doi：10. 3969/j. issn. 1005-7854. 2022. 04. 019

锡矿尾矿库重金属污染特征分析

张 靖[1]　朱连明[2]
（1. 矿冶科技集团有限公司，北京 100160
2. 云南驰宏锌锗股份有限公司 会泽分公司，云南 曲靖 655000）

摘　要：我国锡矿资源储量丰富，锡矿开采过程中产生大量尾矿堆存于尾矿库，存在着潜在环境污染风险。为研究分析锡矿尾矿库的重金属污染特征，通过采样检测、收集资料等方式，对锡尾矿主要成分及其属性、锡矿尾矿库废水、周边土壤等监测数据进行分析，采用标准指数法评价。结果表明，锡矿尾矿库主要重金属污染因子为 As、Cu、Zn、Cd、Pb。此外，从环境空气、水环境、土壤环境等方面分析锡矿尾矿库的重金属污染影响，提出防治措施建议。

关键词：锡矿尾矿库；重金属；污染特征
中图分类号：X753　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-7854(2022)04-0122-05

Analysis on heavy metal pollution characteristics of tin mine tailings pond

ZHANG Jing[1]　ZHU Lian-ming[2]
（1. BGRIMM Technology Group，Beijing 100160，China；
2. Huize Branch，Yunnan Chihong Zinc and Germanium Co. Ltd.，Qujing 655000，Yunnan，China）

Abstract：China is rich in tin resources and a large number of tailings are stored in tailings pond during tin mining，which has potential environmental pollution risks. In order to study and analyze the characteristics of heavy metal pollution in tin mine tailings pond，the main components and properties of tin tailings，tin mine tailings pond wastewater，surrounding soil and other monitoring data were analyzed by means of sampling detection and data collection，and the standard index method was used for evaluation. The results show that the main heavy metal pollution factors of tin mine tailings pond are Cu，Zn，Cd and Pb. In addition，the impact of heavy metal pollution in tin mine tailings pond is analyzed from the aspects of ambient air，water environment and soil environment，and the control measures are proposed.

Key words：tin tailings pond；heavy metal；pollution characteristics

我国锡矿资源储量丰富，分布集中度较高。截至 2017 年底，全国共查明锡资源储量 450.04 万 t，基础储量 104 万 t，锡矿产地共 448 处[1]。我国锡矿资源主要集中分布在云南、广西、广东、湖南、内蒙古和江西，合计占全国探明储量的 98.42%[2]。商云涛[3]研究表明，云南个旧锡矿区域尾矿库对矿区地下水已造成污染，对土壤的污染主要集中在尾矿库周边，尾矿库中重金属元素潜在的危害巨大。近几年，尾矿库突发环境事件频发，泄漏尾矿进入河流，极易造成跨市、跨省，甚至跨国污染，可能导致影响饮用水源地，影响生态环境和人群健康。因此，研究锡矿尾矿库污染特征，分析其大气、水、土壤等环境影响，具有重要的意义。

收稿日期：2021-11-10
第一作者：张靖，硕士，高级工程师，主要从事环境风险防范与管理、环境影响评价等。E-mail：249794197@qq.com

1　锡尾矿现状

1.1　锡尾矿产生系数

我国锡矿石矿区含有多种类型的伴生矿物质，而且其组成较复杂、选别难度大，一般采用重选、浮选、电选等方式，还可结合具体情况，进行联合选别[4]。

锡选矿过程产生的固体废物主要是锡尾矿。根据统计分析云南、广西等锡矿采选企业的数据资料，锡尾矿产生系数(即每吨锡矿石经过选矿后产生的尾矿量)一般为 0.90～0.99，主要受矿山生产规模、矿石品位、选矿工艺等因素影响，具体见表 1。

表 1 锡矿尾矿产生系数

Table 1 Production coefficient of tin tailings

锡矿企业编号	原矿消耗/(万 t·a^{-1})	锡精矿产量/(万 t·a^{-1})	尾矿产生量/(万 t·a^{-1})	尾矿产生系数
企业 A	170	1.1	153.8	0.90
企业 B	6		5.6	0.93
企业 C	33		32.4	0.99

1.2 锡尾矿贮存现状

据不完全统计，截止 2019 年底，全国共有 84 座锡矿尾矿库，其中云南省有 49 座锡矿尾矿库，占全国锡矿尾矿库的 58%(图 1)。全国锡尾矿贮存量约 32 088.03 万 m^3，其中，云南省锡尾矿贮存量为 23 049.03 万 m^3，占全国贮存量的 71.83%；广西壮族自治区锡尾矿贮存量为3 096 万 m^3，占全国贮存量的 9.65%；湖南省锡尾矿贮存量为 943 万 m^3，占全国贮存量的 2.94%。

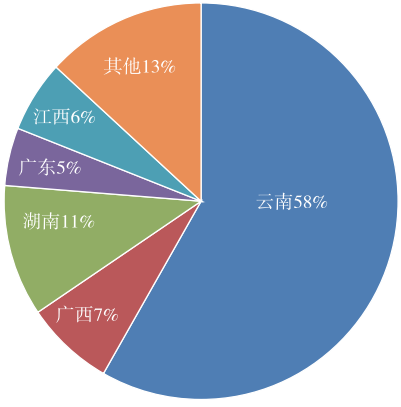

图 1 全国锡矿尾矿库主要分布省份情况

Fig. 1 Main distribution provinces of tin tailings ponds in China

2 锡矿尾矿库重金属污染特征及环境影响分析

2.1 锡矿尾矿库重金属污染特征

1)锡尾矿主要成分

根据收集到的云南、广西、湖南等锡矿采选企业的锡尾矿数据资料，锡尾矿成分以 SiO_2、CaO、Fe 等为主，虽然经过了选矿作用，尾矿中的成矿及共伴生元素含量仍普遍较高，见表 2。

采样收集 6 个典型锡矿采选企业的锡尾矿，分析其重金属组分，结果表明锡尾矿中主要的重金属包括 Sn、As、Pb、Zn、Cd、Cu 等，见表 3。

表 2 锡尾矿的化学成分

Table 2 Chemical compositions of tin tailings

成分	SiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	CaO	MgO	K_2O
含量/%	17.2～24.4	2.6～14.9	20.1～32.5	8.8～21.2	3.33～7.21	0.99～1.99
成分	S	MnO	Na_2O	Sn	Cu	Pb
含量/(mg·kg^{-1}))	2.3～9.5	0.23～1.47	0.18～0.41	134～4062	601～2651	303～7 680
成分	In	Te	Ag	As	Cd	Zn
含量/(mg·kg^{-1})	3.64～14.1	0.12～2.31	11.0～29.5	42.8～5 814	6.8～29.8	1 652～6 801
成分	Sb	Hg	Mo	W	Be	
含量/(mg·kg^{-1})	6.1～104	42.5～444	2.68～33.4	18.4～584	24.3～117	

表 3 锡尾矿中重金属实测结果

Table 3 Analysis results of heavy metals in tin tailings

编号	污染源名称	单位	Pb	As	Hg	Cd	Sn	Cu	Zn
1	A 尾矿	mg/kg	356	2 310	0.448	7.90	50.85	1 470	4 850
2	B 尾矿	mg/kg	597	2 170	0.580	10.30	13.40	601	2 170
3	C 尾矿	mg/kg	237	2 280	1.470	10.40	128.6	1 140	2 280
4	D 尾矿	mg/kg	425	9 990	<0.001	23.40	63.50	23	2 840
5	E 尾矿	mg/kg	143	1 136	1.690	10.72	62.58	未检测	592
6	F 尾矿	mg/kg	21	1 260	2.400	4.64	12.50	未检测	706

2)锡尾矿固废属性

锡尾矿未列入《国家危险废物名录(2021 版)》，因此，需通过对锡尾矿进行鉴别，判断其固废属性。采样收集 4 个典型锡矿采选企业的锡尾矿，按照《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)进行浸出。结果表明，4

个典型锡矿采选企业的锡尾矿浸出液指标均低于《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)的浓度限值，锡尾矿不属于危险废物。进一步按 HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》有关要求进行检测，结果表明企业 A 和企业 C 的 Pb、As、Cu 等浸出浓度均超过《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准；企业 B 和企业 D 各项指标均低于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级排放标准。浸出毒性(水平振荡法)测试结果见表 4。

表 4　锡尾矿浸出毒性(水平振荡法)测试结果

Table 4　Test results of leaching toxicity of tin tailings

	Pb	As	Hg	Cd	Cu	Zn	Ni
企业 A 尾矿	1.22	1.49	0.0013	0.0174	3.24	1.53	0.106
企业 B 尾矿	0.05L	0.1L	0.0002L	0.008	0.01L	0.583	/
企业 C 尾矿	1.852	2.413	0.0076	0.017	3.624	0.836	0.196
企业 D 尾矿	0.05L	0.1L	0.0002L	0.005	001L	1.15	/
GB 8978—1996 一级标准	1.0	0.5	0.05	0.1	0.5	2.0	1.0

综上，锡尾矿不属于危险废物，需进一步按 HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》判定是否属于第Ⅱ一般工业固体废物。

3)锡矿尾矿库重金属污染特征

采样收集 6 个典型锡矿采选企业的尾矿库废水，采用标准指数法评价。结果表明，企业 A 和企业 C 的尾矿库废水中 As 存在超标现象，企业 E 和企业 F 的尾矿库废水中 Zn 存在超标现象，其余监测因子均满足 GB 30770—2014《锡、锑、汞工业污染物排放标准》表 2 排放限值要求，见表 5。

表 5　锡矿尾矿库废水实测结果

Table 5　Measured results of wastewater from tin mine tailings pond

编号	污染源名称	单位	pH	Pb	As	Cd	Sn	Zn
1	企业 A 尾矿库废水	mg/L	7.49	0.006	0.12	<0.004	<0.007	0.21
2	企业 B 尾矿库废水	mg/L	7.88	0.059	0.084	0.014	/	0.139
3	企业 C 尾矿库废水	mg/L	8.0	0.085	0.142	0.014	/	0.034
4	企业 D 尾矿库废水	mg/L	7.88	0.038	0.036	0.016	/	0.046
5	企业 E 尾矿库废水	mg/L	7.41	<0.02	0.023	<0.004	<0.007	6.48
6	企业 F 尾矿库废水	mg/L	7.55	0.022	0.026	<0.004	<0.007	5.99
	标准限值	mg/L	6～9	0.2	0.2	0.005	0.02	1.0

综上，锡矿尾矿库废水中主要的重金属污染因子有 Sn(作为特征污染物考虑)、As、Zn 等。

采样收集 A 尾矿库周边土壤样本，采用标准指数法评价。结果表明，尾矿库周边土壤中 Pb、As、Zn、Cd 超过 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中风险筛选值(6.5＜pH≤7.5)(表 6)，未超过风险管控值。

表 6　尾矿库土壤环境质量现状监测结果

Table 6　Monitoring results of soil environmental quality status of tailings pond

序号	采用位置		单位	Pb	As	Hg[1)]	Zn	Cu	Cd[1)]
1	A 尾矿库北面旱地 1	表层	mg/kg	87.11	44.62	<LOD	393.40	33.85	<LOD
		中层	mg/kg	24.06	14.39	<LOD	131.79	32.36	<LOD
		深层	mg/kg	22.5	12.63	<LOD	126.67	36.64	<LOD
2	A 尾矿库南面旱地	表层	mg/kg	93.22	74.02	<LOD	292.03	31.92	<LOD
		中层	mg/kg	75.42	55.59	<LOD	311.50	40.26	<LOD
		深层	mg/kg	117.9	92.67	<LOD	344.87	42.59	<LOD
3	A 尾矿库北面旱地 2	表层	mg/kg	64.60	46.40	0.014	480.00	42.30	2.32
		中层	mg/kg	75.00	50.40	0.271	547.00	45.20	2.88
		深层	mg/kg	75.40	51.80	0.249	555.00	44.10	3.21
4	A 尾矿库下游旱地	表层	mg/kg	161.00	35.10	0.462	614.00	58.60	3.77
		中层	mg/kg	37.80	176.00	0.202	224.00	36.80	0.55
		深层	mg/kg	38.70	39.20	0.198	218.00	40.30	0.62
GB 15618—2018 风险筛选值			mg/kg	120	30	2.4	250	100	0.30

备注：1)“<LOD”表示低于检出限；Hg 的检出限为 9 mg/kg；Cd 的检出限为 12 mg/kg

2.2 锡矿尾矿库环境影响分析

1)大气环境影响

锡尾矿中微细颗粒含量高且共生关系复杂，品位较低，粒度在 0.074 mm 以下[5]。风向主导重金属污染物在大气中进行水平方向迁移扩散，风力则主导重金属污染物迁移的距离。根据高峰等的研究，当尾矿含水率降低至 21%以下时，风蚀影响就会增大，干滩表面一旦产生龟裂，风蚀影响将会增大，如遇极端风速，扬尘污染将更加严重[6]，存在 Sn、As、Pb、Zn、Cd 等重金属污染影响。

2)水环境影响

赵雪琼等[7]调查研究，个旧锡矿东区部分水质中存在 Cd、Mn、Fe、Zn 超标现象，采样监测浓度分别在 0.063～0.102、0.25～17.84、0.88～14.28、9.86 ～ 15.7 mg/L，超标率分别为 16.67%、38.9%、22.22%、16.67%。污染分布区域主要集中在矿山采选及尾矿库周边。锡矿尾矿库废水如不收集或收集后未经处理通过地面漫流进入地表水体，将会造成地表河流 Sn、As、Zn、Pb 等重金属污染。此外，若锡矿尾矿库在建设时，没有进行详细的地质勘察，对比方案选择库址，且没有进行必要的防渗措施，锡矿尾矿库渗滤液可能会从库底渗漏进入地下水，对地下水环境产生 Sn、As、Zn、Pb 等重金属污染影响，且具有隐蔽性，不易发现。

3)土壤环境影响

冉继伟等[8]研究表明，云南省个旧市大屯镇土壤样本超标率中 Pb、Cd、As 均为 100%，Zn 为 82%，土壤 Cd 的生态危害最强，As、Pb 的生态危害次之。通过分析锡尾矿主要成分数据发现，锡矿尾矿库周边土壤的 pH 值呈弱碱性，且存在 As、Pb、Zn、Cd 等重金属污染风险。

综上，在一定条件下，锡矿尾矿库对环境空气、地表水、地下水和土壤等存在重金属污染风险，具体见表 7。

表 7 锡矿尾矿库环境影响主要途径和污染因子

Table 7 Main environmental impact ways and pollution factors of tin mine tailings pond

分类	主要途径	污染因子
环境空气	风力侵蚀造成扬尘	尾砂扬尘中 Sn、As、Pb、Zn、Cd 等
地表水环境	地面漫流	Sn、As、Zn、Pb 等
地下水环境	废水泄漏及渗漏	Sn、As、Zn、Pb 等
土壤	地面漫流、入渗、大气沉降	As、Pb、Zn、Cd 等

3 结论

1)截止 2019 年底，全国共有 84 座锡矿尾矿库，主要分布在云南、广西、湖南、江西、广东、内蒙古，锡尾矿堆存量约 32 088.03 万 m^3。根据统计分析云南、广西等锡矿采选企业的数据资料，锡尾矿产生系数一般为 0.9～0.99。

2)采用标准指数法评价采样检测数据，结合文献资料进行分析的结果表明，锡矿尾矿库主要重金属污染因子为 As、Cu、Zn、Cd、Pb。

3)锡矿尾矿库可以通过风力侵蚀造成扬尘、地面漫流、废水泄露及渗漏等途径造成大气、地表水、地下水、土壤等环境重金属污染。在大气环境污染防治方面，建议在干滩采用抑尘剂、洒水或堆积坝复垦等措施防治扬尘。在水环境污染防治方面，建议尾矿库渗滤液和库内澄清水经化学沉淀法、离子交换法、吸附法等处理方法处理后，全部泵送至选矿厂循环使用，不外排；在尾矿库周边设置地下水质监控井，定期监测，及时掌握矿区地下水水质动态变化。在环境风险防控方面，建议有条件的尾矿库，可在初期坝下游一定距离处设截渗墙；在尾矿库值班室旁设置应急物资库房；在尾矿输送管线低洼处设置事故应急池。

参考文献

[1] 王莉，陈萍，姚磊. 我国锡矿资源形势及对策分析[J]. 中国矿业，2019，28(11)：44-47.
WANG L，CHEN P，YAO L. Analysis of the trend of tin resources in China and its enlightenments [J]. China Mining Magazine，2019，28(11)：44-47.

[2] 陈丛林，张伟. 全球锡矿资源现状及供需分析[J]. 矿产保护与利用，2021，41(4)：172-175.
CHEN C L，ZHANG W. Study on the current situation and analysis of supply and demand of global tin resource [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources，2021，41(4)：172-175.

[3] 商云涛. 个旧锡矿尾矿库地球化学特征及环境影响分析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2015.

SHANG Y T. Geochemical characteristics and environmental impact analysis of Gejiu tin tailings[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.

[4] 陈文平. 试析锡矿选矿方法[J]. 世界有色金属, 2021(13): 56-57.
CHEN W P. Analysis of tin ore dressing methods[J]. World Nonferrous Metals, 2021(13): 56-57.

[5] 谢禹, 叶国华, 胡艺博, 等. 锡尾矿的资源现状、特点与再选研究进展[J]. 矿冶, 2020, 29(2): 91-95.
XIE Y, YE G H, HU Y B, et al. Resources status, characteristics and reconcentration progress of tin tailings resoures[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(2): 91-95.

[6] 高峰, 杨平, 谢金亮. 尾矿库扬尘污染的研究与防治[J]. 现代矿业, 2015(4): 162-164.
GAO F, YANG P, XIE J L. Study and prevention of dust pollution in tailings pond [J]. Modern Mining, 2015(4): 162-164.

[7] 赵雪琼, 程先峰, 齐武福, 等. 云南个旧锡矿东区水质评价[J]. 地下水, 2016, 38(2): 11-16.
ZHAO X Q, CHENG X F, QI W F, et al. The water quality evaluation of eastern tin ore in Gejiu of Yunnan[J]. Ground Water, 2016, 38(2): 11-16.

[8] 冉继伟, 宁平, 孙鑫, 等. 云南个旧土壤农作物重金属污染特征及潜在风险[J]. 中国环境监测, 2019, 35(5): 62-67.
RAN J W, NING P, SUN X, et al. Heavy metal pollution characteristics and potential risks of soil and grops in Gejiu, Yunnan [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(5): 62-67.

（编辑：王爱平）