

薛路, 陈建文, 吴飘, 等. 下扬子巢湖地区鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩地球化学特征及其地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(5): 12-22.

XUE Lu, CHEN Jianwen, WU Piao, et al. Geochemical characteristics and geological significance of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1 in Chaohu area, Lower Yangtze region[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(5): 12-22.

# 下扬子巢湖地区鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩地球化学特征及其地质意义

薛路<sup>1,2</sup>, 陈建文<sup>1,2,3,4\*</sup>, 吴飘<sup>2,3</sup>, 张鹏辉<sup>1</sup>, 王拔秀<sup>1</sup>

(1 河海大学海洋学院, 南京 210098; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237; 3 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237; 4 山东科技大学, 青岛 266590)

**摘要:**下扬子巢湖地区鼓地 1 井揭示了上奥陶统五峰组(WF2-3 带)和下志留统高家边组下段(LM2 带和 LM5-6 带)页岩。基于该套地层的页岩岩心样品的元素地球化学测试分析, 对其沉积构造背景、物源区背景、古气候、古生产力、海水深度和盐度、氧化还原条件进行了研究。结果表明, 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩主量元素、微量元素以及稀土元素纵向分布不均匀, LM2 带与 WF2-3 带和 LM5-6 带相比明显异常。沉积时期的构造环境主要为活动大陆边缘, 同时兼具大陆岛弧的特征。物源具有长英质物源和成熟大陆石英物源混合物源的特征。WF2-3 带和 LM5-6 带为浅水环境, 底层海水含氧高, 气候温暖湿润, 古生产力较低, 海水较浅且盐度较低; LM2 带为深水环境, 海水盐度高、滞留程度较弱, 底层海水缺氧, 气候干燥炎热, 古生物生产力较强。

**关键词:**下扬子巢湖地区; 鼓地 1 井; 五峰组-高家边组; 沉积背景; 沉积环境

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.325

## 0 引言

扬子区域古生代海相地层一直是油气勘探的重点层位, 上扬子四川盆地取得了对上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气勘探的突破<sup>[1-2]</sup>, 目前已建成威远、长宁、焦石坝 3 个大型页岩气田以及富顺-永川、彭水页岩气产气区等多个重要的页

岩气田或产气区<sup>[3]</sup>。下扬子区与上扬子区同属于扬子板块且具有相似的古地理背景, 古生代海相地层具备较好的油气地质条件<sup>[4]</sup>, 近年来受到越来越多研究人员的关注。前人通过下扬子区的浅钻及典型露头剖面, 对五峰组-高家边组开展了大量工作, 在笔石生物地层划分<sup>[5]</sup>、有机质富集模式<sup>[6-7]</sup>、物源区特征和沉积构造背景<sup>[8]</sup>、古海洋环境<sup>[6]</sup>以及沉积盆地的演化<sup>[9]</sup>等方面已取得了一些重要的认识。徐文礼等<sup>[8]</sup>认为下扬子古生代黑色页岩的物源来自南侧的江南造山带, 其构造环境为大陆岛弧和活动大陆边缘, 兼具被动大陆边缘特征; 孟楚洁等<sup>[6]</sup>指出, 五峰组-高家边组黑色页岩为深水缺氧的沉积环境, 黑色页岩的形成受到了上升流、热液以及海平面上升等多方面因素影响; 黄正清等<sup>[7]</sup>认为, 五峰组-高家边组沉积时期由于江南古陆的隆升, 水体以滞留环境为主。

前人研究表明, 主、微量以及稀土元素能够较好地指示页岩的沉积背景、母岩性质, 恢复其沉积

收稿日期: 2021-12-26

资助项目: 中国地质调查局海洋地质调查项目(DD20190818, DD20160152); 国家自然科学基金面上项目(42076220); 国家自然科学基金青年项目(42102188); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020MD071); 山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2021QD095); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室“十四五”重大科技项目课题(2021QNLM020001-01, 2021QNLM020001-04)

作者简介: 薛路(1995—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质方面的研究工作。E-mail: x19595@163.com

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

时期的古环境。下扬子区五峰组-高家边组具备较好的油气潜力<sup>[10]</sup>,但由于钻遇该套地层的探井很少,且地层受构造改造较为强烈,目前对该套地层的沉积环境认识仍较为局限,特别是在巢湖地区。鼓地 1 井较为完整地揭示了五峰组-高家边组下段地层,基于该井钻井资料和岩石元素地球化学测试数据,本文系统分析了岩芯样品主、微量元素和稀土元素的分异特征,研究在不同沉积时期元素对沉积环境的对应关系,利用元素对沉积环境变化的响应来恢复沉积环境,旨在加强对该套地层沉积特征的认识,以期对下扬子区五峰组-高家边组页岩气的勘探工作提供一定的参考作用。

## 1 地质背景

下扬子地区位于扬子板块东部,西部以郟庐断

裂带与华北板块为界,南部以江山-绍兴断裂与华南板块相隔,北部以五莲-荣成断裂为边界<sup>[10-11]</sup>,向东延伸至南黄海。其早古生代盆地大致经历了加里东期、海西-印支期和喜马拉雅期三期构造演化,属于克拉通基底上经过多期改造的大型叠合盆地<sup>[10,12]</sup>。该区可分为苏皖构造带和江南隆起带 2 个大的构造单元(图 1a):前者包括涂全拗陷、沿江拗陷 2 个一级构造单元;后者包括江南隆起和钱塘拗陷 2 个一级构造单元<sup>[13]</sup>。自晋宁运动基底固结以来,下扬子区进入了稳定沉积阶带,其早古生代大致呈现南、北两侧拗陷盆地和中部沉积台地的“两盆一台”沉积构造格局,两侧盆地内主要发育了黑色泥岩、硅质岩以及深色碳酸岩沉积,中央台地主要为碳酸岩沉积<sup>[8]</sup>。下扬子早古生代地层发育齐全,从寒武系一志留系均有出露。

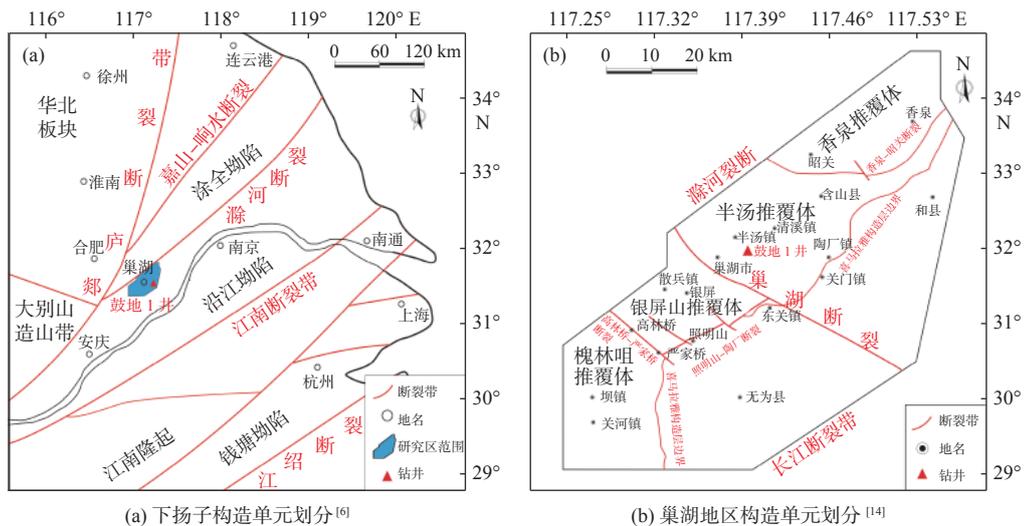


图 1 研究区位置及构造单元划分

Fig.1 Location of the study area and division of tectonic units

巢湖地区位于下扬子西北缘,其西北以滁河断裂带为界,东南以长江断裂带为界,构造分区属于下扬子沿江拗陷<sup>[5]</sup>,区内从北到南可划分为香泉推覆体、半汤推覆体、银屏山推覆体和槐林咀推覆体 4 个五级构造单元<sup>[14]</sup>(图 1b)。区内从寒武系一志留系地层有不同程度出露:寒武系以白云岩为主,主要分布于半汤;奥陶系地层出露较少,发育不全,以仑山组较发育为特征,岩性主要为灰岩和硅质泥岩;志留系底部高家边组以泥岩和粉砂质泥岩为主,中、上部分头组和茅山组主要为细砂岩和粉砂岩。上奥陶统五峰组一下志留统高家边组为本次研究对象。五峰组岩性主要为灰黑色、黑色泥岩、硅质岩

和炭质泥岩<sup>[15]</sup>,生物地层上从底到顶可划分为 WF1-WF4 共 4 个笔石生物带;下志留统高家边组下段岩性主要以黑色、灰黑色页岩为主,发育锯笔石、栅笔石等丰富的笔石动物群,局部有海百合,中、上部为灰色粉砂质泥岩、页岩和薄-中层泥质粉砂岩、细砂岩,生物地层上可划分为 LM1-LM9 共 9 个笔石生物带<sup>[16]</sup>。

## 2 鼓地 1 井地质概况

鼓地 1 井位于下扬子安徽省巢湖市东部鼓山脚下,构造上处于下扬子板块沿江拗陷半汤逆冲推

覆构造带上,是典型的向斜成山的代表<sup>[5]</sup>。该井开口层位为志留系高家边组,终孔层位为寒武系冷泉玉组,完钻井深 1 980 m。该井自上而下分别钻遇志留系高家边组泥岩、粉砂质泥岩,奥陶系灰岩以及寒武系白云岩、硅质岩。该井较好地揭示了下扬子下古生界地层,为研究该区海相下构造层地层序列提供了实物资料。

鼓地 1 井五峰组底界位于井深 1 237.8 m 处,下部为奥陶系汤头组瘤状灰岩;高家边组底界位于 1 226.2 m 处。研究带有地层缺失现象,五峰组见 WF2-3 带地层,缺失 WF1 和 WF4 带地层;高家边组见 LM2 带和 LM5-6 带地层,缺失 LM1 带和 LM3-4 带地层<sup>[5]</sup>(表 1)。五峰组-高家边组下段地层受构造改造严重,岩芯多处发育破碎带,见镜面构造,挤压揉皱现象明显,裂缝中石英充填。五峰组下段岩性主要为深灰色、灰色泥岩和黑色硅质页岩,以块状构造为主,局部见水平波状层理,含笔石化石。高家边组底部 LM2 带为黑色炭质泥岩,笔石化石含量高;LM5 带底部为黑灰色泥岩,夹带少量粉砂质纹层,见水平、波状层理;LM5 带中上部一直到 LM6 带,泥岩中的砂质含量逐渐增多,颜色逐渐变为灰黑色、深灰色,笔石含量较少(图 2)。

表 1 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段与下扬子区地层对比<sup>[5]</sup>

Table 1 Stratigraphic correlation between the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation and Lower Yangtze region of Well Gudi 1<sup>[5]</sup>

下扬子地层		鼓地 1 井
阶	笔石带	井深/m
埃隆阶	LM8	/
	LM7	/
	LM6	1 175.5
鲁丹阶	LM5	1 224.5
	LM4	缺失
	LM3	缺失
	LM3	1 226.2
赫南特阶	LM1	缺失
	WF4	缺失
凯迪阶	WF3	1 237.8
	WF2	1 237.8
	WF1	缺失

### 3 样品采集及分析测试

本次研究测试样品均取自鼓地 1 井五峰组-高

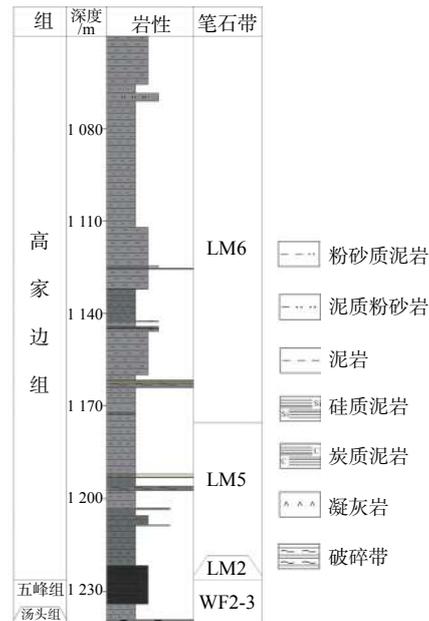


图 2 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段地层特征<sup>[5]</sup>

Fig.2 Stratigraphic characteristics in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1<sup>[5]</sup>

家边组下段页岩岩芯,共取得 10 件样品,进行了常量元素、微量元素以及稀土元素测定。测试前先使用粗碎机将新鲜的块状岩石样品碎成小块,挑选出新鲜的、无风化面和细脉的样品,对样品进行清洗、烘干,然后使用球式玛瑙研磨机将样品碎至 200 目。主量元素测定使用玻璃熔融法,将样品与助融剂混合后高温熔化,再冷却为玻璃熔片,放入 PW2404 X-射线荧光光谱仪测定主量元素含量。微量元素以及稀土元素含量测定使用酸溶法将样品粉末溶解 48 h 后蒸干除硅,再用 2% HNO<sub>3</sub> 稀释 2 000 倍后,放入 ELEMENT XR 型高分辨电感耦合等离子体质谱仪上进行测定。测试标准分别依据国家标准 GB/T 14506.14—2010、GB/T14506.28—2010 和 GB/T14506.30—2010。本次实验测试均在北京核工业地质研究院完成。实验测试结果如表 2、3 和 4 所示。

## 4 元素地球化学特征

### 4.1 主量元素特征

鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩样品中主量元素含量最多的为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 平均含量之和占总量 84.31%。SiO<sub>2</sub> 含量最高,在 55.19%~63.67% 之间,平均含量为 60.43%;其次为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,含量在 9.84%~19.62% 之间,平均含量为 17.42%;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 4.9%~7.16%,平均含量为 6.47%。MgO、

表 2 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段主量元素测试结果

Table 2 Test results of major elements in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

样品编号	深度/m	主量元素含量/%									
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
GD-1	1 063	61.15	17.79	6.62	2.69	0.36	1.39	4.11	0.05	0.791	0.138
GD-2	1 100	59.9	18.56	6.75	2.78	0.28	1.22	4.51	0.05	0.809	0.133
GD-3	1 135	60.51	18.02	6.82	2.71	0.31	1.16	4.34	0.05	0.796	0.135
GD-4	1 162	60.48	18.42	6.6	2.65	0.31	1.15	4.51	0.04	0.815	0.136
GD-5	1 165.7	58.72	19.62	6.54	2.9	0.36	0.963	4.47	0.03	0.842	0.129
GD-6	1 185	60.76	17.75	6.55	2.51	0.30	1.15	4.42	0.05	0.789	0.135
GD-7	1 205	61.5	17.63	5.59	2.13	0.29	1.03	4.81	0.05	0.762	0.131
GD-8	1 215	63.67	15.81	4.9	1.64	0.29	1.15	4.4	0.02	0.692	0.102
GD-9	1 225.5	55.19	9.84	6.69	3.89	6.32	0.396	2.65	0.15	0.433	0.074
GD-10	1 235	60.32	16.88	5.57	2.63	0.52	0.781	5.11	0.04	0.695	0.077

表 3 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段微量元素测试结果

Table 3 Test results of trace elements in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

样品编号	深度/m	微量元素含量/(μg/g)												
		Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Mo	Sr	Ba	Th	U	Zr	Hf
GD-1	1 063	17.3	83.4	89.8	17.2	44.4	71.5	0.302	69.9	708	22.6	3.96	114	3.71
GD-2	1 100	18.1	98.8	85.4	17	43.4	64.7	0.301	69.8	818	23.9	4.15	111	3.72
GD-3	1 135	17.4	89.4	85	18	50.8	83.5	0.339	73.2	949	23.3	4.13	129	4.06
GD-4	1 162	17.1	105	85.7	18	46	66.7	0.518	76	880	22.9	4.47	107	3.36
GD-5	1 165.7	18.7	87.3	68.2	21.1	49.3	69.5	0.353	77.6	831	24.8	4.42	99.8	3.27
GD-6	1 185	17.3	86.3	83.6	16.8	42.7	75.1	0.492	78	1162	24.1	4.48	110	3.57
GD-7	1 205	16	85.7	61	16.8	38.7	33	0.617	70.2	1561	21.7	4	106	3.44
GD-8	1 215	13.6	135	75.8	16.8	79.6	75.6	6.51	74.2	1656	18.3	7.02	122	3.96
GD-9	1 225.5	7.27	81.3	34	5.76	29.8	28.4	12.4	233	1705	12.6	5.69	98.9	2.9
GD-10	1 235	15.5	71.6	66.8	11.4	39.5	59.5	0.626	74.1	1315	23.9	2.89	101	3.88

表 4 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段稀土元素测试结果

Table 4 Test results of rare earth elements in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

样品编号	深度/m	稀土元素含量/(μg/g)													
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
GD-1	1 063	59.4	124	13	41.6	7.97	1.47	6.66	1.08	5.72	1.11	3.08	0.569	3.14	0.5
GD-2	1 100	63.9	133	13.9	43.4	8.63	1.54	6.92	1.14	6.15	1.21	3.41	0.608	3.38	0.54
GD-3	1 135	61.9	131	13.8	45	8.51	1.62	6.77	1.16	5.98	1.2	3.33	0.599	3.33	0.535
GD-4	1 162	68.1	140	14.7	47.5	8.9	1.53	7.06	1.17	6.31	1.25	3.58	0.646	3.55	0.555
GD-5	1 165.7	66.1	140	14.4	44.4	8.5	1.52	6.77	1.12	6.04	1.19	3.29	0.605	3.48	0.547
GD-6	1 185	62.8	131	13.9	43.2	8.62	1.56	7.03	1.17	6.22	1.25	3.5	0.636	3.44	0.532
GD-7	1 205	58.2	107	12.1	41.1	7.02	1.27	5.59	0.909	5.06	0.971	2.79	0.513	2.97	0.464
GD-8	1 215	47.8	85.3	10.5	37.8	6.51	1.14	5.33	0.908	4.81	1.03	2.86	0.526	2.94	0.468
GD-9	1 225.5	26.5	47.9	5.92	21.3	4.13	0.842	3.59	0.59	3.22	0.597	1.71	0.324	1.84	0.286
GD-10	1 235	50.1	99.4	10.6	37.2	6.3	1.04	5.05	0.801	4.18	0.835	2.31	0.453	2.53	0.405

Na<sub>2</sub>O 和 K<sub>2</sub>O 在页岩样品中含量较少, 其中 MgO 含量为 1.64%~3.89%, 平均值为 2.65%; Na<sub>2</sub>O 含量

为 0.39%~1.41%, 平均值为 1.17%; K<sub>2</sub>O 含量为 2.65%~5.11%, 平均值为 4.28%。此外还含有少量

CaO(0.26%~6.32%, 平均值 0.69%)、MnO(0.03%~0.15%, 平均值 0.06%)、TiO<sub>2</sub>(0.43%~0.84%, 平均值 0.76%)、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.07%~0.15%, 平均值 0.12%)。LM5-6带主要元素含量变化不大, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在LM2带

附近小幅度的波动; SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>以及P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量在LM2带明显较低, MgO、CaO和MnO含量在LM2带明显较高。P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量在WF2-3带与LM2带较接近(图3)。

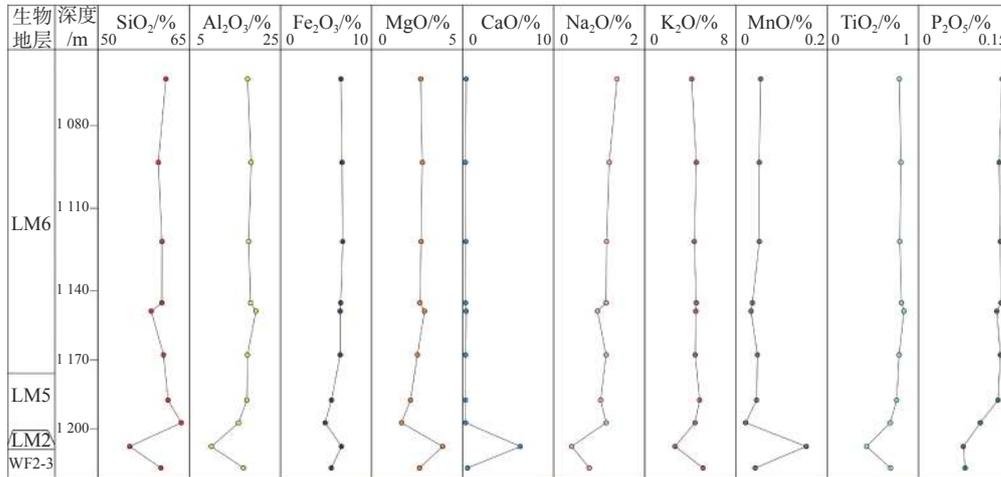


图3 鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩主要元素分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of major elements of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

### 4.2 微量元素特征

鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩样品中 Sc、V、Co、Cu、Sr、Ba、Th、U、Zr、Hf 的最低值或最高值都在 LM2 带。与澳大利亚后太古宙页岩 (PAAS) 微量元素 Al 标准化后的含量相比<sup>[17]</sup>(图4中虚线表示 PAAS 微量元素 Al 标准化后的值), 研究带表

现为 Cr、Co、Hf 整体亏损, Th 和 U 整体富集。其中 LM2 带表现为 V、Ni、Sr、Zr 轻微富集、Sc 元素亏损, 而 WF2-3 和 LM5-6 带表现为 V、Ni、Sr、Zr 亏损、Sc 元素富集。Ba 元素在 WF2-3 带和 LM5-6 带含量大致与 PAAS 标准化值相等, LM2 带呈现高值, U 元素与 Ba 元素分布特征相似。研究带 Cu 元素表现为整体富集、局部亏损的特征(图4)。

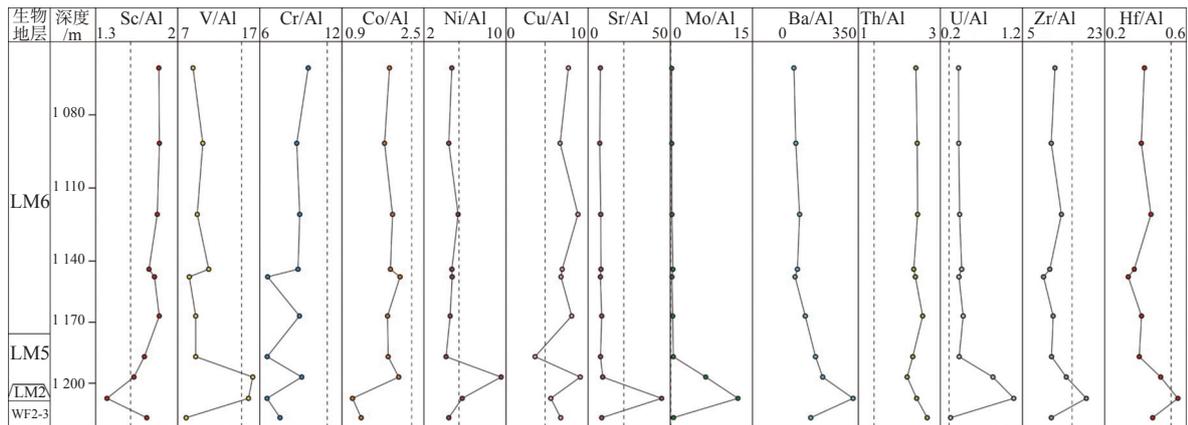


图4 鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩微量元素分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of trace elements of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

### 4.3 稀土元素特征

鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩样品 ΣREE 整体偏高, 值为 (118.75~304.85)×10<sup>-6</sup>, 平均 ΣREE 252.29×10<sup>-6</sup>。ΣLREE/ΣHREE 比值为 8.77~12.35, 平

均值为 10.89, 表现为轻稀土富集, 重稀土亏损的特征, 这与大多数页岩稀土元素分布规律相符合<sup>[18-21]</sup>。对样品稀土元素进行后太古宙澳大利亚页岩 (PAAS) 标准化处理, 得到稀土元素分布曲线(图5)。从曲线形态上看, 研究区页岩稀土元素 PAAS 标准化分

布曲线整体上较为平坦; Ce 元素在 LM2 带表现为微弱的负异常, Eu 元素在研究层带上大部分无异常, 仅在 LM2 带有轻微负异常; LM2 带与 WF2-3 和 LM5-6 带的稀土总量存在差异, LM2 带明显高于 WF2-3 和 LM5-6 带。

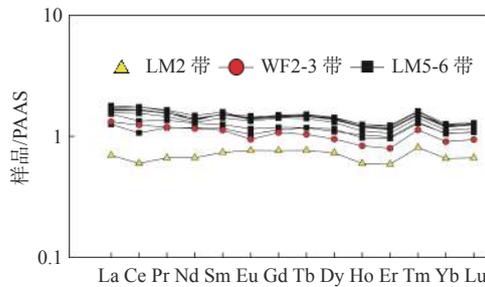


图 5 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩稀土元素 PAAS 标准化分布

Fig.5 PAAS standardized distribution of rare earth elements of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

## 5 讨论

### 5.1 沉积构造背景

#### 5.1.1 构造背景

页岩中的元素含量受到沉积构造背景的控制, 其元素含量的特征可以反映沉积时期的构造环境<sup>[18, 21-25]</sup>。Sc-La-Th 三角图解显示(图 6a), 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩落在活动陆缘+被动陆缘与陆内岛弧边缘的区域; 用 Th-Sc-Zr/10 三角图进行判别(图 6b), 结果显示泥页岩样品均落在活动

陆缘范围附近<sup>[23]</sup>。图解结果表明, 鼓地 1 井五峰组-高家边组物源区以活动大陆边缘为主的构造环境, 同时表现出一定的大陆岛弧的特征。由于华夏块体在中-新元古代向北与扬子板块俯冲, 使得下扬子南部隆升形成了一个 NE-SW 向延伸逾 1 000 km 并向西北弧形突出的江南造山带<sup>[8]</sup>, 其具有“活动大陆边缘+陆内岛弧”的特征。前人已明确提出下扬子早古生代沉积物源来自南侧江南造山带<sup>[24]</sup>, 因此, 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩沉积物源可能主要来自于南侧的江南造山带。综上所述, 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩母岩形成时的构造环境以活动大陆边缘-大陆岛弧的构造环境, 符合南侧江南造山带的性质<sup>[8, 23, 25]</sup>。

#### 5.1.2 物源区背景

沉积岩中的元素含量可以较好地反映母岩的成分, 根据砂、泥岩主量元素物源判别函数  $F_2-F_1$  的判别结果, 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩物源主要来自成熟大陆石英物源区(图 7a)。从 La/Sc-Co/Th 物源判别结果来看, 页岩样品的 Co/Th 值较为稳定, 集中在 1 附近; La/Sc 值变化不大, 基本约为 2~4; 样品投点靠近长英质岩源区, 说明母岩以长英质岩为主(图 7b)。受到华夏板块的挤压作用, 晚奥陶世-早志留世下扬子板块南缘由于剧烈的火山活动产生了大量中酸性火山物质, 而后随着海水的搬运作用, 南侧物源区的中酸性火山物质被搬运到研究区沉积下来<sup>[26]</sup>。因而可以推测鼓地 1 井五峰组-高家边组下段物源来自南部江南造山带的中酸性火山物质和成熟大陆石英物质。

$Al_2O_3$  和  $TiO_2$  作为反映陆源碎屑输入的有效

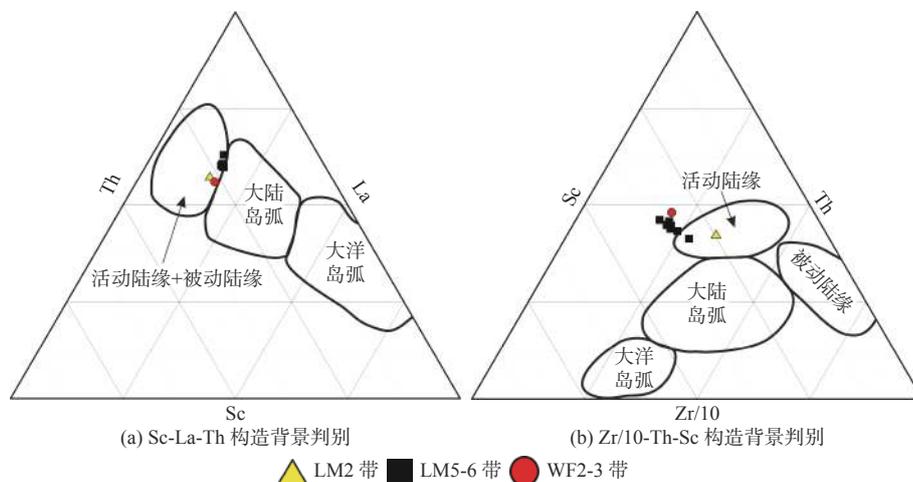


图 6 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩沉积构造背景判别<sup>[24]</sup>

Fig.6 Discrimination of sedimentary tectonic background of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1<sup>[24]</sup>

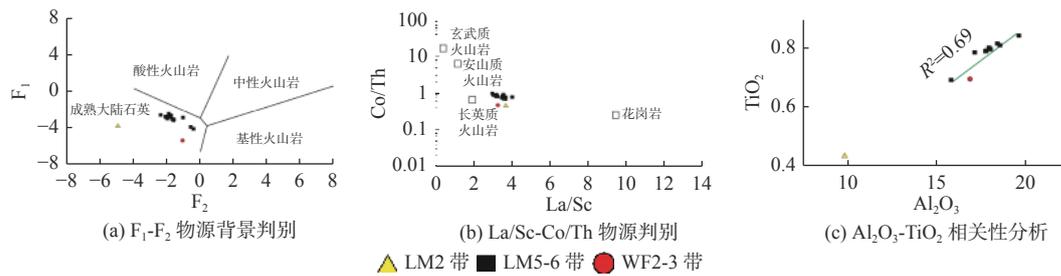


图7 鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩物源区背景判别<sup>[23]</sup>

Fig.7 Discrimination of source area background of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian shale of Well Gudi 1<sup>[23]</sup>

指标,两者含量若呈正相关关系,可认为有高陆源碎屑输入<sup>[27-28]</sup>。WF2-3和LM5-6带页岩 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 含量呈较好的正相关关系(相关性系数 $R^2=0.69$ ),表明有较高的陆源碎屑的输入;LM2带页岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ 含量相关性较低,说明在沉积时期受陆源碎屑输入影响较少(图7c)。这与岩芯观察到五峰组底部泥岩颜色较浅,而LM5-6带页岩中砂质含量明显增多的现象较为一致。

## 5.2 沉积环境恢复

### 5.2.1 古气候

泥页岩CIA(化学蚀变)指数可以用来反映沉积岩物源区的化学风化程度和古气候条件<sup>[29-30]</sup>。CIA反映古气候与源岩区风化程度判别参数见表5。A-CN-K图解显示(图8),鼓地1井五峰组-高家边组下段仅LM2带页岩样品CIA指数在50附近,指示低化学风化、寒冷干燥的环境,其余层带CIA值均 $>70$ ,反映中化学风化强度、温暖湿润的环境。根据前人研究,扬子地区在晚奥陶世和早志留世主要为温暖的古气候环境<sup>[31]</sup>,而奥陶纪末期有短暂的气候变冷过程,在地层上的响应为观音桥段<sup>[32]</sup>。由于鼓地1井缺失观音桥段<sup>[5]</sup>,可能有其他因素造成了LM2带附近样品CIA指数的异常。此外,CIA指数用于反映古气候有一定的适用性<sup>[33]</sup>。研究表明,地势低洼会导致Na、Ka等元素富集从而导致CIA指数变低,同时沉积相和物源的也会影响CIA指数的准确性<sup>[34]</sup>,因此有必要进一步判别古气候。Sr/Cu比值是常用的古气候判别指标,通常认为 $\text{Sr}/\text{Cu}>5$ 为干旱炎热的环境, $<5$ 则反映温暖湿润的环境<sup>[35]</sup>。LM2带附近 $\text{Sr}/\text{Cu}>5$ (图9),显示干旱炎热环境,这与早志留世时冰期结束、全球气温升高的大环境所对应<sup>[6,29]</sup>,至于LM2带CIA指数反映了寒冷干旱的气候条件,可能是在五峰组末期,由于华夏块体的持续碰撞,研究区形成了隆后拗陷<sup>[3]</sup>,地势低洼,造成了Ka、Na等元素的富集,以

致CIA指数失真。WF2-3带和LM5-6带的 $\text{Sr}/\text{Cu}$ 比值 $<5$ (图9),CIA指数 $>70$ ,反映了温暖湿润的气候条件,这与扬子区晚奥陶世—早志留世温暖湿润的古气候环境所匹配<sup>[31]</sup>。综上所述,鼓地1井LM2带应为干旱炎热的环境,WF2-3带和LM5-6带为温暖潮湿的环境。

表5 CIA指数对古气候以及风化程度指标<sup>[30]</sup>

Table 5 Influence of CIA index on paleoclimate and weathering degree index<sup>[30]</sup>

CIA值	化学风化强度	气候条件
50~65	低	寒冷
65~85	中	温暖湿润
85~100	高	炎热潮湿

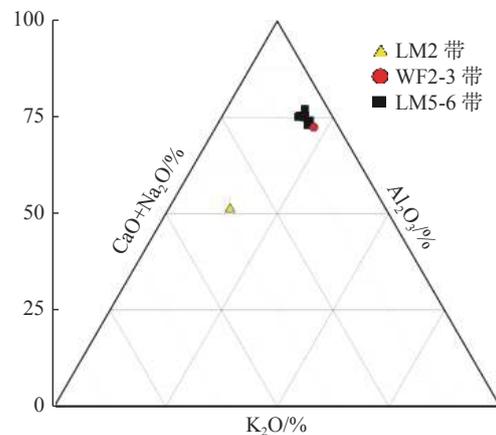


图8 鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩A-CN-K图解<sup>[30]</sup>

Fig.8 A-CN-K diagram of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1<sup>[30]</sup>

### 5.2.2 古海平面与古盐度变化

Sr/Ba比值的变化可以反映海平面的升降,高值反映海平面上升海水盐度增大,低值反映海平面下降海水盐度减小<sup>[36]</sup>。鼓地1井五峰组-高家边组下段页岩Sr/Ba比值在WF2-3带和LM5-6带呈现低值,在LM2带附近呈现高值,说明研究区从WF2-3带到LM2带和LM5-6带沉积时期经历了海平面由低变高再降低的变化,海水也从低盐度变为高盐

度再变为低盐度(图 9)。海水中的钙盐和镁盐的溶解度有差异, 镁盐更易溶<sup>[37]</sup>, Ca/Mg 比值的大小也可以反映海水深度和海水盐度的变化, 高值表明沉积环境海水深度大、盐度高, 而低值表明海水深度小、盐度低。WF2-3 带和 LM5-6 带 Ca/Mg 比值较低, 表示此时海水特征为浅水、低盐度, LM2 带为高 Ca/Mg 值, 表示海水盐度较大(图 9)。

严德天等<sup>[38]</sup>指出, 扬子区在晚奥陶世—早志留世海平面有明显的升降过程。五峰组末期, 气候变冷, 海平面逐渐下降, 在冰期海平面降至最低, 早志留世冰期结束, 全球气候变暖, 海平面快速上升海水变深, 但随着华夏板块不断向北挤压扬子板块, 下扬子区在短暂的海水加深后又是漫长的海退过程, 海水又逐渐变浅<sup>[3]</sup>。海水盐度受淡水补给量的影响较大, WF2-3 带和 LM5-6 带时期气候温暖湿润, 淡水补给充足, 海水盐度较低, LM2 带时期气候干旱炎热, 淡水补给不足且蒸发量较大, 造成海水盐度较高。

5.2.3 氧化还原条件

V/Cr、Ni/Co 和 V/Sc 等微量元素的比值对水体的氧化还原条件的变化较为敏感, 可以用于恢复古沉积环境的氧化还原条件<sup>[39-42]</sup>, 其判别参数见表 6。一般认为 V/Sc 比值 < 9.1 为氧化环境, > 9.1 为还原环境<sup>[39]</sup>; Ni/Co 比值 > 7 为缺氧环境, 5~7 为贫氧环境, < 5 为富氧环境<sup>[40-41]</sup>; V/Cr 比值 > 4.25 为缺氧环境, 2~4.25 为贫氧环境, < 2 为富氧环境<sup>[42]</sup>(表 6)。鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩样品 V/Sc 比值为 4.43~11.18, 平均 5.91, 指示为氧

化环境, 但值变化较大; 在 LM2 带比值 > 9.1, 指示缺氧还原环境(图 9)。Ni/Co 比值在 2.13~5.17 之间, 平均值为 2.79, 指示富氧环境; 而 LM2 带比值为在 5 左右, 指示贫氧环境。V/Cr 比值在 0.93~2.39, 平均值为 1.23, 指示富氧环境; 而 LM2 带附近 V/Cr 比值为 2.39, 指示贫氧环境, 其他层位的样品均指示富氧环境。

表 6 微量元素氧化还原指标<sup>[39-42]</sup>  
Table 6 Redox index of trace elements<sup>[39-42]</sup>

判别参数	缺氧环境		富氧环境
	厌氧	贫氧	
V/Sc		>9.1	<9.1
V/Cr	>4.25	2~4.25	<2
Ni/Co	>7	0.75~1.25	<0.75

鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩样品稀土分配模式较为平坦, Ce 元素在 LM2 带呈微弱的负异常, 其余位置呈现正异常, 说明高家边组底部 LM2 带为弱还原环境, 其他为氧化环境。U 元素和 Mo 元素的富集程度可以较好的反映水体的氧化还原条件<sup>[42]</sup>, 从 U-Mo 协变模式图中可以看出, WF2-3 带以 U 的低富集、Mo 的高富集为特征, LM2 带以 U、Mo 高富集为特征, LM5-6 带 U 和 Mo 的富集系数都较小, 说明了 WF2-3 带和 LM5-6 带为氧化环境, LM2 带为还原环境。同时 LM2 带 Mo 的富集系数较高, 超过正常海水浓度的 3 倍以上, 与 Cariaco 盆地的颗粒载体模式类似<sup>[43]</sup>, 其沉积环境可能为弱滞留海盆环境, 而 WF2-3 带为氧化环境, Mo 元素却大量富集, 这可能是由于在弱滞留环境

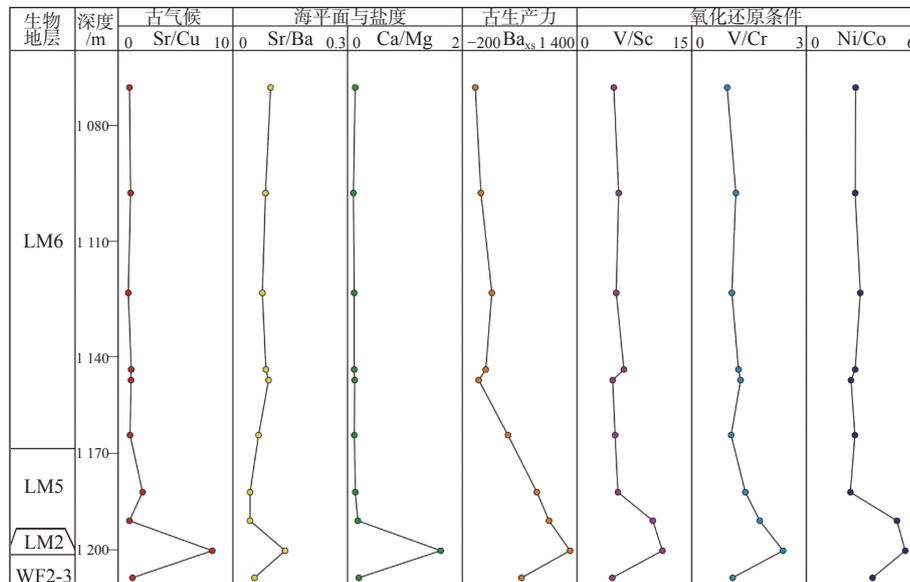


图 9 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩沉积环境恢复

Fig.9 Restoration of sedimentary environment of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian of Well Gudi 1

下, Mo 元素受颗粒载体的吸附沉降作用造成沉积物中的 Mo 元素含量升高<sup>[43]</sup>(图 10)。

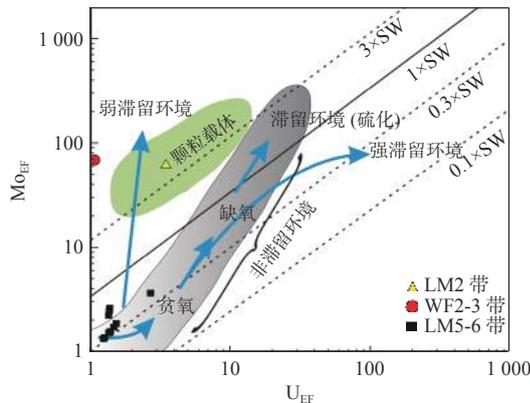


图 10 鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩 U-Mo 协变模式  
Fig. 10 U-Mo covariant model of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1

#### 5.2.4 古生产力

沉积环境中的 Ba 元素主要为生物成因富集,而非生物因素沉淀富集的 Ba 在沉积物中占比较小<sup>[44]</sup>。Ba<sub>xs</sub>(过剩钡)是指沉积物中由生物作用富集的 Ba<sup>[17]</sup>,可以用来指示沉积时期的古生物生产力,其计算公式为  $Ba_{xs} = Ba_{\text{样}} - Al_{\text{样}}(Ba/Al)_{\text{PAAS}}$ 。式中 Ba<sub>样</sub>和 Al<sub>样</sub>为样品实测 Ba 和 Al 的含量, (Ba/Al)<sub>PAAS</sub>为后太古代澳大利亚页岩平均组分 Ba 和 Al 的比值。通常 Ba<sub>xs</sub> 值 > 1 000 μg/g 认为是高生产力<sup>[45]</sup>。鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩 Ba<sub>xs</sub> 含量整体不高, WF2-3 带和 LM5-6 带 Ba<sub>xs</sub> 含量低,显示为低生产力; LM2 带 Ba<sub>xs</sub> > 1 000 μg/g, 达到 1 303 μg/g, 显示为高生产力(图 9)。Ba<sub>xs</sub> 在 1 063 m 处开始显示为负值,这是由于 LM5-6 沉积时期研究区古生物生产力严重不足,生物成因 Ba 供给不足所致。Ba<sub>xs</sub> 含量会受到海水氧化还原条件变化的影响,还原条件下沉积物中的 Ba 元素会溶解析出,造成 Ba<sub>xs</sub> 含量降低,影响古生产力的判断<sup>[17]</sup>。鼓地 1 井五峰组-高家边组下段 WF2-3 带和 LM5-6 带海水较浅,底层海水为氧化环境,沉积物中的 Ba 元素流失较少,而 LM2 带海水较深底,层海水缺氧还原, Ba 元素流失较多。综合来看,处于还原环境中的 LM2 带 Ba<sub>xs</sub> 含量仍高于氧化环境中的 WF2-3 带和 LM5-6 带,说明 LM2 带古生物生产力明显高于 WF2-3 带和 LM5-6 带。

## 6 结论

通过对下扬子巢湖地区鼓地 1 井五峰组-高家边组下段页岩岩芯样品的主、微量元素以及稀土元

素的测定分析,探讨了沉积时期的构造背景、物源区背景、水体氧化还原条件、古气候、古生物生产力、古海平面以及古盐度特征,得出了以下结论:

(1)鼓地 1 井五峰组-高家边组页岩主量元素、微量元素以及稀土元素纵向分布不均匀, LM2 带元素含量与 WF2-3 带和 LM5-6 带相比明显异常。

(2)鼓地 1 井五峰组-高家边组下段主要为活动大陆边缘的沉积构造背景,同时兼具大陆岛弧的特征。物源具有长英质物源和成熟大陆石英物源混合物源的特征。

(3)鼓地 1 井 WF2-3 带和 LM5-6 带为浅水环境,底层海水含氧高,气候温暖湿润,古生产力较低,海水较浅且盐度较低; LM2 带为深水环境,海水盐度高、滞留程度较弱,底层海水缺氧,气候干燥炎热,古生物生产力较强。

#### 参考文献:

- [1] 谢军. 长宁-威远国家级页岩气示范区建设实践与成效[J]. 天然气工业, 2018, 38(2): 1-7.
- [2] 梁兴, 焦亚军, 张永强, 等. 昭通国家级示范区页岩气一体化高效开发模式及实践启示[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 29-37.
- [3] 蔡来星, 肖国林, 郭兴伟, 等. 由下扬子区海陆对比分析南黄海盆地志留统烃源岩特征及其主控因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(1): 39-52.
- [4] 夏在连, 花彩霞, 刘计勇, 等. 下扬子区下古生界油气有利勘探区带探讨[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 66-74.
- [5] 王文娟, 陈建文, 雷宝华, 等. 下扬子巢湖鼓地1井五峰-高家边组生物地层及部分笔石带缺失原因[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 61-67.
- [6] 孟楚洁, 胡文瑄, 贾东, 等. 宁镇地区上奥陶统五峰组-下志留统高家边组底部黑色岩系地球化学特征与沉积环境分析[J]. 地质前缘, 2017, 24(6): 304-315.
- [7] 黄正清, 方朝刚, 李建青, 等. 宁镇地区五峰组-高家边组页岩 U-Mo 协变模式与古海盆水体滞留程度[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 443-450+471.
- [8] 徐文礼, 郑荣才, 颜雪, 等. 下扬子地区早古生代黑色岩系地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1108-1122.
- [9] 杨树锋, 陈汉林, 龚根辉, 等. 下扬子地区早古生代晚期前陆盆地沉积特征与盆山过程[J]. 地球科学, 2019, 44(5): 1494-1510.
- [10] 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.
- [11] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [12] 许明, 陈建文, 雷宝华, 等. 南黄海海域中生代前陆盆地形成的构造背景[J]. 现代地质, 2019, 33(1): 13-24.
- [13] 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.

- [14] 熊强青,王中鹏,张娣,等.下扬子巢湖地区皖舍地1井五峰组-高家边组下段生物地层[J].地层学杂志,2020,44(1):46-55.
- [15] 李海滨.下扬子地区早古生代前陆盆地与油气前景分析[D].南京:南京大学,2013.
- [16] 陈旭,樊隽轩,张元动,等.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].地层学杂志,2015,39(4):351-358.
- [17] 李艳芳,邵德勇,吕海刚,等.四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J].石油学报,2015,36(12):1470-1483.
- [18] 张茜,王剑,余谦,等.扬子地台北缘盐源盆地地下志留统龙马溪组黑色页岩硅质成因及沉积环境[J].地质论评,2018,64(3):610-622.
- [19] GROMET L P, HASKIN L A, KOROTEV R L, et al. The "North American shale composite": its compilation, major and trace element characteristics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12): 2469-2482.
- [20] HU JUNJIE, LI QI, LI Juan, et al. Geochemical characteristics and depositional environment of the Middle Permian mudstones from central Qiangtang Basin, northern Tibet[J]. *Geological Journal*, 2016, 51(4): 560-571.
- [21] 何志威,杨瑞东,高军波,等.贵州松桃道坨锰矿含锰岩系地球化学特征和沉积环境分析[J].地质论评,2014,60(5):1061-1075.
- [22] 熊小辉,王剑,余谦,等.富有机质黑色页岩形成环境及背景的元素地球化学反演-以渝东北地区田坝剖面五峰组-龙马溪组页岩为例[J].天然气工业,2015,35(4):25-32.
- [23] 刘春来,熊国庆,董国明,等.扬子北缘奥陶纪-志留纪之交泥岩地球化学特征及其源区构造背景[J].地质论评,2021,67(4):1-17.
- [24] 安徽省地质矿产局.安徽省区域地质志[M].北京:地质出版社,1987.
- [25] 胡受奚,叶瑛.对“华夏古陆”、“华夏地块”及“扬子-华夏古陆统一”等观点的质疑[J].高校地质学报,2006,12(4):432-439.
- [26] 杨刚,谢渊,刘建清,等.四川盆地西南缘雷波-永善地区志留系龙马溪组黑色页岩地球化学特征与意义[J].四川地质学报,2019,39(4):670-678.
- [27] 蔡全升,陈孝红,张保民,等.鄂西宜昌地区五峰组-龙马溪组黑色岩系硅质来源及其油气地质意义[J].地质学报,2020,94(3):931-946.
- [28] 王淑芳,邹才能,董大忠,等.四川盆地富有机质页岩硅质生物成因及对页岩气开发的意义[J].北京大学学报(自然科学版),2014(3):476-486.
- [29] 拜文华,王强,孙莎莎,等.五峰组-龙马溪组页岩地化特征及沉积环境:以四川盆地西南缘为例[J].中国矿业大学学报,2019,48(6):1276-1288.
- [30] 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.
- [31] 何龙.四川盆地东南缘五峰组-龙马溪组页岩有机质富集机制及沉积环境演化[D].广州:中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所),2020.
- [32] 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.
- [33] KIMURA H, WATANABE Y. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Geology*, 2001, 29(11): 995-998.
- [34] 赵占仓,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.
- [35] 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.
- [36] YOUNG H. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129-147.
- [37] 许中杰,程日辉,王嘹亮,等.广东惠来地区早-中侏罗世桥源组海平面相对升降及构造背景的元素地球化学证据[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(4):966-975+82.
- [38] 严德天,陈代钊,王清晨,等.扬子地区奥陶系-志留系界线附近地球化学研究[J].中国科学:地球科学,2009,39(3):285-299.
- [39] ADEGOKE A K, ABDULLAH W H, HAKIMI M H, et al. Geochemical characterisation and organic matter enrichment of Upper Cretaceous Gongila shales from Chad (Bornu) Basin, northeastern Nigeria: bioproductivity versus anoxia conditions[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2015, 135: 73-87.
- [40] MORFORD J L. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(2): 1735-1750.
- [41] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [42] 郭岭.渝东南地区志留系龙马溪组黑色页岩沉积特征及其页岩气意义[D].北京:中国地质大学(北京),2012.
- [43] 何龙,王云鹏,陈多福.川南地区晚奥陶-早志留世沉积环境与古气候的地球化学特征[J].地球化学,2019,48(6):555-566.
- [44] 张玉玺,陈建文,周江羽.苏北地区早寒武世黑色页岩地球化学特征与有机质富集模式[J].石油与天然气地质,2020,41(4):838-851.
- [45] PI D H, LIU C Q, SHIEDS-ZHOUG A, et al. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in the early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, South China: constraints for redox environments and origin of metal enrichments[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 218-229.

## Geochemical characteristics and geological significance of shale in the lower member of Wufeng-Gaojiabian Formation of Well Gudi 1 in Chaohu area, Lower Yangtze region

XUE Lu<sup>1,2</sup>, CHEN Jianwen<sup>1,2,3,4\*</sup>, WU Piao<sup>2,3</sup>, ZHANG Penghui<sup>1</sup>, WANG Baxiu<sup>1</sup>

(1 College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4 Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Well Gudi 1 reveals the strata of the WF2-3 member of Wufeng Formation (Upper Ordovician) and the LM2 and LM5-6 members of lower member of Gaojiabian Formation (Lower Silurian). The element geochemistry characteristics of shale samples from the studied strata has been analyzed, and its sedimentary tectonic background, provenance background, paleoclimate, paleoproductivity, seawater depth and salinity, redox conditions are thus studied subsequently. The results show that the vertical distribution of major elements, trace elements and rare earth elements in the shale of the lower member of Wufeng Formation-Gaojiabian Formation of well Gudi 1 is uneven, and the LM2 member is obviously abnormal compared with WF2-3 member and LM5-6 member. The tectonic environment during the sedimentary period is mainly the active continental margin environment, which also has the characteristics of continental island arc. The provenance is characterized by a mixture of felsic provenance and mature continental quartz provenance. WF2-3 and LM5-6 are in shallow water environment, with high oxygen content in bottom seawater, warm and humid climate, low paleoproductivity, shallow seawater and low salinity; LM2 member is a deep-water environment with high seawater salinity and weak retention. The bottom seawater is anoxic, dry and hot climate and strong paleontological productivity.

**Key words:** Chaohu area of Lower Yangtze region; Well Gudi 1; Wufeng-Gaojiabian Formation; sedimentary background; depositional environment