

线虫和蚯蚓对土壤微量气体排放的影响

罗天相^{1,2}, 李辉信¹, 王 同¹, 胡 锋^{1,*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 江西省宜春学院, 江西 宜春 336000)

摘要:线虫和蚯蚓是农业中广泛存在的土壤动物, 由于它们与微生物的相互作用及对土壤生态系统能量传递和养分转化的影响, 可能影响土壤微量气体代谢和温室气体的排放。通过在不同土壤线虫密度下接种蚯蚓的 15d 培养试验结果表明, 土壤动物对土壤微量气体(CO₂和 N₂O)代谢有显著促进作用。与灭线土相比, 高密度线虫土壤处理与高密度线虫土壤加蚯蚓的处理导致 CO₂ 排放量分别增加了 4.3 倍和 5.2 倍, 相应的 N₂O 排放量增加了 1.8 倍和 2.7 倍。与低密度线虫土壤处理比较时, 高密度线虫土壤处理导致 CO₂ 和 N₂O 排放量分别增加了 19% 和 21%。接种蚯蚓在高密度线虫土中较接种在低密度线虫土壤中的 CO₂ 和 N₂O 排放量分别增加了 12% 和 27%。5 个处理中, 除了低密度线虫加蚯蚓的处理和高密度线虫处理间差异不显著外, 其余各处理间均达到极显著差异($P < 0.01$)。两种气体的排放速率呈极显著正相关($R^2 = 0.9414$)。高密度线虫土壤较低密度线虫土壤显著提高了土壤的 DOC 含量, 不同线虫密度土壤中 DOC 显著性的差异与 CO₂ 和 N₂O 排放密切相关($P < 0.05$)。

关键词:温室气体排放; 蚯蚓; 食细菌线虫; 相互作用

文章编号: 1000-0933(2008)03-0993-07 中图分类号: Q968 文献标识码: A

Influence of nematodes and earthworms on the emission of atmospheric trace gases (CO₂, N₂O)

LUO Tian-Xiang^{1,2}, LI Hui-Xin¹, WANG Tong¹, HU Feng^{1,*}

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

2. Yichun University in Jiangxi Province, Jiangxi Yichun 336000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 0993 ~ 0999.

Abstract: Soil fauna e. g. nematode and earthworm, occur commonly in agricultural soil, may affect the greenhouse gas fluxes by both direct and indirect effects on organic-matter decomposition, nutrient cycling and the diversity and structure of microbiota in soil. We prepared soil with greater populations of bacterial-feeding nematodes, compared to a nematode-killed soil, to determine the effects of bacterial-feeding nematodes and earthworms on greenhouse gases emissions. Laboratory incubations were carried out for a period of 15 days. Carbon dioxide and nitrous oxide concentration were simultaneously analyzed with a modified gas chromatograph equipped with two detectors of FID and ECD. Soil with greater population nematodes and earthworms enhanced CO₂ and N₂O emissions. Cumulative emissions of the two gas fluxes in the greater population nematodes treatment and the greater population nematodes with earthworms treatment increased by 4.3 times and 5.2 times for CO₂, 1.8 times and 2.7 times for N₂O, respectively *versus* the nematode-killed treatment. The emission fluxes of CO₂ and N₂O in soil with greater nematode populations were 19% and 21% higher than that of soil with smaller population of nematodes, inoculation of earthworms in greater population nematodes resulted in 12% and 27% more

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30670377, 30370286)

收稿日期: 2006-12-16; 修订日期: 2007-08-23

作者简介: 罗天相(1973~), 男, 江西宜春人, 博士生, 主要从事土壤生态学研究. E-mail: ltxls@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fenghu@njau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 30670377, 30370286)

Received date: 2006-12-16; **Accepted date:** 2007-08-23

Biography: LUO Tian-Xiang, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil ecology. E-mail: ltxls@sohu.com

emission of CO_2 and N_2O than earthworms in smaller population nematodes. There are significant differences between each treatment except in soil with smaller population nematodes inoculated earthworms and soil with greater populations of nematodes. The two gas fluxes were significantly correlated ($R^2 = 0.9414$; $p < 0.01$). The greater population nematodes increased DOC value when compared with the smaller populations nematodes. Cumulative emissions of CO_2 and N_2O from the soils treated with different population nematodes were positively correlated with DOC concentration measured at the start of gas sampling ($p < 0.05$).

Key Words: GHGs emissions; earthworm; bacterial-feeding nematode; interact

土壤微量气体代谢是地球各圈层相互作用的重要内容。土壤圈、生物圈以及大气圈之间通过碳(C)、氮(N)等元素循环及动力学过程相互作用,形成有机连续体。土壤生物作为地球化学过程(生物小循环)的驱动者,通过调控微量气体代谢(例如温室气体的生成、消耗及传输等),进一步在大尺度上影响大气环境及全球气候变化。

由于土壤微生物在有机物分解和养分矿化中的巨大作用,土壤动物的生态系统功能一直受到忽略^[1]。但实际上,土壤动物的生态功能十分显著:近年来的大量工作表明,原生动物、线虫、跳虫、蚯蚓和大型节肢动物等在很大程度上直接参与了物质循环的原始过程,更重要的是它们在土壤生态系统中的调控作用不仅极大地提高了土壤养分的利用效率^[1,2],而且改变了土壤微生物区系的组成结构和物种多样性^[3]。有关这方面的研究结论不尽相同^[4],但均普遍认为线虫和蚯蚓活动提高了土壤中活性微生物的比例,蚯蚓、食微线虫与微生物之间通过竞争和取食等相互作用能改变微生物的数量和活性^[5],直接的表现即接种蚯蚓或线虫后,土壤呼吸作用显著加强。从理论上分析,蚯蚓和食微线虫对某一种或几种微生物的取食作用会影响到整个微生物群落的数量、结构和活性,进而影响到土壤微量气体的代谢。

从发表的文献看,白蚁和蚯蚓是两大类付诸实际调查和研究的土壤动物^[6],研究者普遍认为蚯蚓能促进土壤中 N_2O 的排放^[7,8],但 Bertora 等^[9]认为蚯蚓可能抑制土壤中 N_2O 的排放。而有关其它食微土壤动物对土壤微量气体代谢影响的研究报道还比较少见。线虫对温室气体排放的研究较少,Fu^[10]的微系统研究显示,接种线虫后累积的 CO_2 排放量较单细菌处理的排放量将有显著提高。迄今为止,在原位土壤条件下食微线虫和蚯蚓对土壤微量气体排放的影响尚不明了,国内外也少有涉及。蚯蚓和线虫是土壤中广泛存在的土壤动物,由于它们与微生物的相互作用及对土壤生态系统能量传递和养分转化的影响,有可能影响土壤微量气体代谢和温室气体的排放,成为温室气体重要的一个源,但目前在学术界还未引起足够的重视。因此,为了了解土壤动物对温室气体排放的影响,通过接种蚯蚓和食细菌线虫的培养试验,以明确线虫和蚯蚓对土壤微量气体(CO_2 、 N_2O)代谢的贡献,以及蚯蚓和不同密度线虫相互作用时对土壤微量气体代谢的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

土壤采自南京雨花台区板桥镇长江南岸冲积地潮土(美国制土壤质地分类为砂质壤土),种植制度为稻麦轮作。土壤取样深度为 0~20 cm,鲜土采集后剔除石块、大中型土壤动物及根茬等残体,然后过 2mm 筛备用。土壤基本性状见表 1:

表 1 供试土壤基本性质
Table 1 Basic properties of soil tested

有机碳 (g/kg) Organic C	全氮 (g/kg) Total N	铵态氮 (mg/kg) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	硝态氮 (mg/kg) $\text{NO}_3^- - \text{N}$	矿质氮 (mg/kg) Mineral N	pH (H_2O)
9.16	0.88	7.36	9.51	16.87	6.32

1.1.2 获取原位富集线虫土壤和灭线土壤

利用线虫进行微系统土培试验时,通常是采取向土壤中直接接种线虫的方式。所接种的线虫一般是通过在培养基上富化培养获得^[11],这就带来如下几个问题:(1)这些富化培养的线虫可能并不一定是该土壤的土著优势种群;(2)在接种线虫的时候会将微生物同时接种到土壤中;(3)接种的线虫可能有一部分会死亡。考虑到以上因素,本次培养试验希望通过原位培养,在添加有机物料促进线虫繁殖的同时,配以不同孔径的网袋允许或限制线虫的迁移,从而能够获得土著食细菌线虫大量富集的土壤及对照土壤。

原位富集线虫法采用 Mao 等^[12]的盆钵培养法,首先在 1mm 和 5 μ m 尼龙网袋(一般食细菌线虫的幼虫体大于 5 μ m,并且成虫虫体小于 1 mm)内装入 400 g 混合了 14 g 基质(猪粪)的新鲜土壤,将装好土壤的网袋放在盆钵中央,外层装入 650 g 新鲜土壤。网袋内层土壤由于混合了基质,土壤线虫得到大量富化,并且内层富化的线虫能够穿过 1 mm 网袋迁移到外层土壤,而 5 μ m 的网袋则阻止了线虫的迁移。土壤装盆后,调节土壤含水量到田间持水量,并于 20 $^{\circ}$ C 培养。经过 20d 的培养,在 1 mm 尼龙网袋处理中获得原位富集线虫土壤,经浅盘分离并于体视镜下检测,所含线虫约为原始新鲜土壤的 3 倍,达 45 条/g 土,食细菌线虫比例在 95% 以上,而对照 5 μ m 尼龙网袋处理的外层土壤基本仍维持在原土壤水平,为 16 条/g 土,即本试验中的低密度线虫土壤,食细菌线虫比例约为 90%。

为尽量减少对土壤物理结构和微生物区系的破坏,本试验不采用施入杀线虫剂和高温加热的方法,而是通过低温冷冻来杀灭土壤中原有的线虫,最终获得灭线土^[5],土壤经浅盘分离法后在体视镜下检测未见线虫。

1.1.3 蚯蚓的准备

蚯蚓选用成年赤子爱胜蚓(*E. foetida*),每条约重 0.15g,接种前一周置于试验土壤内预培养,以排清蚯蚓肠道里的内容物,减少试验误差。

1.2 试验设计

试验为微系统培养试验,设 5 个处理:①5 μ m 处理的外层土壤,即低密度线虫处理(简称 SM5,以下同);②5 μ m 外层土壤+蚯蚓 2 条(0.3g)(EM5);③1 mm 处理外层土壤,即高密度线虫处理(SM1);④1 mm 外层土壤+蚯蚓 2 条(EM1);⑤灭线土(SK)。每个处理 5 次重复。

1.3 培养方法及样品分析

培养试验采用 Huang 的微系统采气培养法^[13]。称已准备好的 3 种不同线虫密度土样 80g 装于 580 ml 容量瓶中,并根据处理进行接种蚯蚓。试验置于 20 $^{\circ}$ C 下恒温培养,培养时间持续 15d,用去离子水控制土壤体积含水量在 24%。培养阶段气体采集每两天 1 次。抽气之前用充气泵以 300 ml/min 向瓶里吹气 0.5h,充分排除培养瓶内残余的温室气体,然后胶塞密封,培养 2h 之后,用连接三通的 60 ml 注射器从培养瓶上部空间抽气约 20ml。抽气完毕打开胶塞,重新培养直至下一次测定。样品的 CO₂ 和 N₂O 测定用改装的 HP4890 气相色谱仪测定^[14]。

土壤 MBC 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取方法进行测定;土壤 DOC 含量测定:称取 10g 土样溶解于 40ml 去离子水中振荡 2h,然后用总有机碳分析仪(TOC5000,岛津)进行检测;NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 用 2M 的 KCl 震荡 30min 进行提取,提取液通过流动分析仪进行测定(AA3,德国)。

1.4 统计学检验方法

数据统计分析采用单因素方差分析,用 Duncan 法分析不同处理间的差异,所有统计分析均采用 SPSS 统计软件。

2 结果与分析

2.1 接种线虫和蚯蚓对土壤中 CO₂、N₂O 排放的影响

图 1a 和 1b 分别为 15d 培养期内 CO₂、N₂O 排放速率随时间的变化趋势图。由图发现整个培养期内,CO₂ 和 N₂O 排放速率最高的均为 EM1 处理,EM5 和 SM1 处理次之,但均较 SM5 处理的排放速率高,最低的是 SK

处理,可见接种蚯蚓和线虫的土壤相对灭线处理的土壤极大地促进了 CO_2 和 N_2O 排放速率。接种线虫和蚯蚓的土壤,其 CO_2 和 N_2O 的排放速率表现为接种后 48h 出现峰值,之后逐渐降低,其中 CO_2 的排放在培养的末期即 10d 后趋于平稳,而 N_2O 的排放基本在 4d 后即趋于平稳。灭线土在整个培养期内 CO_2 和 N_2O 的排放速率基本比较稳定,未有明显峰值。接种土壤动物土壤排放峰值的出现,主要是由于接种初期,蚯蚓活动加剧,促进了自身微量气体的代谢,这个观察与 Borken 等人^[7]的结果相类似;而食细菌线虫对细菌的取食作用也刺激细菌表现出更高的活性,在微生物的协同作用下,表现出微量气体的排放峰值。而灭线土由于在反复低温过程的灭线处理,一定程度上造成对土壤中的微生物多样性和种群结构的破坏,微生物活动微弱,故培养过程中表现平稳,没有明显峰值。

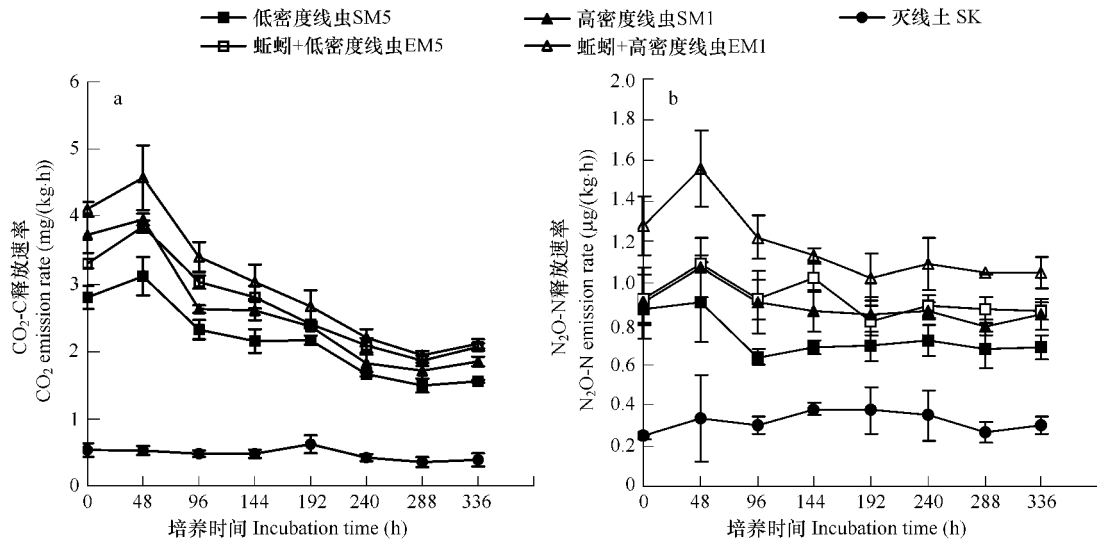


图1 蚯蚓和不同线虫密度处理对 CO_2 (a) 和 N_2O (b) 排放的影响

Fig. 1 CO_2 (a) and N_2O (b) fluxes of soils with different nematode populations with or without earthworms

表2 为不同处理条件下 CO_2 和 N_2O 15d 的累积排放量。与灭线土相比,高密度线虫土与高密度线虫土加蚯蚓的组合导致 CO_2 排放量分别增加了 4.3 倍和 5.2 倍,相应的 N_2O 排放量增加了 1.8 倍和 2.7 倍。另一方面,与对照低密度线土比较,接种高密度的线虫导致 CO_2 和 N_2O 排放量分别增加了 19% 和 21%。接种蚯蚓在高密度线虫土壤中较接种在低密度线虫土壤中的 CO_2 和 N_2O 排放量分别增加了 12% 和 27%。5 个处理中,除了 EM1 和 SM5 差异不显著外,其余各处理间均达到极显著差异 ($P < 0.01$)。

表2 蚯蚓和不同线虫密度处理 CO_2 和 N_2O 累积排放量

Table 2 Cumulative emissions of CO_2 and N_2O for different nematode populations with or without earthworms

处理 Treatments	$\text{CO}_2\text{-C}$ 累积排放量 (mg/kg soil) Cumulative emissions of CO_2	$\text{N}_2\text{O-N}$ 累积排放量 ($\mu\text{g/kg soil}$) Cumulative emissions of N_2O
低密度线虫 SM5	777.6 $\pm$ 21.7C	261.7 $\pm$ 17.7C
蚯蚓 + 低密度线虫 EM5	963.9 $\pm$ 4.4B	332.2 $\pm$ 6.8B
高密度线虫 SM1	926.1 $\pm$ 5.3B	317.9 $\pm$ 29.2B
蚯蚓 + 高密度线虫 EM1	1079.8 $\pm$ 55.6A	422.7 $\pm$ 18.2A
灭线土 SK	173.7 $\pm$ 8.9D	115.1 $\pm$ 21.5D

同一列数字无相同字母间差异达 1% 的极显著水平 (Duncan 检验) Values without the same letter in each column are significant difference at 1% level on Duncan method ($P < 0.01$)

试验中,接种蚯蚓在不同密度土壤线虫中,对温室气体的增加效果是有差异的。当蚯蚓接种在高密度线虫土壤中,15d 的培养期内, CO_2 和 N_2O 的累积排放量较高密度线虫土壤增加了 153.7 mg/kg 和 104.8 $\mu\text{g/kg}$,而当蚯蚓接种在低密度线虫土壤中,则 CO_2 和 N_2O 的累积排放量较低密度线虫处理增加了 186.3 mg/kg 和

70.5 $\mu\text{g/kg}$ 。显然从微量气体绝对增加量的角度,高密度线虫加蚯蚓组合相对于低密度线虫加蚯蚓组合而言,一定程度上抑制了土壤中 CO_2 的排放而促进了 N_2O 的排放,其内在机理尚不得而知。但由于蚯蚓对于 N_2O 的排放具有更显著的影响^[8],或许在高密度线虫土壤中预示着蚯蚓具有更高的活性,并导致 N_2O 的排放提高,这也体现了土壤动物之间相互作用的复杂性。

2.2 试验土壤理化及生物学特性

表3为接种蚯蚓前不同线虫密度土壤(SM1、SM5、SK)的理化及生物学性状,SM1的处理较SM5的处理在MBC和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 上无显著差异,但DOC和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 两项指标上则显著更高($P < 0.05$)。而灭线土的处理中MBC、DOC和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 等各项指标均显著低于SM1和SM5的处理($P < 0.05$)。1mm和5 μm 处理土壤中DOC与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标的显著性差异,有理由认为是土壤中更高密度线虫活动所引起的。因为,食细菌线虫能显著增加土壤养分浓度和细菌数量^[15],从而引起这种指标的分异。此外,导致土壤中DOC含量显著差异的一个可能原因是食细菌线虫能够有效传播土壤中的细菌,这其中既有存活在线虫内脏中的细菌,还有黏附在线虫角质粘膜表面的细菌,这些细菌促进了DOC含量的差异;同时,线虫角质粘膜分泌的黏液本身也是一种碳源。

表3 试验前不同线虫密度土壤的理化生物特性

Table 3 Properties of the outer soils at the start of the experiment

处理 Treatments	微生物生物量碳 (mg/kg) MBC	可溶性有机碳 (mg/kg) DOC	铵态氮 (mg/kg) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	硝态氮 (mg/kg) $\text{NO}_3^- - \text{N}$
高密度线虫 SM1	162.51 $\pm$ 4.81a	61.42 $\pm$ 3.35a	8.64 $\pm$ 1.60a	28.37 $\pm$ 1.35a
低密度线虫 SM5	155.26 $\pm$ 7.72a	54.42 $\pm$ 2.19b	7.12 $\pm$ 0.18b	27.31 $\pm$ 2.09a
灭线土 SK	113.73 $\pm$ 4.64b	28.40 $\pm$ 1.26c	8.08 $\pm$ 0.12ab	14.28 $\pm$ 1.15b

同一列数字无相同字母间差异达5%的显著水平(Duncan检验) Values without the same letter in each column are significant difference at 5% level on Duncan method($P < 0.05$)

土壤理化生物特性中,土壤可溶性有机碳(DOC)对微生物的重要性在以往许多研究中得到证实,DOC作为土壤有机碳中最活跃的部分,极易被微生物所利用。因此,土壤DOC的大小与微生物活性密切相关,土壤DOC含量的变化一定程度上反映了土壤中C、N的转化过程。虽然DOC只占土壤总有机碳的0.04%~0.22%,但它却是有机碳库中最活跃的循环部分^[16]。不同线虫密度土壤DOC显著性的差异与 CO_2 和 N_2O 排放密切相关($P < 0.05$),土壤中更高的DOC含量预示着土壤微量气体的代谢活动加强,这与以往报道结果相一致^[17]。

2.3 CO_2 和 N_2O 排放量的相互关系

有研究表明,有机肥混施入土壤而非表层施用时, CO_2 产生率能很好的表征反硝化速率^[18]。Huang^[13]的培养试验发现,无论有机肥施入与否 N_2O 的排放速率与 CO_2 的排放速率呈明显的正相关关系。即 CO_2 的排放速率越快,呼吸作用越强,则 N_2O 的排放速率也加快。本试验研究同样证明土壤动物活动在加速土壤呼吸作用的同时,也促进了 N_2O 的排放速率,两者呈现极显著正相关关系($R^2 = 0.9414$),如图2所示。

3 讨论

15d的培养试验结果表明,短期内接种土壤动物后对土壤微量气体(CO_2 和 N_2O)代谢是有显著促进作用的。接种蚯蚓和不同密度线虫,能显著提高土壤中 CO_2 和 N_2O 的排放速率,两者的排放速率呈极显著正相关。相关的机理分析中,Borken^[7]通过实施野外条件下的120d土柱试验,调查了放养蚯蚓(*Lumbricus*

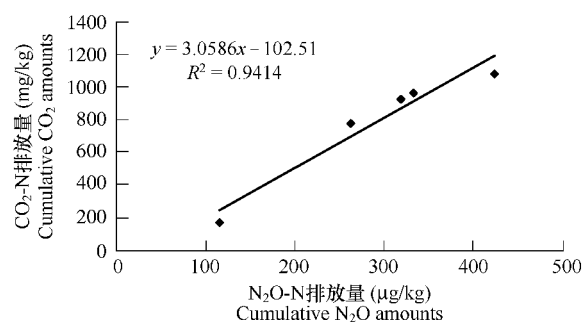


图2 N_2O 和 CO_2 排放量的相关关系

Fig. 2 Correlation of cumulative N_2O with CO_2 amounts

terrestris) 对山毛榉的对照土壤与施石灰土壤 CO_2 、 N_2O 排放通量的潜在影响。蚯蚓通过改变土壤中的反硝化作用及产生的蚓粪、肠道分泌物的间接影响,相比对照土壤增加了 57% 的 N_2O 排放量。由于蚯蚓肠道富含厌氧微生物群落及其他微生物种群^[6],虽然蚯蚓及其肠道物不产生 CH_4 ,然而,厌氧培养的蚯蚓肠道物添加 NO_3^- 后, N_2O 生成率高于对应的土壤处理,活蚯蚓在有氧条件下释放 N_2O ^[8]。一定程度上蚯蚓表现为某些陆地生态系统 N_2O 生成的可移动“热点”^[8],因此蚯蚓可能是陆地生态系统 N_2O 排放的生物源。随着全球氮沉降的显著增加,当 N 素过量时,蚯蚓能提高土壤的反硝化功能,使 N 素以气态形式离开土壤系统^[19]。此外,在 Caravaca^[20] 为期 53d 和 Potthoff^[21] 持续 16d 的微系统试验中,都证实了当接种蚯蚓后能提高土壤中 CO_2 的排放通量,Lachnicht^[22] 认为蚯蚓通过促进细菌和真菌的呼吸作用而达到提高土壤 CO_2 排放通量。有关线虫的机理分析目前尚缺乏,推测可能是由于食微线虫虫体的 C:N 比显著高于细菌的 C:N 比,所以在取食细菌以提供身体结构和呼吸所必须的 C 后,约 70% 被线虫取食消化的微生物生物量 N 将以无机态 N 的形式从线虫的体壁析出^[23],此外,食微线虫所取食的 C 约有 40% 被呼吸掉^[24],因此食微线虫可能对土壤微量气体(CO_2 和 N_2O) 的排放通量产生影响。总之,土壤动物可在 3 个方面影响微量气体代谢^[25],即:(1) 土壤动物直接生成微量气体;(2) 基于取食关系影响代谢微量气体的微生物;(3) 促进“地-气”间微量气体传输。

本试验中,当与接种蚯蚓在低密度线虫的土壤处理相比较时,接种蚯蚓在低密度线虫土中可能抑制 CO_2 的排放但促进 N_2O 的排放,这反映出两种土壤动物相互作用的结果和复杂性,其内在机理还值得研究。土壤动物之间相互作用包括共存、竞争和共生等,蚯蚓活动对微生物的影响是非常复杂的,它与蚯蚓品种、土壤类型等都有着极大的联系。而关于蚯蚓和线虫的作用可能更为复杂,如有蚯蚓或蚓粪时可能促进食菌线虫的生存和繁衍^[26],但农业土壤中蚯蚓也可能降低线虫的数量^[27]。土壤间微量气体的差异并不能完全由土壤理化特性差异解释,土壤动物之间的这种相互作用及其对微生物种类特性的影响也是一个重要原因。在自然系统中,不同生物群落之间并非简单的组合,互相制约或促进的作用必然存在,因此,不同类群的混和群落的研究有助于进一步揭示土壤动物的生态功能。在土壤群落中动物与植物、动物与微生物以及动物与动物之间存在着极为复杂的关系,它们之间的作用机理和随机变异等等阐明以后,将会更加有利于保持土壤生态系统的平衡,使土壤中的营养物质循环得以稳定发展^[28]。

当然,相对于结构复杂,数量众多的土壤动物群落,这种小尺度的试验对于研究它的生态系统功能来说显然过于简单;此外,对于较大型的土壤动物而言,短期的实验室培养和观测还有一定的局限性,结果可能会夸大试验动物的实际作用。微系统试验土壤没有植被生长,因此土壤中 CO_2 和 N_2O 释放不可能是植被根系产生,而主要是土壤微生物和土壤动物直接或间接产生,由于微系统中土壤动物的相对密度高于田间自然状态下的密度,所以土壤动物活动代谢产生的 CO_2 和 N_2O 也占了相当大的比重,如何区分土壤动物和微生物的不同释放速率是进一步研究的方向。

References:

- [1] Haimi J, Fritze H, Moilanen. Responses of soil decomposer animals to wood-ash fertilization and burning in a coniferous forest stand. *Forest Ecology and Management*, 2000, 129: 53–61.
- [2] Yin W Y. Ten-year progress in the study of soil zoology in China. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 1997, 1: 48–51.
- [3] Schindler-Wessells M, Bohlen P J, McCartney D A, et al. The effect of earthworms on soil respiration in corn agroecosystems with different nutrient treatments. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29: 409–412.
- [4] Zhang B G, Li G T, Shen T S. Influence of the earthworm *Pheretima guillelmii* on soil microbial biomass and activity. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 168–172.
- [5] Chen X Y, Li H X, Hu F, et al. Effect of bacterivorous nematode on soil microbial biomass and microbiocoenosis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(12): 2825–2831.
- [6] Han X G, Wang Z P. Soil biodiversity and trace gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) metabolism; a review. *Biodiversity Science*, 2003, 11(4): 322–332.
- [7] Borken W, Grundel S, Beese F. Potential contribution of *Lumbricus terrestris* L. to carbon dioxide, methane and nitrous oxide fluxes from a forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32: 142–148.
- [8] Karsten G R, Drake H L. Denitrifying bacteria in the Earthworm gastrointestinal tract and *in vivo* emission of nitrous oxide (N_2O) by earthworms.

- Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63: 1878 — 1882.
- [9] Bertora C, Van Vliet P C J, Hummelink E W J, *et al.* Do earthworms increase N₂O emissions in ploughed grassland? Soil Biology & Biochemistry, 2007, 39: 632 — 640.
- [10] Fu S L, Ferris H, Brown D, *et al.* Does the positive feedback effect of nematodes on the biomass and activity of their bacteria prey vary with nematode species and population size? Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 1979 — 1987.
- [11] Li H X, Chen X Y, Hu F. Isolation and enrichment culturing of a soil bacterial-feeding nematode. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(2): 71 — 74.
- [12] Mao X F, Hu F, Griffiths B, *et al.* Bacterial-feeding nematodes enhance root growth of tomato seedlings. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 1615 — 1622.
- [13] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 973 — 981.
- [14] Zou J W, Jiao Y, Wang Y S, *et al.* GC-based technique for determination of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from paddy fields. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002, 25(4): 45 — 48.
- [15] Kravachenko I, Boeckx P, Galchenko V, *et al.* Short and medium-term effects of NH₄⁺ on CH₄ and N₂O fluxes in arable soils with a different texture. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34: 669 — 678.
- [17] Zsolnay A. Dissolved humus in soil waters. In: Piccolo A, ed. Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. Amsterdam: Elsevier, 1996. 171 — 223.
- [16] Wang J, Zhang X D, Xie H T, *et al.* New quantificational indexes in modern study of soil organic matter. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(10): 1809 — 1812.
- [17] Qin X G, Cai B G, Wu J S, *et al.* Diurnal variations of soil trace gases and related impacting factors. Quaternary Sciences, 2005, 25(3): 376 — 388.
- [18] Aulakh M S, Doran J W, Walter D T, *et al.* Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55: 1020 — 1025.
- [19] Amador J A, Gorres J H. Role of the anecic earthworm *Lumbricus terrestris* L. in the distribution of plant residue nitrogen in a corn (*Zea mays*)-soil system. Applied Soil Ecology, 2005, 30: 203 — 214.
- [20] Caravaca F, Pera A, Masciandaro G, *et al.* A microcosm approach to assessing the effects of earthworm inoculation and oat cover cropping on CO₂ fluxes and biological properties in an amended semiarid soil. Chemosphere, 2005, 59: 1625 — 1631.
- [21] Pothoff M, Joergensen R G, Wolters V. Short-term effects of earthworm activity and straw amendment on the microbial C and N turnover in a remoistened arable soil after summer drought. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 583 — 591.
- [22] Sharon L L, Paul F H. Interaction of the earthworm *Diplocardia mississippiensis* (Megascolecidae) with microbial and nutrient dynamics in a subtropical Spodosol. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 1411 — 1417.
- [23] Ferris H, Venette R C, Lau S S. Population energetics of bacterial-feeding nematodes: carbon and nitrogen budgets. Soil Biology & Biochemistry, 1997, 29: 1183 — 1194.
- [24] Marchant R, Nicholas W L. An energy budget for the free-living nematode *Pelodera* (Rhabditidae). Oecologia, 1974, 16: 237 — 252.
- [25] Conrad R. Soil Microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO). Microbiological Reviews, 1996, 60(4): 609 — 640.
- [26] Senapati B K. Biotic interactions between soil nematodes and earthworms. Soil Biology & Biochemistry, 1992, 24(12): 1441 — 1444.
- [27] Yeates G W. Nematode populations in relation to soil environmental factors: a review. Pedobiologia, 1981, 22(5/6): 312 — 338.
- [28] Yin W Y, *et al.* Chinese soil animals. Beijing: Science Press, 2000.

参考文献:

- [2] 尹文英. 中国土壤动物学研究 10 年进展. 中国科学基金, 1997, 1: 48 ~ 51.
- [4] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响. 生态学报, 2000, 20(1): 168 ~ 172.
- [5] 陈小云, 李辉信, 胡锋, 等. 食细菌线虫对土壤微生物量和微生物群落结构的影响. 生态学报, 2004, 24(12): 2825 ~ 2831.
- [6] 韩兴国, 王智平. 土壤生物多样性与微量气体(CO₂、CH₄、N₂O)代谢. 生物多样性, 2003, 11(4): 322 ~ 332.
- [11] 李辉信, 陈小云, 胡锋. 土壤食细菌线虫的分离和富集培养方法. 南京农业大学学报, 2002, 25(2): 71 ~ 74.
- [14] 邹建文, 焦燕, 王跃思, 等. 稻田 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量测定方法研究. 南京农业大学学报, 2002, 25(4): 45 ~ 48.
- [16] 王晶, 张旭东, 解宏图, 等. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1809 ~ 1812.
- [17] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 等. 土壤温室气体昼夜变化及其环境影响因素研究. 第四纪研究, 2005, 25(3): 376 ~ 388.
- [28] 尹文英, 等. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.