DOI: 10.20103/j.stxb.202504090828

彭桂圆,郭家文,黄施楚,宋佳雨,杨智杰,熊德成,邓军,刀静梅,陈仕东.增温对亚热带典型树种幼苗土壤球囊霉素相关土壤蛋白含量的影响.生态学报,2026,46(2):997-1005.

Peng G Y, Guo J W, Huang S C, Song J Y, Yang Z J, Xiong D C, Deng J, Dao J M, Chen S D.Effects of warming on glomalin-related soil protein in soils of typical subtropical tree species.Acta Ecologica Sinica,2026,46(2):997-1005.

增温对亚热带典型树种幼苗土壤球囊霉素相关土壤蛋白含量的影响

彭桂圆[1,2],郭家文[4],黄施楚[1,2],宋佳雨[1,2],杨智杰[1,2,3],熊德成[1,2,3],邓 军[4],刀静梅[4],陈仕东[1,2,3,*]

1 福建师范大学地理科学学院,福州 350117

2 福建师范大学福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站,三明 365002

3 福建师范大学地理研究所,福州 350117

4 云南省农业科学院甘蔗研究所,开远 661699

摘要:球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin-Related Soil Protein,GRSP)因其稳定性强、不易分解,被认为是土壤稳定性有机碳库的重要组成部分。米槠是亚热带常绿阔叶林的典型建群种;杉木是我国分布最广、面积最大的人工林树种。然而,目前关于增温实验对亚热带森林土壤中 GRSP 含量变化的研究仍较为匮乏,尤其是不同树种对增温响应的差异尚不明确。通过土壤电缆增温(+4 ℃)控制实验,初步探讨增温对亚热带典型树种幼苗土壤 GRSP 含量的影响。结果表明:2022 年 6 月 28 日—8 月 2 日期间,米槠土壤湿度整体高于杉木,增温后米槠土壤湿度显著下降。米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata)幼苗土壤易提取球囊霉素含量为 2.70 μg/g,显著高于杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)幼苗土壤(2.03 μg/g)。增温显著降低了土壤易提取球囊霉素(EE-GRSP)含量(米槠降低了 34.9%,杉木降低了 14.8%)。冗余分析显示,米槠和杉木幼苗土壤 EE-GRSP 含量均与土壤铵态氮含量呈显著负相关,而米槠土壤中微生物生物量碳含量的大幅下降,表明增温通过影响氮素供应和微生物活性共同调控 GRSP 的分泌与积累。研究揭示了增温与树种类型交互作用下 GRSP 动态变化的机制,为全球气候变化背景下森林土壤碳稳定性评估及生态系统碳汇管理提供了数据支持和科学依据。

关键词:土壤增温; 球囊霉素; 杉木; 米槠; 亚热带树种

Effects of warming on glomalin-related soil protein in soils of typical subtropical tree species

PENG Guiyuan[1,2], GUO Jiawen[4], HUANG Shichu[1,2], SONG Jiayu[1,2], YANG Zhijie[1,2,3], XIONG Decheng[1,2,3], DENG Jun[4], DAO Jingmei[4], CHEN Shidong[1,2,3,*]

1 *school of Grographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350117, *China*

2 *Fujian Normal University Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming* 365002, *China*

3 *Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou* 350117, *China*

4 *Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan* 661699, *China*

Abstract: Glomalin-related soil protein (GRSP), a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), is broadly distributed in terrestrial soils. Due to its recalcitrant molecular structure, strong binding affinity to soil particles, and resistance to microbial degradation, GRSP is increasingly recognized as a major contributor to the stable soil organic

基金项目:国家自然科学基金项目(32271727);福建省自然科学基金项目(2023I0010);福建省公益类科研院所专项(2025R1002004)

收稿日期:2025-04-09; **网络出版日期**:2025-10-15

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: sdchen@fjnu.edu.cn

carbon pool. Understanding how environmental factors regulate GRSP production and turnover is crucial for evaluating long-term carbon storage in forest ecosystems, especially under climate change scenarios. Although ecologically important, how GRSP responds to soil warming, especially in relation to different vegetation types, remains unclear and hinders accurate predictions of soil carbon dynamics in subtropical forests. This study examined how soil warming affects GRSP levels in the rhizosphere of two ecologically distinct but regionally significant tree species: *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata, a dominant species in natural evergreen broadleaf forests, and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook, the most widely planted commercial timber tree in southern China. Soil warming was simulated in the field using heating cables to increase the temperature by 4 ℃. Soil samples were collected from seedling plots of both species between June 28 and August 2, 2022, during the peak growing season. These samples were subsequently analyzed for easily extractable GRSP (EE-GRSP), microbial biomass carbon (MBC), and ammonium nitrogen (NH_4^+-N) to gain insights into microbial and nutrient dynamics under warming. To explore the associations between GRSP and key soil biogeochemical factors, redundancy analysis (RDA) was employed as a multivariate statistical approach. Results showed that under ambient conditions, *C. carlesii* soils maintained higher moisture and EE-GRSP levels (2.70 μg/g) than *C. lanceolata* soils (2.03 μg/g). In contrast, when exposed to warming, *C. carlesii* soils exhibited a more substantial reduction in soil moisture than *C. lanceolata*, suggesting that *C. carlesii* may be more sensitive to elevated temperatures and associated hydrological stress. EE-GRSP levels declined significantly in both species under warming, with a sharper drop in *C. carlesii* (34.9%) than in *C. lanceolata* (14.8%). This reduction was accompanied by a 28.4% decline in MBC in *C. carlesii* soils, suggesting that reduced microbial activity under warming may partly explain the drop in GRSP. Moreover, a significant negative correlation between EE-GRSP and NH_4^+-N was observed in both species, implying that nitrogen availability may constrain GRSP production. The marked decline in MBC in *C. carlesii* soils further indicates that warming may indirectly reduce GRSP production by lowering microbial activity. Overall, this study provides new insights into how soil warming and tree species identity interact to shape GRSP dynamics, offering empirical evidence to refine evaluations of soil carbon stability and to guide adaptive management of forest carbon sinks in a changing climate.

Key Words: soil warming; glomalin-related soil protein; *cunninghamia lanceolata*; *castanopsis carlesii*; subtropical tree species

IPCC 第五次评估报告指出,在 RCP 8.5 情景下,预计本世纪末全球地表平均温度将上升 4 ℃[1]。球囊霉素相关土壤蛋白(Glomalin-Related Soil Protein,GRSP)因其稳定性强、难以分解,且与土壤有机碳含量呈显著正相关,被视为土壤稳定性有机碳库的重要组成部分[2—3]。亚热带地区作为全球碳循环的重要区域,其土壤有机碳库对维持全球碳平衡有重要影响[4—5]。然而,目前关于亚热带森林中增温实验的研究尚显不足[6—7],尤其是增温对土壤 GRSP 含量的影响尚未得到充分探讨。因此,探讨增温条件下亚热带森林生态系统中 GRSP 的变化及其潜在机制,对理解气候变化背景下亚热带森林土壤有机碳的稳定性具有重要的科学意义。

植被类型、气候条件及土壤特性等是影响土壤 GRSP 含量及其分布的重要环境因子[8—9],植被类型可通过影响微生物底物供应,改变微生物生物量及养分有效性等影响土壤 GRSP 含量。Zhang 等[10]发现微生物生物量碳含量与 GRSP 含量呈显著正相关关系。马尾松林土壤中易提取球囊霉素(Easily extracted GRSP,EE-GRSP[11])含量与有效氮含量存在显著正相关关系[12]。一些研究发现温度是影响土壤 GRSP 含量变化的重要因子[13],但增温后土壤 GRSP 含量变化的相关研究结果仍存在较大争议[14]。Chen 等[15]发现 GRSP 含量与年平均温度呈正相关,且 GRSP 丰度随着纬度的降低而增加,与纬度呈负相关。杨梅等[16]在青藏高原四个海拔梯度的增温试验中发现,增温后总提取球囊霉素(Total GRSP,T-GRSP[11])和 EE-GRSP 含量无显著变化。

在亚热带森林生态系统中,杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook)和米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata)分别代表人工林和天然常绿阔叶林的典型建群种。杉木广泛分布于亚热带地区,种植面积

约占人工林种植面积的 25.0%,是我国南方栽培最广的一种速生用材树种[17—18]。米槠具有涵养水源、保持水土、防灾减灾等生态功能[19]。天然常绿阔叶林的有机碳含量较杉木林高[20]。然而,当前有关亚热带森林生态系统中 GRSP 含量对气候变暖响应的研究仍相对不足,尤其是在不同树种类型间的差异性方面缺乏系统探索。因此,本研究以福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站——陈大观测点的中宇宙增温控制试验平台所种植的米槠和杉木幼苗为研究对象,并提出科学问题:增温是否显著影响亚热带森林土壤 GRSP 含量?其变化大小及其可能机制是否因树种而异?研究结果将为提升森林生态系统的碳汇能力和稳定性提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

如图 1 所示,试验地位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站—陈大观测点(26°19′N,117°36′E)。该地区属中亚热带季风气候,年平均气温 19.5 ℃,年降水量为 1749 mm(主要集中在 3 月—8 月),年均蒸发量为 1585 mm,相对湿度为 81.0%。地形以低山丘陵为主,平均海拔约 300 m。

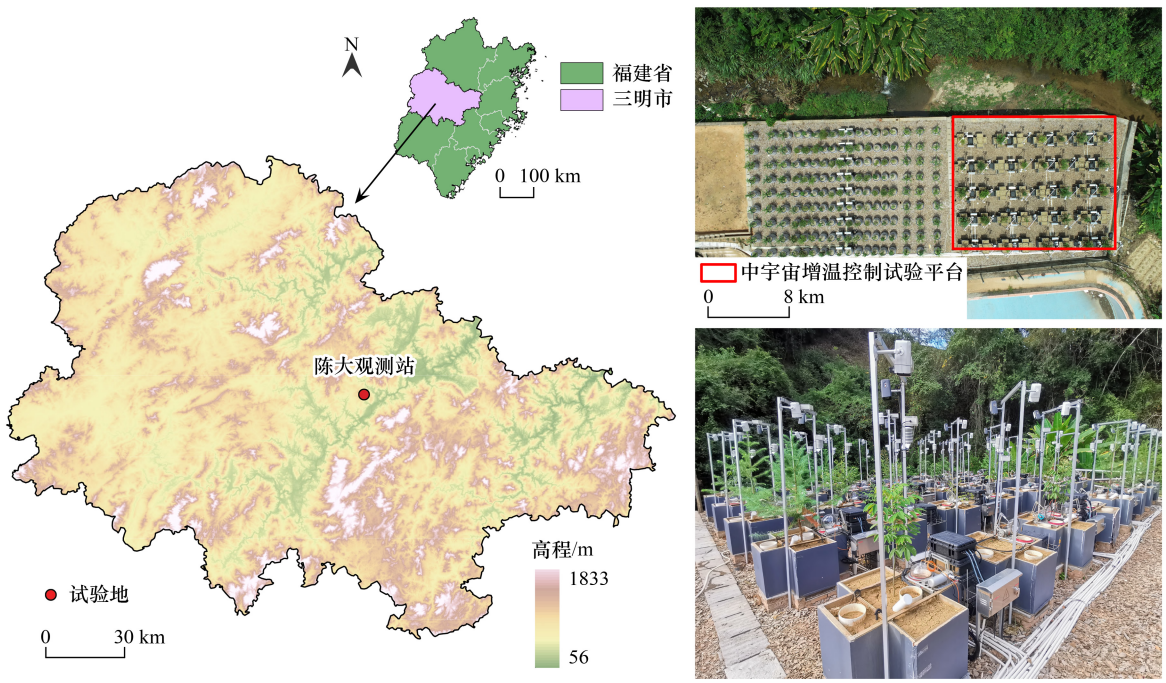

图 1　福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站——陈大观测站

Fig.1　Chenda Observation Station at Fujian Sanming Forest Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station

1.2　实验设计

本研究于 2021 年初采用随机区组实验设计,在自然条件下设置土壤增温(环境温度+4 ℃,W)和对照(环境温度,CT)两种处理,每种处理各设 5 个重复,共建立 20 个根箱,根箱由两个尺寸分别为长 1.1 m,宽 0.6 m 和长 0.6 m,宽 0.5 m 的 PVC 板焊接而成。选用源自云南混合均匀的 C_4 土壤(甘蔗土)进行填充,土壤的本底指标参见表 1。种植幼苗选取一年生的 C_3 植物(米槠和杉木)。待根箱内植物稳定生长 10 个月后,于 2021 年 11 月开始通电增温。土壤增温方式采用电缆增温法,埋设深度为 10 cm,对照处理仅埋设电缆但不通电。稳定增温 8 个月后,于 2022 年 7 月份,采用直径为 5 cm 的土钻对根箱进行土壤取样,取土深度为 0—10 cm(在种植树种的根箱取土要尽量靠近根系取样),每个样品分别混合后用自封袋装好并做好标记。每个根箱分别设置 2 个 EC-5 土壤水分传感器(Decagon, USA)用于监测 10 cm 深度土壤水分的变化情况,监控频率为每小

时 1 次,2022 年 6 月 28 日—2022 年 8 月 2 日土壤湿度变化参见图 2。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤理化性质

土壤有机碳(Soil organic carbon,SOC)和土壤有机氮(Soil organic nitrogen,SON)测定:将风干土过 100 目的筛,再称取 1 g,用碳氮元素分析仪(Elementar VarioMAX,Germany)进行测定;pH 值测定:按土:水=1:2.5(质量比)加入去 CO_2 的蒸馏水,震荡 20 min,静置 30 min,取上清液,并用玻璃电极 pH 计测定;总磷(Total phosphorus,TP)和有效磷(Available phosphorus,AP)分别采用 $HClO_4$-H_2SO_4消解法和 M3 浸提法提取[21],用连续流动分析仪(Skalar San^{++}, Skalar,荷兰)测定;土壤铵态氮(Soil ammonium nitrogen,NH_4^+-N)和土壤硝态氮(Soil Nitrate Nitrogen,NO_3^--N)测定:采用 2 mol/L 的氯化钾溶液按照 1:4 的土水比进行浸提,经震荡、离心和过滤后使用连续流动分析仪测定;有效氮(Available Nitrogen, AN)测定:称取 5 g 过 2 mm 筛的鲜土,加入 20 mL 的 KCl 溶液(2 mol/L),震荡离心之后,经 0.45 μm 滤膜抽滤,再用连续流动分析仪进行测定;可溶性有机碳(Dissolved organic carbon,DOC)的测定:称取 5 g 过 2 mm 筛的鲜土加入去离子水,并且保证土水比例为 1:4,震荡离心之后,经 0.45 μm 滤膜抽滤,再用总有机碳分析仪(TOC-VCPH/CPN, Japan)测定[22]。微生物生物量碳(Microbial biomass carbon,MBC)测定:采用熏蒸法[23]进行提取。首先称取鲜土样品 5 g 熏蒸24 h,并保证一个空白。熏蒸完成后,将土壤样品转移入 50 mL 的离心管中,再加入 20 mL 的硫酸钾溶液(0.5 mol/L),然后用 160 转/min 速度振荡 30 min 后,在离心机上以 4000 转/min 转速离心 10 min 后取上清液用0.45 μm滤膜过滤。另一份土壤样品不做熏蒸,直接用 20 mL 的硫酸钾溶液(0.5 mol/L)进行提取。最后采用连续流动分析仪进行测定。

微生物生物量碳(MBC)的计算公式为:

$$MBC = \Delta E_c / K_c$$

式中,ΔE_c是熏蒸与未熏蒸土壤微生物生物量碳之间的差值,K_c为转换系数,为 0.45。

1.3.2 球囊霉素含量测定

GRSP 含量按考马斯亮蓝法分别测定 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量[24]。EE-GRSP 测定:称取过 2 mm 筛的风干土 1 g 放入离心管中,加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(20 mmol/L,pH 7.0),在 121 ℃和 103 kPa 条件下提取 30 min。冷却后立即在 10000xg 下离心 10 min(4 ℃),收集上清液,上清液即为 EE-GRSP 的提取液,置于4 ℃冰箱冷藏。T-GRSP 测定:称取过 2 mm 筛的风干土 1 g 放入离心管中,加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(50 mmol/L,pH 8.0),混合摇匀,在 121 ℃和 103 kPa 条件下准确量取上清液,提取的上清液应该迅速在10000xg下离心 10 min(4 ℃),将上浮物从土壤中分离出去,收集上清液。然后加入与提取出来的上清液等体积的上述柠檬酸钠浸提剂于离心管底部剩余的土壤中,每次重复提取时,保证提取液体积固定且摇匀土样,使土样与浸提剂充分接触,连续循环提取,直至上清液基本呈无色。上清液储藏于 4 ℃设备内隔天分析。

测定前将提取液经 10000xg 离心 10 min。然后吸取 0.5 mL EE-GRSP 或 T-GRSP 提取液,加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂颠倒混匀,显色 5 min。用 UV-2450(岛津)紫外可见光谱仪在 595 nm 波长下比色。用牛血清蛋白(BSA)作为标准液,绘制标准曲线,即可求出球囊霉素含量。

表 1 试验地土壤性质

Table 1 Soil properties of the experimental site

树种 Plants	土壤有机碳 SOC/(g/kg)	土壤有机氮 SON/(g/kg)	总磷 TP/(g/kg)	pH	速效磷 AP/(mg/kg)	有效氮 AN/(mg/kg)
米槠 *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata	20.42±0.38	1.69±0.02	1.17±0.06	8.03±0.02	23.65±0.54	7.53±1.13
杉木 *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook	20.51±0.41	1.66±0.03	1.14±0.02	8.06±0.02	24.30±0.50	4.42±0.13

SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;SON:土壤有机氮 Soil organic nitrogen;TP:总磷 Total phosphorus;AP:速效磷 Available phosphorus;AN:有效氮 available nitrogen;表中数字为平均值±标准误

1.4　数据分析

本文数据采用 Excel 进行整理;同时采用双因素方差分析和独立样本 T 检验明确不同树种和不同处理下 T-GRSP、EE-GRSP 含量的差异;运用冗余分析法探究环境因子对 GRSP 的影响。以上统计分析均使用 SPSS 27 软件和 Canoco 5.0 进行,利用 Origin 2024 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　增温对杉木和米槠幼苗土壤湿度的影响

2022 年 6 月 28 日至 8 月 2 日期间,杉木和米槠幼苗土壤湿度均呈下降趋势,米槠幼苗土壤湿度整体高于杉木幼苗土壤。增温后杉木幼苗土壤湿度无显著变化,米槠幼苗土壤湿度由 22.7%下降至 17.4%。

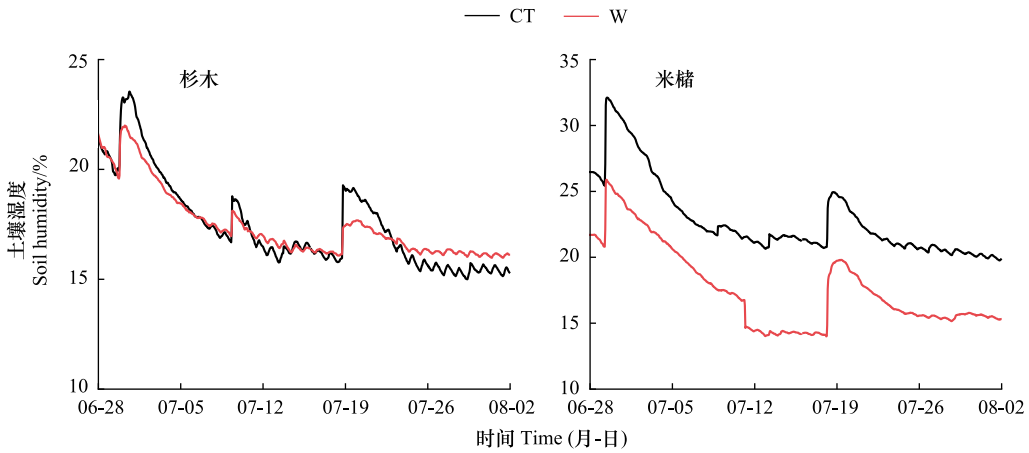

图 2　杉木和米槠土壤湿度动态变化

Fig.2　Dynamic changes of soil moisture in *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis carlesii*

W: 增温 Warming; CT: 对照 Control

2.2　增温和树种对土壤可溶性碳氮含量的影响

在杉木幼苗土壤中,增温后土壤 NO_3^--N 含量降低了 17.6%,NH_4^+-N、MBC、AN 含量分别增加了 15.8%、36.6%、3.6%。在米槠幼苗土壤中,增温后土壤 MBC、AN 含量降低了 28.4%、21.7%,土壤 NH_4^+-N、NO_3^--N 含量增加了 2.4%、11.1%(图 3)。

在对照处理中,杉木幼苗土壤 NH_4^+-N、MBC、AN 含量分别比米槠幼苗土壤低 47.8%、75.5%、70.4%(P<0.01),NO_3^--N 含量比米槠幼苗土壤高 50.2%(P<0.001)。在增温处理中,杉木幼苗土壤 NH_4^+-N、AN 含量分别比米槠幼苗土壤低 30.7%、28.8%,NO_3^--N、MBC 含量比米槠幼苗土壤高 32.9%、7.9%(图 3)。

2.3　增温和树种对球囊霉素含量的影响

增温后 EE-GRSP 含量显著下降,而 T-GRSP 含量无显著变化。在对照处理中,杉木幼苗土壤 EE-GRSP 含量为 2.03 μg/g,增温后为 1.73 μg/g,下降了 14.8%(P<0.001);米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量为 2.70 μg/g,增温后为 1.76 μg/g,下降了 34.9%(P<0.001);在对照处理中,杉木和米槠幼苗土壤 T-GRSP 含量分别为 15.18 μg/g和 14.65 μg/g,增温后分别为 14.65 μg/g 和 15.06 μg/g,均无显著变化(图 4)。

增温后不同树种土壤 GRSP 含量表现出一定差异。在对照处理中米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量比杉木幼苗土壤高 24.8%,T-GRSP 含量则比杉木幼苗土壤低 3.6%。而增温后米槠幼苗土壤的 EE-GRSP 和 T-GRSP 分别比杉木高 1.7%和 2.8%,即增温后米槠幼苗土壤 GRSP 含量略高于杉木(图 4)。

冗余分析(RDA)结果显示 NH_4^+-N 含量是影响杉木和米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量的关键因子,杉木和米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量均与土壤 NH_4^+-N 含量呈显著负相关,增温后 EE-GRSP 含量随 NH_4^+-N 含量的增加

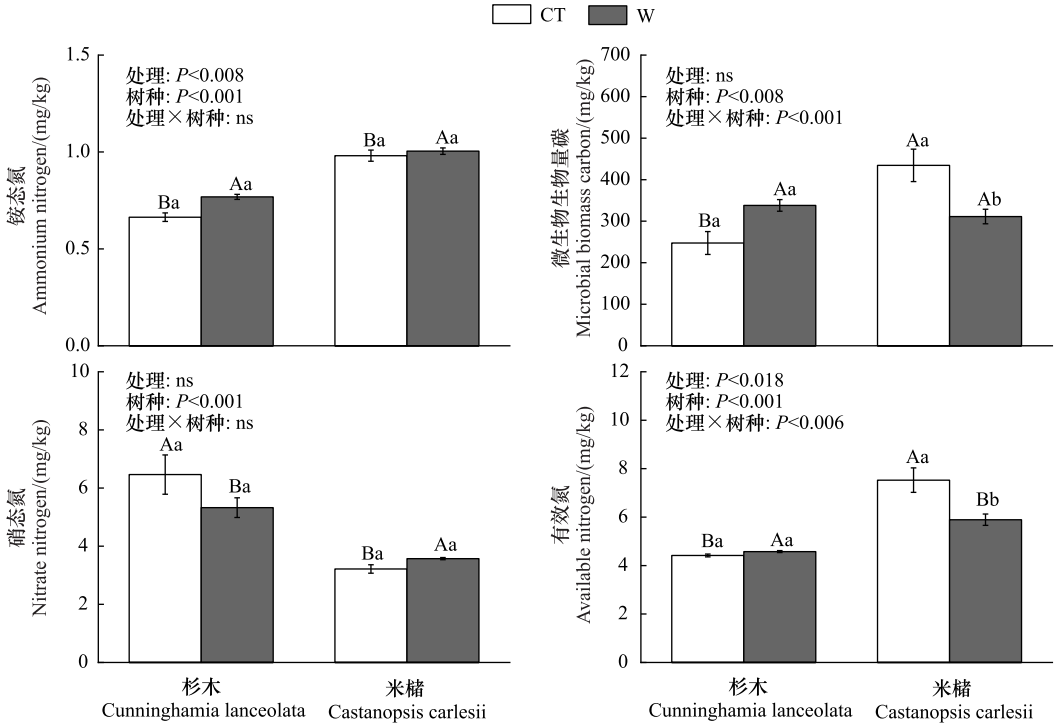

图 3 增温和树种对可溶性碳氮含量的影响

Fig.3 Effects of soil warming and tree species on soil dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen content

不同小写字母表示相同树种不同处理间差异显著,不同大写字母表示同一处理不同树种间差异显著(P<0.05)

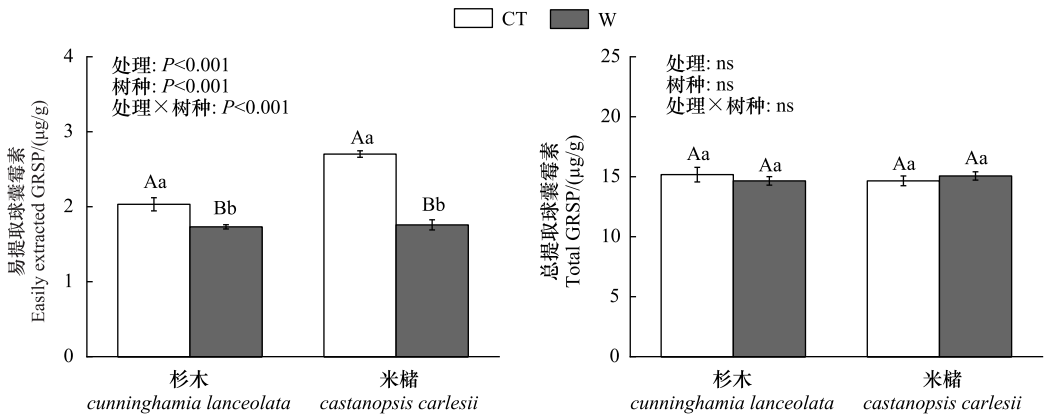

图 4 不同处理和树种对球囊霉素含量的影响

Fig.4 Effects of different treatments and tree species on glomalin content

而减少。同时,在米槠幼苗土壤中 EE-GRSP 含量与 MBC 含量呈显著正相关(图 5)。

3 讨论

3.1 增温对球囊霉素含量的影响

增温可通过改变土壤微生物群落结构、调节土壤碳和养分循环,以及加剧土壤水分蒸发等途径影响 GRSP 的含量[25]。本研究发现增温 4 ℃后土壤 EE-GRSP 含量下降了 14.8%—34.9%;而 T-GRSP 含量无显著变化。Qiao 等[26]发现增温 0.3—1.9 ℃后高寒草甸中的 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量分别降低了 6.4%和 5.0%。但也有研究发现气候变暖导致 EE-GRSP 含量增加了 2.4%,但对 T-GRSP 含量没有影响[27]。这与肖玖军

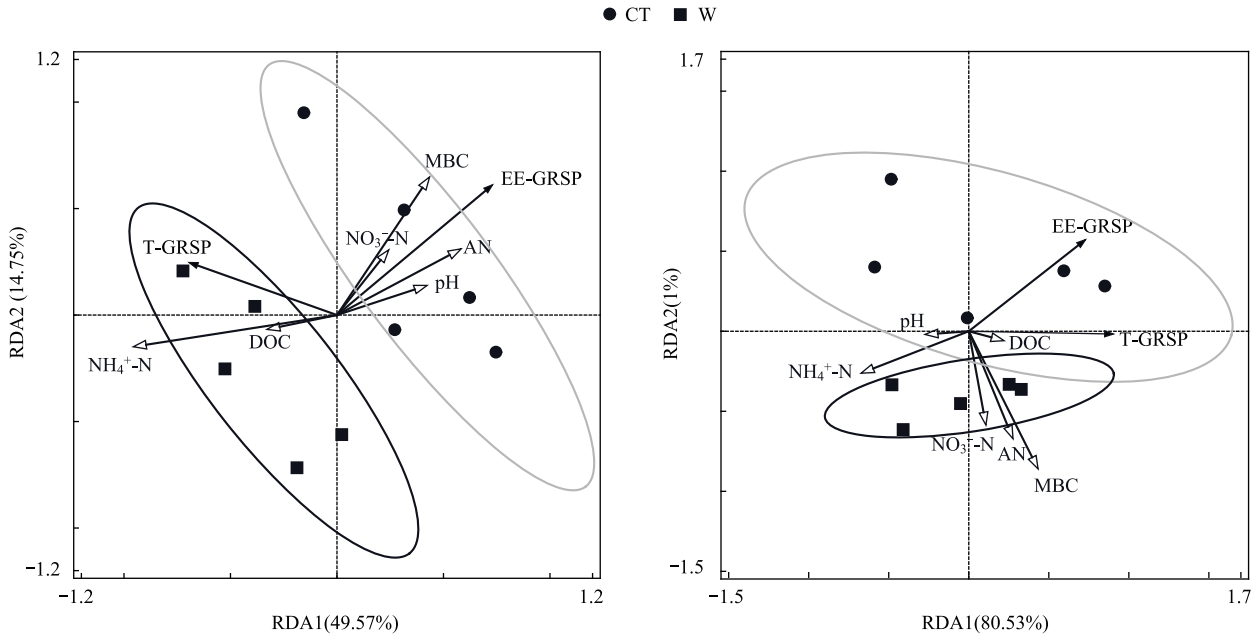

图 5　增温和树种对杉木和米槠幼苗土壤球囊霉素含量变化的冗余分析(RDA)

Fig.5　Redundancy analysis (RDA) **of the effects of warming and tree species on changes in soil glomalin content in *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis carlesii* seedlings**

等[28]研究观点一致,即 T-GRSP 和 EE-GRSP 在功能上存在差异。这可能是由于 EE-GRSP 属于新生成或接近分解的部分,稳定性相对较差,受土壤微生物活动和碳输入的影响较大[29]。增温通过改变土壤微生物群落结构和加速有机质分解,减少 EE-GRSP 的生成[30]。相比之下,T-GRSP 是长期积累的稳定组分,其热稳定性较强,能够在增温条件下保持相对稳定[11]。本研究中,EE-GRSP 含量的下降幅度高于其他研究,这可能与本实验的增温幅度较高以及实验区域的生态环境差异有关。因此,未来研究应进一步探讨不同区域和增温梯度对 GRSP 含量的影响,以深入揭示全球变暖背景下 GRSP 动态变化的机制。

3.2　树种对易提取球囊霉素含量的影响

本研究发现,在对照处理中,米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量(2.70 μg/g)显著高于杉木幼苗土壤(2.03 μg/g)。这一差异可能与两者树种的菌根类型有关[31],杉木主要与内生菌根(AM,Arbuscular mycorrhiza)共生,米槠则主要形成外生菌根(Ectomycorrhiza,ECM)共生体,两者的根系结构、碳分配策略及微生物互作机制存在显著差异。从菌根功能角度分析,AM 真菌是 GRSP 的直接来源[32]。ECM 系统虽不直接合成 GRSP,但可以通过调控根际微生物群落结构、影响 AM 活性或共存,间接促进 GRSP 的积累[33]。AM 真菌与其他土壤微生物之间存在广泛的互作关系[34],深度参与了土壤有机质的转化和分解[35—36],相比之下,ECM 真菌对土壤有机质的分解作用相对较弱[37], 从而减少土壤有机质的降解,提升土壤碳库的稳定性[38]。同时,米槠的落叶量显著大于杉木,叶片分解速率较快,富含有机质,增温通过加速有机质分解可促进 GRSP 的分泌[39]。相较之下,杉木幼苗土壤中 EE-GRSP 含量较低可能与其叶片木质素含量较高、分解速率较慢以及菌丝网络较短等特性有关[40—41]。

3.3　增温和树种对球囊霉素含量的影响机制

氮是许多陆地生态系统中的限制性营养物质[42],其中 NH_4^+-N 是植物和微生物主要氮源,在植物和微生物中发挥重要作用[43]。研究表明,氮添加会增加土壤养分含量,影响植物根系以及菌根的生长[44],进而影响 GRSP 的生成和积累[45]。Jia 等[46]发现在杉木人工林中,氮添加显著降低了 EE-GRSP 和 T-GRSP 含量。王婷等[47]也发现氮添加显著降低了 EE-GRSP 含量 9.8%—16.8%。本研究发现,杉木和米槠幼苗土壤 EE-GRSP

含量与 NH_4^+-N 含量之间均存在负相关关系,这主要是由于增温后杉木和米槠幼苗土壤 NH_4^+-N 含量增加,氮沉降使得根系分泌减少,进而抑制 EE-GRSP 的生成[48]。

本研究结果表明,增温后米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量的下降幅度显著高于杉木幼苗土壤,这可能与米槠幼苗土壤 MBC 含量下降了 28.4%有关。Zhang 等[10]发现 MBC 与 GRSP 之间呈显著正相关;Bai 等[49]进一步证实了微生物活性可显著影响土壤 GRSP 含量。在本研究中,增温导致 MBC 含量降低,进而抑制了土壤微生物活性[50],最终使得米槠幼苗分泌的 EE-GRSP 含量显著下降。

4 结论

本研究通过探讨增温及树种对土壤 GRSP 含量的影响,揭示了气候变化与植物特性在调控土壤真菌代谢产物中的关键作用。研究结果表明,增温对 GRSP 含量的影响受到树种特性的调控。其中,增温后杉木和米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量分别下降了 14.8%和 34.9%,而 T-GRSP 含量未发生显著变化。此外,NH_4^+-N 含量与杉木和米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量呈显著负相关关系,而米槠幼苗土壤 EE-GRSP 含量下降幅度较大可能与增温导致的 MBC 含量下降有关,二者之间呈正相关。未来研究应进一步关注增温对不同菌根树种的响应差异,以及开展多梯度增温实验,持续监测 GRSP 的动态变化,以更全面地评估森林生态系统在全球气候变化背景下的碳汇功能。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2014.

[2] Rillig M C, Maestre F T, Lamit L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(9): 1257-1260.

[3] 田慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 张俊伶, 李晓林. 球囊霉素及其作用研究进展. 土壤通报, 2009, 40(5): 1215-1220.

[4] Zhang Y X, Guo X W, Chen L X, Kuzyakov Y, Wang R Z, Zhang H Y, Han X G, Jiang Y, Sun O J. Global pattern of organic carbon pools in forest soils. Global Change Biology, 2024, 30(6): e17386.

[5] 兰光飞, 张强, 陈相标, 陈仕东, 熊德成, 刘小飞, 杨智杰, 杨玉盛. 中亚热带格氏栲林凋落物季节动态特征及其影响因素. 植物生态学报, 2024, 48(12): 1589-1601.

[6] Cavaleri M A, Reed S C, Smith W K, Wood T E. Urgent need for warming experiments in tropical forests. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2111-2121.

[7] 刘旎喆, 杨智杰, 钟羡芳. 增温对外生菌根真菌的影响研究进展. 亚热带资源与环境学报, 2024, 19(1): 109-116.

[8] Agnihotri R, Sharma M P, Prakash A, Ramesh A, Bhattacharjya S, Patra A K, Manna M C, Kurganova I, Kuzyakov Y. Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls. Science of The Total Environment, 2022, 806: 150571.

[9] Rausch C, Daram P, Brunner S, Jansa J, Laloi M, Leggewie G, Amrhein N, Bucher M. A phosphate transporter expressed in arbuscule-containing cells in potato. Nature, 2001, 414(6862): 462-465.

[10] Zhang H S, Zhou M X, Zai X M, Zhao F G, Qin P. Spatio-temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and soil organic carbon in coastal saline soil of China. Scientific Reports, 2020, 10: 9781.

[11] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. Canadian Journal of Soil Science, 2004, 84(4): 355-363.

[12] 张健, 徐明, 吴丽丰, 文春玉, 张姣, 聂坤. 干扰对黔中地区马尾松林土壤球囊霉素的影响. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 63-70.

[13] Zhang J, Ekblad A, Sigurdsson B D, Wallander H. The influence of soil warming on organic carbon sequestration of arbuscular mycorrhizal fungi in a sub-Arctic grassland. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 147: 107826.

[14] Hu P L, Xie L, Zhang W, Xiao D, Xiao J, Ye Y Y, Zhao J, Zhao Y, Wang K L. Contrasting accumulation of glomalin-related soil proteins along a temperature gradient in karst and non-karst soils. Catena, 2024, 244: 108259.

[15] Chen X W, Su M L, Wu S J, He L, Zhang B H, Zhang Y H, Huang X H, Liu J C, Yan C L, Liu W W, Lu H L. Change in glomalin-related soil protein along latitudinal gradient encompassing subtropical and temperate blue carbon zones. Science of The Total Environment, 2023, 895: 165035.

[16] 杨梅, 石兆勇, 卢世川, 张梦歌, 王旭刚, 徐晓峰. 增温对青藏高原草地生态系统土壤球囊霉素含量的影响. 生态环境学报, 2020, 29(4): 650-656.

[17] Chen F S, Niklas K J, Liu Y, Fang X M, Wan S Z, Wang H M. Nitrogen and phosphorus additions alter nutrient dynamics but not resorption efficiencies of Chinese fir leaves and twigs differing in age. Tree Physiology, 2015, 35(10): 1106-1117.

[18] 余李, 廖杨文科, 自海云, 潘畅, 周梦田, 曹超阳, 李孝刚. 杉木连栽对土壤细菌群落及其抑病能力的影响. 生态学报, 2023, 43(12): 5038-5049.

[19] Zhong X R, Zhang L, Zhang J B, He L R, Sun R X. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of *Castanopsis carlesii* under various climate change scenarios in China. Forests, 2023, 14(7): 1397.

[20] 王韦韦, 吕茂奎, 胥超, 陈光水. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失动态特征对降雨的响应. 生态学报, 2023, 43(18): 7474-7484.
[21] Fitch C, Troyer D D. Sampling methods for used oil analysis. Tribology & Lubrication Technology, 2000, 56(3): 40.
[22] Bu X L, Wang L M, Ma W B, Yu X N, McDowell W H, Ruan H H. Spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types along an elevation gradient in the Wuyi Mountains. Geoderma, 2010, 159(1/2): 139-146.
[23] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
[24] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97-107.
[25] Allison S D, Treseder K K. Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. Global Change Biology, 2008, 14(12): 2898-2909.
[26] Qiao L L, Zhou H K, Wang Z H, Li Y Z, Chen W J, Wu Y, Liu G B, Xue S. Variations in soil aggregate stability and organic carbon stability of alpine meadow and shrubland under long-term warming. Catena, 2023, 222: 106848.
[27] Singh A K, Chen C F, Zhu X A, Yang B, Khan M N, Zakari S, Jiang X J, Alguacil M A M, Liu W J. Unraveling the impact of global change on glomalin and implications for soil carbon storage in terrestrial ecosystems. Resources, Environment and Sustainability, 2024, 18: 100174.
[28] 肖玖军, 邢丹, 毛明明, 王岩. AM 真菌对桑树根围土壤团聚体的影响机制. 土壤学报, 2020, 57(3): 773-782.
[29] Koide R T, Peoples M S. Behavior of Bradford-reactive substances is consistent with predictions for glomalin. Applied Soil Ecology, 2013, 63: 8-14.
[30] Gutknecht J L M, Field C B, Balser T C. Microbial communities and their responses to simulated global change fluctuate greatly over multiple years. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2256-2269.
[31] Johnson N C. Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales. New Phytologist, 2010, 185(3): 631-647.
[32] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of AN abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Science, 1996, 161(9): 575-586.
[33] 王薪琪, 王传宽, 张泰东. 森林土壤碳氮循环过程的新视角: 丛枝与外生菌根树种的作用. 植物生态学报, 2017, 41(10): 1113-1125.
[34] Zhang L, Zhou J C, George T S, Limpens E, Feng G. Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the hyphosphere bacterial orchestra. Trends in Plant Science, 2022, 27(4): 402-411.
[35] Hodge A, Campbell C D, Fitter A H. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decomposition and acquires nitrogen directly from organic material. Nature, 2001, 413(6853): 297-299.
[36] Leigh J, Hodge A, Fitter A H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. New Phytologist, 2009, 181(1): 199-207.
[37] Lindahl B D, Tunlid A. Ectomycorrhizal fungi-potential organic matter decomposers, yet not saprotrophs. New Phytologist, 2015, 205(4): 1443-1447.
[38] Averill C, Bhatnagar J M, Dietze M C, Pearse W D, Kivlin S N. Global imprint of mycorrhizal fungi on whole-plant nutrient economics. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(46): 23163-23168.
[39] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, Newkirk K, Lux H, Bowles F P, Catricala C, Magill A, Ahrens T, Morrisseau S. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176.
[40] 金钊, 杨玉盛, 董云社, 齐玉春, 陈光水. 米槠与杉木细根凋落物是否在自身群落中分解得更快. 植物学报, 2006, 23(6): 651.
[41] Berg B, McClaugherty C. Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration. Berlin: Springer, 2008.
[42] Jackson L E, Burger M, Cavagnaro T R. Roots, nitrogen transformations, and ecosystem services. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 341-363.
[43] Tian C J, Kasiborski B, Koul R, Lammers P J, Bücking H, Shachar-Hill Y. Regulation of the nitrogen transfer pathway in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: gene characterization and the coordination of expression with nitrogen flux. Plant Physiology, 2010, 153(3): 1175-1187.
[44] Jumpponen A, Trowbridge J, Mandyam K, Johnson L. Nitrogen enrichment causes minimal changes in arbuscular mycorrhizal colonization but shifts community composition—evidence from rDNA data. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41(4): 217-224.
[45] Demenois J, Carriconde F, Bonaventure P, Maeght J L, Stokes A, Rey F. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. Geoderma, 2018, 312: 6-16.
[46] Jia S X, Liu X F, Lin W S, Zheng Y, Li J W, Hui D F, Guo J F. Decreased glomalin-related soil protein with nitrogen deposition in a 3-year-old Cunninghamia lanceolata plantation. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(3): 931-941.
[47] 王婷, 沈益康, 汪鹞雄, 甘秉平, 李全. 氮磷添加对杉木根际土壤丛枝菌根真菌和易提取球囊霉素的影响. 陆地生态系统与保护学报, 2021, 1(2):1-10.
[48] Egerton-Warburton L M, Allen E B. Shifts in arbuscular mycorrhizal communities along an anthropogenic nitrogen deposition gradient. Ecological Applications, 2000, 10(2): 484.
[49] Bai C M, He X L, Tang H L, Shan B Q, Zhao L L. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of Astragalus adsurgens Pall. in the Mu Us sandland, China. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(5): 941-947.
[50] Fang C, Li F M, Pei J Y, Ren J, Gong Y H, Yuan Z Q, Ke W B, Zheng Y, Bai X K, Ye J S. Impacts of warming and nitrogen addition on soil autotrophic and heterotrophic respiration in a semi-arid environment. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 248: 449-457.