DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511050138

鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组5号煤层地球化学特征及沉积环境指示——以S14井为例

黄道军[1,2]，王康乐[1,2]，张 辉[1,2]，孙 闻[1,2]，史云鹤[1,2]，
梁 晨[1,2]，王怀厂[1,2]，殷亮亮[1,2]

（1. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，陕西 西安 710018；2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室，陕西 西安 710018）

摘要：以鄂尔多斯盆地东部S14井山西组5号煤层为研究对象，结合岩心描述、工业分析与元素地球化学测试结果，对煤层的垂向岩性分带及其沉积-成煤演化进行了系统刻画。结果表明，5号煤层自下而上可划分为煤-泥岩互层段、夹矸发育段和厚层块状煤段，整体呈现向上水体变浅并逐渐向沼泽泥炭堆积环境过渡的沉积序列。多项地球化学指标显示，成煤期环境总体以还原条件为主，局部阶段出现短期氧化作用与盐度升高的间歇扰动。稀土元素总量偏低且以轻稀土富集为特征，指示陆源碎屑输入占主导，并反映沉积水体处于交换受限的水文地球化学条件。综合岩性分带与元素地球化学证据，认为研究区5号煤层形成于三角洲平原浅水-沼泽成煤体系，可为区域成煤环境重建与对比提供依据。

关键词：深部煤层；稀土元素；沉积环境；地球化学特征；山西组；二叠系；鄂尔多斯盆地

中图分类号：P618.1；TE122.1 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8527(2026)01-0140-14

Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Implications of the No. 5 Coal Seam in the Permian Shanxi Formation, Eastern Ordos Basin: A Case Study from Well S14

HUANG Daojun[1,2], WANG Kangle[1,2], ZHANG Hui[1,2], SUN Wen[1,2], SHI Yunhe[1,2],
LIANG Chen[1,2], WANG Huaichang[1,2], YIN Liangliang[1,2]

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*;
2. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*)

Abstract: Taking the No. 5 coal seam of the Shanxi Formation in Well S14, northeastern Ordos Basin, as the study object, this paper systematically characterizes the vertical lithologic zoning and the depositional-coal-forming evolution of the coal seam by integrating core descriptions, proximate analysis, and elemental geochemical data. The results indicate that, from bottom to top, the No. 5 coal seam can be subdivided into a coal-mudstone interbedded interval, a parting-bearing interval, and a thick massive coal interval. Overall, it records a depositional succession characterized by progressive shallowing of the water body and a gradual transition toward a swamp peat-accumulation environment. Multiple geochemical proxies suggest that the coal-

收稿日期：2025-11-05；**修回日期**：2026-12-06；**编辑**：董立。

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC2909400）；中国石油天然气股份有限公司重大专项课题“深地煤岩气富集规律与有利区优选”项目（2023ZZ18YJ03）。

作者简介：黄道军，男，高级工程师，1979年出生，主要从事石油地质综合研究。Email：hdj_cq@petroChina.com.cn。

引用格式：黄道军，王康乐，张辉，等. 鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组5号煤层地球化学特征及沉积环境指示——以S14井为例［J］. 现代地质，2026，40（1）：140-153. DOI：10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511050138.

HUANG Daojun, WANG Kangle, ZHANG Hui, et al. Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Implications of the No. 5 Coal Seam in the Permian Shanxi Formation, Eastern Ordos Basin: A Case Study from Well S14［J］. GEOSCIENCE, 2026, 40(1): 140-153. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.202511050138.

forming environment was predominantly reducing, with intermittent short-term oxidative conditions and salinity increases during certain stages. The total rare earth element (REE) contents are relatively low and display enrichment in light REEs, indicating the dominance of terrigenous detrital input and reflecting hydrologically restricted depositional conditions. Integrating lithologic zoning with elemental geochemical evidence, it is inferred that the No. 5 coal seam in the study area formed within a shallow-water to swamp coal-forming system on a delta plain, providing a basis for regional reconstruction and correlation of coal-forming environments.

Key words: deep coalbed; rare earth element; sedimentary environment; geochemical characteristics; Shanxi Formation; Permian; Ordos Basin

0　引　言

随着我国非常规天然气开发的深入，煤层气已成为保障国家能源安全与实现“双碳”战略目标的重要接替能源之一[1-3]。近年来，浅部煤层气资源开发趋于成熟，但深部煤层（埋深 > 1500 m）因蕴藏量巨大、封闭性好、开发潜力高，正成为新的战略增储重点[4-6]。然而，深部煤层普遍具有高应力、高温、高压与低渗透等特征，产气受控于煤体孔隙结构、矿物组成及有机质演化程度等多重因素，开发难度显著高于浅部煤层[7-8]。因此，厘清深部煤层的沉积环境特征及其对煤质的控制机理，已成为深部煤层勘探开发的关键科学问题[9]。

沉积环境是控制煤层物质组成与成煤特征的关键因素。古水体条件、物源供给强度以及氧化还原状态的差异，直接影响有机质的保存效率、矿物组合类型及微量元素的分布特征[10-11]。由于主微量及稀土元素具有较高的地球化学稳定性和较低的迁移性，它们常被视为沉积环境变化的重要示踪指标，可用于重建成煤时期的古水体盐度、氧化还原条件及物源属性等[12-13]。已有研究表明，煤中稀土元素（REE）的分布模式不仅反映沉积体系的开放程度和陆源物质输入强度，也能指示成煤水体的封闭性差异，对古环境演化的判识具有重要意义[14]。同时，煤中主微量元素之间的耦合关系可揭示物质来源与沉积演化过程，为储层特征与沉积环境的综合评价提供地球化学约束。

鄂尔多斯盆地是我国煤层气勘探与开发最重要的含煤沉积盆地之一，发育石炭系—二叠系多套含煤地层，其中以本溪组和山西组为主要含煤层系[15]。前人对本溪组8号煤的地球化学特征研究较为系统，认为该煤层形成于海陆过渡相环境，受海水咸化及火山物质输入的影响较为显著[16-17]。相比之下，山西组5号煤形成于海退后的陆相沉积体系，沉积过程主要受陆源碎屑供给和淡水环境控制；该套煤层厚度较大、分布稳定，是鄂尔多斯盆地的重要产气层位[18-20]。然而，现对深部5号煤层的系统地球化学特征及其沉积环境演化规律仍缺乏深入认识。近年来，随着鄂尔多斯盆地钻探工作的深入，多口山西组5号煤层连续岩心资料的获取为开展深部陆相煤层的沉积地球化学研究提供了基础。

基于此，本文以鄂尔多斯盆地东部S14井山西组5号煤层为研究对象，结合岩心观察、工业分析及主量、微量和稀土元素测试结果，系统探讨煤层内部的地球化学特征及沉积环境指示意义。研究旨在通过多指标联合分析，揭示深部陆相煤层沉积体系的演化规律及其对煤质与储层特征的控制机制，为鄂尔多斯盆地深部煤层的地质评价与资源开发提供科学支撑。

1　区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北陆块西部，是我国北方典型的克拉通内大型沉积盆地，形态近似矩形，四周受断裂与隆起带约束。东侧为吕梁山隆起，西缘邻接六盘山褶皱带，南界为渭河地堑，北部与河套地堑相连（图1a）[21]。盆地构造格局在中晚三叠世奠定，喜马拉雅期趋于整体稳定，呈现“东高西低、中部缓倾”的基本形态。研究区位于盆地东北部的靖边—绥德地区，隶属伊陕斜坡。该区构造平缓，断裂活动弱，地层分布稳定，是鄂尔多斯盆地煤系地层发育最完整的地区之一[22]。

根据前人对测井、钻井及岩心资料的综合研究结果，鄂尔多斯盆地东部靖边—绥德地区山西组沉积特征较为稳定，整体上为一套陆相浅水沉积体系（图1b）。该时期受华北陆块整体抬升与海退作用影响，海水基本退出盆地，沉积环境逐渐

由滨浅海过渡为三角洲与冲积平原体系。地层自下而上发育砂岩、泥岩与多层煤互层，显示明显的旋回性特征[23]。沉积时期气候温暖湿润，植被繁茂，泥炭沼泽广泛发育，为煤层形成提供了有利条件。其中，5号煤层形成于山西组早期浅水三角洲平原环境之上，水体相对封闭、沉积速率较快，聚煤条件优越，煤层厚度较大、分布稳定，是研究区煤系地层中具有代表性的煤层[24-26]。

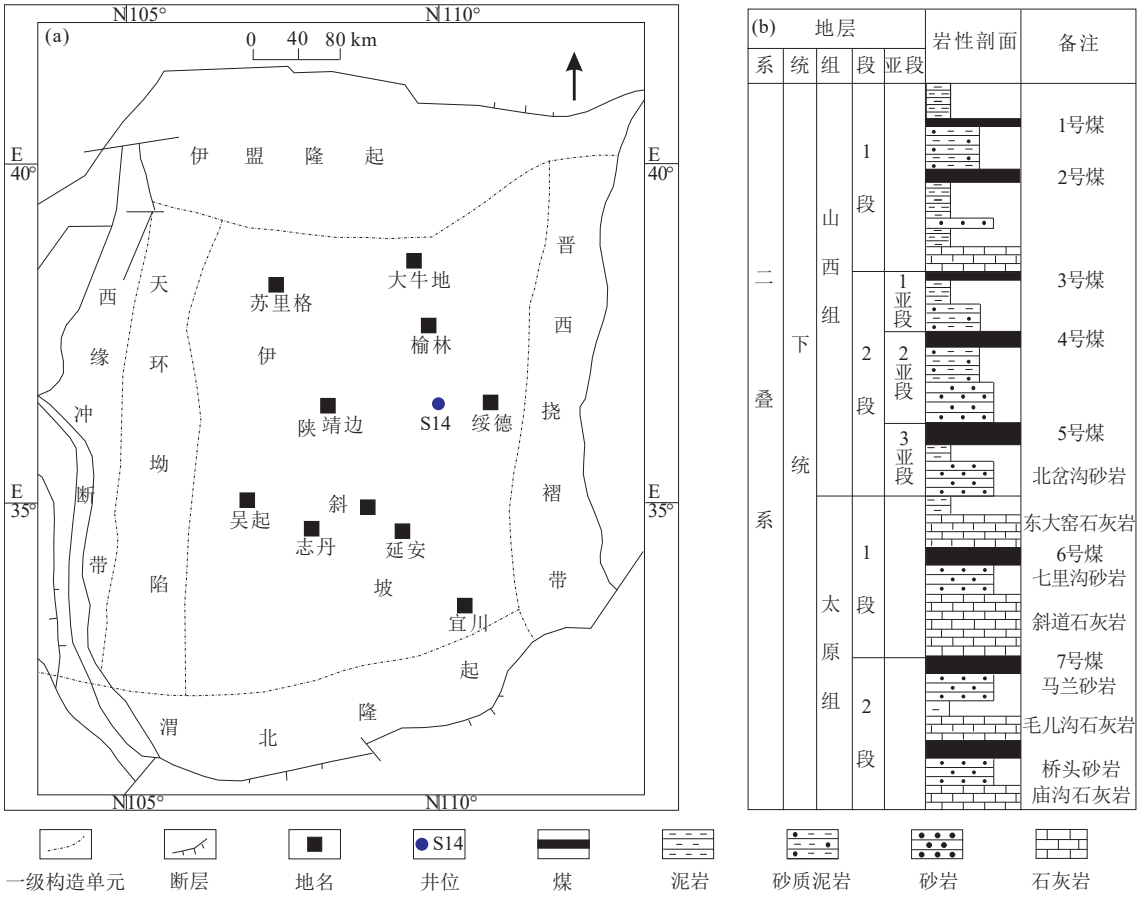


图1 鄂尔多斯盆地区域构造展布图（a）和二叠系地层综合柱状图（b）（据范立勇等[27]修改）

Fig. 1 Regional tectonic framework map of the Ordos Basin (a) and comprehensive Permian stratigraphic column (b) (modified after Fan et al.[27])

2 样品与方法

2.1 宏观煤岩特征

根据S14井5号煤层钻井与岩心资料，该煤层总厚约为7.1 m，整体以原生结构煤为主（图2）。宏观煤岩类型以半暗煤和半亮煤为主，辅以少量光亮煤与暗淡煤。煤层中可见多层夹矸（0.01～0.70 m），其中2317.4 m附近出现一层厚度约0.7 m的泥岩夹矸。依据岩性组合、夹矸特征及煤结构差异，可将5号煤层划分为上、中、下三段（图2）。下段（>2317.4 m）以泥岩与暗淡煤互层为主，泥质夹矸层较厚，多层夹矸厚度超过0.3 m，煤层相对较薄。煤体致密、裂隙不发育，色泽暗淡，反映沉积时期水体较深、还原性强、沉积速率较慢，属于低能滞水环境下形成的煤-泥岩沉积段。中段（2315.2～2317.4 m）为煤-夹矸互层带，夹矸最为发育，共出现6层泥岩夹层（单层厚度0.03～0.22 m），以半亮煤和半暗煤为主，局部夹薄层光亮煤。该段岩性变化频繁，泥质夹层明显增多，反映沉积环境不稳定、水体咸淡波动频繁，为沼泽-浅水三角洲平原过渡阶段的特点。上段（<2315.2 m）为厚煤层段，以半亮煤-半暗煤互层为主，仅含一层约0.1 m的薄夹矸。煤体裂隙较发育，结构相对疏松，光泽较强，表明沉积时期水体变浅、通气性增强，植被繁茂、泥炭堆积旺盛，属于沼泽相强聚煤阶段。总体来看，S14井5号煤层自下而上呈现出“深水低能煤-泥岩互层段、水体波动频繁的夹矸富集段、浅水厚煤段”

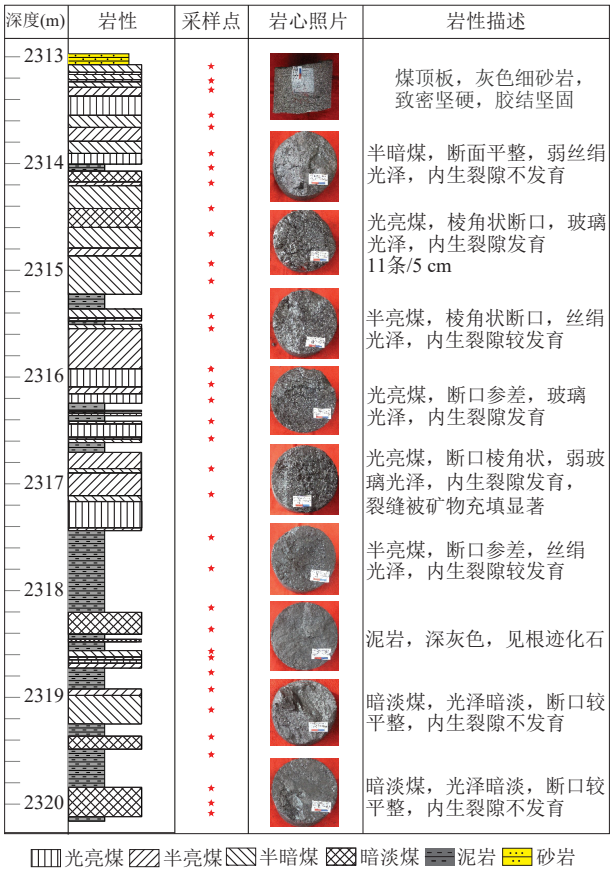


图2　鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤宏观特征综合柱状图

Fig. 2　Integrated macroscopic lithologic column showing the coal macroscopic characteristics of the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin

的垂向演化序列，反映了沉积环境由相对深水向浅水沼泽化方向的逐步演变过程。

2.2　取样与测试

沿S14井5号煤层垂向自上而下共采集35个煤及夹矸样品，覆盖不同煤类型及夹矸层位。所有样品经自然干燥、破碎、均匀化后进行系统测试，包括工业分析、主量元素、微量元素及稀土元素分析。工业分析按《GB/T 212—2008煤的工业分析方法》执行，测定水分、灰分、挥发分及固定碳含量。主微量与稀土元素测试采用《SN/T 1599—2005煤灰中主要成分的测定—电感耦合等离子体原子发射光谱法》，使用Thermo Fisher iCAP 7000电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES），实验条件为室温24 ℃，相对湿度48%。分析前样品经950 ℃灰化后酸溶，后以电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS）进行测试，分析误差小于5%。

3　结果与分析

3.1　工业分析

根据5号煤层样品的工业分析结果（表1），煤样品与夹矸样品在水分、灰分、挥发分及固定碳含量方面差异明显。煤空气干燥基水分（M_{ad}）为0.46% ~ 0.86%，平均为0.68%；灰分（A_d）为9.45% ~ 39.19%，平均为20.52%；干燥无灰基挥发分（V_{daf}）为14.92% ~ 20.79%，平均为17.19%；固定碳（F_{Cd}）为48.17% ~ 76.61%，平均为65.92%。总体上，煤表现为低水分、中灰、低挥发分的特征。相比之下，夹矸样品普遍具有高灰分（A_d为38.32% ~ 88.20%，平均为63.23%）与低固定碳（F_{Cd}为2.74% ~ 47.53%，平均为23.45%）的特征，表明其有机质含量显著偏低、无机矿物组分占比更高，反映煤层形成过程中存在阶段性的碎屑物质输入。煤的灰分与挥发分变化范围相对较窄，而夹矸样品波动幅度大，显示有机质堆积与无机组分加入在垂向上具有交替变化的特点。该差异与岩心中多层夹矸发育的观察结果相一致，提示成煤期沉积环境可能经历了间歇性的物源供给增强或局部水动力条件变化。

3.2　地球化学特征

3.2.1　主量元素

煤样品主量元素分析结果表明，氧化物组成以SiO_2和Al_2O_3为主（表3），二者合计占比均超过80%。其中，SiO_2含量为32.21% ~ 57.64%，平均为44.83%，Al_2O_3含量为30.74% ~ 46.64%，平均为38.13%。“高SiO_2-Al_2O_3”的组合特征表明样品以硅铝质碎屑/黏土矿物成分为主，反映沉积物质来源以陆源输入占主导。TiO_2含量次之，范围为0.39% ~ 9.71%，平均为2.23%。Ti通常以难迁移的无机相（如金红石等含Ti矿物或黏土矿物中的Ti）为主要载体，其相对较高的含量进一步指示无机碎屑组分贡献明显。CaO、MgO、K_2O和Na_2O等其他氧化物整体含量较低，平均值均不足1.5%。煤样的Al_2O_3/SiO_2比值接近高岭石理论值（0.85），与煤系沉积中黏土矿物（尤其高岭石）发育的常见特征相一致，说明煤样中硅铝质组分主要由黏土矿物体系控制[28]。

夹矸样品同样以SiO_2和Al_2O_3为主，二者合计占比亦超过80%。其中，SiO_2含量为30.54% ~

表1 鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤层工业分析结果（%）

Table 1 Proximate analysis results of the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin (%)

样号	M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_d	样号	M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_d
S14-1	0.55	12.65	16.09	73.29	S14-19	1.06	55.16	26.67	32.88
S14-2	0.58	22.50	17.79	63.71	S14-20	0.69	11.75	14.92	75.08
S14-3	0.68	12.55	16.82	72.74	S14-21	0.73	14.97	16.15	71.30
S14-4	0.63	24.33	18.29	61.83	S14-22	0.65	73.54	75.81	6.40
S14-5	0.53	15.42	17.34	69.91	S14-23	1.02	88.20	76.80	2.74
S14-6	0.60	17.65	17.02	68.34	S14-24	0.64	27.12	18.05	59.72
S14-7	1.04	73.67	52.76	12.44	S14-25	0.72	43.63	23.28	43.24
S14-8	0.68	34.98	19.48	52.36	S14-26	0.71	29.19	18.93	57.41
S14-9	0.69	16.62	16.43	69.68	S14-27	0.72	9.45	15.39	76.61
S14-10	0.71	17.02	15.31	70.28	S14-28	0.73	38.32	22.95	47.53
S14-11	0.64	25.33	17.36	61.70	S14-29	0.76	13.42	17.05	71.82
S14-12	0.52	20.88	18.47	64.51	S14-30	0.74	24.32	16.89	62.90
S14-13	0.66	51.62	27.32	35.16	S14-31	0.55	30.59	17.88	57.00
S14-14	0.46	11.62	15.77	74.44	S14-32	0.80	59.86	32.75	27.00
S14-15	0.70	10.23	16.19	75.24	S14-33	0.84	26.99	17.53	60.22
S14-16	0.86	13.76	16.07	72.38	S14-34	0.85	30.39	17.66	57.32
S14-17	0.82	73.76	41.58	15.33	S14-35	0.63	74.53	53.81	11.76
S14-18	0.83	39.19	20.79	48.17					

注：M_{ad}表示空气干燥基下的水分含量；A_d表示干燥基下的灰分含量；V_{daf}表示干燥无灰基下的挥发分含量；FC_d表示干燥基下的固定碳含量。

51.06%，平均为45.80%，Al_2O_3含量为16.44% ~ 45.07%，平均为35.88%，总体仍表现为硅铝质组分占优势。与煤样相比，夹矸中CaO含量变化幅度更大（0 ~ 20.71%，平均为2.28%），局部样品（如S14-22）表现出显著富钙特征，Fe_2O_3含量也普遍高于煤样。CaO与Fe_2O_3的这种“局部增强且波动更大”现象，说明夹矸层位除硅铝质碎屑/黏土矿物外，还叠加了不等量的碳酸盐或含铁矿物组分，使其无机相组成较煤样更为复杂、离散性更强。

3.2.2 微量元素

煤样品的微量元素含量分布特征见图3（a）。结果表明，各元素含量差异较为显著，其中Sr、Ba、Zr、Ti与Pb的平均含量相对较高，分别为105.816、131.307、671.112、6886.722和91.790 μg/g，其余多数元素的平均含量均低于50 μg/g。Ti与Zr为典型难迁移元素，常以陆源碎屑无机相（含Ti矿物、锆石等耐风化重矿物）为主要载体，因此其相对高含量与主量元素所反映的“硅铝质碎屑/黏土输入占主导”特征具有一致性。

夹矸样品的微量元素组成总体与煤一致（图3（b）），Sr、Ba、Zr与Ti仍处于相对高值区间，平均含量分别为92.779、124.960、533.041和6847.498 μg/g。相比煤，夹矸中Mn含量明显升高（平均为116.323 μg/g）。结合夹矸中有机质含量偏低、无机相占比高的基本属性，Mn的相对升高更可能体现其在无机相中的富集特征（例如与碳酸盐或铁锰质无机组分伴生），与夹矸无机相贡献增强的整体特征相吻合[29]。

为进一步分析煤与夹矸中微量元素的相对富集水平，采用Dai等[7]提出的富集系数（CC，Concentration Coefficient）进行计算，即CC为煤中元素含量与世界煤中该元素含量的比值。CC值介于0.5 ~ 2为正常，2 ~ 5为轻度富集，5 ~ 10为中度富集，>10为高度富集，而<0.5则为亏损。煤与夹矸样品的微量元素富集系数如图4所示，二者在总体富集模式上相似，但在部分元素上存在差异。

煤中Zr、Hf、Nb与Ta的CC值均大于10，表现为显著高度富集。这些元素多属于高场强元素或难迁移元素，主要受无机碎屑端元控制，常赋存于耐风化矿物相（如锆石、铌钽矿、金红石等），也可能与酸性火山灰或长英质碎屑物质输入有关[30-31]。U、Ti、V、Be、In等元素的CC值介于5 ~ 10，呈中度富集特征。轻度富集元素主要包括Li、Cr、Co、Cu、Zn、Mo、Ga、W、Sc等，这类元素多以无机相为重要载体，在煤系沉积物

表2　鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤层主量元素（%）

Table 2　Major element compositions (%) of the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin

样号	岩性	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
S14-1	半暗煤	51.72	33.64	0.20	2.72	0.45	0.40	0.76	0.10	0.15
S14-2	半亮煤	47.37	37.93	0.28	0.72	0.38	0.40	0.95	0.12	0.19
S14-3	半暗煤	41.43	38.59	0.16	0.84	0.43	0.41	0.35	0.07	0.17
S14-4	半暗煤	47.63	38.88	0.36	2.28	0.40	0.42	0.42	0.15	0.20
S14-5	半暗煤	45.00	41.80	0.32	2.47	0.27	0.44	0.44	0.12	0.26
S14-6	光亮煤	47.20	40.25	1.11	1.54	1.10	0.51	0.19	0.22	0.33
S14-7	夹矸	50.45	45.07	0.60	1.22	0.20	0.44	0.10	0.06	0.37
S14-8	半亮煤	50.40	43.23	0.37	1.33	0.24	0.39	0.13	0.03	0.36
S14-9	半暗煤	40.07	39.10	2.07	0.39	4.76	5.93	0.14	0.18	0.54
S14-10	暗淡煤	42.88	37.01	3.73	1.81	1.61	0.46	0.36	0.60	0.65
S14-11	半暗煤	57.64	46.64	1.03	1.89	0.34	0.71	0.43	0.22	0.46
S14-12	半亮煤	49.65	42.06	0.48	1.62	0.39	0.52	0.35	0.13	0.50
S14-13	夹矸	46.95	38.48	4.50	2.07	0.36	0.47	0.41	0.65	0.49
S14-14	半亮煤	45.47	40.02	5.65	0.76	0.50	0.95	0.07	0.71	0.47
S14-15	光亮煤	34.78	34.74	6.26	0.40	5.87	0.50	0.03	1.04	0.85
S14-16	半亮煤	32.21	31.33	4.41	1.11	0.58	1.28	0.09	0.61	0.91
S14-17	夹矸	51.06	36.34	1.19	1.44	0.25	0.46	4.23	0.95	0.61
S14-18	半亮煤	47.98	35.65	1.49	1.18	0.06	0.46	2.74	0.75	0.41
S14-19	夹矸	48.32	35.61	0.92	1.18	0.07	0.58	3.24	0.76	0.50
S14-20	半亮煤	46.28	40.51	4.90	0.88	1.06	0.77	0.08	0.70	0.59
S14-21	光亮煤	43.98	37.82	1.51	9.71	0.36	0.53	0.23	0.27	0.25
S14-22	泥岩	30.54	16.44	2.21	0.92	20.71	0.46	1.20	1.70	0.27
S14-23	泥岩	49.25	29.83	0.96	1.66	0.78	0.39	2.12	0.53	0.38
S14-24	暗淡煤	40.15	35.08	5.67	1.54	0.12	0.50	0.17	0.07	0.19
S14-25	夹矸	40.86	39.26	0.73	2.04	0.08	0.48	0.34	0.17	0.28
S14-26	半亮煤	39.59	41.89	0.54	2.17	0.15	0.47	0.17	0.09	0.29
S14-27	半亮煤	42.59	30.74	1.91	3.51	7.44	0.49	0.50	0.80	0.24
S14-28	夹矸	47.47	39.95	2.37	0.57	0.07	0.47	0.38	0.86	0.24
S14-29	半亮煤	46.55	36.92	2.74	0.79	1.28	5.93	0.24	0.53	0.22
S14-30	暗淡煤	39.02	35.70	0.55	7.55	1.44	9.22	0.66	0.11	0.29
S14-31	暗淡煤	48.64	40.10	0.74	3.19	0.10	0.84	0.88	0.33	0.25
S14-32	夹矸	45.56	38.97	0.86	2.05	0.00	0.45	0.47	0.40	0.31
S14-33	半暗煤	40.70	38.98	0.66	3.37	0.31	3.29	0.90	0.38	0.30
S14-34	半暗煤	51.92	34.72	0.85	1.93	0.34	0.48	1.58	0.61	0.33
S14-35	夹矸	47.56	38.82	0.71	1.11	0.32	0.40	0.51	0.20	0.23

中常与黏土矿物及铁质氧化物等组分具有较强关联，其轻度富集与陆源碎屑-黏土输入增强的特征相协调。相对亏损的元素主要为Mn、As、Bi、Th。夹矸样品的CC分布与煤总体一致，Zr、Nb、Hf、Ta仍表现为高度富集，说明高场强元素在煤与夹矸中的分布受共同的无机碎屑端元控制。与煤相比，夹矸中Rb、Cs、Li含量整体偏高（多为轻度富集），这与夹矸中黏土矿物相对富集的特点一致，碱金属元素易在层状硅酸盐矿物的层间/边缘位点发生阳离子交换与选择性吸附，从而形成相对富集[32]。此外，夹矸中Co、Ni、Cu、Mo等元素富集程度略低，这一差异与夹矸有机质含量偏低、以无机相为主的特征相匹配，这类过渡金属在煤中往往更易与有机质/硫化物等相伴生或富集，因此在夹矸层位其相对富集程度可能随有机质贡献降低而减弱[33]。

表3 鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤层稀土元素含量（μg/g）

Table 3 REE concentrations (μg/g) of the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
S14-1	15.70	25.70	3.40	12.00	2.21	0.79	1.61	0.31	1.60	0.50	0.81	0.14	0.74	0.20
S14-2	8.38	18.60	1.80	6.36	1.05	0.45	0.77	0.12	0.46	0.12	0.17	0.04	0.15	0.04
S14-3	2.05	4.30	0.44	1.59	0.29	0.18	0.25	0.05	0.36	0.12	0.25	0.05	0.25	0.07
S14-4	20.56	37.75	3.67	12.62	2.08	0.84	1.60	0.24	1.05	0.27	0.37	0.06	0.34	0.09
S14-5	14.30	28.60	2.86	9.62	1.49	0.61	1.16	0.17	0.62	0.14	0.19	0.04	0.16	0.04
S14-6	1.95	6.58	0.46	1.75	0.35	0.19	0.30	0.05	0.27	0.08	0.16	0.04	0.13	0.04
S14-7	0.37	0.84	0.09	0.36	0.12	0.06	0.08	0.02	0.11	0.03	0.07	0.02	0.08	0.02
S14-8	0.69	2.08	0.24	1.02	0.20	0.11	0.14	0.03	0.19	0.05	0.11	0.03	0.10	0.03
S14-9	0.94	1.48	0.22	0.80	0.19	0.33	0.18	0.05	0.32	0.11	0.21	0.05	0.24	0.06
S14-10	0.17	1.54	0.16	0.74	0.18	0.08	0.12	0.02	0.10	0.02	0.05	0.02	0.06	0.02
S14-11	1.39	3.10	0.64	3.15	0.88	0.24	0.43	0.08	0.40	0.12	0.20	0.05	0.21	0.06
S14-12	2.13	10.70	1.90	9.56	2.58	0.57	1.30	0.26	1.35	0.42	0.75	0.14	0.81	0.21
S14-13	1.62	5.24	0.92	4.39	1.05	0.30	0.58	0.10	0.46	0.13	0.20	0.05	0.21	0.05
S14-14	0.54	4.39	0.11	0.41	0.11	0.08	0.12	0.02	0.13	0.04	0.08	0.02	0.08	0.02
S14-15	10.07	95.61	4.70	20.53	4.38	1.53	4.28	0.63	3.22	1.01	1.72	0.30	1.67	0.46
S14-16	3.06	27.03	0.69	2.52	0.53	0.25	0.82	0.13	0.76	0.27	0.49	0.09	0.51	0.12
S14-17	2.36	6.54	0.64	2.41	0.39	0.23	0.29	0.05	0.25	0.07	0.16	0.04	0.16	0.04
S14-18	2.85	7.04	0.89	3.58	0.74	0.25	0.44	0.07	0.30	0.08	0.13	0.03	0.13	0.04
S14-19	9.00	19.80	5.52	26.60	5.71	1.67	2.84	0.44	1.35	0.26	0.31	0.05	0.25	0.08
S14-20	0.82	6.09	0.23	0.93	0.22	0.13	0.24	0.05	0.32	0.12	0.21	0.05	0.22	0.06
S14-21	7.17	19.50	2.38	10.20	2.16	0.75	1.39	0.23	1.12	0.33	0.56	0.11	0.59	0.17
S14-22	38.42	78.46	8.84	38.67	9.29	7.21	7.01	1.28	7.80	1.80	2.78	0.44	2.34	0.65
S14-23	5.69	10.83	1.17	3.84	0.58	0.28	0.43	0.06	0.26	0.06	0.11	0.03	0.10	0.02
S14-24	1.41	3.30	0.35	1.49	0.35	0.16	0.28	0.08	0.58	0.21	0.40	0.08	0.48	0.13
S14-25	2.27	4.69	0.94	4.47	0.90	0.38	0.53	0.08	0.42	0.13	0.26	0.06	0.25	0.06
S14-26	3.06	8.99	1.65	7.90	1.49	0.50	0.72	0.10	0.40	0.11	0.22	0.05	0.24	0.06
S14-27	18.20	56.80	7.03	29.60	6.21	2.64	4.35	0.91	6.48	1.93	3.26	0.70	3.83	1.21
S14-28	5.21	14.80	1.71	6.18	1.04	0.29	0.74	0.13	0.64	0.18	0.30	0.05	0.26	0.07
S14-29	6.09	19.67	1.14	4.26	0.96	0.42	0.88	0.19	1.15	0.37	0.67	0.12	0.69	0.17
S14-30	1.92	10.59	0.35	1.41	0.32	0.18	0.49	0.09	0.63	0.22	0.40	0.08	0.44	0.10
S14-31	2.66	12.77	0.58	1.94	0.36	0.28	0.43	0.08	0.52	0.20	0.40	0.08	0.47	0.12
S14-32	4.61	11.20	1.07	3.47	0.59	0.20	0.53	0.10	0.58	0.17	0.29	0.06	0.27	0.07
S14-33	1.94	12.50	0.32	1.07	0.23	0.15	0.36	0.06	0.36	0.12	0.23	0.05	0.21	0.04
S14-34	0.30	1.39	0.09	0.31	0.10	0.06	0.04	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0
S14-35	0.25	0.72	0.12	0.52	0.13	0.05	0.05	0.01	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01	0

3.2.3 稀土元素

根据稀土元素的原子序数特征，轻稀土元素（LREE）包括La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu，重稀土元素（HREE）包括Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu，稀土元素总量为二者之和。为表征不同组分之间的分馏程度和异常特征，计算了常用的稀土元素比值与异常参数，包括LREE/HREE、La_N/Yb_N、La_N/Sm_N、Gd_N/Yb_N、δEu、δCe等。其中，LREE/HREE和La_N/Yb_N用于反映轻、重稀土之间的分馏关系；La_N/Sm_N和Gd_N/Yb_N分别表征轻稀土和重稀土内部的分馏程度[34]。

S14井5号煤及夹矸样品稀土元素含量与统计结果见表3和表4。煤REE含量为2.50 ~ 177.00 μg/g，平均为38.68 μg/g，低于中国煤稀土元素平均值（135.89 μg/g）[7]，亦低于世界煤平均值（60.7 μg/g）[35]，表明本区煤中稀土元素总体含量偏低。LREE含量为2.25 ~ 136.83 μg/g，平均为31.10 μg/g；HREE含量为0.25 ~ 56.52 μg/g，平均

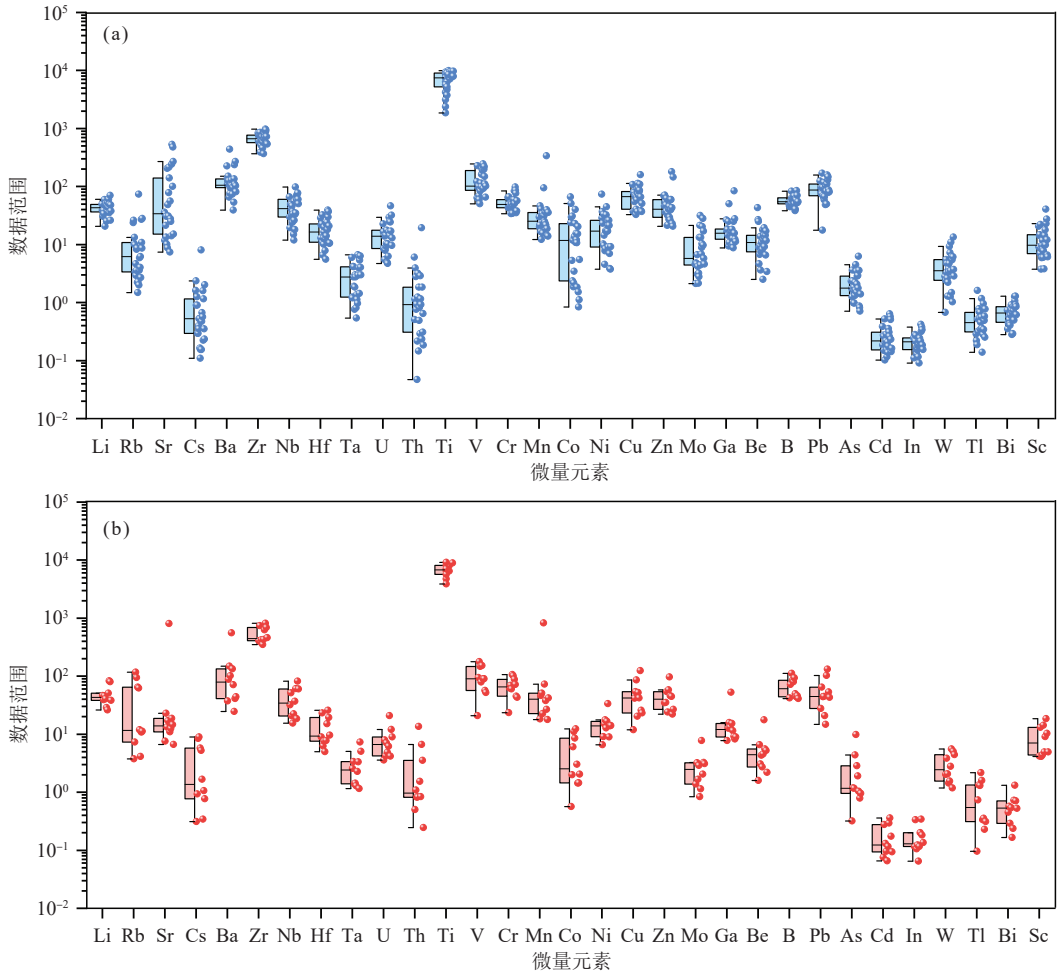


图3　鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤层中煤（a）和夹矸（b）微量元素含量

Fig. 3　Trace-element concentrations of coal （a） and parting （b） from the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin

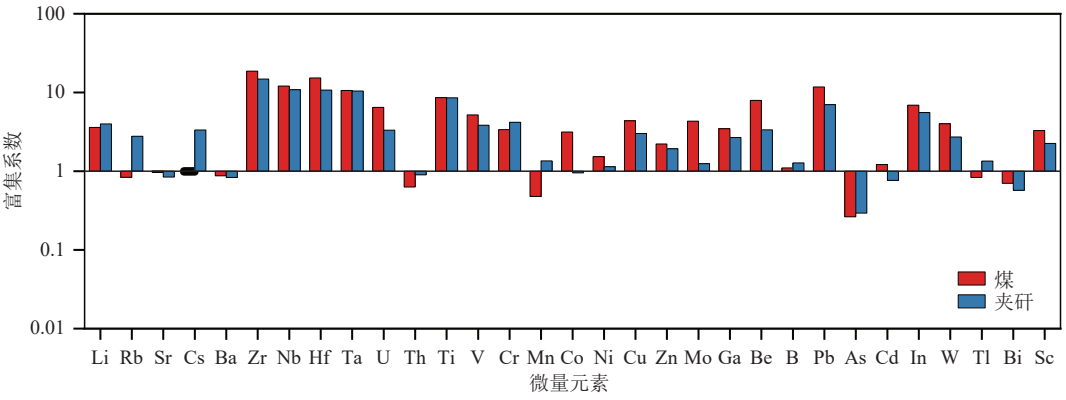


图4　鄂尔多斯盆地S14井山西组5号煤层微量元素富集系数

Fig. 4　Concentration coefficient of trace elements in the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14, Ordos Basin

为7.58 μg/g；LREE/HREE为1.33 ~ 13.90，平均为5.15，表现为轻稀土相对富集。La_N/Yb_N介于0.19 ~ 6.72，平均为1.15，整体接近1；La_N/Sm_N为0.12 ~ 1.49，平均为0.74；Gd_N/Yb_N为0.34 ~ 4.29，平均为1.25，均指示轻、重稀土及其内部的分馏总体不强。δEu为1.47 ~ 8.46，平均为2.68，表现为正异常；δCe为0.74 ~ 4.25，平均为1.80，整体呈弱正异常。综合配分形态与分馏参数，煤样以轻稀土相对富集且分馏较弱为主要特征，与硅铝质碎屑/黏土矿物端元控制下的稀土配分型式具有一致性。

表 4 鄂尔多斯盆地 S14 井山西组 5 号煤层稀土元素地球化学参数

Table 4 Geochemical parameters of rare earth elements for the Shanxi Formation No. 5 coal seam in Well S14

样号	REE(μg/g)	LREE(μg/g)	HREE(μg/g)	LREE/HREE	La_N/Yb_N	La_N/Sm_N	Gd_N/Yb_N	δEu	δCe
S14-1	65.71	59.80	5.91	10.13	1.55	1.07	1.25	1.98	0.80
S14-2	38.51	36.64	1.87	19.64	4.13	1.20	3.00	2.36	1.09
S14-3	10.26	8.85	1.41	6.28	0.60	1.05	0.58	3.06	1.03
S14-4	81.52	77.51	4.01	19.32	4.47	1.49	2.74	2.16	0.99
S14-5	59.99	57.48	2.52	22.84	6.72	1.44	4.29	2.18	1.02
S14-6	12.35	11.28	1.06	10.61	1.06	0.83	1.28	2.79	1.59
S14-7	2.25	1.84	0.41	4.46	0.36	0.47	0.58	2.87	1.04
S14-8	5.01	4.33	0.68	6.40	0.50	0.52	0.78	3.05	1.16
S14-9	5.18	3.97	1.21	3.28	0.29	0.74	0.43	8.46	0.74
S14-10	3.29	2.87	0.41	6.95	0.22	0.14	1.22	2.69	2.13
S14-11	10.93	9.39	1.54	6.08	0.49	0.24	1.18	1.81	0.75
S14-12	32.68	27.44	5.24	5.24	0.19	0.12	0.92	1.47	1.21
S14-13	15.31	13.52	1.79	7.56	0.57	0.23	1.61	1.78	0.98
S14-14	6.16	5.64	0.52	10.83	0.48	0.75	0.86	3.37	4.06
S14-15	150.13	136.83	13.30	10.29	0.44	0.35	1.48	1.67	3.17
S14-16	37.26	34.08	3.18	10.73	0.44	0.86	0.94	1.78	4.25
S14-17	13.62	12.56	1.06	11.85	1.09	0.91	1.06	3.22	1.22
S14-18	16.58	15.35	1.23	12.49	1.56	0.58	1.88	2.07	1.01
S14-19	73.88	68.30	5.58	12.25	2.68	0.24	6.67	1.95	0.64
S14-20	9.70	8.43	1.28	6.61	0.27	0.57	0.63	2.72	3.17
S14-21	46.67	42.16	4.51	9.35	0.89	0.50	1.36	2.03	1.08
S14-22	204.98	180.88	24.09	7.51	1.20	0.62	1.73	4.20	0.97
S14-23	23.45	22.39	1.06	21.11	4.38	1.48	2.58	2.62	0.96
S14-24	9.27	7.05	2.22	3.17	0.22	0.60	0.34	2.43	1.08
S14-25	15.43	13.65	1.78	7.65	0.67	0.38	1.23	2.62	0.73
S14-26	25.49	23.59	1.89	12.45	0.95	0.31	1.77	2.28	0.91
S14-27	143.16	120.48	22.68	5.31	0.35	0.44	0.66	2.39	1.15
S14-28	31.60	29.23	2.37	12.32	1.46	0.75	1.63	1.58	1.13
S14-29	36.77	32.55	4.22	7.70	0.65	0.95	0.74	2.16	1.70
S14-30	17.22	14.77	2.46	6.01	0.32	0.91	0.65	2.12	2.94
S14-31	20.89	18.59	2.29	8.11	0.42	1.10	0.53	3.30	2.35
S14-32	23.20	21.14	2.06	10.25	1.25	1.17	1.13	1.70	1.15
S14-33	17.63	16.20	1.42	11.38	0.68	1.29	1.00	2.41	3.60
S14-34	2.41	2.25	0.16	14.35	0.82	0.44	0.84	4.21	1.94
S14-35	1.92	1.79	0.13	13.73	1.53	0.28	2.23	2.88	0.96

夹矸样品 REE 含量为 1.92 ~ 204.98 μg/g，平均为 40.56 μg/g，与煤整体接近。LREE 含量为 1.79 ~ 180.88 μg/g，平均为 36.53 μg/g；HREE 含量为 0.13 ~ 24.09 μg/g，平均为 4.03 μg/g；LREE/HREE 为 4.46 ~ 21.11，平均为 10.87，显示夹矸轻稀土富集程度较煤更强。La_N/Yb_N 为 0.36 ~ 4.38，平均为 1.52；La_N/Sm_N 为 0.23 ~ 1.48，平均为 0.65；Gd_N/Yb_N 为 0.58 ~ 6.67，平均为 2.05，表明分馏总体仍不强。δEu 为 1.58 ~ 4.20，平均为 2.54，为轻微正异常；δCe 为 0.64 ~ 1.22，平均为 0.98，接近无异常。总体上，夹矸稀土元素配分特征与煤一致，均以轻稀土相对富集、重稀土分馏不明显为主，但夹矸轻稀土富集程度略强，这与夹矸中无机相（尤其黏土矿物）占比更高、稀土更多赋存于无机组分的总体特征相一致。

4 讨 论

4.1 古盐度

前人研究指出，Li、Sr、Ni 和 Ga 等环境敏感元素可作为判识成煤水体盐度变化的重要地球化学指标[19-20]。咸水环境中 Li 质量分数一般高于 150 μg/g，Sr 高于 800 μg/g，Ni 高于 40 μg/g，而 Ga

低于 8 μg/g。在淡水环境中，Li 小于 90 μg/g，Sr 小于 500 μg/g，Ni 小于 25 μg/g，Ga 大于 17 μg/g。研究区 5 号煤及夹矸样品中 Li 含量为 20.46 ~ 82.50 μg/g，平均为 44.43 μg/g，显著低于咸水阈值 150 μg/g，表明沉积时期水体总体为低盐度体系。Sr 含量变化幅度较大，介于 0.68 ~ 803.67 μg/g，平均为 102.09 μg/g，仅个别样品接近 800 μg/g 阈值，显示研究区总体以淡水为主，局部可能受到短暂的咸化事件影响。Ni 含量范围为 3.76 ~ 74.00 μg/g，平均为 18.45 μg/g，其中大部分样品低于 40 μg/g，仅少数样品超过该值，表明沉积期可能存在阶段性或局部的轻微咸化条件，也可能与有机质富集引起的 Ni 吸附效应有关。Ga 含量为 7.73 ~ 84.24 μg/g，平均为 18.82 μg/g，除极少数样品略低于 8 μg/g 外，其余均显著高于该阈值，进一步表明研究区总体处于淡水沉积环境。综上所述，研究区 5 号煤层水体整体以淡水为主，局部受短暂的咸化事件影响，该特征与区域沉积体系中浅水沼泽–三角洲平原的沉积背景相吻合。

Sr/Ba 比值是识别古水体盐度的重要地球化学指标。一般而言，在低盐度水体中，Sr 和 Ba 均以可溶离子形式存在，但 Ba 的迁移性较弱。当海水或咸水进入淡水体系后，Ba^{2+}容易与 SO_4^{2-}反应生成难溶的硫酸钡沉淀，而 Sr 仍保持较高溶解度，导致 Sr/Ba 比值随水体盐度升高而增大。因此，Sr/Ba 比值可反映水体咸化程度：> 1 表示咸水环境，< 0.6 代表淡水环境，0.6 ~ 1 之间则指示半咸水或过渡性环境[36]。如图 5 所示为 Sr/Ba 比值随深度变化曲线。研究区 5 号煤及夹矸样品 Sr/Ba 比值整体介于 0 ~ 2.5 之间，显示沉积水体处于淡水–半咸水环境。纵向上，Sr/Ba 比值变化规律较为明确，可划分为三个阶段，与岩性分带特征具有较好对应关系。下段（约 2317.4 m 以下）Sr/Ba 比值波动幅度较大，局部样品值超过 1，表明沉积时期水体盐度变化频繁，淡水与半咸水环境交替出现，反映该阶段沉积体系受外源物质补给或短暂咸化事件的影响较强，环境处于相对不稳定状态。其中 2317 ~ 2318 m 层段对应一套厚层泥岩夹矸，其 Sr/Ba 比值显著升高，指示沉积水体盐度上升，可能与盆地蒸发作用增强或外来盐源输入有关。该段煤类型以半暗煤至暗淡煤为主，夹矸层较厚，整体反映出低能、还原性较强的沉积环境特征。中段（约 2315.2 ~ 2317.4 m）整体 Sr/Ba 比值偏低，但在层段顶部出现明显升高，显示水体经历了一次短暂的咸化过程。该段岩性变化频繁，夹矸发育，表明沉积环境处于淡水与半咸水条件交替的过渡阶段，水体盐度与能量条件波动较为显著。上段（约 2315.2 m 以上）Sr/Ba 比值稳定低于 0.6，整体处于淡水范围，指示沉积时期水体较为封闭，沉积条件稳定，有利于植物有机质的堆积与保存。总体而言，Sr/Ba 比值的垂向变化揭示出研究区 5 号煤层沉积环境的周期性波动特征。成煤期以淡水环境为主，存在多次局部短期咸化事件，但未改变沉积体系整体的淡水特征。

4.2　氧化–还原条件

本研究利用 U/Th 与 V/（V+Ni）两组指标对研究区 5 号煤层的沉积氧化还原环境进行判别（图 5）。U 元素在氧化条件下易迁移，而在还原环境中易被还原并固定于沉积物中，而 Th 元素在不同氧化还原条件下的溶解度变化不大，因此 U/Th 值的增大通常指示还原性增强。V 和 Ni 同样具有还原敏感性，其中 V 在还原条件下优先以五价态被还原沉淀，而 Ni 迁移性较强，故 V/（V+Ni）比值高通常代表较强还原环境[37]。

从剖面分布特征（图 5）来看，U/Th 整体高于 1.25，V/（V+Ni）多在 0.77 以上，表明研究区 5 号煤层沉积时期总体处于还原环境，仅局部层位表现出短暂的氧化事件[37]。垂向上，氧化还原条件具有明显的分带性，与岩性结构分段特征高度一致。下段（约 2317.4 m 以下）U/Th 与 V/（V+Ni）值波动较大，呈现还原–弱氧化的交替特征，反映沉积水体还原性较强但受外部环境扰动明显，指示为深水滞流、能量较低的沉积阶段。中段（2317.4 ~ 2315.2 m）整体处于较强还原状态，仅在顶部出现一次明显下降，对应一次短暂的氧化转折，与 Sr/Ba 比值升高及夹矸集中发育层位相一致，说明该阶段水体发生了暂时性咸化与通气增强过程。上段（2315.2 m 以上）U/Th 与 V/（V+Ni）值较低，表现出还原–弱氧化条件，表明沉积水体逐渐变浅、通气性增强。总体而言，研究区 5 号煤层以还原环境为主导，但层间可识别出多次短暂的氧化事件，这些氧化转折界面与沉积旋回及水体咸淡变化相互对应，可作为划分煤层上、中、下段的重要地球化学标志。

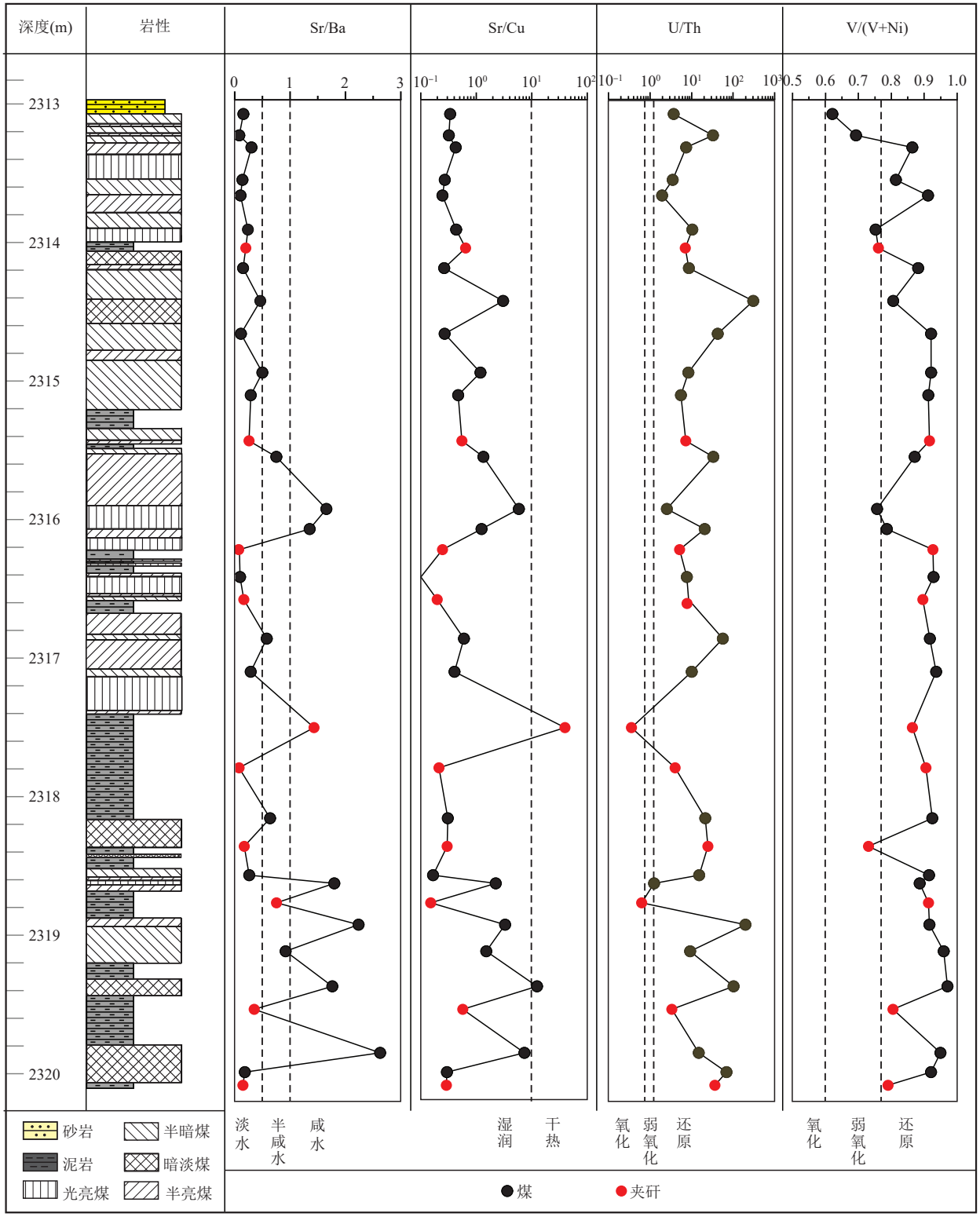


图5 微量元素参数垂向分布特征对比图

Fig. 5 Comparison of the vertical distribution patterns of trace-element parameters

4.3 物源特征

图6为研究区5号煤及夹矸样品的REE-La/Yb关系图，用于区分稀土元素的物源类型[27]。该图以稀土元素总量（REE）反映物质输入强度，以La/Yb比值指示轻、重稀土分馏程度，从而间接表征母岩性质与沉积物来源。通常，花岗岩类源区样品具有较高的La/Yb和中等REE值，玄武岩类源区样品La/Yb较低而REE较高，而沉积岩源样

品则表现为La/Yb中等、REE较低。研究区煤与夹矸样品总体分布于“沉积岩”域内及其附近，表明物源总体以陆源沉积岩为主。然而，部分样品尤其是REE较低（< 10 μg/g）者，分布于沉积岩域之外。造成这种偏离的可能原因是煤层内部有机质含量高、矿物含量低，稀土元素主要以有机质或细颗粒矿物的表面吸附态存在，受吸附能力、孔隙流体化学及还原条件等局部环境因素影响较大，导致其REE特征与典型沉积碎屑样品存在一定差异。总体来看，5号煤层样品在图中集中分布于沉积岩域及其边界，说明物源总体稳定、以陆源碎屑供给为主。局部样品的偏离反映了煤层内部沉积环境与有机质积聚条件的微差异，对整体物源判断影响有限。

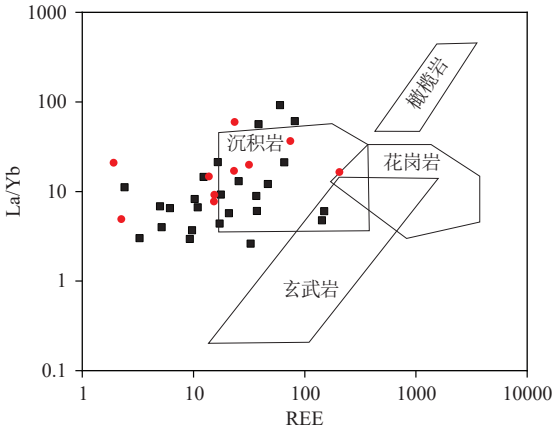


图6　REE-La/Yb关系图

Fig. 6　REE-La/Yb relationship plot

相关性分析结果表明（图7），REE与主量元素（SiO_2、Al_2O_3等）无显著相关，而与微量元素Th、Mn、As均表现为正相关。这说明5号煤层内稀土含量的层间差异并非由黏土矿物丰度主控。前人基于多煤层或不同岩性对比研究认为，稀土元素含量通常与SiO_2和Al_2O_3呈显著正相关，主要受黏土矿物吸附作用控制[27, 38]。然而，本研究聚焦于同一煤层内部的微小变化，样品间物源类型与矿物组成差异有限，因此未表现出明显的“黏土控制”特征，稀土元素的分布主要反映沉积环境的层内差异。

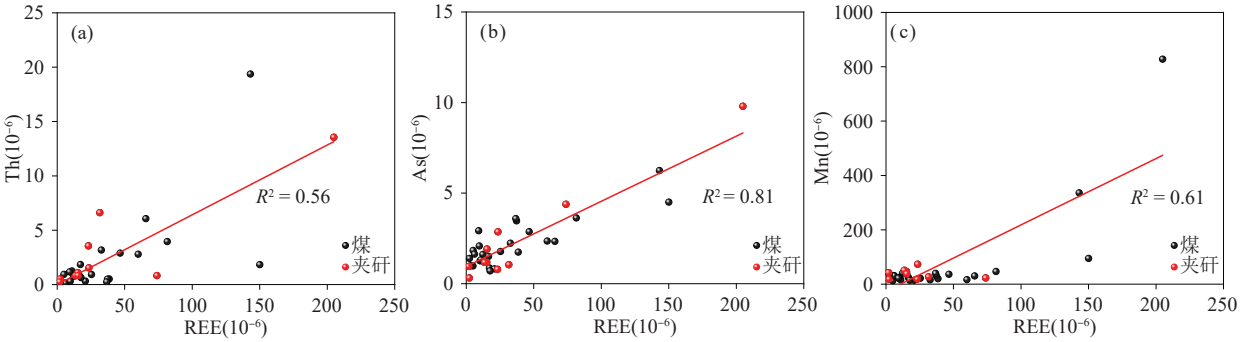


图7　REE与微量元素Th（a）、As（b）和Mn（c）相关性图

Fig. 7　Correlation plots between REE and trace elements：Th（a），As（b），and Mn（c）

从环境指示特征来看，REE–Th的正相关反映了陆源碎屑输入的细微波动，当碎屑物质供给略有增强时，稀土元素总量也会相应升高[13]。REE–Mn与REE–As的正相关则说明氧化还原条件的变化是层内稀土分布的重要控制因素。一般而言，Mn和As在氧化环境中具有较强的迁移性，而在还原或弱氧化环境中更易发生富集。当沉积水体还原性增强、循环受限时，Mn可稳定存在于沉积物中，而As亦更容易被固定或滞留于固相中[39–40]。这种还原环境通常伴随着水体封闭性增强与有机质保存条件改善，从而有利于稀土元素的累积。综上所述，5号煤层内部稀土含量的差异主要受沉积时期水体化学性质与氧化还原状态等微环境因素的控制，而非由物源组成或黏土矿物丰度差异所致。这表明，即便在同一煤层内部，局部水体循环、沉积能量和有机质堆积速率的细微变化，也能显著影响稀土元素的分布格局，为揭示煤层内部沉积环境的演化提供了重要线索。

5　结　论

基于对鄂尔多斯盆地东部S14井山西组5号煤层的系统岩心观察与地球化学分析，本文揭示了其沉积结构特征、环境演化规律及主要控制机制，研究结论如下：

（1）5号煤层沿垂向具有明显分带性，岩性由下至上经历深水低能–浅水–沼泽化演化过程。煤类型以半暗–半亮煤为主，显示成煤环境稳定且具周期性波动特征。

（2）地球化学特征表明，煤层总体形成于以还原环境为主的淡水-半咸水交替体系，局部阶段存在短暂的氧化或咸化事件。元素组合和分布规律揭示了沉积水体能量、水化学及有机质保存条件的周期性变化。

（3）稀土及微量元素特征显示，煤层化学组成的差异主要受沉积微环境（氧化还原、水体封闭性等）控制，而非物源差异。5号煤层代表了深部陆相煤层在三角洲平原-碎屑海岸过渡带形成的典型模式，对认识深部煤层及有机质保存机制具有重要意义。

参考文献：

[1] 霍超，郭海晓，王蕾，等. 双碳背景下中国深部煤层气勘探开发研究进展[J]. 科学技术与工程，2025，25(14)：5705－5720.

[2] LI S，QIN Y，LIU D，et al. A comprehensive review of deep coalbed methane and recent developments in China[J]. International Journal of Coal Geology，2023，279：104369.

[3] 鞠玮，陶树，杨兆彪，等. 中国深部煤层气研究与勘探开发现状及其发展趋势[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：9－16.

[4] ZHAO Z，LIU D M，CAI Y D，et al. Pathways and challenges of the application of geophysical techniques to multifaceted coalbed methane reservoir characterization[J]. Gondwana Research，2025，147：164－183.

[5] LIU Dameng，ZHAO Zheng，CAI Yidong，et al. Characterizing coal gas reservoirs：A multiparametric evaluation based on geological and geophysical methods [J]. Gondwana Research，2024，133：91－107.

[6] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报，2023，44(11)：1791－1811.

[7] DAI S，WANG P，WARD C R，et al. Elemental and mineralogical anomalies in the coal-hosted Ge ore deposit of Lincang，Yunnan，southwestern China：Key role of N_2-CO_2-mixed hydrothermal solutions [J]. International Journal of Coal Geology，2015，152：19－46.

[8] 徐凤银，闫霞，李曙光，等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探，2023，51(1)：115－130.

[9] 闫涛滔，邓志宇，吴鹏，等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴东区杨家坡区块煤层气井产能特征及主控因素[J]. 现代地质，2024，38(6)：1545－1556.

[10] YU C，LIU H，ZHANG S，et al. Geochemistry Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Trace Elements in Coal and Coal Gangue in the Yangcheng Mining Area，Qinshui Basin [J]. ACS Omega，2022，7(16)：13557－13576.

[11] 陈曦，肖玲，王明瑜，等. 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[J]. 现代地质，2023，37(5)：1264－1281.

[12] LIU P，YANG L，WANG Q，et al. Speciation transformation of rare earth elements (REEs) during heating and implications for REE behaviors during coal combustion[J]. International Journal of Coal Geology，2020，219：103371.

[13] YANG N，TANG S H，ZHANG S H，et al. In seam variation of element-oxides and trace elements in coal from the eastern Ordos Basin，China：Geological controls and environmental implications[J]. International Journal of Coal Geology，2018，197：31－41.

[14] QIN G，CAO D，WANG H，et al. Geochemistry and mineralogy of Permo-Carboniferous coals from the Fugu mining district，Shaanxi Province，China：Implications for the evolution of the northeastern Ordos Block[J]. International Journal of Coal Geology，2025，305：104775.

[15] 李胜利，张亚雄，于兴河，等. 含煤层系相控型致密气储层非均质性评价的沉积要素与甜点预测策略：以鄂尔多斯盆地为例[J]. 地学前缘，2025，32(5)：389－403.

[16] 石小虎，曹高社，姚泾利，等. 鄂尔多斯盆地陇东地区太原组L58井铝土岩元素录井在储层预测中的应用 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版)，2025，49(4)：50－61.

[17] 魏虎，林进，王香增，等. 鄂尔多斯盆地东南缘深部8#煤储层地质特征及含气性主控因素分析[J]. 现代地质，2025，39(5)：1316－1331.

[18] SUN J，HAN S，LIU S，et al. Key controlling factors of deep coalbed methane reservoir characteristics in Yan'an Block，Ordos Basin：Based on multi-scale pore structure characterization and fluid mobility research[J]. Processes，2025，13(8)：2382.

[19] 聂志宏，徐凤银，时小松，等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气开发先导试验效果与启示[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(2)：1－12.

[20] 徐长贵，季洪泉，王存武，等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块深部煤层气富集规律与勘探对策[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(8)：1－11.

[21] 刘祥柏，陶士振，杨秀春，等. 煤系氦气富集机理与资源潜力-以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 煤田地质与勘探，2024，52(9)：49－66.

[22] 刘刚，杨文敬，井向辉，等. 鄂尔多斯盆地中元古界长城系地质特征与勘探前景[J]. 中国石油勘探，2024，29(5)：44－60.

[23] 黄军平，范立勇，张艳，等. 鄂尔多斯盆地寒武系天然气成藏地质特征与勘探方向[J]. 中国石油勘探，2025，30(1)：98－110.

[24] 王梓麟，时婧玥，杨英，等. 深层煤岩孔隙结构表征及压裂缝导流能力影响因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，2025，55(4)：1061－1076.

[25] 郭晓娇，王雷，姚仙洲，等. 深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例[J]. 石油实验地质，2025，47(1)：17－26.

[26] 牛小兵，张辉，王怀厂，等. 鄂尔多斯盆地中、东部石炭系本溪组煤储层纵向非均质性特征及成因——以M172井为例[J]. 石油与天然气地质，2024，45(6)：1577－1589.

[27] 范立勇，史云鹤，董国栋，等. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系

山西组深层煤地球化学特征及成煤环境[J]. 天然气工业，2024，44(10)：113－125.

[28] 黄道军，王康乐，陈宇航，等. 鄂尔多斯盆地上古生界山西组 5#煤地质特征与差异含气性主控因素[J]. 现代地质，2025，39(6)：1595－1610.

[29] LARSEN D，MANN R. Origin of high manganese concentrations in coal mine drainage，eastern Tennessee[J]. Journal of Geochemical Exploration，2005，86(3)：143－163.

[30] ZHAO L，WARD C R，FRENCH D，et al. Major and trace element geochemistry of coals and intra-seam claystones from the Songzao Coalfield，SW China[J]. Minerals，2015，5(4)：870－893.

[31] ARBUZOV S I. Geology，geochemistry，mineralogy and genesis of the Spetsugli high-germanium coal deposit in the Pavlovsk coalfield，Russian Far East[J]. Ore Geology Reviews，2021，139：104537.

[32] LITTLE S H，VANCE D，LYONS T W，et al. Controls on trace metal authigenic enrichment in reducing sediments：Insights from modern oxygen-deficient settings[J]. American Journal of Science，2015，315(2)：77－119.

[33] FULLER A J，SHAW S，WARD M B，et al. Caesium incorporation and retention in illite interlayers[J]. Applied Clay Science，2015，108：128－134.

[34] 孙蓓蕾，曾凡桂，李美芬，等. 西山煤田马兰矿区 8 号煤及其夹矸的微量与稀土元素地球化学特征[J]. 煤炭学报，2010，35(1)：110－116.

[35] KETRIS M P，YUDOVICH Y E. Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes：World averages for trace element contents in black shales and coals[J]. International Journal of Coal Geology，2009，78(2)：135－148.

[36] ZHANG H，ZHANG Q，ZHOU Y，et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of black mudstone in the early Carboniferous Dawuba Formation in the Middle and Upper Yangtze region[J]. Frontiers in Earth Science，2023，11：1277359.

[37] 郝睿林，黄文辉，久博. 石嘴山地区煤中微量元素特征及成煤环境对比[J]. 煤炭科学技术，2022，50(9)：158－167.

[38] DAI S，ZOU J，JIANG Y，et al. Mineralogical and geochemical compositions of the Pennsylvanian coal in the Adaohai Mine，Daqingshan Coalfield，Inner Mongolia，China：Modes of occurrence and origin of diaspore，gorceixite，and ammonian illite[J]. International Journal of Coal Geology，2012，94：250－270.

[39] TRIBOVILLARD N，ALGEO T J，LYONS T，et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies：An update[J]. Chemical Geology，2006，232(1/2)：12－32.

[40] FINKELMAN R B，PALMER C A，WANG P. Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal[J]. International Journal of Coal Geology，2018，185：138－160.