

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^①

曹 梦¹, 唐中华¹, 赵 龙¹, 张衷华^{1,2*}

(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 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘 要: 球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin-related soil protein, GRSP)在土壤团聚体形成中起重要作用, 与土壤团聚体稳定性正相关。土壤盐碱化破坏土壤结构, 降低土壤中 GRSP 含量, 但影响多大尺寸团聚体 GRSP 含量并不清楚。本文采集 45 个松嫩盐碱化草地土壤样品, 通过干筛法分离出直径 < 0.25、0.25 ~ 1 和 1 ~ 2 mm 3 种不同粒级团聚体, 采用 Bradford 法测定土壤中 GRSP 含量, 并测定土壤盐碱化指标, 经 Pearson 相关分析和前向选择变量多元线性回归分析, 结果显示: 土壤 pH 显著影响各粒级团聚体总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)含量和难提取球囊霉素相关土壤蛋白(DE-GRSP)含量, 二者存在显著负相关关系, 特别是 0.25 ~ 1 mm 粒级团聚体 DE-GRSP 含量与土壤 pH 存在极显著负相关关系, 可解释 22.3% 的 DE-GRSP 含量变化。土壤 pH、电导率、碱解氮和有效磷对各粒级团聚体易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)影响不显著。结果表明土壤苏打盐碱化影响 0.25 ~ 1 mm 团粒结构中较稳定的 DE-GRSP 含量, 可能对土壤团聚体胶联和土壤碳存储产生负影响。

关键词: 土壤团聚体; 球囊霉素相关土壤蛋白; 苏打盐碱化

中图分类号: S152.4+81 **文献标识码:** A

球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)被认为是存在于土壤中的一类糖蛋白, 定义来源于提取方法^[1-2], 对其详细结构知之甚少^[3-5], 但已被证明在土壤团聚体形成、团聚体稳定性和土壤碳存储中存在重要作用^[6-7]。土壤团聚体形成过程中, GRSP 参与将细小的土壤颗粒黏结成直径 < 0.25 mm 的微团聚体, 然后进一步黏结成 0.25 ~ 2 mm 的大团聚体, 最终形成稳定的土壤团粒结构^[8]。但是土壤苏打盐碱化破坏土壤团粒结构, 导致土壤粉化, 透气、透水性变差, 影响植物生长^[9-10], 已经有一些研究表明土壤苏打盐碱化显著降低 GRSP 储量和功能^[11-12], 但仍缺乏苏打盐碱化对不同粒级团聚体中 GRSP 含量影响的研究。

本文通过干筛法, 将苏打盐碱化土壤分成直径 < 0.25 mm(组分 I)、0.25 ~ 1 mm(组分 II)和 1 ~ 2 mm(组分 III)3 种不同粒级团聚体, 研究土壤盐碱化对不同粒级团聚体比例和 GRSP 含量的影响, 以期揭示土壤盐碱化对 GRSP 参与土壤团粒结构形成的影响。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与处理

本研究以松嫩平原盐碱化草地土壤为研究对象, 样品采集于 2016 年 8 月, 共设置 45 个样地(图 1)。每个样地设置 5 m × 5 m 的样方 1 个, 在样方对角线上均匀设置 3 个采样点, 同时避开盐碱裸地, 用土壤环刀采集 5 ~ 10 cm 土层土壤样品, 共 3 份, 均匀混合后作为该样地土壤样品, 装入土壤袋中, 在自然条件下风干 2 个月。将风干土样中的植物根和碎石等杂物挑出, 用干筛法将土样分成直径 < 0.25、0.25 ~ 1 和 1 ~ 2 mm 三种粒级团聚体, 分别对 3 种组分进行总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)测定。同时取研磨过 2 mm 筛土壤样品, 测定土壤理化性质和未分级 T-GRSP 和 EE-GRSP。

1.2 土壤理化性质测定

土壤 pH 和电导率按照水土比 5 : 1(ml/g)配制成

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2015FY110500)和中央高校基本科研业务费专项(2572015CA05)资助。

* 通讯作者(en_cn@nefu.edu.cn)

作者简介: 曹梦(1994—), 女, 山东莱西人, 硕士研究生, 主要从事植物次生代谢产物调控研究。E-mail: 847550860@qq.com

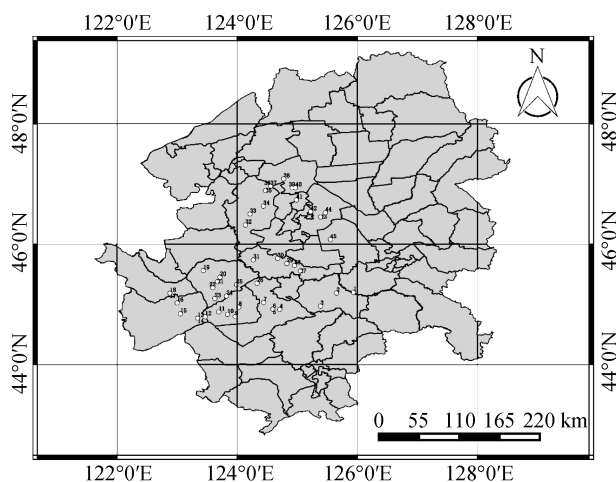


图 1 研究样点在松嫩盐碱化草地的分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in saline-alkali grassland in Songnen plain

双蒸水溶液,采用 pH 计(PB-10, Sartorius, 德国)和电导率仪(DDS-307, 雷磁, 中国)测定。土壤碱解氮用碱解扩散法测定,有效磷含量用碳酸氢钠-钼锑抗比色法测定^[13]。

1.3 球囊霉素相关土壤蛋白含量测定

根据 Wright 和 Upadhyaya^[14]的方法稍加修改,具体操作步骤如下:EE-GRSP 提取:精确称取 0.5 g 土壤,加入 10 ml 离心管(含有 4 ml、20 mmol/L、pH 7.0 的柠檬酸钠溶液)中,充分混匀,同一批土壤样品中加入一个空白样品(10 ml 离心管中只加 4 ml 柠檬酸钠溶液),在 121℃条件下的高压灭菌锅中灭菌 30 min,降压冷却后盖紧离心管并配平,放入离心机 4 000 r/min 离心 6 min,取棕红色上清液待测。

T-GRSP 提取:精确称取 0.1 g 土壤,加入 10 ml 离心管(含有 4 ml、50 mmol/L、pH 8.0 的柠檬酸钠溶液)中,充分混匀,同批次加入空白对照(10 ml 离心管中只加 4 ml 柠檬酸钠溶液),在 121℃条件下的高压灭菌锅中灭菌 60 min,冷却后放入离心机 4 000 r/min 离心 6 min,吸取上清液,收集在 50 ml 离心管中;继续向收集完上清液的离心管中加入 4 ml 同上的柠檬酸钠溶液,充分混匀,在 121℃条件下的高压灭菌锅中灭菌 30 min,冷却后放入离心机 4 000 r/min 离心 6 min,吸取上清液,继续收集在 50 ml 离心管中。至少重复上述步骤两次,直至上清液中不再呈现红棕色为止,最后将所有 50 ml 离心管中的上清液摇匀待测。

采用考马斯亮蓝显色法^[15]测定蛋白质含量,以 1 kg 土壤中蛋白质的质量(g)表示 GRSP 的含量,绘制标准曲线。分别吸取上述提取方法中得到的 T-GRSP 和 EE-GRSP 待测液 0.5 ml,以相同批次空白样品作为

对照,依次加入 5 ml 配好的考马斯亮蓝 G-250 染色剂,充分摇匀后显色 10 min 左右,将 721 紫外分光光度计波长调至 595 nm,依次在该波长下测定蛋白质吸光值。最后,根据标准曲线计算出溶液中蛋白质浓度、GRSP 的含量^[16]。

难提取球囊霉素相关土壤蛋白(DE-GRSP)的计算参考文献[17-18,12]的方法,具体为 $DE-GRSP = T-GRSP - EE-GRSP$ 。

1.4 数据处理

采用 SPSS 19.0 进行数据分析,首先运用双变量相关分析方法对不同组分 DE-GRSP、EE-GRSP、T-GRSP 含量与土壤理化性质进行 Pearson 相关分析,并进行 *t* 检验;然后运用前向选择变量多元线性回归模型对影响 GRSP 含量的主要土壤因子进行解析。

2 结果与分析

2.1 苏打盐碱土不同粒级团聚体中 GRSP 含量

对松嫩平原苏打盐碱土进行筛分,并测定不同粒级团聚体质量占比及其中 GRSP 含量(表 1),结果显示各组分团聚体质量占比存在极显著差异,直径 <0.25 mm 团聚体(组分 I)质量占比最大,平均为 54.59%,其次是 0.25 ~ 1 mm 团聚体(组分 II)质量占比为 27.93%,占比最低的为 1 ~ 2 mm 团聚体(组分 III),平均仅为 17.79%。各团聚体组分 T-GRSP、EE-GRSP 和 DE-GRSP 含量没有显著差异。松嫩草地不同盐碱程度土壤 T-GRSP、EE-GRSP 和 DE-GRSP 存在较大变异,变异系数分布在 35.04% ~ 81.25%,属于中等程度变异。组分 I 和组分 II 质量占比变异系数为 41.45% 和 45.18%,而组分 III 质量占比变异系数为 70.77%,明显高于组分 I 和组分 II,暗示土壤不同程度盐碱化对土壤中 1 ~ 2 mm 粒级团聚体影响较大。

2.2 土壤理化性质与不同粒级团聚体中 GRSP 含量的关系

不同粒级团聚体和未分级土壤 GRSP 含量与土壤电导率、pH、土壤碱解氮和土壤有效磷的相关性见表 2。除组分 II 质量占比与土壤电导率存在显著的正相关($P < 0.05$)外,其他组分质量占比与土壤电导率、pH、碱解氮和有效磷含量不存在显著线性相关关系;组分 I 和组分 II 的 T-GRSP、DE-GRSP 与土壤 pH 显著负相关($P < 0.05$),且组分 II 的 DE-GRSP 含量与土壤电导率和 pH 均呈极显著负相关($P < 0.01$);未分级土壤 pH 与 T-GRSP 和 DE-GRSP 呈显著负相关,土壤电导率与 EE-GRSP 呈显著正相关。

表 1 苏打盐碱土各粒级团聚体中 GRSP 含量
Table 1 GRSP contents in different aggregate proportions in sodic-saline soil

土壤分级	团聚体指标	极小值	极大值	均值	标准差	变异系数(%)
组分	质量占比(%)	8.64	89.27	54.59 a	22.63	41.45
	T-GRSP(g/kg)	0.65	2.43	1.37	0.48	35.04
	EE-GRSP(g/kg)	0.07	1.47	0.59	0.28	47.46
	DE-GRSP(g/kg)	0.03	1.84	0.76	0.42	55.26
组分	质量占比(%)	6.97	58.57	27.93 b	12.62	45.18
	T-GRSP(g/kg)	0.17	2.60	1.46	0.80	54.79
	EE-GRSP(g/kg)	0.08	1.93	0.64	0.52	81.25
	DE-GRSP(g/kg)	0.02	2.48	0.78	0.58	74.36
组分	质量占比(%)	0.00	56.39	17.79 c	12.59	70.77
	T-GRSP(g/kg)	0.22	2.76	1.27	0.57	44.88
	EE-GRSP(g/kg)	0.09	1.22	0.61	0.27	44.26
	DE-GRSP(g/kg)	0.01	2.16	0.68	0.48	70.59
未分级土壤	T-GRSP(g/kg)	0.19	2.91	1.31	0.63	48.09
	EE-GRSP(g/kg)	0.08	1.08	0.62	0.31	50.00
	DE-GRSP(g/kg)	0.01	2.53	0.69	0.55	79.71

注：表中均值后不同小写字母表示各组间差异在 $P < 0.01$ 水平显著。

表 2 土壤理化性质与各组分团聚体中 GRSP 含量的 Pearson 相关分析
Table 2 Pearson correlation analysis between soil physico-chemical properties and GRSP contents in different aggregate proportions

土壤分级	团聚体指标	相关性参数	土壤理化性质			
			电导率	pH	碱解氮	有效磷
组分	质量占比	R	-0.241	-0.112	-0.077	0.103
		P	0.111	0.462	0.615	0.501
	T-GRSP	R	-0.157	-0.350*	0.106	-0.160
		P	0.302	0.018	0.488	0.295
	EE-GRSP	R	0.215	-0.064	0.284	-0.195
		P	0.157	0.678	0.059	0.200
	DE-GRSP	R	-0.232	-0.361*	0.040	-0.120
		P	0.125	0.015	0.792	0.433
组分 II	质量占比	R	0.302*	-0.101	0.066	-0.173
		P	0.044	0.507	0.666	0.257
	T-GRSP	R	-0.244	-0.344*	0.144	-0.122
		P	0.135	0.032	0.381	0.461
	EE-GRSP	R	0.127	0.088	0.045	0.001
		P	0.440	0.596	0.784	0.994
	DE-GRSP	R	-0.375*	-0.472**	0.148	-0.149
		P	0.019	0.002	0.370	0.366
组分 III	质量占比	R	0.106	0.221	0.039	0.034
		P	0.498	0.154	0.805	0.828
	T-GRSP	R	0.164	-0.003	0.065	0.219
		P	0.339	0.985	0.708	0.199
	EE-GRSP	R	-0.192	0.185	-0.015	0.102
		P	0.262	0.281	0.930	0.555
	DE-GRSP	R	0.279	-0.093	0.075	0.190
		P	0.099	0.590	0.665	0.268
未分级土壤	T-GRSP	R	-0.168	-0.301*	0.230	0.096
		P	0.271	0.045	0.128	0.530
	EE-GRSP	R	0.319*	-0.007	-0.080	0.027
		P	0.032	0.961	0.603	0.862
	DE-GRSP	R	-0.290	-0.315*	0.275	-0.113
		P	0.054	0.035	0.068	0.459

注：*表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关，**表示在 $P < 0.01$ 水平极显著相关。

2.3 影响不同粒级团聚体中 GRSP 变化的主要土壤因子解析

利用前向选择变量多元线性回归模型对土壤电导率、pH、碱解氮和有效磷对不同粒级团聚体中 GRSP 含量的影响进行分析,回归方程满足 F 检验($P < 0.05$)和回归系数通过 t 检验($P < 0.05$)的方程结果如表 3 所示。根据上述变量选择结果,土壤 pH 是影响 GRSP 变化的最主

要因素,其中土壤 pH 可分别解释组分 I 中 T-GRSP 和 DE-GRSP 含量变化的 12.3% 和 13.1%;可分别解释组分 II 中 T-GRSP 和 DE-GRSP 含量变化的 11.8% 和 22.3%;可分别解释组分 III 中 T-GRSP 和 DE-GRSP 含量变化的 9.0% 和 9.9%。此外土壤 pH 还能解释组分 III 的 EE-GRSP 含量变化的 10.2%。土壤电导率和 pH 可共同解释组分 II 质量占比 17.4% 的变化。

表 3 前向选择变量多元线性回归模型展示土壤理化性质对各组分 GRSP 含量影响水平

Table 3 Multivariate linear regression model of forward selection variables showed effects of soil physico-chemical properties on GRSP contents in different aggregate proportions

模型参数	组分 I						组分 II					
	T-GRSP(g/kg)			DE-GRSP(g/kg)			T-GRSP(g/kg)			DE-GRSP(g/kg)		
	$(F_{1,45} = 6.008,$ $P = 0.018, R^2 = 0.123)$			$(F_{1,45} = 6.462,$ $P = 0.015, R^2 = 0.131)$			$(F_{1,45} = 4.974,$ $P = 0.032, R^2 = 0.118)$			$(F_{1,45} = 10.628,$ $P = 0.002, R^2 = 0.223)$		
	系数	t	P	系数	t	P	系数	t	P	系数	t	P
截距	5.733	5.098	0.000	4.855	4.671	0.000	2.620	3.095	0.004	2.589	3.931	0.000
pH	-0.300	-2.451	0.018	-0.288	-2.542	0.015	-0.207	-2.230	0.032	-0.235	-3.260	0.002
模型参数	组分 II			组分 III								
	质量占比(%)			T-GRSP(g/kg)			DE-GRSP(g/kg)			EE-GRSP(g/kg)		
	$(F_{2,45} = 4.436,$ $P = 0.018, R^2 = 0.174)$			$(F_{1,45} = 4.272,$ $P = 0.045, R^2 = 0.090)$			$(F_{1,45} = 4.730,$ $P = 0.035, R^2 = 0.099)$			$(F_{1,45} = 4.888,$ $P = 0.032, R^2 = 0.102)$		
	系数	t	P	系数	t	P	系数	t	P	系数	t	P
截距	90.514	2.877	0.006	6.668	9.091	0.000	6.416	9.345	0.000	0.211	11.601	0.000
pH	-7.184	-2.061	0.046	-0.165	-2.067	0.045	-0.163	-2.175	0.035	7.68×10^{-5}	-2.211	0.032
EC	0.013	2.889	0.006	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注:前向选择变量多元线性回归模型分析中共进入土壤 pH、电导率、碱解氮和有效磷 4 个参数项,“-”表示通过前向选择变量多元线性回归模型去掉的参数项,碱解氮和有效磷也被模型自动去掉,表中未展示。

3 讨论

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,影响土壤有机质水平、土壤生物活性以及土壤功能(如水分入渗、持水量、通气性与养分有效性)等^[19-20]。土壤团聚体的形成非常复杂,涉及土壤物理、化学和生物过程^[21]。Bearden 和 Petersen^[22]认为真菌菌丝、植物细根以及二者分泌物是土壤团聚体形成的重要机制。微生物和植物代谢产物,如多糖、脂质和蛋白等对土壤团聚体形成主要起胶结物质的作用。Chatterjee 和 Jain^[23]在研究胶结物质对团粒构成影响时发现微生物黏胶是大团聚体(粒径 0.2 ~ 2.0 mm)构成的最重要因素,微生物分泌的多糖可使 >250 μm 的土壤团聚体更加稳定。Wright 和 Anderson^[24]揭露真菌分泌的多糖即为 GRSP,是一种糖蛋白。一般认为 GRSP 参与 250 ~ 2 mm 土壤大团聚体的形成。土壤盐碱化显著影响土壤团聚体的结构,以前研究已经表明钠离子在土壤中能起到分散剂的作用^[25-26],土壤团聚体稳定性与土壤钠离子

浓度显著负相关^[27-28];也有研究表明在粒径 <2 mm 的中性盐土中,土壤电导率和 GRSP 浓度显著负相关^[27],但关于苏打盐化对各粒级团聚体胶结物质的影响却少见报道^[21]。

GRSP 在土壤团聚体形成、碳存储和植物胁迫忍耐等方面都存在重要作用^[29-30],也被认为是团聚体稳定物质之一^[21],但很多研究发现环境因子变化,例如气候变化、植被类型、土壤理化性质、土地管理等,显著影响土壤中 GRSP 含量和组成^[31-33]。土壤盐碱化也显著影响 GRSP 浓度^[34,11-12],这可能是盐碱化土壤结构较差的原因之一^[35]。已有研究表明土壤 pH(4.5 ~ 8.5 和 6.9 ~ 10.1)与土壤 GRSP 含量存在显著的负相关关系^[36,12],土壤电导率和容重也被发现显著影响 GRSP 含量^[37,34]。进一步研究表明土壤盐碱化主要影响土壤中 DE-GRSP 的含量^[12],本研究表明土壤 pH 对各级土壤组分 T-GRSP 和 DE-GRSP 存在显著影响,其中 DE-GRSP 与土壤 pH 相关性更显著,DE-GRSP 是土壤 GRSP 中最稳定的组成成分,在土

壤 GRSP 功能实现中作用明显^[12,17-18]。Kemper 和 Rosenau^[38]认为 1 ~ 2 mm 粒级的土壤团聚体最容易受短期干扰的影响,这表明土壤团聚体粒级越大可能越易被破坏,本文研究结果虽然也发现 1 ~ 2 mm 粒级团聚体 GRSP 含量与土壤盐碱化存在一定负相关关系,但 0.25 ~ 1 mm 粒级土壤团聚体 DE-GRSP 含量与土壤 pH 存在极显著负相关关系,可解释土壤中 DE-GRSP 含量变化的 22.3%,这暗示在苏打盐碱土中 0.25 ~ 1 mm 粒级团粒结构可能更易被盐破坏,主要原因可能是苏打盐碱化土壤中 1 ~ 2 mm 粒级土壤团粒占比较低(17.79%)。John 等^[39]和毛霞丽等^[40]研究也揭示,只有在未干扰或低度干扰的草地和森林生态系统 >1 mm 的团粒结构才较丰富。本研究并没有发现 EE-GRSP 与土壤盐碱化之间存在显著负相关关系,这也进一步证实土壤盐碱化主要破坏土壤中较稳定的 DE-GRSP 含量,可能对于土壤结构和土壤长期碳存储不利。

4 结论

松嫩平原盐碱化草地土壤 pH 显著影响各粒级团聚体 T-GRSP 含量和 DE-GRSP 含量,特别是土壤苏打盐碱化影响 0.25 ~ 1 mm 团粒结构中较稳定的 DE-GRSP 含量,表明土壤盐碱化破坏土壤团粒结构,导致土壤紧实,透气透水性差,影响微生物和植物的生长。

参考文献:

- [1] Wright S F, Frankesnyder M, Morton J B, et al. Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots[J]. *Plant and Soil*, 1996, 181(2): 193-203
- [2] Rosier C L, Hoyer A T, Rillig M C. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 2205-2211
- [3] Schindler F V, Mercer E J, Rice J A. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 320-329
- [4] 黄艺, 王东伟, 蔡佳亮, 等. 球囊霉素相关土壤蛋白根际环境功能研究进展[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(2): 232-236
- [5] Singh P K, Singh M, Tripathi B N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein[J]. *Protoplasma*, 2013, 250: 663-669
- [6] Bedini S, Pellegrino E, Avio L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1491-1496
- [7] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 101-1088
- [8] 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 and Soil*, 2002, 238: 325-333
- [9] Chi C M, Zhao C W, Sun X J, et al. Estimating exchangeable sodium percentage from sodium adsorption ratio of salt-affected soil in the Songnen plain of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21: 271-276
- [10] 张衷华, 王化, 唐中华, 等. 松嫩草地不同降水区土壤盐碱化程度与羊草生产关系的比较研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(3): 590-597
- [11] Wang Q, Wu Y, Wang W, et al. Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in poplar plantations in Northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties[J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 2014(1): 160403
- [12] Zhang Z H, Wang Q, Wang H, et al. Effects of soil salinity on the content, composition, and ion binding capacity of glomalin-related soil protein (GRSP)[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 581/582: 657-665
- [13] 魏晨辉, 沈光, 裴忠雪, 等. 不同植物种植对松嫩平原盐碱地土壤理化性质与细根生长的影响[J]. *植物研究*, 2015(5): 759-764
- [14] 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 and Soil*, 1998, 198(1): 97-107
- [15] 王孝平, 邢树礼. 考马斯亮蓝法测定蛋白含量的研究[J]. *天津化工*, 2009(3): 40-42
- [16] 王琼. 东北地区球囊霉素相关土壤蛋白含量和组成空间差异及其维持土壤功能的初步研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015
- [17] 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]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5823
- [18] Wu Q S, Li Y, Zou Y N, et al. Arbuscular mycorrhiza mediates glomalin-related soil protein production and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate and soil enzyme activities in the rhizosphere of trifoliate orange grown under different P levels[J]. *Mycorrhiza*, 2015, 25: 121-130
- [19] 奚森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412-418
- [20] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2014, 51(1): 35-40

- [21] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1625–1632
- [22] Bearden B N, Petersen L. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on soil structure and aggregate stability of vertisols[J]. Plant and Soil, 2000, 218: 173–183
- [23] Chatterjee R K, Jain J K. Studies on aggregate formation with reference of cementing substances[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1970, 16: 231–233
- [24] Wright S F, Anderson R L. Aggregate stability and glomalin in alternative crop rotations for the central great plains[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000, 31: 249–253
- [25] Bronick C J, Lai R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124: 3–22
- [26] 张晓光, 黄标, 梁正伟, 等. 松嫩平原西部土壤盐碱化特征研究[J]. 土壤, 2013, 45(2): 332–338
- [27] Kohler J, Caravaca F, Roldán A. An AM fungus and a PGPR intensify the adverse effects of salinity on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa*[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42: 429–434
- [28] 王合云, 李红丽, 董智, 等. 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 706–712
- [29] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin and soil quality[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2004, 84: 355–363
- [30] Hammer E C, Rillig M C. The influence of different stresses on glomalin levels in an arbuscular mycorrhizal fungus-salinity increases glomalin content[J]. PLoS One, 2011, 6(12): e28426
- [31] Violi H A, Treseder K K, Menge J A, et al. Density dependence and interspecific interactions between arbuscular mycorrhizal fungi mediated plant growth, glomalin production, and sporulation[J]. Canadian Journal of Botany, 2007, 85: 63–75
- [32] Wang P, Liu J H, Xia R X, et al. Arbuscular mycorrhizal development, glomalin-related soil protein (GRSP) content, and rhizospheric phosphatase activity in citrus orchards under different types of soil management[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174: 65–72
- [33] Wu Q S, He X H, Cao M Q, et al. Relationships between glomalin-related soil protein in water-stable aggregate fractions and aggregate stability in citrus rhizosphere[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2013, 15: 603–606
- [34] Krishnamoorthy R, Kim K, Kim C, et al. Changes of arbuscular mycorrhizal traits and community structure with respect to soil salinity in a coastal reclamation land[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 72: 1–10
- [35] López-Merino L, Serrano O, Adame M F, et al. Glomalin accumulated in seagrass sediments reveals past alterations in soil quality due to land-use change[J]. Global and Planetary Change, 2015, 133: 87–95
- [36] Wang Q, Wang W J, He X Y, et al. Role and variation of the amount and composition of glomalin in soil properties in farmland and adjacent plantations with reference to a primary forest in northeastern China[J]. PLoS One, 2015, 10(10): e0139623
- [37] Vasconcellos R F L, Bonfim J A, Baretta D, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil[J]. Land Degradation & development, 2016, 27 (2): 325–334
- [38] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[M]// Klute A. Methods of soil analysis (Part I). Madison: American Society of Agronomy, 1986: 425–442
- [39] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soil under different types of land use[J]. Geoderma, 2005, 128: 63–79
- [40] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828–838

Soil pH Effect on Glomalin-related Soil Protein in Aggregates in Sodic-saline Soil

CAO Meng¹, TANG Zhonghua¹, ZHAO Long¹, ZHANG Zhonghua^{1,2*}

(1 Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;

2 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: Glomalin-related soil protein (GRSP) is regarded as an important binding agent in soil aggregation, and a positive relationship between GRSP concentration and aggregate stability has been demonstrated. Soil salinization and alkalization destroys soil structure, induces decreasing of GRSP concentration, but it was still unclear in decreasing GRSP in which size of aggregates. In this paper, 45 soda-saline soil samples were collected from Songnen grassland and dry-sieved into the following size classes: <0.25 mm, 0.25–1 mm and 1–2 mm. Bradford reagent was used to determine GRSP contents of each aggregate size fractions, at the same time, soil physico-chemical properties about salt were also determined. Pearson correlation and multiple linear regressions with forward selection were performed in order to test the significance of influence. The results showed that significant negative relationships were existed between soil pH and total-GRSP (T-GRSP), and difficultly-extractable GRSP (DE-GRSP). Especially, highly significant negative correlation was found between soil pH and DE-GRSP from 0.25–1 mm size, which could be explained 22.3% variation of DE-GRSP. No relationship was found between soil pH value, electrical conductivity, available nitrogen, available phosphorus and easily-extractable GRSP (EE-GRSP) contents. The results showed that sodic salt induced decreased in DE-GRSP of 0.25–1 mm aggregates, it is possible to have a negative impact on aggregate binding and soil carbon storage.

Key words: Soil aggregates; Glomalin-related soil protein; Soda salinization