

# 五大连池不同喷发时期火山土壤微生物量变化特征

曹宏杰<sup>1,2</sup>, 王立民<sup>1</sup>, 徐明怡<sup>1,2</sup>, 黄庆阳<sup>1</sup>, 谢立红<sup>1</sup>, 罗春雨<sup>1</sup>, 倪红伟<sup>3\*</sup> (1. 黑龙江省科学院自然与生态研究所, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室, 黑龙江哈尔滨 150040; 3. 黑龙江省林业科学院, 黑龙江哈尔滨 150081)

**摘要** [目的]明确火山喷发后森林生态系统长期发展演化过程中土壤微生物量的变化特征。[方法]采用空间代替时间的方法,选择五大连池火山群中的老黑山(1721年喷发)、东焦得布山(17万年前喷发)、小孤山(28万年前喷发)、尾山(40万年前喷发)和北格拉球山(70万年前喷发)构成土壤发育的时间序列,分析土壤微生物量碳和氮含量以及土壤理化因子,探索火山喷发形成后森林生态系统长期演化过程中土壤微生物量的时间动态及其影响因素。[结果]随火山喷发形成时间增加,微生物量碳含量总体呈先增加后减少再增加的趋势;微生物量氮总体呈先增加后减少的趋势。土壤微生物量在南坡和北坡上差异显著,数量上表现为北坡>南坡。土壤微生物量碳和氮对土壤总有机碳和全氮的贡献率分别为0.92%~3.03%和1.19%~6.33%,表层(0~10 cm)高于底层(10~20 cm),贡献率的时间变化特征与土壤微生物量碳和氮的时间变化特征基本一致。土壤微生物量碳和氮呈极显著正相关;随火山喷发时间的延长,土壤微生物量与理化因子的相关程度下降。[结论]不同喷发时期火山土壤微生物量及其对土壤养分的贡献率呈波动性变化特征,不同坡向和土层深度土壤微生物量含量存在明显分异,土壤养分对微生物生存发展的限制作用随生态系统发育时间延长而降低。

**关键词** 五大连池;火山;喷发时期;土壤微生物量;变化特征

中图分类号 S154.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)19-0070-06

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.19.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Variation Characteristics of Soil Microbial Biomass in Wudalianchi during Different Volcano Eruption Periods

CAO Hong-jie<sup>1,2</sup>, WANG Li-min<sup>1</sup>, XU Ming-yi<sup>1,2</sup> et al (1. Institute of Natural Resources and Ecology, Science Academy of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Harbin, Heilongjiang 150040)

**Abstract** [Objective] To clarify the variation characteristics of soil microbial biomass during the long-term development and evolution of forest ecosystems after volcanic eruptions. [Method] Using the method of space instead of time, Laoheishan (erupted on 1721), Dongjiaodebu (erupted at 170 000 years ago), Xiaogushan (erupted at 280 000 years ago), Weishan (erupted at 400 000 years ago), and Beigelaqiu (erupted at 700 000 years ago) in the Wudalianchi volcanic group were selected to form the time series of soil development, the carbon and nitrogen contents of soil microbial biomass and soil physicochemical factors were analyzed, and the temporal dynamics of soil microbial biomass and its influencing factors during the long-term evolution of forest ecosystems after the formation of volcanic eruptions were explored. [Result] With the increase of volcanic eruption formation time, the microbial biomass carbon content generally increased first, then decreased and finally increased; the microbial biomass nitrogen generally increased firstly and decreased then. The soil microbial biomass was significantly different between the southern and northern slopes, and the quantity was expressed as the northern slope > the southern slope. The contribution rates of soil microbial biomass carbon and nitrogen to soil total organic carbon and total nitrogen were 0.92%~3.03% and 1.19%~6.33%, respectively. The surface layer (0~10 cm) was higher than the bottom layer (10~20 cm), and the temporal variation characteristics of the contribution rate were basically consistent with the temporal variation characteristics of soil microbial biomass carbon and nitrogen. There was a extremely significant positive correlation between soil microbial biomass carbon and nitrogen. With the extension of volcanic eruption time, the correlation between soil microbial biomass and physicochemical factors decreased. [Conclusion] The soil microbial biomass and its contribution rate to soil nutrients showed fluctuating characteristics in different eruption periods volcanic. The microbial biomass content of soil in different slope directions and soil depth showed differentiation. The limiting effect of soil nutrients on microbial survival and development decreased with the extension of ecosystem development time.

**Key words** Wudalianchi; Volcano; Eruption periods; Soil microbial biomass; Variation characteristics

土壤微生物作为地球生物演化进程中的先锋种类和重要的活性组分,广泛参与土壤中的生物和生物化学反应<sup>[1]</sup>,是土壤中物质转化和养分循环的重要动力和主要驱动因素,对生态系统的发展具有重要的促进作用<sup>[2]</sup>。尽管土壤微生物量碳仅占土壤有机碳的1.92%左右<sup>[3]</sup>,但其对生态系统C、N循环的调控作用不容忽视,是植物所需营养物质循环和转运的重要组成部分<sup>[4]</sup>,因此微生物体碳、氮被认为是土壤活性养分的重要储存库、植物生长可利用养分的重要来源<sup>[5]</sup>。近年来我国学者在典型生态系统<sup>[6]</sup>、土地利用方式<sup>[7]</sup>

及退化土壤植被恢复<sup>[8]</sup>对土壤微生物量的影响等方面开展了大量研究,然而由于我国幅员辽阔,气候条件、土壤类型以及地质条件的复杂多样,目前关于火山森林生态系统这一特殊生境土壤微生物量的研究还较少。

五大连池火山自然保护区,地处黑龙江省黑河市西南部,位于小兴安岭西南山麓与松嫩平原的过渡地带,由不同喷发时期的14座火山组成,是我国保存最为完好的内陆单成因火山群。国内一些学者对该区域植被演替、物种组成、植物多样性及植物功能性状<sup>[9-10]</sup>等方面进行了大量研究。近年来,五大连池微生物方面的研究逐渐增多,主要包括矿泉水中微生物多样性、古菌分布规律、人为干扰对放线菌群落结构影响以及利用PLFA方法探讨不同年代火山的细菌、真菌和放线菌的组成等<sup>[11-14]</sup>。五大连池火山群植被演替阶段、植物群落特性、土壤温湿度、土壤理化性质等调控土壤微生物量的因子与其他的森林生态系统存在一定的差异,同

**基金项目** 国家自然科学基金项目(31770497);黑龙江省重点研发计划(GA21C030);中央引导地方科技发展专项(ZY20B15);黑龙江省科学院基金项目(KY2021ZR03);黑龙江省院所基本应用技术专项(ZNJZ2018ZR-01)。

**作者简介** 曹宏杰(1978—),男,河北承德人,副研究员,博士,从事土壤生态学和土壤微生物方面的研究。\*通信作者,研究员,博士,从事生态学和生物多样性等方面的研究。

**收稿日期** 2021-11-02

时,植物方面的研究结果表明五大连池不同喷发时间形成的火山其植物组成等方面均存在一定时序特征,但作为同一生态系统的重要组成部分的土壤微生物量的变化特征等目前鲜见报道,揭示不同喷发时期火山土壤微生物量的变化特征是深入研究该森林生态系统的重要基础。该研究通过空间代替时间的方法,选择五大连池火山群中喷发历史年代清晰、植被人为干扰较小的5座不同喷发时期的火山构成历史年代序列样地,探讨土壤微生物量的变化特征及其影响因子,以期了解火山生态系统土壤生物特征提供依据,也为火山生态系统的保护开发、生态系统重建提供参考。

## 1 材料与方法

**1.1 样地概况** 五大连池国家级自然保护区位于黑龙江省西北部五大连池市境内,地处小兴安岭南麓与松嫩平原的过渡地带。保护区东西长约40 km、南北宽约27 km,总面积1 060 km<sup>2</sup>,其地理坐标为126°00′~126°26′E、48°34′~48°48′N。五大连池国家级自然保护区(1996年)是我国第一个以火山自然环境及生态系统为保护对象的自然保护区,也是国家级地质公园(2000年8月)和世界地质公园(2004年2月)。五大连池火山群历经早更新世早期(βQ11)、早更新世晚期(βQ12)、中更新世早期(βQ21)、中更新世中期(βQ22)、中更新世晚期(βQ23)、上更新世早期(βQ31)和现代喷发共7次火山喷发旋回形成了14座火山,详见参考文献[15]。样地位置及其概况如图1所示。

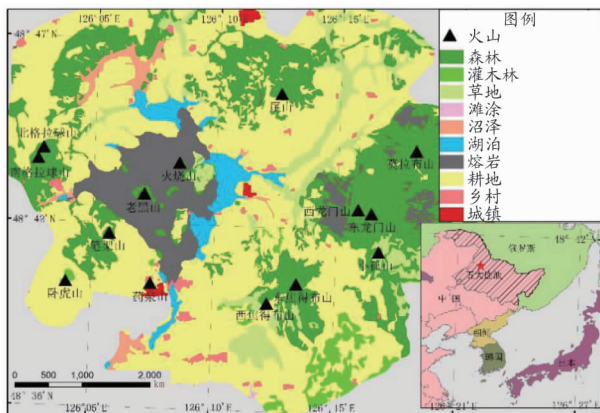


图1 研究区位置及其概况

Fig. 1 Location and overview of the study area

该区属于寒温带大陆性季风区气候,夏季短而炎热,在6、7月份时,最高温可达到38℃;冬季长而严寒,在1月份,最低温可达到-42℃。该地区的年平均气温为0~0.5℃,年降水量为467 mm,无霜期为110 d,霜冻期始于9月10日,终霜期在5月20日左右。

**1.2 研究对象及采样方法** 该研究选择老黑山(laoheishan volcano, LHV)、东焦得布山(dongjiaodebushan volcano, DJD-BV)、小孤山(xiaogushan volcano, XGV)、尾山(weishan volcano, WV)和北格拉球山(beigelaqiushan volcano, BGLQV)5座最后一次喷发历史年代清晰、人为干扰少和生态环境完整的火山为研究对象,采用“空间代替时间”的方法,研究时间序列上土壤微生物量的变化特征。

2018年8月进行土壤样品的采集,为了降低土壤空间异质性的影响和一次取样对土壤造成的影响,在每座火山山体的南、北2个坡向的山脚、坡中和山顶的同一坡位设置3个20 m×20 m的样方,样方内用多点混合法采集表层(0~10 cm)和底层(10~20 cm)土样,每个坡位取3个重复土壤样品,每个坡向共计采集土壤样品9个,样品采集后立即置入带冰袋的冷藏箱内,带回实验室,剔除植物根系和石块后将土样分为2部分:一部分鲜土过2 mm筛后7 d内完成土壤微生物量的测定,另一部分风干后进行土壤养分等指标的测定。

## 1.3 测定方法

**1.3.1 土壤指标的测定。** pH用酸度计法;含水量(water content, WC)用烘干法;总有机碳(total organic carbon, TOC)和全氮(total nitrogen, TN)采用元素分析仪(欧维特EA3000,意大利)法;硝态氮和铵态氮分别采用酚二磺酸比色法和靛酚蓝比色法;全磷(total phosphorus, TP)和速效磷(available phosphorus, AP)分别采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法和碳酸氢钠浸提比色法<sup>[16]</sup>。

**1.3.2 微生物量碳和氮的测定。** 微生物量碳、氮采用总有机碳氮分析仪(耶拿multi N/C® 2100S)测定。土壤微生物量碳(soil microbial biomass carbon, SMBC) =  $(E_c - E_{c_0}) / 0.38$ , 土壤微生物量氮(soil microbial biomass nitrogen, SMBN) =  $(E_c - E_{c_0}) / 0.54$ , 其中,  $E_c$  为熏蒸土样浸提液中碳或氮量,  $E_{c_0}$  为不熏蒸土样浸提液中碳或氮量, 0.38和0.54为校正系数。具体方法详见参考文献[17]。

**1.4 数据分析方法** 所得数据为3个测试重复的平均值,所有结果以干土表示;用Excel 2019进行数据统计,SPSS 16.0进行显著性及相关性分析,OriginPro 2016b作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微生物量碳和氮的变化特征

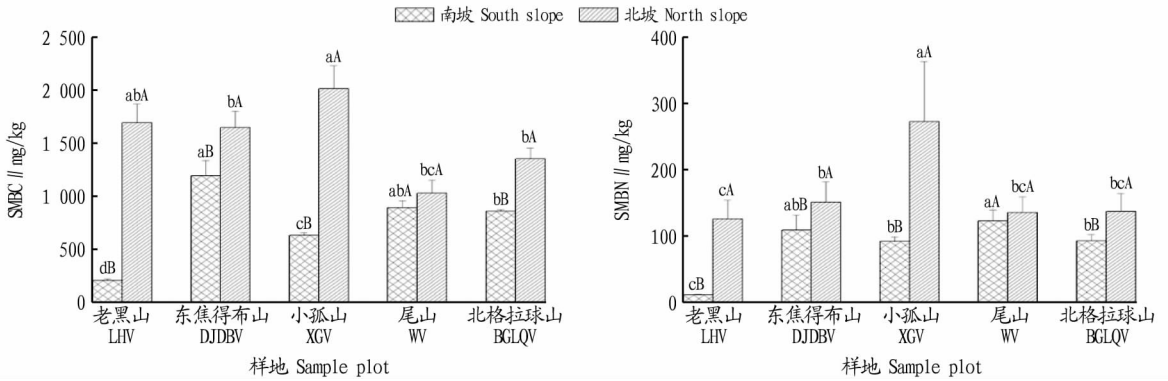
**2.1.1 不同坡向土壤微生物量碳和氮的变化特征。** 由图2可知,土壤微生物量碳(SMBC)含量总体呈先增加后减少再增加的趋势,土壤微生物量氮(SMBN)含量总体呈先增加后减少的趋势。南坡不同历史年代火山SMBC和SMBN含量均以老黑山最低,与其他火山之间差异显著( $P < 0.05$ );东焦得布山SMBC含量最高,除与尾山差异不显著外,与小孤山、老黑山和北格拉球山之间差异均达显著水平( $P < 0.05$ )。北坡小孤山SMBC和SMBN含量最高,与东焦得布山、尾山和北格拉球山差异显著( $P < 0.05$ );小孤山SMBC含量与老黑山差异不显著( $P > 0.05$ );老黑山SMBN含量最低,与小孤山SMBN含量相差1.17倍。

**2.1.2 不同土层深度土壤微生物量碳和氮的变化特征。** 由图3可知,南、北2个坡向不同历史年代火山土壤微生物量碳(SMBC)含量表层(0~10 cm)和底层(10~20 cm)的变化趋势相同。表层SMBC含量显著高于底层( $P < 0.05$ )。南坡东焦得布山底层SMBC含量最高,与其他4座火山之间差异显著( $P < 0.05$ )。北坡老黑山、东焦得布山和小孤山底层SMBC含量较高,三者之间无显著差异,北格拉球山底层SMBC含量高

于尾山,二者差异显著,且与老黑山、东焦得布山和尾山之间差异也显著( $P<0.05$ )。

由图 3 可知,南、北 2 个坡向不同历史年代火山土壤微生物量氮(SMBN)含量表层和底层的趋势相似,表层高于底层,南坡除老黑山外差异均达显著水平( $P<0.05$ );东焦

得布山底层 SMBN 含量最高,与老黑山、小孤山和北格拉球山之间差异显著( $P<0.05$ )。北坡小孤山底层 SMBN 含量最高,与其他 4 座火山之间差异显著( $P<0.05$ ),东焦得布山、尾山和北格拉球山之间底层 SMBN 含量无显著差异( $P>0.05$ )。

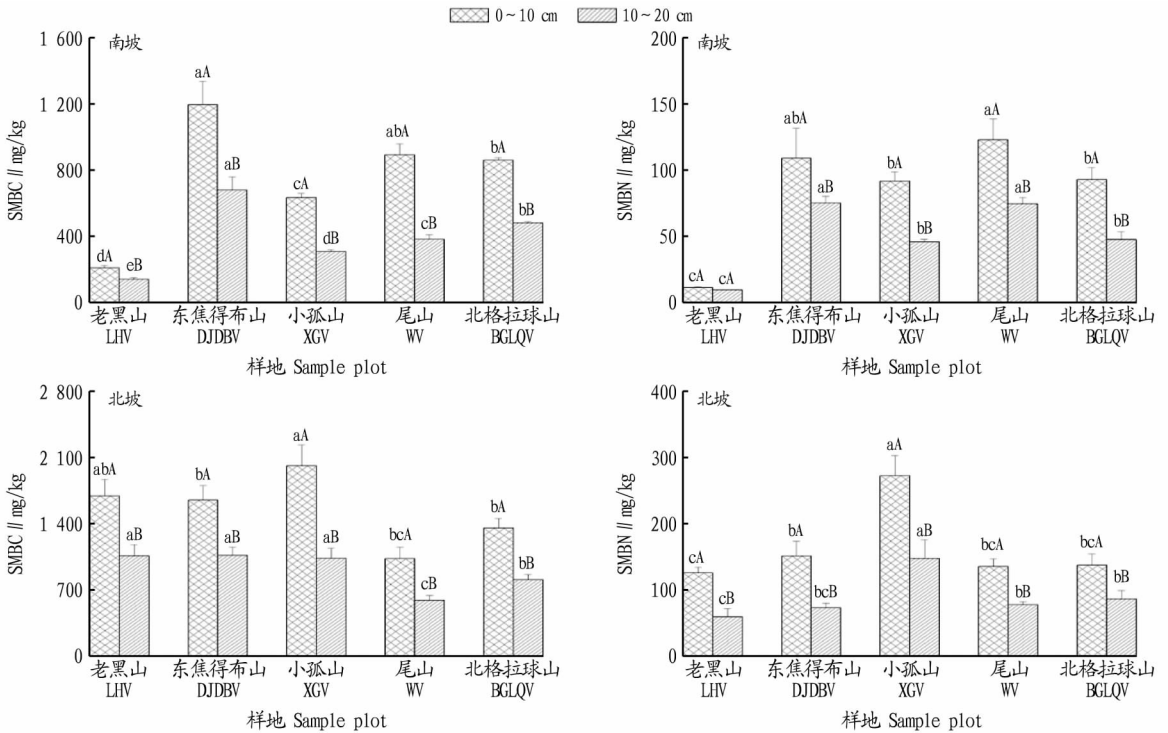


注:不同小写字母表示同一坡向不同火山间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示相同火山不同坡向间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different volcanoes in the same slope aspect ( $P<0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences between different slope aspects of the same volcano ( $P<0.05$ )

图 2 不同坡向土壤微生物量碳和氮

Fig. 2 Soil microbial biomass carbon and nitrogen of different slopes



注:不同小写字母表示同一土层不同火山间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示相同火山不同土层间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different volcanoes in the same soil layer ( $P<0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences between different soil layers of the same volcano ( $P<0.05$ )

图 3 不同土层微生物量碳和氮含量特征

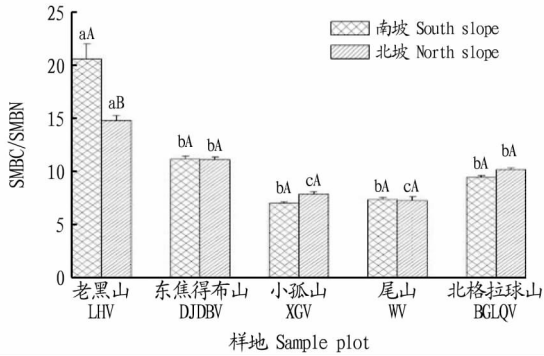
Fig. 3 Characteristics of microbial biomass carbon and nitrogen in different soil layers

**2.2 土壤微生物量碳、氮比的变化特征** 由图 4 可知,不同历史年代的 5 座火山微生物量碳、氮比值 (SMBC/SMBN) 在 6.99~20.59。老黑山南、北 2 个坡向 SMBC/SMBN 值均显著高于其他 4 座火山( $P<0.05$ ),老黑山 SMBC/SMBN 值南坡显

著高于北坡( $P<0.05$ ),而其他 4 座火山南坡和北坡之间差异不显著( $P>0.05$ )。

由图 5 可知,不同历史年代火山 SMBC/SMBN 值表层(0~10 cm)和底层(10~20 cm)的变化趋势相似。南坡除北

格拉球山外,表层均高于底层,老黑山和尾山表层与底层 SMBC/SMBN 值差异显著 ( $P < 0.05$ );老黑山表层和底层 SMBC/SMBN 值均最高,与其他 4 座火山之间均差异显著 ( $P < 0.05$ )。北坡老黑山和东焦得布山 SMBC/SMBN 值底层高于表层,且差异显著 ( $P < 0.05$ )。

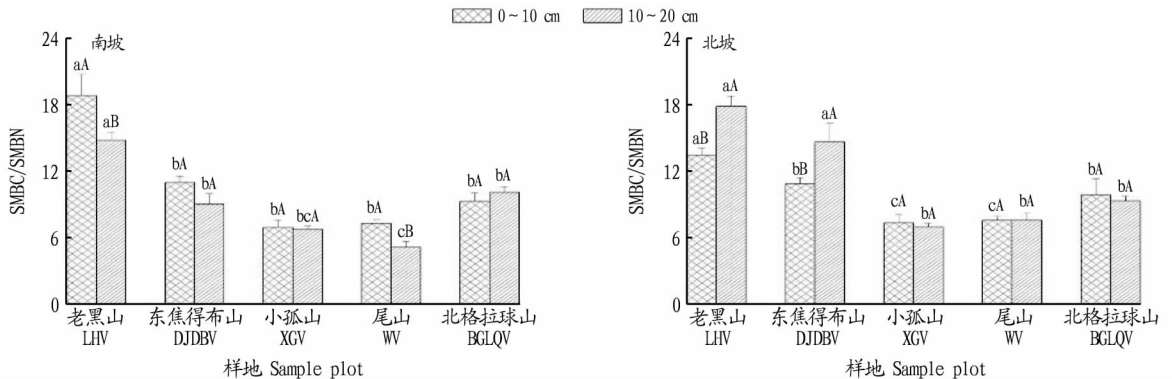


注:不同小写字母表示同一坡向不同火山间差异显著 ( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示相同火山不同坡向间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different volcanoes in the same slope aspect ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences between different slope aspects of the same volcano ( $P < 0.05$ )

图 4 不同坡向土壤微生物量碳氮比

Fig. 4 The ratio of soil microbial biomass carbon and nitrogen in different slope aspects



注:不同小写字母表示同一土层不同火山间差异显著 ( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示相同火山不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different volcanoes in the same soil layer ( $P < 0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences between different soil layers of the same volcano ( $P < 0.05$ )

图 5 不同土层土壤微生物量碳氮比

Fig. 5 The ratio of soil microbial biomass carbon and nitrogen in different soil layers

着火山生态系统发育时间的延长,土壤微生物量与理化因子的相关程度下降,表明土壤养分不再成为其存在发展的限制因素。

### 3 讨论

**3.1 土壤微生物量的数量和分布特征** 该研究表明 SMBC 含量总体呈先增加后减少再增加的趋势,而 SMBN 含量总体呈现先增加后减少的趋势。杨宁等<sup>[18]</sup>对衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变研究中发现,在生态系统恢复或发育初期土壤微生物量呈增加趋势。Jia 等<sup>[19]</sup>研究认为土壤微生物量会随着生态系统恢复年限增加而增加,达到一

**2.3 土壤微生物量对土壤营养库的贡献率特征** 由图 6 可知,SMBC 对土壤总有机碳的贡献率 (SMBC/TOC) 为 0.92%~3.03%。老黑山 SMBC/TOC 值南、北 2 个坡向上与其他 4 座火山之间差异均达显著水平 ( $P < 0.05$ ),其他 4 座火山在南、北 2 个坡向差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。东焦得布山、小孤山和尾山南坡和北坡之间的 SMBC/TOC 值差异显著 ( $P < 0.05$ )。SMBC/TOC 值随火山喷发时间的延长呈逐渐降低的趋势。

由图 6 可知,SMBN 对土壤全氮的贡献率 (SMBN/TN) 为 1.19%~6.33%。小孤山 SMBN/TN 值最高,与其他 4 座火山之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。东焦得布山、尾山和小孤山南、北 2 个坡向间 SMBN/TN 值差异显著 ( $P < 0.05$ ),东焦得布山和小孤山 SMBN/TN 值南坡低于北坡,尾山北坡低于南坡。SMBN/TN 值随火山喷发时间的延长呈逐渐升高再降低的趋势。

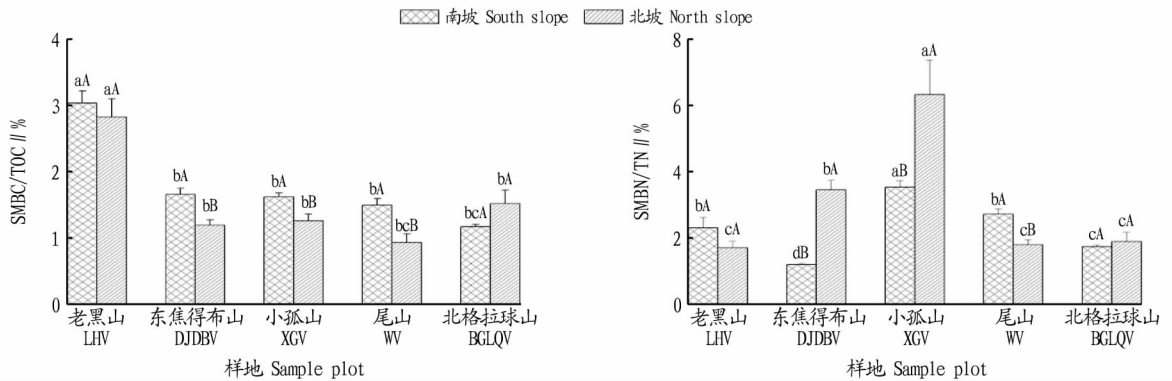
**2.4 土壤微生物量与土壤理化性质的相关性** 从表 1 可以看出,不同历史年代火山 SMBC 和 SMBN 呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),老黑山 SMBC 与土壤总有机碳 (TOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、铵态氮 ( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、硝态氮 ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、速效磷 (AP) 和 pH 具有显著的相关关系,SMBN 与除速效磷外也具有显著的相关关系;东焦得布山 SMBC 和 SMBN 与理化因子均具有显著的相关关系;而小孤山、尾山和北格拉球山 SMBC 和 SMBN 仅与部分理化因子具有显著的相关关系。随

个最大值后会呈现一个相对稳定的状态;梁月明等<sup>[20]</sup>和高喜等<sup>[21]</sup>研究认为土壤微生物量随植被的恢复而增大,这与该研究的结果并不一致,这可能是由于以往的相关研究都是在相对较短的时间尺度上进行的,反映的是植物一个更替过程中土壤微生物量的变化<sup>[22]</sup>。土壤微生物量表高于底层,且不同火山间存在明显差异,说明火山喷发时间的不同造成火山生态系统土壤发育程度和植物群落的差异,进而影响土壤微生物量的分布和数量,也与各土层土壤养分含量、水热条件、微生物活性等不同有关<sup>[23]</sup>。

该研究结果表明,SMBC 和 SMBN 含量北坡高于南坡。

研究表明,地形因素可以通过改变和重塑环境微气候、土壤理化性质、植被生长状况以及地下碳输入等途径影响土壤微生物的生长及生物量<sup>[24]</sup>。坡向作为山地的主要地形因子,对土壤理化性质、土壤微生物组成、活性及群落结构、土壤与植物的化学计量学特征等具有重要影响。因此,坡向影响土

壤的含水率进而提高土壤的微生物周转及其数量可能是南北坡存在差异的原因<sup>[25]</sup>。该研究结果与赵彤等<sup>[26]</sup>、刘效东等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。这些说明山地土壤微生物量北坡高于南坡可能是一个普遍现象。



注:不同小写字母表示同一坡向不同火山间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示相同火山不同坡向间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different volcanoes in the same slope aspect ( $P<0.05$ ), and different capital letters indicate significant differences between different slope aspects of the same volcano ( $P<0.05$ )

图6 不同坡向对微生物量对土壤营养库的贡献率特征

Fig. 6 Characteristics of contribution rate of microbial biomass to soil nutrient bank in different slope aspects

表1 微生物量与土壤理化因子的相关性

Table 1 Correlation between microbial biomass and soil physicochemical factors

样地 Sample plot	微生物 量 MB	SMBC	SMBN	TOC	TN	TP	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	$\text{NO}_3^--\text{N}$	AP	pH
老黑山 LHV	SMBC	—	0.972**	0.797**	0.749**	-0.423**	0.640**	0.570**	0.355*	-0.646**
	SMBN	0.972**	—	0.763**	0.768**	-0.462**	0.636**	0.586**	0.245	-0.630**
东焦得布山 DJDBV	SMBC	—	0.919**	0.749**	0.406*	0.467**	0.624**	0.579**	0.641**	-0.426**
	SMBN	0.919**	—	0.616**	0.381*	0.432**	0.704**	0.513**	0.517**	-0.443**
小孤山 XGV	SMBC	—	0.967**	0.927**	0.813**	-0.254	-0.446*	-0.393	0.874**	0.180
	SMBN	0.967**	—	0.849**	0.671**	-0.244	-0.423	-0.407	0.777**	0.051
尾山 WV	SMBC	—	0.828**	0.312	0.395	-0.116	0.645**	0.549**	0.140	0.195
	SMBN	0.828**	—	0.360	0.455*	0.058	0.489*	0.395	0.061	-0.140
北格拉球山 BGLQV	SMBC	—	0.951**	-0.162	0.284	0.135	0.104	-0.334	0.182	-0.508**
	SMBN	0.951**	—	-0.333	0.205	0.112	-0.103	0.499**	0.015	-0.303

注:\*.  $P<0.05$ ; \*\*.  $P<0.01$

**3.2 微生物量对土壤营养库贡献率特征** 土壤微生物是土壤生态系统持续发展以及土壤肥力形成的核心驱动力,它不仅参与土壤有机质分解、释放养分,与土壤速效养分的来源密切相关,可作为土壤质量研究的有效指标<sup>[28]</sup>,同时还与地上植被存在土壤养分竞争关系<sup>[29]</sup>,因此,在分析土壤微生物量绝对含量的同时,还应该考虑 SMBC 和 SMBN 含量在土壤有机碳和全氮中的比例<sup>[17]</sup>。土壤微生物量与土壤全量养分的比值代表了土壤单位营养所负载的微生物量,可以用来表征土壤微生物量的潜在有效营养源/汇特征<sup>[30]</sup>。该研究中,老黑山和其他4座火山的 SMBC/TOC 值差异显著,说明火山喷发后植被恢复过程的前期微生物量是潜在的营养源,而生态系统恢复到一定阶段土壤微生物量是潜在的营养库。生态系统达到相对稳定状态时,土壤微生物量与土壤全量有机碳的比值处于稳定状态,其比值大小还可以表征土壤碳素的平均可利用性,即代表微生物的代谢活性<sup>[31]</sup>。该研究中,

SMBC/TOC 值随喷发时间延长呈逐渐降低的趋势,除老黑山外其他4座火山的 SMBC/TOC 值无显著差异且波动范围很小,这可能说明老黑山和其他4座火山微生物代谢活性存在明显的差别,而其他4座火山虽然喷发年代存在差异但生态系统可能已经处于一个相对稳定的状态。

土壤微生物量碳氮比(SMBC/SMBN)是表征微生物群落结构信息的重要指标<sup>[32]</sup>,一般情况下,细菌、真菌和放线菌的碳氮比具有相对固定的比值<sup>[33]</sup>。该研究发现老黑山土壤微生物量碳氮比最高,在14.79~20.59,其他4座火山的土壤微生物量碳氮比在6.99~11.18,说明老黑山和其他4座火山的微生物组成存在显著差异,老黑山土壤的真菌含量相对丰富而其他4座火山土壤的细菌和放线菌比例可能较高,这一结论还需要通过磷脂脂肪酸(PLFA)以及高通量测序等技术进一步验证。

**3.3 土壤微生物量与土壤理化因子的相关性** 土壤微生物

量极易受土壤环境因子的影响,是土壤有机组分中最易变化和活跃的部分,其含量与土壤养分等环境指标有关<sup>[34]</sup>。该研究中,老黑山和东焦得布山的土壤总有机碳、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮和 pH 与 SMBC 和 SMBN 间存在显著的相关关系,而其他 3 座火山 SMBC 和 SMBN 仅与部分土壤因子具有显著的相关关系。

火山喷发后生态系统恢复初期,火山熔岩风化速度缓慢,外来营养元素稀缺,土壤发育程度较低甚至还未出现明显的土层分化,其有效养分的供给能力不能满足微生物的代谢需要,成为微生物增长的限制因素,因此,表现出与土壤微生物量存在较强的相关性,随着火山生态系统发育的不断成熟,植被状况得到改变,植物根系分泌物和凋落物输入增加<sup>[35]</sup>,土壤养分能够满足微生物的生长要求,不再成为其生存发展的限制因素,因此,表现为土壤微生物量与理化因子的相关程度下降<sup>[36]</sup>。

由于不同历史年代喷发的火山生态系统演化时间存在差异,地表覆盖状况、物种组成与结构不同,影响生态过程、养分循环及演替方式,决定着五大连池火山演替的发展方向与速度,进而导致生态系统结构功能的改变。因此,推测生态系统发育时间的长短可能是导致土壤理化因子对土壤微生物量的影响程度存在差异的主要原因。

#### 4 结论

随火山喷发形成时间增加,SMBC 含量总体呈先增加后减少再增加的趋势,SMBN 含量总体呈现先增加后减少的趋势。土壤微生物量在不同坡向有显著的差异,表现为北坡大于南坡。SMBC 和 SMBN 对土壤总有机碳和全氮的贡献率分别为 0.92%~3.03% 和 1.19%~6.33%。SMBC 和 SMBN 间呈极显著正相关;随着火山生态系统发育时间的延长,土壤微生物量与理化因子的相关程度下降,土壤养分不再成为其生存发展的限制因素。

#### 参考文献

- 牛森,张立峰,马荣荣,等.高寒草甸土壤微生物量及酶活性的研究[J].南开大学学报(自然科学版),2016,49(4):53-60.
- BOLAT İ,ŞENSOY H,ÖZER D.Short-term changes in microbial biomass and activity in soils under black locust trees (*Robinia pseudoacacia* L.) in the northwest of Turkey[J]. Journal of soils & sediments,2015,15(11):2189-2198.
- ZHOU Z H,WANG C K.Reviews and syntheses:Soil resources and climate jointly drive variations in microbial biomass carbon and nitrogen in China's forest ecosystems[J]. Biogeosciences,2015,12(22):6751-6760.
- KAISER E A,HEINEMEYER O.Seasonal variations of soil microbial biomass carbon within the plough layer[J]. Soil biology & biochemistry,1993,25(12):1649-1655.
- MURATA T,TANAKA H,YASUE S,et al.Seasonal variations in soil microbial biomass content and soil neutral sugar composition in grassland in the Japanese Temperate Zone[J]. Applied soil ecology,1999,11(2/3):253-259.
- 江元明,庞学勇,包维楷.岷江上游油松与云杉人工林土壤微生物量及其影响因素[J].生态学报,2011,31(3):801-811.
- 庞绪,何文清,严昌荣,等.耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响[J].生态学报,2013,33(4):1308-1316.
- 王凤芹,田丽青,宋安东,等.华北刺楸林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J].林业科学,2015,51(3):16-24.
- 谢立红,黄庆阳,曹宏杰,等.五大连池新期火山熔岩台地维管束植物物种多样性[J].西北植物学报,2017,37(4):790-796.
- 谢立红,曹宏杰,黄庆阳,等.五大连池新期火山熔岩台地 3 种共有植物的叶功能性状及其相互关系[J].西北植物学报,2018,38(5):967-975.
- 张海燕,彭彤彤,温玉娟,等.五大连池药泉山矿泉微生物多样性及其地质和环境控制特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(3):815-826.
- 曹宏杰,王立民,徐明怡,等.五大连池新期火山熔岩台地不同植被类型土壤微生物群落的功能多样性[J].生态学报,2019,39(21):7927-7937.
- 关健飞,王继华,张雪萍,等.人类干扰对五大连池药泉山放线菌群落结构影响[J].北京工业大学学报,2016,42(3):460-466.
- XU S Q,ZHANG J F,LUO S S,et al.Similar soil microbial community structure across different environments after long-term succession: Evidence from volcanoes of different ages[J]. Journal of basic microbiology,2018,58(8):704-711.
- 李齐,陈文寄,李大明,等.五大连池地区火山岩年代学研究[J].地质论评,1999,45(S1):393-399.
- 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999:13-169.
- VANCE E D,BROOKES P C,JENKINSON D S.An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil biology biochemistry,1987,19(6):703-707.
- 杨宁,邹冬生,杨满元,等.衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变[J].生态学报,2014,34(10):2693-2701.
- JIA G M,CAO J,WANG C Y,et al.Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziwoulin,northwest China[J]. Forest ecology & management,2005,217(1):117-125.
- 梁月明,何寻阳,苏以荣,等.喀斯特峰丛洼地植被恢复过程中土壤微生物特性[J].生态学杂志,2010,29(5):917-922.
- 高喜,万珊,曹建华,等.岩溶区与非岩溶区土壤微生物活性的对比研究[J].地球与环境,2012,40(4):499-504.
- 胡嵩,张颖,史荣久,等.长白山原始红松林次生演替过程中土壤微生物生物量和酶活性变化[J].应用生态学报,2013,24(2):366-372.
- 丁新华,黄金萍,顾伟,等.扎龙湿地土壤养分与土壤微生物特性[J].东北林业大学学报,2011,39(4):75-77.
- BURKE I C,LAUENROTH W K,RIGGLE R,et al.Spatial variability of soil properties in the shortgrass steppe:The relative importance of topography,grazing,microsite,and plant species in controlling spatial patterns[J]. Ecosystems,1999,2(5):422-438.
- LUNDQUIST E J,JACKSON L E,SCOW K M.Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils[J]. Soil biology & biochemistry,1999,31(7):1031-1038.
- 赵彤,蒋跃利,闫浩,等.黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J].环境科学,2013,34(8):3223-3230.
- 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.
- 徐一兰,唐海明,肖小平,等.长期施肥对双季稻田土壤微生物学特性的影响[J].生态学报,2016,36(18):5847-5855.
- 沈仁芳,孙波,施卫明,等.地上-地下生物协同调控与养分高效利用[J].中国科学院院刊,2017,32(6):566-574.
- MALCHAIR S,CARNOL M.Microbial biomass and C and N transformations in forest floors under European beech, sessile oak, Norway spruce and Douglas-fir at four temperate forest sites[J]. Soil biology & biochemistry,2009,41(4):831-839.
- 王焕华,李恋卿,潘根兴,等.南京市不同功能城区表土微生物碳氮与酶活性分析[J].生态学杂志,2005,24(3):273-277.
- 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:50-64.
- 卜丹蓉,周丹燕,葛之蕙,等.施用沼液对苏北沿海杨树人工林土壤活性有机碳的影响[J].生态学杂志,2015,34(7):1785-1790.
- 赵彤,闫浩,蒋跃利,等.黄土丘陵区植被类型对土壤微生物量碳氮磷的影响[J].生态学报,2013,33(18):5615-5622.
- WANG F E,CHEN Y X,TIAN G M,et al.Microbial biomass carbon,nitrogen and phosphorus in the soil profiles of different vegetation covers established for soil rehabilitation in a red soil region of southeastern China [J]. Nutrient cycling in agroecosystems,2004,68(2):181-189.
- 杨宁,邹冬生,杨满元,等.衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤微生物量碳的变化及其与土壤理化因子的关系[J].生态环境学报,2013,22(1):25-30.