

落叶松人工林球囊霉素相关土壤蛋白与土壤理化性质空间差异特性*

贺海升^{1,2} 王琼¹ 裴忠雪¹ 王慧梅¹ 王文杰^{1**}

(¹ 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040; ² 沈阳师范大学, 沈阳 110034)

摘要 球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)对土壤生产力的提高具有重要意义,已逐渐成为当前土壤养分研究的热点,然而 GRSP 与土壤理化性质之间空间相互关系则鲜见报道。本文以东北小兴安岭余脉老山、帽儿山、东山、大青川人工落叶松林土壤 GRSP 为研究对象,利用多变量协方差及共线性对土壤(0~80 cm)中 GRSP 与有机碳、全氮、全磷、全钾等 12 个土壤理化因子之间的空间差异特性进行分析。结果表明:(1) 土层深度是造成 GRSP 含量及土壤各理化因子差异的因素之一;(2) 逐步回归方法分别反映出 EE-GRSP 协同贡献最大因子为有机碳($\beta=0.312$),而 T-GRSP 协同贡献最大因子为全磷($\beta=0.376$),而容重则是两者共有的负相关因子($\beta=-0.229, -0.212$);(3) GRSP 垂直分布与土壤各理化因子的共线性分析中发现,GRSP 与土壤全磷之间存在显著共线性($P<0.05$)。本研究表明,GRSP 与土壤理化性质之间存在显著空间异质性,充分印证了 GRSP 在土壤养分运输及可持续利用的重要作用,并且筛选出影响 GRSP 含量及其生态功能相关土壤因子,为土壤质量及功能评价提供依据。

关键词 球囊霉素相关土壤蛋白;逐步回归分析;共线性分析

中图分类号 S152.4, S791.22 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)12-3466-08

Spatial variations of glomalin-related soil protein in *Larix gmelinii* plantations and possible relations with soil physicochemical properties. HE Hai-sheng^{1,2}, WANG Qiong¹, PEI Zhong-xue¹, WANG Hui-mei¹, WANG Wen-jie^{1**} (¹Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; ²Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(12): 3466-3473.

Abstract: Glomalin-related soil protein (GRSP) plays an important role in enhancing soil productivity, and it has been one of the hot subjects in the soil nutrient research field. However, few studies have focused on the correlations between GRSP content and soil physicochemical properties. In this paper, soils from 0-80 cm depths were collected in *Larix gmelinii* plantations in the Lesser Khingan (Laoshan, Mao'ershan, Dongshan, Daqingchuan) in Northeast China. Multiple covariances analysis and collinearity analysis were used to analyze the spatial correlations between GRSP content and soil physicochemical properties (soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, soil CaCO_3 , available silicon, soil pH, soil bulk density and electrical conductivity). The results showed that, (1) soil depth was a key factor affecting the variations of GRSP content and soil physicochemical properties. (2) soil organic carbon and total phosphorus respectively contributed most to EE-GRSP content ($\beta=0.312$) and T-GRSP content ($\beta=0.376$), and soil bulk density was a negative factor contributing most to EE-GRSP content and T-GRSP content ($\beta=-0.229, -0.212$). (3) significant collinearity was observed between GRSP and total phosphorus ($P<0.05$). Our results showed that significant spatial heterogeneity was observed between GRSP content and soil physicochemical properties. These data suggested that GRSP had important

* 国家自然科学基金项目(41373075, 31170575)、黑龙江省杰出青年基金项目(JC201401)和中央高校基本科研业务费项目(2572014EA01)资助。

** 通讯作者 E-mail: wjwang225@hotmail.com

收稿日期: 2015-04-06 接受日期: 2015-09-18

effects on soil nutrient transportation and soil sustainable use. In addition, the soil factors which affected GRSP content and its ecological function were also identified. Our study provides a basis for assessing soil quality and soil function.

Key words: glomalin-related soil protein; stepwise regression analysis; collinearity analysis.

球囊霉素相关土壤蛋白 (glomalin-related soil protein, GRSP) 是丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizal, AM) 真菌随着宿主植物根系的生长分泌产生的一类糖蛋白。由于 AM 真菌在自然界中存在的普遍性和广泛性, GRSP 也普遍存在于各种土壤中 (Wright *et al.*, 1996, 1998a)。Wright 等 (1998b)、Rillig (2004)、Janos 等 (2008) 根据 GRSP 提取的难易程度及提取方法 (考马斯亮蓝法和酶联免疫反应法) 分为总提取球囊霉素相关土壤蛋白 (total GRSP, T-GRSP) 和易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (easily extractable GRSP, EE-GRSP); 免疫反应球囊霉素相关土壤蛋白 (immunoreactive total GRSP, IT-GRSP) 和免疫反应易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (immunoreactive easily extractable GRSP, IEE-GRSP)。Rosier 等 (2006) 的研究表明, 目前的提取方法没有除去所有的非球囊霉素类物质, 但 Bolliger 等 (2008) 用多种方法测定了 GRSP 的纯度, 结果表明其中的主要成分仍然是球囊霉素。

GRSP 是菌根真菌与土壤环境相互作用的重要媒介物质 (Purin *et al.*, 2007), 随土壤年龄增加土壤球囊霉素含量有升高的趋势 (Rillig *et al.*, 2001; Steinberg *et al.*, 2003), GRSP 在土壤中含量丰富且稳定性强, 是土壤有机质的重要组成部分, 其所含碳素的量不可忽视 (Wright *et al.*, 1998b)。同时, GRSP 也是土壤团聚体形成重要的粘合剂, 在土壤中有较强的粘附能力。具有团聚体的土壤结构体既能抵抗风蚀与水蚀, 提高土壤结构稳定性和抗侵蚀能力, 促进退化土壤的恢复, 又改善根际微环境, 提高土壤肥力, 从而提高土壤生态系统的生产力 (Rillig *et al.*, 2000, 2007; Catherine *et al.*, 2004)。因此, GRSP 对于土壤团聚化过程、土壤质量的改善和评价具有非常重要的意义 (Borie *et al.*, 2006; Halvorson *et al.*, 2006; Wright *et al.*, 2007), 已逐渐成为当前土壤养分研究的热点。

研究发现, 荒漠及农牧半干旱地区 GRSP 含量受到样地气候条件、土壤微环境、宿主植物生长和 AM 真菌生物学特性等多种因素共同作用的影响, 而土壤因子的作用表现尤为突出 (陈颖等, 2009; 贺

学礼等, 2008, 2011a; 张淑容等, 2013; 王诚煜等, 2013)。而对于林区 GRSP 含量及空间分布特性与土壤理化性质研究相对较少。为此, 本文以东北地区具有重要碳汇功能的树种落叶松 (Wang *et al.*, 2005; 孙玉军等, 2007) 的林下土壤中 GRSP 为研究对象, 对比 4 个采样地点不同土层深度下 GRSP 与土壤理化性质相关关系, 探讨 GRSP 与土壤各理化性质之间是否存在空间差异特性, 在土壤系统中影响 GRSP 含量的土壤理化因子, 以及不同土层深度下哪些土壤理化因子对 GRSP 的生态功能存在响应? 这些实验结论都将为 GRSP 对林下土壤结构的改善和土壤养分的维持及可持续利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

样地为长白山余脉张广才岭的老山 (45°20' N, 127°34' E)、帽儿山 (45°24' N, 127°33' E)、小兴安岭的东山 (46°57' N, 129°10' E)、大青川 (47°00' N, 129°07' E) 人工落叶松林下土壤, 其中老山土壤类型属于白浆土, 其他土壤类型均为暗棕壤, 总共 159 块样地。该地区属大陆性季风气候, 年平均气温 -0.3~2.6 °C, 降水量 676~724 mm, 海拔 240~340 m。

1.2 样品采集及处理

取样在预先选好的样地上, 随机选择 3 个取样点。将确定的取样点地表有机覆盖物去除, 露出矿质土层, 挖 100 cm 深的土壤剖面, 从地表开始向下至 1 m 深处分 4 层 (0~20、20~40、40~60、60~80 cm) 土壤环刀采取土样, 称重。用四分法取适量土样置于土袋中带回实验室, 风干、除去植物根系、石块等。研磨、过筛、装瓶, 用于土壤养分和 GRSP 测定。

1.3 试验方法

球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP) 按修改后 Wright 等 (1998b) 考马斯亮蓝法测定。易提取球囊霉素相关土壤蛋白 (EE-GRSP): 取 1 g 风干土于试管中, 加入 8 mL 的 20 mmol · L⁻¹ (pH 7.0) 柠檬酸钠浸提剂, 在 103 kPa、121 °C, 连续提取 90 min 后, 在 10000 ×g 下离心 6 min, 收集上清液; 总提取球囊

霉素相关土壤蛋白(T-GRSP);取1 g 风干土于试管中,加入8 mL的50 mmol·L⁻¹(pH 8.0)柠檬酸钠浸提剂,在103 kPa、121 °C条件下连续提取60 min,再重复提取4次;10000 ×g下离心5 min,收集上清液。分别吸取上清液0.5 mL加入5 mL考马斯亮蓝G-250染色剂,在595 nm波长下比色。用牛血清蛋白标液,考马斯亮蓝法显色,绘制标准曲线,求得EE-GRSP和T-GRSP含量。

有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮采用半微量开氏法;碱解氮采用碱解扩散法;全磷采用高氯酸—浓硫酸法(钼锑抗试剂法);速效磷采用中性和石灰性土壤速效磷测定法(碳酸氢钠法);全钾、速效磷采用火焰分光光度计法;电导率采用电导法;容重采用土壤环刀法;pH值采用酸度计水土比5:1测定;土壤碳酸钙中性滴定法;有效硅采用柠檬酸浸提法;具体方法见《土壤农化分析》(鲍士旦,2000)。

1.4 数据处理

应用SPSS 18.0统计软件对数据进行多因素方差分析,可以得出GRSP及土壤因子含量分布差异,利用逐步回归原理(*F*值概率0.05~0.1)筛选出与GRSP协同或拮抗影响贡献大的因子,并采用共线性分析法对比GRSP与土壤因子之间共线性。

2 结果与分析

2.1 GRSP与土壤理化因子空间分布差异

不同地点下GRSP含量存在差异(表1),159块样地之中,老山落叶松林下土壤中GRSP含量均低于其他样地,在0~20 cm土层中表现尤为突出($P<0.01$)。GRSP随土层深度加深而呈逐渐下降趋势。老山、帽儿山、东山、大青川样地EE-GRSP含量由表层(0~20 cm)至深层(60~80 cm)含量分别降低约52%、40%、56%和56%;T-GRSP含量分别降低约24%、29%、47%和57%。4个地点EE-GRSP含量平均下降约51%,T-GRSP含量平均下降约38%。对159块样地的GRSP含量结果进行方差分析发现

(表1),土层深度对GRSP含量影响达到显著水平($P<0.05$),说明土层深度是影响GRSP含量的因素之一。

如图1所示,EE-GRSP、T-GRSP与有机碳($R^2=0.613,0.484$)、全氮($R^2=0.562,0.482$)、全磷($R^2=0.442,0.479$)、碱解氮($R^2=0.364,0.310$)、速效钾($R^2=0.1134,0.1757$)、电导率($R^2=0.1365,0.2676$)显著正相关($P<0.05$),与容重($R^2=0.536,0.454$)显著负相关($P<0.05$)。

2.2 GRSP与土壤因子逐步回归分析

由于GRSP与土壤多个理化性质因子具有相关性,且与多数因子相关性达到显著水平($P<0.05$),为了进一步探讨GRSP与土壤各因子之间的影响关系,建立最优的回归方程(表3),分析GRSP与不同土壤因子间相互关系大小,有效地从众多相关因子中筛选出与GRSP协同或拮抗影响贡献大的因子。

实验测定土壤其他理化因子随地点及土层也存在显著变化(表2)。土壤因子中,有机碳、全氮、全磷、碱解氮、速效钾、土壤容重与GRSP随土层变化有相同的变化趋势,且达到显著水平($P<0.05$)。相比较而言,速效磷、有效硅、碳酸钙、全钾变化趋势不明显。方差分析发现,土层深度对土壤理化因子(除有效硅外)影响均达到显著水平($P<0.05$)。

2.3 土壤球囊霉素相关蛋白与各土壤理化因子相关性

鉴于GRSP与多因子有相同变化趋势(表2),利用简单线性相关分析方法,分析GRSP与各土壤理化因子之间是否存在相互影响。结果见图1。

结果显示,EE-GRSP、T-GRSP与土壤各理化因子模拟逐步回归方程,其复相关系数分别为0.850和0.856,并均达到显著水平($P<0.01$),因此逐步方程能够反映GRSP与土壤理化因子之间相互关系。有机碳、全氮、全磷、容重、有效硅、速效磷为EE-GRSP与T-GRSP共有因子,其中有机碳($\beta=0.312$)对EE-GRSP含量影响最高,其次为容重、全

表1 4个采样地点GRSP在不同土层的分布(mg·g⁻¹)

Table 1 Distribution of GRSP in different soil layers in four sampling sites

土壤深度 (cm)	EE-GRSP				T-GRSP			
	老山	帽儿山	东山	大青川	老山	帽儿山	东山	大青川
0~20	0.87(0.25) Aa	1.27(0.32) Ba	1.24(0.29) Ba	1.19(0.32) Ba	8.55(2.11) Aa	13.47(3.66) Ba	12.44(2.47) Ba	10.86(2.09) Ba
20~40	0.60(0.24) Ab	0.99(0.21) Bb	0.85(0.30) Bb	0.78(0.22) Ab	6.90(2.15) Ab	11.67(2.71) Bb	9.31(2.35) Bb	7.71(1.71) Ab
40~60	0.48(0.23) Ac	0.83(0.18) Bc	0.66(0.21) Ac	0.63(0.17) Ac	6.72(1.71) Ab	10.70(2.61) Bb	7.37(2.38) Ac	5.91(1.93) Ac
60~80	0.42(0.16) Ac	0.74(0.18) Bc	0.56(0.19) Ac	0.52(0.15) Ad	6.50(1.74) Ab	9.56(2.44) Bc	6.54(2.33) Ac	4.66(1.78) Ad

括号内为标准误;纵行不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

表 2 不同地点、深度下各项土壤因子比较

Table 2 Analysis of soil factors in soil layers in different sites

样地	土壤深度(cm)	有机碳 (g·kg ⁻¹)	全氮 (g·kg ⁻¹)	全磷 (g·kg ⁻¹)	全钾 (g·kg ⁻¹)	碱解氮 (mg·kg ⁻¹)	速效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)	CaCO ₃ (%)	有效硅 (mg·kg ⁻¹)	pH	电导率 (μS·cm ⁻¹)	土壤容重 (g·cm ⁻³)
老山	0~20	5.13 (1.54) a	1.20 (0.61) a	0.55 (0.17) a	24.97 (4.66) a	106.19 (62.36) a	7.93 (9.35) a	23.57 (26.96) a	0.01 (0.00) a	119.91 (39.48) a	5.43 (0.20) a	47.91 (10.90) a	1.21 (0.18) a
	20~40	2.33 (0.99) b	0.55 (0.32) b	0.45 (0.17) b	26.01 (4.80) ab	39.37 (24.59) b	6.13 (9.22) a	11.6 (25.42) b	0.00 (0.00) a	123.40 (31.73) a	5.37 (0.26) ab	36.70 (8.40) b	1.42 (0.11) b
	40~60	1.63 (0.70) c	0.36 (0.34) c	0.44 (0.17) b	27.61 (5.37) bc	26.52 (21.63) c	8.38 (17.87) a	21.22 (28.40) a	0.00 (0.00) a	159.72 (45.93) b	5.31 (0.25) b	35.60 (10.29) b	1.50 (0.13) c
	60~80	1.29 (0.79) d	0.29 (0.28) c	0.49 (0.21) b	28.00 (5.14) c	23.15 (26.98) c	10.43 (16.92) a	34.81 (39.93) c	0.00 (0.00) a	175.26 (57.50) b	5.33 (0.23) b	35.10 (10.37) b	1.54 (0.10) c
帽儿山	0~20	7.49 (2.32) a	2.78 (1.36) a	1.19 (0.39) a	25.17 (5.32) a	204.23 (113.12) a	12.89 (6.99) a	40.66 (37.73) a	0.01 (0.00) a	146.24 (74.6) a	5.36 (0.90) a	59.04 (21.78) a	1.05 (0.24) a
	20~40	5.35 (1.99) b	1.88 (1.02) b	1.19 (0.44) a	26.49 (4.38) ab	109.31 (70.46) b	14.34 (6.19) a	29.21 (40.70) ab	0.01 (0.00) a	162.10 (80.13) a	5.55 (0.32) a	43.89 (10.05) b	1.21 (0.16) b
	40~60	3.04 (1.15) c	0.94 (0.58) c	0.98 (0.41) b	28.69 (5.35) b	68.74 (52.15) c	25.55 (17.09) b	27.06 (32.61) ab	0.01 (0.00) a	167.42 (75.59) a	5.55 (0.32) a	32.62 (10.46) c	1.31 (0.12) c
	60~80	2.31 (1.02) d	0.69 (0.47) c	0.86 (0.39) b	29.88 (6.34) bc	32.92 (26.63) c	35.29 (32.54) c	23.73 (34.00) b	0.00 (0.00) a	161.73 (75.47) a	5.57 (0.35) a	30.05 (7.97) c	1.37 (0.12) c
东山	0~20	10.19 (2.29) a	3.16 (1.05) a	1.34 (0.23) a	28.21 (3.27) a	96.77 (37.11) a	6.37 (3.81) a	119.15 (49.88) a	0.02 (0.02) a	171.47 (36.55) a	5.92 (0.17) a	35.39 (13.19) a	1.01 (0.12) a
	20~40	5.36 (1.90) b	1.58 (0.65) b	1.01 (0.23) b	30.19 (3.16) a	52.08 (28.10) b	9.89 (9.77) ab	68.32 (51.50) b	0.01 (0.01) b	165.78 (39.67) a	6.05 (0.15) b	23.58 (8.54) b	1.19 (0.12) b
	40~60	3.54 (1.79) c	0.92 (0.60) c	0.74 (0.21) c	32.11 (4.19) b	27.32 (21.23) c	15.68 (22.75) bc	32.31 (30.58) c	0.01 (0.01) b	164.44 (43.68) a	6.12 (0.19) b	18.86 (8.52) bc	1.39 (0.19) c
	60~80	2.37 (1.14) d	0.73 (0.61) c	0.69 (0.18) c	33.41 (3.63) b	23.74 (18.54) c	18.35 (17.79) c	31.90 (33.73) c	0.01 (0.01) b	167.89 (39.94) a	6.21 (0.17) c	17.07 (7.29) c	1.46 (0.21) c
大青川	0~20	8.40 (2.52) a	3.16 (1.07) a	1.24 (0.35) a	28.69 (3.50) a	102.44 (38.81) a	7.68 (6.61) a	75.02 (65.04) a	0.02 (0.02) a	163.76 (51.51) a	5.84 (0.25) a	30.63 (8.30) a	1.04 (0.14) a
	20~40	4.38 (1.66) b	1.53 (0.58) b	0.90 (0.29) b	31.24 (4.34) b	49.10 (22.54) b	9.73 (12.18) ab	44.75 (50.42) b	0.01 (0.01) b	163.78 (36.09) a	5.96 (0.22) ab	19.73 (7.87) b	1.27 (0.16) b
	40~60	3.00 (2.00) c	0.87 (0.58) c	0.65 (0.28) c	33.59 (3.95) c	30.22 (20.95) c	20.37 (29.84) bc	17.89 (25.15) c	0.01 (0.01) b	157.14 (45.41) a	6.04 (0.25) bc	15.84 (6.72) c	1.42 (0.19) c
	60~80	1.84 (1.02) d	0.60 (0.27) c	0.55 (0.20) c	36.51 (4.45) d	21.04 (11.26) c	25.00 (30.52) c	11.80 (19.36) c	0.01 (0.01) b	156.21 (48.50) a	6.11 (0.24) c	13.20 (3.26) c	1.51 (0.16) d

括号内为标准误;同列不同字母代表差异显著($P < 0.05$)。

表 3 GRSP 与各土壤因子相关关系逐步回归模拟

Table 3 Step regression simulation of correlations between GRSP and soil factors

因子	EE-GRSP ($R^2 = 0.850, P < 0.01$)					因子	T-GRSP ($R^2 = 0.856, P < 0.01$)				
	非标准化系数		β	t	P		非标准化系数		β	t	P
	B	Se					B	Se			
常量	0.937	0.099				常量	12.929	1.719			
有机碳	0.036	0.005	0.312	6.84	0.000	全氮	0.311	0.14	0.108	2.219	0.027
土壤容重	-0.355	0.062	-0.229	-5.726	0.000	电导率	0.043	0.007	0.202	6.352	0.000
全磷	0.146	0.027	0.176	5.332	0.000	全磷	2.921	0.252	0.376	11.605	0.000
碱解氮	0.001	0	0.134	4.547	0.000	土壤容重	-3.068	0.568	-0.212	-5.399	0.000
有效硅	0	0	-0.084	-3.648	0.000	有效硅	0.008	0.001	0.134	6.061	0.000
速效磷	0.001	0	0.069	2.904	0.004	pH	-1.166	0.238	-0.148	-4.904	0.000
全氮	0.041	0.016	0.134	2.649	0.008	有机碳	0.172	0.049	0.158	3.521	0.000
-	-	-	-	-	-	速效磷	0.012	0.004	0.073	3.107	0.002

磷;而 T-GRSP 逐步回归模拟方程结果显示对 T-GRSP 含量影响较大的是全磷($\beta = 0.376$)。容重为 GRSP 拮抗影响最大的因子($\beta = -0.229, -0.212$)。

2.4 GRSP 与土壤理化因子共线性

通过协方差法及共线性分析法对比 EE-GRSP、T-GRSP 与各土壤因子在不同土层间相关性的差异

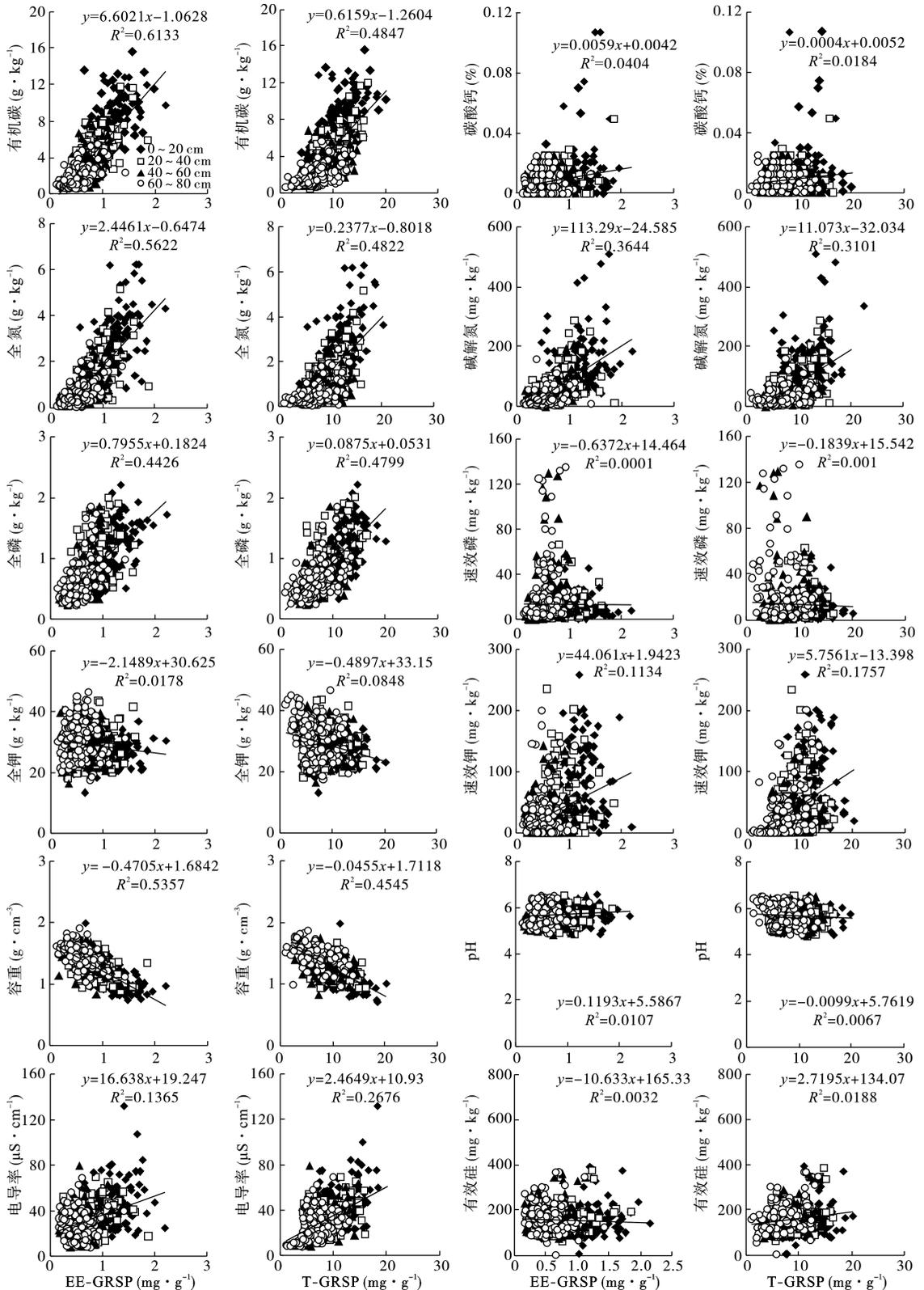


图1 易提取球囊霉素相关土壤蛋白及总提取球囊霉素相关土壤蛋白与土壤中各因子相关关系
Fig.1 Correlations between GRSP (T-GRSP and EE-GRSP) and soil factors

(表4), 结果表明, EE-GRSP、T-GRSP 与有机碳、全氮、全磷、碱解氮、容重在 0~80 cm 的各土层中均有

显著线性关系($P < 0.01$), 而其中只有全磷在 0~80 cm 的各土层中共线性差异不显著($P > 0.05$), 即不

表 4 不同土层中 GRSP 与土壤各因子相关系数比较及共线性分析

Table 4 Comparison and collinearity analysis of correlation coefficient between GRSP content and soil factors in different soil layers

土壤因子	EE-GRSP (mg · g ⁻¹)					T-GRSP (mg · g ⁻¹)					
		0~20 (cm)	20~40 (cm)	40~60 (cm)	60~80 (cm)	共线性 显著度	0~20 (cm)	20~40 (cm)	40~60 (cm)	60~80 (cm)	共线性 显著度
有机碳 (g · kg ⁻¹)	slope	5.108	5.221	3.783	2.60	**	0.531	0.497	0.288	0.184	**
	R ²	0.366**	0.503**	0.335**	0.255**		0.376**	0.485**	0.251**	0.214**	
全氮含量 (g · kg ⁻¹)	slope	2.335	1.886	1.576	1.152	**	0.264	0.196	0.113	0.074	**
	R ²	0.337**	0.388**	0.448**	0.293**		0.409**	0.446**	0.296**	0.198**	
全磷含量 (g · kg ⁻¹)	slope	0.917	0.843	0.863	0.720		0.105	0.084	0.080	0.060	
	R ²	0.440**	0.298**	0.387**	0.258**		0.541**	0.331**	0.410**	0.273**	
全钾含量 (g · kg ⁻¹)	slope	1.68	4.016	0.155	-0.090	**	-0.045	0.046	-0.548	-0.840	**
	R ²	0.016	0.049**	0.000	0.000		0.001	0.001	0.078**	0.135**	
碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	slope	82.13	68.45	82.19	27.781	**	10.116	7.253	7.093	1.889	**
	R ²	0.112**	0.160**	0.321**	0.063**		0.155**	0.184**	0.308**	0.047**	
速效磷 (mg · kg ⁻¹)	slope	1.93	11.81	17.20	28.711	**	0.670	1.317	0.610	0.480	**
	R ²	0.006	0.104**	0.034*	0.051**		0.067**	0.146**	0.006	0.002	
速效钾 (mg · kg ⁻¹)	slope	51.49	31.85	18.65	8.618	**	5.932	4.860	4.089	4.808	**
	R ²	0.087**	0.039*	0.024	0.003		0.110**	0.096**	0.147**	0.134**	
CaCO ₃ (%)	slope	0.013	0.005	0.003	0.001	**	0.001	0.0003	-0.0001	-0.0003	**
	R ²	0.067	0.044	0.012	0.001		0.023	0.014	0.002	0.014	
有效硅 (mg · kg ⁻¹)	slope	31.24	50.87	-2.41	-50.54	**	5.079	6.854	4.693	5.040	**
	R ²	0.035*	0.075**	0.000	0.033*		0.087**	0.144**	0.059	0.053**	
pH	slope	0.208	0.279	0.375	0.369	**	0.0151	0.009	-0.024	-0.042	**
	R ²	0.049**	0.043**	0.045**	0.028*		0.025*	0.005	0.024	0.061**	
电导率 (μS · cm ⁻¹)	slope	7.15	9.34	1.79	-3.44	**	1.836	1.682	1.847	1.885	**
	R ²	0.018	0.042*	0.001	0.003		0.108**	0.145**	0.157**	0.158**	
土壤容重 (g · cm ⁻³)	slope	-1.46	-1.535	-1.677	-1.698	**	-0.033	-0.034	-0.033	-0.027	**
	R ²	0.329**	0.276**	0.342**	0.282**		0.332**	0.352**	0.287**	0.202**	

** P<0.01, * P<0.05。

同土层中 GRSP 与全磷之间存在共线性。

3 结论与讨论

通过对 4 个采样地点不同土层深度落叶松林下土壤中 GRSP 含量多变量因素相关分析发现(表 1),随深度变化 EE-GRSP 与 T-GRSP 含量呈现显著下降趋势。由表层至深层土壤 GRSP 含量呈现下降趋势,最多下降了 56%、57%,达到显著差异(P<0.05),老山落叶松林下土壤 GRSP 含量均低于其他样地,在 0~20 cm 土层中表现尤为突出(P<0.01),主要是由于林下土壤中 AM 真菌感染草本植物,浅根系居多,形成菌根共生体多分布于土壤表层所致,与此同时土壤的不同层次选择性地吸收各种元素,并以凋落物和死亡根的形式归还土壤,进而在表层相对富集(何斌温等,2002)。此外,老山土壤类型属于白浆土,不同于其他样地土壤类型,而导致老山样地 GRSP 含量低于其他样地。在土壤理化因子中,有机质是最重要的土壤肥力成分,氮、磷、钾素是植物从土壤中吸收利用最多的矿质元素。

从表 2 可以看出,土壤各因子之间具有空间异质性,并被其他研究所证明(王其兵等,1998;Rillig *et al.*, 2003),且土层深度对土壤理化因子(除有效硅外)影响均达到显著水平(P<0.05)。可见,GRSP 与土壤理化因子具有相同的空间异质性,这与陈颖等(2009)、贺学礼等(2011b)研究结果相一致。

本研究中,GRSP 与有机碳呈显著正相关($R^2 = 0.613$ 、 $R^2 = 0.484$, $P < 0.01$),印证了 GRSP 是土壤有机质的主要组成部分,是土壤有机碳的一个重要来源,能在一定程度上反映土壤碳库的变化。GRSP 与全氮、碱解氮全磷呈显著正相关($P < 0.01$),这可能与菌根产生 GRSP 需土壤碱解氮提供氮源及对土壤磷活化有关(Rillig *et al.* 2007; Janos *et al.*, 2008; 贺学礼等,2011b),这与许多学者研究的结果相一致(Wright *et al.*, 1996, 1998a; Rillig *et al.*, 2003),而容重则与 GRSP 呈显著负相关($R^2 = 0.536$ 、 $R^2 = 0.454$, $P < 0.01$),说明土壤紧实度在一定程度上抑制植物生长,降低真菌对植物根系的侵染率(毕银丽,2007),从而影响土壤中 GRSP 含量。

有研究发现,EE-GRSP 库包含的是土壤中新鲜的 GRSP,T-GRSP 反映了土壤中累积 GRSP 的水平 (Rillig *et al.*,2007;Janos *et al.*,2008)。逐步回归方程能比较客观地反映 GRSP 含量与土壤养分、土壤物理结构之间相互关系,有机碳是影响 EE-GRSP 含量的首选因子,协同贡献影响最大($\beta=0.312$),全氮是影响 T-GRSP 的选因子,土壤全磷($\beta=0.376$)对 T-GRSP 贡献较为明显。说明 GRSP 对土壤主要肥力成分(碳、氮、磷等)的富集具有不可忽视的作用 (Wright *et al.*,1996,1998a;Rillig *et al.*,2002);同时,菌根生长、繁殖、分泌 GRSP 需要丰富碳源(刘润进等,2007),而菌丝辅助细根吸收转移无机氮、磷等元素(宋勇春等,2001)的功能也主要通过T-GRSP 来实现。在土壤因子中,容重则是对土壤中 GRSP 影响最大的拮抗因子。

不同土层深度土壤理化因子中除全磷外,GRSP 与土壤各理化因子的共线性均存在显著差异 ($P<0.05$),印证 GRSP 与土壤理化因子之间存在空间异质性的结论。在土壤理化因子中,只有全磷与 GRSP 含量在 0~80 cm 土层中存在共线性 ($P>0.05$),这可能与丛枝菌根真菌促使植物对磷吸收利用有直接关系(宋勇春等,2003),此结果也是 Wang 等(2014)对于保持深层土壤养分可持续利用发展研究的重要补充。GRSP 受样地气候条件、土壤微环境、物种多样性等多种因素共同作用的影响,本文主要针对 GRSP 与土壤理化因子的相关关系进行多尺度分析,可以综合反映土壤有机碳库动态,土壤养分循环及运输,今后应结合样地气候、水文、物种多样性等自然因素,进一步探究 GRSP 调节土壤功能的机制,为采取何种合理的土壤管理措施来提高土壤质量及功能评价提供理论依据。

参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社: 30-107.
- 毕丽银. 2007. 丛枝菌根培养新技术及其对土地复垦生态效应. 北京: 地质出版社: 74-75.
- 陈颖, 贺学礼, 山宝琴, 等. 2009. 荒漠油蒿根围 AM 真菌与球囊霉素的时空分布. 生态学报, **29**(11): 6010-6016.
- 何斌温, 远光, 梁宏温. 2002. 英罗港红树植物群落不同演替阶段植物元素分布及其与土壤关系. 植物生态学报, **26**(5): 518-524.
- 贺学礼, 白春明, 赵丽莉. 2008. 毛乌素沙地沙打旺根围 AM 真菌的空间分布. 应用生态学报, **19**(12): 2711-2716.
- 贺学礼, 陈程, 何博. 2011a. 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. 生态学报, **31**(6): 1653-1661.
- 贺学礼, 许珂, 郭辉娟. 2011b. 黄芩根围 AM 真菌分布与土壤碳氮相关性研究. 河北农业大学学报, **34**(5): 63-68.
- 刘润进, 陈应龙. 2007. 菌根学. 北京: 科学出版社.
- 宋勇春, 冯固, 李晓林. 2003. 不同磷源对红三叶草根际和菌根际磷酸酶活性的影响. 应用生态学报, **14**(5): 139-148.
- 宋勇春, 李晓林, 冯固. 2001. 菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草生境中土壤有机磷亏缺的影响. 生态学报, **21**(7): 1130-1135.
- 孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 等. 2007. 兴安落叶松(*Larix gmelini*)幼中龄林的生物量与碳汇功能. 生态学报, **27**(5): 1756-1762.
- 王诚煜, 冯海艳, 杨忠芳, 等. 2013. 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. 干旱区研究, **30**(1): 22-28.
- 王其兵, 李凌浩, 刘先华, 等. 1998. 内蒙古锡林河流域草原土壤有机碳及氮素的空间异质性分析. 植物生态学报, **22**(5): 409-414.
- 张淑容, 贺学礼, 徐浩博, 等. 2013. 蒙古沙冬青根围 AM 和 DSE 真菌与土壤因子的相关性研究. 西北植物学报, **33**(9): 1891-1987.
- Bolliger A, Nallab A, Magida J, *et al.* 2008. Re-examining the glomalin purity of glomalin-related soil protein fractions through immunochemical, lectin-affinity and soil labelling experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, **40**: 887-893.
- Borie F, Rubio R, Rouanet JL, *et al.* 2006. Effects of tillage systems on soil characteristics, glomalin and mycorrhizal propagules in a Chilean Ultisol. *Soil and Tillage Research*, **88**: 253-261.
- Catherine E, Sara F, Deborah A, *et al.* 2004. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology*, **92**: 278-287.
- Halvorson JJ, Gonzalez JM. 2006. Bradford reactive soil protein in Appalachian soils: Distribution and response to incubation, extraction reagent and tannins. *Plant and Soil*, **286**: 339-356.
- Janos DP, Garamszegi S, Beltran B. 2008. Glomalin extraction and measurement. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 728-739.
- Purin S, Rillig MC. 2007. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress and a new hypothesis for its function. *Pedobiologia*, **51**: 123-130.
- Rillig MC, Caldwell BA, Wosten HAB, *et al.* 2007. Role of proteins in soil carbon and nitrogen storage: Controls on persistence. *Biogeochemistry*, **85**: 25-44.
- Rillig MC, Hernandez GY, Newton PCD. 2000. Arbuscular mycorrhizae respond to elevated atmospheric CO₂ after long-term exposure: Evidence from a CO₂ spring in New Zealand supports the resource balance model. *Ecology Letters*, **3**:

- 475–478.
- Rillig MC, Ramsey PW, Morris S, *et al.* 2003. Glomalin an arbuscula-mycorrhizal fungal soil protein, responds to land-use change. *Plant and Soil*, **253**: 293–299.
- Rillig MC, Wright SF, Eviner VT. 2002. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation; Comparing effects of five plant species. *Plant and Soil*, **238**: 325–333.
- Rillig MC, Wright SF, Nichols KA, *et al.* 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant and Soil*, **233**: 167–177.
- Rillig MC. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, **84**: 355–363.
- Rosier CL, Hoye AT, Rillig MC. 2006. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 2205–2211.
- Steinberg PD, Rillig MC. 2003. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin. *Soil Biology and Biochemistry*, **35**: 191–194.
- Wang HM, Wang WJ, Chen HF, *et al.* 2014. Temporal changes of soil physico-chemical properties at different soil depths during larch afforestation by multivariate analysis of covariance. *Ecology and Evolution*, **4**: 1039–1048.
- Wang WJ, Zu YG, Wang HM, *et al.* 2005. Plant biomass and productivity of *Larix gmelinii* forest ecosystems in Northeast China; Intra- and inter-species comparison. *Eurasian Journal of Forest Research*, **8**: 21–41.
- Wright SF, Green VS, Cavigelli MA. 2007. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. *Soil and Tillage Research*, **94**: 546–549.
- Wright SF, Upadhyaya A, Buyer JS. 1998b. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis. *Soil Biology and Biochemistry*, **30**: 1853–1857.
- Wright SF, Upadhyaya A. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Science*, **161**: 575–586.
- Wright SF, Upadhyaya A. 1998a. A survey of soils for aggregate stability and glomalin a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, **198**: 97–107.

作者简介 贺海升,男,1982年生,在读博士。主要从事土壤恢复生态学研究。E-mail: hehaisheng1002@163.com
责任编辑 张敏
