

长白山高山冻原生态系统三种养分含量的空间分布

魏 晶¹, 邓红兵¹, 吴 钢^{1*}, 郝莹婕², 尚文艳¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 山西省平遥县城乡建设局, 平遥 031100)

摘要:对长白山高山冻原生态系统中 3 种养分(N、P 和 S)在植被-凋落物-土壤中的空间分布规律进行了研究。结果表明:(1)在长白山高山冻原植被亚系统中,3 种养分总含量分布规律是石质高山冻原(ST)>典型高山冻原(TT)>沼泽高山冻原(WT)>草甸高山冻原(MT)>石海高山冻原(RT);3 种养分积累总量为 72.46 kg·hm⁻²,其中 N、P 和 S 分别是 48.55 kg·hm⁻², 10.33 kg·hm⁻²和 13.61 kg·hm⁻²;生物量与养分积累分布规律是 WT>TT>MT>ST>RT。(2)在长白山高山冻原凋落物亚系统中,平均凋落物量是 1.96 kg·hm⁻²;3 种养分积累总量为 82.5 kg·hm⁻²,其中 N、P 和 S 分别是 46.28 kg·hm⁻², 21.14 kg·hm⁻²和 15.08 kg·hm⁻²;养分积累总量分布规律是 TT>WT>RT>MT>ST。(3)长白山高山冻原土壤(0~20 cm)亚系统中,养分积累总量为 39.6 t·hm⁻²,其中 N、P 和 S 分别是 23.76 t·hm⁻², 5.86 t·hm⁻²和 9.98 t·hm⁻²。4)在长白山高山冻原生态系统中,3 种养分总积累量为 40644.98 kg·hm⁻²,其中 N、P 和 S 分别是 24734.85 kg·hm⁻², 10018.7 kg·hm⁻²和 5891.43 kg·hm⁻²,土壤库是长白山高山冻原的主要养分储存库。

关键词:养分; 植被类型; 高山冻原; 长白山

Spatial variations in nutrient accumulations within the tundra zone on Changbai Mountain

WEI Jing¹, DENG Hong-Bing¹, WU Gang^{1*}, HAO Ying-Jie², SHANG Wen-Yan¹ (1. *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*; 2. *City Planning Bureau of Pingyao County, Shanxi Province, Pingyao, 031100, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2360~2366.

Abstract: It is important to better understand the biogeochemical cycling of the alpine tundra zone on Changbai Mountain as this ecosystem plays an unique role in ecological services in the region, such as protecting water and soil from erosion for three major river systems in northeast China. However, little attention has been paid on biogeochemical distribution and storage of the alpine tundra on Changbai Mountain. In 2003, we conducted a field study to investigate the distribution and storage of N, P and S in plants (above-ground vegetation), litters and soil of the tundra zone at elevations ranging from 1 950 to 2 650 m on Changbai Mountain, lying along the border of China and North Korea. We set up 4 random sampling plots at a 100 m interval of elevation along a transect between 1 950 and 2 650 m on Changbai Mountain. The plot size is 0.2×0.2 m. All the plants inside a plot were harvested. The soil bulk density was determined by the cutting-ring method to a depth of 5 cm and 15 cm, respectively. The soil, litters and plants were re-sampled, and N, P and S contents in them were analyzed. The nutrients were compared among five tundra types: Stony Tundra (ST), Typical Tundra (TT), Swamp Tundra (WT), Meadow Tundra (MT), and Rocky Tundra (RT).

The contents of N, P and S in plants varied among the five tundra types and followed an order of ST>TT>WT>MT>RT. The total nutrients for plants, litters and soil as a whole follow an order of ST>TT>MT>WT>RT. The average

基金项目:国家自然科学基金重点基金资助项目(40173033)

收稿日期:2004-06-17; **修订日期:**2004-09-07

作者简介:魏晶(1973~),女,山西人,博士生,主要从事恢复生态学研究。E-mail: weijingrcees@126.com

* **通讯作者** Author for correspondence. E-mail: wug@mail.rcees.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40173033)

Received date: 2004-06-17; **Accepted date:** 2004-09-07

Biography: Wei Jing, Ph.D. candidate, mainly engaged in restoration ecology and environment management. E-mail: weijingrcees@126.com

accumulation of N, P and S in plants was $72.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, of which $48.55 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for N, $10.33 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for P, and $13.61 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for S in plants, respectively.

The litter biomass was between 1.258 and $2.543 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ with the average of $1.96 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The total accumulation of N, P and S in litters was as follows: $\text{TT} > \text{WT} > \text{RT} > \text{MT} > \text{ST}$. The average accumulation of N, P and S was $82.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, of which $46.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for N, $21.14 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for P, and $15.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for S in litters, respectively; the average accumulation of N, P and S was $39.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ in soil ($0 \sim 20 \text{ cm}$), of which $23.76 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for N, $5.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for P, and $9.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for S in soil, respectively.

The soil pool was the major pool of the nutrients in the alpine tundra zone of Changbai Mountain. The total accumulations of N, P and S was $40\,644.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the tundra zone, of which $24\,734.85 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for N, $10\,018.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for P, and $5\,891.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ was for S, respectively.

Key words: nutrients; vegetation type; alpine tundra; Changbai Mountain

文章编号:1000-0933(2004)11-2360-07 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

陆地生态系统含有大量的有机碳和养分,而且碳含量是大气的3倍以上^[1]。陆地生态系统在全球CO₂收支平衡中起着非常重要的作用^[2~5]。但是对于高山冻原生态系统(全球变化响应最为敏感的生态系统)在全球气候变化影响下的土壤碳库、养分库的大小及其变化研究较少。长白山高山冻原生态系统在1702年火山喷发以后,经过漫长演替和植被恢复,目前长白山高山冻原面积的95.8%主要由草本、灌木、苔藓和地衣等植物所覆盖。然而,由于近年来该地区旅游业的快速发展,尤其是天池旅游的开发,当地人口的增加,全球气候变化等的影响,使得长白山高山冻原生态系统正在逐渐退化。

土壤的形成主要包括物理过程、化学过程和生物过程。由于火山喷发后成土过程中各自作用的不同使土壤养分在土壤形成初就表现出很大的差异,而且土壤性质随时间推移会有不同变化特征,这种差别称为土壤时空异质性或时空变异性^[6,7]。小尺度土壤的微域分布影响因素可以分为地貌和小地形、植被、水文等3个方面。植被与土地利用类型、干扰梯度、生物多样性有关^[8]。不同尺度上研究土壤的空间异质性,不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义^[9],而且对了解植物与土壤的关系、养分和水分对植物的影响以及植物的空间格局等也具有重要的参考价值^[10,11]。长白山高山冻原植被是经过长期演替而形成的高寒地区稳定的极地植物群落。它的存在对维持极地生态系统或高山高寒地区生态系统的稳定性、地貌特点、生物多样性等具有重要意义。本文以长白山高山冻原生态系统为研究对象,系统研究这一中国唯一巨型火山喷发后由原生演替形成的高山冻原系统中植被、凋落物和土壤中养分含量、积累量的分布规律。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

冻原是指分布在北极和高山地带的无林土地,其地下具有永冻层,植被情况变化多样,从裸地到由禾本科草类、苔草、杂草、矮灌木、藓类和地衣类组成的各种类型的植被^[12]。长白山高山冻原地貌主要有火山地貌、冰川地貌、冰缘地貌3种类型,分布着多处越年雪斑,年均太阳辐射量为 $506.6 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均日照总时数为 2295 h, 年均气温为 $-7.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 最冷月(1月份)平均气温 $-23.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 最热月(7月份)平均气温 $8.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 $19.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最低气温 $-44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (观察点 $42^{\circ}01' \text{N}$, $128^{\circ}05' \text{E}$, 海拔 2623 m)。位于海拔 1950~2691 m 之间的冻原面积为 15860 hm^2 , 地理位置为 $41^{\circ}53' \sim 42^{\circ}04' \text{N}$, $127^{\circ}57' \sim 128^{\circ}11' \text{E}$ 。其中有植被覆盖的面积为 15195 hm^2 , 占该高山冻原面积的 95.78%。本研究主要集中在海拔 1950~2650 m 之间。

1.2 研究方法

长白山高山冻原系统有5种植被类型:石海高山冻原植被(RT);石质高山冻原植被(ST);典型高山冻原植被(TT);草甸高山冻原植被(MT);沼泽高山冻原植被(ST)。

野外工作于2003年8月在长白山北坡高山冻原系统内分别在海拔1950, 2050, 2150, 2250, 2350, 2450, 2550和2650 m处的典型植被上,随机设置4个坡面样方,样方面积为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 。用收获法测试植被生物量和凋落物量。在每一样方内,于土壤5 cm和15 cm处测定土壤容重。在样方内分两层采集土壤样品,装入土壤袋中,重复4次,并在阴凉处凉干。

植物和凋落物样品中,总氮用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 硝化后用半微量凯氏法测定;总磷用钼锑抗比色法;总硫用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4 + \text{BaCl}_2$ 比浊法测定。

土壤样品总氮用凯氏定氮法;总磷测试方法与植物样品相同;总硫 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4 + \text{BaCl}_2$ 比浊法。

土壤氮硫磷储量根据以下公式计算^[13]: $C_i = BD \times C_c \times D$; 其中 C_i 是养分储量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), BD 是土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), C_c 是土壤养分含量, D 是土层厚度(cm)。

用 T 检验分析不同土壤类型中养分的显著性差异($p < 0.05$)。所有的统计分析在SPSS软件包中运行。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型中各组分的养分含量

表1列出了长白山高山冻原系统中5种植被类型中氮磷硫养分的浓度。在不同植被类型中地上与地下部分所占比例各不相同。N分布规律是:在石质高山冻原植被(ST,2.05%)中最大,在石海高山冻原植被(RT,1.34%)中最小;P分布规律与N相似,最大值(0.65%)在ST中,最小值在RT(0.27%)中。S分布规律是:在沼泽高山冻原植被(WT,0.49%)中含量最大,在ST(0.31%)中含量最小。长白山高山冻原不同植被类型中氮磷硫含量地上部分远大于地下部分,说明植物对N、P和S的吸收具有选择性,且不同器官对氮磷硫具有不同的选择吸收系数。

长白山高山冻原植被亚系统中,3种养分总含量分布规律是石质高山冻原植被(ST)>典型高山冻原植被(TT)>沼泽高山冻原植被(WT)>草甸高山冻原植被(MT)>石海高山冻原植被(RT),但在TT中,叶中养分含量高于茎。

表1 长白山高山冻原系统中不同植被类型各组分养分含量(%)
Table 1 Concentrations of nutrients in different parts of different vegetation types in Changbai Mountain

植被类型 Vegetation type	组分 Components	养分 Nutrients			
		全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全硫 Total sulphur	合计 Total
RT	地下 Belowground	0.29±0.12	0.05±0.02	0.22±0.12	0.56±0.05
	地上 Aboveground	1.07±0.78	0.13±0.03	0.14±0.02	1.34±0.07
ST	地下 Belowground	0.53±0.14	0.27±0.16	0.18±0.08	0.98±0.06
	地上 Aboveground	1.52±1.10	0.38±0.43	0.13±0.11	2.03±0.10
TT	根 Root	0.55±0.05	0.09±0.04	0.10±0.06	0.74±0.02
	茎 Stem	0.50±0.23	0.09±0.07	0.15±0.10	0.74±0.06
	叶 Leave	0.82±0.34	0.12±0.09	0.20±0.12	1.14±0.09
MT	根 Root	0.36±0.12	0.12±0.08	0.08±0.04	0.56±0.03
	茎 Stem	0.27±0.13	0.08±0.03	0.17±0.12	0.52±0.07
	叶 Leave	0.66±0.21	0.12±0.11	0.18±0.09	0.96±0.02
WT	根 Root	0.56±0.23	0.05±0.04	0.11±0.07	0.72±0.04
	茎 Stem	0.52±0.13	0.07±0.04	0.19±0.11	0.78±0.07
	叶 Leave	0.54±0.36	0.15±0.11	0.19±0.16	0.88±0.02

RT: 石海高山冻原植被 Rocky tundra; ST: 石质高山冻原植被 Stony tundra; TT: 典型高山冻原植被 Typical tundra; MT: 草甸高山冻原植被 Meadow tundra; WT: 沼泽高山冻原植被 Swamp tundra; 以下类同 the same below

2.2 生物量和养分积累

植物吸收的养分一部分以凋落物形式回归土壤,一部分存留在植物体内,构成了植被层的养分积累量。长白山高山冻原植被亚系统中,养分积累总量为72.46 kg·hm⁻²,其中氮积累量是48.55 kg·hm⁻²,磷积累量是10.33 kg·hm⁻²,硫积累量是13.61 kg·hm⁻²;生物量与养分积累量分布规律是WT>TT>MT>ST>RT(表2)。在较低海拔的植被类型(TT和WT),生物量分配状况是:地上部分>地下部分,如优势种笃斯越桔(*Vaccinium jliginosum* var. *alpinum*)生物量分配状况是:茎>根>叶;牛皮杜鹃(*Rhododendron chrysanthum*)生物量分配状况是:叶>根>茎;宽叶仙女木(*Dryas octopetala* var. *asiatica*)生物量分配状况是:地上>地下。在较高海拔的植被类型中,生物量分配状况是:地下部分>地上部分。在长白山高山冻原5种植被类型中,氮在TT和WT中积累量最高,且根系中氮储存最多,与生物量分配状况不同。磷在MT和WT中积累量最高,但是在MT和WT中不同植物器官的养分积累量分配各不相同,在MT中,根系磷储存最多,而在WT中叶器官磷储存最多,这说明磷在MT和WT的吸收、利用和迁移转化规律不同。在MT的土壤中相对缺磷而WT的土壤富含磷;与生物量分配规律一致。硫在WT中积累量最高,且硫积累量在各个器官分布规律为:叶>茎>根,与生物量(叶>根>茎)分布规律不尽相同。硫积累量总体规律是地上>地下。在不同海拔高度,由于气候等环境因子不同,因而生物量在典型植被优势种各器官间分配比例也各不相同。但是总体趋势是随着海拔的升高,根系(地下部分)生物量的比例增加,这是因为长白山高山冻原植物种对风蚀和雪蚀作用长期适应的结果。

生物量和养分在各个器官中的分配比例随着海拔的变化而呈现出不同的规律。按照文献^[14, 15]的观点,地下生物量与地上生物量的比值即根/茎(叶)是衡量生态系统生产力的一个基本指标。当地上生物量达到最大时,该指标随物种不同而有较大变化,越接近高海拔优势种,比值越大。在RT,ST,TT,MT和WT中该比值平均分别为0.66,2.42,0.65,1.46和0.38,差异较大。随着海拔的升高,根生物量所占的比例逐渐增加,叶生物量所占的比例逐渐减小,而茎生物量所占的变化不明显,而养分积累量随海拔变化却没有明显的规律性。

表2 不同植被类型生物量和养分积累
Table 2 Biomass and nutrient accumulation of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	组分 Components	生物量 Biomass (kg·hm ⁻²)	养分 Nutrients(kg·hm ⁻²)			合计 Total
			全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全硫 Total sulphur	
RT	地下 Belowground	23.82±2.84	0.07	0.01	0.05	0.13
	地上 Aboveground	36.18±7.18	0.39	0.05	0.05	0.48
ST	地下 Belowground	177±23.91	0.94	0.45	0.32	1.73
	地上 Aboveground	73±13.81	1.12	0.28	0.09	1.48
TT	根 Root	1160.32±110.8	6.34	1.09	1.21	8.63
	茎 Stem	1204.72±98.6	6.02	1.08	1.81	8.92
	叶 Leave	594.96±75.2	4.86	0.71	1.21	6.78
MT	根 Root	1722.6±110.45	6.20	2.07	1.38	9.65
	茎 Stem	655.4±98.4	1.77	0.52	1.11	3.41
	叶 Leave	522±32.17	3.45	0.63	0.94	5.01
WT	根 Root	833.98±212.7	4.67	0.42	0.92	6.00
	茎 Stem	753.48±78.3	3.92	0.53	1.43	5.88
	叶 Leave	1632.54±213.7	8.82	2.45	3.10	14.37
	合计 Total	9390	48.55	10.33	13.61	72.46

2.3 凋落物量和养分积累

凋落物是生态系统的重要组成成分,凋落物动态是生态系统物质循环和能量流动的一个重要方面^[16,17]。凋落物与植被动态密切相关,其变化伴随着生态系统的演替进程,凋落物的归还还是植物吸收的营养元素返还土壤的主要途径^[18]。

长白山高山冻原5种植被类型中凋落物量和养分积累量见表3。长白山高山冻原凋落物亚系统中,凋落物量分布规律是WT>TT>MT>ST>RT;平均凋落物量是1.96 kg·hm⁻²,TT和WT最大且分别是2.356 kg·hm⁻²和2.476 kg·hm⁻²;养分积累总量是82.5 kg·hm⁻²,其中N、P和S分别是46.28 kg·hm⁻²,21.14 kg·hm⁻²和15.08 kg·hm⁻²,养分积累量的分布规律为TT>WT>RT>MT>ST。这说明5种植被类型中凋落物的灰分含量、分解速率和在营元素循环中的作用存在显著差异。

从表3中可以看出,N在RT和TT中积累量最大,P在TT中积累量最大,S在WT中积累量最大。分析表明,除了在WT和TT凋落物量大外,不同植被类型中养分含量也大。经测定,S含量在WT中含量高,是由于在WT中优势种植物如宽叶仙女木、牛皮杜鹃凋落物中S含量较高;N含量在RT最高,其次是TT,是由于在海拔优势种植物如倒根蓼(*Polygonum ochotense*)凋落物中N含量很高;P在TT中含量最高,是因为在所采集到的典型高山冻原生态系统中的优势种如笃斯越桔、毛毡杜鹃(*Rhododendron confertissimum*)、牛皮杜鹃、宽叶仙女木和黑穗苔草(*Carex atrata*)凋落物中的P含量都较高,且基本相同。所以长白山典型高山冻原生态系统中凋落物的养分含量是非常丰富(在很少有人为干扰的生态系统内,凋落物是土壤养分的主要来源),因而典型高山冻原植被生长旺盛,因此TT内凋落物量占整个长白山高山冻原系统内凋落物92.7%,系统中凋落物养分积累总量占整个长白山高山冻原系统内凋落物养分积累总量的28.3%。

表3 不同植被类型凋落物量和养分积累量
Table 3 Biomass of litter and nutrient accumulation of different vegetation types

植被类型 Vegetation type	凋落物量 Biomass of litter (kg·hm ⁻²)	养分 Nutrients(kg·hm ⁻²)			合计 Total
		全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全硫 Total sulphur	
RT	1.378±0.78	11.16	4.27	1.1	16.53
ST	1.415±0.21	5.3	1.81	1.06	8.17
TT	2.356±3.41	11.31	7.54	4.47	23.32
MT	2.154±2.17	10.34	2.81	3.01	16.16
WT	2.476±0.89	8.17	4.71	5.44	18.32
合计 Total	1.98(Ave.)	46.28	21.14	15.08	82.5

2.4 土壤养分浓度与积累

长白山高山冻原系统5种植被类型中土壤养分含量及积累量见表4。长白山高山冻原土壤(0~20 cm)系统中,3种养分积累总量为39.6 t·hm⁻²,其中氮为23.76 t·hm⁻²,磷为5.86 t·hm⁻²,硫为9.98 t·hm⁻²。

(1)土壤氮变化数据不同植被类型中土壤氮主要集中在表层土中(0~10 cm)。在RT,ST和TT冻原土壤中,除MT的土壤以外,不同植被类型的土壤总氮变化规律不明显(*p*<0.05)。土壤表层(0~10 cm)总氮分布规律与10~20 cm及其相似。但是当冻

原植被由RT 转变为MT 时,土壤总氮含量显著地增加41%。土壤氮积累规律在表层(0~10 cm)与深层(10~20 cm)相似。氮在MT 中积累最多,其次是RT。

(2)土壤磷变化 在ST 中土壤总磷明显地($p<0.05$)低于其他植被类型。在整个长白山高山冻原土壤中,土壤总磷变化规律与总氮不一致。但在MT, TT 和WT 中冻原土壤表层(0~10 cm)总磷明显大于10~20 cm;而在RT 和ST 中土壤磷的变化规律却与之相反,但磷在土壤中积累量规律与土壤氮一致。

表 4 不同植被类型中土壤养分浓度及积累

Table 4 Concentrations and accumulation of nutrients in different vegetation types											
养分 Nutrients	土层 Soil depth (cm)	RT		ST		TT		MT		WT	
		浓度(%) Concentration	积累量 Accumulation (t·hm ⁻²)	浓度(%) Concentration	积累量 Accumulation (t·hm ⁻²)	浓度(%) Concentration	积累量 Accumulation (t·hm ⁻²)	浓度(%) Concentration	积累量 Accumulation (t·hm ⁻²)	浓度(%) Concentration	积累量 Accumulation (t·hm ⁻²)
TN	0~10	0.34 (0.07)	3.33	0.32 (0.03)	2.62	0.32 (0.02)	2.49	0.54* (0.15)	4.1	0.33 (0.14)	2.05
	10~20	0.22 (0.02)	2.02	0.24 (0.03)	1.94	0.23 (0.02)	1.63	0.34* (0.03)	2.55	0.18 (0.03)	1.01
TP	0~10	0.06 (0.05)	0.59	0.03 (0.02)	0.25	0.08 (0.06)	0.62	0.1* (0.06)	0.76	0.18 (0.03)	0.62
	10~20	0.05 (0.03)	0.46	0.03 (0.01)	0.24	0.09* (0.04)	0.64	0.12* (0.03)	0.9	0.14* (0.06)	0.78
TS	0~10	0.12 (0.01)	1.18	0.11 (0.02)	0.9	0.11 (0.01)	0.86	0.17 (0.04)	1.29	0.11 (0.03)	0.68
	10~20	0.08 (0.01)	0.74	0.12* (0.06)	0.97	0.11* (0.04)	0.78	0.3* (0.36)	2.25	0.06 (0.01)	0.34
合计 Total	0~20	—	113.65	—	115.36	—	128.19	—	162.05	—	108.1

TN:总氮Total nitrogen, TP:总磷Total phosphorus, TS: 总硫Total sulphur; Values in the parentheses are standard deviations of samples from four sites in one type of vegetation; * Means that this value is significantly different with that in RT of Alpine tundra at same depth ($p<0.05$)

(3)土壤硫变化 土壤硫含量在MT 中明显地高于其他植被类型($p<0.05$)。除了MT(土壤硫含量最高)外,在不同植被类型的不同土层中,土壤硫没有明显的变化($p<0.05$)。土壤硫在MT 中积累最多,其次是WT 和TT。

N 和S 在WT 土壤中含量较低而P 在MT 土壤中含量较低,可能的原因是在火山喷发后,该区域土壤的形成主要以物理风化为主,而很少有生物和化学作用,且在植被恢复以后,尽管由于这里常年低温,使得植物生长非常缓慢,但厌氧和还原性土壤不利于微生物新陈代谢和凋落物的分解,使得这里的冻原土富含腐殖质和泥炭层。在不同植被类型不同土层深度,土壤氮含量基本不变,是由于在长白山高山冻原系统中N 不是植物生长的限制因子和岩石风化使得N 有较高的净矿化速率。P 含量随植被类型而有明显得变化的原因是在每一植被类型中,P 是植物生长的限制因子。在长白山高山冻原系统中,MT 富含S。

2.5 长白山高山冻原系统中氮磷硫分布与积累特征分析

长白山高山冻原系统中5 种植被类型中3 种元素的总积累量为40644.98 kg·hm⁻²,其中氮为24734.85 kg·hm⁻²,硫为10018.7 kg·hm⁻²,磷为5891.43 kg·hm⁻²(表5)。

植被和凋落物中养分积累量仅占冻原生态系统的一小部分,氮磷硫在冻原生态系统中的分布呈现N>S>P 的趋势。N 总积累量分布为MT>RT>TT>ST>WT; S 总积累量分布为MT>RT>ST>TT>WT; N 总积累量分布为MT>WT>TT>RT>ST。土壤是长白山高山冻原生态系统的养分的主要储存库,其各养分的储存都达到了整个生态系统相应养分总量的95%以上。

3 结论

长白山高山冻原植被亚系统中,氮磷硫含量在不同植被类型中分布为ST>TT>WT>MT>RT,3 种养分(N,P 和S)积累总量为72.46 kg·hm⁻²,其中氮48.55 kg·hm⁻²,磷10.33 kg·hm⁻²,硫13.61 kg·hm⁻²。生物量与养分积累分布规律是WT>TT>MT>ST>RT。长白山高山冻原凋落物亚系统中,凋落物量分布规律是WT>TT>MT>ST>RT;氮磷硫积累总量为:82.5 kg·hm⁻²,其中N、P 和S 分别是46.28 kg·hm⁻²,21.14 kg·hm⁻²和15.08 kg·hm⁻²,养分积累总量分布规律是TT>WT>RT>MT>ST。据方万数据长白山高山冻原土壤(0~20 cm)中,氮磷硫积累总量为39.6 t·hm⁻²,其中氮为23.76 t·hm⁻²。土壤N 的分布规律与根系的分布有密切的联系^[17]。许多研究已经发现固氮物种的存在能够显著地增加土壤氮含量^[19~21],而也有

一些研究发现固氮树种和土壤表层总氮的积累没有相关性^[22,23]。研究发现RT 和MT 系统的土壤富含氮,在土壤表层有氮素的积累,原因是在RT 和MT 系统中植物和凋落物中氮素含量高,而氮素的利用率较低;在火山喷发后的成土过程中由于岩石分化使得N 有较高的净矿化速率;固氮树种的根系有特殊的空间分布格局。

表 5 长白山高山冻原系统中氮磷硫分配与积累 (kg · hm⁻²)

Table 5 Accumulation and distribution of N,P and S in Alpine tundra ecosystem of Changbai mountain

养分 Nutrients	组分 Components	RT	ST	TT	MT	WT	合计 Total
N	植物 Plant	0.46	2.06	17.22	11.42	17.41	48.57
	凋落物 Litter	11.16	5.3	11.31	10.34	8.17	46.28
	土壤 Soil	5350	4560	5020	6650	3060	24640
	合计 Total	5361.62	4567.36	5048.53	6671.76	3085.58	24734.85
S	植物 Plant	0.1	0.41	4.23	3.43	5.45	13.62
	凋落物 Litter	1.1	1.06	4.47	3.01	5.44	15.08
	土壤 Soil	1920	1870	1640	3540	1020	9990
	合计 Total	1921.2	1871.47	1648.7	3546.44	1030.89	10018.7
P	植物 Plant	0.06	0.73	2.88	3.22	3.4	10.29
	凋落物 Litter	4.27	1.81	7.54	2.81	4.71	21.14
	土壤 Soil	1050	490	1260	1660	1400	5860
	合计 Total	1054.33	492.54	1270.42	1666.03	1408.11	5891.43

长白山高山冻原系统土壤(0~20 cm)中,磷积累总量为5.86 t · hm⁻²。火山喷发后土壤磷储量的差异主要来自于不同土层的生物地化过程的变化^[24]。在土壤中,菌根共生体和其他的微生物的新陈代谢过程有助于保持土壤磷的含量。对土壤磷的生物控制主要包括根系生长格局,碎屑的输入数量和质量,细胞外酶的活性,有机物和酶整合的能力等^[20,25]。在火山喷发后长白山高山冻原植被恢复过程中,土壤磷没有明显得变化。土壤磷含量在ST 中较低而在MT 的深层(10~20 cm)却较高。在MT 和WT 中土壤磷储量较大。

长白山高山冻原系统土壤(0~20 cm)中,硫积累总量为9.98 t · hm⁻²。硫是植物生长所必须的常量营养元素。由于在不同的环境下,控制S 氧化还原的因子具有不确定性,如氧气的浓度,硫酸盐浓度,温度,可利用有机质等^[26]。长白山高山冻原系统中土壤硫主要是来自于岩石,有机质和凋落物的风化。研究发现在优势种植物和凋落物中硫含量较高而在土壤中S 含量相对较低,这说明在长白山高山冻原生态系统中S 和P 不仅有较高的利用效率,而且它们是植物生长的限制因子。为了清楚地解释巨型火山喷发后,在植被恢复过程中土壤N,P 和S 的作用机理等需要进行深入的研究。

References:

[1] WatsonR T, Rodhe H, Oeschger H, *et al.* Greenhouse gases and aerosols. In: Houghton, J. T. , Jenkins,G. J. , Ephraums, J. J. Eds. *Climate change*. Cambridge:Cambridge University Press, 1990. 1~40.

[2] Schimel D S, Enting I G, Heimann M, *et al.* CO₂and the carbon cycle. In: Houghton, J. T. , Filho,G. M. , Bruce, J. , Lee, *et al.* Eds. *Climate change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 35~71.

[3] Fan S, Gloor M, Mahlamn J, *et al.* A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic CO₂ data and models. *Science*, 1998, **282**: 442~446.

[4] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from change in land use 1850~1990. *Tellus*, 1999, **51B**: 298~313.

[5] Rayner P, Enting I, Francey R,*et al.* Reconstructing the recent carbon cycle from atmospheric CO₂, δ¹³C and O₂/N₂ observations. *Tellus*, 1999, **51B**: 213~232.

[6] Trangmar B B, Yost R S &. Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agronomy.* , 1985, **38**: 44~94.

[7] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in field. *Advance in Soil Science*, 1985, 1~70.

[8] IngridC B, William K L &. Rebecca R. Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe. *Ecosystems*, 1999, **2**: 422~438.

[9] Rossi R E, Mulla D K &. Journal A G. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monograph*, 1991, **62**: 277~314.

[10] Fortin 万方数据 Legendre P. Spatial autocorrelation and sampling design in plant ecology. *Vegetation*, 1989, **83**: 209~222.

[11] Legendre P &. Fortin M J. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetation*, 1989, **80**: 107~138.

[12] Wu G, Zhao J Z, Shao G F, *et al.* Carbon cycle in alpine tundra ecosystem of Changbai Mountain and its comparison with arctic tundra. *China Science (D)*, 2001, **31** (12): 1039~1045.

[13] Guo L B. & Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.*, 2002, **8**: 345~360.

[14] Ma K P, Guo Y S, Zhou R C. Regularity on Belowground biomass of *Deyeuxia angustifolia* meadow. *Pratacultural Science*, 1992, **9** (2): 24~28.

[15] Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* The biomass of *Phragmites australis* and its influencing factors in Wuliangsu Hai. *Acta Phytoecological Sinica*, 2004, **28** (2): 246~251.

[16] Maguire D A. Branch mortality and potential litter fall from Douglas-fir trees in stands of varying density. *Forest Ecology and Management*, 1994, **70**: 41~53.

[17] Xue L, Luo S. Concentration and distribution of nutrients in an Artificial *Cunninghamia lanceolata* stand ecosystem at Yishan. *Journal of South China Agricultural University*, 2002, **23** (1): 24~26.

[18] Berger T W, Neubauer C, & Glatzel G. Factors controlling soil carbon and nitrogen stores in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *For. Ecol. Manage.*, 2002, **159**: 3~14.

[19] Binkley D. Mixtures of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species. In: Cannell, M. G. R., Malcolm, D. C., Robertson, P. A. Eds. *The ecology of mixed-species stands of trees*. Oxford: The British Ecological Society, 1992. 23~34.

[20] Conard S G, Jarmillo A E, Cromack Jr, K, *et al.* *The role of the Genus ceanothus in western forest ecosystems*. US Department of Agriculture, 1985. 181~182.

[21] Xiongwen Chen & Li B L. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in Northeast China. *Forest ecology and management*, 2003, **186**: 197~206.

[22] Walker L R. Nitrogen fixer and species replacements in primary succession. In: Miles, J., Walton, D. W. H. eds., *Primary Succession on Land. Special Publ.* 12, The British Ecological Society, Oxford, Blackwell Scientific Publications, London, 1993. 112~131.

[23] Cromack Jr, K, Miller R E, Helgerson O T, *et al.* Soil carbon and nutrients in a coastal Oregon Douglas-fir plantation with red alder. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, **63**: 232~239.

[24] Frossard E, Brossard M, Hedley M J, *et al.* Reactions controlling the cycling of P in soils. In: Tiessen, H. ed., *Phosphorus in the Global Environment: Transfers, Cycles and Management*. New York: Ellis Horwood Chichester, 1995. 145~177.

[25] Zou X, Binkley D & Caldwell B A. Effects of nitrogen-fixing trees on phosphorus biogeochemical cycling in contrasting forests. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, **59**: 1452~1458.

[26] Holmer M & Storkholm P. Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: a review. *Freshwater Biol.*, 2001, **46** (4), 431~451.

参考文献:

[12] 吴钢, 赵景柱, 邵国凡, 等. 长白山高山冻原生态系统的碳循环及与北极对比研究. *中国科学(D)*, 2001, **31** (12): 1039~1045.

[13] 马克平, 郭亚胜, 周瑞昌. 小叶樟草甸地下生物量形成规律的研究. *草业科学*, 1992, **9** (2): 24~28.

[15] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析. *植物生态学报*, 2004, **28** (2): 246~251.

[16] 薛立, 罗山. 宜山杉木人工林生态系统养分含量和分布的研究. *华南农业大学学报*, 2002, **23** (1): 24~26.