

粤北地区森林土壤重金属含量特征及生态风险评价 ——以曲江区为例*

叶彩红^{1,2} 邹祖有² 许窈孜^{1,2} 张中瑞²
朱航勇² 张耕² 何茜¹ 丁晓纲²

(1. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要 以曲江区森林土壤为研究对象, 分析0~20 cm 土层土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 的含量, 并采用单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法对土壤重金属含量进行污染评价和生态风险评价。结果表明, 8种重金属元素的单因子指数均小于1, 污染等级为无污染; 内梅罗综合指数小于0.7, 综合污染等级为安全状态; 单一重金属潜在生态风险指数表现为 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 元素为轻度风险, Cd 元素为中度风险, Hg 元素为强度风险; 综合潜在生态风险等级为中等生态风险。总的来说, 研究区存在一定程度的潜在生态风险, 应加强重金属污染源的控制, 减少重金属进入土壤, 降低重金属污染风险。

关键词 森林土壤; 重金属; 单因子指数法; 内梅罗综合指数法; 潜在生态风险指数法

中图分类号: S714 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2022) 03-0039-07

Heavy Metal Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Forest Soil in Northern Guangdong Province: A Case Study of Qujiang District

YE Caihong^{1,2} ZOU Zuyou² XU Tiaozi^{1,2} ZHANG Zhongrui²
ZHU Hangyong² ZHANG Geng² HE Qian¹ DING Xiaogang²

(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract To understand the characteristics of heavy metal content and pollution of forest soil in Qujiang district, and provide a theoretical basis for its ecological risk assessment. In this study, the contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg in the 0-20 cm soil layer of forest soil in Qujiang district were analyzed, and the pollution and ecological risk assessment of heavy metal content in soil were carried out by single factor index method, Nemerow comprehensive index method and potential ecological risk index method. The results showed that the single factor index of 8 heavy metals was all less than 1, and the pollution grade was no pollution. Nemerow composite index is less than 0.7, and the comprehensive pollution level is safe. The potential ecological risk index

* 基金项目: 广东省生态林业建设项目“林地土壤调查”, 广东省林业科技计划项目(2019-07), 广东省省级生态公益林效益补偿资金省统筹经费项目。

第一作者: 叶彩红(1996—), 女, 在读硕士, 研究方向为森林培育, E-mail: 1300716484@qq.com。

通信作者: 丁晓纲(1978—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事森林培育、林业经济研究, E-mail: 27267152@qq.com。

of single heavy metals showed that Cr, Ni, Cu, Zn, As and Pb were mild risk, Cd was moderate risk, and Hg was intense risk. The comprehensive potential ecological risk level is medium ecological risk. In general, there is a certain degree of potential ecological risk in the study area, so it is necessary to strengthen the control of heavy metal pollution sources, reduce the entry of heavy metals into the soil and reduce the risk of heavy metal pollution.

Key words forest soil; Heavy metals; Single factor index method; Nemerow composite index method; Potential ecological risk index method

土壤是人类生存和发展的必要资源之一,也是生态系统的重要组成部分。重金属具有普遍存在、微量毒性、生物富集和持久性等特点^[1],进入土壤后容易造成土壤生态环境恶化、土壤质量下降等危害^[2],土壤重金属污染因此也逐渐成为威胁土壤生态环境的重要因素^[3-4]。森林作为生态系统的重要组成部分,重金属污染森林土壤已成为全球关注的热点问题^[5-6]。国内外越来越多的学者致力于森林土壤重金属的研究,研究内容也主要集中在土壤重金属空间分布特征^[7]、污染评价^[8]、影响因子^[9]、污染修复^[10]以及污染来源^[11]等方面。

重金属的污染会直接影响森林的土壤生态环境,因此对森林土壤中重金属污染程度和生态风险评价等研究是十分重要的。陈锦等^[12]运用单因子法和综合污染指数法对官庄金矿地区周围土壤重金属污染情况进行评价研究,发现越靠近尾矿库重金属污染越严重,且污染严重程度依次为 As、Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Ni 和 Hg。樊志颖等^[13]对色季拉山森林土壤重金属污染程度进行评价研究,通过单因子指数法和内梅罗综合指数法评在 0~20 cm 土层中重金属含量,结果表明 Ni、Cd、Hg 3 种重金属元素均已达到污染程度。叶俊等^[14]利用 4 种经典的重金属污染评价方法对中国 13 个具有代表性的林地土壤重金属 (Pb、Cd、Cu、Zn) 进行评价。Mohammed 等^[15]以马来西亚吉隆坡自然公园土壤重金属为研究对象,利用 3 种重金属生态风险评价方法评估研究区土壤,发现吉隆坡雪兰莪河口重金属的风险较低,经研究分析发现不同的红树林对重金属的分配和吸收能力不同。

韶关市是我国重要的矿产基地,Cu、Zn、Cd、Pb、Hg、U、W 等矿产储量位居全省第一^[16],被誉为“金属之都”^[17],土壤母质的重金属含量相

对较高^[18]。其中曲江区自然资源丰富,被誉为“有色金属之乡”^[19],森林覆盖率 74.55%^[20]。自印发《土壤污染防治行动计划》后^[21],韶关市作为土壤污染综合防治先行区开展了土壤污染调查工作。本研究选取韶关市曲江区森林土壤作为研究对象,分析 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 和 Hg 8 种重金属元素含量分布特征,利用经典土壤评价方法单因子法和综合污染指数法评价土壤重金属污染程度,以期为曲江区森林土壤重金属污染治理和安全利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

曲江区(113°06'30"E~113°59'57"E, 24°27'18"N~25°08'12"N)位于广东省韶关市南部,总面积 1 620 km²。曲江区地处北回归线以北,南岭山间盆地,南离海洋较远,北被南岭山脉阻隔,属于亚热带季风气候区,大陆性气候明显,冷暖交替明显,夏季长、冬季短,年均气温 20.1℃,夏季平均气温 28.9℃,最热可到 39.5℃,最冷月平均气温 9.6℃,极端最低零下 5.3℃;年降雨量 1 640 mm。

1.2 样品采集和测定

根据曲江区森林植被、地形(坡向、坡度等)等特征,确定采样点 107 个,并采用典型抽样法布设样点。根据样点情况,选择地形较为平整、植被能代表该区域水平的地方挖掘 3 个土壤剖面,每个剖面中心点的水平间距不小于 10 m。每个剖面深度在 0~20 cm,在此区间取土壤样品,每份样品不少于 500 g。将样品均匀混合后作为该剖面的样品。将采集后的土壤样品密封保存,及时运回实验室,风干、研磨筛选后制样,以便后续分析。

土壤重金属铜、锌、铬、镍元素含量参照《土壤和沉积物铜、锌、镍、铬的测定 火焰原子

吸收分光光度法》HJ 491-2019 进行测定^[22]，土壤重金属汞、砷、铅元素含量参照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》GB/T 22105.3-2008 进行测定^[23]，土壤重金属镉元素含量参照《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》GB/T 17141-1997 进行测定^[24]。

1.3 污染评价方法

采用单因子指数法^[25]、内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法^[26]进行土壤重金属污染评价。

单因子指数法^[25]是研究某一污染物的污染程度的方法，计算公式为：

$$P_i = C_i / S_i \dots\dots\dots(1)$$

公式(1)中， P_i 为土壤重金属*i*的单项污染指数； C_i 为重金属*i*的实测值，单位 $mg \cdot kg^{-1}$ ； S_i 为重金属*i*评价标准值，单位 $mg \cdot kg^{-1}$ 。本研究采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[27](GB 15618—2018)中非农田条件下的风险筛选值为标准值(表1)。单项污染指数法评价标准如表2所示。

内梅罗综合指数法^[26]是结合单因子指数法计算出的各重金属污染指数进行评价的方法，在土壤重金属污染评价中被广泛使用一种的方法。计算公式为：

$$P = \sqrt{(P_{i\max}^2 + P_{i\text{avg}}^2) / 2} \dots\dots\dots(2)$$

公式(2)中， P 为内梅罗综合指数， $P_{i\max}$ 为重金属单项污染指数的最大值， $P_{i\text{avg}}$ 为重金属单项污染指数的平均值。内梅罗指数法评价标准如表2所示。

潜在生态风险指数法^[26]是瑞典科学家 Hakanson 提出的，用于评价沉积物中重金属潜在风险程度，能综合反映重金属对土壤的污染情况，其公式为：

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_i = T_r^i C_i / S_i \dots\dots\dots(3)$$

公式(3)中， R_i 为多种重金属潜在生态风险综合指数， E_i 为单一重金属的潜在生态风险指数， T_r^i 为重金属*i*的毒性系数，其中Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg的毒性系数分别为2、5、5、1、10、30、5、40^[28]； C_i 为重金属*i*的实测值，单位 $mg \cdot kg^{-1}$ ， S_i 重金属*i*的土壤背景值，单位 $mg \cdot kg^{-1}$ ，本研究选用《中国土壤元素背景值》^[29]中的广东省重金属元素背景值作为参考值(表1)。重金属生态风险系数 E_i 与其潜在生态风险程度 R_i 值关系如表3所示。

1.4 数据处理

土壤重金属描述性统计、相关性分析等使用

表 1 土壤重金属评价参考值
Table 1 Reference value of soil heavy metal evaluation

参考值 Reference	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
土壤污染风险筛选值 Soil pollution risk screening value	150	60	50	200	40	0.30	70	1.30
广东省土壤背景值 Soil background value in Guangdong province	50.5	18.2	17	47.3	8.9	0.056	36	0.078

表 2 单因子指数和内梅罗综合污染指数评价指标
Table2 Single factor index and Nemerow comprehensive pollution index evaluation index

数值 Value	污染程度 The degree of pollution	数值 Value	污染程度 The degree of pollution
$P_i \leq 1$	无污染	$P \leq 0.7$	安全状态
$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$0.7 < P \leq 1.0$	污染警戒
$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1.0 < P \leq 2.0$	轻度污染
$P_i > 3$	重度污染	$2.0 < P \leq 3.0$	中度污染
		> 3.0	重度污染

表3 生态危害程度及潜在生态风险程度评价指标

Table 3 Evaluation index of ecological hazard degree and potential ecological risk degree

数值 Value	潜在生态风险程度 Degree of potential ecological risk	数值 Value	潜在生态风险程度 Degree of potential ecological risk
$E_i < 40$	轻度	$R_i < 150$	轻度
$40 < E_i \leq 80$	中度	$150 < R_i \leq 300$	中度
$80 < E_i \leq 160$	强	$300 < R_i \leq 600$	强
$160 < E_i \leq 320$	很强	$R_i > 600$	很强
$E_i > 320$	极强		

表4 曲江区森林土壤重金属描述性统计特征

Table 4 Descriptive statistical characteristics of heavy metals in forest soil of Qujiang district

mg · kg⁻¹

统计量 Statistics	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
平均值 Mean	27.06	7.75	13.88	46.60	25.17	0.16	44.43	0.18
最大值 Max	175.01	102.74	59.54	237.70	346.38	1.69	497.88	0.62
最小值 Min	3.75	0	1.67	9.26	2.50	0	7.51	0.05
标准差 Standard deviation	22.47	11.25	11.09	40.25	45.28	0.26	54.12	0.08
变异系数 Coefficient of variation	0.83	1.45	0.80	0.86	1.80	1.59	1.22	0.47

SPSS 20.0 软件, 污染程度图使用 Origin 2022 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 森林土壤重金属含量特征

曲江区森林土壤重金属元素含量的描述统计结果见表4, 由表可知8种重金属元素含量的最小值、最大值、平均值、标准差和变异系数等。对Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb和Hg 8种重金属的变异系数进行分析, 其变异系数有小到大依次为Hg<Cu<Cr<Zn<Pb<Ni<Cd<As。由此可知Pb、Ni、Cd、As 4种元素极度变异, 离散程度最高, 受极端值的极强干扰, 由此可以发现这4种重金属元素受环境影响程度大, 在森林土壤中含量分布不均; Cu、Cr、Zn元素为高度变异; Hg元素为中等变异, 变异程度相对而言较为集中。

2.2 土壤重金属污染评价及风险评估

对曲江区森林土壤重金属进行单因子指数、内美罗综合污染指数法进行评价(表5), 曲江区Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb和Hg 8种重金属元素的单因子指数小于1, 均处于非污染等

级(0.13~0.63)。曲江区内梅罗综合污染指数为0.51<0.7, 综合污染等级为安全状态。

以农用地土壤风险筛选值为背景值, 曲江区森林土壤重金属元素中仅Hg元素未出现污染超标情况, 其余Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb 7种重金属含量均存在高于土壤污染风险筛选值的情况, 超标率分别为0.93%、0.93%、1.87%、1.87%、12.15%、9.35%和13.08%, 污染程度如图1所示。由图可知As元素污染情况最为严重, 主要表现在重度污染和轻度污染上, 其占比分别为4%和8%, 其次到Cd、Pb元素, 其重度污染分别为4%、2%, 说明这3种元素虽然存在严重的点状污染, 但污染范围较小; Cr、Ni、Cu、Zn元素仅出现轻度污染, 且污染占比小, 污染程度相对而言较轻, 其污染范围小。

Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb和Hg 8种重金属元素的潜在生态风险指数及风险程度见表6。曲江区Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 6种重金属元素的潜在生态风险指数均小于40, 潜在生态风险程度为轻度生态风险; Cd元素的潜在生态风险指数在40~80之间, 为中度生态风险等级; Hg元素的

表 5 曲江区森林土壤重金属单因子指数及综合污染指数评价

Table 5 Evaluation of forest soil heavy metal single factor index and comprehensive pollution index in Qujiang district

污染评价 Pollution evaluation	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
单因子污染指数 Single factor pollution index	0.18	0.13	0.28	0.23	0.63	0.54	0.63	0.14
单项污染等级 Individual pollution grade	无污染							
内梅罗综合污染指数 Nemerow composite pollution index	0.51							
综合污染等级 Composite pollution grade	安全状态							
超标率 /% Over-standard rate	0.93	0.93	1.87	1.87	12.1	9.35	13.1	-

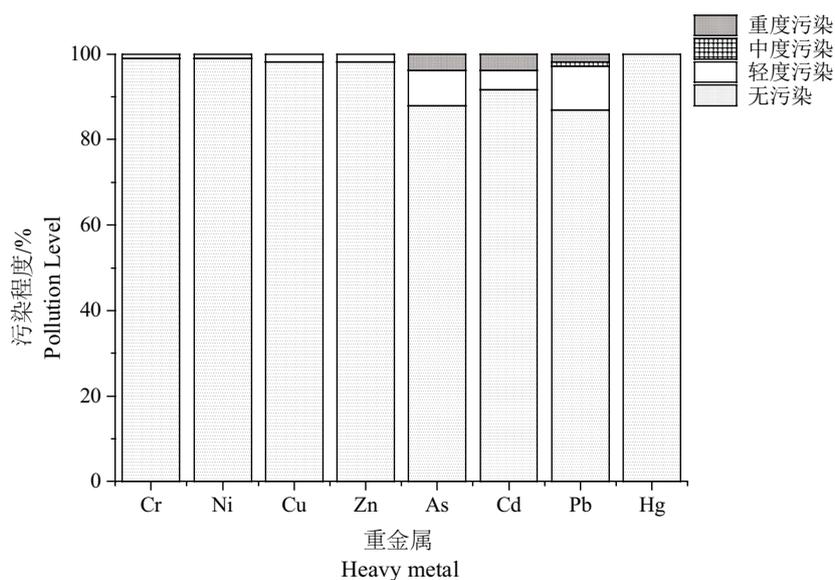


图 1 以农用地土壤污染风险筛选值为参考值的重金属单因子指数评价污染程度

Fig. 1 Heavy metal single factor index was used as reference value to evaluate the pollution degree of agricultural land soil

表 6 曲江区森林土壤重金属潜在生态风险评估

Table 6 Potential ecological risk assessment of heavy metals in forest soil of Qujiang district

生态风险评价 Ecological risk assessment	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
毒性系数 Toxic coefficient	2	5	5	1	10	30	5	40
单因子生态风险指数 Single factor ecological risk index	1.07	2.13	4.08	0.99	28.29	87.12	6.17	90.52
单项风险程度 Individual risk level	轻度生态 风险	轻度生态 风险	轻度生态 风险	轻度生态 风险	轻度生态 风险	中度生态 风险	轻度生态 风险	强度生态 风险
综合风险指数 Composite risk index	220.36							
综合风险程度 Composite risk level	中度生态风险							

潜在生态风险指数在 80~160 之间, 其潜在生态风险程度为强度生态风险。此外, 曲江区的综合风险指数在 150~300 之间, 综合风险程度为中度生态风险。

2.3 森林土壤重金属相关性分析

为探讨曲江区 8 种重金属的来源和迁移, 分析了 8 种重金属元素之间的相关关系。由表 7 可知, Ni 元素与 Cr、Cu、Zn、Cd 元素分别存在极显著的正相关关系, Cu 元素与 Cr、Zn、As、Pb 元素分别存在极显著的正相关关系, Zn 元素与 Cr、As、Cd、Pb 元素分别存在极显著的正相关关系, As 元素与 Pb 元素之间存在显著的正相关关系, Hg 与 As、Pb 元素分别存在极显著的正相关关系。其中 Ni 与 Cr 相关系数达 0.741, 表明 Ni 与 Cr 可能存在相同的来源, Zn 与 Ni、Cu、Cd、Pb 的相关系数分别为 0.631、0.578、0.527、0.591, 说明 Zn 元素与这 4 种元素呈现复合污染的可能性大。

3 讨论与结论

曲江区森林土壤重金属含量特征结果表明: 该区域森林土壤重金属含量差异较大, 但大部分样点的重金属含量均为超过农用地土壤筛选值; 重金属的变异系数表现为 Hg 元素最小, As 元素变异系数最大, 说明该地区森林土壤重金属存在比较明显的空间分布差异。

以农用地土壤风险筛选值为参考值, 计算研究区森林土壤重金属的单因子指数和内梅罗综合

指数, 评价结果表明 8 种重金属平均含量单因子指数均小于 1, 土壤无污染, 其中 As 和 Pb 的单因子指数最高, Ni 的单因子指数最低。8 种重金属的内梅罗综合指数为 $0.51 < 0.7$, 综合评价为安全状态。基于广东省土壤背景值的潜在生态风险评估结果显示, 研究区森林土壤重金属的单一潜在生态风险评价表明, 8 种重金属的潜在生态风险指数有小到大依次为 $Zn < Cr < Ni < Cu < Pb < As < Cd < Hg$, 其中 Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、As 元素为轻度的潜在生态风险, Cd 元素为中度潜在生态风险, Hg 元素为强度生态风险。8 种重金属的综合风险指数为 220.36, 潜在风险等级为中度生态风险。单因子指数法是通过单一重金属的含量进行土壤重金属污染评价的, 而潜在生态风险指数法充分考虑了不同重金属生物毒性系数, 计算时增加了重金属的毒性系数, 其对土壤重金属污染的评价也会更加综合和全面^[30]。潜在风险评价中 Hg、Cd 的毒性系数较大, 而 Zn 的毒性系数较小, 说明 Hg、Cd 元素对人体和植物的毒害作用较大, 因此在通过单因子指数法计算出 Hg、Cd 元素的污染等级为无污染的情况下, Hg、Cd 元素在生态系统中仍存在较大的潜在生态风险。

土壤重金属的来源主要为自然来源和人为来源^[31], 自然来源主要是通过母质和基岩风化而产生的岩石输入^[3], 人为来源主要是人类的采矿活动、冶炼厂、工业使用、化石燃烧粉尘废气等产生的^[32]。具有相同来源的重金属之间往往具有一定的相关性, 因此可通过分析相同土层的重金属

表 7 曲江区森林土壤重金属元素相关关系
Table 7 Correlation of heavy metal elements in forest soil of Qujiang district

重金属 Heavy metal	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
Cr	1							
Ni	.741**	1						
Cu	.378**	.382**	1					
Zn	.418**	.631**	.578**	1				
As	.105	.190	.302**	.352**	1			
Cd	.379**	.482**	.148	.527**	.075	1		
Pb	-.131	-.024	.393**	.591**	.247*	.187	1	
Hg	.075	.014	.037	.125	.340**	.176	.280**	1

注: **. 在 .01 水平 (双侧) 上显著相关。*. 在 .05 水平 (双侧) 上显著相关。

Note: **. Significant correlation was found at .01 level (bilateral). *. Significantly correlated at .05 level (bilateral).

含量之间的相关性来推测其来源^[33]。研究发现 Ni 与 Cr 相关系数达 0.741, 表明 Ni 与 Cr 可能具有相同的来源, 通过单因子指数法评价分析, Ni、Cr 均处于无污染状态, 因此推测其来源可能为成土母质。Zn 与 Ni、Cu、Cd、Pb 的相关系数分别为 0.631、0.578、0.527、0.591, 说明 Zn 元素与这 4 种元素可能存在复合污染的可能性大, 或其具有相同的污染来源。研究区位于韶关市曲江区, 被誉为“有色金属之乡”, 矿产资源丰富, 频繁的矿山开采冶炼、化学工业生产, 会排放大量重金属废气, 通过大气自然迁移和沉降等途径进入土壤并累积, 使得研究区的大部分重金属之间存在显著或极显著的正相关关系。Cheng 等^[34]研究发现土壤重金属 As、Cd、Pb、Zn、Cu 的污染主要来自矿石开采、尾矿风化以及冶炼厂的废气排放, Hg 主要来源为冶炼厂和尾矿坝的降尘和气体排放, Cr、Ni 主要来源成土母质。

韶关市曲江区森林土壤重金属 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 元素平均含量较低, 均未超过农用地土壤风险筛选值, 内梅罗综合指数评价等级为安全状态。通过潜在生态风险评估, 除 Cd、Hg 元素外, 其余 6 种重金属均属于轻度生态风险程度, 而 Cd 元素为中等生态风险, Hg 为强度生态风险, 因此研究区综合潜在生态风险等级为中等生态风险。应定期对曲江区森林土壤重金属含量进行监测, 并加强对 Cd、Hg 这两种中、高等生态风险元素的检测, 避免这些元素的潜在危害。研究区森林土壤重金属间存在不同的相关性, 表明重金属之间存在一定的同源性, 其主要来源可能为成土母质、矿山开采冶炼及化学工业生产等, 因此应加强污染源控制。

参考文献

- [1] JIA Z M, LI S Y, WANG L. Assessment of soil heavy metals for eco-environment and human health in a rapidly urbanization area of the upper Yangtze Basin[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1).
- [2] 谭琳, 肖丽娜, 江瑶, 等. 森林土壤重金属空间分布特征及污染评价: 以华南沿海地区为例[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(01): 116-121.
- [3] MISHRA S, LIN Z Q, PANG S M, et al. Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 418.
- [4] PAN Y J, DING L XIE S Y, et al. Spatiotemporal simulation, early warning, and policy recommendations of the soil heavy metal environmental capacity of the agricultural land in a typical industrial city in China: Case of Zhongshan City[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(pre-published).
- [5] PENG X, CUI Y X, CAO W Q. et al. Remediation technologies and risk assessment of soil contaminated with heavy metals[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 781(3): 032057(10pp).
- [6] 李怡欣, 谢桂军, 李腊梅, 等. 广东麻竹笋及产地土壤重金属污染与风险评价[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(6): 103-109.
- [7] 罗倩, 张珍明, 向准, 等. 梵净山自然保护区林地土壤重金属分布与富集特征[J]. 西南农业学报, 2017, 30(10): 2352-2359.
- [8] 杨维鸽, 岳军伟, 张雁. 商洛金凤山不同林地土壤重金属含量研究[J]. 商洛学院学报, 2021, 35(4): 33-40.
- [9] 窦苗, 陶玉柱, 高瑶瑶. 田头山自然保护区林地土壤理化性质与重金属相关性研究[J]. 广东园林, 2022, 44(1): 16-21.
- [10] 贺志远. 土壤重金属污染修复技术应用分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(4): 109-111.
- [11] 马杰, 张秀, 刘今朝, 等. 某铅锌尾矿库周边土壤重金属污染特征及其来源分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(6): 101-109.
- [12] 陈锦, 郭锦. 单因子法及综合污染指数法在矿山土壤重金属污染评价中的应用[J]. 世界有色金属, 2020(9): 281-282.
- [13] 樊志颖, 李江荣, 高郟, 等. 色季拉山森林土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(8): 93-100.
- [14] 叶俊, 任大军, 张晓晴, 等. 中国部分林地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(6): 2507-2514.
- [15] MOHAMMED ELT, ROSALIN A, ROZAINAH M Z, et al. Evaluation of heavy metals and environmental risk assessment in the Mangrove Forest of Kuala Selangor estuary, Malaysia[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 136: 1-9.
- [16] 冯慧敏, 李海渤. 粤北地区重金属污染菜地现状及土壤修复对策与建议: 以韶关为例[J]. 湖南生态科学学报, 2018, 5(3): 48-56.
- [17] 田美玲, 陆素芬, 常显志, 等. 粤北某矿业密集区土壤重金属含量特征研究[J]. 河池学院学报, 2019, 39(5): 38-43.
- [18] 余斐, 叶彩红, 许宛孜, 等. 韶关市花岗岩地区森林土壤

- 重金属污染评价[J].生态环境学报, 2022, 31(2): 354-362.
- [19] 颜彭莉, 贾永锋. 先行区探路土壤污染防治[J]. 环境经济, 2018(17): 34-35.
- [20] 韶关市曲江区统计局. 韶关市曲江区2021年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2022-04-23]. http://www.qujiang.gov.cn/zfxgkml/content/post_2185044.html.
- [21] 中华人民共和国国务院. 土壤污染防治行动计划[EB/OL]. [2016-05-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm.
- [22] 生态环境部. 土壤和沉积物铜、锌、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法: HJ 491-2019[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [23] 中华人民共和国农业部. 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法: GB/T 22105.3-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 国家环境保护局科技标准司. 土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法: GB/T 17141-1997 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [25] 李剑锋, 冯李霄, 陈希清, 等. 桂阳县大顺隆锡矿区周边土壤重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境工程技术学报: 1-12.
- [26] RYSZARD M, JOANNA K, MICHAŁ G, et al. Assessment of heavy metals contamination in surface layers of Roztocze National Park forest soils (SE Poland) by indices of pollution[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 839-850.
- [27] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [28] 孙厚云, 卫晓锋, 刘卫, 等. 基于GIS基线分割与土地利用单元优化的土壤重金属生态风险累积效应评价方法[J]. 地质学报, 2022, 96(4): 1488-1502.
- [29] 国家环境总局, 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.
- [30] 庄玉婷, 冯嘉仪, 储双双, 等. 粤西地区不同林分类型土壤重金属含量及生态风险评价[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(5): 25-31.
- [31] 李向阳, 吴疆, 刘洪强. 鄂东南5种森林土壤重金属含量及污染评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 102-108.
- [32] 孙养存, 尹紫良, 葛菁萍. 土壤中重金属污染物的来源及治理方式[J]. 中国农学通报, 2022, 38(6): 75-79.
- [33] 简毅, 张健, 杨万勤, 等. 岷江下游小型集水区不同林分土壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1526-1533.
- [34] CHENG X F, DANEK T, DROZDOVA J, et al. Soil heavy metal pollution and risk assessment associated with the Zn-Pb mining region in Yunnan, Southwest China[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2018, 190(4): 194.1-194.16.