



入侵植物薇甘菊对土壤主要温室气体排放的影响:真菌主导 N_2O 排放与低 CO_2 当量特征

周卫君, 马耀, 周启梦, 王晓敏, 杨雪, 李伟华

引用本文:

周卫君, 马耀, 周启梦, 等. 入侵植物薇甘菊对土壤主要温室气体排放的影响:真菌主导 N_2O 排放与低 CO_2 当量特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 437–444.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

外来入侵植物薇甘菊的2种化感物质对土壤氮循环的影响

Effects of Two Allelochemicals in Alien Invasive Plant *Mikania micrantha* on Soil Nitrogen Cycling
热带亚热带植物学报. 2020, 28(3): 292–300 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4150>

从种内、种间化感作用分析入侵种薇甘菊及其近邻种的非协同进化趋势

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 1–9 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4074>

氮素形态对铁线莲光合特性及氮代谢的影响

Effect of Nitrogen Forms on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Metabolism of *Clematis*
热带亚热带植物学报. 2021, 29(3): 276–284 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4281>

岩溶与非岩溶区典型植物最适光合模型和光合特征研究

Studies on Optimal Photosynthetic Biochemical Model and Photosynthetic Characteristics of Typical Plants in Karst and Non-karst Regions
热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 187–194 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4269>

外来入侵植物与人工林下层植被结构的关联性

热带亚热带植物学报. 2020, 28(1): 10–16 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4050>

向下翻页, 浏览PDF全文

入侵植物薇甘菊对土壤主要温室气体排放的影响： 真菌主导 N₂O 排放与低 CO₂ 当量特征

周卫君, 马耀, 周启梦, 王晓敏, 杨雪, 李伟华*

(华南师范大学生命科学学院, 广东省植物发育生物工程重点实验室, 广州 510631)

摘要: 为揭示植物生长对土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响, 通过野外和盆栽试验相结合, 对入侵植物薇甘菊(*Mikania micrantha*) 及其竞争植物粉葛(*Pueraria lobata* var. *thomsonii*) 和红薯(*Ipomoea batatas*) 的土壤温室气体排放进行了研究。结果表明, 薇甘菊生长土壤的 CO₂ 当量排放显著低于粉葛和红薯, 显示出更低的温室效应潜势; 真菌对 N₂O 排放的相对贡献(79.3%)显著高于细菌(58.1%); 随机森林模型揭示土壤总氮(TN)、硝态氮(NO₃⁻-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)是温室气体排放的核心驱动因子(解释度>11%), 与 CO₂ 当量排放量呈显著正相关($R^2=0.49\sim0.82$)。薇甘菊生长土壤的温室气体排放效应与对照物种的选择密切相关。与本地植物粉葛和红薯相比, 薇甘菊生长土壤表现出更低的温室效应潜势, 这可能与不同植物的氮利用策略和氮循环微生物群落调控机制有关。这为入侵植物生态效应的评估提供了重要参考, 但需结合更多物种和长期观测进一步验证。

关键词: 薇甘菊; 温室气体排放; 微生物群落调控; 氮循环

doi: 10.11926/jtsb.5031

CSTR:32235.14:jtsb.5031

Influence of the Invasive Plant *Mikania micrantha* on Major Soil Greenhouse Gas Emissions: Fungal-dominated N₂O Emissions and Low CO₂-Equivalent Characteristics

ZHOU Weijun, MA Yao, ZHOU Qimeng, WANG Xiaomin, YANG Xue, LI Weihua*

(Guangdong Province Key Laboratory of Biotechnology for Plant Development, School of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: To reveal the impact of plant growth on soil N₂O and CO₂ emissions, a combined field and pot experiment was conducted to study the soil greenhouse gas emissions of *Mikania micrantha* and its competing plants, *Pueraria lobata* var. *thomsonii* and *Ipomoea batatas*. The results showed that the CO₂ equivalent emissions from the soil where *M. micrantha* grew were significantly lower than those from the soil where *P. lobata* var. *thomsonii* and *I. batatas* grew, indicating a lower greenhouse effect potential. The relative contribution of fungi to N₂O emissions (79.3%) was significantly higher than that of bacteria (58.1%). The random forest model revealed that total soil nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO₃⁻-N), and ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) were the core driving factors of greenhouse gas emissions (explaining more than 11%), and were significantly positively correlated with CO₂ equivalent emissions ($R^2=0.49\sim0.82$). The greenhouse gas emission effect of the soil where *M. micrantha* grows is closely related to the choice of control species. Compared with the local plants *P. lobata* var. *thomsonii* and *I. batatas*, the soil where *M. micrantha* grows shows a lower greenhouse effect potential, which may be related to the different nitrogen utilization strategies and nitrogen cycling microbial community regulation

收稿日期: 2025-05-10 接受日期: 2025-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32172430)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32172430).

作者简介: 周卫君(1999年生), 女, 硕士研究生, 主要从事入侵生态学研究。E-mail: 2024023149@m.scnu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: whli@scnu.edu.cn

mechanisms of different plants. This provides an important reference for the assessment of the ecological effects of invasive plants, but further validation is needed by combining more species and long-term observations.

Key words: *Mikania micrantha*; Greenhouse gas emissions; Microbial community regulation; Nitrogen cycle

全球气候变化的核心驱动机制与温室气体排放密切相关,其中氧化亚氮(N_2O)因其高达 273 的全球增温潜势(以 CO_2 为基准 1)而备受关注^[1]。尽管其大气浓度(335 nmol/mol)远低于 CO_2 (420 $\mu\text{mol/mol}$),但 N_2O 对百年尺度气候变暖的贡献率已达 6%^[2],其排放通量的准确评估对全球碳氮循环模型构建至关重要。

土壤中 N_2O 排放受多种因素影响,如土壤温度、湿度等^[3]。然而,微生物介导的硝化与反硝化过程是陆地生态系统 N_2O 产生的主要途径^[4],而植物-土壤界面通过光合固碳与根系分泌物输入的双向作用,深刻调控着微生物驱动的碳氮耦合循环^[5]。在酸性土壤(pH<5.5)中,真菌因耐酸特性可能在氮转化过程中占据主导地位^[6],但其对 N_2O 排放的定量贡献尚不明确,这制约了区域温室气体排放清单的准确性。

薇甘菊(*Mikania micrantha*)作为华南地区典型的入侵植物,已证实其可通过降低土壤 pH、加速有机质矿化等途径,改变微生物驱动的碳氮循环过程^[7],进而潜在影响温室气体排放通量。外来植物入侵通过根系分泌物化学计量差异、凋落物分解速率改变及微生物群落重构等途径,直接或间接调控土壤氮素转化效率与温室气体排放通量^[8]。入侵植物通过提高硝化酶活性促进 N_2O 产生,或通过碳输入增加激发 CO_2 释放^[9]。然而,现有研究多聚焦于细菌介导的氮转化途径^[10-11],忽视了酸性条件下真菌的潜在主导作用。值得注意的是,本地植物粉葛(*Pueraria lobata* var. *thomsonii*)和红薯(*Ipomoea batatas*)因其强资源竞争能力,能有效抑制薇甘菊再生和扩散,已成为替代薇甘菊的重要物种^[12-13]。然而,目前关于薇甘菊与这 2 种替代植物在温室气体排放潜势方面的比较研究尚未见报道。

基于广东地区酸性土壤(pH 5.5 左右)的生态背景^[14],本研究聚焦薇甘菊入侵对土壤温室气体排放影响及其作用机制提出以下科学假设:(1) 真菌可能在温室气体排放中占主导地位;(2) 与本地植物相比,薇甘菊温室气体排放可能被现有评估体系高估。通过抑菌实验结合 CO_2 当量(基于全球增温潜势的温室气体换算指标)核算,本研究旨在评估薇甘菊与 2 种替代植物的土壤温室气体排放差异;明确

细菌与真菌对 N_2O 和 CO_2 排放的贡献比例,可为入侵植物生态效应评估及区域生态修复提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 野外试验

试验于 2021 年 4 月在广东省茂名市茂南区(21°39'57.81" N, 110°55'14.62" E)的露天矿生态公园弃荒地开展。该地区为亚热带季风气候(年均温>22 °C,年降雨量 1 530~1 770 mm),酸性土壤(pH 4.68~4.93),受薇甘菊严重入侵,盖度达 90%以上。对入侵地(面积约 500 m²)薇甘菊经人工清除后统一整地,一半种植粉葛建立粉葛替代样地,一半留空任薇甘菊自然再生作为对照样地。植物生长 6 个多月后,于 2021 年 10 月 21 日,采用五点取样法分别从粉葛替代样地和薇甘菊自然再生样地采集植物根际土壤。样品装入标记的自封袋后立即置于冰盒转运至实验室。经去除可见植物残体及石砾后,土壤过 2 mm 筛混匀,保存于 4 °C 冰箱待测 N_2O 和 CO_2 的释放。

采集后的新鲜土样用于室内培养开展抑菌试验,试验共分为 4 个处理:(1) 全部微生物组:不添加任何抗生素的土壤;(2) 细菌组:土壤添加 2.0 mg/g 的放线菌酮,抑制真菌生长;(3) 真菌组:土壤中添加 3.0 mg/g 的硫酸链霉素,抑制细菌生长;(4) 其他微生物组:土壤中同时添加 3.0 mg/g 的链霉素和 2.0 mg/g 放线菌酮,抑制细菌和真菌生长^[15]。

采用 250 mL 培养瓶测定以上 4 种处理下的 CO_2 和 N_2O 浓度(单位 $\mu\text{mol/mol}$)^[16-17],具体操作如下:称取 10 g 过 2 mm 筛的新鲜土壤置于 250 mL 培养瓶中,实验组将抗生素原液溶于 5 mL 蒸馏水制成溶液并均匀涂抹于土壤表面,对照组以等量蒸馏水处理,于 4 °C 预培养 12 h 使抗生素充分扩散至土壤孔隙有效抑制真菌和细菌活性;随后将培养瓶转移至恒温环境(23±2) °C,各处理加入 30 mL DEA 溶液(1 mmol/L 葡萄糖与 1 mmol/L KNO_3 混合溶液),用橡胶塞密封后通入高纯氮气营造缺氧环境,抽出 25 mL 氮气并注入 25 mL 乙炔以抑制 N_2O 进一步还

原为 N₂, 置于摇床轻摇 10 min (120 r/min) 确保形成均匀土壤泥浆并促进乙炔溶解; 将培养瓶转移至 18 °C 恒温培养箱, 分别于培养 3、6、9 h 时用气密性注射器抽取 20 mL 顶空气体, 并立即补充等量高纯氮气维持瓶内压力平衡, 气体样品储存于专用气袋后送至华南植物园公共实验室平台, 采用气相色谱仪(GC-6890, Agilent Technologies)测定 N₂O 和 CO₂ 浓度(本实验未检测到甲烷的排放)。

1.2 抑菌控制实验

1.2.1 实验设计

为了进一步验证薇甘菊入侵对土壤主要温室气体释放的影响, 选用薇甘菊替代植物^[12-13]粉葛和红薯为对照, 对 3 种植物进行盆栽种植 6 个月后测定其土壤释放 N₂O 和 CO₂ 浓度, 并测定土壤氮素和有机碳含量, 以考察土壤环境因子对温室气体排放的影响。实验所用薇甘菊材料采集于华南师范大学标本园(23°8' N, 113°21' E)。2021 年 3 月底, 将选取的健康茎段剪裁为 7~10 cm 插穗, 每段保留 2 个茎节, 置于锡纸包裹的培养瓶中, 于 RXZ 智能型人工气候箱(宁波江南仪器厂)中进行无性繁殖。培养条件设置为: 光强 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光周期 12 h/12 h (光照/黑暗), 恒温 25 °C, 相对湿度 65%。粉葛和红薯扦插苗购自淘宝平台(店铺 ID: 4165405168), 并在相同条件下进行无性繁殖培养。

2021 年 4 月, 经过 2 周的扦插培养后, 从中筛选出生长健壮且长势一致的扦插苗用于试验, 并将其移植至花盆中(直径 19~33.5 cm, 高度 22 cm)。每个盆内装入 7.5 kg 栽培基质, 该基质由华南师范大学标本园采集的红土与园艺土按 3:1 的比例混合配制而成。将薇甘菊、粉葛和红薯 3 种植物各自单种(分别简称为 Mm、Pl 和 Ib), 每盆 2 株, 共 3 种处理, 每处理设置 4 个重复。所有幼苗定植后随机排列, 在华南师范大学生物园温室中培养, 期间保持统一水管理。

1.2.2 土壤氮素、有机碳和温室气体的测定

于盆栽种植 6 个月后采集试验植物的根际土壤。去除杂质和植物根系后, 将土壤样品混匀后用 2 mm 筛进行初筛。过筛后的土壤样品分为 2 份: 1 份鲜样置于 4 °C 冰箱保存, 1 周内采用氯仿熏蒸法(chloroform fumigation-extraction method, FE)测定土壤微生物生物量氮^[17], 并按 1.1 的方法检测 CO₂ 和 N₂O 浓度。基于野外试验表明土壤培养 9 h 后菌源温室气体排放差异显著, 故抑菌控制实验选定此

时段进行检测。另 1 份样品自然风干后保存, 用于测定土壤全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳。土壤过 0.15 mm 筛, 采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量; 土壤过 1 mm 筛, 经过 2 mol/L KCl 溶液浸提后, 采用靛酚蓝比色法测定铵态氮含量; 采用紫外分光光度法测定硝态氮含量; 土壤过 0.15 mm 筛, 采用重铬酸钾氧化-外加热法, 通过硫酸-重铬酸钾体系氧化有机碳后, 以硫酸亚铁滴定剩余氧化剂, 测定有机碳含量^[18-19]。

1.3 数据的统计分析

为综合评估这些温室气体对全球变暖的影响, 引入全球增温潜势(GWP)的概念进行数据分析。温室效应潜势用于衡量温室气体对全球变暖的影响, 指特定时段(常用 100 a)内, 1 kg 温室气体相较于 1 kg CO₂ 的辐射强迫比值。已知 CO₂ 的 GWP 值为 1, N₂O 的 GWP 值为 273^[1]。根据“ $\mu\text{mol}/\text{mol} \times \text{GWP}$ ”的计算方法, 将 2 种气体的浓度分别与各自的 GWP 值相乘, 来计算 CO₂ 当量。

用 R 软件进行统计分析, 对土壤理化性质、N₂O 和 CO₂ 排放浓度进行单因素方差分析, 采用 Duncan 检验($P < 0.05$)进行多重比较, 对影响 CO₂ 当量排放的土壤理化因子进行随机森林分析, 结合“ggplot2”、“agricolae”、“dplyr”、“tidyr”、“purrr”等 R 包, 对数据进行可视化处理, 从分布特征、离散程度等维度展示数据特征; 使用 GraphPad 软件对抑菌剂处理下 N₂O 浓度进行独立样本 t 检验($P < 0.05$), 对筛选出的土壤理化关键因子与总 CO₂ 排放当量数据进行线性回归分析; 同时使用 GraphPad 软件对数据进行可视化。

2 结果和分析

2.1 野外实验-N₂O 排放随时间的变化

在 N₂O 排放特征方面, 薇甘菊和粉葛生长土壤 N₂O 排放浓度在各种处理下均表现为随时间递增的趋势(图 1)。未进行微生物抑制的土壤(Total) N₂O 排放浓度始终高于微生物抑制组, 显示出微生物活动对 N₂O 排放的增强作用。并且薇甘菊和粉葛生长土壤均表现为真菌 N₂O 排放量高于细菌。

2.2 抑菌控制实验

2.2.1 土壤有机碳和土壤氮素的变化

盆栽种植 6 个月后, 薇甘菊生长显著改变了土壤理化性质, 氮素指标发生了显著变化(表 1)。总

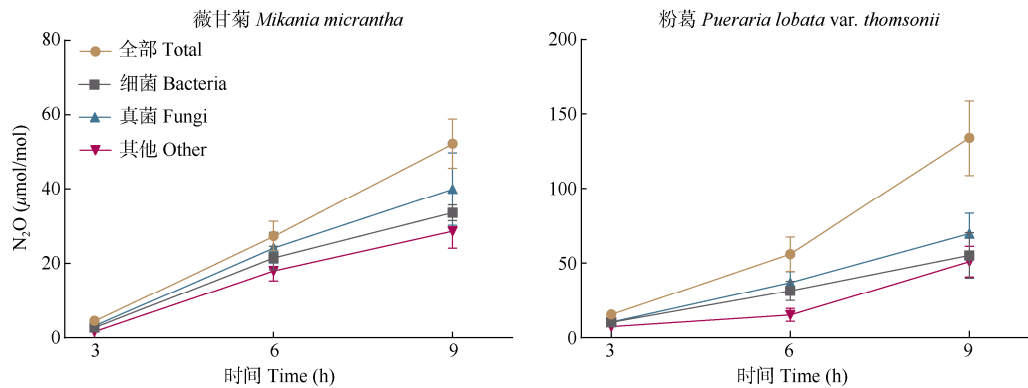


图 1 野外实验薇甘菊和粉葛生长土壤的 N₂O 排放浓度

Fig. 1 N₂O concentrations from soils grown *Mikania micrantha* and *Pueraria lobata* in field experiment

表 1 3 种植物生长 6 个月后的土壤氮素与有机碳含量变化

Table 1 Changes in soil nitrogen and organic carbon contents of three species after 6-month cultivation

理化性质 Physicochemical property	基底 Baseline	薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	粉葛 <i>Pueraria lobata</i> var. <i>thomsonii</i>	红薯 <i>Ipomoea batatas</i>
总氮 Total nitrogen (g/kg)	1.01±0.02a	0.78±0.01c	0.87±0.01b	0.73±0.01d
铵态氮含量 Ammonium nitrogen (mg/kg)	42.65±1.07a	30.28±1.69b	43.01±1.37a	30.94±2.20b
硝态氮含量 Nitrate nitrogen (mg/kg)	50.26±0.60a	44.46±1.34b	50.61±2.18a	39.77±0.71c
微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen (mg/kg)	24.39±0.72c	39.55±2.87b	44.47±2.97a	37.49±2.75b
有机碳 Organic carbon (g/kg)	48.76±1.11b	46.79±1.33b	51.40±1.52a	44.64±1.38c

$n=4$; 同行数据后不同字母表示 Duncan 检验差异显著($P<0.05$)。

$n=4$; Data followed different letters at the same line indicate significant difference at 0.05 level by Duncan-test.

氮、铵态氮和硝态氮含量的变化表现为薇甘菊生长土壤显著低于基底值和粉葛，其中总氮和硝态氮含量高于红薯生长土壤，显示其对硝态氮的吸收利用能力介于粉葛和红薯之间。微生物生物量氮则表现为 3 种植物均显著高于基底值，其中薇甘菊生长土壤的含量低于粉葛。薇甘菊生长土壤的有机碳含量与基底值无显著差异，但显著低于粉葛，高于红薯。

2.2.2 抑菌控制条件下细菌和真菌对 N₂O 和 CO₂ 排放的影响

控制实验表明不同抑菌剂处理对温室气体排放的影响不同(图 2)。在 N₂O 排放方面，薇甘菊与红薯生长土壤表现为由真菌引起的 N₂O 排放浓度显著高于细菌，真菌在 N₂O 排放中起主导作用；粉葛生长土壤则表现为真菌与细菌引起的 N₂O 排放浓度没有显著差异。在 CO₂ 排放方面，薇甘菊与粉葛生长土壤均表现为细菌与真菌的排放浓度没有显著差异，红薯生长土壤则表现为真菌的排放浓度大于细菌。

通过分析 3 种植物生长土壤中细菌和真菌对氧化亚氮(N₂O)排放的相对贡献，结果表明薇甘菊(真

菌 79.3%；细菌 58.1%)和红薯(真菌 74.5%；细菌 55.6%)生长土壤均表现为真菌对 N₂O 排放的贡献显著高于细菌，表现出较强的真菌主导特征。而粉葛生长土壤则表明细菌和真菌的贡献无显著差异(图 3)。

2.2.3 抑菌控制条件下 CO₂ 当量排放特征

3 种植物生长土壤的 CO₂ 当量排放特征表明，薇甘菊生长土壤均低于粉葛和红薯，在所有处理组中均保持最低排放水平。并且，各抑制微生物处理组生长土壤的 CO₂ 排放当量均低于全部微生物组(图 4)。

2.2.4 抑菌控制条件下 CO₂ 当量的影响因子

随机森林模型表明(图 5)，对 CO₂ 当量产生影响的因素依次为植物生长土壤总氮(TN, 12.53%)、NO₃⁻-N (11.42%)、NH₄⁺-N (11.35%)、有机碳(OC, 9.46%)、微生物生物量氮(MBN, 4.08%)，其中 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 影响显著($P<0.05$)。线性回归分析进一步证实，CO₂ 当量与植物生长土壤 TN ($R^2=0.54$, $P<0.01$)、NO₃⁻-N ($R^2=0.49$, $P<0.05$)和 NH₄⁺-N ($R^2=0.82$, $P<0.0001$)呈显著正相关。OC 和 MBN 对 CO₂ 当量的影响相对较小，未达显著水平。

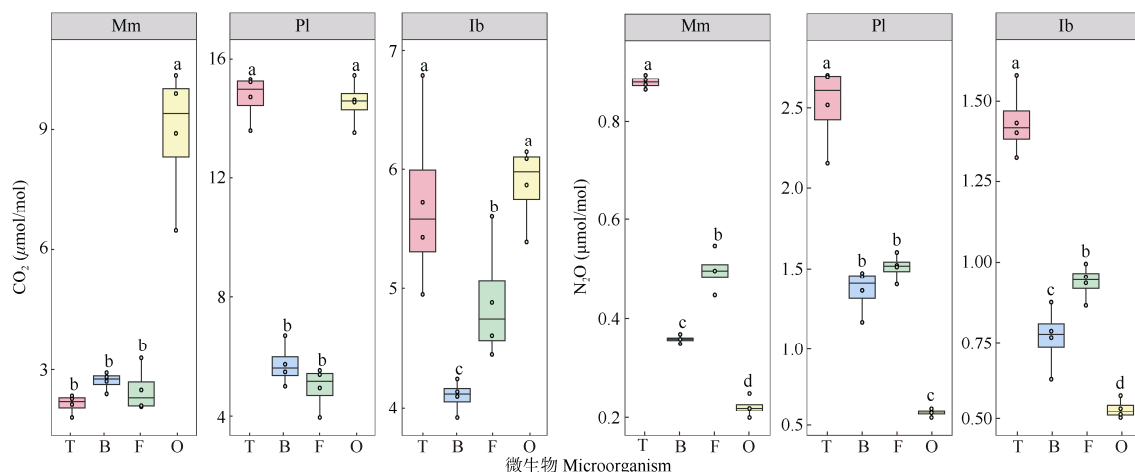


图2 抑菌控制条件下细菌和真菌对3种植物生长土壤 N₂O 和 CO₂ 排放的影响。n=4; Mm: 薇甘菊; Pl: 粉葛; Ib: 红薯; T: 全部微生物; F: 真菌; B: 细菌; O: 其他微生物。柱上不同字母表示 Duncan 检验差异显著(P<0.05)。下同

Fig. 2 Effects of bacteria and fungi on N₂O and CO₂ emissions from soils cultivated with three species under bacteriostatic condition. Mm: *Mikania micrantha*; Pl: *Pueraria lobata* var. *thomsonii*; Ib: *Ipomoea batatas*; T: Total; F: Fungi; B: Bacteria; O: Others. Different letters upon column indicate significant difference at 0.05 level by Duncan-test. The same below

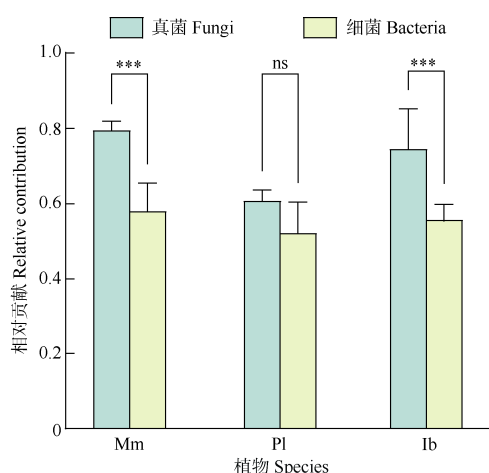


图3 抑菌控制条件下细菌与真菌对3种植物生长土壤 N₂O 排放的相对贡献。n=4; ***: P<0.001; ns: 差异不显著。

Fig. 3 Bacterial and fungal contributions to N₂O emissions across three species under bacteriostatic condition. n=4; ***: P<0.001, ns: No significance.

3 讨论和结论

3.1 薇甘菊引起的主要温室气体排放低于本地植物

研究结果表明,薇甘菊生长土壤引起的温室气体排放显著低于粉葛和红薯。薇甘菊根际土壤总氮、铵态氮、硝态氮、微生物生物量氮、有机碳均显著低于粉葛。粉葛根瘤固氮过程可能通过 NH₃ 挥发和根系分泌含氮化合物(如尿素)^[20],提升了硝化与反硝化底物浓度,从而促进了 N₂O 的排放。CO₂

排放特征表明,虽然菌群排放浓度无显著差异,但薇甘菊生长土壤的整体 CO₂ 排放通量较粉葛降低了 84.13%,这可能源于根系分泌物对异养微生物代谢途径的特异性调控^[21]。

相较于红薯生长土壤,薇甘菊根际土壤总氮、硝态氮和有机碳含量分别高出 6.85%、11.79%和 4.82%。结合 Shen 等^[22]关于红薯低营养需求特性的研究,本研究观察到红薯根际养分被显著消耗的现象可能源于其微生物矿化作用,导致氮素和碳源通过 N₂O 和 CO₂ 的形式流失。这种养分利用策略差异最终使薇甘菊生长土壤的 CO₂ 当量排放较2种本地植物降低了 39.34%~65.44%。

3.2 真菌主导了薇甘菊入侵土壤 N₂O 的排放

土壤微生物抑制实验表明,未抑制组的 N₂O 排放浓度持续高于抑制组,验证了微生物活动对 N₂O 产生的关键作用^[23]。与传统认知中细菌主导反硝化作用的观点^[24]不同,本研究表明薇甘菊入侵土壤中真菌是 N₂O 排放的关键驱动者(其相对贡献为 79.3%),其作用强度较细菌(58.1%)提升了 36.5%。这可能与广东地区土壤 pH 值(4.5~5.5)的酸性特征有关^[25]。在此环境下真菌群落多样性较细菌更具稳定性,同时硝化菌群(如变形菌门 *Proteobacteria*)在低 pH 条件下的适应性降低^[26],导致真菌介导的异养硝化过程成为了 N₂O 产生的主要途径^[26]。

3.3 土壤氮素是主要温室气体排放的主要驱动因子

随机森林模型表明,植物生长土壤中总氮、铵

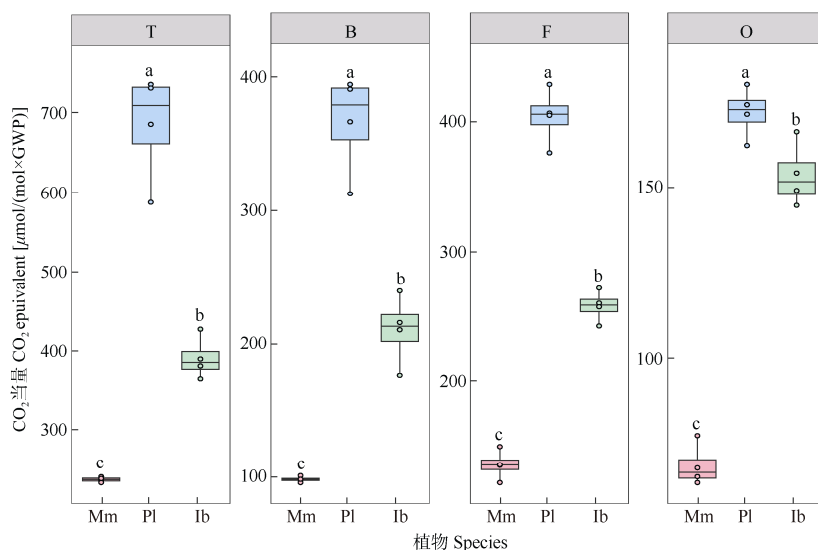


图 4 抑菌控制条件下 3 种植物生长土壤 CO_2 当量排放差异。 $n=4$ 。

Fig. 4 Variation in soil CO_2 -equivalent emissions among three species under bacteriostatic condition. $n=4$.

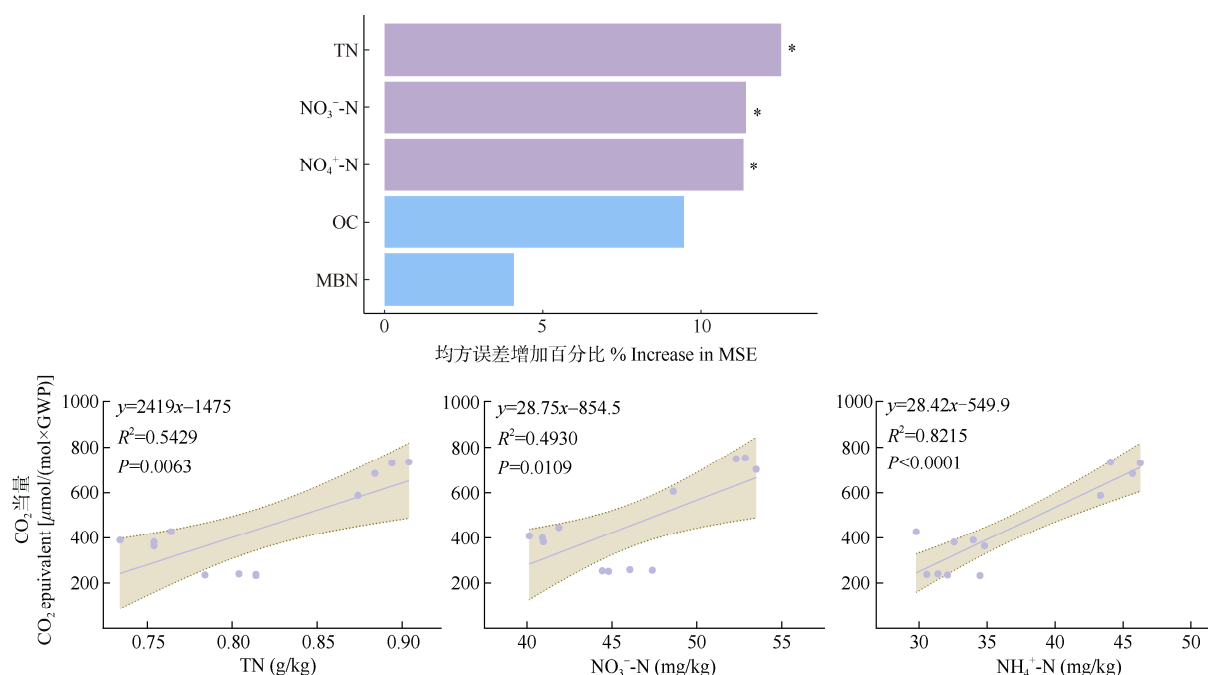


图 5 抑菌控制条件下土壤氮素和有机碳对 CO_2 当量影响的随机森林分析及线性回归分析。TN: 总氮; OC: 有机碳; MBN: 微生物生物量氮。

Fig. 5 Random forest and linear regression analyses of the effects of soil nitrogen and organic carbon on CO_2 equivalent emissions under bacteriostatic condition. TN: Total nitrogen; OC: Organic carbon; MBN: Microbial biomass nitrogen.

态氮和硝态氮共同解释了 CO_2 当量变异的 35.3%，是影响 CO_2 当量的关键因素，印证了植物入侵通过改变氮循环影响温室气体排放的理论框架^[27]。薇甘菊生长土壤总氮、铵态氮、硝态氮含量较基底值显著降低，这与入侵植物高效吸收策略及微生物生物量氮固定效应密切相关^[27-28]，并且微生物代谢驱动的有机氮矿化过程形成正反馈机制，既满足植物生

长需求^[29]又促进了真菌的生长和繁殖^[30]，使其数量增加，从而增强了真菌介导的异养硝化过程。

氮素可利用性同时通过双重途径影响 CO_2 排放：一是通过促进根系呼吸速率和微生物代谢活性^[31]；二是通过加速有机碳分解及其耦合的氮转化过程^[32]，这与 CO_2 当量与氮素指标的正相关性一致^[33]。值得注意的是，尽管有机碳对温室气体排

放变异的直接贡献率仅为 9.46%, 但其通过调控 C/N 化学计量比间接影响微生物代谢途径^[34]。上述结论修正了入侵植物必然加剧温室效应的传统认知^[35], 入侵植物的温室气体排放效应可能因对照物种的选择而存在差异。在本研究中, 薇甘菊的温室效应势显著低于粉葛和红薯, 这可能与其独特的氮利用策略和真菌主导的 N₂O 排放机制有关。然而, 这一结论需谨慎推广, 未来研究应纳入更多本地物种和长期数据以全面评估入侵植物的气候效应。

本研究也存在以下局限: 一是抑菌实验中抗生素的添加可能对非目标微生物产生抑制作用, 且未能完全区分真菌与细菌的交互作用对温室气体排放的影响; 二是盆栽实验的土壤条件可能与自然生境存在差异, 影响植物生长和根系分泌模式; 三是温室气体测定仅基于短期培养实验, 未能反映季节动态变化对排放通量的长期影响。

综上, 本研究结果表明, 薇甘菊生长土壤 CO₂ 当量排放较本地植物粉葛和红薯分别降低 39.34%~65.44%; 薇甘菊生长土壤真菌 N₂O 排放的相对贡献 (79.3%) 大于细菌 (58.1%); 土壤氮素是温室气体排放的核心驱动因子, 解释了 35.3% 的 CO₂ 当量变异; 入侵植物的温室气体排放效应因对照物种的选择而存在差异。薇甘菊的排放显著低于粉葛和红薯, 但需进一步验证其普适性。本研究结果为区域生态修复中入侵植物的综合效益评估提供了新的量化依据和理论框架。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the 6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] ALSINA M M, FANTON-BORGES A C, SMART D R. Spatiotemporal variation of event related N₂O and CH₄ emissions during fertilization in a California almond orchard [J]. Ecosphere, 2013, 4(1): 1–21. doi: 10.1890/ES12-00236.1.
- [3] LIU H, ZHAO P, LIN Y B, et al. CH₄ and N₂O fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of south China [J]. J Trop Subtrop Bot, 2008, 16(4): 304–314. [刘惠, 赵平, 林永标, 等. 华南丘陵区 2 种土地利用方式下地表 CH₄ 和 N₂O 通量研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2008, 16(4): 304–314. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2008.4.1936.]
- [4] XIAO X, DELGADO-BAQUERIZO M, SHEN H Y, et al. Microbial interactions related to N₂O emissions and temperature sensitivity from rice paddy fields [J]. mBio, 2023, 14(1): e0326222. doi: 10.1128/mbio.03262-22.
- [5] BAIS H P, WEIR T L, PERRY L G, et al. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms [J]. Annu Rev Plant Biol, 2006, 57(1): 233–266. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159.
- [6] REX D, CLOUGH T J, RICHARDS K G, et al. Impact of nitrogen compounds on fungal and bacterial contributions to codenitrification in a pasture soil [J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 13371. doi: 10.1038/s41598-019-49989-y.
- [7] SUN F, OU Q J, YU H X, et al. The invasive plant *Mikania micrantha* affects the soil foodweb and plant-soil nutrient contents in orchards [J]. Soil Biol Biochem, 2019, 139: 107630. doi: 10.1016/j.soilbio.2019.107630.
- [8] PORTIER E, SILVER W L, YANG W H. Invasive perennial forb effects on gross soil nitrogen cycling and nitrous oxide fluxes depend on phenology [J]. Ecology, 2019, 100(7): e02716. doi: 10.1002/ecy.2716.
- [9] GAO Z L, GUO Y Q, ZOU J W. Effect of invasive plants (*Conyza sumatrensis* and *Alternanthera philoxeroides*) on soil carbon and nitrogen processes [J]. J Agro-Environ Sci, 2011, 30(4): 797–805. [高志亮, 过燕琴, 邹建文. 外来植物水花生和苏门白酒草入侵对土壤碳氮过程的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 797–805.]
- [10] SHEN S C, XU G F, CLEMENTS D R, et al. Suppression of reproductive characteristics of the invasive plant *Mikania micrantha* by sweet potato competition [J]. BMC Ecol, 2016, 16(1): 30. doi: 10.1186/s12898-016-0085-9.
- [11] DONG W T, ZHU Y Y, CHANG H Z, et al. An SHR-SCR module specifies legume cortical cell fate to enable nodulation [J]. Nature, 2021, 589(7843): 586–590. doi: 10.1038/s41586-020-3016-z.
- [12] YU H X, YUE M F, WANG C, et al. Priority effects and competition by a native species inhibit an invasive species and may assist restoration [J]. Ecol Evol, 2020, 10(23): 13355–13369. doi: 10.1002/ece3.6938.
- [13] SHEN S C, XU G F, CLEMENTS D R, et al. Suppression of the invasive plant mile-a-minute (*Mikania micrantha*) by local crop sweet potato (*Ipomoea batatas*) by means of higher growth rate and competition for soil nutrients [J]. BMC Ecol, 2015, 15(1): 1. doi: 10.1186/s12898-014-0033-5.
- [14] LUO X L, LIU J, WANG Q, et al. Temporal and spatial changes in pH and organic matter and their influencing factors in soils with various land use types in Guangdong Province since 2016 [J]. Ecol Environ Sci, 2024, 33(12): 1849–1861. [罗小玲, 刘军, 王琦, 等. 2016 年以来广东省不同土地利用类型土壤 pH 和有机质时空变化及其影响因素分

- 析 [J]. 生态环境学报, 2024, 33(12): 1849–1861. doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2024.12.003.]
- [15] HEROLD M B, BAGGS E M, DANIELL T J. Fungal and bacterial denitrification are differently affected by long-term pH amendment and cultivation of arable soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 2012, 54: 25–35. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.04.031.
- [16] LIU S, WANG C K, XU F. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30(15): 4075–4084. [刘实, 王传宽, 许飞. 4 种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量 [J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4075–4084. doi: 10.20103/j.stxb.2010.15.014.]
- [17] ZHANG W, MO J M, FANG Y T, et al. Effects of nitrogen deposition on the greenhouse gas fluxes from forest soils [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(5): 2309–2319. [张伟, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响 [J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2309–2319. doi: 10.1016/S1872-2032(08)60047-5.]
- [18] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19(6): 703–707. doi: 10.1016/0038-0717(87)90052-6.
- [19] BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30–56. [鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30–56.]
- [20] VOB L, HEINEMANN K J, HERDE M, et al. Enzymes and cellular interplay required for flux of fixed nitrogen to ureides in bean nodules [J]. *Nat Commun*, 2022, 13(1): 5331. doi: 10.1038/s41467-022-33005-5.
- [21] VAN DER PUTTEN W H. Impacts of soil microbial communities on exotic plant invasions [J]. *Trends Ecol Evol*, 2010, 25(9): 512–519. doi: 10.1016/j.tree.2010.06.006.
- [22] SHEN S C, XU G F, MA G Z, et al. Sweet potato (*Ipomoea batatas*) and hyacinth bean (*Lablab purpureus*) in combination provide greater suppression of mile-a-minute (*Mikania micrantha*) than either crop alone [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1070674. doi: 10.3389/fpls.2023.1070674.
- [23] LI J Q, MENG B, YANG X C, et al. Suppression of AMF accelerates N₂O emission by altering soil bacterial community and genes abundance under varied precipitation conditions in a semiarid grassland [J]. *Front Microbiol*, 2022, 13: 961969. doi: 10.3389/fmicb.2022.961969.
- [24] YAO Y Z, SONG Y T, SU P J, et al. Asymmetric responses of functional microbes in methane and nitrous oxide emissions to plant invasion: A meta-analysis [J]. *Soil Biol Biochem*, 2023, 178: 108931. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108931.
- [25] WANG T T, CAO X X, CHEN M M, et al. Effects of soil acidification on bacterial and fungal communities in the Jiaodong Peninsula, northern China [J]. *Agronomy*, 2022, 12(4): 927. doi: 10.3390/agronomy12040927.
- [26] ZHU T B, MENG T Z, ZHANG J B, et al. Fungi-dominant heterotrophic nitrification in a subtropical forest soil of China [J]. *J Soil Sedim*, 2015, 15(3): 705–709. doi: 10.1007/s11368-014-1048-4.
- [27] EHRENFELD J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes [J]. *Ecosystems*, 2003, 6(6): 503–523.
- [28] WANG W J, ZHU Q Y, DAI S Y, et al. Effects of *Solidago canadensis* L. on mineralization-immobilization turnover enhance its nitrogen competitiveness and invasiveness [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 882: 163641. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163641.
- [29] LI J, HE J Z, LIU M, et al. Invasive plant competitiveness is mediated by nitrogen use strategies and rhizosphere microbiome [J]. *Soil Biol Biochem*, 2024, 192: 109361. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109361.
- [30] LIU M H, WEI Y Q, LIAN L, et al. Discovering the role of fairy ring fungi in accelerating nitrogen cycling to promote plant productivity in grasslands [J]. *Soil Biol Biochem*, 2024, 199: 109595. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109595.
- [31] LIU Y, CHEN Q M, WANG Z X, et al. Nitrogen addition alleviates microbial nitrogen limitations and promotes soil respiration in a subalpine coniferous forest [J]. *Forests*, 2019, 10(11): 1038. doi: 10.3390/f10111038.
- [32] ZENG W J, WANG Z D, CHEN X Y, et al. Nitrogen deficiency accelerates soil organic carbon decomposition in temperate degraded grasslands [J]. *Sci Total Environ*, 2023, 881: 163424. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163424.
- [33] NI B, ZHANG W, XU X C, et al. Exponential relationship between N₂O emission and fertilizer nitrogen input and mechanisms for improving fertilizer nitrogen efficiency under intensive plastic-shed vegetable production in China: A systematic analysis [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2021, 312: 107353. doi: 10.1016/j.agee.2021.107353.
- [34] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165–173. doi: 10.1038/nature04514.
- [35] BEYENE B B, LI J J, YUAN J J, et al. Climatic zone effects of non-native plant invasion on CH₄ and N₂O emissions from natural wetland ecosystems [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 906: 167855. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167855.