第 48 卷 第 8 期
2020 年 8 月

西北农林科技大学学报(自然科学版)
Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)

Vol. 48 No. 8
Aug. 2020

网络出版时间:2020-01-20 13:39 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.08.012
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200119.0923.004.html

# 色季拉山森林土壤重金属空间分布特征及污染评价

樊志颖[1,2,3],李江荣[1,3],高 郯[1,3],郑维列[1,3]

(1 西藏高原森林生态教育部重点实验室,西藏 林芝 860000;2 西藏生态安全实验室,西藏 林芝 860000;
3 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站,西藏 林芝 860000)

[摘 要] 【目的】探明色季拉山森林土壤重金属含量空间分布特征及其污染状况。【方法】在色季拉山阴坡和阳坡分别选取了 3 700,3 900,4 300 m 3 个海拔梯度,设置了 6 个采样点,分层(0~10,10~20,20~40,40~60 和 60~100 cm)采集土样,测定 Cr、Cd、Hg、Ni、Se、As、Pb 7 种土壤重金属元素含量,并参照全国土壤元素背景值,采用单因子指数法、内梅罗指数法和污染负荷指数法对土壤重金属污染状况进行综合评价。【结果】(1)色季拉山森林0~20 cm 土层重金属元素 Cr、Se、As、Pb 含量低于全国土壤元素背景值和西藏土壤元素背景值;Cd 和 Hg 含量都超过了全国土壤元素背景值和西藏土壤元素背景值,分别是全国土壤元素背景值的 2.2 倍和 2.92 倍、西藏土壤元素背景值的 2.75 倍和 9.5 倍;Ni 含量低于西藏土壤元素背景值,但高于全国土壤元素背景值,是其含量的 1.03 倍。7 种重金属元素含量的变异系数都大于 50%,其中 Hg 表现为极度变异,其余 6 种均属于高度变异。(2)在同一土层 Cr、As 含量均表现为阳坡低于阴坡,Pb、Ni 和 Hg 含量总体均表现为阳坡大于阴坡。在阳坡,As、Cd、Hg 含量随着海拔升高而降低,Se 含量随着海拔的升高而增加;而在阴坡,Cr、Se 和 As 含量随着海拔的升高而降低,Pb 和 Hg 含量随着海拔的升高而增加;重金属元素 As 含量在阴坡随土层的加深而增加,Hg 含量在阳坡随土层的加深而减少。其余重金属元素含量在不同坡向、海拔及土层间无明显规律性。(3)单因子指数评价结果表明,在色季拉山森林土壤 0~20 cm 土层,在阳坡,Hg 为重度污染,Cd 为中度污染,Ni 为轻度污染,Cr、Se、As、Pb 都是非污染状态;在阴坡,Cd 和 Hg 为中度污染,其他 5 种重金属元素都是非污染状态。(4)内梅罗指数法评价结果表明,在色季拉山森林 0~20 cm 土层,阳坡土壤受重金属污染程度明显高于阴坡,主要污染物均为 Ni、Cd 和 Hg。(5)通过污染负荷指数法对色季拉山林 0~20 cm 土层重金属污染状况进行评价发现,阳坡森林土壤受到轻度的重金属污染,阴坡土壤无重金属污染。【结论】在色季拉山森林 0~20 cm 土层中,Ni、Cd 和 Hg 3 种重金属元素都达到了污染程度,其中 Ni 是轻度污染,Cd 和 Hg 是中度以上污染;阳坡土壤受到轻度的重金属污染,阴坡无重金属污染。

[关键词] 森林土壤;重金属污染;空间分布;污染评价;色季拉山

[中图分类号] X53;S714.5 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2020)08-0093-08

# Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in forest soils of the Sygera Mountain

FAN Zhiying[1,2,3], LI Jiangrong[1,3], GAO Tan[1,3], ZHENG Weilie[1,3]

(1 *Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Nyingchi, Tibet* 860000, *China*;
2 *Laboratory of Ecological Security, Tibet, Nyingchi, Tibet* 860000, *China*; 3 *Tibet National Forestry Observation and Research station for Alpine Forest Ecosystern, Nyingchi, Tibet* 860000, *China*)

**Abstract**: 【Objective】This study aimed to find out the spatial distribution characteristics of heavy metals in forest soil of the Sygera Mountain. 【Method】A total of 6 stratified sampling points (0—10, 10—

[收稿日期] 2019-07-19
[基金项目] 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究项目(2015-2020);西藏生态安全实验室项目(STX2018-03)
[作者简介] 樊志颖(1994—),男,山西运城人,硕士,主要从事森林生态学,生态系统生态学研究。E-mail:1797147857@qq.com
[通信作者] 李江荣(1984—),男,四川遂宁人,副教授,硕士,主要从事森林生态学、生态监测与评价等研究。
E-mail:ljrong06@126.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

20,20－40,40－60,and 60－100 cm) were set at 3 700,3 900,and 4 300 m on the shady and sunny slopes of Sygera Mountain. The contents of heavy metals including Cr,Cd,Hg,Ni,Se,As and Pb in seven types of soils were determined. With reference to the background values of national soil elements,the single factor index method,Nemero index method and pollution load index method were used for comprehensive evaluation of soil heavy metal pollution.【Result】(1) In the 0－20 cm forest soil layer of the Sygera Mountain, the contents of heavy metals including Cr,Se,As and Pb were lower than the national and Tibetan background values. Cd and Hg contents exceeded the national and Tibetan background values. They were 2.2 and 2.92 times of the national background values and 2.75 and 9.5 times of the Tibetan background values. Ni content was lower than the Tibetan background value,but was 1.03 times of the national background value. The coefficients of variation of the seven heavy metal elements were greater than 50%. Hg showed extreme variation,and the other six were highly variable. (2) The contents of Cr and As in the same soil layer in the sunny slope were lower than in the shady slope,while Pb,Ni and Hg contents were opposite. On the sunny slope,contents of As,Cd and Hg decreased with the elevation,while Se content increased. On the shady slope, contents of Cr,Se and As decreased with the increase of altitude,while contents of Pb and Hg increased. The content of As increased with the increase of soil layer depth on the shady slope,and Hg content decreased with the increase of soil layer depth on the sunny slope. The contents of other heavy metal elements had no obvious regularity in different slope aspelt,altitude and soil layer. (3) The single factor index evaluation results showed that in the soil layer of 0－20 cm,Hg was heavily polluted,Cd was moderately polluted,Ni was mildly polluted,and Cr,Se,As and Pb were in non-polluting state on the sunny slope. On the shady slope,Cd and Hg were moderately polluted, and the other elements were in non-polluting state. (4) The evaluation results of Nemero index method showed that the sunny slope was more polluted than the shady slope in the soil layer of 0－20 cm. The main pollutants were Ni,Cd and Hg. (5) The pollution load index method showed that the soil in the sunny slope was mildly polluted by heavy metals, while the soil was not polluted in the shady slope.【Conclusion】In the 0－20 cm forest soil layer of the Sygera Mountain,Ni,Cd and Hg all reached the pollution levels. Ni was in mild pollution, while Cd and Hg were in moderate pollution. The sunny slope soil was slightly polluted by heavy metals and the shady slope soil was not polluted.

**Key words**:forest soil;heavy metals pollution;spatial distribution;pollution assessment;Sygera Mountain

森林土壤是在森林植被下发育的具有森林凋落物、林木根系和依赖于现有森林生物的土壤[1]。森林土壤为植物提供生长基础和养分,为土壤微生物提供栖息地和充足的能量。近几十年来,人类活动直接或间接释放大量有毒有害重金属元素,因大气沉降等原因,重金属元素在远离城市的原始森林土壤中也大量积累。森林土壤中的重金属污染直接影响森林土壤生态系统的结构和功能,还可能通过地下水和食物链改变生物种群的结构,减少生物多样性,并危害植物、动物和人类。现阶段,国内外对森林生态系统土壤重金属含量特征的研究主要集中在城市森林、城市绿地和城郊等人类主要活动区域[2-5]、典型污染地带[6-8]和金属冶炼厂附近[9-10],但关于纯天然条件下森林生态系统土壤重金属含量特征及污染评价的研究较少。

色季拉山位于西藏东南部林芝市境内,海拔2 200～5 400 m,地理坐标29°10′－30°15′N,93°12′－95°35′E,是藏东南典型暗针叶林分布的核心和代表性区域之一。色季拉山处于藏东南半湿润与湿润区的过渡地带,山脉走向主要为西北－东南,形成了较大范围的东西坡面[11]。该区属亚高山温带半湿润气候区,冬温夏凉、干湿季分明。年平均气温－0.73 ℃,最高月(7月)平均气温9.23 ℃,最低月(1月)平均气温－13.98 ℃,极端最低气温－31.6 ℃,极端最高气温24.0 ℃。年均相对湿度78.83%,年均降水量1 134.1 mm,蒸发量544.0 mm,占年均降水量的48.0%。每年的6－9月为雨季,占全年降水的75%～82%,其中8月降雨最多,平均为294.2 mm,占全年降水的30%[12]。土壤主要为山地棕壤和酸性棕壤为主,pH值为4～6[13]。本研究

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在色季拉山阴坡和阳坡的不同海拔梯度设置 6 个采样点，每个样点随机挖取 6 个土壤剖面，分层（0～10，10～20，20～40，40～60 和 60～100 cm）采集土样，测定样品中铬（Cr）、镉（Cd）、汞（Hg）、镍（Ni）、硒（Se）、砷（As）、铅（Pb）7 种重金属的含量，以揭示色季拉山森林土壤重金属在当前环境条件下的含量及其空间分布特征，采用单因子指数法、内梅罗指数和污染负荷指数法综合评价土壤重金属的污染状况，以期为林芝市森林资源经营管理、生态旅游规划、国家生态安全屏障和美丽西藏建设提供理论基础。

## 1　材料与方法

### 1.1　样品采集与处理

2017 年 11 月和 2018 年 5 月，在色季拉山阴坡和阳坡分别选取 3 个海拔梯度（3 700，3 900，4 300 m），随机在典型地段上设置 1 个 10 m×10 m 的样地，共计 6 个样地。在每个样地随机挖取 6 个土壤剖面，在 0～10，10～20，20～40，40～60 和 60～100 cm 土层采集土壤样品，用来测定土壤重金属含量。采样时，在划好采样深度的剖面上，由下向上分层采样，每层采集样品 200 g 左右。采集好的土壤样品用做好标号的聚乙烯塑料袋密封后带回实验室，在室温下自然风干，拣去石块、植物残根等杂物，磨碎后过孔径为 0.147 mm 的尼龙网筛，待测。

### 1.2　测定重金属元素的选择

比重大于 5 的金属统称为重金属[14]（通常指那些密度大于 4.5 g/cm$^3$ 的金属），如 Fe、Zn、Cd、Hg、Ni、Co 等。此外，类金属 Se 和 As 所具备的毒性效应及部分性质与重金属较为相似，尽管二者不是重金属元素，但属于重金属污染物[15]。能造成污染的重金属元素种类很多，本研究按照《陆地生态系统土壤观测规范》[16]中森林土壤长期观测任务指标选定要测定的金属元素包括：铬（Cr）、镍（Ni）、铅（Pb）、砷（As）、镉（Cd）、汞（Hg）、硒（Se）。

### 1.3　样品测定方法

根据《陆地生态系统土壤观测规范》[16]中重金属元素分析方法，采用 1＋1 王水消解-原子荧光光谱法测定 Hg、Se、As 的含量；采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消煮-石墨炉原子吸收分光光度法测定 Cd 的含量；采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消煮-火焰原子吸收分光光度法测定 Cr 和 Ni 的含量。

### 1.4　评价方法

1.4.1　单因子指数法　单因子指数法[17]是以土壤中某一污染物的背景值标准限值作为评价指标来衡量污染物的累积污染程度[18]，其计算公式为：

$$P_i = C_i / S_i 。$$

式中：$P_i$ 为土壤中重金属 $i$ 的污染指数；$C_i$ 为土壤中重金属 $i$ 的实际测量浓度；$S_i$ 为土壤重金属 $i$ 的评价标准值。若 $P_i<1$，则重金属含量在土壤背景值含量之内，土壤没有受到污染；若 $1\leqslant P_i<2$，重金属含量已造成土壤轻度污染；$2\leqslant P_i<3$，重金属含量已造成土壤中度污染；$P_i\geqslant 3$，重金属含量已造成土壤重度污染。

1.4.2　内梅罗指数法　内梅罗指数法[19]是兼顾单个元素污染指数平均值和最大值，突出了高浓度污染物对土壤环境质量的影响[20]，将多个单因子指数综合应用的评价方法。该方法计算公式如下：

$$P_{综合} = \sqrt{\frac{(P_i)_{\max}{}^2 + (P_i)_{\mathrm{ave}}{}^2}{2}} 。$$

式中：$P_{综合}$ 为土壤综合污染指数；$(P_i)_{\max}$ 为土壤中单项污染物的最大污染指数；$(P_i)_{\mathrm{ave}}$ 为土壤中各污染物指数的平均值。若 $P_{综合}\leqslant 1$ 为非污染；若 $1<P_{综合}\leqslant 2$ 为轻度污染；若 $2<P_{综合}\leqslant 3$ 为中度污染；$P_{综合}>3$ 为重污染。

1.4.3　污染负荷指数法　污染负荷指数法是由英国重金属污染水平分级研究者 Tomlinson 等[21]提出，该方法由评价区域所包含的多种重金属共同构成，不仅可以反映单个采样点的重金属污染程度，而且还可以对某一区域土壤综合污染状况进行评价[22]。计算公式如下：

$$P = \sqrt[m]{C_{f1}C_{f2}C_{f3}\cdots C_{fm}}，C_{fi} = \frac{C_i}{C_{mi}} 。$$

式中：$P$ 为某样点的污染负荷指数；$C_{fi}$ 为重金属 $i$ 的污染系数；$C_i$ 为重金属 $i$ 的测定值；$C_{mi}$ 为重金属 $i$ 的参比值；$m$ 为参与评价的重金属种类数。

某一区域的污染负荷指数计算公式为：

$$P_a = \sqrt[n]{P_1P_2P_3\cdots P_n} 。$$

式中：$P_a$ 为某区域的污染负荷指数，$n$ 为该区域所采样点数。若 $P_a<1$，该地区无污染；$1\leqslant P_a<2$，该地区轻度污染；$2\leqslant P_a<3$，该地区为中度污染；当 $P_a\geqslant 3$ 时，该区域为重度污染。

### 1.5　数据处理与分析

采用 Excel 和 SPSS 24.0 统计软件对试验数据进行处理与分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　色季拉山森林土壤重金属元素分析

对研究区 0～20 cm 土层土壤样品进行描述性

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

统计分析,得出7种重金属元素含量的最小值、最大值、平均值、标准差和变异系数等,结果见表1。由表1可知,色季拉山森林0～20 cm土层中重金属元素Cr、Se、As、Pb平均含量均低于全国土壤元素背景值和西藏土壤元素背景值;Cd和Hg含量平均值都超过了全国土壤元素背景值和西藏土壤元素背景值,分别是全国土壤元素背景值的2.2和2.92倍、西藏土壤元素背景值的2.75和9.5倍;Ni含量平均值低于西藏土壤元素背景值,但略高于全国土壤元素背景值。变异系数($CV$)反映样点间数据的离散程度,$CV<20\%$为低变异,$20\%\leqslant CV<50\%$为中等变异,$50\%\leqslant CV<100\%$为高度变异,$CV\geqslant 100\%$为极度变异。7种重金属元素的变异系数均大于50%,其中Hg表现为极度变异,其余6种均属于高度变异。

表1 色季拉山森林0～20 cm土层重金属含量统计分析

Table 1 Statistical analysis of heavy metal contents in 0－20 cm forest soil layer of the Sygera Mountain

| 重金属元素 Heavy metal element | 平均值/(mg·kg$^{-1}$) Average value | 最小值/(mg·kg$^{-1}$) Minimum value | 最大值/(mg·kg$^{-1}$) Maximum value | 标准差/(mg·kg$^{-1}$) Standard deviation | 变异系数/% $CV$ | 全国土壤元素背景值/(mg·kg$^{-1}$) Background value in China | 西藏土壤元素背景值/(mg·kg$^{-1}$) Background value in Tibet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | 29.80 | 6.00 | 81.00 | 15.59 | 52.33 | 61.00 | 76.60 |
| Ni | 27.63 | 5.00 | 153.00 | 18.68 | 67.60 | 26.90 | 32.10 |
| Cd | 0.22 | 0.10 | 0.54 | 0.11 | 51.72 | 0.10 | 0.08 |
| Se | 0.11 | 0.02 | 0.40 | 0.08 | 75.45 | 0.29 | 0.16 |
| As | 10.48 | 0.32 | 29.50 | 5.73 | 54.69 | 11.20 | 19.70 |
| Hg | 0.19 | 0.01 | 0.88 | 0.19 | 101.13 | 0.065 | 0.02 |
| Pb | 24.25 | 1.83 | 66.13 | 12.61 | 51.98 | 26.00 | 29.10 |

## 2.2 色季拉山森林土壤重金属空间分布特征

2.2.1 **不同海拔土壤重金属含量** 7种重金属元素在不同海拔土壤中的含量见表2。由表2可知,在阳坡,As、Cd、Hg含量随着海拔升高而降低,Se含量随着海拔的升高而增加,Cr、Pb、Ni含量与海拔的关系不明显;在阴坡,Cr、Se和As含量随着海拔的升高而降低,Pb和Hg含量随着海拔的升高而增加,Ni和Cd含量与海拔关系不明显。

表2 色季拉山不同海拔森林土壤重金属含量

Table 2 Heavy metal contents in forest soils at different altitudes in the Sygera Mountain mg/kg

| 坡向 Slope aspect | 海拔/m Elevation | Cr | Ni | Pb | As | Cd | Hg | Se |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阳坡 Sunny slope | 3 700 | 27.87 | 28.30 | 30.22 | 12.43 | 0.23 | 0.27 | 0.09 |
| | 3 900 | 26.90 | 39.70 | 21.77 | 10.62 | 0.22 | 0.22 | 0.14 |
| | 4 300 | 31.07 | 23.90 | 27.43 | 5.85 | 0.21 | 0.10 | 0.17 |
| 阴坡 Shady slope | 3 700 | 36.40 | 13.50 | 12.89 | 14.19 | 0.21 | 0.08 | 0.22 |
| | 3 900 | 35.42 | 30.96 | 29.51 | 12.68 | 0.24 | 0.14 | 0.08 |
| | 4 300 | 32.88 | 28.15 | 34.52 | 10.40 | 0.22 | 0.17 | 0.08 |

2.2.2 **土壤重金属垂直分布特征** 从图1可以看出,As含量在阴坡随土层深度的增加而增加,Hg含量在阳坡随土层深度的增加而减少,其余重金属元素含量在各土层间无明显规律性。

在同一土层,Cr、As含量均表现为阳坡小于阴坡,而Pb、Ni和Hg含量总体表现为阳坡大于阴坡;Cd含量在0～10,20～40和40～60 cm土层均表现为阳坡大于阴坡,在10～20和60～100 cm土层均表现为阳坡小于阴坡;Se含量除了在0～10,10～20,60～100 cm土层表现为阳坡小于阴坡外,在20～40,40～60 cm土层表现为阳坡大于阴坡。

## 2.3 色季拉山森林土壤重金属污染评价分析

2.3.1 **单因子指数法评价** 参照全国土壤元素背景值,对色季拉山森林0～20 cm土层重金属污染状况综合评价。由表3可知,在阳坡,土壤重金属单因子污染指数$P_i$平均值的排序为Hg>Cd>Ni>Pb>As>Cr>Se,其中Hg为重度污染,Cd为中度污染,Ni为轻度污染,Cr、Se、As、Pb都是非污染状态;而在阴坡,土壤重金属单因子污染指数$P_i$值的排序为Cd>Hg>As>Ni>Pb>Cr>Se,其中Cd和Hg为中度污染,其余5种重金属元素都是非污染状态。此外,阳坡土壤中,重金属元素As、Pb、Cd、Hg的污染程度随着海拔的升高而降低,Cr的污染程度随着海拔的升高而增加;阴坡土壤中,Cr、Se和As的污染程度随着海拔的升高而降低,Cd、Hg、Ni、Pb的污染程度随着海拔升高而增加。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

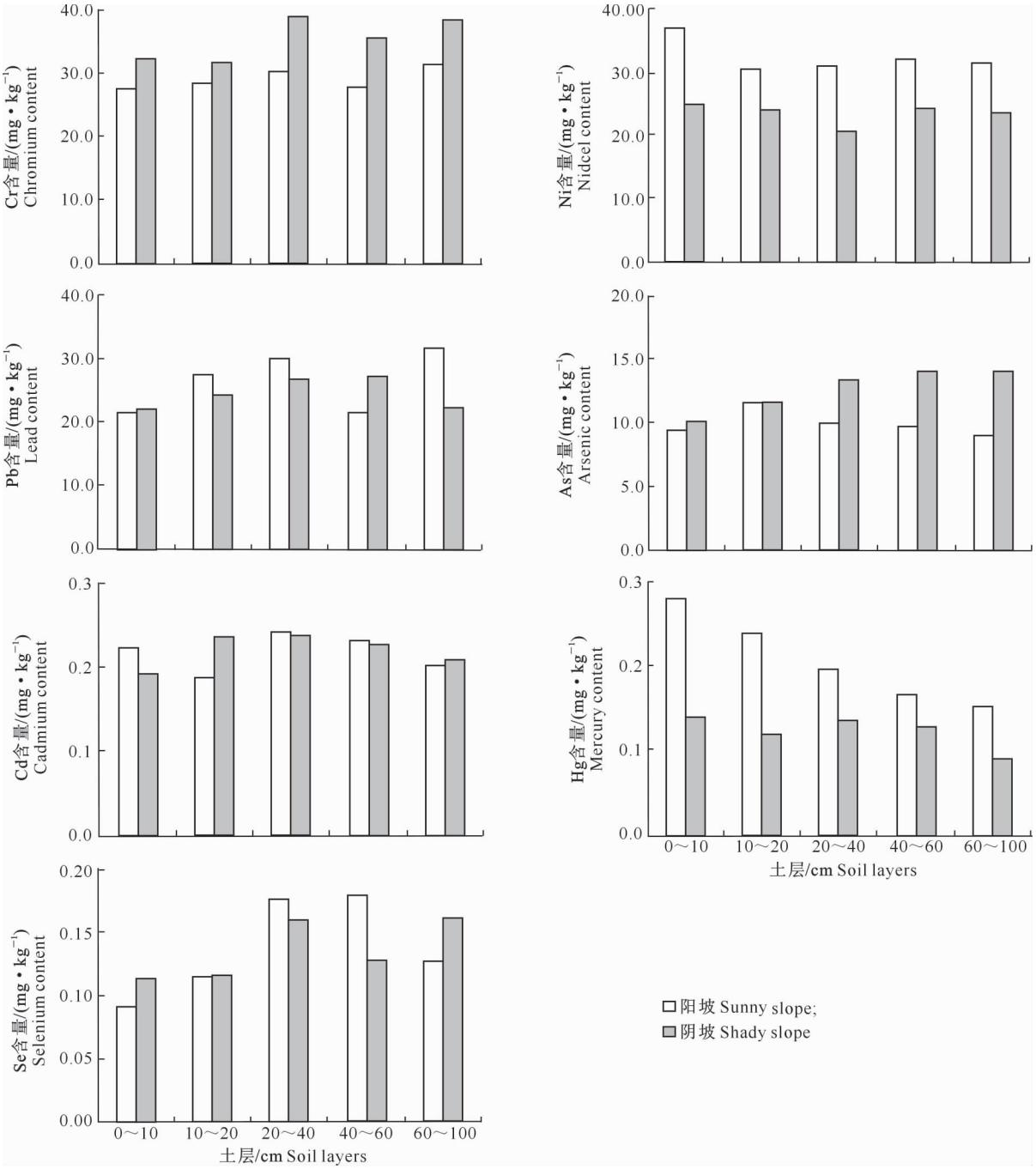


**图 1　色季拉山阴坡和阳坡不同土层重金属含量分布**

Fig. 1　Distribution of heavy metals in different soil layers on the shady slope and sunny slope of the Sygera Mountain

2.3.2　**内梅罗指数法评价**　由表 3 可知，就综合污染指数来看，色季拉山森林 0～20 cm 土层在阳坡土壤受重金属污染程度明显高于阴坡。阳坡重金属综合污染程度随海拔的升高而降低，在海拔 3 700 m 地区土壤为重度污染，在海拔 3 900 m 地区土壤为中度污染，在海拔 4 300 m 地区土壤为轻度污染；阴坡重金属的污染程度随着海拔的升高而升高，在海拔 3 700 和 3 900 m 地区土壤均为轻度污染，在海拔 4 300 m 地区土壤为中度污染。

2.3.3　**污染负荷指数法评价**　通过污染负荷指数法对色季拉山森林 0～20 cm 土层重金属污染状况进行评价，结果（表 4）发现，在阳坡海拔 4 300 m 地区土壤未受重金属污染，在海拔 3 700 和 3 900 m 地区土壤遭到轻度重金属污染。整体来看，阳坡森林土壤受到轻度重金属污染，阴坡土壤无重金属污染。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 色季拉山森林0～20 cm土层重金属综合污染指数

Table 3 Heavy metal comprehensive pollution index of 0－20 cm forest soil layer of the Sygera Mountain

| 坡向 Slope aspect | 海拔/m Elevation | $P_{Cr}$ | $P_{Ni}$ | $P_{Pb}$ | $P_{As}$ | $P_{Cd}$ | $P_{Hg}$ | $P_{Se}$ | $(P_i)_{ave}$ | $(P_i)_{max}$ | $P_{综合}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 阳坡 Sunny slope | 3 700 | 0.40 | 1.01 | 1.26 | 1.16 | 2.30 | 5.50 | 0.30 | 1.70 | 5.50 | 4.07 |
| | 3 900 | 0.44 | 1.66 | 0.96 | 1.03 | 2.19 | 3.94 | 0.44 | 1.52 | 3.94 | 2.99 |
| | 4 300 | 0.58 | 0.97 | 0.65 | 0.54 | 1.65 | 2.29 | 0.34 | 1.00 | 2.29 | 1.77 |
| | 平均值 Average | 0.47 | 1.21 | 0.96 | 0.91 | 2.05 | 3.91 | 0.36 | 1.41 | 3.91 | 2.94 |
| 阴坡 Shady slope | 3 700 | 0.67 | 0.43 | 0.46 | 1.12 | 2.08 | 1.28 | 0.78 | 0.97 | 2.08 | 1.63 |
| | 3 900 | 0.53 | 1.13 | 1.09 | 1.07 | 2.17 | 2.17 | 0.23 | 1.20 | 2.17 | 1.75 |
| | 4 300 | 0.37 | 1.16 | 1.15 | 0.73 | 2.17 | 2.62 | 0.18 | 1.19 | 2.62 | 2.04 |
| | 平均值 Average | 0.52 | 0.91 | 0.90 | 0.97 | 2.14 | 2.02 | 0.39 | 1.12 | 2.14 | 1.71 |

表4 色季拉山森林0～20 cm土层重金属污染负荷指数

Table 4 Heavy metal pollution load index of 0－20 cm forest soil layer of the Sygera Mountain

| 坡向 Slope aspect | 海拔/m Elevation | $P$ |
|---|---|---|
| 阳坡 Sunny slope | 3 700 | 1.12 |
| | 3 900 | 1.15 |
| | 4 300 | 0.82 |
| | 平均值 Average | 1.02 |
| 阴坡 Shady slope | 3 700 | 0.85 |
| | 3 900 | 0.96 |
| | 4 300 | 0.87 |
| | 平均值 Average | 0.89 |

## 3 讨 论

重金属对森林土壤的危害具有长期性、破坏性和一定程度上的不可逆性。所以研究土壤重金属的含量和空间分布特征一直深受国内外学者重视。随着人口的持续增长与经济的快速发展,人类活动严重改变了重金属元素在自然界的分布,已有研究表明,即使是远离城市的原始森林也遭到重金属污染[23-27]。本试验对色季拉山森林土壤不同坡向、不同海拔和不同深度土壤重金属含量进行了研究,从综合污染指数来看,阳坡土壤重金属污染程度随着海拔的增高而逐渐降低,但阴坡土壤重金属的污染程度随海拔的升高而升高,且阳坡的污染程度比阴坡严重。可能是阳坡比阴坡光照条件好,冰雪消融较早,而且海拔越低生物活动越频繁,大量的生物活动对土壤元素含量造成一定程度上的影响,因而阳坡海拔越低污染越严重;阴坡常年光照不足,且冰雪覆盖时间较阳坡长,导致生物活动困难,海拔越高生物活动就越少,导致阳坡重金属污染比阴坡严重。

本研究中,色季拉山森林0～20 cm土层重金属污染物主要是Cd和Hg。Cd、Hg是生物非必需元素,普遍存在生物圈中,但却是严重污染性重金属。土壤中的Cd和Hg,一部分来自火山喷发、岩溶和Cd、Hg自然浓集作用,导致土壤Cd、Hg背景值偏高;另一部分是人为地球化学所致,包括交通运输、制造电池和采矿、冶炼、污灌和磷肥施用等活动,导致土壤中Cd、Hg含量很高[28]。本研究中,As含量在阳坡与阴坡都是随着海拔的升高而递减,这与万佳蓉等[29]对土壤重金属沿山地森林海拔梯度的分布特征研究结果相同,海拔梯度对As的含量有显著影响。张继舟等[30]在研究大兴安岭土壤重金属含量空间变异时发现,Cd、Cr、Pb、Cu、Zn、Ni、Hg及As 8种重金属的变异系数为16.67%～35.39%,变异较小,说明人为因素对8种重金属的影响较小。但是本研究中色季拉山森林土壤中7种重金属元素含量变异系数都是高度变异,最大值和最小值差异均较大,说明其空间分布差异显著,但不能说明色季拉山土壤重金属污染是受人类活动影响。虽然近些年林芝旅游业的发展,特别是鲁朗国际小镇旅游业的大力发展,交通运输和人类旅游对色季拉山造成了一定程度的污染,但色季拉山森林土壤远离城市,具有相对原始的环境,海拔较高,条件恶劣,人类的许多活动难以开展。

本研究中,不同的污染评价方法对评价结果有很大影响。内梅罗指数法评价结果显示,色季拉山阴坡和阳坡的采样点土壤都受到重金属一定程度的污染,而污染负荷指数法的评价结果显示,仅有阳坡采样点有轻度重金属污染。这可能是阳坡和阴坡土壤中Cd和Hg的含量严重超标造成的,因为内梅罗指数法会在一定程度上夸大含量高因子或缩小含量低因子的作用[31]。

## 4 结 论

(1)在色季拉山森林0～20 cm土层,测定的7种重金属元素中,除Cr、Se、As、Pb外,其余3种重金属元素都达到了污染程度,其中Ni是轻度污染,Cd和Hg是中度以上污染;此外,7种重金属元素变异系数均高于50%,尤其是Hg为极度变异,变异系

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数大于 100%。

(2)色季拉山森林土壤重金属含量在空间分布上受坡向、海拔与土壤深度的影响，影响最大的是坡向。Cr、As 含量表现为阳坡低于阴坡，Ni、Pb 和 Hg 含量表现为阳坡大于阴坡。在阳坡，As、Cd、Hg 含量随着海拔升高而降低，Se 含量随着海拔的升高而增加；而在阴坡，Cr、Se 和 As 含量随着海拔的升高而降低，Pb 和 Hg 含量随着海拔的升高而增加。重金属元素 As 含量在阴坡随土层的加深而增加，Hg 含量在阳坡随土层的加深而减少，其余重金属元素在不同坡向、海拔及土层间的含量无明显规律性。

(3)通过对色季拉山 0～20 cm 土层重金属污染状况的综合评价，发现阳坡与阴坡均有不同程度的重金属污染，且阳坡的污染程度大于阴坡。分析 7 种重金属元素的单因子指数，造成土壤重金属污染的主要原因是 Cd 和 Hg 的单因子指数较高，而用污染负荷指数法对色季拉山 0～20 cm 土层重金属污染状况的评价结果是，阳坡森林土壤受到轻度重金属污染，阴坡无重金属污染。

## [参考文献]


[1] 林学名词审定委员会. 林学名词 [M]. 第 2 版. 北京：科学出版社，2016：14.
Committee for the Examination and Approval of Terminology in Forestry. Chinese terms in forest science [M]. 2nd ed. Beijing：Science Press，2016：14.

[2] 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]. 生态环境学报，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 Environmental Sciences，2008，17(1)：210-215.

[3] 宁晓波，项文化，方　晰，等. 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 [J]. 生态学报，2009，29(4)：2169-2177.
Ning X B，Xiang W H，Fang X，et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district，Guiyang City [J]. Acta Ecologica Sinica，2009，29(4)：2169-2177.

[4] Sprynskyy M，Kowalkowski T，Tutu H，et al. The adsorption properties of agricultural and forest soils towards heavy metal ions (Ni，Cu，Zn，and Cd) [J]. Journal of Soil Contamination，2011，20(1)：12-29.

[5] 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，2012，8(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，2012，8(8)：16-24.

[6] Telmer K，Bonham-Carter G F，Kliza D A，et al. The atmospheric transport and deposition of smelter emissions：evidence from the multi-element geochemistry of snow，Quebec，Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta，2004，68：2961-2980.

[7] Helmisaari H S，Salemaa M，Derome J，et al. Remediation of heavy metal：contaminated forest soil using recycled organic matter and native woody plants [J]. Journal of Environmental Quality，2007，36：1145-1153.

[8] Su J J，Wang H L，Kimberley M O，et al. Distribution of heavy metals in a sandy forest soil repeatedly amended with biosolids [J]. Australian Journal of Soil Research，2008，46：502-508.

[9] Alphen M V. Atmospheric heavy metal deposition plumes adjacent to a primary lead-zinc smelter [J]. Science of the Total Environment，1999，236(1/2/3)：119-134.

[10] Ruan X L，Zhang G L，Ni L J，et al. Distribution and migration of heavy metals in undisturbed forest soils：a high resolution sampling method [J]. Pedosphere，2008，18：386-393.

[11] 马和平，郑维列，石玉龙，等. 藏东南色季拉山苔藓植物垂直分布特征初步研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2019，47(5)：102-109.
Ma H P，Zheng W L，Shi Y L，et al. A preliminary study on vertical distribution of bryophytes in Sygera Mountains in southeast of Tibet [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2019，47(5)：102-109.

[12] 卢　杰，潘　刚，罗大庆，等. 濒危植物急尖长苞冷杉种群生命表分析 [J]. 水土保持研究，2010，17(5)：212-216，221.
Lu J，Pan G，Luo D Q，et al. Analysis to the life table of endangered population *Abies georgei* [J]. Research of Soil and Water Conservation，2010，17(5)：212-216，221.

[13] 马和平，李江荣，卢　杰，等. 西藏色季拉山不同海拔梯度土壤有效氮和土壤微生物量氮的变化 [J]. 高原农业，2017，1(1)：27-32.
Ma H P，Li J R，Lu J，et al. Change of soil effective nitrogen and SMBN along the different elevation gradient in Sygera Mountain of Tibet，China [J]. Journal of Plateau Agriculture，2017，1(1)：27-32.

[14] 嵇　东，孙　红. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究 [J]. 农业开发与装备，2018，204(12)：77-78.
Ji D，Sun H. Study on heavy metal pollution and remediation technology in farmland soil [J]. Agricultural Development & Equipments，2018，204(12)：77-78.

[15] 王莲阁，王　印，申高明，等. 城市土壤重金属污染研究进展及展望 [J]. 河南科技，2018(32)：157-158.
Wang L G，Wang Y，Shen G M，et al. Research progress and prospect of heavy metal pollution in urban soil [J]. Henan Science and Technology，2018(32)：157-158.

[16] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地态系统土壤生观测规范 [M]. 北京：中国环境科学出版社，2007.
China Network Science Committee for Ecosystem Research. Protocols for standard soil observation and measurement in terrestrial ecosystems [M]. Beijing：China Environmental Press，2007.


(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[17] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17):310-315.
Fan S X,Gan Z T,Li M J,et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(17):310-315.

[18] 张金池,严逸伦,曾 锋.重金属对森林生态系统效应的研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2001,25(5):52-56.
Zhang J C,Yan Y L,Zeng F. Advance in the research on domino effect of heavy metal ions in forest ecosystem [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),2001,25(5):52-56.

[19] 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. Assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Chinese Journal of Ecology,2011,30(5):889-896.

[20] 张 芬.我国土壤环境质量评价现状[J].绿色科技,2016(4):116-117.
Zhang F. Current situation of soil environmental quality assessment in China [J]. Journal of Green Science and Technology,2016(4):116-117.

[21] Tomlinson D L,Wilson J G,Harris C R,et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen,1980,33(1/2/3/4):566-575.

[22] 张文捷,吴含志,肖 江,等.广西某水稻产区土壤重金属含量及污染评价[J].农村经济与科技,2017,28(19):1-4.
Zhang W J,Wu H Z,Xiao J,et al. Evaluation of heavy metal content and pollution in soil of a rice producing area in Guangxi [J]. Rural Economy and Science-Technology,2017,28(19):1-4.

[23] Hovmand M E,Kemp K,Kystol J,et al. Atmospheric heavy metal deposition accumulated in rural forest soils of southern Scandinavia [J]. Environmental Pollution,2008,155:537-541.

[24] Michopoulos P,Baloutsos G,Econmou A,et al. Biogeochemistry of lead in an urban forest in Athens,Greece [J]. Biogeochemistry,2005,73:345-357.

[25] Hansen H,Larssen T,Seip H M,et al. Trace metals in forest soils at four sites in southern China [J]. Water,Air,and Soil Pollution,2001,130(1/2/3/4):1721-1726.

[26] Vries W D,Vel E,Reinds G J,et al. Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe:Ⅰ. Objectives,set-up and evaluation strategy [J]. Forest Ecology and Management,2003,174(1/2/3):77-95.

[27] Laura H,Anne P,Jean L P,et al. Heavy metal distribution in some French forest soils:evidence for atmospheric contamination [J]. Science of the Total Environment,2003,312:195-219.

[28] 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.
Fang X,Tang Z J,Tian D L,et al. Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha [J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(23):7595-7606.

[29] 万佳蓉,聂 明,邹 芹,等.土壤重金属沿山地森林海拔梯度的分布特征[J].光谱学与光谱分析,2011,31(12):3371-3374.
Wan J R,Nie M,Zou Q,et al. Distribution characteristics of heavy metals along an elevation gradient of montane forest [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(12):3371-3374.

[30] 张继舟,吕 品,王立民,等.大兴安岭森林土壤重金属含量空间变异与污染评价[J].生态学杂志,2015,34(3):810-819.
Zhang J Z,Lü P,Wang L M,et al. Spatial variability of heavy metal contents and contamination assessment in forest soils of Daxing'an Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(3):810-819.

[31] 刘育辰,王莉淋,伍 钧,等.四川城市生活垃圾重金属污染状况及来源分析[J].环境工程学报,2015,9(12):6010-6018.
Liu Y C,Wang L L,Wu J,et al. Pollution status and source analysis of heavy metals in municipal solid waste in Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2015,9(12):6010-6018.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net