

接种蚯蚓对施加秸秆的旱作稻田 N₂O 排放的影响^①

罗天相^{1,2}, 胡 锋², 李辉信², 刘 莎³

(1 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西宜春 336000; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095;

3 宜春学院图书馆, 江西宜春 336000)

摘 要:通过田间试验研究了秸秆不同施用方式下接种蚯蚓(威廉腔环蚓, *Metaphire guillelmi*)对水稻旱作土壤 N₂O 排放通量的影响。结果显示施加秸秆和接种蚯蚓增加了 N₂O 的排放量。在秸秆表施的情况下, 接种蚯蚓处理显著提高了 N₂O 的排放量, 从 12.54 kg/hm² 提高到 14.94 kg/hm² ($P < 0.05$); 但是在秸秆混施的情况下, 接种蚯蚓处理未显著提高 N₂O 的排放量。蚯蚓的存在使土壤 NO₃-N 的含量显著提高, 尤其是在混施秸秆的情况下。由于栽培期内 NH₄⁺-N 变化幅度较小, 不同处理 NO₃-N 含量的变化决定了土壤矿质氮的分异。农田生态系统中蚯蚓对 N₂O 排放的贡献主要体现在促进秸秆混入土壤, 从而加快秸秆的分解和 N₂O 的排放。

关键词:旱作水稻; 蚯蚓; 秸秆; 矿质氮; N₂O 排放

中图分类号: S154

氧化亚氮(N₂O)是重要的温室气体之一, 其增温效应大约是 CO₂ 的 298 倍, 对全球气候变暖的贡献大约占 7%, 因此受到广泛的关注^[1]。当前大气 N₂O 的主要人为排放源是农业生产中氮肥的施用(如含氮化肥和秸秆还田), 它们会增加参与土壤中硝化、反硝化作用的有效氮源, 从而增加土壤 N₂O 排放。

蚯蚓是一类对土壤能量流动和物质循环均具有显著影响的土壤动物。近年来, 有关蚯蚓活动与土壤 N₂O 排放间的关系受到越来越多的关注^[2]。蚯蚓单体的培养实验^[3-5]和接种蚯蚓于不同土壤类型的田间试验^[6-12]表明蚯蚓活动与土壤 N₂O 排放密切相关, 是土壤温室气体代谢过程中不容忽视的功能种群, 但在评估蚯蚓与土壤 N-N₂O 代谢的关系时, 相关研究结果还未取得一致意见。特别是由于蚯蚓具有 3 种不同生态型, 其活动及取食特点均有显著差异, 施加秸秆后(表施或混合施入), 不同生态型蚯蚓对土壤 N₂O 排放的影响仍存有争议。研究表明, 植物残体表施时, 深栖类(anecic)蚯蚓 *Aporrectodea longa*^[6,8] 和表栖类(epigeic)蚯蚓 *Lumbricus rubellus*^[6] 都会增加土壤 N₂O 的排放; 而残体混施时, 接种表层种蚯蚓并没有增加土壤 N₂O 的排放^[5]。内层种(endogeic)蚯蚓表现更为复杂, 与土壤类型亦有关联。一种内层种蚯蚓 *A.caliginosa* 接种在壤土中会促进 N₂O 的排放^[8], 但

在沙土中, 这种蚯蚓甚至会抑制土壤 N₂O 的排放^[11], 这反映出蚯蚓生态型不同的取食策略。蚯蚓的生态功能之一就是通过取食并分解作物残体, 使残体中的氮素等营养物质在耕作层中更均匀地分布和均衡利用, 植物残体的施加方式甚至残体混施的深度都有可能改变蚯蚓与土壤 N-N₂O 代谢之间的关系。

由于蚯蚓在草地和林地中种群的密度较高, 过往的研究多集中于这里^[6-7,9-12], 缺乏对农田生态系统的关注。但配施秸秆水稻土中的蚯蚓数量仍可以达到 17 条/m² 以上^[13], 所以为正确评价蚯蚓在土壤温室气体代谢中的作用, 本研究通过接种蚯蚓的长期定位试验平台, 结合土壤性状的观测, 对施加秸秆(混施或表施)的旱作水稻土壤 N₂O 排放通量的变化进行了初步研究, 试图揭示蚯蚓活动对土壤 N-N₂O 代谢的影响, 更好地了解蚯蚓在土壤微量气体代谢过程中的生态功能, 以促进农业生态系统的管理减排。

1 材料与方法

1.1 试验地点

盆栽试验地点位于南京农业大学的常年定位网室内。网室内用混凝土砌成规则排列的池子, 规格为 2.8 m×1 m×0.6 m, 试验时池内约填入 50 cm 深的土壤。供试土壤是采自南京郊区的高沙土。

试验使用的盆钵内圆高度和直径大概为 20 cm, 上沿处有一凹型槽, 约深 1.5 cm, 采样时通过将水注入槽中, 可以达到密封的效果。试验盆钵大部分埋进网室池内的土壤中, 尽可能减少采样时盆钵间的温度差异, 盆钵里的供试土壤为 4 kg。

1.2 试验设计与田间管理

供试稻种为武育粳 3 号, 旱育秧。每盆移栽 4 株。在整个生长期, 盆内均不覆盖水层, 进行旱育管理, 灌水保持土壤含水量约在 80% 田间持水量。移栽期为 2008 年 6 月 21 日, 收获期为 10 月 20 日。

试验包含 5 个处理, 分别为: 对照, 不添加玉米秸秆也未接种蚯蚓(CK); 秸秆混施, 均匀混和秸秆残体在 0~20 cm 的土壤中(I); 秸秆表施, 在盆钵内的土层表面均匀覆盖秸秆(M); 秸秆混施后接种蚯蚓(IE); 秸秆表施后接种蚯蚓(ME), 每个处理 3 次重复。

肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾, 氮肥(以纯 N 计)、磷肥(以 P_2O_5 计)和钾肥(以 K_2O 计)的用量分别是 210、105 和 105 kg/hm²。其中 40% 的氮肥及全部的磷、钾肥用作基肥, 剩余的氮肥平分用作分蘖肥及穗肥。有机残体选用玉米秸秆, 使用前全部粉碎至约 2 cm, 基本的性状为 C 464.33 g/kg, N 14.63 g/kg, P 2.85 g/kg, 其 C/N 比为 31.74, 单个盆钵的施用量为 23.5 g(合 7 500 kg/hm²)。

试验接种蚯蚓品种为威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*), 分类上属于深栖类, 介于表栖类和内栖类之间。这是原土壤采集地蚯蚓的优势种群, 自然条件下密度大约为 60~80 g/m², 折合到每盆钵面积中应有约 2.5 g 蚯蚓生物量, 故经过仔细挑选及称重, 单个盆钵接种 2 条成年蚯蚓(约为 2.5 g)。

1.3 测定项目及方法

试验的开始和结束进行土壤性状测试, 对土壤表层(0~20 cm)进行采样分析。土壤有机碳(SOC)用 $K_2Cr_2O_7$ 氧化法测定; 全氮(TN)用半微量凯氏定氮法测定; NH_4^+-N 用靛酚蓝比色法测定; NO_3^--N 用镀 Cu-Cd 还原法测定^[14]。

土壤 N_2O 排放通量采用静态箱-气相色谱法测定^[15]。每天上午 9:00 到 11:00 进行气体采样, 以尽量避免气温变化造成的误差, 2~3 个箱体平行采样, 于关箱后的 0、5、10、15、20 min 对采样箱内的气体进行抽取, 每次抽样约 60 ml。气体样品带回实验室 24 h 内用 Agilent 4890D 气相色谱仪进行分析。考虑到采样箱内栽种的水稻品种, 试验采集获得的 N_2O 排放量为该生态系统背景下的 N_2O 排放值。试验采样频率为每两周一次。

1.4 数据处理

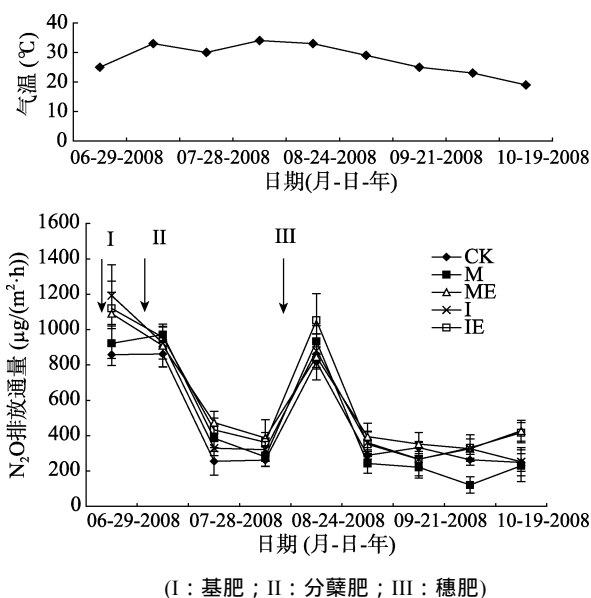
用单因素方差分析不同处理间差异, 差异显著性

用 Duncan 检验, 所有统计分析均采用 SPSS 统计软件。

2 结果与分析

2.1 蚯蚓和秸秆对 N_2O 排放的影响

从 N_2O 排放变化图(图 1)可以看出, 与对照处理相比, 接种蚯蚓和施加秸秆的土壤 N_2O 排放速率均得以显著提高。整个盆栽期内排放速率最高的为 IE 处理, ME 和 I 处理次之, 最低的是 CK 处理。稻季 N_2O 排放量的峰值基本上出现在移栽初期和中期, 这两个时期排放较大的原因是初期蚯蚓活动旺盛, 特别是外源氮素(如基肥和穗肥)的施入使土壤微生物有较多的氮素利用, 加强了土壤硝化和反硝化作用。在李曼莉等^[16]的研究中, 同样发现旱作稻田生态系统 N_2O 的排放通量在每次施肥后一周左右出现排放高峰。



(I: 基肥; II: 分蘖肥; III: 穗肥)

图 1 气温及 N_2O 排放的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of N_2O flux and atmosphere temperature

蚯蚓与秸秆的相互作用产生了不同的效果, 在秸秆表施的情况下, 相对 M 处理, ME 处理显著提高 N_2O 的排放量, 从 12.54 kg/hm² 提高到 14.94 kg/hm² ($P<0.05$); 但是在秸秆混施的情况下, 相比 I 处理, IE 处理并未显著提高 N_2O 的排放量(表 1)。总的来说, 与相关水稻生态系统 N_2O 排放量的研究结果比较, 本研究中的水稻旱作系统 N_2O 排放量的结果偏大, 一方面是水稻旱作 N_2O 排放量显著大于水田生长季, 另一方面也是本研究采样频率偏低, 施基肥穗肥后采样得到了较高的 N_2O 排放通量。事实上, 在较高 N_2O 排放通量期内(如化肥施用后或明显降水后一段时间)测量频度应在每天一次为妥。

表 1 不同处理土壤有机碳、全氮、矿质氮及 N₂O 排放量变化
Table 1 Changes of soil organic carbon, total nitrogen, mineral nitrogen content and N₂O emissions under different treatments

处理	有机碳(g/kg)		全氮(g/kg)		矿质氮(mg/kg)		N ₂ O 排放总量 (kg/hm ²)
	移栽日 06-21	收获日 10-20	移栽日 06-21	收获日 10-20	移栽日 06-21	收获日 10-20	
CK	5.43 ± 0.18 c	5.95 ± 0.23 c	0.69 ± 0.04 d	0.67 ± 0.08 b	23.04 ± 0.62 a	27.45 ± 1.67 c	12.21 ± 0.72 b
M	6.29 ± 0.26 b	6.49 ± 0.57 c	0.76 ± 0.01 c	0.80 ± 0.04 a	21.55 ± 0.73 b	26.20 ± 1.02 c	12.54 ± 0.45 b
ME	6.92 ± 0.09 a	7.63 ± 0.62 b	0.83 ± 0.02 ab	0.77 ± 0.08 ab	20.76 ± 0.26 b	35.97 ± 3.45 b	14.94 ± 0.78 a
I	6.61 ± 0.27 ab	8.11 ± 0.35 ab	0.80 ± 0.01 b	0.82 ± 0.03 a	22.72 ± 0.34 a	28.58 ± 1.04 c	13.87 ± 0.87 a
IE	6.68 ± 0.26 ab	8.49 ± 0.37 a	0.85 ± 0.01 a	0.83 ± 0.02 a	22.73 ± 0.73 a	47.09 ± 6.51 a	15.18 ± 0.61 a

注：表中同列不同小写字母表示处理间差异在 $P < 0.05$ 水平显著(Duncan 检验)；CK：对照；M：秸秆表施；ME：秸秆表施+蚯蚓；I：秸秆混施；IE：秸秆混施+蚯蚓。

2.2 蚯蚓和秸秆对土壤理化性状的影响

秸秆在土壤中的分解受土壤养分、水分、温度、秸秆本身的理化特性、土壤类型及土壤与秸秆间的接触程度等因素的影响。施用秸秆提高了土壤有机碳和全氮含量(表 1)，这与已有的研究结果一致^[17]，证明植物残体的施用有利于改善土壤的理化性质，但植物残体的不同施用方式(混施或表施)仍可能对土壤理化性状产生不同影响。本试验中，秸秆混施(处理 I)较秸秆表施(处理 M)土壤有机碳含量增加显著($P < 0.05$)。由于混施还田的植物残体与土壤有充分的接触，也能迅速分解，除作物吸收部分外，余下的可能以土壤有机质的形式固存下来，所以混施比表施更易于植物残体的分解和矿化。

土壤有机物是蚯蚓生命活动的主要能量来源，本试验中，接种蚯蚓并配合施用秸秆后，经过一个栽培季节，土壤有机碳含量增加，全氮含量没有显著差异，这表明蚯蚓的取食和活动并没有导致土壤全氮、有机碳总量的减少。

蚯蚓对于土壤矿质氮的影响很显著，无论秸秆混施或是表施，接种蚯蚓处理的矿质氮含量均较单施秸秆的处理有显著提高($P < 0.05$)，蚯蚓活动对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的影响较大(图 2)，相对而言，试验结束后，各处理间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量比较稳定，其变化幅度基本位于 $0 \sim 1 \text{ mg/kg}$ 之内；而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的幅度变化则更大。蚯蚓的存在使土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量提高显著，尤其是在混施秸秆的情况下。

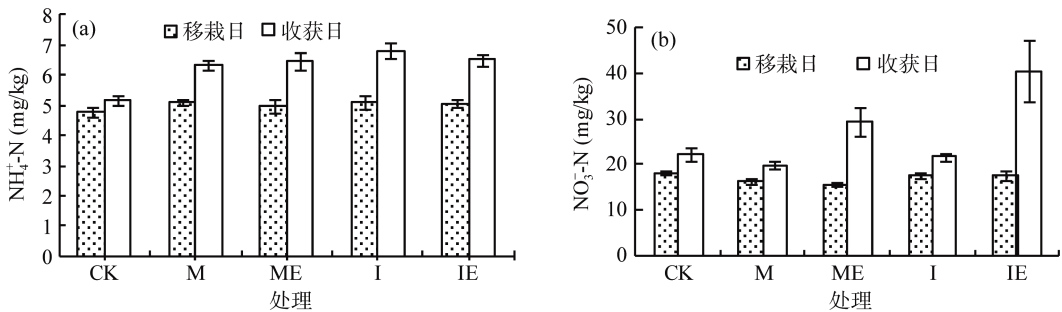


图 2 各处理间移栽日和收获日 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a)和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b)含量变化
Fig. 2 Changes in content of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (a) and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (b) under different treatments

3 讨论

3.1 蚯蚓与 N₂O 排放

土壤 N₂O 排放与土壤物理、化学及生物性状有密切关系，一般认为生物途径特别是在异养微生物及反硝化细菌参与下的土壤硝化与反硝化作用贡献较大^[18]。尽管单个新鲜蚯蚓 *Aporrectodea longa* 和 *Lumb-ricus rubellus* 的 N₂O 排放量约 $2.5 \sim 25.0 \text{ ng/(h}\cdot\text{g)}$ ^[7,19]，但蚯蚓直接排放的 N₂O 并没有对土壤温室气体有显著贡献^[5]。在田间试验尺度下，蚯蚓的 N₂O 直接排放量明显低于接种蚯蚓后生态系统的排放增量，可以

忽略。所以蚯蚓虽然能够直接生成 N₂O，但在全球排放总量中占的比例是很低的。

本试验中，表施秸秆后，接种威廉腔环蚓(anecic)能够显著提高土壤 N₂O 的排放量，这与以往类似的研究结果是一致的^[6,8]。目前，关于蚯蚓促进土壤 N₂O 排放的途径有两种假说，即肠道关联效应 GAP(gut-associated processes)和养分富集效应 NEP(nutrient-enrichment processes)。NEP 意味着蚯蚓通过混合并取食所添加的秸秆，导致土壤和蚓粪的养分富集，该效应将蚯蚓的作用主要归因于蚯蚓在土壤中的迁移

和取食作用; GAP 则主要是包括与蚯蚓肠道相关联的一系列生化反应过程, 以及肠道分泌物和排泄分泌物中微生物和酶数量和活性的改变等。考虑到本试验中, 蚯蚓与秸秆不同施用方式对 N_2O 排放有显著的交互作用 ($P < 0.05$), 这或许预示着养分富集效应较肠道关联效应能更好地解释蚯蚓的作用。由于蚯蚓的活动, 在表施秸秆的情况下, 通过取食活动将秸秆混入土壤, 从而使秸秆的分解由原来的好氧和低硝化作用的环境而转移到一个硝化作用显著加强的环境 (NEP), 从而促进氮的分解和 N_2O 的排放; 而在混施秸秆的情况下, 蚯蚓的功能将更多地局限于肠道关联效应上, 而此时, 蚯蚓并未表现出对 N_2O 排放有显著促进作用。

本试验表明, 施加秸秆 (特别是秸秆表施) 后接种蚯蚓能增加 N_2O 的排放量, 但正如 Rizhiya 等^[6]认为的, 蚯蚓与秸秆的交互作用影响温室气体排放的机制仍有许多不清楚的地方。蚯蚓的生态功能同时具有 GAP 和 NEP 效应, 如何准确界定其中的关系, 特别是两种不同过程所导致的微生物功能菌数量和活性的变化仍值得研究。

3.2 旱作栽培与 N_2O 的排放

水分对于作物的生长发育和产量非常重要, 当前, 水资源短缺已成为中国农业高产优质高效发展的一大制约因子, 水稻种植面积会越来越小, 而旱稻种植面积可能会逐渐增大^[20]。

稻田 N_2O 的产生和排放与多种因素 (如水分、温度、氧气、pH、有机质含量等) 密切相关。稻田水分管理是制约 N_2O 排放的关键因子^[21]。有研究表明, 水稻田相对于水稻旱作栽培, 将有助于减轻 N_2O 的排放^[22]。在 Zou 等^[22]的一个与本试验条件高度接近的研究中, 水稻栽培的各处理间全生育期 N_2O 排放总量为 $5.12 \sim 7.98 \text{ kg/hm}^2$, 显著低于本试验水稻旱作栽培的 $12.21 \sim 15.18 \text{ kg/hm}^2$, 反映出水稻旱作较显著提高了 N_2O 的排放量。此外, 廖千家骅等^[23]通过模拟水稻生长季 N_2O 的排放情况, 发现 378 个点的 N_2O 排放通量为 $6.0 \sim 74.3 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 也远低于本试验的排放通量值。事实上, 水稻田淹水期间 N_2O 的排放量很低, 但在水稻生长期间尤其是干湿交替阶段的排放却占全年的绝大部分。在 Hadi 等^[24]的相关研究中, 发现将泥炭地改变为栽培用地 (旱作和水稻栽培) 将促进 N_2O 排放, 在各处理中, 栽培旱作植物木薯的处理 N_2O 排放速率最高, 达到 $1.04 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。此外, 水旱轮作系统的水田生长季 N_2O 排放值显著低于旱作季节^[25]。因此, 稻田水分

管理方式对 N_2O 排放量的大小至关重要。

从全生育期的整个温室气体排放分析, 本试验中对照 CK 处理稻季的 CO_2 排放量 (1.12 kg/m^2) (未发表) 小于 Zou 等^[26]类似试验条件下的水稻栽培处理的排放量 (约为 3.18 kg/m^2), 水稻旱作减少了 CO_2 的排放。尽管水稻旱作较显著提高了 N_2O 的排放量, 但同时 CH_4 的排放量更低, 减排的效应需从 3 种温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 的综合全球增温潜势进行评估。

3.3 土壤矿质氮与 N_2O 排放

蚯蚓对氮矿化的影响, 与蚯蚓的养分富集效应和肠道关联效应都密切相关。 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 分别是反硝化和硝化过程的底物, 而这些底物的浓度将制约着 N_2O 的排放。在盆栽试验中, 蚯蚓通过对取食、破碎植物残体, 促进有机物的分解和矿化, 在 GAP 和 NEP 两种效应的共同作用下显著提高了土壤矿质氮 (特别是 NO_3^- -N) 含量 ($P < 0.05$), 在秸秆混施时, NO_3^- -N 有更大的增幅。本试验中, 由于 NH_4^+ -N 变化幅度较小, 不同处理 NO_3^- -N 含量的变化决定了土壤矿质氮的分异, 这与先前进行的一个秸秆+蚯蚓的微生物培养试验结果是类似的^[3]。

中观试验表明^[11], 与对照无蚯蚓土壤处理的 $228 \mu\text{g/kg}$ 比较, 接种表栖类蚯蚓 *L. rubellus* 显著增加了 N_2O 的累积排放量, 达到 $859 \mu\text{g/kg}$, 但是内栖类蚯蚓 *A. caliginosa* 对 N_2O 的排放影响不显著。一方面, 这或许是因为取食习性上, *A. caliginosa* 较喜欢腐烂的植物残体, 并非试验中实际使用的新鲜有机物料, 所以 *A. caliginosa* 的活性可能降低; 另一方面, 试验表明接种表栖类蚯蚓容易导致土壤滤出液中 NO_3^- -N 的浓度升高, 而内栖类蚯蚓则导致 NH_4^+ -N 的浓度升高^[8], 由于较高含量的 NO_3^- -N 不仅会促进土壤反硝化速率, 且在 N_2O 还原为 N_2 过程中产生抑制和延迟效应^[6], 故与土壤 N_2O 排放更为密切。所以, 蚯蚓或许主要通过影响土壤 NO_3^- -N 含量间接促进土壤 N_2O 的排放, 当然, 这仍需要进一步的试验及数据来证实。

4 结论

从本试验结果可以看出, 水稻旱作较显著提高了 N_2O 的排放量, 但其温室效应需进行 3 种主要温室气体 (CO_2 、 N_2O 和 CH_4) 的综合全球增温潜势评估。已往的研究由于所接种的蚯蚓生态型差异、施用植物残体方式的差异等原因, 对蚯蚓在土壤 N_2O 排放中的作用可能产生不同甚至相反的结论。本试验中, 施加秸秆后, 威廉腔环蚓 (anecic) 的存在能够显著提高土壤中 N_2O 的排放量, 蚯蚓的这种作用当秸秆表施时

更明显。蚯蚓与秸秆不同施用方式对 N_2O 排放有显著的交互作用,养分富集效应较肠道关联效应更好地诠释该生态功能。

参考文献：

- [1] Dyominov IG, Zadorozhny AM. Greenhouse gases and recovery of the Earth's ozone layer. Greenhouse gases, ozone, and electrodynamics; their changes in the middle atmosphere and lower thermosphere[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35: 1 563–1 565
- [2] Lubbers IM, van Groenigen KJ, Fonte SJ, Six J, Brussaard L, van Groenigen JW. Greenhouse-gas emissions from soils increased by earthworms[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3: 187–194
- [3] 罗天相, 胡锋, 刘莎, 李辉信, 熊国新. 施用秸秆和接种蚯蚓对土壤温室气体排放的影响[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 653–657
- [4] 罗天相, 李辉信, 王同, 胡锋. 线虫和蚯蚓对土壤微量气体排放的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 993–999
- [5] Sperattia AB, Whalen JK. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil as influenced by anecic and endogeic earthworms[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(1): 27–33
- [6] Rizhiya E, Bertora C, van Vliet PCJ, Kuikmana PJ, Fabera JH, van Groenigen JW. Earthworm activity as a determinant for N_2O emission from crop residue[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 2 058–2 069
- [7] Bertora C, van Vliet PCJ, Hummelink EWJ, van Groenigen JW. Do earthworms increase N_2O emissions in ploughed grassland? [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 632–640
- [8] Giannopoulou G, Pulleman MM, van Groenigen JW. Interactions between residue placement and earthworm ecological strategy affect aggregate turnover and N_2O dynamics in agricultural soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(4): 618–625
- [9] Chapuis-Lardy L, Brauman A, Bernard L, Pablo AL, Toucet J, Mano MJ. Effect of the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* on the microbial structure and activity related to CO_2 and N_2O fluxes from a tropical soil (Madagascar)[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 201–208
- [10] 高波, 傅声雷, 张卫信, 刘素萍, 周存宇. 蚯蚓和三叉苦对亚热带人工林土壤 N_2O 和 CH_4 通量的短期效应[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(4): 364–371
- [11] Giannopoulos G, van Groenigen JW, Pulleman MM. Earthworm-induced N_2O emissions in a sandy soil with surface-applied crop residues[J]. *Pedobiologia*, 2011 (Supplement), 54: 103–111
- [12] Lubbers IM, Brussaard L, Otten W, van Groenigen JW. Earthworm-induced N mineralization in fertilized grassland increases both N_2O emission and crop-N uptake[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 152–161
- [13] 向昌国, 张平究, 潘根兴, 邱多生, 储秋华. 长期不同施肥下太湖地区黄泥土蚯蚓的多样性、蛋白质含量与氨基酸组成的变化[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 1 667–1 674
- [14] 刘光崧, 蒋能慧, 张连第, 刘赵礼. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 31–38
- [15] Wang YS, Wang YH. Quick measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 842–844
- [16] 李曼莉, 徐阳春, 沈其荣, 周春霖, 黄新宇, 殷晓燕, 尹金来. 旱作及水作条件下稻田 CH_4 和 N_2O 排放的观察研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 864–869
- [17] 王霞, 胡锋, 李辉信, 沈其荣. 秸秆不同还田方式下蚯蚓对旱作稻田土壤碳氮的影响[J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 462–466
- [18] 蔡延江, 丁维新, 项剑. 土壤 N_2O 和 NO 产生机制研究进展[J]. *土壤*, 2012, 44(5): 712–718
- [19] Karsten GR, Drake HL. Denitrifying bacteria in the earthworm gastrointestinal tract and in vivo emission of nitrous oxide (N_2O) by earthworms[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63: 1 878–1 882
- [20] 陈展宇, 徐克章, 吴磊, 张治安, 凌凤楼. 旱作条件下旱稻和水稻叶片光合特性及 RuBP 羧化酶活性的比较[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(5): 87–91
- [21] 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 万运帆, 高清竹, 张仲新. 中国稻田 CH_4 和 N_2O 排放及减排整合分析[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(14): 2 923–2 936
- [22] Zou JW, Huang Y, Zheng XH, Wang YS. Quantifying direct N_2O emissions in paddy fields during rice growing season in mainland China: Dependence on water regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(37): 8 030–8 042
- [23] 廖千家骅, 王书伟, 颜晓元. 中国稻田水稻生长季 N_2O 排放估算[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 212–218
- [24] Hadi A, Inubushi K, Purnomo E, Razie F, Yamakawa K, Tsuruta H. Effect of land-use changes on nitrous oxide (N_2O) emission from tropical peatlands[J]. *Chemosphere*, 2000, 2(3/4): 347–358
- [25] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 朱普平, 盛婧, 王子臣. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1 521–1 526
- [26] Zou JW, Huang Y, Zong LG, Zheng XH, Wang YS. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane emissions from rice-winter wheat rotation system as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 5: 691–698

Influence of Earthworms on N₂O Emissions in Aerobic Rice with Crop Residues

LUO Tian-xiang^{1,2}, HU Feng², LI Hui-xin², LIU Sha³

(1 College of Life and Environmental Sciences, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China; 2 College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3 Library of Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract: Earthworms play an important role in determining the greenhouse-gas balance of soils worldwide. A field experiment in aerobic rice was conducted to investigate the effects of crop residues and earthworm activities on soil properties and N₂O emissions. A 120-day mesocosm experiment was set up in which crop residues were either incorporated or applied on top of the soil in the presence or absence of earthworm (*Metaphire guillelmi*). The results indicated that *Metaphire guillelmi* significantly enhanced soil N₂O emissions. In the treatment with crop residues mulching, the cumulative emission amounts of N₂O significantly increased from 12.54 to 14.94 kg/hm² ($P < 0.05$) in the presence of earthworm. However, if residues were incorporated into the soil, the earthworm effect disappeared. Soil mineral nitrogen was increased, and nitrogen mineralization was strengthened by earthworm activities. The level of NH₄⁺-N in soil of different treatments remained at a very low level during the whole growing period of aerobic rice, while the variations of NO₃⁻-N content in soil was very high. The spatial-temporal variations of soil NO₃⁻-N had close relationships with soil mineral nitrogen level. The results of this study suggested that *Metaphire guillelmi* increased cumulative N₂O emissions by affecting denitrifier community activity via incorporation of fresh residue into the soil and accelerating decomposition.

Key words: Aerobic rice, Earthworm, Crop residue, Soil mineral nitrogen, N₂O emissions