

## 云南某典型锡矿选矿厂重金属污染特征

刘月, 董颖博, 林海, 陈月芳, 于明利

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 选择云南某典型锡选矿厂为研究对象, 根据产污节点设置废水、粉尘、固体废弃物的采样点, 通过取样、测试分析研究不同节点的重金属污染特征, 应用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法评价其污染状况, 并对重金属总量进行对比分析。结果表明: 锡选矿行业产生的废水以及粉尘中的重金属元素含量明显高于其参比值, 尾矿中 Zn、As、Cu、Pb 含量较高, 平均含量分别为 2225、1855、870.50、417 mg/kg, 尾矿库周边表土重金属含量明显超过背景值并和尾矿中重金属污染情况基本一致。单因子指数法评价结果显示, 废水中重金属污染程度由高到低依次为 Zn、Pb、As、Hg、Cu(Cd、Cr<sup>6+</sup>、Sn 未检出), 粉尘中重金属污染程度由大到小依次为 As、Cd、Cu、Zn、Pb、Hg、Cr(Sn 缺乏参比值), 尾矿库周边表土重金属污染程度由大到小依次为 Zn、As、Pb、Cu、Cr、Sn、Cd、Hg。内梅罗综合指数法结果表明: 精矿过滤设备和粉矿仓这两个节点的重金属污染能力最高, 而尾矿库周边土壤综合污染指数达到 21.73, 远远超过 5 级评价指标。重金属总量对比分析发现, 研究矿区已经形成多种重金属复合污染的特征, 其中重金属产生绝对量由大到小依次为 Zn、As、Cu、Pb、Sn、Cr、Cd、Hg, 且尾矿重金属产生量所占比例最高, 达到 79.17%。

**关键词:** 锡; 选矿; 重金属; 污染特征

中图分类号: X753

文献标志码: A

## Pollution characteristics of heavy metals in typical tin mineral processing plant of Yunnan, China

LIU Yue, DONG Ying-bo, LIN Hai, CHEN Yue-fang, YU Ming-li

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing100083, China)

**Abstract:** In order to investigate the pollution characteristics of heavy metals in a typical tin mineral processing plant in Yunnan, the water, dust and tailings samples from the discharging nodes were tested by ICP-OES, and single factor pollution index method and Nemerow integrated index method were used to evaluate the status of heavy metal pollution. Finally, the heavy metal contents were analyzed for contrast. The results show that the metal contents in the water and dust samples are higher than reference values. The contents of Zn, As, Cu and Pb in the tailings samples are rich and the average values are 2225, 1855, 870.50 and 417 mg/kg, respectively. The metal contents in soils surrounding the tailings exceed the background levels and are similar to the tailings pollution status. The results of single factor pollution index method shows that the pollution degree of water is in the decreasing order of Zn, Pb, As, Hg, Cu, As, Cd, Cu, and the pollution degrees of dust and soil samples in the decreasing orders of Zn, Pb, Hg, Cr and Zn, As, Pb, Cu, Cr, Sn, Cd, Hg, respectively. The Nemerow integrated index results suggest that the pollution degrees of concentrate filtration and fine ore bin are the highest. The Nemerow integrated index of soil samples is 21.73, which is significantly higher than the standard value of surface water class IV. The comparative analysis shows that the tin mineral processing plant becomes a combined polluted area by various metals, and the amount of heavy metals is in the decreasing order of Zn, As, Cu, Pb, Sn, Cr, Cd and Hg, and the ratio of heavy metals from tailings is 79.17%, which accounts for the most.

**Key words:** tin; mineral processing; heavy metal; pollution characteristics

基金项目: 环保部环保公益性行业科研专项资助项目(201209013)

收稿日期: 2013-07-04; 修订日期: 2013-12-26

通信作者: 董颖博, 讲师, 博士; 电话: 010-62333603; E-mail: ybdong@ustb.edu.cn

有色金属矿山引发的重金属污染日益为公众所关注, 而《重金属污染综合防治“十二五”规划》的高调出台, 再次将有色金属采选行业重金属污染推到风口浪尖, 当然其中也包括锡行业。我国是锡资源大国和生产大国, 矿石类型多样、共伴生组分多、元素组合关系多变<sup>[1]</sup>。矿石的本身特性一方面决定了选矿流程的复杂性, 而另一方面又在某种程度上导致了共伴生重金属元素进入环境中, 通过地下水或食物链迁移进入动植物或人体, 危害人类健康<sup>[2-4]</sup>。

近年来, 国内学者对锡矿区的重金属污染进行了一系列研究, 并集中研究了尾矿、土壤及农作物的重金属污染特征, 研究发现锡矿区周边菜地、农田及尾矿库的土壤均受到重金属的严重威胁, 而土壤的重金属污染直接导致了作物系统的污染, 生长在锡矿影响区内的叶菜、果实及根茎类等农作物食用部位的重金属含量都要比非影响区的高出数倍甚至数百倍, 其中以 As 和 Pb 污染最为突出<sup>[5-6]</sup>。但是, 国内外尚缺乏对锡选矿行业典型工艺全过程不同类型污染物和重金属污染特征的研究。因此, 本文作者选择亚洲最大的锡石-多金属综合回收典型选矿企业为研究对象, 针对不同类型的重金属污染物(废水、粉尘、固体废弃物), 通过现场调研、取样、测试分析, 重点研究了不同产污节点产生污染物中主要重金属(Hg、Cd、As、Pb、Cr)和行业特征重金属(Sn、Zn、Cu)的污染特征并对其进行评估。研究结果有助于了解锡选矿全过程重金属污染的来源、污染程度及其危害, 以期对锡选矿行业重金属污染预防与控制提供参考。

# 1 材料与方法

## 1.1 采样点布设与样品采集

通过对选定的典型锡选矿厂现场调研发现, 该选矿厂的入选原矿样为氧化锡矿和锡铜伴生硫化矿, 含重金属废水产生节点主要为精矿浓缩、尾矿浓缩、精矿过滤及尾矿库; 含重金属粉尘产生节点主要为破碎筛分车间、粉矿仓及精矿运输路线; 固体废弃物产生节点主要为尾矿库。根据重金属的产生节点布设样点, 共布置水样采集点 10 个(W<sub>1</sub>~W<sub>10</sub>), 粉尘采集点 5 个(D<sub>1</sub>~D<sub>5</sub>), 尾矿砂采集点 2 个(S<sub>1</sub>~S<sub>2</sub>), 尾矿库周边表土采集点 2 个(S<sub>3</sub>~S<sub>4</sub>)。样点布设如图 1 所示。采样时, 每个点各采 3 个平行样混合均匀作为一个样品, 连续取 3 d, 每天取 3 次。

水样样品采集后立即装入无污染的聚乙烯塑料瓶并加 HNO<sub>3</sub>, 置于 4 °C 以下密封保存。粉尘和尾矿砂样品均装入无污染的聚乙烯塑料袋密封保存。

## 1.2 样品处理与检测

将采回的粉尘和固体废弃物样品在烘箱中烘干至恒重, 研磨过 0.15 mm 筛, 存储备用。废水、粉尘、固体废弃物样品经王水法消解, 消解所得上清液采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 Hg、Cd、As、Pb、Cr、Sn、Zn、Cu 的含量。

## 1.3 重金属污染评价方法

根据分析测定数据, 分别采用单因子指数法和内

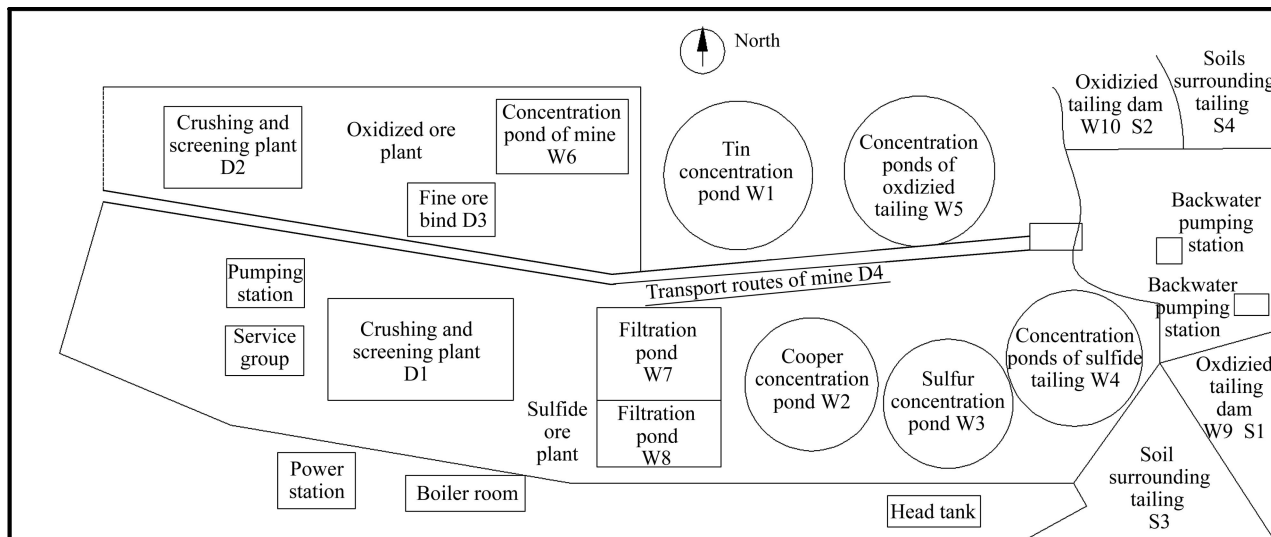


图 1 样品采集点示意图

Fig. 1 Schematic map of sampling points

梅罗综合污染指数法对选矿厂重金属污染状况进行综合评价。

单因子指数法公式为

$$P_{ij} = c_i / S_i$$

式中： $P_{ij}$ 为第*j*个监测点*i*污染物的污染指数； $c_i$ 为第*j*个监测点*i*污染物的实测值； $S_i$ 为第*j*个监测点*i*污染物的评价标准。

内梅罗综合污染指数法公式为

$$P_N = \{[(c_i / S_i)_{\max}^2 + (c_i / S_i)_{\text{ave}}^2] / 2\}^{1/2}$$

式中： $P_N$ 为综合污染指数； $(c_i / S_i)_{\max}^2$ 为重金属元素中污染指数最大值； $(c_i / S_i)_{\text{ave}}^2$ 为重金属元素各单项污染指数的平均值。

单因子污染指数和内梅罗综合污染指数一般分为5个，具体见表1。

表1 重金属污染分级标准

Table 1 Standards for grading of heavy metals pollution

$P_{ij}$	$P_N$	Rank	Pollution levels
<1	<1	1	Non-pollution
1-2	1-2	2	Light pollution
2-3	2-3	3	Medium pollution
3-5	3-5	4	Heavy pollution
$\geq 5$	$\geq 5$	5	Severe pollution

表2 选矿厂废水各产污节点重金属浓度

Table 2 Heavy metals concentrations in water samples from nodes in tin mineral processing plant

Node	Sample No.	Heavy metal concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )							
		Hg	Cd	As	Pb	Cr <sup>6+</sup>	Sn	Zn	Cu
Concentration ponds of mine	W1	ND	ND	0.37	0.19	ND	ND	10.40	0.20
	W2	$2.00 \times 10^{-5}$	ND	0.47	0.20	ND	ND	7.46	0.18
	W3	$9.80 \times 10^{-4}$	ND	0.49	0.11	ND	ND	16.10	0.09
Average		$5.00 \times 10^{-4}$	—	0.44	0.17	—	—	11.32	0.16
Concentration ponds of tailings	W4	$7.90 \times 10^{-4}$	ND	0.05	0.05	ND	ND	5.86	0.07
	W5	$2.00 \times 10^{-4}$	ND	0.02	0.03	ND	ND	7.84	0.02
	Average	$4.95 \times 10^{-4}$	—	0.04	0.04	—	—	6.85	0.05
Filtration ponds of concentration	W6	ND	ND	0.32	4.18	ND	ND	5.83	0.19
	W7	$1.39 \times 10^{-3}$	ND	0.18	ND	ND	ND	10.20	ND
	W8	$2.32 \times 10^{-3}$	ND	0.20	ND	ND	ND	19.50	ND
Average		$1.86 \times 10^{-3}$	—	0.23	1.39	—	—	11.84	0.06
Tailings dam	W9	$5.70 \times 10^{-4}$	ND	0.02	ND	ND	ND	6.48	0.01
	W10	$1.00 \times 10^{-4}$	ND	0.03	0.02	ND	ND	5.99	0.01
	Average	$3.35 \times 10^{-4}$	—	0.03	0.01	—	—	6.24	0.01
Standard value of surface water class IV		0.001	0.005	0.1	0.05	0.05	—	2.0	1.0

ND presents beyond detection time.

## 2 结果与讨论

### 2.1 废水重金属污染特征

根据《环境影响评价技术导则—地面水环境》(HJ/T2.3—1993)的相关规定和文献[7-9]总结,对研究区域进行污染特征分析时,采用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)IV类水质标准作为生态风险评估的参比值。

锡选矿过程产生废水中重金属浓度如表2所列。结果发现,整个选矿流程产生的废水中Zn浓度均超标,其中,精矿过滤设备产生的废水中Zn污染状况最为严重,其浓度均值为11.84 mg/L,浓度最大值 $w_8$ 点污染超标倍数高达9.75。精矿浓缩、精矿过滤设备产生的废水中Pb和As浓度超标严重:Pb浓度在精矿过滤设备节点处出现最大值,浓度为4.18 mg/L,超标83.60倍,精矿浓缩池中Pb平均浓度也达到0.17 mg/L,超过标准限值;As浓度则在精矿浓缩池节点处出现最大值,精矿过滤设备产生的废水中As平均浓度超过标准限值。Hg浓度仅在精矿过滤设备节点超过标准限值,平均浓度达到1.86  $\mu\text{g/L}$ 。另外,Cd、Cr<sup>6+</sup>、Sn均未检出,Cu浓度未超标。

采用1.3节介绍的方法进行评价,废水各节点重金属单因子评价结果见图2(Cd、Cr<sup>6+</sup>、Sn均未检出,

故在图中未列出)。图 2 结果表明, 锡选矿废水中 Zn 污染最严重, 为重污染到严重污染; 各节点 Pb、As 污染程度差异明显, 个别达到重污染甚至严重污染; 各节点大部分无 Hg 污染, 少量为轻污染; 各节点 Cu 污染最小, 几乎无污染。总体来看, 锡选矿废水中重金属的污染程度大小由高到低依次为 Zn、Pb、As、Hg、Cu。

图 3 所示评价结果表明, 精矿浓缩池、尾矿浓缩池、精矿过滤设备、尾矿库废水多金属综合污染指数分别为 4.47、2.53、20.38、2.28。由图 3 可见, 精矿过滤设备产生的废水属于严重污染, 精矿浓缩池产生的废水属重污染, 尾矿浓缩池和尾矿库的废水属中污染。不同节点重金属污染程度由高到低依次为精矿过滤、精矿浓缩、尾矿浓缩、尾矿库。

### 2.2 粉尘重金属污染特征

目前, 国内外对粉尘中重金属污染尚无统一的界定标准, 且各参比值差别较大, 有的学者运用区域地壳中元素的丰度为参比值<sup>[10]</sup>, 也有的根据评价对象选取典型对照点元素含量进行评价<sup>[11]</sup>, 还有的根据《土

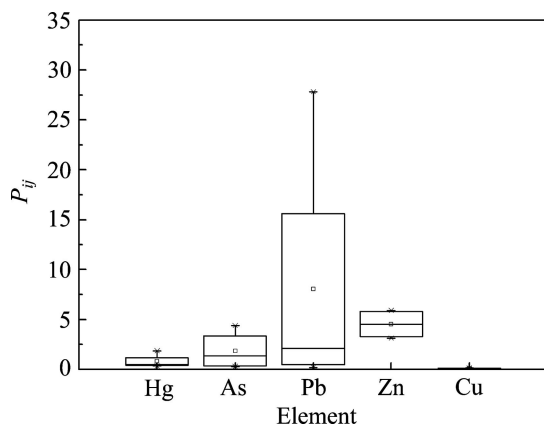


图 2 选矿厂污水单因子指数法评价结果  
Fig. 2 Box-chart of evaluating results by  $P_{ij}$  for water

表 3 选矿厂粉尘各产污节点重金属含量

Table 3 Heavy metals contents in dust samples from nodes in tin mineral processing plant

Node	Sample No.	Heavy metals content/(mg·kg <sup>-1</sup> )							
		Hg	Cd	As	Pb	Cr	Sn	Zn	Cu
Crushing and screening plant	D1	1.53	14.80	2390	761	16.70	101.9	5430	4310
	D2	0.43	22.20	2320	2520	35.80	97.30	4040	1508
	Average	0.98	18.50	2355	1640	26.25	99.60	4735	2909
Fine ore bin	D3	0.81	24.80	6330	1150	19.60	100.1	6600	4910
Transport route of mine	D4	0.40	19.40	6250	1530	26	82.70	4700	2940
Yunnan Province soil background values <sup>[16]</sup>		0.05	0.24	16.04	42.42	76.32	—	93.76	47.20

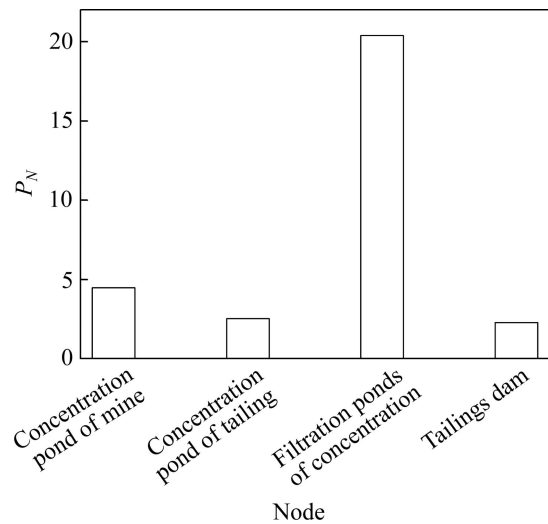


图 3 选矿厂污水综合污染指数法评价结果  
Fig. 3 Evaluating results by  $P_N$  for water

壤环境质量标准》(GB15618—1995)<sup>[12]</sup>或者当地土壤背景含量值<sup>[13-15]</sup>作为参比。由于云南属岩成土区, 土壤和矿石本身 Pb、Zn、As 等元素平均值较高, 因此, 本文作者选取云南省土壤背景含量为标准限值。

锡选矿过程中, 粉尘产生节点重金属含量如表 3 所列。结果显示, 除 Cr、Sn 外, 粉尘中 Hg、Cd、As、Pb、Zn、Cu 污染均比较严重, 且各元素含量范围变化分别在 0.40~1.53、14.80~24.80、2320~6330、761~1640、4040~6600、1508~4910 mg/kg, 其中破碎筛分车间粉尘中 Hg、Pb 含量出现极大值, 而粉矿仓粉尘中 Cd、As、Zn、Cu 含量均最大。

图 4 所示为粉尘中重金属单因子评价结果(Sn 无相关背景值, 因此图中未列出)。由图 4 可知, 锡选矿粉尘中污染程度最高的重金属元素是 As, 其次为 Cd、Cu、Zn、Pb、Hg, 均达到严重污染等级; Cr 污染指数小于 1, 对环境基本无影响。由上可知, 锡选矿粉

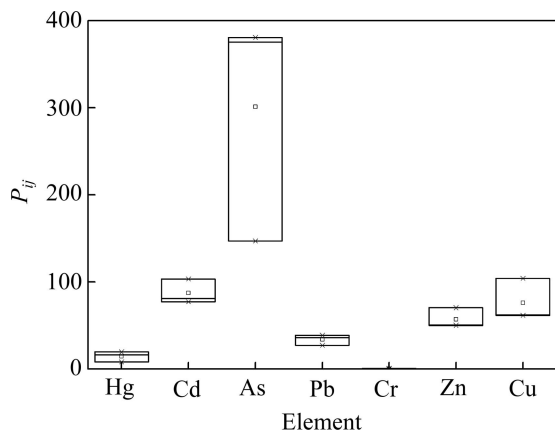


图4 选矿厂粉尘单因子指数法评价结果

Fig. 4 Box-chart of evaluating results by  $P_{ij}$  for dust

尘重金属污染程度大小顺序为 As、Cd、Cu、Zn、Pb、Hg、Cr。

由图 5 所示内梅罗综合污染指数法评价结果可知, 3 个产尘节点污染程度相当严重; 粉矿仓综合污染指数高达 278.17, 精矿运输路线粉尘综合污染指数为 272.72, 破碎筛分车间粉尘污染指数较之前两者较小, 但也达到 111.21, 全部属于严重污染级别。不同节点重金属污染强度由大到小依次为粉矿仓、精矿运输路线、破碎筛分车间。

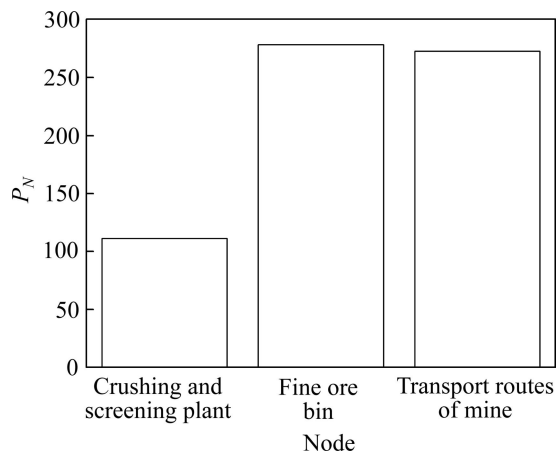


图5 选矿厂粉尘综合污染指数法评价结果

Fig. 5 Evaluating results by  $P_N$  for dust

表4 尾矿中重金属含量

Table 4 Heavy metals contents in tin tailings

Node	Sample No.	Heavy metal content / (mg·kg <sup>-1</sup> )							
		Hg	Cd	As	Pb	Cr	Sn	Zn	Cu
Tailing dam	S1	1.47	10.40	2520	237	14.30	128.6	2280	1140
	S2	0.58	10.30	1190	597	9.60	13.40	2170	601
Average		1.03	10.35	1855	417	11.95	71	2225	870.5

### 2.3 尾矿重金属污染特征

尾矿重金属含量分析结果如表 4 所列。从测定结果可以看出, 尾矿中 Zn、As、Cu、Pb 含量比较高, 平均含量分别为 2225、1855、870.5、417 mg/kg, 其原因可能是研究区入选矿石类型为锡铜伴生硫化矿, Zn、As、Cu、Pb 含量丰富, 品位较高。此外, 尾矿砂中还存在大量的 Sn、Cr、Cd、Hg 等元素。由此表明, 尾砂存在潜在的重金属环境危害。

尾矿中重金属可通过溶解、渗滤等作用迁移转化至周边土壤中, 造成更大区域的污染<sup>[17-19]</sup>。因此, 为了更彻底地了解 and 评估该区域尾砂的污染特征, 本研究对尾矿库周边表土中重金属含量进行了分析, 并以云南省土壤背景值为评价标准, 运用单因子、综合污染指数法进行评价(见表 5 和 6)。由表 5 可知, 尾矿库周边土壤与对照相比, Hg、Cd、As、Pb、Cr、Zn、Cu 含量明显偏高, 平均含量分别达到 1.18、5.40、439、291.5、79.40、2410、218 mg/kg, 含量由大到小顺序为 Zn、As、Pb、Cu、Cr、Sn、Cd、Hg, 这与尾矿中重金属元素含量分布情况基本一致。

从表 6 单因子污染指数来看, As 污染指数出现极大值, 超标倍数为 27.37, Zn、Hg、Cd、Pb 污染指数也都超过 5, 属于严重污染; Cu 污染指数为 4.62, 属于重污染; Cr 污染最小, 属于轻度污染。各重金属元素污染情况从大到小为 As、Zn、Hg、Cd、Pb、Cu、Cr。土壤的综合污染指数为 21.73, 受污染情况已经相当严重。可见, 尾矿砂对周边土壤影响很大, 应该引起重视。

### 2.4 重金属总量对比分析

选厂不同类型污染物中各重金属产生量见图 6。结果表明, 8 种重金属元素产生量从大到小排序依次为 Zn、As、Cu、Pb、Sn、Cr、Cd、Hg。总体来看, 该选矿企业重金属污染程度已经相当严重, 特别是 Zn、As、Cu、Pb 的污染非常显著, 并已经形成多种重金属复合污染。同时可以发现, 不同类型污染物中 8 种重金属产生量有所差异, 但尾矿的污染贡献率均最大。

表 5 尾矿库周边表土中重金属含量

Table 5 Heavy metals contents in soil samples surrounding tin tailings

Node	Sample No.	Heavy metal content /( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )							
		Hg	Cd	As	Pb	Cr	Sn	Zn	Cu
Soils surrounding the tailings	S3	1.63	5.00	514	462	77.60	9.93	2420	217
	S4	0.73	5.80	364	121	81.20	20.59	2400	219
Average		1.18	5.40	439	291.5	79.40	15.26	2410	218
Yunnan Province soil background values <sup>[16]</sup>		0.05	0.24	16.04	42.42	76.32	—	93.76	47.20

表 6 尾矿周边表土中重金属污染指数

Table 6 Evaluating results by Single factor pollution index ( $P_{ij}$ ) and Integrated index ( $P_N$ ) for soils surrounding tin tailings

Node	$P_{ij}$								$P_N$
	Hg	Cd	As	Pb	Cr	Sn	Zn	Cu	
Soils surrounding tailings	23.60	22.50	27.37	6.87	1.04	—	25.70	4.62	21.73

废水、粉尘、尾矿重金属产生比例见图 7。由图 7 可知, 尾矿中产生的重金属量占选矿全流程重金属产生总量的 79.17%, 粉尘和废水产生的重金属量分别占 19.32% 和 1.51%。重金属产生比例表明, 尾矿重金属污染是决定整个锡选矿行业重金属污染程度的关键。

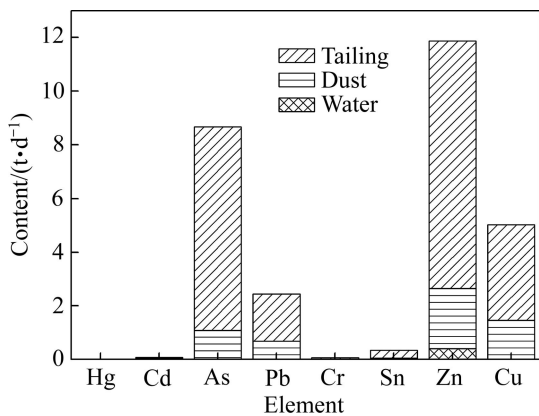


图 6 不同类型污染物重金属含量

Fig. 6 Heavy metals contents in different pollutants

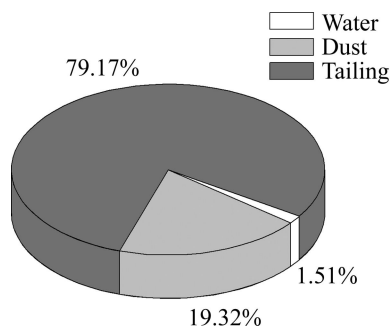


图 7 不同类型污染物重金属含量

Fig. 7 Heavy metals contents in different pollutants

### 3 结论

1) 锡选矿行业产生废水重金属污染严重, Zn、Pb、As、Hg 含量都明显高出地表水第 IV 类水质环境标准。除 Cd、Cr<sup>6+</sup>、Sn 未检出外, 其余重金属的污染程度由高到低依次为 Zn、Pb、As、Hg、Cu, 各废水产生节点重金属污染能力由高到低依次为精矿过滤、精矿浓缩、尾矿浓缩、尾矿库废水。

2) 锡选矿行业产生粉尘, 除 Cr 外, 其余重金属元素含量明显超过背景值, 且重金属污染程度由大到小依次为 As、Cd、Cu、Zn、Pb、Hg、Cr (Sn 缺乏参比值), 各粉尘产生节点重金属污染强度由大到小依次为粉矿仓、精矿运输路线、破碎筛分车间。

3) 锡选矿产生尾砂重金属含量丰富, 并直接加剧了尾矿库及其周边甚至整个矿区土壤的重金属污染。周边表土综合污染指数高达 21.73, 且各重金属元素污染情况由高到低依次为 As、Zn、Hg、Cd、Pb、Cu、Cr。

4) 研究矿区已经形成多种重金属复合污染的特征, 其中主要重金属产生绝对量由大到小依次为 Zn、As、Cu、Pb、Sn、Cr、Cd、Hg, 而尾矿对重金属的贡献量最大, 粉尘次之, 废水最少。

### REFERENCES

[1] 孙 虎, 王建平, 王玉峰, 王雄伟. 我国锡矿开发利用现状及

- 可持续发展建议[J]. 资源与产业, 2012(4): 58-62.
- SUN Hu, WANG Jian-pin, WANG Yu-feng, WANG Xiong-wei. Suggestion of exploitation, utilization and sustainable development of China's tin resources[J]. Resources and Industries, 2012(4): 58-62.
- [2] 谢 华, 刘晓海, 陈同斌, 廖晓勇, 阎秀兰, 王莉霞. 大型古老锡矿区影响土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3503-3507.
- XIE Hua, LIU Xiao-hai, CHEN Tong-bin, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, WANG Li-xia. Concentration and health risk of heavy metals in vegetables and soils in region affected by an ancient tin ore[J]. Environmental Science, 2008, 29(12): 3503-3507.
- [3] NAVARRO M C, PÉREZ-SIRVENT C, MARTÍNEZ-SÁNCHEZ M J, VIDAL J, TOVAR P J, BECH J. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2008, 96(2/3): 183-193.
- [4] OYARZUN R, LILLO J, LÓPEZ-GARCÍA J A, ESBRI J M, CUBAS P, LIANOS W, HIGUERAS P. The Mazarrón Pb-(Ag)-Zn mining district (SE Spain) as a source of heavy metal contamination in a semiarid realm: Geochemical data from mine wastes, soils and stream sediments[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 109(1/3): 113-124.
- [5] 甘凤伟, 方维萱, 王训练, 杨社锋, 郑厚义. 锡矿尾矿库土壤-食用马铃薯和豌豆中重金属污染状况[J]. 生态环境, 2008(5): 1847-1852.
- GAN Feng-wei, FANG Wei-xuan, WANG Xun-lian, YANG She-feng, ZHENG Hou-yi. The heavy metal contamination in soil-potato and pea of tin tailings[J]. Ecology and Environment, 2008(5): 1847-1852.
- [6] 王 京. 云南个旧锡多金属矿区砷污染地球化学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- WANG Jing. Research on geochemical characteristics of As among tin polymetallic deposit in Gejiu, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [7] 梁 宁. 招远金矿区地表水重金属污染特征研究[D]. 济南: 济南大学, 2012.
- LIAN Ning. Study on heavy metal pollution characteristics in surface water of Zhaoyuan Gold Mine Area[D]. Jinan: University of Jinan, 2012.
- [8] 孙清展, 臧淑英. 水体重金属污染评价方法对比研究——以扎龙湿地湖水为例[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2242-2248.
- SUN Qing-zhan, ZANG Shu-ying. Pollution evaluation and forecast of heavy metal in lake of Zhalong Wetland, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2242-2248.
- [9] 江 硕. 福建主要河流及福州城市内河水污染特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- JIANG Shuo. Pollution characteristic of major rivers in Fujian Province and the city inland rivers in Fujian[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [10] 吴国平, 王丰基, 梁志锋, 陈 君, 梁俊明. 顺德大气降尘中重金属污染特征分析[J]. 环境保护, 2009(4): 46-48.
- WU Guo-ping, WANG Feng-ji, LIAN Zhi-feng, CHEN Jun, LIAN Jun-ming. Pollution characteristics of heavy metals in atmospheric dustfall of Shunde, China[J]. Environmental Monitoring, 2009(4): 46-48.
- [11] 张建强, 白石清, 渡边泉. 城市道路粉尘、土壤及行道树的重金属污染特征[J]. 西南交通大学学报, 2006(1): 68-73.
- ZHANG Jian-qiang, BAI Shi-qing, DU Bian-quan. Heavy metal pollution of dust, topsoil and roadside tree near by main city roadways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2006(1): 68-73.
- [12] 张骁勇. 尤溪铅锌矿区重金属的迁移和分布研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- ZHANG Xiao-yong. Distribution and transport of heavy metal in Youxi lead-zinc mine[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
- [13] 焦 荔, 沈建东, 姚 琳, 杨 乐. 杭州市大气降尘重金属污染特征及来源研究[J]. 环境污染与防治, 2013(1): 73-76, 80.
- JIAO Li, SHEN Jian-dong, YAO Lin, YANG Le. Pollution characteristics and sources of heavy metals in atmospheric dustfall of Hangzhou[J]. Environmental Pollution and Control, 2013(1): 73-76, 80.
- [14] 赵云霞. 豫西地区环境及食物链中重金属含量的背景值分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- ZHAO Yun-xia. The background values of heavy metals in the environment and food chain in western Henan province[D]. Luoyang: University of Science and Technology Henan, 2012.
- [15] 林 啸, 刘 敏, 侯立军, 许世远, 常 静. 上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J]. 中国环境科学, 2007(5): 613-618.
- LIN Xiao, LIU Min, HOU Li-jun, XU Shi-yuan, CHANG Jing. Soil and surface dust heavy metal pollution state and assessment in Shanghai City[J]. China Environmental Science, 2007(5): 613-618.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 87-88.
- Environmental Monitoring Station. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 87-88.
- [17] WAHSHAA M, BINIA C, ARGESSE E, MINELLO F, FONTANA S, WAHSHEH H. Heavy metals accumulation in willows growing on Spolic Technosols from the abandoned Imperina Valley mine in Italy[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123: 19-24.
- [18] JI K, KIM J, LEE M, PARK S, KWON H J, et al. Assessment of exposure to heavy metals and health risks among residents near abandoned metal mines in Goseong, Korea[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 322-328.
- [19] ZHUANG Ping, LI Zhi-an, ZOU Bi, XIA Han-ping, WANG Gang. Heavy metal contamination in soil and soybean near the Dabaoshan Mine, South China[J]. Pedosphere, 2013, 23(3): 298-304.