

安徽巢湖石炭系高骊山组元素地球化学 记录及其环境意义*

周 润^{1,2} 吴 立^{1,3} 蒋浩东^{1,3}

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽芜湖 241002

2 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000

3 江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室, 安徽芜湖 241002

摘 要 安徽巢湖地区高骊山组杂色页岩有效记录了早石炭世的区域古环境演变信息, 为深入了解该时期的环境演变机制提供了重要资料。在野外调查与采样的基础上, 利用 X 射线荧光光谱仪和磁化率仪对样品进行测试, 依据元素地球化学数据与磁化率信息, 探讨高骊山组的源岩属性与沉积时期的古气候、古环境变迁。结果表明: (1) 巢湖地区高骊山组主量元素以 Si、Al 和 Fe 为主, 微量元素中 Ba、Sr、Cs 等大离子亲石元素及 Cu、Zn、Cr、V 等过渡族元素相对 PAAS 总体亏损, 而 Nb、Nd、Th、Zr、Hf 等高场强元素显著富集, 且 P、Ba、Mn 及氧化还原敏感元素 Co、Cr、Ni、V 在该组下段的富集, 指示下段沉积时期的古生产力提高及氧化还原条件变化; (2) 高骊山组页岩沉积时期的构造背景具被动大陆边缘特征, 源岩经历了显著的沉积再旋回作用, 主要为古老的陆地壳长英质岩石; (3) 古气候由页岩沉积早期相对较暖湿向中期相对温湿再向晚期相对暖湿转变, 水体环境由弱还原—弱氧化向氧化过渡, 水体深度由深向浅变化, 整体为海陆过渡相半咸水环境, 晚期盐度相对较低; (4) 高骊山组的 2 个层位可能具有特殊的环境意义, 其中 GLS-4 层位地球化学指标指示极湿热气候及相对深水的高盐度环境, 但也可能受到成岩作用影响, 而 GLS-24 层位则可能记录了特殊的地质事件或环境剧变, 这均需进一步研究。研究结果深化了对巢湖地区高骊山组页岩沉积时期古气候、古环境及其演变机制的认识, 并了解石炭纪复杂的气候环境演化过程提供了更精细的记录。

关键词 页岩 古环境 地球化学特征 高骊山组 巢湖地区

第一作者简介 周润, 女, 2003 年生, 硕士研究生, 主要研究方向为古环境变化与释光测年。E-mail: zhour2025@lzu.edu.cn。

通讯作者简介 吴立, 男, 1985 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自然地理与古环境演变。E-mail: jedi-wuli@163.com。

中图分类号: P595 文献标志码: A

Elemental geochemistry records of the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province and their environmental implications

ZHOU Run^{1,2} WU Li^{1,3} JIANG Haodong^{1,3}

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Anhui Wuhu 241002, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42671209, 42271173) 和安徽省“十四五”规划重点项目 (编号: 2022BFAFZ01365) 共同资助。
[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42671209, 42271173) and Key Project of the 14th Five Year Plan of Anhui (No. 2022BFAFZ01365)]

收稿日期: 2025-10-24 改回日期: 2026-01-01

2 College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 Provincial Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin,
Anhui Normal University, Anhui Wuhu 241002, China

Abstract The variegated shale from the Gaolishan Formation in the Chaohu area, Anhui Province, China, effectively records the palaeoenvironmental evolution of the Early Carboniferous, providing valuable insights into the mechanisms of environmental evolution during this period. Based on field investigations and sample collection, X-ray fluorescence spectrometer and magnetic susceptibility meter were used to test the samples, obtaining elemental geochemical and magnetic susceptibility data, further exploring the sedimentary source rock properties as well as palaeoenvironmental and palaeoclimate changes during the depositional period of Gaolishan Formation. The results show that: (1) Major elements are predominantly Si, Al and Fe. The large ion lithophile elements (LILE), such as Ba, Sr and Cs, and the transition elements, such as Cu, Zn, Cr and V, are typically characterized by depletion compared to PAAS, while the high field strength elements (HFSE) such as Nb, Nd, Th, Zr and Hf are significantly enriched. The enrichment of P, Ba, Mn and redox-sensitive elements Co, Cr, Ni and V in the lower section suggests the increase of paleoproductivity and the change of redox conditions. (2) The shale tectonic setting reflects the characteristics of the passive continental margin, which has undergone significant sedimentary recycling. The parent rocks are mainly ancient upper crustal felsic rocks, and granite may also exist. (3) The palaeoclimate of the study area changed from relatively warm and humid in the early period to relatively mild and humid in the middle period, and then to relatively warmer and more humid in the late period. The redox environment transitioned from weak reduction-weak oxidation to oxidation, and the water depth changed from deep to shallow. The study area was characterized by a marine-continental transitional face with brackish water environment, and the salinity was relatively higher in the later stages. (4) This area may contain two stratigraphic units of particular environmental significance. The GLS-4 unit represents an extremely humid and hot climate, along with a relatively deep-water high-salinity environment, which may be influenced by diagenesis activities. The GLS-24 unit may record unique geological events or significant environmental upheavals. Both of them require further investigation. The results may deepen the understanding of the palaeoclimate, palaeoenvironment and their evolution mechanisms of the Gaolishan Formation shale in Chaohu area, and provide a more detailed record for understanding the complex climate and environmental evolution process across the Carboniferous.

Key words shale, palaeoenvironment, geochemical characteristics, Gaolishan Formation, Chaohu area

About the first author ZHOU Run, born in 2003, a master's degree candidate, majors in palaeoenvironmental change and luminescence dating. E-mail: zhour2025@lzu.edu.cn.

About the corresponding author WU Li, born in 1985, professor, doctoral supervisor, is engaged in researches on physical geography and palaeoenvironmental evolution. E-mail: jedi-wuli@163.com.

0 引言

元素地球化学已被广泛应用于沉积岩的古环境研究中,是进行古沉积环境恢复和物源示踪的有效手段之一。沉积岩的元素地球化学特征除受元素自身化学特性影响外,还与源岩属性及古沉积环境条

件关系密切(陈曦等,2023)。在物质的沉积过程中,不同的动力条件、介质性质、气候条件等因素所导致的元素分散与聚集规律有所差异,故元素地球化学特征可作为沉积环境的判别标志之一(Arthur and Sageman, 1994; Morford and Emerson,

1999; 宋明水, 2005; 朱筱敏, 2010)。地层中元素的含量及比值变化, 都在一定程度上指示着古气候、古环境的演化历程。

安徽巢湖北部区域石炭系发育完整, 出露齐全, 沉积类型多样, 是探究石炭纪地质环境特征的关键区域之一(侯明金等, 1998)。石炭纪作为地质历史时期沉积环境由陆相向海相转变的过渡期, 岩相、海平面变化呈现出高度的复杂性和多样性, 具体表现为沉积地层普遍较薄, 其间穿插着众多界限模糊、不易区分的地层界面, 且这一特征在早石炭世尤为显著, 指示该时期的沉积环境变化复杂(李双应等, 2000)。前人研究表明, 石炭系仅高骊山组为陆源碎屑沉积, 发育一套独特的紫、黄、绿色等杂色页岩, 其余均为海相碳酸盐岩建造(夏广胜和徐家聪, 1980)。然而, 针对这一特殊碎屑岩地层的研究则相对匮乏。早期研究主要从层序地层学(李双应等, 2000; 林春明等, 2002)、古生物学(沈炎彬, 1983; 严幼因, 1987)以及岩相古地理(胡祈和宋传中, 1986; 夏军和徐家聪, 1991; 侯明金等, 1998)等方向展开, 通常以石炭系整体为研究对象, 高骊山组仅作为其下属的一个地层单元被简要描述, 缺乏针对性的系统研究工作。之后, 地球化学和古地磁学等方法被用来进行古环境研究: 赵欢(2016)通过古生物组合及稀土元素地球化学特征分析, 认为高骊山组沉积于浅海还原环境, 上部的沉积速率比下部低, 更有利于有机质的聚集和古生物化石的保存; 曾建等(2024)通过开展有机地球化学和元素地球化学研究, 认为高骊山组页岩主体沉积于氧化环境, 下部较高的古生产力和安静的水体环境相对利于有机质的富集。可以看出, 前人利用元素地球化学方法针对高骊山组沉积环境的研究尚存在争议, 且侧重氧化还原环境和水动力等条件对有机质富集的影响, 但对驱动这些变化的古气候背景关注较少, 从而限制了对该时期复杂沉积环境演化机制的全面认识。

此外, 沉积成岩过程中的化学风化、分选作用和成岩作用都会影响碎屑沉积岩的化学组成, 且地球化学指标具有一定的多解性(蔡观强等, 2006; 逢淑伊等, 2019), 因此需要结合磁化率这种能够反映陆源碎屑通量的物理指标进行交叉验证, 得到更准确的古环境信息。磁化率作为物质被磁化难易程度的一种度量指标, 反映了物质中磁性矿物的种

类和含量(刘德政和夏非, 2021), 可用于进一步分析磁性矿物的变化规律及所代表的环境变化信息。鉴于磁化率的测量具有快速简便、经济、可重复率高等优点(Verosub and Roberts, 1995; 段先锋等, 2024), 其已成为一种重要的环境代用指标, 被广泛应用于黄土(刘东生, 1985; 范义姣等, 2021)、湖泊(杨晓强和李华梅, 1999; 王心源等, 2008)、海洋(李波等, 2015; 肖春风等, 2023)等沉积环境研究中。

以出露良好的安徽巢湖市北部地区麒麟山东坡高骊山组剖面为研究对象, 采用元素地球化学分析方法(包括常量元素与微量元素), 辅以磁化率手段, 将地球化学和磁化率组合作为环境演变的替代性指标, 分析高骊山组页岩沉积时期古气候、古环境及其演变机制。研究成果为了解石炭纪复杂的气候环境演化过程提供了更精细的记录。

1 区域概况

研究区位于安徽巢湖北部地区, 构造位置上处于华北板块、大别造山带和扬子板块三者交界处, 隶属于下扬子板块东北部、郯庐断裂带东侧(图 1-A)(隋欣如, 2017)。在地层区划上, 其隶属于扬子地层区下扬子地层分区和县—安庆地层小区(阴江宁等, 2016; 刘海, 2020)。石炭纪, 下扬子地区发育“两坳夹一隆”型克拉通盆地, 中部的南京—巢湖—宿松一带为北东—南西向古陆, 周边为台地—台地前缘斜坡(纪友亮等, 2011)。

研究区石炭系自下而上依次划分为下石炭统金陵组(C_{1j})、高骊山组(C_{1g})、和州组(C_{1h}), 以及上石炭统黄龙组(C_{2h})、船山组(C_{2ch}), 各组之间呈假整合接触(陈华成等, 1979)。早石炭世海侵范围扩大, 海平面上升, 区内被海水淹没, 沉积了一套海相碳酸盐地层, 至高骊山组沉积时期由于陆源碎屑含量增加而发育碎屑岩沉积(夏广胜和徐家聪, 1980)。高骊山组沉积时期为下扬子地区海盆活跃阶段, 地壳活动较为频繁, 以升降运动为主, 发生多次规模不等的海侵—海退, 沉积环境多变(林春明等, 2002; 李世毅等, 2015), 生物繁盛, 地层中可见珊瑚、苔藓虫、腕足类、瓣鳃类等海相动物化石, 以及部分植物化石(陈华成等, 1979)。

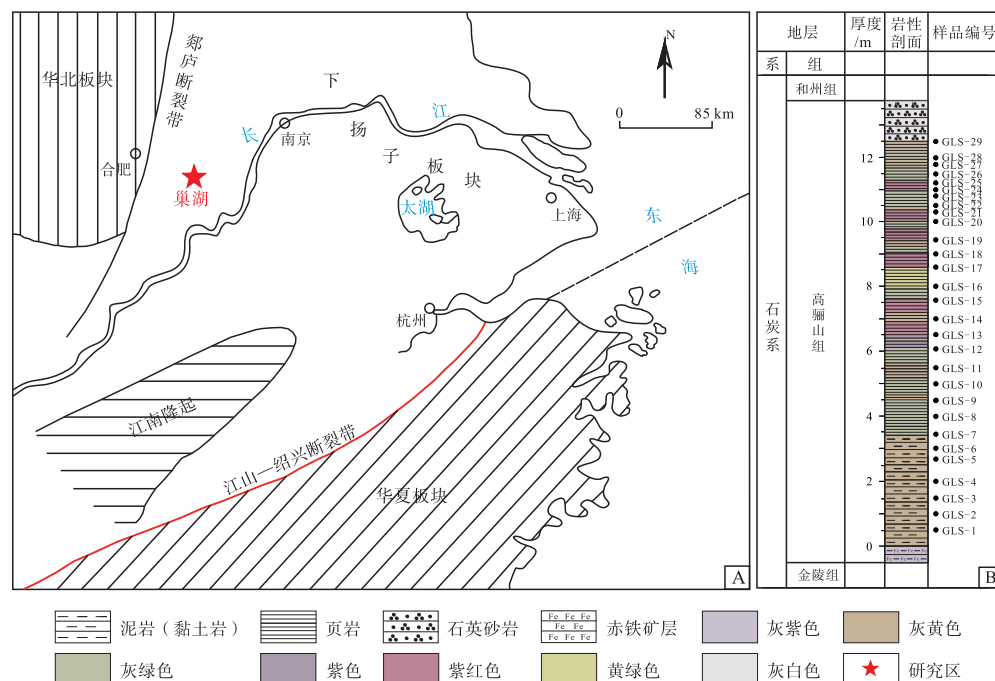


图 1 安徽巢湖大地构造示意图 (A) (据隋欣如, 2017, 有修改) 及石炭系高骊山组样品采集位置 (B)

Fig. 1 Tectonic sketch map of Chaohu area, Anhui Province (A, modified from Sui, 2017) and sampling position in the Carboniferous Gaolishan Formation (B)

2 样品采集与实验方法

在安徽巢湖麒麟山东坡一处厚 12.5 m 的高骊山组出露剖面上,以一定间距进行样品采集,取样位置如图 1-B 所示。采样集中在剖面的主体杂色页岩部分,底部仍有厚约 0.5 m 的灰紫色赤铁矿层与金陵组相接,顶部有厚约 1.3 m 的灰白色中薄层石英砂岩与和州组相接。

首先, 将采集回来的样品进行风干、烘干处理; 之后, 取干燥后的样品不少于 20 g, 经粉碎机粗碎后, 置于玛瑙研钵充分研磨至 200 目以下并混合均匀, 装袋备用; 最后, 进行地球化学元素的 X 射线荧光光谱分析和磁化率分析。

进行地球化学元素测试时, 取研磨后的样品 5~6 g 在高压下压成圆片, 由日本理学公司生产的 ZSX Primus IV 型 X 射线荧光光谱仪进行元素地球化学测试 (XRF), 分析过程中使用国家地球化学标准沉积物样品 (GSS1 和 GSD9) 全程监控, 分析误差小于 $\pm 1\%$ 。磁化率测量使用英国 Bartington 公司生产的 MS2B 型双频磁化率仪, 测试过程为: 取研磨后的样品 10 g (± 0.5 g) 装入直径 2.4 cm、高 2.2 cm 的圆柱形无磁塑料盒中, 压紧后分别进

行低频质量磁化率 (x_{lf} , 0.47 kHz) 和 高频质量磁化率 (x_{hf} , 4.7 kHz) 测量, 每组数据均测量 3 次, 取其平均值为最终结果, 测量精度为 0.1 SI。所有样品测试均在安徽师范大学地理与旅游学院江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室完成。

3 结果分析

3.1 主量元素特征

高骊山组杂色页岩 29 个样品的主量元素氧化物测试数据如表 1 所示。样品具有较高的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 含量, 3 种成分的总含量平均值为 81.53%, 变化范围为 77.53% ~ 83.87%。其中, SiO_2 平均含量 (56.69%) 最高, 变化范围为 45.64% ~ 63.58%; Al_2O_3 平均含量 (16.45%) 次之, 变化范围为 14.27% ~ 19.08%; Fe_2O_3 平均含量 (8.38%) 较低, 变化范围为 4.09% ~ 16.71%。 K_2O 、 MgO 、 CaO 平均含量依次减少, 分别为 3.59%、1.07%、0.77%, 变化范围分别为 1.11% ~ 5.26%、0.35% ~ 1.61%、0.49% ~ 1.46%。 Na_2O 平均含量 (0.26%) 最低, 变化范围为 0.17% ~

表 1 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩样品主量元素含量 (wt.%)

Table 1 Major element contents (wt.%) of shale samples from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province

剖面编号	样品位置/m	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃
GLS-1	0.5	45.64	15.18	16.71	3.83	0.91	0.72	0.24	77.53
GLS-2	1.0	58.19	15.89	7.26	1.84	0.58	1.36	0.23	81.34
GLS-3	1.5	48.49	14.45	15.69	3.87	0.93	0.75	0.24	78.63
GLS-4	2.0	60.81	14.38	6.47	1.11	0.39	0.58	0.17	81.66
GLS-5	2.7	57.41	17.13	7.59	3.23	1.03	0.73	0.25	82.13
GLS-6	3.0	58.61	16.72	6.80	3.24	1.07	0.70	0.25	82.13
GLS-7	3.4	59.56	17.00	4.99	3.56	1.18	0.73	0.25	81.55
GLS-8	4.0	60.25	15.90	5.40	3.64	1.22	0.86	0.26	81.55
GLS-9	4.5	58.95	15.47	7.81	3.61	1.13	0.73	0.26	82.23
GLS-10	5.0	58.47	16.60	6.53	3.90	1.20	0.74	0.26	81.60
GLS-11	5.5	63.58	14.46	4.58	3.17	1.03	0.70	0.25	82.62
GLS-12	6.1	57.00	17.31	7.19	4.26	1.20	0.65	0.26	81.50
GLS-13	6.5	55.04	17.50	9.62	4.25	1.19	0.69	0.26	82.16
GLS-14	7.0	54.14	16.89	9.47	4.31	1.17	0.65	0.25	80.50
GLS-15	7.6	61.28	15.64	4.09	3.71	1.20	0.61	0.24	81.01
GLS-16	8.0	51.26	19.08	9.51	3.95	1.17	0.94	0.25	79.85
GLS-17	8.6	59.51	15.41	8.21	4.04	1.25	0.63	0.25	83.13
GLS-18	9.0	63.01	14.27	5.64	3.36	1.08	0.64	0.26	82.92
GLS-19	9.4	54.02	16.85	9.83	5.01	1.48	1.35	0.38	80.70
GLS-20	10.0	57.04	17.01	6.23	5.26	1.61	0.62	0.33	80.28
GLS-21	10.3	52.81	16.57	13.24	5.12	1.44	0.59	0.32	82.62
GLS-22	10.5	57.29	16.82	7.02	5.14	1.58	0.70	0.39	81.13
GLS-23	10.8	56.72	15.51	9.92	4.79	1.44	0.83	0.32	82.15
GLS-24	11.0	54.75	18.44	6.53	4.45	1.28	0.70	0.35	79.72
GLS-25	11.2	50.27	17.11	16.49	4.13	1.03	0.71	0.25	83.87
GLS-26	11.5	55.25	17.84	8.59	3.00	0.90	1.46	0.22	81.68
GLS-27	11.8	58.40	16.97	8.29	1.22	0.35	0.49	0.21	83.66
GLS-28	12.0	59.30	16.56	5.74	1.81	0.54	0.57	0.22	81.60
GLS-29	12.5	56.93	18.19	7.68	1.24	0.35	0.89	0.21	82.80

0.39%。K₂O、MgO、CaO、Na₂O 等含量较低，可能与 K、Mg、Ca、Na 等碱金属元素更易从母岩中风化淋滤流失有关。

3.2 微量元素特征

高骊山组杂色页岩 29 个样品的部分微量元素测试数据如表 2 所示。沉积物中微量元素的富集或亏损程度可以用富集系数 (EF) 进行评价。为了消除元素来源差异对参考结果的影响，普遍采用 Al 标准化的元素富集系数 (EF) 对沉积物中的元素进行表征 (Tribovillard *et al.*, 2006)。本研究采取如下计算公式： $EF_X = (X/Al)_{\text{样品}} / (X/Al)_{\text{PAAS}}$

(Taylor and McLennan, 1985)，其中 X 和 Al 表示元素浓度， $(X/Al)_{\text{PAAS}}$ 指后太古宙澳大利亚页岩的平均 X/Al 值。当 $EF_X > 1$ ，说明元素 X 相对于 PAAS (后太古宙澳大利亚平均页岩) 富集；当 $EF_X < 1$ ，则元素 X 相对亏损。

由图 2 可知，岩石中大离子亲石元素 Ba、Sr、Cs 含量波动范围较大，相对于 PAAS 明显亏损；过渡族元素 Cu、Zn 明显亏损，Cr、V 呈弱亏损至弱富集，仅少量层位元素有明显聚集。总体上，过渡族元素和大离子亲石元素以亏损为主。高场强元素 Nb、Nd、Th、Zr、Hf 明显富集；具有古生产力指

表 2 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩样品微量元素含量 (μg/g)
Table 2 Trace element concentration (μg/g) of shale samples from the Carboniferous Gaolishan Formation
in Chaohu area, Anhui Province

剖面编号	样品位置/m	Ba	Sr	Cs	Nb	Nd	Th	Zr	Hf	Co	Cr	Ni	Zn	V	Cu	P	Mn
GLS-1	0.5	1604	43	5	16	73	22	141	6	28	84	56	84	144	30	1559	13612
GLS-2	1.0	212	64	7	19	36	14	521	5	11	90	58	49	116	25	423	893
GLS-3	1.5	1289	24	5	19	53	24	169	6	24	83	48	62	138	8	1140	10209
GLS-4	2.0	403	260	7	14	59	13	409	5	32	230	88	75	84	9	749	2594
GLS-5	2.7	157	83	6	29	34	18	357	5	79	101	47	77	154	20	592	332
GLS-6	3.0	185	39	6	27	30	18	325	5	34	98	38	63	148	27	460	308
GLS-7	3.4	187	72	7	26	32	15	328	5	18	91	33	47	135	24	397	226
GLS-8	4.0	201	62	7	24	42	15	324	5	39	86	47	45	127	30	417	541
GLS-9	4.5	170	42	6	24	46	16	282	5	46	87	52	68	135	33	686	382
GLS-10	5.0	161	40	6	22	42	16	256	5	20	88	44	46	124	26	587	180
GLS-11	5.5	169	29	7	24	34	14	339	5	11	78	31	34	112	11	322	386
GLS-12	6.1	104	24	7	18	37	13	261	5	11	97	33	36	117	11	407	91
GLS-13	6.5	135	30	6	19	41	16	202	5	12	97	30	36	112	7	450	422
GLS-14	7.0	342	27	6	18	38	16	232	5	18	85	44	44	114	14	569	4285
GLS-15	7.6	134	13	8	19	26	9	358	4	9	76	22	29	96	17	322	162
GLS-16	8.0	417	38	6	18	36	17	162	5	15	104	41	59	141	17	545	2949
GLS-17	8.6	174	24	7	20	34	17	227	5	18	86	37	39	115	7	289	980
GLS-18	9.0	105	38	7	23	45	15	338	5	16	79	40	33	112	22	611	173
GLS-19	9.4	155	71	6	29	90	22	246	5	15	92	46	48	127	12	1956	90
GLS-20	10.0	174	24	7	20	27	15	261	5	15	88	39	37	99	26	242	91
GLS-21	10.3	136	23	6	19	50	23	220	6	16	93	41	39	113	7	292	102
GLS-22	10.5	149	22	7	28	44	15	189	5	26	101	50	44	105	32	393	180
GLS-23	10.8	126	21	6	22	45	19	185	5	14	83	40	39	106	8	1272	104
GLS-24	11.0	355	1869	7	29	320	22	400	5	14	115	52	46	119	40	1633	76
GLS-25	11.2	133	71	5	20	89	23	172	6	19	96	54	51	147	13	628	168
GLS-26	11.5	156	43	6	19	27	15	315	5	22	116	52	43	125	41	322	210
GLS-27	11.8	114	52	7	21	35	15	896	6	7	137	26	15	151	9	286	67
GLS-28	12.0	135	88	7	23	29	13	815	6	10	118	34	24	128	24	392	70
GLS-29	12.5	131	52	7	22	35	16	860	6	7	124	19	17	160	11	291	105
PAAS		650	200	15	19.05	32	14.6	210	5	23	110	55	85	150	50	700	850
平均富集系数		0.50	0.62	0.50	1.32	1.65	1.32	1.84	1.20	1.05	1.05	0.90	0.63	0.95	0.44	1.04	1.98

示意义的 P、Ba、Mn 在 GLS-1、GLS-3、GLS-4 号样品中异常富集，氧化还原敏感元素 Co、Cr、Ni、V 在页岩下段相对富集。

3.3 磁化率特征

该剖面的磁化率变化情况如图 3 所示。低频质量磁化率 xlf 变化范围在 $16.8 \times 10^{-8} \sim 187.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间，平均值为 $33.7 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ；高频质量磁化率 xhf 变化范围在 $16.1 \times 10^{-8} \sim 185.1 \times$

$10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间，平均值为 $33.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。磁化率最大值与最小值相差甚远，整体上低频质量磁化率略高于高频质量磁化率，符合磁化率数据分布的一般规律。样品高频磁化率与低频磁化率呈现较为同步的变化趋势，本研究仅选取更为常用的低频质量磁化率作为环境代用指标。此外，该剖面存在 2 个磁化率峰值，其中 GLS-4 样品为磁化率异常高值，高达 $187.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，而次峰值为 GLS-24 样品，磁化率大小为 $59.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

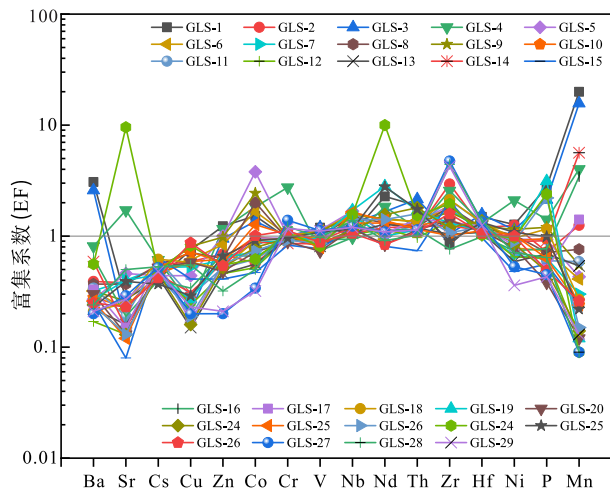


图 2 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩微量元素富集特征
Fig. 2 Enrichment characteristics of selected trace elements of shale from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province

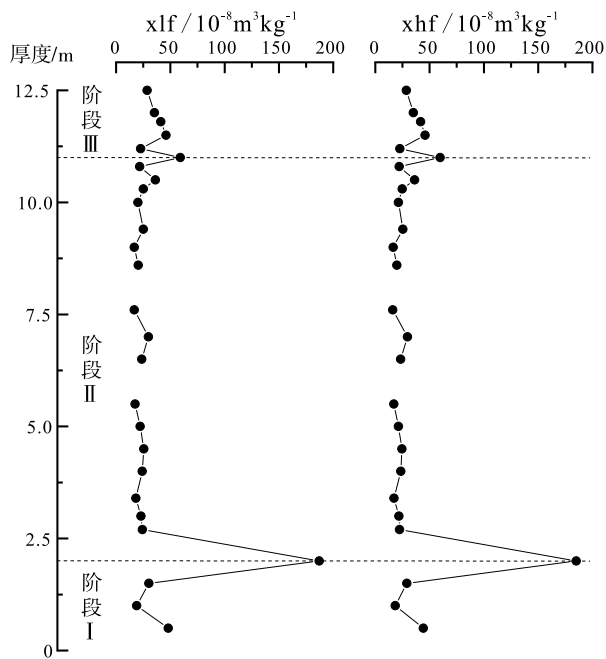


图 3 安徽巢湖石炭系高骊山组剖面磁化率曲线
Fig. 3 Magnetic susceptibility curve of the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province

4 讨论

4.1 构造背景与物源分析

源岩属性是影响沉积岩化学组成的重要因素 (Verma *et al.*, 2017), 其地球化学特征在一定程度上保存了沉积区物源信息, 可作为岩石构造背景和母岩类型的判别指标 (梁小聪等, 2023; 秦何星

等, 2024)。前人将岩石构造背景分为 4 种类型, 分别是大洋岛弧构造背景 (OIA)、大陆岛弧构造背景 (CIA)、活动大陆边缘构造背景 (ACM) 以及被动大陆边缘构造背景 (PM) (Bhatia and Crook, 1986)。源区构造环境的改变, 会造成主量元素中某些元素含量发生较大变化, 如 Roser 和 Korsch (1986) 指出主量元素的 K_2O/Na_2O 与 SiO_2 交会图可以用于区分物源区构造背景, 表现为从岛弧环境向活动大陆边缘以及被动大陆边缘过渡时, SiO_2 含量明显增加。利用 Roser 和 Korsch (1986) 建立的 K_2O/Na_2O vs. SiO_2 图解识别出研究区高骊山组页岩的物源主要形成于被动大陆边缘环境 (图 4-A), 个别位于活动大陆边缘环境。一些低活性的微量元素, 如 La、Th、Sc 等元素稳定性较强, 在水体中的分配系数较低和滞留时间较短, 且不受沉积、成岩过程的影响, 也携带了较多物源区的构造背景信息 (Taylor and McLennan, 1985)。在 La-Th-Sc 判别图解中 (图 4-B), 研究区样品投点相对集中, 多数位于活动大陆边缘与被动大陆边缘范围内, 少数测试结果位于大陆岛弧环境中, 与主量元素判别图解高度相关。GLS-24 号样品因 La 元素含量异常高而偏离投点集中区。综合 K_2O/Na_2O vs. SiO_2 和 La-Th-Sc 图解 (图 4), 认为研究区高骊山组源区构造背景以被动大陆边缘为主。

Th/Sc 与 Zr/Sc 交会图是识别沉积分选和再循环特征的经典图解 (McLennan *et al.*, 1993), 用以判断沉积物化学成分变化和再旋回作用。沉积岩的 Th/Sc 值反映物源区母岩的原始特征, 经历过再循环作用的沉积物 Th/Sc 值通常大于 1.0, 岩石多由古老的上陆壳碎屑组成 (Girty *et al.*, 1994; 许锋等, 2021)。研究区页岩 Th/Sc 值介于 1.13~2.23 之间 (平均值 1.57), 反映物源主要来自古老的上陆壳碎屑; Zr/Sc 值则随着沉积物的改造和锆石的富集而增加。通常沉积岩中 Th/Sc 与 Zr/Sc 的线性正相关趋势反映沉积物主要受母岩岩浆分异的影响, 而研究区样品投点逐渐偏离岩浆分异线 (图 4-C), 锆石富集, 表明高骊山组部分页岩样品经历了沉积再旋回, 投点以长英质岩石为主, 少数偏花岗岩, 且样品成分投点靠近 PAAS 和 UCC。因此, 研究区高骊山组页岩主要受到长英质母岩的成分控制, 且 La/Th vs. Hf 判别图解 (图 4-D) 也

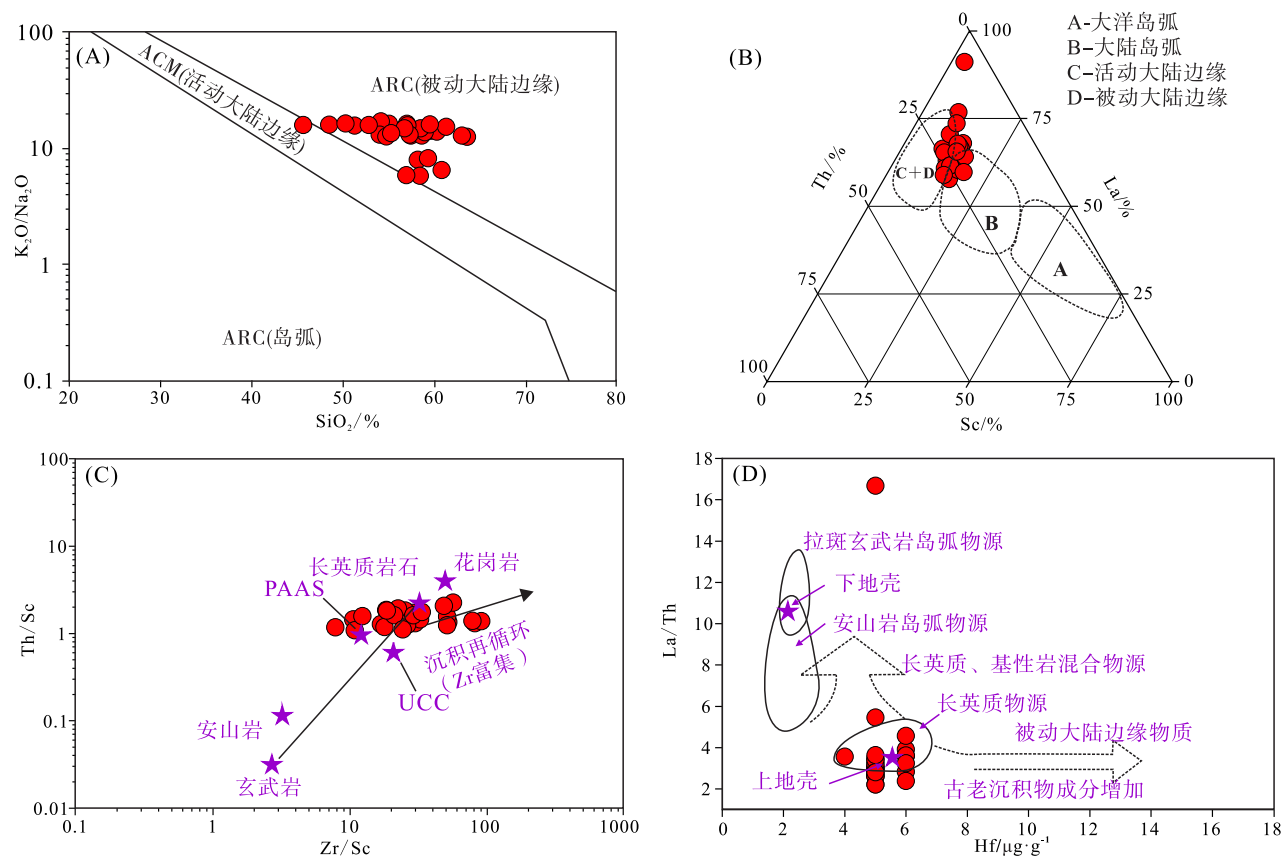


图 4 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩构造背景 (A, B) 及物源性质 (C, D) 判别图 (底图 A-D 分别修改自 Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986; Floyd and Leveridge, 1987; McLennan *et al.*, 1993)

Fig. 4 Discrimination diagrams of tectonic setting (A, B) and provenance characteristics (C, D) for shale samples from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province (base images A–D modified from Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986; Floyd and Leveridge, 1987; McLennan *et al.*, 1993)

证明了这一结论的可靠性。

综上所述,巢湖地区高骊山组页岩构造背景主要为被动大陆边缘,源岩经历了物质再旋回作用,可能来源于再旋回沉积物,推测主要来自古老上地壳长英质岩石,可能还存在部分花岗岩。石炭纪,下扬子地块整体处于被动大陆边缘盆地演化阶段,浅海覆盖湖北东部至江苏等广大区域(田晓旭,2019)。下扬子盆地的主要物源区为南部的皖浙赣古陆和北部的胶南古陆,其深刻影响着研究区石炭纪沉积相的展布。到高骊山组沉积时期,南部物源区上隆,盆地的海域范围缩小,陆源碎屑含量增加,碳酸盐成分显著减少,因此台地相碳酸盐岩被浅海陆棚相碎屑岩所取代(李双应和金福全,1994)。洪浩澜等(2014)依据锆石年代学测试得出高骊山组锆石的年龄分布总体宽泛,多岩浆成因锆石,可能存在再循环地壳

组分, 可与本研究得出的结论相互印证。

4.2 古沉积环境分析

4.2.1 古气候特征

不同元素对气候环境响应的敏感性存在差异, Rb/Sr、Mg/Ca、Ga/Rb、 K_2O/Al_2O_3 等指标均可作为判别古气候提供良好的指示。海洋或湖泊沉积物中的 Rb 和 Sr 主要来源于 2 类过程: 一是物理侵蚀直接输入的陆源碎屑物质, 主要以残渣态 (碎屑矿物) 形式存在; 二是物源区化学风化释放的溶解态物质, 在水体中经物理吸附、化学沉淀和生物吸收等过程沉降, 主要以非残渣态形式 (包括可交换态、碳酸盐结合态等) 赋存 (曾艳等, 2011)。石炭纪下扬子板块位于北半球低纬度地区, 整体为热带温暖湿润气候, 大气降水充沛 (李双应和金福全, 1994)。在这种气候条件下, 研究区经历的频繁海侵—海退过程进一步加剧了化学风化作用。

在百年至千年尺度的长期演化过程中，化学风化相较于物理风化对沉积物地球化学组成的影响更为显著，在调节沉积物 Rb/Sr 值的长期变化趋势中起主导作用 (Liu *et al.*, 2023)。由于 Rb 的离子半径较大，易被黏土矿物吸附而保留在原地或近距离迁移，相比之下离子半径较小的 Sr 则主要以游离态形式被地表水或地下水带走。因此，随着化学风化程度的增强，残留部分的 Rb/Sr 值逐渐增大。相应地，流域内硅酸盐化学风化速率增大将导致更多的 Sr 进入水体，从而使海洋或湖泊沉积物的非残渣态 Rb/Sr 值减小。因此，高 Rb/Sr 值指示干冷气候控制下的弱风化作用，低 Rb/Sr 值指示湿热气候控制下的强风化作用 (金章东等, 2002; 鲜本忠和姜在兴, 2005; 肖静, 2017)。Mg/Ca 值对古气候变化有较高的敏感性，通常认为，干旱气候条件下，蒸发作用增强， Mg^{2+} 相较于 Ca^{2+} 更易富集，因此 Mg/Ca 值随气候干旱程度的增加而升高。需要注意的是，在极度干旱的情况下，Mg/Ca 值的指示意义正好相反 (宋明水, 2005)。

此外，Al、K、Rb 和 Ga 元素含量的波动对气候变化的影响也有所记录。Ga/Rb 值和 K_2O/Al_2O_3 值可以用来评估风化作用强度。Al 和 Ga 与细粒层状硅酸盐有关，富集在与温暖潮湿气候有关的高岭石中 (Hieronymus *et al.*, 2001; Beckmann *et al.*, 2005)，而 Rb 和 K 优先赋存于通常与弱化学风化有关的伊利石中 (Ratcliffe *et al.*, 2010)。Roy 和 Roser (2013) 通过对孟加拉国 Khalaspir 盆地的研究证实高 Ga/Rb 及低 K_2O/Al_2O_3 值反映温暖湿润的气候条件。

沉积物磁化率是记录古环境与古气候变迁的重要代用指标，但其强度受磁性矿物含量、沉积环境及早期成岩作用等多种因素的控制，且在不同沉积介质中的环境意义存在差异 (Arai *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2005)。沉积物中的磁性矿物主要来源于外源碎屑输入和自生成因 2 种途径 (李波等, 2015)。在高骊山组沉积时期，巢湖地区沉积物以陆源碎屑供给为主，自生磁性矿物的影响相对有限，因此陆源碎屑来源的磁性矿物是研究区磁化率的主要贡献者。陆源碎屑输入强度通常与气候条件密切相关 (徐国真等, 2012)，一般在降雨充沛、气候湿润的时期，陆地侵蚀和化学风化作用增强，地表径流的搬运能力增大，更多碎屑物质被输送至

沉积区，导致磁化率升高 (Stage, 2001; Racki *et al.*, 2002)；反之，在降雨减少、气候相对干旱的时期，陆源输入减弱，磁化率相应降低 (Ellwood *et al.*, 2007)。

水体中的 Sr 存在陆源、地壳热液等多种来源，且生物作用和成岩作用也会对 Sr 的富集产生影响，其含量常表现出明显的突变特征 (范柏江等, 2022; 师良等, 2023)。研究区页岩样品中 Sr 存在 2 个极大值 (GLS-4 为 $260 \mu\text{g/g}$, GLS-24 为 $1869 \mu\text{g/g}$)，导致 Rb/Sr 存在 2 个极低值 (GLS-4 为 0.26, GLS-24 为 0.1)，表明可能存在 2 次明显的气候湿热化现象。GLS-4 样品的 Rb/Sr 低值点与 Mg/Ca、 K_2O/Al_2O_3 的低值点、Ga/Rb 的高值点和磁化率的高值点具有良好的对应关系，而 GLS-24 处 Rb/Sr 值则无法进行对比，因此认为 GLS-4 号样品有效记录了沉积环境的变化，GLS-24 样品 Rb/Sr 值可能受到其他因素的干扰而呈现异常低值，推测发生了特殊地质事件或经历了环境的剧烈变化。

结合磁化率 (图 3) 和元素地球化学参数 (图 5) 的变化趋势，巢湖地区高骊山组页岩沉积环境可划分为 3 个演化阶段：阶段 I 对应剖面 0~2.0 m，阶段 II 对应 2.0~10.8 m，阶段 III 对应 10.8~12.5 m。由表 3 和附表 1 可知，阶段 I 的 Ga/Rb 平均值较大，Rb/Sr、Mg/Ca、 K_2O/Al_2O_3 平均值较小，比值变化均较大，表明当时化学风化作用相对较强，干湿变化剧烈，但气候仍相对暖湿，GLS-4 处可能存在极度湿热气候；阶段 II 的 Ga/Rb 值由大变小，Rb/Sr、Mg/Ca、 K_2O/Al_2O_3 则具有相反的变化趋势，表明化学风化作用由相对较强向相对较弱转变，相应地气候由相对暖湿向相对温湿转变。至阶段 II 晚期化学风化作用最弱，可能出现了相对干凉的气候。整体而言，阶段 II 的冷暖与干湿变化较小，仅能识别出小幅度的气候波动。进入阶段 III，Ga/Rb 值明显增加，平均值为剖面最大；Rb/Sr、Mg/Ca、 K_2O/Al_2O_3 呈明显下降趋势，平均值为剖面最小，表明该阶段气温增加，降水量明显增多，化学风化作用最强，为高骊山组沉积时期气候最为暖湿的阶段。磁化率分析结果显示，高骊山组页岩自下而上 3 个阶段样品的磁化率平均值分别为 $71.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $23.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $38.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，若剔除阶段 I 中 GLS-4 层位的异常

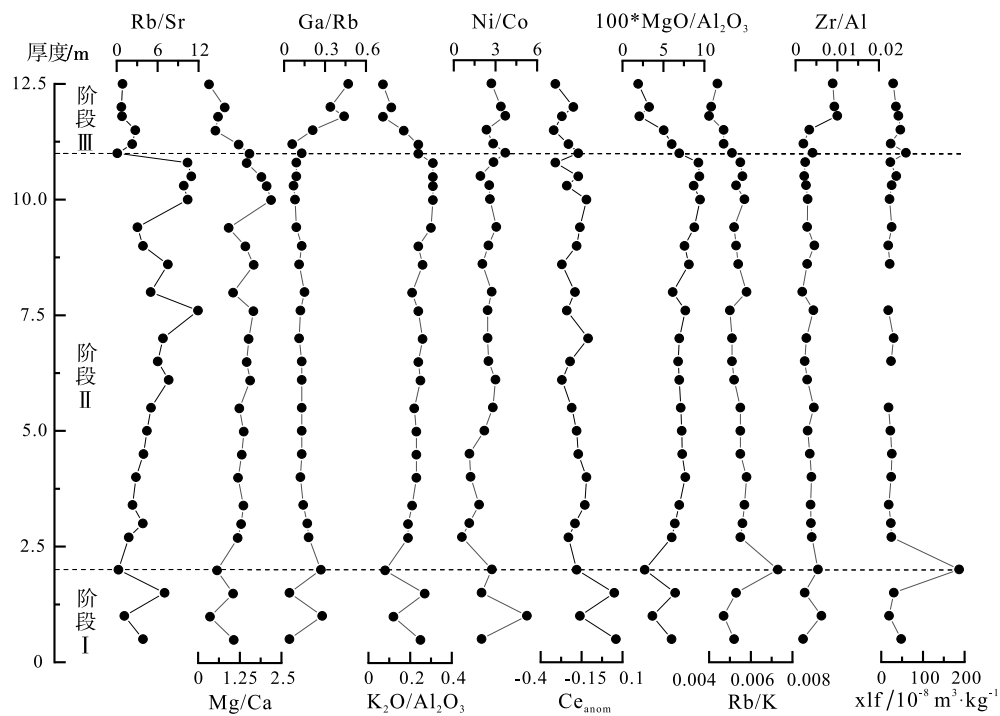


图 5 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩沉积环境指标演化特征

Fig. 5 Evolutionary characteristics of depositional environment index recorded in shales from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province

表 3 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩沉积环境指标对比分析

Table 3 Comparative analysis of depositional environment index for shales from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province													
层段	剖面厚度 /m	古气候				氧化—还原环境		古盐度		水动力		磁化率 /10 ⁻⁸ m ³ ·kg ⁻¹	环境评价
		Rb/Sr	Mg/Ca	Ga/Rb	K ₂ O/Al ₂ O ₃	Ni/Co	Ce _{anom}	100 * MgO/Al ₂ O ₃	Rb/K	Zr/Al	Rb/K		
阶段Ⅲ	10.8~12.5	1.25	0.84	0.28	0.15	3.12	-0.25	4.21	0.0045	0.0063	0.0045	38.86	相对暖湿气候 氧化环境 水体相对较浅 盐度相对较低的 半咸水环境
阶段Ⅱ	2.0~10.8	6.19	1.46	0.12	0.25	2.19	-0.19	7.6	0.0054	0.0031	0.0054	22.99	相对温湿气候 氧化环境 水体相对较深 盐度相对较高的 半咸水环境
阶段Ⅰ	0~2.0	3.07	0.76	0.16	0.18	3.01	-0.06	4.7	0.0056	0.0039	0.0056	32.49 (剔除 GLS-4 后)	相对较暖湿气候 弱还原—弱氧化环境 水体相对较深 盐度相对较高的 半咸水环境

注：所有数值均为每一阶段该项指标的平均值。

高值，则阶段Ⅰ磁化率平均值为 $32.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，仍维持在剖面较高水平。就剔除异常点后的平均值而言，阶段Ⅲ页岩磁化率平均值最大，阶段Ⅰ次之，阶段Ⅱ最小，总体变化趋势与地球化学指标所

揭示的Ⅰ阶段气候相对较暖湿、Ⅱ阶段气候相对温湿和Ⅲ阶段气候相对暖湿的古气候演变趋势相吻合。需要注意的是，阶段Ⅰ中部分磁化率值可能还受到了其他因素的影响，比如成岩作用的改造。当

成岩作用加强时,会产生许多新的顺磁性矿物,如鲕绿泥石、菱铁矿向黄铁矿转化等,导致磁化率增高,使得磁化率记录不完全受古气候的直接控制(杨光等, 2024)。GLS-4 处的极大值一方面可能为异常暖湿背景下搬运较多的磁性矿物所致,但其远偏离于剖面平均值,还可能受到较强的成岩改造作用。

4.2.2 古氧化还原特征

沉积物中的 V、Mo、Ni、Co、Cr、Zn、Ce 等微量元素对沉积环境的氧化还原性质有较好的指示,并且成岩作用过程中几乎不发生迁移,能够较好地保存沉积记录,故通过上述元素在沉积物中的含量或比值可以重建沉积时水体的氧化还原状态(Tribouillard *et al.*, 2006; 吕荐阔等, 2021)。这些氧化还原敏感元素在富氧水体中呈溶解态,而缺氧条件下被还原为难溶价态从海水中析出进入沉积物(蔡倩茹等, 2024),因此氧化还原敏感元素含量的差异可视为对底栖氧化还原条件的不同响应,其富集程度同样用微量元素的富集系数定量表征。海洋中的氧化还原敏感元素主要来源于自生沉积和陆源输入(王昌建, 2023),在应用之前需要进行陆源碎屑影响程度的检验(常华进等, 2009)。Al、Ti 等元素主要来自陆源供应,将其与 V、Mo、Ni、Co、Cr、Zn 与 Al 和 Ti 元素进行相关性分析,结果表明,Al 和所有元素均不存在明显相关性,而 Ti 和 V、Mo 显示中等相关性(相关系数 R^2 分别为 0.637 和 0.496),表示元素受到了陆源碎屑的影响,不能作为沉积环境的氧化还原判断指标。元素比值 Ni/Co 和铈异常指数(Ce_{anom})可以用来反演沉积时水体的氧化还原程度。由于还原环境中 Co 比 Ni 优先活化,进而造成沉积物中 Ni/Co 值增大,其中 Ni/Co > 7.0 表示缺氧环境,5.0 ~ 7.0 为贫氧环境, < 5.0 则为氧化环境(蔡倩茹等, 2024)。 Ce_{anom} 的计算公式为: $Ce_{anom} = \lg [3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$, 且以 PAAS 为标准,规定 $Ce_{anom} > -0.1$ 为 Ce 的富集,指示缺氧、还原的古水体环境,而 $Ce_{anom} < -0.1$ 为 Ce 的亏损或负异常,指示氧化的古水体环境(范德廉等, 2004)。综上,笔者选择 Co_{EF} 、 Ni_{EF} 、 Cr_{EF} 、 Zn_{EF} 、Ni/Co、 Ce_{anom} 等参数反演古氧化还原环境。

由表 4 可知,阶段 I 的 Co_{EF} 、 Ni_{EF} 、 Cr_{EF} 、

表 4 安徽巢湖石炭系高骊山组页岩氧化还原敏感元素富集平均值

Table 4 Average enrichment values of redox-sensitive elements of shales from the Carboniferous Gaolishan Formation in Chaohu area, Anhui Province

层段	剖面厚度/m	Co_{EF}	Ni_{EF}	Cr_{EF}	Zn_{EF}
阶段 III	10.8~12.5	0.62	0.77	1.16	0.41
阶段 II	2.0~10.8	1.14	0.83	0.94	0.61
阶段 I	0~2.0	1.32	1.44	1.41	1.01

Zn_{EF} 均呈现轻微富集特征,富集系数平均值依次为 1.32、1.44、1.41、1.01。同时, Co_{EF} 、 Ni_{EF} 、 Cr_{EF} 、 Zn_{EF} 富集系数自阶段 I 至阶段 III 呈减小的趋势,暗示研究区高骊山组底部沉积环境的还原性相对较强。Ni/Co、 Ce_{anom} 在阶段 I、II 和 III 的平均值分别为 3.01 和 -0.06、2.19 和 -0.19、3.12 和 -0.25,特征值由高向低转变,进一步印证了阶段 I 沉积环境的还原性相较于阶段 II、III 更强。尽管从平均数值上分析,3 个阶段均为氧化环境,但图 5 显示阶段 I 仍有部分样品的 Ni/Co 值与 Ce_{anom} 值落入还原或贫氧环境区间。综合上述分析,认为高骊山组阶段 I 沉积环境表现为弱还原—弱氧化状态,氧化还原特征波动较大;阶段 II 和阶段 III 则以氧化环境为主导,且阶段 III 的氧化性更强。

4.2.3 古水深特征

由于黏土对 Rb、K 的差异性吸附导致 Rb 更易被黏土吸附运移,因此 Rb/K 值常用来指示水深变化,其值越大,水体越深(郑玉龙等, 2015)。此外, Zr 是典型的亲陆元素,通常离岸越近,元素含量越高,而沉积岩中 Zr 元素的分布受 Al 元素的支配,因此 Zr/Al 值能够代表水体深度的变化(刘新宇等, 2021; 何雁兵等, 2024),但意义与 Rb/K 值相反。纵向图(图 5)上, Rb/K、Zr/Al 值具有大致相反的变化趋势,但在 GLS-4 层位处出现较大分歧,表现为 Rb/K 值指示此时水体为剖面最深,而 Zr/Al 值指示此时水体较浅。通过之前的分析可知, Sr 在该层位具有一定的环境指代意义,高 Sr 含量可能是海水入侵造成水体加深的证明。钱峥等(1996)认为高骊山组整体为浅海陆棚沉积,李双应和金福全(1994)认为石炭纪的下扬子海是一个水深几十米的陆表海环境。因此,研究区水体整体应相对较浅。依据元素地球化学特征综合分析,

认为研究区各阶段的古水深演化特征为: 阶段 I, 古水深相对较大, 伴随显著的水深波动变化, 且该阶段后期, 古水深可能达到高骊山组沉积时期的最大深度; 阶段 II, 尽管古水深依然相对较大, 但水深变化趋于稳定, 有小幅度的海平面旋回变化, 总体趋势为先变浅再变深; 阶段 III, 古水深迅速减小, 是高骊山组沉积时期古水深最浅的阶段。

4.2.4 古盐度特征

依据沉积物中 MgO 的亲海性和 Al_2O_3 的亲陆性特征, 将镁铝之间的比值 ($m = 100 * \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$) 广泛用作古盐度的代用指标。具体而言, 当沉积水体由淡水变为海水时, m 值也会随着水体中盐度的增加而变大, 其中 $m < 1$ 指示的是淡水环境, $1 < m < 10$ 指示海陆过渡沉积环境, $10 < m < 500$ 指示海水环境, $m > 500$ 则为陆表海或潟湖沉积环境 (张士三, 1988)。此外, Rb/K 值作为另一个重要的古环境参数, 不仅用于评估古水深, 亦能有效区分古盐度差异, 其中, $\text{Rb}/\text{K} < 0.004$ 为陆相淡水环境, $0.004 < \text{Rb}/\text{K} < 0.006$ 为半咸水环境, $\text{Rb}/\text{K} > 0.006$ 为海相咸水环境 (张启连等, 2016)。高骊山组 3 个沉积阶段的分析结果表明, m 值平均为 4.70、7.60、4.21, Rb/K 平均值为 0.0056、0.0054、0.0045, 均处于海陆过渡相半咸水环境的阈值范围内。进一步分析图 5 所展示的垂向变化特征, 可明显观察到阶段 I 和阶段 II 表现出较高的古盐度特征, 阶段 III 的古盐度相对较低。

4.3 沉积环境演化过程

阶段 I 的古环境代用参数波动显著, 指示该时期古沉积环境发生较大变化 (表 3)。该阶段化学风化作用较为强烈, 气候相对较暖湿, 尤以 GLS-4 层位最为典型, 可能伴随有极端暖湿气候事件。同时, GLS-4 层位可能记录了剖面的最高海水盐度和最大水体深度, 暗示水体深度的增加与海侵活动及海平面的升降有关。整体环境特征表现为弱还原—弱氧化状态, 属于海陆过渡相半咸水环境。古生产力指示元素 P、Ba、Mn 的富集可能与该阶段还原环境有利于有机质的保存有关 (周靖皓等, 2022)。

进入阶段 II, 古环境代用参数的变化趋于平缓, 表明沉积环境相对稳定。该阶段化学风化作用逐渐减弱, 气候由先前的相对较暖湿向相对温湿过

渡, 晚期最为温湿, 可能标志着相对于凉气候的短暂出现。尽管水体深度相较阶段 I 有所减小, 但仍保持较深状态, 这一变化导致沉积环境的氧化性有所增强。总体而言, 该阶段仍维持海陆过渡相半咸水环境, 但可能由于降水量的相对减少, 导致海水盐度较前一阶段有所增加。

至阶段 III, 化学风化作用再次增强, 标志着气候由相对干凉向相对暖湿的显著转变。此阶段水深为研究时段最浅, 这一变化直接对应于海平面的显著下降, 即一次明确的海退事件, 使得沉积环境的氧化性达到最高水平。与此同时, 海水盐度相较阶段 II 有所降低, 但仍属于海陆过渡相的半咸水环境范畴。值得注意的是, GLS-24 层位中微量元素的异常分布特征, 暗示了该层位可能经历了某种特殊地质事件的冲击, 如构造变动或遭遇其他剧烈的环境变化。

5 结论

1) 安徽巢湖地区高骊山组页岩的 Si、Al 和 Fe 含量较高; 大离子亲石元素 Ba、Sr、Cs 相对于 PAAS 具有明显亏损特征; 过渡族元素 Cu、Zn 相对于 PAAS 亏损明显, Cr、V 则表现出弱亏损至弱富集的特征; 高场强元素 Nb、Nd、Th、Zr、Hf 较 PAAS 明显富集; 具有古生产力指示意义的 P、Ba、Mn 在页岩下段尤其富集; 氧化还原敏感元素 Co、Cr、Ni、V 在页岩下段相对富集。

2) 高骊山组页岩沉积时期构造背景以被动大陆边缘为主, 源岩经历了显著的物质再旋回过程, 主要来自古老上地壳中的长英质岩石, 可能还包括部分花岗岩。

3) 基于元素地球化学特征和磁化率变化, 将高骊山组页岩沉积环境划分为 3 个阶段。古气候总体以暖湿为特征, 中期短暂出现相对温湿气候; 古氧化还原环境由早期弱还原—弱氧化向中晚期氧化转变; 古水深由早中期深水逐步过渡至晚期浅水环境; 古水体整体处于海陆过渡相半咸水环境, 早中期盐度相对较高, 晚期显著下降。

4) 磁化率与元素地球化学揭示了安徽巢湖地区高骊山组可能存在具有特殊环境意义的 2 个层位, 分别是 GLS-4 和 GLS-24。地球化学元素特征表明, GLS-4 沉积时期可能出现短暂的极湿热气候, 水深、盐度推测同样达到剖面最高, 但磁化

率指标暗示该层位可能还受到较强的成岩改造作用; GLS-24 沉积时期可能发生了特殊地质事件或经历了环境的剧烈变化。

附件: 本文附件(附表1)详见古地理学报官网(www.gdlib.cn)和中国知网(www.cnki.net)。

参考文献 (References)

- 蔡观强, 郭锋, 刘显太, 隋淑玲. 2006. 碎屑沉积物地球化学: 物源属性、构造环境和影响因素. *地球与环境*, 34(4): 75-83. [Cai G Q, Guo F, Liu X T, Sui S L. 2006. Clastic sediment geochemistry: implications for provenance and tectonic setting and its influential factors. *Earth and Environment*, 34(4): 75-83]
- 蔡倩茹, 王金铎, 张关龙, 宋智华, 王圣柱, 熊峥嵘, 倪胜利. 2024. 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组烃源岩沉积环境分析及物源示踪: 来自泥岩地球化学的证据. *石油实验地质*, 46(1): 146-157. [Cai Q R, Wang J D, Zhang G L, Song Z H, Wang S Z, Xiong Z R, Ni S L. 2024. Research on sedimentary environment and provenance for hydrocarbon source rocks of Upper Carboniferous Batamayneishan Formation in northeastern Junggar Basin: evidences from the geochemistry of mudstones. *Petroleum Geology & Experiment*, 46(1): 146-157]
- 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 黄晶, 张启锐. 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义. *地质论评*, 55(1): 91-99. [Chang H J, Chu X L, Feng L J, Huang J, Zhang Q R. 2009. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies. *Geological Review*, 55(1): 91-99]
- 陈华成, 王云慧, 严幼因. 1979. 江苏及安徽南部早石炭世地层. *地层学杂志*, 3(4): 242-250. [Chen H C, Wang Y H, Yan Y Y. 1979. The Early Carboniferous strata in Jiangsu and the southern part of Anhui. *Journal of Stratigraphy*, 3(4): 242-250]
- 陈曦, 肖玲, 王明瑜, 郝晨曦, 王峰, 唐红南. 2023. 鄂尔多斯盆地西南缘长8油层组物源与古沉积环境恢复: 来自岩石地球化学的证据. *现代地质*, 37(5): 1264-1281. [Chen X, Xiao L, Wang M Y, Hao C X, Wang F, Tang H N. 2023. Reconstruction of provenance and paleo-sedimentary environment of the Chang 8 oil layer in the southwestern margin of the Ordos Basin: evidence from petrogeochemistry. *Geoscience*, 37(5): 1264-1281]
- 段先锋, 吴波, 罗红, 李龙强. 2024. 江汉盆地长湖南东部第四纪沉积物粒度与磁化率特征及其环境意义. *资源环境与工程*, 38(4): 393-399. [Duan X F, Wu B, Luo H, Li L Q. 2024. Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of Quaternary sediments in southeastern Changhu Lake, Jiangnan Basin, and their environmental significance. *Resources Environment & Engineering*, 38(4): 393-399]
- 范柏江, 师良, 杨杰, 苏珊, 马荣, 袁耀利, 曾陈宇. 2022. 鄂尔多斯盆地中部湖相有机质沉积环境特征. *石油与天然气地质*, 43(3): 648-657. [Fan B J, Shi L, Yang J, Su S, Ma R, Yuan Y L, Zeng C Y. 2022. Sedimentary environment of lacustrine organic matter in the central Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(3): 648-657]
- 范德廉, 张焘, 叶杰. 2004. 中国的黑色岩系及其有关矿床. 北京: 科学出版社. [Fan D L, Zhang T, Ye J. 2004. Black Rock Series and Related Deposits in China. Beijing: Science Press]
- 范义姣, 田伟东, 杨军怀, 王树源, 陈梓炫, 马亚鹏, 陆浩, 高福元, 贾佳, 夏敦胜. 2021. 新疆天山地区不同海拔黄土记录的末次冰消期以来的环境演变. *第四纪研究*, 41(5): 1244-1253. [Fan Y J, Tian W D, Yang J H, Wang S Y, Chen Z X, Ma Y P, Lu H, Gao F Y, Jia J, Xia D S. 2021. Environmental changes since last deglaciation recorded in loess at different altitude in Tianshan Mountains, Xinjiang. *Quaternary Sciences*, 41(5): 1244-1253]
- 何雁兵, 雷永昌, 邱欣卫, 肖张波, 郑仰帝, 刘冬青. 2024. 珠江口盆地陆丰南地区文昌组沉积古环境恢复及烃源岩有机质富集主控因素研究. *地质前缘*, 31(2): 359-376. [He Y B, Lei Y C, Qiu X W, Xiao Z B, Zheng Y D, Liu D Q. 2024. Sedimentary paleoenvironment and main controlling factors of organic enrichment in source rocks of the Wenchang Formation in southern Lufeng, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science Frontiers*, 31(2): 359-376]
- 洪浩澜, 赵欢, 张立夫, 贾志海, 李全忠, 周涛发. 2014. 安徽巢湖北部地区早石炭世碎屑锆石年代及其沉积意义分析. *岩石学报*, 30(4): 1087-1096. [Hong H L, Zhao H, Zhang L F, Jia Z H, Li Q Z, Zhou T F. 2014. The Early Carboniferous zircon U-Pb chronology and its sedimentary significance in the northern Chaohu area, Anhui, East China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(4): 1087-1096]
- 侯明金, 齐敦伦, 金义祥. 1998. 安徽巢湖凤凰山石炭纪岩石特征及沉积环境分析. *安徽地质*, 8(3): 32-39. [Hou M J, Qi D L, Jin Y X. 1998. The petrological characteristics and sedimentary environments of Chaohu city, Anhui Province. *Geology of Anhui*, 8(3): 32-39]
- 胡祈, 宋传中. 1986. 安徽巢北地区石炭系碳酸盐岩石学特征及形成环境讨论. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 8(2): 121-134. [Hu Q, Song C Z. 1986. The carbonic marine carbonate rock types character and the sedimentary environment of north-Chaoxian of Anhui Province. *Journal of Hefei University of Technology(Natural Science)*, 8(2): 121-134]
- 纪友亮, 周勇, 王改为, 路琳琳. 2011. 下扬子地区古生界海相碳酸盐岩层序地层发育模式及储层预测. *石油与天然气地质*, 32(5): 724-732, 786. [Ji Y L, Zhou Y, Wang G W, Lu L L. 2011. Sequence stratigraphic models and reservoir prediction of the Paleozoic marine carbonates in the Lower Yangtze area. *Oil & Gas Geology*, 32(5): 724-732, 786]
- 金章东, 王苏民, 沈吉, 王银喜. 2002. 湖泊沉积物 Sr 同位素记录的小冰期. *科学通报*, 47(19): 1512-1516. [Jin Z D, Wang S M, Shen J, Wang Y X. 2002. The little ice age recorded by Sr isotopes in lake sediments. *Chinese Science Bulletin*, 47(19): 1512-1516]
- 李波, 王艳, 颜佳新. 2015. 海相沉积岩磁化率的影响因素. *地质科技情报*, 34(4): 57-64, 69. [Li B, Wang Y, Yan J X. 2015. Influence factors on magnetic susceptibility of marine sedimentary rocks. *Geological Science and Technology Information*, 34(4): 57-64,

- 69]
- 李世毅,姜迪,赵莹莹,胡修棉,史宇坤. 2015. 安徽巢湖地区石炭纪—早二叠世碳酸盐岩微相与沉积环境. 沉积与特提斯地质, 35(1): 3-15. [Li S Y, Jiang D, Zhao Y Y, Hu X M, Shi Y K. 2015. Carboniferous-Early Permian carbonate microfacies and sedimentary environments in the Chaohu region, Anhui. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 3-15]
- 李双应,金福全. 1994. 下扬子盆地石炭纪的古地理. 合肥工业大学学报(自然科学版), 17(3): 167-174. [Li S Y, Jin F Q. 1994. The palaeogeography of the Carboniferous in the Lower Yangtze Basin. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 17(3): 167-174]
- 李双应,金福全,黄其胜,颜怀学. 2000. 下扬子盆地石炭纪层序地层研究及盆地演化. 安徽地质, 10(4): 241-247. [Li S Y, Jin F Q, Huang Q S, Yan H X. 2000. Study of the Carboniferous sequence strata and evolution of the Lower Yangtze Basin. *Geology of Anhui*, 10(4): 241-247]
- 梁小聪,牛杏,胡明毅,黎洋,胡忠贵,蔡全升. 2023. 湘鄂西下寒武统牛蹄塘组黑色页岩发育特征及沉积环境. 岩性油气藏, 35(4): 102-114. [Liang X C, Niu X, Hu M Y, Li Y, Hu Z G, Cai Q S. 2023. Development characteristics and sedimentary environment of black shale of Lower Cambrian Niutitang Formation in western Hunan and Hubei. *Lithologic Reservoirs*, 35(4): 102-114]
- 林春明,黄志诚,刘家润,凌洪飞,张顺,赵彦彦. 2002. 安徽巢湖凤凰山剖面石炭系微相和层序地层特征. 岩石学报, 18(3): 424-432. [Lin C M, Huang Z C, Liu J R, Ling H F, Zhang S, Zhao Y Y. 2002. Carboniferous microfacies and sequence stratigraphy of Fenghuangshan profile in Chaohu of Anhui Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 424-432]
- 刘德政,夏非. 2021. 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 41(5): 210-220. [Liu D Z, Xia F. 2021. Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(5): 210-220]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社. [Liu D S. 1985. *Loess and Environment*. Beijing: Science Press]
- 刘海. 2020. 皖江经济带地热系统成因及开发利用研究. 成都理工大学博士学位论文. [Liu H. 2020. Research on genesis and development of geothermal system in Wanjiang Economic Belt. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 刘新宇,邵磊,史德锋,侍文芳,欧阳杰. 2021. 西沙西科1井元素地球化学特征与海平面升降的关系. 海洋地质前沿, 37(6): 8-17. [Liu X Y, Shao L, Shi D F, Shi W F, Ouyang J. 2021. Element geochemistry of well Xike 1 on the Xisha islands and its bearing on sea level fluctuation. *Marine Geology Frontiers*, 37(6): 8-17]
- 吕荐阔,翟世奎,于增慧,刘晓锋,王轲. 2021. 氧化还原敏感性元素在沉积环境判别中的应用研究进展. 海洋科学, 45(12): 108-124. [Lü J K, Zhai S K, Yu Z H, Liu X F, Wang K. 2021. Application and influence factors of redox-sensitive elements in a sedimentary environment. *Marine Sciences*, 45(12): 108-124]
- 逢淑伊,操应长,梁超. 2019. 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段岩相特征及沉积环境: 以樊页1井为例. 石油与天然气地质, 40(4): 799-809. [Pang S Y, Cao Y C, Liang C. 2019. Lithofacies characteristics and sedimentary environment of Es4U and Es3L: a case study of Well FY1 in Dongying sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(4): 799-809]
- 钱铮,李淳,马在平. 1996. 安徽巢北地区下石炭统高骊山组风暴沉积. 石油大学学报(自然科学版), 20(5): 8-11. [Qian Z, Li C, Ma Z P. 1996. Tempestites of Gaolishan Group of Carboniferous Series in Chaobei area of Anhui Province. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 20(5): 8-11]
- 秦何星,陈雷,卢畅,胡月,熊敏,谭秀成,计玉冰,陈鑫,王高翔. 2024. 上扬子南缘五峰组—龙马溪组页岩地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示. 地质论评, 70(4): 1314-1334. [Qin H X, Chen L, Lu C, Hu Y, Xiong M, Tan X C, Ji Y B, Chen X, Wang G X. 2024. Geochemical characteristics of the Wufeng-Longmaxi Formations shale in the southern margin of the Upper Yangtze area: implications for weathering, provenance and tectonic setting. *Geological Review*, 70(4): 1314-1334]
- 沈炎彬. 1983. 安徽下石炭统发现的臂头虾类. 古生物学报, 22(6): 663-668, 728. [Shen Y B. 1983. A new pygocephalomorph genus (*Eumalacostraca*) of Lower Carboniferous from Anhui. *Acta Palaeontologica Sinica*, 22(6): 663-668, 728]
- 师良,范柏江,王霞,李亚婷,黄飞飞,戴欣洋. 2023. 鄂尔多斯盆地长9页岩烃源岩的元素组成及其古沉积环境. 现代地质, 37(5): 1254-1263. [Shi L, Fan B J, Wang X, Li Y T, Huang F F, Dai X Y. 2023. Element composition and sedimentary environment of Chang 9 shale source rocks in the Ordos Basin. *Geoscience*, 37(5): 1254-1263]
- 宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征. 矿物岩石, 25(1): 67-73. [Song M S. 2005. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying Depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 67-73]
- 隋欣如. 2017. 巢北地区下石炭统沉积环境与古生态恢复. 中国矿业大学硕士学位论文. [Sui X R. 2017. The research of sedimentary environment and ancient ecological restoration of Lower Carboniferous in northern Chaohu. Masteral dissertation of China University of Mining and Technology]
- 田晓旭. 2019. 华南石炭系中间界线沉积特征与沉积地球化学记录. 中国科学技术大学硕士学位论文. [Tian X X. 2019. Sedimentary characteristics and geochemical records of the mid-Carboniferous boundary interval in South China. Masteral dissertation of University of Science and Technology of China]
- 王昌建. 2023. 贵州早寒武世不同沉积环境中富稀土磷矿床稀土富集机理研究. 贵州大学硕士学位论文. [Wang C J. 2023. Study on enrichment mechanism of rare earth elements in phosphorus deposits in different sedimentary environments of Early Cambrian in Guizhou. Masteral dissertation of Guizhou University]

- 王心源, 吴立, 张广胜, 王官勇, 韩伟光. 2008. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义. 地理科学, 28(4): 548-553. [Wang X Y, Wu L, Zhang G S, Wang G Y, Han W G. 2008. Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lake sediments since Holocene in Chaohu lake, Anhui Province. *Scientia Geographica Sinica*, 28(4): 548-553]
- 夏广胜, 徐家聪. 1980. 安徽巢湖地区早石炭世地层. 地层学杂志, 4(2): 87-95. [Xia G S, Xu J C. 1980. The Early Carboniferous strata in the Chaohu area, Anhui Province. *Journal of Stratigraphy*, 4(2): 87-95]
- 夏军, 徐家聪. 1991. 安徽南部石炭纪的构造与古地理. 岩相古地理, 11(4): 17-26. [Xia J, Xu J C. 1991. Tectonics and palaeogeography of southern Anhui during the Carboniferous. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 11(4): 17-26]
- 鲜本忠, 姜在兴. 2005. 黄河三角洲地区全新世环境演化及海平面变化. 海洋地质与第四纪地质, 25(3): 1-7. [Xian B Z, Jiang Z X. 2005. Environment evolution and eustatic change of Holocene in the Yellow River Delta. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 25(3): 1-7]
- 肖春风, 孙启顺, 陈亮, 殷征欣, 陈龙, 官玉龙, 章钰桢, 姜兆霞. 2023. 南海西北部 16 kaBP 以来沉积物的环境磁学特征及其物源指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 43(1): 13-26. [Xiao C F, Sun Q S, Chen L, Yin Z X, Chen L, Guan Y L, Zhang Y Z, Jiang Z X. 2023. Environmental magnetic characteristics and provenance significance of sediments in NW South China Sea since the past 16 ka. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 43(1): 13-26]
- 肖静. 2017. 济阳坳陷古近纪古湖泊特征分析. 河南理工大学硕士学位论文. [Xiao J. 2017. Analysis on the characteristics of paleo-lake in Paleogene in Jiyang Depression. Masteral dissertation of Henan Polytechnic University]
- 许锋, 马明, 吴承美, 徐田录, 李维锋. 2021. 新疆西准噶尔上石炭统哈拉阿拉特组泥岩物源及源区构造背景. 天然气地球科学, 32(10): 1489-1500. [Xu F, Ma M, Wu C M, Xu T L, Li W F. 2021. Provenance and tectonic setting of mudstone of the Upper Carboniferous Hala'alat Formation mudstone in West Junggar, Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Natural Gas Geoscience*, 32(10): 1489-1500]
- 徐国真, 冯凡斌, 雷勇, 沈俊, 冯庆来. 2012. 贵州安顺新民二叠系—三叠系界线剖面磁化率变化及古气候环境意义. 沉积学报, 30(5): 817-824. [Xu G Z, Feng F B, Lei Y, Shen J, Feng Q L. 2012. Variations of the magnetic susceptibility across the P-T boundary at Xinmin section in Anshun, Guizhou and their paleoclimatic implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(5): 817-824]
- 严幼因. 1987. 下扬子区下石炭统. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 8(2): 3-26. [Yan Y Y. 1987. Lower Carboniferous in the Lower Yangtze region. *Bulletin of Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 8(2): 3-26]
- 杨光, 高祥成, 李永忠, 李秀国, 郭昭江, 赵杰杰, 王辉, 郑胜利, 董福奇. 2024. 岩心数字化技术研究与应用. 油气地质与采收率, 31(4): 217-226. [Yang G, Gao X C, Li Y Z, Li X G, Guo Z J, Zhao J J, Wang H, Zheng S L, Dong F Q. 2024. Research and application of digital core technologies. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(4): 217-226]
- 杨晓强, 李华梅. 1999. 泥河湾盆地沉积物磁化率及粒度参数对沉积环境的响应. 沉积学报, 17(S1): 763-768. [Yang X Q, Li H M. 1999. The sediment susceptibility and grain-size profile respond to change of depositional environment in Nihewan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(S1): 763-768]
- 阴江宁, 邢树文, 肖克炎. 2016. 长江中下游 Fe-Cu-Au-Pb-Zn 多金属成矿带主要地质成矿特征及潜力分析. 地质学报, 90(7): 1525-1536. [Yin J N, Xing S W, Xiao K Y. 2016. Metallogenic characteristics and resource potential analysis of the Middle-Lower Yangtze River Fe-Cu-Au-Pb-Zn metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 90(7): 1525-1536]
- 曾建, 张成成, 孙雪瑞, 代子豪, 刘通, 陈健. 2024. 巢湖高骊山组页岩有机质富集与沉积环境特征. 安徽理工大学学报(自然科学版), 44(1): 70-77. [Zeng J, Zhang C C, Sun X R, Dai Z H, Liu T, Chen J. 2024. Organic matter enrichment and depositional environment characteristics of Carboniferous Gaolishan Formation shale in Chaohu area of Anhui Province. *Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science)*, 44(1): 70-77]
- 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 李健. 2011. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候/古环境研究中的应用与展望. 地球科学进展, 26(8): 805-810. [Zeng Y, Chen J A, Zhu Z J, Li J. 2011. Advance and perspective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleoclimate/paleoenvironment. *Advances in Earth Science*, 26(8): 805-810]
- 张启连, 梁裕平, 余文超, 杜远生. 2016. 桂西地区二叠系合山组铝土岩的沉积环境. 古地理学报, 18(4): 595-604. [Zhang Q L, Liang Y P, Yu W C, Du Y S. 2016. Sedimentary environment of allites in the Permian Heshan Formation in western Guangxi. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 18(4): 595-604]
- 张士三. 1988. 沉积岩层中镁铝含量比的研究及其应用. 矿物岩石地球化学通讯, 7(2): 112-113. [Zhang S S. 1988. Research on the ratio of magnesium to aluminum in sedimentary rock layers and its applications. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 7(2): 112-113]
- 赵欢. 2016. 安徽含山、巢湖地区下石炭统高骊山组稀土元素特征及其与环境关系研究. 合肥工业大学硕士学位论文. [Zhao H. 2016. REE characteristics and its relationship with environment of Lower Carboniferous Gaolishan Formation in Hanshan and Chaohu area, Anhui. Masteral dissertation of Hefei University of Technology]
- 郑玉龙, 马志强, 王佰长, 袁国礼, 覃建勋. 2015. 黑龙江省柳树河盆地始新统八虎力组油页岩元素地球化学特征及沉积环境. 古地理学报, 17(5): 689-698. [Zheng Y L, Ma Z Q, Wang B C, Yuan G L, Qin J X. 2015. Geochemistry characteristics and sedimentary environment of oil shale from the Eocene Bahuli Formation in Liushuhe Basin, Heilongjiang Province. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 17(5): 689-698]

- 周靖皓, 鲜本忠, 张建国, 钟骑, 陈鹏. 2022. 高频旋回地层约束下的湖相页岩有机质富集规律: 以东营凹陷古近系沙三下亚段为例. *古地理学报*, 24(4): 759–770. [Zhou J H, Xian B Z, Zhang J G, Zhong Q, Chen P. 2022. Organic matter enrichment law of lacustrine shale constrained by high resolution cyclostratigraphy: a case study from the lower sub-member of Member 3 of Paleogene Shahejie Formation, Dongying sag. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 24(4): 759–770]
- 朱筱敏. 2010. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M. 2010. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- Arai K, Sakai H, Konishi K. 1997. High-resolution rock-magnetic variability in shallow marine sediment: a sensitive paleoclimatic metro-nome. *Sedimentary Geology*, 110(1–2): 7–23.
- Arthur M A, Sageman B B. 1994. Marine black shales: depositional mechanisms and environments of ancient deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22: 499–551.
- Beckmann B, Flögel S, Hofmann P, Schulz M, Wagner T. 2005. Orbital forcing of Cretaceous river discharge in tropical Africa and ocean response. *Nature*, 437(7056): 241–244.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193.
- Ellwood B B, Brett C E, MacDonald W D. 2007. Magnetostratigraphy susceptibility of the Upper Ordovician Kope Formation, northern Kentucky. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 243(1–2): 42–54.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531–542.
- Girty G H, Hanson A D, Knaack C, Johnson D. 1994. Provenance determined by REE, Th, and Sc analyses of metasedimentary rocks, Boyden Cave roof pendant, central Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 64(1b): 68–73.
- Hieronymus B, Kotschoubey B, Boulègue J. 2001. Gallium behaviour in some contrasting lateritic profiles from Cameroon and Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, 72(2): 147–163.
- Liu L P, Yu K K, Li A Z, Zhang C, Wang L, Liu X X, Lan J H. 2023. Weathering intensity response to climate change on decadal scales: a record of Rb/Sr ratios from Chaonaqiu Lake sediments, western Chinese Loess Plateau. *Water*, 15(10): 1890.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of American Special Papers*, 284: 21–40.
- Morford J L, Emerson S. 1999. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(11–12): 1735–1750.
- Racki G, Racka M, Matyja H, Devleeschouwer X. 2002. The Frasnian/Famennian boundary interval in the South Polish-Moravian shelf basins: integrated event-stratigraphical approach. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181(1–3): 251–297.
- Ratcliffe K T, Wright A M, Montgomery P, Palfrey A, Vonk A, Vermeulen J, Barrett M. 2010. Application of chemostratigraphy to the Mungaroo Formation, the Gorgon field, offshore northwest Australia. *The AAPG Journal*, 50(1): 371–388.
- Roser B P, Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Roy D K, Roser B P. 2013. Climatic control on the composition of Carboniferous-Permian Gondwana sediments, Khalaspir Basin, Bangladesh. *Gondwana Research*, 23(3): 1163–1171.
- Stage M. 2001. Magnetic susceptibility as carrier of a climatic signal in chalk. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(1–2): 17–27.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical Geology*, 232(1–2): 12–32.
- Verma S P, Rivera-Gómez M A, Díaz-González L, Pandarinath K, Amezcua-Valdez A, Rosales-Rivera M, Verma S K, Quiroz-Ruiz A, Armstrong-Altrin J S. 2017. Multidimensional classification of magma types for altered igneous rocks and application to their tectonomagmatic discrimination and igneous provenance of siliciclastic sediments. *Lithos*, 278–281: 321–330.
- Verosub K L, Roberts A P. 1995. Environmental magnetism: past, present, and future. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B2): 2175–2192.
- Wu H C, Zhang S H, Jiang G Q, Li H Y. 2005. Magnetic susceptibility variations of the Ediacaran cap carbonates in the Yangtze Platform and their implications for paleoclimate. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 23: 291–298.

(责任编辑 张西娟)