

石门雄黄矿水、土环境介质重金属及其风险评估数据集（2015）研发

刘杨晓月¹, 杨芬^{2*}

- 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
- 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101

摘要: 湖南省石门雄黄矿是亚洲最大的单砷矿, 有 1,500 多年开采历史, 是土壤砷高背景区和矿冶活动共同导致重金属污染的主要来源。由于多年冶炼活动的进行, 加之废水、废气及废渣的不当处置等因素, 导致大量的重金属遗留在土壤和水体等环境介质中。2015 年, 作者团队在石门雄黄矿中心区上游, 顺黄水溪而下, 进入皂市水库, 获得 21 个样点的表层水样, 19 个样点的沉积物样品, 以及 28 个样点的表层土壤。现场用 YSI6600V2 型水质多参数分析仪和实验室内利用电感耦合等离子体色谱仪 (ICP-OES) 和电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS) 检测, 得到 2015 年石门雄黄矿所有环境样品理化性质和重金属特征及其风险评估数据集。该数据集包括: (1) 表层水体、沉积物和土壤样点的地理位置数据; (2) 表层水体理化性质 (pH、水温、溶解氧、总磷、总氮) 数据; (3) 沉积物和表层土壤理化性质 (pH 和有机质) 数据; (4) 表层水体、沉积物和土壤重金属 (As、Cr、Cd、Pb、Zn、Ni、Mn 等) 数据; (5) 土壤重金属污染等级评价 (地累积指数、单一污染指数、内梅罗指数、潜在生态风险指数) 数据。数据集存储为 .kmz、.shp 和 .xlsx 格式, 数据量为 122 KB, 由 25 个数据文件组成 (压缩为 1 个文件, 98 KB)。

关键词: 石门雄黄矿; 表层水; 沉积物; 表层土壤

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.13>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.13>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.08.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.08.V1>。

1 前言

湖南省石门雄黄矿作为我国和最古老的矿山之一, 以蕴藏丰富的雄黄矿资源而闻名世界, 为亚洲最大的雄黄矿, 有 1,500 多年的开采历史^[1]。石门雄黄矿作为单独的砷矿床, 砷平均品位 75%, 矿石储量 73 万吨^[2]。1958 年后开始大规模开采和冶炼, 年选矿 1.5

收稿日期: 2024-12-02; 修订日期: 2025-02-23; 出版日期: 2025-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41571470)

*通讯作者: 杨芬, 中国科学院地理科学与资源研究所, yangf@igsnr.ac.cn

数据引用方式: [1] 刘杨晓月, 杨芬. 石门雄黄矿不同环境介质重金属及其风险评估数据集 (2015) 研发[J]. 全球变化数据学报, 2025, 9(1): 114–121. <https://doi.org/10.3974/geodp.2025.01.13>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2025.01.13>.

[2] 刘杨晓月, 杨芬. 湖南石门雄黄矿环境介质重金属及其风险评估数据集 (2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.08.V1>.

万吨，生产原矿石约 0.3 万吨^[3]。经过多年采挖，30 万吨的雄黄储量已消耗殆尽，资源濒临枯竭。1978 年，炼砷厂被关闭。2001 年，雄黄矿经国土资源部批准正式闭矿。由于多年的矿产开采和冶炼活动，导致大量的砷进入到水、土壤等环境中，造成了长期、严重的砷污染^[4]。2012 年《石门雄黄矿重金属污染“十二五”综合防治方案》开始实施，对历史遗留砷渣进行清理，对周边污染土壤和河道进行治理。因此，在石门雄黄矿开展水体、沉积物、土壤理化性质和重金属的监测和调查，对于全面查清石门雄黄矿的污染现状和治理石门雄黄矿区环境污染具有重要意义。本数据集是 2015 年 5 月，通过对石门雄黄矿周边黄水溪上游至下游，以及黄水溪汇入皂市水库区段进行采样，对表层水样、沉积物和土壤进行现场监测，利用多种污染评价手段对重金属生态风险进行评估。

2 数据集元数据简介

《湖南石门雄黄矿环境介质重金属及其风险评估数据集（2015）》^[5]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据格式、数据量、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《湖南石门雄黄矿环境介质重金属及其风险评估数据集（2015）》元数据简表

条目	描述
数据集名称	湖南石门雄黄矿不同环境介质重金属及其风险评估数据集（2015）
数据集短名	HMsShimenRealgarMine2015
作者信息	刘杨晓月，中国科学院地理科学与资源研究所，lyxy@lreis.ac.cn 杨芬，中国科学院地理科学与资源研究所，yangf@igsrr.ac.cn
地理区域	湖南省石门县
数据年代	2015 年
数据格式	.kmz、.shp 和.xlsx 格式
数据量	122 KB
数据集组成	（1）表层水体、沉积物和土壤样点的地理位置数据；（2）表层水体理化性质数据；（3）沉积物和表层土壤理化性质数据；（4）表层水体、沉积物和土壤重金属数据；（5）土壤重金属污染等级评价数据
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[6]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS, GEOSS, PubScholar, CKRSC

3 水、土环境介质监测方法

2015 年 5 月，沿石门雄黄矿中心区上游，顺黄水溪而下，进入皂市水库（溇水下游），进行采样，获得 21 个样点的表层水样，19 个样点的沉积物样品，以及 28 个样点的表层土

壤,其中,围绕石门雄黄矿原砷矿区和尾矿坝等代表性区域附近进行样点加密处理(图1)。并对所有样点的表层水样、沉积物和土壤进行现场检测。

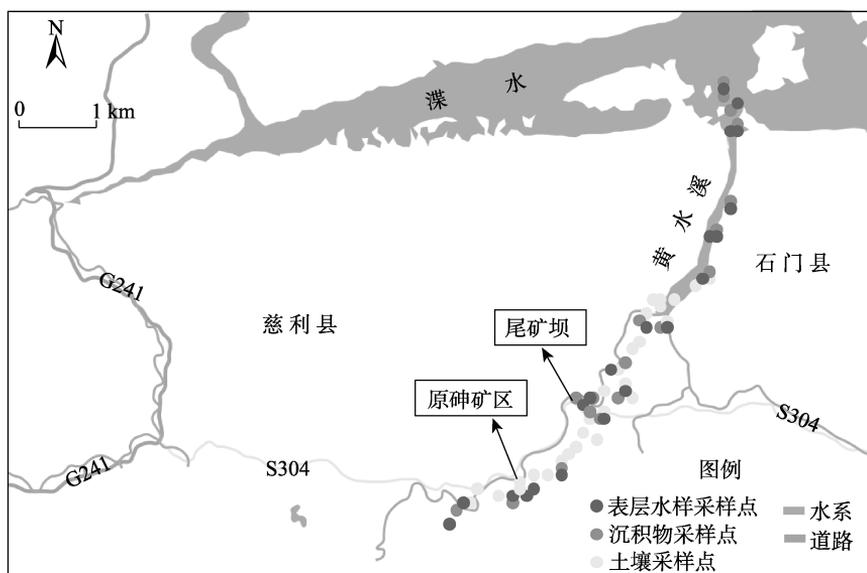


图1 石门雄黄矿监测样点分布图(2015)

3.1 样点不同环境介质的采集与预处理

表层水体样点选取表层水(0–20 cm),现场用 YSI6600V2 型水质多参数分析仪检测水温、pH、氧化还原电位、溶解氧等水体理化性质,并用 0.45- μm 滤膜过滤后待用。沉积物样点的采集采用彼得森采样器采集表层(30 cm 左右)沉积物,置于塑料自封袋内。土壤样点采集取 0–20 cm 的表层土壤,去除表面碎石及其他覆盖物,使用梅花 5 点法采集混合土壤样品。沉积物和土壤样品除去石块、植物根系等杂物,自然风干,研磨至粉末状备用。

3.2 理化性质和重金属监测

土壤和沉积物的 pH 值的测定方法依据《土壤检测第 2 部分:土壤 pH 的测定》(NY/T 1121.2—2006)中电位法(土:水=1:2.5)。土壤和沉积物有机质的测定方法依据《土壤检测第 6 部分:土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)中的重铬酸钾氧化-容量法¹。土壤和沉积物中总砷的测定依据《土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 2 部分:土壤中总砷的测定》(GB/T22105.2—2008)²。土壤和沉积物中重金属(Cd, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn)的测定方法依据《固体废物金属元素的测定电感耦合等离子体质谱法》(HJ766—2015)³。砷的测定采用氢化物发生-原子荧光光谱仪(AFS-8230,北京吉天有限公司)

¹ 土壤检测系列标准(NY/T 1121-2006). <https://www.doc88.com/p-1833069955732.html>.

² 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分:土壤中总砷的测定(GB/T 22105.2-2008). <https://openstd.samr.gov.cn/bz/gk/gb/newGbInfo?hcno=2B5E1AA5CCBFCB3876799A9789177DD8>.

³ 固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法(HJ 766-2015). https://www.mee.gov.cn/yw/gz/fgbz/bz/bzwb/jcfffz/201511/t20151130_317999.shtml.

测定。样品中其他重金属（Cd, Pb, Cr, Cu, Mn, Ni, Zn）使用 PerkinElmer 公司生产的电感耦合等离子体光谱仪 ICP-OES（仪器型号：Elan DRC-e）检测，对于含量低于 ICP-OES 检测限的元素，如 Cd 和 Pb 采用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS（仪器型号：Optima 5300DV）检测。

3.3 重金属风险评估

为综合评价土壤污染水平，选取重金属（As, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn）作为土壤环境质量评价指标，通过地累积指数（Index of Geo-accumulation, I_{geo} ）、单一污染指数（Pollution Index, PI）、内梅罗综合污染指数（Nemerow Integrated Pollution Index, NIPI）、潜在生态风险指数（Ecological Risk Index, EI 和 Potential Ecological Risk Index, RI）等指数计算，确定土壤中主要重金属生态风险水平，各指标分类标准见表 2、3、4。其中地累积指数的计算公式如下^[7]：

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

式中， C_n 为重金属 n 的实测含量（mg/kg）； B_n 为重金属的背景值（mg/kg）；1.5 为校正因子。

单一污染指数（PI）和内梅罗指数（NIPI）的具体公式如下^[8]：

$$PI = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$NIPI = \sqrt{\frac{PI_{\max}^2 + PI_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中， C_i 为重金属 i 的实测含量（mg/kg）； S_i 为依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）GB15618—2018》^[9]中对应重金属 i 的风险筛选值（mg/kg）。 PI_{\max} 为 PI 的最大值， PI_{ave} 为 PI 的平均值。

潜在生态风险指数（RI 和 EI）综合考虑重金属的生态效应和毒理效应，公式如下^[10]：

$$EI_i = \frac{C_i}{B_i} \times CF^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n EI_i \quad (5)$$

式中， EI_i 和 CF^i 分别为重金属 i 对应的潜在生态风险指数和毒性相应系数。

表 2 地累积指数（ I_{geo} ）分类表

分类	I_{geo} 值	污染等级
0	$I_{geo} < 0$	无污染
1	$0 \leq I_{geo} < 1$	无污染至中度污染
2	$1 \leq I_{geo} < 2$	中度污染
3	$2 \leq I_{geo} < 3$	中度污染至重度污染
4	$3 \leq I_{geo} < 4$	重度污染
5	$4 \leq I_{geo} < 5$	重度污染至极度污染
6	$I_{geo} \geq 5$	极度污染

表3 单一污染指数 (PI) 和内梅罗污染指标 (NIPI) 分类表

分类	PI 值	NIPI 值	污染等级
0	PI<0.7	NIPI<0.7	无污染
1	0.7<PI<1	0.7<NIPI<1	警告限值
2	1<PI<2	1<NIPI<2	轻度污染
3	2<PI<3	2<NIPI<3	中度污染
4	PI>3	NIPI>3	重度污染

表4 潜在生态风险评价指标分类表

潜在生态风险	轻度生态风险	中度生态风险	强生态风险	很强生态风险	危险
EI	<40	40-80	80-160	160-320	>320
RI	<150	150-300	300-600	>600	

4 数据结果

4.1 数据集组成

本数据集包括: (1) 表层水体、沉积物和土壤样点的地理位置数据; (2) 表层水体理化性质 (pH、水温、溶解氧、总磷、总氮) 数据; (3) 沉积物和表层土壤理化性质 (pH 和有机质) 数据; (4) 表层水体、沉积物和土壤重金属 (As、Cr、Cd、Pb、Zn、Ni、Mn 等) 数据; (5) 土壤重金属污染等级评价 (地累积指数、单一污染指数、内梅罗指数、潜在生态风险指数) 数据。

4.2 数据结果

(1) 表层水样的监测结果为: 石门雄黄矿黄水溪和皂市水库的水体 pH 为 8.45-10.11, 均呈碱性。参照我国地表水水质标准 GB3838—2002^[11], 水体总磷、总氮的浓度达到中-富营养化水平。这是由于炼砷厂关闭后, 炉子被改为炼硫酸, 硫酸用来制造磷肥, 因此砷矿中心冶炼区和尾矿区附近水体中的总磷、总氮最高。浮游生物是水生生态系统中的一个重要组成部分, 表层水体中共鉴定浮游植物有: 蓝藻门、硅藻门、甲藻门、金藻门、隐藻门、裸藻门、绿藻门等 7 门。1994 年, 王振刚等对石门雄黄矿地区的环境污染状况进行了现场调查, 发现河水中的砷含量最高可达 15.8 mg/L^[1]。Zhu 等对尾矿和冶炼区水体中的砷含量检测, 发现水砷含量也可高达 40.10 mg/L^[12]。石门雄黄矿和皂市水库的表层水体中的砷浓度最高为 3.29 mg/L, 水体中的砷含量随着与矿中心区和尾矿中心区距离的加大而呈现明显的降低趋势。

(2) 沉积物的监测结果为: 沉积物 pH 为 7.32-7.89, 呈弱碱性。沉积物的总有机质平均值为 17.0 g/kg。沉积物中的砷含量范围为 43.42-4,543 mg/kg, 随着与矿中心区距离的加大而呈现明显的降低趋势。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行) GB15618—2018》^[9]中砷的风险筛选值为 25 mg/kg, 说明所有采集沉积物中, 土壤砷含量全部严重超标。沉积物作为可能的砷贮存库, 对沉积物中间隙水中砷的研究有助于阐明水-沉积物界面砷的迁移。

(3) 表层土壤的监测结果为: 不同区域土壤 pH 为 5.33-8.06, 土壤有机质含量 13.12

g/kg–77.31 g/kg 之间。部分点位为农田，有机质含量高，而部分点位为尾矿土和河床土壤，有机质含量相对较低。土壤中的砷含量最高为 5,008 mg/kg，远远高于湖南省土壤砷背景值（13.41 mg/kg）。Tang 等研究发现，石门雄黄矿中心区域土壤中的砷含量最高仍可达到 5,240 mg/kg^[13]。与表层水样和沉积物中的砷含量空间分布模式一致，原砷矿中心区和尾矿区土壤中砷含量最高，但是随着与原矿中心区和尾矿区的距离增加，土壤中的砷含量随之降低，说明砷矿的开采等活动是当地土壤砷污染的一个重要来源。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）GB15618—2018》中砷的风险筛选值为 25 mg/kg，说明采集土壤中的砷严重超标。长期重金属污染会导致土壤养分流失，破坏土壤生物和功能退化^[14,15]。因此，对石门雄黄矿土壤砷污染的修复势在必行。

（4）重金属风险评估结果为：基于土壤的重金属含量，得到石门雄黄矿及其周边地区重金属 As, Cd, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Mn 的平均含量分别为 610, 1.23, 58.0, 104, 27.3, 43.4, 175, 738 mg/kg。地累积指数显示，部分点位 As 和 Cd 处于极度污染至中度污染水平（图 2）。内梅罗综合指数显示 Cr, Cu, Ni 为无污染水平，Pb 和 Zn 处于轻度污染水平，As 和 Cd 处于重度污染水平。土壤的潜在生态风险表明石门雄黄矿地区 43%具有中度生态风险，39%具有强生态风险，18%具有很强的生态风险（图 3）。表明矿山开采是影响石门雄黄矿的主要影响因素，为降低风险区内土壤重金属含量，亟需采取绿色环保高效的修复措施。由于矿区土壤重金属治理是一个长期的过程，因此需要制定长期的修复计划并实时监测环境修复效果^[16]。

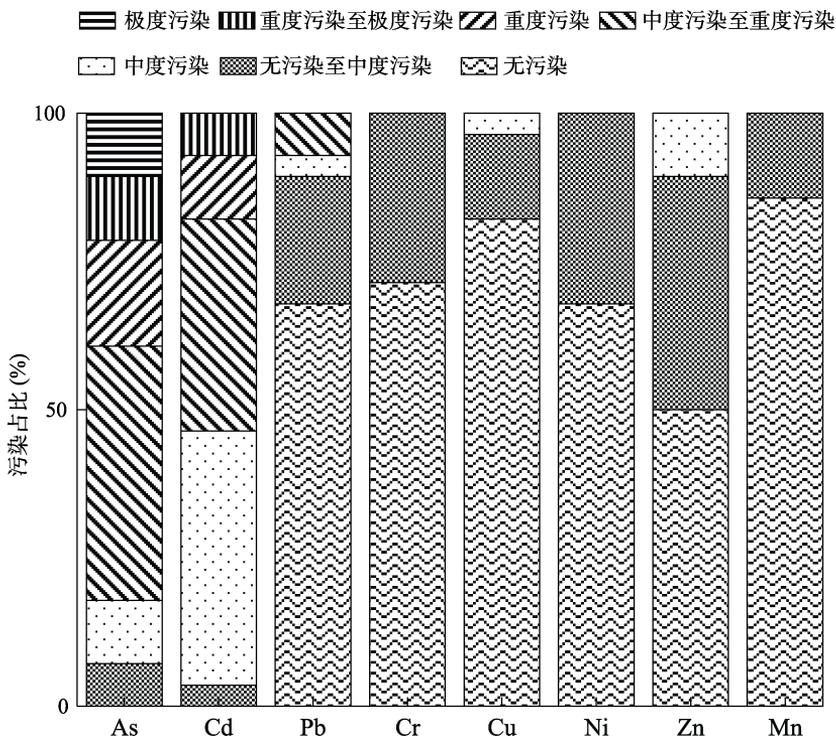


图 2 石门雄黄矿土壤风险评估 (Igeo) 统计分析图

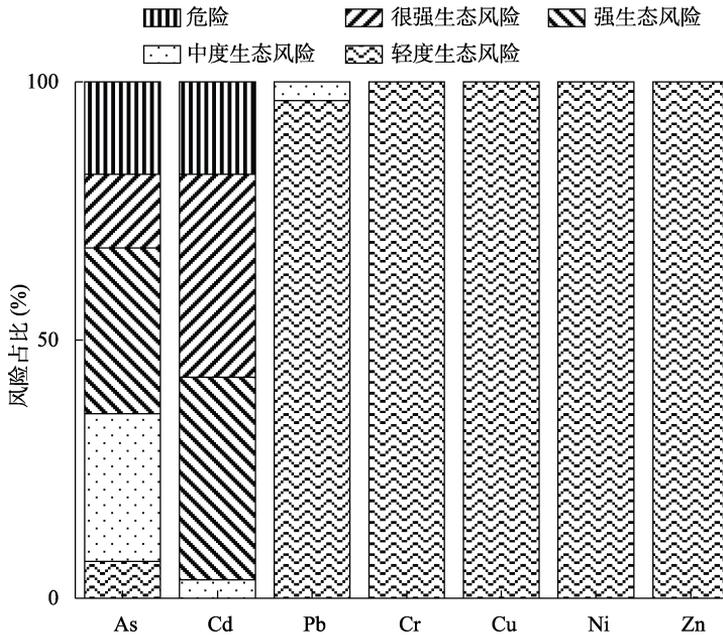


图3 石门雄黄矿土壤潜在生态风险统计分析图

5 讨论和总结

重金属具有高毒性、持久性和不可生物降解性，长期采矿和冶炼活动造成的土壤中重金属污染已成为一个广泛关注的问题^[17,18]。湖南省石门雄黄矿作为亚洲最大的单砷矿，具有 1,500 多年的开采历史。黄水溪贯穿石门雄黄矿，汇入皂市水库。皂市水库作为当地重要的水源地，也受到矿区地表径流、尾矿及废渣堆场的污染。土壤和沉积物作为陆地生态系统重要的储存库，直接影响生态系统结构和功能。本数据集选取石门雄黄矿及周边地区，于 2015 年 5 月对表层水体、沉积物、土壤进行现场调查和数据监测。针对多环境介质开展全面的理化性质和重金属监测，评估土壤重金属污染程度及潜在生态风险。本数据集作为石门雄黄矿单一砷矿区重要的环境监测基础数据集，可为研究石门雄黄矿生态风险评估和深入认识环境中砷的迁移转化提供参考资料，为揭示矿区长周期、大区域砷的运移模拟提供数据基础，为石门雄黄矿环境污染的防治和健康风险应对、可持续发展提供科学依据和建设性意见。

作者分工：杨芬对数据集的开发做了总体设计，并采集和处理了所有数据；刘杨晓月撰写了数据论文等。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] 王振刚, 何海燕, 严于伦. 石门雄黄矿地区居民砷暴露研究[J]. 卫生研究, 1999, 28: 6-8.
- [2] 宣之强. 中国砷矿资源概述[J]. 化工矿产地质, 1998, 20(3): 205-211.

- [3] 夏晶, 曹帅, 吴赵云等. 药用雄黄的基源考证及实地调研[J]. 中华中医药杂志, 2012, 27: 777-778.
- [4] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, 27: 201-212.
- [5] 刘杨晓月, 杨芬. 湖南石门雄黄矿环境介质重金属及其风险评估数据集(2015)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2024. <https://doi.org/10.3974/geodb.2024.11.08.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2024.11.08.V1>.
- [6] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [7] Muller, G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river [J]. *Geojournal*, 1969, 2: 109-118.
- [8] Nemerow, N. L. *Scientific Stream Pollution Analysis* [M]. Washington: Scripta Book Company, 1974.
- [9] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行) (GB15618—2018) [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [10] Hakanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14 (8):975-1001.
- [11] 国家环境保护局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准(GB3838—2002)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] Zhu, X. Y., Wang, R. C., Lu, X. C., *et al.* Secondary minerals of weathered orpiment-realgar-bearing tailings in Shimen carbonate-type realgar mine, Changde, Central China [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2015, 109: 1-15.
- [13] Tang, J. W., Liao, Y. P., Yang, Z. H., *et al.* Characterization of arsenic serious-contaminated soils from Shimen realgar mine area, the Asian largest realgar deposit in China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16: 1519-1528.
- [14] Zhang, C., Nie, S., Liang, J., *et al.* Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure [J]. *Science of the Total Environment*, 2016(1), 785-790.
- [15] Zhao, L., Xu, Y. F., Hou, H., *et al.* Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 654-662.
- [16] 郭军康, 赵隽隽, 李怡凡等. 矿区土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 249-260.
- [17] Ran, H. Z., Guo, Z. H., Yi, L. W., *et al.* Pollution characteristics and source identification of soil metal(loid)s at an abandoned arsenic-containing mine, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 413: 125382.
- [18] Chen, R., Han, L., Liu, Z. Assessment of soil-heavy metal pollution and the health risks in a mining area from southern Shaanxi Province, China [J]. *Toxics*, 2022, 10: 385-401.