

桂林会仙岩溶湿地土地利用方式对球囊霉素 相关土壤蛋白分布的影响

沈育伊¹⁾, 滕秋梅²⁾, 徐广平^{2,3)*}, 孙英杰²⁾, 张德楠²⁾, 牟芝熠⁴⁾, 周龙武²⁾

1) 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006;

2) 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006;

3) 中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;

4) 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541004

摘要: 土壤丛枝菌根真菌分泌的球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)是土壤碳库变化的重要指标, 为明确其在会仙岩溶湿地不同土地利用方式下的分布特征及影响因素, 以会仙岩溶沼泽, 并由其转变而来的水稻田、旱地、果园和弃耕地4种不同土地利用方式为研究对象, 采集0–10 cm、10–20 cm和20–40 cm这3个层次的土样, 对不同土地利用方式下球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其与土壤因子的关系进行了研究。结果表明, 不同土层总球囊霉素相关土壤蛋白(T-GRSP)含量为1.08~3.35 mg/g, 占土壤有机碳的12.33%~19.73%, 球囊霉素相关土壤蛋白是湿地土壤中的一个重要碳库。球囊霉素相关土壤蛋白在不同土地利用方式和土层之间均表现出显著差异, 随土层深度的增加表现出降低趋势。沼泽土壤中总球囊霉素相关土壤蛋白、易提取球囊霉素相关土壤蛋白(EE-GRSP)含量和有机碳(SOC)的含量均高于其它4种土地利用方式(水稻田、旱地、园土和弃耕地)。GRSP分别与蛋白酶、SOC和全氮(TN)呈极显著正相关($P < 0.01$), 分别与速效氮(AN)、速效磷(AP)、粘粒和粉粒呈显著正相关($P < 0.05$)。EE-GRSP与SOC和TN呈极显著正相关($P < 0.01$), 分别与蛋白酶和粘粒呈显著正相关($P < 0.05$)。主成分分析表明, 粉粒、SOC、AN和TN是影响球囊霉素相关蛋白分布特征和反映会仙岩溶湿地土壤营养状况的主要因子。会仙岩溶湿地土壤中的球囊霉素相关土壤蛋白对土壤碳封存具有重要贡献。

关键词: 岩溶湿地; 球囊霉素相关土壤蛋白; 土地利用方式; 土壤蛋白酶; 土壤因子

中图分类号: P934; S153 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.012701

Effects of Land Use Type on Distribution of Glomalin-related Soil Protein in the Huixian Karst Wetland, Guilin

SHEN Yu-yi¹⁾, TENG Qiu-mei²⁾, XU Guang-ping^{2,3)*}, SUN Ying-jie²⁾, ZHANG De-nan²⁾,
MOU Zhi-yi⁴⁾, ZHOU Long-wu²⁾

1) Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006;

2) Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006;

3) Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Natural Resources & Guangxi Zhuang Autonomous Region, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004;

4) College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: To identify the effects of land use type on the distribution of glomalin-related soil protein in the Huixian karst wetland, we selected five land use types (marsh wetland, reclaimed paddy field, reclaimed dry

本文由广西自然科学基金项目(编号: 2018GXNSFAA050069; 2020GXNSFBA297048)、国家自然科学基金项目(编号: 31760162; 41361057)、广西岩溶动力学重大科技创新基地开放课题资助项目(编号: KDL & Guangxi202004)、广西重点研发计划项目(编号: 桂科AB21220057)和广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室研究基金(编号: LRCSU21K0203)联合资助。

收稿日期: 2021-07-19; 改回日期: 2022-01-25; 网络首发日期: 2022-01-30。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 沈育伊, 女, 1980年生。本科, 助理研究员。主要从事生物地球化学与环境效应研究。E-mail: 417850389@qq.com。

*通讯作者: 徐广平, 男, 1977年生。博士, 副研究员。主要从事环境土壤学与物质循环研究。E-mail: xugpgx@163.com。

farmland, orchard and abandoned land) and examined soil profile distribution patterns and influencing factors of glomalin-related soil protein. Soil samples were collected from depths of 0–10 cm, 10–20 cm, and 20–40 cm, respectively. The results showed that total glomalin-related soil protein content ranges from 1.08 ~ 3.35 mg/g, accounting for 12.33% ~ 19.73% of soil organic carbon content. Glomalin-related soil protein is, therefore, regarded as a major carbon pool in the soil of the Huixian karst wetland. Significant differences in glomalin-related soil protein content were observed among the land use types and soil layers ($P < 0.05$). Glomalin-related soil protein exhibits obvious vertical distribution pattern, which decreases with an increase in soil depth. GRSP and EE-GRSP of marsh wetlands was significantly higher than the content with the other four land use types. GRSP was directly related to soil protease, soil organic carbon, and total nitrogen ($P < 0.01$), and had a significant positive relationship with available nitrogen, available phosphorus, clay and silt; E-GRSP was directly related to soil organic carbon and total nitrogen ($P < 0.01$), and had a significant positive relationship with soil protease and clay. Principal component analysis showed that silt, soil organic carbon, total nitrogen and available nitrogen were the key factors affecting distribution characteristics of glomus-associated proteins and reflected soil nutrition status in the Huixian karst wetland. Glomalin-related soil protein in soils of the Huixian karst wetland is important for soil carbon sequestration.

Key words: karst wetland; glomalin-related soil protein (GRSP); land use type; soil protease; soil factors

球囊霉素(Glomalin)被认为由土壤丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)分泌的一种疏水性糖蛋白质(Rosier et al., 2006),是土壤有机质的重要组成部分和重要来源(贺海升等, 2015)。由于目前尚未有特定的提取高纯度球囊霉素的方法, Rillig(2004)进一步建议采用球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin-related soil protein, GRSP)的新术语来定义从土壤中提取的以球囊霉素为主的蛋白质混合物,用“球囊霉素相关土壤蛋白”代替球囊霉素更为合适。根据提取条件可分为总球囊霉素相关土壤蛋白(Total-related soil protein, T-GRSP)和易提取球囊霉素相关土壤蛋白(Easily extracted-related soil protein, EE-GRSP)(Gillespie et al., 2011)。有研究表明 GRSP 在土壤团聚体形成和土壤碳存储中存在重要作用(Spohn and Giani, 2011),有利于提高土壤有机碳固定能力(吴阳等, 2018)。因此,球囊霉素相关土壤蛋白常被作为表征土壤质量和土壤碳库变化的重要指标(张梦歌等, 2020)。球囊霉素相关土壤蛋白广泛分布于不同的生态系统中(王健等, 2016),由于球囊霉素相关土壤蛋白的重要生态功能,使其在各种生态系统土壤中的含量和分布引起了人们的广泛关注(刘瑾等, 2017)。

生态系统的波动,如全球气候变暖(Rillig et al., 2002, 2003)以及各种农业管理措施(Wright et al., 1999)对球囊霉素相关土壤蛋白的含量均会造成影响。土地利用方式的改变可影响土壤结构及土壤生物地球化学循环过程,并显著影响陆地生态系统的结构和功能(Dayamba et al., 2016; 李强, 2021)。唐宏亮等(2009)在农田生态系统的研究发现,土地利用方式不同而导致了球囊霉素相关土壤蛋白含量的明显不同。不同土地利用方式变化下,土壤中球囊

霉素相关土壤蛋白比有机质降解的慢(Pregler et al., 2007),使得球囊霉素相关土壤蛋白在生态系统中可以更好地固定碳元素(Quiquampoix and Burns, 2007)。GRSP 对不同土壤环境变化的反应可能有所不同,并受到土地利用方式和植被类型等的影响。不同土壤类型会导致 GRSP 含量显著差异(贺海生等, 2015),球囊霉素相关土壤蛋白含量在不同生态系统中,可能具有不同的分布特征。

碳封存是实现碳中和的主要途径之一。湿地土壤中储存了约 550 Pg C,占陆地土壤碳库的 20% ~ 30%,是陆地生态系统极其重要的碳库之一(Mitch et al., 2013)。土壤总碳含量是评价固碳能力的重要指标,但其中球囊霉素相关土壤蛋白作为有机碳的重要组成部分,具有指示有机碳在湿地固碳能力中的作用。GRSP 作为土壤碳组成中不可缺少的一部分,有助于凝聚土壤颗粒以形成土壤团聚体来实现碳的长期储存(Rosier et al., 2006)。土地利用变化对湿地碳循环有重要的影响(Edenhofer et al., 2014),土地利用变化是土壤碳库变化的重要因素之一,研究湿地不同土地利用方式下 GRSP 的分布特征,对于评价湿地固碳和长期碳封存能力具有重要的科学意义。

桂林会仙岩溶湿地是中国最大的岩溶湿地之一,生态系统脆弱,在调节地区气候、涵养水源等方面发挥着重要作用,具有特殊的生态意义和科研价值(徐广平等, 2019)。近年来由于人类活动的加剧,会仙岩溶湿地被人们通过排水围栏等方式开垦为耕地或鱼塘等,土地利用方式的变化对湿地环境造成了一定的影响(李世杰等, 2009; 黄科朝等, 2018)。会仙岩溶湿地的典型水生植物具有一定的碳汇效应(沈育伊等, 2021),会仙岩溶湿地生态系统较为脆弱,

在受到人为垦殖活动等影响下,不同土地利用方式下球囊霉素相关土壤蛋白分布特征及其影响因素尚不清楚。因此,本研究提出以下科学问题:(1)会仙岩溶湿地不同土地利用方式下土壤中 GRSP(T-GRSP、EE-GRSP)有怎样的分布特征;(2)探索 GRSP 与 SOC 的关系及不同土地利用方式对 GRSP 含量的影响。鉴于此,本研究选择会仙岩溶湿地 5 种有代表性的土地利用方式,通过分析球囊霉素相关土壤蛋白、土壤 SOC 和土壤蛋白酶等相关指标在不同土层中的分布特征,阐明 GRSP 对有机碳的贡献,揭示土地利用方式对湿地球囊霉素相关土壤蛋白的影响,为岩溶湿地碳封存的研究提供科学依据。

1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于广西桂林市临桂区会仙镇,东至雁山区,西至临桂区四塘乡,地理坐标为北纬 25°01'30" — 25°11'15", 东经 110°08'15" — 110°18'00", 海拔 150 ~ 160 m, 总面积约 120 km², 是以草本沼泽和湖泊为主的岩溶湿地, 是国内为数不多的中低海拔大型岩溶湿地之一, 现已规划为我国最大的喀斯特湿地公园。该区属亚热带季风气候区, 年均气温 16.5 ~ 20.5℃, 极高温达 38.80℃, 极低温度为 -3.30℃, 年均降雨量为 1 890.4 mm。降雨时空分布不均, 多集中在每年的 3—8 月, 形成了春夏雨多而集中, 秋冬少雨干旱的特点。土壤以红黄壤和红壤为主, 集中分布于洼地、平原和缓坡, 土壤层薄甚至基岩裸露。湿地植被以挺水植被和沉水植被为主, 植物种类较多, 且生长茂盛, 盖度常可达 80% ~ 95%, 主要建群种有芦苇(*Phragmites communis*)、华克拉莎(*Cladium chinense*)、五刺金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* var. *oryzolorum*)、石龙尾(*Limnophila sessiliflora*)等(沈育伊等, 2021)。

2 材料与方法

2.1 样地设置和样品的采集

2020 年 9 月, 选择会仙岩溶沼泽湿地, 并由其转变而来的 4 种不同土地利用方式(水稻田、旱地、果园和弃耕地)为研究对象, 各选择 3 块 40 m×40 m 的样地作为 3 个重复, 按照 S 型方法分别在各样地中选取 5 个代表性样点采样土壤样品, 按 0—10 cm, 10—20 cm 和 20—40 cm 层次用土壤取样器(直径 5 cm)分层取土, 同层土壤混匀为 1 个土样。将采集的样品 1 kg 装入无菌自封袋, 带回实验室, 自然风干, 去掉土壤中可见植物根系和残体等杂物, 过 2 mm 孔径的土壤分析筛, 一部分常温保存用于土壤理化性质的测定, 另一部分在冰箱 4℃ 保存用于

测定球囊霉素相关土壤蛋白。

2.2 土壤理化性质及 GRSP 的分析

土壤理化性质的测定。土壤 pH 值采用电位法测定(水土质量比为 2.5:1)。土壤有机碳(SOC)采用 TOC 仪(岛津 5000A, 日本)测定。全氮(TN)通过德国 Vario ELIII 元素分析仪测定。将采集的新鲜土壤仔细剔除动植物残体, 自然风干后过 2 mm 土壤筛, 用英国 Malvern 公司 Mastersize 2000 型激光粒度仪测定土壤粒径组成。按照土壤粒径分级标准将土壤分为 3 个等级: 粘粒(Clay, < 0.002 mm)、粉粒(Silt, 0.002 ~ 0.05 mm)、砂粒(Sand, 0.05 ~ 2 mm)。速效氮(AN)用碱解扩散法, 速效磷(AP)用碳酸氢钠浸提, 钼锑抗比色法(鲍士旦, 2000)。土壤蛋白酶(Soil protease, SP)活性用茆三酮比色法测定(关松荫, 1986)。

总球囊霉素相关土壤蛋白和易提取球囊霉素相关土壤蛋白含量按照 Wright and Upadhyaya(1996)和改进后的 Janos et al. (2008)方法测定。总球囊霉素相关土壤蛋白提取: 将 0.25 g 土样与 2 mL 50 mmol/L、pH 8.0 的柠檬酸钠加入塑料离心管, 放入高压灭菌锅, 于 121℃ 提取 1 h 后, 9710 r/min 离心 5 min, 收集上清液; 重复提取直至离心管内上清液不再呈红棕色为止, 将收集到的上清液在 4000 r/min 下离心 20 min, 置于 4℃ 下保存备用分析。易提取球囊霉素相关土壤蛋白提取: 将 0.25 g 土样与 2 mL 20 mmol/L、pH 7.0 的柠檬酸钠溶液加入塑料离心管, 放入高压灭菌锅, 于 121℃ 提取 0.5 h 后, 在 9710 r/min 条件下离心 5 min, 收集上清液, 置于 4℃ 保存备用分析。球囊霉素蛋白的定量分析采用 Brad-ford 法(Janos et al., 2008; 阙弘等, 2015), 考马斯亮蓝染色液实验方法主要如下: 称取 0.1 g 考马斯亮蓝 G250 溶于 50 mL 95% 的乙醇, 加入 100 mL 85% 的磷酸, 定容至 1000 mL, 使用前需过滤, 用牛血清蛋白 BSA 作标准物质。

2.3 数据处理

数据统计在 Microsoft Excel 2007 上进行, 采用 SPSS 19.0 统计软件进行方差分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)比较不同数据间差异($\alpha=0.05$), 并进行 Person 法两两相关分析和主成分分析。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用方式土壤理化性质的变化特征

从表 1 可知, 土壤理化性质在不同土地利用方式及土层间均显著差异($P < 0.05$)。随着土层深度的增加, 除了 pH 值、粘粒和砂砾呈现逐渐增大的趋势

表 1 不同土地利用方式下蛋白酶与土壤理化性质的变化
Table 1 Changes in protease and soil phy-chemical properties under different land use types

项目	土层 /cm	蛋白酶 /(mg/g)	SOC /(g/kg)	TN /(g/kg)	AN /(mg/kg)	AP /(mg/kg)	pH	粘粒/%	粉粒/%	砂砾/%
沼泽	0-10	23.15aA	25.02aA	2.41aA	193.45aA	15.02aA	7.48bA	26.6aC	53.95aA	19.46cE
	10-20	19.09bA	21.56bA	2.19aA	141.84bA	13.28bA	7.58aA	27.24aB	51.06bA	21.70bC
	20-40	15.28cA	15.39cA	1.93aA	103.26cA	6.48cB	7.63aA	28.50aB	48.45cA	23.05aE
	平均值	19.17	20.66	2.18	146.18	11.59	7.56	27.45	51.15	21.40
水稻田	0-10	19.08aB	21.44aB	2.06aB	144.65aB	10.60aB	7.25aA	27.64bB	50.97aB	21.38cD
	10-20	12.78bB	15.20bB	1.94bB	125.58bB	8.89bB	7.22aB	29.19aA	48.75bB	22.06bC
	20-40	9.49cB	12.56cB	1.76cB	96.95cB	5.26cC	7.36aB	30.48aA	45.56cB	23.97aD
	平均值	13.78	16.40	1.92	122.39	8.25	7.28	29.10	48.43	22.47
旱地	0-10	14.49aC	16.07aC	1.45aC	91.04aC	9.04aC	6.40aB	29.48aA	46.05aC	24.46cC
	10-20	9.56bC	13.12bC	1.35aC	81.92bC	8.27bB	6.46aC	23.66cD	44.42bC	31.92bB
	20-40	7.92cC	10.72cC	1.20bC	78.01cC	7.38cA	6.49aB	25.17bD	41.46cC	33.37aC
	平均值	10.66	13.30	1.33	83.65	8.23	6.45	26.10	43.98	29.92
果园	0-10	11.22aD	14.83aD	1.29aD	87.30aD	7.86aD	6.24aC	25.89aC	43.13aD	30.98bB
	10-20	8.50bD	11.43bD	1.14aD	80.54bC	7.24bC	6.25aC	25.65aC	41.09bD	33.26aA
	20-40	6.98cD	9.71cD	0.98bD	73.96cC	6.24bB	6.38aB	26.44aC	38.83cD	34.73aB
	平均值	8.90	11.99	1.14	80.6	7.11	6.29	25.99	41.02	32.99
弃耕地	0-10	9.19aE	11.06aE	1.07aE	68.51bE	7.30aE	6.13aD	27.16aB	40.81aE	32.03cA
	10-20	8.14bE	7.44bE	0.94aE	69.67aD	7.18aC	6.18aD	28.15aB	37.63bE	34.22bA
	20-40	5.85cE	5.46cE	0.82bE	42.45cD	6.75bB	6.24aC	24.05bE	35.64cE	40.31aA
	平均值	7.73	7.99	0.94	60.21	7.08	6.18	26.45	38.03	35.52

注: 同一列不同小写字母表示同一土地利用方式不同土层间差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示同一土层不同土地利用方式间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 不同土地利用方式下土壤中球囊霉素相关土壤蛋白、蛋白酶及土壤因子的二元方差分析
Table 2 Two-way analysis of variance (ANOVA) for glomalin-related soil protein, protease content and properties under different land use types

指标	土地利用方式		土层		土地利用方式×土层	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
T-GRSP	40.12	0.000**	101.75	0.000**	5.11	0.000**
EE-GRSP	69.85	0.000**	144.36	0.000**	9.78	0.000**
蛋白酶	16.52	0.000**	2.13	0.000**	4.36	0.000**
SOC	20.11	0.000**	66.25	0.000**	7.89	0.000**
TN	9.26	0.002**	12.05	0.003**	3.15	0.006*
AN	11.44	0.000**	201.22	0.000**	23.98	0.000**
AP	20.01	0.000**	31.14	0.02*	8.26	NS
pH	10.01	0.000**	18.67	0.000**	5.24	0.000**
砂砾	65.15	0.000**	2.66	0.03*	2.74	0.003**
粉粒	30.22	0.000**	10.32	0.000**	3.49	0.04*
粘粒	23.36	0.000**	10.54	0.000**	2.96	0.000**

注: *表示相关性达显著水平($P<0.05$), **表示相关性达极显著水平($P<0.01$), NS 表示无显著差异。下同。

之外, 土壤蛋白酶、有机碳、全氮、速效氮、速效磷和粉粒均呈现逐渐减小的趋势($P<0.05$)。在相同土层, 与水稻田、旱地、果园和弃耕地比较, 沼泽的土壤蛋白酶、SOC、TN、AN、AP、pH 值和粉粒含量最高($P<0.05$), 砂砾含量最低。

总体上, 从 0-40 cm 土层各指标的平均值来看, 土壤蛋白酶、SOC、TN、AN、AP、pH 值和粉粒含量的大小关系依次为沼泽>水稻田>旱地>果园>弃耕地($P<0.05$)。砂砾含量在 0-40 cm 土层的平均值表现为弃耕地>果园>旱地>水稻田>沼泽(P

<0.05), 粘粒没有明显的变化规律。双因素方差分析表明土壤蛋白酶及土壤理化性质在不同土地利用方式和土层之间均有差异显著($P<0.05$), 并且除 AP 外, 它们之间有显著的交互作用(表 2)。

3.2 不同土地利用方式球囊霉素相关蛋白的分布特征

如表 3 所示, 随着土层深度的增加, 不同土地利用方式土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量均趋于减小($P<0.05$)。沼泽湿地的土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量最高, 弃耕地则最低, 大小关系依次表现为沼

泽湿地 > 水稻田 > 旱地 > 果园 > 弃耕地 ($P < 0.05$)。双因素方差分析表明: T-GRSP 和 EE-GRSP 含量在不同土地利用方式和土层之间均差异显著, 并且它们之间有显著的交互作用(表 2)。

土壤 T-GRSP 的含量为 1.08 ~ 3.35 mg/g, 0–40 cm 土层 T-GRSP 的平均含量在 1.41 ~ 2.70 mg/g 之间; E-GRSP 的含量为 0.30 ~ 1.17 mg/g, 0–40 cm 土层 E-GRSP 的平均含量在 0.40 ~ 0.95 mg/g 之间。EE-GRSP/T-GRSP 百分比为 25.37% ~ 38.82%, 0–40 cm 土层 EE-GRSP/T-GRSP 的平均值大小关系依次表现为沼泽湿地(35.17%) > 水稻田(32.25%) > 旱地(32.14%) > 弃耕地(28.12%) > 果园(26.85%)。

T-GRSP/SOC 的百分比为 12.33% ~ 19.73%, 0–40 cm 土层 T-GRSP/SOC 的平均值大小关系依次表现为弃耕地(18.12%) > 水稻田(14.68%) > 果园(14.48%) > 旱地(14.19%) > 沼泽湿地(13.13%)。EE-GRSP/SOC 的百分比为 3.47% ~ 5.43%, 0–

40 cm 土层 EE-GRSP/SOC 的平均值大小关系依次表现为弃耕地(5.05%) > 水稻田(4.7%) > 沼泽湿地(4.6%) > 旱地(4.54%) > 果园(3.85%)。5 种不同土地利用方式的 T-GRSP/SOC、EE-GRSP/SOC 贡献随着土层加深而没有统一的变化规律。可见, 尽管弃耕地的土壤有机碳较低, 但是 T-GRSP 和 EE-GRSP 占据了其 SOC 较大的比例, 略高于其它土地利用方式, GRSP 起到了积极的固碳作用。

3.3 球囊霉素相关土壤蛋白、蛋白酶与土壤理化性质的关系

由表 4 可以看出, T-GRSP 分别与蛋白酶、SOC 和 TN 呈极显著正相关($P < 0.01$), 分别与 AN、AP、pH 值、粘粒和粉粒呈显著正相关($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。土壤 EE-GRSP 与 SOC 和 TN 呈极显著正相关($P < 0.01$), 分别与蛋白酶、pH 值和粘粒呈显著正相关($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。蛋白酶分别与 SOC 和 TN 呈

表 3 不同土地利用方式下土壤中球囊霉素相关土壤蛋白(GRSP)的分布
Table 3 Distributions of glomalin-related soil protein(GRSP) in soils under different land use types

项目	土层/cm	T-GRSP /(mg/g)	EE-GRSP /(mg/g)	EE-GRSP/T-GRSP /%	T-GRSP/SOC /%	EE-GRSP/SOC /%
沼泽	0–10	3.35±0.08aA	1.17±0.04aA	35.0±0.62bB	13.41±0.42aC	4.69±0.19aB
	10–20	2.66±0.08bA	1.03±0.02bA	38.82±1.71aA	12.33±0.24bD	4.78±0.13aB
	20–40	2.10±0.06cA	0.66±0.04cA	31.68±2.14cA	13.64±0.9aC	4.32±0.30aB
	平均值	2.70	0.95	35.17	13.13	4.60
水稻田	0–10	2.85±0.07aB	1.04±0.05aB	36.59±2.81aA	13.28±0.45bC	4.86±0.31aB
	10–20	2.29±0.09bA	0.77±0.07bB	33.36±1.99bB	15.08±0.61aB	5.04±0.49aA
	20–40	1.97±0.07cA	0.53±0.03bB	26.81±2.0cC	15.67±0.46aB	4.21±0.39bB
	平均值	2.37	0.78	32.25	14.68	4.70
旱地	0–10	2.34±0.15aB	0.83±0.10aB	35.84±6.45aB	14.59±1.14aB	5.18±0.58aA
	10–20	1.79±0.11bB	0.58±0.02bB	32.37±3.32bB	13.63±0.56bC	4.40±0.27bB
	20–40	1.54±0.07bB	0.43±0.06cB	28.21±2.82cB	14.34±0.33aC	4.05±0.50bB
	平均值	1.89	0.61	32.14	14.19	4.54
果园	0–10	2.15±0.07aB	0.62±0.07aC	29.18±4.31aC	14.51±1.03aB	4.21±0.38aC
	10–20	1.75±0.16bB	0.44±0.05bC	25.37±4.12bC	15.32±1.16aB	3.86±0.38bC
	20–40	1.32±0.09cB	0.34±0.07bC	26.0±7.11bC	13.6±1.42bC	3.47±0.61bC
	平均值	1.74	0.47	26.85	14.48	3.85
弃耕地	0–10	1.76±0.05aC	0.51±0.03aC	29.23±1.90aC	15.93±0.71bA	4.66±0.37bB
	10–20	1.38±0.14bC	0.38±0.03bC	27.52±5.31bC	18.69±2.57aA	5.07±0.50aA
	20–40	1.08±0.05cC	0.30±0.01cC	27.60±1.79bB	19.73±1.66aA	5.43±0.12aA
	平均值	1.41	0.40	28.12	18.12	5.05

表 4 球囊霉素相关土壤蛋白、蛋白酶与土壤理化性质的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson's correlation analysis among glomalin-related soil protein, protease content and soil properties

项目	T-GRSP	EE-GRSP	蛋白酶	SOC	TN	AN	AP	pH	粘粒	粉粒
EE-GRSP	-0.502	1								
蛋白酶	0.601**	0.574*	1							
SOC	0.781**	0.732**	0.784**	1						
TN	0.685**	0.711**	0.693**	0.864**	1					
AN	0.725*	0.402	0.89*	0.684*	0.749*	1				
AP	0.667*	0.399	0.426	0.598**	0.321	0.412	1			
pH	0.673*	0.591*	0.57*	0.632*	0.705*	0.54	0.635*	1		
粘粒	0.757*	0.613*	0.625*	0.564*	0.625*	0.745*	0.419	0.461	1	
粉粒	0.645*	0.502	0.547*	0.601*	0.518	0.53	0.533	0.487	0.495*	1
砂砾	-0.632*	-0.711*	-0.49	0.324	-0.658*	-0.49	-0.75*	-0.63*	-0.52	-0.57*

表 5 土壤因子主成分载荷矩阵、特征值及贡献率

Table 5 The principal component loading matrix, eigenvalue, contribution rate for soil factors

项目	第 1 主成分	第 2 主成分
蛋白酶	0.402	0.733
SOC	0.895	-0.131
TN	0.902	-0.436
AN	0.901	0.046
AP	0.422	0.031
pH	-0.954	-0.202
粘粒	0.456	-0.187
粉粒	0.865	0.143
砂砾	0.475	0.539
特征值	4.365	1.204
贡献率	60.230	26.250
累计贡献率	86.480	

极显著正相关($P < 0.01$), 分别与 AN、pH 值、粘粒和粉粒呈显著正相关($P < 0.05$)。

SOC 分别与 TN 和 AP 呈极显著正相关($P < 0.01$), 分别与 AN、pH 值、粘粒和粉粒呈显著正相关($P < 0.05$)。TN 分别与 AN、pH 值和粘粒呈显著正相关($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。AN 与粘粒呈显著正相关($P < 0.05$)。AP 与 pH 值呈显著正相关($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。pH 值与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。粘粒与粉粒呈显著正相关($P < 0.05$), 粉粒与砂砾呈显著负相关($P < 0.05$)。

表 5 是主成分分析的载荷矩阵特征值及贡献率。对 9 个土壤因子进行了主成分分析, 根据相关矩阵特征值大于 1、方差累积贡献率大于 86% 的原则, 选择了 2 个主成分。第 1 主成分反映的信息量占总体信息量的 60.23%, 第 2 主成分仅占 26.25%。可见, 第 1 主成分所含信息量在 2 个主成分中较高, 因此粉粒、SOC、AN 和 TN(权重在 0.865 ~ 0.902) 是影响球囊霉素相关蛋白分布特征的主要生态因子, 并且反映了会仙岩溶湿地不同土地利用方式下土壤的营养状况。

4 讨论

4.1 不同土地利用方式球囊霉素相关土壤蛋白的变化特征

土地利用是自然和人类活动相互作用的综合过程, 土地利用方式的变化可以改变土壤物理、化学和生物学性质以及土壤环境状况(孔祥斌等, 2003)。本研究中, 在同一土层不同土地利用方式之间和同一土地利用方式不同土层之间, 土壤有机碳、全氮、pH、速效氮、速效磷、蛋白酶和球囊霉素土壤相关蛋白均表现出一定的差异性, 这可能是由湿地垦殖方式、管理措施、施肥和经营水平等不

同而引起。5 种土地利用方式下土壤中总球囊霉素土壤相关蛋白含量均随着土层深度增加而减小, 这是由于表层土壤中 AMF 更为丰富, 能够产生更多的球囊霉素并在表层积累。前人研究表明, 球囊霉素土壤相关蛋白含量在不同生态系统之间变化较大, 处于 2.0 ~ 14.8 mg/g 之间(Wright and Upadhyaya, 1996; Rillig et al., 2001; Nie et al., 2007)。在会仙湿地, 不同土层总球囊霉素相关土壤蛋白含量为 1.08 ~ 3.35 mg/g, 占土壤有机碳的 12.33% ~ 19.73%, 0~40 cm 土层 T-GRSP 的平均含量在 1.41 ~ 2.70 mg/g 之间, 在不同土地利用方式和土层之间均存在显著差异。接近于唐宏亮等(2009)报道的河北省中部不同土地利用方式下球囊霉素平均含量(1.41 ~ 3.18 mg/g)和阙弘等(2015)报道的江苏省南京市浦口区土壤中总球囊霉素含量(1.96 ~ 3.12 mg/g)范围。在会仙湿地, 沼泽各土层的总球囊霉素土壤相关蛋白含量均显著高于其它 4 种土地利用方式, 表明相比受人为扰动大的耕作土壤, 沼泽湿地更易产生和积累球囊霉素土壤相关蛋白。此外, 5 种土地利用方式下土壤中球囊霉素土壤相关蛋白含量均随着土层深度增加而减小, 这是由于表层土壤有机碳含量较高, AMF 数量更为丰富, 能够产生更多的球囊霉素并积累在表层土壤。而在水稻田、旱地、果园和弃耕地这 4 种耕作土壤, 由于人为耕作过程(如过量施用化肥、农药等)降低了 AMF 数量和活性, 减少了土壤中球囊霉素的产生, 并加速了球囊霉素的分解, 进而减小了球囊霉素土壤相关蛋白的积累量。由于湿地的垦殖导致了土壤养分含量的降低(黄科朝等, 2018), 所以水稻田、旱地、果园和弃耕地的球囊霉素占土壤全碳的含量有所提高, 也表明 GRSP 是会仙岩溶湿地土壤碳库的重要来源和组成部分, 尤其是在湿地垦殖为其它土地利用方式后, GRSP 对土壤碳库有重要的贡献。

球囊霉素土壤相关蛋白是一类产生于 AM 菌丝体和孢子壁的糖蛋白(Purin and Rillig, 2007), 能够促进土壤团聚体的形成和稳定, 进而影响土壤碳储量和有效防止土壤碳的流失(Rillig and Mummey, 2006)。前人研究表明, 球囊霉素相关土壤蛋白作为土壤活性有机碳库中最重要的碳来源, 在土壤中的周转时间长达 6 ~ 24 年, 是稳定性有机碳库的重要组成部分(Rillig et al., 2001)。球囊霉素土壤相关蛋白与土壤碳库关系密切, 并且球囊霉素土壤相关蛋白的含量是土壤腐殖质含量的 2 ~ 24 倍, 可占到土壤有机碳的 27%(Comis, 2002)。本研究表明球囊霉素土壤相关蛋白与有机碳极显著正相关, 这与 Wright and Upadhyaya(1996)的研究涉及 12 种土壤

类型的研究结果相类似,说明球囊霉素土壤相关蛋白能够提高会仙岩溶湿地土壤碳库的含量。研究结果与 Lovelock et al.(2004), Nie et al.(2007)和唐宏亮等(2009)的研究结果不同,其均表明球囊霉素土壤相关蛋白与有机碳呈负相关,这可能因为在不同生态系统中,由于其试验样地和土壤类型不同,不同的气候条件和地理环境等,导致了土壤有机碳和球囊霉素土壤相关蛋白积累结果的差异性。

前人研究表明, 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 (Halvorson and Gonzalez, 2006; Nichols and Wright, 2006)。本试验中, T-GRSP 和 EE-GRSP 含量均随土层的增加而递减,这主要是由于表层土壤通透性好、营养丰富,有利于促进 AMF 活性,进而释放的球囊霉素较多。0–40 cm 土层中 EE-GRSP/T-GRSP 百分比的平均值沼泽湿地最高,弃耕地和果园较小,这是由于沼泽湿地土壤受人为干扰相对较小,土壤生态功能良好,AMF 丰富且易产生和积累球囊霉素土壤相关蛋白所致。而且沼泽归还到土壤中的凋落物较多,增加了土壤 SOC 和 TN 含量,改善了土壤结构,提高了土壤中 AMF 的数量及其侵染能力,同样也有利于 GRSP 的产生。另外,磷是影响植物和 AMF 生长发育的重要元素,显著影响 AMF 对植物的侵染(高秀兵等, 2016),土壤速效磷含量的增加或减少会通过抑制或促进 AMF 生长发育而引起 GRSP 含量的增加或减少(刘灵等, 2008)。本研究土壤中速效磷与 T-GRSP 含量呈显著正相关关系($P < 0.05$),沼泽土壤速效磷较高,可能促进了土壤中的菌丝降解,在土壤中产生大量 GRSP,因此其 T-GRSP 含量较高。易提取的组分由新近或分解部分产生,EE-GRSP 与 T-GRSP 的比值在一定程度上可以衡量 AMF 的活跃程度,EE-GRSP/T-GRSP 比值越大,说明易提取部分所占比例越大。本研究中沼泽表现出较高 EE-GRSP/T-GRSP 比值,说明沼泽中 AMF 的活跃程度高,这与其 EE-GRSP 相对高于其他 4 种土地利用方式是一致的。

4.2 不同土地利用方式球囊霉素相关土壤蛋白的影响因素

GRSP 被证明是丛枝菌根真菌的代谢产物 (Wright and Upadhyaya, 1996),其含量和组成受包括气候条件、植被类型、土壤特性、AMF 组成等众多因素的影响。在会仙岩溶湿地,由沼泽垦殖转变而来的 4 种土地利用方式(水稻田,旱地,果园和撂荒地),由于几十年不同土地利用方式的作用,其土壤质地、有机碳、GRSP 均发生了较大变化,与沼泽土壤相比有显著差异,这与人类活动对土壤生态

系统的干扰有关,种植方式、管理水平、施肥情况等均能改变土壤的理化性质。黄科朝等(2018)的研究结果表明,垦殖显著降低了土壤的微生物活性,土壤质量呈现下降趋势,对旱地土壤影响较为严重。本研究中,从不同土地利用方式 T-GRSP、EE-GRSP 和有机碳的含量来看,沼泽最高,说明在目前农业耕作方式下土壤质量呈一定的下降趋势,其中表土流失较严重的弃耕地土壤肥力下降最多,这进一步支持了黄科朝等(2018)的结论。表明土地利用方式能影响 GRSP 的积累,天然沼泽湿地更有利于土壤碳的封存,湿地被垦殖为其它不同土地利用方式后则降低了土壤碳的固定。前人研究表明,能影响丛枝菌根真菌生长的因子均会影响 GRSP 含量的变化(王建等, 2016)。GRSP 具有丰富的蛋白质和碳水化合物,这是对土壤有机碳贡献的基础 (Rillig et al., 2001)。GRSP 含量会随着土壤深度的增加而降低,主要是由于 GRSP 在土壤剖面的分布受土壤理化性质变化的影响较大(Wang et al., 2017)。表层的 GRSP 主要受到 SOC 和土壤养分的影响,而深层 GRSP 主要受到土壤理化性质,如容重、pH 值等的影响,土壤养分越高,容重越低,GRSP 会累积的越多(Wang et al., 2017)。

本研究表明沼泽相对有较高的有机碳含量,主要是因为相对人为干扰较小,而其它土地利用方式下干扰较大,加速了其土壤中有机质的分解,导致有机碳含量降低。相比于沼泽中的土壤,旱地,果园有较低的球囊霉素相关土壤蛋白,这主要是人为耕作过程加剧了球囊霉素土壤相关蛋白的分解。已有研究显示(Wright and Upadhyaya, 1998),球囊霉素相关土壤蛋白是难溶于水,含有金属离子的糖蛋白,这种糖蛋白不为蛋白酶水解,在自然状态下极为稳定。本研究中, T-GRSP 分别与蛋白酶呈显著正相关($P < 0.01$), EE-GRSP 与蛋白酶和粘粒呈显著正相关($P < 0.05$),表明土壤蛋白酶活性的增加可能引起 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量的增加,这从另一方面也说明会仙岩溶湿地球囊霉素土壤相关蛋白可能受蛋白酶水解作用的影响较小,蛋白酶并未导致会仙岩溶湿地球囊霉素土壤相关蛋白的水解,这与其他研究结论相一致(Wright and Upadhyaya, 1998; 唐宏亮等, 2009)。王建等(2016)的研究发现耕地及果园等长期耕作土壤中的球囊霉素土壤相关蛋白含量低于林地、草地。Preger et al.(2007)的研究表明持续性的耕作会导致土壤球囊霉素相关土壤蛋白流失,土壤肥力下降。有研究表明,中性至微酸性土壤有利于 AMF 发育,而 pH 继续减小则不利于 AMF 生长(贺学礼等, 2008),进而导致总球囊霉素产生量下降。本研究中, 5 种土地利用方式下土壤

pH 随土层深度增加而增大, 土壤 pH 与球囊霉素相关蛋白含量呈显著正相关。在 0–40 cm 土层各指标的平均值, 土壤 pH 值的大小关系依次为沼泽湿地 > 水稻田 > 旱地 > 果园 > 弃耕地 ($P < 0.05$), 土壤 T-GRSP 和 EE-GRSP 含量大小关系依次表现为沼泽湿地 > 水稻田 > 旱地 > 果园 > 弃耕地 ($P < 0.05$), 这表明, 沼泽湿地垦殖为其它不同土地利用方式后, 随着土壤 pH 降低, 导致了球囊霉素相关蛋白产生量的下降。本实验结果与 Preger et al.(2007)、阙弘等(2015)和王建等(2016)的研究结果相似。会仙湿地沼泽中易提取球囊霉素土壤蛋白占总球囊霉素土壤蛋白的比例高于其它 4 种土地利用方式, 这是由于易提取球囊霉素土壤蛋白主要表征土壤中新近产生的与土壤结合不紧密的球囊霉素(Lovelock et al., 2004), 沼泽中易提取球囊霉素土壤蛋白的产生量较多, 向总提取球囊霉素土壤蛋白的转化较少。由此推测, 随着近年来会仙岩溶湿地的生态保护工程, 人为扰动的减少, 加之植被恢复的增加, 通过 EE-GRSP 含量的增加, 会仙岩溶湿地土壤中的 GRSP 累积量将会增加, 并将促进土壤有机碳的固持。而在人为干扰较大的果园和撂荒地中, 易提取球囊霉素土壤蛋白的产生量较少, AMF 的活跃程度较低, 人为干扰活动驱动了表层土壤中易提取球囊霉素土壤蛋白向总提取球囊霉素土壤蛋白的转化。

GRSP 对退化土壤和作物的生态改造有十分重要的影响(Wright and Upadhyaya, 1996; Rillig et al., 2001), 对植物生长起到明显的促进作用(李晓林等, 1995)。对免耕、传统耕作和休闲地的研究表明, 由于 AMF 受人为活动的影响, 使得植物根系中的真菌菌丝减少, 致使免耕及休闲地土壤 GRSP 含量高于传统耕作(Liang, 2010)。阙弘等(2015)通过研究 5 种不同利用类型土壤的 GRSP 含量, 表明林地和草地的球囊霉素含量高于水稻田、茶园土和菜园土。本研究中, 水稻田、旱地、果园和撂荒地的 T-GRSP 和 EE-GRSP 与其对应土地利用方式的 SOC 含量相比较, T-GRSP/SOC 和 EE-GRSP/SOC 比值要高于沼泽, 这是因为尽管其自身 SOC 较低, 但 GRSP 发挥了积极地固碳作用; 而如果水稻田、旱地、果园和撂荒地的 T-GRSP 和 EE-GRSP 分别与沼泽的 SOC 来比较(原始对照地), 结果则显示其 T-GRSP/SOC 和 EE-GRSP/SOC 较低; 这也说明, 湿地垦殖后, 水稻田、旱地、果园和撂荒地这 4 种土地利用方式对湿地土壤碳库的贡献较低, 而沼泽的贡献则较高。T-GRSP/SOC 的大小范围介于 12.33%~19.73%, 高于 Rillig et al.(2001)所研究的在热带山地雨林中 T-GRSP/SOC 的比值(4%~5%)。总体上, GRSP 对会仙岩溶湿地土壤碳封存存有积极的贡献和正效应。会

仙岩溶湿地土壤 pH 与 T-GRSP、EE-GRSP、蛋白酶、SOC 和 TN 呈现显著正相关关系($P < 0.05$), 可能是因为提取球囊霉素土壤相关蛋白时浸提剂对 pH 有要求, 尽管测定 T-GRSP 和 EE-GRSP 时浸提了多次, 但酸性土壤对 T-GRSP 和 EE-GRSP 的测定还是存在一定的影响。垦殖降低了会仙岩溶湿地土壤的 pH(黄科朝等, 2018), 因此推测会仙岩溶湿地的酸化土壤环境, 影响了植物与丛枝菌根真菌间的共生关系, 降低了球囊霉素土壤相关蛋白的分泌。

本研究中, T-GRSP 与粘粒和粉粒呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关 ($P < 0.05$), EE-GRSP 与粘粒呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与砂砾呈显著负相关 ($P < 0.05$)。SOC 与粘粒和粉粒呈显著正相关 ($P < 0.05$), 蛋白酶与粘粒和粉粒呈显著正相关 ($P < 0.05$)。这表明, 相对于壤土, 黏土更有利于 GRSP 的累积。T-GRSP 和 EE-GRSP 与有机碳、全氮呈极显著正相关, 说明 GRSP 能够提高土壤碳库的含量, 这与在毛乌素沙地的研究结论相似(Bai et al., 2009), 也与张梦歌等(2020)在海南尖峰岭热带雨林的研究结果一致, 进一步说明球囊霉素土壤相关蛋白是土壤有机碳、氮的一个重要来源。前人(Rillig et al., 2001; Qian et al., 2012)研究认为 GRSP 是土壤有机碳库的重要组成部分, 本研究中 GRSP 与 SOC 之间的正相关关系也证实这一结论。因此, 保护天然沼泽湿地不被破坏, 有利于保护沼泽土壤碳库。球囊霉素土壤相关蛋白的积累和组成受多种生态环境因子, 如气候条件、植被类型、土壤特性、AMF 组成等的影响(Rillig et al., 2001; Preger et al., 2007)。总球囊霉素土壤相关蛋白和易提取球囊霉素土壤相关蛋白能综合反映土壤有机碳动态、养分循环及土壤健康状况, 因此有必要将其作为土壤质量及功能评价的指示指标, 包括植物根系的丛枝菌根真菌的侵染状况, 来进一步深入研究。

5 结论

(1) 会仙岩溶湿地天然沼泽土壤总球囊霉素相关土壤蛋白和易提取球囊霉素相关土壤蛋白含量较高, 球囊霉素相关土壤蛋白是会仙岩溶湿地土壤中的一个重要碳库。球囊霉素相关土壤蛋白在不同土地利用方式及各土层间均表现出显著差异, 具有明显的垂直分布特征。

(2) 会仙岩溶湿地天然沼泽土壤中易提取球囊霉素相关土壤蛋白占总球囊霉素相关土壤蛋白比例高于其它耕作土壤。土地利用方式影响了会仙岩溶湿地土壤中 GRSP 的积累, 表层土壤(0–10 cm)中 GRSP 含量受湿地垦殖的影响显著。T-GRSP 和 EE-GRSP 对 SOC 的贡献具有重要影响, T-GRSP 对

SOC 的贡献相对较高。

(3)总球囊霉素相关土壤蛋白、易提取球囊霉素相关土壤蛋白分别与有机碳和全氮极显著正相关,与土壤 pH 显著正相关。粉粒、SOC、AN 和 TN 是影响球囊霉素相关蛋白分布特征和反映会仙喀斯特湿地土壤营养状况的主要因子,黏土更有利于会仙岩溶湿地 GRSP 的累积。

(4)球囊霉素相关蛋白对会仙岩溶湿地土壤质量和土壤碳库有着重要的指示作用,可用 GRSP 的含量来评价湿地土壤质量状况,沼泽湿地垦殖为其它土地利用方式后,降低了 GRSP 的含量。随着桂林会仙喀斯特湿地国家公园的建设,天然沼泽湿地的恢复,有利于促进 GRSP 的产生量和积累量,进而提高了湿地对土壤 SOC 的封存作用。

致谢:感谢兰州大学于倩倩,田垒,程桂霞等在实验样品分析方面提供的帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见,特此一并谢意!

Acknowledgements:

This study was supported by Natural Science Foundation of Guangxi (Nos. 2018GXNSFAA050069 and 2020GXNSFBA297048), National Natural Science Foundation of China (Nos. 31760162 and 41361057), Guangxi Key Science and Technology Innovation Base on Karst Dynamics (No. KDL & Guangxi202004), Key Research and Development Program of Guangxi (No. Guike AB21220057), and Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin (No. LRCSU21K0203).

参考文献:

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社.
- 高秀兵, 邢丹, 陈瑶, 周富裕, 赵华富, 陈娟, 郭灿, 周玉锋. 2016. 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, 36(2): 191-200.
- 关松荫. 1986. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社.
- 贺海升, 王琼, 裴忠雪, 王慧梅, 王文杰. 2015. 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[J]. 生态学杂志, 34(12): 3466-3473.
- 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[J]. 应用生态学报, 19(12): 2711-2716.
- 黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武. 2018. 垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响[J]. 环境科学, 39(4): 1813-1823.
- 孔祥斌, 张凤荣, 齐伟, 徐艳. 2003. 集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响——以河北省曲周县为例[J]. 地理学报, 58(3): 333-342.
- 李强. 2021. 土地利用方式对岩溶断陷盆地土壤细菌和真核生物群落结构的影响[J]. 地球学报, 42(3): 417-425.

- 李世杰, 蔡德所, 张宏亮, 沈德福, 赵湘桂, 李春海. 2009. 桂林会仙岩溶湿地环境变化沉积记录的初步研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 27(2): 94-100.
- 李晓林, 周文龙, 曹一平, 张俊伶. 1995. VA 菌根菌丝对不同形态磷肥的吸收利用[J]. 北京农业大学学报, 4(3): 305-311.
- 刘瑾, 叶思源, 王家生. 2017. 辽河三角洲滨海湿地有机碳的时空演变、环境功能及其埋藏机制[J]. 地球学报, 38(S1): 83-86.
- 刘灵, 廖红, 王秀荣, 严小龙. 2008. 磷有效性对大豆菌根侵染的调控及其与根构型、磷效率的关系[J]. 应用生态学报, 4(3): 564-568.
- 阙弘, 葛阳洋, 康福星, 凌婉婷. 2015. 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, 47(4): 719-724.
- 沈育伊, 张德楠, 徐广平, 滕秋梅, 周龙武, 黄科朝, 牟芝熠, 孙英杰. 2021. 会仙喀斯特湿地三种典型植物叶片碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)特征及其指示意义[J]. 广西植物, 41(5): 769-779.
- 唐宏亮, 刘龙, 王莉, 巴超杰. 2009. 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, 17(6): 1137-1142.
- 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 2016. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. 应用生态学报, 27(2): 634-642.
- 吴阳, 李强, 徐红伟, 乔磊磊, 李袁泽, 薛菱. 2018. 氮添加对白羊草土壤球囊霉素含量特征的影响[J]. 水土保持研究, 25(5): 61-65, 71.
- 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕. 2019. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. 环境科学, 40(3): 1491-1503.
- 张梦歌, 石兆勇, 杨梅, 卢世川, 王旭刚, 徐晓峰. 2020. 热带山地雨林土壤球囊霉素的分布特征[J]. 生态环境学报, 29(3): 457-463.

References:

- BAI C M, HE X L, TANG H L, SHAN B Q, ZHAO L L. 2009. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 41(5): 941-947.
- BAO Shi-dan. 2000. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press(in Chinese).
- COMIS D. 2002. Glomalin: Hiding place for a third of the world's stored soil carbon[J]. Agricultural Research, 50(9): 4-7.
- DAYAMBA S D, DJOUDI H, ZIDA M, SAWADO L, VERCHOT L. 2016. Biodiversity and carbon stocks in different land use types in the Sudanian Zone of Burkina Faso, West Africa[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 216: 61-72.
- EDENHOFER O, PICHS-MADRUGA R, SOKONA Y. 2014. Summary for policymakers[C]//Climate change 2014: Mitigation of climate change. IPCC's Fifth Assessment Report.
- GAO Xiu-bin, XING Dan, CHEN Yao, ZHOU Fu-yu, ZHAO Hua-fu, CHEN Juan, GUO Can, ZHOU Yu-feng. 2016. Contents of glomalin-related soil protein and its correlations with

- soil factors in the rhizosphere of tea plant [*Camellia Sinensis*(L.) O. Kuntze][J]. Journal of Tea Science, 36(2): 191-200(in Chinese with English abstract).
- GILLESPIE A W, FARRELL R E, WALLY F L, ROSS A R S, LEINWEBER P, ECKHARDT K U, REGIER T Z, BLYTH R I R. 2011. Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials[J]. Soil Biology and Biochemistry, 43(4): 766-777.
- GUAN Song-ying. 1986. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press(in Chinese).
- HALVORSON J J, GONZALEZ J M. 2006. Bradford reactive soil protein in Appalachian soils: distribution and response to incubation, extraction reagent and tannins[J]. Plant and Soil, 286(1): 339-356.
- HE Hai-sheng, WANG Qiong, PEI Zhong-xue, WANG Hui-mei, WANG Wen-jie. 2015. Spatial variations of glomalin-related soil protein in *Larix gmelinii* plantations and possible relations with soil physicochemical properties[J]. Chinese Journal of Ecology, 34(12): 3466-3473(in Chinese with English abstract).
- HE Xue-li, BAI Chun-ming, ZHAO Li-li. 2008. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Astragalus adsurgens* root-zone soil in Mu Us sand land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 19(12): 2711-2716(in Chinese with English abstract).
- HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, HUANG Yu-qing, ZHANG De-nan, SUN Ying-jie, LI Yan-qiong, HE Wen, ZHOU Long-wu. 2018. Effects of reclamation on soil nutrients and microbial activities in the Huixian karst wetland in Guilin[J]. Environmental Science, 39(4): 1813-1823(in Chinese with English abstract).
- JANOS D P, GARAMSZEGI S, BELTRAN B. 2008. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 40(3): 728-739.
- KONG Xiang-bin, ZHANG Feng-rong, QI Wei, XU Yan. 2003. The influence of land use change on soil fertility in intensive agricultural region: A case study of Quzhou County, Hebei[J]. Acta Geographica Sinica, 58(3): 333-342(in Chinese with English abstract).
- LI Qiang. 2021. Land-use types leading to distinct ecological patterns of soil bacterial and eukaryota communities in karst graben basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 42(3): 417-425(in Chinese with English abstract).
- LI Shi-jie, CAI De-suo, ZHANG Hong-liang, SHEN De-fu, ZHAO Xiang-gui, LI Chun-hai. 2009. Environmental changes record derived from sediment cores in Huixian karst wetlands, Guilin, China[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science Edition), 27(2): 94-100(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao-lin, ZHOU Wen-long, CAO Yi-ping, ZHANG Jun-lin. 1995. The role of VA-mycorrhizal hyphae in phosphorus uptake of red clover from phosphorus sources of different solubilities[J]. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 4(3): 305-311(in Chinese with English abstract).
- LIANG W J. 2010. Effect of tillage systems on glomalin-related soil protein in an aquic brown soil[J]. Research Journal of Biotechnology, 5(3): 10-13.
- LIU Jin, YE Si-yuan, WANG Jia-sheng. 2017. Organic carbon distribution, function and its burial processes in the coastal wetlands of the Liaohe Delta, Northeast of China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(S1): 83-86(in Chinese with English abstract).
- LIU Ling, LIAO Hong, WANG Xiu-rong, YAN Xiao-long. 2008. Regulation effect of soil pavailability on mycorrhizal infection in relation to root architecture and pefficiency of Glycine max[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 4(3): 564-568(in Chinese with English abstract).
- LOVELOCK C E, WRIGHT S F, CLARK D A, RUESS R W. 2004. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. Journal of Ecology, 92(2): 278-287.
- MITSCH W J, BERNAL B, NAHLIK A M, MANDER U, ZHANG L, ANDERSON C J, JORGENSEN S E, BRIX H. 2013. Wetlands, carbon, and climate change[J]. Landscape Ecology, 28(4): 583-597.
- NICHOLS K A, WRIGHT S F. 2006. Carbon and nitrogen in operationally defined soil organic matter pools[J]. Biology and Fertility of Soils, 43(2): 215-220.
- NIE J, ZHOU J M, WANG H Y, CHEN X Q, DU C W. 2007. Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen[J]. Pedosphere, 17(3): 295-302.
- PREGER A C, RILLIG M C, JOHNS A R, DUPREEZ C C, LOBE I, AMELUNG W. 2007. Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: A chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld[J]. Soil Biology and Biochemistry, 39(2): 445-453.
- PURIN S, RILLIG M C. 2007. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin: Limitations, progress, and a new hypothesis for its function[J]. Pedobiologia, 51(2): 123-130.
- QIAN K M, WANG L P, YIN N N. 2012. Effects of AMF on soil enzyme activity and carbon sequestration capacity in reclaimed mine soil[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 22(4): 553-557.
- QUE Hong, GE Yang-yang, KANG Fu-xing, LING Wan-ting. 2015. Content and distribution of glomalin-related soil protein in soils of Nanjing under different land use types[J]. Soils, 47(4): 719-724(in Chinese with English abstract).
- QUIQUAMPOIX H, BURNS R G. 2007. Interactions between proteins and soil mineral surfaces: Environmental and health consequences[J]. Elements, 3(6): 401-406.
- RILLIG M C, MUMMEY D L. 2006. Mycorrhizas and soil structure[J]. New Phytologist, 171(1): 41-53.
- RILLIG M C, RAMSEY P W, MORRIS S, PAUL E A. 2003. Glomalin, an arbuscular-mycorrhizal fungal soil protein, responds

- to land-use change[J]. *Plant and Soil*, 253: 293-299.
- RILLIG M C, WRIGHT S F, NICHOLS K A, SCHMIDT W F, TORN M S. 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils[J]. *Plant and Soil*, 233: 167-177.
- RILLIG M C, WRIGHT S F, SHAW M R, FIELD C B. 2002. Artificial climate warming positively affects arbuscular mycorrhizae but decreases soil aggregate water stability in an annual grassland[J]. *Oikos*, 97(1): 52-58.
- RILLIG M C. 2004. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4): 355-363.
- ROSIER C L, HOYE A T, RILLIG M C. 2006. Glomalin-related soil protein: Assessment of current detection and quantification tools[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8): 2205-2211.
- SHEN Yu-yi, ZHANG De-nan, XU Guang-ping, TENG Qiu-mei, ZHOU Long-wu, HUANG Ke-chao, MOU Zhi-yi, SUN Ying-jie. 2021. Characteristics and significance of $\delta^{13}\text{C}$ of three typical aquatic plants in the Huixian karst wetland, Guilin[J]. *Guihaia*, 41(5): 769-779(in Chinese with English abstract).
- SPOHN M, GIANI L. 2011. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(5): 1081-1088.
- TANG Hong-liang, LIU Long, WANG Li, BA Chao-jie. 2009. Effect of land use type on profile distribution of glomalin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 17(6): 1137-1142(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian, ZHOU Zi-yan, LING Wan-ting. 2016. Distribution and environmental function of glomalin-related soil protein: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(2): 634-642(in Chinese with English abstract).
- WANG W J, ZHONG Z L, WANG Q, WANG H M, FU Y J, HE X Y. 2017. Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles[J]. *Scientific Reports*, 7(1): 13003.
- WRIGHT S F, STARR J L, PALTINEANU I C. 1999. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage management transition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 63(6): 1825-1829.
- WRIGHT S F, UPADHYAYA A. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Science*, 161(9): 575-586.
- WRIGHT S F, UPADHYAYA A. 1998. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant and Soil*, 198: 97-107.
- WU Yang, LI Qiang, XU Hong-wei, QIAO Lei-lei, LI Yuan-ze, XUE Sha. 2018. Effects of nitrogen addition on characteristic of glomalin in the soil of *bothriochloa ischaemum*[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 25(5): 61-65, 71(in Chinese with English abstract).
- XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, ZHANG De-nan, SUN Ying-jie, ZHANG Zhong-feng, ZHOU Long-wu, DUAN Chun-yan. 2019. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian karst wetland in Guilin[J]. *Environmental Science*, 40(3): 1491-1503(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Meng-ge, SHI Zhao-yong, YANG Mei, LU Shi-chuan, WANG Xu-gang, XU Xiao-feng. 2020. Elevational distribution of glomalin-related soil proteins in a tropical montane rain forest[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 29(3): 457-463(in Chinese with English abstract).