

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

滑带水岩理化作用与滑坡预测预报

唐辉明^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

滑坡是地质灾害的重要类型,约占地质灾害总数的 70%。滑坡预测预报被称为百年科学难题,国内外学者为此不懈努力。滑坡预测预报经历了现象预测、统计预测和关联要素阈值预测等阶段,难以解决复杂滑坡问题。理论和实践证明,基于地质演化过程是实现滑坡预测预报的有效途径。滑带是滑坡地质演化的关键部位,对滑坡启滑常常起控制作用,滑带物理化学效应是国内外滑坡研究的重要前沿课题。滑带物理化学效应主要表现为滑带结构演变、岩土体物理特性和抗剪强度的改变。通过西南山区和三峡库区重大滑坡长期现场监测和试验,揭示了物理化学作用下,动水驱动型、锁固解锁型和静态液化型滑坡滑带结构演变规律和物理力学参数定量变化规律。以滑坡启滑分类为基础,选取具有普适意义的动水驱动、锁固解锁和静态液化三类滑坡,研究发现其启滑机制分别为:渗流驱动-强度劣化-启动滑移、应力集中-锁固失效-解锁滑移、剪切蠕变-结构塌陷-液化滑移,其中滑带物理化学效应发挥了重要作用。从而建立了三类滑坡

的共性启滑机制为:动力触发-损伤演化-滑坡启滑。依据滑坡启滑共性机制,提出了滑坡启滑通用判据。根据滑坡地质演化特征,分别给出了三类条件下通用判据的不同表达形式,即分别考虑损伤-硬化竞争机制、滑带速率效应和自愈合效应、渗流-力学-变形耦合作用的滑坡启滑通用判据。实现了通用判据的数值程序开发。以滑坡启滑通用判据为基础,构建了滑坡数值预报模式。研发了滑坡多场关联和大变形自适应技术,从而建立了国内外首个集地质力学模型与外动力因素不确定性表征、滑坡演化过程实时动态更新、滑坡启滑预测模型于一体的滑坡数值预报平台。系统开展了滑坡数值预报平台推广研究,在全国建立了一批动水驱动型、锁固解锁型和静态液化型三类型滑坡监测示范点,成功应用于三道沟东、白家包、屯堡乡和临江滑坡预测预报。

关键词: 滑坡预测预报; 滑带水岩理化作用; 启滑机制; 启滑判据; 滑坡数值预报模式

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42090050)

作者简介: 唐辉明(1962-), 教授; 研究方向: 工程地质与地质灾害。Email: tanghm@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

锑界面吸附过程中的同位素分馏机制

刘鹏^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430000

随着高精度分析技术的发展, 自然样品中锑稳定同位素组成在研究环境中锑的来源、迁移转化和归宿的示踪, 以及古海洋氧化还原条件的反演中发挥着越来越重要的作用。锑在矿物表面的吸附是控制锑在环境中分布的重要过程。本研究探究了锑在典型的铝、铁、锰氧化物上吸附过程中的同位素分馏规律及分馏机理。 γ - Al_2O_3 吸附实验表明轻的锑同位素首先富集在 γ - Al_2O_3 上, 锑同位素分馏值 ($\Delta^{123}\text{Sb}$) 在反应前 20 分钟内由 0.20‰ 升高至 0.47‰, 后逐渐下降至 0。EXAFS 结果表明锑在 γ - Al_2O_3 表面形成外层络合物, 从而导致未发生平衡同位素分馏。水铁矿、赤铁矿和针铁矿吸附实验表明同位素分馏符合平衡分馏模型, 其同位素分馏值分别为 0.49‰、1.12‰、1.14‰。EXAFS 结果表明锑与铁氧化物都形成了内层络合

物, 其中赤铁矿和针铁矿上第二壳层的 Sb-Fe 配位峰较弱, 从而导致了较大的锑同位素分馏。水钠锰矿吸附实验表明在吸附过程中锑同位素分馏值由 0.398‰ 在 1 小时内降低到 0.332‰, 最后升高至 0.384‰ 达到平衡。锑在水钠锰矿吸附过程中的同位素分馏符合平衡分馏模型。EXAFS 和 DFT 结果表明锑首先在水钠锰矿边缘形成边共享配合物, 然后转变为角共享配合物, 从而导致了锑同位素分馏随时间的演化。本研究理清了锑在铝、铁、锰氧化物上吸附过程中锑同位素的分馏机理, 为未来锑同位素的环境应用提供了基础数据及理论支撑。

关键词: 锑; 同位素; 同步辐射; 铁氧化物; 水钠锰矿; DFT

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42277405)

作者简介: 刘鹏 (1981-), 教授; 研究方向: 矿山环境修复。Email: pengliu@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

铀矿生物浸出过程中矿物-微生物相互作用机理研究

王健¹, 孙占学^{1*}

1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013

铀矿生物浸出是一种资源节约且环境友好的应用技术,然而铀矿物与微生物溶浸液相互作用机制尚不明确。本研究以沥青铀矿为目标矿物,以化能自养型嗜酸性氧化亚铁硫杆菌 (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, At.f) UBK35 为菌源,建立了无铁/有铁两种微生物浸铀体系,查明了沥青铀矿-溶浸液相互作用过程中微生物直接作用和间接作用机制。取得的主要研究成果为:(1)“硫酸”“硫酸+亚铁”“菌液”和“菌液+亚铁”四组浸出体系,在沥青铀矿-溶浸液相互作用 30 h 后,铀的浸出率分别达 2.73%、6.48%、22.68%、95.12%。“菌液+亚铁”体系铁氧化率达 92.67%,浸出后期总铁含量随着黄钾铁矾沉淀形成而明显降低。铀矿石所含碱性物质等耗酸使得体系 pH 在浸出初期快速升高,而后因黄钾铁矾形成过程中产酸又导致 pH 急剧下降并最终保持稳定;由于三价铁不断生成,溶浸液 Eh 值持续升高。(2)“菌液”体系,沥青铀矿-溶浸液相互作用过程中,浸铀菌通过胞外聚合物粘附在沥青铀矿表面并形成腐蚀坑,且铀浸出率显著高于对照组“硫酸”体系,证实

存在直接作用机制。浸出 30 h 后,微生物直接作用和硫酸作用对铀浸出的贡献率分别为 87.96%和 12.04%。浸出 15 h 后,铀浓度升高激发了浸铀菌自我解毒机制,铵根、磷酸根及铀酰离子在细菌胞内磷酸酶和胞外聚合物多糖作用下固定,形成均匀、玫瑰花状铵铀云母沉淀。(3)“菌液+亚铁”体系,沥青铀矿-溶浸液相互作用时,浸铀菌也吸附在沥青铀矿表面并形成腐蚀坑,表明存在直接作用机制。由于铁源加入,铀浸出率远高于“菌液”体系,说明该体系还存在间接作用机制。浸出 30 h 后,微生物间接作用、直接作用、非生物催化形成三价铁的氧化作用和硫酸作用对铀浸出贡献率分别为 72.22%、20.97%、3.94%、2.87%。本研究初步揭示了沥青铀矿-微生物溶浸液相互作用机理,发现精准控制微生物溶浸体系 pH 值,使其既利于微生物生长又能够抑制黄钾铁矾生成,是人工调控生物浸铀过程以达到最佳浸铀效率的关键。

关键词: 铀矿生物浸出; 水岩相互作用; 生物水文地球化学; 矿物-溶液界面反应

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41772266, U1967209)

第一作者简介: 王健 (1988-), 讲师; 研究方向: 铀矿水文地球化学。Email: 1054218424@qq.com

*通信作者简介: 孙占学 (1962-), 教授; 研究方向: 水文地球化学。Email: zhxsun@ecut.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

超临界地热条件下石英溶解沉淀规律及 对岩层渗透性影响研究

钟承昊^{1*}, 许天福¹, 袁益龙¹

1. 吉林大学 新能源与环境学院, 长春 130000

深部超临界地热资源勘探开发是国际上地热学研究的焦点。超临界地热通常指温度和压力达到水的超临界点(374 °C, 22.1 MPa)以上, 地壳深部流体以超临界相态存在。石英和水作为地壳中普遍存在的两种物质, 揭示高温高压条件下石英溶解沉淀规律及对热储裂隙渗透性影响, 对综合认识深部超临界地热流体形成、运聚及开采过程十分重要。

利用自主研发高温高压水岩反应实验系统、原位高温真空取样装置, 开展 300~500°C、25~50 MPa 条件下石英溶解热力学和反应动力学实验, 获取亚临界至超临界地热条件下石英溶解度和溶解速率常数。结果表明, 在亚临界至超临界地热条件下, 石英溶解度和溶解速率常数受温度和压力共同作用。等压条件下, 石英溶解度和溶解速率常数在亚临界区随温度升高而增大, 进入超临界区后随温度升高而减小, 具有逆行溶解行为; 等温条件下, 石英溶解度和溶解速率常数与压力呈正相关关系。基于本次研究实验结果和文献中获取的高质量数据, 构建了石英溶解度和溶解速率常数预测模型, 实现常温常压至超临界地热条件下地热流体中二氧化硅溶解浓度及反应速率的定量

计算。

利用自主研发的超临界地热条件岩心渗流实验系统, 开展亚临界至超临界地热条件下花岗岩裂隙渗流-化学耦合实验, 揭示了超临界地热条件下石英溶沉对花岗岩裂隙渗透性演化的影响规律。结果表明, 在亚临界至超临界地热条件下, 裂隙渗透性随时间呈单一缓慢增加趋势; 裂隙渗透率的变化率同时受温度和压力影响, 其大小与不同温压条件下石英的溶解度和溶解速率测试结果具有一致性。结合溶液化学测试、裂隙面溶蚀特征以及裂隙面粗糙度系数综合分析, 论证了花岗岩裂隙壁面发生的自由面溶解作用是裂隙渗透率随时间缓慢增加的主要控制机制, 且石英是花岗岩裂隙面主要溶解矿物。

本次研究不仅对基础深部流体地学研究有重大意义, 而且具有较宽广的地质工程应用前景, 为有关深部流体地学问题和超临界地热开发工程等问题的解决提供科学理论和实验数据支撑。

关键词: 超临界地热; 石英溶解; 水热实验; 裂隙渗流-化学耦合作用; 储层渗透率

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

碘的水文生物地球化学行为

李俊霞^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

我国是世界上已知面积最大的水源性高碘国家, 全国约 3,098 万人暴露于高碘地下水, 碘的长期过量摄入对居民健康产生极大威胁。本研究以我国内陆大同盆地及滨海华北平原典型高碘地下水为研究对象, 查明了不同沉积背景地下水碘的主要物源包括陆源富有机质河湖相沉积及海相沉积, 厘清了利于碘富集的水文地质条件及水环境特征, 并提出高碘地下水成因模式, 包括埋藏-溶解型、压密-释放型和蒸发-浓缩型, 可用于解释自然界中广泛分布的原生高碘地下水。基于对高碘地下水宏观成因机理的认识, 利用大数据模型预测了全国范围高碘地下水赋存情况, 发现其高风险区 ($p>0.5$) 约占我

国国土面积的 19.8%。同时, 碘是典型的氧化还原敏感元素, 可参与地下水系统复杂的生物地球化学过程, 综合运用地质微生物学、基因组学等技术手段, 从原生高碘地下水系统中分离出首株异化碘酸盐还原菌, 并发现了地下水系统隐秘铁/硫循环激发碘的形态转化, 促使碘以活性最强的碘离子在地下水中富集, 构建了地下水系统碳-铁-硫-碘生物及非生物耦合循环网络, 识别了其在全球地下水碘循环中的重要意义。

关键词: 碘; 地下水; 水文地球化学; 生物地球化学; 迁移转化

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

能否利用氢氧稳定同位素识别水体盐化机理?

黄天明^{1,2*}, 祁生文^{1,2}, 张芬^{1,2}, 庞忠和^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

溶滤、蒸发、蒸腾是自然水体盐化的主要原因。但是, 如何定量评价水体盐化过程中各种作用的贡献比例, 目前尚无简单而又可靠的方法。由于蒸发伴随着浓缩(导致水中盐度增加), 造成水体中氢氧稳定同位素的富集, 很多人利用 $\delta^{18}\text{O}$ 或 $\delta^2\text{H}$ 与 TDS 的关系确定蒸发浓缩的作用。然而利用 $\delta^2\text{H}$ 或者 $\delta^{18}\text{O}$ 与 TDS 关系示踪水体盐化机理, 只适合初始水的氢氧同位素组成不变的情况下, 通常在流域尺度上, 由于降水同位素的季节效应和空间差异, 这种方法并不适用。

氦盈余($d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$)综合考虑了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 的影响。由于在一个流域, 虽然降水或者初始水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化可能很大, 但氦盈余往往差别不大, 即具有相同的氦盈余值。只要存在蒸发, 氦盈余就会降低, 是很有潜力的指示剂。因此氦盈余与蒸发水体

剩余比例的定量化确定对于研究水体蒸发浓缩与溶滤对总盐度的贡献具有重要意义。

作者曾经基于同位素水文学原理, 根据同位素丰度概念和瑞利分馏模型导出蒸发剩余水体比例(f)与氦盈余(d)之间的关系; 并通过对比初始水(S_0)与剩余水的盐度(S)与氦盈余, 确定了蒸发与溶滤作用各自的贡献率。然而研究人员在利用该方法的时候, 往往出现初始氦盈余不易确定的情况, 本文给出了一些确定初始氦盈余的方法; 同时, 在地下水发生蒸发条件下, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 变化机理复杂, 本文也指出了利用该方法时需要注意的问题。

关键词: 同位素; 盐化机理; 氦盈余; 蒸发浓缩; 矿物溶解

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

乌梁素海溶解态砷-氟含量异常对黄河流域 原生劣质地下水成因的启示

闫雅妮¹, 张俊文^{1*}, 刘林², 赵志琦¹

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210007

干旱和半干旱地区地下水中砷和氟浓度异常威胁着当地居民健康饮水。这些地区地表水中这两种元素浓度升高的现象却很少受到关注, 其对当地劣质地下水(即高砷、高氟和高盐度)的影响也尚不清楚。本研究分析了我国河套盆地乌梁素海、引黄灌溉/排干渠及黄河水样的 pH 值、砷和氟浓度、其他主要元素浓度及氢氧稳定同位素组成。结果表明, 这些水样呈弱碱性(pH: 7.85~9.01), 总溶解固体浓度(TDS)介于 402~9778 mg/L(均值 1920 mg/L)。10 个湖水样品中, 有 6 个砷浓度超过 10 μ g/L(最大值为 69.1 μ g/L), 其中一个样本的氟浓度超过 1.5 mg/L。值得注意的是, 湖水中高砷、高氟和高 TDS 的结果与先前报道的当地地下水相似, 且所有

水样中, 除去两个钙离子浓度异常高的样本外, 砷和氟浓度呈显著的正相关关系($R^2=0.96$, $p<0.01$)。分析表明蒸发过程, 包括蒸发浓缩和解吸是导致湖水中砷和氟升高的主要原因。我们推测研究区的古湖泊经历了强烈的蒸发过程, 导致砷、氟和主要元素在沉积物(或残余湖水)中积累并被埋藏在河流盆地中; 随后, 它们通过多种(生物)水文地球化学过程被释放到地下水中。结合本研究与先前地下水的结果, 我们提出了干旱和半干旱地区高砷高氟地下水成因的新假设。

关键词: 干旱区和半干旱区; 地表水; 地下水; 砷; 氟

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930863, 42373058)

第一作者简介: 闫雅妮(1990-), 博士; 研究方向: 环境水文地球化学。Email: 2019027015@chd.edu.cn

*通信作者简介: 张俊文(1989-), 副教授; 研究方向: 同位素水文地球化学。Email: zhangjunwen@chd.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

气候变化和人类活动影响下岩溶水水文地球化学演化研究

高旭波¹, 王焰新^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

针对当前强烈人类活动和全球气候变化下, 岩溶水资源衰减、水质持续恶化, 岩溶生态系统失稳等问题, 围绕岩溶大泉水文地质调查理论与技术创新这一核心内容, 以查明岩溶水赋存规律及污染组分运移特征为立项根本、以服务于岩溶大泉保护及泉域生态环境修复为宗旨, 以水文地质调查为基础, 研发了岩溶水污染文地质调查新技术, 开展了多同位素示踪、放

射性同位素定年、痕量污染高精度检测、水文地球化学模拟等, 查明了岩溶水水化学演化机制, 为岩溶大泉保护和泉域生态环境可持续发展提供了理论和技术依据。

关键词: 岩溶大泉; 污染水文地质; 水资源开发与保护;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172288)

第一作者简介: 高旭波(1975-), 研究员; 研究方向: 地下水水文-生物地球化学、岩溶水资源与岩溶环境。Email: Xubo.gao.cug@gmail.com

*通信作者简介: 王焰新(1963-), 中科院院士, 教授; 研究方向: 水文地质学、水文地球化学、地下水污染及防治等。Email: yx.wang@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

曲折裂隙中两相流的非达西行为

王京平¹, 钱家忠^{1*}, 马海春¹, 薛俊杰¹, 刘咏²

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 合肥 230601

裂隙介质中探究非达西流动行为对于深入理解自然裂隙含水层的流动控制机制具有关键意义, 尤其是在地热储层建模方面显得尤为重要。尽管达西定律常被用于描述此类低流速流动, 但对于涉及非达西效应的粗糙垂直裂隙中的两相流动的定量研究却相对匮乏。本研究针对不相溶的气-水系统, 在满足高斯分布的裂隙几何形态中, 求解了三维 Navier-Stokes 方程, 并将其与 Cahn-Hilliard 模型相结合, 以应对不同的边界条件。结果表明, 在雷诺数介于 998 至 26930 之间时,

存在显著的非达西流动行为, 并证实了 Forchheimer 方程能够解释高水相比流量 q_w 时的达西偏离现象。揭示了水相饱和度 S_w 与 q_w 之间的非线性依赖关系, 从而能够定义两个水驱替气的区域。这些研究成果为修正当前两相流体系统相对渗透率的估算方法提供了新的视角, 使得非达西效应能够被纳入这些估算之中。

关键词: 垂直裂隙; 两相流; 非达西行为; 相对渗透率; 数值模拟

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2267218, 42377050, 42472310)

第一作者简介: 王京平 (1995-), 博士; 研究方向: 环境地质学。Email: 2022010091@mail.hfut.edu.cn

*通信作者简介: 钱家忠 (1968-), 教授; 研究方向: 地下水科学。Email: qianjiazhong@hfut.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

亚热带河流系统中多样且碳活跃的水生生境： 碳酸盐含水层的促进作用

何立羹¹, 姜光辉^{1*}

1. 广西大学, 南宁 530004

揭示水生群落和环境因子的影响对于更清晰地认识河流环境中的水碳循环至关重要。为探讨归春河地下水流动和储存环境中水生群落的特征, 本文对归春河的瀑布、泉池、岩溶天窗、湿地、河道和水库进行了研究。喀斯特动力和水文条件导致河段类型更加多样化, 从单一河道到地下河流、岩溶天窗、湿地、水库和泉池并存。喀斯特含水层增加了钙离子 (+52.90~91.20 mg/L)、DIC (+156~284 mg/L)、CO₂ (+0~22 mg/L) 等气体和矿物离子的浓度, 促进了浮游生物和微生物的生物量和物种多样性。水库具有较高的 Chl-a 水平和方解石饱和指数 (SIc), 表明水生环境和生物过程有利于碳吸收。然而, 在春季水池和湿地环境中, 浮游生物丰度降低和 CO₂ 放出量增加可能导致碳释放。此外, 瀑布还增加了 DO (+1.71~

3.66 mg/L) 和 ORP (+0~158.05 mV) 浓度, 导致河道中方解石大规模沉积。这重塑了河床地形, 为植被生长创造了有利条件, 减缓了水流, 改善了水质。研究区共发现浮游植物 7 门 132 种, 浮游动物 4 门 22 种。浮游动物群落的丰度、生物量和多样性与浮游植物群落的变化趋势基本一致。微生物丰度受浮游植物产生的有机物控制, 多样性与 pH 有关。我们的研究将 GCR 水文和生物地球化学变化与水生群落特征联系起来, 强调了喀斯特动力和水文条件的重要作用, 为喀斯特河流生态中碳循环的相关研究提供了有价值的参考。

关键词: 喀斯特河流; 浮游植物; 微生物; 生物组成; 碳循环

基金项目: 国家自然科学基金 (42172287)

第一作者简介: 何立羹 (1998-), 博士研究生; 研究方向: 岩溶地下水。

*通信作者简介: 姜光辉 (1977-), 教授; 研究方向: 地下水科学与工程, 生态水文学。

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Multiscale reactive transport modeling and predictive uncertainty quantification of water-rock interactions during uranium in situ leaching

罗豪豪^{1,2}, Laura L. Kuhar³, Adam J. Siade^{4,5}, 李超^{1,2}, Baheten Boassen Guillaume Herman^{1,2}, Henning Prommer^{4,5}, 孙静^{1*}, 刘承帅^{1,6}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学, 北京 101408;

3. CSIRO Minerals, Waterford, Australia 000000;

4. The University of Western Australia, Perth, Australia 000000;

5. CSIRO Land and Water, Floreat, Australia 000000;

6. 华南农业大学, 广州 510642

In situ leaching (ISL) has been widely applied for the extraction of uranium. However, the geochemical processes, such as the reaction between gangue minerals and lixiviant, exhibit nonlinear coupling, making them difficult to fully reveal through laboratory studies. Therefore, a deeper understanding of the uranium leaching mechanism is crucial for reducing the risks associated with the ISL process. This study analyzes uranium recovery experimental data using a process-based reactive transport model (RTM) to identify and quantify the key hydrogeochemical factors influencing uranium dissolution. Subsequently, we extend the laboratory-scale RTM to a field-scale to predict uranium recovery and quantify the uncertainty in model parameters and predictions through Monte Carlo uncertainty analysis. The results indicate that uranium dissolution is influenced by a combination of uranium mineralogy, leaching agent type, and gangue minerals. Under acidic conditions, the dissolution of

coffinite (U(IV)) does not require an oxidant, whereas in alkaline conditions, an oxidant is essential. The pH buffering effect caused by the dissolution of gangue minerals, such as chlorite, inhibits uranium leaching. Moreover, for the first time, quantitative analysis reveals a specific dissolution sequence of gangue minerals, with chlorite dissolving preferentially in this study. Uncertainty analysis shows that the initial concentrations of uranium and gangue minerals significantly impact the predictive accuracy of the field-scale RTM, leading to considerable uncertainty in the simulation results. The approach in this study not only enhances the understanding of the ISL process but also provides theoretical guidance for large-scale uranium recovery.

key words: Uranium in-situ recovery; water-rock interactions; reactive transport modeling; uncertainty quantification

基金项目: 贵州省重大科技计划项目 ([2024]013); 贵州省“百人”高层次创新人才项目 (GCC (2023) 038)

第一作者简介: 罗豪豪 (1999-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: luohaohao@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 孙静 (1987-), 研究员; 研究方向: 环境水文地球化学、土壤与地下水修复、反应性溶质运移建模。Email: sunjing@mail.gyig.ac.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

地下水环境中地质成因污染物氧化还原 非平衡的生物能学机制

皮坤福^{1*}, 谢先军¹, 王焰新¹

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078

地下水是人类生存发展和生态系统运行不可或缺的重要基础资源。不幸的是, 全球范围内广泛分布的原生劣质地下水直接威胁超过 4.5 亿人口的用水安全和生命健康。原生劣质地下水形成与演化机制和风险管控体系不仅是学界广泛关注的前沿和热点, 而且是各国政府高度重视的基本民生问题。地质成因污染物(砷、氟、碘等)在地下水中的分散富集是水-矿物-气体-有机质-微生物相关作用(即广义的“水-岩作用”范畴)的结果, 由此构成的生物地球化学反应网络的复杂性使得地下水水质处于动态性、非线性、非稳态演化中。尤其是, 地质成因污染物氧化还原非平衡问题不但使得供水含水层中污染物的迁移转化和归趋更为复杂, 而且导致局部或区域上原生劣质地下水改良更为困难。譬如, 第四系孔隙地下水中, 相较

于其他主要氧化还原对, 不同砷/碘/硒价态往往表现出氧化还原不平衡性, 但其内在机制尚不清晰。通过结合野外水文地球化学调查、定量宏基因组测序、超高分辨率质谱和基于基因组学的分子模型等方法手段, 本研究发现, 地下水环境中多种地质成因污染物的水文生物地球化学行为受到微生物生物能学属性的限制, 其氧化还原不平衡性是热力学自由能有限条件下功能微生物介导元素氧化还原双向动力学过程的结果。这一认识对开发劣质地下水原位改良方法和认识地下水环境中污染物的高度变异性具有重要理论指导意义。

关键词: 原生劣质地下水; 地质成因污染物; 生物地球化学循环; 水-岩相互作用; 水质演化

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2023YFC3708001)

第一及通信作者简介: 皮坤福, 男, 教授; 研究方向: 生源微量元素水文生物地球化学和水土污染与防治。Email: pikunfu@cug.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

渤海海域深部热液对太古界潜山储层的影响作用研究

臧春艳^{1*}

1. 中海油能源发展有限公司 中海油实验中心, 天津 300457

渤海海域近几年在太古界变质岩潜山领域取得了多个重大勘探发现, 累计探明储量超过 6 亿吨。薄片、岩心观察、电子探针、同位素等资料分析表明, 太古界潜山经历了复杂的深部热液作用, 储集空间受到了深部热液的强烈改造影响。研究表明, 储层中普遍含 CO_2 , 多口井统计表明, 储层中 CO_2 含量 6%~15%, CO_2 的碳同位素分析及 He 同位素分析表明 CO_2 主要为幔源成因。裂缝中见大量碳酸盐胶结物充填, 部分碳酸盐充填物氧同位素强负偏, 碳同位素偏正, 表现为深部热液的特征; 储层中见到大量黄铁矿, 电子探针分析表明, 部分黄铁矿 $\text{Co/Ni}>1$, 具有典型深部热液特征; 在部分储层中见到 CO_2 气藏中特征伴生矿物片钠铝石, B 表明储层中有过 CO_2 侵位的影响。为了进一步落实 CO_2 热液对储层的具体影响, 开展了溶蚀模拟实验, 实验表明, CO_2 流体作用下长石溶蚀后的伴生矿物组合为高岭石+铁白云

石+石英, 与钻井中长石溶蚀伴生矿物组合一致, 显示了 CO_2 对长石溶蚀增孔作用。裂缝中常见碳酸盐胶结物的溶蚀现象, CO_2 侵位后早期碳酸盐矿物的溶蚀是裂缝型储集空间的重要成因之一。太古界潜山经历了漫长的地质演化过程, 中生界、古近系都钻遇火山岩, 也见到辉绿岩、闪长玢岩, 煌斑岩等多期次侵入体, CO_2 主要可能主要来源于闪长玢岩、辉绿岩体侵位后的释气作用及伴生的深部热液温压降低后的析气作用。深部热液活动虽然也伴生黄铁矿、碳酸盐矿物、片钠铝石等矿物的充填作用, 但由于 CO_2 含量高, 在矿物沉淀后仍有大量 CO_2 剩余, 热液最终表现为对碳酸盐矿物和长石的溶蚀作用, 最终改善了储层物性。

关键词: 渤中凹陷; 太古界; 储层; 深部热液; 改造作用

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

莱州湾南岸海（咸）水入侵地下水的物理、化学和微生物过程

胡晓农^{1*}, 支传顺¹, 杨帆¹

1. 济南大学 水利与环境学院, 济南 250022

莱州湾南岸是我国海（咸）入侵最严重的区域之一。本研究沿莱州湾南岸建立长约 35 km 的地下水监测剖面, 采集地下水与沉积物样品, 开展物理化学指标测试、同位素示踪与微生物分析。结果表明: 莱州湾南岸咸入侵的主要诱因是历史时期地下水超采, 淡水与卤水地下水漏斗共同作用改变地下水流场, 促使咸水向南部淡水区运移的结果。莱州湾南岸地下水盐度自内陆向沿海方向逐渐升高, 卤水盐分不仅来源于古海水, 还存在岩盐溶滤作用的贡献, 咸水是地下水与盐水、卤水混合作用的结果。

地下水微生物多样性随盐度升高呈先降低后升高趋势, 沉积物微生物多样性总体随盐度升高而增加。海杆菌属 (*Marinobacter*)、交替单胞菌科 (*Alteromonadaceae*) 等微生物可作为海水或古海水来源的生物标志物。地下水盐化过程影响碳、氮、硫循环等生物地球化学过程, 高盐度地下水中硫酸盐还原作用增强。

关键词: 海（咸）入侵; 高密度电法; 同位素示踪; 数值模拟; 微生物群落

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42430712); 青年项目 (42202277, 42402247)

第一及通信作者简介: 胡晓农 (1962-), 教授; 研究方向: 地下水循环。Email: stu_huxn@ujn.edu.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Research on the Time lag between Groundwater level variation and Water Burst in Fissure Media Mine Tunnel Excavation by FEFLOW.

Amjad Danyal¹, Zaimin Wang^{1*}, Yangjun Wu¹, XiaoXiong Li¹

1. 成都理工大学 环境与土木工程, 成都 610059

Mining activities in fissure media pose significant challenges due to the complex and unpredictable behavior of groundwater flow, which can lead to hazardous water bursts. These bursts threaten operational safety, infrastructure integrity, and environmental sustainability. This study investigates the time lag between groundwater level variations and water bursts during tunnel excavation, emphasizing its role as an early-warning mechanism. Using the Maoping lead-zinc mining area as a case study, a conceptual model was developed to simulate groundwater flow dynamics, incorporating geological and hydrogeological data. The analysis focuses on hydraulic head, pressure distribution, water flux, velocity, and time lag, particularly within fractures 1 to 3, which represent varying hydraulic conditions. The results highlight the importance of monitoring wells in critical zones, where sudden hydraulic head reductions act as precursors to water inrush events. A negative time lag of -9, -8, and -10 steps was observed, corresponding to different monitoring locations, establishing it as a reliable indicator of transient hydraulic behavior.

High-risk zones, such as Fracture 2, exhibit dominant groundwater transport roles, characterized by high velocities and significant fluxes. These findings emphasize the need for prioritizing such fractures for real-time monitoring and proactive mitigation strategies. By integrating time lag analysis with advanced numerical simulations, this study provides a robust framework for enhancing safety in underground mining operations. The proposed early-warning system enables timely evacuation of workers, adjustment of excavation activities, and reinforcement of critical zones, mitigating risks and reducing economic losses. Furthermore, this study highlights the importance of integrating hydrogeological monitoring with predictive modeling to address groundwater flow challenges in fractured rock systems. The findings contribute to improved risk management strategies and pave the way for refining predictive tools through field applications.

Key words: Time lag; water inrush; water burst prediction; tunnel excavation; mining safety

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

基于多种稳定同位素联用的华北平原 地下水水-岩过程示踪

王莹^{1*}, 陈江¹, 苏媛娜¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北省石家庄市中华北大街 268 号水环所 050061

地下水水岩过程示踪是地下水质量和资源评价的重要组成部分, 利用稳定同位素分馏规律来示踪水岩过程是一种有效的手段, 但由于稳定同位素来源的多元性和分馏局限性, 在实际应用中仍需其它方法的支持。本研究联合应用氢氧和金属稳定同位素的分馏规律, 对华北平原典型流域剖面上地下水中的溶解沉淀、离子交换吸附作用进行了示踪, 结果显示从太行山前至滨海地区, 浅部含水层中氢氧和镁同位素随径流距离都呈逐渐偏重的趋势。地下水补给过程中, 除了受降雨的影响, 浅层地下水还经历了硅酸盐、白云岩和碳酸盐溶解, 导致了镁含量增大, 同时 $\delta^{26}\text{Mg}$

值在径流过程中存在上升趋势; 在深层径流补给过程中, 除了经历矿物溶解作用, 还经历了溶质沉淀过程, 使得镁含量随之降低, 重的镁同位素分馏而更多留在固相中, 导致地下水中 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值存在降低趋势。而在滨海地区的深部含水层中, 氢氧同位素和金属稳定同位素的变化趋势并不一致, 金属稳定同位素的贫化趋势说明除了混合作用, 还经历了次生矿物的形成及离子交换吸附作用, 使得镁含量减少而 $\delta^{26}\text{Mg}$ 的值进一步降低。

关键词: 同位素; 地下水; 示踪

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072289)

第一及通信作者简介: 王莹 (1984-), 正高级工程师; 研究方向: 同位素水文地球化学。Email: wy@mail.cgs.gov.cn

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

西藏堆龙德庆构造岩浆活动与现代地热关系研究

韩军¹

1. 核工业北京地质研究院 地矿所, 北京市朝阳区小关东里 10 号院 核工业北京地质研究院 100029

通过对拉萨西南部堆龙德庆区某园区及周边水热显示及地质条件的野外调查, 结合大地构造和构造岩浆活动的综合研究, 重点剖析了断裂构造、岩浆活动与地热活动的关系。调查发现的新的古地热蚀变遗迹为古近纪-更新世时期的产物, 蚀变矿物以高岭土、残留石英和蒙脱石为主要成分, 系中低温热液或热水作用的产物, 中更新世以来未见明显的地热活动现象。发现的古地热蚀变遗迹是北东、南北、北西向断裂控制的构造岩浆活动的产物, 东西向断裂则形成了研究区现代地貌和水文系统, 与地热活动没有直接联系。研究区中新世以前构造岩浆活动较为活跃, 其后岩浆活动明显减弱。构造体系不匹配以及岩浆活动不发育, 控制古钙华的断裂构造强度减弱造成深部可能的热水与浅部地下水没有联系等是研究区不具备现代水热显示和现代地热活动的主要原因。

主要结论:

研究区出露的“钙华”并不在主断裂及旁侧次级断裂上, 而是以钙华为代表的古地热蚀变遗迹的形式产在北东-南北-北西向张性、张扭性断裂产生的次级裂隙、节理、破碎带和脉岩中。根据断裂活动和岩浆岩形成时间推测, 这些钙华主要是古近纪-中新世时期中性、中酸性岩浆活动形成的热蚀变产物, 不排除少量形成于中更新世以前的酸性脉岩活动, 均属中低

温蚀变, 这类蚀变应为当时岩浆活动期后加热的古地下水运移和上涌的产物。

地表显示的钙华产生机制及现代热显示关系推测如下:

(1) 研究区地处拉萨地块中部为相对刚性地体, 与青藏高原近南北向地热带具显著不同, 构造岩浆活动较弱, 不属于地热活动有利带;

(2) 由北东、近南北向断裂为主, 北西向断裂次之, 这些断裂控制的从古近纪-中新世的岩浆活动是古热液-热水活动的热源, 热蚀变形成的钙华遗迹形成的主要时代为古近纪-中新世, 其后岩浆活动形成的脉岩规模较小, 表明其活动显著减弱;

(3) 控制出露钙华的几组断裂均为主断裂的次级构造, 这些派生构造切割较浅, 未切割到深部岩浆房或地下水, 深部可能存在热水不能上升到浅部, 造成的古钙华规模较小;

(4) 研究区构造岩浆活动在中新世以前较为活跃, 全新世以来岩浆活动明显减弱, 构造体系不匹配以及岩浆活动不发育造成热源不足, 且深部可能的热水不能循环至浅部;

关键词: 新生代构造岩浆活动; 古地热蚀变; 断裂; 堆龙德庆

• 专题 14: 水-岩-气-生相互作用及地下水关键组分演化 •

Hydrobiogeochemical Impacts of Water Sealing on Acid Coal Mine Drainage in Well-developed Karst Area

宋磊^{1,2}, 刘鹏^{3,4}, 李超^{1,2}, 刘宇晖⁵, 张海丽^{1,2}, 严杰^{1,2}, 宁增平¹, 刘意章¹,
刘承帅^{1,6}, 孙静^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 101408;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074;

4. 中国地质大学(武汉)长江流域环境水科学湖北重点实验室, 武汉 430074;

5. 福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002;

6. 华南农业大学 资源环境学院, 广州 510642

The acid mine drainage of closed coal mines contamination for karst aquifers as important drinking water happens continuously. Understanding the underground iron and sulfur cycles controlled by the unique karst medium structure and the response of acid coal mine drainage (ACMD) to source control technology-blocking is imperative for effective groundwater quality management and reduce impact of ACMD for surface water environment in the karst region. This study combined hydrochemistry, multiple stable isotopes ($\delta D-H_2O$, $\delta^{18}O-H_2O$, $\delta^{18}O-SO_4^{2-}$, and $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$), microbiology, solid-phase chemistry and characterization, as well as a tracer test to clarify the SO_4^{2-} sources and iron-sulfur cycling within the karst aquifer affected by ACMD and blocking at the Yudong River Basin in Guizhou Province, Southwest China. Field investigations, solid characterization and hydrochemistry revealed that pyrite oxidation and dissolution of coal in the underground P2l layer, and reaches the surface via the karst conduits of the P2q+m layer. The low pH and high sulfate and total iron characteristics of ACMD effluents are not modulated by seasonal changes and blocking. The δD -excess values of water isotopes indicates that coal mining increases the difference in seasonal changes of δD -excess values, and blocking reverses the seasonal change characteristics of δD -excess values. The data from $\delta^{18}O-H_2O$ and $\delta^{18}O-SO_4^{2-}$ showed that the contributions of the pyrite oxidation by O_2 were 14%~45% and

21%~63% during the wet and dry seasons respectively for ACMD effluents in unsealed coal mines. However, blocking reduced the contributions of the pyrite oxidation by O_2 in the wet and dry seasons (7%~20% and 11%~21%, respectively). The data from $\delta^{34}S-SO_4^{2-}$ suggested that dissimilatory sulfate reduction processes were responsible for the sulfur isotope depletion in the ACMD effluents within this region. The microbial community structure showed that there were hydraulic connection channels between CM#3 and the Baishui River. Moreover, the relatively weakened flow might be more conducive to the redox of Fe-S than the continuous flow. The predicted genes of Fe-S metabolism indicated that all links of sulfur redox and transport processes were relatively complete, and bacteria that could simultaneously carry out multi-metal redox including Fe may be the core population in karst ACMD. Moreover, enormous and free Fe^{3+} may exist in the karst groundwater system affected by ACMD. This study provided an integrated method for exploring the iron-sulfur dynamics in karst aquifers contaminated by ACMD and its response for blocking technology. Moreover, the study highlighted that the hydrological fluctuations and karst media structure control could interfere the stability and synergy of microbial indicators.

Key words: Acid coal mine drainage; Karst; Sealing; Multi-isotopic system; Microbial indicators

基金项目: 国家自然科学基金(42377256); 贵州省“百人高层次创新人才项目”(GCC[2023]038); 贵州省科学计划([2024]013); 环境地球化学国家重点实验室自主部署项目

第一作者简介: 宋磊(1994-), 博士研究生; 研究方向: 环境地球化学。Email: 754254323@qq.com

*通信作者简介: 孙静(1987-), 研究员; 研究方向: 环境水文地球化学、土壤与地下水修复、反应性溶质运移建模。Email: sunjing@mail.gyig.ac.cn