

五大连池不同林型球囊霉素相关土壤蛋白与土壤理化性质和林分特征的关系

张文天^{1,2}, 姜明月^{1,2}, 魏晓雪^{1,2*}, 沈光¹, 潘虹^{1,2}, 曾颖^{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. 黑龙江省科学院高技术研究院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要 [目的]了解五大连池自然保护区熔岩台地不同林型土壤真菌生物量及土壤理化性质的变化规律。[方法]选择五大连池火山熔岩台地3个典型树种(白桦矮曲林、山杨矮曲林、香杨矮曲林),对林分特征、土壤中总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)、易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)、有机碳、全氮、全磷、全钾、pH等指标进行研究。[结果]球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)林型间差异明显,GRSP与土壤理化性质相关性的种类、数量、正负和有无受林型影响较大。GRSP对矮曲林林分大小具有一定的指示功能。[结论]熔岩台地生境中林型及林分的差异与GRSP、土壤理化指标及二者的耦合关系存在一定关联,这种关联对于提高保护区土壤碳汇功能和维持土壤肥力,乃至对该地区进一步开展自然资源及地质遗产保护具有重要价值。

关键词 球囊霉素相关土壤蛋白;林型;土壤理化性质;五大连池;熔岩台地

中图分类号 S718 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)24-0155-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.24.036



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Relationship between Glomalin-related Soil Protein and Soil Physicochemical Properties and Stand Characteristics of Different Forest Types in Wudalianchi

ZHANG Wen-tian^{1,2}, JIANG Ming-yue^{1,2}, WEI Xiao-xue^{1,2} et al (1. Institute of Natural Resources and Ecology, HAS, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. High-tech Institute of Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract [Objective] To understand the change rules of soil fungi biomass and soil physicochemical properties of forest types in lava plateau of Wudalianchi nature reserve. [Method] We studied the total glomalin-related soil protein, easily extractable glomalin-related soil protein, SOC, soil total N, soil total P, soil total K and soil pH of 3 typical forest types in Wudalianchi volcanic lava platform. [Result] The result showed that there were significant differences of glomalin-related soil protein on different forest types. The difference of forest types affects the species, quantity, positive and negative, and the existence or not of soil physicochemical properties related to GRSP. GRSP has a certain indication function for stand size of dwarf quilin. [Conclusion] This correlation is of great significance not only for improving soil carbon sink function and maintaining soil fertility in natural reserve, but also for the further protection of natural resources and geological heritage.

Key words Glomalin-related soil protein; Forest types; Soil physicochemical properties; Wudalianchi; Lava plateau

五大连池位于黑龙江松嫩平原和大小兴安岭交汇带,远离板块边缘,气候条件恶劣,地质特征多样。该地区较为频繁的火山活动形成了独特的熔岩台地生境。熔岩台地由火山喷发流出的岩浆冷却形成。该地区熔岩台地面积达80 km²,其上岩石裸露、土壤贫瘠,植物只有通过改变植株形态才能在这种临界地貌生境中生存^[1]。矮曲林是该区域先锋木本植物群落,也是植物以表型变化适应特殊生境的突出范例^[2],其典型树种包括白桦、山杨和香杨等。五大连池是我国重要的自然保护区和风景名胜区,为我国首批国家地质公园以及全球首批世界地质公园之一,2003年被联合国教科文组织批准为世界人与生物圈保护区,在该地区开展不同林型间地下土壤特征研究是进行地质遗产与生态环境保护的基础。

球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)是由丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌次生代谢出的一种糖蛋白^[3]。AM真菌对植物具有广泛的侵染性,可与大多数陆生植物和农作物形成共生系统^[4]。同时,

大量研究表明,GRSP在农田、草原、灌木林、热带雨林等生态系统中也很常见^[5-11]。

依照已有研究,根据提取的难易程度把GRSP分为2个组分^[12]:总球囊霉素相关土壤蛋白(total glomalin-related soil protein, T-GRSP)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(easily extractable glomalin-related soil protein, EE-GRSP)。田慧等^[13]研究表明,土壤中有0.03~0.35 mg/g AM真菌干重菌丝,并认为AM真菌在维持土壤生态系统功能方面发挥着重要作用,目前学界多用GRSP含量表示AM真菌的生物量。前人研究发现,GRSP主要有稳定和增加土壤有机碳库^[12,14],改善土壤团聚体和土壤质量^[11-12,15],固定土壤重金属元素^[16]等生态学功能。

目前,学界已对球囊霉素和土壤之间的关系进行了大量研究,这些研究广泛分布于苏北沿海、松嫩平原、西藏高原、贵州茶园、内蒙古及河北农牧区等不同的地形地貌和生态环境^[17-21],但对生长于土层浅薄、岩石裸露度高的火山熔岩台上的矮曲林中球囊霉素和土壤的研究较为欠缺,矮曲林中AM真菌和GRSP对土壤肥力的保持作用还有待进一步研究。有关某些基本问题,如熔岩台地次生林树种对土壤GRSP的影响、不同树种间GRSP与土壤营养指标的相关关系等鲜见报道。基于此,笔者选取五大连池新时期火山熔岩台地植被中典型的白桦、山杨、香杨矮曲次生林,对其土壤理化性质指标和GRSP进行了测定,以探究熔岩台地不同树种土

基金项目 黑龙江省科学院青年创新基金重点项目“五大连池新时期火山熔岩台地不同林型菌丝结合碳变化规律研究”;黑龙江省院所基本应用技术研究专项(ZNBZ2020ZR09)。

作者简介 张文天(1985—),男,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,硕士,从事植物学、森林生态学研究。*通信作者,副研究员,博士,从事植物学研究。

收稿日期 2021-08-12

壤特征及真菌生物量变化规律,为进一步了解五大连池地区熔岩台地 AM 真菌在土壤碳汇过程中的功能及作用奠定基础,同时也为该地区进一步开展自然资源及地质遗产保护提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究地概况及样地设置 采样地为五大连池新时期火山熔岩台地。五大连池自然保护区(126°00'~126°26'E, 48°34'~48°48'N)位于黑龙江省中北部,小兴安岭山地向松嫩平原的转换地带,属于寒温带大陆性季风气候区,结冰期

为10月初至翌年5月初,无霜期121 d。

选择熔岩台地上生长的白桦矮曲林、山杨矮曲林、香杨矮曲林3种林分,每种林分设置3个20 m×20 m标准样地。在每个样地的4个角分别设置5 m×5 m灌木样方,在每个灌木样方中随机设置1 m×1 m草本样方。

1.2 矮曲林林分特征概况 调查每个样方中乔木层(DBH≥3 cm的植株)的种类、数量、胸径、树高和冠幅;调查每个灌木样方中灌木层(DBH<3 cm的木本个体)以及每个草本样方中草本植株的种类、数量、平均高度和盖度(表1)。

表1 林分特征概况

Table 1 Forest stand characteristics summary

林分类型 Stand type	乔木层 Ardor			灌木层 Shrub			草本层 Herb		
	树高 TH m	胸径 DBH cm	郁闭度 CD	层高 LH m	盖度 Coverage %	优势种 DS	层高 LH m	盖度 Coverage %	优势种 DS
白桦矮曲林 <i>Betula platyphylla</i> Suk. elfin forests	12.10±2.00 a	6.92±2.81 a	0.43±0.21 a	0.93±0.23 a	9.00±6.56 b	山刺玫、兴安胡枝子、欧亚绣线菊	0.27±0.03 a	5.50±1.32 a	岩败酱、鹅线委陵菜
山杨矮曲林 <i>Populus davidiana</i> elfin forests	3.67±0.76 b	3.89±2.38 b	0.48±0.28 a	1.67±0.81 a	31.67±14.43 a	胡枝子、兴安胡枝子	0.31±0.08 a	21.00±20.81 a	岩败酱、兴安白头翁、鹅线委陵菜
香杨矮曲林 <i>Populus koreana</i> elfin forests	4.17±1.04 b	6.66±2.85 a	0.46±0.09 a	1.33±0.23 a	11.00±3.61 b	山刺玫、珍珠梅	0.23±0.08 a	20.67±17.21 a	万年蒿、岩败酱、钝叶瓦松

注:同列不同小写字母表示同一参数不同林型间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different forest types in the same layer ($P<0.05$)

1.3 样本采集及处理 采集方法:分别在3种林分各3块(合计9块)标准样地内采集土壤样本。取样过程:除去表层凋落物,在乔木植株根部取表层(0~10 cm)土壤样品并装入土壤袋备用。处理方法:将土壤样品带回室内风干,去除植物根系、石块等杂质,均匀混合后研磨,过<0.25 mm筛,阴凉干燥处储存备用。

1.4 测定方法

1.4.1 球囊霉素相关土壤蛋白测定。T-GRSP和EE-GRSP的测定参照Wright等^[12]的方法进行,即土样在121℃下分别使用20和50 mmol/L柠檬酸钠溶液进行处理,离心后分别得到EE-GRSP溶液和T-GRSP溶液,用考马斯亮蓝染色,用可见光分光光度计在595 nm下进行检测,用牛血清蛋白作为标准。

1.4.2 土壤理化指标测定。有机碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;全氮含量采用半微量凯氏定氮法;全磷含量采用NaOH熔融-钼锑抗比色法;全钾含量采用NaOH熔融-火焰光度法;pH的测定方法:称取5 g土样加入15 mL去离子水并混匀,使用pH计(PB-10,深圳赛多利斯)进行测定。测定土壤碳、氮、磷、钾和物理性质时,以土壤标准样品(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所)作为对照土样^[22]。

1.5 数据分析 使用SPSS 17.0软件对GRSP及各项理化性质数据进行多因素方差分析。使用JMP软件对GRSP与各理化性质间的相关性进行分析。

2 结果与分析

2.1 GRSP及土壤理化性质的林型间差异 通过分析各树

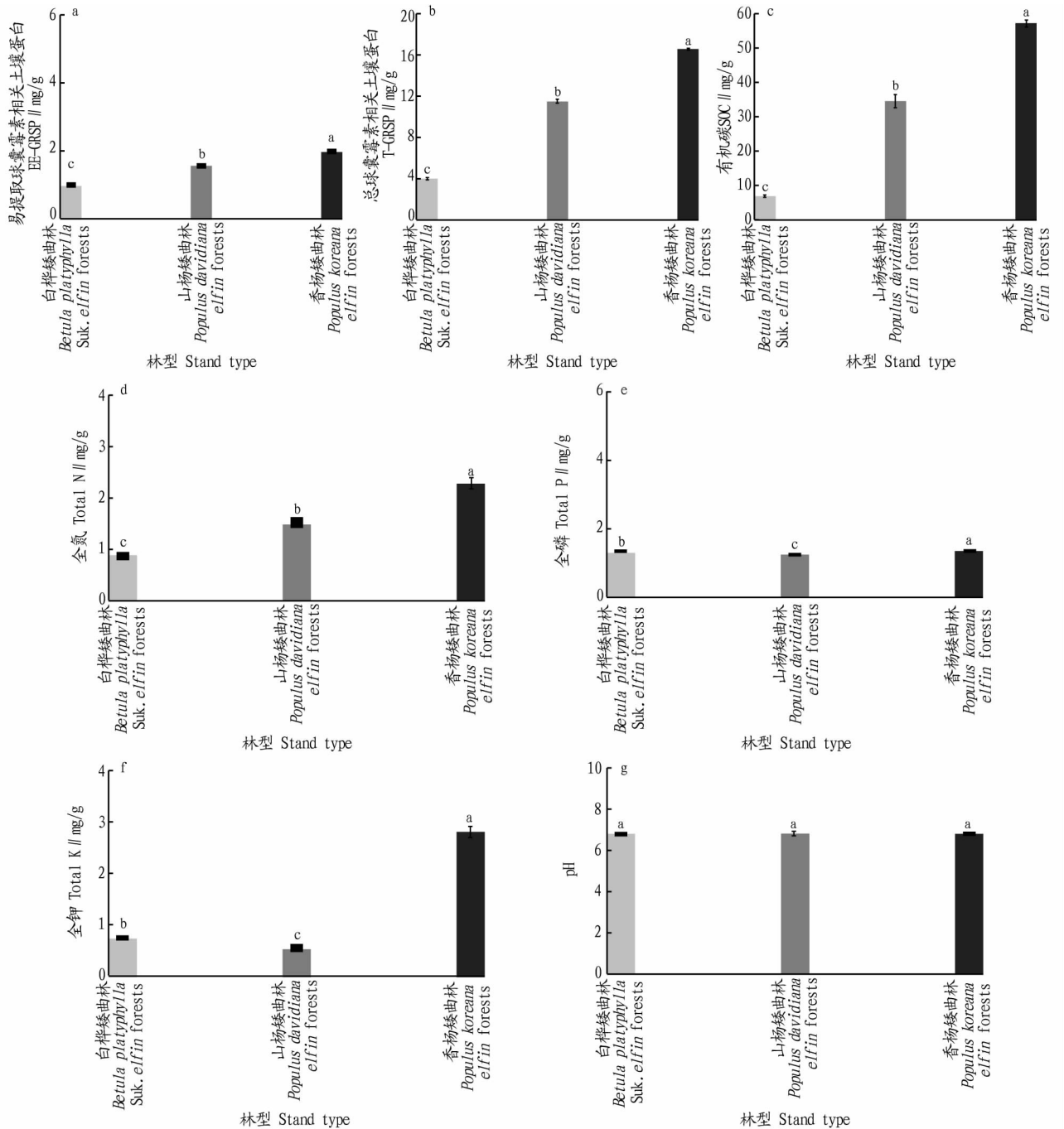
种指标的均值,发现林型的差异显著影响了2个组分的GRSP和大部分土壤理化指标(有机碳、全氮、全磷和全钾)。具体来说,香杨矮曲林的EE-GRSP、T-GRSP、有机碳以及全氮含量分别显著高于白桦矮曲林55.49%($P<0.05$)、183.43%($P<0.05$)、400.51%($P<0.05$)、70.95%($P<0.05$)和山杨矮曲林27.01%($P<0.05$)、43.44%($P<0.05$)、65.46%($P<0.05$)、53.41%($P<0.05$);山杨矮曲林的全磷含量显著低于白桦林6.01%($P<0.05$),显著低于香杨矮曲林6.93%($P<0.05$),全钾含量显著低于白桦矮曲林23.99%($P<0.05$),显著低于香杨矮曲林80.11%($P<0.05$);各林型的pH均无显著差异(图1)。

2.2 GRSP与土壤理化性质的相关关系及其林型间差异 由表2可知,EE-GRSP、T-GRSP含量与土壤有机碳、全氮、全磷、全钾大多存在显著的相关关系,但这种相关性在不同林型中又存在不同的表现。具体来说,山杨矮曲林中有有机碳与EE-GRSP呈显著正相关,全氮与T-GRSP呈显著负相关。香杨矮曲林中全钾与2种GRSP均呈显著或极显著正相关,全氮、全磷与T-GRSP之间也存在显著或极显著正相关;白桦矮曲林的土壤理化性质与GRSP之间没有显著的相关性。

通过分析不同林型中与GRSP有显著相关性的理化性质的种类和数量,可以发现,在各树种矮曲林中,有4种共6个理化指标与GRSP含量呈现显著的相关性,其中香杨矮曲林较其他树种具有更多的显著相关性。在数量上,香杨矮曲林和山杨矮曲林各有1个与EE-GRSP含量有显著相关的理化指标,白桦矮曲林为0个;香杨矮曲林有3个与T-GRSP

含量有显著相关性的理化指标,山杨矮曲林有 1 个,白桦矮曲林为 0 个(表 2)。由此可见,在熔岩台地生境中,香杨矮曲

林林下土壤中与 GRSP 含量有关的理化性质种类和数量均为最多,白桦矮曲林最少。



注:柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters on the column indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图 1 球囊霉素相关土壤蛋白及各理化指标的林型间差异

Fig.1 The differences of glomalin-related soil protein and soil physicochemical properties on different forest types

2.3 GRSP 及土壤理化性质与林分特征的关系及其林型间差异 通过对林分特征与 GRSP 及土壤理化性质的相关关系分别进行分析,发现这种相关关系整体上只在乔木的树高上有较为显著的体现,而在不同林型中的表现存在一定的差异。具体来说,从整体上看,只有乔木树高与 GRSP 存在显著的负相关。而在各林型中,与 GRSP 含量有显著相关性的有白桦矮曲林和山杨矮曲林的乔木树高、胸径以及香杨矮曲

林的灌木层高(仅与 T-GRSP 呈显著负相关)。其中,与 EE-GRSP 显著相关的白桦矮曲林乔木树高以及山杨矮曲林乔木树高、胸径为正相关,白桦矮曲林乔木胸径为负相关;与 T-GRSP 显著相关的白桦矮曲林和山杨矮曲林的乔木树高、胸径以及香杨矮曲林的灌木层高均为负相关(表 3)。而所有林分特征与土壤理化指标之间均没有显著的相关性。

表2 球囊霉素相关土壤蛋白与各理化指标间相关关系及其林型间差异

Table 2 The correlations between glomalin-related soil protein and soil physicochemical properties affected and the difference between forest types

参数 Parameter	相关系数 Correlations	白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.		山杨 <i>Populus davidiana</i>		香杨 <i>Populus koreana</i>		全部林型 Total forest types	
		EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP
有机碳 SOC	相关性	-0.343	0.427	0.786	-0.411	0.326	-0.642	0.998	0.996
	P 值	0.366	0.251	0.012	0.272	0.392	0.062	<0.001	<0.001
全氮 Total N	相关性	0.406	-0.439	0.485	-0.915	-0.356	0.690	0.984	0.978
	P 值	0.278	0.237	0.185	<0.001	0.346	0.040	<0.001	<0.001
全磷 Total P	相关性	-0.373	0.470	-0.525	0.492	0.472	0.880	0.050	0.020
	P 值	0.323	0.202	0.147	0.179	0.200	0.002	0.804	0.923
全钾 Total K	相关性	0.492	-0.528	0.573	0.128	0.722	0.848	0.781	0.760
	P 值	0.178	0.144	0.106	0.742	0.028	0.004	<0.001	<0.001
pH	相关性	0.027	0.198	-0.500	0.249	0.113	-0.112	0.014	0.028
	P 值	0.945	0.609	0.170	0.519	0.772	0.773	0.946	0.888

表3 林分特征与球囊霉素相关土壤蛋白的相关关系及其林型间差异

Table 3 Correlations between forest stand characteristics and glomalin-related soil protein and the difference between forest types

参数 Parameter	相关系数 Correlations	白桦 <i>Betula platyphylla</i> Suk.		山杨 <i>Populus davidiana</i>		香杨 <i>Populus koreana</i>		全部林型 Total forest types	
		EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP	EE-GRSP	T-GRSP
乔木树高 Arbor tree height	相关性	0.999	-1.000	0.999	-1.000	-0.186	0.862	-0.853	-0.873
	P 值	0.027	0.015	0.027	0.015	0.881	0.338	0.003	0.002
乔木胸径 diameter at breast height	相关性	-1.000	-1.000	1.000	-1.000	-0.235	0.836	-0.098	-0.128
	P 值	0.008	0.020	0.008	0.020	0.849	0.370	0.802	0.742
乔木郁闭度 Arbor crown density	相关性	0.113	-0.131	0.113	-0.131	0.976	0.125	0.073	0.069
	P 值	0.928	0.917	0.928	0.917	0.139	0.920	0.852	0.860
灌木层高 Shrub layer height	相关性	0.129	-0.111	0.129	-0.111	-0.314	-1.000	0.352	0.388
	P 值	0.917	0.929	0.917	0.929	0.796	0.015	0.352	0.302
灌木盖度 Shrub coverage	相关性	0.258	-0.276	0.258	-0.276	-0.039	-0.954	0.133	0.150
	P 值	0.834	0.822	0.834	0.822	0.975	0.194	0.732	0.700
草本层高 Herb layer height	相关性	0.129	-0.111	0.129	-0.111	-0.859	-0.771	-0.193	-0.166
	P 值	0.917	0.929	0.917	0.929	0.342	0.439	0.618	0.670
草本盖度 Herb coverage	相关性	0.895	-0.903	0.895	-0.903	-0.820	0.262	0.435	0.460
	P 值	0.295	0.283	0.295	0.283	0.388	0.831	0.241	0.213

3 结论与讨论

土壤 AM 真菌在保持土壤肥力和提高土壤碳汇方面发挥着重要作用。大量研究表明,影响 AM 真菌生长的因素也会影响 GRSP 含量的变化^[12]。如气候条件、植被类型、土壤特性、土壤利用方式、耕作模式、大气二氧化碳浓度等多种生态环境因素都会影响到 GRSP 的积累和组成^[8,10,23]。作为我国较为珍贵且保存相对完好的新期火山熔岩地貌,五大连池自然保护区的熔岩台地具有独特的生态环境和特征,是研究火山喷发、植被演替、土壤碳汇及营养等诸多科学问题不可多得的“宝地”^[24]。在该地区,需要进一步研究熔岩台地矮曲林林型差异对 GRSP 及土壤的影响。基于此,该研究分析了土壤中 EE-GRSP、T-GRSP 和 SOC 等常见理化指标对特殊生境下林型差异的响应;并通过研究各部分间的相关性,探讨不同林型条件下 AM 真菌对土壤肥力维持的影响。

该研究发现,林型的差异对 EE-GRSP、T-GRSP 都有显著影响,GRSP 含量平均值最高的香杨高于含量最低的树种白桦 2 倍左右。GRSP 与土壤理化指标的相关性体现了 GRSP 对于土壤肥力的影响力。AM 真菌对植物生理生化、

养分吸收及土壤理化指标有着不同程度的影响。如徐丽娇等^[25]研究发现,AM 与植株的共生体系能够调节宿主植物对低磷胁迫的响应,还有可能通过其分泌物对相邻非菌根植株产生影响;甄莉娜等^[26]研究了不同施磷水平下 AM 真菌对羊草生长的影响,发现羊草经过接菌处理后,其地下部分全磷含量有了显著的增加;Wu 等^[27]研究发现,菌根真菌能够直接或间接影响土壤团聚体的稳定性;钟思远等^[28]研究发现,AM 真菌产生的 GRSP 能够促进土壤碳固,同时也能帮助土壤形成大团聚体,进而使其结构更加稳定;王诚煜等^[29]研究发现,GRSP 与植物根际土壤的 SOC、N 及 C/N 呈显著正相关,与容重、pH 等呈显著负相关。该研究在前人研究的基础上,发现在个别矮曲林分中 GRSP 与全氮指标呈显著负相关以及白桦矮曲林中的 GRSP 与其他土壤理化指标均无相关性,这些发现补充和完善了前人的研究成果。五大连池地区 GRSP 与土壤肥力的相关关系表明了 AM 真菌在土壤肥力维持中的重要影响力和指示作用。

同时,也需要注意林型对土壤碳库和肥力指标的影响。大量研究表明,林型的差异能够导致土壤碳库的改变,该研

究结果印证了以上内容。但与前人研究不同的是,该研究发现林型的差异未对土壤 pH 产生显著影响。其原因可能一方面在于熔岩台地形成时间较短,生长其上的矮曲林成林较晚,尚未对林下土壤产生明显影响;另一方面由于熔岩台地土壤稀薄贫瘠,火山灰所占比例较大,对不同林型土壤的理化性质有一定的干扰和平衡。该研究发现,在熔岩台地生境中,土壤有机碳含量和全氮含量变化表现为香杨矮曲林>山杨矮曲林>白桦矮曲林。可以看出,香杨作为五大连池地区的典型树种,在土壤碳截获能力及肥力维持能力方面具有明显优势。在土壤中,磷和钾是植物生理代谢活动中不可或缺的元素^[30]。该研究发现,不同林型土壤磷、钾(尤其是钾)有明显差异,其中香杨林林下土壤磷和钾含量均为各林型最高。综上所述,选择适当的林木进行针对性的栽培,对于提高土壤碳汇能力及保持土壤肥力,乃至对该地区进一步开展自然资源和地质遗产保护具有重要的生态价值和社会意义。

该研究的采样地点为五大连池新期火山(最后一次喷发时间为公元 1720—1721 年)喷发后形成的熔岩台地,虽然没有人为干扰的森林土壤质量较好^[31],而该研究的采样点均为无人干扰的次生林,但由于熔岩台地透水性好,土壤稀薄且密度低、黏性差,致使土壤养分贫瘠,水分不足^[1],不利于植被生长,进而影响 AM 真菌的生长导致 GRSP 含量相对较低。对于反映土壤肥力的有机碳、氮、磷、钾等成分来说,由于熔岩台地环境恶劣,地表植物多为苔藓和地衣,高等植物种类和数量稀少^[32],导致凋落物较少且不易留存于土壤中,使土壤中碳、氮、磷、钾等重要营养元素的输入量和含量较低^[33],这与福英等^[34]对新期火山土壤碳、氮含量的研究结论相一致。

前人研究表明,植物与环境相互作用和发展直接影响植被的群落特征^[35]。研究林分特征与土壤养分的关系可为生态环境的保护与恢复提供理论依据^[36-37]。基于当前五大连池自然保护区生态环境及地质遗产保护的迫切需要,需要对具有代表性的矮曲林林分特征与 GRSP 以及土壤理化指标的耦合机制进行更加深入的了解。该研究发现,在熔岩台地生境下,GRSP 对林分大小具有一定的指示功能。这一功能体现在林分个体大小(乔木层高)与 GRSP 紧密的相关关系,且该相关性为负相关。该研究同时发现,矮曲林部分林分特征(乔木树高、乔木胸径、灌木盖度)在不同林型中表现出显著差异($P<0.05$),而不同林型中与 GRSP 和土壤理化性质有显著相关关系的林分特征的种类、正负和有无也不尽相同。初步分析产生这一现象的原因是由于熔岩台地植被是以斑块动态模式进行演替,这种演替模式是随机、跳跃性的而非遵从一般的演替规律^[24]。这种随机性和跳跃性导致各林型的林分特征与土壤 AM 真菌及理化性质之间关联性的断裂和缺失,更深层的机理需要进一步研究。

目前五大连池地区不同植被类型对 GRSP 与土壤理化性质相关性的影响鲜见系统报道,该研究对此进行了补充,这些相关关系受林型影响较大。具体来说,香杨矮曲林土壤中与土壤真菌相关的理化性质的种类最多,共 4 种;而山杨

矮曲林只有 2 种,白桦矮曲林与 GRSP 无相关的理化指标。可见,相对于香杨矮曲林、山杨矮曲林中真菌与肥力的紧密关系,白桦矮曲林中存在的关系较弱。由此分析,白桦矮曲林中土壤真菌生长受到的扰动较大,影响了其与土壤碳、氮的关联性;而香杨矮曲林中土壤真菌受到的干扰较小。根据这一结果推论,不同林型中 AM 真菌群落结构也可能发生了变化,这需要进一步研究加以证实。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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):14-17,21.
- [3] 李涛,赵之伟.丛枝菌根真菌产球囊霉素研究进展[J].生态学杂志,2005,24(9):1080-1084.
- [4] SMITH S E, READ D. Mycorrhizal Symbiosis[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2014.
- [5] BIRD S B, HERRICK J E, WANDER M M, et al. Spatial heterogeneity of aggregate stability and soil carbon in semi-arid rangeland[J]. Environ Pollut, 2002, 116(3):445-455.
- [6] LOVELOCK C E, WRIGHT S F, CLARK D A, et al. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. J Ecol, 2004, 92(2):278-287.
- [7] RILLIG M C, MAESTRE F T, LAMIT L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes[J]. Soil Biol Biochem, 2003, 35(9):1257-1260.
- [8] RILLIG M C, HERNANDEZ G Y, NEWTON P C D. Arbuscular mycorrhizae respond to elevated atmospheric CO₂ after long-term exposure: Evidence from a CO₂ spring in New Zealand supports the resource balance model[J]. Ecol Lett, 2000, 3(6):475-478.
- [9] RILLIG M C, WRIGHT S F, ALLEN M F, et al. Rise in carbon dioxide changes soil structure[J]. Nature, 1999, 400:628.
- [10] RILLIG M C, WRIGHT S F, NICHOLS K A, et al. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils[J]. Plant Soil, 2001, 233(2):167-177.
- [11] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant Soil, 1998, 198(1):97-107.
- [12] WRIGHT S F, UPADHYAYA A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Soil Sci, 1996, 161(9):575-586.
- [13] 田慧,刘院蕾,盖京苹,等.球囊霉素及其作用研究进展[J].土壤通报,2009,40(5):1215-1220.
- [14] COMIS D. Glomalin: Hiding place for a third of the world's stored soil carbon[J]. Australia Farm, 2004, 14:64-66.
- [15] RILLIG M C, WRIGHT S F, EVINER V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species[J]. Plant Soil, 2002, 238(2):325-333.
- [16] GONZÁLEZ-CHÁVEZ M C, CARRILLO-GONZÁLEZ R, WRIGHT S F, et al. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements[J]. Environ Pollut, 2004, 130(3):317-323.
- [17] 马洁怡,王金平,张金池,等.沿海造林树种根际丛枝菌根真菌与土壤因子的通径分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(4):139-147.
- [18] 曹梦,唐中华,赵龙,等.苏打盐碱化土壤 pH 与团聚体中球囊霉素相关土壤蛋白含量的关系[J].土壤,2018,50(2):319-325.
- [19] 彭岳林,蔡晓布,薛会英,等.影响西藏高原草地植物 AM 真菌分布的环境因子研究[J].农业网络信息,2006(6):155-157,162.
- [20] 高秀兵,邢丹,陈瑶,等.茶树根际球囊霉素相关土壤蛋白含量及其与土壤因子的关系[J].茶叶科学,2016,36(2):191-200.
- [21] 贺学礼,陈程,何博.北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布[J].生态学报,2011,31(6):1653-1661.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [23] RILLIG M C, RAMSEY P W, MORRIS S, et al. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change[J]. Plant Soil, 2003, 253(2):293-299.

了联动效应;在农业生产上,化肥的特点是见效快、易吸收,生物有机肥的特点是养分全、长效,有机肥与化肥结合使用可以平衡土壤养分供给,更有利于作物生长^[8-9]。生物有机肥和化肥的配合施用处理与常规施用化肥处理的甜玉米农艺性状和产量构成因子差异不显著,产量相当。这主要是由于化肥单位养分含量高,成分少,释放快,因此,产量提高明显,生物有机肥含有的养分多,但相对含量较低,释放较缓慢,因此全部施用生物有机肥玉米产量提高不明显。这与前人研究结果一致^[10-14]。

(2)施用生物有机肥可提高甜玉米中的淀粉、可溶性糖及蛋白质含量^[5]。研究表明,相较于单独施用化肥氮处理,有机肥氮代替 20%~40%的化肥氮可明显提高玉米籽粒的可溶性糖及淀粉含量,随着有机肥等氮替代比例的增加,可溶性糖、淀粉的含量不断增加^[15],因而改善了甜玉米的品质,提高了其营养价值,甜玉米的商品价值也随之提高。

(3)生物有机肥是在有机肥中接种了特定的有益微生物而生产的一种复合肥料,通过微生物的生命代谢活动分解有机质,释放养分,或者固定空气中的氮气,供作物生长需要,同时发挥速效和长效的作用^[16]。生物有机肥富含有机质及高效活性微生物,可进行固氮、解磷、解钾,因此,施用生物有机肥能很好地改善土壤有效养分状况,提高土壤有机质含量和土壤中碱解氮、速效钾、速效磷含量,生物有机肥还能显著降低土壤容重,增加土壤孔隙度^[17]。

(4)生物有机肥与化肥配合施用可以降低化肥的使用量,减少因为生产化肥而消耗大量的能源,还可以避免因大量施用氮肥而造成的地下水污染及水产品硝酸盐污染^[18]。因此,生物有机肥和化肥的配合施用,实现了对畜禽粪便的无害化处理,解决了畜禽粪便对环境的污染问题,并且变废为宝,实现了资源的高效利用,提高了经济效益,对农业的持续增产增收具有重要意义,符合“加快建设资源节约型、环境

友好型社会”的要求,实现了生态的良性循环与农业的可持续发展。

参考文献

- [1] 施晓晖,赵国军,张新峰.伊宁县发展鲜食玉米生产的优势及对策[J].中国农业信息,2012(4):80.
- [2] 孙治强,赵卫星,张文波.不同氮肥施用模式对日光温室生菜品质及土壤环境影响[J].农业工程学报,2005,21(S2):159-161.
- [3] 罗华,李敏,胡大刚,等.不同有机肥对肥城桃果实产量及品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(4):955-964.
- [4] 赵满兴,刘慧,白二磊,等.腐殖酸肥或生物有机肥替代部分化肥对土壤肥力、红枣产量和品质的影响[J].西北农业学报,2019,28(6):981-987.
- [5] 武长飞,刘远青,刘新程,等.不同用量有机肥对水果玉米产量及品质的影响[J].吉林农业科学,2014,39(1):44-46,73.
- [6] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [7] 刘斌,黄玉溢,陈桂芬.生物有机肥对甜玉米产量及土壤肥力的影响[J].广西农业科学,2008,39(4):500-503.
- [8] 郝小雨,高伟,王玉军,等.有机无机肥料配合施用对设施番茄产量、品质及土壤硝态氮淋失的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(3):538-547.
- [9] 王艳博,黄启为,孟琳,等.有机无机肥料配施对盆栽菠菜生长和土壤供氮特性的影响[J].南京农业大学学报,2006,29(3):44-48.
- [10] 邢鹏飞,高圣超,马鸣超,等.有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2016(3):98-104.
- [11] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J].中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
- [12] 何浩,危常州,李俊华,等.商品有机肥替代部分化肥对玉米生长、产量及土壤肥力的影响[J].新疆农业科学,2019,56(2):325-332.
- [13] 谢军红,柴强,李玲玲,等.有机氮替代无机氮对旱作全膜双垄沟播玉米产量和水氮利用效率的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1199-1206.
- [14] 冯剑,胡小斌,何臻铸,等.有机肥氮替代化肥氮对甜玉米产量及品质的影响[J].安徽农业科学,2020,48(16):157-159,191.
- [15] 周芸,李永梅,范茂攀,等.有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J].作物杂志,2019(4):125-132.
- [16] 宛彩云.生物有机肥对玉米生长发育及产量品质的影响[J].现代农业科技,2009(12):163-164.
- [17] 岑忠用,罗兴录,苏江,等.生物有机肥对木薯地土壤理化性状的影响[J].西南农业学报,2006,19(6):1092-1095.
- [18] 闫佳会,侯璐,姚强,等.有机肥替代化肥对大葱产量、品质和土壤氮淋失的影响[J].西北农业学报,2020,29(8):1243-1249.

(上接第 159 页)

- [24] 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.
- [25] 徐丽娇,姜雪莲,郝志鹏,等.从枝菌根通过调节碳磷代谢相关基因的表达增强植物对低磷胁迫的适应性[J].植物生态学报,2017,41(8):815-825.
- [26] 甄莉娜,王润梅,周凤,等.不同施磷水平下 AM 真菌对羊草生长的影响[J].中国草地学报,2015,37(6):56-61.
- [27] WU Q S, CAO M Q, ZOU Y N, et al. Direct and indirect effects of glomalin, mycorrhizal hyphae and roots on aggregate stability in rhizosphere of trifoliate orange[J]. Sci Rep, 2014, 4: 5823.
- [28] 钟思远,张静,褚国伟,等.南亚热带森林从枝菌根真菌与土壤结构的关系[J].生态科学,2018,37(5):16-24.
- [29] 王诚煜,冯海艳,杨忠芳,等.内蒙古中北部球囊霉素相关土壤蛋白的分布及其环境影响[J].干旱区研究,2013,30(1):22-28.
- [30] WANG R N, WANG C M. Impacts of *Larix olgensis* afforestation on soil

- phosphorus dynamics[J]. Procedia Environ Sci, 2010, 2: 1669-1678.
- [31] 李丹.不同土地利用方式对土壤性质及细菌群落结构的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
- [32] 黄庆阳,曹宏杰,谢立红,等.五大连池不同年代火山熔岩流遗迹的物种组成及多样性分析[J].国土与自然资源研究,2017(6):68-71.
- [33] DEL MORAL R, WOOD D M. Early primary succession on the volcano Mount St. Helens[J]. J Veg Sci, 1993, 4(2): 223-234.
- [34] 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.
- [35] 钟娇娇,陈杰,陈倩,等.秦岭山地天然次生林群落 MRT 数量分类、CCA 排序及多样性垂直格局[J].生态学报,2019,39(1):277-285.
- [36] ZUO X A, ZHAO X Y, ZHAO H L, et al. Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Geoderma, 2012, 173/174: 1-9.
- [37] 崔丽娟,马琼芳,郝云庆,等.若尔盖高寒沼泽植物群落与环境因子的关系[J].生态环境学报,2013,22(11):1749-1756.