

氮添加对白羊草土壤球囊霉素含量特征的影响

吴 阳¹, 李 强², 徐红伟³, 乔磊磊⁴, 李袁泽⁵, 薛 蕙^{1,3}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:球囊霉素或球囊霉素类相关蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP)是丛枝菌根真菌(AMF)分泌的一种疏水性蛋白。为研究氮沉降对土壤 GRSP 的影响,选取了黄土高原典型地带性植物白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为研究对象,采用小车模拟小区试验,通过氮添加来模拟氮沉降,共设置 3 个氮添加浓度 N_1 (2.5 g/m²)、 N_2 (5 g/m²) 和 N_3 (10 g/m²),以裸地(LD)和不添加氮处理 CK(0 g/m²)为对照。结果表明:不同浓度氮添加后,土壤中总球囊霉素(Total glomalin, T-GRSP)含量呈现先增加后降低的趋势,但变化未达到显著水平,而易提取球囊霉素(Easily extractable glomalin, EE-GRSP)的含量变化在 N_3 时显著降低($P < 0.05$)。冗余分析表明 SOC、C/N、地下地上生物量是影响土壤 GRSP 的主要因素。研究从土壤 GRSP 角度分析了氮添加对土壤活性物质的影响,有利于揭示未来全球氮沉降背景下土壤质量的变化,加深对土壤生态变化过程的认识。

关键词:球囊霉素类相关蛋白; 氮添加; 白羊草

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0061-05

Effects of Nitrogen Addition on Characteristic of Glomalin in the Soil of *Bothriochloa ischaemum*

WU Yang¹, LI Qiang², XU Hongwei³, QIAO Leilei⁴, LI Yuanze⁵, XUE Sha^{1,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin University, Yulin, Shaanxi 719000, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Glomalin or glomalin-related soil protein is the hydrophobic protein secreted by AMF. In order to study the effects of nitrogen deposition on soil GRSP of typical *Bothriochloa ischaemum* community in the Loess Plateau, simulated nitrogen deposition was conducted with the method of nitrogen addition into plots. The four nitrogen addition gradients were CK (0 g/m²), N_1 (2.5 g/m²), N_2 (5 g/m²) and N_3 (10 g/m²), and the bare land (LD) was also selected as the control. The results showed that the content of total glomalin in soil increased firstly and then decreased, but the change did not reach to the significant level, and the contents of easily extractable glomalin decreased significantly in N_3 ($P < 0.05$). Redundancy analysis showed that SOC, C/N, the below-ground biomass and the under-ground biomass were the main factors affecting soil GRSP. In this study, the effect of nitrogen addition on soil active substance was analyzed from the perspective of soil GRSP, which is helpful to reveal the change of soil quality under the background of global nitrogen deposition in the future and deepen the understanding of soil ecological change process.

收稿日期:2017-12-10

修回日期:2018-01-04

资助项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0501707);国家科技支撑计划(2015BAC01B03);中科院西部青年学者项目(XAB2015A05);国家自然科学基金(41661101)

第一作者:吴阳(1992—),男,陕西西安人,硕士,研究方向:土壤微生物生态。E-mail:wuyang0521@nwfau.edu.cn

通信作者:薛蕙(1978—),男,陕西西安人,博士,研究员,博士生导师,研究方向:恢复生态学。E-mail:xuesha100@163.com

Keywords: glomalin-related soil protein; nitrogen addition; *Bothriochloa ischaemum*

从上个世纪中叶开始,由于矿物燃料燃烧,含氮化肥生产和使用及畜牧业等人类的活动^[1],大大的增加了进入陆地和水生系统的活性 N 的数量^[2-3]。过量的 N 输入会改变土壤有机质的分解,影响土壤团聚体结构和土壤体积密度,从而改变土壤理化性质和自然结构^[4-6]。氮是植物生长的限制性因子,氮的过多输入势必会影响植物的生长,与此同时,也会影响与其共生的 AM 真菌的生长^[7-14]。

丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhiza Fungi, AMF)是土壤中重要的微生物群落之一^[15]。普遍存在于陆地生态系统中,研究表明 80% 以上的陆生维管束植物具有丛枝菌根^[16]。AMF 作为桥梁,连接土壤和植物的根,在植物营养中扮演着重要的角色^[17]。AMF 可以通过增加宿主植物对矿物质元素的吸收和循环,从而促进植物的生长^[18-19]。还可以提高植物耐受胁迫的能力,提高植物对于干旱和病原体的抗性^[20-21],以及提供营养种间转移的途径,改善土壤水分,土壤结构等^[16]。球囊霉素或者球囊霉素相关蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP),是 AMF 真菌分泌的一种疏水性蛋白,目前根据 Wright^[22]提取法可将其分为总球囊霉素(Total glomalin, T-GRSP)和易提取球囊霉素(Easily extractable glomalin, EE-GRSP)。球囊霉素作为土壤有机碳,氮的重要来源^[23],被称为“超级胶水”的它,可以极大地提高、改善土壤颗粒的稳定性^[24],改善土壤有机结构和土壤特性^[25],提高土壤有机碳的固定能力^[26]。土壤 GRSP 质量的变化还可以作为改善流域管理和保护水生生态系统的指标^[27]。所以,土壤 GRSP 对于土地质量的改善,评价以及指示土壤碳库的变化具有重要的意义。

关于 GRSP 分别在农田、针叶林、沙漠、温带森林、温带草地以及热带雨林都有研究^[28]。另外,不同的土地利用方式^[29-31]以及施肥方式^[32-33]对土壤 GRSP 的也具有显著的影响。N 沉降作为目前非常普遍的一种环境变化^[4-6, 34-35],然而目前针对氮沉降对土壤 GRSP 含量的影响研究相对较少,且还没有一致的结论。因此,本研究以黄土高原典型地带性植物白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)为研究对象,采用小车控制试验,通过氮添加模拟氮沉降对 GRSP 的影响,旨在揭示未来全球变化背景下,土壤生态过程的响应机制,为区域生态建设提供科学依据和数据支持。

1 材料和方法

1.1 试验地点介绍

小车模拟小区试验设在陕西省杨凌区(108°4′27.95″E,

34°16′56.24″N)西北农林科技大学水土保持研究所内。日平均气温 13.2℃,平均降水量 674.3 mm,日照 1 993.7 h,无霜期 225 d,属温带大陆性季风气候。

1.2 试验设计和样品采集

试验采用自制移动变坡式土槽,尺寸规格为:长×宽×高=2.0 m×1.0 m×0.5 m,试验用白羊草种子采自陕西省安塞县(109°14′E, 36°92′N),供试土壤采自陕西省安塞县表层黄绵土(0—20 cm),土壤容重控制在 1.2 g/m³ 左右,分四层装土,每层 10 cm,填土总高度 40 cm,试验坡度为 15°。按照密度 10 cm×10 cm,深度 0.5 cm 种植白羊草,模拟白羊草纯群落。试验期间,除拔掉杂草外,不做任何人工处理。根据全球 N 沉降水平和发展趋势,试验设 4 个水平,5 个处理,每个处理 3 个重复,裸地(LD)既无植被也不进行氮添加处理,对照 CK(0 g/m²)、N₁(2.5 g/m²)、N₂(5 g/m²)和 N₃(10 g/m²)有植被且按照试验设计浓度进行氮添加处理,4 个水平氮添加参考目前全球 N 沉降浓度设计^[36],氮肥为尿素(CO(NH₂)₂)。

本试验设计为两年、2013 年份氮添加在 2013 年 8 月份一次性施入,2014 年份氮添加在白羊草生长季(5 月—8 月)进行,每月添加一次,添加量为全年施氮水平的四分之一。施氮方法为:将尿素充分溶解在 1 L 水中,于雨前均匀喷撒到试验小车内,裸地(LD)及对照组(CK)只喷洒相同体积的水。将小车置于室外培育,不做任何处理。取样于 2014 年 9 月底进行,方法为:在小车内随机选取 6 个 10 cm×10 cm×10 cm 的样方,剔除根系,土壤混匀后过 1 mm 筛并风干备用,用于土壤基本指标和 GRSP 含量的测定。

土壤基本理化性质采用常规方法^[37]测定:土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)用重铬酸钾氧化—外加热法;土壤全氮(Total N)采用凯氏定氮法;土壤全磷(Total P)采用硫酸—高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;土壤硝态氮用水浸提,采用紫外分光光度法测定;土壤铵态氮用水浸提,采用连续流动分析仪测定;pH 值用 pH 计测定(水:土=2.5:1);土壤速效磷(Available P)采用碳酸氢钠提取钼锑抗比色法测定。

GRSP 含量的测定分为两个部分:浸提是按照 Wright 和 Upadhyaya^[24]提出的方法。(1)易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)浸提:称取供试土样 1.00 g,加入 8 ml 20 mmol/L, pH 值为 7.0 的柠檬酸钠溶液,121℃条件下浸提 30 min,立即将浸提液以 10 000 rpm 离心 5 min,然后将上清液倒入 10 ml 离心管中,保存于 4℃冰箱中

备用。(2) 总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)浸提:称取供试土样 1.00 g,加入 8 ml 50 mmol/L,pH 值为 8.0 的柠檬酸钠溶液,121℃ 条件下浸提 60 min,随即将浸提液以 10 000 rpm 离心 5 min 后,将上清液倒入 50 ml 离心管中,补充等体积的浸提液,继续浸提,浸提 6 次。合并所有浸提液,保存于 4℃ 下待测。浓度测定采用考马斯亮蓝测定蛋白质的方法:取浸提液 1 ml 于 10 ml 离心管,加入 5 ml 考马斯亮蓝,显色 2 min 后于 595 nm 下比色。

1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 进行整理分析,用 SPSS 20.0 进行统计分析,采用 Canoco 5.0 进行冗余分析(RDA)。

表 1 土壤基本理化性质

处理	土壤有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	铵态氮/ (mg · kg ⁻¹)	硝态氮/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	pH 值
LD	1.58±0.16a	0.22±0.00a	9.59±0.54b	3.07±0.57a	0.42±0.00a	4.09±0.14c	8.68±0.04a
CK	1.75±0.06ab	0.23±0.02ab	5.18±0.31a	2.67±0.51a	0.44±0.18ab	3.01±0.15b	8.69±0.11a
N ₁	1.80±0.05b	0.24±0.01abc	7.91±2.50b	3.10±0.53a	0.45±0.01bc	2.07±0.28a	8.59±0.01a
N ₂	1.75±0.12ab	0.26±0.01bc	7.22±1.27ab	3.17±1.00a	0.46±0.06bc	2.08±0.17a	8.56±0.07a
N ₃	1.61±0.06ab	0.28±0.04c	9.09±1.08b	3.10±0.17a	0.46±0.01c	2.12±0.21a	8.54±0.09a

注:不同小写字母表示不同处理之下同一指标有显著差异($p<0.05$)。

2.2 N 添加对土壤 GRSP 含量的影响

CK 和 LD 相比,T-GRSP,EE-GRSP 含量均降低,但均未达到显著水平。随着氮添加浓度增加,土壤中 T-GRSP 含量总体上呈现先增加后减少趋势,在 N₁ 时浓度最高,但差异不显著($p<0.05$)(图 1 所示)。其中 EE-GRSP 含量与 CK 相比,在 N₃ 时降低达到显著性水平,其余处理均无显著性差异($p<0.05$)。

N 沉降作为 21 世纪新近出现的环境问题,所引起的一系列的生态环境变化,已经日益引起人们的关注^[38]。但是,N 沉降对土壤 GRSP 含量的影响在国内外研究较少^[35]。Treseder 等在对 27 个生态系统的球囊霉素含量的文献调查显示:N,P 的添加对土壤中球囊霉素含量的变化没有影响^[28]。Wuest 等通过对种植冬小麦的土壤进行不同浓度的 N(0,45,90 kg/hm²)添加,也得出了相同的结论,即 N 添加对土壤 GRSP 含量的变化并无显著的差异^[34]。以上研究均和本试验结果类似,N 添加对土壤 GRSP 的含量变化并无显著性影响。GRSP 是 AM 真菌分泌的一种含铁的特殊蛋白质^[22]。张骄阳等研究了在相同处理下土壤微生物群落结构的变化规律,结果显示真菌 PLFA 含量变化先增加后降低,且在 N₁ 时达到最大^[39],吕凤莲在对油松根际土微生物群落研究中,设置了 0,2.8,5.6,11.2,22.4 g N/(m² · a)共 5 种 N

2 结果与分析

2.1 氮添加对土壤基本理化性质的影响

在 CK 和 LD 相比,土壤有机碳、全氮以及全磷含量均有所升高,但无显著性差异。硝态氮、铵态氮和速效磷含量降低,但硝态氮未达到显著水平。和 CK 相比,不同浓度氮添加后土壤全氮、铵态氮、硝态氮和全磷含量均呈增加趋势,其中铵态氮有显著差异,硝态氮无显著差异,全氮和全磷在 N₃ 达到显著水平。土壤有机碳先升高后降低,但均未达到显著水平。速效磷和 pH 值随着 N 浓度升高逐渐降低,其中速效磷在 N₁ 达到显著水平,pH 值则未有显著差异(表 1)。

添加浓度后得出:AMF 的丰度随着 N 添加浓度先升高然后在降低^[14],走向均和本试验 GRSP 类似。所以出现 GPRS 的含量没有显著变化可能的原因是:最初的 N 添加,并没有改变 AM 真菌的丰度^[35]。然而在本研究中,EE-GRSP 在 N₃ 时显著性降低,所以当 N 添加达到一定浓度后,会抑制 AMF 的生长,从而降低土壤 GRSP 的浓度。但是 GRSP 和 AMF 之间的作用机制,还有待进一步研究^[32]。

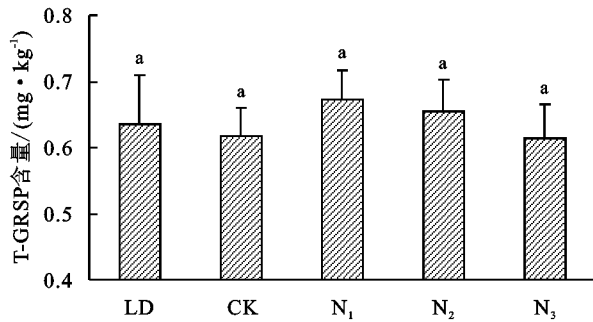
2.3 土壤 GRSP 含量的冗余分析

对土壤 T-GRSP,EE-GRSP 和土壤全氮、全磷、有机碳、速效磷、硝态氮、铵态氮、pH 值,C/N 以及地上和地下生物量 10 个环境因子进行冗余分析(RDA),由于考虑到生物量因素,我们此处并未对 LD 进行分析,表明:RDA1 和 RDA2 分别解释了 97.00%和 2.64%的变化,10 种环境因子共同解释了 99.64%的 GRSP 含量变化。SOC,C/N 与 EE-GRSP 呈显著正相关,是影响其的主要因素,地上、地下生物量、SOC,C/N 和铵态氮与 T-GRSP 呈显著正相关,全磷与 T-GRSP 和 EE-GRSP 皆呈显著负相关(图 2)。

以上结果表明土壤 C/N,SOC 对土壤 GRSP 含量影响显著,这和人前研究结果基本吻合。1998 年,Wright 和 Upadhyaya 发现了 37 种不同土壤的 GRSP 和 SOC 含量变化呈现显著相关性^[40]。Riling^[41]、Jing

Zhang^[26,35]和杜介方^[32]等也发现了二者呈现显著的相关性,其结果都和本试验相似。Riling 等发现在 AMF 的菌丝生长时, SOC 是影响 GRSP 生成的主要因素^[42]。Jing Zhang 等在对中国南部的人工林,次生林和原始森林土壤中 GRSP 和 SOC 的 ^{13}C 进行 NMR 分析结果得出: GRSP 中烷基 C 和芳香族 C 的总和与 O-烷基 C 和羧基 C 的总和之比的值明显

高于 SOC 中的值,说明: GRSP 含有丰富的烷基 C 和芳香族 C, 这些特殊的结构可以调节 SOC 的固定^[26]。GRSP 的平均寿命大概为 $6\sim 42\text{ a}$ ^[42], 其作为土壤 C 库的重要组成部分, 在一定程度上可以反映土壤 C 库的变化情况^[42]。所以研究土壤 GRSP 和 SOC 之间的含量变化对土壤质量以及管理具有重要的意义。



注:不同小写字母表示不同处理之下同一指标有显著差异($P<0.05$)。

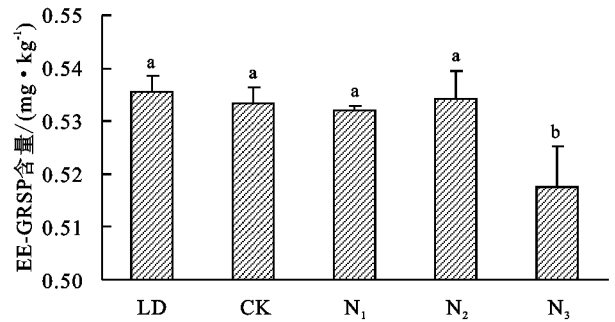


图 1 不同的 N 添加对土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量的影响

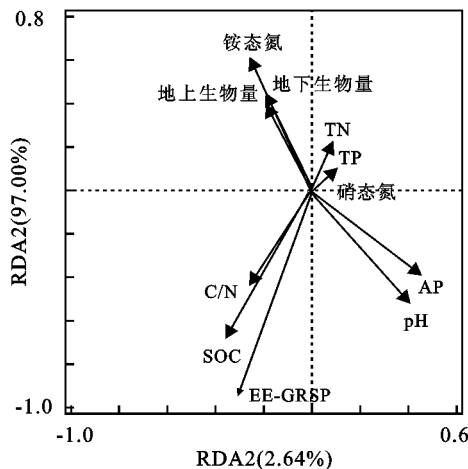


图 2 GRSP 含量和环境因子的冗余分析

3 结论

在经过不同浓度 N_1 (2.5 g/m^2)、 N_2 (5 g/m^2) 和 N_3 (10 g/m^2) 添加后,以裸地(LD)和不进行氮添加处理 CK (0 g/m^2) 为对照,土壤中 T-GRSP 含量呈现先增加后降低的趋势,但变化未达到显著水平,而土壤 EE-GRSP 的含量变化在 N_3 时显著降低($p<0.05$)。冗余分析表明: SOC、C/N 是影响土壤 GRSP 的主要因素。由于本实验室为人工控制下进行的培养试验,且试验周期较短,因此很难从机理上揭示氮添加对 GRSP 的作用机制,因此在下一阶段需要加强此方面的工作,特别是氮添加后 AMF 和 GRSP 之间的作用关系研究。

参考文献:

[1] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen

budgets[J]. Biogeochemistry, 1999,46(1/3):7-43.

- [2] Jefferies R L, Maron J L. The embarrassment of rich-atmospheric deposition of nitrogen and community and ecosystem processes [J]. Trends in Ecology & Evolution, 1997,12(2):74-78.
- [3] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world:200 years of change[C]. International Nitrogen Conference, 2002:64-71.
- [4] Phoenix G K, Emmett B A, Britton A J, et al. Impacts of atmospheric nitrogen deposition: responses of multiple plant and soil parameters across contrasting ecosystems in long-term field experiments [J]. Global Change Biology, 2012,18(4):1197-1215.
- [5] Stark S, Hilli S, Willför S, et al. Composition of lipophilic compounds and carbohydrates in the accumulated plant litter and soil organic matter in boreal forests[J]. European Journal of Soil Science, 2012,63(1):65-74.
- [6] Zhong Y, Yan W, Shanguan Z. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015,91:151-159.
- [7] Egertonwarburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient. [J]. Ecological Applications, 2000,10(2):484-496.
- [8] Hodge A, Campbell C D, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material[J]. Nature, 2001,413(6853):297-299.
- [9] Treseder K K. A meta-analysis of mycorrhizal r-esponses to

- nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO₂ in field studies [J]. *New Phytologist*, 2004,164(2):347-355.
- [10] Bradley K, Drijber R A, Knops J. Increased N availability in grassland soils modifies their microbial communities and decreases the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006,38(7):1583-1595.
- [11] Van Diepen L T A, Lilleskov E A, Pregitzer K S, et al. Decline of arbuscular mycorrhizal fungi in northern hardwood forests exposed to chronic nitrogen additions [J]. *New Phytologist*, 2007,176(1):175-183.
- [12] Van Diepen L T A, Lilleskov E A, Pregitzer K S. Simulated nitrogen deposition affects community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in northern hardwood forests [J]. *Molecular Ecology*, 2011,20(4):799-811.
- [13] Zheng Y, Kim Y C, Tian X F, et al. Differential responses of arbuscular mycorrhizal fungi to nitrogen addition in a near pristine Tibetan alpine meadow. [J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2015,89(3):594-605.
- [14] Lv F, Xue S, Wang G, et al. Nitrogen addition shifts the microbial community in the rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* in Northwestern China [J]. *PloS one*, 2017,12(2):e0172382.
- [15] Fitter A H, Helgason T, Hodge A. Nutritional exchanges in the arbuscular mycorrhizal symbiosis; Implications for sustainable agriculture[J]. *Fungal Biology Reviews*, 2011,25(1):68-72.
- [16] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal symbiosis*[M]. New York:Academic Press, 2010.
- [17] Hernández-Hernández R M, Roldán A, Caravaca F, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal assemblages in biological crusts from a Neotropical savanna are not related to the dominant perennial *Trachypogon*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,575:1203-1210.
- [18] Li H, Smith S E, Holloway R E, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi contribute to phosphorus uptake by wheat grown in a phosphorus-fixing soil even in the absence of positive growth responses[J]. *New Phytologist*, 2006,172(3):536-543.
- [19] Subramanian K S, Santhanakrishnan P, Balasubramanian P. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2006,107(3):245-253.
- [20] De l P E, Echeverria S R, Wh V D P, et al. Mechanism of control of root-feeding nematodes by mycorrhizal fungi in the dune grass *Ammophila arenaria* [J]. *New Phytologist*, 2010,169(4):829-840.
- [21] Egertonwarburton L M, Querejeta J I, Allen M F. Common mycorrhizal networks provide a potential pathway for the transfer of hydraulically lifted water between plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007,58(12):1473-1483.
- [22] 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 Science*, 1996,161(9):575-586.
- [23] Rillig M C, Wright S F, Allen M F, et al. Rise in carbon dioxide changes soil structure[J]. *Nature*, 1999,400(6745):628-628.
- [24] 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.
- [25] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes[J]. *Ecology Letters*, 2004,7(8):740-754.
- [26] Zhang J, Tang X, Zhong S, et al. Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):2391-2399.
- [27] Sui X, Wu Z, Lin C, et al. Terrestrially derived glomalin-related soil protein quality as a potential ecological indicator in a peri-urban watershed[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017,189(7):315-332.
- [28] Treseder K K, Turner K M. Glomalin in Ecosystems [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007,71(4):1257-1266.
- [29] 唐宏亮,刘龙,王莉,等. 土地利用方式对球囊霉素土层分布的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009,17(6):1137-1142.
- [30] 阙弘,葛阳洋,康福星,等. 南京典型利用方式土壤中球囊霉素含量及剖面分布特征[J]. *土壤*, 2015,47(4):719-724.
- [31] 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,等. 北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系[J]. *环境科学*, 2016,37(12):4806-4814.
- [32] 杜介方,张彬,解宏图,等. 不同施肥处理对球囊霉素土壤蛋白含量的影响[J]. *土壤通报*, 2011,42(3):573-577.
- [33] 李博文. 施肥对青藏高原高寒草甸球囊霉素土壤相关蛋白及其环境因子的影响[D]. 兰州:兰州大学,2016.
- [34] Wuest S B, Caesar-Tonthat T C, Wright S F, et al. Organic matter addition, N, and residue burning effects on infiltration, biological, and physical properties of an intensively tilled silt-loam soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2005,84(2):154-167.

- 水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5780-5788.
- [14] 王长科, 吕宪国, 蔡祖聪, 等. 若尔盖高原草甸土与泥炭土氧化 CH_4 研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 584-588.
- [15] 陈全功. 江河源区草地退化与生态环境的综合治理[J]. 草业科学, 2005, 22(4): 93-96.
- [16] 孙强, 韩建国, 周莉华. 枯草层对草地早熟禾草坪水分利用的影响[J]. 草业科学, 2005, 22(4): 93-96.
- [17] 田应兵, 熊明彪, 熊晓山, 等. 若尔盖高原湿地土壤—植物系统有机碳的分布与流动[J]. 植物生态学报, 2003, 27(4): 490-495.
- [18] Li Y, Zhou X, Brandle J R, et al. Temporal progress in improving carbon and nitrogen storage by grazing exclosure practice in a degraded land Area of China Horqin Sandy Grassland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 159: 55-61.
- [19] Bilotta G S, Brazier R E, Haygarth P M. The impacts of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands [J]. Advances in Agronomy, 2007, 94: 237-280.
- [20] 苏永忠, 赵哈林, 张铜会, 等. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤性状特征[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 333-338.
- [21] 王根绪, 程国栋, 沈永平, 等. 土地覆盖变化对高山草甸土壤特性的影响[J]. 科学通报, 2002, 47(23): 1771-1777.
- [22] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [23] 国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1984.
- [24] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653-659.
- [25] 赵新全. 高寒草甸生态系统与全球变化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [26] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1977: 522-524.
- [27] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 422-429.
- [28] 脱云飞, 费良军, 董艳慧, 等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 6-11.
- [29] 李红琴, 乔小龙, 张镔铨, 等. 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 195-200.
- [30] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 当雄草原不同退化草甸土壤含水量及容重分布特征[J]. 草地学报, 2011, 19(5): 746-751.
- [31] 林慧龙, 侯扶江, 李飞. 家畜践踏对环县草原地下生物量的影响[J]. 草地学报, 2008, 16(2): 186-190.
- [32] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [33] 吴启华, 毛绍娟, 李英年. 牧压梯度下高寒杂草类草甸土壤持水能力及影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 590-598.

(上接第 65 页)

- [35] Zhang J, Tang X, He X, et al. Glomalin-related soil protein responses to elevated CO_2 and nitrogen addition in a subtropical forest: Potential consequences for soil carbon accumulation[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 83: 142-149.
- [36] Bobbink R, Hicks K, Galloway J, et al. Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis[J]. Ecological Applications A Publication of the Ecological Society of America, 2010, 20(1): 30-59.
- [37] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 2 版. 北京: 农业出版社, 1981.
- [38] 张维娜, 廖周瑜. 氮沉降增加对森林植物影响的研究进展[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(3): 21-24.
- [39] Zhang J, Ai Z, Liang C, et al. Response of soil micro-
bial communities and nitrogen thresholds of *Bothriochloa ischaemum* to short-term nitrogen addition on the Loess Plateau[J]. Geoderma, 2017, 308: 112-119.
- [40] Wright S F, Upadhyaya A, Buyer J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998, 30(13): 1853-1857.
- [41] 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 Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1257-1260.
- [42] 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 and Soil, 2001, 233(2): 167-177.