

DOI: 10.5846/stxb202110082788

赵爽,王邵军,杨波,张昆凤,张路路,樊宇翔.接种丛枝菌根真菌对云南石漠化土壤呼吸的影响.生态学报,2022,42(21):8830-8838.

Zhao S, Wang S J, Yang B, Zhang K F, Zhang L L, Fan Y X. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi inoculations on soil respiration in Yunnan rocky desertification habitat. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(21):8830-8838.

接种丛枝菌根真菌对云南石漠化土壤呼吸的影响

赵爽¹,王邵军^{1,2,*},杨波¹,张昆凤¹,张路路¹,樊宇翔¹

1 西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037

摘要:为探明“丛枝菌根(Arbuscular mycorrhiza, AM)真菌-植物-土壤”耦合作用对石漠化土壤呼吸季节动态的影响,采用 LI-6400-09 土壤呼吸室和便携式光合作用测量系统,对圆柏(*Sabina chinensis*)接种摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, FM)、根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, RI) 2 种 AM 菌种处理下土壤呼吸季节动态进行野外连续定位观测,并探究 AM 真菌接种处理下石漠化土壤呼吸速率与植物生长、土壤理化性质之间的关系。结果表明:(1)相较于对照,接种 AM 真菌对石漠化生境土壤呼吸季节动态产生了显著影响($P<0.01$)。AM 真菌处理具有较高的土壤呼吸季节变化幅度,即根内根孢囊霉处理土壤呼吸速率($1.55\text{—}9.10\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$)显著高于摩西斗管囊霉($1.62\text{—}8.29\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$)和对照($1.23\text{—}4.46\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$);(2)AM 真菌接种处理下土壤温湿度变化对土壤呼吸的影响显著大于对照,即土壤温度与水分对土壤呼吸的平均解释量大小顺序为:RI (44.84%;52.35%)>FM (17.18%;41.65%)>CK (2.66%;16.55%);(3)2 种菌种处理下土壤呼吸速率均与土壤有机质、硝态氮、全氮、速效钾、树高、胸径及根系生物量呈显著或极显著正相关($P<0.01$ 或 0.05),而与 pH 呈极显著负相关($P<0.01$),但对照处理土壤呼吸速率除与 pH 呈显著负相关($P<0.05$)外,与其它土壤理化指标相关性不显著;(4)土壤温度和水分、硝态氮、铵态氮、有机质、易氧化有机碳、速效钾、全氮及全磷对土壤呼吸变化的贡献最大,而胸径、树高、有效磷、微生物生物量、根系生物量及 pH 的影响次之。因此,“AM 真菌-寄主植物-土壤”相互作用对石漠化生境土壤呼吸季节动态的影响,主要取决于不同 AM 真菌接种处理对土壤微气候(如含水量)、碳素(有机质、易氧化有机碳)、无机氮库(铵态氮、硝态氮)、根系生物量及磷钾养分可利用性的调控。

关键词:石漠化;丛枝菌根(AM)真菌;耦合;土壤呼吸;氮库;碳库;调控因素

Effects of arbuscular mycorrhiza fungi inoculations on soil respiration in Yunnan rocky desertification habitat

ZHAO Shuang¹, WANG Shaojun^{1,2,*}, YANG Bo¹, ZHANG Kunfeng¹, ZHANG Lulu¹, FAN Yuxiang¹

1 College of Ecology and environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: This study aimed to expound the coupling effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi, plants, and soils on seasonal dynamics of respiration rates in rocky desertification soils. We employed LI-6400-09 respiration chamber and portable photosynthesis measurement system to conduct a continuous field-positioning observation on seasonal dynamics of soil respiration rates under the inoculation *Sabina chinensis* plants with two AM fungi species, i.e., *Funneliformis mosseae* (FM) and *Rhizophagus intraradices* (RI). Furthermore, we explored the association of respiration rates with plant growth and physicochemical properties under AM fungal inoculation treatments in rocky desertification soils. The results were as following: (1) the inoculation with two AM fungi species had a significant effect on seasonal dynamics of soil respiration

基金项目:国家自然科学基金项目(32060281,31660191);云南省高校优势特色重点学科项目(05000511311);云南省教育厅科学研究基金项目(2021Y235)

收稿日期:2021-10-08; **网络出版日期:**2022-06-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shaojunwang2009@163.com

rates in rocky desertification habitat, compared with the control treatment (CK, $P < 0.01$). The treatments with two AM fungi species had a higher magnitude of seasonal variation in respiration rates compared with the CK in rocky desertification soils. The order of soil respiration rates was ranked as RI treatment ($1.55\text{—}9.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > FM treatment ($1.62\text{—}8.29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) > CK ($1.23\text{—}4.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). (2) Soil temperature and water content had a greater effect on soil respiration dynamics in AM fungal inoculations compared with the CK treatment. The contributions of soil temperature and water content to the variations in soil respiration rates were ranked as RI treatment (44.84%; 52.35%) > FM treatment (17.18%; 41.65%) > CK (2.66%; 16.55%). (3) Soil respiration rates under AM treatments were positively correlated with soil organic matter, nitrate nitrogen, total nitrogen, available potassium, tree height, diameter at breast height (DBH), and root biomass ($P < 0.01$ or 0.05), while they were negatively associated with soil pH ($P < 0.01$). In contrast, soil respiration rates in CK treatment were negatively correlated with soil pH ($P < 0.05$), but there was no significant correlation with other soil physicochemical properties. (4) Soil temperature and moisture, ammonium and nitrate nitrogen, organic matter, easily oxidized carbon, available potassium, total nitrogen and phosphorus had the greatest contributions to the variations in soil respiration rates, while the contributions of DBH, tree height, available phosphorus, microbial biomass, root biomass and pH to respiration dynamics were ranked the second. Therefore, the results suggest that the effects of the interactions among arbuscular mycorrhizal fungi, plants, and soils on seasonal dynamics of soil respiration rates may be mainly determined by the modification of AM fungi inoculations on soil microclimate (e.g., water content), carbon nutrient (organic matter and easily oxidized carbon), inorganic nitrogen pool (e.g., ammonium and nitrate nitrogen), root biomass, and nutrient availability of phosphorus and potassium in rocky desertification habitat.

Key Words: stony desertification; arbuscular mycorrhizal; coupling; soil respiration; nitrogen pool; carbon pool; regulatory factors

近几十年来,人类活动导致大气 CO_2 等温室气体排放剧增,从而显著影响全球气候变暖的进程^[1],其中土壤释放的 CO_2 增加量已达过去 2 个世纪来因人类活动释放总量的 1/2,因此,探明土壤呼吸动态及影响机制已成为全球气候变化研究的热点科学问题^[2]。目前,关于土壤呼吸调控机制的研究主要集中于土壤非生物因素的影响,而关于土壤生物对土壤呼吸的影响却缺乏相关研究。

丛枝菌根 (Arbuscular mycorrhiza, AM) 真菌能与 80%—90% 陆地植物种类形成共生体^[3],是退化生态系统恢复与重建的重要生物调节者^[4]。云南是我国岩溶石漠化面积的第二大省份,石漠化面积为 8.15 万 km^2 ,占云南省国土总面积的 20%^[2]。石漠化导致地表植被严重破坏、土壤侵蚀严重、基岩大面积裸露、土壤生物缺乏、生产力严重下降^[5]。将 AM 菌根技术运用于石漠化退化生态系统恢复,通过“菌丝-根系-土壤-植物”之间的耦合,不仅能够影响植物水分吸收与利用、植物生理生化过程、种内与种间竞争,而且能够影响土壤理化性质、球囊霉素相关蛋白分泌及 C/N/P 等养分循环,并直接或间接调控植物生长及与植被演替^[6-8],从而引起石漠化土壤根系、土壤微生物及土壤动物等呼吸组分的变化,最终引起大气 CO_2 浓度及土壤碳库动态的显著变化。目前,关于丛枝菌根的研究主要集中于其对石漠化植被与土壤恢复的影响^[4-6],而关于 AM 真菌引起植被与土壤环境变化对土壤呼吸过程的影响研究,却十分缺乏,严重制约人们关于土壤呼吸过程及微生物调控机制的理解。因此,探明云南石漠化地区“AM 真菌-植被与土壤变化-土壤呼吸动态”之间的相互关系,是西南石漠化生态恢复与重建及全球气候变化研究的关键科学问题。

云南弥勒是轻中度石漠化类型的典型分布区域,是研究 AM 真菌共生对土壤呼吸影响机制的理想场所。以国家林业局石漠化治理弥勒推广示范基地为实验区,选择圆柏 (*Sabina chinensis*) 群落为研究对象,设置摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*, FM)、根内根孢囊霉 (*Rhizophagus intraradices*, RI) 及对照 (不加菌种) 3 种野外试验处理,采用 LI-6400-09 便携式土壤呼吸室对土壤呼吸时间动态进行连续定位观测,揭示 AM 真菌共生处理下土壤呼吸变化与植物生长 (树高、胸径、根系生物量)、土壤性质 (微生物生物量、温湿度、容重、pH、有机质、硝态氮、铵态氮、全磷、有效磷、速效钾等) 之间的相互关系,从而探明 AM 真菌与植物耦合对土壤呼吸速率动态的影响,研究结果有助于阐明云南石漠化恢复过程中土壤 CO_2 释放规律,为量化土壤微生物介导石漠化

恢复对土壤呼吸的贡献提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样地概况

研究区位于云南弥勒市西一镇(103°17'E, 24°17'N), 地处北亚热带季风气候区, 属典型的喀斯特地质地貌高寒山区^[9]。年平均气温 15℃, 年降雨量 900—1000 mm, 年日照数 2055 小时, 全年无霜期 240 d, 光照充足、有效温期长, 霜雪日短。多石山碎布, 间有成林的乔灌木; 土壤以红壤和砂壤土为主, 耕地多散布于谷地和平坝中。

在国家林业局石漠化治理技术弥勒推广示范基地实验区内, 选择圆柏(*S. chinensis*)群落作为研究样地。样地基本情况如下: 海拔 1700 m, 土壤类型为砂质红壤, 上覆盖枯枝落叶 0—0.5 cm。主要树种有圆柏(*S. chinensis*)、白枪杆(*Fraxinus malacophylla*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、紫茎泽兰(*Eupatorium adenophora Spreng*)、长波叶山蚂蝗(*Desmodium sequax Wall*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor Turcz*)、地果(*Ficus tikoua Bur*)、艾纳草(*Blumea balsamifera*)等。

1.2 研究方法

本研究采用野外接种 AM 真菌菌种试验, 选择圆柏(*S. chinensis*)作为供试植物, 分别随机设置 3 个重复样地(40 m × 40 m, 相距 500 m), 并对样地中所有圆柏植株分别接种摩西斗管囊霉(*F. mosseae*, FM)、根内根孢囊霉(*R. intraradices*, RI), 以不接种样地作为对照。每种菌剂接种量为每株圆柏 40 g 菌种(孢子数约为 144 个/g), 供试 AM 菌种均购置于北京市农林科学院的植物营养与资源研究所 BGC 菌种库^[10]。于 2017 年 6 月(湿季)及 12 月(干季)分别进行接种处理, 实验处理 2 年后的 2020 年 6 月开始测定分析, 研究区干湿季变化明显, 故选择湿季(6 月、9 月)及干季(12 月及 2021 年 3 月)进行呼吸测定及土壤取样(频率为每 3 月一次)。

1.3 土壤呼吸测定

采用 LI-6400-09 土壤呼吸叶室连接 LI-6400 便携式光合作用测量系统(LI-COR 公司)连续性观测土壤呼吸速率^[11]。测定时, 将 PVC 管提前 24 h 镶嵌入土壤中, 以尽量避免底座的嵌入对土壤造成扰动^[12]。于 2020 年 6 月、9 月、12 月及 2021 年 3 月各月, 选择晴朗无风的稳定天气条件下进行测定, 随机选择 2 种菌种接种的圆柏各 6 株并于接种区附近进行呼吸测定, 同时测定对照处理的土壤呼吸, 各测定点重复测定 3 次, 测定时段为 9:00—12:00^[13]。采用便捷式土壤水分温度测量仪(SINTN8)同步测量 0—5 cm 及 ≥5—10 cm 的土层温度。测定土壤呼吸的同时, 采集各土层的土壤样品, 做好标签且用自封袋密封保存好, 带回实验室内供土壤指标分析。

1.4 土壤指标测定

土壤样品剔除根系、土壤动物及石块等杂物及时带回实验室, 同时尽量保持原有的湿度, 分别进行风干和冷藏备用。根据《土壤学实验指导教程》^[14]微生物量(MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取-碳自动分析法测定; 有机质(SOM)K₂Cr₂O₇外加热法测定; 硝态氮和铵态氮全自动流动分析仪测定; 全氮和全磷连续流动注射分析法测定; 速效钾乙酸铵浸提-火焰光度法测定; 有效磷碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定; 土壤容重环刀法测定; 土壤 pH 电位法(土水比 1:2.5)测定; 圆柏根系生物量采用根钻取样-烘干称重法测定^[15]。

1.5 数据处理

将所采集的数据(圆柏树高、胸径、根系生物量; 土壤微生物生物量碳、有机质、硝态氮、铵态氮、全磷、有效磷、速效钾、容重、pH 等)用 Execl 进行统计且用 SPSS 23.0 软件进行分析, 数据分析前进行正态性及方差齐性检验, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验土壤呼吸速率季节动态的显著性; 采用指数($R_s = ae^{\beta T_s}$)回归模型分析土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系。其中, R_s 为土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T_s 为土壤温度(℃), a 代表土壤温度为 0℃时的土壤呼吸速率, β 为土壤呼吸与温度间指数模型中的温度反应系数; Q_{10} 是指土壤呼吸对温度的敏感程度^[16], 即温度每升高 10℃时土壤呼吸速率增加的倍数。 Q_{10} 值采用指数模型进行

计算($Q_{10} = e^{10b}$),采用 Linear($Rs = aW + b$)、Quadratic($Rs = aW^2 + bW + c$)和 Exponential($Rs = ae^{bW}$)水分回归模型分析土壤呼吸速率与土壤水分($W, \%$)之间关系(a, b, c 为回归系数);采用 Canoco 5.0 多元统计分析土壤理化指标与土壤呼吸速率的关系。使用 SigmaPlot 13.0 作图。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌接种处理下土壤呼吸及其时间动态

研究表明,相较于对照(CK),接种摩西斗管囊霉(FM)和根内根孢囊霉(RI)均显著促进了土壤呼吸($P < 0.01$,图1)。不同实验处理下土壤呼吸速率大小顺序为:RI($1.55\text{—}9.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)>FM($1.62\text{—}8.29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)>CK($1.23\text{—}4.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。不同处理土壤呼吸速率均呈明显的季节波动,其中最大值均出现在9月,最小值在12月。除2021年3月外,其余月份2种菌种处理下土壤呼吸速率均高于空白对照。经方差分析,2种菌种接种处理下土壤呼吸速率湿季(6月、9月)差异显著($P < 0.05$),干季(12月、3月)差异不显著。

2种菌种接种处理下土壤呼吸与土壤温度均呈湿季相反、干季相同的季节变化趋势,两者最小值均出现在12月份;而对照样地土壤呼吸与土壤温度呈相类似的季节变化(图2)。其中平均土壤温度大小顺序为:CK(22.52°C)>RI(20.43°C)>FM(20.01°C),经方差分析,不同处理下土壤温度差异性显著($P < 0.01$ 或 0.05)。

不同处理下土壤呼吸与土壤水分季节动态在湿季呈现相类似的变化,但干季却相反(图2),两者最大值均出现在9月份,平均土壤含水量大小顺序为:RI(7.30%)>FM(5.35%)>CK(5.01%)。经方差分析,2种AM菌剂处理增加了土壤含水量($P < 0.05$),从而显著促进土壤呼吸速率($P < 0.01$)。

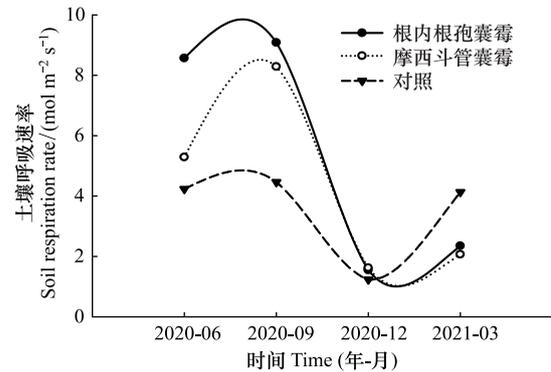


图1 不同实验处理下土壤呼吸速率的季节动态

Fig. 1 The seasonal dynamics of soil respiration rate under different experimental treatments

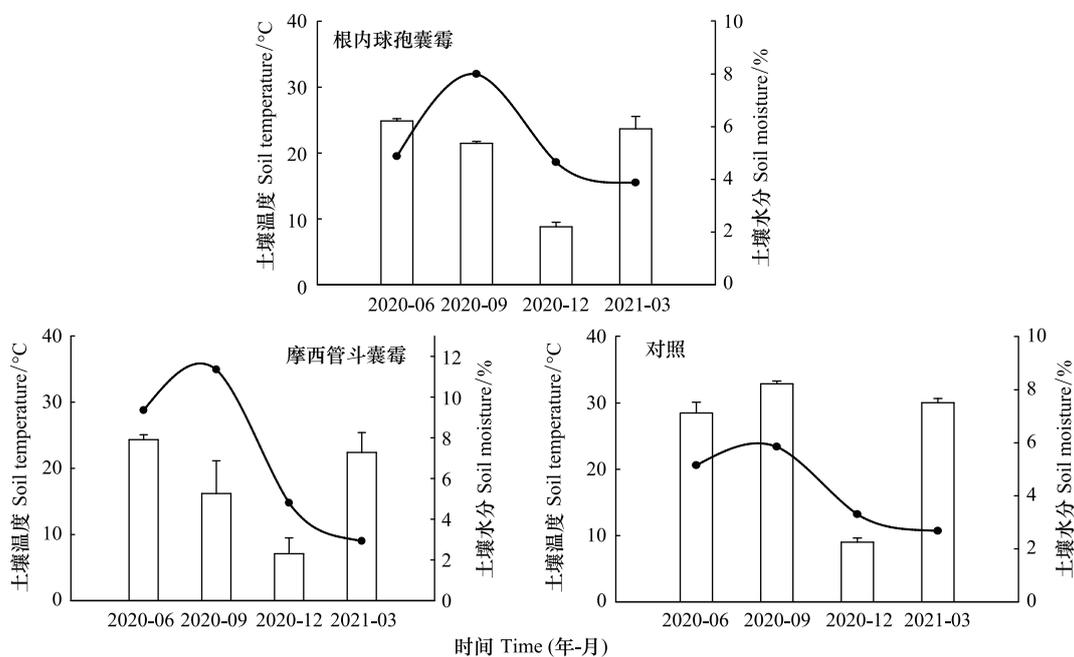


图2 不同实验处理下土壤温度与水分季节动态

Fig. 2 The seasonal dynamics of soil temperature and water content under different experimental treatments

2.2 AM 真菌接种处理下土壤呼吸速率与温度、水分的关系

2.2.1 与土壤温度的关系

采用拟合程度最好的指数模型 $R_s = ae^{Bt_s}$, 分别对不同菌种接种处理下(0—5 cm 及 ≥ 5 —10 cm) 土层温度与土壤呼吸速率进行回归分析, 结果表明 2 种菌种接种处理下土壤呼吸速率均随各土层温度增加呈显著非线性上升趋势($P < 0.05$ 或 0.01), 而空白对照样地呈不显著非线性上升趋势(图 3, $P > 0.05$)。0—5 cm、 ≥ 5 —10 cm 土层温度对土壤呼吸的解释量大小顺序为: RI (44.35%—45.32%) > FM (12.78%—21.57%) > CK (2.36%—2.96%)。土壤呼吸对土壤温度的敏感性(Q_{10} 值) 表现为根内根孢囊霉接种处理(2.18、2.38) 显著高于摩西斗管囊霉处理(1.50、1.79)。

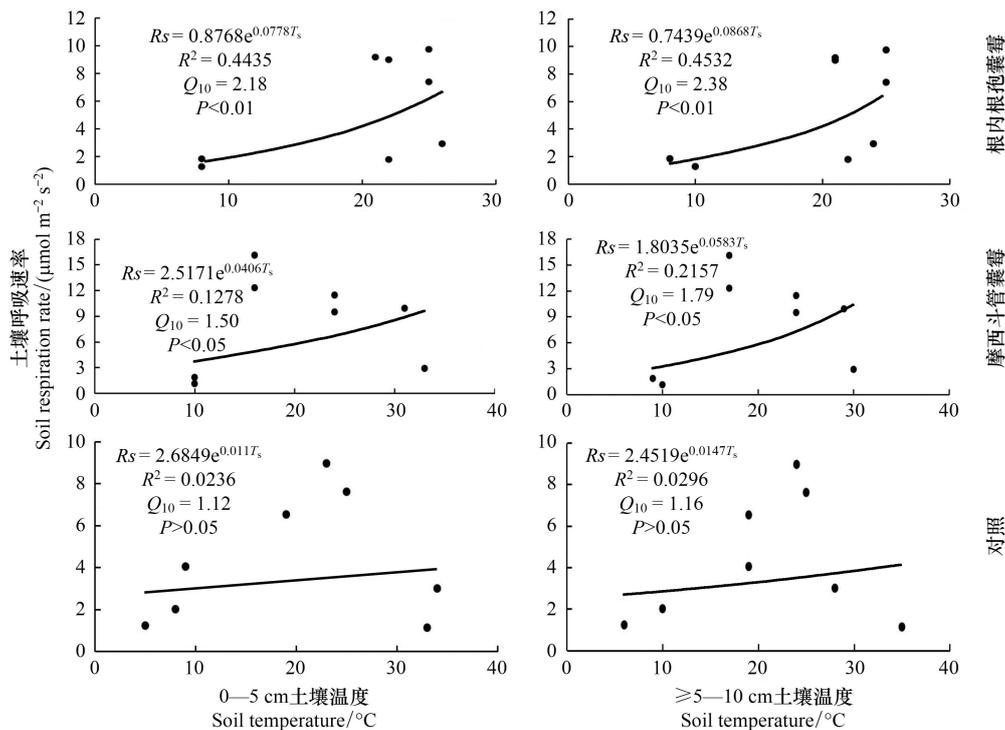


图 3 不同实验处理下土壤呼吸速率与不同土层温度的相互关系

Fig.3 Relationship between soil respiration rate and soil temperature in different layers under three experimental treatments

2.2.2 与土壤水分的关系

采用 Linear、Quadratic 和 Exponential 回归模型, 分别对不同处理下 0—5 cm 及 ≥ 5 —10 cm 土层水分与土壤呼吸速率进行回归分析(表 1)。结果显示, 2 种菌种接种处理下土壤呼吸速率均随各土层土壤水分增加呈显著非线性上升趋势($P < 0.01$ 或 0.05), 其中, 采用 Linear 模型拟合, 摩西斗管囊霉(FM) 接种处理在 ≥ 5 —10 cm 土层水分二者拟合度最高, 土壤水分可解释 50.70% 的土壤呼吸变化($P < 0.01$); 采用 Quadratic 模型拟合, 根内根孢囊霉(RI) 接种处理在 ≥ 5 —10 cm 土层水分拟合度最高, 土壤水分可解释 71.10% 的土壤呼吸变化($P < 0.01$); 采用 Exponential 模型拟合, 根内根孢囊霉(RI) 接种处理在 ≥ 5 —10 cm 土层水分拟合度最高, 土壤水分可解释 50.10% 的土壤呼吸变化($P < 0.01$)。但采用 3 种模型拟合, 对照处理中各土层水分对土壤呼吸的解释量均较小。

2.3 土壤呼吸速率与土壤性质与植物生长的关系

研究表明, 2 种菌种接种对土壤微生物量及理化性质产生了显著影响。其中, 接种根内根孢囊处理下土壤微生物生物量、水分、铵态氮、有机质等理化性质显著高于摩西斗管囊霉接种处理和空白对照样地(表 2)。不同实验处理下土壤呼吸速率和土壤理化性质的相关性分析表明(表 3), 根内根孢囊接种处理下土壤呼吸速率与土壤有机质、硝态氮、铵态氮、全氮、速效钾、容重、温度、水分、树高、胸径及根系生物量达到显著或极显著

正相关 ($P < 0.01$ 或 0.05), 与 pH 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$), 与微生物生物量、易氧化有机碳、全磷及有效磷未达到显著性水平 ($P > 0.05$); 摩西斗管囊霉接种处理下土壤呼吸速率与土壤有机质、易氧化有机碳、硝态氮、全氮、速效钾、温度、水分、树高、胸径及根系生物量达到显著或极显著正相关水平 ($P < 0.01$ 或 0.05), 与 pH 达到显著或极显著负相关关系 ($P < 0.01$ 或 0.05), 与全磷、容重未达到显著性水平 ($P > 0.05$), 与微生物生物量、铵态氮及有效磷呈现负相关关系; 不加菌种处理土壤呼吸速率 pH 达到显著负相关水平 ($P < 0.05$), 与其它土壤理化指标未达到显著性水平。

表 1 不同菌种处理下土壤呼吸与各土层含水量间关系的模型参数

Table 1 Models and relevant parameters showing the relationship between soil respiration and water content of each layer under three experimental treatments

处理 Treatment	土层/cm Soil layer	$R_s = aW + b$				$R_s = aW^2 + bW + c$					$R_s = ae^{bW}$			
		a	b	R^2	P	a	b	c	R^2	P	a	b	R^2	P
根内根孢囊霉 <i>R. intraradices</i>	0—5	0.757	1.015	0.426	0.023	0.061	1.331	-0.987	0.514	0.004	1.391	0.120	0.501	0.006
	≥5—10	0.165	4.572	0.336	0.045	-0.120	2.644	-6.507	0.711	0.001	1.250	0.141	0.479	0.048
摩西斗管囊霉 <i>F. mosseae</i>	0—5	0.413	1.301	0.408	0.040	-0.019	1.029	0.268	0.428	0.025	1.638	0.156	0.346	0.025
	≥5—10	0.533	0.621	0.507	0.008	0.988	-9.890	27.401	0.326	0.050	3.319	0.040	0.327	0.059
对照 No mycorrhizae addition	0—5	0.140	3.177	0.032	0.060	0.281	-1.964	5.617	0.328	0.049	2.837	0.030	0.037	0.065
	≥5—10	0.040	3.363	0.003	0.854	0.564	-3.929	8.141	0.026	0.053	3.022	0.003	0.007	0.057

R_s : 土壤呼吸速率 Respiration rate; W : 土壤水分 Soil water

表 2 不同试验处理土壤理化性质及植物生长生理指标大小

Table 2 Soil physicochemical properties and plant growth indexes under different experimental treatments

处理 Treatment	RI	FM	CK	处理 Treatment	RI	FM	CK
微生物生物 MBC/(g/kg)	2.06±0.64	0.92±0.24	0.81±0.19	有效磷 AP/(g/kg)	18.94±6.70	15.37±5.83	15.21±4.70
易氧化有机碳 ROC/(g/kg)	6.25±0.59	4.91±0.55	5.75±0.53	容重 BD/(g/cm ³)	1.44±0.09	1.47±0.03	1.62±0.28
有机质 SOM/(g/kg)	10.96±0.72	10.80±1.39	10.80±1.32	pH	7.66±0.06	7.66±0.07	7.68±0.06
硝态氮 NO ₃ -N/(mg/L)	4.26±0.73	2.86±0.51	2.53±0.47	温度 ST/°C	20.10±1.88	21.33±2.45	22.52±2.90
铵态氮 NH ₄ -N(mg/L)	0.47±0.05	0.45±0.08	0.38±0.053	水分 SW/%	10.30±1.98	8.03±0.79	7.22±0.82
全氮 TN/(mg/L)	2.76±0.45	2.36±0.45	2.24±0.45	树高 Tree height/cm	108.01±4.15	106.34±3.56	100.99±4.97
全磷 TP/(mg/L)	2.28±0.64	1.43±0.04	1.26±0.10	胸径 Diameter at breast height/mm	19.96±0.86	19.13±0.67	19.05±0.73
速效钾 AK/(g/kg)	25.80±6.33	25.24±5.83	27.17±7.41	根系生物量 Root biomass/(g/kg)	2.15±1.33	1.45±0.89	0.85±0.43

FM: 摩西斗管囊霉 *F. mosseae*; RI: 根内根孢囊霉 *R. intraradices*; CK: 对照, 不加菌种 No mycorrhizae addition; MBC: Microbial biomass carbon; ROC: Readily oxidizable organic carbon; SOM: Soil organic matter; NH₄-N: Ammonium nitrogen; NO₃-N: Nitrate nitrogen; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; AK: Available potassium; AP: Available phosphorus; BD: Bulk density; ST: Soil temperature; SW: Soil water

表 3 不同菌种处理下土壤呼吸速率与植物生长及土壤性质的相关性

Table 3 Correlation between soil respiration rate and soil physicochemical properties under different arbuscular mycorrhiza fungi treatments

处理 Treatment	RI	FM	CK	处理 Treatment	RI	FM	CK
微生物生物 MBC/(g/kg)	0.069	-0.221	-0.292	有效磷 AP/(g/kg)	0.392	-0.353	0.34
易氧化有机碳 ROC/(g/kg)	0.437	0.694 *	0.221	容重 BD/(g/cm ³)	0.562 *	0.059	-0.239
有机质 SOM/(g/kg)	0.630 *	0.586 *	0.121	pH	-0.893 **	-0.619 **	-0.751 *
硝态氮 NO ₃ -N/(mg/L)	0.279 *	0.852 **	0.37	温度 ST/°C	0.899 **	0.607 *	0.287
铵态氮 NH ₄ -N(mg/L)	0.614 *	-0.342	0.066	水分 SW/%	0.670 **	0.624 *	0.358
全氮 TN/(mg/L)	0.537 *	0.821 **	0.397	树高 Tree height/cm	0.890 *	0.530 *	-0.344
全磷 TP/(mg/L)	0.122	0.144	-0.168	胸径 Diameter at breast height/mm	0.910 *	0.531 *	0.254
速效钾 AK/(g/kg)	0.870 **	0.654 *	-0.023	根系生物量 Root biomass/(g/kg)	0.751 *	0.672 *	0.051

** 表示 $P < 0.01$ 极显著水平; * 表示 $P < 0.05$ 显著水平

主成分分析结果表明, 植物生长及土壤理化性质变化对土壤呼吸产生了重要影响(图 4)。其中, 第一坐标轴对土壤呼吸速率贡献率最大(85.33%), 第二坐标轴的贡献率(23.99%)较小。同时按箭头夹角大小

来看,土壤温度和水分、硝态氮、铵态氮、有机质、易氧化有机碳、速效钾、全氮及对土壤呼吸速率的贡献最大,而全磷、速效磷、树高、胸径、微生物生物量、根系生物量及 pH 次之。

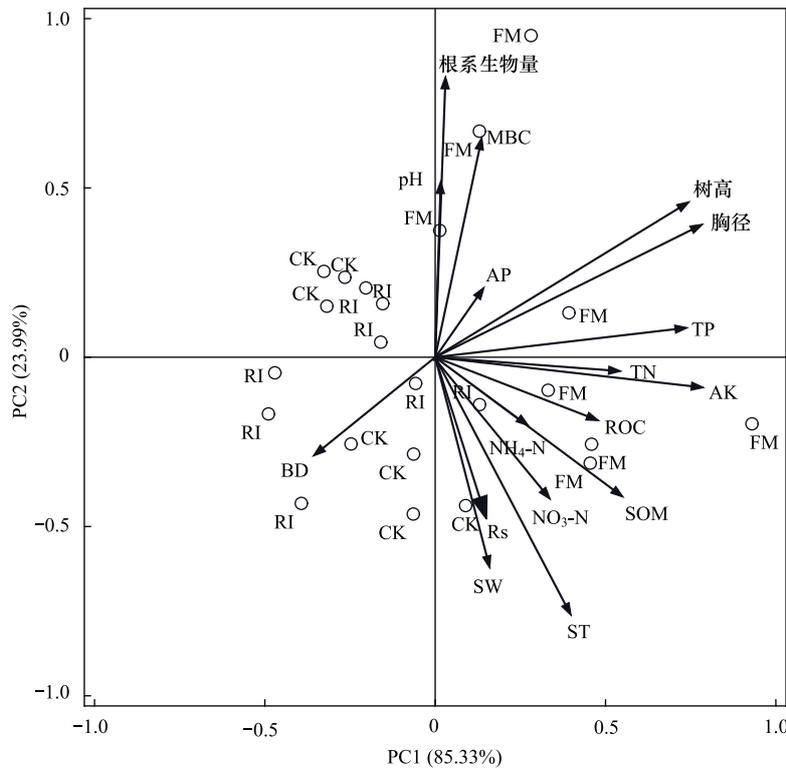


图 4 不同处理下植物及土壤性质变化对土壤呼吸速率影响的主成分分析

Fig.4 Principal component analysis for the effects of soil physicochemical properties on soil respiration rate under different arbuscular mycorrhiza fungi treatments

Rs: 土壤呼吸速率 Soil respiration rate; MBC: 微生物生物量 Microbial biomass carbon; ROC: 易氧化有机碳 Readily oxidizable organic carbon; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; $\text{NH}_4\text{-N}$: 铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3\text{-N}$: 硝态氮 Nitrate nitrogen; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; AP: 有效磷 Available phosphorus; BD: 容重 Bulk density; ST: 土壤温度 Soil temperature; SW: 土壤水分 Soil water

3 讨论

3.1 AM 真菌接种处理下土壤呼吸及其时间变化特征

AM 真菌与植物耦合能够导致土壤温湿度、养分及微生物等非生物与生物因素的显著改变,从而调控土壤呼吸速率及其时间动态^[17]。本研究中,2 种丛枝真菌处理的土壤呼吸速率月均值显著高于对照,表明 AM 真菌接种显著促进了土壤呼吸。这可能与 AM 真菌接种处理具有较高的土壤水分、铵态氮、微生物生物量、有机质、易氧化有机碳及根系生物量等含量密切相关。一些研究表明,AM 真菌接种能够提高土壤水分与碳氮等养分的可利用性、促进土壤水稳定团聚体的形成^[18],刺激根系及土壤微生物的活性与呼吸。因此,AM 真菌能够通过调节土壤理化状况而调控土壤呼吸动态。

不同实验处理土壤呼吸速率具有显著的季节变化,其中湿季(6 月、9 月)显著高于干季(12 月、3 月),这与湿季具有较高的土壤水分含量密切相关^[19]。同时,2 种 AM 真菌处理具有较高的土壤呼吸变幅(对照的 1.41—1.62 倍),这可能是由 AM 真菌与根系耦合对土壤温度与湿度的调节作用所致。炎热季节时,AM 真菌接种能够通过降低土壤高温而促进土壤呼吸各组分的排放,本研究中接种 AM 真菌可能降低高温胁迫对圆柏植株根系及根际微生物的伤害^[20]。干季时,AM 真菌接种通过刺激土壤水分的可利用性及根系活力,进而刺

激土壤呼吸速率^[21]。

3.2 AM 真菌接种处理下植物生长变化对土壤呼吸的影响

AM 真菌能够与高等植物形成共生关系,通过促进植物生长及光合产物向土壤的输入^[4,22-23],从而刺激土壤生物的呼吸作用。本研究中,2 种菌种接种处理显著促进了植物的地上生长(平均树高、胸径)及地下生长(根系生物量),并显著促进土壤呼吸。可能由于接种 AM 真菌通过提高植株的水分渗透调节、抗氧化能力及养分代谢效率,并调节植物内源激素平衡而促进寄主植株的营养生长^[24],从而刺激植物根系活及根际微生物的活动。一些研究表明,AM 真菌与圆柏根系共生可能形成发达的菌丝网络体系,增大了植物与土壤的接触面积,通过提高植物根系对营养和水分的吸收^[25],进而促进根系的呼吸。同时,AM 真菌从圆柏植物体中获取碳水化合物,相应地促进了根系微生物对矿质营养的吸收^[26-29],从而刺激了微生物的呼吸。研究还发现,AM 真菌接种处理下土壤 N、P、K 含量显著增多^[30],提高其有效性和利用率,从而促进植物根系及微生物的活动,进而刺激了土壤呼吸。因此,AM 真菌与植物耦合能够通过刺激植物地上与地下生长而直接或间接地调控土壤呼吸动态。

3.3 AM 真菌接种处理下土壤理化性质变化对土壤呼吸的影响

AM 真菌与植物耦合能够通过影响土壤理化性质而对土壤呼吸产生重要调控作用^[31-33]。本研究中,AM 真菌接种处理通过影响植物根系及微生物栖息的土壤理化环境而对土壤呼吸产生重要影响^[34]。2 种 AM 真菌通过降低土壤 pH 而对土壤呼吸产生促进作用,这与郭晗铃等^[35]的研究结果相类似,AM 真菌与植物耦合形成强大的菌丝网络系统,分泌有机酸,降低土壤 pH,刺激土壤微生物活性,从而促进土壤微生物的呼吸。

土壤碳库(如总有机碳、易氧化有机碳)、氮库(如硝态氮、铵态氮)组分含量及磷与钾养分状况变化是影响土壤呼吸的另一个重要因素。本研究中,AM 真菌与植物耦合显著提高土壤有机质含量,增加了土壤呼吸底物的供应,进而刺激土壤呼吸^[36];AM 真菌与植物耦合显著提高土壤易氧化有机碳的含量,通过刺激根系与微生物活动而促进土壤呼吸^[10,37];AM 真菌与植物耦合增加土壤无机氮(硝氮、铵氮)供应,刺激了植物根系生长,进而促进土壤呼吸^[38]。特别是铵氮能够被植物直接吸收^[39],刺激植物生长、土壤酶活性及微生物活动,从而提高土壤呼吸各组分的强度。菌种处理下显著增加土壤速效钾的供应,刺激球囊霉相关蛋白的分泌,可能促进根系和根际微生物的活动,进而提高土壤呼吸速率^[40]。另外,AM 真菌通过改善土壤通气性、酸碱性促进土壤养分可利用性,从而调控土壤呼吸及动态变化。

综上,AM 真菌通过与圆柏植株根系耦合改善土壤温湿度条件,提高土壤通气性,调控土壤酸碱性,增加土壤碳库(如易氧化有机碳)与氮库(如铵态氮)组分含量的积累,提高氮、磷与钾养分的可利用性,并刺激植物地上与地下生长,从而显著刺激了土壤呼吸过程中的 CO₂ 排放。研究结果有助于理解 AM 真菌与植物耦合对石漠化土壤呼吸的影响,为准确评估石漠化土壤生物学修复对全球变化的影响提供基础数据。

参考文献(References):

- [1] 张梦歌,尹可敬,石兆勇,曹利兵. 丛枝菌根真菌对番茄生长及土壤呼吸速率的影响. 北方园艺,2021(13):91-98.
- [2] 姚家平,李彪,熊智,刘绍雄,王金华. 云南石漠化地区土壤性质分析. 中国农学通报,2012,28(10):43-46.
- [3] 唐浩琪,张娜,孙波,梁玉婷. 典型农田土壤中丛枝菌根真菌-根际细菌互作及与氮磷利用的关系. 微生物学报,2020,60(6):1117-1129.
- [4] 王邵军,李霁航,陆梅,张哲,李少辉,陈闽昆,曹润. "AM 真菌-根系-土壤"耦合作用机制研究进展. 中南林业科技大学学报,2019,39(12):1-9.
- [5] 张中峰,张金池,周龙武,徐广平,李艳琼. 丛枝菌根真菌对石漠化地区造林苗木生长的影响. 生态学杂志,2018,37(10):2927-2934.
- [6] 张娇阳. 长芒草植物-土壤-微生物碳氮过程对氮磷添加的协同响应机制. 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2020.
- [7] Li Y M, Wang S J, Lu M, Zhang Z, Chen M K, Li S H, Cao R. Rhizosphere interactions between earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi increase nutrient availability and plant growth in the desertification soils. Soil and Tillage Research,2019,186:146-151.
- [8] Wang S J, Wang H, Li J H. Does tree species composition affect soil CO₂ emission and soil organic carbon storage in plantations? Trees,2016,30(6):2071-2080.

- [9] 张荣才,刘葵. 弥勒市石漠化治理现状与对策分析. 林业建设,2014(2):60-63.
- [10] 王邵军,左倩倩,曹乾斌,王平,杨波,赵爽,陈闽昆. 云南寻甸石漠化土壤易氧化碳对丛枝菌根真菌共生的响应. 南京林业大学学报(自然科学版);1-11[2021-11-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20201201.1651.002.html>.
- [11] 赵爽,王邵军,杨波,左倩倩,曹乾斌,王平,张路路,张昆凤,樊宇翔. 西双版纳热带森林土壤呼吸对次生演替的响应. 南京林业大学学报(自然科学版);1-10[2021-11-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1161.S.20210420.1608.004.html>.
- [12] 赵吉霞,王邵军,陈奇伯,王艳霞,舒蛟靖. 滇中高原云南松天然林和人工林土壤呼吸特征的比较. 中南林业科技大学学报,2015,35(1):96-103.
- [13] 姚玉刚,张一平,于贵瑞,沙丽清,邓云,谭正洪. 热带雨林土壤呼吸测定代表性时段研究. 南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(4):74-78.
- [14] 胡慧蓉,田昆. 土壤学实验指导教程. 北京:中国林业出版社,2012.
- [15] 张立桢,曹卫星,张思平,周治国. 棉花根系生长和空间分布特征. 植物生态学报,2005(2):266-273.
- [16] 唐燕飞,王国兵,阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述. 南京林业大学学报(自然科学版),2008(1):124-128.
- [17] 石兆勇,张晓锋,王发园. 菌根真菌对土壤呼吸的影响. 生态环境学报,2010,19(1):233-238.
- [18] 叶佳舒,李涛,胡亚军,郝志鹏,高彦征,王幼珊,陈保冬. 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响. 生态学报,2013,33(4):1080-1090.
- [19] 李思龙,张玉刚,陈丹明,马健,郭绍霞. 丛枝菌根对高温胁迫下牡丹生理生化的影响. 中国农学通报,2009,25(7):154-157.
- [20] 钱雨奇,彭晓茜,曾文静,张馨月,王妮. 菌根真菌对土壤呼吸以及凋落物分解的影响. 微生物学通报,2013,40(12):2306-2318.
- [21] 高文礼,再努尔·吐尔逊,桑钰,马晓东. 丛枝菌根真菌对植物氮素吸收作用的研究进展. 中国农学通报,2021,37(27):53-58.
- [22] 吕星光,刘润进,李敏. 不同丛枝菌根真菌对西瓜嫁接苗生长和光合作用的影响. 中国蔬菜,2017(5):46-49.
- [23] 陈永亮,陈保冬,刘蕾,胡亚军,徐天乐,张莘. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用. 生态学报,2014,34(17):4807-4815.
- [24] 姜英,刘雄盛,李娟,杨继生,蒋斌,王仁杰. 干旱胁迫下丛枝菌根真菌对柚木光合及荧光参数的影响. 森林与环境学报,2019,39(6):608-615.
- [25] 柯世省. 丛枝菌根与植物营养. 生物学教学,2007(8):4-6.
- [26] 魏勇,吴茜茜,李应德,王瑜璇,常生华,段廷玉. AM 真菌和根瘤菌对紫花苜蓿生长及其营养价值的影响. 草业科学,2020,37(6):1115-1123.
- [27] 贾艳艳,顾大路,杨文飞,吴传万,孙爱侠,诸俊,王伟中,杜小凤. 丛枝菌根真菌对还田麦秆分解及玉米生物量的影响. 江苏农业学报,2019,35(3):612-617.
- [28] 屈明华,俞元春,李生,张金池. 丛枝菌根真菌对矿质养分活化作用研究进展. 浙江农林大学学报,2019,36(2):394-405.
- [29] 金海如,刘洁,刘静,黄晓伟. 丛枝菌根真菌氮吸收、运转和传递机理的总述. 中国科学:生命科学,2012,42(5):355-364.
- [30] 魏祖晨,赵顺鑫,李卓蔚,周浓,黄小兰,郭冬琴,赵晶晶. 接种丛枝菌根真菌对木香无机元素吸收的影响. 中国野生植物资源,2021,40(7):34-39.
- [31] Li Y L, Yantai G, Newton L P W Y, Chantal H. Influence of introduced arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus sources on plant traits, soil properties, and rhizosphere microbial communities in organic legume-flax rotation. *Plant and Soil*,2019,443(1-2):87-106.
- [32] Ma F, Zhang S J, Wang L, Shan D, Jiang X F, Zhang X, Li Z. How inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi impact on soil respiration? *Advanced Materials Research*,2015(2149).
- [33] Tan Q Y, Si J P, He Y J, Yang Y, Shen K P, Xia T T, Kang L L, Fang Z Y, Wu B L, Guo Y, Han X. Improvement of Karst soil nutrients by arbuscular mycorrhizal fungi through promoting nutrient release from the litter. *International Journal of Phytoremediation*,2021,23(12):1244-1254.
- [34] 黄艳萍,甘秋霞,杨敏,祁俊生,潘兴娇,张杰,周浓. 田间施加丛枝菌根真菌剂对滇重楼根际土壤理化性质的影响. 中国实验方剂学杂志,2020,26(22):110-115.
- [35] 郭哈铃,刘世俊,徐静,宋书锐,唐建军,陈欣. 丛枝菌根真菌对双子叶植物生长和根系特征的影响:整合分析. 生态学杂志,2017,36(7):1855-1864.
- [36] 刘荣林,葛菁萍. 丛枝菌根真菌和硫氧化细菌对土壤理化性质和植物生长影响的研究进展. 生态学杂志,2021,40(10):3355-3363.
- [37] 阮仕琴,陶刚,姜璇,赵兴丽. 丛枝菌根真菌生态功能及其与共生植物互作机理. 中国土壤与肥料;1-9[2021-12-03].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20210914.1841.002.html>.
- [38] 张学林,李晓立,何堂庆,张晨曦,田明慧,吴梅,周亚男,郝晓峰,杨青华. 丛枝菌根真菌对玉米籽粒产量和氮素吸收的影响. 作物学报,2021,47(8):1603-1615.
- [39] 陈晓光,李洪民,张爱君,唐忠厚,魏猛. 氮素形态对甘薯土壤微生物及酶活性的影响. 西南农业学报,2017,30(3):619-623.
- [40] 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.