

黔西北晚二叠世煤中硫的赋存特征及地质意义

李颖^{1,2}, 夏鹏^{1,2,4}, 吴章利^{2,3}, 付勇^{1,4}, 王秋军^{1,4}, 王科^{1,4}, 王伟

1,4

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳, 550025; 2. 自然资源部复杂构造区非常规天然气评价与开发重点实验室, 贵州 贵阳, 550081; 3. 贵州省油气勘查开发工程研究院, 贵州 贵阳, 550081; 4. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳, 550025)

摘要:【目的】硫是煤中最关键的元素之一, 其赋存特征对于煤炭资源利用效率、全球生态环境、古生物研究等均有重要意义。【方法】基于黔西北地区上二叠统龙潭组煤样煤岩煤质测试数据, 分析了区内龙潭组不同含煤段代表煤层中硫的赋存特征及其地质意义。

【结果】黔西北上二叠统煤层整体含硫量较高, 6号、16号和32号煤层平均含硫量2.10%、1.97%和2.14%, 呈现从西部向东部逐渐升高的趋势。硫的赋存形态均以黄铁矿硫为主, 黄铁矿硫、有机硫和硫酸盐硫在全硫中平均占比分别为63.09%、25.00%和11.91%。6号煤中黄铁矿硫与U和As含量呈正相关、与Th含量呈负相关, 16号煤中黄铁矿硫与U含量呈正相关, 有机硫与Ge和Ga含量显著正相关, 32号煤中黄铁矿硫与Ge和Ga含量正相关、与Th和P含量负相关, 有机硫与Ga、U、V含量有显著正相关性。【结论】龙潭组下含煤段沉积时期水体相对较深, 水体还原程度强; 到中含煤段沉积时期水体深度和还原程度均有降低; 上含煤段水体深度和还原程度再次升高。

关键词: 黔西北; 煤; 全硫; 形态硫; 古环境; 有害元素; 相关性; 影响因素

中图分类号: P618.11

文献标志码: A



Occurrence characteristics of sulfur in Late Permian coals from

Northwestern Guizhou and their indicative significance

LI Ying^{1,2}, XIA Peng^{1,2,4}, WU Zhangli^{2,3}, FU Yong^{1,4}, WANG Qiujuan^{1,4}, WANG Ke^{1,4}, WANG Wei^{1,4}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China; 2. Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Evaluation and Development in Complex Structural Areas, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Guizhou Provincial Oil and Gas Exploration and Development Engineering Research Institute, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: **[Objective]** Sulphur is one of the most critical elements in coal, and its occurrence characteristics hold significant implications for coal resource utilisation efficiency, global ecological environments, and palaeontological research. **[Methods]** Based on coal-rock and coal quality test data from Upper Permian Longtan Formation coal samples in northwest Guizhou, this study analysed the sulphur occurrence characteristics and geological significance in representative coal seams from different coal-bearing sections within the Longtan Formation. **【 Results 】** Upper Permian coalbeds in northwest Guizhou exhibit overall high sulphur content, with average sulphur concentrations of 2.10%, 1.97% and 2.14% in Seams 6, 16 and 32 respectively, showing a gradual increase from west to east. The predominant sulphur species is pyrite sulphur, accounting for 63.09% of total sulphur on average, with organic sulphur and sulphate sulphur contributing 25.00% and 11.91% respectively. In Coal Seam No. 6, pyrite sulphur showed positive correlations with U and As, and a negative correlation with Th. In Coal Seam No. 16, pyrite sulphur correlated positively with U, while organic sulphur exhibited significant positive correlations with Ge and Ga. In Coal Seam No. 32, pyrite sulphur correlated positively with Ge and Ga, and negatively with Th and P; organic sulphur showed significant positive correlations with Ga, U, and V. **【 Conclusion 】** During the deposition of the lower coal-bearing section of the Longtan Formation, the water body was relatively deep with a high degree of reduction. By the deposition of the middle coal-bearing section, both water depth and reduction levels decreased. while the water depth and reduction level increased again during the Upper Coal-bearing Stage. The sulphur content of the Upper Permian coal in Qianxi is influenced by the combined effects of stratigraphic pressure, temperature, trace elements, and palaeobiological evolution.

Keywords: Northwestern Guizhou; coal; total sulfur; morphological sulfur; paleoenvironment; trace elements; correlation; influence factor

收稿日期: 2025-11-18; **修回日期:** 2025-12-30; **录用日期:** 2026-02-13; **网络出版日期:** 2026-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472211); 国家自然科学基金项目(42162016); 自然资源部复杂构造区非常规天然气评价与开发重点实验室开放课题(非常规天然气重点实验室科合[2024]08)

作者简介: 李颖(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事非常规天然气地质与开发等方面的研究工作。E-mail: 2786494773@qq.com

通信作者: 夏鹏(1989—), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要从事非常规天然气地质与开发等方面的研究工作。E-mail: pxia@gzu.edu.cn

0 前言

硫是煤中的有害元素之一，例如：（1）燃烧释放 SO_2 、 SO 等有毒有害气体，导致酸雨和土壤酸化，破坏生态系统^[1-2]；（2）加工处理和运输过程中腐蚀锅炉、管道等设备，增加维护成本^[3]；（3）炼焦时渗入钢铁，抬高生产成本^[4]。然而，煤中硫也存在某些益处，硫含量和赋存状态有助于还原古环境特征，辅助预测煤中有害微量元素的分布^[3,5-6]。开展高硫煤分布特征、赋存状态研究，对于进一步准确认识煤中硫的利用前景具有必要性。

我国煤中硫分含量变化较大，变化范围 0.02~10.48%，平均 1.14%，其中特低硫煤和低硫煤（本文统称为低硫煤）占比 40.56%和 31.84%，低中硫煤和中硫煤（本文统称为中硫煤）分别占 10.29%和 7.42%，中高硫煤和高硫煤（本文统称为高硫煤）为 7.13%和 2.77%^[7]。目前煤中硫的形态划分成熟，分布规律清晰，成因机制明确，在沉积环境的指示、成煤作用的示踪、矿产与资源关联方面都有显著成果。煤中硫的含量主要受沉积环境的影响，有学者曾调查世界范围内煤田，得到结论：低硫煤主要形成于河流环境，高硫煤沉积于海水环境；除了煤在泥炭成藏过程中有没有海水的影响和影响程度外，煤中硫含量还受沉积后成岩作用的影响。说明并不是所有高硫煤都是在海水影响的环境中沉积的，还可能会受到富硫热液和火成岩侵入的影响^[8-10]。煤中硫不同组分的硫同位素携带了煤母质的演变过程的重要信息，低硫煤中有机硫 $\delta^{34}\text{S}$ 通常是稳定的，说明了在煤化过程中硫酸盐混入和硫酸盐还原作用的影响不大^[11,12]，相对应的高硫煤中有机硫 $\delta^{34}\text{S}$ 变化较大^[13]。煤中的黄铁矿硫的同位素组成变化更为丰富，可反映出黄铁矿存在于不同的成矿阶段^[14]。煤中硫与矿产资源的关联不仅体现在硫的经济价值上，还有对成煤环境的指示和伴生金属元素富集等方面，合理开发和探究煤中硫的规律对实现资源合理利用和环境保护都有重要意义。

在黔西北地区对煤中硫元素的研究较为稀少，特别是不同含煤段代表煤层中硫的赋存特征及其地质意义。在湖北、广西、四川、重庆、贵州这六个富含高硫煤的省（自治区、直辖市）中，贵州的煤炭资源量最丰富，远超其他 5 省（自治区、直辖市）之和，加之贵州晚二叠世煤中硫含量变化范围很大，为 0.06~15.08%，虽然平面上煤中硫含量变化规律较明显^[8,15,16]，但已有数据多来自于遵义织金等贵州东部煤田，而黔西北处于峨眉山玄武岩和海陆交互过渡带，使得硫的来源、赋存状态与东部存在不同，是一个值得研究煤中硫的赋存规律的方向。本文以贵州黔西北地区上二叠统煤为例，通过系统收集整理区内煤矿勘查测试资料，结合数理统计、地质成图、镜下鉴定、理论分析等方法研究硫含量空间分布及赋存状态，探讨其地质意义，有助于深入认识区内目的层段煤化学特征，可以作为成煤

环境分析的新参考，能为后续煤及其伴生资源勘探开发提供较系统的数据资料支撑。

1 地质背景

黔西北地区位于贵州西北部，其中西部和西北部紧邻云南省，东北部与四川省毗邻，是滇东—黔西富煤带的重要组成部分，包括威宁穹盆构造变形区、六盘水北西向褶皱带和黔北隆起区 3 个四级构造单元的一部分（见图 1），其中黔北隆起区分为织金穹盆构造变形区和毕节弧形褶皱带 2 个五级构造单元^[17]。中二叠世末的东吴运动使研究区抬升成陆，经历了较长时期的剥蚀，至晚二叠世，发生新一期的基底沉降，海水侵入，形成了晚二叠世的含煤岩系。由于康滇裂谷带在中二叠世末的复活，康滇古陆抬升，形成上扬子盆地西高东低的整体格局，该古陆为西南地区晚二叠世主要的陆源供给区，这一时期，研究区形成了自西向东由陆到海的古地理格局，并控制着沉积体系的总体配置关系，形成了三角洲沉积体系和潟湖—潮坪沉积体系^[18-20]。研究区地层发育较全，自新元古界至第四系均有出露，其中震旦纪至三叠纪海相地层层序连续性较好，其间多为整合接触，区内大面积出露的地层主要有寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系及三叠系，以古生代地层分布广为主要特征，中生代、新生代地层小范围分布于区内部分向斜的核部及北缘地带。研究区内主要含煤地层为上二叠统龙潭组，除西部局部遭较强剥蚀外，在区内其他部位普遍分布。

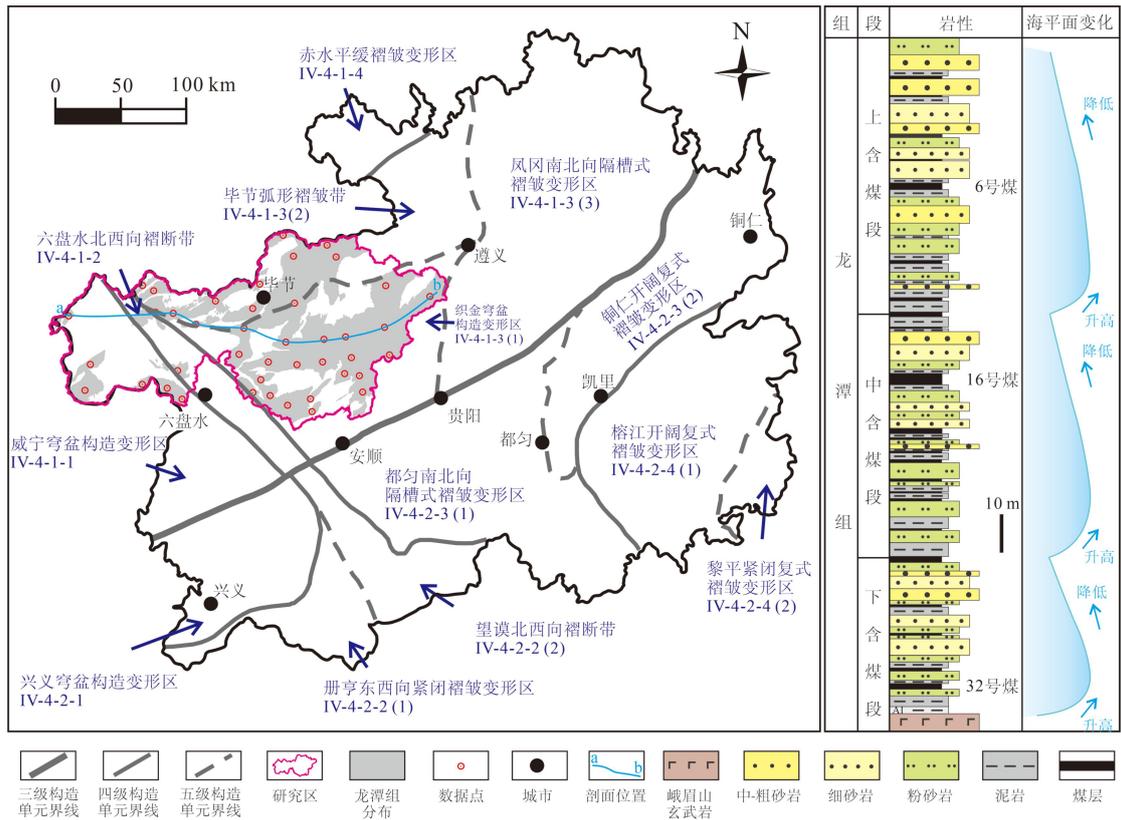


图 1 研究区位置、龙潭组分布和岩性 (改自文献[17])

Fig. 1 Location of the study area, distribution of the Longtan Formation, and lithology (modified from Reference [17])

根据本文收集的煤矿勘查资料统计, 黔西北地区龙潭组厚度 105.45~446.59 m, 含煤 7~50 层, 煤层总厚 6.01~38.76 m, 含煤系数 2.87%~11.60%, 可采煤层 2~11 层, 可采煤层累计厚度 1.34~18.79 m, 可采系数 0.73%~6.20%。根据沉积旋回特征、岩性特征、古生物特征和含煤性, 龙潭组可分为 3 个含煤段 (图 1), 即下含煤段、中含煤段和上含煤段^[21-23]。其中, 下含煤段主要可采煤层为 32 号煤, 厚度 0.12~7.25 m, 平均厚度 1.31m; 中含煤段主要可采煤层为 16 号煤, 厚度 0.05~6.82 m, 平均 1.61 m; 上煤段主要可采煤层为 6 号煤, 厚度 0.05~10.87 m, 平均厚度 1.88 m。本文以这 3 层可采煤层为对象, 研究黔西北地区龙潭组煤层中硫的赋存特征。

2 数据来源与分析方法

为了分析黔西北地区晚上二叠统龙潭组煤中硫的空间分布特征, 调研了区内 1480 份煤矿勘查成果资料, 收集 6 号、16 号和 32 号三层煤的共计 2470 个硫含量数据。由于收集的硫含量原始成果资料具有时间跨度长、完成单位多、格式类型杂等特点, 通过数字化、数

据标准化数值分析等方法处理原始数据，去除异常数据。这里选择使用基于统计学的 *Z-score* 方法来判断异常值，该方法基于数据符合正态分布的假设，通过计算每个数据点与均值的偏离程度（以标准差为单位）来识别异常值，数据分析简单直观，能够有效地在一维数据中找出偏离整体分布的数据点。*Z-score* 计算方法如下

$$Z\text{-score}=(x-\mu)/\sigma$$

式中， x 为样品全硫数据（%）； μ 为所有样品全硫数据的均值（%）； σ 为所有样品全硫数据的标准差（%）。

当 *Z-score* 的绝对值大于 3 时，对应的全硫数据点被认为是异常值。通过 *Z-score* 方法识别出的异常值，将 *Z-score* 绝对值大于 3 的数据点从原始数据中去除，得到了去除异常值后的数据集，处理前后数据对比如表 1 所列。经过处理后，累计去除 50 个异常数据，剩余的 2420 个有效数据将用于后续论文分析和讨论。需要说明的是，由于本文数据来自煤田钻孔，集中分布在研究区内的各煤矿勘查区范围内，而煤具有极强的非均质性，这样导致单个勘查区内部硫含量存在较大变化，给全区硫含量分布趋势研究带来困难。针对该问题，本文以构造单元为单位，统计各单元内硫含量与组分平均值，统计点数量和位置如图 1 中数据点所示，基于平均值绘制平面等值线图 and 剖面变化趋势图，用于分析硫含量在研究内空间上的整体变化规律。此外，还统计了报告中 6 号、16 号和 32 号三层煤的埋深、煤岩镜质体反射率、孔隙率、含水率、主微量元素等数据；为了揭示各含煤段代表性煤层黄铁矿硫赋存特征，丰富古环境分析数据，通过扫描电镜观察、测量了三层煤的草莓状黄铁矿粒径。

表 1 数据处理前后特征

Table 1 Features before and after data processing

统计量	6 号煤统计量		16 号煤统计量		32 号煤统计量	
	原始数据	去除异常值后数据	原始数据	去除异常值后数据	原始数据	去除异常值后数据
样本数量/个	1277	1245	880	871	313	304
平均值/%	2.24	2.10	2.04	1.97	2.34	2.14
标准差/%	1.77	1.47	1.55	1.38	1.93	1.50
最小值/%	0.08	0.12	0.10	0.10	0.19	0.19

统计量	6号煤统计量		16号煤统计量		32号煤统计量	
	原始数据	去除异常值后数据	原始数据	去除异常值后数据	原始数据	去除异常值后数据
下四分位数/%	1.04	1.02	0.91	0.91	1.07	1.07
中位数/%	1.89	1.86	1.71	1.67	1.74	1.70
上四分位数/%	2.95	2.84	2.75	2.70	2.97	2.82
最大值/%	12.44	7.54	12.36	6.68	13.60	7.78

3 结果与分析

3.1 硫的空间分布及影响因素

经过处理后，黔西北地区6号、16号和32号煤层全硫含量分布在0.10%~7.78%，平均值为2.06%。其中，6号煤层含硫量介于0.12%~7.54%，平均值2.10%；16号煤层含硫量0.10%~6.68%，平均值1.97%；32号煤层含硫量0.19%~7.78%，平均值2.14%（见表1）。可见，这三层煤中硫含量变化范围和平均值均较接近，整体含硫量较高，均以中高硫煤为主，这与前人研究认识相符^[8,15,24]。在研究区平面上，6号、16号、32号煤中硫含量变化均表现出东部高，向西部逐渐降低的趋势（见图2）。其中6号煤和32号煤含硫量在东南部局部地区超过4.00%，在西部威宁、赫章等地低于1.00%。16号煤中硫含量分布趋势与其他两层煤一致，不同之处在于该煤层整体含硫量相对较低，中低硫煤（含硫量<2.00%）分布范围相对较大。

已有研究显示，沉积环境是影响煤中硫含量的重要因素，主要表现为海水影响主导的硫分异规律，海陆过渡相沉积环境（如三角洲、潟湖—潮坪等）因受海水周期性侵入影响，直接引入了海水硫酸盐，增加水体中硫酸根离子浓度，在强还原条件下通过细菌硫酸盐还原作用转化得到，导致煤层全硫含量增加^[25-27]。相比之下，内陆淡水沼泽因硫酸盐供应受限，硫分主要来源于植物有机质，全硫含量普遍较低^[7,24]。此外，泥炭沼泽的垂向氧化还原分带进一步强化了硫的差异富集，持续覆水的强还原环境更有利于和有机硫的保存，进而表现出较高的全硫含量。

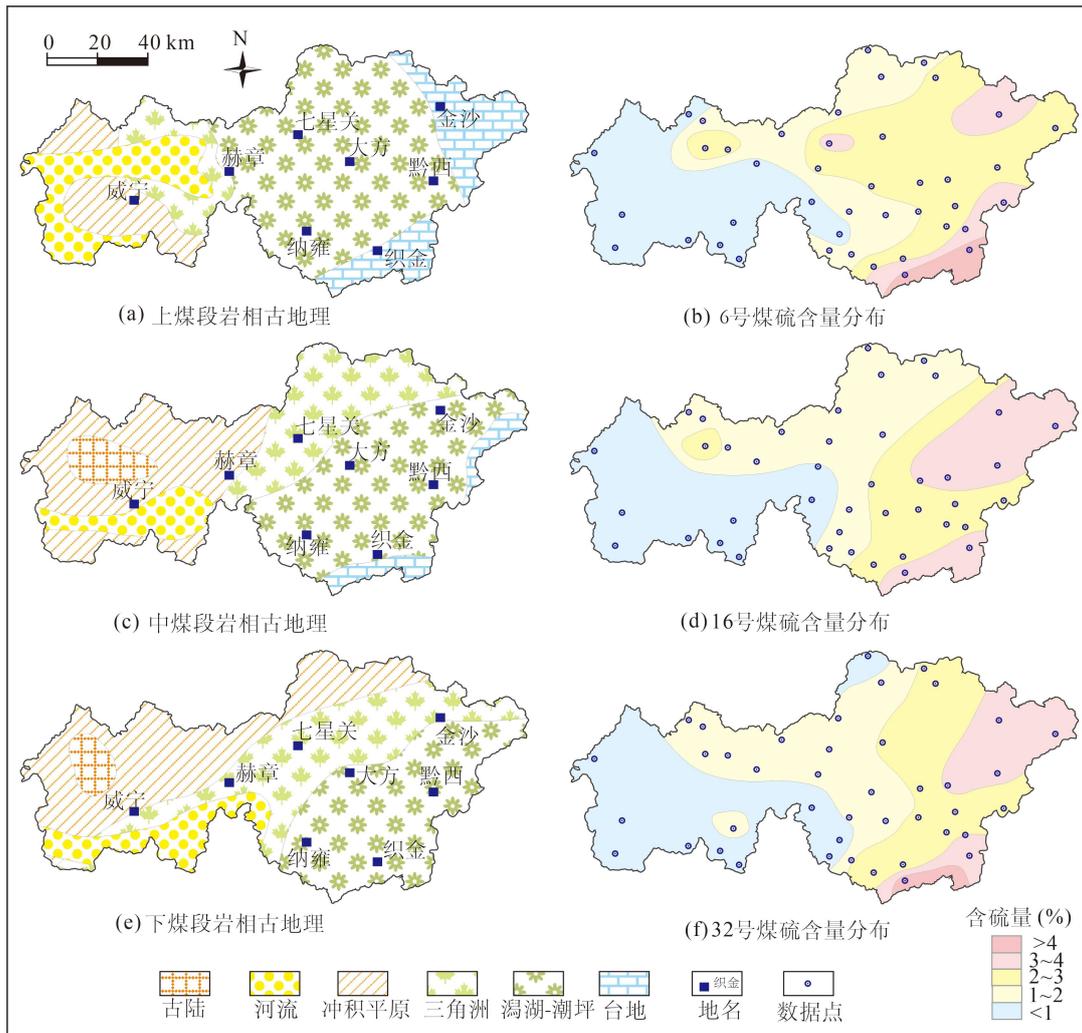


图2 龙潭组不同煤段岩相古地理（参考文献[29,30]）和煤层含硫量分布

Fig.2 Paleogeography of different coal segments in the Longtan Formation (References [29,30]) and distribution of sulfur content in coal seams.

如图2所示，黔西北地区上二叠统龙潭组不同含煤段沉积环境与煤中硫含量具有显著关联性。下含煤段以潟湖—潮坪、三角洲、冲积平原、河流等环境为主，自东向西水体深度逐渐变浅，导致该含煤段中32号煤层含硫量自东向西逐渐降低。中含煤段沉积时期，研究区北部冲积平原分布范围减少，三角洲的范围扩大，16号煤层含硫量整体仍表现为东高西低，在北部局部区块相比32号煤含硫量有所增加。至上含煤段沉积时期，发生明显海侵，区内沉积环境自西向东依次是碳酸盐台地、潟湖—潮坪、三角洲、冲积平原和河流，其中潟湖—潮坪和三角洲等主要成煤环境分布范围明显增大，更加有利于煤层发育，导致6号煤层厚度较16号、32号煤层更大，同时海水影响范围扩大使得含硫量升高，该煤层高硫煤的分布范围明显大于另两层煤。

垂向上，不同煤层之间含硫量只有细微差别（见表 1）。各煤层硫含量与深度之间的关系具有一定规律，主要表现为，高硫煤更集中分布在各煤层埋深相对较浅的部位，例如 16 号煤，除了 3 个样品点例外，其余数据中高硫煤均分布在埋深 800 m 以浅的部位（见图 3）。此外，6 号煤也表现为在浅部硫含量更高，32 号煤由于缺少深部样品数据，未能显示出类似规律，但在埋深 800 m 附近仍然出现含硫量的陡崖式下降。通常，煤层含硫量随埋深增加而升高是普遍规律，原因是在还原性沉积环境中，随着埋深增加，地层压力增大、封闭性增强，硫酸盐还原菌更活跃，将硫酸盐还原为硫化氢，与铁离子结合形成黄铁矿硫，导致煤中硫分升高^[25,31]。本文难以对同一煤层深部（埋深>800 m）硫含量普遍低于浅部（埋深<800 m）的原因做出准确判断，但通过整理分析煤层同时含有全硫和吸水率、孔隙率的样本数据，分别进行全硫与吸水率、孔隙率的相关性分析发现，硫含量与吸水率和孔隙率均呈显著负相关，并且在含硫量随埋深变化关系最突出的 16 号煤这种相关性更强（见图 4）。这个结果暗示深部煤层压力大，如果孔隙率较高能够为流体提供运移通道，那深部高压将使煤层中的流体从高压区向低压区运移，导致深部煤层中的硫有向浅部运移的趋势，从而造成浅部煤层含硫量升高、深部含硫量降低。然而，由于本文中同时具有全硫、吸水率、孔隙率数据的样本较少，相关解释的准确性还需要更多数据和模拟试验加以证实，值得深入探讨。

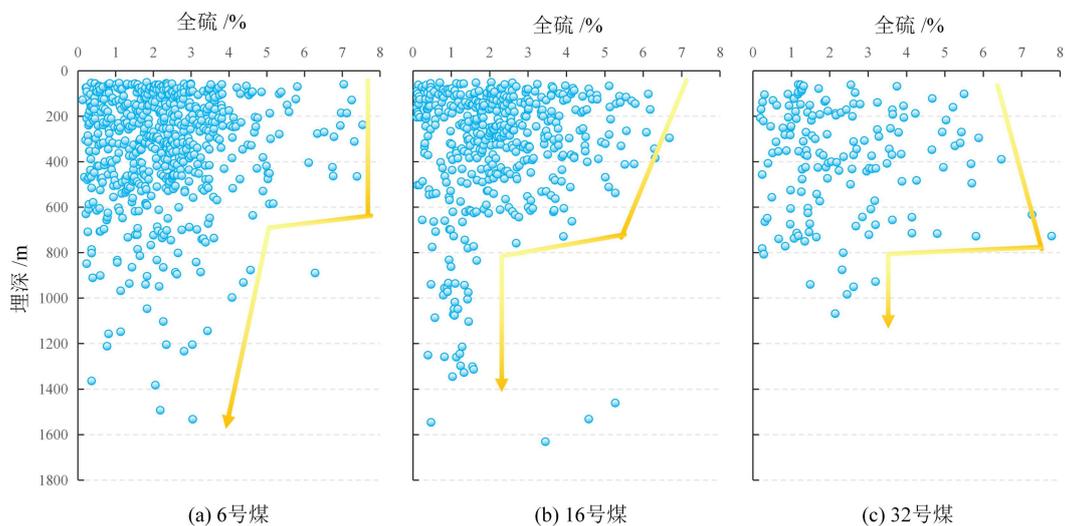


图 3 煤层埋深与全硫含量关系(全硫含量随埋深的变化趋势方向)

Fig.3 Relationship between coal seam burial depth and total sulfur content (Trend direction of total sulphur content with burial depth)

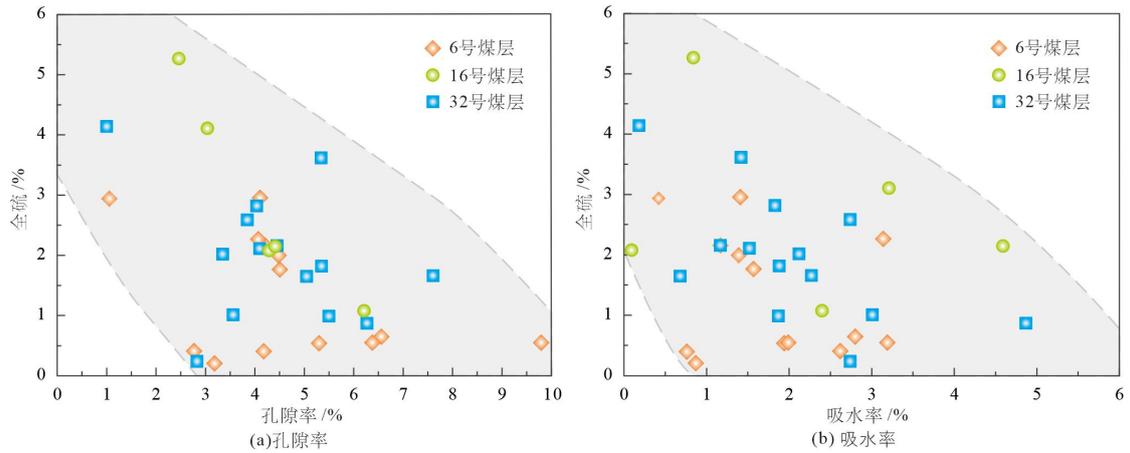


图4 煤中全硫与孔隙率、吸水率关系（虚线表示全硫含量随孔隙率/吸水率变化的拟合趋势带边界）

Fig.4 Relationship between total sulfur content in coal and porosity and water absorption rate (The dashed line indicates the fitted trend band boundary for total sulphur content as a function of porosity/water absorption rate)

3.2 硫的赋存形态

煤中硫的赋存形态包括有机硫和无机硫，煤质分析中通常采用全硫减去无机硫获得有机硫含量^[32]。无机硫主要包括黄铁矿硫和硫酸盐硫，前者是煤中最常见的无机硫形态；后者在煤中含量相对较少，通常是由于成煤过程中受到外界地质条件的影响，使一些含硫酸根的矿物质混入煤中而形成^[8,28,33]。

黔西北地区龙潭组6号、16号和32号煤层中硫赋存形态主要为黄铁矿硫，含量为0~7.37%，平均含量1.66%，在全硫中平均占比63.09%；有机硫含量0~5.87%，平均值0.43%，在全硫中平均占比25.00%；硫酸盐硫较少，含量0~6.81%，平均值0.35%，在全硫中占比0~98.87%，平均11.91%。分煤层对比，区内三层目标煤层的形态硫分布如图6a，6号煤层黄铁矿硫、有机硫和硫酸盐硫平均含量分别为1.73%、0.45%和0.35%，在全硫中占比分别为68.38%、17.79%和13.83%；16号煤层3类形态硫的含量平均值依次为1.61%、0.41%和0.44%，占全硫比重为65.45%、16.67%和17.88%；32号煤层中3类形态硫含量平均值为1.71%、0.49%和0.07%，占全硫比重为75.33%、21.59%和3.08% [见图5(b)]。选取研究区内九个构造单元的黄铁矿硫、有机硫、硫酸盐硫平均值绘制图6，研究区内不同位置，形态硫组成特征也有明显差异，主要表现为黄铁矿硫含量自西向东逐渐增加；有机硫

在全区自西向东部分区段有增加趋势，整体东西部差异不大；硫酸盐硫整体含量较低，特别是在 32 号煤层，占全硫比重仅 3.08%，6 号和 16 号煤层在局部区块硫酸盐硫含量异常高，导致这两层煤中该类型硫的占比明显高于 32 号煤（见图 6）。例如，6 号煤在 D5 处硫酸盐硫含量达到 0.46%，超过了此处的有机硫含量 0.43%；16 号煤在 D8 处硫酸盐硫含量为 0.59%，远高于其他区块。

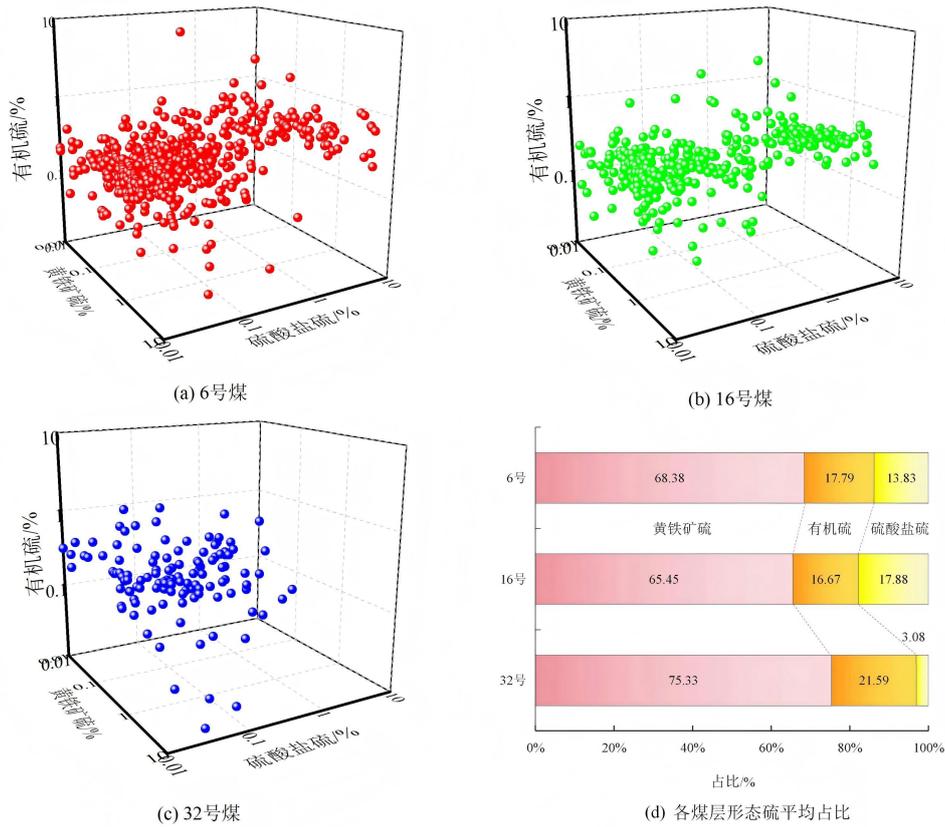


图 5 煤层形态硫含量统计

Fig.5 Statistics on the sulfur content of coal seam morphology

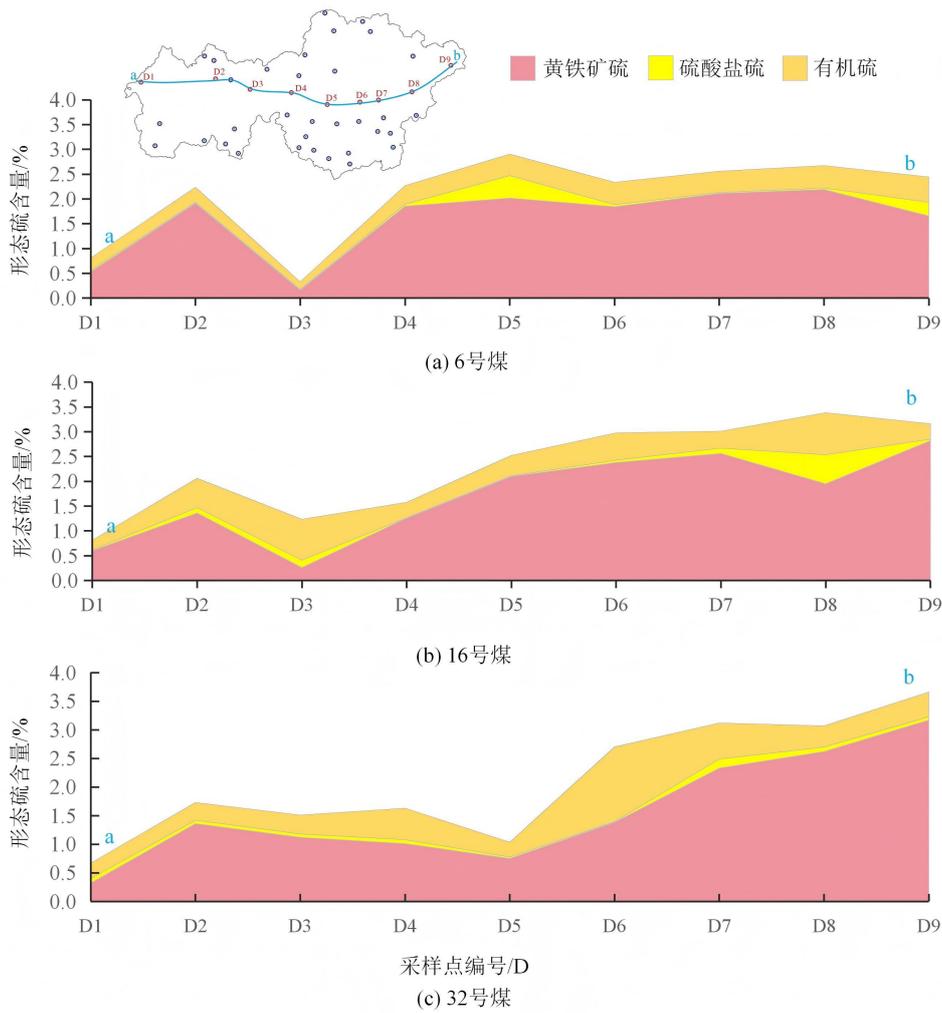


Fig.6 Distribution of morphological sulfur in each coal seam in the study area

煤中硫的赋存形态主要受沉积环境、母质类型和成岩演化过程等因素的影响。沉积阶段，黄铁矿硫的形成需要硫化环境且富含铁离子，硫酸盐还原菌将水体中的硫酸盐还原为 H_2S ，同时在硫化环境下铁离子主要以 Fe^{2+} 形式赋存，二者在酸性条件下反应生成黄铁矿^[34]（见图 7）。成岩阶段，由于生成黄铁矿的反应是一个可逆反应^[35]，早期形成的黄铁矿可能被分解，同时有机质热解产生 H_2S 和有机酸，加上煤岩中早期形成的单硫化物，与地层水中携带的 Fe^{2+} 结合可以形成新的黄铁矿。硫酸盐硫的形成机制包括成煤后期或暴露地表时，黄铁矿或有机硫被氧化生成硫酸盐矿物，或者是地下水携带的硫酸盐矿物在煤裂隙中沉淀^[36]。有机硫来源主要包括成煤母质本身含硫氨基酸在泥炭化阶段保留， H_2S 与有机质在微生物或热力催化下反应形成硫醇、噻吩等结构^[37]。

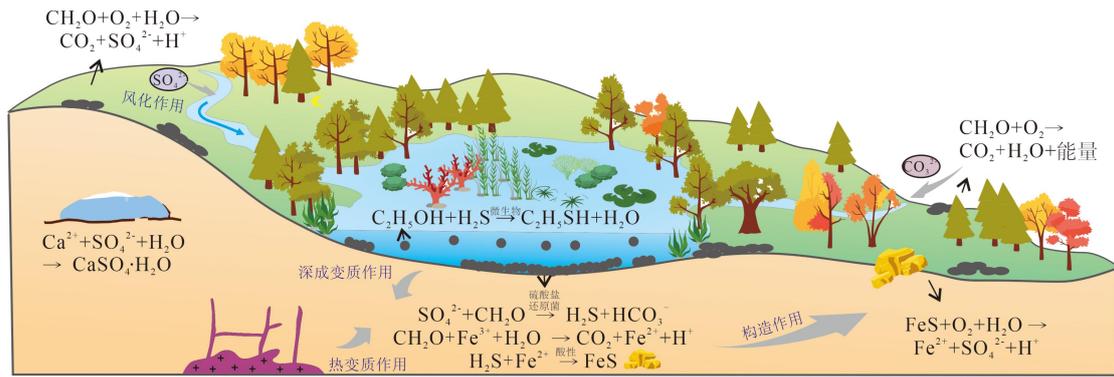


图7 煤中不同形态硫形成模式 (图中化学反应原理参考[38-39])

Fig.7 Schematic diagram of the formation of different forms of sulfur in coal (Chemical reaction principles in the figure are referenced from [38-39])

煤中不同类型的硫形成后并不是固定不变的，它们之间可以发生相互转化，例如，在氧化环境下黄铁矿硫和有机硫转化为硫酸盐硫；在还原性成岩环境，硫酸盐还原菌利用有机质作为电子供体，将 SO_4^{2-} 还原为 H_2S ，再与 Fe^{2+} 反应最终转化为黄铁矿硫；在有机质热演化过程中，有机硫热裂解释放 H_2S ，与铁矿物反应生成黄铁矿，同时黄铁矿能在热液作用下分解，释放的硫可能与有机质重新结合。研究区形态硫分布规律（见图7）表明，煤中无机硫主要来源于沉积水体中 SO_4^{2-} ， SO_4^{2-} 在成煤作用过程中被泥炭、煤中大量有机质还原形成 H_2S ，并与 Fe^{2+} 结合形成 FeS ；泥炭在还原条件下得以保存，并在还原条件下经历煤化作用演化成煤，这种条件导致煤中残留的 SO_4^{2-} 极少，研究区局部区块6号和16号煤 SO_4^{2-} 异常富集应当是受地下水影响。

3.3 硫赋存对煤中其他元素分布的影响

煤中硫是多种元素的载体，其中包括有害元素 Hg、Cd、Pb、As、F 等，以及有用元素 Ge、Ga、U、Ni、Co 等^[40]。例如，鄂尔多斯盆地宁东地区晚古生代煤中，黄铁矿硫与 Pb、Cl、F、As 具有正相关关系，有机硫与 Ga 存在负相关关系^[41]；沁水盆地晚古生代煤中，黄铁矿是有害微量元素 As、Se 和 Hg 的重要载体，而有机硫决定了煤中 U 的富集^[24]；淮北煤田古生代煤层黄铁矿与 Co、Ni、As、Se、Pb、Cu 等元素显著正相关，有机硫则与 Mo 正相关性较明显^[42]；阿巴拉契亚盆地宾夕法尼亚纪煤层黄铁矿中富集 As、Se、Hg、Pb、Ni 等元素^[43]。可见，煤中硫与多种元素的富集具有密切关联，但不同地区、不同煤层中这种关系的表现形式存在明显差异，因此有必要基于区内 1480 份煤矿勘查成果资料，共计 2470 个硫含量数据、灰分主量元素含量和部分元素含量，对黔西北地区煤中硫与其他元素之间关系进行相关性统计分析。黔西北地区 6 号、16 号、32 号煤层全硫与形态硫和煤中部

分元素的相关性分析如图 8 所示，不同煤层中硫与其他元素的相关性差异较大。

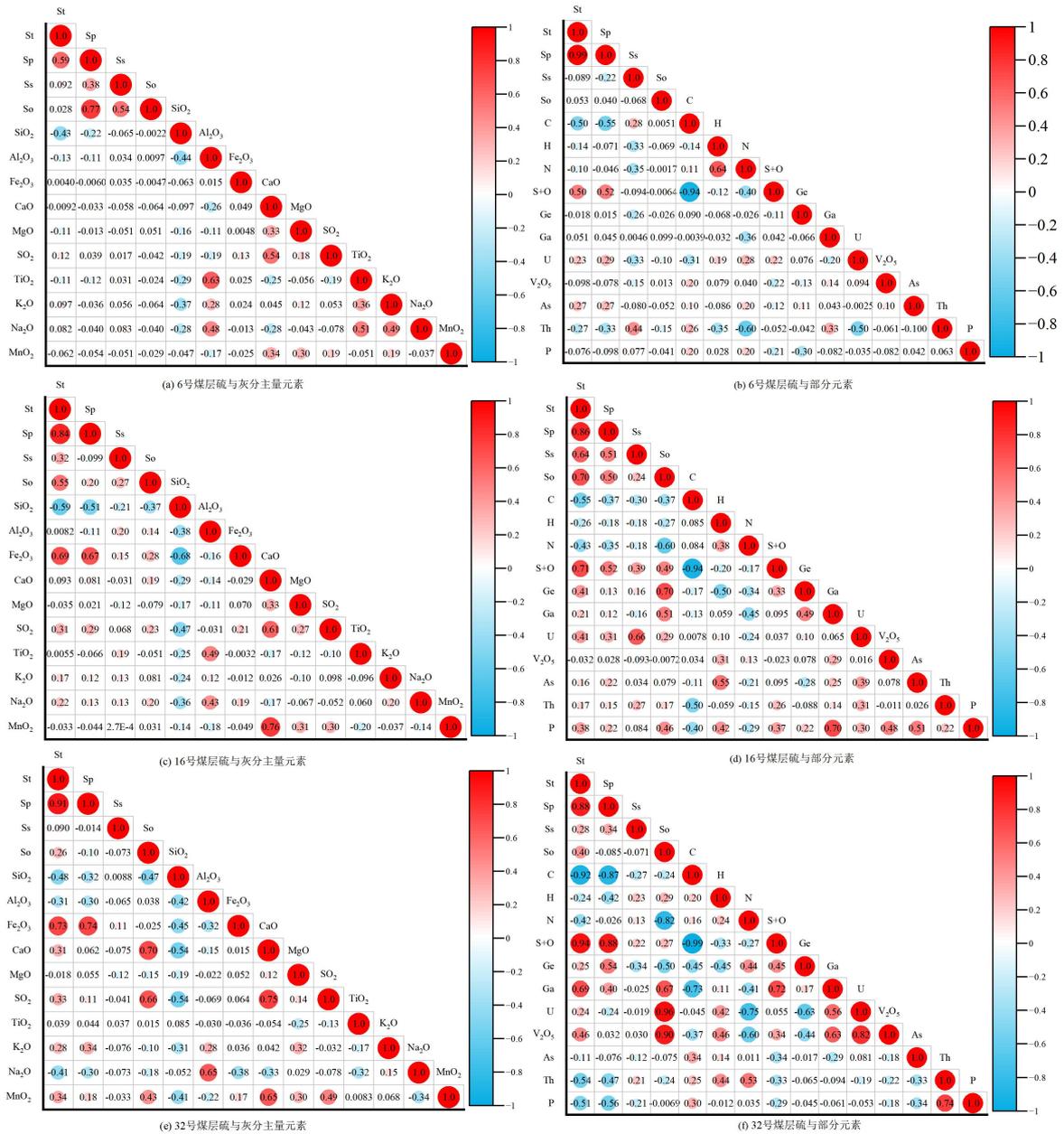


图 8 煤中硫与元素相关性（注：图中 St 为全硫；Sp 为黄铁矿硫；Ss 为硫酸盐硫；So 为有机硫）

Fig 8 Correlation between sulfur in coal and elements (Note: St represents total sulfur; Sp represents pyrite sulfur;

Ss represents sulfate sulfur; So represents organic sulfur)

6 号煤层中，黄铁矿硫（Sp）与 SiO_2 含量呈现负相关，表明在黄铁矿形成过程中，硅酸盐矿物的减少，在还原条件下，硅酸盐矿物被还原并释放出硅，而黄铁矿则在缺氧环境中形成，与灰分其他主量元素的相关性较弱。在部分元素中，与 S+O 含量呈正相关（ $R^2=0.52$ ），表明黄铁矿硫的形成与硫和氧的结合有关，可能反映了在缺氧环境中，硫以

硫化物的形式存在。与 C 含量呈负相关 ($R^2=-0.55$)，表明在煤的成煤过程中，碳的富集与黄铁矿硫的形成是两个相对独立的过程，或者黄铁矿硫的形成不利于碳的富集。与 U、As 含量呈弱正相关 ($R^2<0.5$)，在还原条件下，铀和砷更容易与黄铁矿硫结合，反映了还原环境对某些微量元素的富集作用，与 Th 含量呈弱负相关，相关系数为-0.33。硫酸盐硫 (S_s) 同样与灰分主量元素的相关性较弱，表明硫酸盐硫的形成与灰分中主量元素的关系不大，可能更多地受到水体化学条件的影响。与 C 含量呈弱正相关，与 U 含量则呈弱负相关，与 Th 含量呈正相关 ($R^2=0.44$)。对 Ge、U 含量则呈现为弱负相关，与其他部分元素相关性较弱。有机硫 (S_o) 与分析的所有元素关系均不明显，相关系数绝对值均小于 0.15，表明有机硫的形成与灰分中元素的关系不大，可能更多地与有机质的类型和演化过程有关。

16 号煤层中，黄铁矿硫 (S_p) 与 Fe_2O_3 呈正相关 ($R^2=0.67$)，表明黄铁矿硫的形成与铁的氧化物密切相关，在缺氧或还原环境中，铁通常以 Fe^{2+} 的形式存在，容易与硫结合形成黄铁矿 (FeS_2)，这种相关性可能反映了煤层形成时期的还原条件。与 SiO_2 呈现负相关 ($R^2=-0.51$)，与 U 呈弱正相关，与 C、H、N 呈弱负相关 ($R^2<0.5$)，与其他元素的相关性不明显。硫酸盐硫 (S_s) 则与 U 呈正相关 ($R^2=0.66$)，与 C、H、N 呈弱负相关 ($R^2<0.5$)。有机硫 (S_o) 与 Ge、Ga 具有显著正相关性，相关系数分别为 0.70、0.51，与 P 和 U 有弱正相关性。32 号煤层中，黄铁矿硫 (S_p) 与 Ge、Ga 正相关，与 Th、P 负相关；有机硫 (S_o) 与 Ga、U、V 等元素有显著正相关性，相关系数分别为 0.67、0.96、0.90。不同煤层之间硫与元素的差异反映不同煤层成煤环境的差异，推断 6 号煤层形成于相对稳定的弱还原环境，元素间相互作用较弱，未促使硫与元素间形成强相关性。16 号煤层对应环境还原程度增加，且环境中营养元素更富集，有机质吸附 Ge、Ga、U、P 等元素，在微生物作用下形成络合物，导致有机硫与这些元素之间形成了较强的结合关系。32 号煤层对应的环境为强还原环境，强还原条件导致煤层中主要为黄铁矿硫和有机硫，且富集 U、V 等氧化还原敏感元素，而非敏感元素 Th 则较少。

类似现象也可以通过硫与煤灰分主量元素之间的相关性（见图 8）加以验证。6 号煤层中全硫、形态硫与煤灰分中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaO、MgO、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO_2 均无明显相关性。16 号和 32 号煤层中全硫、黄铁矿硫与煤灰分中 Fe_2O_3 呈显著正相关，有机硫与 CaO 和 SO_2 具有正相关性。这些结果也暗示 6 号煤中金属元素的富集受硫的影响较小，可能与其他元素结合赋存。

4 地质意义

4.1 古生物演化和古气候特征

煤中硫含量及其赋存状态蕴含着丰富的古环境、古地理信息，对揭示古生物演化具有重要指示作用，较高的黄铁矿硫含量对应较强还原环境甚至硫化环境，暗示着特定微生物群落的活动，这些微生物在硫循环中发挥着关键作用，影响着古生物的生存和演化^[44,45]。有机硫的形成与富集则可能与古生物有机质的分解和转化密切相关，反映了当时生物地球化学过程的特点^[37]。硫酸盐硫的变化可指示沉积水体的化学性质和古气候条件，进而影响着古生物的栖息环境^[46]。通过研究煤中硫含量和赋存状态的变化，能够推断古生物群落的结构和演替规律，有助于深入认识古生物与古环境之间的相互作用关系，为准确理解古生物演化提供独特的视角和重要依据。

黔西北地区龙潭组自下而上不同含煤段古生物具有明显演化特征^[17,47]。下含煤段有腹足、双壳、有孔虫、藻类、海百合、苔藓虫等生物，且藻类丰度较高（见图 9）。中含煤段，腕足、苔藓虫的丰度明显增加，藻类和有孔虫丰度降低，反映水体变浅，还原程度降低，这与该段全硫（见表 1）、黄铁矿硫（见图 6）含量的降低相符。上含煤段生物种类相比中含煤段有所增加，并且生物丰度较稳定，浮游生物的增加反映水体可能再次升高。下段：藻-有孔虫组合；中段：腕足-苔藓虫增多、藻减少；上段：浮游生物再增多，构成了一个完整的海进-海退-再海进旋回。16 号煤层在最大海退面附近，对应水体最浅、氧化最强、全硫与黄铁矿硫最低的位置。草莓状黄铁矿是煤中黄铁矿比较常见的显微结构，其粒径大小与沉积环境氧化还原条件密切相关，通常，较小粒径（如小于 10 μm ）指示强烈缺氧的静水环境，较大或变形粒径可能指示动荡水体或后期改造。本文通过扫描电镜观察测量了龙潭组 6 号、16 号、32 号煤层中草莓状黄铁矿粒径，这三层煤中均发育大量草莓状黄铁矿，粒径介于 0.47~5.11 μm ，其中 32 号煤层 0.47~3.22 μm ，16 号煤层 0.55~5.11 μm ，6 号煤层 0.59~3.91 μm ，均表明煤层形成时经历了强还原—硫化环境，但 32 号和 6 号煤层还原程度相比 16 号煤层更强，有利于硫酸还原菌持续活动；中段粒径最大，且硫含量最低，说明短暂的海退使底水氧化，抑制硫化作用。16 号煤层在黔西北龙潭组内具有比较鲜明的特征，可在野外或钻孔的无化石段快速识别，可作为标志层。强还原层（6 号、32 号）的高黄铁矿硫不仅意味着存在潜在的 H_2S 气源，也暗示 As、Se、Hg 等有害元素容易以硫化物形式存在，但 16 号煤因氧化行增强，黄铁矿硫含量低于 16 号和 32 号煤层，可作为“清洁煤”优先开采。

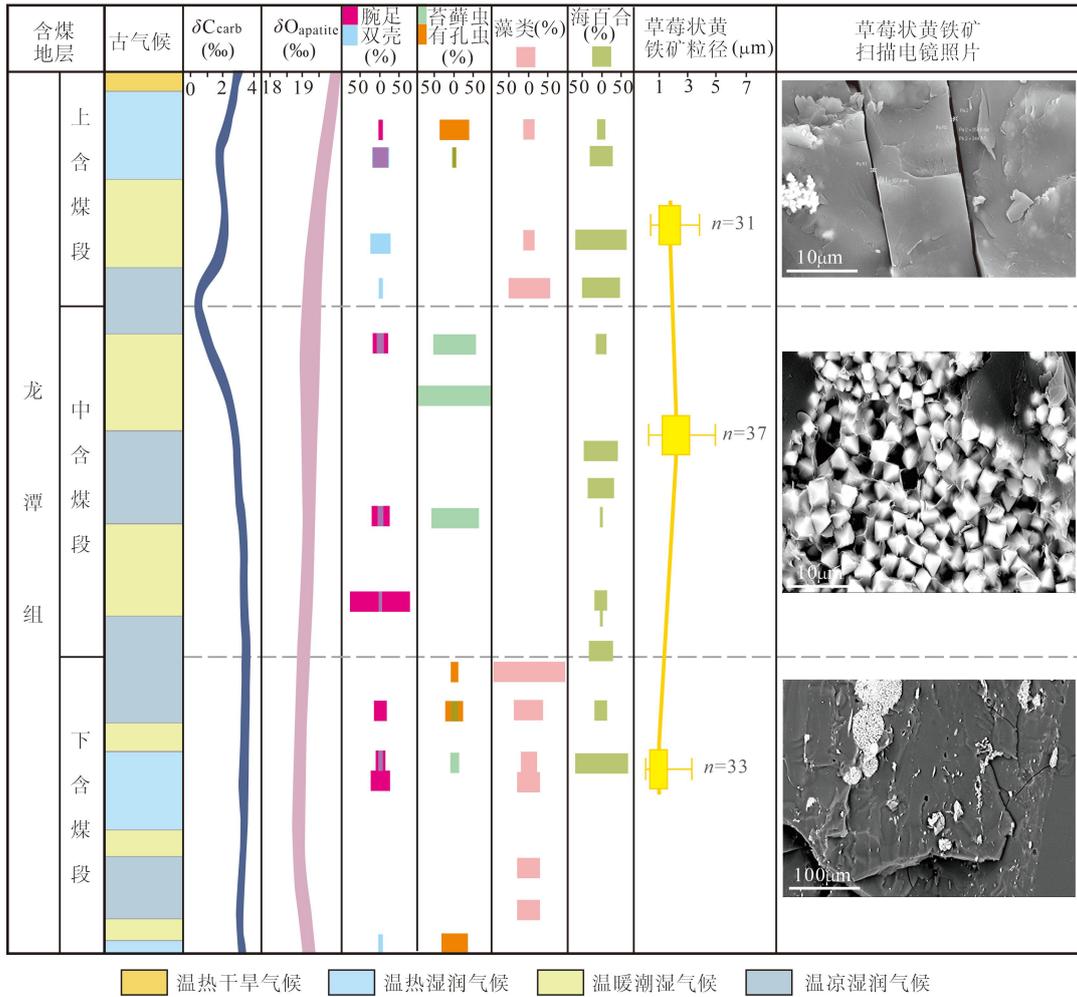


图9 研究区龙潭组古生物及地球化学特征 (古气候参考文献[48], 碳氧同位素参考文献[49], 古生物信息参考文献[17,47])

Fig.9 Paleontological and geochemical characteristics of the Longtan Formation in the study area (paleoclimate references [48], carbon and oxygen isotope references [49], paleontological information references [17,47])

通过古生物特征和含硫特征，结合前人研究认识推断龙潭组下含煤段沉积时期水体相对较深，水体还原程度强；中含煤段沉积时期水体深度和还原程度均有降低；上含煤段水体深度和还原程度再次升高，但仍低于下含煤段沉积时期。可见，煤中硫含量和赋存特征对于成煤环境以及古生物演化特征有较好的耦合关系，后续有必要针对黔西地区上二叠统煤系地层系统地开展相关研究。

4.2 对煤转化的影响

黔西北地区6号、16号、32号煤层中均含有大量的黄铁矿硫[见图5(b)]，图6，三层煤的煤化程度均较高，镜质体反射率介于1.36%~3.87%，主体在2.0%以上，在织金—纳雍—七星关一线镜质体反射率最高，在西部威宁最低（见图10）。黄铁矿硫含量分布与全

硫含量分布（见图 2）分布趋势相近，整体表现为自西向东，黄铁矿硫含量逐渐增加（见图 10）。煤岩镜质体反射率与黄铁矿硫含量分布趋势具有相似性，导致在研究区西部低煤岩变质演化程度地区煤层对应黄铁矿含量和全硫含量均较低，对于煤向液态烃、气态烃的转化中，转化潜力与潜在催化剂分布不对应。

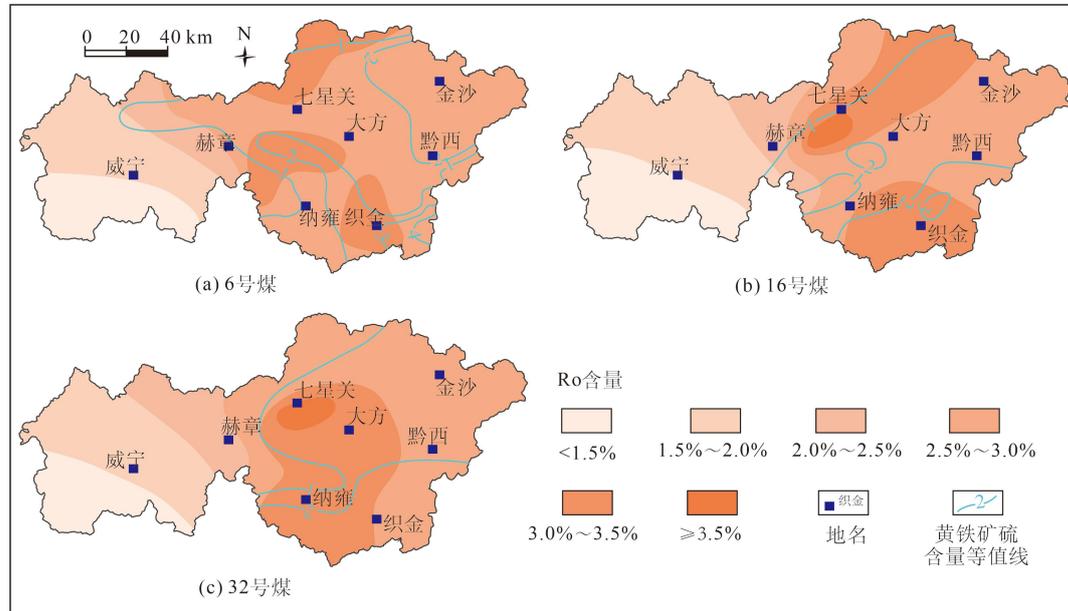


图 10 研究区目标煤层镜质体反射率和黄铁矿硫分布

Fig.10 Reflectance of vitrinite and distribution of pyrite in the target coal seam of the study area

5 结论与展望

系统收集黔西北地区上二叠统煤炭地质成果资料，分析了该地区不同含煤段代表煤层（6号、16号和32号）中硫的赋存特征，讨论了其地质意义，主要结论和展望如下。

（1）研究区内煤层整体含硫量较高，中高硫煤为主，由西向东递增，中含煤段沉积时期海水影响范围扩大，16号煤层中高硫煤分布范围大于6号和32号。硫含量及赋存特征与地层压力、温度之间存在紧密关联，后续可开展相关试验模拟研究工作。

（2）煤中硫的赋存形态均以黄铁矿硫为主，黄铁矿硫、有机硫和硫酸盐硫在全硫中平均占比分别为63.09%、25.00%和11.91%。研究区黄铁矿硫含量内自西向东逐渐增加，有机硫在全区分布较均匀，硫酸盐硫整体含量较低，受地下水影响局部含量异常高。

（3）煤中硫赋存特征与微量元素、古生物演化、硫循环以及煤的转化等有密切关联。不同煤层中硫与微量元素的关联性存差异，6号煤中黄铁矿硫与U和As含量呈正相关、与Th含量呈负相关；16号煤中黄铁矿硫与U含量呈正相关；32号煤中黄铁矿硫与Ge和

Ga 含量正相关，与 Th 和 P 含量负相关。龙潭组下含煤段沉积时期水体相对较深，水体还原程度强，到中含煤段沉积时期水体深度和还原程度均有降低，上含煤段水体深度和还原程度再次升高。研究区煤中硫赋存特征与古生物演化有关系，后续可针对煤系地层剖面开展高精度地球化学和古生物学分析，深入认识煤中硫赋存特征对古生物演化的指示关系。

参考文献

- [1] TSAI L Y, CHEN C F, FINKELMAN R B. Composition and trace element content of coal in Taiwan,China [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2005, 16(3): 641-650.
- [2] 胡军,郑宝山,王明仕,等.中国煤中硫的分布特征及成因[J].*煤炭转化*,2005 ,28(4):5-10.
HU Jun, ZHENG Baoshan, WANG Mingshi, et al. Distribution characteristics and genesis of sulfur in Chinese coal[J]. *Coal Conversion*, 2005 ,28 (4): 5-10.
- [3] 任德贻. 煤的微量元素地球化学[M].北京:科学出版社,2006.
REN Deyi. *Geochemistry of Trace Elements in Coal*[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [4] 赵福平. 贵州省晚二叠世煤中硫的分布特征及成因[J].*煤炭转化*, 2007 ,30(3): 16-20.
ZHAO Fuping. Distribution characteristics and genesis of sulfur in Late Permian coal in Guizhou Province[J]. *Coal Conversion*, 2007,30 (3): 16-20.
- [5] 谢俊邦. 贵州省区域地质志[M].北京:地质出版社. 1987.
XIE Junbang. *Regional Geology of Guizhou Province*[M]. Beijing. Geological Publishing House ,1987.
- [6] LOU Yi, SU Y L, WANG W D, et al. Coal Facies and its effects on pore characteristics of the Late Permian Longtan coal, Western Guizhou, China[J]. *Geofluids*, 2022, 6071514.
- [7] 陈朝玉.黔西北晚二叠世含煤岩系高分辨率层序地层与聚煤模式研究[D].北京: 中国地质大学,2011.
CHEN Chaoyu. High-resolution Sequence Stratigraphy and Coal Accumulation Model of the Late Permian Coal-bearing Strata in Northwestern Guizhou[D]. Beijing : China University of Geosciences, 2011.
- [8] CHOU C. Sulfur in coals: A review of geochemistry and origins[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 100: 1-13.
- [9] TURNER B, RICHARDSON D. Geological controls on the sulphur content of coal seams in the Northumberland Coalfield, Northeast England[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 60(2-4): 169-196.
- [10] DAI S, REN D. Effects of magmatic intrusion on mineralogy and geochemistry of coals from the Fengfeng-Handan Coalfield, Hebei, China[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(3): 1663-1673.
- [11] SEAL R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 61(1): 633-677.
- [12] JIANG Y, ELSWICK E, MASTALERZ M. Progression in sulfur isotopic compositions from coal to fly ash: Examples from single-source combustion in Indiana[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73(3-4): 273-284.
- [13] BAI OUMY H. Sulfur geochemistry of Jurassic high-sulfur coals from Egypt[J]. *Geochemistry*, 2010, 70(1): 61-67.
- [14] DAI S, REN D, TANG Y, et al. Distribution, isotopic variation and origin of sulfur in coals in the Wuda coalfield, Inner Mongolia, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 51(4): 237-250.
- [15] CANFIELD D. Sulfur isotopes in coal constrain the evolution of the Phanerozoic sulfur cycle. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (21): 8443-6.
- [16] DIEHL S, GOLDBABER M, KOENIG A, et al. Distribution of arsenic, selenium, and other trace elements in high pyrite Appalachian coals: Evidence for multiple episodes of pyrite formation[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 238-249.
- [17] WANG X, DI S, CHOU C , et al. Mineralogy and geochemistry of Late Permian coals from the Taoshuping Mine, Yunnan Province, China: Evidences for the sources of minerals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 96: 49-59.
- [18] 秦勇, 高弟. 贵州省煤层气资源潜力预测与评价[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2012.
QIN Yong, GAO Di. Prediction and Evaluation of Coalbed Methane Resource Potential in Guizhou Province[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2012.
- [19] STROBL S, SACHSENHOFER R, BECHTEL A, et al. Paleoenvironment of the Eocene coal seam in the Fushun Basin (NE China): Implications from petrography and organic geochemistry[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2014, 134: 24-37
- [20] 孙全宏. 黔西北地区龙潭组页岩气形成条件与分布预测[D]. 北京:中国地质大学 2014.
SUN Quanhong. Formation Conditions and Distribution Prediction of Shale Gas in the Longtan Formation, Northwestern

- Guizhou[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [21] 高彩霞. 川渝滇黔晚二叠世层序—古地理与聚煤规律研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2015.
GAO Caixia. Sequence-paleogeography and Coal Accumulation Patterns of the Late Permian in Sichuan, Chongqing, Yunnan, and Guizhou[D]. Beijing :China University of Mining and Technology, 2015.
- [22] 唐跃刚, 贺鑫, 程爱国, 等. 中国煤中硫含量分布特征及其沉积控制[J]. 煤炭学报, 2015, 40(9): 1977-1988.
TANG Yuegang, HE Xin, CHENG Aiguo, et al. Distribution characteristics and sedimentary control of sulfur content in Chinese coal[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1977-1988.
- [23] 邵龙义,张超,闫志明,等. 华南晚二叠世层序——古地理及聚煤规律[J]. 古地理学报, 2016, 18(6): 905-919.
SHAO Longyi, ZHANG Chao, YAN Zhiming, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation patterns of the Late Permian in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(6): 905-919.
- [24] 刘贝, 黄文辉, 敖卫华, 等. 沁水盆地晚古生代煤中硫的地球化学特征及其对有害微量元素富集的影响[J]. 地学前缘, 2016, 23(3): 59-67.
LIU Bei, HUANG Wenhui, AO Weihua, et al. Geochemical characteristics of sulfur in Late Paleozoic coal from the Qinshui Basin and its influence on the enrichment of harmful trace elements[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(3): 59-67.
- [25] AN Y, LIU L, WANG M, et al. Source and enrichment of toxic elements in coal seams around mafic intrusions: Constraints from pyrites in the Yuandian coal mine in Anhui, Eastern China[J]. Minerals, 2018, 8(4): 164.
- [26] 张杰芳, 刘桂建, 付彪, 等. 贵州晚二叠世高硫煤中黄铁矿的赋存特征及其地质成因[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 1094-1103.
ZHANG Jiefang, LIU Guijian, FU Biao, et al. Occurrence characteristics and geological genesis of pyrite in high-sulfur coal of the Late Permian in Guizhou[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4): 1094-1103.
- [27] 朱科宇. 湖北秭归及京山中二叠世茅口组沉积相与化石群落演化对比[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
ZHU Keyu. Comparative Study on Sedimentary Facies and Fossil Community Evolution of the Maokou Formation (Middle Permian) in Zigui and Jingshan, Hubei[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019.
- [28] 沈树忠, 张华, 张以春, 等. 中国二叠纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学:地球科学, 2019, 49(1): 160-193.
SHEN Shuzhong, ZHANG Hua, ZHANG Yichun, et al. Integrated stratigraphy and temporal framework of the Permian in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 49(1): 160-193.
- [29] ZHOU CHENGLIN. Geologic characteristics of sulfur coal and development of the clean coal technologies [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(S): 23-27.
- [30] MEDUNIC G, GRIGOREB M, DAI S, et al. Characterization of superhigh-organic-sulfur Raša coal, Istria, Croatia, and its environmental implication[J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 217: 103344.
- [31] 马良. 煤中硫分布特征及其沉积成因研究: 以鄂尔多斯盆地榆横矿区南区为例[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 200-209.
MA Liang. Study on the distribution characteristics and sedimentary genesis of sulfur in coal: A case study of the southern area of Yuheng mining district, Ordos Basin[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 200-209.
- [32] 吴蒙, 秦云虎, 王晓青, 等. 宁东地区晚古生代煤中硫的地化特征及其对有害元素富集的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 932-942.
WU Meng, QIN Yunhu, WANG Xiaoqing, et al. Geochemical characteristics of sulfur in Late Paleozoic coal and its influence on the enrichment of harmful elements in the Ningdong area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 932-942.
- [33] SHEN Y, HU Y, WANG M, et al. Speciation and thermal transformation of sulfur forms in high-sulfur coal and its utilization in coal-blending coking process: A review[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2021, 35(7): 70-82.
- [34] 朱银惠, 郭立达. 煤化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
ZHU Yinhui, GUO Lida. Coal Chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2021.
- [35] WILKIN R, BARNES H.. Formation processes of framboidal pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(2), 323-339.
- [36] 赵青, 戴晓燕, 刘波, 等. 滇东-黔西二叠系龙潭组层序格架内致密天然气储层特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 12-23.
ZHAO Qing, DAI Xiaoyan, LIU Bo, et al. Characteristics of tight natural gas reservoirs within the sequence framework of the Permian Longtan Formation in eastern Yunnan and western Guizhou[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science &

Technology Edition), 2022, 49(1): 12-23.

- [37] 陈丛. 煤中有机硫的赋存、演化及其对煤结构的影响研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2022.
CHEN Cong. Study on the Occurrence, Evolution, and Influence of Organic Sulfur in Coal on Coal Structure[D]. Beijing:China University of Mining and Technology ,2022.
- [38] 代世峰, 任德贻, 唐跃刚, 等. 高硫煤中硫的地质演化模式——以内蒙古乌达矿区为例[J]. 地质论评, 2001, 47(4): 383-387.
DAI Shifeng, REN Deyi, TANG Yuegang, et al. Geological evolution model of sulfur in high-sulfur coal: A case study of the Wuda mining area, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2001, 47(4): 383-387.
- [39] 杜双雪. 基于不同形态硫物种的提取揭示喀斯特中高硫煤矿区煤中硫的演化特征[D]. 贵州: 贵州大学, 2024.
DU Shuangxue. Extraction-based Characterization of Different Sulfur Species Revealing the Evolution of Sulfur in High-sulfur Coal from a Karst Mining Area[D]. Guizhou: Guizhou University, 2024.
- [40] 张云飞. 黔西晚二叠世古气候演化及其天文轨道指示[D]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
ZHANG Yunfei. Paleo-climate Evolution and Its Astronomical Orbital Indications in Western Guizhou During the Late Permian[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2023.
- [41] MA D, WANG Q. Experimental study on preparation of calcium oxide by coal reduction of calcium sulfate in carbon dioxide atmosphere[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2023, 98(9): 2192-2202.
- [42] WANG X, MA T, TANG Y, et al. Volatilization of potentially harmful trace elements in coal pyrite during heat treatment in a tube furnace at 573–1473 K[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(17): 12716-12727.
- [43] WANG Y, BAI D, YANG X, et al. Soil sulfur cycle bacteria and metabolites affected by soil depth and afforestation conditions in high-sulfur coal mining areas[J]. Applied Soil Ecology, 2023, 185: 104802.
- [44] LIU H, DAI Z, WANG Y, et al. Interacting effects of water and nitrogen addition on soilplant sulfur dynamics in a semi-arid grassland[J]. Geoderma, 2024, 442: 116796.
- [45] LI H, NIE Q, WANG C, et al. Durability investigation of fractured coal-gasified ash slag concrete eroded by sulfate and chlorine salts[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02745.
- [46] MA Q, TOU C, TANG S, et al. Biodegradation and bioavailability of low-molecular-weight dissolved organic sulphur in soil and its role in plant-microbial S cycling[J]. Plant and Soil, 2024, 496(1): 623-640.
- [47] MOU Y, XIA P, ZHU L, et al. Geochemical characteristics of the shale gas reservoirs in Guizhou Province, South China[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(3): 105616.
- [48] PATRIA A A, SUHEBDRA R, ANGGARA F, et al. Association and textural-compositional evolution of pyrite-organic matter in coals of the Tarakan, Barito, and Pasir Basins, Kalimantan, Indonesia[J]. International Journal of Coal Geology, 2024, 282: 104442.
- [49] WANG M, DU Q, LI Y, et al. Transformation of sulfur in coal during rapid pyrolysis at high temperatures[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2024, 46(1): 7547-7559.

(责任编辑 李颀家)