

# 废弃矿区重金属污染负荷核算方法及其应用研究

——以广东某废弃铅锌矿区为例

彭香琴<sup>1</sup>, 沈于凯<sup>2</sup>, 蔡彬<sup>1</sup>, 王炜<sup>1</sup>, 杜建伟<sup>1</sup>, 陈岩赞<sup>1</sup>

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广州 510655;  
2. 广东工业大学, 广州 510006)

**摘要:** 为定量评估废弃矿山中非点源重金属污染负荷, 以 Johnes 输出系数模型为基础, 构建了废弃矿区固体废物重金属负荷核算模型。以广东某废弃铅锌矿区作为模型验证区, 应用模型估算了该矿区的非点源锌、铅、镉、砷、铜、汞、镍等重金属污染负荷。结果表明: 某废弃铅锌矿区固体废物在淋溶条件下产生的重金属负荷约为 1.81 g/a, 其中铅的负荷最高, 占 45.95%。但在考虑污染物全部释放的情形下, 铅的平均污染负荷达到了 465.78 t。该模型可快速推算废弃矿区重金属污染负荷, 相比于传统的 Johnes 输出系数法更简便、快速、适用性更高。与其他矿区相比, 该矿区重金属整体污染负荷不高, 但重金属污染元素种类较多, 在极端条件下, 该区域铅镉锌等重金属仍有较高的污染风险, 建议按“一堆一策”治理方案深入开展废弃矿区固体废物污染源整治。

**关键词:** 污染负荷核算; 废弃矿山; 重金属; 输出系数法

中图分类号: X75

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202308007

## Research on the calculation method and application of heavy metal pollution load in abandoned mining areas

——Based on an abandoned lead-zinc mining area in Guangdong

PENG Xiangqin<sup>1</sup>, SHEN Yukai<sup>2</sup>, CAI Bin<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, DU Jianwei<sup>1</sup>, CHEN Yanzhi<sup>1</sup>

(1. South China Institute of Environmental Sciences, Guangzhou 510655, China;  
2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** A heavy metal load assessment model for solid waste in abandoned mines was developed to quantitatively evaluate non-point source heavy metal pollution. Using Johnes' output coefficient model, this study estimated heavy metal pollution loads in an abandoned lead-zinc mine in Guangdong. The results showed that under leaching conditions, the heavy metal load was approximately 1.81g/a, with lead comprising the highest proportion at 45.95%. Considering the total pollutant release, the average lead contamination load reached 465.78 tonnes. Compared to the conventional Johnes output coefficient method, it offered a faster and simpler approach to estimate the heavy metal pollution in abandoned mining areas. It proved to be a valuable tool for calculating non-point source heavy metal pollution loads in such areas. Although the overall heavy metal pollution load in the mining area was relatively low, the presence of various heavy metal elements posed a notable risk, particularly for lead, cadmium, and zinc under extreme conditions. Comprehensive solid waste pollution remediation following a tailored "one mining area, one policy" approach was necessary.

**Keywords:** pollution load calculation; abandoned mining areas; heavy metals; output coefficient method

CLC number: X75

矿产资源的开发与利用后往往带来矿区污染问题。开采和冶炼分选产生的大量不规范堆存的

固体废物, 在雨水冲刷淋滤后, 极易以非点源的形式渗透进周边水体与土壤, 从而带来地方或区域性

收稿日期: 2023-06-04

录用日期: 2023-07-30

基金项目: 典型硫铁矿硫化还原菌对硫酸盐矿物的微观作用机制研究 (PM-zx703-202305-269)

作者简介: 彭香琴(1979—), 女, 工程师。研究方向: 土壤、固废环境调查与评估、治理修复。E-mail: pengxiangqin@scies.org

通信作者: 陈岩赞(1986—), 男, 高级工程师。研究方向: 废弃矿山和土壤污染防治技术。E-mail: chenyanzhi@scies.org

引用格式: 彭香琴, 沈于凯, 蔡彬, 等. 废弃矿区重金属污染负荷核算方法及其应用研究——以广东某废弃铅锌矿区为例 [J]. 环境保护科学, 2023, 49(5): 18-23.

重金属污染。相关研究表明,矿区周边地区,不管土壤或水体,重金属负荷明显处于较高水平,水土样品污染与研究区域的采矿活动直接相关<sup>[1-2]</sup>。一般来说,废弃矿区重金属污染属于非点源污染,具有分散、随机、成因复杂、周期长、监管难等特点<sup>[3-4]</sup>。目前国内外对矿区重金属非点源污染负荷评估仍多采用估算方法,通过对不同非点源来源、降雨径流和河流断面水文水质监测等资料数据对非点源污染负荷研究。研究方法可分为:(1)简单的经验统计模型:国内外非点源污染负荷评估研究的探索期,这一时期的研究基础主要以实验数据为主,通过分析污染负荷与流域土地利用或径流量间的经验关系建立经验统计模型,最后通过经验系数反映非点源污染负荷模拟结果。其中以改进输出系数法为代表,其他的还有负荷当量法<sup>[5]</sup>、单位面积复合法<sup>[6-9]</sup>、水文比拟法<sup>[10]</sup>,此外还有 ARM、SWMM 等模型;(2)机理模型及发展:20世纪70年代至90年代,单纯的经验模型无法满足复杂环境的污染物机理分析,其主要是对非点源污染的迁移转化过程、水文侵蚀过程进行综合模拟的一种模型。该类模型对数据要求较高、需要大量的水文资料、参数,但模型模拟精度得到提高,例如 SWAT<sup>[11-12]</sup>、HSPF、AnnAGNPS、BASIN 等模型。

在矿山治理中,如何快速识别估算污染关键源区以及负荷,并提出相应的控制措施对解决实际污染问题显然更具管理及经济意义<sup>[10]</sup>。截至目前,国家或行业内并未出台专门针对废弃矿山固体废物污染负荷核算方法。输出系数模型考虑了土地利用类型和非点源污染产生之间的关系,通过土地输出系数和土地利用类型等有关资料构建研究流域内土地利用类型与非点源污染负荷的关系。在研究英国两条河流的氮、磷面源污染时,Johnes 模型对输出系数法其进行了改进,在模型中依据营养物的来源,对土地类型的进行分类,计算各类土地的输出系数然后乘以土地面积,得出某类土地的负荷。这种方法相较其他模型,具有物理意义明确、所需参数少、尺度不敏感、可操作性强等优势,适合我国的监测资料少,研究基础薄弱的情况。我国矿区的重金属监测资料较少,难以满足机理模型和功能模型的对数据的要求,只能采用经验模型对流域的非点源污染负荷年产生量进行大致的估算,因此结构简单的经验模型如 Johnes 模型在国内得到

广泛应用。茆峰等<sup>[13]</sup>以 Johnes 输出系数法为基础,在模型中引入了溶出率因子,以构建适应浑河流域矿山的重金属非点源污染负荷核算模型,并用该模型对浑河流域重金属面源负荷进行了估算。吴云龙等<sup>[14]</sup>研究通过改进经典的 Johnes 输出系数模型,分别计算湘潭锰矿区非点源 Pb 污染负荷,结果表明改进的输出系数模型提高了模拟精度。刘洋等<sup>[15]</sup>亦在 Johnes 输出系数法的基础上估算浙江省嵊州市非点源污染负荷,基于改进的输出系数模型在不同尺度上分析总氮(TN)、总磷(TP)的空间分布特征。

本研究通过对经典的 Johnes 输出系数模型进行改进,构建了改进的输出系数模型。以广东某废弃矿区来验证模型的适用性,利用改进的输出系数模型估算该矿区非点源重金属污染负荷,并对比分析了不同地区污染负荷核算结果。本研究可为废弃矿区固体废物重金属污染负荷的计算提供参考方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

文章以广东粤北某废弃铅锌矿区(QY 矿区)作为模型验证区,该铅锌矿于20世纪60年代末至80年代初期为民窑地下开采矿山,开采矿种主要为铅矿石和锌矿石。由于开采历史久远,加之开采剥离过程工艺落后、管理不规范,导致大量历史遗留固体废物随意堆积于矿山及周边,形成山谷填埋、边坡等堆放形态。QY 矿区固体废物共计3处,测绘后现场固体废物(主要为废石渣)堆存量为33 210.7 m<sup>3</sup>,见表1。

表1 废弃矿区固体废物堆存情况  
Table 1 Solid waste accumulation in abandoned mining areas

固废编号	堆存量/m <sup>3</sup>	占地面积/m <sup>2</sup>	最大坡度	堆存地形特征
NY-SF1	16 153.3	5 142.3	37°	边坡堆放
NY-SF2	2 837.1	4 555.5	29°	边坡堆放
NY-SF3	14 220.3	3 325.7	23°	山谷填埋

### 1.2 模型建立

1.2.1 输出系数模型 该模型应用的关键是确定输出系数的种类及取值。在矿山地区,重金属污染来源包括开采、搬运、堆积过程中大气扩散、散落、

淋溶等方式造成的非点源污染。为估算废弃矿区固体废物污染负荷,本研究根据实际情况将 Johnes 输出系数模型进行了改进<sup>[14]</sup>,见式(1):

$$L = \sum_{i=1}^n E_i(A_i \times I_i) + P \quad (1)$$

式中:  $L$  为污染物流失量,  $E_i$  为第  $i$  种污染源输出系数,  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型面积、第  $i$  种牲畜数量、人口数量;  $I_i$  为第  $i$  种污染源污染物输入量,  $P$  为降水输入的污染物流量。

1.2.2 模型改进 茆峰等<sup>[13]</sup>在考虑重金属来源后除去重金属输入量  $P$  以及加入重金属溶出率  $\alpha$  后,将 Johnes 模型改进,见式(2):

$$L = \sum_{i=1}^n 10^{-2} \alpha \times S \times C_i \times A_i \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为水中某类重金属溶出率,  $S$  为土壤侵蚀模数,  $t/km^2 \cdot a$ ,  $A_i$  为第  $i$  类土地利用类型面积,  $km^2$ ;  $C_i$  为土壤第  $i$  种重金属的质量分数,  $g/kg$ 。

式(2)提高了 Johnes 模型估算污染负荷的置信度,然而在实际情况中,该式土壤侵蚀模数数据要求较高,且重金属溶出率来自文献,与实际情况差异较大。有鉴于此,本研究结合质量-体积浓度计算公式,拟通过矿区溶淋水产生量和实测矿区样品浸水浓度推算出矿区重金属污染负荷。综上,依据实际情况,可将输出系数模型改为式(3):

$$L_j = \sum_{j=1}^n Q \times C_j \quad (3)$$

式中:  $L_j$  为第  $j$  种重金属负荷,  $mg/a$ ;  $Q$  为溶淋水产生量,  $L/a$ ;  $C_j$  为第  $j$  种重金属浸水浓度,  $mg/L$ 。

式(3)中  $Q$  参照《生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行): HJ 564—2010》采用经验公式法(浸出系数法)来计算废弃矿区溶淋水产生量,见式(4):

$$Q = \frac{I \times (K \times A_j)}{1000} \times 365 \quad (4)$$

式中:  $Q$  为溶淋水产生量,  $m^3/a$ ;  $I$  为多年平均日降雨量,  $mm/d$ ;  $A_j$  为单元汇水面积,  $m^2$ ;  $K$  为作业单元渗出系数,一般宜取 0.5 ~ 0.8, 该式取 0.5。

由式(1)和(2)可得式(5):

$$L_j = \sum_{j=1}^n 0.365 \times I \times K \times C_j \times A_j \quad (5)$$

式(5)中 0.365、 $I$ 、 $K$  和  $C_j$  相当于式(2)中的  $10^{-2}S$  和  $\alpha$ 、 $C_i$ 。此外,在实际探测中,为了更快速推算废弃矿区重金属污染负荷情况,估算最不利情况下(全组分溶出)重金属负荷,往往通过全扫描分析矿区重金属组成和质量浓度,再乘以堆渣量,通过质量与浓度的关系可以推算重金属污染负荷,见式(6):

$$L_i = 10^{-3} A_i \times M \quad (6)$$

式中:  $L_i$  为第  $i$  种重金属负荷,  $kg$ ;  $A_i$  为第  $i$  种重金属质量浓度,  $mg/kg$ ;  $M$  为堆渣量,  $t$ 。

## 2 结果与讨论

根据 2.2 节改进输出系数模型和最不利情况下(全组分溶出)重金属负荷,利用已获取的全组分、浸出浓度结果并结合废弃矿区固体废物堆存量、汇水面积等,计算各自污染负荷。

### 2.1 矿区淋溶水估算

依据该区域多年平均日降雨(6 mm/d),作业单元取渗出系数 0.5,结合公式(4),可计算出该区域淋溶水产生量,见表 2。

表 2 矿区汇水面积及淋溶水产生量  
Table 2 Catchment area and leached water production in mining area

固废编号	汇水面 积/ $m^2$	平均日降雨 量/ $mm \cdot d^{-1}$	渗出 系数	淋溶水产生 量/ $m^3 \cdot d^{-1}$	淋溶水产生 量/ $m^3 \cdot a^{-1}$
NY-SF1	5142.3	6	0.5	15.43	5630.82
NY-SF2	4555.5	6	0.5	13.67	4988.27
NY-SF3	3325.7	6	0.5	9.98	3641.64
合计	13023.5	—	—	39.07	14260.73

注:参照《生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行): HJ 564—2010》渗滤液产生量的计算经验公式,作业单元渗出系数一般取 0.2~0.8。当降雨量=蒸发量时宜取 0.5,当降雨量<蒸发量时取值<0.5,反之取值则>0.5。查阅该区域多年历史气象数据,一般 2—6 月降水量>蒸发量,7—1 月蒸发量>降水量,因此本案例取 0.5 计算。

### 2.2 重金属浸出测试

对该废弃矿区 3 处堆存点的固体废物表层和深层分别采集 11 个样品,其中 NY-SF1 采集 5 个样品、NY-SF2 采集 3 个样品、NY-SF3 采集 3 个样品,参照《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法 HJ 557—2010》浸出浓度结果进行分析,见表 3。

表3 废弃矿区重金属水平浸出浓度  
Table 3 Level leaching concentration of heavy metals in abandoned mining area

项目	检测值/mg·L <sup>-1</sup>		
	最大值	最小值	平均值
锌	0.12000	0.01000	0.0410
铅	0.09000	0.04000	0.0583
镉	0.04000	0.01000	0.0225
砷	0.01890	ND	0.0037
铜	ND	ND	ND
汞	0.00546	0.00037	0.0014
镍	ND	ND	ND

注：ND表示该物质低于方法检出限。

### 2.3 固体废物全组分测试

分别对该废弃矿区3处堆存点的固体废物采集表层及深层样品,其中NY-SF1表层及深层随机采集5个样品分别混合为1个样品,NY-SF2和NY-SF3表层及深层随机各采集3个样品混合分别为1个样品,采用ICP-MS进行全扫描半定量检测。参照GB36600—2018重金属含量较高的前7项指标结果进行分析,见表4。

表4 废弃矿区重金属全组分扫描结果  
Table 4 Scanning results of all components of heavy metals in abandoned mining area

检测指标	检测浓度/mg·kg <sup>-1</sup>		
	最大值	最小值	平均值
锌	30000.0	4200.00	15075.000
铅	25500.0	2100.00	9350.000
镉	185.0	53.10	100.850
砷	30.3	16.30	20.650
铜	27.1	11.00	17.350
汞	18.4	1.09	8.955
镍	13.3	4.14	7.375

### 2.4 重金属负荷分析

2.4.1 降雨淋溶情形污染负荷(浸出分析) 经过实地踏勘,该废弃矿区固体废物堆存量为33210.7 m<sup>3</sup>,占地面积(即作业单元汇水面积)为13023.5 m<sup>2</sup>,依据矿区淋溶水计算、固体废物浸出浓度并结合输出公式(5)核算,降雨淋溶情形下各重金属污染负荷结果,见表5和表6。

表5 降雨淋溶情形下各重金属浸出污染负荷  
Table 5 Leaching pollution loads of heavy metals under rainfall leaching conditions

指标	污染负荷/g·a <sup>-1</sup>		
	最大值	最小值	平均值
锌	1.711	0.143	0.585
铅	1.283	0.570	0.832
镉	0.570	0.143	0.321
砷	0.270	0.000	0.053
铜	—	—	—
汞	0.078	0.005	0.020
镍	—	—	—

注：“—”表示无。

表6 浸淋溶情形下各重金属负荷百分比  
Table 6 Percentage of heavy metal load under leaching condition

重金属	负荷百分比/%
铅	45.85
锌	32.33
镉	17.72
砷	2.90
汞	1.10
铜	<1.00
镍	<1.00

表5和表6可知,废弃矿区淋溶条件下产生的重金属负荷约为1.81 g/a,其中铅,锌的负荷最高,分别占45.85%,32.33%。

2.4.2 最不利情形污染负荷(全组分分析) 该废弃矿区固体废物堆存量为33210.7 m<sup>3</sup>(按堆积密度按1.5 t/m<sup>3</sup>转换),共计49816.05 t。考虑在最不利排出情况下发生污染物全组分释放,依据固体废物全组分扫描数据并结合输出公式(6)核算,推算各重金属污染负荷,见表7。

表7可知,在最不利情形下,固体废物中重金属污染负荷量较大,其中锌、铅的平均污染负荷达750.98和465.78 t,而污染负荷最小的汞平均值达0.45 t,如不妥善处理这些重金属进入周边地表水或土壤中,将对周边生态环境造成较大影响。

表 7 最不利用情形下各重金属污染负荷  
Table 7 Pollution loads of heavy metals under the least utilizable conditions

检测指标	最不利情况污染负荷/kg		
	最大值	最小值	平均值
锌	1494481.50	209227.41	750976.95
铅	1270309.28	104613.71	465780.07
镉	9215.97	2645.23	5023.95
砷	1509.43	812.00	1028.70
铜	1350.01	547.98	864.31
汞	916.62	54.30	446.10
镍	662.55	206.24	367.39

2.4.3 同类型污染物负荷对比分析 本研究将污染负荷计算结果与湖南某历史遗留矿区、湘江长株潭地区、浑河流域、惠阳城区、北江上游等结果进行了比对。相比其他矿区,本研究矿区重金属负荷

相对较低。废弃矿区重金属废渣堆存的污染方式主要是废渣堆渗滤液下渗<sup>[16]</sup>。吴云龙<sup>[14]</sup>以湘江流域湘潭锰矿区作为模型的验证区,发现城市用地和工矿用地是重金属非点源污染负荷输出的关键区。另一项研究发现,矿山地区重金属污染主要来自运输污染区和自然土地<sup>[13]</sup>。李耀初等<sup>[17]</sup>发现惠阳城区一次典型降雨径流中重金属负荷(Pb、Zn、Cu 和 Cr)高达 219.41 kg,已接近甚至超出了当地重点污染点源的重金属污染负荷。此外,李彤等<sup>[18]</sup>研究北江上游高桥断面在极端暴雨条件下的溶解态重金属(Pb、Zn、Cu 和 Cd)通量及非点源负荷,发现在淋溶条件下,会对重金属的溶出或者富集产生显著的影响。综上可知,不合理不规范地开采,废弃矿渣的随意堆存会导致矿区周边环境承受较大的重金属污染压力,见表 8。在降雨等极端情况下,矿区废渣重金属会通过淋溶下渗,地表径流等方式造成负荷输出转移,严重影响周边环境。

表 8 不同区域重金属污染负荷表  
Table 8 Heavy metal pollution loads in different regions

研究区域	锌	铅	镉	砷	铜	汞	镍	单位	文献
本研究(水浸试验)	0.585	0.832	0.321	0.053	-	0.02	-	g·a <sup>-1</sup>	-
湖南某历史遗留矿区*	2.080	4.520	45.240	36.19	5.79	0.65	1.50	g·a <sup>-1</sup>	[16]
湘江长株潭地区	-	16439	1118.560	2616.59	-	-	-	kg·a <sup>-1</sup>	[14]
本研究(最不利情况下)	750976	465780	5023.000	1028	864	446	367	kg	-
浑河流域	8180	3050	-	-	3990	-	-	kg	[13]
惠阳城区	88.5	68.77	-	-	41.77	-	-	kg	[17]
北江上游高桥断面	91400	24100	3400.000	-	14600	-	-	kg	[18]

注: \*表示该结果为基于文献数据的二次核算, -表示无。

有鉴于此,对于该矿区固体废物应加强管控,建议按“一堆一策”治理方案深入开展废弃矿区固体废物污染源整治,采取措施方向包括但不限于:规范堆放场所,建立“三防”措施;固废资源化综合利用(有价元素提取、水泥窑协同处置、封堵回填等);原址原位/异位风险阻隔管控;清挖转运填埋场处理处置等;生物修复,利用栽种植物及其根际微生物体系的协同作用来清除,固定,转化土壤中的重金属物质。

### 3 结论

本研究通过对经典的 Johnes 输出系数模型进

行改进,构建了改进的输出系数模型,以广东某废弃矿区来验证模型的适用性,利用改进的输出系数模型估算广东某矿区非点源重金属污染负荷,并对不同地区估算结果进行分析。此外,还通过全扫描分析矿区重金属组成和质量浓度,堆渣量,利用质量与浓度的关系估算最不利情况下重金属污染负荷,并得出以下结论。

(1) 通过结合矿区溶淋水产生量以及水浸浓度,可快速推算废弃矿区重金属污染负荷,相比于传统的 Johnes 输出系数法更简便、快速、适用性更高。在淋溶下产生的重金属负荷整体较低,其中铅的负荷最高,其次是锌,分别占 45.95% 和 32.33%。

(2)通过全扫描分析发现,在最不利情形下,废弃矿区重金属污染负荷量较大,其中锌、铅平均污染负荷达到了750.98和465.78 t,而污染负荷最小的汞平均值也达到了0.45 t。

(3)与其他矿区和流域污染情况对比可知,该矿区重金属整体污染负荷不高,但重金属污染元素种类较多,在极端条件下,该区域铅镉锌等重金属拥有较高的污染风险,建议按“一堆一策”治理方案深入开展废弃矿区固体废物污染源整治。

## 参考文献

- [1] 张健琳,瞿明凯,陈剑,等.中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析[J].环境科学,2021,42(9):4414-4421.
- [2] KARKI D, VERMA A. Pollution assessment of heavy metals in groundwater and agricultural soil in tailing of Zawar mines, Udaipur, Rajasthan[J]. International Journal of Environmental Quality, 2020, 38: 37-47.
- [3] 樊在义,宋兵魁,杨勇,等.非点源污染负荷估算方法探讨[J].环境科学导刊,2011,30(3):1-6.
- [4] 李俊玲,何璟嫣,苏保林,等.山区丘陵地区农业非点源污染负荷估算方法比较研究[J].水电能源科学,2022,40(11):45-49.
- [5] 王寿兵,张浩,王祥荣.区域环境负荷计量的当量因子法——以广东省佛山市富营养化污染负荷为例[J].中国环境科学,2004(2):110-114.
- [6] HAITH D A. Land Use and Water Quality in New York Rivers[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1976, 102(1): 1-15.
- [7] HAITH D A, TUBBS L J. Watershed loading functions for nonpoint sources[J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1981, 107(1): 121-137.
- [8] BREZONIK P L, STADELMANN T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. Water Research, 2002, 36(7): 1743-1757.
- [9] WHIPPLE W, HUNTER J V. Nonpoint sources and planning for water pollution Control[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1977, 49(1): 15-23.
- [10] 朱玉晨,李剑锋,郝奇琛,等.福建晋江流域锰负荷分布及源区识别[J].华东地质,2022,43(1):113-123.
- [11] 任伯帜,刘科家,马宏璞等.基于SWAT模型的金属矿区雨水径流中锰污染负荷分析[J].环境污染与防治,2014,36(11):50-54.
- [12] 刘科家.改进SWAT模型在镉矿区土水界面流镉污染负荷模拟中的应用研究[D].湘潭:湖南科技大学,2015.
- [13] 菲峰,苏馈足,康加廷,等.基于改进输出系数法的矿区重金属面源污染负荷核算模型[J].环境科学研究,2012,25(2):207-211.
- [14] 吴云龙.基于改进输出系数模型的铅镉砷非点源污染负荷研究[D].湘潭:湘潭大学,2017.
- [15] 刘洋,李丽娟,李九一.面向区域管理的非点源污染负荷估算——以浙江省嵊州市为例[J].环境科学学报,2021,41(10):3938-3946.
- [16] 吴旻.某矿区历史遗留重金属废渣场地污染调查分析及治理建议[J].世界有色金属,2022(6):223-225.
- [17] 李耀初,吴淮,罗伟华.惠阳城区降雨径流重金属污染特征研究:II.重金属污染负荷估算[J].环境科学研究,2008(3):57-60.
- [18] 李彤,易雯,付青,等.极端暴雨条件下北江重金属非点源污染负荷估算[J].环境科学研究,2014,27(9):990-997.