一般—好的烃源岩。其中泥岩 TOC 为 0.2%~5.7% (均值 2.23%),炭质泥岩 TOC 分布范围为 6.09%~14.2% (均值 8.48%),灰岩有机碳含量为 0.05%~0.16% (均值 0.11%)。

通过纵向对比(图 2)发现,下扬子区大隆组和孤峰组泥岩的有机碳含量普遍偏高,且孤峰组的有机碳含量高于大隆组,根据正相关关系,孤峰组的生烃量优于大隆组。由此表明,下扬子区以往被忽略的孤峰组泥岩是一套潜在的优质烃源岩,对该区的油气勘探方向具有重要的指导意义。二叠系 4 套地层中炭质泥岩的有机质丰度基本相当,龙潭组的略高,但均为差—中等的级别,供烃能力一般。下二叠统栖霞组灰岩发育,有机质丰度较丰富,据王顺玉等(2000)的评价标准为好—很好级别,而大隆

组的灰岩为一套非—差烃源岩。

3.1.2 平面有机质丰度特征

下扬子区下二叠统栖霞组烃源岩 TOC 在陆域分布于 0.05%~3.66%之间,均值 0.827%;海域的分布范围为 0.192%~14.2%,均值 1.996%。该套烃源岩丰度在下扬子区的海域延伸部分明显高于陆域(图 3-a),而有机碳含量的高值主要是由岩性不同引起的,泥岩有机碳含量普遍高于灰岩。栖霞组烃源岩的厚度不大,为 50~100 m,该套烃源岩有利区主要发育于扬州—巢湖一线以南的台地相沉积区,海域延伸部分可能分布于南黄海南部的沉降中心。栖霞组烃源岩 S_1+S_2 在陆域和海域的分布范围分别为 0.06~1.70 mg/g (均值 0.62 mg/g) 和 0.25~1.56 mg/g (均值 0.94 mg/g)。应用有机碳含量和生烃潜力 2 个参数综合判断,下扬子区栖霞组烃源岩属较好—好级别,且表现出海域略优于陆域的特点(图 4)。

孤峰组烃源岩在以往的研究中未被重视,本次研究根据下扬子区陆域钻井和海域科学钻探 CSDP-2 井岩心样品测试数据,结合陆域皖宜页 1 井、皖南 H 井、巢湖剖面等资料(黄保家等,2013;徐伟良等,2016;宋腾等,2019;徐菲菲等,2019),综合结果显示,下扬子区孤峰组烃源岩 TOC 在陆域和海域的分布范围分别为 0.87%~12.5% (均值 6.12%) 和 2.58%~11.2% (均值 6.89%) (图 3-b)。孤峰组烃源岩 S_1+S_2 分布于 0.69~4.04 mg/g 之间,均值 1.30 mg/g,其在陆域和海域的分布范围分别为 0.69~4.04 mg/g (均值 1.21 mg/g) 和 2.45~3.56 mg/g (均值 3.0 mg/g)。表现出下扬子区孤峰组烃源岩属于好—很好级别(图 4),孤峰组烃源岩丰度由陆域向海域具有逐渐变好的趋势,即海域优于陆域。孤峰组烃源岩在整个下扬子区都很发育,其厚度为 50~100 m。该套烃源岩在陆域有利发育区位于盐城—滁州一线以南和无锡—宣城一线以北的台盆相区,根据下扬子海陆沉积相分布特征及钻井解释烃源岩特征,预测孤峰组烃源岩在海域的有利发育区可能位于南黄海南部沉降中心,在其北部沉降中心亦可能存在一个有利区。

下扬子区龙潭组和大隆组烃源岩 TOC 在陆域分布范围分别为 0.37%~16% (均值 3.08%) 和 0.2%~14.2% (均值 3.64%) (图 3-c、d),海域丰度范围分别为 0.18%~12.41% (均值 1.67%) 和

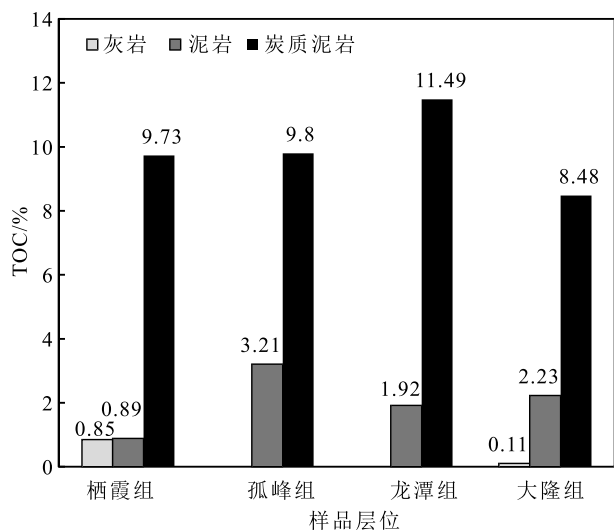


图 2 下扬子地区二叠系烃源岩有机碳分布直方图

Fig. 2 Histogram of organic carbon of Permian source rocks in Lower Yangtze region

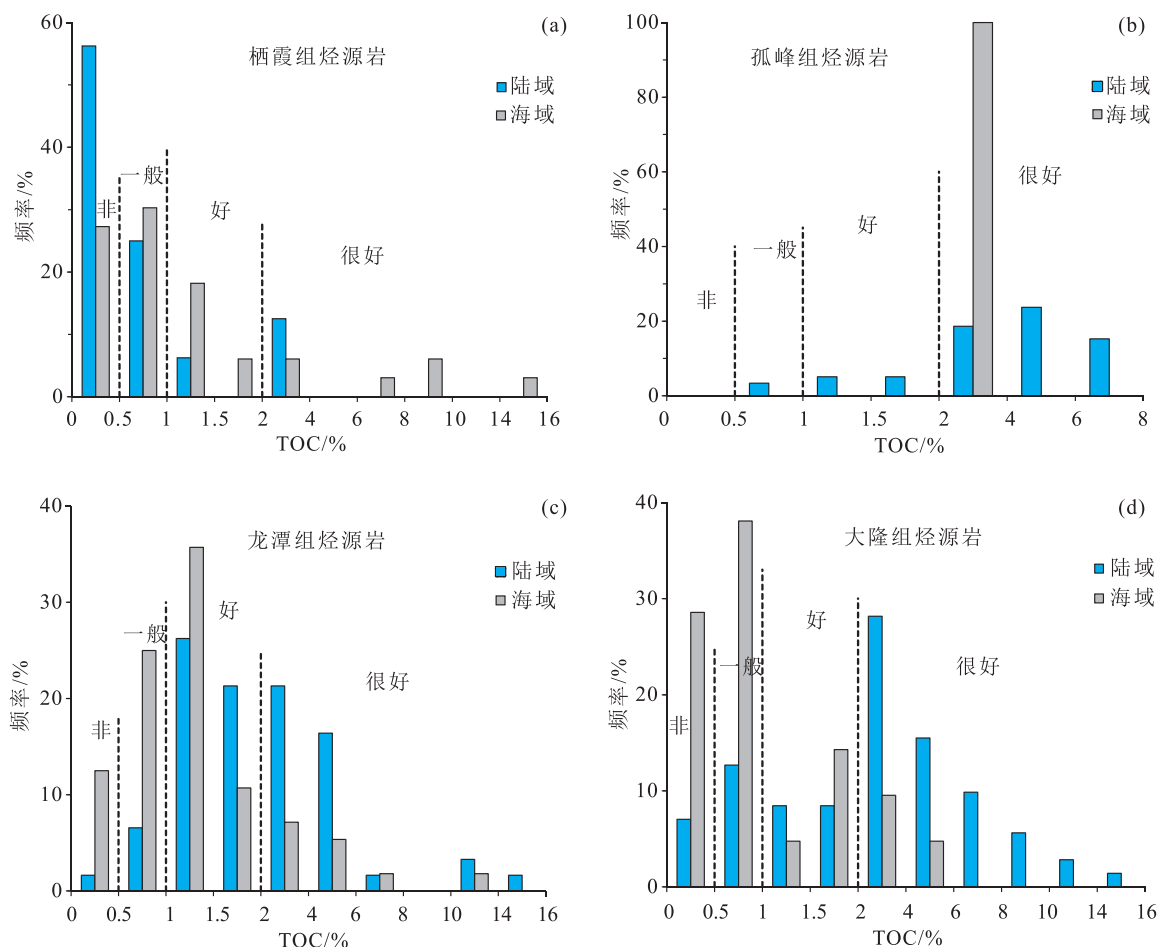


图 3 下扬子地区二叠系海域—陆域烃源岩有机碳分布直方图

Fig. 3 Histogram of organic carbon of Permian source rocks in Lower Yangtze land-ocean area

0.05%~4.85% (均值 1.18%)。龙潭组烃源岩 S_1+S_2 在陆域和海域的分布范围分别为 0.68~8.65 mg/g (均值 1.40 mg/g) 和 0.01 mg/g~7.79 mg/g (均值 1.18 mg/g); 大隆组烃源岩 S_1+S_2 在陆域和海域的分布范围分别为 0.13~8.15 mg/g (均值 1.17 mg/g) 和 0.02~3.42 mg/g (均值 1.40 mg/g)。综合显示,下扬子区上二叠统龙潭组和大隆组烃源岩的有机质丰度普遍较高,属于一般—好级别,且陆域优于海域(图 4)。其中更优质的大隆组烃源岩在整个下扬子区普遍发育,优质烃源岩厚度在 50 m 左右,陆域主要发育在盐城以南和宣城以北的区域,根据区域沉积相、地震资料、野外露头、钻井等资料,推测下扬子区海域延伸部分在南黄海盆地的南、北 2 个沉降中心可能发育该套优质烃源岩。

3.2 有机质母质来源

有机质类型是决定烃源岩生成油气类型的重

要因素,常规的测试指标有氢指数、氧指数、氯仿沥青“A”等,然而下扬子区上、下二叠统烃源岩热演化程度表现出非均一性:部分地区刚进入生油窗,部分区域达高熟—过成熟演化阶段,出现氢含量迅速减少、最高热解温度 (T_{max}) 不准确等现象,造成有机质类型指标参数如氢指数、 T_{max} 失效。干酪根碳同位素继承了母源的物质类型,随着烃源岩热演化程度的增加,碳同位素发生分馏的影响较小。为了统一下扬子区有机质母质来源的判识指标,以及指标参数的有效性,本文采用干酪根碳同位素作为该区二叠系 4 套烃源岩有机质类型的识别参数。

从戴金星等(2001)干酪根碳同位素判识有机质类型标准可以看出,下扬子区二叠系不同层位烃源岩干酪根的 $\delta^{13}C$ 值存在差异。依据其分布特征(图 5),上二叠统龙潭组烃源岩的干酪根 $\delta^{13}C$ 值最

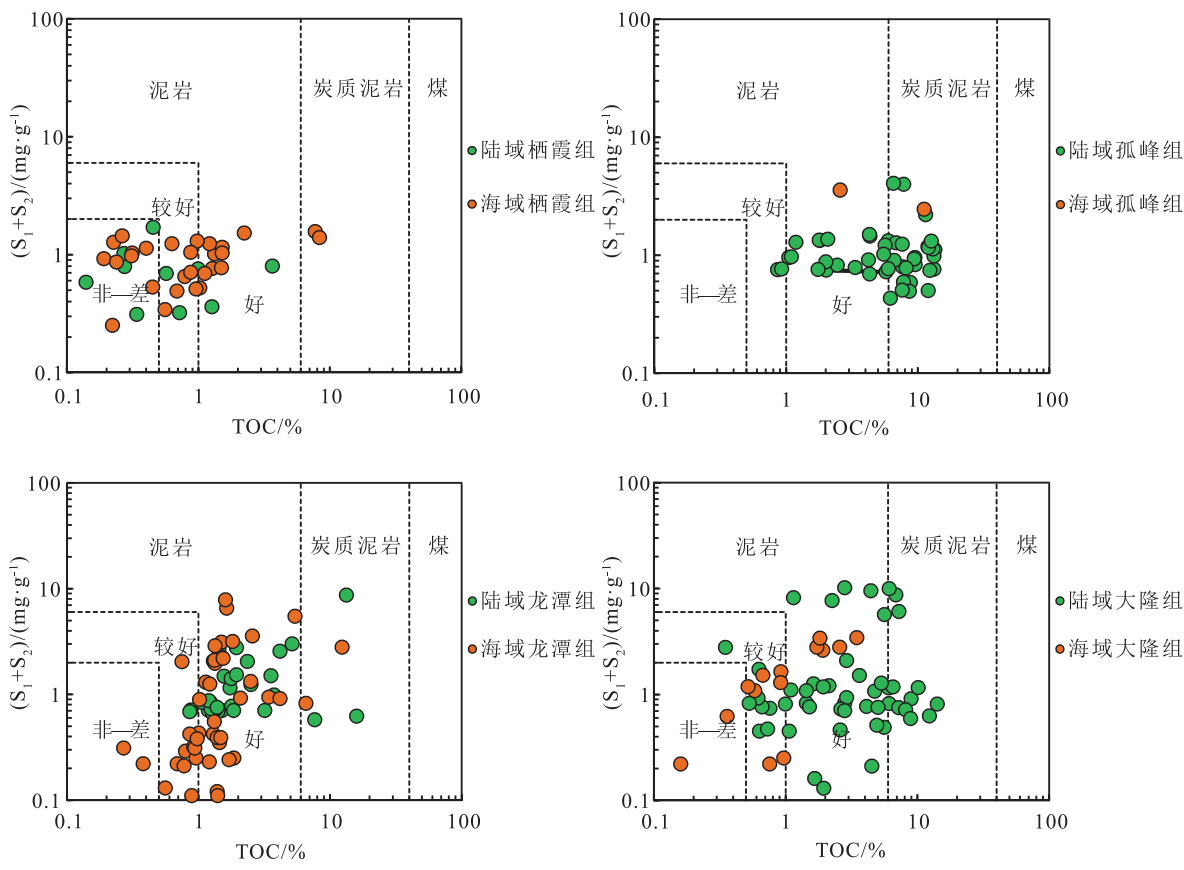


图 4 下扬子地区二叠系烃源岩有机碳与生烃潜力交汇图

Fig. 4 Cross-plot of TOC and S_1+S_2 for Permian source rocks in Lower Yangtze region

重,普遍大于 -25‰ ,最重达 -22.07‰ ,主要为Ⅲ型干酪根,部分为Ⅱ型干酪根;下二叠统栖霞组烃源岩的干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 值最轻,分布于 $-25.97\text{‰}\sim-30.4\text{‰}$ 之间,为

Ⅰ~Ⅱ型干酪根,有机质类型好;其他层位烃源岩则介于两者之间。大隆组烃源岩干酪根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度范围大,主频 $-25.5\text{‰}\sim-26.8\text{‰}$,最轻 -29.02‰ ,最重 -23.6‰ ,主要为Ⅱ型干酪根,部分为Ⅰ型和Ⅲ型干酪根;孤峰组烃源岩干酪根的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-28.7\text{‰}\sim-22.7\text{‰}$,属于Ⅱ~Ⅲ型干酪根,与前人研究成果基本一致(黄保家等,2013;宋换新等,2015)。

下扬子区从栖霞组到龙潭组烃源岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐变重,向上大隆组烃源岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 表现轻值。由此看出,二叠系烃源岩的干酪根碳同位素值总体由下至上呈现出依次变重、再变轻的趋势,反映了有机质母质来源的不同。栖霞组有机质来源以水生为主,向上至龙潭组陆源有机质输入逐渐增多,干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 变重;到大隆组,低等水生生物输入又开始增加,母质类型变好,向生油的母质类型转变。在同一层位内龙潭组有机质生源既有水生生物,又有高等植物的输入,有机质类型为Ⅰ~Ⅲ型,表明当时沉积微环境、水体和生物变化非常明显,与上扬

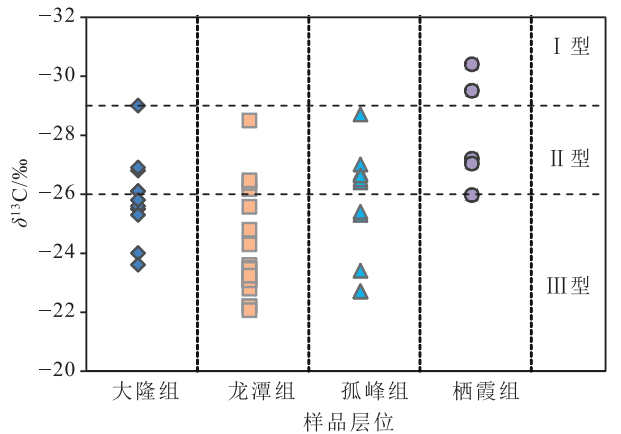


图 5 下扬子二叠系烃源岩干酪根碳同位素分布特征

Fig. 5 Distribution of carbon isotope of kerogen of Permian source rock in the Lower Yangtze region

子川东北地区相对应的吴家坪组母质来源特征相似(腾格尔等,2010)。

3.3 有机质热成熟度

有机质的成熟度(R_o)是衡量烃源岩在地层埋藏过程中生烃相态的重要指标,同时也是油气资源评价的重要依据。一般认为, R_o 达 0.5% 进入生烃门限, R_o 介于 0.7%~1.3% 之间为成熟阶段,1.3%~2.0% 为高成熟阶段,大于 2.0% 时,则达到过成熟演化阶段。下扬子区古生界烃源岩的成熟度普遍较高,并存在大量的、分布广泛的沥青,对于高、过成熟烃源岩样品,本文拟采用 Jacob(1986)建立的沥青反射率换算的等效镜质体作为下扬子区古生界海相烃源岩样品成熟度的标尺,关系式如下:

$$R_o = 0.618R_b + 0.4$$

式中, R_o 为镜质体反射率; R_b 为沥青反射率。结合测试数据及前人研究资料,本次统计结果显示(图 6),下扬子区下二叠统栖霞组和孤峰组烃源岩 R_o 分布区间分别为 0.6%~3.47% 和 0.83%~2.65%;上二叠统龙潭组和大隆组烃源岩 R_o 分布于 0.95%~3.08% 和 0.78%~3.03% 之间。二叠系 4 套烃源岩有机质成

熟度主频分布范围均在 1.3%~2.0% 之间,达到高热演化的生烃阶段,其中二叠系低成熟的烃源岩在中—新生代理藏之前,具备二次生烃,晚期成藏的条件(李皓月等,2014)。

各套烃源岩的成熟度在平面展布上具有明显的不均一性,部分地区可能存在油气共生的特点。下二叠统栖霞组烃源岩的热演化程度跨度范围大,从低成熟—过成熟阶段均有分布,部分地区刚进入生烃门限, R_o 仅达 0.6% 左右;部分地区已达高、过成熟生烃阶段,进入产气阶段。有机质热演化程度异常高值区可能与早二叠世晚期东吴运动伴随的岩浆热液活动引起的古地温异常有关(宋腾,2019;傅宁等,2003)。海域和陆域栖霞组烃源岩 R_o 主频分布范围分别为 $\geq 2.0\%$ 和 1.3%~2.0%,烃源岩的成熟度在平面展布上呈现出由海及陆降低的趋势。下扬子区二叠系其他层系烃源岩陆域和海域热演化特征相似,从低成熟至高—过成熟均有分布,且主频分布于 1.3%~2.0% 区间,达到高成熟产轻质油、湿气阶段,在区域上分布具有南部高于北部的特征。

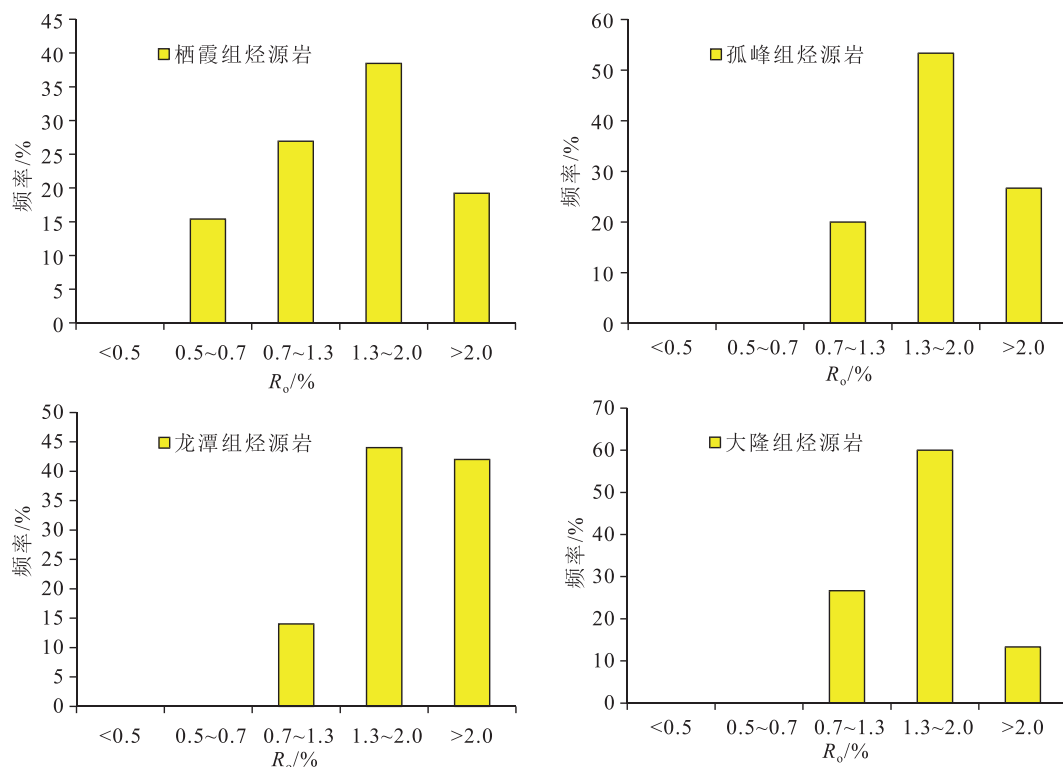


图 6 下扬子区二叠系烃源岩成熟度分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of the maturity of Permian source rocks in the Lower Yangtze region

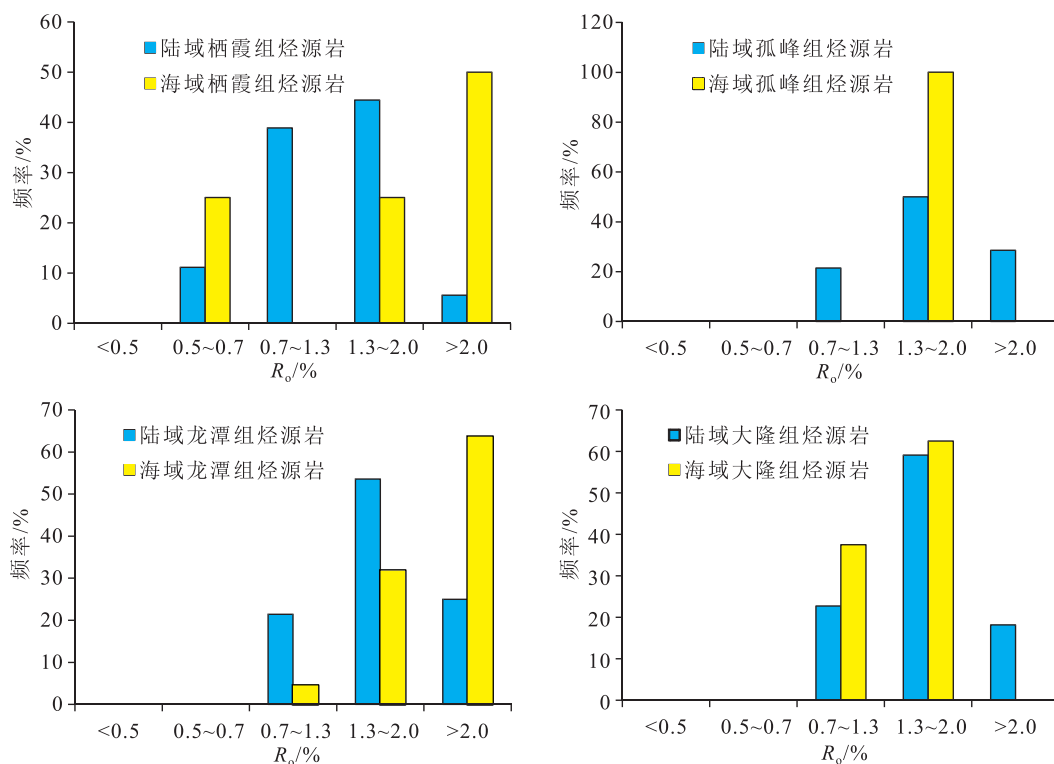


图7 下扬子区海域—陆域二叠系烃源岩成熟度分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of the maturity of Permian source rocks in Lower Yangtze land-ocean area

3.4 生源环境

以往下扬子区上古生界专属烃源岩生物标志物研究较少,下扬子区海域和陆域二叠系岩心样品实测数据显示,二叠系4套烃源岩甾烷、萜烷生物标志物特征相似(图8)。萜烷系列中,五环三萜烷较三环萜烷具有明显的优势,其中三环萜烷以 C_{23} 为主,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值分布于0.10~0.26之间, C_{31} ~ C_{35} 藿烷显示为正常降序排列, C_{24} -四环/ C_{26} -三环萜烷分布区间为0.92~1.26,均值1.07,表明陆源有机质输入的 C_{24} -四环萜烷含量低值。综合分析认为,下扬子区二叠系4套烃源岩母质来源主要与低等水生生物有关,陆源高等植物可能贡献不大,当时的海水盐度不高,有机质在缺氧的水体环境下沉积。

甾烷系列中, C_{27} 规则甾烷有机母质主要来自浮游生物或藻类的贡献,而 C_{29} 规则甾烷的有机母质主要来自陆源高等植物(Volkman, 1986)。下扬子区二叠系4套烃源岩的 C_{27} 、 C_{28} 和 C_{29} 规则甾烷均呈“V”字形分布($C_{27} > C_{28} < C_{29}$),且 C_{27} 规则甾烷具明显优势,说明甾烷的有机母质类型主要来自低等

水生浮游生物和藻类的贡献,同时含少量高等植物。另外,样品中均检测出了较高的孕甾烷和升孕甾烷,孕甾烷系列的高低代表沉积水体的咸化程度及生物降解作用的强度,说明其主要归属于藻类生源。

类异戊二烯烃中姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)是判断有机质沉积古环境的常用生物标志物,彼得斯等(2011)提出,高Pr/Ph值(>3.0)指示氧化条件下的陆源有机质输入,而在强还原、高盐环境中,沉积物中有机质表现出植烷优势,Pr/Ph值一般小于0.6。另外,Pr/Ph值随着有机质热演化程度的增加,不同类型有机质的Pr/Ph值最后趋于一致(程鹏等, 2014)。从下扬子二叠系各层系烃源岩的Pr/Ph值(图9)特征看,Pr/Ph值在0.18~2.17之间均有分布,未表现出趋同的特征,由此,可用Pr/Ph值作为有机质沉积环境的判识指标。下扬子区龙潭组烃源岩的Pr/Ph值分布范围较广(0.22~2.17),既有Pr/Ph值小于0.6的还原沉积环境,又有大于1.5的较氧化沉积环境,表明龙潭组沉积水体环境波动较频繁。而大隆组、孤峰组和栖霞组烃源岩的Pr/Ph

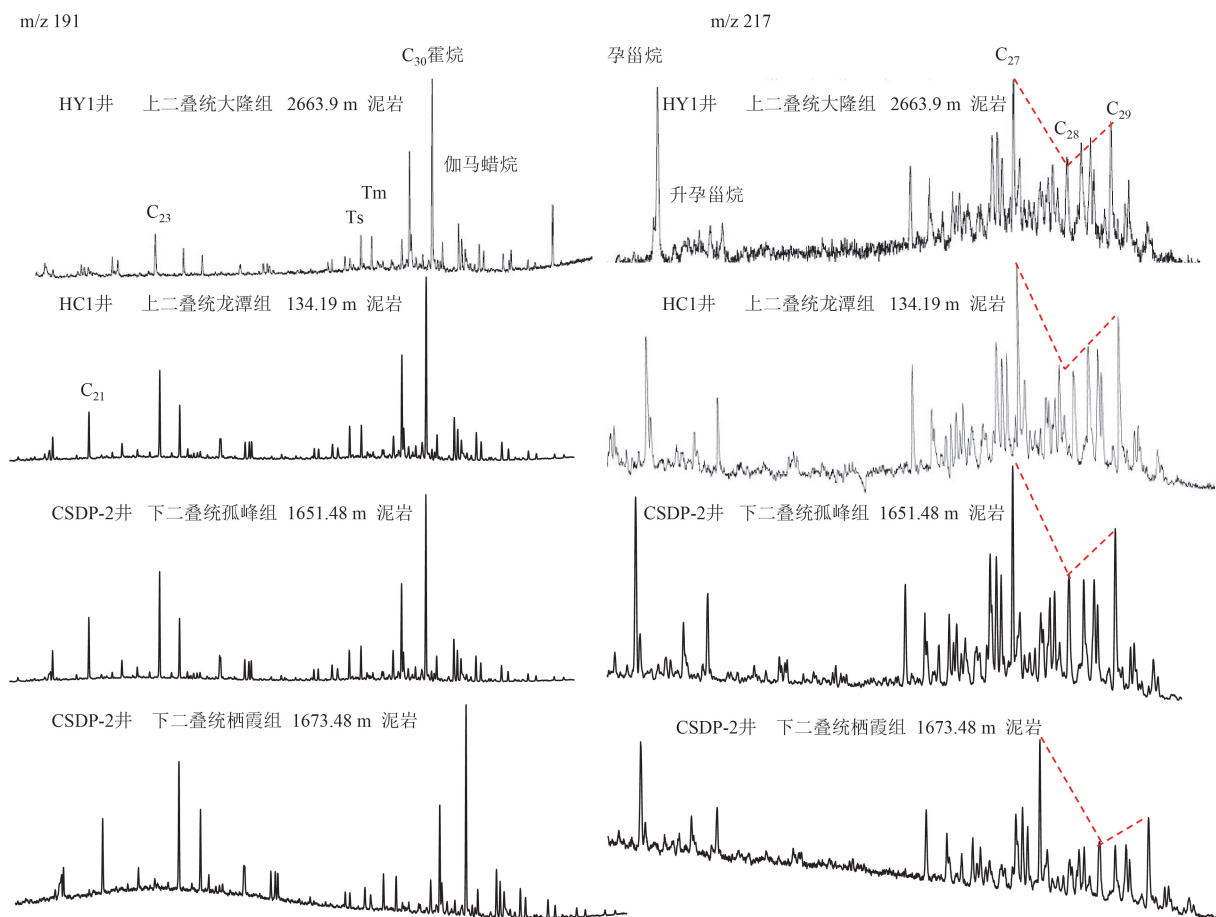
图 8 下扬子区二叠系烃源岩饱和烃 $m/z191$ 和 $m/z217$ 特征离子质量色谱图

Fig. 8 Characteristic ion mass chromatography ($m/z191$, $m/z217$) of saturated hydrocarbons of Permian source rocks in Lower Yangtze

值基本分布于 0.6~1.5 之间,有机质在贫氧的弱还原—弱氧化的保存条件下沉积。同时,在 Pr/nC_{17} 与

Ph/nC_{18} 交汇图(图 10)中,也表现出二叠系 4 套烃源岩有机质沉积于还原的海洋环境。

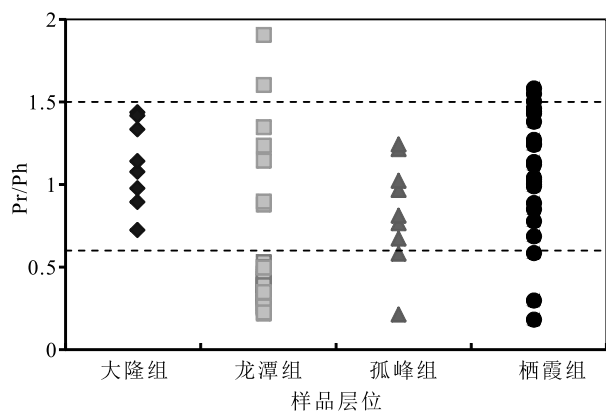


图 9 下扬子区二叠系各层烃源岩 Pr/Ph 值分布图
(部分数据据宋腾等,2017;耿梓傲等,2019)

Fig. 9 The Pr/Ph distribution of the Permian source Rocks in the Lower Yangtze region

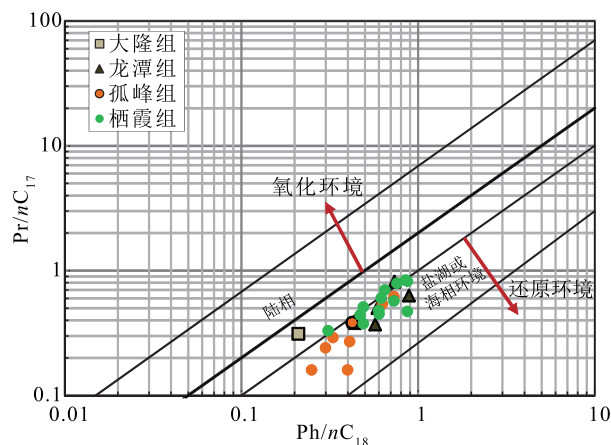
图 10 下扬子区二叠系烃源岩 Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 交汇图

Fig. 10 Crossplot between Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} of the Permian source Rocks in the Lower Yangtze region

4 结 论

(1) 下扬子区二叠系 4 套烃源岩有机碳含量普遍较高,基本达到好—很好级别;生烃潜力均达中等—好级别。其中被忽略的孤峰组烃源岩有机质丰度达好—很好级别,是一套优质的潜在烃源岩。横向对比,下扬子区海域延伸部分(南黄海盆地)下二叠统孤峰组—栖霞组烃源岩优于下扬子陆域部分,上二叠统则反之。

(2) 根据干酪根碳同位素特征判识,栖霞组烃源岩有机质类型最好,属于 I ~ II 型母质类型;下扬子区二叠系其他 3 套烃源岩母质类型主要为 II ~ III 型。其中大隆组烃源岩干酪根碳同位素从 I ~ III 型均有分布,表明当时沉积水体动荡频繁和生物变化非常明显。

(3) 4 套烃源岩有机质成熟度主频均分布在 1.3%~2.0% 之间,达到高成熟热演化阶段。各层系内有机质成熟度在下扬子区平面展布上具有明显的非均一性,部分地区可能存在油气共生的特点。

(4) 二叠系 4 套烃源岩生源环境特征表现出母质来源主要与低等水生生物有关,陆源高等植物可能贡献不大,当时的海水盐度不高,有机质在缺氧的水体环境下沉积,其中龙潭组沉积的水体环境波动较频繁。

参考文献

- Jacob H 著,宋家荣译.运移沥青[J].天然气勘探与开发,1986,6: 81-87.
- Volkman J K. A review of sterol biomarkers for marine and terrigenous organic matter[J]. Organic Geochemistry, 1986, 9: 83-89.
- 彼得斯 K E, 沃尔特斯 C C, 莫尔多万 J M 著. 张水昌, 李振西, 等译. 生物标志化合物指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 23-27.
- 蔡东升, 冯晓杰, 张川燕, 等. 南黄海海域盆地构造演化特征与中、古生界油气勘探前景探讨[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(11): 23-24.
- 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.
- 陈代钊, 汪建国, 严德天, 等. 扬子地区古生代主要烃源岩有机质富集的环境动力学机制与差异[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 5-26.
- 陈红, 龚红春, 杨友胜, 等. 下扬子区海相油气成藏特征[J]. 江苏地质, 2003, 27(3): 148-151.
- 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.
- 陈建文, 杨长清, 张莉, 等. 中国海域前新生代地层分布及其油气勘查方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(01): 1-25.
- 陈尚斌, 朱炎铭, 李伍, 等. 扬子区页岩气和煤层气联合开发的地质优

- 选[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(5): 672-676.
- 程鹏, 肖贤明, 田辉等. 成熟度对陆相烃源岩可溶有机质 Pr/Ph 比值的影响[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 182-188.
- 戴春山, 杨艳秋, 闫桂京. 南黄海—中生代海相残留盆地埋藏生烃史模拟及其意义[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(1): 49-56.
- 戴金星, 夏新宇, 卫延召, 等. 四川盆地天然气的碳同位素特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(2): 115-121.
- 傅宁, 刘英丽, 熊斌辉, 等. CZ35-2-1 井古生界烃源岩地球化学参数异常分析[J]. 中国海上油气(地质), 2003, 17(2): 93-98.
- 高林, 周雁. 中下扬子区海相中—古生界烃源岩评价与潜力分析[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(3): 30-33.
- 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.
- 耿梓傲, 韦恒叶. 下扬子巢湖地区中二叠统孤峰组富有机质硅质岩有机地球化学特征[J]. 高校地质学报, 2019, 25(6): 823-837.
- 郭念发, 郑绍贵. 苏北盆地天然气成藏特征及选区评价[J]. 天然气工业, 1999, 19(3): 6-14.
- 郭念发, 闫吉柱, 陈红, 等. 苏浙皖地区海相油气地质特征及勘探目标的选择[J]. 地质评论, 2002, 48(5): 552-560.
- 黄保家, 施荣富, 赵幸滨, 等. 下扬子皖南地区古生界页岩气形成条件及勘探潜力评价[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 877-882.
- 花彩霞. 下扬子句容地区海相上组合油气地质条件评价[J]. 地质学刊, 2014, 38(2): 200-205.
- 贾东, 胡文瑄, 姚素平, 等. 江苏省下志留统黑色页岩浅井钻探及其页岩气潜力分析[J]. 高校地质学报, 2016, 22(1): 127-137.
- 李飞. 下扬子黄桥地区二叠系栖霞组成藏条件分析[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(3): 15-19.
- 李皓月, 刘倩茹, 薛林福. 苏北盆地中—古生界海相烃源岩发育规律及其意义[J]. 世界地质, 2014, 33(1): 178-189.
- 廖志伟, 胡文煊, 曹剑, 等. 下扬子皖南大隆组黑色岩系发育特征及油气资源潜力初探[J]. 高效地质学报, 2016, 22(1): 138-151.
- 刘书磊. 下扬子地区下志留统页岩气资源分布[D]. 成都理工大学, 2012: 23-40.
- 罗开平, 叶德燎, 周凌方, 等. 下扬子海相烃源岩结构与有效烃源[J]. 石油实验地质, 2016, 38(1): 9-14.
- 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 337-343.
- 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[J]. 海相油气地质, 2015, 20(2): 21-28.
- 宋腾, 林拓, 陈科, 等. 下扬子皖南地区上二叠统(泾页 1 井)发现海陆过渡相页岩气[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 606-607.
- 宋腾, 陈科, 林拓, 等. 下扬子苏皖南地区上二叠统页岩油气地质条件研究[J]. 中国地质调查, 2019, 6(2): 18-25.
- 孙晶, 王建强, 龚建明. 下扬子陆域海相中—古生界烃源岩有机质丰度特征及其岩相古地理[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 23-28.
- 谭思哲, 陈春峰, 徐振中, 等. 南黄海古生界烃源岩特征及资源潜力评估[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 116-124.
- 腾格尔, 秦建中, 付晓东, 等. 川东北地区上二叠统吴家坪组烃源岩评价[J]. 古地理学报, 2010, 12(3): 334-345.

田瑞聪,龚建明,田杰鹏,等.下扬子地区龙潭组煤系地层特征[J].海洋地质前沿,2016,32(1): 60-65.

王顺玉,戴鸿鸣,王海清,等.大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究[J].天然气地球科学,2000,11(4/5): 4-16.

徐春华,仇卫东,秦新龙,等.下扬子地区页岩气勘探新认识[J].河北地质大学学报,2019,42(3): 32-39.

徐菲菲,张训华,黄正清,等.下扬子地区宁国凹陷大隆组-孤峰组泥页岩储层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2019,46(2): 180-190.

徐伟良,刘洛夫,刘祖发,等.扬子地区二叠系页岩气赋存地质条件研究[J].现代地质,2016,30(6): 1376-1389.

张福榕,李翀,周文治,等.苏北盆地古生界页岩气形成条件及评价[J].录井工程,2017,28(4): 103-109.

张建球.下扬子区中、古生界构造演化与油气藏形成史[J].石油与天然气地质,1996,17(2): 146-149.

张水昌,梁狄刚,张大江.关于古生界烃源岩有机质丰度的评价标准[J].石油勘探与开发,2002,29(2): 8-12.

张涛,尹宏伟,贾东,等.下扬子地区高家边组底部黑色页岩与北美 Marcellus 页岩地质特征对比[J].高校地质学报,2016,22(1): 152-158.

张银国,陈清华,陈建文,等.下扬子海相中—古生界烃源岩发育的控制因素[J].海洋地质前沿,2016,32(1): 8-12.

周东升,许林峰,潘继平,等.扬子地块上二叠统龙潭组页岩气勘探前景[J].天然气工业,2012,32(12): 6-10.



《地质通报》第 42 卷第 8 期要目预告

非洲稀土资源研究进展	任军平等
坦桑尼亚水系沉积物地球化学特征及金资源前景	孙凯等
西非铁矿资源概况及成矿规律初探	姜军胜等
坦桑尼亚矿产资源及矿业投资环境	古阿雷等
摩洛哥成矿地质背景与主要矿产资源	吴发富等
模糊证据权方法在纳米比亚白岗岩型铀矿预测中的应用	王佳营等
尼日利亚中生代碱性花岗岩和黑云母花岗岩成因及其对锡多金属找矿的意义	杨奇荻等
加纳成矿区带划分与勘查开发现状	向鹏等
赞比亚西北部地质特征与找矿方向	何胜飞等
坦桑尼亚维多利亚湖金矿田地质特征、矿床成因及成矿模式	彭俊等
非洲钾盐矿床地质特征及资源潜力	孙宏伟等
全球锂资源特征及市场发展	邢凯等