

蚯蚓和三叉苦对亚热带人工林土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的短期效应

高波¹, 傅声雷^{2,3}, 张卫信^{2,3}, 刘素萍^{2,3}, 周存宇^{1*}

(1. 长江大学园艺园林学院, 湖北 荆州 434025; 2. 中国科学院华南植物园, 广州 510650;

3. 鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 广东 鹤山 529725)

摘要: 在广东鹤山大叶相思(*Acacia auriculæformis*)人工林内设置外来蚯蚓西土寒究蚓(*Ocnerodrius occidentalis*)和乡土植物三叉苦(*Evodia lepta*)野外控制实验,用静态箱-气相色谱法对土壤 N₂O 和 CH₄ 通量进行 15 d 的原位测定,研究蚯蚓和三叉苦对土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的影响。结果表明:三叉苦并未明显增加土壤 N₂O 和 CH₄ 的通量,而假植物(模拟三叉苦的物理效应)则显著促进了土壤 N₂O 的释放通量。整个实验阶段,蚯蚓效应分别使无植物对照和三叉苦处理土壤 N₂O 通量增加了 26.7% 和 66.3%,而在种假植物条件下,添加蚯蚓使土壤 N₂O 通量降低了 39.7%;同时,蚯蚓效应使对照处理土壤 CH₄ 吸收通量增加了 10.3%,使假植物处理土壤 CH₄ 吸收通量降低了 90.6%,而使三叉苦处理土壤 CH₄ 释放通量增加了 301.8%。可见,蚯蚓能够促进人工林土壤 N₂O 释放;同时促进人工林土壤从 CH₄ “汇”向“源”转变。三叉苦的物理过程促进土壤 N₂O 的释放,而三叉苦的生物过程抑制土壤 N₂O 的排放。如何减缓人工林中土壤 N₂O 和 CH₄ 的排放,必须综合考虑植物物理过程、生物过程以及蚯蚓对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放过程影响的独立效应和交互效应。

关键词: 蚯蚓; N₂O; CH₄; 三叉苦

中图分类号: S714.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)04-0364-08

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.04.004

Short-term Effects of Earthworm and *Evodia lepta* on Soil N₂O and CH₄ Fluxes in a Subtropical Plantation

GAO Bo¹, FU Sheng-lei^{2,3}, ZHANG Wei-xin^{2,3}, LIU Su-ping^{2,3}, ZHOU Cun-yu^{1*}

(1. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Heshan National Field Research Station of Forest Ecosystem, Heshan 529725, China)

Abstract: A field experiment was conducted in *Acacia auriculæformis* plantation at the Heshan Hilly Land Interdisciplinary Experimental Station to investigate the short-term effects of earthworm (*Ocnerodrius occidentalis*) and plant (*Evodia lepta*) on soil N₂O and CH₄ fluxes. The N₂O and CH₄ fluxes were measured *in situ* using the static chamber technique and analyzed with gas chromatogram for 15 days. The results showed that *E. lepta* did not significantly enhance soil N₂O and CH₄ fluxes, but fake plant (to simulate the physical effects of *E. lepta*) significantly increased soil N₂O emissions ($P < 0.05$). Earthworm promoted soil N₂O fluxes in both control (without plant or fake plant) and the treatment with *E. lepta* by 26.7% and 66.3%, respectively. Contrary to our hypothesis, the effects of additional earthworm on soil N₂O fluxes were not always positive. In the treatment with fake plant, the earthworm effects decreased the N₂O fluxes by 39.7%. Meanwhile, the earthworm increased the

收稿日期: 2010-01-04 接受日期: 2010-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(30870457); 青年科学基金项目(30901147); 国家杰出青年科学基金项目(30925010); 长江大学博士科研启动基金项目(801190010105)资助

* 通讯作者 Corresponding author, email: zhoucey@scbg.ac.cn

CH₄ uptake by 10.3% in control, but decreased the CH₄ uptake by 90.6% in the treatment with fake plant and decreased CH₄ uptake by 301.8% in the treatment with *E. lepta*. Earthworm addition shifted the soil CH₄ from uptake to emission in the treatment with *E. lepta* and significantly decreased soil CH₄ uptake in the treatment with fake plant ($P < 0.05$). The results indicated that earthworm could accelerate soil N₂O emission and might even convert CH₄ sinks into sources in the *A. auriculæformis* plantation. The physical effect of *E. lepta* facilitated soil N₂O emission, while the biological processes of *E. lepta* might suppress soil N₂O efflux. No significant correlations between N₂O as well as CH₄ fluxes and hydrothermal factors were found in the present study. In order to reduce the soil greenhouse gas emission, it will be useful to consider both the independent and interactive effects of plant physical processes, plant biological processes and earthworm activity on the efflux and influx of soil greenhouse gases.

Key words: Earthworm; N₂O; CH₄; *Evodia lepta*

全球气候与环境变化是目前世界最受关注的科学问题之一,温室气体作为全球气候变化的重要导因,受到前所未有的关注。近几十年来,大气中的温室气体逐年增加^[1-3]。Houghton 等^[4]指出热带森林和温带森林土壤的 N₂O 排放量之和约占全球 N₂O 排放总量的 24.7%,全球 N₂O 排放源的 57% 为土壤释放^[5]。土壤是大气 CH₄ 的一个重要汇,约占全球 CH₄ 年总释放量的 10%^[6],湿地生境是大气 CH₄ 主要的自然来源。

N₂O 和 CH₄ 的产生是物理、化学和生物学过程综合作用的结果,土壤动物和植物对土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的影响成为关注的热点。蚯蚓作为大型土壤动物在生态系统的物质循环和能量传递过程中发挥着不可或缺的作用。很多研究表明,蚯蚓能够提高森林和庭园土壤总 N₂O 排放通量,促进效应接近 33%^[7-8]。Borken 等^[9]野外 120 d 的土柱实验表明,放养蚯蚓使得土壤 CH₄ 氧化率比对照降低 53%,而 N₂O 排放量提高了 57%。但是,蚯蚓在任何生态系统中并不都提高 N₂O 的排放,Speratti 等^[10]的研究表明,蚯蚓对农田土壤 N₂O 通量无显著影响。同样,植物生长能够显著影响土壤 N₂O 的排放过程^[11]。Duxbury 等^[12]的研究表明在一定条件下通过植物吸收,降低土壤有效氮源,可以减少 N₂O 排放。植物根系分泌物能促进 CH₄ 的产生,促进作用大小与植物种类及分泌物的数量和质量有关^[13]。蚯蚓、植物以及和微生物相互作用可以促进或抑制土壤 N₂O 和 CH₄ 产生与释放,但这个结论很难在野外实验进行验证,主要是由于土壤湿度和有效态底物易随时间波动^[14-15],相关研究也很少见。因此,通过野外控制平台探讨蚯蚓和植物对土壤 N₂O 和 CH₄ 气体的产生与排放的影响效应十分必要。

西土寒究蚓(*Ocnerodrilus occidentalis*)为广东非自然林内广泛分布的外来种蚯蚓^[16]。本文在广东鹤山人工林设置西土寒究蚓和乡土植物三叉苦(*Evodia lepta*)野外控制实验,原位测定不同控制条件下蚯蚓和三叉苦对土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的影响,为预测土壤动物和植物在全球气候变化大背景下对人工林生态系统碳氮循环的响应提供科学依据。

1 研究地概况

试验地位于广东省鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站(112° 54' E, 22° 41' N),多为海拔 100 m 以下的低山丘陵,属南亚热带季风气候,年均温 21.7℃;年均降雨量 1800 mm,有明显的干、湿季之分,干季为 10 月至翌年 3 月,湿季为 4 ~ 9 月。土壤为砂页岩发育而成的赤红壤,属于强酸性土壤。试验地植被为 1984 年人工种植的大叶相思(*Acacia auriculæformis*);林下灌草主要为三叉苦、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、山苍子(*Litsea cubeba*)、梅叶冬青(*Ilex asprella*)、芒萁(*Dicranopteris linearis*)等。

2 研究方法

2.1 样地处理与试验设计

在大叶相思人工林内,设置 24 个 1 m × 2 m 的小样方,沿小样方四周挖槽至 80 cm 深并用 PVC 板围封小样方,确保 PVC 板入土 80 cm 并伸出地表 20 cm,以切断和隔绝大叶相思根系及阻止蚯蚓在土壤中的侧向移动。去除小样方内的灌草,并布设尼龙网以防止大叶相思凋落物向样方内输入,去除大叶相思的影响。从山坡上部往下,设 4 个平行的区组,每个区组均包含 6 个实验处理:(1)无处理

的对照(CK);(2)添加蚯蚓(CK + E);(3)种植假植物(FP);(4)种植假植物并添加蚯蚓(FP + E);(5)种植三叉苦(P);(6)种植三叉苦并添加蚯蚓(P + E)。三叉苦为鹤山地区乡土植物,在试验地大叶相思人工林下广泛分布,选择其进行研究具有代表性。三叉苦是 2007 年种植的幼苗,至今已 2 a 多,树高平均约为 1 m。在整个试验期间,三叉苦的长势良好。从试验地周边砍伐和样方内植株高度相近的三叉苦,去掉叶子,装上大小和形状接近的塑料枝条和叶子,作为假植物。在每个小样方内种植 3 株假植物,假植物与样方内三叉苦的总叶面积和郁闭度相近,以模拟三叉苦的物理效应。添加西土寒究蚓前,以电击手拣法驱除各样方中的蚯蚓^[17]。西土寒究蚓从邻近样地的林地里挖掘收集,挑选大小相对一致的蚯蚓,置于水中清肠 24 h,清洗,计数称重后,于 2009 年 5 月 17 日傍晚添加至指定小样方,每处添加 200 条蚯蚓。

2.2 N₂O 和 CH₄ 气体通量的测定

土壤 N₂O 和 CH₄ 通量利用静态箱-气相色谱法测定^[18-19]。采样箱和底座均由 PVC 管制成,箱体内径 20 cm,高 20 cm,底座高 5 cm,有储水槽。底座固定于采样位点,整个生长季节不再移动。每天上午 9:00~11:00 完成气样采集以减少气温变化引起的误差;这个时间段土壤温室气体通量测定值基本接近一天的平均值^[20]。气样采集时,先向底座的储水槽内注水,然后将采样箱罩于底座上,分别于 0、10、20 和 30 min 时用 60 mL 医用注射器采集箱内气体,所有气体样品于 24 h 内带回实验室用 HP5890D 气相色谱仪分析。添加蚯蚓前于 5 月 17 日完成 N₂O 和 CH₄ 通量的本底测定,于添加蚯蚓后第 1~7 天(2009 年 5 月 18 至 24 日)和第 15~21 天(2009 年 6 月 1 至 7 日)分别进行一周的连续测定。气体的通量是土壤单位面积上单位时间内温室气体质量的变化^[21-22]。

2.3 环境因子测定和土样分析

在采集气样的同时,在静态箱底座周边随机选取 3 点,用便携式 WSB-1 型温湿度仪测定地表温度和湿度,用便携式 JM624 型土壤温度计测定 5 cm 深处土壤温度,用 FDS100 土壤水分传感器测定 0~5 cm 深土壤的平均湿度。取 3 个点的平均值代表各个气体采样点的土壤温湿度。在添加蚯蚓前和最后一次气体采集结束后,在每个样方内随

机选取 5 点,用直径 4.5 cm 的土钻取 0~10 cm 的土壤,混合成一个土壤样品。土壤过 2 mm 筛后,一部分风干,测定 SOC、TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 等理化性质^[23]。另一部分样品放入 -4℃ 的冰箱保存,以备氯仿熏蒸 K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物生物量^[24-25]。

2.4 数据统计分析

用方差分析比较未添加蚯蚓处理(CK、FP、P)、添加蚯蚓处理(CK + E、FP + E、P + E)样方土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的差异,检验植物效应和蚯蚓效应;用配对 *t*-检验比较添加蚯蚓和相应对照处理(CK 和 CK + E、FP 和 FP + E、P 和 P + E)样方土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的差异,检验蚯蚓添加效应;各处理样方在不同时间的测定值视为相应处理的重复(即 $n = 4 \times 14$)。用 *t*-检验比较添加蚯蚓前后土壤理化性质的差异;方差分析检验土壤理化性质及微生物量之间的差异;用相关分析分别检验不同处理土壤 N₂O 和 CH₄ 通量与土壤理化性质和水热因子的相关性。所有的统计分析在 SPSS 13.0 软件中进行,显著性差异用 $P < 0.05$ 表示。

3 结果和分析

3.1 蚯蚓和三叉苦对土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的影响

两周的观测数据表现出类似的规律,因此,本文将两周数据一起综合分析。结果表明,6 种处理的土壤 N₂O 平均通量都为正值,为净排放。测定时间内,处理 CK、CK + E、FP、FP + E、P、P + E 的 N₂O 释放通量平均值依次为 38.3、48.6、61.6、37.1、31.5 和 52.4 $\mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$,P 处理的 N₂O 通量均值最低,FP 处理的最高。FP 处理的显著高于 CK 和 P 处理($P < 0.05$),P 和 CK 处理之间无显著差异。CK 和 CK + E 处理的 N₂O 通量差异不显著,FP + E 处理的显著低于 FP 处理($P < 0.05$),P + E 处理的显著高于 P 处理($P < 0.05$)(图 1C,D)。添加蚯蚓使对照和三叉苦处理土壤 N₂O 通量分别增加了 26.7% 和 66.3%,而使假植物处理土壤 N₂O 通量降低了 39.7%。

仅 P + E 处理的土壤 CH₄ 平均通量为正值,表现为 CH₄ 的弱源;其它各处理均为负值,表现为 CH₄ 的汇。测定时间内,CK、CK + E、FP、FP + E、P、P + E 处理的 CH₄ 通量平均值依次为 -38.4、-42.3、-67.6、-6.3、-6.7 和 13.6 $\mu\text{g m}^{-2}\text{h}^{-1}$,FP 处理的吸收

通量最大, P + E 处理的释放通量最高。FP 处理的吸收通量显著大于 P 处理 ($P < 0.05$), FP 和 P 处理与 CK 间均无显著差异。三叉苦处理添加蚯蚓后 CH₄ 由吸收变为释放, 假植物处理添加蚯蚓后 CH₄

吸收通量显著变小 ($P < 0.05$) (图 1A, B)。添加蚯蚓使对照处理的土壤 CH₄ 吸收通量增加了 10.3%, 使假植物处理的降低了 90.6%, 而使三叉苦处理的土壤 CH₄ 释放通量增加了 301.8%。

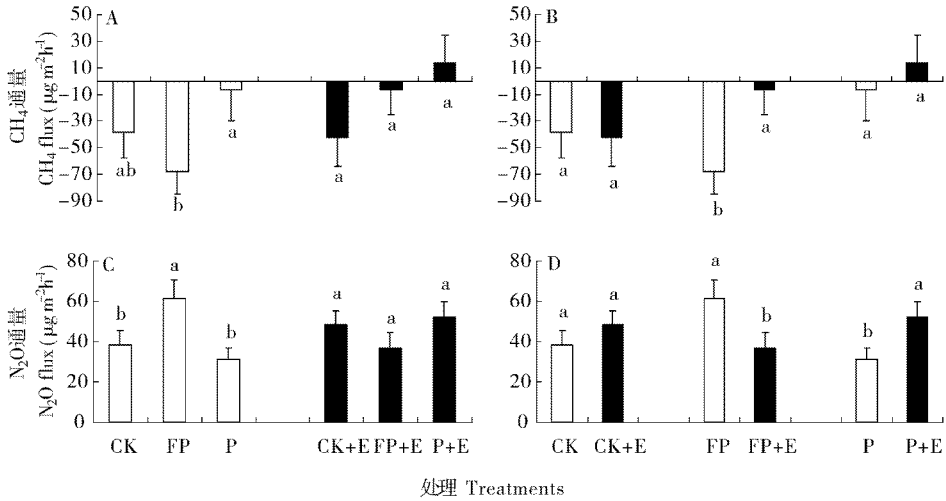


图 1 不同处理的土壤 N₂O 和 CH₄ 通量

Fig. 1 The soil nitrous oxide and methane fluxes under different treatments

$n = 56$, 柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters above bars indicate significant difference at 0.05 level by two-way ANOVA analysis; CK: 对照 Control; CK + E: 添加蚯蚓 Earthworm added; FP: 假植物 Fake plant; FP + E: 假植物并添加蚯蚓 Fake plant and earthworm; P: 三叉苦 *E. lepta*; P + E: 三叉苦并添加蚯蚓 *E. lepta* and earthworm; 下图同 The same as following Figures.

3.2 不同处理土壤 N₂O 和 CH₄ 通量的时间动态

在实验时间内, 处理 CK、CK + E、FP、FP + E、P 和 P + E 的 N₂O 通量分别为 5.5 ~ 75.3、-19.9 ~ 115.7、-12.8 ~ 67.2、16.1 ~ 82.6、-15.5 ~ 104.6、7.0 ~ 73.5 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (图 2C, D); CH₄ 通量分别为 -89.1 ~ 152.3、-140.8 ~ 77.5、-123.1 ~ 227.2、-152.0 ~ 146.7、

-157.6 ~ 16.6、-109.7 ~ 160.7 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (图 2A, B)。N₂O 通量的变化幅度相对较小, 每天的测定均值几乎都为正值, 负值仅偶尔出现, 表现为 N₂O 的释放; 而 CH₄ 通量的变化幅度相对较大, 每天的测定均值正值和负值交替出现, 多表现为 CH₄ 的吸收。

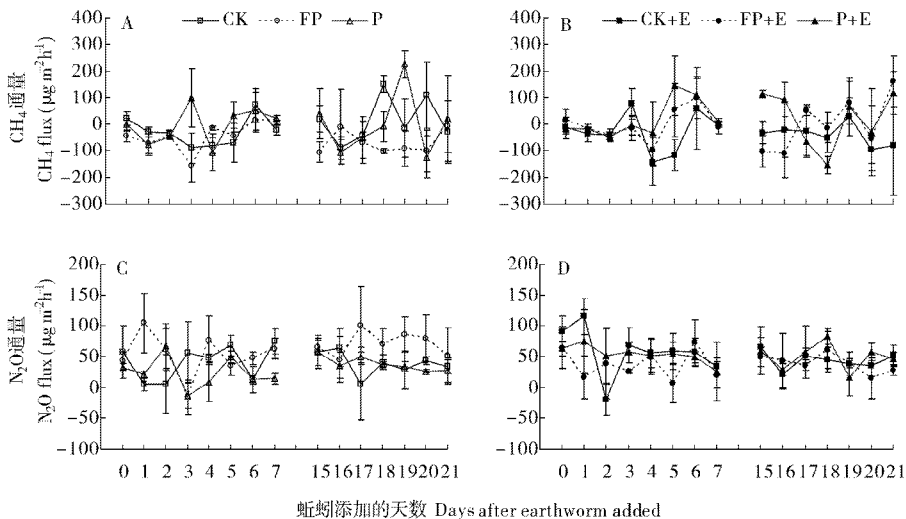


图 2 不同处理土壤 N₂O 和 CH₄ 通量时间动态

Fig. 2 The dynamics of soil nitrous oxide and methane fluxes under different treatments

3.3 蚯蚓与三叉苦对土壤理化性质和土壤微生物量的影响

添加蚯蚓与否与样点的土壤温度和湿度变化均无明显关系;种植三叉苦和假植物都使土壤5 cm深处的温度降低,而对土壤水分的影响不明显;土壤5 cm深处温度以对照样方>假植物样方>三叉苦样方,但它们之间均未达到显著差异(图 3A,B)。CK+E处理的SOC含量高于CK处理($P=0.068$),FP和FP+E、P和P+E处理之间无明显差异(图 3C)。CK+E处理的TN含量显著高于CK处理($P=0.024$),FP和FP+E、P和P+E处理之间无

显差异(图 3D)。添加蚯蚓处理(CK+E、FP+E和P+E)的 NH_4^+-N 含量均高于相应的不添加蚯蚓处理(CK、FP和P),但未达到显著差异(图 3E);不过,P+E处理的 NH_4^+-N 含量(15.14 mg kg^{-1})高于其本底(添加蚯蚓前) NH_4^+-N 含量(9.63 mg kg^{-1})($P=0.065$)。CK+E和P+E处理 NO_3^--N 含量分别高于CK和P处理,但未达到显著差异(图 3F)。添加蚯蚓和种植三叉苦对土壤微生物量碳的影响均不明显,但FP+E和P+E处理土壤微生物量氮分别高于FP和P处理(图 3G,H)。

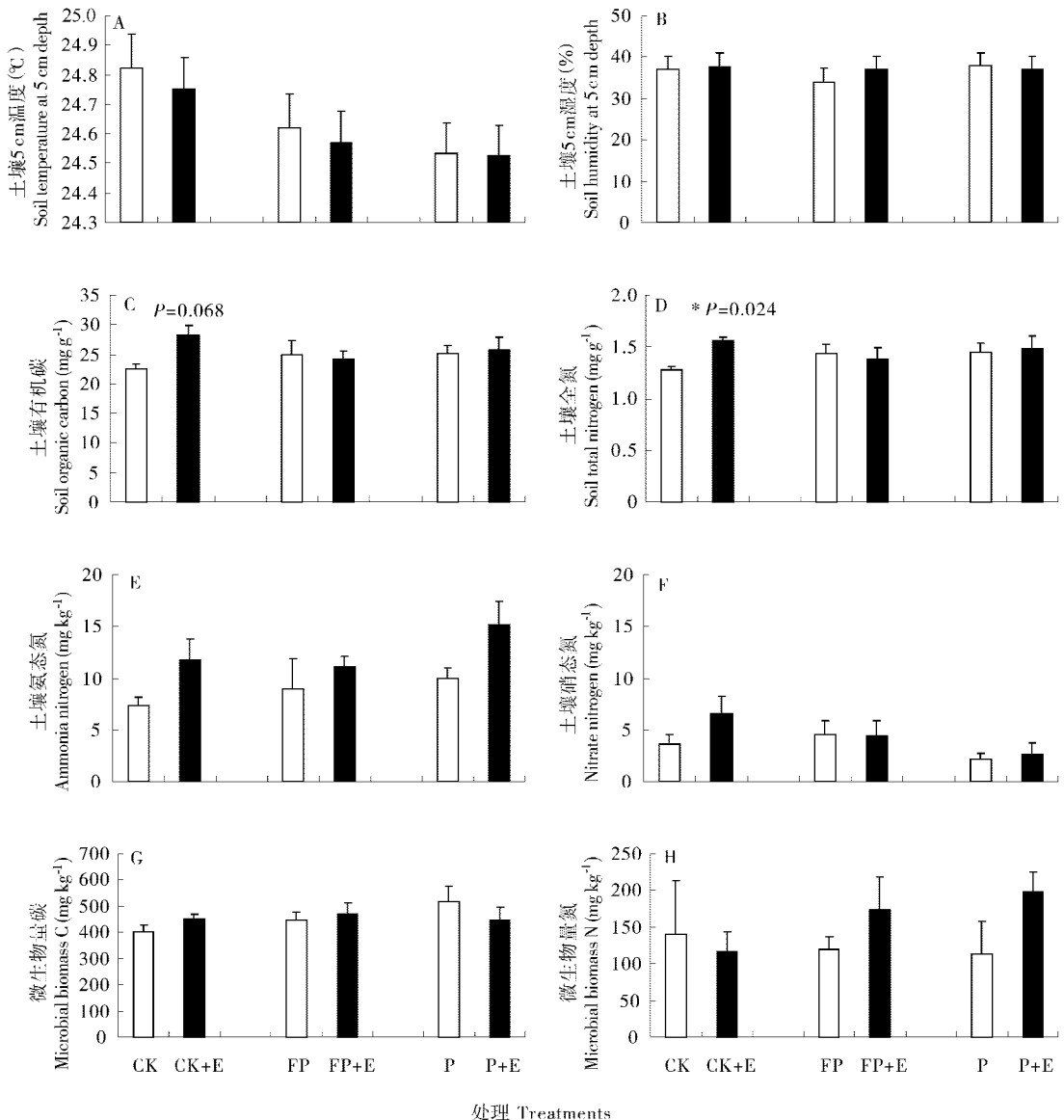


图 3 各处理表层土壤理化性质比较

Fig. 3 The physical and chemical properties of surface soil under different treatments

* 表示处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。Asterisk indicates significant difference at 0.05 level.

3.4 土壤 N_2O 和 CH_4 通量与环境因子的关系

土壤 N_2O 和 CH_4 产生与排放是复杂的物理、化学和生物学过程综合作用的结果,因而,所有能够直接影响生物化学过程的环境因子都可能影响土壤温室气体的排放。土壤 N_2O 和 CH_4 通量与各环境因子的相关分析表明:土壤 N_2O 通量与土壤水热因子均没有明显的相关性;仅 CK 处理的 CH_4 通量与土壤地表温湿度和土壤 5 cm 深湿度有显著的相关性, N_2O 和 CH_4 通量与土壤 C、N 含量的相关性不明显。

4 讨论

4.1 蚯蚓对土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响

蚯蚓通过取食、排泄、掘穴等影响土壤微生物及土壤碳、氮的矿化过程,改变土壤理化性质,对土壤的物质循环和能量传递具有重要作用^[26]。土壤 N_2O 的产生要经历一个复杂的物理、化学和生物学过程,主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成的^[27]。添加蚯蚓使对照处理和三叉苦处理中的 N_2O 通量分别增加了 26.7% 和 66.3%,其中种植三叉苦处理的 N_2O 通量的增加达到显著差异($P < 0.05$),这与 Matthies 等^[8]和 Borken 等^[9]的研究结果一致,表明蚯蚓促进土壤 N_2O 通量的增加是普遍规律。这可能是蚯蚓作用促进了微生物的硝化作用,从而产生和释放更多的 N_2O 气体,CK + E 和 P + E 处理的 NO_3^- -N 含量分别高于 CK 和 P 处理也证明了这一点;同时,CK + E 和 P + E 相对较高的 NH_4^+ -N 为硝化作用提供了丰富的底物,在一定程度上加快了硝化过程,从而增加了 N_2O 的释放。由此表明,蚯蚓能够促进人工林土壤 N_2O 释放。

土壤 CH_4 通量表现为正值或负值是甲烷产生菌和甲烷氧化菌共同作用的结果。添加蚯蚓后,假植物处理 CH_4 吸收通量显著变小($P < 0.05$),与未添加蚯蚓的假植物对照相比, CH_4 吸收通量降低了 90.6%,有显著促进 CH_4 释放的趋势;蚯蚓也在一定程度上促进了三叉苦处理 CH_4 的释放,与未添加蚯蚓的三叉苦对照相比, CH_4 释放通量增加了 301.8%,使 P + E 处理表现为 CH_4 的弱源,这和 Borken 等^[9]报道的放养蚯蚓(*Lumbricus terrestris*)能使土壤 CH_4 氧化吸收显著降低的结论一致。可能原因是植物根系生长与呼吸、蚯蚓活动以及和微生物的相互作用,使土壤产生局部缺氧环境,甲烷氧化菌活性降低,有利于甲烷产生菌发挥作用。可

见,蚯蚓能促进土壤 CH_4 释放,使人工林土壤有从 CH_4 “汇”向“源”转变的趋势。

4.2 三叉苦对土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响

三叉苦对土壤 N_2O 通量的总效应为其物理过程对 N_2O 通量的效应(三叉苦物理效应)和其生物过程对 N_2O 通量的效应(三叉苦生物效应)之和。未添加蚯蚓样方中,三叉苦的物理效应与生物效应对土壤 N_2O 通量的贡献是截然相反的。FP 处理的 N_2O 通量显著高于 CK 处理,表明三叉苦的物理效应促进土壤 N_2O 释放;P 处理和 CK 处理之间无显著差异,表明三叉苦总效应(物理效应和生物效应之和)对土壤 N_2O 通量的作用效应不明显;由此推测三叉苦生物效应抑制土壤 N_2O 的释放。

三叉苦的物理效应促进土壤 N_2O 释放,而本研究中 N_2O 通量与土壤温湿度的相关性不明显。这可能是土壤温湿度对气体通量的影响可能存在某种滞后效应,或者说气体通量大小可能是某个时间段温湿度共同作用的结果。而本研究中的土壤温湿度为和气体通量测定同步的瞬时观测值,从而可能导致 N_2O 通量与土壤温湿度实测值无相关性。因此,为了更好的明确植物三叉苦的物理效应如何通过作用于土壤温湿度来影响 N_2O 通量,在类似的研究中可以尝试应用连续温湿度监测数据代替瞬时观测值。

土壤 N_2O 的产生受底物浓度(NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N)、土壤含水量、微生物等诸多因素的影响,而微生物(主要是硝化和反硝化细菌)直接影响 N_2O 的产生。本研究中三叉苦处理的土壤 N_2O 产生的底物浓度有所增加(如图 3D,E),同时土壤温湿度与 N_2O 排放无相关性,但三叉苦的生物效应抑制土壤 N_2O 排放。可能原因是在一定条件下三叉苦与微生物形成抑制关系(如竞争、他感作用),使微生物受到胁迫,进而可能促使硝化和反硝化细菌生物量及活性降低,硝化和反硝化作用减弱,使 N_2O 产生和排放降低。但现有数据无法直接进行验证,因此需要应用微生物学手段,对植物和微生物的竞争机理以及在竞争关系下硝化和反硝化细菌生物量及活性的变化等进行深入研究。

在整个实验阶段,种植三叉苦和假植物并未明显影响土壤 CH_4 的通量,表现为 FP 和 P 处理与 CK 处理间的 CH_4 通量无显著差异,表明三叉苦物理过程和生物过程对土壤 CH_4 通量的效应都不明显。

4.3 蚯蚓和三叉苦与土壤因子相互作用对土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响

蚯蚓活动能对土壤理化性质产生影响,土壤因子又反过来影响森林土壤中的生物过程和碳氮循环^[28-29]。P + E 处理土壤 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 都呈增加趋势,这说明三叉苦和蚯蚓共同作用可以促进有机氮的矿化;CK + E 处理 NH_4^+-N 、 $NO_3^- -N$ 和 TN 不同程度增加,表明蚯蚓单独作用亦能促进有机氮的矿化;这与 Cortez 等^[30]和 Enami 等^[31]报道的蚯蚓能够显著提高土壤中无机氮含量的结果一致。由于土壤中的 $NO_3^- -N$ 不但促进反硝化速率,而且抑制或延迟 N_2O 还原为 N_2 ^[32];而土壤中的 NH_4^+-N 为硝化作用提供反应底物,其浓度能控制硝化的进程^[33],土壤 NH_4^+-N 含量的增加能在一定程度上加快硝化过程。因此,蚯蚓可以通过影响土壤 NH_4^+-N 和 $NO_3^- -N$ 含量间接影响土壤 N_2O 的排放,而硝化作用和反硝化作用的平衡决定了 N_2O 释放通量大小。另外,蚯蚓可能通过破碎混合作用促进样方内大的有机质碎片转变为细小颗粒,从而增加了 CK + E 处理土壤中 SOC 含量,但并未明显加快有机质降解形成 CH_4 的过程,这从 CK 和 CK + E 处理 CH_4 通量无差异可以看出;而在 FP + E 和 P + E 处理,蚯蚓作用可能不仅促进大的有机质碎片向小的转变,而且通过作用于微生物加快了有机质转化为 CH_4 的过程,而使 SOC 含量增加不明显,这从 FP + E 和 P + E 处理微生物生物量氮含量较高及 CH_4 有释放的趋势得到验证。蚯蚓能通过作用于土壤理化性质、微生物以及和植物相互作用影响有机质分解矿化,进而影响土壤 N_2O 和 CH_4 的产生与排放。而本文未发现 N_2O 和 CH_4 通量与土壤 C、N 含量的相关性,可能是由于气体通量数据用瞬时观测值估计通量均值,但土壤 C、N 含量是整个实验期间积累的结果,分析两者之间的相关关系,从时间尺度而言本身具有局限性。因此,在以后的研究中要探索更加有效的方法(如同位素示踪)来明确气体通量与土壤 C、N 含量之间的相互关系。

很多研究认为土壤温度和土壤湿度是影响土壤温室气体排放的主要环境因子^[34-35]。本研究中国土壤水热因子与 N_2O 和 CH_4 通量的相关性不强,除了实验方法本身的原因外,还可能由于整个实验阶段处在湿季,而土壤微生物、植物根系活性,以及土壤有效态底物在湿季易受其他环境因子影响^[22],因而时间动态上 N_2O 和 CH_4 通量波动幅度较大。由

于土壤 N_2O 和 CH_4 排放机制固有的复杂性,加上影响温室气体排放的因素众多,土壤温湿度、土壤理化性质以及微生物等因子对土壤 N_2O 和 CH_4 通量的影响必然是相互联系的。蚯蚓和植物以及与微生物的相互作用也可能对土壤 N_2O 和 CH_4 通量与水热因子等的相关性产生重要影响。

综上所述,我们认为如何减缓人工林中土壤 N_2O 和 CH_4 的排放,必须综合考虑植物物理过程、生物过程以及蚯蚓对土壤 N_2O 和 CH_4 排放过程影响的独立效应和交互效应。由于试验时间尚短,本研究结论有一定的局限性,还需在更长的时间尺度上进行实验验证。

参考文献

- [1] Watson R T, Meira Filho L G, Sanhueza E, et al. Source and sinks [M]// Houghton J T, Callendar B A, Varney S K. Climate Change: The Supplementary Report to the IPCC Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 25-46.
- [2] Mosier A R, Delgado J A, Keller M. Methane and nitrous oxide fluxes in an acid Oxisol in western Puerto Rico: Effects of tillage, liming and fertilization [J]. Soil Biol Biochem, 1998, 30: 2087-2098.
- [3] Yan Y P, Sha L Q, Cao M, et al. Fluxes of CH_4 and N_2O from soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China [J]. J Environ Sci, 2008, 20: 207-215.
- [4] Houghton J T, Meira Filho L G, Lim B, et al. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]// Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Bracknell: UK Meteorological Office, 1997: 41-52.
- [5] Breuer L, Papen H, Butterbach-Bahl K. N_2O emission from tropical forest soils of Australia [J]. J Geophys Res, 2000, 105: 26353-26367.
- [6] King G M. Responses of atmospheric methane consumption by soils to global climate change [J]. Glob Change Biol, 1997, 3(4): 351-362.
- [7] Karsten G R, Drake H L. Denitrifying bacteria in the earthworm gastrointestinal tract and *in vivo* emission of nitrous oxide (N_2O) by earthworms [J]. Appl Environ Microbiol, 1997, 63: 1878-1882.
- [8] Matthies C, Grieshammer A, Schmittroth M, et al. Evidence for involvement of gut-associated denitrifying bacteria in emission of nitrous oxide (N_2O) by earthworms obtained from garden and forest soils [J]. Appl Environ Microbiol, 1999, 65: 3599-3604.
- [9] Borken W, Gröndel S, Beese F. Potential contribution of *Lumbricus terrestris* L. to carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a forest soil [J]. Biol Fert Soils, 2000, 32: 142-148.
- [10] Speratti A B, Whalen J K. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil as influenced by anecic and endogeic earthworms [J]. Appl Soil Ecol, 2008, 38: 27-33.
- [11] Yang L F(杨兰芳), Cai Z C(蔡祖聪). Effects of N application and maize growth on N_2O emission from soil [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 2005, 16(1): 100-104.(in Chinese)
- [12] Duxbury J M, Bouldin D R, Terry R E, et al. Emission of nitrous

- oxide from soils [J]. *Nature*, 1982, 298: 462–464.
- [13] Ding W X(丁维新), Cai Z C(蔡祖聪). Effects of soil organic matter and exogenous organic materials on methane production in and emission from wetlands [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2002, 22(10): 1672–1679.(in Chinese)
- [14] Wessells M L S, Bohlen P J, McCartney D A, et al. Earthworm effects on soil respiration in corn agroecosystems receiving different nutrient inputs [J]. *Soil Biol Biochem*, 1997, 29: 409–412.
- [15] Bertora C, van Vliet P C J, Hummelink E W J, et al. Do earthworms increase N_2O emissions in ploughed grassland? [J] *Soil Biol Biochem*, 2007, 39: 632–640.
- [16] Zhang W X(张卫信), Li J X(李健雄), Guo M F(郭明昉), et al. Seasonal variation of earthworm community structure as correlated with environmental factors in three plantations of Heshan, Guangdong, China [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2005, 25(6): 1362–1370.(in Chinese)
- [17] Bohlen P J, Parmelee R W, Blair J M, et al. Efficacy of methods for manipulating earthworm populations in large-scale field experiments in agroecosystems [J]. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27(8): 993–999.
- [18] Raich J W, Bowden R D, Steudler P A. Comparison of two static chamber techniques for determining carbon dioxide efflux from forest soil [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 1990, 54(6): 1754–1757.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emission from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(5): 842–844.
- [20] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest [J]. *Glob Change Biol*, 1998, 4: 217–227.
- [21] Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, et al. Emission of CO_2 , CH_4 and N_2O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China [J]. *Atmos Environ*, 2006, 35: 6879–6885.
- [22] Li H F(李海防), Xia H P(夏汉平), Fu S L(傅声雷), et al. Emissions of soil greenhouse gases in response to understory removal and *Cassia alata* addition in an *Eucalyptus urophylla* plantation in Guangdong Province, China [J]. *Chin J Plant Ecol(植物生态学报)*, 2009, 33(6): 1015–1022.(in Chinese)
- [23] Liu G S(刘光崧), Jiang N H(蒋能慧), Zhang L D(张连第), et al. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles* [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 31–38.(in Chinese)
- [24] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil-nitrogen — A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17: 837–842.
- [25] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, 19: 703–707.
- [26] Tian G, Olimah J A, Adeoye G O, et al. Regeneration of earthworm populations in a degraded soil by natural, planted fallows under humid tropical conditions [J]. *Soil Sci Soc Amer J*, 2000, 64: 222–228.
- [27] Yashiro Y, Kadir W R, Okuda T, et al. The effects of logging on soil greenhouse gas (CO_2 , CH_4 , N_2O) flux in a tropical rain forest, Peninsular Malaysia [J]. *Agri For Meteorol*, 2008, 148: 799–806.
- [28] Staaf H. Foliage litter turnover and earthworm populations in three beech forests of contrasting soil and vegetation types [J]. *Oecologia*, 1987, 72: 58–64.
- [29] Reich P B, Oleksyn J, Modrzyński J, et al. Linking litter calcium, earthworms and soil properties: a common garden test with 14 tree species [J]. *Ecol Lett*, 2005, 8: 811–818.
- [30] Cortez J, Billes G, Bouch M B. Effect of climate, soil type and earthworm activity on nitrogen transfer from a nitrogen-15-labelled decomposing material under field conditions [J]. *Biol Fert Soils*, 2000, 30: 318–327.
- [31] Enami Y, Okano S, Yada H, et al. Influence of earthworm activity and rice straw application on the soil microbial community structure analyzed by PLEA pattern [J]. *Eur J Soil Biol*, 2001, 37: 269–272.
- [32] Luo T X(罗天相), Hu F(胡锋), Liu S(刘莎), et al. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil greenhouse gases emissions [J]. *Soils(土壤)*, 2008, 40(4): 653–657. (in Chinese)
- [33] Xie J F(谢军飞), Li Y E(李玉娥). A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils [J]. *Chin J Agromet(中国农业气象)*, 2002, 23(4): 47–52.(in Chinese)
- [34] Wang Y S, Xue M, Zheng X H, et al. Effects of environmental factors on N_2O emission from and CH_4 uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia [J]. *Chemosphere*, 2005, 58: 205–215.
- [35] Liu H(刘惠), Zhao P(赵平), Lin Y B(林永标), et al. CH_4 and N_2O fluxes from soil surface of 2 land use in a hilly area of south China [J]. *J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报)*, 2008, 16(4): 304–314.(in Chinese)