

嘉陵江流域采矿废弃物安全现状研究

——对小规模堆场的指示意义

李晓雨¹ 杨放² 彭秀红^{1, 3} 李贺领¹ 唐亮^{1, 31}

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059;

2. 四川发展环境科学技术研究院有限公司, 四川 成都 610072;

3. 成都理工大学地学核技术四川省重点实验室, 四川 成都 610059)

【摘要】: 全球采矿废弃物堆场平均面积为 1.3km², 我国采矿废弃物堆场为 0.363km², 而嘉陵江流域 132 个采矿废弃物堆场(主要为尾矿库)平均面积仅为 0.11km², 属于典型的小规模采矿废弃物堆场。规模越小越不易引起监管重视, 易产生滑坡、泥石流、矿渣扩散污染等环境问题, 研究其安全现状具有重要意义。以野外调查为基础, 对堆场与流域地理要素耦合关系进行分析, 发现采矿废弃物堆场多位于嘉陵江上游, 严重影响下游四川省广元市、南充市, 甚至重庆市的用水安全。此外, 流域内采矿废弃物堆场“头顶库”比例接近 90%, 不规范堆场比例达 38.6%; 结合流域内坡度分析, 发现流域内采矿废弃物受滑坡威胁的比例大于 43.2%。在水/风侵蚀作用下, 采矿废弃物将有 5.4~7.2t/a 左右的有害重金属(Pb、Zn 为主)进入临近土壤及水系中, 形成持久危害。嘉陵江流域采矿废弃物所在地形、气候、堆场规模及监督管理是影响堆场安全的重要因素, 相关部门应重视矿山尾矿库的前期规划, 重视小规模采矿废弃物的后期监督管理。

【关键词】: 采矿废弃物 嘉陵江流域 安全现状

【中图分类号】: TD7 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)11-2755-08

据统计, 小规模矿业开采占到了世界总金属开采量的 15%~20%, 占金矿开采规模的 20%, 钻石规模的 40% 以及几乎所有有色宝石, 约有 1 亿人口依靠小规模采矿谋生^[1]。然而, 该类矿业活动形成的小规模废弃物堆场不易引起监管重视, 具滑坡、泥石流、重金属污染等潜在危害^[2]。近年, 我国开采了大量小规模金属矿产, 嘉陵江流域所在的秦岭山脉矿业开发是其中典型代表。

嘉陵江上游横跨甘肃、陕西、四川所在的西秦岭区域, 是我国重要铅锌矿产区之一, 30 多年的矿业开发产生了大量采矿废弃物, 采矿废弃渣及矿业废水泄漏事故时有发生, 对嘉陵江流域生态环境形成了严重威胁^[3,4]。2015 年, 西汉水发生锑泄漏事故, 导致甘陕川三省 300 多千米嘉陵江水域 Sb 浓度超标 66d, 周边城市不得不采取应急供水措施^[5]。2017 年, 汉中锌业铜矿违规排放废水, 导致四川省广元市 T1 浓度超标 4.6 倍, 城区供水中断 36h^[6]。可见, 整治嘉陵江流域采矿废弃物堆场, 保障生态环境安全

作者简介: 李晓雨(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为尾矿风化封存 CO2. E-mail:1036595308@qq.com; 杨放; E-mail:476069739@qq.com; *唐亮, E-mail:tangliangl7@cdut.edu.cn

已刻不容缓。

陕西省生态环境保护厅 2018 年发布《关于摸底排查嘉陵江流域尾矿库污染和生态风险函》，旨在切实加强嘉陵江流域尾矿库监管工作，消除安全隐患，全面提升尾矿库的风险防控水平。然而，目前嘉陵江流域采矿废弃物堆场(主要为尾矿库)的安全现状仍缺乏研究，致部分堆场的安全隐患得不到有效排查和及时治理。为此，本文以嘉陵江流域 132 个采矿废弃物堆场为研究对象，分析采矿废弃物堆场的基本信息及其存在的安全隐患，为嘉陵江流域采矿废弃物堆场的监管治理及保障周边生态环境安全提供建议。

1 研究方法

通过文献调研、实地考察获取嘉陵江流域采矿废弃物堆场的基本分布范围及相关矿种。利用高光谱遥感图像寻找并获取嘉陵江流域矿产所在位置，并进行标注(图 1)。结合已有数据及现场获取数据，对嘉陵江流域采矿废弃物堆场的数量、所在地的海拔、占地面积等地理信息进行统计分析。

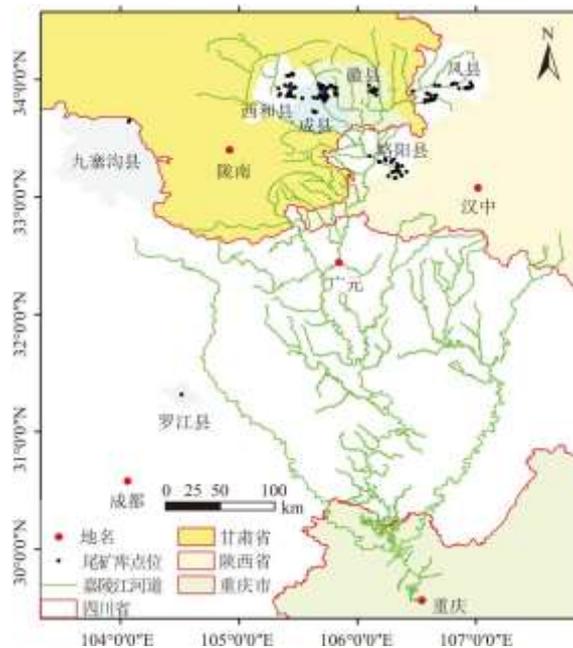


图 1 嘉陵江流域采矿废弃物堆场分布图

通过 ArcGIS 坡度分析,对流域内采矿废弃物的堆积坡度进行安全评估。结合采矿废弃物和流域内敏感地理要素之间的关系,通过 ArcGIS 密度分析、空间分析及缓冲分析,评估采矿废弃物对流域内河流、交通道路、居民点、农田的潜在威胁。

2 结果及讨论

2.1 采矿废弃物堆场基本信息

2.1.1 采矿废弃物堆场数量、海拔

流域内 132 个采矿废弃物堆场中(主要为尾矿库),69 个位于甘肃省境内(表 1),占总数的 52.3%,其中,徽县、成县以及西和

县分别有 24、24、21 个，以铅锌矿采矿废弃物堆场为主。61 个位于陕西省境内，占总数的 46.2%，凤县(34 个)以铅锌矿采矿废弃物堆场为主，略阳县(27 个)以铜矿采矿废弃物堆场为主。2 个位于四川省九寨沟境内，占总数的 1.5%。

表 1 嘉陵江流域采矿废弃物堆场分布

区域	数量(个)	平均海拔(m)	平均面积(km ²)
甘肃省	69	1397	0.097
陕西省	61	1174	0.075
四川省	2	2959	1.45
嘉陵江流域	132	1318	0.11

嘉陵江流域采矿废弃物堆场平均海拔 1318m(图 2)，海拔最高为四川省九寨沟县马脑壳金矿废弃物堆场，海拔 3165m，海拔最低为陕西省略阳县某金、锰矿废弃物堆场，海拔 707m。

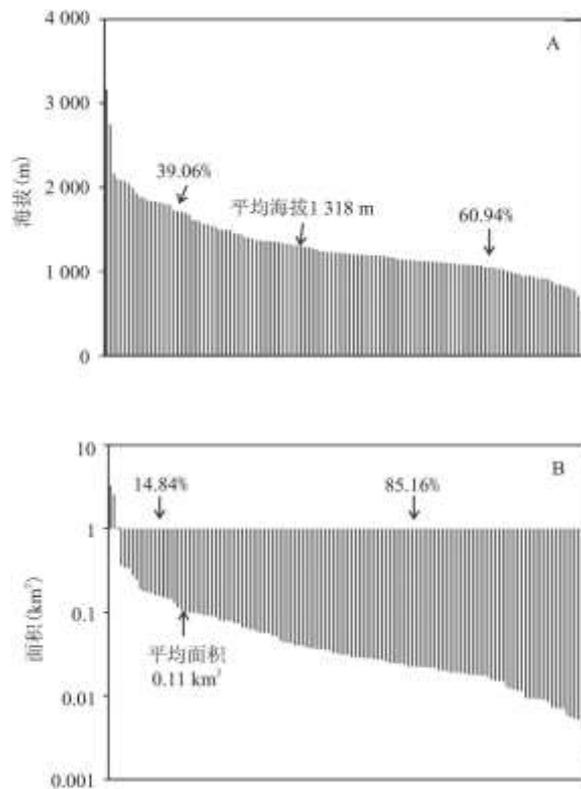


图 2 嘉陵江流域采矿废弃物堆场分布图

2.1.2 采矿废弃物堆场占地面积

流域内采矿废弃物堆场的总占地面积为 14.2km²，平均面积 0.11km²(图 2)，小于我国采矿废弃物平均堆积面积 0.363km²[7]，远低于世界采矿废弃物平均堆放面积(1.3km²) (未发表)，属于较小规模采矿废弃物堆场。其中，陕西省境内堆场占地面积 4.6km²，平均

面积 0.075km²;甘肃省境内堆场占地面积 6.7km²,平均面积 0.097km²;四川省境内 2 个堆场面积 2.9km²,平均面积 1.45km²。流域内最大的采矿废弃物堆场占地 2.0km²,最小采矿废弃物堆场占地面积仅 0.006km²。

2.2 采矿废弃物堆场风险评估

2.2.1 采矿废弃物形成的扬尘污染

随着流域内采矿废弃物堆积面积的增大,尾矿和周围环境的接触周长逐渐增加,尾矿扬尘可能波及的土壤面积逐渐增大,形成的生态威胁也逐渐增大(图 3A),研究认为,平地圆形堆场为最佳的尾矿堆积方式^[8]。流域内采矿废弃物堆场面积和周长之间拟合度较好,采矿废弃物堆场面积较小时,多为椭圆形,随着堆积面积及周长的增大,逐渐被拉长。通过对比,发现堆场的空间构造多呈拉长的锥面体,其地表形状似等腰三角形。其中,腰/底=2、3、4 的堆场数量较多,占总量的 56.8%,腰/底为 2、3、4、5、6 的堆场,占总数的 78.8%(图 3B)。由此可知,区内废弃物堆场受地形限制,多数废弃物的堆积效率较低,极大的增大了区内采矿废弃物和临近土壤的接触面积。流域内总人口约 4000 余万人^[9],土地总面积约 1.6×10⁵km²^[10],人均仅 0.004km²,土地资源极为珍贵,采矿废弃物形成的扬尘、废渣和废水污染加剧了人地矛盾。

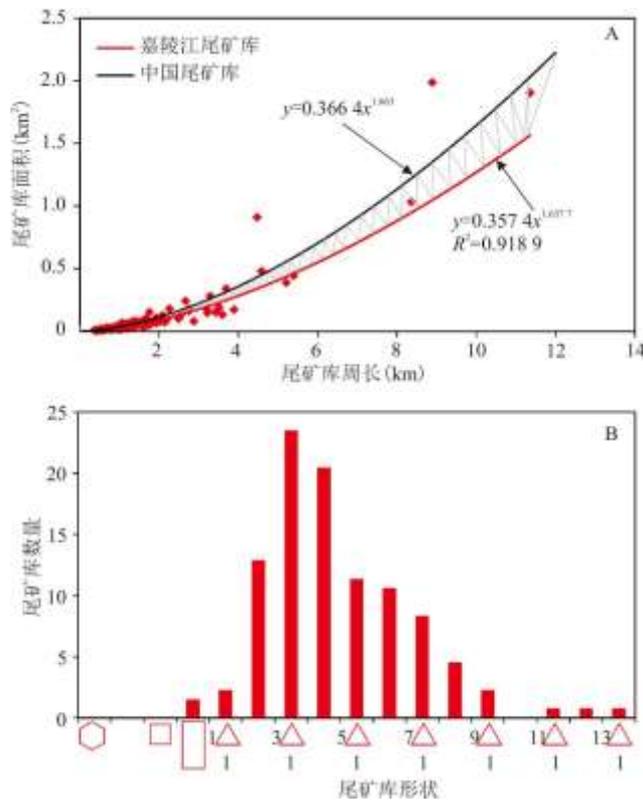


图 3 嘉陵江流域采矿废弃物堆场规模及形状

注: A. 采矿废弃物覆盖面积与周长之间的关系,我国采矿废弃物堆场拟合曲线^[8b];B. 废弃物的图形化形状,腰/底比值指示堆场长宽大小。

此外,嘉陵江上游位于我国南北方过渡带,流域上游自西向东分别为寒冷地带、干旱地带和温带^[11],区内寒冷及干旱地带普遍降雨较少,植被覆盖严重不足。如图 4B,位于寒冷地带的堆场为 2 个,占用土地面积 0.95km²,土地和废弃物堆场的过渡带长度

为 8.5km;干旱地带带有 58 个采矿废弃物堆场,用地面积 6.1km²,和土壤的接触长度为 93.4km。已有研究认为,干采矿废弃物的最小扬尘磨阻启动风速为 5m/s^[12,13],植被覆盖较低的采矿废弃物堆场其年侵蚀量在 25700~31600t/a·km²^[14],则区内寒冷及干旱地带采矿废弃物的最小侵蚀量可达到 18.1 万 t。区内主要以铅锌矿为主,采矿废弃物中 Pb 的最高含量可达 80~200g/kg, Zn 可达 120~250g/kg,废弃物 Pb、Zn 平均含量达到 300~400mg/kg^[15,16]。若以此计算,则每年将有 5.4~7.2t 左右的 Pb、Zn 受水/风侵蚀进入临近土壤及水系沉积物中,重金属的风化作用会威胁农业种植及下游饮用水安全。因此,为避免扬尘污染,应对干旱区、寒冷区(甘肃省境内)采矿废弃物堆场进行有效植物修复以及物理固定/固化^[17,18]。

2.2.2 采矿废弃物堆场选址坡度

采矿废弃物堆场排水不良及地震液化是堆场失事的主要因素^[20]。嘉陵江流域采矿废弃物堆场主要分布于西秦岭山脉地区,区内地势起伏极大(图 4D)。利用 ArcGIS 进行嘉陵江流域坡度分析,并耦合流域地形与采矿废弃物堆场的位置关系,得出区内采矿废弃物主要堆置于 3°~23° 的斜坡上。其中,大于 50% 的采矿废弃物堆置于 3°~9° 度范围内,约 70% 的采矿废弃物堆积在 5.5°~12° 斜坡上,比例最大。研究显示,滑坡主要发育于 10°~40° 的斜坡范围内,崩塌主要发育于 40°~50° 的斜坡上^[21],区内有 56.8% 的采矿废弃物堆积坡度都在滑坡安全坡度范围内(小于 10°),但仍有约 43.2% 的废弃物堆积在滑坡警戒坡度范围(大于 10°)(图 5A、图 5B)。由于采矿废弃物颗粒松散,势能大,常堆积于谷底,堆场浸润线较高,则流域内采矿废弃物因地形坡度而受到威胁的比例将大于 43.2%。

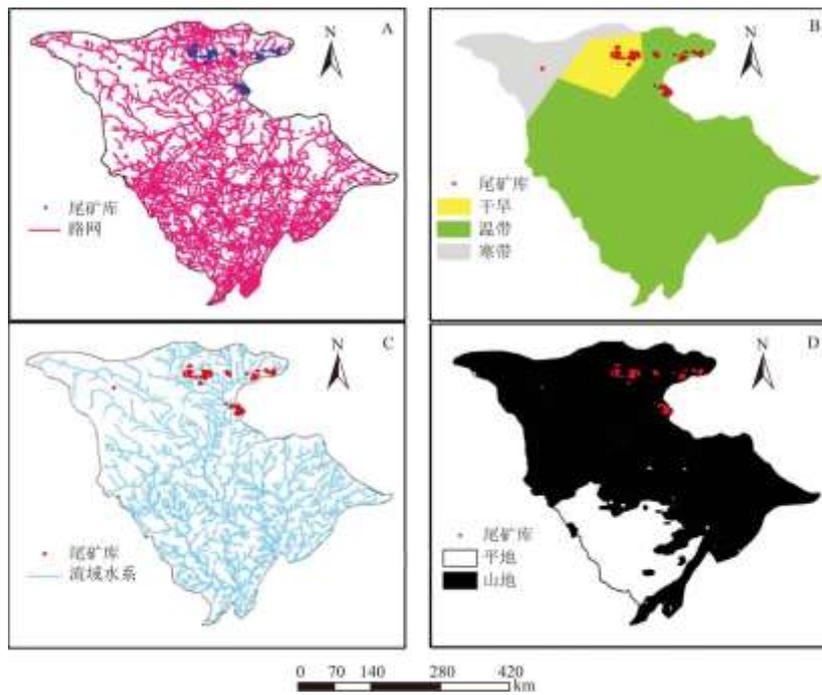


图 4 嘉陵江流域采矿废弃物地理格局

注: A. 嘉陵江流域路网分布(Open Street Map);B. 嘉陵江流域气候分布,据 Köppen-Geiger 气候分带^[9];C. 嘉陵江流域详细水系图(Open Street Map);D. 嘉陵江流域地形分布图^[16]。

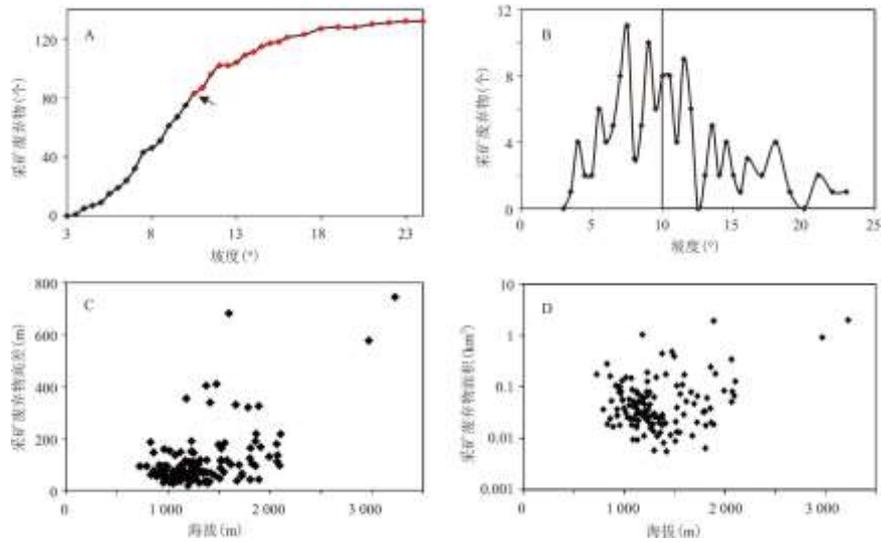


图5 嘉陵江领域采矿废弃物堆积属性

注：A、B:采矿废弃物堆积所在区域的地形坡度；C:采矿废弃物堆积高差和废弃物堆积平均海拔之间的关系；D:采矿废弃物堆积面积和平均海拔之间的关系。

此外，区内采矿废弃物涉及范围极大，采矿形成的暴露面净高差在18~745m之间，平均高差113m。废弃物堆积高差和采矿所在海拔成正相关，海拔越高，废弃物堆积高差越大(图5C)。流域内海拔越高，人口密度、工农业活动强度降低，采矿规模受限制的因素减少，废弃物堆积规模也就随之增加(图5D)。在较陡的地势环境下，当堆积物规模增大后，形成的废弃物高差也随之增大，由此导致采矿废弃物势能增大，潜水面也增高，加剧了废弃物管涌、滑坡的风险，形成泥石流的规模和强度也会增加^[22]，采矿废弃物堆场所在地形坡度应成为影响区内采矿废弃物安全状况的因素之一。

2.2.3 采矿废弃物堆场“头顶库”比例

采矿废弃物堆场(尾矿库)的修建约占矿山建设的10%，耗资较大，出于工程投资考虑，堆场多被建在离厂区一定范围内，靠近公路、铁路、河流或居民点^[23]，但安全风险也成倍增加。根据国家安全监管总局印发关于《遏制尾矿库“头顶库”重特大事故工作方案》的通知(安监总管-[2016]54号)，尾矿库下游1km内有居民及重要设施的被称为“头顶库”^[24,25](图6C)。临近河流、农田、交通干线及居民点，无论是废渣渗漏还是尾矿库溃坝都将给下游造成重大损失，且极易引起重特大安全生产事故，引发环境和社会事件^[26,27]。如：2019年1月25日，巴西东南部布鲁马迪纽市发生的尾矿库溃坝事故，库内泥浆顺流而下，引发大规模泥石流，迅速淹没附近村落，造成259人死亡，108人失踪，损失惨重^[28]。

通过ArcGIS缓冲分析，结合流域内采矿废弃物堆场与临近地理要素之间的耦合关系(图6A、6B)，流域内采矿废弃物堆场距河流1km以内的有34个，占总数的25.8%；距居民区1km以内的采矿废弃物堆场有105个，占总数的79.5%；距交通干线1km以内的采矿废弃物堆场有120个，占总数的90.9%；距耕地1km以内的采矿废弃物堆场有108个，占总数的81.8%。由数据可知，流域内的采矿废弃物堆场存在的安全问题与环境问题都很严重，虽然居民点可以合理搬迁，但受限于山区地形，采矿废弃物堆场附近的公路，河道等极难改变，采矿废弃物堆场形成的威胁将长期存在。

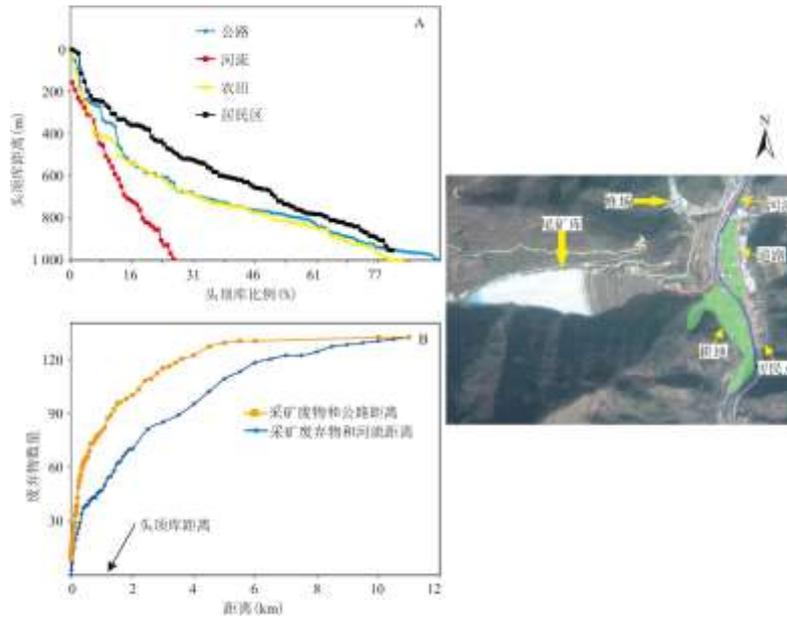


图6 嘉陵江流域“头顶库”与河流、居民区、交通干线、耕地之间的关系

注：A. “头顶库”范围内各地理要素的比例；B. 采矿废弃物堆场与公路、河流之间的距离；C. 典型“头顶库”。

2.2.4 采矿废弃物堆场建设规范性

采矿废弃物堆场(尾矿库)的合理设计及施工是保障矿山安全运行的前提,可有效避免高势能泥石流、滑坡、重金属污染等事故的发生^[29,30,31,32,33,34]。调查显示,流域内按规范修建采矿废弃物堆场的有81个,余下51个堆场就地堆积或顺山坡倾倒构成,未修建相应拦截设施(尾矿坝),有的堆场周围不足百米便有河流、农田、居民点(图6)。另外,库内有违章建筑物的采矿废弃物堆场有31个,占总数的23.5%。此类采矿废弃物在雨季或地震发生时,废渣将随径流、山洪搬运,污染周边水体、土壤、植被,甚至引发泥石流淹没农田、居民住宅,造成经济损失及人员伤亡。因此,应加强流域内采矿废弃物堆场(尾矿库)设计、施工的监管,强化已有不规范堆场的监控及整治,并形成长效机制。

3 结论

(1) 嘉陵江流域132个采矿废弃物堆场多分布于流域上游,总占地面积14.2km²,平均面积0.11km²。约83.3%的堆场占地面积低于平均值,且低于世界平均值,说明流域内多为小规模堆场,此类堆场普遍未经正规设计、安全系数低,易发生安全事故。

(2) 堆场地表形状以拉长的三角形为主,增加了采矿废弃物和土壤的接触面积,增加了废弃物被风/水侵蚀的概率,扬尘污染严重。

(3) 大于43.2%的废弃物堆积在滑坡警戒坡度范围,流域内废弃物堆积所在坡度应被重视。

(4) 流域内堆场“头顶库”所占的比例较大,1km范围内地理要素的占比为公路>农田>居民点>河流,易引起特重大安全生产事故。

(5) 不规范采矿废弃物堆场数量占总数的38.6%,后期应加强新建采矿废弃物堆场(尾矿库)设计、施工的监管,强化已有不规

范堆场的监控及整治。

参考文献:

- [1] LOTTERMOSER B G. Mine wastes. characterization, treatment and environmental impacts [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [2] 门永生, 柴建设. 我国尾矿库安全现状及事故防治措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2009, 5(1): 48-52.
- [3] 董宏伟. 长江流域嘉陵江水系水生态环境保护探讨[J]. 水利规划与设计, 2018, 6: 53-54.
- [4] 刘玥. 凤县铅锌矿区地质环境质量评价研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [5] 环球网. 透视嘉陵江跨境污染之痛: 上游 200 余座尾矿库成隐患 [EB/OL]. (2018-3-30) [2020-6-9]. https://www.sohu.com/a/226788392_162522.
- [6] 两江环保. 广元铊污染非孤例, 嘉陵江上游水质信息亟待公开[EB/OL]. (2017-5-10) [2020-6-9]. https://www.sohu.com/a/139560104_720361.
- [7] LI W, ZHONG R, XU C, et al. U-Pb and Re-Os geochronology of the Bainaimiao Cu-Mo-Au deposit, on the northern margin of the North China Craton, Central Asia Orogenic Belt: Implications for ore genesis and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 2012, 48: 139-150.
- [8] TANG L, LIU X M, WANG X, et al. Statistical analysis of tailings ponds in China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2020. DOI:10.1016/j.gexplo.2020.106579.
- [9] 封面新闻. 省人大代表杨雨龙: 四省联动大规划发展嘉陵江生态经济带[EB/OL]. (2019-1-19) [2020-12-25]. https://www.sohu.com/a/290069488_308022.
- [10] 中国政府网. 嘉陵江流域综合规划环境影响评价公众参与第二次信息公示[EB/OL]. (2013-4-19) [2020-12-25]. <http://www.sc.gov.cn/10462/10464/10727/10746/2013/4/19/10257257.shtml>.
- [11] PEEL M C, FINLAYSON B G, MCMAHON T. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(5): 1633-1644.
- [12] LI R, YU M, ZHU W, et al. Research of comprehensive control measures of tailings dust (In Chinese)[J]. Metal Mine, 2011, 415(1): 142-146.
- [13] MILEUSNIC M, MAPANI S R, KAMONA B S, et al. Trace elements dispersion from a tailings impoundment (dam) and speciation study in surrounding agricultural soils: A Case study from Kombat Mine area, Otavi Mountainland, Namibia[J]. Environmental & Health Impacts of Mining in Africa, 2012, 594.
- [14] AMPONSAH-DACOSTA F. A field-scale performance evaluation of erosion control measures for slopes of mine tailings dams[R]. 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference, 2015.

-
- [15]郭建平, 吴甫成, 谢淑容, 等. 湖南临湘铅锌矿尾矿库环境状况及开发利用研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(3):553-558.
- [16]何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, 34(9):3595-3600.
- [17]ACOSTA J A, ABBASPOUR A, MARTINEZ G R, et al. Phytoremediation of mine tailings with *Atriplex halimus* and organic/inorganic amendments: A five-year field case study[J]. *Chemosphere*, 2018, 204:71-78.
- [18]CHOI W H, LEE S R, PARK J Y. Cement based solidification/stabilization of arsenic-contaminated mine tailings[J]. *Waste Management*, 2009, 29(5):1766-1771.
- [19]SAYRE R, FRYE C, KARAGULLE D, et al. A new high-resolution map of world mountains and an online tool for visualizing and comparing characterizations of global mountain distributions[J]. *Mountain Research and Development*, 2018, 38(3):240-249.
- [20]沈珠江. 计算土力学. 岩土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [21]李源亮, 任光明, 黄细超, 等. 攀西黑水河流域北部地区崩塌与滑坡分布规律[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(10):57-62.
- [22]RICO M, BENITO G, DIEZ-HERRERO A. Floods from tailings dam failures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3):79-87.
- [23]刘登高. 尾矿坝稳定性分析与研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- [24]李全明, 张红, 李钢. 中国与加拿大尾矿库安全管理对比分析[J]. 中国矿业, 2017, 26(1):21-26.
- [25]林玉山, 张卫. 尾矿库地质灾害与危险性评估[J]. 桂林工学院学报, 2006, 26(4):486-49.
- [26]李海港. 降雨因素对尾矿库溃坝的影响及安全预警技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
- [27]柴啸龙, 张杰. 尾矿库对高速公路桥梁工程安全的影响及对策研究[J]. 公路与汽运, 2019, 192:155-159.
- [28]Environment News Service, Brumadinho. Brazilian Mine Tailings Dam Breaks, Killing Dozens[EB/OL]. (2019-1-28) [2020-6-9]. <http://ens-newswire.com/2019/01/28/brazilian-mine-tailings-dam-breaks-killing-dozens/>.
- [29]李文学. 嘉陵江流域水质及排污情况调查[J]. 水利规划与设计, 2015, 8:37-38.
- [30]吴晓艳. 嘉陵江流域生态经济建设的对策探讨[J]. 科技·经济·社会, 2005, 23(1):29-34.
- [31]陈俊. 尾矿库瞬态溃坝下泄砂流演进过程研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [32]杨金艳, 蒲生彦, 谢燕华, 等. 尾矿库溃坝风险评价方法的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(11):84-91.
- [33]周杰, 曾晟, 孙冰. 尾矿库溃坝原因及安全稳定性分析[J]. 黄金, 2018, 10(39):73-77.

[34]DIBIKE B Y, SHAKIBAEINIA A, DROPPO G I. Modelling the potential effects of Oil-sands tailings pond breach on the water and sediment quality of the lower Athabasca River[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642:1263-1281.