

贵阳花溪区石灰土林地土壤重金属 含量特征及其污染评价

宁晓波^{1,2}, 项文化^{1,3,*}, 方 晰^{1,3}, 闫文德^{1,4}, 邓湘雯^{1,4}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 贵州省林业厅, 贵阳 550001;

3. 亚热带森林生态湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410004; 4. 城市森林生态湖南省重点实验室, 长沙 410004)

摘要:选取贵阳市花溪区典型石灰土林地土壤作为研究对象, 分析了林地石灰岩和土壤中 7 种重金属 (Cu、Zn、Mn、Cd、Ni、Pb、Co) 的含量特征, 以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值为评价标准进行林地土壤重金属污染评价和潜在生态风险评价。结果表明: 林地石灰岩以 Pb 的平均含量 ($40.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最高, Zn 的 ($5.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 最低, 7 种重金属平均含量高低顺序为: $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn}$; 林地土壤中以 Mn 的平均含量 ($451.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上) 最高, Cd 的 ($2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下) 最低, 7 种重金属含量的变异系数在 8.57% ~ 63.10% 之间, Zn 的平均含量明显低于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值, Cu、Mn、Cd、Pb、Ni、Co 的平均含量高于或接近于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值。Cu、Zn、Mn、Ni、Co、Ni 与 Pb、Cd 与 Pb、Cd 与 Co 来源相同的可能性较大, 而 Cd 与 Cu、Ni、Pb 与 Mn、Cu、Co 的来源不同; 石灰土偏碱性, 富含 Ca、Mg 元素, 有利于重金属 Cd、Pb 的累积。单因子污染指数和多因子综合指数(内梅罗指数法)与 Hakanson 潜在生态危害指数的评价结果一致, 林地土壤重金属综合污染指数在 3.67 以上, 达到重污染程度, 以 Cd 的污染指数(4.94 以上)最高, 污染程度最为严重, 其次是 Pb(1.82 以上), Zn、Mn 污染程度最低, 林地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)为 173.75 以上, 为中度生态危害程度, 产生最大生态危害的是 Cd, 其次是 Pb、Ni、Co、Cu, 危害程度最小的是 Mn、Zn, 在相同的成土母岩和人为活动影响下, 无林地土壤重金属的综合污染指数和潜在生态危害指数均明显高于有林地。

关键词: 贵阳花溪区; 石灰土; 林地; 重金属; 相关分析; 污染评价; 潜在生态危害评价

文章编号: 1000-0933(2009)04-2169-09 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district, Guiyang City

NING Xiao-Bo^{1,2}, XIANG Wen-Hua^{1,3,*}, FANG Xi^{1,3}, YAN Wen-De^{1,4}, DENG Xiang-Wen^{1,4}

1 Central South University of Forestry and Technology Changsha 410004, China

2 Forestry Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550001, China

3 Key Laboratory of Subtropical Forest Ecology, College of Hunan Province, Changsha 410004, China

4 Key Laboratory of Urban Forest Ecology of Hunan Province Changsha 410004, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4): 2169 ~ 2177.

Abstract: The concentrations of heavy metals (Cu, Zn, Mn, Cd, Ni, Pb and Co) were measured in limestone forests in Huaxi district, Guiyang, and assessment of heavy metal pollution was conducted by comparisons of our results with the background values of heavy metals of limestone soils in both Guizhou Province and in China. The results showed that the abundance of heavy metals in the limestone rocks was in the order $\text{Pb} (40.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}) > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn} (5.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$. In the limestone soils, Mn ($> 451.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) had the highest concentration and Cd ($< 2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) had the lowest one of all test metals, with variation coefficients ranged from 8.57% to 63.10% for the seven

基金项目: 国家科技部公益性研究资助项目(2007415); 国家野外科学观测研究站资助项目(20060515, 20070822); 国家林业局 948 资助项目(200372); 国家林业局重点资助项目(200508, 200611, 200617, 2007R23); 湖南省科技厅重点资助项目(2006SK4059, 2007SK4030)

收稿日期: 2008-10-26; 修订日期: 2009-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiangwh2005@163.com

heavy metals. On average, the concentration of Zn ($< 55.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) was significantly lower than the background values of heavy metals of limestone soils in Guizhou Province ($82.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and in China ($110.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), respectively; while the contents of Cu, Mn, Cd, Pb, Ni, Co were higher than or similar with these background values. Correlation analyses showed that the five heavy metals (Cu, Zn, Mn, Ni and Co) came from the same recourses, and so did of Ni and Pb, Cd and Pb, and Cd and Co. Because of limestone soils with high contents of Ca and Mg elements, Cd and Pb were accumulated in the study sites. Comprehensive pollution index indicated the forest-lands were seriously polluted by heavy metals, with the highest index value of Cd (> 4.94), next to Pb (> 1.82), and the lowest values of Zn and Mn. Ecological risk index showed that Cd had the highest potential to cause ecological damage in study area, followed by the order Pb $>$ Ni $>$ Co $>$ Cu $>$ Mn $>$ Zn. Our results indicated that both comprehensive pollution index and ecological risk index were considerably higher in bare-lands than forest-lands.

Key Words: Huaxi district in Guiyang; limestone soil; forest-lands; heavy metals; correlation analysis; pollution assessment; potential ecological risk assessment

土壤是连接大气圈、水圈、生物圈以及岩石圈的纽带,具有净化污染物质的功能。在自然情况下,土壤中重金属主要来源于母岩和残落的生物物质。然而随着城市化、工业化、矿产资源的开发利用以及大量化学产品的广泛使用,含重金属的污染物通过各种途径进入土壤,造成土壤重金属污染日趋严重,成为了经济、社会与环境协调发展凸现的生态问题。土壤中的重金属污染物不仅具有隐蔽性、不可逆性等特点,而且可经水、植物等介质进入人体,直接危害人体特别是儿童的健康,还会通过污染食物、大气和水环境间接影响环境质量而危害人体健康^[1],威胁着人类的生存和发展。传统上,土壤学的研究对象主要集中在农业土壤,对其重金属污染也研究较多。而城市土壤重金属污染直到最近才成为国际学术界关注的热点问题^[2~4]。目前,国内正逐渐开展研究城市土壤重金属污染物的来源和行为、污染程度的评价、对人体健康的影响及其相关修复技术等,城市土壤重金属污染调查与评价以及其生态效应的研究不断涌现^[5~11]。研究表明,贵阳市土壤重金属污染已达轻度生态危害水平以上^[12]。城市森林是城市生态环境的重要组成部分,在城市生态平衡中起着重要的作用,已引起众多国家的关注和重视,成为城市生态学的研究热点之一。然而,强烈的人类活动影响下的城市森林土壤重金属含量特征及其污染评价的研究仍极少见报道^[13,14]。贵阳市被称为“森林之城”,行政区域内森林覆盖率为 34.79%^[15]。而地处贵阳市南部城区的花溪区,素有“云贵高原明珠”的美誉,是贵州著名的风景旅游区,繁忙的旅游、生产生活活动强烈影响着该区土壤的组成成分及含量。为此,本文以贵阳市花溪区石灰林地土壤作为研究对象,分析林地土壤重金属的含量特征以及土壤化学性质对其含量的影响,并以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类重金属背景值为评价标准,揭示该区林地土壤重金属污染及生态危害程度,为城市森林土壤管理和城市土壤环境重金属污染防治提供科学依据。

1 研究区概况

贵阳市位于贵州省中部,地理位置为 $26^{\circ}11' \sim 26^{\circ}34' \text{N}$, $106^{\circ}27' \sim 106^{\circ}52' \text{E}$,地处黔中山原盆地,最高海拔 1655.9m,最低 999m,属亚热带季风湿润气候,年平均温度 15.2°C ,年平均降水量为 1178mm,年平均日照时数为 1214.6 小时,相对湿度为 85%。具有冬无严寒、夏无酷暑、气候温和、雨量充沛、雨热同季的特点。母岩以碳酸盐岩(石灰岩)为主,土壤为石灰土,占全市面积的 85%。地带性植被为中亚热带湿润常绿阔叶林,自然植被主要以壳斗科(Fagaceae)、樟科(Lauraceae)、山茶科(Theaceae)为主,次生植被有杨梅(*Myrica rubra* (Lour.) S. et z.)、光皮桦(*B. luminifera* H. Winkl.)、柏木(*C. funebris* Endl.)、女贞(*C. lucidum* Ait.)、桃(*P. persica* (L.) Batsch.)、李(*P. salicina* Lindl.)、火棘(*P. fortuneana* (Maxim) Li)、粗叶悬钩子(*R. alceaefolius* Poir)等。本研究试验地设于贵阳市花溪区,在全区林地调查的基础上,在典型石漠化石灰土区选择母岩、土壤条件一致的山坡设置有林地和无林地试验样地各 3 块,面积均为 667 m^2 ,进行植物群落和土壤剖面调查。

无林地以五节芒 *Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb.、蕨类 *Lygodium japonicum*、过路黄 *L. christinae*

Hance、悬钩子 *R. palmatus* Thunb.、葛藤 *Pueraria Lobota*、火棘 *P. fortuneana* (Maxim.) Li、金樱子 *R. lavigata* Michx.、葶草 *Arthraxon hispidus*、白茅 *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. var. *major* (Nees) C. E. hubb.、野菊 *Dendranthema indicum* (L.) Des Moul.、一年蓬 *Erigeron annuus* (L.) Pers.、拔葵 *S. china* L. 等草本植物为主,植被覆盖度在 20 ~ 30% 之间。

有林地主要有柏木 *C. funebris* endl.、冬青 *Ilex purpurea*、构树 *B. papyrifera* (L.) L. *Her exvent*、朴树 *Celtis tetyandra*、棕榈 *T. fortunei* (Hook. f.) *H. wendl*、五节芒 *Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb. 等植物,郁闭度为 0.8。

2 研究方法

2.1 土壤样品的采集

在 6 块样地内均按棋盘式布设 8 个采样点,每个采样点先按 0 ~ 10cm、10 ~ 20cm 分层分别采集土壤后再混合成 1 个土壤样品,共采样 48 个。土壤样品经室内风干后,过 20 目和 100 目筛备用。同时,采集林地内的石灰石样品,每块样地分别采集岩石样品 3 个,共 18 个,用木锤敲碎,过 20 目和 100 目筛备用。

2.2 化学分析方法

岩石、土壤 pH 值用 SJ-4A 型 pH 计测定;有机质用重铬酸钾氧化法测定;全 N 用半微量凯氏法测定;全 P 用碱熔-钼锑钒比色法测定;全 K 用碱熔-火焰光度法测定;Ca、Mg、Cu、Zn、Mn、Cd、Ni、Pb、Co 用酸溶法,采用 Hp3510 原子吸收分光光度计测定。

2.3 土壤重金属污染评价

评价方法采用单因子污染指数法和综合污染指数法。

单因子污染指数式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中, P_i 为土壤中 i 污染物的污染指数; C_i 为 i 种污染物的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为土壤的 i 污染物的背景值或对照值或标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

为全面反映各重金属元素对土壤的不同作用,突出高浓度重金属元素对环境质量的影响,采用内梅罗 (N. L. Neiow) 综合污染指数法,表达式如下:

$$P_{\text{综}} = \{ [(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2] / 2 \}^{1/2}$$

式中, $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤重金属元素中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤各污染指数的平均值。

国内对土壤重金属污染评价多采用 II 类土壤评价标准,主要适用于农田、蔬菜地、果园、牧场等,但有的重金属元素在《中国土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 中未作规定,为了能准确的反映研究区林地土壤重金属污染状况,本研究选用贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类重金属背景值作为评价标准。

目前国内暂时还没有确定林地土壤重金属元素污染评价的统一分级标准,本研究参照夏家淇^[16] 和中华人民共和国土壤环境质量标准^[17],提出单因子污染指数法分级标准和多项综合污染指数法分级标准,如表 1 所示。

表 1 土壤重金属污染等级划分标准

Table 1 The criterion of pollution grade of soil heavy metals

分级 Grade	单因子污染指数分级标准 Pollution index criterion of individual factor (P_i)		综合污染指数分级标准 Comprehensive pollution index criterion (P)	
	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade	污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution grade
1 级 1 grade	$P_i < 1$	清洁 Clean	$P \leq 0.7$	安全 Safe
2 级 2 grade	$1 \leq P_i < 2$	轻污染 Slight pollution	$0.7 < P \leq 1$	警戒 Warning
3 级 3 grade	$2 \leq P_i < 3$	中污染 Medium pollution	$1 < P \leq 2$	轻污染 Slight pollution
4 级 4 grade	$P_i \geq 3$	重污染 Heavy pollution	$2 < P \leq 3$	中污染 Medium pollution
5 级 5 grade			$P > 3$	重污染 Heavy pollution

2.4 潜在生态风险评价方法

为了进一步确定试验区林地土壤重金属可能存在的生态危害效应和反映特定区域的特殊性,本研究应用 Hakanson 潜在生态危害指数法^[18],以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值^[22]作为参比值对试验区林地土壤重金属潜在生态风险进行评价。

单种重金属的潜在生态危害系数(E_i)为: $E_i = T_r^i \times (C_i/C_{0i})$

式中, C_i 、 C_{0i} 、 T_r^i 分别为第 i 种重金属的实测含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、参比值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和毒性系数。毒性系数是根据陈静生^[18]计算出的 12 种重金属毒性系数(T_r^i): $\text{Mn} = \text{Zn} = 1$ 、 $\text{Pb} = \text{Ni} = \text{Co} = \text{Cu} = 5$ 、 $\text{Cd} = 30$ 。

某区域多个重金属的潜在生态危害指数 RI 为: $RI = \sum E_i$

根据 E_i 和 RI 值,参照沉积物(土壤)中重金属潜在生态危害系数、生态危害指数和污染程度的关系^[18],采用任华丽等人^[19]划分的潜在生态危害分级标准(表 2)。

表 2 Hakanson 潜在生态危害评价指标

Table 2 The potential ecological hazard assessment indices by Hakanson

生态危害 Ecological risk	轻微 Slight	中等 Medium	强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
E_i	<40	40 ~ 80	80 ~ 160	160 ~ 320	>320
RI	<90	90 ~ 180	180 ~ 360	360 ~ 720	>720

2.5 数据处理

采用 EXCEL、SPSS10.0 统计软件进行数据处理。

3 结果与分析

3.1 林地石灰岩、土壤重金属的含量及其相关性分析

3.1.1 林地石灰岩重金属的含量

由表 3 可以看出,有林地与无林地内的石灰岩中重金属含量差异不大,以 Pb 的平均含量最高,为 $40.21\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Zn 的最低,为 $5.78\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,两者相差近 7 倍,7 种重金属的平均含量高低顺序为: $\text{Pb} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Co} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Zn}$ 。本研究试验林地内石灰岩中 Pb($40.21\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Ni($39.12\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Co($15.45\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cd($5.86\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的平均含量明显高于我国东部石灰岩中 Pb($32\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Ni($3.8\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Co($1.9\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cd($0.08\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的含量,而 Mn($38.18\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cu($13.48\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Zn($5.78\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的含量却低于我国东部石灰岩中 Mn($112\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Cu($30\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、Zn($16\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的含量^[20]。

表 3 石灰岩中重金属元素含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Heavy metal concentrations in limestone

样地 Sites	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb	Co
无林地 Bare land	12.93	5.39	39.63	6.03	39.56	39.87	14.80
有林地 Forestland	14.56	6.56	35.28	5.51	38.22	40.87	16.76
平均值 Mean	13.48 ± 0.65	5.78 ± 0.60	38.18 ± 1.45	5.86 ± 0.22	39.12 ± 0.59	40.21 ± 1.64	15.45 ± 0.86

3.1.2 石灰土林地土壤重金属的含量

土壤中重金属的含量既与母岩及成土母质有密切的关系,又受到局部环境质量状况、地形和生物地球化学循环的深刻影响。由表 4 所示,林地土壤均以 Mn 的平均含量最高,达 $451.16\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,Cd 的最低,为 $2.87\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,Cu、Zn、Ni、Pb 和 Co 之间无数量级差异,林地土壤中 7 种重金属的变异系数在 8.57% ~ 63.10% 之间,表明林地土壤中重金属含量分布比较均匀,存在相似性。无林地、有林地土壤中 7 种重金属的平均含量由高到低排序略有所不同,无林地: $\text{Mn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cd}$,而有林地则为: $\text{Mn} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cd}$ 。方差分析结果(表 4)表明,无林地,有林地土壤 Cu、Zn 平均含量差异不显著($p > 0.05$),

有林地土壤 Mn、Co 平均含量极显著高于无林地, Cd、Ni、Pb 平均含量极显著低于无林地 ($p < 0.01$)。表明由不同植物种类组成的林地土壤对重金属吸附、累积产生较为明显的影响。

从表 4 还可以看出,除 Cd 外,林地土壤中其它 6 种重金属的含量明显高于林地石灰岩中相应重金属的含量,如 Mn 高出 11 倍以上, Cu、Zn、Ni、Pb、Co 分别高出 1.8、9.2、1.2、1.4、1.17 倍以上。这与陈静生^[20]和朱其清^[21]等人的研究结果基本一致。林地土壤中 Zn 的平均含量明显低于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类环境背景值^[22], Cu、Mn、Cd、Pb、Ni、Co 的含量却高于或接近于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类环境背景值^[22]。林地土壤 Cu ($14.53 \sim 55.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Zn ($8.27 \sim 92.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Ni ($27.17 \sim 99.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Pb ($42.47 \sim 99.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 含量均未超过我国土壤环境质量标准 (GB15618-1995) 中的Ⅲ级标准值^[23], 仅 Cd 含量 ($1.08 \sim 4.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 超过Ⅲ级标准 ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 表明该区石灰土基本上适用于林业用地,但在造林时应注意选择抗逆性强的乡土树种,如栎树 (*Koelreuteria paniculata*)^[24] 及富集 Cd 能力强的灌木植物,如绿珠藜 (*Chenopodium acuminatum*)、苘麻 (*Abutilon theophrasti*) 等,以降低 Cd 的污染。

表 4 石灰土地中重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 4 Heavy metal concentrations in limestone soils of two kinds of forest-lands

样地 Sites	项目 Item	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb	Co
无林地 Bare land	最大值 Max.	51.78	92.39	890.93	4.41	99.35	99.63	25.32
	最小值 Min.	14.36	8.27	40.92	1.76	27.17	55.96	12.34
	平均值 Mean	27.38	53.43	451.16	2.87	63.06	79.70	18.16
	标准差 Standard Deviation	12.40	30.53	284.66	0.65	36.43	13.39	3.38
	变异系数 Variation coefficient (%)	45.27	57.15	63.10	22.54	41.92	16.80	18.59
有林地 Forestland	最大值 Max.	55.24	71.12	901.04	2.76	55.45	72.23	24.98
	最小值 Min.	18.05	44.55	475.23	1.08	40.96	42.47	16.31
	平均值 Mean	24.51	55.16	630.87	1.64	46.64	58.75	20.29
	标准差 Standard Deviation	11.93	8.58	121.29	0.44	4.00	7.84	2.33
	变异系数 Variation coefficient (%)	48.69	15.56	19.23	26.82	8.57	13.33	11.48
显著性差异 Significance deviation		0.441	0.784	0.006	0.000	0.009	0.000	0.000
贵州省土壤背景值 Soil background value in Guizhou		25.70	82.40	591.00	0.133	33.70	29.30	17.10
全国石灰(岩)土类背景值 Limestone soil background value in China		28.80	110.20	812	0.332	43.50	32.20	18.30
土壤环境质量标准 (Ⅲ级) Soil environmental quality standard (Ⅲ grade)		400	500	—	1.0	200	500	—

3.1.3 石灰土地土壤重金属的含量相关性分析

同一区域土壤中重金属污染物的来源途径可以是单一的,也可以是多途径的。研究土壤中重金属的相关性可以推测重金属的来源是否相同,如果重金属含量有显著的相关性,说明其具有相同来源的可能性较大,若不存在显著的相关性则来源是不同的^[25]。分析结果(见表 5)表明,该区林地土壤中各种重金属元素间普遍存在相关性。Cu 与 Zn、Mn、Ni、Co 的相关性达显著水平 ($p < 0.05$), Zn 与 Mn、Ni 相关系数分别为 0.844、0.826,达极显著水平 ($p < 0.01$),与 Cd、Pb、Co 相关系数分别为 -0.320、0.454、0.546,达显著水平 ($p < 0.05$), Mn 与 Co 相关系数为 0.730,达极显著水平 ($p < 0.01$),与 Cd、Ni 相关系数为 -0.441、0.576,达显著水平 ($p < 0.05$), Cd 与 Pb、Co 相关系数分别为 0.415、-0.332,达显著水平 ($p < 0.05$)。Ni 与 Pb 相关系数为 0.712,达极显著水平 ($p < 0.01$),与 Co 相关系数为 0.412,达显著水平 ($p < 0.05$)。表明 5 种重金属 Cu、Zn、Mn、Ni、Co, Ni 与 Pb, Cd 与 Pb、Cd 与 Co 具有相同来源的可能性较大,而 Cd 与 Cu、Ni 不相关, Pb 与 Mn、Cu、Co 不相关,表明 Cd 与 Cu、Ni, Pb 与 Mn、Cu、Co 的来源不同。

3.2 石灰土地土壤重金属含量与土壤化学性质的相关性分析

土壤的化学性质如 pH 值、有机质和营养元素的含量对重金属的活性、生态毒性、环境迁移行为等起着重

要的影响。从表 6 可以看出, Cd、Pb 与 pH 值呈显著正相关性, 而 Mn、Co 与 pH 值呈显著负相关性 ($p < 0.05$), 而 Cu、Zn、Ni 与 pH 值的相关性不显著 ($p > 0.05$); Zn、Mn 与有机质呈正显著相关性, Cd、Pb 与有机质呈显著负相关性 ($p < 0.05$), Cu、Ni、Co 与有机质的相关性不显著 ($p > 0.05$)。Zn、Mn、Co 与 N、P、K 呈显著或极显著正相关性, 与 Ca、Mg 呈极显著负相关性, 而 Cd 与 N、P、K 呈显著或极显著负相关性, 与 Ca、Mg 呈极显著正相关性, Ni 与 N、Ca、Mg 呈负相关性, 与 P、K 呈正相关性, 但仅与 K、Ca、Mg 存在显著的相关性 ($p < 0.05$), Cu、Pb 与 N、K、P、Ca、Mg 的相关性都不显著 ($p > 0.05$)。表明土壤中 Ca、Mg 含量增加, 土壤碱化, 会引起土壤中 Cd、Pb 含量明显增加, 处于累积状态, Zn、Mn、Co 含量下降, 而提高土壤有机质、N、P、K 含量, 降低土壤碱性, 会引起土壤中 Zn、Mn、Ni、Co 含量增加, 特别是 Mn、Zn、Co 含量增加明显, 处于累积状态, Cd、Pb 含量明显下降, 而 Cu 含量变化不甚明显。

表 5 石灰土重金属间相关系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix of heavy metals in limestone soils

项目 Item	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb	Co
Cu	1	0.362 *	0.294 *	-0.148	0.493 *	0.159	0.256 *
Zn		1	0.844 **	-0.320 *	0.826 **	0.454 *	0.546 *
Mn			1	-0.441 *	0.576 *	0.134	0.730 **
Cd				1	0.009	0.415 *	-0.332 *
Ni					1	0.712 **	0.412 *
Pb						1	0.005
Co							1

* * 0.01 水平显著性相关 Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * 0.05 水平显著性相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

研究^[26]表明, 石灰岩富含 Ca、Mg 等元素, 成土过程中母岩受溶蚀作用不断释放出 Ca、Mg 等碱土金属元素的补给, 即便是在湿润的亚热带淋溶作用较强的环境下, 土壤仍呈碱性反应。近年来的研究也表明, Cd 是贵州省农业土壤的主要污染元素^[27,28]。可见石灰土偏碱性, 富含 Ca、Mg 元素, 导致重金属 Cd、Pb 在土壤中的累积, 而引起贵州省农业或林业土壤受 Cd 的污染, 除了存在相应的污染源外, 还与本地区的石灰土的成土母岩(质)及其化学元素成分和含量有密切的相关性。

表 6 石灰土化学元素含量的相关分析

Table 6 Correlations between nutrient concentrations in limestone soils

项目 Item	pH	有机质 OM	N	P	K	Ca	Mg
Cu	-0.073	-0.101	-0.093	-0.024	0.300	-0.265	-0.235
Zn	-0.122	0.445 *	0.490 *	0.608 **	0.661 **	-0.649 **	-0.638 **
Mn	-0.477 *	0.568 *	0.647 **	0.741 **	0.851 **	-0.831 **	-0.831 **
Cd	0.497 *	-0.550 *	-0.469 *	-0.635 **	-0.734 **	0.725 **	0.760 **
Ni	0.156	-0.055	-0.016	0.151	0.304 *	-0.311 *	-0.369 *
Pb	0.479 *	-0.367 *	-0.246	-0.217	-0.214	0.213	0.256
Co	-0.429 *	0.172	0.307 *	0.398 *	0.715 **	-0.765 **	-0.719 **

* * 0.01 水平显著性相关 Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * 0.05 水平显著性相关 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

3.3 石灰土林地土壤重金属污染评价

由表 7 可以看出, 以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值^[22]作为评价标准, 林地土壤重金属的综合污染指数在 3.67 以上, 达到了重污染程度。在相同的成土母岩和人为活动影响下, 无林地土壤重金属的综合污染指数明显高于有林地, 表明由林木树种组成的林地有利于净化土壤重金属污染。从单因子污染指数 (P_i) 来看, 以贵州省土壤背景值为评价标准时, 林地土壤中 Zn、Mn 的 $P_i < 1$, 未污染, 处于清洁水平, Cu、Ni、

Co 的 P_i 处于 1~2 之间,属于轻污染程度,Pb 的 P_i 处于 2~3 之间,属于中污染程度,Cd 的 $P_i > 3$,达到了重污染程度,污染指数达到 12.33 以上,污染指数的大小排序为: Cd > Pb > Ni > Cu > Co > Mn > Zn。以全国石灰(岩)土类背景值为评价标准时,林地土壤中 Cu、Zn、Mn 的 $P_i < 1$,属于清洁水平,Ni、Co 的 P_i 处于 1~2 之间,属于轻污染程度,Pb 的 P_i 处于 2~3 之间,属于中污染程度,Cd 的 $P_i > 3$,达到了重污染程度,污染指数达到 4.94 以上,污染指数的大小排序为: Cd > Pb > Ni > Co > Cu > Mn > Zn。可见,林地土壤 Cd 的污染指数最高,污染程度最为严重,其次是 Pb。

表 7 林地土壤重金属污染评价指数

Table 7 The pollution index of heavy metals in forest-lands soil

样地 Sites	评价标准 Evaluation standard	单因子污染指数 Pollution index of individual factor (P_i)							综合污染指数 Comprehensive pollution index (P)
		Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb	Co	
无林地 Bare land	贵州省土壤背景值 Soil background value in Guizhou	1.07	0.65	0.76	21.58	1.87	2.72	1.06	15.55
	全国石灰(岩)土类背景值 Limestone soil background value in China	0.95	0.48	0.56	8.64	1.45	2.48	1.00	6.31
有林地 Forestland	贵州省土壤背景值 Soil background value in Guizhou	0.95	0.67	1.07	12.33	1.38	2.01	1.19	8.94
	全国石灰(岩)土类背景值 Limestone soil background value in China	0.85	0.50	0.78	4.94	1.07	1.82	1.11	3.67

3.4 石灰土地土壤重金属的潜在生态风险评价

潜在生态风险评价结果(表 8)表明,以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值^[22]作为参比值时,林地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)为 173.75 以上,达到了中等生态危害程度。在相同的成土母岩和人为活动影响下,无林地土壤重金属潜在生态危害指数明显高于有林地,也表明由林木树种组成的林地能够减轻重金属生态危害程度。从潜在生态危害系数(E_i)来看,无论是以贵州省土壤背景值还是以全国石灰(岩)土类背景值^[22]作为参比值时,林地土壤以 Cd 的 E_i 最高,达到了极强生态危害程度,Pb、Ni、Cu、Co、Mn、Zn 均显示为轻微生态危害程度,其中 Mn、Zn 潜在生态危害系数均小于 1,危害程度最小。这与武永锋等^[12]人的研究结果相似。Cd 是一种有害的重金属物质,严重污染性元素,是生物非必要元素,但在生物圈中普遍存在。火山喷发、岩溶和元素 Cd 的自然浓集作用,它常常导致土壤 Cd 的高背景。人为地球化学的作用,包括采矿、冶炼、污灌和磷肥施用等工农业活动,导致土壤中 Cd 含量很高。由于 Cd 严重污染,使林地土壤重金属潜在的生态危害已达到了很强程度,所以要注意 Cd 的污染状况。

表 8 林地土壤重金属的潜在生态危害系数和潜在生态危害指数

Table 8 Potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index of heavy metals in forest-lands soil

样地 Sites	参比值 Consult value	潜在生态危害系数 Potential ecological hazard coefficient (E_i)							潜在生态 危害指数 Potential ecological risk index (RI)
		Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb	Co	
无林地 Bare land	贵州省土壤背景值 Soil background value in Guizhou	5.33	0.65	0.76	647.37	9.36	13.60	5.31	682.37
	全国石灰(岩)土类背景值 Limestone soil background value in China	4.75	0.48	0.56	259.34	7.25	12.38	4.96	289.72
有林地 Forestland	贵州省土壤背景值 Soil background value in Guizhou	4.77	0.67	1.07	369.92	6.92	10.03	5.93	399.31
	全国石灰(岩)土类背景值 Limestone soil background value in China	4.26	0.50	0.78	148.19	5.36	9.12	5.54	173.75

4 结论

林地内石灰岩以 Pb 的平均含量($40.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最高,Zn 的平均含量($5.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)最低,7 种重金属

平均含量的高低排序为: $Pb > Ni > Mn > Co > Cu > Cd > Zn$ 。

林地土壤以 Mn 的平均含量($451.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上)最高, Cd 的平均含量($2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下)最低, Cu、Zn、Ni、Pb 和 Co 之间无数量级差异, 7 种重金属的变异系数在 8.57% ~ 63.10% 之间。除 Cd 外, 林地土壤其它 6 种重金属平均含量明显高于林地内石灰岩相应重金属的平均含量。林地土壤 Zn 的平均含量低于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值, 而 Cu、Mn、Cd、Pb、Ni、Co 的含量高于或接近于贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值, 石灰土基本上适用于林业用地。

林地土壤中 7 种重金属元素间普遍存在相关性, Cu、Zn、Mn、Ni、Co、Ni 与 Pb, Cd 与 Pb, Cd 与 Co 同源的可能性较大。而 Cd 与 Cu、Ni, Pb 与 Mn、Cu、Co 的来源可能不同。

Cd、Pb 与 pH 值呈显著正相关性, 而 Mn、Co 与 pH 值呈显著负相关性。Cd、Pb 与有机质呈显著负相关性, 而 Zn、Mn 与有机质呈显著的正相关性。Zn、Mn、Co 与 N、P、K 呈显著或极显著的正相关性, 而与 Ca、Mg 呈极显著的负相关性, Cd 与 N、P、K 呈显著或极显著的负相关性, 与 Ca、Mg 呈极显著的正相关性。表明石灰土偏碱性, 富含 Ca、Mg 元素, 有利于重金属 Cd、Pb 的累积, 是导致贵州省土壤受 Cd 的污染原因之一。

采用单因子污染指数和多因子综合指数(内梅罗指数法)与 Hakanson 潜在生态危害指数所得出的结果是一致的。以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类元素背景值作为评价标准, 林地土壤重金属综合污染指数在 3.67 以上, 达到了重污染程度, 以 Cd 的污染程度最为严重, 其次是 Pb。以贵州省土壤背景值和全国石灰(岩)土类背景值作为参比值时, 林地土壤重金属潜在生态危害指数(RI)为 173.75 以上, 达到了中等生态危害程度, 产生最大生态危害的是 Cd, 其次是 Pb、Ni、Co、Cu, 危害程度最小的是 Mn、Zn。在相同的成土母岩和人为活动影响下, 无林地土壤重金属的综合污染指数和潜在生态危害指数均明显高于有林地, 表明由林木树种组成的林地有利于净化土壤重金属污染和减轻土壤重金属生态危害程度。

References:

- [1] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong. *Environmental Pollution*, 1997, 96: 61–68.
- [2] Stagliani W M, Doelman P, Salomons W, *et al.* Chemical time bombs: Predicting the unpredictable. *Environment*, 1991, 33 (4): 4–30.
- [3] Chen T B, Zheng Y M, Lei M, *et al.* Assessment of heavy metal pollution in surface soils of urban parks in Beijing, China. *Chemosphere*, 2005, 60(4): 542–551.
- [4] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, *et al.* Heavy metal in urban soil: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300: 229–243.
- [5] Guo P, Xie Z L, Li J, *et al.* Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 108–112.
- [6] Li Z P, Chen Y C, Yang X C, *et al.* Assessment of potential ecological hazard of heavy metals in urban soils in Chongqing City. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2006, 28 (2): 227–230.
- [7] Deng Q J, Song C R, Xie F, *et al.* Distribution and evaluation of heavy metals in cultivated soil of Guiyang. *Soil*, 2006, 38 (1): 53–60.
- [8] Lu Y, Gong Z T, Zhang G L, *et al.* Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 123–126.
- [9] Guan D S, Chen Y J, Yuan G B. Study on Heavy Metal Concentrations and the Impact of Human Activity on Them in Urban and Suburb Soils of Guangzhou. *Acta Sientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen*, 2001, 40(4): 93–96.
- [10] Wu X M, Li L Q, Pan G X, *et al.* Soil Pollution of Cu, Zn, Pb and Cd in Different City Zones of Nanjing. *Environmental Science*, 2003, 24(3): 105–111.
- [11] Wu Q H, Dai T G, Fang J W. *et al.* Sources of heavy metals in soils of Changsha, Zhuzhou and Xiangtan, Hunan, China. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(11): 1453–1458.
- [12] Wu Y F, Liu C Q, Tu C L. The heavy metal pollution in urban soils of Guiyang city and their potential ecological hazard assessment. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(3): 254–257.
- [13] Zeng F, Zhang J C. Advances in the Research on Movement Pattern of Heavy Metal Ions in Forest Ecosystem. *World Forestry Research*, 2001, 14 (2): 16–22.
- [14] Pan Y J, Chen B F, Xiao Y H, *et al.* Heavy metal pollution status and evaluation of urban forest soils in Guangzhou. *Ecology and Environment*,

2008, 17(1): 210—215.

- [15] General situation of Guiyang. <http://www.cbiq.com>-Guangzhou daily- Government network of Guiyang, 2004.
- [16] Xia J Q. The Detail Explanation of Soil Environmental Quality Standards. Beijing: China Environment Science Press, 1996.
- [17] GB15618-1995. Soil Environment Quality Standards of People's Republic of China. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [18] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112—115.
- [19] Ren H L, Cui B S, Bai J H, *et al.* Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani Terrace core zone and assessment on its potential ecological risk. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1625—1634.
- [20] Chen J S, Hong S, Deng B S, *et al.* Geographical Tendencies of Trace Element Contents in Soils Derived from Granite, Bassalt and Limestone of Eastern China. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(3): 161—167.
- [21] Zhu Q Q, Yin C L, Tang L H, *et al.* Content and distribution of trace elements in limestone soils of China. *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(1): 58—69.
- [22] Chen S Y. Environmental Impact Assessment. Beijing: Higher Education Press, 2002. 160—162.
- [23] Cui S, Zhou Q X, Chao L, *et al.* Absorption and accumulation of heavy metals by plants around a smelter. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(3): 512—515.
- [24] Dalun Tian, Wenhua Xiang, Wende Yan, *et al.* Biological cycles of mineral elements in a young mixed stand in abandoned mining soils. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2007, 49(9): 1284—1293.
- [25] Zhu J J, Cui B S, Yang Z F, *et al.* Spatial distribution and variability of heavy metals contents in the topsoil along roadside in the Longitudinal Range-Gorge Region in Yunnan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 146—153.
- [26] Zhang M, Zhang F H. Karst forest soil of Karst in Maolan. Science Investigation Report of Karst forest in Maolan. In: Zhou Z X eds. Guiyang: Guizhuo People Press, 1987. 111—123.
- [27] Liu Y S, He T B, Luo H B, *et al.* Pollution of Soil Heavy Metal and Its Evaluation of Farm land in Wudang District of Guiyang. *Chongqing Environmental Sciences*, 2003, 25(10): 42—45.
- [28] Song C R, He J L, Tan H, *et al.* Primary Appraisal for Heavy Metals Pollution in Farm Soils of Guizhou Province. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33(2): 13—16.

参考文献:

- [5] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价. *地理科学*, 2005, 25(1): 108~112.
- [6] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价. *西南农业学报(自然科学版)*, 2006, 28(2): 227~230.
- [7] 邓秋静, 宋春然, 谢锋, 等. 贵阳市耕地土壤重金属分布特征及评价. *土壤*, 2006, 38(1): 53~60.
- [8] 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. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123~126.
- [9] 管东生, 陈玉娟, 阮国际. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(4): 93~96.
- [10] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴. 南京市不同功能区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征. *环境科学*, 2003, 24(3): 105~111.
- [11] 吴玺虹, 戴塔根, 方建武, 等. 长沙、株洲、湘潭三市土壤中重金属元素的来源. *地质通报*, 2007, 26(11): 1453~1458.
- [12] 武永锋, 刘从强, 涂成龙. 贵阳市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(3): 254~257.
- [13] 曾锋, 张金池. 重金属在森林生态系统中的迁移规律研究进展. *世界林业研究*, 2001, 14(2): 16~22.
- [14] 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. *生态环境*, 2008, 17(1): 210~215.
- [15] 贵阳概况. <http://www.cbiq.com>-广州日报-贵阳政府网, 2004.
- [16] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [17] GB15618—1995. 中华人民共和国土壤环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [18] 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. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112~115.
- [19] 任华丽, 崔保山, 白军红, 等. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险. *生态学报*, 2008, 28(4): 1625~1634.
- [20] 陈静生, 洪松, 邓宝山, 等. 中国东部花岗岩、玄武岩及石灰岩上土壤微量元素含量的纬度向分异. *土壤与环境*, 1999, 8(3): 161~167.
- [21] 朱其清, 尹楚良, 唐丽化, 等. 石灰岩土中微量元素的含量与分布. *土壤学报*, 1984, 21(1): 58~69.
- [22] 陈书玉. 环境影响评价. 北京: 高等教育出版社, 2002. 160~162.
- [23] 崔爽, 周启星, 晁雷, 等. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 512~515.
- [25] 朱建军, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征. *生态学报*, 2006, 26(1): 146~153.
- [26] 张明, 张凤海. 茂兰喀斯特森林下的土壤. 见: 周正贤主编. 茂兰喀斯特森林科学考察集. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987. 111~123.
- [27] 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 等. 贵阳市乌当区耕地土壤重金属污染现状及其评价. *重庆环境科学*, 2003, 25(10): 42~45.
- [28] 宋春然, 何锦林, 谭红, 等. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价. *贵州农业科学*, 2005, 33(2): 13~16.