

长白山国家级自然保护区垂直带土壤—植物系统中 Pb 的变异特征及其影响因素

白军红 欧阳华 王庆改 王春梅

(中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)

摘要 本文研究了长白山国家级自然保护区垂直带土壤-植物系统中 Pb 元素含量的水平变异和垂直变异特征。结果表明,垂直带土壤 Pb 含量均在 25mg/kg 以上,且各土壤带 Pb 的平均含量与其变异程度相反,棕色针叶林土 Pb 平均含量最低但变异最大,而山地生草森林土 Pb 平均含量最高但变异最小;垂直带植物 Pb 含量均低于克拉克值,与垂直带土壤 Pb 含量高低基本相吻合,但其变异以高山苔原带变异最大,岳桦林带变异最小;植物 Pb 含量垂直分异显著高于土壤 Pb 含量,变异系数达 89.76%;植物对 Pb 的富集能力依植物种类及器官不同而异;成土母质和母岩、土壤 pH 值、有机质及土壤质地是影响 Pb 在土壤-植物系统中分异的主要因素。

关键词 Pb; 变异特征; 土壤-植物系统; 垂直带; 长白山国家级自然保护区

中图分类号 S154.4; X171

铅是对人体有害的重金属元素之一,在自然界中分布甚广。土壤-植物系统是 Pb 元素生物地球化学循环的重要环节,Pb 在该系统中的变异特征既表明了 Pb 来源的差异,又与 Pb 污染密切相关。自然保护区尤其是山地自然保护区是受人类活动干扰和污染较少的地区之一,是进行环境本底值和表生生物地球化学研究的较为理想的场所,同时山地土壤、植被垂直带谱为研究土壤-植物系统地球化学提供了良好的条件。地貌形态是引起区域内 Pb 元素再分配的重要外部条件,山地土壤 Pb 背景值与坡积物及沉积物的土壤 Pb 背景值有明显差别,它主要通过土壤矿物质发生作用,来影响土壤内部的元素迁移和转化^[1]。近年来国内对土壤 Pb 背景值已有较多研究^[1-2],对重金属对土壤的污染以及植物对重金属的吸收和累积也有不少报道^[3],但对山地垂直带土壤-植物系统中 Pb 的变异规律较为系统的研究尚少。研究自然保护区垂直带内土壤-植物系统中 Pb 的变异可为该区环境监测和评价等提供基础信息和依据,也可为全国乃至全球土壤-植物系统 Pb 含量提供参比资料。

1 研究区域自然概况

长白山自然保护区位于 41°58'~42°06' N,

127°54'~128°08' E^[4]范围内,总面积为 196465hm²^[5],是我国自然环境和生态系统保持比较完整的自然保护区,1980 年加入联合国教科文组织“人与生物圈”保护区网。由于受地形、气候、水文、母质、土壤、植被等因子的直接影响,区内主体长白山山地生态系统垂直分异显著^[2],植被和土壤随地势的增加具有典型的垂直带谱结构,构成了由上到下为高山苔原带、岳桦林带、山地暗针叶林带和山地针阔混交林带;相应的垂直带土壤依次为高山苔原土、山地生草森林土、棕色针叶林土和暗棕色森林土。本区区域气候属于大陆季风气候^[4],年平均气温变化在 4.9~7.3°C;全年降水量为 600~1340mm,降水主要集中在 6~9 月,约占全年降水量的 60%左右;积雪时间可达 6 个月以上,积雪厚度约 2~4m。地貌以火山锥、倾斜熔岩高原和熔岩台地火山地貌为主。

2 材料与方法

样品采自长白山自然保护区北坡各土壤、植被垂直带内,共计采集表层和亚表层土壤样品 40 个,典型植物(优势种或建群种)样品 40 个,对草本植物以及苔藓地衣植物以植株为单位进行采集,对灌木分叶、枝进行采集。土壤和植物样品自然风干后,挑去残根和石块,磨碎,过 100 目筛,装袋备测。

Pb 的测定先用氢氟酸—硝酸—高氯酸消解土样和植物样,再用 0.3mol/L HCl 定容于 50ml 容量瓶中,采用原子吸收法测定,回收率为 95%。土壤有机质测定:K₂Cr₂O₇ 容量法-外加热法;土壤 pH 值测定:电位法;土壤粒度分析采用比重法^[6]。

3 结果与讨论

3.1 长白山自然保护区土壤-植物系统中 Pb 的水平变异

测定结果表明(表 1),长白山自然保护区土壤带 Pb 含量较高,均在 25mg/kg 以上,约是克拉克值的 2 倍之多。可能是由于长白山自然保护区成土环境

中,大多数地区化学风化作用相对较弱,土壤母质以物理风化为主,土壤中 Pb 含量在很大程度上保持着母岩的地球化学特征。各土壤带 Pb 含量测定值接近于正态分布,平均含量大小依次为山地生草森林土>暗棕色森林土>高山苔原土>棕色针叶林土。而各带水平变异系数大小则与之排序相反依次为棕色针叶林土>高山苔原土>暗棕色森林土>山地生草森林土。表明山地生草森林土壤带 Pb 含量较高且分布相对均匀;而棕色针叶林土壤带 Pb 的平均含量尽管较小,但其分布差异较大,变异系数位于 4 个土壤带之首。

表 1 长白山自然保护区土壤带 Pb 的水平变异

Table 1 Horizontal variation of soil Pb along the vertical zones in the Changbai Mountain Nature Reserve

土壤带类型	海拔 (m)	平均值 (mg/kg)	标准差	变异系数 (%)	分布	克拉克值 ^[7] (mg/kg)
高山苔原土	2000~2740	29.1	6.79	23.33	正态	10
山地生草森林土	1800~2000	32.9	5.42	16.47	正态	
棕色针叶林土	1600~1800	26.75	6.60	24.67	正态	
暗棕色森林土	600~1600	31.7	5.88	18.55	正态	

表 2 长白山自然保护区植被带 Pb 的水平变异

Table 2 Horizontal variation of plant Pb along the vertical zones in the Changbai Mountain Nature Reserve

植被带类型	海拔 (m)	平均值 (mg/kg)	标准差	变异系数 (%)	分布	克拉克值 ^[8] (mg/kg)
高山苔原带	2000~2740	38.12	36.15	94.83	对数正态	50
岳桦林带	1800~2000	53.09	11.68	22.00	正态	
山地暗针叶林带	1600~1800	25.43	14.44	56.78	对数正态	
山地针阔叶混交林带	600~1600	38.12	36.15	94.83	对数正态	

长白山植物带 Pb 含量较低,除岳桦林带略高于克拉克值外,其它各植被带均低于克拉克值(表 2),可能是由长白山自然保护区大部分植物对 Pb 的吸收富集能力较低^[9]所致。岳桦林带植物 Pb 含量接近于正态分布,而其它各植被带植物 Pb 含量均接近于对数正态分布,植物 Pb 平均含量大小依次为岳桦林带>高山苔原带>山地针阔叶混交林带>山地暗针叶林带,与垂直带相应的土壤 Pb 含量高低基本吻合,表明植物 Pb 含量在很大程度上受制于土壤 Pb 含量,对植物 Pb 与土壤 Pb 含量作回归分析的回归方程:Y(植物 Pb 含量) = 68.8299+3.5491X(土壤 Pb 含量)(R=0.8528, P=0.01)。而各带水平变异系数变化规律则显然不同于土壤的逆序变化规律,其大小依次为

高山苔原带>山地针阔叶混交林带>山地针阔叶混交林带>岳桦林带。表明在各垂直带中,岳桦林带不同种植物对 Pb 的吸收富集能力相差不大,而高苔原带不同种植物对 Pb 的吸收富集能力差异显著。

3.2 长白山自然保护区垂直带土壤-植物系统中 Pb 的垂直变异

长白山自然保护区垂直带土壤-植物系统中,土壤 Pb 含量较高约是克拉克值的 3 倍(表 3),植物 Pb 含量低于克拉克值,表明长白山自然保护区垂直带母质 Pb 的平均含量较高,垂直带植物对 Pb 的吸收富集能力普遍较低;植物 Pb 含量垂直变异显著高于土壤 Pb 含量,变异系数达 89.76%,也进一步说明不同海拔高度上的植被对 Pb 的吸收富集能力差异

显著,而土壤因受母质 Pb 的高含量的影响,差异相对较弱,变异系数为 22.83%。

表 3 长白山自然保护区垂直带土壤-植物系统中 Pb 的垂直变异

Table 3 Vertical variation of Pb in the soil-plant system of the vertical zones in Changbai Mountain Nature Reserve

项目	含量范围(mg/kg)	平均值(mg/kg)	标准差	变异系数(%)
土壤	19~50	29.87	6.82	22.83
植物	5~100	39.67	35.61	89.76

注：土壤、植物 Pb 的平均含量分别指所有土壤和植物样品 Pb 含量平均值。

4 影响长白山自然保护区垂直带土壤—植物系统 Pb 空间分异的主要因子

4.1 成土母质和母岩对长白山自然保护区垂直带土壤—植物系统 Pb 含量的影响

Pb 在地壳中的丰度值为 10mg/kg^[10]。自然界中,由岩石风化而进入 Pb 元素的地质大循环的 Pb 是 5.6T/a^[11]。但 Pb 在各类岩石中的含量相差较大,火成岩类中的橄榄岩含量最低为 0.2mg/kg,沉积岩类中的 Pb 土矿含量最高为 100mg/kg^[12]。长白山自然保护区内垂直带内各类岩石 Pb 含量大小排序为沸石>流纹岩>玄武岩>凝灰角砾岩>粗面岩>火山灰。

地质作用是 Pb 元素在土壤中重新分配的主要内部条件,成土作用是土壤中 Pb 元素重新分配的外部条件^[1]。岩石是土壤成土母质的物质来源,其 Pb 含量影响着成土母质的 Pb 含量,而成土母质的 Pb 含量又进一步影响着土壤 Pb 含量。由于成土母质和其它成土环境的影响,土壤 Pb 含量差异明显,世界土壤中 Pb 平均含量为 15~25mg/kg^[13]。在长白山自然保护区垂直带内各类母岩上发育的土壤 Pb 含量大小依次为沸石上发育的土壤>流纹岩上发育的土壤>凝灰角砾岩上发育的土壤>玄武岩上发育的土壤>粗面岩上发育的土壤>火山灰上发育的土壤,与母岩中 Pb 含量基本一致。相关分析也表明二者在 0.01 水平上显著正相关,相关系数为 0.933,这说明长白山自然保护区垂直带土壤 Pb 含量主要决定于母岩 Pb 含量。经回归分析得回归方程:Y(土壤 Pb 含量)=12.68202+0.4693X(母岩 Pb 含量)(R=0.9329,P=0.01)。

4.2 土壤 pH 值、有机质和质地对长白山自然保护区垂直带土壤—植物系统 Pb 含量的影响

土壤-植物系统是在母质、生物、气候和地形等的综合影响、作用下形成的一开放系统。土壤的理化性质^[13]、土壤质地^[3,13]、微生物的活动、降水^[1]、气温^[1]和植物种类^[9,13]等因素都影响着 Pb 元素的累积和分异特征。相关分析表明土壤的基本理化性质

对土壤-植物系统中 Pb 的含量均存在着不同程度的影响。土壤 Pb 含量在 0.01 水平上与有机质显著正相关,在 0.05 水平上与粉砂(0.01~0.005mm)和粘粒(<0.005mm)显著正相关,在 0.05 水平上与土壤 pH 值显著负相关。植物 Pb 含量在 0.01 水平上与土壤 Pb 含量和土壤有机质显著正相关,在 0.05 水平上与粉砂(0.01~0.005mm)和粘粒(<0.005mm)显著正相关,在 0.05 水平上与土壤 pH 值显著负相关。这表明土壤有机质、pH 值和质地是继成土母质和母岩影响土壤-植物系统 Pb 含量的另外 3 个重要因素。土壤有机质对 Pb 的螯合作用,以及粉砂和粘粒对 Pb 的吸附、富集作用都强烈影响着土壤 Pb 的迁移和累积。土壤有机质含量愈高,质地也越粘重,Pb 含量也越高。不同质地的土壤,土体内 Pb 元素的淋滤和迁移模式不同,土壤颗粒越细小,质地越粘重,Pb 元素就越不易淋失,对 Pb 元素则起了一种富集作用。植物 Pb 含量主要决定于土壤 Pb 含量,土壤质地和有机质对植物 Pb 含量的影响是通过影响土壤 Pb 含量来实现的。而土壤 pH 值则主要通过影响微生物的活动^[14]来影响土壤-植物系统 Pb 含量。

表 4 土壤母岩和土壤 Pb 含量之间的关系

Table 4 Relationship between soil Pb and Pb in soil parent materials

岩类	类型	Pb 平均含量 (mg/kg)
凝灰角砾岩	母岩	35.59
	土壤	30.7
火山灰	母岩	31.2
	土壤	26.9
沸石	母岩	44.8
	土壤	34.6
粗面岩	母岩	33.6
	土壤	28.4
流纹岩	母岩	42.3
	土壤	32.2
玄武岩	母岩	41.25
	土壤	30.63

表 5 长白山自然保护区土壤-植物系统中 Pb 与土壤 pH 值、有机质、质地相关系数矩阵

Table 5 Matrix of coefficients of the relations of Pb in the soil-plant system with soil pH, soil organic matter, soil texture in the Changbai Mountain Nature Reserve

	土壤 Pb 含量	植物 Pb 含量	pH	有机质	0.1~0.01 mm	0.01~0.005 mm	<0.005 mm
土壤 Pb 含量	1						
植物 Pb 含量	0.835**	1					
pH	-0.371*	-0.315*	1				
有机质	0.598**	0.456**	-0.265	1			
0.1~0.01mm	-0.186	-0.019	0.114	-0.132	1		
0.01~0.005mm	0.334*	0.326*	-0.283	0.338*	0.687**	1	
<0.005mm	0.313*	0.308*	0.171	-0.106	-0.436**	-0.445**	1

**显著性水平 0.01, *显著性水平 0.05。

4.3 气候对长白山自然保护区垂直带土壤-植物系统 Pb 含量的影响

气候对土壤-植被系统的影响主要表现在温度、降水等方面对土壤的影响。K. Stahr^[15]和殷效彩^[1]等发现土壤 Pb 背景值的高低也受气温和降水的影响,气温越高,降水量越大,土壤 Pb 背景值就越高,且同一温度条件下,土壤水分越好,Pb 含量就越高。但该规律并不适用于长白山自然保护区垂直带土壤,土壤 Pb 含量最高值和最低值分别出现在中间的岳桦林带和山地暗针叶林带,其原因在于山地垂直带气候显著不同于平原气候,雨热不同带,年平均气温由山地针阔叶混交林带的 2.6°C 向上依次下降,至高山苔原带年平均气温降至-6°C,而年平均降雨量则由下向上逐渐增加由山地针阔叶混交林带 700~800mm 增至高山苔原带的 1700mm 以上。此外该区干湿沉降中 Pb 的含量较低,其平均含量分别为 5.04 μg/kg 和 1.02 μg/kg^[16],所以对该区土壤-植物系统 Pb 含量影响不大,同时也表明该区大气 Pb 污染较轻,受人类活动影响较弱。

5 小结

(1) 该区是高 Pb 生物地球化学区,各土壤带 Pb 含量均在 25mg/kg 以上,约是克拉克值的 2.5 倍;各土壤带 Pb 含量高低排序:山地生草森林土>暗棕色森林土>高山苔原土>棕色针叶林土,其水平变异程度与平均含量排序相反,棕色针叶林土变异最大,而山地生草森林土但变异最小。

(2) 各植物带 Pb 含量均低于克拉克值,与土壤带 Pb 含量高低基本相吻合,各带水平变异系数变化规律则显然不同于土壤的逆序变化规律,其大小依

次为高山苔原带>山地针阔叶混交林带>山地针阔叶混交林带>岳桦林带。植物 Pb 含量在很大程度上受制于土壤 Pb 含量,对植物 Pb 与土壤 Pb 含量作回归分析的回归方程:Y(植物 Pb 含量)=68.8299+3.5491X(土壤 Pb 含量)(R=0.8528, P=0.01)。

(3) 植物 Pb 含量垂直分异显著高于土壤 Pb 含量,变异系数达 89.76%。

(4) 成土母质和母岩直接决定着土壤中 Pb 含量,其回归方程为 Y(土壤 Pb 含量)=12.68202+0.4693X(母岩 Pb 含量)(R=0.9329, P=0.01)。

(5) 土壤-植物系统中 Pb 分异受土壤 pH 值、有机质及土壤质地影响显著,在 0.01 水平上与有机质显著正相关,在 0.05 水平上与粉砂(0.01~0.005mm)和粘粒(<0.005mm)显著正相关,在 0.05 水平上与土壤 pH 值显著负相关。

(6) 气候因子对该区土壤-植物系统 Pb 含量分异影响微弱。

参考文献

- 1 殷效彩. 中国土壤 Pb 背景值的地理分异特征. 青岛大学学报. 1999, 12 (2): 82~85
- 2 章申, 陈喜保等. 珠穆朗玛峰地区土壤地球化学研究—土壤中镉和铅的分布. 科学通报. 1985, 17: 1337~1340
- 3 Lagerwerff JV, *et al.* Uptake of cadmium, lead, and zinc by radish from soil and air. Journal of Soil Science. 1977, 111:129~133
- 4 黄锡畴, 刘德生, 李祯. 长白山北侧的自然景观带. 见: 黄锡畴论文选集编委会主编, 自然地理与环境研究. 北京: 科学出版社, 1996, 85~95
- 5 中国人与生物圈国家委员会. 自然保护区与生态旅游.

- 北京：中国科学技术出版社，1998，98~108
- 6 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京：中国农业科技出版社，1999，107~147
- 7 朱颜明，黄锡畴，刘景双. 长白山高山苔原植物微量元素地球化学分析. 地理科学. 1991，11(3): 244~252
- 8 多布罗沃利斯基 BB (朱颜明译). 微量元素地理学. 北京：科学出版社，1987: 36~38
- 9 黄锡畴. 长白山区优势植物中微量元素研究. 见：黄锡畴论文集编委会主编，自然地理与环境研究. 北京：科学出版社，1996，98~108
- 10 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京：中国环境科学出版社，1990，28~86
- 11 刘英俊. 元素地球化学. 北京：科学出版社，1986，8~9
- 12 缪天成. 环境背景值研究. 环境科学，1989,10(4):25~29
- 13 杨居荣，车宇瑚，刘坚. 重金属在土壤-植物系统中的迁移、累积特征及其与土壤环境条件的关系. 生态学报，1985，5(4): 306~313
- 14 黄瑞农. 环境土壤学. 北京：高等教育出版社，1994，145~146
- 15 Stahr K, Zötl HW and Hädrich FR. Transport of trace elements in ecosystem of the Bärhalde watershed in the southern black forest. Journal of Soil Science, 1980,130 (4): 217~224
- 16 黄锡畴. 自然地理与环境研究. 北京：科学出版社，1996，100~102

CHARACTERISTICS OF PB VARIATION AND THEIR INFLUENCING FACTORS IN THE SOIL-PLANT SYSTEM OF VERTICAL ZONES IN CHANGBAI MOUNTAIN NATIONAL NATURE RESERVE

Bai Junhong Ouyang Hua Wang Qinggai Wang Chunmei

(*Institute of Geography Science and Natural Resource Research, Beijing 100101*)

Abstract The characteristics of vertical variation and horizontal variation of Pb in the soil-plant system of the vertical zones in the Changbai Mountain National Nature Reserve were studied in this paper. The results showed that Pb concentrations in the soils of the vertical zones are all over 25mg/kg, and the average Pb concentration in each soil zone is negatively related to its degree of variation, i.e. in the brown coniferous forest soil zone, its average Pb concentration is the lowest of the four soil zones, but its horizontal variation the highest; whereas, in the mountain soddy forest soil, its average Pb concentration is highest, but its horizontal variation the lowest. The average Pb concentrations in plants along the vertical zones are all lower than the karat value of Pb in plant, which is basically similar to soil Pb concentration in variation. But in terms of horizontal variation, the mountain Tundra zone is the highest, while the *Betula ermanii* forest zone the lowest. The vertical variation of Pb concentration in plants is obviously higher than that in soils, with its variation coefficient reaching 89.76%. The enrichment capability of plants for Pb varies with the type of the plant and the organ of the plant. Parent material and parent rock, soil pH, soil organic matter and soil texture etc. are the main factors influencing variation of Pb concentration in the soil-plant system along the vertical zones in the Changbai Mountain National Nature Reserve.

Key words Pb, Variation characteristics, Soil-plant system, Vertical zone, Changbai Mountain National Nature Reserve