

湘西古丈烂泥田锰矿区地表水污染特征及风险评价

伍鹏, 舒倩, 罗小芳, 伍钢

(湖南中诚环境监测技术有限公司, 湖南长沙 410000)

摘要: [目的] 研究古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理后地表水质量, 以期掌握研究区地表水安全状况, 为锰矿区重金属的污染治理提供依据。[方法] 对采集水样的 pH 值, Mn, Pb, Hg, As, Cu, Cd, Cr^{6+} , 化学需氧量及氨氮含量进行测定。运用水质综合污染评价法与健康风险评价法对样品结果进行评价。[结果] ①古丈烂泥田锰矿区地表水中仅 S_3 (涵洞出口上游), S_4 (恒源矿业下游) 与 S_5 (烂泥田河流末端) 号采样点的 Mn 含量超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 III 类标准; ②受张氏锰业外排废水的影响, 各样点水环境综合污染指数大小顺序为: S_3 (涵洞出口上游) $> S_4$ (恒源矿业下游) $> S_5$ (烂泥田河流末端) $> S_1$ (锰矿渣库上游) $> S_2$ (涵洞出口); ③ S_1 — S_5 号采样点水环境总健康风险 (RT) 分别为 7.73×10^{-6} , 1.19×10^{-5} , 4.23×10^{-5} , 2.64×10^{-5} , 2.40×10^{-5} , 均未超过国际辐射防护委员会 (ICRP) 的最大可接受风险水平 (5.0×10^{-5})。[结论] 水环境的总体健康风险主要来源于非致癌物质。减少水环境中的铅和铜, 可以有效地控制饮用水带来的总体健康风险。从总体上看, 古丈县烂泥田无尾矿库实施一体化管理已达到目标, 水环境质量基本达到标准。

关键词: 地表水; 古丈烂泥田; 水环境质量; 锰矿区; 健康风险

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0070-05

中图分类号: X820.4, X82, X131.2

文献参数: 伍鹏, 舒倩, 罗小芳, 等. 湘西古丈烂泥田锰矿区地表水污染特征及风险评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 70-74. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.012; Wu Peng, Shu Qian, Luo Xiaofang, et al. Surface water pollution and risk assessment at a manganese mining area located in mud field in Guzhang County of Western Hu'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 70-74.

Surface Water Pollution and Risk Assessment at a Manganese Mining Area Located in Mud Field in Guzhang County of Western Hu'nan Province

Wu Peng, Shu Qian, Luo Xiaofang, Wu Gang

(Environmental Monitoring Technology Limited Company of Hu'nan Zhongcheng, Changsha, Hu'nan 410000, China)

Abstract: [Objective] The surface water quality after the comprehensive treatment of tailless manganese ore at the mud field in Guzhang County in Hu'nan Province was studied in order to provide the basis for the pollution control of heavy metals in the study area. [Methods] The pH value, Mn, Pb, Hg, As, Cu, Cd, Cr^{6+} , chemical oxygen demand (COD) and NH_4^+ -N in the samples were determined. The water environment quality was evaluated by comprehensive pollution assessment and health risk assessment methods. [Results] ① The Mn content from sampling points S_3 (upstream of culvert exit), S_4 (downstream of Hengyuan Mining) and S_5 (end of mud field river) exceeded the class III standard of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB 3838-2002). ② As effected by the discharged wastewater from Zhang's manganese industry, the comprehensive pollution index of water environment ranged as S_3 (upstream of culvert exit) $> S_4$ (downstream of Hengyuan Mining) $> S_5$ (end of mud field river) $> S_1$ (upstream of manganese slag reservoir) $> S_2$ (culvert exit). ③ The results of health risk assessment showed that the total health risks (RT) of the S_1 to S_5 sampling point were 7.73×10^{-6} , 1.19×10^{-5} , 4.23×10^{-5} , 2.64×10^{-5} , 2.40×10^{-5} , respectively,

收稿日期: 2018-12-22

修回日期: 2019-01-15

资助项目: 湖南省自然科学基金资助项目“加拿大一枝黄花的入侵机制及其生物防控研究”(2018JJ2182)。

第一作者: 伍鹏(1989—), 男(汉族), 湖北省阳新人, 助理工程师, 主要从事环境监测与分析研究。E-mail: 2230311949@qq.com。

通讯作者: 伍钢(1985—), 男(汉族), 湖北省阳新人, 工程师, 主要从事环境监测及污染治理研究。E-mail: 2428175459@qq.com。

all of which not exceeded the maximum acceptable risk level of International Commission on Radiological Protection(5.0×10^{-5}). [Conclusion] The total health risk of water environment is mainly derived from non-carcinogenic substances. Reducing Pb and Cu in the water environment can effectively control the total health risks caused by drinking water. Overall, the implementation of the comprehensive management of the tailing-free manganese mine at mud field in Guzhang County has achieved the target, and the water environment quality has basically reached the standard.

Keywords: surface water; water environmental quality; manganese mining area; health risk

矿产的采选与冶炼是环境中重金属的主要来源之一,采矿和冶炼过程中重金属离子在雨水的淋洗作用下渗入到基础土层中,后经复杂的地球化学作用沿着地表水运动方向迁移,进而对水文系统造成污染,加剧了水资源危机^[1-4]。毒理学研究表明,进入环境中的部分重金属会通过食物链最终进入人体,对人体产生毒性和内分泌干扰作用^[5-7]。由此,研究矿产开采活动对地表水环境的影响已经成为环境领域的热点^[8-11]。湘西古丈县烂泥田的锰矿资源丰富,矿产采选与冶炼促进了当地经济的发展,也导致了企业周边土壤、地表水等环境污染^[12-14]。为了治理矿产开采对当地环境的危害,湖南省政府 2015—2018 年对古丈县内 44 家电解锰企业实行了综合整治,关停了全部非法小选矿厂,并开展了古丈县烂泥田无尾矿库锰矿综合治理工程,整治了矿区历史遗留废渣及河道淤泥。

为探明古丈县烂泥田锰矿区综合治理工程的实施成效,本研究拟以治理后烂泥田锰矿区地表水为研究对象,采用国内外河流水环境重金属污染健康风险评估法与水质综合污染评价法,开展水环境质量评价与人体健康风险评估,以期为锰矿区重金属的污染防治及综合治理提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与工程建设

烂泥田锰矿区位于湖南省古丈县岩头寨镇坪家村,距离县城 11.5 km。矿区大规模锰矿开采始于 20 世纪 90 年代,采矿过程中遗留山间废渣 $1.28 \times 10^5 \text{ m}^3$,废石 $1.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ 及河道锰渣 $7.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。废弃物已对矿区周边及其下游水、土壤、空气质量产生了严重影响。2014 年锰矿区溪流 L_1 点位(恒源矿业及其下游)水体中 Mn 含量达到了 1.91 mg/L。

烂泥田锰矿区作为湖南省矿山环境重点治理区域之一,治理面积 0.2 km²。针对区内历史遗留锰渣的环境污染问题,古丈县人民政府新建了一座 $6.88 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的一般 II 类工业固废填埋场,用于对矿区

内历史遗留废渣以及河道淤泥的填埋处理,并对渗滤液进行收集处理,同时在涵洞出口上游进行溪水改道引流工程(包括隧洞工程建设和拦水坝工程建设),对矿区内 3 km 河道 $7.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 锰渣进行了清理。

1.2 样品采集

地表水样品采集点位分别布设于锰矿渣库上游(S_1)、涵洞出口(S_2)、涵洞出口上游(S_3)、恒源矿业下游(S_4)、烂泥田河流末端(S_5)。水样监测频次为 2 次/d,连续 2 d(2018 年 8 月 23—24 日),共采集水样样品 20 个。水样用硝酸处理过的塑料桶采集,采集后放入用 HNO₃ 清洗过的 500 ml 聚乙烯瓶中,并加入 5 ml 经一次蒸馏的浓硝酸进行固定,放入 4 ℃ 的冰箱中保存。

1.3 分析测试方法

水样采用玻璃电极法测定 pH 值,纳氏试剂比色法测定样品中氨氮浓度,化学需氧量(COD)按(GB11914-89)标准方法测定。样品消解方法参照国标法进行,各取水样 5 ml 至比色管中,然后分别加入王水与超纯水混合液 5 ml(王水:超纯水=1:1),置于电热板上浓缩至 2 ml 左右,再用超纯水定容至 25 ml,采用火焰原子吸收光谱法测定 Cu, Mn, Cd, Pb, Cr⁶⁺ 的浓度,原子荧光法测定 As, Hg 的浓度。

1.4 综合污染指数法

用均值型综合污染指数法对地表水样品中的主要污染项目作为水体污染评价指数均值 P ,其计算式为^[15]:

$$P_{ij} = \frac{c_{ij}}{s_i} \quad (1)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (3)$$

式中: P ——综合污染指数均值; n ——评价参数数量; P_j —— j 断面水污染综合指数; P_{ij} —— j 断面 i 项的污染指数; P_i ——单项污染指数; c_{ij} ——第 j 断面 i 项污染物的监测值; s_i ——第 i 项污染物的水质标准值,具体综合水质分级判定标准见表 1。

表 1 综合水质分级判定标准

综合污染指数 P 值范围	水质状况	分级依据 ^[16]
$P \leq 0.20$	清洁	多数项目未检出,个别项目检出,但在标准内
$0.20 < P \leq 0.40$	尚清洁	检出值在标准内,个别项目接近或超标
$0.40 < P \leq 0.70$	轻度污染	个别项目检出,且超标
$0.70 < P \leq 1.0$	中度污染	有两项指标检出值超标
$1.0 < P \leq 2.0$	重污染	相当部分指标检出值超标
$2.0 < P$	严重污染	相当部分指标检出值超标数倍或几十倍

1.5 健康风险评价

(1) 饮水途径的单位体重日均暴露剂量 D_{ig} 为^[17]:

$$D_{ig} = 2.2 \times c_i / 70 \quad (4)$$

式中:2.2——成人平均每日饮水量(L); c_i ——化学致癌物或躯体毒物的浓度(mg/L); 70——人均体重(kg)。

(2) 化学致癌物所致健康危害的风险。化学致癌物所致健康危害的计算式为:

$$R_c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c \quad (5)$$

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig} q_{ig})] / 70 \quad (6)$$

式中: R_{ig}^c ——化学致癌物(共 k 种化学致癌物)经饮水途径的平均个人致癌年风险(a); D_{ig} ——化学致癌物 i 经饮水途径的单位体重日均暴露剂量[mg/(d·kg)]; q_{ig} ——化学致癌物经饮水途径的致癌强度系数[mg/(d·kg)], Cr^{6+} , As, Cd 的致癌强度系数 41, 15, 6.1 [mg/(d·kg)]; 70——人类平均寿命(a)。

(3) 非致癌污染物所致健康危害的风险。非致癌污染物所致健康危害的计算式为:

$$R_n = \sum_{i=1}^k R_{ig}^n \quad (7)$$

$$R_{ig}^n = (D_{ig} / Rf D_{ig} \cdot 70) \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

式中: R_{ig}^n ——非致癌物 i 经饮水途径的平均个人致癌年风险(a); $Rf D_{ig}$ ——非致癌物经饮水途径的参考剂量[mg/(kg·d)], Pb, Hg, Cu, Mn, 氨氮的参考剂量分别为 0.001 4, 0.000 3, 0.005 0, 0.140 0, 0.970 0 mg/(kg·d)。

(4) 总健康危害的风险。

$$R_T = R_c + R_n \quad (9)$$

式中: R_T ——总健康风险。

2 结果与分析

2.1 锰矿区地表水监测结果

湘西古丈烂泥田锰矿区溪流地表水监测结果见表 2。由表 2 可知,与《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅲ类标准限值规定的污染物浓度限值相比, S_1 (锰矿渣库上游)与 S_2 (涵洞出口)监测点位样品中各项监测指标均未超标,涵洞出口上游(S_3)、恒源矿业下游(S_4)、烂泥田河流末端(S_5)监测点位样品中仅 Mn 元素超标,分别超标 4.6, 1.2, 1.4 倍。根据采样点位置可知,监测点样品中 Mn 元素均未超标,且 S_1 (锰矿渣库上游)与 S_2 (涵洞出口)监测点位样品中其余各重金属元素含量均低于其它采样点; S_3 (涵洞出口上游)采样点 Mn 元素含量最高达到 0.4575 mg/L,其来源与张氏锰业外排废水有关,同时影响到了下游地表水 Mn 的含量; S_4 (恒源矿业下游)采样点样品中 Hg 与 Cr^{6+} 的含量高于 S_3 (涵洞出口上游)采样点,主要是 S_4 (恒源矿业下游)采样点样品不仅受上游张氏锰业的影响,同时还受恒源矿业外排废水的影响,但实施治理工程后, S_4 (恒源矿业下游)采样点样品中 Mn 元素含量仅为未治理前 L_1 采样点(恒源矿业及其下游)水样中 Mn 含量的 6.15%,表明古丈县烂泥田锰矿区综合治理后地表水中 Mn 的污染得到明显改善。与广西省矿区地表水锰超标应急处置工程相比^[18],广西省通过投加药剂使 Mn 含量从 28.2 mg/L 降低至符合标准,存在成本高,不稳定的缺点。

表 2 锰矿区地表水水环境监测结果

监测点位	pH 值	化学需氧量	$NH_4^+-N/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	Cu/ ($mg \cdot L^{-1}$)	As/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Hg/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Cd/ ($mg \cdot L^{-1}$)	$Cr^{6+}/$ ($mg \cdot L^{-1}$)	Pb/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Mn/ ($mg \cdot L^{-1}$)
S_1	7.31	4.25	0.029	0.009	0.000 12	0.000 057 5	0.000 21	0.006 25	0.001	0.008 0
S_2	7.89	2.36	0.026	0.008	0.000 18	0.000 052 5	0.000 18	0.006 25	0.004	0.007 0
S_3	7.60	3.12	0.026	0.024	0.000 35	0.000 047 5	0.000 42	0.003 68	0.015	0.457 5
S_4	7.61	2.89	0.039	0.013	0.000 21	0.000 050 0	0.000 36	0.005 25	0.011	0.117 5
S_5	7.48	2.67	0.039	0.018	0.000 19	0.000 036 0	0.000 29	0.005 12	0.008	0.135 0
限值	6~9	20	1.0	1.0	0.05	0.000 1	0.005	0.05	0.05	0.1

注:参考《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅲ类标准限值; S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 为 5 个采样点,分别在锰矿渣库上游、涵洞出口、涵洞出口上游、恒源矿业下游、烂泥田河流末端。

2.2 锰矿区地表水综合污染评价

湘西古丈烂泥田锰矿区溪流地表水各采样点水环境中 9 项监测指标的单因子污染指数累计值和综合污染指数见图 1。由图 1 可知,各采样点水环境综合污染指数大小顺序为: S_3 (涵洞出口上游) $> S_4$ (恒源矿业下游) $> S_5$ (烂泥田河流末端) $> S_1$ (锰矿渣库上游) $> S_2$ (涵洞出口), 结合单因子污染指数累计值可知, S_3 (涵洞出口上游) 采样点样品的综合污染指数主要受 Mn 元素的影响。综合水质判定标准, S_1 (锰矿渣库上游) 与 S_2 (涵洞出口) 采样点样品的综合污染

指数分别为 0.122, 0.110, 均属于清洁等级, S_4 (恒源矿业下游) 与 S_5 (烂泥田河流末端) 采样点样品的综合污染指数分别为 0.254, 0.247, 均属于尚清洁等级, S_3 (涵洞出口上游) 采样点样品的综合污染指数为 0.636, 属于轻度污染等级。从整体来看, 古丈烂泥田锰矿区经过治理后, 矿区溪流地表水水环境质量有所改善, 取得了一定成效, 而 S_3 (涵洞出口上游) 采样点水体受张氏锰业外排废水的影响, 水环境综合污染指数仍为轻度污染, 还需进一步加强对张氏锰业外排污染物的监管。

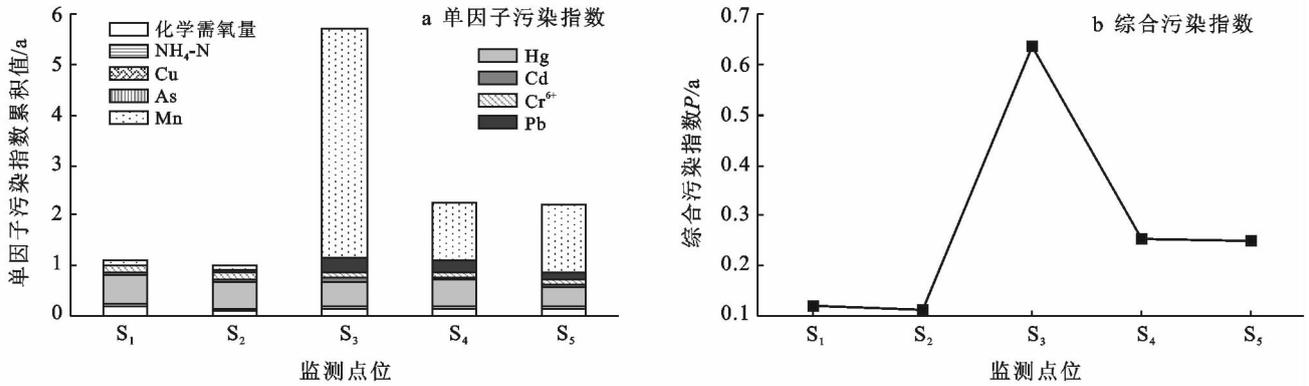


图 1 锰矿区地表水各采样点水环境污染指数

2.3 锰矿区地表水健康风险评价

湘西古丈烂泥田锰矿区溪流地表水通过饮水途

径所引起的平均个人年致癌健康风险、非致癌健康风险和总健康风险见表 3。

表 3 古丈烂泥田锰矿区溪流地表水经饮水途径的健康风险评价结果

监测点	化学致癌物质			R_c	非致癌物质					R_n	R_T
	Cd	Cr^{6+}	As		Hg	Pb	Cu	Mn	NH_4^+-N		
S_1	2.66×10^{-10}	1.58×10^{-6}	2.13×10^{-10}	1.58×10^{-6}	4.22×10^{-7}	1.57×10^{-6}	3.96×10^{-6}	1.26×10^{-7}	6.58×10^{-8}	6.14×10^{-6}	7.73×10^{-6}
S_2	1.95×10^{-10}	1.58×10^{-6}	4.80×10^{-10}	1.58×10^{-6}	3.85×10^{-7}	6.29×10^{-6}	3.52×10^{-6}	1.10×10^{-7}	5.90×10^{-8}	1.04×10^{-5}	1.19×10^{-5}
S_3	1.60×10^{-9}	5.48×10^{-7}	1.82×10^{-9}	5.51×10^{-7}	3.48×10^{-7}	2.36×10^{-5}	1.6×10^{-5}	7.19×10^{-6}	5.90×10^{-8}	4.17×10^{-5}	4.23×10^{-5}
S_4	7.81×10^{-10}	1.12×10^{-6}	6.53×10^{-10}	1.12×10^{-6}	3.67×10^{-7}	1.73×10^{-5}	5.72×10^{-6}	1.85×10^{-6}	8.85×10^{-8}	2.53×10^{-5}	2.64×10^{-5}
S_5	5.70×10^{-10}	1.60×10^{-6}	5.35×10^{-10}	1.63×10^{-6}	2.64×10^{-7}	1.26×10^{-5}	7.92×10^{-6}	2.12×10^{-6}	8.85×10^{-8}	2.30×10^{-5}	2.40×10^{-5}

由表 3 可知, S_1 (锰矿渣库上游)、 S_4 (恒源矿业下游), S_5 (烂泥田河流末端) 采样点水环境中化学致癌物的健康风险顺序为: $Cr^{6+} > Cd > As$ 。而 S_2 (涵洞出口), S_3 (涵洞出口上游) 号采样点水环境中化学致癌物的健康风险顺序为: $Cr^{6+} > As > Cd$ 。这表明 Cr^{6+} 是古丈烂泥田锰矿区溪流地表水主要化学致癌因子。根据 ICRP 推荐的化学致癌物经饮水途径的最大可接受风险水平为 5.00×10^{-5} , S_1 — S_5 号采样点样品中的化学致癌物健康风险 (R_c) 分别为 1.58×10^{-6} , 1.58×10^{-6} , 5.51×10^{-7} , 1.13×10^{-6} , 1.06×10^{-6} , 均未超过最大可接受风险水平。5 个采样点样品的化学致癌物健康风险大小顺序为: S_2 (涵洞出口) $> S_1$ (锰矿渣

库上游) $> S_4$ (恒源矿业下游) $> S_5$ (烂泥田河流末端) $> S_3$ (涵洞出口上游)。这主要是 S_1 (锰矿渣库上游) 与 S_2 (涵洞出口) 号采样点样品中 Cr^{6+} 的化学致癌物健康风险偏高。

S_1 — S_5 号采样点水环境中经饮水途径 Cu, Pb, Hg, Mn, NH_4^+-N 的非致癌健康风险 (R_n) 分别为 6.14×10^{-6} , 1.04×10^{-5} , 4.17×10^{-5} , 2.53×10^{-5} , 2.30×10^{-5} , 大小顺序为 S_3 (涵洞出口上游) $> S_4$ (恒源矿业下游) $> S_5$ (烂泥田河流末端) $> S_2$ (涵洞出口) $> S_1$ (锰矿渣库上游), 5 个采样点样品的化学非致癌物健康风险均未超过 ICRP 推荐的化学非致癌物经饮水途径的最大可接受风险水平 (5.00×10^{-5}), 受 Pb 和 Cu

的影响, S_3 (涵洞出口上游)、 S_4 (恒源矿业下游)、 S_5 (烂泥田河流末端) 号采样点样品的化学非致癌物健康风险均已临近最大可接受风险水平, 需加强对这 3 个采样点水环境中 Pb 和 Cu 的防范。

S_1 — S_5 号采样点水体总健康风险 (R_T) 分别为 7.73×10^{-6} , 1.19×10^{-5} , 4.23×10^{-5} , 2.64×10^{-5} , 2.40×10^{-5} , 大小顺序为 S_3 (涵洞出口上游) $>$ S_4 (恒源矿业下游) $>$ S_5 (烂泥田河流末端) $>$ S_2 (涵洞出口) $>$ S_1 (锰矿渣库上游), 5 个采样点水体的总健康风险均未超过 ICRP 的最大可接受风险水平。各采样点水样样品中化学非致癌物健康风险占总健康风险的 80% 以上, 而 Pb 与 Cu 占化学非致癌物健康风险的 90% 以上, 表明古丈烂泥田锰矿区溪流地表水水环境总健康风险主要受化学非致癌物 Pb 与 Cu 的影响。结合上述地表水综合污染评价结果, 说明古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理工程后, 研究区溪流的水环境经饮水途径引起的人体健康风险有明显改善。

3 讨论与结论

3.1 工程实施后地表水污染物含量特征

(1) 古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理工程后, 除 S_3 (涵洞出口上游)、 S_4 (恒源矿业下游) 与 S_5 (烂泥田河流末端) 号采样点水体中 Mn 含量超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 III 类标准外, 其它各点位水体中 Pb, Hg, As, Cu, Cd, Cr^{6+} , 化学需氧量及 NH_4^+ -N 含量均未超标。治理后部分点位水样中 Mn 的浓度值超标是否与当地本底值高有关还有待开展大范围的地表水监测分析予以证实。贵州省 8 个典型锰矿区地表水^[19]中 Mn 含量 0.03~19.70 mg/L, 与研究区治理前地表水中 Mn 含量 1.91 mg/L 相比, 古丈烂泥田锰矿区地表水中 Mn 含量处于中等水平, 治理后地表水中的污染物含量均显著降低。因此, 说明古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理工程后的地表水水环境质量得到明显改善。

(2) 古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理工程后 S_3 (涵洞出口上游)、 S_4 (恒源矿业下游) 与 S_5 (烂泥田河流末端) 点位水体中 Mn 含量仍超标, 源于监测点位上游张氏锰业的外排废水。但与未施工前溪流 L_1 点位地表水 Mn 含量相比, Mn 的最大超标倍数由 19.1 倍下降至 5.4 倍, 地表水中 Mn 的治理效果明显, 且填埋场渗滤液经过处理后, 年减排重金属 Mn 约 16.82 t, 表明工程实施产生了较好的环境效益及经济效益。

3.2 工程实施后地表水水环境质量评价

(1) 研究区实施无尾矿库锰矿综合治理工程后,

各采样点样品中水环境综合污染指数大小顺序为 S_3 (涵洞出口上游) $>$ S_4 (恒源矿业下游) $>$ S_5 (烂泥田河流末端) $>$ S_1 (锰矿渣库上游) $>$ S_2 (涵洞出口), 水环境质量主要受 Mn 元素的影响。为更好的监督工程实施后的效果, 确保特殊情况下对研究区溪流地表水的水质风险, 应定期对各点位地表水进行监测, 并加强对填埋场及渗滤液处理设施的维护和保养, 尤其是丰水季节、大雨后的现场检查, 保证工程设施完好。同时应加大收集池的容积, 提高填埋场丰水季节连续降雨时渗滤液的处理能力。

(2) 健康风险评价结果表明, S_1 — S_5 号采样点水环境总健康风险 (R_T) 分别为 7.73×10^{-6} , 1.19×10^{-5} , 4.23×10^{-5} , 2.64×10^{-5} , 2.40×10^{-5} , 均未超过 ICRP 的最大可接受风险水平 (5.0×10^{-5}), 且水环境总健康风险主要来源于非致癌物质, 所以, 降低研究区水环境中非致癌物质 Pb 与 Cu 能有效控制经饮水途径引起的总健康风险。

3.3 对策与建议

为确保古丈县烂泥田实施无尾矿库锰矿综合治理工程效果的长效性, 防止自然力或其他原因引起塌跨流失, 再次造成环境污染事故, 同时恢复当地的自然生态环境, 对于废石堆建议采用建立挡石墙、覆土和杂草恢复等就地稳定化处理。

(1) 筑建挡石墙。用废石和水泥修建挡石墙以稳定废石堆, 防止雨水的侵蚀、淋滤及洪水的冲刷。

(2) 覆土。用黄土覆盖废石堆, 减弱雨水和地表径流对废石的侵蚀, 为后续杂草植根、植被恢复奠定基础。覆土层约 15—20 cm, 土壤来源为就近山体土壤。

(3) 杂草恢复。为防止覆土层流失, 并改善生态环境, 采取本地植根深的杂草进行植被恢复, 使得废石不直接被雨水冲刷, 维护治理工程的稳定性。

[参 考 文 献]

- [1] 谢晓君, 王方园, 王光军, 等. 中国地表水重金属污染的进展研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(2): 31-34.
- [2] 祝慧娜, 李莹, 梁婕, 等. 基于区间数排序法的洞庭湖沉积物重金属生态风险分析[J]. 环境工程, 2014, 32(2): 114-117, 122.
- [3] Li Peiliang, Li Guozheng, Liu Guanfeng. The influence of seepage flow on groundwater in certain tailing pool [J]. Gold, 2005, 26(12): 45-47.
- [4] 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 等. 贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3798-3805.

(下转第 79 页)

- [4] 段钊. 黄土滑坡触发机理研究:以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D]. 西安:长安大学,2013.
- [5] 赵秋鹏. 灌溉作用下陕西省泾阳县张村湾黄土滑坡形成机理及稳定性分析研究[D]. 西安:西北大学,2014.
- [6] 韩波. 泾阳南塬斜坡地下水位与稳定度的关系研究[D]. 西安:西安科技大学,2015.
- [7] 葛瑞华. 泾阳南塬灌溉诱发黄土滑坡形成机理试验研究[D]. 西安:西北大学,2016.
- [8] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬多序黄土滑坡特征参数与成因[J]. 山地学报,2016,34(1):71-76.
- [9] 段钊,彭建兵,王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡的运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报,2016,36(3):46-49.
- [10] 许强,魏勇,彭大雷,等. 泾阳南塬蒋刘4#滑坡特征及成因机制[J]. 水文地质工程地质,2018,45(1):123-130+143.
- [11] 杨炳强. 泾阳南塬河滩村黄土滑坡的特征及致灾机理研究[D]. 西安:长安大学,2015.
- [12] 段钊,李文可,王启耀. 泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J]. 西安科技大学学报,2015,35(3):369-375.
- [13] 金艳丽,戴福初. 地下水位上升下黄土斜坡稳定性分析[J]. 工程地质学报,2007,15(5):599-606.
- [14] 许领,李宏杰,吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2008,19(2):32-35.
- [15] 许领,戴福初,邝国麟,等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(2):287-293.
- [16] 许领,戴福初,闵弘,等. 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J]. 地球科学:中国地质大学学报,2010,35(1):155-160.
- [17] 许领,戴福初,邝国麟,等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评,2009,55(1):85-90.
- [18] 唐东旗,姚秀芳,彭建兵,等. 黄土坡体节理发育特征和空间分区与边坡稳定性[J]. 煤田地质与勘探,2015,43(3):86-90.
- [19] 杨阳. 黄土滑坡裂缝发育特征及其对滑坡孕灾模式的影响:以泾阳南塬黄土滑坡为例[D]. 西安:长安大学,2015.
- [20] 杨华. 裂隙性黄土渗透特性试验研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [21] 谢超. 泾阳南塬黄土渗透特性及黄土滑坡研究[D]. 西安:长安大学,2016.
- [22] Nouguiet-Lehon C, Cambou B, Vincens E. Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: A numerical analysis[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010,27(14):1207-1226.
- (上接第74页)
- [5] 刘亚宾,许云海,张海涛,等. 湘西花垣县主要地表河流重金属污染特征及健康风险评估[J]. 应用与环境生物学报,2018,24(3):602-608.
- [6] 杨海君,许云海,刘亚宾,等. 湘江流域衡阳水口山段水环境健康风险评估[J]. 环境化学,2018,37(9):2060-2070.
- [7] Zhang Zhaoyong, Abuduwaili Jilili, Jiang Fengqing. Determination of occurrence characteristics of heavy metals in soil and water environments in Tianshan Mountains, Central Asia [J]. Analyt Lett, 2013, 46(13):2122-2131.
- [8] Bing Haijian, Wu Yanhong, Zhou Jun. Mobility and eco-risk of trace metals in soils at the Hailuogou Glacier foreland in eastern Tibetan Plateau[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(6):5721-5732.
- [9] Ni Fuquan, Liu Guodong, Ren Huazhun. Health risk assessment on rural drinking water safety: A case study in Rain City district of Ya'an City of Sichuan Province [J]. Journal of water Resource and Protection, 2009(2):128-135.
- [10] 沈园,谭立波,单鹏,等. 松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析[J]. 生态学报,2016,36(9):2732-2739.
- [11] Zhu Bingqi, Yu Jingjie, Qin Xiaoguang. The significance of mid-latitude rivers for weathering rates and chemical fluxes: Evidence from northern Xinjiang Rivers [J]. Journal of Hydrology, 2013,486:151-174.
- [12] 叶壮凌,杨海君. 花垣河重污染河段水环境健康风险评估及监测因子分析[J]. 湖南农业科学,2017(2):57-61.
- [13] 朱程,马陶武,周科,等. 湘西河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在生态毒性风险[J]. 生态学报,2010,30(15):3982-3993.
- [14] 朱佳文. 湘西花垣铅锌矿区重金属污染土壤生态修复研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2012.
- [15] 陈妮. 2006—2015年南四湖水质综合评价及改善效果分析[D]. 山东 青岛:青岛理工大学,2018.
- [16] 关伯仁,司志中. 水质系统规划研究:以伊洛河洛阳段为例[J]. 地理研究,1986(1):106-107.
- [17] 符刚,曾强,赵亮,等. 基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评估[J]. 环境科学,2015,36(12):4553-4560.
- [18] 刘钢,谌建宇,叶万生,等. 矿区地表水锰超标应急处置工程案例分析[J]. 给水排水,2018,54(4):63-65.
- [19] 马先杰,陆凤,陈兰兰,等. 贵州锰矿区地表水体重金属污染及生态风险评估[J]. 环境科学与技术,2018,41(11):191-197.