doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2024.03.006

滇中高原哀牢山不同林分土壤重金属污染特征及其生态风险评价

刘浪[1],吴恒[1],许先鹏[1],方向阳[2],王玥琳[3*]

(1. 国家林业和草原局西南调查规划院,昆明 650031; 2. 昆明市林火防控和林草信息中心,昆明 650506;
3. 成都理工大学 旅游与城乡规划学院,成都 610059)

摘　要:为探究滇中高原哀牢山不同林分类型土壤重金属的分布特征及对其潜在生态风险进行评价,选取哀牢山 4 种林分(常绿阔叶林、高山栎林、华山松林、滇油杉林)土壤为研究对象,采集林分土壤,对该土壤进行 7 种重金属(Zn、Cu、Mn、Cr、Pb、As、Ni)、有机质含量和 pH 进行检测分析。以云南省土壤背景值和国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)作为参比值,采用 Hakanson 潜在生态危害指数法(Potential ecologicalrisk index)评价研究区不同林分土壤重金属潜在生态危害效应。结果表明,研究区内土壤中 Zn 的含量最高,其次是 Mn,其余 5 种都在 5 mg/kg 以下,pH 均为酸性,有机质的含量常绿阔叶林最高,滇油杉林、华山松林次之,高山栎林最低,变异系数为 18.32% ~ 37.26%。常绿阔叶林土壤中 Pb 和 pH 为显著负相关($P<0.05$),与有机质显著正相关($P<0.05$);高山栎林 Pb 和 Ni 极显著负相关($P<0.01$),As 和有机质显著正相关($P<0.05$);华山松林 Mn 与 Pb 显著正相关($P<0.05$);滇油杉林 Zn 和 Pb、Ni、有机质为负相关外,其余 4 种重金属和 pH 均为正相关,且相关性均不显著($P>0.05$);有机质与 Zn 的相关性较强可聚类为一组。4 种林分土壤重金属的单种和多种土壤重金属潜在生态危害都处于轻微风险状态,单种重金属潜在生态危害程度平均值由大到小排序为 As、Zn、Ni、Pb、Cu、Cr、Mn,多种土壤重金属潜在生态危害程度由大到小排序为华山松林、滇油杉林、常绿阔叶林、高山栎林。

关键词:滇中高原;哀牢山;森林土壤;重金属含量;生态风险评价
中图分类号:S714;X53;X826　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1006-8023(2024)03-0056-10

Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil in Different Forest Stands of Ailao Mountain in the Central Yunnan Plateau

LIU Lang[1], WU Heng[1], XU Xianpeng[1], FANG Xiangyang[2], WANG Yuelin[3*]

(1. Southwest Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, China;
2. Kunming Forest Fire Prevention and Control and Forest Grass Information Center, Kunming 650506, China;
3. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to investigate the distribution characteristics of heavy metals in soil of different forest types in Ailao Mountain on the central Yunnan Plateau and evaluate their potential ecological risks, four forest types (evergreen broad-leaved forest, alpine oak forest, *Pinus armandii* forest, and Yunnan oil fir forest) were selected as the research object. The forest soil was collected to detect and analyze the content of seven heavy metals (Zn, Cu, Mn, Cr, Pb, As, Ni), organic matter, and pH of the soil. Using the soil background value of Yunnan Province and the national soil environmental quality standard (Level I) as reference values, the Hakanson potential ecological hazard index method was used to evaluate the potential ecological hazard effects of heavy metals in soil of different forest stands in the study area. The results showed that the content of Zn in the soil of the study area was the highest, followed by Mn, and the other five species were all below 5 mg/kg. The pH was acidic, and the content of organic matter was highest in evergreen broad-leaved forest, followed by Yunnan oil fir forest and *Pinus armandii* forest, and the lowest in alpine oak forest, with a coefficient of variation

收稿日期:2023-05-22
基金项目:四川省哲学社会学科研究“十四五”规划 2022 年度基地项目(SC22EZD075)。
第一作者简介:刘浪,硕士,工程师。研究方向为林草资源调查监测与规划设计。E-mail:357200784@qq.com
*通信作者:王玥琳,博士,讲师。研究方向为生态系统功能服务评价。E-mail:wangyuelin001@163.com
引文格式:刘浪, 吴恒,许先鹏,等. 滇中高原哀牢山不同林分土壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 森林工程, 2024,40(3):56-65.

LIU L, WU H, XU X P, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of soil in different forest stands of Ailao Mountain in the central Yunnan Plateau[J]. Forest Engineering, 2024, 40(3):56-65.

between 18.32% and 37.26%. There was a significant negative correlation between Pb and pH in the soil of evergreen broad-leaved forest ($P<0.05$), and a significant positive correlation with organic matter ($P<0.05$). Pb and Ni were significantly negatively correlated ($P<0.01$), while As and organic matter were significantly positively correlated ($P<0.05$) in the alpine oak fores. There was a significant positive correlation between Mn and Pb in *Pinus armandii* forest ($P<0.05$). Except for the negative correlation between Zn and Pb, Ni, and organic matter in the Yunnan oil fir forest, the other four heavy metals and pH values were all positive correlated, and the correlation was not significant ($P>0.05$). The correlation between organic matter and Zn was strong and can be clustered into a group. The potential ecological hazards of single and multiple heavy metals in the soil of four forest stands were all in a mild risk state. The average degree of potential ecological hazards of single heavy metals was ranked from high to low as As, Zn, Ni, Pb, Cu, Cr, and Mn, while the potential ecological hazards of multiple soil heavy metals were ranked from high to low as *Pinus armandii* forest, Yunnan oil fir forest, evergreen broad-leaved forest and alpine oak forest.

Keywords: Central Yunnan Plateau; Ailao Mountain; forest soil; heavy metal content; ecological risk assessment

0　引言

森林生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,为人类的生产、生活提供赖以生存的条件,也是陆地上最大的碳源碳汇,在气候调节、水土保持、水源涵养和空气净化等方面起着非常重要的作用[1-2]。森林下方土壤质量的好坏关乎森林生态系统的健康持久发展,其生物及非生物因素都是影响植物群落生存的重要环境因子,是森林生态系统不可缺少的重要部分[3-4]。目前随着工业的迅速发展,大量重金属通过大气和水体等途径不断排放到环境中,通过降雨、空气沉降及植物拦截等作用最终不断输入到森林土壤中,并且相关研究表明土壤虽然可容纳环境系统中 70%以上的重金属[5],但土壤中的重金属具有长时间残留、强隐蔽性和毒性大等特点[6]。森林土壤重金属含量达到一定阈值将会对生态系统中的其他生物造成一定威胁,不利于其他生物生存,减少生物多样性,从而影响整个生态系统的稳定性,并通过林产品以及地下水等形式危害人类健康[7]。有研究发现,不同植物对重金属吸附和累积的能力有所不同,林地土壤重金属含量也有所不同,森林群落对重金属具有明显的消减作用[8-9],一方面森林植被生物量较大,生命周期长,大量的重金属可长期存储在体内,另一方面植物发达的根系能够深入土层吸附更深层土壤中的重金属[10]。

哀牢山国家级自然保护区境内分布着滇中最具代表性的中山湿性常绿阔叶林以及高山栎林、滇油杉林等多种典型林分[11],而目前研究主要集中在森林植被的土壤营养元素[12]、土壤水分动态[13]、枯落物[14]和碳储量[15]等方面,对于土壤重金属污染方面的研究还未见报道。而该研究区对于本地的水源涵养、生物多样性等方面起着重要的生态功能[16],因此很有必要对该地区不同林分类型土壤重金属潜在生态风险分析评价,掌握研究区森林土壤重金属分布特征、污染程度和潜在风险,为森林生态安全提供科学保障。

1　研究区概况

哀牢山国家级自然保护区位于云南省中部,地处云贵高原、横断山地和青藏高原三大自然地理区域的接合部。地理位置为 23.35°~24.44° E,100.54°~101.30° N,海拔 1 300~2 750 m,受西南季风的影响,干湿季分明,年平均气温 11.3 ℃,年平均降水量为 1 947 mm,年均蒸发量 1 192 mm,全年日照时间 2 380 h。研究区内由于海拔较高,气候垂直分布明显,形成的植被带分布明显,从山体下部到上部大致可以划分为 3 个植被带,分别为山体中下部的亚热带季风常绿阔叶林、山体中部的中山湿性常绿阔叶林和山体顶部的苔藓矮林。独特的气候特点蕴育了我国目前面积最大以云南特有植物物种为优势的亚热带常绿阔叶林生长在哀牢山,使其保存着处于原始状态、完整而稳定的亚热带山地森林生态系统。

2　研究方法

2.1　样品的采集及处理

利用 GPS 定位根据哀牢山森林的不同海拔,分别选取常绿阔叶林、高山栎林、华山松林和滇油杉林 4 个植物群落,见表 1,每个群落中按照 10 m×10 m 的网格面积布设 4 个典型样方,共布设 16 个典型样方。每个样方按照上、中、下坡位各设置采样点 1 个,共布设采样点 48 个。每个采样点分别按 0~20、20~40、40~60 cm,3 个层次采集各土壤剖面样品。采样时按照由上到下的次序分层采样,每层采集 500 g 左右,随后将同一样地同一坡度同一层土壤均匀混合,采用四分法收集 500 g 左右,剔除土

壤样品中的石头和植物的根、叶等杂物,放入标好号的聚乙烯塑料袋密封,带回试验室通风处进行自然风干,风干后磨碎过孔径为100目的尼龙网筛,放入密封袋待测。

表1 林分基本情况

Tab. 1 Basic information of forest type

林分类型 Forest type	海拔/m Altitude	坡度/(°) Slope	密度/(株·hm^{-2}) Density	平均树高/m Average height	平均胸径/cm The average DBH	树种组成 Tree species composition
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	2 418	30.0±5.0	1 734	15.46	3.81	光叶柯(*Lithocarpus mairei*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、牛筋条(*Dichotomanthes tristaniicarpa*)、高山栎(*Quercus semecarpifolia*)、木荷(*Schima superba*)、云南樱桃(*Prunus yunnanensis*)
高山栎林 Alpine oak forest	2 497	27.0±5.0	1 075	3.38	5.89	光叶柯、高山栎、珍珠花(*Lyonia ovalifolia*)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera*)、露珠杜鹃(*Rhododendron irroratum*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)
华山松林 *Pinus armandii* forest	2 350	11.5±3.5	75	10.86	11.90	华山松(*Pinus armandii*)、斜基叶柃(*Eurya obliquifolia*)、厚皮香、青冈(*Quercus glauca*)、旱冬瓜(*Alnus nepalensis*)、滇润楠(*Machilus yunnanensis*)
滇油杉林 Yunnan oil fir forest	2 107	26.5±1.5	85	4.18	6.31	滇油杉(*Keteleeria evelyniana* Mast)

2.2 分析方法

2.2.1 样品化学分析方法

土壤重金属Zn、Cu、Mn、Cr、Pb、As、Ni采用酸溶法后用美谱达V-1800原子吸收分光光度计测定,pH用pHS-3C酸度计测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加热法,每份样品设置3个重复,最终取3次试验分析的平均值为该样点的最终分析值。

2.2.2 土壤重金属潜在生态危害评价方法

本研究选用Hakanson提出的潜在生态危害指数法(Potential ecologicalrisk index)[17],以云南省土壤背景值[18]和国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)[19]作为参比值,见表2,确定每种林分类型土壤重金属潜在生态危害效应及空间分布特性,评价玉溪哀牢山常绿阔叶林、高山栎林、华山松林和滇油杉林4个林分的土壤重金属潜在生态危害效应。

表2 土壤重金属污染评价参比值

Tab. 2 Evaluation reference values of soil heavy metal pollution mg·kg^{-1}

项目 Item	Zn	Cu	Mn	Cr	Pb	As	Ni
云南省土壤背景值 Soil background value in Yunnan Province	89.7	46.3	560	65.2	40.6	18.4	42.5
国家土壤环境质量标准(Ⅰ级) National soil environmental quality standard (Level Ⅰ)	100	35	725	90	35	15	40

单种重金属潜在生态危害系数(E_i)的计算公式为

$$E_i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_{0i}} 。 \quad (1)$$

式中:T_r^i为重金属的毒性系数;C_i为第i种重金属的实测含量,mg/kg;C_{oi}为参比值,mg/kg,即土壤背景值。

本研究以云南省土壤背景值和国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)作为参比值。毒性系数根据徐争启等[20]计算的重金属毒性系数(T_r^i):Zn=Mn=1、Cr=2、Cu=Ni=Pb=5、As=10。

多种重金属潜在生态危害指数(R_I)的计算公式为

$$R_I = \sum_{i=1}^{m} E_i 。 \quad (2)$$

根据E_i和R_I,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[20],采用丁振华等[21]给出7种重金属的潜在生态危害指数R_I划分的潜在生态危害分级标准,见表3。

2.2.3 数据处理方法

本研究采用Excel2013、SPSS20.0统计软件进行数据分析,聚类分析在R 4.0.5中利用"pheatmap"包[22]完成分析。

表 3　Hakanson 潜在生态风险等级划分

Tab. 3 Classification of potential ecological risks by Hakanson

生态危害 Ecological risk	轻微 Slight	中等 Medium	强 Strong	很强 Very strong	极强 Greatly strong
潜在生态风险指数(E_i) Potential ecological risk index (E_i)	<40	[40,80)	[80,160)	[160,320)	≥320
潜在生态风险指数(R_1) Potential ecological risk index (R_1)	<150	[150,300)	[300,600)	[600,1 200)	≥1 200

3　结果与分析

3.1　不同林分类型森林土壤重金属含量及其分布特征

哀牢山 4 种林分类型下土壤的 pH、有机质与重金属含量见表 4。7 种土壤重金属中,Zn 的含量最高,其次是 Mn,其余 5 种都在 5 mg/kg 以下,Pb 的含量最低。Mn 在常绿阔叶林中变幅最大,且变异系数最大,常绿阔叶林中最大值是最小值的 6 倍多,且 4 种林分其平均含量由大到小为:常绿阔叶林、滇油杉林、华山松林、高山栎林,说明 Mn 在常绿阔叶林土壤中含量分布最不均匀。每种林分土壤中 Pb 含量变幅最大,其平均含量滇油杉林最高,高山栎林次之,常绿阔叶林和华山松林相同,且在后 2 种林分土壤中分布较不均匀,变异系数都在 60%以上。As 在 4 种林分土壤中变幅最小,华山松林土壤 As 的平均含量相对最高,其余 3 种差别不大。总的来看,滇油杉林土壤中 7 种重金属含量变异系数最大,其分布最不均匀,其次是常绿阔叶林、华山松林,高山栎林最小。4 种林分类型土壤的 pH 均为酸性,差异相对较小,pH 的变异系数值均在 8.11%以下。有机质的含量不同林分差异较大,其平均含量常绿阔叶林最高,滇油杉林、华山松林次之,高山栎林最低,最大值为最小值的 3 倍多,且各林分类型下变异系数为 18.32%~37.26%。

表 4　不同森林类型土壤 pH、有机质与重金属含量描述性统计

Tab. 4 Descriptive statistics of pH, organic matter and heavy metals contents in different types of forest soils

林分类型 Forest type	数据类型 Data type	重金属/(mg·kg^{-1}) Heavy metal							pH	有机质/(g·kg^{-1}) Organic matter
		Zn	Cu	Mn	Cr	Pb	As	Ni		
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	最大值	85.71	0.89	26.95	2.57	0.89	2.83	1.54	4.15	139.79
	最小值	40.51	0.49	4.21	0.63	0.23	2.18	1.31	3.62	50.87
	均值	58.16	0.72	12.26	1.58	0.54	2.57	1.46	3.89	105.56
	变异系数(%)	41.57	28.64	97.03	61.29	60.97	13.44	9.07	7.25	37.26
高山栎林 Alpine oak forest	最大值	37.00	0.22	1.89	1.66	1.48	2.73	1.5	4.22	57.89
	最小值	31.77	0.08	1.24	1.31	0.95	1.37	1.07	3.72	20.47
	均值	35.17	0.13	1.50	1.46	1.17	2.23	1.32	3.99	34.44
	变异系数(%)	8.37	56.79	22.76	12.48	23.61	33.6	17	8.11	26.42
华山松林 *Pinus armandii* forest	最大值	95.41	2.06	7.66	3.02	0.84	3.98	3.65	4.49	77.83
	最小值	64.00	0.83	7.01	2.1	0.09	3.64	1.52	4.06	50.9
	均值	74.69	1.48	7.41	2.51	0.54	3.84	2.73	4.29	74.39
	变异系数(%)	24.02	41.81	4.7	18.79	73.4	4.67	40.1	7.62	31.63
滇油杉林 Yunnan oil fir forest	最大值	93.59	1.19	10.12	1.34	1.79	3.08	2.98	4.27	90.26
	最小值	69.71	0.47	5.31	0.71	1.07	2.72	2.5	3.98	61.34
	均值	85.57	0.84	7.53	1.09	1.47	2.88	2.77	4.06	82.45
	变异系数(%)	16.05	42.91	32.24	30.69	24.96	6.36	8.87	6.59	18.32

3.2　土壤重金属含量与 pH、有机质的相关性分析

对 4 种林分类型下土壤中重金属、有机质含量及 pH 进行相关性分析,结果见表 5。常绿阔叶林土壤中 Zn 和 Cu、Ni、pH 呈正相关性外,与其余 4 种重金属及有机质呈负相关,且相关性不显著($P>0.05$);Pb 和 pH 表现出显著负相关性($P<0.05$),与

表5 不同类型森林土壤中重金属与pH、有机质含量之间的相关性

Tab. 5 Correlation of heavy metals with pH and organic matter in different types of forest soils

林分类型 Forest type	项目 Item	Zn	Cu	Mn	Cr	Pb	As	Ni	pH	有机质 Organic matter
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	Zn	1								
	Cu	0.066	1							
	Mn	−0.406	−0.939	1						
	Cr	−0.189	0.967	−0.820	1					
	Pb	−0.900	0.375	−0.032	0.598	1				
	As	−0.944	−0.391	0.684	−0.144	0.707	1			
	Ni	0.632	−0.731	0.451	−0.881	−0.906	−0.342	1		
	pH	0.888	−0.4	0.060	−0.620	−1.000*	−0.687	0.918	1	
	有机质	−0.875	0.426	−0.088	0.642	0.998*	0.667	−0.928	−1.000*	1
高山栎林 Alpine oak forest	Zn	1								
	Cu	0.423	1							
	Mn	0.700	0.943	1						
	Cr	0.226	−0.787	−0.538	1					
	Pb	0.326	0.994	0.903	−0.848	1				
	As	−0.381	0.676	0.393	−0.987	0.750	1			
	Ni	−0.339	−0.996	−0.909	0.840	−1.000**	−0.741	1		
	pH	−0.057	−0.929	−0.753	0.960	−0.962	−0.901	0.959	1	
	有机质	−0.327	0.718	0.446	−0.994	0.787	0.998*	−0.778	−0.925	1
华山松林 *Pinus armandii* forest	Zn	1								
	Cu	−0.915	1							
	Mn	−0.990	0.962	1						
	Cr	−0.227	0.601	0.361	1					
	Pb	−0.988	0.967	1.000*	0.377	1				
	As	0.645	−0.281	−0.532	0.598	−0.517	1			
	Ni	−0.963	0.990	0.991	0.481	0.993	−0.415	1		
	pH	−0.866	0.994	0.927	0.683	0.934	−0.177	0.969	1	
	有机质	0.845	−0.989	−0.912	−0.712	−0.919	0.137	−0.958	−0.999*	1
滇油杉林 Yunnan oil fir forest	Zn	1								
	Cu	0.886	1							
	Mn	0.795	0.423	1						
	Cr	0.985	0.793	0.888	1					
	Pb	−0.742	−0.968	−0.182	−0.614	1				
	As	0.183	0.618	−0.451	0.010	−0.795	1			
	Ni	−0.218	0.259	−0.765	−0.383	−0.493	0.920	1		
	pH	0.672	0.252	0.984	0.790	−0.001	−0.605	−0.869	1	
	有机质	−0.486	−0.836	0.144	−0.327	0.947	−0.948	−0.747	0.321	1

注：** 表示 $P<0.01$，相关性在0.01水平（双侧）上极显著相关。* 表示 $P<0.05$，相关性在0.05水平（双侧）上显著相关。

Note: ** Indicating $P<0.01$, the correlation is highly significant at the 0.01 level (bilateral). * Indicating $P<0.05$, the correlation is significantly correlated at the 0.05 level (bilateral).

有机质表现出正相关性显著（$P<0.05$）；其余重金属之间、重金属与有机质和pH之间相关性均不显著（$P>0.05$）。高山栎林土壤中Zn和Cu、Mn、Cr、Pb呈正相关性外，与其余2种重金属及pH、有机质呈负相关，且相关性不显著（$P>0.05$）；Pb和Ni表现出极显著负相关性（$P<0.01$），相关性系数为1；As和有机质表现出显著正相关性（$P<0.05$），其余重金属之间、重金属与有机质和pH之间相关性均不显

著(P>0.05)。华山松林土壤中 Zn 和 As、有机质为正相关外,其余 5 种重金属和 pH 均为负相关,且相关性均不显著(P>0.05);Mn 与 Pb 表现出显著正相关性(P<0.05),有机质和 pH 表现出显著负相关性(P<0.05);其余重金属之间、重金属与有机质和 pH 之间相关性均不显著(P>0.05)。滇油杉林土壤中 Zn 和 Pb、Ni、有机质为正相关外,其余 4 种重金属和 pH 均为正相关,且相关性均不显著(P>0.05)。总体来看,pH 与重金属之间的相关性不显著,也无明显规律可循;而有机质与不同林分类型土壤中的重金属含量均有一定的正/负相关性,且相关系数值较大,说明有机质对重金属可能存在一定的吸附效果,这与 Brookes[23] 的研究结果相似。

3.3　不同林分土壤重金属、有机质含量及 pH 聚类分析

对不同林分类型土壤重金属、有机质含量及 pH 进行层次聚类分析,得到相关性聚类热图(图 1)。由图 1(图上部)可看出,最底层滇油杉林和华山松林的重金属含量更相似可以划分为第 1 组,其次是常绿阔叶林与第 1 组划分成第 2 层次为第 2 组,最后是高山栎林与第 2 组划分成第 3 层次为第 3 组,可能与林分的地理空间位置相近,土壤本底值相似有关系。从重金属、有机质、pH 看(图 1 左侧),除了 Zn 之外的 6 种重金属与 pH 的相关性较强可聚类为一组,有机质(OM)与 Zn 的相关性较强可聚类为一组,可能二者之间的相互作用较其他重金属更为明显。

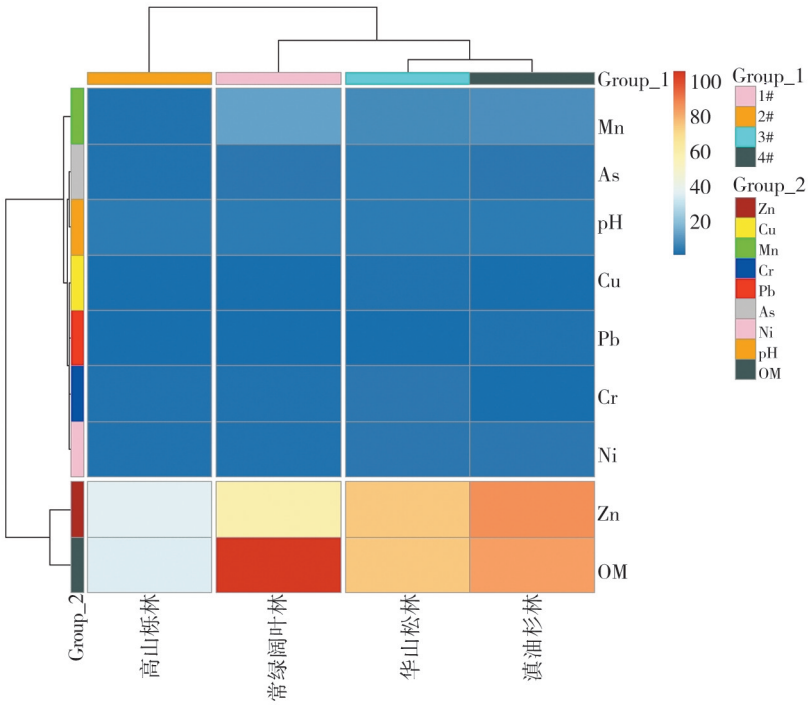


图 1　不同林分类型土壤重金属、有机质含量及 pH 相关性层次聚类热图

Fig. 1 Hierarchical clustering heat map of correlation between contents of heavy metals, organic matter and pH values in soils of different forest types

3.4　不同林分土壤重金属潜在生态风险评价

由表 6 看出,无论用云南省土壤背景值还是国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)作为参比值,4 种林分类型下每种土壤重金属的单种重金属潜在生态危害系数(E_i)均远远小于 40,都处于轻微风险状态,每种林分下多种土壤重金属潜在生态危害指数(R_I)也均远小于 150,处于轻微风险状态。4 种林分土壤单种重金属潜在生态危害系数(E_i)危害程度平均值由大到小排序为:As、Zn、Ni、Pb、Cu、Cr、Mn,可能与 As 的毒性系数较大有关系,使 As 的潜在生态风险系数计算结果偏大。从林分类型来看,多种土壤重金属潜在生态危害指数(R_I)危害程度由大到小排序为:华山松林、滇油杉林、常绿阔叶林、高山栎林。

表6 不同林分土壤重金属的 Hakanson 潜在生态风险评价

Tab. 6 Hakanson potential ecological risk evaluations of heavy metals in different forest soils

林分类型 Forest type	参比值 Reference value	单种重金属潜在生态危害系数(E_i) Potential ecological hazard coefficient of single heavy metal (E_i)							多种重金属潜在生态危害指数(RI) Potential ecological hazard index of multiple heavy metals (RI)	RI 评价结果 RI evaluation results
		Zn	Cu	Mn	Cr	Pb	As	Ni		
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	云南省土壤背景值	0.65	0.08	0.02	0.05	0.07	1.40	0.17	2.43	轻微
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	0.58	0.10	0.02	0.04	0.08	1.71	0.18	2.71	轻微
高山栎林 Alpine oak forest	云南省土壤背景值	0.39	0.01	0.00	0.04	0.14	1.21	0.16	1.96	轻微
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	0.35	0.02	0.00	0.03	0.17	1.49	0.17	2.22	轻微
华山松林 *Pinus armandii* forest	云南省土壤背景值	0.83	0.16	0.01	0.08	0.07	2.09	0.32	3.56	轻微
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	0.75	0.21	0.01	0.06	0.08	2.56	0.34	4.00	轻微
滇油杉林 Yunnan oil fir forest	云南省土壤背景值	0.95	0.09	0.01	0.03	0.18	1.57	0.33	3.16	轻微
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	0.86	0.12	0.01	0.02	0.21	1.92	0.35	3.49	轻微
平均值 Average	云南省土壤背景值	0.71	0.09	0.01	0.05	0.11	1.57	0.24	2.78	轻微
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	0.63	0.11	0.01	0.04	0.13	1.92	0.26	3.11	轻微
E_i 评价结果 E_i evaluation results	云南省土壤背景值	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	
	国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	轻微	

4 结论与讨论

哀牢山不同林分类型下7种土壤重金属中,Zn的含量最高,其次是Mn,其余5种都在5 mg/kg以下,Pb的含量最低,且每种重金属在不同林分含量变异系数各不相同,在不同采样点分布较不均匀,表明研究区内土壤重金属空间分布差异特征比较明显,这与其他学者的研究结果一致[24-25]。并且森林土壤重金属的含量、分布特征,受重金属元素的来源、种类以及林地土壤的理化性质和原有的土壤母质影响很大[26-27]。简单来说,土壤中重金属既可能本身就存在于原有土壤母质中,也有可能是由人类的生产生活等活动带入[28]。可以肯定的是,不同种类的重金属但其来源相同,说明这几类重金属可能存在一定的相关性[25]。分析结果显示,不同林分类型土壤重金属之间表现出的相关性各异,比如高山栎林中Pb和Ni表现出极显著负相关性($P<0.01$),相关性系数为1;As和有机质表现出显著正相关性($P<0.05$),华山松林中Mn与Pb表现出显著正相关性($P<0.05$),其他林分类型下各种土壤重金属之间相关性不显著($P>0.05$),说明这几种土壤重金属的来源存在相同的伴生性[29]。

从土壤的理化性质(有机质含量及pH)与重金属的关系来分析,其理化性质对重金属起到累积和吸附的效果[30],土壤重金属含量与有机质含量呈明显的相关性[31],并且pH越高土壤对重金属离子的吸附效果越明显[32]。本研究结果显示,常绿阔叶林中Pb与有机质表现出显著正相关性($P<0.05$),高山栎林中As和有机质表现出显著正相关性($P<0.05$)且相关系数值较大,说明土壤中的有机质可能对重金属产生一定的吸附作用,这一研究与Brookes[23]的结果相似。常绿阔叶林中Pb和pH表

现出显著负相关性($P<0.05$),而其他重金属含量与林分中 pH 间的相关性关系均不显著($P>0.05$)。同时从土壤重金属和理化性质的层次聚类分析结果也证实,有机质与 Zn 的相关性较强可聚类为一组,这些结果都进一步说明了土壤理化性质与重金属之间关系的复杂性[24]。

以云南省土壤背景值和国家土壤环境质量标准(Ⅰ级)作为参比值的单种和多种土壤重金属潜在生态风险评价结果均为轻微污染程度,可能与研究区属于天然林并远离城区处于比较原始的状态,土壤重金属主要属于自然来源,一是来源于岩石圈内地球化学过程中形成的原生的土壤母质,二是植被拦截到的重金属尘降,三是天然土壤污染[33],几乎不受人类工农业活动的影响。4 种林分土壤单种重金属潜在生态危害系数(E_i)危害程度平均值由大到小排序为:As、Zn、Ni、Pb、Cu、Cr、Mn,这样的分析结果显示利用重金属潜在生态风险法,在计算的过程中加入了毒性系数(T_r^i),这样的计算方式充分考虑了不同重金属的生物毒性,从而使评价结果更综合、全面地评价[34]。评价结果显示 As 的毒性系数比其他种类的重金属都大,与 As 的毒性系数最大值(10)有关系[20],使得 As 的潜在生态风险系数计算结果最大。并且研究结果显示,从林分类型来看,多种土壤重金属潜在生态危害指数(R_I)危害程度由大到小排序为:华山松林、滇油杉林、常绿阔叶林、高山栎林。可能与不同林分的植被净化作用不同有关,并且华山松林生长的坡度相较于其他林分要平稳,对于大气沉降带来的重金属更有利于存储,而其他林分所处坡度较陡,降雨对土壤层起到更大强度的淋溶和冲刷作用[24],土壤中重金属含量相对较低,因此在研究区内华山松林对土壤重金属的吸附和存储效果较其他林分明显,直接影响到重金属在土壤中的释放、迁移和沉积等自然循环过程,以及重金属在自然界的毒性强弱[6,35],最终导致华山松林多种土壤重金属潜在生态危害指数最大。但总体来看,由于 4 种天然林中重金属总量较少或由于植被的净化作用,研究区森林土壤重金属污染属于轻微污染状态。

【参　考　文　献】

[1] 张祯祺,蔡惠文,张平平,等. 基于 GEE 遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):231-242.
ZHANG Z Q, CAI H W, ZHANG P P, et al. A GEE-based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three-River Headwaters region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 231-242.

[2] 李亦秋,邓欧,李若霜,等. 黔中喀斯特城市新区森林生态系统水土保持及其生态效益[J]. 水土保持通报,2022,42(4):244-250.
LI Y Q, DENG O, LI R S, et al. Soil and water conservation and ecological benefits of forest ecosystem in new urban Karst areas of central Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 244-250.

[3] ILANY T, ASHTON M S, MONTAGNINI F, et al. Using agroforestry to improve soil fertility: effects of intercropping on *Ilex paraguariensis* (yerba mate) plantations with *Araucaria angustifolia*[J]. Agroforestry Systems, 2010, 80(3): 399-409.

[4] 单奇华,俞元春,张建锋,等. 城市森林土壤肥力质量指标筛选:以南京市为例[J]. 土壤,2009,41(5):777-783.
SHAN Q H, YU Y C, ZHANG J F, et al. Determination of fertility index of urban forest soil in Nanjing city[J]. Soils, 2009, 41(5): 777-783.

[5] NRIAGU J O. A history of global metal pollution[J]. Science, 1996, 272(5259): 223.

[6] 韩春梅,王林山,巩宗强,等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1499-1502.
HAN C M, WANG L S, GONG Z Q, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499-1502.

[7] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志,2011,30(5):889-896.
GUO X X, LIU C Q, ZHU Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 889-896.

[8] 卢德亮,乔璐,陈立新,等. 哈尔滨市区绿地土壤重金属污染特征及植物富集[J]. 林业科学,2012,48(8):16-24.
LU D L, QIAO L, CHEN L X, et al. Soil pollution characteristics by heavy metals and the plant enrichment in green space of urban areas of Harbin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(8): 16-24.

[9] 刘晓辉,吕宪国,刘惠清. 沟谷地不同植被下土壤重金属纵

向分异研究[J]. 环境科学,2007,28(12):2766-2770.
LIU X H, LYU X G, LIU H Q. Longitudinal variation of heavy metals contents in topsoil covered with different vegetation in gully area[J]. Environmental Science, 2007, 28(12): 2766-2770.

[10] WANG G, SU M Y, CHEN Y H, et al. Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China[J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1): 127-135.

[11] 牛跃,刘洋,张一平,等. 哀牢山植物多样性垂直分布格局[J]. 西部林业科学,2008,37(4):27-34.
NIU Y, LIU Y, ZHANG Y P, et al. Vertical distribution patterns of plant species diversity in Ailao Mountains[J]. Journal of West China Forestry Science, 2008, 37(4): 27-34.

[12] 罗钰颖,朱玉婷,唐青,等. 哀牢山不同海拔表层土壤理化性质变化规律研究[J]. 西部林业科学,2020,49(1):140-148.
LUO Y Y, ZHU Y T, TANG Q, et al. Variation pattern of physicochemical properties in different altitudes of Ailao Mountain[J]. Journal of West China Forestry Science, 2020, 49(1): 140-148.

[13] 巩合德,张一平,刘玉洪,等. 哀牢山常绿阔叶林土壤水分动态变化[J]. 东北林业大学学报,2008,36(1):53-54.
GONG H D, ZHANG Y P, LIU Y H, et al. Dynamics of soil moisture in evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(1): 53-54.

[14] 冯文婷. 哀牢山常绿阔叶林土壤简单糖类和氨基酸研究:地上凋落物、地下碳输入和植物养分吸收对其的影响[D]. 西双版纳:中国科学院研究生院(西双版纳热带植物园),2007.
FENG W T. Soil simple sugars and amino acids in an evergreen forest of Ailao Mountains[D]. Xishuangbanna: Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2007.

[15] 张鹏超,张一平,杨国平,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量[J]. 生态学杂志,2010,29(6):1047-1053.
ZHANG P C, ZHANG Y P, YANG G P, et al. Carbon storage and sequestration of tree layer in subtropical evergreen broadleaf forests in Ailao Mountain of Yunnan[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(6): 1047-1053.

[16] 李晋,陶晶,晁增华,等. 哀牢山自然保护区资源保护价值评估[J]. 内蒙古林业调查设计,2021,44(5):44-47, 57.
LI J, TAO J, CHAO Z H, et al. Evaluation of resource conservation value in Ailao Mountain Nature Reserve[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design, 2021, 44(5): 44-47, 57.

[17] XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy-metal's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 31(2): 112-115.

[18] 国家环境保护局主持,中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.
Chaired by the State Environmental Protection Bureau of the People's Republic of China, Chief Editor of China Environmental Monitoring Station. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[19] 中华人民共和国生态环境部,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:中国环境出版社集团, 2018.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality- Risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Press Group, 2018.

[20] 徐争启,倪师军,庹先国,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.
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[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112-115.

[21] 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):64-66,119.
DING Z H, JIA H W, LIU C E, et al. Pollution and assessment of heavy metals in Huangpu River sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 29(2): 64-66, 119.

[22] KOLDE R. pheatmap: Pretty heatmaps. R package version 1.0.12[EB/OL]. https://CRAN.R-project.org/

package=pheatmap. 2019.

[23] BROOKES P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(4): 269-279.

[24] 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.
ZHUANG Y T, FENG J Y, CHU S S, et al. Contents and ecology risk assessments of heavy metals in different forest soils in West Guangdong[J]. Journal of South China Agricultural University, 2018, 39(5): 25-31.

[25] 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.
JIAN Y, ZHANG J, YANG W Q, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of soils in different forest stands of a small catchment at the downstream of Minjiang River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(9): 1526-1533.

[26] 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]. Science of the Total Environment, 2002, 300(1/2/3): 229-243.

[27] 楚春晖,佘宇晨,佘济云,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.
CHU C H, SHE Y C, SHE J Y, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil from different forests in subtropics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 258-263.

[28] 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.
PAN Y J, CHEN B F, XIAO Y H, et al. Heavy metal pollution status and evaluation of urban forest soils in Guangzhou[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 210-215.

[29] 雷康平,黄铖,朱荣莉,等. 凉山州土壤重金属与粳稻中重金属相关性评价[J]. 农业研究与应用,2022,35(2):62-69.
LEI K P, HUANG C, ZHU R L, et al. Correlation evaluation of heavy metals in soil and Japonica rice in Liangshan prefecture[J]. Agricultural Research and Application, 2022, 35(2): 62-69.

[30] 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]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1/2/3): 133-143.

[31] 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.
XU C, XIA B C, HE S M, et al. Characteristics of Cd, Zn, Pb, Cu content of paddy soils in the lower stream of Dabaoshan area, Guangdong[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(3): 122-127.

[32] 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.
QIAO D M, QI X B, PANG H B, et al. The effect of pH level on existing form of Pb2+[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 173-176.

[33] 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.
XU H Z, CHANG J. Evaluation and methods of heavy metal pollution in main soils of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 411-415.

[34] 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.
XU Y, LI S Q, GUO S H, et al. Comparison of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(11): 4615-4617.

[35] 钱进,王子健,单孝全. 土壤中微量金属元素的植物可给性研究进展[J]. 环境科学,1995,16(6):73-75.
QIAN J, WANG Z J, SHAN X Q. Progress in the investigation on plant availability of soil trace metals[J]. Chinese Journal of Enviromental Science, 1995, 16(6): 73-75.