

五大连池火山熔岩台地植物多样性与土壤养分的关系

黄庆阳^{1,2}, 曹宏杰^{1,2}, 王立民^{1,2}, 谢立红^{1,2}, 倪红伟^{1,2}

(1. 黑龙江省科学院 自然与生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省科学院 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)

摘要: 采用空间序列代替时间序列的方法对五大连池不同年代火山熔岩台地进行样方调查, 在得到物种组成和土壤养分的基础上, 运用相关性分析探讨不同火山熔岩台地植物多样性及其与土壤养分之间的关系。结果表明: 植物物种的科、属、种数量在新期火山中最低, 随着火山形成年代的增加, 老期火山植物物种的科、属、种数量最高; 群落乔木层、灌木层的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数在 17 万 a 火山具有最大值($P < 0.05$), 群落草本层的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数在 28 万 a 火山具有最大值($P < 0.05$)。随着火山形成年代的增加, 这 4 项指数均呈现先增加后减小的趋势, 支持了森林生态系统中间阶段具有较高物种多样性的“中度干扰假说”; 土壤 pH 值、全磷、全钾、速效钾质量分数在新期火山最高(290 a), 显著高于老期火山($P < 0.05$), 随着火山形成年代的增加呈现先减小后增加的趋势; 土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、速效磷质量分数在 40~50 万 a 火山具有最大值, 显著高于其他时期火山熔岩台地($P < 0.05$), 随着火山形成年代的增加呈现先增加后减小的趋势。乔、灌、草不同层次多样性指数与土壤的 pH 值、全氮、全钾有明显的相关性。图 4 表 3 参 26

关键词: 森林生态学; 五大连池; 火山; 熔岩台地; 植物多样性; 土壤理化性质

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)01-0080-08

Species diversity and soil nutrients in lava platforms of Wudalianchi Volcanoes, China

HUANG Qingyang^{1,2}, CAO Hongjie^{1,2}, WANG Limin^{1,2}, XIE Lihong^{1,2}, NI Hongwei^{1,2}

(1. Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 2. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Wetlands and Ecological Conservation, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To determine species composition and soil nutrients in different lava platforms as well as the relationship between plant diversity and soil nutrients, volcanic lava platforms of different ages in Wudalianchi were used as research samples using a spatial sequence approach instead of a temporal sequence and correlation analysis. Richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou indexes were also used. Results showed that as the age of the volcanoes increased, the number of genera and species of plants was lowest in new volcanic lava platforms and was highest in old volcanic lava platforms. Richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou indexes of tree and shrub were highest in volcanic lava platforms erupted at 170 000 years than others ($P < 0.05$), however, Richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou indexes of herb layers were highest in volcanic lava platforms erupted at 280 000 years than others ($P < 0.05$), which all initially increased and then decreased in support of the “intermediate disturbance hypothesis” in the forest ecosystem. Total P, total K, available N, and pH in the soil was highest in new volcanic lava platforms(290 years)than others ($P < 0.05$), which

收稿日期: 2018-01-15; 修回日期: 2018-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31770497); 黑龙江省科学院学部委员指导专项资助(STXB-02); 黑龙江省财政基本科研业务费专项(STJB16-02)

作者简介: 黄庆阳, 副研究员, 博士, 从事植物学、植物生态学研究。E-mail: huangqingyang@163.com。通信作者: 倪红伟, 研究员, 博士, 从事生态学等研究。E-mail: nihongwei2000@163.com

initially decreased and then increased. However, soil organic carbon, total N, ammonium N, nitrate N, and available P was highest in volcanic lava platforms erupted at 400 000–500 000 years than others ($P < 0.05$), which initially increased and then decreased. Moreover, richness, Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou indexes of different layers were positively correlated with pH, total N, and total K in the soil ($P < 0.05$). [Ch, 4 fig. 3 tab. 26 ref.]

Key words: forest ecology; Wudalianchi; volcano; lava platform; plant diversity; soil nutrient

黑龙江五大连池地区在过去的 210 万 a 间经历了 7 次大规模的火山喷发，在植物个体繁殖、存活、生长、死亡等一系列动态演替下，形成了不同时间格局和空间格局的 14 座火山森林群落^[1-2]，被誉为“天然火山博物馆”。五大连池火山群是中国第四纪著名的火山群之一，其中老黑山和火烧山为新期火山，形成了面积达 80 km² 的熔岩台地^[3]；其熔岩裸露，土壤稀薄贫瘠，植物为特有的矮曲林；其他 12 座为老期火山，主要为不同发育阶段的针阔混交林和阔叶混交林^[4-5]。植被和土壤是森林生态系统的重要组成部分，参与森林生态系统物质循环和能量流动的关键环节^[6]。土壤和植物群落结构、功能有着密切的联系，土壤为森林生态系统提供植物生长所必须的矿质元素和水分，影响植物群落的物种组成和动态变化^[7-8]；植被的群落组成及多样性则影响土壤养分，使土壤呈现空间效应^[9]。目前，对物种多样性和土壤的关系已有相当多的研究，主要集中在滇中高原、黄土丘陵、高寒草甸、亚热带高山、喀斯特地貌等不同类型的生态系统^[10-14]，但对土层浅薄、岩石裸露度高的火山熔岩台地森林类型中物种多样性和土壤的研究较为欠缺。本研究以五大连池不同年代火山熔岩台地为对象，研究植物多样性和土壤养分性质特征及其两者之间的相关性，探讨火山喷发后，生态系统恢复过程中植物多样性和土壤理化性质的变化规律及其响应机制，为研究火山森林生态系统中植被和土壤耦合系统的恢复重建理论提供基础数据。

1 研究区概况

试验地点设在黑龙江黑河(五大连池)国家森林生态系统定位观测研究站。五大连池(48°30′~48°50′ N, 126°00′~126°45′ E)位于黑龙江省黑河市西南部，总面积为 988.66 km²；属温带大陆性季风气候区，冬季严寒漫长，夏季凉爽短促，年平均气温为 -0.5 °C，无霜期为 121.0 d，年平均降水量为 476.3 mm，多年平均相对湿度为 69%；主要土壤类型是火山石质土、火山灰土、草甸土、沼泽土、泥炭土。森林植被主要有针阔混交林和落叶阔叶林，优势植物有落叶松 *Larix gmelini*，白桦 *Betula platyphylla*，山杨 *Populus davidiana*，蒙古栎 *Quercus mongolica*，黑桦 *B. dahurica* 等。因老黑山和火烧山在 1722–1723 年的爆发，巨量熔岩阻断了白河谷河道，形成了 5 个溪水相连的串状湖泊，五大连池因此得名^[1]。五大连池地区有 14 座火山，其中老黑山和火烧山为新期火山，东焦得布山、小孤山、尾山和南、北格拉球山等 12 座火山为老期火山(图 1)。

2 研究方法

2.1 样方设置

采用“以空间代替时间”的研究方法，选择人为干扰小、生态环境完整、喷发记录清晰的 5 座火山(以火山最后一次喷发时间作为生态系统发育的起始时间)作为研究样区，共设立了 43 个 20 m × 20 m 研究样方。样方的详细情况见表 1。

2.2 植物多样性指标测定

2014 年 8 月和 2015 年 8 月分别测定了 43 个样方植物群落的密度(株·m⁻²)，平均冠幅(m²·株⁻¹)，盖度(%，即所有林木树冠的椭圆形面积之和占地面面积的比例)，平均胸径(cm·株⁻¹)和平均高度(m·株⁻¹)等指标计算群落多样性^[15]。

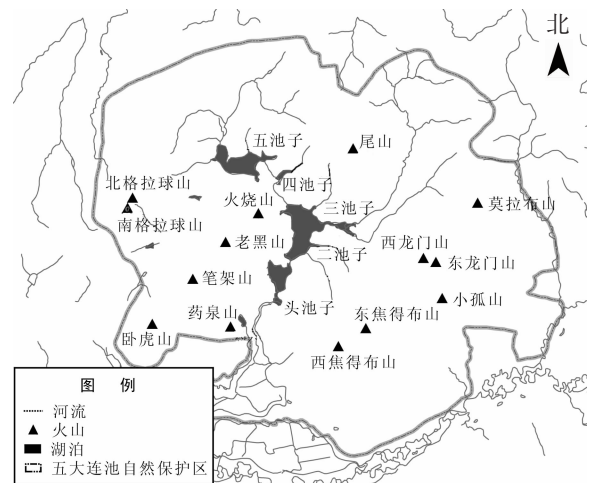


图 1 研究区位置及其概况

Figure 1 Location and basic information of experiment sites

表1 五大连池不同年代火山样地条件

Table 1 Sample sites of volcanic platform in different periods

研究区	中心点坐标	海拔/m	土壤类型	喷发时间	样品号
南格拉球山(NGLQ)	48°44'13"N, 126°00'46"E	415	暗棕壤	70~80 万 a 前	N(38~43)
尾山(WS)	48°47'23"N, 126°15'26"E	400	暗棕壤	40~50 万 a 前	W(28~37)
小孤山(XGS)	48°40'45"N, 126°22'06"E	380	暗棕壤	28~36 万 a 前	X(23~27)
东焦得布山(DJDB)	48°39'13"N, 126°16'30"E	375	暗棕壤	17~19 万 a 前	D(9~22)
老黑山(LHS)	48°42'32"N, 126°07'06"E	340	火山灰土	290 a 前	L(1~8)

多样性测度指标有：①丰富度 $R=(S-1)/\ln N$ 。②多样性 Shannon-Wiener 指数 $H=-\sum_{i=1}^k P_i \ln P_i$ 。③均匀

度 Pielou 指数 $J=H/\ln S$ 。④Simpson 优势度指数 $D=1-\sum_{i=1}^k P_i^2$ 。其中 S 为群落中的总种数， P_i 为种 i 的个体数占群落中总个体数的比例，即 $P_i=n_i/N$ ， n_i 为种 i 的个体数， N 为观察到的个体。

2.3 土壤样品的采集及理化性质分析

在各样地中心按梅花型方式选 5 个采样点，各点间距在 5 m 之内。2015 年 8 月在各样点用环刀 (0~10 cm) 取样 5 次重复，均匀混合组成待测土样。五大连池火山熔岩台地区域土壤很薄，部分仅有 10 cm 左右，因此以 0~10 cm 土壤层中作为取样对象。

土壤 pH 值的测定采用电极电位法；有机质和全氮采用元素分析仪测定；铵态氮、硝态氮采用流动分析仪测定；全磷采用氢氧化钠熔融钼锑抗比色法测定；速效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法测定；全钾的测定采用氢氧化钠熔融-原子吸收法，速效钾的测定采用醋酸铵浸提-原子吸收法^[16]。

2.4 数据处理与分析

采用 Excel 软件进行绘图，利用 SPSS 19.0 软件进行方差分析，Pearson 相关性分析等统计分析。

3 结果与分析

3.1 群落物种组成

根据实地踏勘和调查统计，在老黑山、东焦得布山、小孤山、尾山、南格拉球山等不同年代火山熔岩台地的 43 个调查样方，共发现维管束植物 358 种，隶属于 72 科 205 属。其中蕨类植物 9 科 11 属 19 种，裸子植物 1 科 1 属 1 种，种子植物 63 科 193 属 338 种(表 2)。

表2 五大连池不同年代火山台地植物组成

Table 2 Species composition of plant in volcanic platform in different periods

物种组成	老黑山(290 a)			东焦得布山(17 万 a)			小孤山(28 万 a)			尾山(40 万 a)			南格拉球山(70 万 a)		
	科	属	种	科	属	种	科	属	种	科	属	种	科	属	种
蕨类植物	5	5	7	4	6	9	4	5	7	4	6	9	5	7	10
裸子植物	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
种子植物	22	38	48	44	98	146	44	100	154	46	115	186	58	151	231
合计	28	44	56	49	105	156	48	105	161	51	122	196	63	158	241

随着火山形成年代的增加，不同火山台地植被物种的科、属、种组的数量呈递增趋势，恢复期最长的研究区(南格拉球山)，物种最多(图 2)。新时期火山台地主要由大面积的缺少土壤的玄武岩熔岩构成，植被物种组成简单，植被物种的丰富度也低，绝大多数物种均是 1 科 1 属 1 种 1 生活型，仅有蔷薇科 Rosaceae，菊科 Compositae，禾本科 Gramineae，百合科 Liliaceae，石竹科 Caryophyllaceae 等分布有多属多种多生活型，显示这些类群对玄武岩熔岩环境具有较好的适应性。

调查结果和物种重要值研究显示，不同年代火山熔岩台地植物群落的建群种和优势种也存在明显差异。在新期火山老黑山，落叶松，白桦，香杨 *Populus koreana*，珍珠梅 *Sorbaria sorbifolia*，万年蒿 *Artemisia sacrorum* 等物种是植物群落的优势种或建群种；在中老期火山地区，蒙古栎，黑桦，紫椴 *Tilia amurensis*，五味子 *Schisandra chinensis*，乌苏里藁草 *Carex ussuriensis* 等为植物群落的优势种或建群种。

3.2 植物多样性

随着火山形成年代的增加，乔木层、灌木层和草本层的 Simpson 多样性指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数的总体变化趋势一致，均是逐渐增加后减小(图 3)。不同的是乔木层和灌木层趋势一致，在恢复至 17 万 a 时，达到最大值，后减小并趋向稳定，而草本层植物多样性是在恢复到 28 万 a 达到最大值，后呈减小的趋势。经单因素方差分析，火山形成时间对乔木层、灌木层和草本层的 4 种多样性指数均具有显著差异($P < 0.05$)。

3.3 土壤养分特征

随着火山形成时间的增加，土壤 pH 值、全磷、全钾、速效钾质量分数趋向一致，均为先减小后增加，在新期火山老黑山具有最大值(图 4)。而土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、速效磷总体都呈现先增加后减小。经单因素方差分析，不同火山形成时间对土壤特征的影响差异显著($P < 0.05$)。

3.4 植物多样性与土壤养分的相关性

草本层、灌木层多样性指数和土壤养分的 Pearson 相关分析(表 3)表明：氨态氮、硝态氮、全磷、速效磷和速效钾与乔木层、灌木层和草本层的 4 种多样性特征没有显著相关($P > 0.05$)。土壤 pH 值对草本丰富度指数、多样性指数和均匀度指数具有极显著的负相关($P < 0.01$)；土壤有机质和全氮与乔木层和灌木层的丰富度指数呈显著正相关($P < 0.05$)；土壤全钾与乔木层多样性指数、草本层多样性和丰富度呈显著负相关($P < 0.05$)，全钾与乔木层丰富度指数呈极显著负相关($P < 0.01$)。

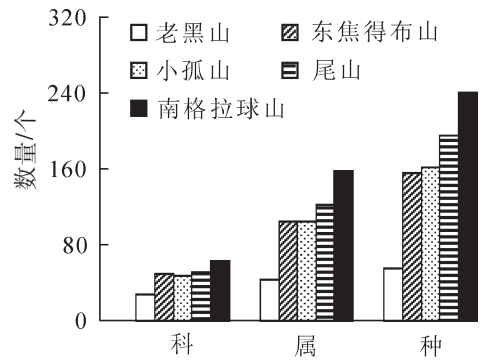
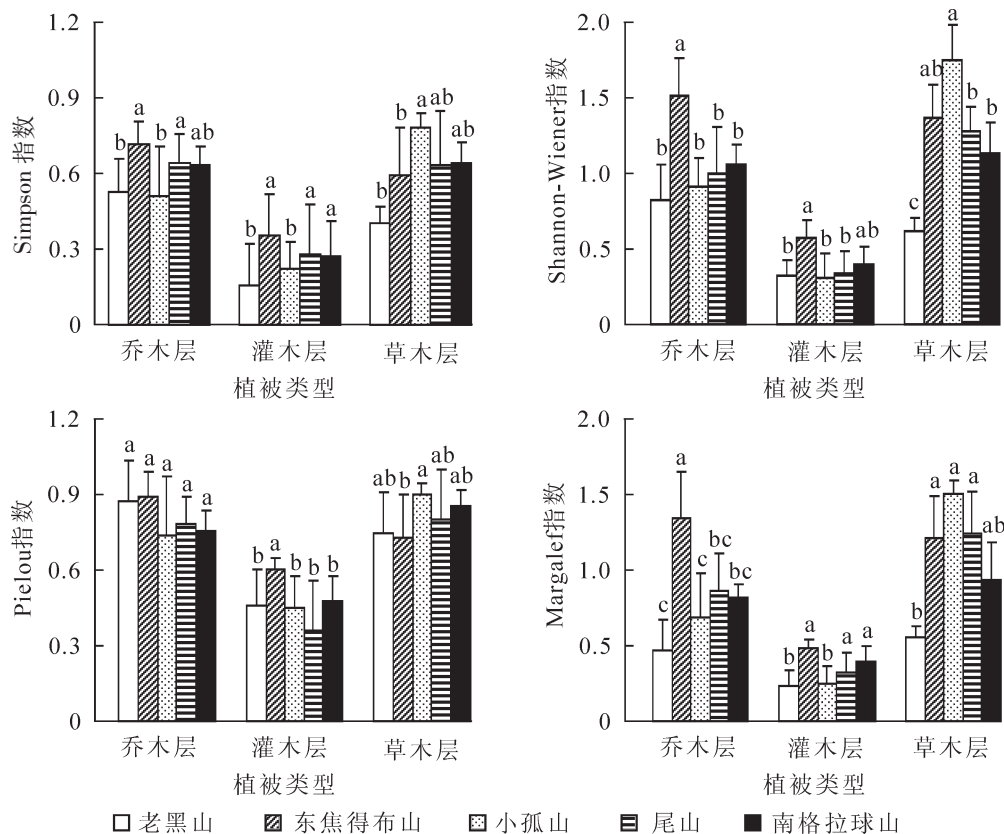


图 2 不同年代火山台地植物组成科、属、种的聚集过程

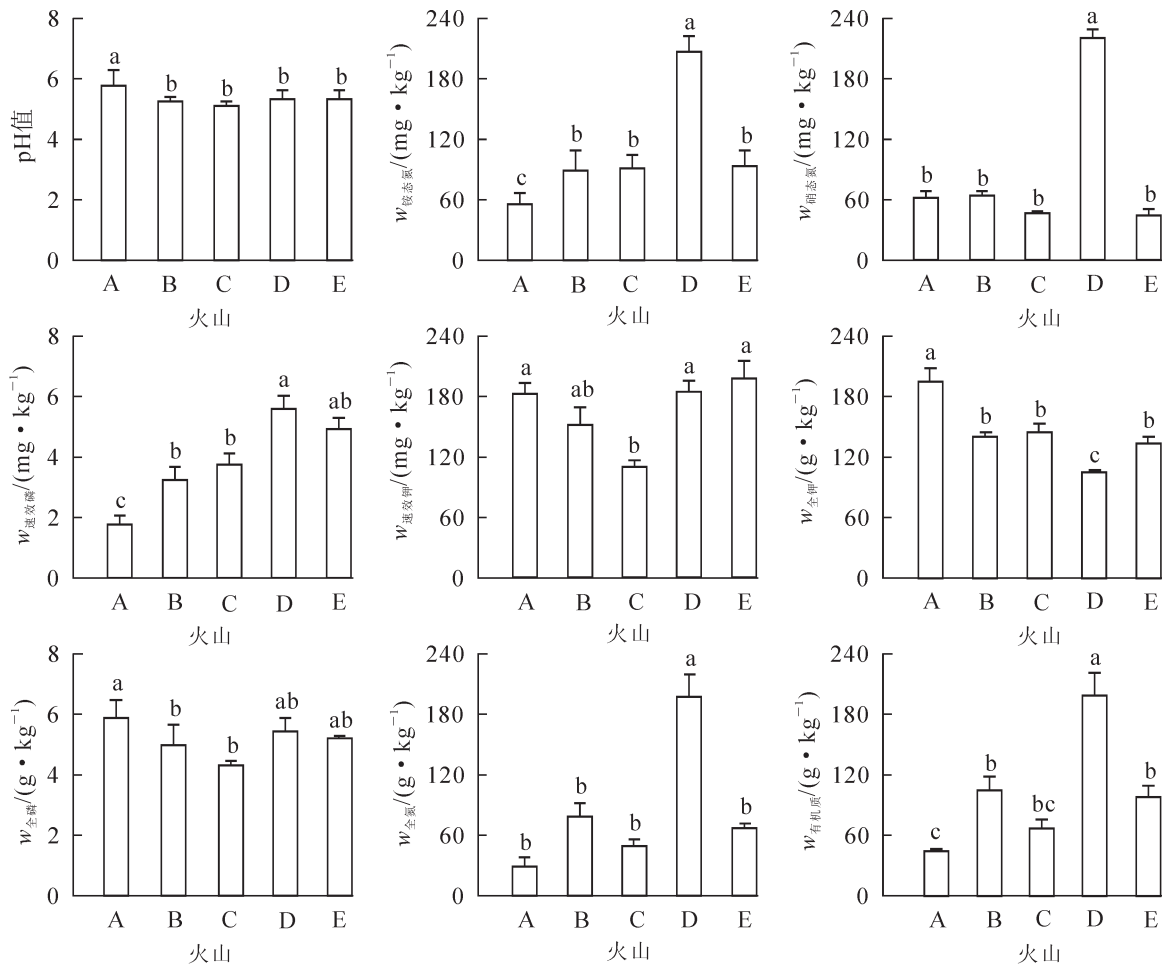
Figure 2 Gathering progress of family, genus, species of plants in volcanic platform in different periods



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 3 五大连池不同年代火山台地植物多样性

Figure 3 Plant diversity indexes in volcanic platform in different periods



A. 老黑山; B. 东焦得布山; C. 小孤山; D. 尾山; E. 南格拉球山

不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图4 五大连池不同年代火山台地土壤理化性质特征

Table 4 Comparisons of soil nutrients of volcanic platform in different periods

4 讨论

4.1 植物多样性特征及其演变

五大连池位于黑龙江大小兴安岭和松嫩平原的交错地带,特殊的地理位置使得该区种子植物的种类成分复杂。在五大连池不同年代火山熔岩台地内共出现维管束植物72科205属358种,而新时期火山植被群落中仅有28科44属56种,且大多数植物为1科1属1种,丰富度极低,显示熔岩环境对其分布植物具有显著的胁迫。这与岩石裸露率高,土层浅薄,土壤稀少而干燥的自然条件有关^[13,17]。

物种多样性是衡量植被群落结构与功能复杂性的一个重要指标,物种多样性的变化反映了植被的恢复程度^[8]。研究结果显示:不同年代火山台地植被群落组成存在明显差异,乔木层、灌木层和草本层的Simpson指数、Shannon-Wiener指数、均匀度和丰富度指数均是在演替初期具有最小值,表现为先增加后减小的趋势。相似的结论在日本中部Mount Kiyosumi暖温带地区也有报道,火山爆发后由原生演替而来的中间演替阶段的森林显示了最高的物种多样性^[18],支持了森林生态系统中间阶段具有较高物种多样性的“中度干扰假说”^[19]。

4.2 土壤养分特征的响应

植物群落的正向演替是土壤养分不断积累、物理性能不断改善的过程,而植物群落的逆向演化是土壤不断退化的过程。新时期火山熔岩台地的植被群落由苔藓地衣、草本群落、稀疏的阔叶矮曲林和落叶松混交林群落构成,郁密度低,地表凋落物稀少,因此pH值较高。中老期火山台地的植被群落多为紫椴-黑桦-蒙古栎群落构成,大量的凋落物分解后产生较多的二氧化碳有机酸,可减低土壤pH值,这与崔宁

表 3 植物多样性与土壤养分之间的相关分析

Table 3 Correlation analysis of plant diversity index and soil nutrients

指数	相关系数								
	pH 值	有机质	全氮	氨态氮	硝态氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾
乔 Simpson 指数	-0.044	0.288	0.245	0.155	-0.008	-0.023	0.178	-0.291	0.074
乔 Shannon-Wiener 指数	-0.164	0.288	0.238	0.149	-0.048	-0.147	0.169	-0.362*	-0.057
乔 Pielou 指数	0.247	-0.048	-0.039	-0.123	-0.072	0.130	-0.070	0.188	-0.028
乔 Margalef 指数	-0.233	0.381*	0.338*	0.300	0.048	-0.124	0.238	-0.461**	-0.033
灌 Simpson 指数	-0.119	0.284	0.254	0.092	0.125	0.094	0.008	-0.255	-0.031
灌 Shannon-Wiener 指数	-0.020	0.234	0.220	0.039	0.116	0.177	-0.105	-0.145	0.010
灌 Pielou 指数	-0.045	0.181	0.158	-0.024	0.074	0.083	-0.052	-0.138	-0.020
灌 Margalef 指数	-0.101	0.367*	0.340*	0.230	0.231	0.264	0.069	-0.297	0.117
草 Simpson 指数	-0.476**	0.108	0.031	0.232	0.069	-0.175	0.198	-0.324*	-0.165
草 Shannon-Wiener 指数	-0.523**	0.144	0.060	0.225	-0.003	-0.186	0.152	-0.366*	-0.183
草 Pielou 指数	-0.195	-0.023	-0.066	0.164	0.001	-0.013	0.124	-0.079	-0.013
草 Margalef 指数	-0.426**	0.238	0.160	0.277	0.079	-0.104	0.114	-0.368*	-0.115

说明：* 和 ** 分别表物种多样性指数与土壤养分之间相关性显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)

洁等^[8]的研究结果相一致。自然界中的全磷、全钾、速效钾质量分数与成土的岩石矿物类型、风化成土条件及土壤本身特性有密切关系^[14]。老黑山的土壤全磷、全钾、速效钾质量分数最高，显示熔岩台地环境土壤受火山喷发形成的玄武岩母岩影响明显，这与福英等^[4]对五大连池火山熔岩土壤养分的研究相一致。土壤有机质和氮含量主要来自于植物枯枝落叶及根系腐烂^[20]，老黑山台地地表凋落物稀少，土壤氮的输入量较低，导致土壤有机质和氮含量最低^[21]，与福英等^[4]对新期火山土壤碳、氮质量分数的研究一致。

随着火山喷发年代的增加，台地土壤 pH 值以及全磷、全钾等养分特征的变化趋势与福英等^[4]对不同年代火山土壤养分的研究并不一致，究其原因，虽然研究对象均是不同喷发期的火山序列，但本研究选择人为干扰小、生态环境完整、喷发记录清晰的 5 座火山作为研究对象，与福英等选择的研究个体并不相同。五大连池共有 14 座新、老期火山，喷发期时间和个体原因可能会导致研究结果的不同，因此，我们下一步将对不同喷发期的 14 座火山的植被和土壤进行细致的研究。

4.3 植物多样性与土壤养分的关系

植物生长发育受土壤养分条件的制约，土壤性质的差异会导致群落结构和物种多样性的变化^[13]。特别是火山喷发的特殊性^[22]，土壤 pH 值、有机质等会对植物物种多样性造成极大的影响。本研究结果表明：土壤 pH 值对草本丰富度指数、多样性指数和均匀度指数具有极显著影响 ($P < 0.01$)，与张荣涛^[23]对五大连池不同时期火山的研究相一致；五大连池不同年代火山台地植被类型植物多样性指数同表层土壤有机质和全量的正相关显著，这与张荣涛的研究结果并不一致，但杨小波等^[24]和王凯博等^[25]的研究与本研究结果类似。不同火山土壤全钾与乔木层、草本层的多样性和丰富度均有不同程度的负相关性，与对五大连池熔岩矮曲林多样性和土壤全钾相关性研究一致^[26]，这可能与火山喷发形成的富钾玄武岩母质的特征有关。

5 结论

五大连池不同年代火山熔岩台地内共出现维管束植物 72 科 205 属 358 种，而新期火山植被群落中仅有维管束植物 28 科 44 属 56 种。随着火山形成年代的增加，不同火山台地植被物种的科、属、种组的数量成呈递增趋势。随着火山形成年代的增加，不同年代火山台地乔木层、灌木层和草本层的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、均匀度和丰富度指数均先增加后减小的趋势，支持了森林生态系统中阶段具有较高物种多样性的“中度干扰假说”。随着火山形成年代的增加，不同年代火山台地土壤 pH 值、全氮、全钾、速效钾质量分数呈现先减小后增加的趋势，土壤有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、速效磷质量分数呈现先增加后减小的趋势。因此，本研究认为：五大连池不同火山台地的乔、灌、草不同层次多样性指数受到土壤的 pH 值、全氮、全钾的影响更显著。

6 致谢

黑龙江省五大连池风景名胜自然保护区管理委员会旅游局李洪光、科研管理中心朱月山对本项目在野外考察期间给予了极大的支持与帮助。特此致谢!

7 参考文献

- [1] 周志强, 徐丽娇, 张玉红, 等. 黑龙江五大连池的生态价值分析[J]. 生物多样性, 2011, **19**(1): 63 – 70.
ZHOU Zhiqiang, XU Lijiao, ZHANG Yuhong, *et al.* An analysis of the ecological value of Wudalianchi, Heilongjiang Province, China [J]. *Biodiversity Sci*, 2011, **19**(1): 63 – 70.
- [2] 黄庆阳, 朱道光, 钟海秀, 等. 五大连池种子植物属的区系分析[J]. 植物研究, 2014, **34**(2): 200 – 203.
HUANG Qingyang, ZHU Daoguang, ZHONG Haixiu, *et al.* Floristic analysis on spermatophyte genera in Wudalianchi [J]. *Bull Bot Res*, 2014, **34**(2): 200 – 203.
- [3] 谢立红, 黄庆阳, 曹宏杰, 等. 五大连池新时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.
XIE Lihong, HUANG Qingyang, CAO Hongjie, *et al.* Species diversity of vascular plants in new stage volcanic lava plateau in Wudalianchi [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2017, **37**(4): 790 – 796.
- [4] 福英, 白学良, 张乐, 等. 五大连池火山熔岩地貌苔藓植物对土壤养分积累的作用[J]. 生态学报, 2015, **35**(10): 3288 – 3297.
FU Ying, BAI Xueliang, ZHANG Le, *et al.* The effect of bryophytes on nutrient accumulation in surface soil in the Wudalianchi volcanic area [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(10): 3288 – 3297.
- [5] 沈海滨, 王小德, 董立军. 黑龙江五大连池风景区主要植被类型特征[J]. 北方园艺, 2011(1): 108 – 111.
SHEN Haibin, WANG Xiaode, DONG Lijun. Characteristics of main vegetation types in Wudalianchi scenic spot of Heilongjiang Province [J]. *North Hortic*, 2011(1): 108 – 111.
- [6] REICH P B, TJOELKER M G, MACHADO J L, *et al.* Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants [J]. *Nature*, 2006, **439**(7075): 457 – 461.
- [7] HOLMES P. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition [J]. *Restoration Ecol*, 2001, **9**(1): 71 – 84.
- [8] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(10): 2610 – 2617.
CUI Ningjie, ZHANG Danju, LIU Yang, *et al.* Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chin J Ecol*, 2014, **33**(10): 2610 – 2617.
- [9] BLOOR J M G, BARDGETT R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability [J]. *Perspect Plant Ecol, Syst*, 2012, **14**(3): 193 – 204.
- [10] 李玉进, 胡澍, 焦菊英, 等. 黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应[J]. 生态学报, 2017, **37**(12): 4100 – 4107.
LI Yujin, HU Shu, JIAO Juying, *et al.* Response of soil organic carbon to vegetation restoration in different erosion environments in the hilly-gullied region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37**(12): 4100 – 4107.
- [11] 王莹, 庞晓攀, 肖玉, 等. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物多样性与土壤养分间关系的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(17): 5485 – 5496.
WANG Ying, PANG Xiaopan, XIAO Yu, *et al.* The effect of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance on the relationship between plant diversity and soil nutrients of alpine meadow [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(17): 5485 – 5496.
- [12] 杨元武, 李希来, 周旭辉, 等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报, 2016, **24**(6): 1211 – 1217.
YANG Yuanwu, LI Xilai, ZHOU Xuhui, *et al.* Study on relationship between plant community degradation and soil environment in an alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sin*, 2016, **24**(6): 1211 – 1217.
- [13] 盛茂银, 熊康宁, 崔高仰, 等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报, 2015, **35**

(2): 434 – 448.

SHENG Maoyin, XIONG Kangning, CUI Gaoyang, *et al.* Plant diversity and soil physical-chemical properties in karst rocky desertification ecosystem of Guizhou, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(2): 434 – 448.

- [14] 杨媛媛, 陈奇伯, 黎建强, 等. 滇中高原华山松植物多样性与土壤生物肥力特征[J]. 土壤, 2017, **49**(1): 90 – 96.

YANG Yuanyuan, CHEN Qibo, LI Jianqiang, *et al.* Vegetation diversity and soil biological fertility of *Pinus armandii* in Central Yunnan Plateau, China [J]. *Soil*, 2017, **49**(1): 90 – 96.

- [15] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 (I) α 多样性的测度方法 (下) [J]. 生物多样性, 1994, **2**(4): 231 – 239.

MA Keping, LIU Yuming. Methods for measuring biodiversity of communities (I) Methods of measuring α diversity [J]. *Biodiversity Sci*, 1994, **2**(4): 231 – 239.

- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 146 – 195.

- [17] PETRAGLIA M D, DITCHFIELD P, JONES S, *et al.* The Toba volcanic super-eruption, environmental change, and hominin occupation history in India over the last 140 000 years [J]. *Quaternary Int*, 2012, **258**(5): 119 – 134.

- [18] 龚直文, 亢新刚, 顾丽. 森林植被恢复阶段群落研究动态综述 [J]. 江西农业大学学报, 2009, **31**(2): 283 – 291.

GONG Zhiwen, KANG Xingang, GU Li. Dynamics of community study on forest vegetation in restoration stages [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2009, **31**(2): 283 – 291.

- [19] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forest and coralreefs [J]. *Science*, 1978, **199**: 1302 – 1310

- [20] WALKER L R, SIKES D S, DEGANGE A R, *et al.* Biological legacies: directed early ecosystem recovery and food web reorganization after a volcanic in Alaska [J]. *Ecoscience*, 2013, **20**(3): 1 – 12.

- [21] del MORAL R, WOOD D M. Early primary succession on the volcano Mount St. Helens [J]. *J Veg Sci*, 1993, **4**: 223 – 234.

- [22] 周胜男, 梁宇, 贺红士, 等. 火山喷发后植被演替的影响因子 [J]. 生态学杂志, 2016, **35**(1): 234 – 242.

ZHOU Shengnan, LIANG Yu, HE Hongshi, *et al.* Factors affecting vegetation succession after volcano eruptions [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(1): 234 – 242.

- [23] 张荣涛. 五大连池火山植物物种多样性及其与生态因子关系 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.

ZHANG Rongtao. *Factor and Its Relationship with the Ecological Diversity of Plant Species Wudalianchi Volcano* [D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2014.

- [24] 杨小波, 张桃林, 吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系 [J]. 生态学报, 2002, **22**(2): 190 – 196.

YANG Xiaobo, ZHANG Taolin, WU Qingshu. The relationship between biodiversity and soil fertility characteristics on abandoned fields in the tropical region of Southern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(2): 190 – 196.

- [25] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系 [J]. 西北植物学报, 2007, **27**(10): 2089 – 2096.

WANG Kaibo, CHEN Meiling, QIN Juan, *et al.* Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling area [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2007, **27**(10): 2089 – 2096.

- [26] 魏晓雪, 姜明月, 方振兴, 等. 五大连池地区矮曲林物种多样性及与土壤因子关系 [J]. 安徽农业科学, 2016, **44**(1): 14 – 17.

WEI Xiaoxue, JIANG Mingyue, FANG Zhenxing, *et al.* Diversity of elfin forest species in Wudalianchi and the relationship between diversity and soil factors [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2016, **44**(1): 14 – 17.