

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.

粤西地区不同林分类型土壤重金属含量及生态风险评价

庄玉婷, 冯嘉仪, 储双双, 吴道铭, 王 婧, 张立超, 曾曙才
(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】了解粤西地区不同林分类型土壤重金属的含量特征及污染情况, 为其生态风险评价提供理论依据。【方法】以粤西地区桉树 *Eucalyptus urophylla* 人工林、马尾松 *Pinus massoniana* 人工林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林、相思 *Acacia* spp. 人工林和阔叶混交林 5 种林分类型为研究对象, 分析不同林分 0~20 cm 土层土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 的含量, 并采用单项污染指数 (P_i) 法、内梅罗综合污染指数 (P_N) 法和 Hakanson 潜在生态风险指数 (RI) 法对各林分土壤重金属污染情况进行污染评价及潜在生态风险评价。【结果】各林分土壤重金属含量均以 Zn 最高, Cd 最低, 但均未超过广东省土壤背景值; 土壤 pH 为 3.62~6.42, 呈酸性。马尾松人工林土壤中 Cu 质量分数 ($16.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 及桉树人工林土壤中 Pb 质量分数 ($12.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 均显著高于阔叶混交林土壤中相应重金属的质量分数 (9.21 和 $6.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 人工林土壤重金属含量间的相关性显著。5 种林分土壤重金属 P_i 均小于 1, 污染等级均为清洁; 土壤重金属 P_i 及 P_N 均表现为: 马尾松人工林>杉木人工林>桉树人工林>相思人工林>阔叶混交林, 除马尾松人工林外, 其余林分的综合污染等级均为安全。单一及多种重金属的潜在生态风险评价结果均为轻微风险, 单一重金属潜在生态风险系数 (E_i) 表现为 Cd 最大, Zn 最小, 多种重金属 RI 表现为马尾松人工林最高, 阔叶混交林最低。【结论】Hakanson 潜在生态风险指数法能更综合地反映土壤受重金属污染情况; 本研究评价结果表明, 防止和减少森林土壤中人为的重金属输入仍是一项需要长久坚持的必要举措。

关键词: 森林土壤; 重金属含量; 单项污染指数; 内梅罗指数; 污染评价; 潜在生态风险

中图分类号: S718.516; X825

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2018)05-0025-07

Contents and ecology risk assessments of heavy metals in different forest soils in West Guangdong

ZHUANG Yuting, FENG Jiayi, CHU Shuangshuang, WU Daoming, WANG Jing, ZHANG Lichao, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To understand heavy metal content characteristics and pollution conditions in different forest soils in west Guangdong, and provide a theoretical basis for their ecology risk assessments. 【Method】*Eucalyptus urophylla* plantation, *Pinus massoniana* plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation, *Acacia* spp. plantation and broad-leaved mixed forest in West Guangdong were chosen to investigate heavy metal (Cu, Zn, Pb, Cd and Ni) contents in soil at the 0–20 cm depth. Single pollution index (P_i), Nemerow index (P_N) and Hakanson potential ecological risk index (RI) methods were used to assess heavy metal pollution conditions and potential ecological risks in different forest soils. 【Result】Cd content was the lowest while Zn content was the highest in all studied forest soils, but they were all below soil background value of Guangdong Povice. The values of pH

收稿日期: 2018-03-08 网络首发时间: 2018-07-09 17:49:26

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180707.1635.006.html>

作者简介: 庄玉婷 (1993—), 女, 硕士研究生, E-mail: 547181298@qq.com; 通信作者: 曾曙才 (1971—), 男, 教授, 博士, E-mail: sczeng@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划项目 (2015B020207002); 广东省林业科技创新专项资金项目 (2014KJCX022)

ranged from 3.62 to 6.42, presenting acidic. Both Cu content ($16.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in *P. massoniana* plantation soil and Pb content ($12.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in *E. urophylla* plantation soil were significantly higher than those in broad-leaved mixed forest soil (9.21 and $6.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The correlations among five heavy metal contents in plantations were significant. All P_i values in five forests were lower than 1, indicating no contamination. Both P_i and P_N ranks in five forests were as follows: *P. massoniana* plantation > *C. lanceolata* plantation > *E. urophylla* plantation > *Acacia* spp. plantation > broad-leaved mixed forest. Except *P. massoniana* plantation, the pollution levels of all other forests were safe. The potential ecological risk assessment results of single and multiple heavy metals were slight risk. The potential ecological risk coefficients (E_i) of single heavy metal showed that Cd had the highest value while Zn had the lowest value. The results of RI showed that *P. massoniana* forest had the highest value and broad-leaved mixed forest had the lowest value. 【Conclusion】 The E_i method can more comprehensively reflect the soil heavy metal contamination. According to its assessment results, it is still a long-term and necessary measure to prevent and reduce heavy metal pollution caused by human.

Key words: forest soil; heavy metal content; single pollution index; Nemerow index; pollution assessment; potential ecological risk

森林是陆地生态系统的主体,是陆地上最大的碳库与碳吸收汇,同时还为人类提供良好的工作、生活和居住条件,在生态平衡中起着重要作用^[1]。但随着经济的迅猛发展及城市工业化进程的加快,大量重金属不断释放到环境中,土壤可接纳大气-水体-土壤环境系统中70%以上的重金属排放量^[2]。森林土壤中过高的重金属含量不仅影响森林土壤生态系统的结构和功能,而且对生态环境、生物多样性和人类的生存与健康等均将造成危害^[3-5],该问题已引起国内外学者的广泛关注^[6-7]。评价森林土壤中的重金属污染程度对保护生态环境和生物健康有重要意义,当前土壤重金属污染评价的研究对象多见于与人类活动密切相关的农田、城市、道路、矿区等土壤^[8-12],对不同林分类型土壤重金属污染进行评价探究的研究较少。桉树 *Eucalyptus urophylla*、马尾松 *Pinus massoniana*、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 和相思 *Acacia* spp. 是我国南方重要的人工造林树种,广泛种植于华南地区^[13]。本研究以粤西地区桉树、马尾松、杉木、相思人工林和阔叶混交林5种林分类型的表层土壤为研究对象,分析研究粤西地区不同林分土壤重金属的含量特征及分布特点,并采用单项污染指数法、内梅罗综合污染指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法进行土壤重金属污染与潜在生态风险评价,从而为粤西地区森林土壤重金属污染评价提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

罗定市位于广东省西南部 ($111^{\circ}03'08'' \sim 111^{\circ}52'44''\text{E}$, $22^{\circ}25'11'' \sim 22^{\circ}57'34''\text{N}$),属南亚热带季

风气候,四季分明,雨量充沛,气候温和,水热条件优越,年均气温 22.10°C ,年均日照率 42%,年降水量 $1\ 260 \sim 1\ 700 \text{ mm}$ 。罗定中部、南部和东北部为丘陵、盆地地带,西部、南部和西北部一部分为云开大山山地,受多种自然条件影响,植被类型复杂,植物种类繁多,地带土壤类型为赤红壤、黄壤。

1.2 样品采集与分析

于2015年11—12月选取罗定市金鸡、船步、朗塘、附城、连州、罗平、泗纶和太平等8个镇进行样地调查和土壤采集。在每个镇选取兼具桉树林、马尾松林、杉木林、相思林和阔叶混交林(主要树种为相思、桉树、黄梁木 *Neolamarckia cadamba* 和毛竹 *Phyllostachys heterocycla*) 的区域进行土壤调查采样,5种林分所在地段土壤母质及土地利用历史相似,海拔高度相近。在5种林地中央均设置1个面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的采样样地,样地基本情况如表1。在每个样地对角线上选取3个采样点,每个采样点均采集表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 深度的土壤 500 g 左右,采用四分法将同一样方的土壤样品混匀,用聚乙烯塑料袋密封并做好标记,共采集样品120个,

表1 样地基本情况

Table 1 Basic status of sampling plots

林分	林龄 ¹⁾ /a	胸径/cm	树高/m	坡度/(°)
桉树人工林	12.6±11.4	13.2±5.8	13.8±4.4	20.9±6.1
马尾松人工林	30.8±12.1	13.6±4.0	11.9±2.0	25.2±4.2
杉木人工林	26.6±13.7	12.5±5.4	11.5±3.4	28.4±12.6
相思人工林	13.7±15.3	14.0±5.1	13.5±4.6	25.7±4.9
阔叶混交林	—	15.7±9.5	15.4±4.9	25.9±10.4

1) —表示林龄不确定

室温下自然风干,除去石子及植物叶片、残根等杂物,磨碎并过100目的尼龙网筛,备用。

土壤pH采用pH计测定;土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[14];土壤Cu、Zn、Pb、Cd和Ni用HF-HNO₃-HClO₄消解后,采用原子吸收分光光度计测定^[15]。

1.3 土壤重金属污染评价方法

1.3.1 单项污染指数法 单项污染指数(P_i)能对土壤中某一重金属的污染程度进行评价,计算公式^[16]:

$$P_i = C_i/S_i,$$

式中, C_i 为重金属*i*的实测质量分数,mg·kg⁻¹; S_i 为重金属*i*的评价参比值,mg·kg⁻¹。本研究选用广东省土壤背景值^[17]以及国家土壤环境质量标准(I级)^[18]作为污染评价的参比值(表2)。 $P_i \leq 1$ 时,土壤未受到重金属的明显影响; $P_i > 1$ 时,土壤受到重金属污染, P_i 值越大,表示土壤受重金属污染的程度越大^[19]。

表2 土壤重金属污染评价参比值

Table 2 Evaluation reference values of soil heavy metal pollution $w/(mg \cdot kg^{-1})$

指标	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
广东省土壤背景值 ^[17]	17.65	49.71	35.87	0.094	17.80
国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	35.00	100.00	35.00	0.200	40.00

1.3.2 内梅罗综合污染指数法 内梅罗综合污染指数(P_N)能更全面地对重金属污染进行累积性综合评价,其计算公式^[16]:

$$P_N = \sqrt{(P_{i,ave}^2 + P_{i,max}^2)/2},$$

式中, $P_{i,ave}$ 、 $P_{i,max}$ 分别为土壤重金属*i*的单项污染指数法评价结果的平均值和最大值。土壤重金属污染程度依据内梅罗综合污染指数法评价结果划分为5个等级: $P_N \leq 0.7$ 时,土壤污染等级为安全; $0.7 < P_N \leq 1.0$ 时,土壤污染等级为警戒级; $1.0 < P_N \leq 2.0$ 时,土壤为轻度污染; $2.0 < P_N \leq 3.0$ 时,土壤为中度污染; $P_N > 3.0$ 时,土壤为重度污染^[19]。

1.3.3 Hakanson潜在生态风险指数法 Hakanson潜在生态风险指数^[20]能综合反映土壤重金属对环境的潜在影响及生态危害。其中,单一重金属潜在生态风险系数(E_i)的计算公式^[21]:

$$E_i = T_r^i C_i/S_i,$$

式中: T_r^i 为第*i*种重金属的毒性系数; C_i 为第*i*种重金属的实测质量分数,mg·kg⁻¹; S_i 同“1.3.1”。依据徐争启等^[22]的研究结果,重金属毒性系数(T_r^i):

Zn为1,Cd为30,Cu、Ni和Pb为5。多种重金属潜在生态风险指数(RI)的计算公式^[23]:

$$RI = \sum E_i,$$

E_i 和RI的分级标准^[24]如表3所示。

表3 Hakanson潜在生态风险指数法的危害分级标准

Table 3 Harm classification criterion of Hakanson potential ecological risk index method

危害分级	E_i	RI
轻微	<40	<150
中等	40~80	150~300
强	80~160	300~600
很强	160~320	>600
极强	>320	

1.4 数据分析

所有数据均采用Excel进行处理,用SPSS 17.0进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 森林土壤重金属的描述性统计分析

5种林分土壤中,Cu、Zn、Pb、Cd和Ni的质量分数分别为12.85、19.17、9.45、0.02和7.81 mg·kg⁻¹(表4),但均未超过广东省土壤背景值^[17];变异系数表现为Ni最大(76.97%),Zn最小(57.86%);5种林分的pH在3.62~6.42之间,土壤均呈酸性。

表4 土壤理化指标及重金属含量统计特征

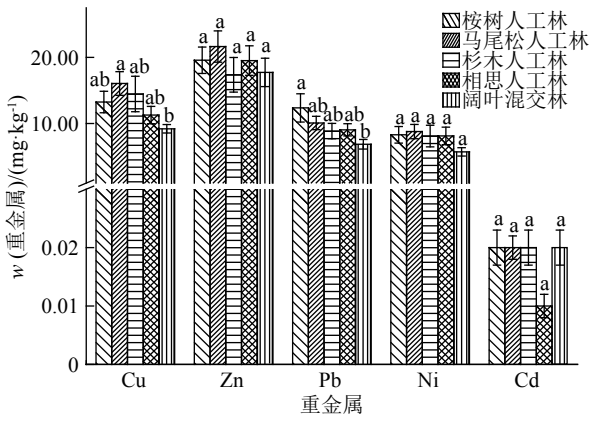
Table 4 Statistical characteristics of soil physicochemical indicators and heavy metal contents

项目	pH	w (有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w (mg·kg ⁻¹)				
			Cu	Zn	Pb	Cd	Ni
最小值	3.62	1.66	2.42	3.65	1.74	0.001	1.68
最大值	6.42	51.53	60.25	54.70	46.43	0.070	37.83
平均值	4.25	23.67	12.85	19.17	9.45	0.020	7.81
标准差	0.39	10.27	8.71	11.09	6.47	0.010	6.01
变异系数/%	9.12	43.39	67.78	57.86	68.51	72.88	76.97

不同林分土壤的重金属含量如图1所示,马尾松人工林中 w (Cu)为16.06 mg·kg⁻¹,显著高于阔叶混交林,桉树人工林中 w (Pb)为12.37 mg·kg⁻¹,显著高于阔叶混交林,其余重金属含量在不同林分之间无显著差异。

2.2 森林土壤重金属含量及理化指标间的相关性

各林分土壤重金属含量与土壤pH、有机质的



同一重金属的不同柱子上方,凡是具有一个相同小写字母者表示该重金属在不同林分间差异不显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)

图 1 不同林分土壤重金属含量

Fig. 1 Heavy metal contents in different forest soils

关系如表 5 所示, 马尾松人工林的土壤 pH 与 Zn 含量之间存在显著的正相关关系; 杉木人工林土壤 pH 与 Zn 和 Ni 含量之间存在极显著的正相关关系

($P<0.01$); 其他林分土壤 pH 与重金属含量之间不存在显著的相关性 ($P>0.05$)。桉树人工林土壤有机质与 Cd 含量之间存在显著的正相关关系; 马尾松人工林土壤有机质与 Cu 含量之间存在显著的负相关关系; 阔叶混交林土壤有机质与 Cd 含量之间存在极显著的正相关关系。

不同林分土壤重金属含量之间既存在相关性又存在一定的差异。土壤重金属含量之间的相关性在 4 种人工林中较为显著, 尤其是杉木人工林, 除 Cu 与 Pb、Cd 含量之间以及 Cd 与 Zn 含量之间的相关性不显著外, 其余重金属含量两两之间均呈显著或极显著相关性。阔叶混交林中仅 Cu 与 Pb 含量之间具有极显著相关性。

2.3 森林土壤重金属生态危害评价

2.3.1 不同林分重金属污染评价 基于不同参比值^[17-18]的各林分重金属污染评价结果(表 6)表明, 阔叶混交林中 Cu、Pb 和 Ni 的单项污染指数均相应

表 5 不同林分土壤重金属含量及理化指标间的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients between heavy metal contents and physico-chemical indicators in different forest soils

林分	重金属	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	pH	有机质
桉树人工林	Cu	1	0.708**	0.254	0.285	0.398	-0.213	0.106
	Zn		1	0.381	0.241	0.604**	-0.325	0.06
	Pb			1	0.633**	0.123	-0.147	0.363
	Cd				1	0.256	-0.323	0.425*
	Ni					1	-0.218	0.066
马尾松人工林	Cu	1	0.574**	0.188	-0.025	0.710**	0.401	-0.486*
	Zn		1	0.301	0.060	0.769**	0.459*	-0.107
	Pb			1	0.342	0.149	0.121	-0.149
	Cd				1	0.025	-0.205	0.141
	Ni					1	0.297	-0.171
杉木人工林	Cu	1	0.491*	0.271	0.128	0.553**	0.251	-0.183
	Zn		1	0.590**	0.330	0.583**	0.707**	0.051
	Pb			1	0.650**	0.617**	0.401	0.085
	Cd				1	0.498*	0.374	0.114
	Ni					1	0.594**	-0.208
相思人工林	Cu	1	0.192	0.008	-0.226	0.656**	0.251	-0.006
	Zn		1	0.314	0.461*	0.412*	0.394	0.123
	Pb			1	0.605**	0.21	0.389	0.027
	Cd				1	-0.068	0.322	0.214
	Ni					1	0.391	0.027
阔叶混交林	Cu	1	0.299	0.577**	0.114	0.171	0.124	0.062
	Zn		1	0.16	-0.122	-0.018	-0.097	0.038
	Pb			1	0.106	0.153	0.196	0.388
	Cd				1	-0.07	-0.353	0.524**
	Ni					1	0.316	-0.06

1)*和**分别表示0.05和0.01水平上显著相关(Pearson法)

低于其他林分类型, 马尾松人工林 Cu、Zn 和 Ni 的单项污染指数均高于其他林分类型。各林分土壤重金属单项污染指数均表现为 Cu 最大 Cd 最小, 各林分 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 的单项污染指数均小于 1, 污染等级均为清洁, 表明 5 种林分土壤均未受到重金属的明显影响。内梅罗综合污染指数排序为: 马尾松人工林>杉木人工林>桉树人工林>相思人工林>

阔叶混交林。除马尾松人工林在以广东省土壤背景值^[17]作为参比值时综合污染等级表现为警戒级外, 其余 4 种林分的综合污染等级均表现为安全。

2.3.2 不同林分重金属潜在生态风险评价 如表 7 所示, 不同参比值^[17-18]下, 各林分单一土壤重金属潜在生态风险系数 (E_i) 均为 Cd 最大 Zn 最小, 评价结果均为轻微潜在生态风险; 不同林分多种土壤

表 6 不同林分土壤重金属污染评价

Table 6 Pollution assessments of heavy metals in different forest soils

林分	参比值	单项污染指数(P_i)					内梅罗综合污染指数(P_N)	综合污染等级
		Cu	Zn	Pb	Cd	Ni		
桉树人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	0.75	0.39	0.34	0.17	0.47	0.61	安全
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.38	0.20	0.35	0.08	0.21	0.32	安全
马尾松人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	0.91	0.44	0.28	0.18	0.49	0.72	警戒级
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.46	0.22	0.29	0.08	0.22	0.37	安全
杉木人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	0.82	0.35	0.25	0.19	0.46	0.65	安全
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.41	0.17	0.25	0.09	0.20	0.33	安全
相思人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	0.64	0.39	0.25	0.14	0.46	0.52	安全
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.32	0.20	0.26	0.06	0.20	0.27	安全
阔叶混交林	广东省土壤背景值 ^[17]	0.52	0.36	0.19	0.18	0.32	0.43	安全
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.26	0.18	0.20	0.08	0.14	0.22	安全
平均值	广东省土壤背景值 ^[17]	0.73	0.39	0.26	0.17	0.44	0.59	安全
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	0.37	0.19	0.27	0.08	0.19	0.30	安全
单项污染等级	广东省土壤背景值 ^[17]	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁		
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁		

表 7 不同林分土壤重金属的 Hakanson 潜在生态风险评价

Table 7 Hakanson potential ecological risk evaluations of heavy metals in different forest soils

林分	参比值	单一重金属潜在生态风险系数(E_i)					多种重金属潜在生态风险指数(RI)	RI评价结果
		Cu	Zn	Pb	Cd	Ni		
桉树人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	3.76	0.39	1.72	5.03	2.33	13.23	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	1.89	0.20	1.77	2.36	1.04	7.26	轻微
马尾松人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	4.55	0.44	1.41	5.42	2.47	14.28	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	2.29	0.22	1.44	2.55	1.10	7.60	轻微
杉木人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	4.10	0.35	1.23	5.72	2.28	13.68	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	2.07	0.17	1.27	2.69	1.01	7.21	轻微
相思人工林	广东省土壤背景值 ^[17]	3.19	0.39	1.26	4.07	2.28	11.20	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	1.61	0.20	1.29	1.91	1.02	6.03	轻微
阔叶混交林	广东省土壤背景值 ^[17]	2.61	0.36	0.96	5.33	1.61	10.86	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	1.32	0.18	0.98	2.51	0.72	5.70	轻微
平均值	广东省土壤背景值 ^[17]	3.64	0.39	1.32	5.11	2.19	12.65	轻微
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	1.84	0.19	1.35	2.40	0.98	6.76	轻微
E_i 评价结果	广东省土壤背景值 ^[17]	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微		
	国家土壤环境质量标准(I级) ^[18]	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微		

重金属潜在生态风险指数 (RI) 表现为马尾松人工林最高而阔叶混交林最低, 均存在轻微潜在生态风险。

3 讨论与结论

3.1 森林土壤重金属含量特征

森林土壤重金属元素含量与其来源、种类和土壤的立地条件及理化性质有很大关系^[21, 25]。本研究中的土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 和 Ni 质量分数 (12.85、19.17、9.45、0.02 和 7.81 mg·kg⁻¹), 除 Cu 外均低于湖北省 3 种森林类型的相应重金属质量分数 (12.77、33.92、16.19、0.16、20.63 mg·kg⁻¹)^[19], 且 Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量均低于东莞市 4 种人工林的相应重金属质量分数 (22.67、50.76、48.10、0.08 mg·kg⁻¹)^[26], 而与广州市帽峰山森林公园相应重金属质量分数 (6.99、32.95、3.86、0.135 mg·kg⁻¹) 相比, 则有高有低^[27]。变异系数表现为 Ni 最大 Zn 最小, 且 5 种重金属含量的极差均较大, 表明土壤重金属存在较明显的空间分布差异, 这与前人的研究结果一致^[11]。

3.2 森林土壤重金属来源及与理化指标间的相关性

土壤中的重金属既来源于土壤母质, 也受人类活动的影响^[28], 相同来源的重金属间往往存在一定的相关性, 因此通过分析处在同一环境下不同林分类型土壤重金属含量之间的相关性可以推测其来源^[29]。具有显著相关性的重金属往往具有较好的伴生关系^[30], 本研究发现, 土壤重金属之间的相关性在人工林中较自然林更为显著, 尤其是杉木人工林中除了 Cu 与 Pb、Cd 含量之间以及 Cd 与 Zn 含量之间的相关性不显著外, 其余重金属含量之间均存在显著或者极显著的正相关关系, 而阔叶混交林中除了 Cu 与 Pb 含量之间呈现显著的正相关关系外, 其余重金属含量之间的相关性均不显著, 说明人工林中重金属来源相同的可能性更大, 一方面可能由于人工林中的土壤样品成土母质相同, 另一方面可能与人工林中的重金属引入方式相似有关, 或由于人工林的土壤发生化学过程相近。

土壤理化性质对重金属累积及吸附作用的影响较为明显^[31-32], 其中土壤有机质对重金属具有吸附性^[21], 因此土壤重金属含量随着有机质含量的增加而增加^[33], 且 pH 越高土壤对重金属离子的吸附能力越大^[34]。本研究发现, 有机质含量与桉树人工林和阔叶混交林中的 Cd 含量有显著和极显著的正相关性, 与马尾松人工林中的 Cu 含量有显著的负

相关性, 与其他重金属间则无显著相关性, 这与孙慧珍等^[1]的研究结果不同; pH 除了与马尾松人工林中的 Zn 含量及杉木人工林中的 Zn 和 Ni 含量有显著或极显著的正相关性以外, 与其他林分的重金属含量间的相关性均不显著。这进一步说明了重金属与土壤理化性质之间关系的复杂性。

3.3 森林土壤重金属污染与潜在生态风险评价

基于广东省土壤背景值^[17]及国家土壤环境质量标准 (I 级)^[18]的单项污染指数法的评价结果均显示, 5 种重金属污染等级均达到清洁程度, 其中 Cu 的单项污染指数最高, Cd 的单项污染指数最低。而单一重金属潜在生态风险法的评价结果则显示, 5 种重金属均存在轻微的潜在生态风险, 其中 Cd 的潜在生态风险系数最高, 而 Zn 的最低。不同的评价方法得出的重金属污染评价结果不同, 这是由于单项污染指数法通过单项重金属元素的含量进行土壤污染评价, 而重金属潜在生态风险法却充分考虑了不同重金属的生物毒性, 即加入了毒性系数 (T_r^i), 从而能对重金属污染进行更综合、全面的评价^[35-36]。重金属潜在生态风险评价法中, Cd 的毒性系数较大, 而 Zn 的较小, 同时 Cd 对人体及植物具有明显的毒害作用, 而 Zn 则是人体和植物的必需微量元素^[36], 因此在通过单项污染指数法计算出 Cd 的污染等级达到清洁程度的情况下, Cd 在生态系统中仍存在较大的潜在生态风险。

本文结果显示, 除重金属 Cd 外, 人工林中的重金属含量均高于自然林中的重金属含量, 其中马尾松人工林中的 Cu 含量显著高于阔叶混交林中的 Cu 含量, 桉树人工林的 Pb 含量显著高于阔叶混交林中的 Pb 含量。且人工林中的土壤重金属内梅罗污染指数及潜在生态风险指数均高于自然林, 表现为: 马尾松人工林>杉木人工林>桉树人工林>相思人工林>阔叶混交林。其原因一方面可能是人工林受到的人为重金属污染程度较高, 而自然林较低, 或者阔叶树种具有更大的能吸收、富集更多重金属元素的叶面积^[30], 而针叶树种却相反, 因此导致马尾松人工林的土壤重金属累积程度较高; 另一方面可能是与人工林相比, 自然林具有更丰富的树种组成、更高的植物多样性及更复杂的群落结构, 因此自然林对土壤重金属具有更强的吸收固定作用; 此外, 林分的树种组成差异也可能对土壤重金属累积产生一定的影响, 由较多树种种类组成的自然林可能其生物学特性改变了土壤理化性质, 因此最终导致了与人工林中重金属的吸附与累积效果不同的结果。

参考文献:

- [1] 孙慧珍,陆小静,陈明月,等. 哈尔滨市不同类型人工林土壤重金属含量[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 614-620.
- [2] JEROME O N. A history of global metal pollution[J]. *Science*, 1996, 272(5259): 223-224.
- [3] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学报, 2011, 30(5): 889-896.
- [4] CHEN T B, WONG M H, WONG J W C, et al. Heavy metal distribution in surface soils of Hongkong and the assessment of the soil environmental quality: A case study[J]. *Environ Pollut*, 1997, 96(10): 61-68.
- [5] ABRAHAMS P W. Soils: Their implications to human health[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 291(1): 1-32.
- [6] WEI X, GAO B, WANG P, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2015, 112(5): 186-192.
- [7] 冯乙晴,刘灵飞,肖辉林,等. 深圳市典型工业区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(6): 1051-1058.
- [8] 宁翠萍,李国琛,王颜红,等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 487-495.
- [9] SUN Y, ZHOU Q, XIE X, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *J Hazard Mater*, 2010, 174(1/2/3): 455-462.
- [10] 李梅,吴启堂,李锐,等. 佛山市郊污灌菜地土壤和蔬菜的重金属污染状况与评价[J]. 华南农业大学学报, 2009, 30(2): 19-21.
- [11] 李姗姗,曹广超,石平超,等. 青岛城区土壤重金属元素空间分布及其现状评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(1): 112-117.
- [12] 林文杰. 莲花山钨矿区土壤重金属污染与理化特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 232-236.
- [13] 王大鹏,王文斌,郑亮,等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 698-704.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] 李祚泳,丁晶,彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] 广东省环境监测中心站. 广东省土壤环境背景值数据集[R]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 中华人民共和国环境保护部. 土壤环境质量国家标准: GB 15618-1995[S]. 北京: 中国环境出版社, 1995.
- [19] 马军,刘爱琴,侯晓龙,等. 福州城市边缘区森林土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 149-153.
- [20] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [21] 楚春晖,余宇晨,余济云,等. 亚热带不同森林类型的土壤重金属空间分布特征及其潜在生态风险[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 258-263.
- [22] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [23] 方晰,唐志娟,田大伦,等. 长沙城市森林土壤7种重金属含量特征及其潜在生态风险[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7595-7606.
- [24] 丁振华,贾洪武,刘彩娥,等. 黄浦江沉积物重金属的污染及评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(2): 64-66.
- [25] MANTA D S, ANGELONE M, BELLANCA A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. *Sci Total Environ*, 2002, 300(1/2/3): 229-243.
- [26] 欧芷阳,苏志尧,朱剑云. 东莞市4种人工林土壤重金属含量的特征及评价[J]. 西部林业科学, 2013, 42(6): 38-44.
- [27] 潘勇军,陈步峰,肖以华,等. 广州市城市森林土壤重金属污染状况及其评价[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 210-215.
- [28] JEROME O N, JOZEF M P. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals[J]. *Nature*, 1988, 333(6169): 134-139.
- [29] ROBERTSON D J, TAYLOR K G, HOON S R. Geochemical and mineral magnetic characterisation of urban sediment particulates, Manchester, UK[J]. *Appl Geochem*, 2003, 18(2): 269-282.
- [30] 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.
- [31] VANDECASTEELE B, QUATAERT P, TACK F M G. Uptake of Cd, Zn and Mn by willow increases during terrestrialisation of initially ponded polluted sediments[J]. *Sci Total Environ*, 2007, 380(1/2/3): 133-143.
- [32] 卢瑛,龚子同,张甘霖,等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 123-126.
- [33] 许超,夏北成,何石媚,等. 大宝山矿山下游地区稻田土壤重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(3): 122-127.
- [34] 乔冬梅,齐学斌,庞鸿宾,等. 不同pH值对重金属Pb²⁺形态的影响研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 173-176.
- [35] 徐燕,李淑芹,郭书海,等. 土壤重金属污染评价方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4615-4617.
- [36] 徐鸿志,常江. 安徽省主要土壤重金属污染评价及其评价方法研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(2): 411-415.

【责任编辑 李晓卉】