

煤层微量元素分布特征及层位判别意义

李明宇¹, 把其欢²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²淮北矿业集团有限公司临涣煤矿, 安徽 淮北

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年8月12日; 发布日期: 2026年9月8日

摘要

煤中微量元素分布具有层位判别的潜在地球化学价值。以临涣矿区77件主采煤层钻孔煤芯样品为对象, 其中5个样品数 ≥ 5 的主采煤层共62件纳入统计对比。基于13种微量元素数据, 采用Pearson相关分析、主成分分析和层次聚类等多元统计方法, 系统分析了不同煤层微量元素分布规律、层间差异及其主控因素。结果表明: (1) Ti、Ba、Sr含量最高, Zn、Cu、V和Co的变异系数均大于0.87, 结合箱线图显示其层间均值分离明显, 是区分不同煤层的潜力指标; (2) 7₂号煤层以Ba-Sr富集为特征, 8₁号煤层Ti高值且Pb相对富集, 8₂号煤层Cu含量最高, 各层呈现可区分的元素组合指纹; (3) 提取的前两个主成分累计解释46.7%的总方差, PC1反映陆源碎屑供给强度, PC2反映沉积环境氧化还原条件变化; (4) 层次聚类进一步揭示7₂号、8₁号煤层的元素组合具有独特性, 8₂号与3₂号煤层较为接近。研究区微量元素层间差异受成煤环境氧化还原条件、陆源碎屑供给强度及后期岩浆热液改造三重因素联合控制, 微量元素特征可为构造复杂区煤层层位辅助判别提供参考。

关键词

微量元素, 地球化学, 煤层判别, 主成分分析, 层次聚类, 淮北煤田

Distribution Characteristics of Trace Elements in Coal Seams and Their Implications for Stratigraphic Identification

Mingyu Li¹, Qihuan Ba²

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Linhuan Coal Mine, Huaibei Mining Group Co., Ltd., Huaibei Anhui

Received: July 6, 2026; accepted: August 12, 2026; published: September 8, 2026

文章引用: 李明宇, 把其欢. 煤层微量元素分布特征及层位判别意义[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1232-1239.

DOI: 10.12677/me.2026.145121

Abstract

The distribution of trace elements in coal has potential geochemical value for stratigraphic identification. Based on 77 drill-core coal samples from main minable seams in the Linhuan Mining Area, of which 62 samples from five seams with sample sizes of no less than 5 were included for statistical comparison, this study systematically analyzed the distribution patterns, interlayer differences, and controlling factors of trace elements in different coal seams using multivariate statistical methods including Pearson correlation analysis, principal component analysis (PCA), and hierarchical clustering, based on 13 trace element concentration data. The results show that: (1) Ti, Ba, and Sr exhibit the highest concentrations; the coefficients of variation for Zn, Cu, V, and Co all exceed 0.87, and combined with box plots, their interlayer mean separations are distinct, indicating their potential as indicators for distinguishing different coal seams; (2) the No. 7₂ seam is characterized by Ba-Sr enrichment, the No. 8₁ seam shows high Ti values with relatively enriched Pb, and the No. 8₂ seam has the highest Cu content, each displaying distinguishable elemental assemblage fingerprints; (3) the first two extracted principal components cumulatively explain 46.7% of the total variance, with PC1 reflecting terrigenous detrital supply intensity and PC2 reflecting changes in sedimentary redox conditions; (4) hierarchical clustering further reveals that the No. 7₂ and No. 8₁ seams have distinctive elemental assemblages, while the No. 8₂ and No. 3₂ seams are relatively similar. The interlayer differences of trace elements in the study area are jointly controlled by sedimentary redox conditions, terrigenous detrital input intensity, and post-depositional magmatic-hydrothermal modification. The trace element characteristics can provide references for auxiliary stratigraphic identification of coal seams in tectonically complex areas.

Keywords

Trace Elements, Geochemistry, Coal Seam Identification, Principal Component Analysis, Hierarchical Clustering, Huaibei Coalfield

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤中微量元素的含量与赋存状态受成煤植物群落、泥炭沼泽氧化还原条件、陆源碎屑供给强度及后期热液-岩浆叠加改造等多重因素共同约束[1][2]。不同煤层即使赋存于同一含煤岩系,其微量元素组成亦往往呈现一定的层位专属性特征,因此微量元素地球化学指纹具备成为煤层层位辅助判别依据的潜力[3][4]。

传统层位对比主要依赖标志层识别、测井曲线形态比对和古生物组合分析,在构造简单、地层连续的区域效果良好。然而,淮北煤田等中国东部矿区经历了多期次构造改造,断层发育、地层错断频繁,传统方法在复杂区段的适用性明显降低[5]。李影影等[6]对芦岭煤矿主采煤层进行了系统测试,发现山西组煤层微量元素含量高于下石盒子组煤层;李祥和李伍[7]对朱庄煤矿煤中微量元素进行了系统分析,发现Li、Cr、Co高度富集,并指出其受沉积环境、海水和热液共同影响。鲁梦菲等[8]对两淮煤田煤中微量元素的地球化学特征进行了系统研究,揭示了两淮煤田微量元素组成的区域背景特征;童柳华等[9]对淮南煤中微量元素分布特征进行了系统分析,进一步佐证了两淮煤田微量元素组成的区域相似性。但针对临涣矿区多煤层之间的系统层间对比研究仍相对薄弱,各煤层地球化学指纹差异的成因解释尚待深入。

本文以淮北临涣矿区 77 件主采煤层钻孔煤芯样品为原始样品，选取样品数 ≥ 5 的 5 个主采煤层样品为研究对象。基于 13 种微量元素数据，综合运用 Pearson 相关分析、主成分分析和层次聚类三种多元统计方法，系统研究不同煤层微量元素分布规律、层间差异及其主控因素，评估微量元素特征在煤层层位辅助判别中的实际应用潜力与局限性。

2. 样品与数据

2.1. 研究区概况

临涣矿区位于淮北煤田中南部，构造上处于童亭背斜东翼，整体为走向 NNE、倾向 SE 的单斜构造，区内发育次一级褶曲和断层。含煤地层为二叠系山西组和下石盒子组，主采煤层为 3₁、3₂、5₁、7₂、8₁、8₂ 号，煤层埋深 300 m 至 800 m，煤类以肥煤和焦煤为主，局部受岩浆热变质影响[5]。黄文辉等[10]对华北晚古生代煤的稀土元素地球化学特征进行了系统研究，指出华北克拉通统一的物源供给是各煤层稀土元素组成相似的基底控制因素。

2.2. 样品与测试

样品来自各煤层勘探钻孔煤芯，共计 77 件，涵盖 12 个煤层，其中 7₂、8₁、8₂ 号煤层样品数最多，数据基础较为可靠；3₁ 号和 3₂ 号可满足基本统计要求；2 号、10 号煤层各有 3 件样品，样品数偏少，相关均值仅供参考；2₁、5₂、5₃、8₃ 号煤层仅 1 至 2 件，不纳入定量统计对比。为保证统计可靠性，本文跨煤层对比的图表及主要结论均限于样品数 ≥ 5 的 5 个主采煤层。

微量元素含量采用发射光谱半定量分析，检测 22 种元素。低于检测限取检测限 1/2 代入，未检出按 0 处理。最终选取在多数样品中有检测结果的 13 种元素(Ba、Cr、Ga、Ti、Pb、Mn、Ni、V、Cu、Zn、Co、Zr、Sr)为主要分析指标。

2.3. 分析方法

本研究采用三种方法形成互补分析：Pearson 相关分析用于识别元素间的地球化学共性；主成分分析用于提取控制元素分布的主要地质因素；层次聚类基于各煤层元素均值向量进行聚类，量化煤层间的地球化学亲疏关系。三种方法分别从相关性、降维和分组角度回答了微量元素的层间分布特征问题。

3. 分析结果

3.1. 各煤层微量元素总体分布特征

为直观展示各煤层微量元素的分布状况和层间差异程度，表 1 汇总了 5 个主采煤层在 8 种主要元素上的样品数量和均值。

Table 1. Sample count and mean trace element contents per coal seam (content unit: 10^{-6})

表 1. 煤层样品数量及微量元素含量均值统计(含量单位: 10^{-6})

煤层	样品数	Ba	Sr	Cu	V	Ti	Mn	Zr	Pb
3 ₁	7	1000	643	90	429	10,143	543	186	46
3 ₂	12	958	650	51	267	10,167	264	149	35
7 ₂	15	1490	991	71	228	10,467	287	201	41
8 ₁	12	1425	738	81	210	13,167	225	187	69
8 ₂	16	828	626	119	199	10,750	301	163	39

从表 1 可以看出：(1) Ti 含量在所有煤层中最高，其次为 Ba 和 Sr；(2) Ba 含量在 7₂ 号煤层中最高；(3) Cu 含量在 8₂ 号煤层最高，在 3₂ 号煤层最低；(4) V 含量在 3₁ 号煤层最高，在 5₁ 号煤层最低。

为进一步评估各元素的层间区分潜力，表 2 列出了 13 种元素在全部样品中的统计特征。

Table 2. Statistical summary of 13 trace elements (content unit: 10⁻⁶)

表 2. 汇总 13 种微量元素的统计特征(含量单位: 10⁻⁶)

元素	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数
Ba	100	3000	1100	547	0.50
Ti	700	50,000	10,879	6541	0.60
Sr	50	2000	675	486	0.72
Zr	15	300	169	66	0.39
V	40	1500	239	207	0.87
Mn	70	800	318	168	0.53
Cu	10	300	78	69	0.88
Cr	10	200	52	36	0.69
Zn	5	300	71	63	0.89
Ni	10	150	34	25	0.71
Co	5	200	38	33	0.87
Pb	10	200	45	33	0.73
Ga	10	100	39	20	0.50

表 2 显示，Zn、Cu、V 和 Co 的变异系数最大，表明这些元素在整个数据集中的离散程度最高，具备较好的层间区分潜力。但需指出，变异系数反映的是层内和层间变异的综合结果，不能简单等同于“层间差异”，实际判别效果还需结合箱线图的层间均值分离程度综合判断。Ti 和 Zr 的变异系数较小，含量分布相对均匀，单独使用的判别价值有限。

3.2. 主采煤层微量元素对比

本节结合图 1 的箱线图对 5 个主采煤层(3₁、3₂、7₂、8₁、8₂ 号)逐一分析其元素指纹特征。图 1 为各煤层关键元素的箱线图，箱体高度反映层内变异，箱体位置反映层间差异。

各主采煤层的元素指纹差异集中体现在 Ba-Sr、Ti-Pb 和 Cu-Zn 三类元素组合上，如图 1 所示。7₂ 号煤层的 Ba 和 Sr 均值均为各层最高，Ba 约是 3₂ 号煤层的 1.6 倍，Sr 约是 8₂ 号煤层的 1.6 倍，二者同步富集指示该煤层形成于还原性较强的泥炭沼泽环境[3]；但 Ba 含量箱体跨度较大，反映层内微环境存在一定非均质性。8₁ 号煤层的 Ti 和 Pb 均值均为各层最高，Ti 的高值指示沉积期陆源重矿物供给较强，Pb 偏高则可能叠加了后期热液改造的影响[7]。8₂ 号煤层 Cu 均值各层最高，Zn 亦处于高位，二者协同富集可能反映了硫化物矿物的相对富集，而该层 Ba 均值反而最低，与 7₂ 号煤层形成鲜明反差。3₁、3₂ 号煤层总体呈背景型特征，3₁ 号煤层 V 均值各层最高，可能与较强还原条件下有机质结合态钒的富集有关[1]；3₂ 号煤层 Cu 均值各层最低但 Ba-Sr 中等偏高，层内非均质性较强。

综上，各主采煤层在 Ba、Sr、Cu、V 等元素上表现出可识别的差异，为微量元素辅助层位判别提供了地球化学依据，但层内变异客观存在，实际判别时应综合多元素组合而非依赖单一指标。

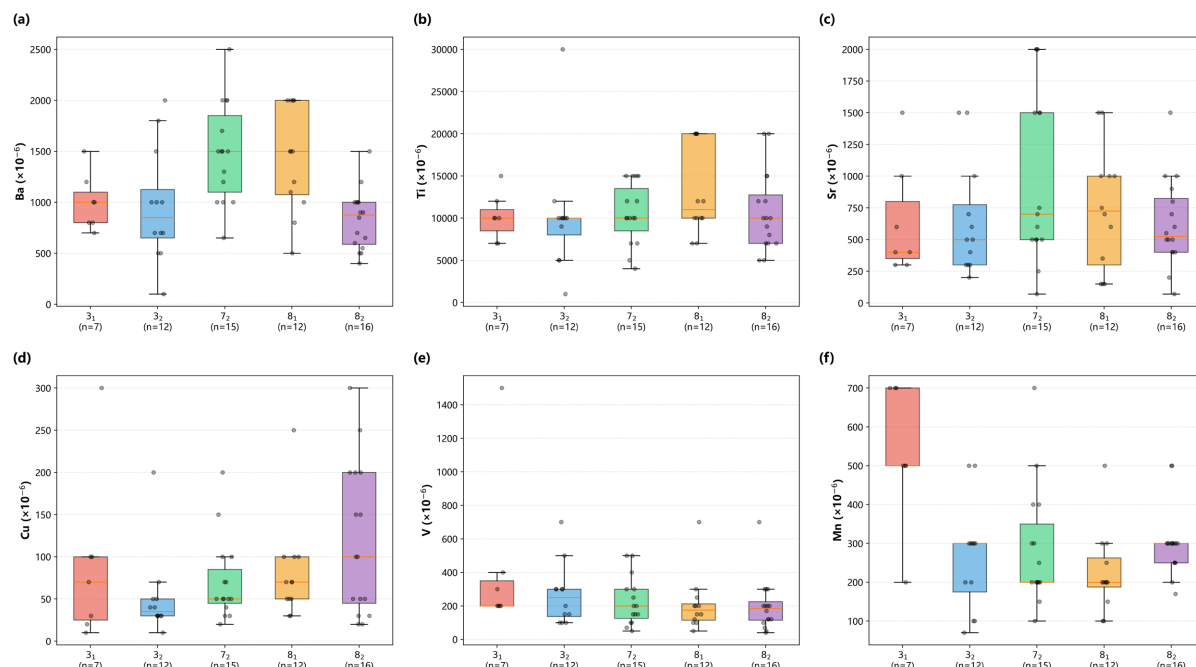


Figure 1. Box plots of key trace element contents across different coal seams

图 1. 不同煤层关键微量元素含量分布箱线图

3.3. 元素相关性分析

在分析层间差异之前,有必要考察元素之间的相关性,以评估信息冗余程度。图 2 为 13 种元素的 Pearson 相关系数矩阵热力图。

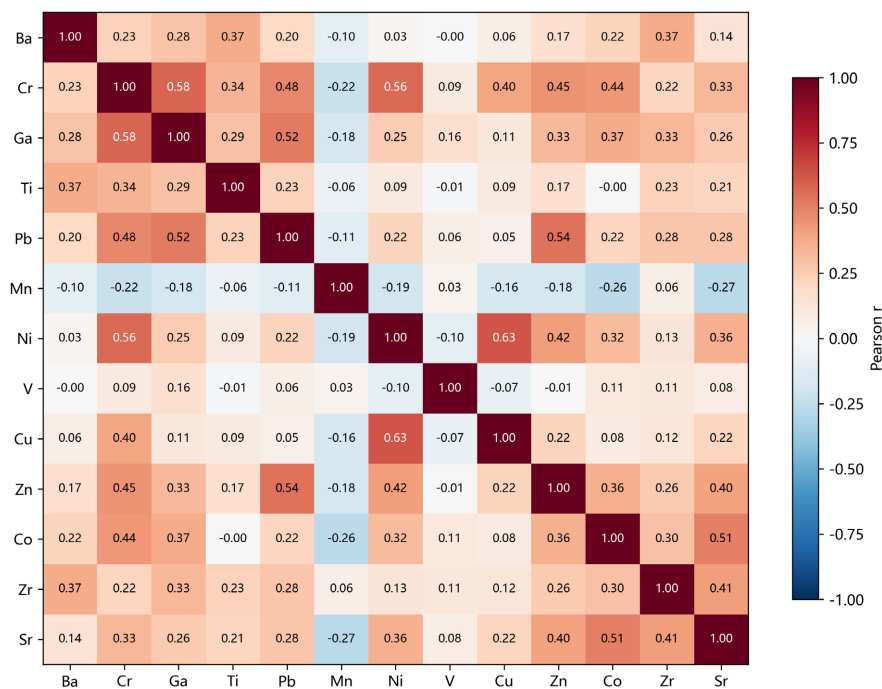


Figure 2. Trace element Pearson correlation coefficient heatmap

图 2. 微量元素 Pearson 相关系数热力图

结果显示: Ti 与 Cr、Ba 与 Sr 呈中等正相关, 前者可能反映陆源碎屑中钛铁矿与含铬重矿物的共生搬运[11], 后者指示 Ba、Sr 在还原条件下硫酸盐-碳酸盐体系的共同沉淀[3]。其余多数元素对之间的相关系数绝对值低于 0.5。总体而言, 各元素提供的判别信息相对独立, 信息冗余度较低, 有利于后续的综合判别分析。

3.4. 主成分分析

对 13 种微量元素进行主成分分析, 前两个主成分累计解释 46.7%的总方差(图 3), 其中 PC1 贡献率为 34.1%, PC2 贡献率为 12.6%。PC1 在 Cr、Zn、Ga 上载荷最高, 这些元素均与陆源碎屑密切相关, 因此 PC1 可解释为陆源碎屑输入强度。PC2 在 Ni 和 Cu 上具有较高的正向载荷, 在 Ba 上具有较高的负向载荷。Ni 和 Cu 常与硫化物矿物伴生并在还原条件下富集, Ba 则在硫酸盐还原作用强烈的环境中以碳酸钡或重晶石形式沉淀, 载荷的正负分异反映了氧化还原梯度的变化。

各煤层样品在 PC1-PC2 空间的投影如图 3 所示。8₂ 号煤层样品整体偏向 PC1 正方向, 指示陆源碎屑供给相对较强; 7₂ 号煤层偏向 PC1 负方向及 PC2 负方向, 指示陆源供给较弱且 Ba 沉淀条件有利; 3₂ 号煤层分布范围较广, 内部非均质性强。不同煤层在 PCA 空间中虽有一定重叠, 但 7₂ 与 8₂ 号煤层的分离趋势较明显, 为层位判别提供了降维依据。Ward 法层次聚类进一步印证了上述结果, 7₂ 号和 8₁ 号煤层各自形成独立分支, 8₂ 号与 3₂ 号煤层聚为一支, 与 PCA 分析具有较好的一致性。

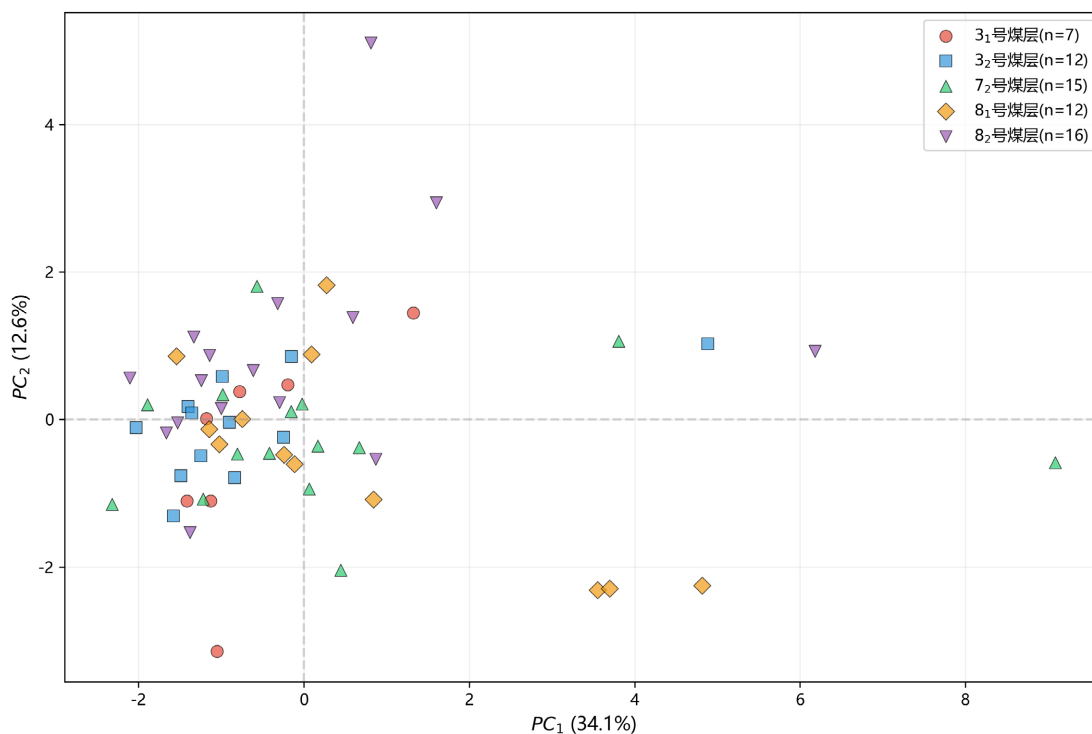


Figure 3. PCA scatter plot
图 3. 主成分分析散点图

4. 讨论

4.1. 微量元素层间差异的三重控制因素

矿区各主采煤层微量元素层间差异受区域背景、局部沉积环境及后期热液改造三重因素叠加控制。

统一的华北古陆物源奠定了各煤层微量元素组成的相似基底[10], 但局部沉积环境差异导致敏感元素发生分异: 7₂号煤层 Ba-Sr 同步富集指示强还原沼泽环境[3], 8₂号煤层 Cu 高值反映硫化物矿物富集[12], 3₁号煤层 V 高值与有机质结合态钒有关。Ba 和 V 虽均在还原条件下富集, 但 Ba 受硫酸盐还原-沉淀平衡控制, V 主要与有机质络合或黏土吸附有关, 响应路径不同, 因此元素指纹各异。此外, 临涣矿区局部发育燕山期岩浆岩侵入体[5], 热液活动导致 8₁号煤层 Pb 均值偏高[7], 并可能改变元素赋存状态。

4.2. 微量元素辅助层位判别的可行性与局限性

7₂号煤层的 Ba 高值、8₁号煤层的 Ti 高值、8₂号煤层的 Cu 高值构成可区分的多元素指纹组合, PCA 及聚类结果均表明微量元素具备辅助层位判别的地球化学基础。但实际应用中需注意: 3₂号与 8₂号煤层在聚类中优先合并, 仅凭微量元素难以可靠区分, 需结合测井或煤岩数据; 2₁、5₂、5₃、8₃号煤层样品量仅 1~2 件, 结论不宜作为判别依据; 发射光谱精度有限, 后续宜采用 ICP-MS 定量分析; 部分元素层内变异较大, 应综合多元素组合判断而非依赖单一指标。微量元素方法在构造复杂区具有辅助判别潜力, 建议与测井参数及有机地球化学指标联合使用, 构建多信息融合的判别模型。

与已有两淮煤田微量元素研究相比, 本文的贡献在于: (1) 首次对临涣矿区多煤层进行了系统的层间定量对比; (2) 将区域背景与局部环境的控制机制进行了区分; (3) 通过多方法交叉验证增强了结论的可靠性。后续研究可结合临涣矿区各煤层的钻孔测温、瓦斯组分等参数, 构建多参数地球化学-物性综合判别体系。

5. 结论

本文系统对比了临涣矿区 5 个主采煤层的微量元素分布特征, 识别了 7₂号、8₁号和 8₂号煤层的元素组合指纹差异。

(1) 临涣矿区煤中 Ti、Ba、Sr 含量最高。Zn、Cu、V 和 Co 的变异系数均超过 0.87, 且箱线图显示其层间均值分离明显, 是区分不同煤层的潜力指标; Ti 和 Zr 变异系数较小, 含量相对均匀。

(2) 7₂号煤层以 Ba-Sr 富集为特征, 8₁号煤层以 Ti 高值为特征, 8₂号煤层以 Cu 均值最高为特征。层次聚类证实 7₂、8₁号煤层地球化学特征具有独特性, 8₂号与 3₂号煤层较为接近。

(3) PCA 前两个主成分累计解释 46.7%的方差, PC1 受 Cr、Zn、Ga 控制, 反映陆源碎屑输入强度; PC2 受 Ni、Cu 正向及 Ba 负向控制, 反映沉积环境氧化还原条件变化。

(4) 微量元素差异受控于成煤环境氧化还原条件、陆源碎屑强度和后期岩浆改造三重因素。7₂号煤层 Ba-Sr 富集和 8₂号煤层 Cu 高值可作为辅助层位判别的地球化学指标, 但 3₂号与 8₂号煤层的高相似性表明, 微量元素判别宜与其他数据融合使用。

参考文献

- [1] Dai, S., Finkelman, R.B., French, D., Hower, J.C., Graham, I.T. and Zhao, F. (2021) Modes of Occurrence of Elements in Coal: A Critical Evaluation. *Earth-Science Reviews*, 222, Article 103815. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103815>
- [2] Ward, C.R. (2016) Analysis, Origin and Significance of Mineral Matter in Coal: An Updated Review. *International Journal of Coal Geology*, 165, 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.07.014>
- [3] 代世峰, 任德贻, 周义平, 等. 煤型稀有金属矿床: 成因类型、赋存状态和利用评价[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1707-1715.
- [4] Dai, S. and Finkelman, R.B. (2018) Coal as a Promising Source of Critical Elements: Progress and Future Prospects. *International Journal of Coal Geology*, 186, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005>
- [5] 程先振, 林东才. 淮北地区地质构造与瓦斯灾害关系研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(8): 217-220.
- [6] 李影影, 刘桂建, 陈冰宇, 等. 淮北矿区芦岭煤矿微量元素地球化学特征[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(10): 15-19.

-
- [7] 李祥, 李伍. 淮北煤田朱庄煤矿煤中微量元素地球化学特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(8): 178-191.
 - [8] 鲁梦菲, 刘桂建, 沈梦晨, 等. 两淮煤田煤中微量元素的地球化学研究[J]. 地学前缘, 2026, 33(5): 388-409.
 - [9] 童柳华, 严家平, 唐修义. 淮南煤中微量元素及分布特征[J]. 矿业安全与环保, 2004, 31(Z1): 94-96.
 - [10] 黄文辉, 杨起, 汤达祯, 等. 华北晚古生代煤的稀土元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2000(1): 96.
 - [11] 吴灿灿, 曹静, 赵景宇. 淮北煤田宿州矿区山西组泥质岩地球化学特征及地质意义[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(5): 190-197.
 - [12] 邵培, 王爱宽, 宋昱. 淮北煤田孟庄煤矿煤中微量元素赋存状态及环境效应[J]. 煤炭技术, 2015, 34(7): 108-110.