

基于主量元素地球化学的岩屑层位源解析

桂和荣^{1,2}, 李俊^{1,2,3}, 陈永青⁴, 余浩^{1,2}, 王浩⁴, 叶爽⁴, 陈大星⁴, 梁展⁴, 胡洋^{1,2},
郭艳^{1,2}, 许继影^{1,2}

(1. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心(宿州学院), 安徽 宿州 234000; 2. 安徽省矿井勘探工程技术研究中心, 安徽 宿州 234000; 3. 中国科学技术大学 地球与空间学院, 安徽 合肥 230000; 4. 安徽恒源煤电股份有限公司, 安徽 宿州 234000)

摘要:近年来, 岩屑录井在“华北型”煤田底板灰岩层注浆加固工程中发挥了重要作用。然而, 现有的岩屑录井仅停留在颜色、颗粒大小及形貌特征等物理指标的识别上, 难以精准判层, 钻孔设计“顺层率”难以保障, 制约着底板灰岩水害区域治理效果。基于石炭纪太原组薄层灰岩及其碎屑岩夹层的元素地球化学差异特点, 选取淮北煤田桃园煤矿为研究区, 对太原组上段薄层灰岩 L₁ 灰~L₄ 灰地层(注浆治理目的层为 L₃ 灰)垂直钻孔岩心进行取样, 利用 X 射线荧光光谱仪(XRF)定量测定了薄层灰岩及其夹层的元素背景值, 通过聚类分析、因子分析等数理统计手段建立薄层灰岩主量元素地球化学识别模式; 同时对地面定向钻水平分支孔岩屑同样开展主量元素测试, 并基于已建立的地球化学识别模式进行岩屑层位源解析以及识别模式验证。结果显示: 高 CaO 丰度、烧失量(LOI)可以作为注浆加固改造目的层 L₃ 灰的特征指标, MgO(0.5%±)、MnO(0.03%±)、P₂O₅(0.08%±)丰度可作为注浆目的层上覆标志层 J₃ 的识别指标; 聚类分析识别模式可有效区分太原组一灰~三灰(L₁ 灰~L₃ 灰); 以元素因子得分建立的识别模式可以将太原组碎屑岩夹层与薄层灰岩进行有效区分; 以岩样地球化学背景值运行判别模型得到的 Fisher 判别方程对注浆目的层 L₃ 灰岩屑来源解析的准确率为 100%。基于上述认识, 论证了以确保设计“顺层率”为目标的水平分支孔岩屑地球化学源解析方法应用之可行性, 进而提出了一种地面定向钻“顺层率”控制技术方案。本研究基于元素地球化学理论, 对地面定向钻岩屑携带的特征地球化学信息进行了目的层层位辨识, 在现场快速定量测试技术手段的支持下, 可为解决华北型煤田底板灰岩水害区域注浆改造顺层难题提供了新的思路。

关键词: 主量元素丰度; 地球化学识别模式; 顺层率; 太原组薄层灰岩; 底板灰岩水害区域治理
中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0929-12

Geochemical source analysis of rock cuttings based on major elemental geochemistry

GUI Herong^{1,2}, LI Jun^{1,2,3}, CHEN Yongqing⁴, YU Hao^{1,2}, WANG Hao⁴, YE Shuang⁴, CHEN Daxing⁴, LIANG Zhan⁴,
HU Yang^{1,2}, GUO Yan^{1,2}, XU Jiying^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling (Suzhou University), Suzhou 234000, China; 2. Anhui Province Mining Exploration Engineering Technology Research Center, Suzhou 234000, China; 3. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China; 4. Hengyuan Coal Mine, Anhui Hengyuan Coal & Electric Co., Ltd., Suzhou 234000, China)

收稿日期: 2023-09-19 修回日期: 2023-12-19 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1176

基金项目: 中国博士后科学基金面上资助项目(2023M743361); 安徽省公益地质项目基金资助项目(2023-g-1-11); 安徽省教育厅重点科研资助项目(2022AH051369)

作者简介: 桂和荣(1963—), 男, 安徽舒城人, 教授, 博士生导师。E-mail: guiherong@163.com

通讯作者: 李俊(1995—), 男, 安徽长丰人, 博士后。E-mail: szxyljun@163.com

引用格式: 桂和荣, 李俊, 陈永青, 等. 基于主量元素地球化学的岩屑层位源解析[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 929-940.

GUI Herong, LI Jun, CHEN Yongqing, et al. Geochemical source analysis of rock cuttings based on major elemental geochemistry[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 929-940.



移动阅读

Abstract: In recent years, shale logging has played a crucial role in the grouting reinforcement engineering of the floor limestone strata in “North China-type” coalfields. However, existing shale logging techniques are limited to the recognition of physical indicators such as color, particle size, and morphology. This limitation makes an accurate stratification challenging, and the “along-stratum rate” in borehole design is difficult to be ensured. These constraints hinder the effectiveness of water damage control in the floor limestone strata areas. This study, based on the elemental geochemical differences in the Carboniferous Taiyuan Formation thin-layered limestone and its clastic interlayers, selected the Taoyuan Coal Mine in the Huaibei Coalfield as the research area. Some vertical core samples were obtained from drill holes in the upper part of the Taiyuan Formation, including L₁ limestone to L₄ limestone (with L₃ limestone as the grouting control target layer). Using the X-ray fluorescence spectrometry (XRF), the major elemental background values of thin-layered limestone and its interlayers were quantitatively determined. Also, a major elemental geochemical identification model was established for thin-layered limestone using mathematical statistical methods such as cluster analysis and factor analysis. Simultaneously, major elemental testing was conducted on shale samples from directional drilling horizontal branch holes. The identification pattern validation was completed through shale stratigraphic source analysis based on the established geochemical identification model. The results showed that high CaO content and Loss on Ignition (LOI) value could serve as characteristic indicators for the target layer L₃ limestone in grouting and reinforcement. Abundances of MgO (0.5%±), MnO (0.03%±), and P₂O₅ (0.08%±) could be used as recognition indicators for the overlying marker layer J₃. The cluster analysis identification model effectively distinguished the Taiyuan Formation L₁ to L₃ limestone. The model established using element factor scores effectively differentiated clastic interlayers from thin-layered limestone in the Taiyuan Formation. The Fisher discriminant equation obtained by running the model with rock geochemical background values achieved an accuracy rate of 100% in the source analysis of cuttings from grouting target layer L₃ limestone. Based on the above findings, the feasibility of applying the elemental geochemical source analysis method, aimed at ensuring the “in-layer rate” in horizontal branch hole cuttings, was demonstrated. This, in turn, led to the proposal of a ground directional drilling “in-layer rate” control technology scheme. This study, grounded in elemental geochemical theory, identified the target layer stratification through characteristic geochemical information carried by cuttings from directional drilling. With the support of on-site rapid quantitative testing techniques, the technology offers new insights into addressing the challenge of grouting and modification at bottom limestone water hazard areas in the North China-type coalfields.

Key words: abundance of major elements; geochemical identification model; bedding rate; thin-bedded limestone of the Taiyuan formation; control of floor limestone water hazards in the region

华北煤田许多矿井正在向深部延伸开采,二叠纪煤系地层底板灰岩水压高,对采掘活动的安全威胁愈加严重^[1-2]。煤系底板灰岩主要包括石炭系太原组灰岩(简称“太灰”)及奥陶系灰岩(简称“奥灰”),其中奥灰水压高、富水性强,可谓煤系底板的“汪洋大海”。二叠系下组煤距离太灰平均 50 m 左右,为矿井直接充水水源;下组煤距离奥灰平均 250 m 左右,为矿井间接充水水源,但在岩溶陷落柱等垂向导水构造的沟通下,奥灰水直接向矿坑充水,水量大、水压高,来势凶猛,通常造成突水淹井事故^[3-5]。以安徽两淮煤田为例,曾发生过 3 起重特大奥灰陷落柱突水淹井事故。因而,底板灰岩水害防治已成为华北煤田煤矿防治水的重中之重任务,煤矿企业、科研院所都十分重视底板灰岩水害防治的基础理论、技术体系与装备升级研究^[6-9],加固改造太灰、封堵垂向导水通道以阻断奥灰的“远堵近疏”底板灰岩水害防治理念已写入国家和

地方相关政策规定,煤矿水害治理模式向事前预防型转变已逐步成为煤炭行业的共识^[10-11]。

近年来,底板灰岩水害的主动防治策略分为 2 类:一是疏放降压,即在充分掌握高承压岩溶含水层水文地质条件的前提下,对工作面底板太灰进行井下超长密集钻孔区域疏降,实现煤层底板“零”承压开采,如淮北矿区孙疃煤矿^[12];二是改造带压,即按照临界突水系数反算安全隔水层厚度,进而在太灰中选择合适的薄层灰岩(即“目的层”)进行地面定向钻高压区域注浆加固改造(简称“底板区域治理”),同时封堵垂向导水通道,切断与下伏奥灰水之间的水力联系,实现安全带压开采,如淮北及淮南煤田、邯邢和焦作等矿区^[7-9,13]。深部开采下,底板灰岩水头相对增大,导水构造尤其是陷落柱等隐蔽致灾因素有可能发育,只有实施底板区域治理,通过“改造带压”技术实施,增加有效隔水层厚度,从根本上消除下组煤开采底板灰岩

水害的威胁。

近 10 a 来, 底板区域治理在华北矿区广泛应用^[14], 工艺、技术与装备日趋成熟。然而, 在实践中也存在诸多突出的“瓶颈”问题, 如水平分支孔对所选目的层的“顺层率”、浆液扩散机理与扩散半径等, 严重制约着底板区域治理的效果。其中, “顺层率”作为底板区域治理的一项重要技术指标要求(一般 85% 以上), 备受关注。保障目的层“顺层率”的方法虽然很多, 如岩屑录井、钻时录井、钻井液录井等, 但顺层误判情况时有发生^[15-16], 设计“顺层率”难以保障。随钻伽马在顺层判识中应用较多, 但在钻探高频振动环境以及不同岩性薄岩层互层发育的影响下, 随钻伽马识别岩层的效果不稳定^[15], 顺层判别精准度受到挑战。

理论和实践证明, 在保障设计“顺层率”方面, 岩屑录井法应该能够发挥重要作用。因为不同岩层, 因岩性不同, 其岩屑物性特征应该存在差异。然而, 目前所进行的岩屑录井, 仅停留在颜色、颗粒大小及形貌等物理特征的鉴别上, 顺层判识精准度有限, 特别是华北煤田太灰属多薄层灰岩互层、距离较近的海陆交互沉积地层, 夹层岩性类似, 钻进串层现象经常发生, 顺层难度大。因而, 需要另辟蹊径, 从岩屑元素地球化学入手, 开展顺层元素地球化学判别方法及应用研究, 使钻探“顺层率”达到甚至超过设计要求, 确保底板区域治理效果, 实现高承压底板灰岩水上安全开采目标。

基于地学理论, 华北煤田石炭纪距今 3.5 亿 a, 石炭纪太原组形成于距今 298~283 Ma 时间段内^[17], 沉积了 10~12 层薄层灰岩, 灰岩层之间为陆相碎屑岩(如砂岩、泥页岩)。在这 15 Ma 的沉积时段, 每一个沉积旋回至少经历百万年(2 次海侵开始之间的时间), 每一层灰岩之间、每一个碎屑岩夹层之间的元素地球化学差异悬殊; 同时, 南华北地区海陆位置及沉积环境均发生了显著变化, 对应的水体元素特征同样产生演变^[18-19]。这些地质背景为岩屑元素地球化学判层提供了理论依据。此外, 复杂火成岩、变质岩岩屑的岩性识别需求推动了诸如传统 X 射线荧光光谱(XRF)和激光诱导击穿光谱(LIBS)等元素分析技术在多应用场景中发展^[20-21], 为岩屑元素地球化学识别判层、指导钻孔顺层, 确保“顺层率”提供了可能。

笔者选取淮北煤田桃园煤矿为研究区, 以太灰上段一至四灰(L₁~L₄)为研究对象, 利用地面垂直补勘钻孔岩心和地面定向钻水平分支钻孔岩屑样品的元素地球化学测试数据, 结合数理统计方法, 捕捉目的层 L₃ 灰地球化学信息, 建立灰岩、碎屑岩地层元素背景值, 进行岩屑层位源解析, 指导水平分支孔精准“顺

层”, 提高“顺层率”, 保障华北煤田高承压底板灰岩水上安全开采。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮北煤田在大地构造位置上位于南华北地区一级构造单元淮北拗陷^[18]。桃园矿位于淮北煤田东南的宿南矿区(图 1(a)), 地面标高+21.20~+27.10 m, 地层产状受印支、燕山运动产生的推覆作用控制, 以补 3 线为界北部倾角最高达到 42°, 南部缓, 平均 21°。矿井整体在宿南背斜东翼, 构造与水文地质条件极其复杂。据统计, 山西组 10 号煤开采共发生突水 26 次, 其中底板太原组灰岩含水层突水 15 次, 水量 20~550 m³/h, 2013 年发生“2·3”奥灰岩溶陷落柱突水淹井事故, 最大突水量 29 000 m³/h。矿井主要威胁水源为底板太灰及奥灰水。该矿太原组发育 11 层薄层灰岩(总厚 76 m 左右), 其中三灰(L₃)、四灰(L₄)较厚, 岩溶发育, 富水性较强。

针对下组煤(10 号煤)底板的突水风险, 2014 年起, 对二水平(-600~-800 m)工作面底板太原组 L₃ 灰进行了地面定向钻高压区域注浆加固改造(图 1(b)、(c)), 总治理面积达 4.59 km², 注浆量共计 79.81 万 t。

1.2 取样采集与测试

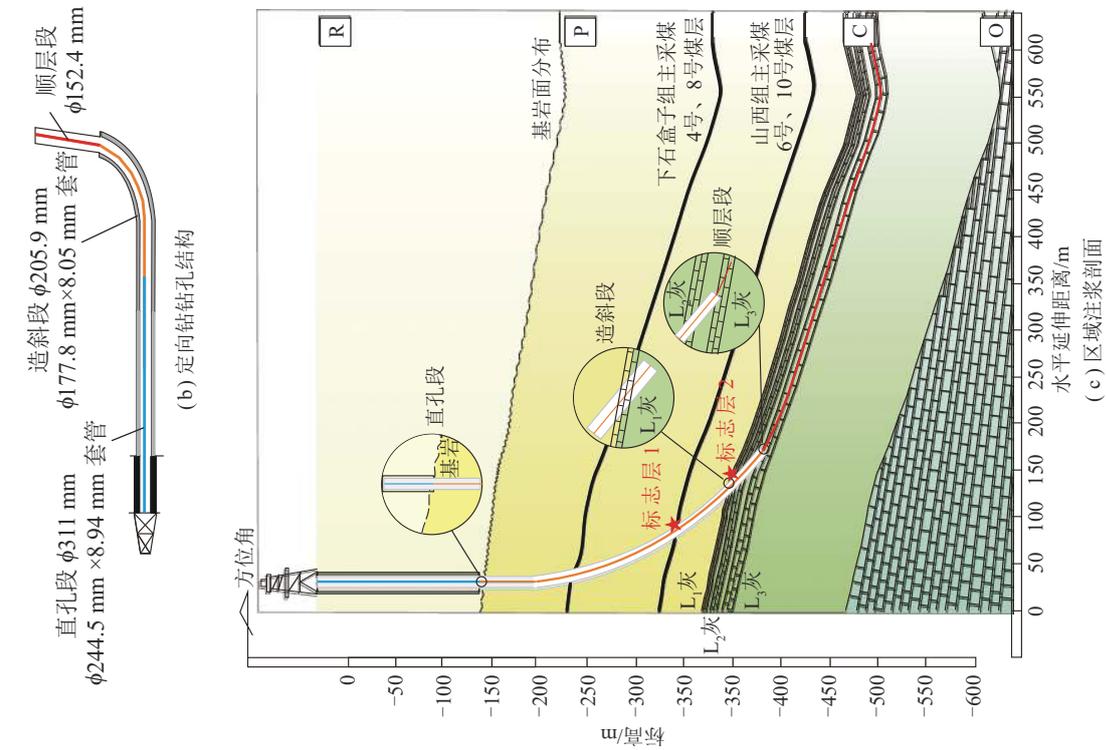
桃园矿 II₁ 采区底板区域治理面积 2.11 km², 笔者对 II₁ 采区右翼南段、II₁ 采区右翼北部 T7、L₃ 灰注浆主水平分支孔进行岩屑样品采集。考虑元素地球化学丰度存在横向差异性, 利用治理区附近垂直补勘孔(2019-2 孔)进行地层背景值岩屑取样。采集了包括太原组第 1~4 层灰岩(L₁~L₄)和灰岩顶底的泥岩、粉砂岩等碎屑岩(J₁~J₃), 如图 2 所示。其中 J₁ 为山西组底部泥岩, 整合接触于太原组第 1 层灰岩(L₁)之上。样品详细信息见表 1。

岩心及岩屑样品在测试前需要进行预处理, 样品粒径小于 200 目(<0.075 mm)。样品粉碎工作在国家煤矿水害防治工程技术研究中心岩石土壤预处理实验室完成。岩石主量元素测试在合肥工业大学分析测试中心完成, 测试仪器为日本岛津公司生产 XRF-1800X 射线荧光光谱分仪, 并选择了 GSR 系列国家岩石标准物质 GSR-1、GSR-2、GSR-3、GSR-4、GSR-5 和 GSR-13 作为标准岩石质控样, 用于控制检测仪器的精度, 测试误差 ≤0.5%。

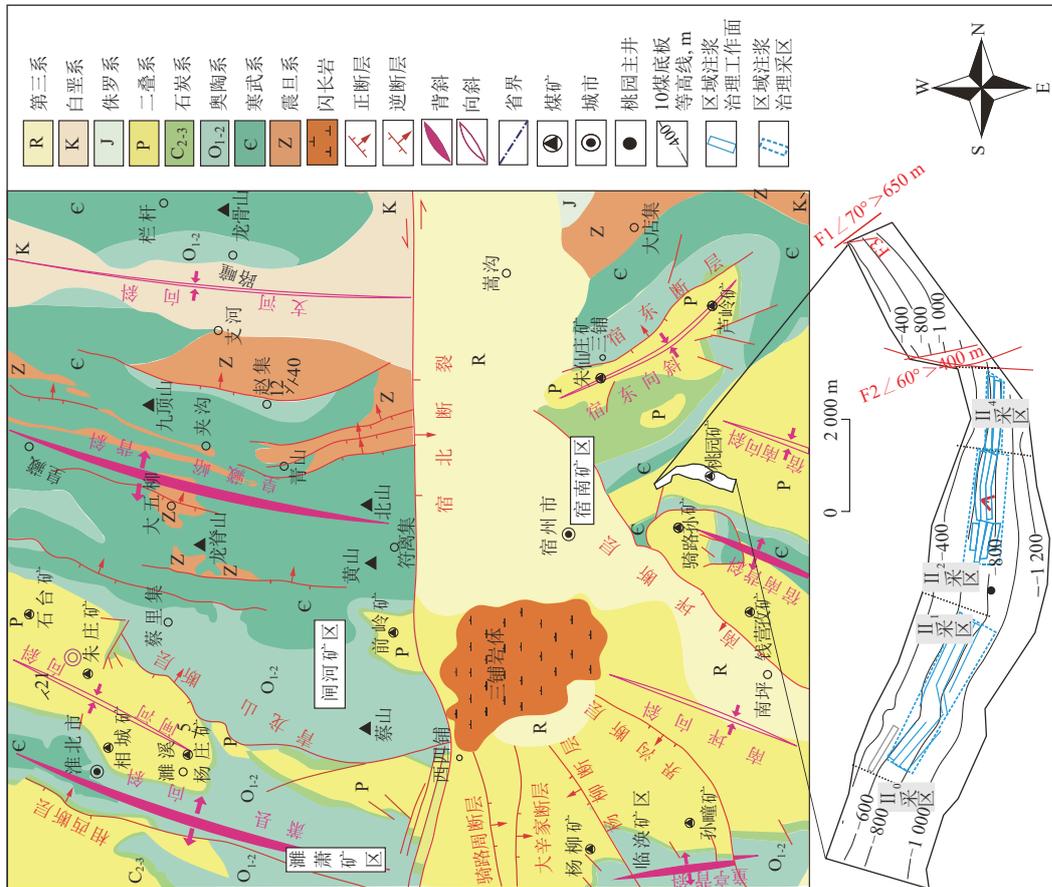
2 薄层灰岩地化背景建立

2.1 太灰上段主量元素赋存特征

2019-2 孔 24 件样品(J₄~J₁、L₄~L₁)的主量元素



(c) 区域注浆剖面



(a) 研究区构造地质简图

图1 研究区构造地质简图、定向钻孔结构、区域注浆剖面

Fig.1 Tectonic geological map of the Study Area, directional drilling borehole structure, and regional injection profile

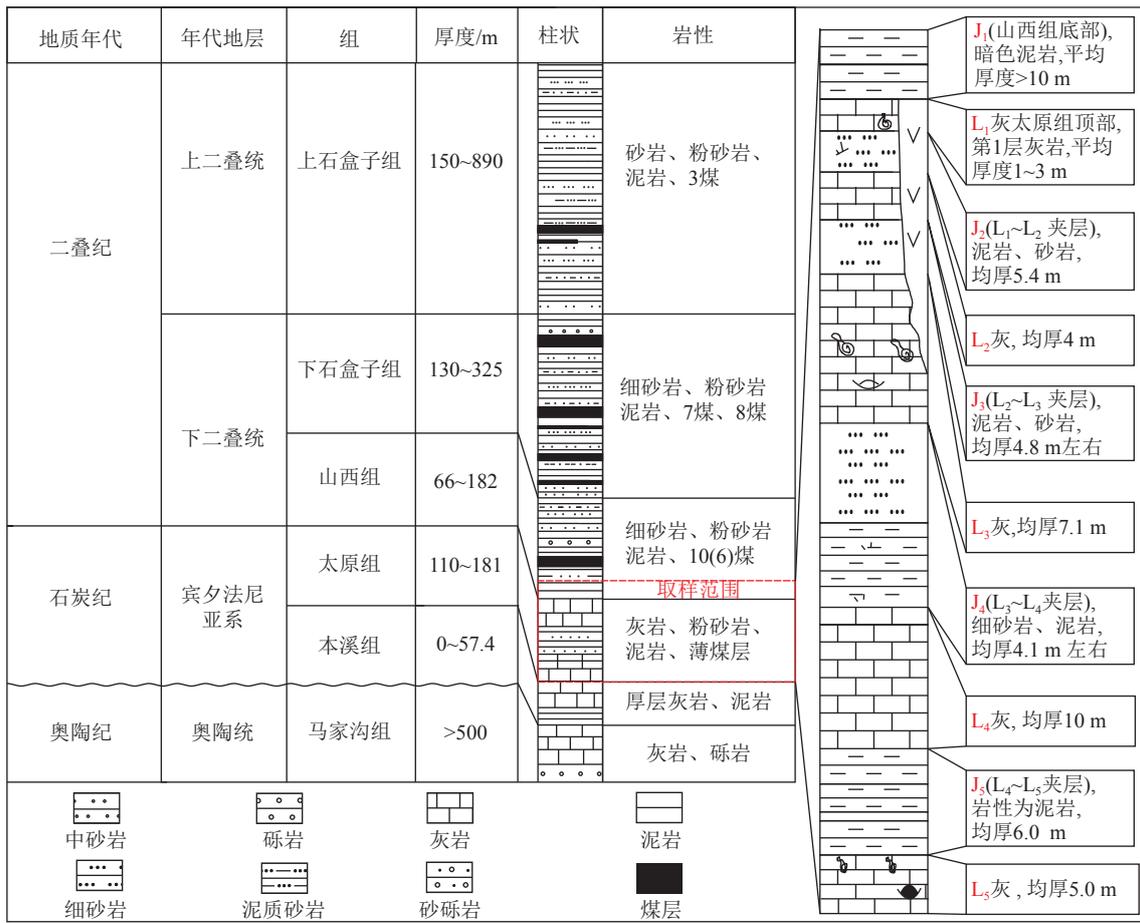


图 2 桃园煤矿太原组上段岩性剖面示意

Fig.2 Illustration of lithological profile in the Upper Section of Taoyuan Coal Mine's Taiyuan Formation

表 1 桃园煤矿太原组采集样品信息

Table 1 Sample collection information for Taiyuan Formation at Taoyuan Coal Mine

孔号	层位	取样埋深/m	数量	编号
2019-2	J ₁	802.8~804.9	3	T2-1~T2-3
	L ₁	805.2~808.6	3	T2-4~T2-6
	J ₂	809.6~813.9	3	T2-7~T2-9
	L ₂	814.1~817.7	3	T2-10~T2-12
	J ₃	818.3~821.5	3	T2-13~T2-15
	L ₃	822.0~836.1	3	T2-16~T2-18
	J ₄	837.2~841.5	4	T2-19~T2-22
T7	L ₄	841.9~843.2	2	T2-23~T2-24
	J ₁	585~599	3	T7-1~T7-3
	L ₁	605~610	2	T7-5~T7-6
	J ₂	620~635	3	T7-7~T7-9
	L ₂	638~649	3	T7-10~T7-12
	J ₃	675~680	3	T7-15~T7-17
	L ₃	685~705	3	T7-18~T7-20

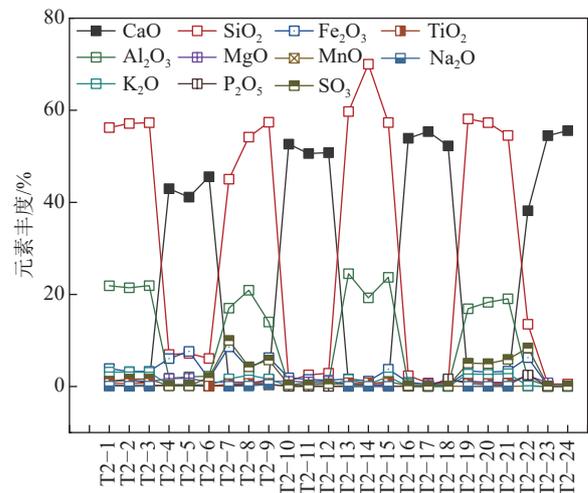


图 3 桃园煤矿太原组上段主量元素测试结果

Fig.3 Major elemental test results for the upper section of Taiyuan Formation at Taoyuan Coal Mine

丰度分布特征如图 3 所示,以氧化物表示。桃园矿 J₁ 样品中, SiO₂、Al₂O₃ 为丰度最高的主量元素,这与

XRD 矿物分析谱图中检测出石英与黏土矿物(硅铝酸盐)的结果一致^[18]。SiO₂、Al₂O₃ 丰度为 56.2%~57.3%、21.4%~21.8%。可见 SiO₂、Al₂O₃ 在 J₁ 中的丰度稳定,与华南板块山西组海相泥岩(SiO₂ 均值 64.70%, Al₂O₃ 均值 21.0%)和鄂尔多斯纸坊组泥岩(SiO₂ 均

值 49.53%, Al_2O_3 均值 13.83%) 相近^[22-23]。

太原组 $J_2 \sim J_4$ 的主量元素种类 (Si、Al、Fe、Ca) 与山西组泥岩一致。同时, 部分样品也出现高铁组分, 如 T2-7(J_2) 为 8.6%, 与黄铁矿存在有关。此外, 太原组石英砂岩见极高的 Si 元素组分, 如 J_3 层位的 SiO_2 丰度大于 70%, 但其 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 丰度 ($0.5\% \pm 0.03\% \pm 0.08\% \pm$) 显著低于 J_2 、 J_4 。

桃园矿 $L_1 \sim L_4$ 灰 Ca 元素丰度平均值为 50%, 丰度略高于淮南煤田 $L_1 \sim L_4$ 灰 (平均 46.46%), 更接近纯石灰岩中的理论 Ca 元素丰度 (56%)^[24]。另一方面, $L_1 \sim L_4$ 灰 Mg 元素丰度相对较低, 介于 0.5%~1.8%, 指示了本区灰岩的主要矿物为低镁方解石。 Al_2O_3 是陆源碎屑贡献的典型指示物, 其在样品的丰度为 0.1%~2.3%, 与淮南地区 $L_1 \sim L_4$ 灰 (0.5%~1.4%) 相近^[24]。此外, 石灰岩较高的碳酸盐矿物组分决定了样品的高烧失量, 在 $L_1 \sim L_4$ 灰均值为 41.6%, 且呈 $L_4 > L_3 > L_2 > L_1$ 的规律。

2.2 元素丰度剖面

华北煤田石炭系太原组是海陆交替沉积体系, 受到海平面升降速率和海陆相物质供给共同决定, 并在周期性海水运动下沉积。因此, 即使是同一种岩性的岩石, 其元素丰度特征仍存差异。如 Ca 是灰岩中的高丰度元素, 然而在桃园煤矿太原组各薄层灰岩中 Ca 丰度差异明显; 碎屑岩中以 Si、Al 为高丰度元素, 太原组不同层位碎屑岩 Si、Al 丰度也存在差异。这里选取高丰度主量元素 (Ca、Al、Si) 作为参照, 建立元素丰度剖面 (图 4), 直观地反映太灰上段元素地球化学丰度的差异性。

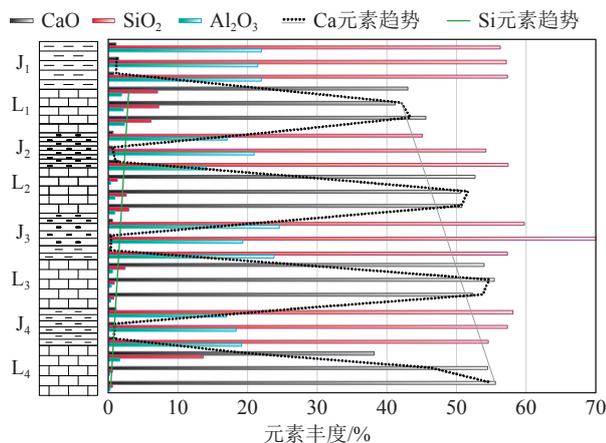


图 4 桃园煤矿 $L_1 \sim L_4$ 段元素丰度剖面

Fig. 4 Element abundance profiles of L_1 to L_4 sections at Taoyuan Coal Mine

由图 4 可见, 桃园矿太原组 $L_1 \sim L_4$ 灰 Ca 元素丰度均值分别为 42.43%、51.36%、53.85%、55.04%, Si 元素丰度均值分别为 6.73%、2.21%、1.27%、0.50%。

随灰岩层位的加深, Ca 元素丰度增加, Si 元素丰度减小。灰岩至泥砂岩过渡段及白云石化灰岩段常出现 Ca 元素低值异常点 (如 T-22), 过渡段灰岩的 Si (13.53%)、Al 元素丰度上升, 而烧失量 (LOI) 降低, 对应的白云石化灰岩的 Mg 元素丰度上升 (2.39%)。

此外, 注浆加固改造的目的层 (L_3 灰) 上覆 J_3 夹层沉积了一套粉砂岩 ($3.5 \text{ m} \pm$)、泥岩 ($0.8 \text{ m} \pm$) 的岩性组合。其中粉砂岩的主量元素丰度特征为富 Si (57.3%~70.0%)、贫 Ca (0.3%~0.5%), 可作为注浆目的层 (L_3 灰)、上覆标志性地层的参照元素特征。

2.3 主量元素聚类分析识别模式

聚类分析广泛应用于多学科的研究中, 按照不同目的, 可分为系统聚类法、模糊聚类分析、K-均值聚类法等^[25]。聚类对象可以为变量或个案, 可探讨变量之间的关系及完成个案的分类。

笔者选取系统聚类法以石灰岩主量元素丰度为变量, 对研究区岩样 (个案) 进行分类, 建立太灰上段薄层灰岩地球化学识别模式。聚类分析选取变量的基本原则为: 在灰岩及碎屑岩中表现具有不同丰度特征的组分均设置为变量。最终, 筛选出主量元素组分 CaO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 K_2O 、 SO_3 、 TiO_2 、LOI 作为聚类分析的参照变量

比较了类平均法、最短距离法、最长距离法的聚类结果后, 选择最远与最近距离法, 基于欧氏距离确定分类数, 得到了太原组样品 (图 5(a)) 和 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 灰的分类 (图 5(b))。理想的分类结果由欧式距离为 5 时确定。图 5(a) 显示所有样品被分为 2 类, 即灰岩 ($L_1 \sim L_4$) 与夹层 ($J_1 \sim J_4$), 其中夹层样品中 T2-7、灰岩样品中 T2-22 的欧式距离稍大, 原因分别与 T2-7 中 Fe 元素丰度增加和 Si 元素丰度下降有关, T2-22 取自于 $L_4 \sim L_3$ 过渡段, Ca 元素丰度有一定降低。总体来看, 太原组灰岩、夹层准确判别率达到 100%。

基于最近距离法建立薄层灰岩聚类识别模式 (图 5(b)), 其中 L_2 、 L_1 的聚类识别效果较好, L_4 、 L_3 样品稍有混乱, 原因在于 L_3 中下部样品 T2-17、T2-18 与 L_4 聚类结果相似, Si 元素丰度随灰岩埋深增加不断减小, 而 L_3 上部 (T2-16) Si 丰度为 2.36%, 中下部降至 0.9%。桃园煤矿 L_4 样品 Si 元素丰度为 0.5% 左右, L_3 中下段与 L_4 区分度较小。因此, 聚类分析可以有效区分 L_1 、 L_2 、 L_3 样品。

2.4 主量元素因子分析识别模式

因子分析拓展于主成分分析法, 是一种通过降维思想, 提出少数的公共因子表征原始关系复杂的多变量的数理统计方法^[26]。笔者选取岩石主量组分作为变量用于建立因子分析识别模式。

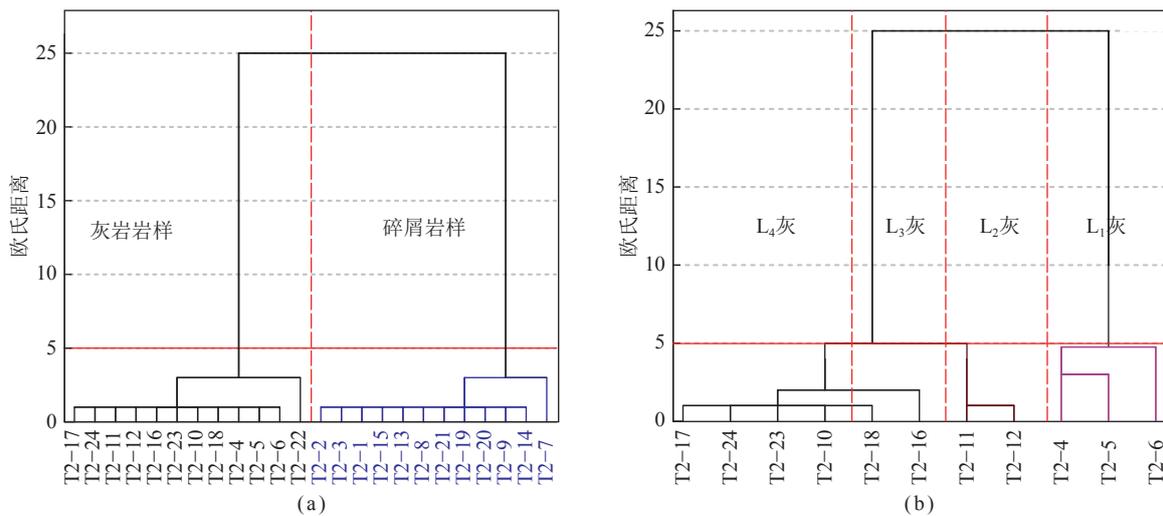


图 5 太原组 L₁~L₄ 段主量元素聚类分析识别模式

Fig.5 Cluster analysis identification patterns of major elements in L₁ to L₄ sections of the Taiyuan Formation

因子分析需要检验变量间的相关程度。主量组分的相关性分析结果显示弱相关性指标为 SO₃, 剔除 SO₃ 外的所有主量组分选取为因子分析的变量, 检验相关性后, 确定因子分析的适用性。在 IBM SPSS Statistics(v. 22) 中设定运行参数及条件后, 采用最大方差法旋转得到了因子分析结果, 见表 2。

提取了因子 1(C1)、因子 2(C2)、因子 3(C3)3 个因子, 累计方差贡献率达到 86.38%, 特征值分别为 6.07、1.81、1.62。其中 C1 组分中 CaO、SiO₂、Al₂O₃、K₂O、TiO₂、LOI 为高载荷变量 (绝对值), C2 组分中 MgO、P₂O₅ 为高载荷变量, C3 组分中 MnO 为高载荷变量。

计算太原组所有样品在 C1、C2、C3 上的因子得分建立识别模式, 灰岩与夹层样品在 C1 上的得分差异明显, 灰岩样品得分为负值, 夹层样品得分为正值 (图 6)。在 C2 上, 灰岩样品得分为-1.5~1.5, 其中 T2-22 为异常点, 而碎屑岩样品集中于-1.2~1.0。在 C3 上, 灰岩样品得分值集中在-1.2~1.8。

由图 6(a) 可知, 以 C1 轴原点为界, 灰岩样品与夹层样品分别处于原点的左侧与右侧, 如 J₁(T2-1~T2-3)、J₂(T2-7~T2-9)、J₃(T2-14~T2-15)、J₄(T2-19~T2-21) 各层样品分布集中, 识别效果清晰。图 6(b) 中灰岩与夹层样品同样分布在 C1 轴两侧, 但纵向的变化范围增大。由此可以得出结论, 基于主量元素建立的因子分析识别模式具有进一步拓展应用的空间。为了确认因子分析在灰岩间 (L₁~L₄)、夹层间 (J₁~J₄) 的识别效果, 分别计算了太原组灰岩 (L₁~L₄) 与夹层 (J₁~J₄) 的因子得分 (图 7)。

因子分析结果显示, L₁ 灰样品在 C1 与 C2 的得分为: 1.52~1.73、0.28~0.35; L₂ 灰样品的得分为: -0.31~-0.08、-0.34~0.05; L₃ 灰样品的得分为:

表 2 主量组分因子分析结果

Table 2 Major component factor analysis results

项目	公共因子		
	C1	C2	C3
CaO	-0.983	-0.033	-0.149
SiO ₂	0.989	-0.032	0.070
Fe ₂ O ₃	0.282	0.506	0.664
Al ₂ O ₃	0.977	-0.089	0.052
MgO	-0.089	0.859	0.337
MnO	0.014	0.003	0.897
K ₂ O	0.898	0.046	0.104
P ₂ O ₅	-0.044	0.885	-0.136
TiO ₂	0.983	-0.129	0.037
Na ₂ O	0.580	-0.028	0.438
LOI	-0.987	-0.070	-0.084
特征值	6.07	1.81	1.62
方差贡献率/%	55.18	16.48	14.72
累计方差贡献率/%	55.18	71.66	86.38

-0.81~-0.73; L₄ 灰样品的得分为: -0.80~-0.91、-0.2~-0.4。由此, 用不同颜色椭圆圈定散点以完成灰岩判别及夹层的识别 (图 7(a))。其中, 夹层碎屑岩通常包括多层的砂岩或泥岩, 因此识别模式中一般出现多点集中、一点远离的状态。从研究区夹层因子分析中提取了 3 个公共因子, 比较识别效果后, 选择对层位区分更为明显的 C2 与 C3 公共因子, 采用同样方法圈定, 建立识别模式 (图 7(b))。

3 水平分支孔岩屑来源解析

岩屑是底板灰岩区域治理工程中的水平分支孔

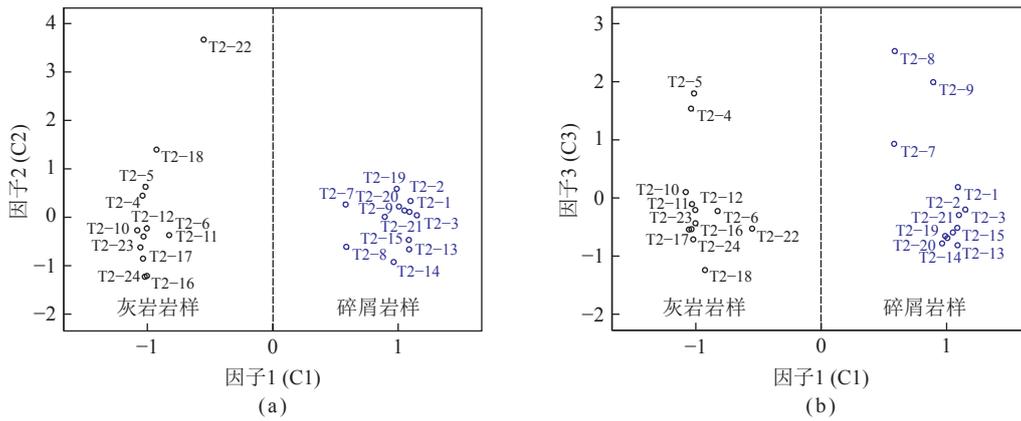


图 6 太原组灰岩与碎屑岩样品因子得分特征

Fig.6 Factor score characteristics of Taiyuan Formation limestone and clastic rock samples

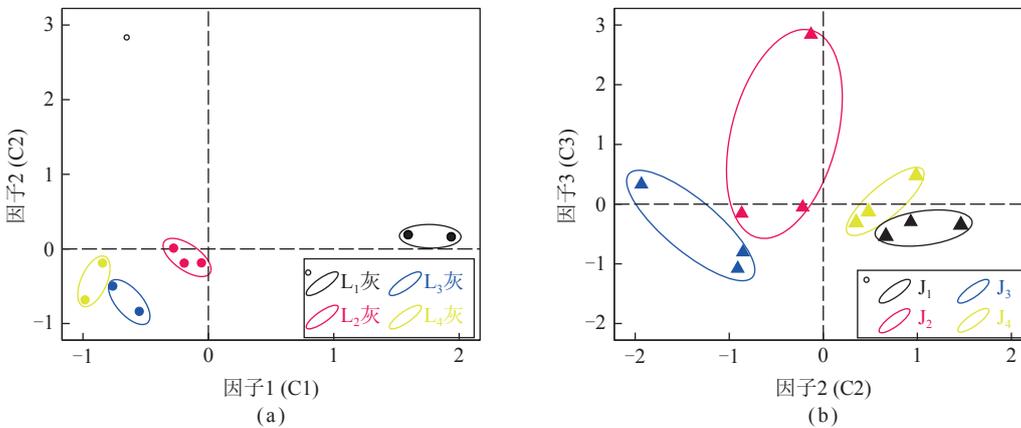


图 7 太原组主量元素因子分析识别背景

Fig.7 Background of factor analysis identification for major elements in the Taiyuan Formation

破碎岩石后经冲洗液带回地面的岩石碎屑，粒径 0.2~10.0 mm。岩屑保留了对应地层的元素信息，是水平分支孔钻探判层的重要依据。上节的识别模式是在地面垂直补勘钻孔岩样元素测试结果分析的基础上建立的，因取自各层灰岩的样品纯净，识别效果可靠，可作为地面定向钻岩屑来源判别的背景识别模式。本节将根据上节的识别模式，开展岩屑来源层位源解析研究，并对识别效果进行评价。

3.1 主量元素因子分析法岩屑源解析

依据主、微量元素因子分析建立的薄层灰岩的背景识别模式(图 6、7)，L₁~L₃ 背景值以不同颜色的实心圆表示。再对灰岩岩屑因子分析，计算了水平分支孔岩屑样品的因子得分，将因子得分以不同颜色的“×”线型标识，投点至主量元素因子分析背景识别模式(图 8)。可见，除了 L₁ 岩屑样品出现一个较大偏离外，其余所有样品均投影至 L₁~L₃ 背景点附近，且投影位置分布在背景点的左侧，此现象原因可能是因子分析过程中岩心、岩屑独立进行计算所带来的小距离误差，2 者总体趋势基本一致，沿 C1 得分增加的路径指示了

陆源碎屑混染程度增强，识别模式完成了 T7 孔岩屑的源解析。

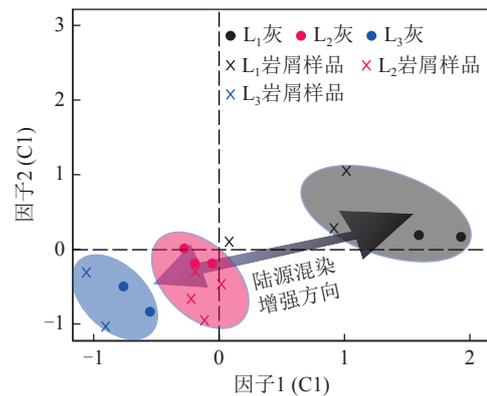


图 8 岩屑主量元素因子分析层位源解析

Fig.8 Cuttings major elemental factor analysis stratigraphic source resolution

3.2 Fisher 判别分析法岩屑源解析

Fisher 判别分析法的基本思想源于方差分析，是一种能较好区分各个总体的线性判别法，最主要的判别准则之一为已知样品分类的样品数量尽可能的多于待判样品数量，进而达到判别准确性^[27]。Fisher 判

别分析主要是计算出一个高拟合度的判别函数来完成已知样品与待判样品的分类。笔者利用地面垂直补勘孔岩心中提取的纯净样本(背景值)对桃园矿 T7 水平分支孔岩屑元素地球化学数据进行 Fisher 判别, 完成层位源解析, 并评价判层效果。

前已述及, 岩屑中的 Ca、Si 元素丰度会受到相邻地层的影响而造成混染, 因而进行判别分析之前, 需剔除较易受到混染影响的 Ca、Si 元素。选取垂直钻孔岩样主量元素中 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 K_2O 、 SO_3 、 TiO_2 等组分进行 Fisher 判别分析。判别分析结果见表 3。

表 3 中, $F_1 \sim F_7$ 分别表示判别分析得出的 7 种判别函数及其在主量元素上系数的分布情况。特征值与方差贡献率上, $F_1 \sim F_3$ 占据全部样品中 99.7% 的方差贡献率, 其中 F_1 的方差贡献率达到 95%, 同时特征值也远高于其余判别函数, 因而判别函数 F_1 携带了岩样的地球化学信息, 可以用其作为本次判别分析法的判别函数:

$$F_1 = -25.812w(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 163.875w(\text{Al}_2\text{O}_3) + 58.713w(\text{MgO}) + 1910.420w(\text{MnO}) + 313.557w(\text{K}_2\text{O}) + 177.830w(\text{SO}_3) - 722.387w(\text{TiO}_2) + 86.848w(\text{LOI} - 18.169) \quad (1)$$

将垂直钻孔岩样分为 8 组, 1~8 组分别为一灰顶 (J_1)、 L_1 灰、 $L_1 \sim L_2$ 夹层 (J_2)、 L_2 灰、 $L_2 \sim L_3$ 夹层 (J_3)、 L_3 灰、 $L_3 \sim L_4$ 夹层 (J_4)、 L_4 灰。利用判别函数 F_1 与组分质心值确定岩样类别。计算过程: 利用测试数据代入判别函数后得出函数值, 再将函数值与训练数据(即“岩心背景值”)的各组分质心值相加, 数值最小者(距离最小者)即为该测试数据的分类, 1~8 组的质心值见表 3。

Fisher 函数的判别分析结果见表 4, T7-15~T7-17 岩屑样品取自 J_3 层, 而判别分析结果显示出对应的层位分别为 J_4 、 L_3 、 J_2 , 判别模型对灰岩夹层层位的识别效果较混乱。然而, 灰岩岩屑样品 T7-18~T7-20 识别层位均为 L_3 , 灰岩岩屑样品的层位被成功溯源, 表明了水平分支孔顺层轨迹保持在 L_3 灰中。整体上, Fisher 判别分析源解析的判层正确率为 75%, 其中灰岩层位判别正确率达到 100%, 有效地验证了层位源解析的正确性。综上, 基于样品主量元素建立的 Fisher 判别模式可以完成对 L_3 灰层位的识别, 但对碎屑岩夹层的判别效果较差。

3.3 岩屑源解析方法应用的可行性

淮北煤田 $L_4 \sim L_1$ 沉积于石炭纪晚期, 整个沉积时期经历约 15 Ma。漫长的沉积期内, 作为生物化学沉

表 3 岩样主量元素组分 Fisher 判别分析结果

Table 3 Fisher discriminant analysis results for major elemental components of rock samples

项目	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
Fe_2O_3	-25.812	67.363	50.202	54.395	-1.389	0.998	-53.940
Al_2O_3	-163.875	-66.635	56.091	-5.069	-4.499	-14.778	28.862
MgO	58.713	-121.266	12.814	146.877	-117.545	131.016	183.206
MnO	1910.420	1012.407	382.722	-71.925	168.801	-243.721	265.580
K_2O	313.557	233.337	-489.009	74.231	65.334	-0.190	-49.984
SO_3	177.830	105.355	11.974	-42.536	-1.425	28.398	23.178
TiO_2	722.387	3213.418	1164.249	997.513	340.539	1844.522	-87.740
LOI	86.848	52.364	31.802	23.626	10.117	33.722	11.418
(常量)	-18.169	-25.265	-14.607	-11.880	-3.112	-15.030	-6.082
特征值	717.452	22.079	12.735	2.312	0.123	0.108	0.075
方差/%	95.0	2.9	1.7	0.3	0	0	0
累积/%	95.0	98.0	99.7	100	100	100	100
1组	-25.515	-1.097	-3.847	1.571	0.064	-0.348	0.154
2组	20.808	1.537	1.734	2.364	-0.162	0.087	-0.276
3组	-5.401	8.572	2.623	-0.679	0.115	-0.150	0.134
4组	20.704	-2.149	0.204	0.276	0.027	0.342	0.452
5组	-35.327	-4.469	4.803	-0.360	-0.058	0.089	-0.064
6组	19.848	-2.738	-0.387	-0.794	0.594	-0.124	-0.189
7组	-15.317	2.242	-4.412	-0.917	-0.084	0.424	-0.191
8组	20.199	-1.899	-0.719	-1.461	-0.497	-0.320	-0.020

表 4 基于主量元素 Fisher 函数的岩屑判层结果

Table 4 Cuttings stratification results based on major elemental fisher function

	层位	预分类	Fisher判层结果
训练数据	一灰顶(J ₁)(T2-1~T2-3)	1	1、1、1
	L ₁ 灰(T2-4~T2-6)	2	2、2、2
	L ₁ ~L ₂ 夹层(J ₂)(T2-7~T2-9)	3	3、3、3
	L ₂ 灰(T2-10~T2-12)	4	4、4、4
	L ₂ ~L ₃ 夹层(J ₃)(T2-13~T2-15)	5	5、5、5
	L ₃ 灰(T2-16~T2-18)	6	6、6、6
	L ₃ ~L ₄ 夹层(J ₄)(T2-19~T2-22)	7	7、7、7
	L ₄ 灰(T2-23~T2-24)	8	8、4
待判数据	T7-15	J ₃	7
	T7-16	J ₃	6
	T7-17	J ₃	3
	T7-18	L ₃	6
	T7-19	L ₃	6
	T7-20	L ₃	6

积岩,海水提供了元素来源,化学元素的富集或亏损则受控于气候、氧化还原条件、构造背景等古环境^[18-19]。因而,基于元素地球化学丰度建立的源解析方法,其理论依据充分。这里需要确立 2 点认识:一是元素的地球化学特征具有横向展布差异性,需要对各层位的岩屑样品进行更多的采样测试,进一步丰富层位元素地球化学背景数据库;二是底板区域治理中,主孔的第 1 个分支孔携带的层位信息最为准确,可作为其余分支孔层位识别的背景。此外,随着现场检测技术的发展,光谱类的测试手段降低了对实验环境要求^[20-21],如便携式 X 射线荧光光谱和激光诱导击穿光谱技术可为样品的现场快速定量测试提供保障,元素地球化学源解析在底板灰岩区域治理工程中实时指导水平分支孔精准“顺层”方面,推广应用前景广阔。

基于上述源解析方法,这里仅以 CaO 的地球化学丰度识别为例,阐述底板区域治理水平分支孔“顺层”控制技术方案(图 9),并在桃园煤矿得到成功应用。具体工况为:水平分支孔过正断层。依据图 4 共有 3 种预想状态:一是 Ca 元素丰度维持稳定状态,表示分支孔轨迹始终停留在 L₃ 灰中上部,多在地层倾角平缓时出现;二是元素丰度先升后降,对应的钻进方向偏 L₃ 灰以下,继续钻进穿过 L₃ 灰至 J₄,此时需要上调钻进角度;三是岩屑 Ca 元素丰度迅速降低,预示了钻孔轨迹向 J₃ 夹层地层偏向,此时需要向下调整钻进方向,以保持沿 L₃ 灰“顺层”。

具体实施过程中,钻头在进入海相泥岩后,开始对水平分支孔岩屑样品主量元素进行测试,观测其 Ca 元素丰度的变化;当钻头在 L₂ 灰底部并逐渐进入

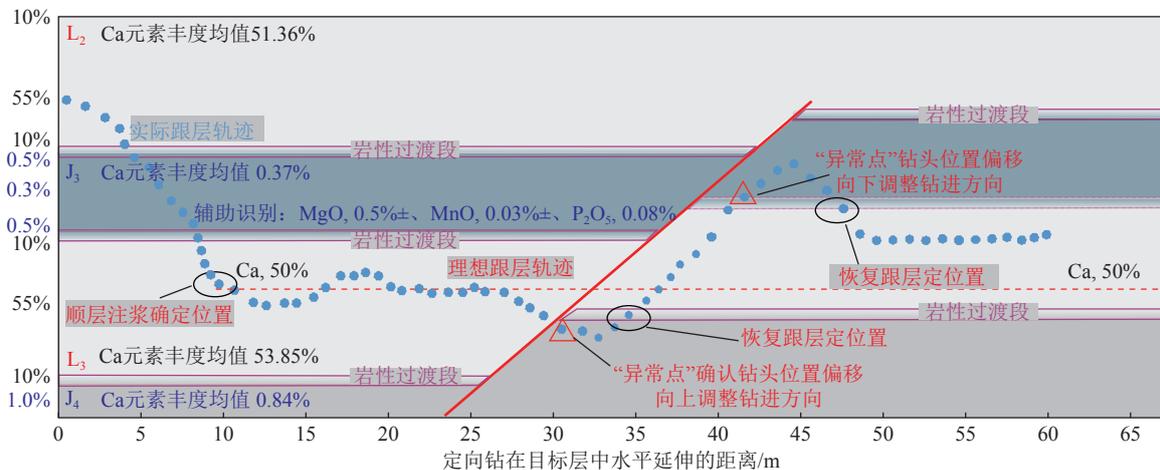


图 9 水平分支孔“顺层率”控制技术方案

Fig.9 Horizontal branch hole “in-layer rate” control technology plan

夹层时, 岩屑 Ca 元素丰度降至 10% 以下, 继续钻进, 借以 J₃ 的低 Ca 和辅助元素 (MgO、MnO、P₂O₅) 特征穿过并到达 L₃ 灰; 钻进至 L₃ 灰上部, 即 Ca 元素丰度上升至 50% 左右时, 确定进行目的层 (L₃ 灰), 继续顺层钻进。

4 结 论

(1) 通过 X 射线荧光光谱 (XRF) 定量测定了 L₁~L₄(含碎屑岩夹层) 的主量元素。SiO₂、Al₂O₃ 为碎屑岩含量最高的主量元素, 而薄层灰岩则以 CaO 为高丰度元素。

(2) 依据薄层灰岩元素丰度剖面确定的 MgO、MnO、P₂O₅、烧失量 (LOI) 丰度可作为 J₃、L₃ 灰识别的单一指标。

(3) 利用聚类分析、因子分析、判别分析建立的识别背景模式可以有效地对岩屑层位来源做出准确判别, 并提出了一种区域治理“顺层率”控制技术方案, 取得了初步应用效果。

(4) 随着现场快速定量测试手段的不断发展, 如激光诱导击穿光谱 (LIBS) 等, 可以实现岩屑元素地球化学现场测试、快速溯源、及时指导水平分支孔顺层。

参考文献(References):

- [1] 吴涛, 方向清, 宁树正, 等. 华北型煤田“三下一上”煤炭资源现状及开发利用研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 129-135.
WU Tao, FANG Xiangqing, NING Shuzheng, et al. Study on status quo and development as well as utilization of coal resources “under buildings, water bodies, railways and above confined water” in North China Coalfields[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 129-135.
- [2] 潘文勇. 华北型岩溶煤田的灰岩分布规律及岩溶发育特征[J]. 煤炭学报, 1982(3): 48-56.
PAN Wenyong. Limestone distribution and karst development characteristics in north china type karst coalfields[J]. Journal of China Coal Society, 1982(3): 48-56.
- [3] 冯启言, 沈文, 李义昌. 滕沛煤田奥陶系岩溶发育的层控规律[J]. 煤田地质与勘探, 1990(1): 40-44, 71-72.
FENG Qiyang, SHEN Wen, LI Yichang. Strata control law of Ordovician karst development in Tengpei coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 1990(1): 40-44, 71-72.
- [4] 施龙青, 宋振骥. 肥城煤田深部开采突水评价[J]. 煤炭学报, 2000, 25(3): 273-277.
SHI Longqing, SONG Zhenqi. Evaluation for the water inrush possibility in the deep mining in Feicheng coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(3): 273-277.
- [5] ZHANG Haitao, XU Guquan, LIU Mancai, et al. Formation environments and mechanisms of multistage paleokarst of Ordovician carbonates in Southern North China Basin[J]. Scientific Reports, 2021(1): 819.
- [6] LIU Weitao, HAN Mengke. A practical method for floor water inrush prediction using a hybrid artificial intelligence model and GIS[J]. Mine water and the environment, 2023, 42(2): 220-229.
- [7] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1112-1117.
ZHAO Qingbiao. Research and application of advanced treatment technology in Ordovician limestone karst water hazard area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(6): 1112-1117.
- [8] 董书宁, 郭小铭, 刘其声, 等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 1-10.
DONG Shuning, GUO Xiaoming, LIU Qisheng, et al. Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 1-10.
- [9] 张党育, 蒋勤明, 高春芳, 等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31-36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, et al. Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water damage control in the floor of North China Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31-36.
- [10] 查华胜, 张海江, 连会青, 等. 潘二煤矿 A 组煤层底板灰岩水害微震监测[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3001-3014.
ZHA Huasheng, ZHANG Haijiang, LIAN Huiqing, et al. Microseismic monitoring on limestone water inrush at coal seam floor for group a coal layer of Pan'er Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3001-3014.
- [11] 尹尚先, 王屹, 尹慧超, 等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1855-1864.
YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1855-1864.
- [12] 蔡学斌, 王大设, 朱传峰. 孙疃煤矿灰岩水补给通道分析及封堵实践[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(6): 48-54.
CAI Xuebin, WANG Dashe, ZHU Chuanfeng. Limestone water recharge channel analysis and plugging practice in Suntuan Coalmine[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(6): 48-54.
- [13] 张刚艳. 超薄隔水层底板突水机理与区域修复技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2021.
ZHANG Gangyan. Research on water inrush mechanism and regional repair technology of ultra-thin water barrier floor [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [14] 杜兵建. 峰峰矿区九龙矿隐伏水陷落柱治理实践[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(3): 31-35.
DU Bingjian. Fathering practice of hidden water inrush subsided column in Jiulong Coalmine, Fengfeng mining area[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(3): 31-35.
- [15] 刘树坤, 汪勤学, 梁占良, 等. 国内外随钻测量技术简介及发展前景展望[J]. 录井工程, 2008, 19(4): 1-4, 24, 76.
LIU Shukun, WANG Qingxue, LIANG Zhanyuan, et al. Brief introduction and development prospect of MWD technology at home and abroad[J]. Mud Logging Engineering, 2008, 19(4): 1-4, 24, 76.
- [16] 张雷雷. 水平井录井技术理论应用分析及技术方法研究[J]. 西部

- 探矿工程, 2023, 35(2): 62–64.
- ZHANG Lei. Theoretical application analysis and technical method research of horizontal well logging technology[J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(2): 62–64.
- [17] 孙蓓蕾, 曾凡桂, 刘超, 等. 太原西山上古生界含煤地层最大沉积年龄的碎屑锆石 U-Pb 定年约束及地层意义[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 187–197.
- SUN Beilei, ZENG Fangui, LIU Chao, et al. Constraints on U-Pb dating of detrital zircon of the maximum depositional age for Upper Paleozoic coal-bearing strata in Xishan, Taiyuan and its stratigraphic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(2): 187–197.
- [18] LI Jun, GUI Herong, CHEN Luwang, et al. Geochemical characteristics, paleoenvironment and provenance of marine mudstone in Shanxi Formation of Huaibei Coalfield, southern North China Plate[J]. *Geological Journal*, 2021, 56(6): 3064–3080.
- [19] LI Jun, GUI Herong, CHEN Luwang, et al. Geochemistry of the Late Paleozoic ‘thin layer’ limestones in the southern North China Craton: Implications for closure of northeastern Paleo-Tethys Ocean[J]. *Geological Magazine*, 2022, 159(4): 494–510.
- [20] 陈莎, 杨燕婷, 王旭, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术的录井岩屑多元素定量分析方法 (特邀)[J]. *光子学报*, 2023, 52(3): 0352112.
- CHEN Sha, YANG Yanting, WANG Xu, et al. Quantitative analysis method of multi-elements for logging cuttings based on LIBS technology(Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(3): 0352112.
- [21] 檀兵, 黄敏, 朱启兵, 等. 激光诱导击穿光谱谱峰元素自动识别方法研究[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 273–279.
- TAN Bing, HUANG Min, ZHU Qibing, et al. Method on elements automatic identification of spectral peaks in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 273–279.
- [22] WANG Feng, CHEN Rong, LIANG Qingshao et al. Geochemical characteristics and depositional environments of mudstones from the Triassic Zhifang Formation in the Tongchuan area, southern Ordos Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(5): 3857–3869.
- [23] XIE Qifeng, CAI Yuanfeng, DONG Yunpeng, et al. Geochemical characteristics of the Permian marine mudstone and constraints on its provenance and paleoenvironment in the Fenghai area, Fujian Province, Southeastern China[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(3–4): 527–540.
- [24] 陈冰宇. 淮南煤田晚石炭世铝质泥岩-碳酸盐岩环境地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- CHEN Bingyu. Environmental Geochemistry of aluminous argillite and carbonate in the Late Carboniferous Taiyuan Formation from Huainan Coalfield [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
- [25] 曹凯迪, 徐挺玉, 刘云, 等. 聚类分析综述[J]. 智慧健康, 2016, 2(10): 50–53.
- CAO Kaidi, XU Tingyu, LIU Yun. Review of cluster analysis[J]. *Smart Healthcare*, 2016, 2(10): 50–53.
- [26] 孙晓军, 周宗奎. 探索性因子分析及其在应用中存在的主要问题[J]. 心理科学, 2005, 28(6): 1440–1442, 1448.
- SUN Xiaojun, ZHOU Zongkui. Exploratory factor analysis and its main problems in application[J]. *Journal of Psychological Science*, 2005, 28(6): 1440–1442, 1448.
- [27] 董陇军, 李夕兵, 白云飞. 急倾斜煤层顶煤可放性分类预测的 Fisher 判别分析模型及应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(1): 58–63.
- DONG Longjun, LI Xibin, BAI Yunfei. A Fisher discriminant analysis model for classifying top coal cavability of the steep seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(1): 58–63.