



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

吴 飘, 陈建文, 张银国, 龚建明, 蓝天宇, 薛 路, 可 行

Geochemical characteristics and upwelling origin of siliceous source rocks in the Permian Gufeng Formation of the South Yellow Sea area

WU Piao, CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo, GONG Jianming, LAN Tianyu, XUE Lu, and KE Xing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

华南下扬子区早寒武世幕府山组沉积环境：来自于全岩地球化学的启示

Sedimentary environment of the Lower Cambrian Mufushan Formation in the Lower Yangtze region: Evidence from whole-rock geochemistry
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 82

南海南部海陆过渡相烃源岩的两类分布模式

Two distribution patterns of the marine–continental transitional source rocks in the southern South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 173

山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义

Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 138

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

西南印度洋中脊岩石地球化学特征及其岩浆作用研究

A review of studies on the magmatism at Southwest Indian Ridge from petrological and geochemical perspectives
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 126



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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): 138-158.
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): 138-158.

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

吴飘^{1,2}, 陈建文^{1,2,3,4}, 张银国^{1,2,5}, 龚建明^{1,2}, 蓝天宇^{1,2,6}, 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. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580
6. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

摘要: 前人对南黄海地区中二叠统孤峰组层状硅质岩的生烃潜力和成因研究较少, 本文利用下扬子-南黄海地区的5口钻井资料, 对二叠系孤峰组硅质烃源岩进行了详细的矿物学和地球化学研究, 并通过与现代秘鲁上升流区的沉积物进行元素含量对比, 分析了南黄海地区孤峰组硅质烃源岩的生烃潜力和成因机制。结果显示, 下扬子-南黄海地区孤峰组具有硅质岩和硅质泥岩不等厚互层的特征, 是一套呈SWW-NEE向展布的过成熟偏腐殖型优质烃源岩。在地球化学特征方面, 南黄海地区孤峰组硅质烃源岩和秘鲁上升洋流沉积物均表现出还原性敏感元素和生产力敏感元素相对富集, K、Ti、Mn相对亏损, 具有 $Co \times Mn < 0.4$ 、 $Cd/Mo > 0.1$ 的特征, 显示为大陆边缘的上升流成因。研究显示, 南黄海地区孤峰组硅质烃源岩的有机质富集主要受高生产力控制, 形成于中等滞留的缺氧-硫化环境。与硅质泥岩相比, 孤峰组硅质岩的陆源碎屑输入和 $Co \times Mn$ 值较低, Zr/Rb值较高, 这意味着硅质岩沉积时期的上升流活动强度大于硅质泥岩。此外, 部分探井中的孤峰组硅质泥岩相对于硅质岩具有较高的化学蚀变指数, 说明古气候变暖是造成上升流活动减弱和硅质沉积含量减少的主要原因。

关键词: 硅质岩; 上升流; 地球化学特征; 南黄海地区; 孤峰组

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022061501

Geochemical characteristics and upwelling origin of siliceous source rocks in the Permian Gufeng Formation of the South Yellow Sea area

WU Piao^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2,3,4}, ZHANG Yinguo^{1,2,5}, GONG Jianming^{1,2}, LAN Tianyu^{1,2,6}, 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. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China
6. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: Few studies regarding the hydrocarbon generation potential and genesis of the layered siliceous source rocks in the Mid-Permian Gufeng Formation (GFF) of the South Yellow Sea (SYS) has been conducted. The mineralogy and geochemistry of the siliceous source rocks in

资助项目: 国家专项海洋地质调查项目(DD20221723, DD20190818, DD20160152); 国家自然科学基金面上项目“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”(42076220); 国家自然科学基金青年基金项目“二连盆地地下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); 山东省自然科学基金面上项目“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”(ZR2020MD071); 山东省自然科学基金青年基金项目“南黄海盆地崂山隆起上二叠统特低渗砂岩致密层储层表征研究”(ZR2020QD038), “二连盆地地下白垩统小型断陷湖盆的咸化特征及其有机质富集机制”(ZR2021QD095); 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, 主要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, 主要从事海域油气资源调查评价与研究, E-mail: jwchen2012@126.com

收稿日期: 2022-06-15; **改回日期:** 2022-09-23. 周立君编辑

the GFF were studied in detail based on the borehole data of five wells located in the Lower Yangtze to South Yellow Sea area, and the element content were compared with those of the sediments in the modern upwelling area of Peru, from which the hydrocarbon generation potential of the GFF siliceous source rocks in the SYS and its origin were revealed. Geological data shows that the GFF in the SYS area is characterized by interbeds of siliceous rocks and siliceous mudstones in unequal thickness, and is a set of over-mature and slightly humic high-quality source rocks extending in the SWW-NEE direction. In terms of geochemistry, both the siliceous rocks and Peruvian upwelling deposits show enrichment in the elements that are sensitive to reduction and productivity, but relative depletion in K, Ti and Mn, and have $Co \times Mn$ value lower than 0.4, Cd/Mo value higher than 0.1, indicating their origin of upwelling on continental margin. This study shows that the enrichment of organic matter in the GFF siliceous source rocks in the SYS area is mainly controlled by high productivity and is formed in anoxic to euxinic environment with moderate retention. Compared with siliceous mudstone in the GFF, the terrigenous clastic input and $Co \times Mn$ value are lower and Zr/Rb value is higher in the siliceous rocks, which means that the upwelling intensity of the siliceous rocks during sedimentation is greater than that of siliceous mudstones. In addition, the siliceous mudstone of the GFF have higher chemical alteration index than the GFF siliceous rocks in some wells, which suggests that the paleoclimate warming is the main cause for the weakening of upwelling activity and the reduction of siliceous sediment content.

Key words: siliceous rocks; upwelling current; geochemical characteristics; South Yellow Sea; Gufeng Formation

硅质岩是一种 SiO_2 含量大于 70% 的岩石, 常形成于陆架、岛弧、洋盆及洋中脊等特定的沉积环境, 对古地理、古海洋及古构造研究具有重要意义^[1-2]。二叠纪时期, 环太平洋和地中海、古特提斯洋及泛大陆西北缘发生了硅质沉积事件^[3-4], 在扬子板块北缘形成了一套中二叠统孤峰组层状硅质岩, 厚度 10~200 m^[5-6]。关于该套硅质岩的成因认识一直存在热水成因^[7-8]、生物成因^[6, 9]、热水-生物混合成因^[10]、上升流成因^[11-14] 等争议。目前较为一致的认识是上扬子地区该套硅质岩主体为热水成因^[15-16], 中下扬子地区除同沉积断裂附近分布有热水成因硅质岩外^[4, 7], 主体为生物成因或热水-生物混合成因^[16-19]。上升流成因作为生物成因硅质岩的一种解释, 目前研究多局限在下扬子陆域范围较小的地区或单一剖面^[12-14, 20], 尚未形成区域性分布特征。此外, 已建立的上升洋流沉积识别标志以岩石学和古生物标志为主, 如硅质岩与泥页岩组成韵律层^[12], 富含磷结核^[13]、富含有机质^[14] 和绿硫细菌^[21] 以及富含放射虫、海绵骨针等生物化石^[22], 但是在沉积地球化学方面研究较少, 如何确切地识别古代上升流沉积物是一大难题^[14, 23]。

近年来, 扬子板块孤峰组页岩气勘探和研究逐渐引起关注, 中扬子鄂西地区已有鹤地 1 井、鄂建页 1 井等探井取得孤峰组页岩气发现, 下扬子皖江地区港地 1 井、皖宣页 1 井、WWD1 井等也相继取得了孤峰组页岩气发现或气测显示^[24-25]。南黄海盆地是扬子板块在海域的延伸, 其中, 古生界占据了下扬子板块的主体^[26], 2016 年位于该盆地崂山断隆带的科探井 CSDP-2 井钻遇了一套孤峰组硅质岩, 但由于厚度较薄, 一直未引起前人对其成因研究的关注^[27]。Chen 等^[28] 通过对孤峰组硅质岩进行元素

地球化学特征分析, 认为其形成于亚氧化和间歇性缺氧环境, 高古生产力控制了有机质的富集, 但并未识别硅质岩的沉积动力成因和高生产力的来源。下扬子陆域巢湖地区已在和县、平顶山、庵门口、东风石矿等剖面识别出上升流成因硅质岩^[15], 并提出硅-泥韵律层沉积受米兰科维奇轨道力控制^[18], 可作为二叠纪硅质沉积事件的典型剖面^[2]。因此, 本文以南黄海地区孤峰组硅质烃源岩为研究对象, 一方面通过与下扬子陆域孤峰组硅质烃源岩进行有机地球化学类比, 评价其生烃潜力, 另一方面通过与巢湖和县地区 HX 井上升流成因硅质岩和现代秘鲁上升洋流沉积物进行元素地球化学类比, 分析孤峰组硅质烃源岩的元素地球化学特征以及成因。研究成果不仅对南黄海地区孤峰组硅质烃源岩资源潜力评价具有实践意义, 而且对上升流成因硅质岩的地球化学识别具有科学意义。

1 地质背景

南黄海地区在区域构造上位于扬子板块的下扬子地块东部, 北以嘉山-响水-千里岩断裂与苏鲁造山带及华北地台相接^[29], 南以江山-绍兴断裂与华南板块相连, 向东延伸到朝鲜半岛^[30], 向西与下扬子陆域苏皖地块(含苏北盆地)^[29, 31] 相连。南黄海海域面积 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[26], 已有 4 口探井钻遇二叠系, 在崂山断隆带龙潭组、大隆组见油气显示但尚未发现商业性油气藏^[32-33]。同属于下扬子板块的苏皖地块面积约 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[34-35], 在二叠系见多处油气显示并发现了黄桥含烃 CO_2 气藏^[36]。

二叠纪华南地块位于古赤道附近, 东邻泛大洋, 西邻古特提斯洋, 呈现出陆海相间、台盆相间、

台中有盆、盆中有台的古地理格局^[37]。该时期下扬子地块整体处于被动大陆边缘盆地演化阶段^[33, 38-40], 构造运动以板内裂谷作用和升降作用为主^[4, 41], 海水进退频繁^[42]。在经历了早二叠世栖霞期第一次海侵后, 中二叠世孤峰组沉积时期下扬子地块发生了晚古生代以来最大规模的海侵^[43], 形成了一套以黑色富有机质炭质硅质页岩、硅质岩为主的海相页岩^[43]。其下与栖霞组开阔台地相灰岩整合接触^[44-46], 其上在下扬子陆域与银屏组浅海台地相碎屑岩夹硅质页岩或武穴组浅海台地相碳酸盐岩呈整合接触^[47], 在南黄海地区则与上覆龙潭组滨岸沼泽相煤系地层呈平行不整合接触^[48]。孤峰组岩性在下扬子陆域可分为3段: 下段以含磷结核页岩为主, 中段为含放射虫硅质岩和泥岩, 上段为炭质泥页岩^[5, 24], 整体与上扬子茅口组灰岩为受同沉积断裂控制的

同时异相沉积^[5-6, 44, 49]。根据前人对下扬子陆域孤峰组的岩相古地理和沉积相的研究^[37, 42, 50-53], 该时期下扬子陆域-南黄海地区总体地势南高北低, 据此推测下扬子陆域-南黄海地区北部为盆地相, 中部为深海陆棚相, 往东南华夏地台古隆起方向逐渐过渡为浅水陆棚相、三角洲相沉积(图1)。

2 样品及实验方法

本文的样品取自3口陆域探井(CC1井、HC1井、HY1井)和2口海域探井(CSDP-2井、CZ35-2-1井)。其中, CC1井位于安徽省泾县昌桥镇, HC1井位于安徽省无为县何村, HY1井位于安徽省芜湖地区, CSDP-2井位于南黄海盆地崂山断隆带, CZ35-2-1井位于南黄海盆地青岛断褶带。探井的钻测井相

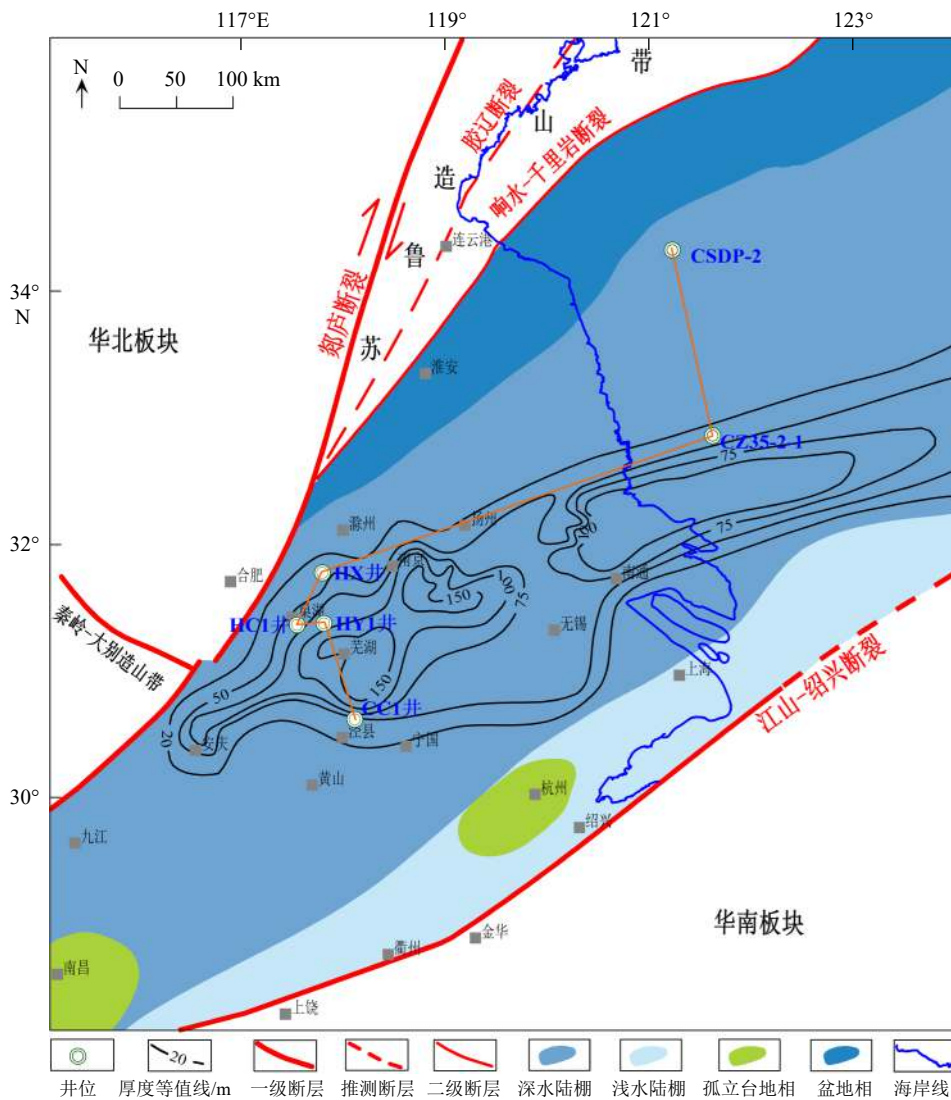


图1 下扬子陆域-南黄海地区中二叠统孤峰组沉积相及烃源岩厚度分布预测图

Fig.1 Prediction of sedimentary facies and thickness of hydrocarbon source rocks of the Mid-Permian Gufeng Formation in the Lower Yangtze – South Yellow Sea Area

关数据由青岛海洋地质研究所南黄海油气资源调查项目组提供。共选取 48 件(海域 15 件和陆域 33 件)硅质泥页岩样品进行地球化学分析, 包括对 48 件样品进行有机碳分析和岩石热解分析, 对 13 块样品进行干酪根碳同位素和干酪根显微组分分析, 对 11 块样品(2 块海域和 9 块陆域)进行镜质体反射率测试, 对 15 块样品进行全岩矿物定量分析, 对 10 块样品进行主微量元素分析。

(1) 岩石总有机碳分析采用干烧重量法在 HIR-944B 碳硫仪中进行测定, 热解分析在 Rock-Eval6 热解仪中进行, 分析参数主要包括气态烃含量 S_0 、液态烃含量 S_1 、热解烃含量 S_2 、残余烃含量 S_4 和最高热解峰温 T_{max} 。采用化学分离法和重液浮选法分离出干酪根, 然后在 Axio Scope A1 偏反光显微镜上利用反射光进行干酪根显微组分分析, 在 CRAIC20/20 PV 显微分光光度计上测定干酪根镜质体反射率, 在 MAT 253 稳定同位素质谱仪上测定干酪根稳定碳同位素。

(2) 全岩矿物成分采用 X 射线衍射(XRD)分析法, 将样品研磨至 70~80 μm , 然后与乙醇混合后用 XRD 内标物涂抹在载玻片上, 在 Panalytical X Pert PRO X 射线衍射仪上获取 X 射线衍射谱图, 通过与

标准谱图数据进行对比确定矿物种类和含量。矿物组分含量大于 40% 时, 测试相对偏差小于 10%, 矿物组分含量为 5%~20% 时, 测试相对偏差小于 30%。其中, CC1 井和 HY1 井的全岩矿物数据引自文献 [54], HC1 井的全岩矿物数据引自文献 [55]。

(3) 主量元素测试采用熔片法, 称取的粉末样品使用马弗炉高温烘烤后计算烧失量, 之后与混合溶剂经高温熔融制作成玻璃片, 使用 XRF-1800 波长扫描 X 射线荧光光谱仪进行测试, 测试数据相对误差为 $\pm 5\%$ 。微量元素和稀土元素测试采用酸溶法和电感耦合等离子体质谱分析法(ICP-MS)。粉末样品在 Teflon 坩埚中依次经过 HF、 HNO_3 、 HClO_4 溶解后, 用去离子水将酸液转移至 50 mL 容量瓶并稀释至 50 mL, 在 NexION300D 等离子体质谱仪中进行元素含量测试。微量元素和稀土元素测试的相对标准偏差分别小于 5% 和 10%。

3 硅质烃源岩的特征

3.1 硅质岩岩性及矿物组成

南黄海盆地 CSDP-2 井孤峰组硅质烃源岩以黑

表 1 CSDP-2 井孤峰组硅质烃源岩的有机碳、岩石热解及全岩矿物分析数据

Table 1 Analytical data of TOC, Rock-Eval, and whole-rock mineral composition of siliceous source rocks in the Gufeng Formation in Well CSDP-2

样品号	深度/m	岩性	TOC/%	S_1+S_2 /(mg/g)	$T_{max}/^{\circ}\text{C}$	矿物含量/%				
						石英	长石	碳酸盐	黄铁矿	黏土矿物
DP2-1	1633.9	硅质岩	11.4	1.18	548.3	75.1	11.5	0	1.7	11.7
DP2-2	1634.5	硅质泥岩	10.9	2.19	504.7	10.3	19.2	0	6.3	64.2
DP2-3	1635.1	硅质岩	11.5	1.62	527.8	89.3	0.0	0	2.2	8.5
DP2-4	1636.3	硅质泥岩	12.2	1.18	514.7	24.1	11.5	0	14.3	50.1
DP2-5	1636.0	硅质岩	—	—	—	67.6	10.4	0	0	22.0
DP2-6	1637.0	硅质岩	14	2.18	529.7	86.4	0	0	1.8	11.8
DP2-7	1638	硅质岩	—	—	—	77.3	0	0	2.6	20.1
DP2-8	1638.9	硅质岩	11.4	1.95	535	82.1	0.7	0	2.4	14.8
DP2-9	1639.7	硅质泥岩	13.5	2.00	533.1	44.6	16.3	0	3.4	35.7
DP2-10	1640.4	硅质岩	7.92	1.11	531.7	75.6	2.7	2.7	3.4	15.6
DP2-11	1641.2	硅质泥岩	9.08	2.16	529.6	62.1	3.9	19	2.6	12.4
DP2-12	1642.2	硅质泥岩	9.58	2.18	520.8	66.8	1.5	4	4.5	23.2
DP2-13	1642.5	硅质岩	13.3	2.23	526.3	73.1	1.9	0	4.4	20.6
DP2-14	1644.4	硅质岩	2.97	0.42	540.5	77.1	2.3	10.3	3.2	7.1
DP2-15	1645.7	硅质泥岩	16.3	2.03	533.8	45.5	6.0	9.2	7.9	31.4

色硅质岩和硅质泥岩为主,二者呈厚层-块状不等厚互层,硅质岩中常见贝壳状断口和黄铁矿。全岩矿物分析显示(表1、图4),CSDP-2井孤峰组硅质岩石英和长石含量为75%~89.3%,平均值为81.5%,黏土矿物含量7.1%~22%,平均值为14.7%,碳酸盐岩矿物含量为0~10.3%,平均值为1.4%;硅质泥岩的石英和长石含量为30%~68.3%,平均为52%,黏土矿物含量为12.4%~64.2%,平均值为36.2%,黄铁矿含量为2.6%~14.3%,平均值为6.5%。在页岩岩相划分三端元图上(图2),CSDP-2井孤峰组页岩主要为硅质岩和硅质页岩相。

下扬子陆域HY1井、HC1井、CC1井及巢湖和县地区HX井孤峰组页岩均可分为3段(图4),下段为黑色泥岩、黑色钙质泥岩或黑色含磷结核泥岩,中段为中层-块状硅质泥岩和硅质岩不等厚互层,上段为黑色泥岩、炭质泥岩。其中,HY1井孤峰组中段硅质岩和硅质泥岩的石英含量为36.9%~97.2%,平均为72.1%,黏土矿物含量0.5%~52.2%,平均为20.4%,碳酸盐岩矿物含量0~7.8%,平均为2.8%。HC1井孤峰组中段页岩的黏土矿物含量为24.5%~35.7%,平均为29%,石英和长石含量为52.5%~74.7%,平均为60.5%,碳酸盐岩矿物含量0.1%~17.4%,平均为9.9%。CC1井孤峰组页岩的碳酸盐岩矿物含量明显偏高,其上段和下段页岩的碳酸盐岩矿物含量14%~52.56%,平均值30%,中段页岩的碳酸盐

岩矿物含量0.67%~29.4%,平均值7.6%,石英和长石含量为13.1%~92.4%(平均值66.3%),黄铁矿含量0.67%~36.3%,平均值7.62%。在页岩岩相划分三端元图上(图2),HY1井、HC1井孤峰组主要发育硅质岩相、硅质页岩相和黏土质页岩相,而CC1井孤峰组发育硅质岩相、硅质页岩相、钙质页岩相和钙质硅质页岩相。

不同地区孤峰组页岩的矿物含量差异反映了沉积环境的差异。南黄海地区CSDP-2井孤峰组硅质岩的石英和长石含量高于下扬子陆域三口探井,反映出其沉积环境的水深或初级生产力大于陆域三口探井孤峰组页岩。下扬子陆域泾县地区CC1井碳酸盐岩含量偏高可能与该井更靠近南侧江南断隆带的碳酸盐岩台地有关,而HC1井孤峰组上段黏土含量偏高和HY1井上段白云岩夹层的出现可能与中二叠世末期海平面下降^[16]或初级生产力不足有关。不同探井孤峰组页岩有机质丰度与页岩岩相的关系研究显示(图2),孤峰组TOC>4%的样品主要分布在硅质岩相、硅质页岩相,少量分布在黏土质页岩相。

3.2 硅质烃源岩评价

南黄海地区CSDP-2井孤峰组烃源岩的有机碳含量2.97%~16.3%(平均值11.1%),生烃潜力指数(PG)为0.46~3.81 mg/g(平均值2.02 mg/g),按照古

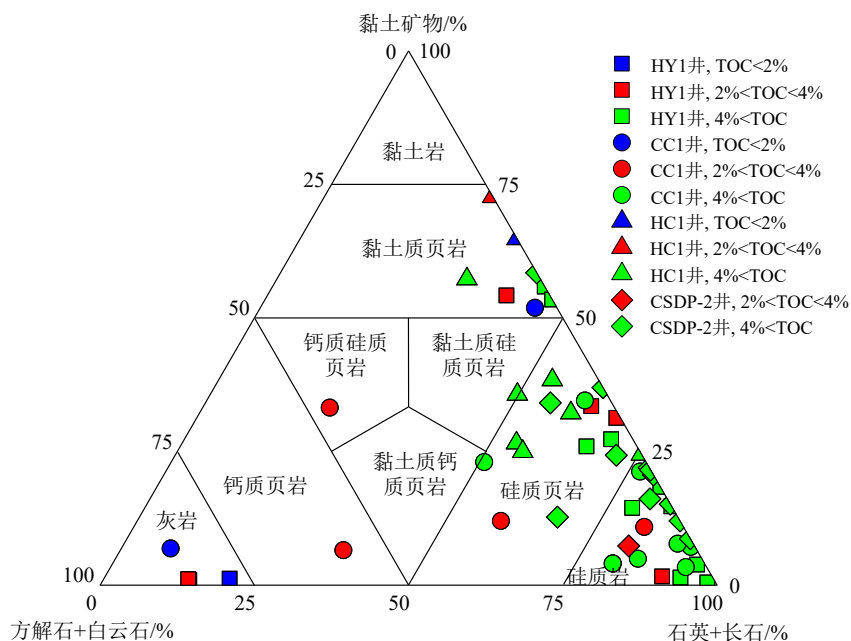


图2 下扬子-南黄海地区孤峰组页岩矿物组成三端元图解

图版据文献[56]。

Fig.2 Ternary diagram of shale mineral composition

Template is from reference [56].

生界海相烃源岩生烃潜力评价标准^[57], 属于很好烃源岩。CZ35-2-1 井孤峰组黑色泥岩有机质丰度 2.24%~2.58%, PG 值 1.82~2.47 mg/g(平均值 2.14 mg/g), 属于好烃源岩(图 3)。下扬子陆域三口探井孤峰组硅质页岩的有机碳含量 0.98%~18.8%(平均

值 7%), HC1 井和 HY1 井孤峰组烃源岩的 PG 值为 0.7~4.04 mg/g(平均值 1.14 mg/g), 热解氢指数为 5.6~109 mg/g(平均值为 38 mg/g), 属于好-很好烃源岩。可见, 下扬子-南黄海地区孤峰组硅质烃源岩是一套优质烃源岩。

南黄海地区两口探井的孤峰组硅质烃源岩的镜质体反射率 R_o 为 2.1%~3.11%, 热解峰温 T_{max} 值为 375~543 °C, 其中 CZ35-2-1 井孤峰组烃源岩 T_{max} 受到了非烃+沥青质含量的影响而呈现异常低值^[58]。下扬子陆域孤峰组烃源岩的 R_o 为 1.02%~2.65%, T_{max} 值为 360~639 °C, 其中 HC1 井也出现有 T_{max} 异常低的现象。结合 T_{max} 和镜质体反射率 R_o 对烃源岩的成熟度评价认为, 海域和陆域孤峰组烃源岩均属于高过成熟烃源(图 3)。利用高过成熟烃源岩显微组分类型指数(TI)和干酪根稳定碳同位素相结合的方法进行有机质类型评价^[59], 结果显示南黄海地区孤峰组烃源岩的有机质类型以 II₂ 型为主, 而陆域孤峰组烃源岩为 II₂-III 型(图 3)。因此, 综合评价认为南黄海地区孤峰组烃源岩为一套很好的偏腐殖型高过成熟烃源岩, 且有机质类型略优于下扬子陆域孤峰组烃源岩。

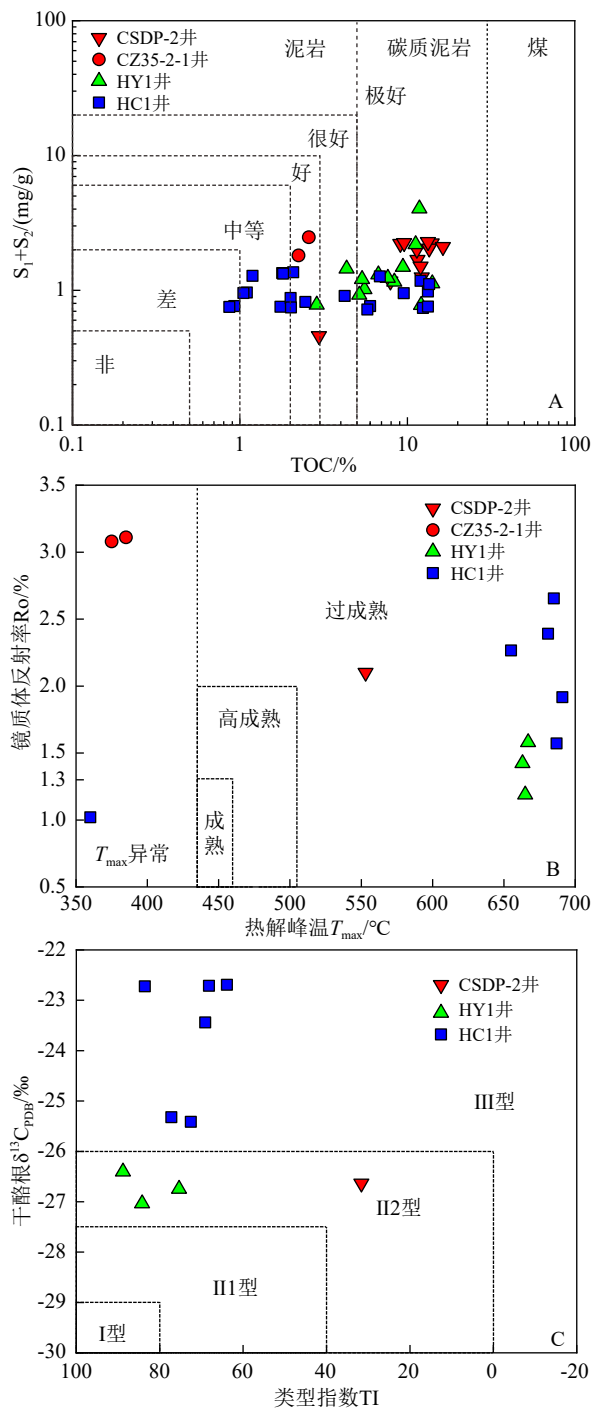


图 3 下扬子-南黄海地区孤峰组烃源岩生烃潜力、有机质成熟度及有机质类型评价

Fig.3 Evaluation of hydrocarbon generation potential, organic matter type, and organic matter maturity of source rocks in the Gufeng Formation of the Lower Yangtze – South Yellow Sea area

3.3 硅质烃源岩分布特征

海域与陆域孤峰组硅质烃源岩的连井对比显示(图 4), 南黄海地区 CSDP-2 井孤峰组烃源岩厚 13.4 m, CZ35-2-1 井孤峰组烃源岩厚 22 m, 陆域泾县地区 CC1 井孤峰组烃源岩厚 41.5 m, HC1 井和 HY1 井硅质烃源岩厚约 75 m, 而巢湖和县 HX1 井硅质烃源岩厚 19 m。因此, 孤峰组烃源岩分布呈现出陆域厚度明显大于海域, 且由南向北厚度逐渐增大再逐渐减小的趋势。依据前人对陆域孤峰组烃源岩的分布研究^[60-61], 并结合沉积相展布及探井实测数据, 预测下扬子-南黄海地区孤峰组烃源岩整体呈 SWW-NEE 向展布, 陆域厚度中心在芜湖和溧水地区, 最大厚度大于 150 m, 向西至安庆-铜陵一带快速收敛成窄条状, 向北、向南均匀递减; 海域孤峰组烃源岩厚度中心在青岛断褶带南部, 预测最大厚度大于 100 m。

4 硅质烃源岩的沉积环境及成因

4.1 硅质烃源岩的沉积环境

硅质岩的 MnO/TiO_2 值、 Fe_2O_3/TiO_2 值、 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值、 La_N/Ce_N 值均可用于判断其形成

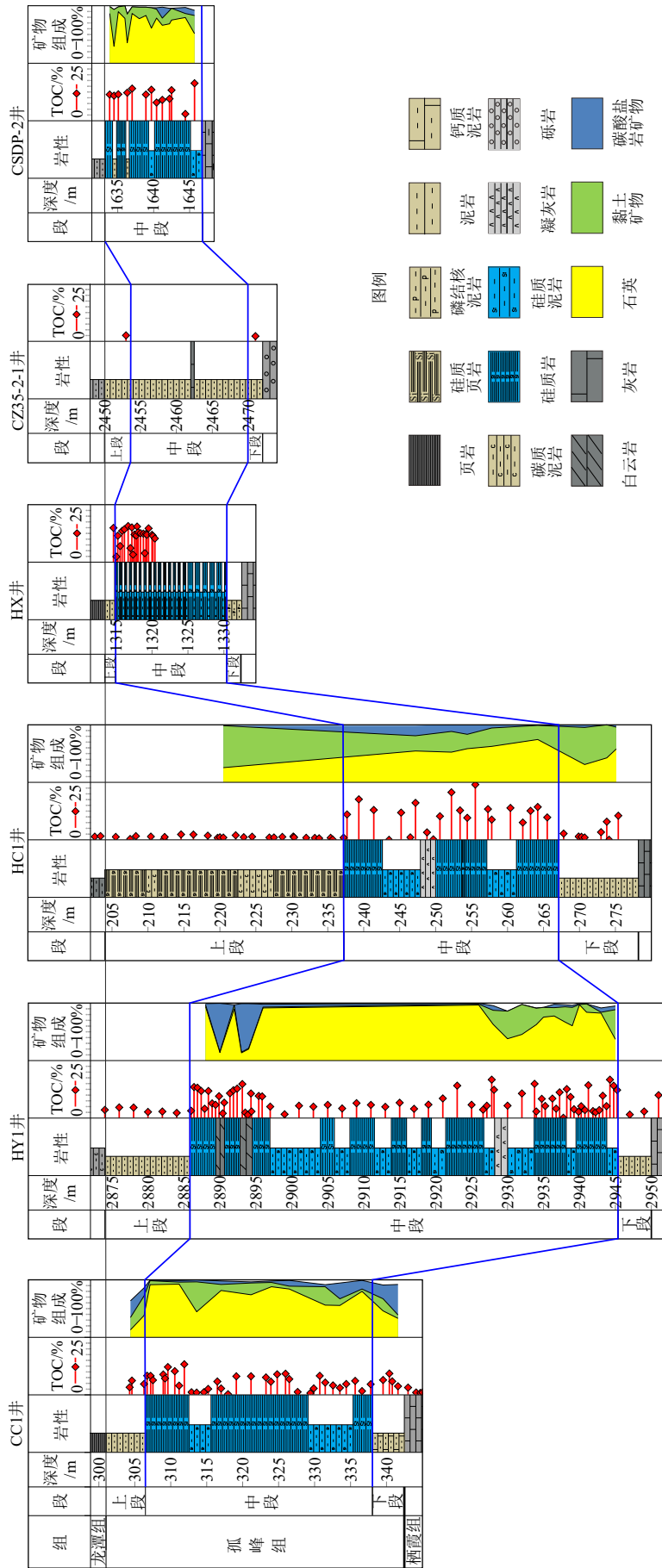


图 4 下扬子-南黄海地区中二叠统孤峰组烃源岩连井对比图
井位见图 1。
See Fig. 1 for locations of the wells.

Fig. 4 Inter-well comparison of source rocks in the Middle Permian Gufeng Formation in the Lower Yangtze-South Yellow Sea area

的大地构造环境。开阔大洋中硅质沉积物的 MnO/TiO_2 可达 0.5~1.5, 陆缘海和大陆坡沉积的硅质岩 MnO/TiO_2 一般小于 0.5^[10, 62]。靠近大陆边缘的硅质岩受陆源碎屑影响其 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 大于 0.5、 Fe_2O_3/TiO_2 小于 50, 而大洋中脊附近的硅质岩 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 小于 0.5、 Fe_2O_3/TiO_2 大于 50^[10, 52]。大陆边缘的硅质岩 La_N/Ce_N 值平均约 0.5~1.5, 深海盆地硅质岩的 La_N/Ce_N 值为 1.0~2.5, 在洋脊附近的硅质岩 La_N/Ce_N 值 ≥ 3.5 ^[9, 63]。CSDP-2 井和巢湖地区 HX 井孤峰组硅质岩、硅质页岩的 MnO/TiO_2 值明显小于 0.5, Fe_2O_3/TiO_2 值为 2.2~38.4, $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 值为 0.41~0.93, La_N/Ce_N 值为 1.1~2.6 (表 2、表 3)。在 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 与 Fe_2O_3/TiO_2 、 $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ 与 La_N/Ce_N 散点图上 (图 5) 主要分布于大陆边缘区域。因此, 可以确定南黄海地区 CSDP-2 井和 HX 井孤峰组硅质烃源岩形成的构造环境类似, 主要形成于大陆边缘环境。

在贫氧条件下, 沉积物中 U 的富集早于 Mo, 其 Mo_{EF}/U_{EF} 为正常海水的 0.1~0.3 倍, 而在厌氧条件下沉积物对 Mo 的吸收速率大于 U, 其 Mo_{EF}/U_{EF} 增大为正常海水的 1~3 倍^[65-66]。此外, 由于厌氧的滞留海盆限制了海水中 Mo 和 U 的补给, 其沉积物中 Mo_{EF}/U_{EF} 一般小于 1 倍海水值, 而在受铁、锰氢氧化物颗粒载体吸附作用影响的弱滞留环境中沉积物的 Mo_{EF}/U_{EF} 为正常海水值的 3~10 倍^[65-66]。CSDP-2 井和 HX 井孤峰组硅质岩、硅质泥岩的 Mo_{EF}/U_{EF} 为正常海水值的 1~3 倍, 在 $U_{EF}-Mo_{EF}$ 协变图上 (图 6) 主要位于缺氧-静水硫化环境和颗粒载体区域, 且 CSDP-2 井硅质岩的 U_{EF} 明显偏高 (表 3)。这反映出两口井孤峰组硅质岩、硅质泥岩主要形成于缺氧-静水硫化环境, 且 CSDP-2 井硅质岩沉积时期的还原性更强。Algeo 等^[67] 通过对比不同海洋环境中沉积物的 Mo/TOC 值, 建立了 Mo-TOC 水体滞留程度的判别图 (图 6), 滞留海盆沉积物的 Mo/TOC 呈现极低值。Scott 和 Lyons^[68] 指出间歇性静水环境的沉积物 Mo 含量为 $(25\sim 100)\times 10^{-6}$, 持续性静水环境的 Mo 含量大于 100×10^{-6} 。CSDP-2 井孤峰组硅质岩、硅质泥岩的 Mo/TOC 值介于 3.5~27.5, Mo 含量为 $(35\sim 220)\times 10^{-6}$ (平均值 111.5×10^{-6}), 指示中等滞留程度的静水硫化环境; 而 HX 井硅质岩、硅质泥岩的 Mo/TOC 值为 1.8~11, Mo 含量为 $(18\sim 151)\times 10^{-6}$ (平均值 72.4×10^{-6}), 指示为中等—强滞留程度的间歇性静水环境。值得指出的是缺氧-静水硫化环境并不是区分海水是否受上升流影响的标志, 在长期受上升洋流影响的大陆边缘海环境, 由于初级生产

力、有机碳沉降量和底栖生物耗氧量的增加, 在水深 200~1000 m 的大陆坡环境中常形成最小含氧带 (OMZ), 带内水柱自上而下依次出现氧跃层 ($20\ \mu mol/L \leq$ 氧含量 $< 65\ \mu mol/L$)、最小含氧带核心层 ($1\ \mu mol/L <$ 氧含量 $< 20\ \mu mol/L$) 和下氧跃层 ($20\ \mu mol/L \leq$ 氧含量 $< 100\ \mu mol/L$), 因而也表现为缺氧-静水硫化环境^[65-66, 69]。

4.2 硅质来源

Al-Fe-Mn 三角图解常用来判别硅质岩的热水成因和非热水成因。一般认为, 纯生物成因硅质岩沉积物的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 比值为 0.6, 而纯热液成因的硅质岩该比值为 0.01, 受热水作用的影响其比值小于 0.35^[9, 73]。CSDP-2 井、HX 井孤峰组硅质岩和硅质泥岩的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 分别为 0.6~0.8、0.34~0.91, 与纯生物成因的硅质岩比值接近, 在 Al-Fe-Mn 三角图上全集中于生物成因区 (图 7A)。因此, 可以确定南黄海地区 CSDP-2 井和巢湖地区 HX 井孤峰组硅质岩和硅质泥岩主要为生物成因。

生物成因硅质岩即通过生物的固硅作用形成的硅质岩, 其形成的必备条件是需要有大量的生物为硅质提供物质来源, 海侵、上升洋流、陆源营养盐输入等因素均能促使海水的化学条件发生改变而造成生物繁盛^[74-75]。因此, 需要对硅质生物的来源作进一步的分析。如图 7B 所示, 两口井孤峰组硅质烃源岩的 SiO_2 和 Al_2O_3 存在明显的负相关性, 说明两个地区的陆源硅对硅质岩成因影响极小。硅质泥岩的 Al_2O_3 含量明显高于硅质岩, 反映其陆源碎屑输入量较大。

为判别孤峰组硅质岩的上升洋流成因, 本文利用现代秘鲁洋流沉积物的元素地球化学数据^[14, 76] 与 CSDP-2 井、和县地区 HX 井硅质岩和硅质泥岩的数据进行类比。选用北美上地壳页岩组合的元素含量^[71] 作为标准, 按 $X_{EF}=(X/Al)_{\text{样品}}/(X/Al)_{\text{AUCC}}$ 的计算公式对 CSDP-2 井硅质岩样品的元素富集系数进行计算。结果显示 (图 8), CSDP-2 井和 HX 井孤峰组硅质岩、硅质泥岩与秘鲁洋流沉积物的元素富集系数表现出良好的一致性。主量元素均表现为 Ca、Si、P、Mg 元素相对富集, K、Ti 元素相对亏损 (图 8A), 说明 CSDP-2 井孤峰组硅质来源中生物硅贡献较大而陆源硅贡献较少; 微量元素均表现为还原性敏感元素 (Cr, U, V, Mo) 和生产力敏感元素 (Cd, Cu, Zn, Ni) 相对富集, Mn 相对亏损 (图 8B), 反映出 CSDP-2 井、HX 井孤峰组硅质烃源岩与秘鲁洋流沉积物的沉积环境类似, 均形成于高生产力和

表2 HX井与CSDP-2井孤峰组硅质岩的主量元素百分含量

Table 2 Mass percentage fractions of the main elements of siliceous rocks in the Gufeng Formation in Wells HX and CSDP-2

井位	样品号	岩性	深度/m	TOC/%	主量元素/%										
					SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
CSDP-2井	DP2-3	硅质岩	1635.1	11.5	81.62	0.11	2.85	1.15	0.005	0.34	0.33	0.26	0.39	0.148	
	DP2-6	硅质岩	1637.0	14	82.33	0.10	2.54	1.05	0.003	0.31	0.39	0.27	0.35	0.21	
	DP2-8	硅质岩	1638.9	11.4	76.33	0.14	3.62	1.33	0.004	0.30	0.28	0.28	0.50	0.174	
	DP2-9	硅质泥岩	1639.7	13.5	64.53	0.14	9.45	1.76	0.032	2.71	3.17	0.82	0.77	0.11	
	DP2-10	硅质岩	1640.4	7.92	73.86	0.20	5.17	1.88	0.005	0.52	0.53	0.54	0.75	0.138	
	DP2-11	硅质泥岩	1641.2	9.08	66.78	0.16	4.45	1.51	0.034	3.09	4.38	0.89	0.53	0.104	
	DP2-12	硅质泥岩	1642.2	9.58	67.37	0.22	5.69	2.70	0.009	1.06	1.70	0.69	1.00	0.31	
	DP2-13	硅质岩	1642.5	13.3	72.01	0.21	5.70	2.50	0.005	0.37	0.47	0.58	0.98	0.109	
	DP2-14	硅质岩	1644.4	2.97	75.19	0.12	3.78	1.97	0.009	0.49	3.97	0.38	0.72	0.19	
	DP2-15	硅质泥岩	1645.7	16.3	54.71	0.36	9.08	3.88	0.02	0.86	4.26	0.84	1.69	0.34	
	DP2-16	硅质泥岩	1644.0	10.4	51.99	0.26	8.54	2.78	0.01	7.03	10.70	1.44	0.89	0.10	
	DP2-17	硅质泥岩	1644.2	12	62.54	0.25	6.53	3.50	0.00	1.83	7.80	1.35	0.93	0.25	
	HX井	HX0-12	硅质岩	1320.4	10.3	85.31	0.084	2.35	0.3	0.002	0.33	0.5	0.13	0.21	0.043
		HX0-8	硅质岩	1320.1	11.4	80.29	0.106	2.72	1.23	0.001	0.22	0.76	0.09	0.31	0.212
		HX0-7	硅质岩	1320.0	11.9	74.53	0.211	4.7	1.88	0.002	0.46	0.42	0.13	0.69	0.057
		HX0-3	硅质岩	1319.5	14.7	63.78	0.189	5.13	1.82	0.004	0.56	4.91	0.14	0.64	0.069
		HX0-1	硅质岩	1319.3	11.9	72.55	0.079	2.22	0.27	0.007	0.33	9.23	0.15	0.24	0.043
HX1-2		硅质岩	1319.0	3.9	82.12	0.046	1.35	0.1	0.001	0.35	5.55	0.12	0.11	0.035	
HX1-13		硅质岩	1317.3	3.3	82.67	0.052	1.56	0.5	0.002	1.45	4	0.12	0.13	0.037	
HX1-15		硅质岩	1317.0	6.1	73.38	0.066	1.8	0.41	0.005	2.53	5.95	0.07	0.17	0.041	
HX1-25		硅质岩	1315.5	7	67.4	0.05	1.48	1.51	0.008	3.59	8.95	0.11	0.13	0.039	
HX1-28		硅质岩	1315.0	2.4	81.94	0.078	1.98	1.88	0.003	0.82	4.41	0.18	0.22	0.049	
HX1-1		硅质泥岩	1319.2	12.3	69.64	0.207	5.93	1.41	0.008	0.53	3.52	0.06	0.58	0.065	
HX1-3		硅质泥岩	1318.8	12.4	65.94	0.141	4.51	0.87	0.002	0.5	6.08	0.15	0.46	0.062	
HX1-6		硅质泥岩	1318.4	12.6	56.81	0.234	7.22	7.95	0.008	0.63	3.37	0.09	0.75	0.084	
HX1-8		硅质泥岩	1318.1	13	66.38	0.144	3.93	1.94	0.004	0.47	6.3	0.1	0.47	0.075	
HX1-9		硅质泥岩	1317.9	15.5	59.63	0.192	6.14	3.7	0.004	0.75	3.9	0.17	0.65	0.08	
HX1-10		硅质泥岩	1317.8	11.6	54.66	0.306	9.21	4.04	0.013	1.75	4.95	0.12	1.16	0.207	
HX1-11		硅质泥岩	1317.5	12	65	0.137	4.82	3.12	0.004	0.66	4.9	0.1	0.45	0.079	
HX1-14		硅质泥岩	1317.2	15.1	65.91	0.213	7.19	3.06	0.004	0.7	1.84	0.12	0.71	0.086	
HX1-17		硅质泥岩	1316.7	15.7	63.8	0.283	7.92	3.24	0.007	0.9	1.32	0.13	0.97	0.102	
HX1-21		硅质泥岩	1316.1	14.3	52.79	0.274	7.33	10.53	0.011	0.65	1.44	0.11	0.92	0.14	
HX1-23		硅质泥岩	1315.8	13.6	64.58	0.183	5.74	2.06	0.002	0.68	3.83	0.07	0.62	0.083	
HX1-27	硅质泥岩	1315.2	11.5	64.81	0.198	7.04	5.48	0.003	0.66	1.22	0.13	0.7	0.077		
HX1-31	硅质泥岩	1314.6	14.9	55.22	0.24	9.16	2.96	0.007	1.11	4.99	0.14	1	0.155		

注: HX井样品数据引自文献[14]; DP2-16、DP2-17号样品数据引自文献[28]。

表 3 HX 井与 CSDP-2 井孤峰组硅质岩的微量元素含量

Table 3 Mass fractions of the trace elements of siliceous rocks in the Gufeng Formation from Wells HX and CSDP-2

井位	样品号	微量元素/ $\times 10^{-6}$													Cd/Mo	La _N /Ce _N	CIA	C值	
		V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	U	Mo	Cd	Th	Sr	Zr	Rb					
CSDP-2井	DP2-3	786	391	3.62	186	35.2	369	40.3	76.2	51.6	1.66	75.4	44.3	16.5	0.68	1.44	68.92	0.97	
	DP2-6	1004	423	4.21	218	43.3	398	66.6	110	65.5	1.8	101	35.3	16.7	0.60	1.47	66.57	0.92	
	DP2-8	1672	649	5.47	304	66.2	654	37.4	220	114	2.43	62.7	62.7	22.5	0.52	1.50	71.31	1.17	
	DP2-9	1093	365	3.3	156	41	257	19.4	118	59.6	14.4	403	68.3	29.8	0.51	1.16	72.81	0.27	
	DP2-10	1059	383	6.57	279	52.5	264	28.2	218	84.7	4.47	78.5	71.5	31.3	0.39	1.18	66.66	0.86	
	DP2-11	800	317	4.94	189	37.7	265	19.6	108	56.3	3.53	177	68.1	22.6	0.52	1.23	55.87	0.20	
	DP2-12	1191	775	8.58	243	80.5	317	105	114	79.9	5.28	158	74	39.3	0.70	1.35	63.03	0.66	
	DP2-13	1126	697	8.88	291	85.5	337	14	90.5	66.5	4.33	79.8	50.6	38.6	0.73	1.25	66.64	1.08	
	DP2-14	289	193	5.95	101	35.2	119	33.1	47.4	25.7	2.1	225	45.6	19.3	0.54	1.06	64.98	0.36	
	DP2-15	1073	763	14.4	247	151	292	27.8	124	95.8	6.66	343	110	61.6	0.77	1.49	66.40	0.52	
	DP2-16	-	-	6.0	-	57.0	75.6	16.3	35.9	-	-	-	-	-	-	-	59.96	0.14	
	DP2-17	-	-	5.0	-	83.0	154.0	15.9	76.3	-	-	-	-	-	-	-	54.50	0.29	
	HX井	HX0-12	191.3	264.5	1.7	115.3	34.9	168.3	7.2	18.2	14.8	1.57	48.5	40.9	20.7	0.81	1.31	78.19	0.32
		HX0-8	619.2	386.8	4.5	164.6	58.9	210.2	20.4	62.4	50.77	2.36	65.0	74.3	31.9	0.81	1.45	81.13	0.96
		HX0-7	917.7	857.3	5.5	198.7	76.6	401.7	15.2	49.2	43.86	3.18	81.3	43.0	30.8	0.89	1.27	79.98	1.20
		HX0-3	1324.5	419.4	7.7	213.0	66.6	237.9	18.1	92.7	81.84	3.45	261.0	52.1	31.5	0.88	1.53	81.62	0.33
		HX0-1	399.5	146.8	1.8	82.1	27.4	136.5	2.6	21.9	34.42	1.63	-	47.2	28.17	1.57	1.26	74.65	0.04
HX1-2		293.1	119.7	0.9	57.9	14.8	54.0	3.9	22.6	15.58	1.03	-	19.5	6	0.69	1.47	72.42	0.03	
HX1-13		337.7	104.4	2.3	56.8	16.8	95.6	4.4	32.8	16.23	1.31	148.5	21.1	7.2	0.49	1.20	74.43	0.10	
HX1-15		504.8	192.5	1.6	85.1	21.7	210.5	4.7	44.8	37.37	1.32	110.7	24.1	8.5	0.83	1.32	81.27	0.06	
HX1-25		950.9	114.6	8.4	80.4	28.8	120.1	6.2	50.8	25.19	1.3	222.1	63.8	17.6	0.50	1.32	74.63	0.13	
HX1-28		325.8	115.5	7.4	75.7	23.4	105.5	8.29	48.7	22.99	1.6	232.6	28.1	11.3	0.47	1.23	70.44	0.34	
HX1-1		1382.1	371.8	5.6	135.4	60.8	195.3	7.6	44.7	76.97	4.54	198.2	63.5	62.2	1.72	2.62	87.76	0.35	
HX1-3		1081.1	450.4	4.1	177.5	51.5	136.6	11.3	57.1	46.35	3.83	244.2	43.8	22.7	0.81	1.57	81.96	0.15	
HX1-6		1486.8	373.2	28.7	273.3	95.7	225.2	21.1	140.3	49.46	6.18	228.4	53.8	36.6	0.35	1.21	86.68	1.65	
HX1-8		1569.4	233.0	8.2	170.5	56.1	161.1	8.0	66.4	70.65	2.55	300.7	85.8	49.9	1.06	1.88	82.41	0.29	
HX1-9		1465.0	463.2	16.1	286.0	115.5	679.5	22.4	151.4	121.89	4.51	247.2	55.8	31.9	0.81	1.43	82.92	0.72	
HX1-10		1300.9	361.6	10	219.9	93.6	362.0	43.2	109.2	119.56	7.1	348.9	76.7	52.6	1.09	1.36	84.78	0.53	
HX1-11		2233.9	313.2	10.2	193.8	66.5	241.3	7.4	75.8	83.85	3.83	270.5	83.3	49.1	1.11	1.34	85.50	0.56	
HX1-14		3299.3	607.7	11.1	216.5	81	268.5	9.2	76.6	99.26	6.3	156.6	65.5	56.6	1.30	1.19	86.05	1.05	
HX1-17		3086.0	488.4	11.3	237	92.8	361.6	10.3	73.2	116.77	5.62	155.4	91.0	50.4	1.60	1.25	84.25	1.10	
HX1-21		31105	454.9	40	173	105.8	407.7	11.7	150.1	119.77	6.86	151.7	82.4	48.7	0.80	1.18	84.35	3.38	
HX1-23	1256.0	523.9	5.7	218.6	78.6	572.3	14.2	80.3	107	4.27	225.2	55.0	31.2	1.33	1.26	86.41	0.44		
HX1-27	1277.5	423.7	22.0	252.6	88.6	394.6	21.4	104.9	68.48	7.22	128.8	55.3	35.2	0.65	1.16	85.57	2.05		
HX1-31	4403.5	488.7	9.8	236.3	88.8	259.4	15.5	91	96.36	9.27	317.9	72.7	48.9	1.06	1.42	85.56	0.50		

注: La_N/Ce_N是样品经过北美上地壳页岩组合的元素含量^[71]标准化后计算的比值, 计算公式为La_N/Ce_N=(La_s样品/La_{AUCC})/(Ce_{样品}/Ce_{AUCC}); 元素富集系数按照X_{EF}=(X/Al)_{样品}/(X/Al)_{AUCC}公式计算, 过剩Cu_{xs}=Cu_{样品}-Al_{样品}×(Cu/Al)_{AUCC}; CIA指数计算方法见文献[72]; C指数计算方法见文献[28]。

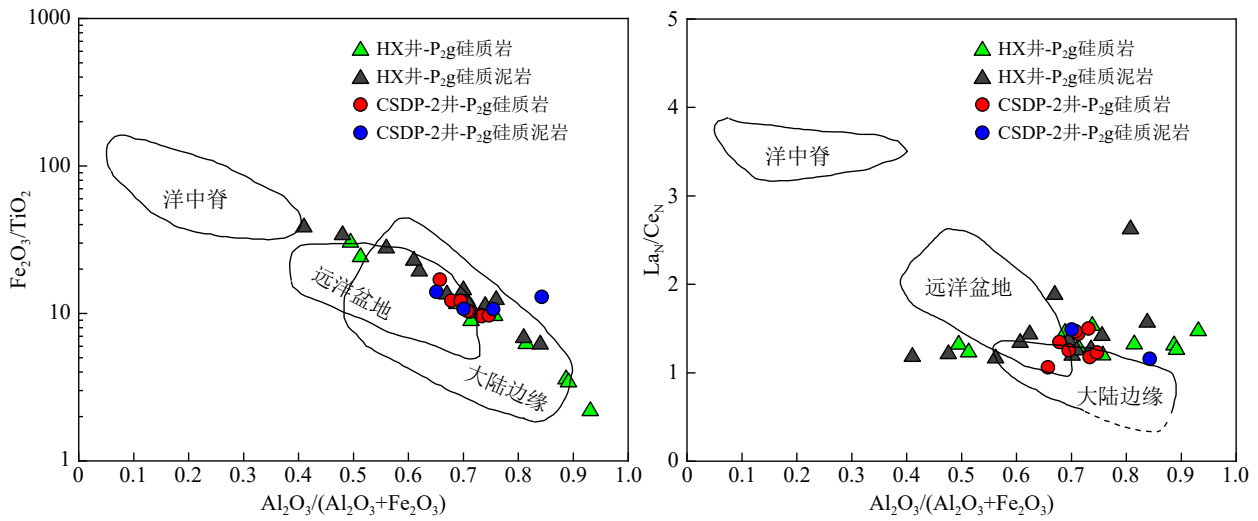


图5 下扬子-南黄海地区中二叠统孤峰组硅质岩沉积环境判别图解

图版据文献 [64]。

Fig.5 Discrimination of sedimentary environment of siliceous rocks in the Middle Permian Gufeng Formation in Lower Yangtze – South Yellow Sea area

Template is from reference [64].

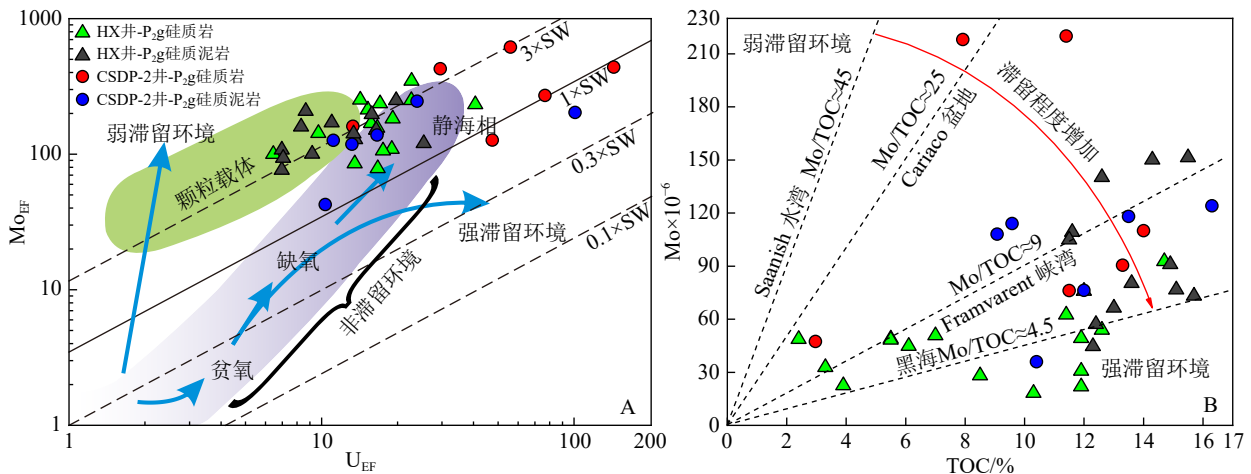


图6 下扬子-南黄海地区中二叠统孤峰组硅质岩的 U_{EF} - Mo_{EF} 协变及 Mo-TOC 相关关系图解

底图据文献 [67, 70]。

Fig.6 Covariant diagram of U_{EF} vs Mo_{EF} and correlation diagram of Mo vs TOC of siliceous rocks in the Mid-Permian Gufeng Formation in the Lower Yangtze – South Yellow Sea area

Template is from references [67, 70].

还原环境, Mn 的亏损可能与其在还原环境中的活动性有关。

通过统计 CSDP-2 井孤峰组硅质岩的主微量元素含量的平均值, 并与和县地区 HX 井的硅质岩及现代秘鲁上升流沉积物的主微量元素含量进行对比。结果显示, CSDP-2 井和 HX 井孤峰组硅质岩、硅质泥岩的主微量元素含量与秘鲁上升洋流沉积物的主微量元素含量具有明显的正相关性(图 8C-D)。主量元素整体均表现出 $Si > Al > Ca > Fe > K >$

$Mg > P > Ti$ 的特征, 且 CSDP-2 井和 HX 井硅质泥岩的 Al、K、Ti 元素含量均略高于硅质岩(图 8C), 反映出硅质泥岩的陆源碎屑输入量大于硅质岩。CSDP-2 井硅质岩、硅质泥岩的 P 含量与 HX 井硅质岩都表现出显著低于秘鲁洋流沉积物的特征, 可能与还原环境下 P 元素的再矿化作用有关^[14]。两口井孤峰组硅质岩的微量元素含量均表现出 $V > Zn > Cr > Ni > Cu > Mo > Cd > Pb > U > Co$ 的特征, 且 CSDP-2 井硅质岩、硅质泥岩的 Co、U、Cd、

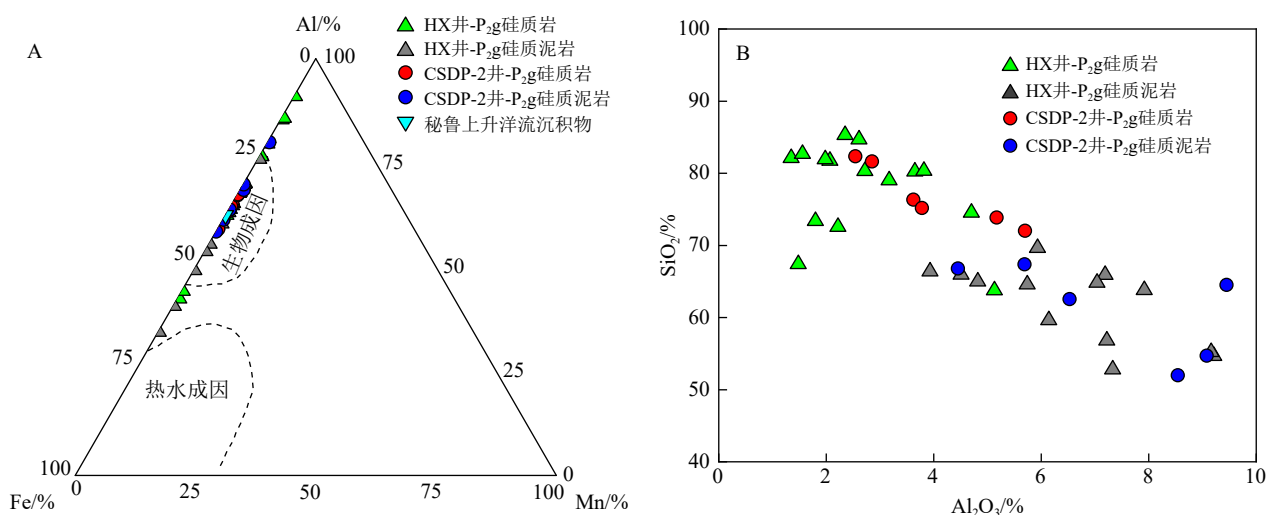


图 7 下扬子-南黄海地区中二叠统孤峰组硅质岩的成因判别图解

图版据文献 [73]。

Fig.7 Ternary discrimination of Al-Fe-Mn and $Al_2O_3-SiO_2$ for siliceous rocks in the Mid-Permian Gufeng Formation in the Lower Yangtze-Southern Yellow Sea area

Template is from reference[73].

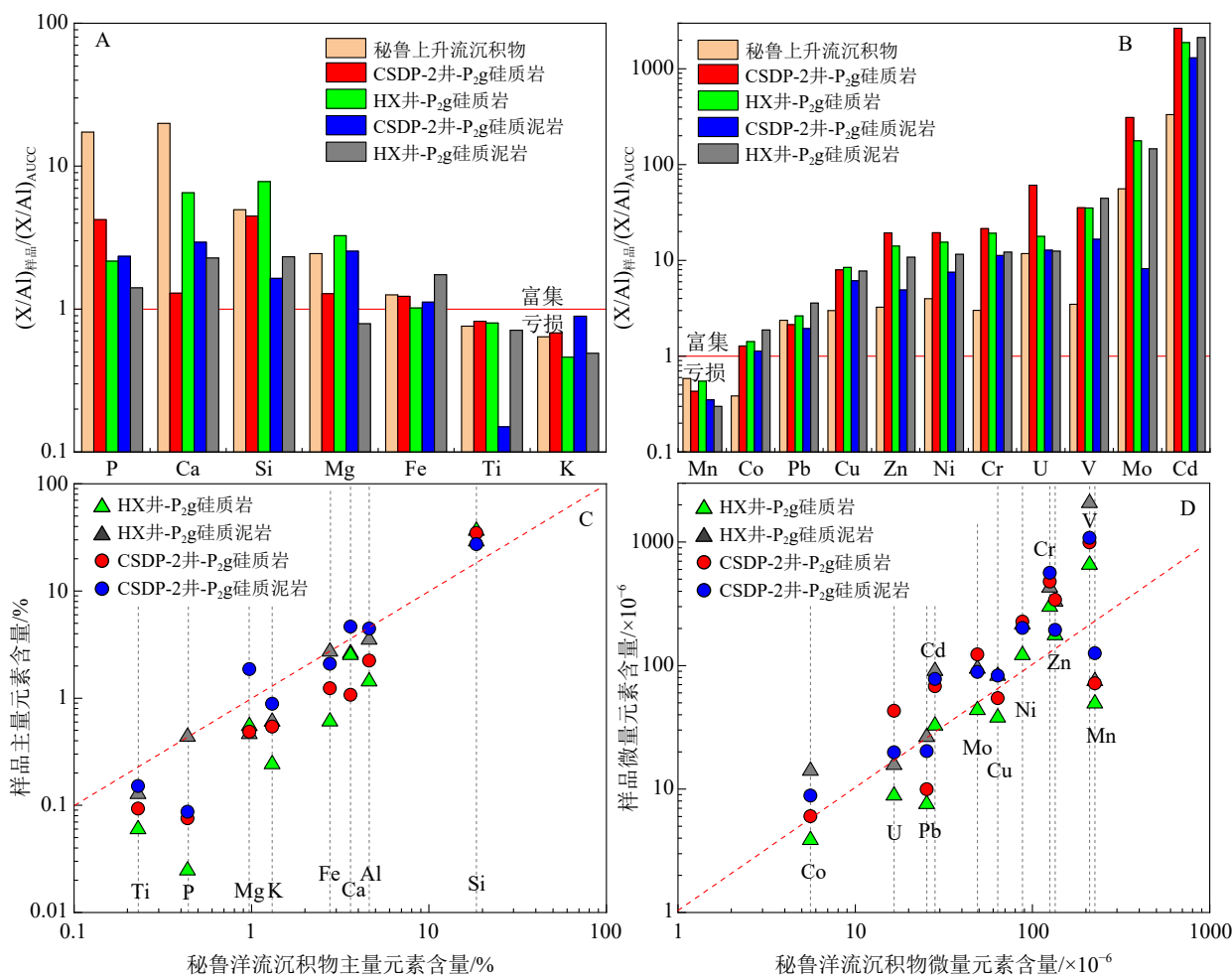


图 8 下扬子-南黄海地区孤峰组硅质岩与秘鲁洋流沉积物的元素富集系数、元素含量类比

Fig.8 Comparison in elemental enrichment coefficient and content between the siliceous rocks of Gufeng Formation in Lower Yangtze-South Yellow Sea area and the deposits of Peru upwelling

Mo、Cu、Ni、Zn、Cr、V元素含量略大于秘鲁洋流沉积物(图8D),说明南黄海地区孤峰组页岩沉积时期的海洋古生产力和水体还原性可能比现代秘鲁洋流更强。

受最小含氧带(OMZ)、“Mn传送带”和高生产力等水化学条件影响,上升洋流沉积物中的Mn或Co大量亏损、Cd和Mo大量富集^[65,77]。Sweere等^[78]通过对不同滞留程度水体沉积物的元素地球化学研究,提出 $Co \times Mn < 0.4$ 、 $Co_{EF} \times Mn_{EF} < 0.5$ 、 $Cd/Mo > 0.1$ 是上升流沉积的典型特征,且上升流活动越强烈,沉积物中的 $Co \times Mn$ 或 $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 越低、 Cd/Mo 越高^[14,77-78]。季节性上升流环境中沉积物的 Cd/Mo 一般为0.1~0.6,常年性上升流环境中沉积物的 $Cd/Mo > 0.6$ ^[78]。如图9、表3所示,CSDP-2井孤峰组硅质岩、硅质泥岩的 $Co \times Mn$ 值分别为0.01~0.04(平均值0.02)、0.02~0.22(平均值0.1), $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 值分别为0.22~0.66(平均值0.36)、0.12~1.49(平均值0.5), Cd/Mo 值为0.39~0.77(平均值0.6)。HX井孤峰组硅质岩、硅质泥岩的 $Co \times Mn$ 值分别为0.002~0.07(平均值0.02)、0.01~0.39(平均值0.11), $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 值分别为0.17~0.79(平均值0.47)、0.15~1.64(平均值0.57), Cd/Mo 为0.35~1.72(平均值0.94)。两口井硅质烃源岩的 $Co \times Mn < 0.4$ 、 $Co_{EF} \times Mn_{EF} < 0.5$ 、 $Cd/Mo > 0.6$,说明硅质烃源岩沉积时期存在常年性上升洋流活动。此外,两口井硅质岩的 $Co \times Mn$ 值和 $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 值均小于硅质泥岩,说明硅质岩沉积时的上升流活动强度大于硅质泥岩。

4.3 硅质烃源岩的成因

4.3.1 古构造和古气候背景

中二叠世孤峰组沉积时期,古特提斯洋处于初始扩张期^[16],扬子板块的构造运动以南北向大规模的拉张活动为主^[6,41],在板块内部和边缘形成了一系列NE、NW或EW向的裂谷性深水盆地和同沉积断裂^[16]。这些裂谷盆地的形成对硅质烃源岩的分布起到了控制作用,扬子板块中二叠统层状硅质岩集中分布的三个大区可分别对应于裂陷形成的北部盆地、湘桂盆地和钦防盆地^[6]。

气候变化是影响海洋通风量和海洋环流的重要因素,上升洋流作为海洋环流的一种形式,对气候变暖及温室效应等现象具有潜在的敏感性^[77],典型实例是现代秘鲁上升洋流受到厄尔尼诺作用抑制^[11]。化学蚀变指数(CIA)可用于衡量大陆地壳化学风化作用强度^[79]和古气候条件^[80],但CIA值易受

物质来源、沉积地形、沉积循环等因素影响^[81],气候指数C值和Sr/Cu比值在指示古气候条件时相对稳定。如图10所示,CSDP-2井孤峰组硅质烃源岩的CIA指数为55~73,HX井孤峰组硅质烃源岩的CIA指数为70~88,分别指示了弱—中等风化程度的冷湿气候和中等—强风化程度的热湿气候特征。但两口井大多数硅质烃源岩样品的古气候指数C值 > 0.2 ,Sr/Cu比值 < 0.5 ,且二者呈现出较好的负相关性,较一致地指示了潮湿或半干旱-半潮湿的古气候特征,这与两口井纬度相近的古地理特征是一致的。因此推测CSDP-2井硅质烃源岩偏低的CIA指数可能受到了气候之外的其他因素影响。HX井硅质岩的CIA指数为70~82,而硅质泥岩的CIA指数为82~88,指示硅质岩主要形成于暖湿气候而硅质泥岩形成于热湿气候。结合CSDP-2井和HX井硅质岩的陆源碎屑输入少、上升流活动强度大,而硅质泥岩的陆源碎屑输入较多、上升流活动强度较弱的特征,推断气温升高可能造成了孤峰组上升洋流活动减弱和陆源风化强度增大,进而形成了硅质泥岩和硅质岩的韵律性沉积特征。此外,早—中二叠世为全球巨型季风气候的鼎盛时期^[82],这也为上升洋流的形成和生物的繁盛创造了良好条件。

4.3.2 古生产力

海相高有机质丰度烃源岩的形成受保存条件和古生产力条件控制^[21]。现代海洋溶解的Cd的浓度主要受控于浮游植物的吸收和释放,因此较高的初级生产力可导致沉积物中Cd的富集^[65]。据此,Sweere等^[78]通过对比不同滞留程度海盆沉积物的 Cd/Mo 值,提出将控制有机质富集的古生产力因素和保存条件因素之间的界限定在 Cd/Mo 值为0.1, $Cd/Mo > 0.1$ 指示沉积物中的有机质富集受生产力主控, $Cd/Mo < 0.1$ 则指示沉积物中的有机质富集受保存条件主控。CSDP-2井和HX井孤峰组硅质岩、硅质页岩的 $Cd/Mo > 0.1$ (图11A),说明两口井孤峰组硅质烃源岩的有机质富集受生产力条件主控。结合 $Co \times Mn < 0.4$ 的上升流环境指示特征,可以推断孤峰组硅质岩形成的高生产力条件与上升流环境有关。

为验证 Cd/Mo 指标对于区分富有机质页岩形成主控因素的有效性,选取 Cu_{xs} (过剩Cu)和U/Th分别作为古生产力指标^[83]和保存力指标^[84]与TOC进行相关性分析。如图11B-C所示,CSDP-2井和HX井孤峰组硅质烃源岩的 Cu_{xs} 与TOC呈明显正相关且相关系数达到了0.62,而硅质烃源岩的U/Th值虽然指示了缺氧的水化学环境,但与TOC无明显

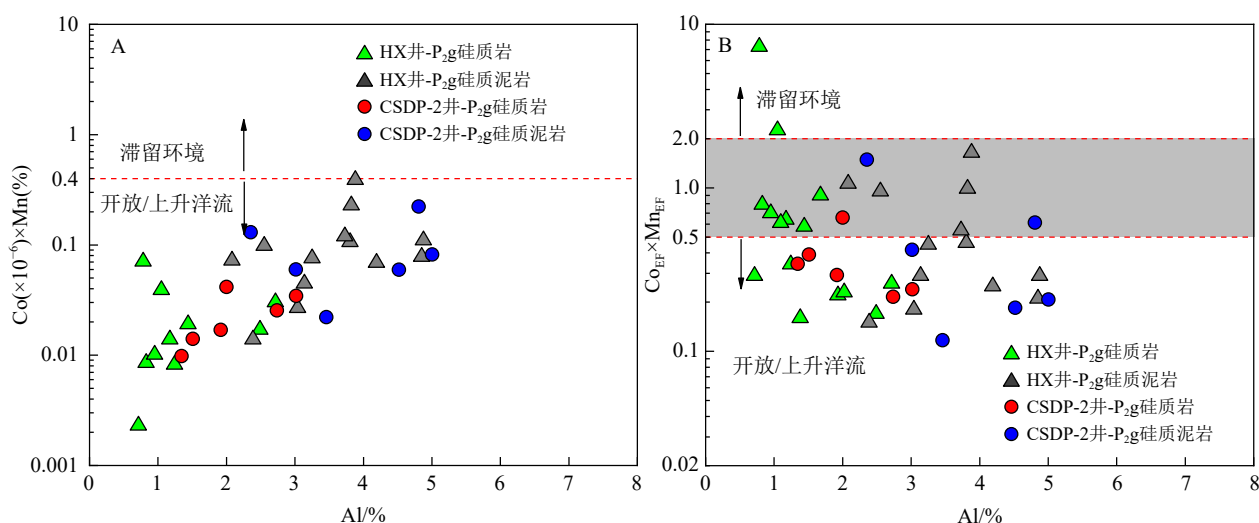


图 9 下扬子-南黄海地区孤峰组硅质岩 $Co \times Mn$ 和 Al 含量、 $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ 和 Al 含量相关关系
底图据文献 [78]。

Fig.9 Relationship between $Co \times Mn$ or $Co_{EF} \times Mn_{EF}$ and Al in siliceous rocks of the Gufeng Formation in the Lower Yangtze–South Yellow Sea areas

Template is from reference [78].

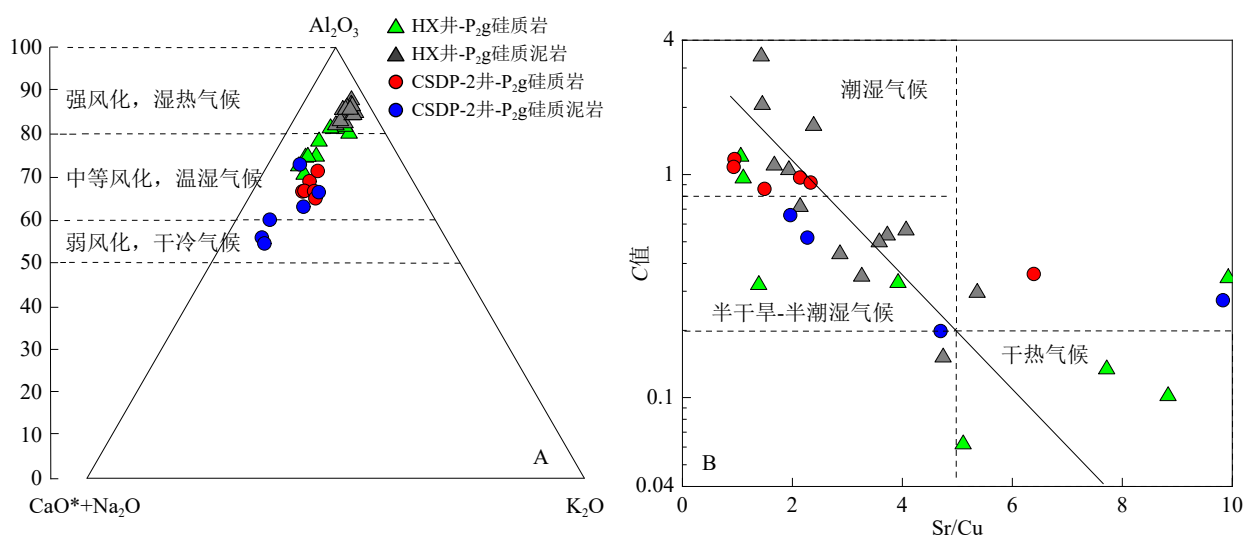


图 10 下扬子-南黄海地区孤峰组硅质岩的 A-CN-K 图解 [72]、 Sr/Cu 、气候指数 C 值判别古气候

Fig.10 Discrimination of paleoclimate by A-CN-K ternary diagram [72], Sr/Cu ratio, and value of climate index C during the deposition of siliceous rocks in the Gufeng Formation in the Lower Yangtze–South Yellow Sea area

相关关系。这说明 CSDP-2 井和 HX 井孤峰组上升流成因硅质烃源岩的有机质富集主要受高生产力控制, 缺氧环境对 TOC 的控制作用不明显, 这与通过 Cd/Mo 指标判断的结果一致。

4.3.3 水动力条件

水动力条件是水深、浪基面等的综合反映, 海相优质烃源岩形成于浪基面以下的静水环境 [85]。全岩 Zr/Rb 值可用于水动力条件的定量表征, 腾格尔等 [86] 对鄂尔多斯盆地海相烃源岩发育环境的无机地球化学研究表明, $Zr/Rb > 2$ 指示浅水高能环

境, 而 $Zr/Rb < 2$ 指示深水低能环境。CSDP-2 井和 HX 井孤峰组硅质泥岩的 Zr/Rb 值为 $1.02 \sim 2.29$, 而硅质岩的 Zr/Rb 值为 $1.31 \sim 3.63$, 且硅质烃源岩的 Zr/Rb 值与 TOC 呈现出一定的负相关性 (图 11D)。这说明硅质岩沉积时期的水动力状况以高能环境为主, 而硅质泥岩沉积时期的水动力状况以低能环境为主, 且动荡的水流带走了硅质岩中的一部分含有机质的细碎屑, 造成了硅质岩的 TOC 值相对于硅质泥岩偏低。

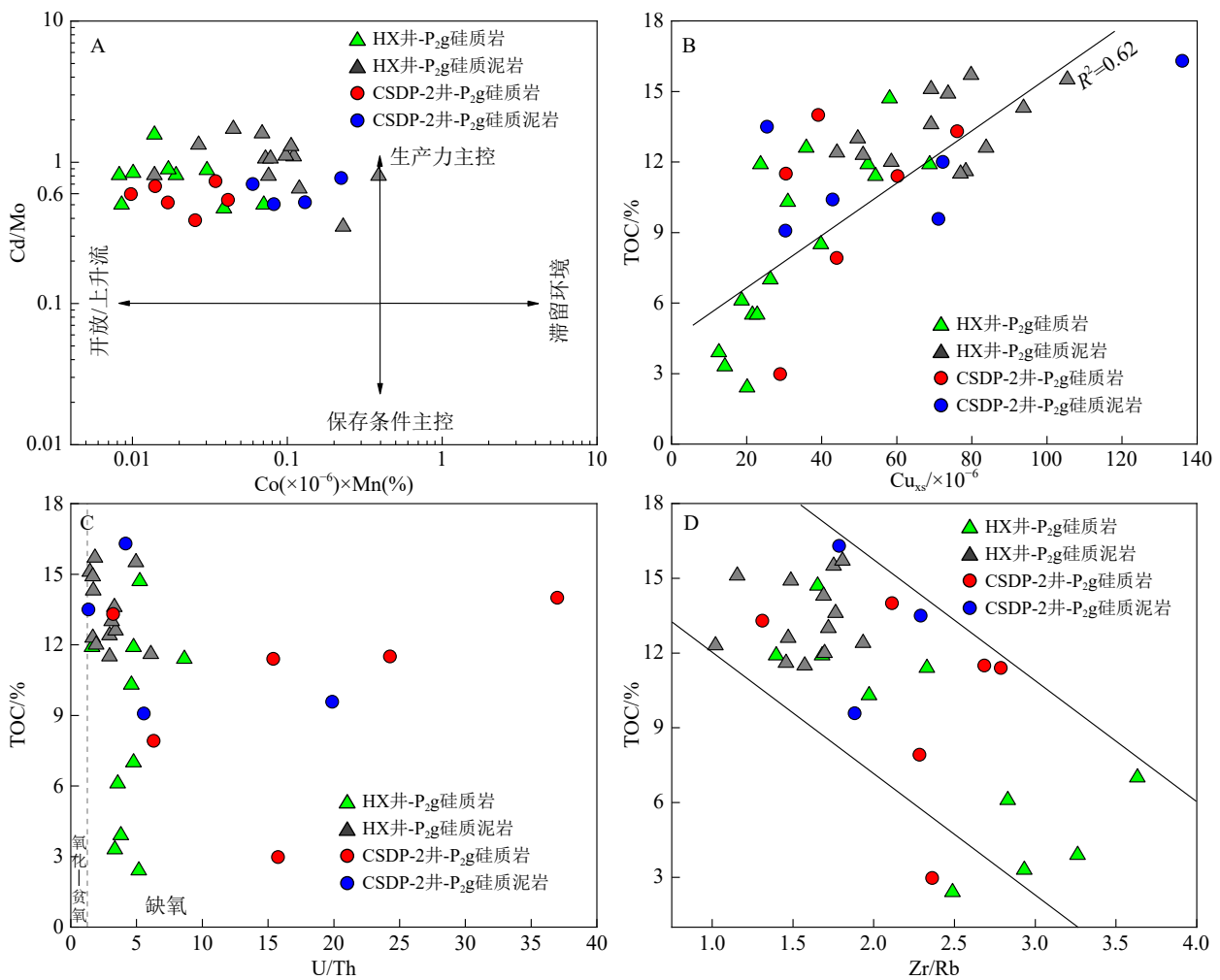


图 11 下扬子-南黄海地区孤峰组硅质烃源岩的 Cd/Mo-Co×Mn 联合图版^[78]及 Cu_{xs}、U/Th、Zr/Rb 与 TOC 的相关关系

Fig.11 Cd/Mo-Co×Mn joint chart^[78] and correlation among Cu_{xs}, U/Th, Zr/Rb, and TOC of the siliceous source rocks of Gufeng Formation in the Lower Yangtze-South Yellow Sea area

5 硅质烃源岩的成因模式

中二叠世孤峰组沉积时期, 扬子板块位于古特提斯洋东缘近赤道附近, 处于热带或亚热带潮湿气候^[87], 受赤道信风和海洋表层暖水与底层冷水对流影响, 上升洋流在古特提斯洋东岸活动强烈。彼时, 下扬子-南黄海地区为被动大陆边缘盆地^[88-91], 具有南高北低^[53]、北部与古特提斯洋相连的古地理特征^[6], 这为盆地相或深水陆棚相上升流成因硅质岩、硅质泥岩的沉积提供了理想环境。在硅质岩沉积时期, 古气候以中等风化强度的暖湿气候为主, 陆源碎屑物输入有限, 强烈的上升流活动携带了大量的 Cu、Zn、Ni 等营养元素至浅表层水体, 使得海洋表层及底栖生物大量繁盛并消耗了海水中的氧气, 进而造成海水分层或在大陆坡环境形成最小含

氧带(OMZ), 带内水柱表现为缺氧-硫化特征, 有利于有机质富集。但高能动荡的上升流水体活动会带走 OMZ 内部分含有机质的细碎屑, 形成硅质矿物对有机质富集的稀释效应。因此, CSDP-2 井和 HX 井硅质岩烃源岩的 TOC 值波动较大(2.4%~14.7%)(图 12A)。在硅质泥岩沉积时期, 古气候以强风化的炎热潮湿气候为主, 海平面相对硅质岩沉积时期下降, 陆源碎屑输入相对增加。虽然气温的升高减弱了上升洋流的活动, 使得上升洋流带来的营养盐减少, 但陆源营养物质供给使得海洋生产力维持在较高水平, 为有机质的富集提供了物质基础。此外, 减弱的上升洋流造成海水中溶解的氧含量减少, 进而造成 OMZ 的扩大和水体的滞留性增强。这与硅质泥岩具有较高的 Co×Mn 或 Co_{EF}×Mn_{EF} 值、较低的 Mo/TOC 值和 Zr/Rb 的特征相符。因此, CSDP-2 井和 HX 井硅质泥岩烃源岩的 TOC 处于稳

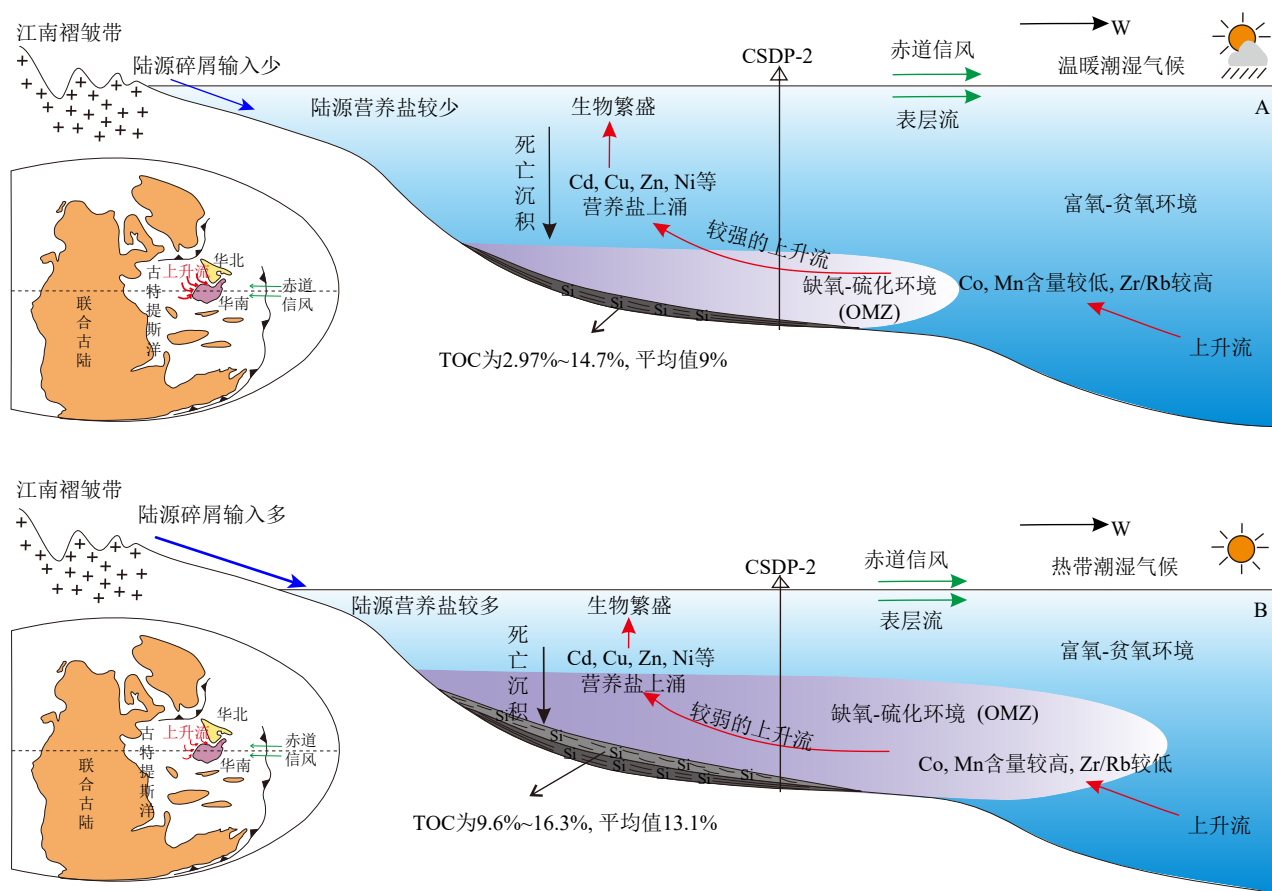


图 12 南黄海地区孤峰组硅质烃源岩成因模式图

Fig. 12 Genesis model of siliceous source rocks in Gufeng Formation of South Yellow Sea area

定高值(9.6%~16.3%)(图 12B)。

6 结论

(1) 南黄海地区与下扬子陆域孤峰组均具有硅质岩和硅质泥岩不等厚互层的特征, 且南黄海地区孤峰组硅质岩的石英含量更高, 在平面上呈 SWW-NEE 向分布于青岛断褶带南部, 是一套很好的高过成熟 II_2 型烃源岩。

(2) 南黄海地区 CSDP-2 井孤峰组硅质烃源岩与下扬子陆域 HX 井硅质岩、秘鲁上升流沉积物均表现出 Ca、Si、P、Mg、Cr、U、V、Mo、Cd、Cu、Zn、Ni 相对富集, K、Ti、Mn 相对亏损, $Co \times Mn < 0.4$, $Cd/Mo > 0.1$, 结合 Al-Fe-Mn 三角图等图版可以判断 CSDP-2 井孤峰组硅质岩为大陆边缘上升流成因。

(3) 南黄海地区 CSDP-2 井和下扬子陆域 HX 井孤峰组硅质烃源岩的 Mo_{EF}/U_{EF} 为 1~3 倍海水值, 且 Cu_{xs} 与 TOC 呈明显正相关、Zr/Rb 与 TOC 呈负相关、U/Th 与 TOC 无明显相关性, 说明 CSDP-2 井

孤峰组硅质烃源岩形成于缺氧-静水硫化环境, 其有机质富集受生产力主控, 但也受水动力条件影响。

(4) 南黄海地区 CSDP-2 井和下扬子陆域 HX 井孤峰组硅质岩的陆源碎屑输入和 $Co \times Mn$ 低于硅质泥岩, 而 Zr/Rb 值高于硅质泥岩。结合 HX 井硅质岩较低的 CIA 值, 推测认为气候变化是造成孤峰组上升流活动强度变化和硅-泥韵律性沉积的主要原因。

参考文献 (References)

- [1] 谈昕, 邱振, 卢斌, 等. 华南地区不同时代硅质岩地球化学特征及地质意义[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 7-19. [TAN Xin, QIU Zhen, LU Bin, et al. Geochemical characteristics for siliceous rocks of different ages in south china and their geological significance [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 7-19.]
- [2] 姚旭, 周瑶琪, 李素, 等. 硅质岩与二叠纪硅质沉积事件研究现状及进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(11): 1189-1200. [YAO Xu, ZHOU Yaoqi, LI Su, et al. Research status and advances in chert and Permian chert event [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(11): 1189-1200.]

- [3] Murchey B L, Jones D L. A mid-Permian chert event: widespread deposition of biogenic siliceous sediments in coastal, island arc and oceanic basins [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1992, 96(1-2): 161-174.
- [4] 程成, 李双应, 赵大千, 等. 扬子地台北缘中上二叠统层状硅质岩的地球化学特征及其对古地理、古海洋演化的响应[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(1): 155-166. [CHENG Cheng, LI Shuangying, ZHAO Daqian, et al. Geochemical characteristics of the middle-upper Permian bedded cherts in the northern margin of the Yangtze block and its response to the evolution of paleogeography and Paleoocean [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 155-166.]
- [5] 吴勘, 马强分, 冯庆来. 扬子板块北缘孤峰组地层划分及空间分布特征[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(1): 33-39. [WU Kan, MA Qiangfen, FENG Qinglai. Stratigraphic division and spatial distribution of the Middle Permian KuhFeng Formation in the Northern Yangtze Block [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2015, 39(1): 33-39.]
- [6] 杨玉卿, 冯增昭. 华南下二叠统层状硅岩的形成及意义[J]. *岩石学报*, 1997, 13(1): 112-120. [YANG Yuqing, FENG Zengzhao. Formation and Significance of the Bedded Siliceous Rocks of the Lower Permian in South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(1): 112-120.]
- [7] 夏邦栋, 钟立荣, 方中, 等. 下扬子区早二叠世孤峰组层状硅质岩成因[J]. *地质学报*, 1995, 69(2): 125-137. [XIA Bangdong, ZHONG Lirong, FANG Zhong, et al. The origin of cherts of the Early Permian Gufeng Formation in the Lower Yangtze Area, Eastern China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1995, 69(2): 125-137.]
- [8] 加娜提古丽·吾斯曼, 周瑶琪, 姚旭, 等. 安徽省巢湖地区二叠纪栖霞组、孤峰组硅质岩地球化学特征对比及大地构造背景分析[J]. *现代地质*, 2017, 31(4): 734-745. [JIANATIGULI W, ZHOU Yaoqi, YAO Xu, et al. Geochemical characteristics comparison and tectonic background analysis of siliceous rocks from Qixia Formation and Gufeng Formation of Permian in Chaohu Area, Anhui Province [J]. *Geoscience*, 2017, 31(4): 734-745.]
- [9] 韩宗珠, 肖楠, 李安龙, 等. 安徽巢湖下二叠统孤峰组硅质岩沉积地球化学特征与沉积环境分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(4): 78-85, 99. [HAN Zongzhu, XIAO Nan, LI Anlong, et al. Geochemistry and sedimentary environments analysis of siliceous rocks from the Gufeng Formation of Lower Permian in Chaohu Region, Anhui Province [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2014, 44(4): 78-85, 99.]
- [10] 李红敬, 林正良, 解习农. 下扬子地区古生界硅质岩地球化学特征及成因[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(5): 232-239. [LI Hongjing, LIN Zhengliang, XIE Xinong. Geochemical characteristics and origin of Palaeozoic siliceous rocks in Lower Yangtze area [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(5): 232-239.]
- [11] 吕炳全, 瞿建忠. 下扬子地区早二叠世海进和上升流形成的缺氧环境的沉积[J]. *科学通报*, 1990, 35(14): 1193-1198. [LV Bingquan, QU Jianzhong. Sedimentation of anoxic environments under transgression and upwelling process in Early Permian in Lower Yangtze area [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(14): 1193-1198.]
- [12] 鄢菲, 胡望水, 吕炳全, 等. 下扬子中二叠统上升流相与烃源岩的关系研究[J]. *海洋石油*, 2008, 28(2): 62-67. [YAN Fei, HU Wangshui, LV Bingquan, et al. Relationship between middle Permian upwelling facies and hydrocarbon in lower Yangtze area [J]. *Offshore Oil*, 2008, 28(2): 62-67.]
- [13] Kametaka M, Takebe M, Nagai H, et al. Sedimentary environments of the Middle Permian phosphorite-chert complex from the northeastern Yangtze platform, China; the Gufeng Formation: a continental shelf radiolarian chert [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 174(3-4): 197-222.
- [14] Zhang B L, Yao S P, Wignall P, et al. Widespread coastal upwelling along the Eastern Paleo-Tethys Margin (South China) during the Middle Permian (Guadalupian): Implications for organic matter accumulation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 97: 113-126.
- [15] 姚旭. 东古特提斯洋大陆边缘二叠纪硅质岩成因研究[D]. 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2016. [YAO Xu. Research on origin of Permian cherts from continental marginal sea of eastern Paleo-Tethys ocean [D]. Doctor Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2016.]
- [16] 赵振洋, 李双建, 王根厚. 中下扬子北缘中二叠统孤峰组层状硅质岩沉积环境、成因及硅质来源探讨[J]. *地球科学进展*, 2020, 35(2): 137-153. [ZHAO Zhenyang, LI Shuangjian, WANG Genhou. Discussion on sedimentary environments, origin and source of Middle Permian Gufeng Formation bedded cherts in the northern margin of the Middle-Lower Yangtze area [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(2): 137-153.]
- [17] Shi L, Feng Q L, Shen J, et al. Proliferation of shallow-water radiolarians coinciding with enhanced oceanic productivity in reducing conditions during the Middle Permian, South China: evidence from the Gufeng Formation of western Hubei Province [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 444: 1-14.
- [18] Yao X, Zhou Y Q, Hinnov L A. Astronomical forcing of a Middle Permian chert sequence in Chaohu, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 206-221.
- [19] Ito T, Takahashi K, Matsuoka A, et al. The Guadalupian (Permian) Gufeng formation on the north margin of the South China block: a review of the Lithostratigraphy, Radiolarian biostratigraphy, and geochemical characteristics [J]. *Paleontological Research*, 2019, 23(4): 261-280.
- [20] 吕炳全, 王红罡, 胡望水, 等. 扬子地块东南古生代上升流沉积相及其与烃源岩的关系[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(4): 29-35. [LV Bingquan, WANG Honggang, HU Wangshui, et al. Relationship between Paleozoic upwelling Facies and hydrocarbon in Southeastern Marginal Yangtze Block [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(4): 29-35.]
- [21] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地质前缘*, 2005, 12(3): 39-48. [ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, BIAN Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 39-48.]
- [22] 王汝建, 沈高平, SASHIDA K. 苏皖地区孤峰组放射虫动物群及其古环境意义[J]. *同济大学学报*, 1997, 25(5): 559-564. [WANG Rujian, SHEN Gaoping, SASHIDA K. Studies on radiolarian fauna from Gufeng formation in Anhui and Jiangsu provinces, East China and its paleoenvironmental significance [J]. *Journal of Tongji Uni-*

- versity, 1997, 25 (5): 559-564.]
- [23] 张尚锋, 许光彩, 朱锐, 等. 上升流沉积的研究现状和发展趋势[J]. *石油天然气学报*, 2012, 34 (1): 7-11,30. [ZHANG Shangfeng, XU Guangcai, ZHU Rui, et al. Research status and development tendency of upwelling sediments [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2012, 34 (1): 7-11,30.]
- [24] 翟刚毅, 王玉芳, 刘国恒, 等. 中国二叠系海陆交互相页岩气富集成藏特征及前景分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40 (3): 102-117. [ZHAI Gangyi, WANG Yufang, LIU Guoheng, et al. Enrichment and accumulation characteristics and prospect analysis of the Permian marine continental multiphase shale gas in China [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40 (3): 102-117.]
- [25] 廖圣兵, 石刚, 李建青, 等. 安徽望江地区WWD1井钻遇二叠系孤峰组页岩气[J]. *中国地质*, 2021, 48 (5): 1657-1658. [LIAO Shengbing, SHI Gang, LI Jianqing, et al. Shale gas drilled by well WWD1 in the Wangjiang area of Anhui Province [J]. *Geology in China*, 2021, 48 (5): 1657-1658.]
- [26] 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.]
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 叶舟, 马力, 梁兴, 等. 下扬子独立地块与中生代改造型残留盆地[J]. *地质科学*, 2006, 41 (1): 81-101. [YE Zhou, MA Li, LIANG Xing, et al. The independent Lower Yangtze block and Mesozoic reformed residual basins [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41 (1): 81-101.]
- [30] 蔡乾忠. 中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15 (1): 7-24. [CAI Qianzhong. Corresponding division of geotectonic units of eastern China and Korea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15 (1): 7-24.]
- [31] 吴根耀, 陈焕疆, 马力, 等. 苏皖地块: 特提斯演化阶段独立的构造单元[J]. *古地理学报*, 2002, 4 (2): 77-87. [WU Genyao, CHEN Huanjiang, MA Li, et al. Su-Wan block: an independent tectonic unit during period of Tethyan evolution [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4 (2): 77-87.]
- [32] 陈建文, 张银国, 欧光习, 等. 南黄海古生界油气多期成藏的包体证据[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34 (2): 69-70. [CHEN Jianwen, ZHANG Yinguo, OU Guangxi, et al. Inclusion evidence of multi-stage hydrocarbon accumulation in the Paleozoic of South Yellow Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34 (2): 69-70.]
- [33] 高顺莉, 谭思哲, 陈春峰, 等. 下扬子-南黄海二叠纪岩相古地理特征及油气勘探启示[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37 (4): 53-60. [GAO Shunli, TAN Sizhe, CHEN Chunfeng, et al. Permian Lithofacies paleogeography of the South Yellow Sea area, Lower Yangtze plate and its implications for petroleum exploration [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37 (4): 53-60.]
- [34] 郭念发, 赵红格, 陈红, 等. 下扬子地区海相地层油气赋存条件分析及选区评价[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2002, 32 (5): 526-530. [GUO Nianfa, ZHAO Hongge, CHEN Hong, et al. Oil-gas occurrence conditions and evaluation of chosen belts of the marine strata in Yangtze Area [J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2002, 32 (5): 526-530.]
- [35] 顾忠安, 郑荣才, 黄建良, 等. 苏皖地区二叠系页岩气成藏地质条件[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2014, 41 (3): 274-282. [GU Zhong'an, ZHENG Rongcai, HUANG Jianliang, et al. Geological conditions of Permian shale gas accumulation in Jiangsu-Anhui of China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2014, 41 (3): 274-282.]
- [36] 金之钧, 刘光祥, 方成名, 等. 下扬子区海相油气勘探选区评价研究[J]. *石油实验地质*, 2013, 35 (5): 473-479,486. [JIN Zhijun, LIU Guangxiang, FANG Chengming, et al. Evaluation of selected areas for petroleum exploration in marine strata of Lower Yangtze region [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35 (5): 473-479,486.]
- [37] 冯增昭, 杨玉卿, 金振奎, 等. 中国南方二叠纪岩相古地理[J]. *沉积学报*, 1996, 14 (2): 1-11. [FENG Zengzhao, YANG Yuqing, JIN Zhenkui, et al. Lithofacies paleogeography of the Permian of South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14 (2): 1-11.]
- [38] 朱光, 徐嘉炜, 刘国生, 等. 下扬子地区前陆变形构造格局及其动力学机制[J]. *中国区域地质*, 1999, 18 (1): 73-79. [ZHU Guang, XU Jiawei, LIU Guosheng, et al. Tectonic pattern and dynamic mechanism of the foreland deformation in the Lower Yangtze Region [J]. *Regional Geology of China*, 1999, 18 (1): 73-79.]
- [39] 郭彤楼. 下扬子地区中古生界叠加改造特征与多源多期成藏[J]. *石油实验地质*, 2004, 26 (4): 319-323. [GUO Tonglou. Superimposition and modification of the Mesozoic and Paleozoic Basins and multi-stages of hydrocarbon accumulation with multiple source rocks in Lower Yangtze area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26 (4): 319-323.]
- [40] 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等. 南黄海古生代以来构造演化[J]. *石油实验地质*, 2005, 27 (2): 124-128. [YAO Yongjian, XIA Bin, FENG Zhiqiang, et al. Tectonic evolution of the South Yellow Sea since the Paleozoic [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27 (2): 124-128.]
- [41] 罗志立, 金以钟, 朱夔玉, 等. 试论上扬子地台的峨眉地裂运动[J]. *地质论评*, 1988, 34 (1): 11-24. [LUO Zhili, JIN Yizhong, ZHU Kuiyu, et al. On Emei taphrogenesis of the Upper Yangtze platform [J]. *Geological Review*, 1988, 34 (1): 11-24.]
- [42] 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 in the Jingxian-Nanling region of Anhui [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34 (4): 431-444.]
- [43] 朱文博, 张训华, 周道容, 等. 下扬子地区二叠系海相页岩孔隙特征新认识及页岩气勘探启示[J]. *天然气工业*, 2021, 41 (7): 41-55. [ZHU Wenbo, ZHANG Xunhua, ZHOU Daorong, et al. New cognition on pore structure characteristics of Permian marine shale in the

- Lower Yangtze Region and its implications for shale gas exploration [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41 (7): 41-55.]
- [44] 胡世忠. 对孤峰组的新认识[J]. 火山地质与矿产, 2000, 21 (1): 63-68. [HU Shizhong. New consideration of Gufeng Formation by stratigraphy check up [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2000, 21 (1): 63-68.]
- [45] 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 the Lower Yangtze Region, Southeastern China[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2016.]
- [46] 庞玉茂. 基于CSDP-2井的南黄海中部隆起构造热演化史研究[D]. 中国科学院大学博士学位论文, 2017. [PANG Yumao. Tectonic thermal evolution history of the central uplift of the South Yellow Sea Basin from CSDP-2 drilling well[D]. Doctor Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [47] 顾忠安. 苏皖地区二叠系页岩气成藏地质条件分析[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2014. [GU Zhong'an. Geological conditions of Permian shale gas accumulation in Jiangsu-Anhui area[D]. Master Dissertation of Chengdu University of Technology, 2014.]
- [48] 祁江豪, 温珍河, 张训华, 等. 南黄海地区与上扬子地区海相中—古生界岩性地层对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33 (1): 109-119. [QI Jianghao, WEN Zhenhe, ZHANG Xunhua, et al. Lithostratigraphic correlation of Mesozoic and Palaeozoic Marine strata between South Yellow Sea and Upper Yangtze region [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33 (1): 109-119.]
- [49] 付小东, 陈娅娜, 罗冰, 等. 四川盆地北部中二叠统茅口组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义[J]. 地质学报, 2021, 95 (6): 1903-1920. [FU Xiaodong, CHEN Ya'na, LUO Bing, et al. Characteristics and petroleum geological significance of the high-quality source rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the northern Sichuan basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95 (6): 1903-1920.]
- [50] 马永生, 陈洪德, 王国力, 等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [MA Yongsheng, CHEN Hongde, WANG Guoli, et al. Sequence stratigraphy and paleogeography of Southern China[M]. Beijing: Science Press, 2009.]
- [51] 白卢恒, 石万忠, 张晓明, 等. 下扬子皖南宣泾地区二叠系海相页岩特征及其沉积环境[J]. 地球科学, 2021, 46 (6): 2204-2217. [BAI Luheng, SHI Wanzhong, ZHANG Xiaoming, et al. Characteristics of Permian marine shale and its sedimentary environment in Xuanjing Area, South Anhui province, Lower Yangtze area [J]. *Earth Science*, 2021, 46 (6): 2204-2217.]
- [52] 邱振, 王清晨. 湘黔桂地区中上二叠统硅质岩的地球化学特征及沉积背景[J]. 岩石学报, 2010, 26 (12): 3612-3628. [QIU Zhen, WANG Qingchen. Geochemistry and sedimentary background of the Middle-Upper Permian cherts in the Xiang-Qian-Gui region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26 (12): 3612-3628.]
- [53] 姚素平, 吴聿元, 余文端, 等. 下扬子区孤峰组—大隆组露头剖面特征与岩相变化[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12 (1): 215-232,245. [YAO Suping, WU Yuyuan, YU Wenduan, et al. Outcrop characteristic and lithofacies changes of both Gufeng and Dalong Formations in Lower Yangtze Region [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12 (1): 215-232,245.]
- [54] 袁飞. 下扬子巢湖-宣城地区二叠系泥页岩储层特征研究[D]. 长江大学硕士学位论文, 2018. [YUAN Fei. Study on the characteristics of Permian shale reservoir in the lower Yangtze Chaohu-Xuancheng area[D]. Master Dissertation of Yangtze University, 2018.]
- [55] 曹涛涛, 宋之光, 罗厚勇, 等. 下扬子地区二叠系海陆过渡相页岩孔隙体系特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27 (7): 1332-1345. [CAO Taotao, SONG Zhiguang, LUO Houyong, et al. Pore system characteristics of Permian transitional shale reservoir in the Lower Yangtze region, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27 (7): 1332-1345.]
- [56] 梁峰. 中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气富集模式及有利区优选评价[D]. 中国矿业大学(北京)博士学位论文, 2018. [LIANG Feng. The research on shale gas enrichment pattern and the favorable area optimizing of Wufeng-Longmaxi shale in middle and upper Yangtze Region[D]. Doctor Dissertation of China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.]
- [57] 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.]
- [58] 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. [FU Ning, LIU Yingli, XIONG Binhui, et al. An Analysis of abnormal geochemical parameters of Palaeozoic source rocks in CZ35-2-1 well, the Southern Yellow Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17 (2): 93-98.]
- [59] 赵青芳, 王建强, 陈建文, 等. 下扬子区海相古生界高成熟烃源岩评价指标的优选[J]. 地质通报, 2021, 40 (2-3): 330-340. [ZHAO Qingfang, WANG Jianqiang, CHEN Jianwen, et al. Optimization of evaluation index of Paleozoic high mature marine source rock in the Lower Yangtze region [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40 (2-3): 330-340.]
- [60] 白帆. 下扬子西部地区中二叠统孤峰组气源岩发育特征及控制因素[J]. 石油实验地质, 2021, 43 (3): 468-475. [BAI Fan. Characteristics and controlling factors of natural gas source rocks of Middle Permian Gufeng Formation in western part of Lower Yangtze Platform, China [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43 (3): 468-475.]
- [61] 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(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13 (2): 1-16. [LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, Southern China (Part 1): distribution of four suits of regional marine source rocks [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2008, 13 (2): 1-16.]
- [62] Boström K, Kraemer T, Gartner S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments [J]. *Chemical Geology*, 1973, 11 (2): 123-148.
- [63] Murray R W, Ten Brink M R B, Gerlach D C, et al. Rare earth, major,

- and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(7): 1875-1895.
- [64] Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3-4): 213-232.
- [65] 肖斌, 刘树根, 冉波, 等. 基于元素Mn、Co、Cd、Mo的海相沉积岩有机质富集因素判别指标在四川盆地北缘的应用[J]. *地质论评*, 2019, 65(6): 1316-1330. [XIAO Bin, LIU Shugen, RAN Bo, et al. Identification of organic matter enrichment factors in marine sedimentary rocks based on elements Mn, Co, Cd and Mo: application in the northern margin of Sichuan Basin, South China [J]. *Geological Review*, 2019, 65(6): 1316-1330.]
- [66] Algeo T J, Tribouillard N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation [J]. *Chemical Geology*, 2009, 268(3-4): 211-225.
- [67] Algeo T, Lyons T. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions [J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(1): PA1016.
- [68] Scott C, Lyons T. Contrasting molybdenum cycling and isotopic properties in euxinic versus non-euxinic sediments and sedimentary rocks: Refining the paleoproxies [J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 19-27.
- [69] Paulmier A, Ruiz-Pino D. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean [J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 80(3-4): 113-128.
- [70] Tribouillard N, Algeo T J, Baudin F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography [J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 46-58.
- [71] McLennan S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2001, 2(4): 1021.
- [72] 牟传龙, 葛祥英, 余谦, 等. 川西南地区五峰—龙马溪组黑色页岩古气候及物源特征: 来自新地2井地球化学记录[J]. *古地理学报*, 2019, 21(5): 835-854. [MOU Chuanlong, GE Xiangying, YU Qian, et al. Palaeoclimatology and provenance of black shales from Wufeng-Longmaxi Formations in southwestern Sichuan Province: From geochemical records of Well Xindi-2 [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(5): 835-854.]
- [73] Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. *Sedimentary Geology*, 1986, 47(1-2): 125-148.
- [74] Dean W E, Leinen M, Stow D A V. Classification of deep-sea, fine-grained sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1985, 55(2): 250-256.
- [75] 朱如凯, 李梦莹, 杨静儒, 等. 细粒沉积学研究进展与发展方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 251-264. [ZHU Rukai, LI Mengying, YANG Jingru, et al. Advances and trends of fine-grained sedimentology [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 251-264.]
- [76] Böning P, Brumsack H J, Böttcher M E, et al. Geochemistry of Peruvian near-surface sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(21): 4429-4451.
- [77] Zhang B L, Wignall P, Yao S P, et al. Collapsed upwelling and intensified euxinia in response to climate warming during the Capitanian (Middle Permian) mass extinction [J]. *Gondwana Research*, 2021, 89: 31-46.
- [78] Sweere T, Van Den Boorn S, Dickson A J, et al. Definition of new trace-metal proxies for the controls on organic matter enrichment in marine sediments based on Mn, Co, Mo and Cd concentration [J]. *Chemical Geology*, 2016, 441: 235-245.
- [79] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [80] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [81] 赵占仑, 温小浩, 汤连生, 等. 化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 343-353. [ZHAO Zhanlun, WEN Xiaohao, TANG Liansheng, et al. Applicability of chemical alteration index to indication of paleoclimate change by different sedimentary facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(2): 343-353.]
- [82] 颜佳新, 赵坤. 二叠-三叠纪东特提斯地区古地理、古气候和、古海洋演化与地球表层多圈层事件耦合[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 44(11): 968-978. [YAN Jiaxin, ZHAO Kun. Permo-Triassic paleogeographic, paleoclimatic and paleoceanographic evolutions in eastern Tethys and their coupling [J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2001, 44(11): 968-978.]
- [83] Zhang B L, Yao S P, Hu W X, et al. Development of a high-productivity and anoxic-euxinic condition during the late Guadalupian in the Lower Yangtze region: Implications for the mid-Capitanian extinction event [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 531: 108630.
- [84] Jones B, Manning D. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [85] 秦建中, 腾格尔, 付小东. 海相优质烃源层评价与形成条件研究[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(4): 366-372, 378. [QIN Jianzhong, TENGGER, FU Xiaodong. Study of forming condition on marine excellent source rocks and its evaluation [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2009, 31(4): 366-372, 378.]
- [86] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 海相地层无机参数与烃源岩发育环境的相关研究: 以鄂尔多斯盆地为例[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(4): 411-421. [TENGGER, LIU Wenhui, XU Yongchang, et al. Study on relation between inorganic parameters in marine deposits and developmental environment of hydrocarbon source rocks: taking Ordos basin as an example [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(4): 411-421.]
- [87] 刘喜停, 颜佳新, 薛武强, 等. 华南中二叠统栖霞组海相烃源岩形成

- 的地球生物学过程[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 57(5): 957-964. [LIU Xiting, YAN Jiabin, XUE Wuqiang, et al. The geobiological formation process of the marine source rocks in the Middle Permian Chihhsia Formation of South China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(5): 957-964.]
- [88] 朱伟林, 陈春峰, 张伯成, 等. 南黄海古生代盆地原型演变与烃源岩发育特征[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 728-741. [ZHU Weilin, CHEN Chunfeng, ZHANG Bocheng, et al. Paleozoic basin prototype evolution and source rock development in the South Yellow Sea [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 728-741.]
- [89] 陈建文, 龚建明, 李刚, 等. 南黄海海相中-古生界油气资源潜力巨大[J]. *海洋地质前言*, 2016, 32(1): 1-7. [CHEN Jianwen, GONG Jianming, LI Gang, et al. Great Resources potential of the Marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(1): 1-7.]
- [90] 陈建文, 梁杰, 张银国, 等. 中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 1-29. [CHEN Jianwen, LIANG Jie, ZHANG Yinguo, et al. Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 1-29.]
- [91] 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探方向[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 1-25. [CHEN Jianwen, YANG Changqing, ZHANG Li, et al. Distribution of Pre-Cenozoic strata and petroleum prospecting directions in China Seas [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 1-25.]