

# 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\*

谭琳<sup>1</sup> 肖丽娜<sup>2</sup> 江瑶<sup>2</sup> 张中瑞<sup>2</sup>

(1. 广东省林业科技推广总站, 广东广州 510173; 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** 为了解森林土壤重金属空间分布特征及污染状况, 选取华南沿海地区具有代表性的森林土壤, 采用克里金插值法分析了土壤中常见重金属元素镉、铅、铜、镍的空间分布特征, 并利用单因子及内梅罗综合污染指数、潜在生态风险指数等方法评估了土壤重金属污染程度和潜在生态风险。结果显示: 研究区铅含量较高, 均超过土壤污染风险管控标准规定的风险筛选值 70 mg/kg; 镉、铜、镍含量均在风险筛选值以内。从空间分布特征上看, 铅含量呈西南向东北逐渐升高的趋势, 镍、镉含量呈西南向东北逐渐降低的趋势, 铜含量呈自西向东逐渐降低的趋势, 但总体变化均属于中等变异程度。污染程度评价表明, 铅元素单因子污染指数大于 1, 呈轻污染等级; 镉、铜、镍元素单因子污染指数均小于 1, 重金属含量未超标; 内梅罗综合污染指数为 0.945, 综合污染等级达到警戒线。潜在生态风险评估表明, 研究区镉含量呈中等潜在生态风险程度; 铅、铜、镍均呈轻微潜在生态风险程度; 4 种重金属元素综合生态风险指数小于 150, 属于轻微程度。总的来说, 研究区存在一定程度的潜在生态风险, 有必要进行定期的森林土壤污染监测。

**关键词** 森林土壤; 空间分布特征; 重金属污染; 潜在生态风险

中图分类号: S714.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 01-0116-06

## Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Forest Soil: A Case Study in Coastal Areas of South China

TAN Lin<sup>1</sup> XIAO Lina<sup>2</sup> JIANG Yao<sup>2</sup> ZHANG Zhongrui<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Forestry Technology Extension Station, Guangzhou, Guangdong 510173, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/ Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

**Abstract** To understand the spatial distribution and pollution of heavy metals in forest soils, Kriging interpolation method was used, in some selected typical forest soils in coastal areas of south China, to analyze the spatial distribution characteristics of the common heavy metal elements in soil, like cadmium, lead, copper, nickel. By using single factor and Nemerow comprehensive pollution index as well as potential ecological risk index method, this study assessed the degrees of soil heavy metal pollution and potential ecological risks. The results showed that the content of lead in the study areas was high, which exceeded the risk screening value of

\* 基金项目: 广东省省级财政专项资金“林地土壤调查”; 广东省林业科技计划项目(2019-07); 广东省生态公益林效益补偿专项“广东省生态公益林可持续经营研究与示范”。

第一作者: 谭琳(1978—), 女, 工程师, 主要从事林业相关研究, E-mail: 596601705@qq.com。

通信作者: 张中瑞(1987—), 男, 工程师, 主要从事林业经济研究, E-mail: zhangzhongrui126@126.com。

70 mg/kg stipulated by the soil pollution risk control standard. The contents of cadmium, copper and nickel were all within the risk screening value. In terms of spatial distribution characteristics, Pb content increased gradually from southwest to northeast, Ni and Cd content decreased gradually from southwest to northeast, and Cu content decreased gradually from west to east, nevertheless, the overall changes were of moderate variation. The pollution degree evaluation showed that the single factor pollution index of lead was greater than 1, indicating a light pollution. The single factor pollution index of Cd, Cu and Ni was all smaller than 1. The content of heavy metals did not exceed the standard. Nemerow comprehensive pollution index is 0.945, and comprehensive pollution level reached the warning line. The potential ecological risk assessment showed that cadmium content in the study area hit a medium level of potential ecological risk. Lead, copper and nickel content in soils all showed slight potential ecological risk. The comprehensive ecological risk index of the four heavy metal elements is less than 150, indicating slight ecological risk. Generally speaking, there is a certain degree of potential ecological risk in the studied areas, and it is necessary to perform regular monitoring of forest soil pollution there.

**Key words** forest soil; spatial distribution characteristics; heavy metal pollution; potential ecological risk

森林土壤重金属污染是目前广受关注的热点问题<sup>[1]</sup>, 重金属污染具有持久性、潜伏性、毒害性等特点, 容易造成或引起潜在的土壤质量下降、森林生态环境恶化等危害, 甚至可能会对林产品安全及人类健康造成严重威胁<sup>[2]</sup>。目前不少学者陆续开展了森林土壤重金属含量分布特征、污染程度评价、生态风险评估等研究<sup>[3-4]</sup>。其中, 开展土壤重金属元素的空间分布特征研究, 能够直接反映污染的重点分布区域及污染蔓延趋势。对森林土壤重金属污染进行客观精确的评价及风险评估, 能够为下一步的污染防控和区域生态安全保护提供依据。

华南沿海地区经济发展快、城市化程度高, 且长期受到高强度酸沉降的影响, 森林土壤重金属大量积累, 森林生态系统的承载能力不断下降<sup>[5]</sup>。森林土壤重金属污染问题正逐步发展成为影响生态环境、制约经济发展的关键因子, 应当引起重视。本研究选择华南沿海地区森林土壤作为研究对象, 分析土壤中镉、铅、铜、镍元素含量状况及空间分布特征, 并利用经典污染评价方法评估土壤中各元素污染程度, 以期为森林土壤重金属含量分布特征及污染评价方法的研究奠定基础, 也为森林土壤生态环境安全和保护提供建议和意见。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于华南沿海地区珠海市南部的横琴新

区, 濒临南海, 属南亚热带海洋性季风气候区, 年平均气温为 22-23 ℃, 年平均降水量为 2 015.9 mm。研究区主要地貌有山地、丘陵、平地、滩涂等。南部主要分布有大横琴山、丘陵、平地、滩涂和水域, 北部主要分布有小横琴山、填海、围垦地, 中部多是围垦、填海地、滩涂等<sup>[6]</sup>。总的来说, 南、北部地区多山地、森林及旅游景区等, 中部地区以居民生活区为主。研究区土壤类型包括红壤、赤红壤、石质土、海滨沙土、盐渍沼泽土、冲积土等。研究区植被茂密, 主要的森林类型有榕树林、红树林和野生芦苇 *Phragmites australis*, 原生植被覆盖率高。

### 1.2 调查及采样方法

根据研究区植被、地形、气候特征等状况, 确定基本样本量 ( $n=30$ ), 并采用典型抽样法布设样点。选择样点内具有代表性的区域挖掘 3 个土壤剖面, 各剖面水平距离应大于 10 m。每个剖面长 1.2 ~ 1.5 m, 宽 0.8 ~ 1.0 m, 剖面深度达母质层或地下水, 土层较厚时深度达到 1.0 m。各剖面每隔 20 cm 分层取样, 将各层样品混合均匀后作为该剖面的样品。采集后的土壤样品妥善保存, 并及时带回实验室, 风干、过筛后以便后续分析。

### 1.3 指标测定方法

土壤样品重金属含量分析与测定方法分别为: 镉含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定, 铅含量采用原子荧光法测定, 采用火焰原子吸收分光光度法测定铜、镍含量<sup>[7]</sup>。

### 1.4 数据处理及制图

采用 SPSS 18.0 软件对土壤重金属元素含量的均值、标准差及变异系数等作描述性统计, 计算 Kolmogorov-Smirnov 值以检验数据是否符合正态分布 (显著水平  $\alpha = 0.05$ )。利用 ArcGis10.7 软件对土壤重金属含量的空间分布作克里金空间插值分析, 并制作空间分布特征图<sup>[8]</sup>。

### 1.5 土壤污染评价

土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合指数法<sup>[9]</sup>。其中, 单因子污染指数法用于研究单一重金属元素对土壤的污染状况; 内梅罗综合污染指数法能够综合反应多种重金属对土壤的污染状况, 并突出高浓度重金属对土壤质量的影响作用。两种评价方法的计算公式分别为:

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

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

公式 (1) 中,  $P_i$  为土壤重金属  $i$  的单因子污染指数;  $C_i$  为重金属  $i$  的实测值 (mg/kg);  $S_i$  为重金属评价标准值 (mg/kg)。由于目前尚无森林土壤重金属相关的限量标准, 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)》<sup>[10]</sup> (GB 15618—2018) 中 pH<5.5 非水田条件下的风险筛选值。公式 (2) 中,  $P$  为内梅罗综合污染指数,  $P_{\max}$  为重金属单因子污染指数最大值,  $P_{\text{avg}}$  为重金属单因子污染指数平均值。单因子污染指数法评价标准:  $P_i \leq 1$ , 无污染;  $1 < P_i \leq 2$ , 轻度污染;  $2 < P_i \leq 3$ , 中度污染;  $P_i \geq 3$ , 重度污染。内梅罗污染指数可分为 5 级,  $P \leq 0.7$  时表示土壤仍清洁;  $0.7 < P \leq 1.0$  表示土壤尚清洁 (警戒线),  $1.0 < P \leq 2.0$  表示土壤轻度污染,  $2.0 < P \leq 3.0$  表示土壤中度污染,  $P > 3.0$  表示土壤受到重污染。

### 1.6 潜在生态风险评估

本研究采用潜在生态风险指数法<sup>[11]</sup>来评价重金属元素对生态系统的潜在风险。该方法能够分别反映研究区域中单个及多种重金属元素对土壤的潜在生态影响。计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \frac{C_i}{C_n^i}) \dots\dots\dots(3)$$

公式 (3) 中: RI 为多种重金属潜在生态风险

指数;  $E_r^i$  为单一重金属的潜在生态风险因子;  $C_i$  为重金属含量;  $C_n^i$  为土壤背景参考值, 本研究选用《中国土壤元素背景值》<sup>[12]</sup> 中的元素背景值作为参考;  $T_r^i$  为单一重金属  $i$  的生物毒性系数 (Cd=30、Pb=5、Cu=5、Ni=5)。潜在生态风险等级划分如下:  $E$  值小于 40 属于轻微生态风险;  $E$  值在 40~80 范围内, 属于中等生态风险;  $E$  值在 80~160 范围内, 属于强生态风险;  $E$  值在 160~320 范围内, 属于极强生态风险;  $E$  值超过 320, 达到极强生态风险。RI 值小于 150 属于轻微生态风险; RI 值在 150~300 范围内属于中等生态风险; RI 值在 300~600 范围内属于强生态风险; RI 值超过 600 则为很强生态风险。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量特征

研究区森林土壤重金属元素含量的描述统计结果见表 1。其中, 铅元素含量平均值最高, 达到 88.54 mg/kg, 高于标准规定的铅元素土壤污染风险筛选值 (70 mg/kg); 镉元素含量平均值最低, 为 0.05 mg/kg, 低于标准规定的镉元素污染风险筛选值 (0.3 mg/kg); 铜、镍元素含量平均值分别为 7.36 mg/kg, 9.03 mg/kg, 均低于标准规定的铜、镍元素污染风险筛选值 (50 mg/kg, 60 mg/kg)。对 4 种重金属元素的变异系数进行分析, 变异值由大到小依次为镉 (0.40), 镍 (0.39), 铜 (0.38), 铅 (0.29), 均处于中等变异程度 ( $0.1 \leq CV \leq 1.0$ )。在显著水平  $\alpha = 0.05$  的单样本 K-S 检验水平下, 均符合正态分布。

### 2.2 土壤重金属元素空间分布

依据土壤污染风险管控标准, 研究区土壤铅含量较高, 基本超过 70 mg/kg 的风险筛选值。其中, 西部至中部地区, 土壤铅的含量相对低, 基本处于 90 mg/kg 以下的水平, 东北部地区土壤铅含量略高于 90 mg/kg, 整体呈现自西向东逐渐升高的趋势。土壤铜含量总体低于风险筛选值 50 mg/kg。其中, 西北局局部区域土壤铜含量相对较高, 东北局局部区域土壤铜含量相对较低, 整体呈自西向东逐渐降低的趋势。研究区绝大部分区域土壤镍的含量处于 8 mg/kg 水平, 远低于风险筛选值 60 mg/kg。其中, 西南区域土壤镍含量相对较

表 1 森林土壤重金属描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of heavy metals in forest soil

统计量 Statistics	镉 Cd	铅 Pb	铜 Cu	镍 Ni
最大值 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Max	0.09	130.62	11.50	15.79
最小值 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Min	0.03	48.72	2.93	5.00
平均值 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Mean	0.05	88.54	7.36	9.03
标准差 / (mg · kg <sup>-1</sup> ) Standard deviation	0.02	25.90	2.79	3.56
变异系数 Coefficient of variation	0.40	0.29	0.38	0.39
K-S 值 Value of K-S test	0.48	0.54	0.48	0.49
显著性 Significance	0.98	0.93	0.97	0.97

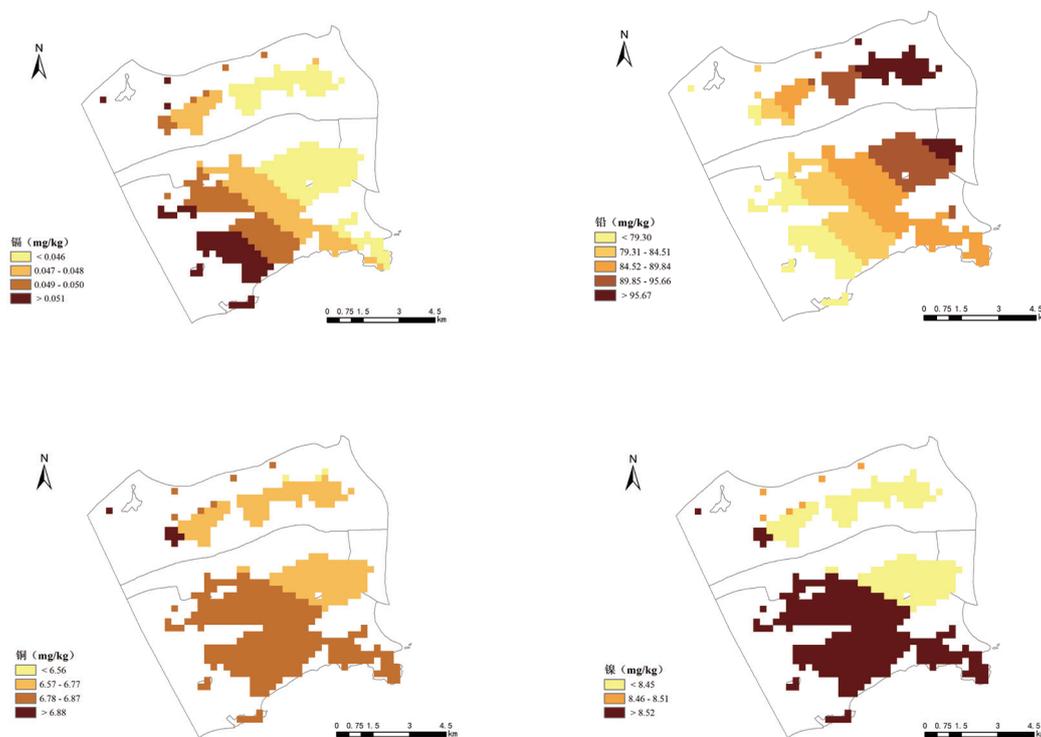


图 1 森林土壤重金属含量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of heavy metals content in forest soil

高，东北部土壤镍含量相对较低，整体呈自西向东降低的趋势。土壤镉含量相对较低，基本处于 0.05 mg/kg 以下的水平，低于 0.3 mg/kg 的风险筛选值。其中，西南部及西北局部区域土壤镉含量相对较高，东部区域土壤镉含量相对较低，整体呈自西南向东北逐渐降低的趋势。

### 2.3 土壤重金属污染评价及风险评估

研究区森林土壤重金属元素单因子及综合污染指数评价结果如表 2 所示。土壤重金属镉、铜、镍元素单因子指数小于 1，处于非污染等级。土壤铅的单项污染指数大于 1，呈轻污染等级。研究区内梅罗综合污染指数为 0.945，综合污染等级达到警戒线。

表2 森林土壤重金属单因子及综合污染指数评价

Table 2 Single and Nemerow pollution index evaluation of forest soil heavy metals

重金属元素 Heavy metal elements	镉 Cd	铅 Pb	铜 Cu	镍 Ni
单因子污染指数 Single factor pollution index	0.162	1.265	0.147	0.150
单项污染等级 Individual pollution grade	非污染	轻污染	非污染	非污染
内梅罗综合污染指数 Nemerow composite pollution index	0.945			
综合污染等级 Composite pollution grade	警戒线			

表3 森林土壤重金属潜在生态风险评估

Table 3 Potential ecological risk assessment of forest soil heavy metals

重金属元素 Heavy metal elements	镉 Cd	铅 Pb	铜 Cu	镍 Ni
毒性系数 Toxic coefficient	30	5	5	5
单因子生态风险指数 Single factor ecological risk index	65.65	0.27	0.04	0.03
单项风险程度 Individual risk level	中等生态风险	轻微生态风险	轻微生态风险	轻微生态风险
综合风险指数 Composite risk index	65.99			
综合风险程度 Composite risk level	轻微生态风险			

镉、铅、铜、镍4种重金属元素的潜在生态风险指数及风险程度分级见表3。研究区铅、铜、镍3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微; 研究区镉元素的潜在生态风险指数在40~80范围内, 潜在生态风险程度为中等。此外, 研究区土壤的综合风险指数小于150, 说明这4种重金属元素在研究区的综合生态风险属于轻微程度。

### 3 结论与讨论

通过分析研究区内重金属含量空间分布可以看出, 除铅外, 其它重金属元素含量均在风险筛选值以内。整体上看, 镍、镉元素含量呈西南向东北逐渐降低的趋势, 铜元素含量呈自西向东逐渐降低的趋势, 铅元素含量呈西南向东北逐渐升

高的趋势, 但总体变化均属于中等变异程度。参照土壤污染风险管控标准, 研究区内铅含量普遍处于风险状态, 同时, 结合其空间分布状态也可以推断, 铅含量与研究区内频繁的人为活动直接关联<sup>[13]</sup>, 在靠近景区、港口或其它居民聚集点, 土壤铅含量相对较高。铅元素对人体健康危害性极大, 一直以来是土壤研究中重点关注的一类污染因子<sup>[14]</sup>。因此, 应当加强森林土壤铅含量环境监测, 原则上应尽快采取安全防治措施。

通过单因子污染和内梅罗综合指数法对研究区内森林土壤重金属污染进行评价, 研究区森林土壤重金属单因子指数小于1, 说明森林土壤重金属含量均未超标, 森林土壤中铅的单因子污染指数大于1, 呈轻污染等级。研究区内梅罗综合污染指数为0.945, 综合污染等级达到警戒线。对研究

区内土壤重金属污染进行潜在风险评估, 铅、铜、镍 3 种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微; 镉在研究区的潜在生态风险指数大于 40 但小于 80, 潜在生态风险为中等。此外, 研究区的综合风险指数值小于 150, 说明这 4 种金属元素在研究区的总生态风险属于轻微程度。已有研究指出, 华南沿海区域普遍受到重金属污染的影响, 由于大面积的围垦农田易造成铅、镍、铜、镉等元素的富集, 往往表现为以镉元素为主的多种重金属混合污染<sup>[15]</sup>, 相似地, 本研究中镉处于中等潜在生态风险。另外, 靠近城市中心区或工业活动密集区往往存在较高的污染风险<sup>[16]</sup>, 本研究区城市化程度较高且人为活动密集, 存在一定的总体潜在生态风险。因此, 有必要进行定期森林土壤污染监测, 加强污染源控制, 并对污染风险区进行土壤理化性质适当调节, 减轻对森林土壤生态环境的危害作用, 从而保证森林生态系统健康稳定。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320; 350; 272.
- [3] 林雯, 李吉跃, 粟娟. 广州市城市林地土壤重金属污染研究[J]. 广东林业科技, 2012, 28(1): 25-29.
- [4] 程炯, 吴志峰, 刘平, 等. 福建沿海地区不同用地土壤重金属污染及其评价[J]. 土壤通报, 2004(5): 639-642.
- [5] 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.
- [6] 梁晓娜. 生态策略在智慧城市空间规划的应用研究: 以珠海横琴新区为例[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 710-716.
- [9] 解懿妮, 叶龙华, 李小川, 等. 云浮市油茶适生地区土壤重金属含量变异分析及污染评价[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(6): 84-90.
- [10] 生态环境部. GB 15618—2018土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 杨圆圆, 张东宏, 董振洁, 等. 秦岭山地典型林分林地土壤Pb、Zn分布特征及污染评价[J]. 温带林业研究, 2019, 2(3): 45-51.
- [14] 陈穗玲, 李锦文, 陈南, 等. 福建沿海地区农田土壤重金属Hg、Pb、Cd区域分布特征与污染评价[J]. 环境化学, 2013, 32(1): 162-163.
- [15] 吴为, 武攀峰, 缪明, 等. 滨江沿海地区耕地土壤重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 中国测试, 2019, 45(2): 78-82; 110.
- [16] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J/OL]. 环境科学, 2021, 42(2): 1-13.