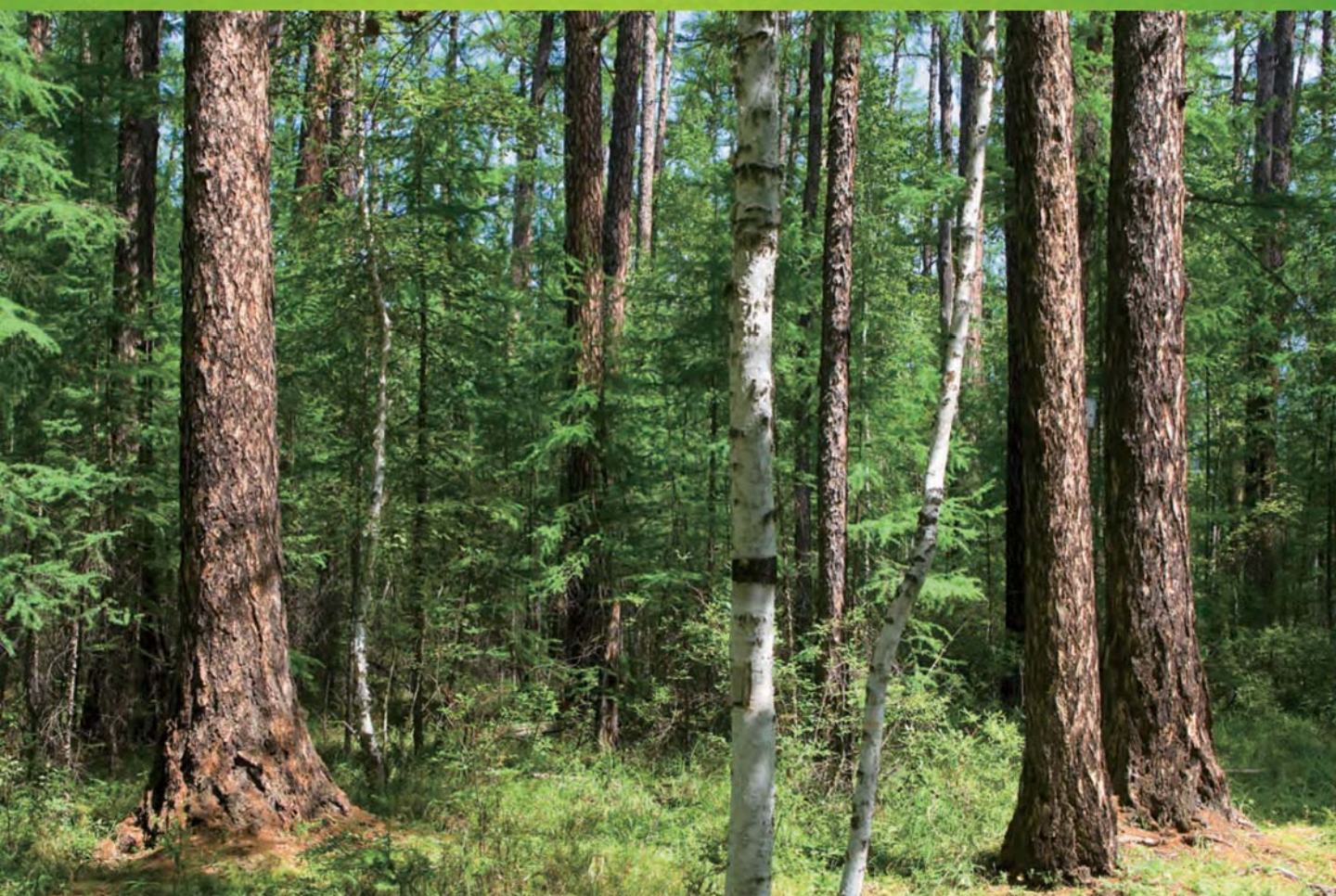


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 23 期 Vol.33 No.23 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 23 期 2013 年 12 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 基于树干液流技术的北京市刺槐冠层吸收臭氧特征研究..... 王 华, 欧阳志云, 任玉芬, 等 (7323)
- 三疣梭子蟹增殖过程对野生种群的遗传影响——以海州湾为例..... 董志国, 李晓英, 张庆起, 等 (7332)
- 土壤盐分对三角叶滨藜抗旱性能的影响..... 谭永芹, 柏新富, 侯玉平, 等 (7340)
- 南美斑潜蝇为害对黄瓜体内 4 种防御酶活性的影响..... 孙兴华, 周晓榕, 庞保平, 等 (7348)

个体与基础生态

- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物养分输入量的早期影响..... 肖银龙, 涂利华, 胡庭兴, 等 (7355)
- 茎瘤芥不同生长期植株营养特性及其与产量的关系..... 赵 欢, 李会合, 吕慧峰, 等 (7364)
- 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化..... 黄张婷, 张 艳, 宋照亮, 等 (7373)
- 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响..... 张树杰, 廖 星, 胡小加, 等 (7382)
- 广西扶绥黑叶猴的主要食源植物及其粗蛋白含量..... 李友邦, 丁 平, 黄乘明, 等 (7390)
- 氮素营养水平对膜下滴灌玉米穗位叶光合及氮代谢酶活性的影响..... 谷 岩, 胡文河, 徐百军, 等 (7399)
- PFOS 对斑马鱼胚胎及仔鱼的生态毒理效应 夏继刚, 牛翠娟, 孙麓垠 (7408)
- 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用..... 韩秀荣, 高 嵩, 侯俊妮, 等 (7417)
- 基于柑橘木虱 CO I 基因的捕食性天敌捕食作用评估 孟 翔, 欧阳革成, Xia Yulu, 等 (7430)
- 健康和虫害的红松挥发物对赤松梢斑螟及其寄生蜂寄主选择行为的影响.....
..... 王 琪, 严善春, 严俊鑫, 等 (7437)

种群、群落和生态系统

- 小麦蚕豆间作对蚕豆根际微生物群落功能多样性的影响及其与蚕豆枯萎病发生的关系.....
..... 董 艳, 董 坤, 汤 利, 等 (7445)
- 喀斯特峰丛洼地不同生态系统的土壤肥力变化特征..... 于 扬, 杜 虎, 宋同清, 等 (7455)
- 黄土高原人工苜蓿草地固碳效应评估..... 李文静, 王 振, 韩清芳, 等 (7467)

景观、区域和全球生态

- 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响..... 李轶冰, 逢焕成, 杨 雪, 等 (7478)
- 三峡库区典型农林流域景观格局对径流和泥沙输出的影响..... 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等 (7487)
- 基于 BP 神经网络与 ETM+ 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类..... 肖锦成, 欧维新, 符海月 (7496)
- 寒温带针叶林土壤 CH₄ 吸收对模拟大气氮沉降增加的初期响应..... 高文龙, 程淑兰, 方华军, 等 (7505)
- 寒温带针叶林土壤呼吸作用的时空特征..... 贾丙瑞, 周广胜, 蒋延玲, 等 (7516)

黄土高原小麦田土壤呼吸季节和年际变化..... 周小平,王效科,张红星,等 (7525)

不同排放源周边大气环境中 NH₃ 浓度动态..... 刘杰云,况福虹,唐傲寒,等 (7537)

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N₂O 排放的影响 罗天相,胡 锋,李辉信 (7545)

资源与产业生态

基于水声学方法的天目湖鱼类资源捕捞与放流的生态监测..... 孙明波,谷孝鸿,曾庆飞,等 (7553)

应用支持向量机评价太湖富营养化状态..... 张成成,沈爱春,张晓晴,等 (7563)

研究简报

亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 徐旺明,闫文德,李洁冰,等 (7570)

青蒿素对蔬菜种子发芽和幼苗生长的化感效应 白 祯,黄 玥,黄建国 (7576)

NO 参与 AM 真菌与烟草共生过程 王 玮,赵方贵,侯丽霞,等 (7583)

基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法..... 张桂铭,朱阿兴,杨胜天,等 (7590)

施氮方式对转基因棉花 Bt 蛋白含量及产量的影响 马宗斌,刘桂珍,严根土,等 (7601)

学术信息与动态

未来地球——全球可持续性研究计划..... 刘源鑫,赵文武 (7610)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 292 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-12



封面图说: 兴安落叶松林景观——中国的寒温带针叶林属于东西伯利亚森林向南的延伸部分,它是大兴安岭北部一带的地带性植被类型,一般可分为落叶针叶林和常绿针叶林两类。兴安落叶松林景观地下部分为棕色森林土,中上部为灰化棕色针叶林土,均呈酸性反应。随着全球气候持续变暖,寒温带针叶林生态系统潜在的巨大碳库将可能成为大气 CO₂ 的重要来源,研究表明,温度是寒温带针叶林生态系统土壤呼吸作用的主要调控因子,对温度的敏感性随纬度升高而增加,根系和凋落物与土壤呼吸作用表现出相似的空间变异性。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208201170

罗天相, 胡锋, 李辉信. 施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N_2O 排放的影响. 生态学报, 2013, 33(23): 7545-7552.

Luo T X, Hu F, Li H X. Influence of residues and earthworms application on N_2O emissions of winter wheat. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7545-7552.

施加秸秆和蚯蚓活动对麦田 N_2O 排放的影响

罗天相^{1,2,*}, 胡 锋², 李辉信²

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

摘要: 蚯蚓是农田生态系统的重要组成部分, 对土壤的碳氮循环和 N_2O 排放起着重要作用。为了研究接种蚯蚓(威廉腔环蚓, *Metaphire guillelmi*) 对农田土壤特性及 N_2O 排放通量的影响, 分析蚯蚓在土壤 N_2O 排放中的作用, 于 2007—2008 年冬小麦生长季采用静态箱-气相色谱法, 对施用秸秆(表施和混施)并接种蚯蚓后土壤 N_2O 排放通量的变化进行了监测, 结果显示接种蚯蚓增加了土壤 N_2O 的排放量。在秸秆表施的情况下, 接种蚯蚓处理 N_2O 的排放量最大, 全生育期达 14.26 kg/hm^2 , 显著高于未接种蚯蚓处理 11.59 kg/hm^2 ($P < 0.05$)。在秸秆混施时, 接种蚯蚓与未接种蚯蚓的两个处理间 N_2O 排放量在栽培后期差异不显著。接种蚯蚓处理土壤 N 的矿化作用加强, 矿质 N 含量提高, 铵态氮含量比较稳定, 硝态氮含量显著提高, 表施秸秆接种蚯蚓处理硝态氮含量比未接种处理提高了 20.1% ($P < 0.05$), 达到 21.13 mg/kg , 而混施秸秆后接种蚯蚓的硝态氮含量为 21.21 mg/kg , 较未接种处理提高了 11.7%。分析表明, 硝态氮含量与 N_2O 排放密切相关, 接种蚯蚓后 N_2O 排放潜力的提高与蚯蚓活动促进土壤氮素矿化特别是硝态氮含量的增加有关, 农田生态系统中蚯蚓对 N_2O 排放的贡献主要体现在促进秸秆混入土壤, 从而改变秸秆分解的微域环境, 促进反硝化作用并增加 N_2O 的排放。

关键词: 蚯蚓; 秸秆; N_2O 排放; 矿质氮; 冬小麦

Influence of residues and earthworms application on N_2O emissions of winter wheat

LUO Tianxiang^{1,2,*}, HU Feng², LI Huixin²

1 Yichun University in Jiangxi Province, Jiangxi, Yichun 336000, China

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

Abstract: Earthworms, the most important macro-fauna in agroecosystem play an important role in nutrient cycling. Earthworm activity is known to increase emissions of nitrous oxide (N_2O) from arable soils. Earthworm gut, casts, and burrows have exhibited higher denitrification activities than the bulk soil. Furthermore, the earthworm feeding strategy may drive N_2O emissions, as it determines access to fresh organic matter for denitrification. Here, a field experiment was conducted to investigate the effects of residues and earthworm (*Metaphire guillelmi*) activities on soil properties and N_2O emissions. Treatments included: (1) no earthworm addition, no residues application (2) residues incorporated and mixed with soil only, (3) residues mulch only, (4) residues incorporated + earthworms inoculation, and (5) residues mulch + earthworms inoculation. These treatments were abbreviated as CK, I, M, IE and ME. The N_2O fluxes was measured *in situ* using the static chamber technique and analyzed with gas chromatogram in a winter wheat field. The results indicated that *Metaphire guillelmi* significantly enhanced soil N_2O emissions. Soil mineral nitrogen (especially NO_3^- -N content) was increased, and nitrogen mineralization was strengthened by earthworm activities. In the treatment with straw residues

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370286); 江西省重点学科暨宜春学院重点学科“作物学”基础 Research 资助项目

收稿日期: 2012-08-20; **修订日期:** 2013-03-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ltxls@139.com

mulching, the cumulative emission amounts of N_2O significantly increased from 11.59 to 14.26 kg/hm^2 ($P < 0.05$) in the presence of earthworm, with a corresponding increase in the contents of soil NO_3^- -N by 20.1% ($P < 0.05$) and up to 21.13 mg/kg . However, if residues were incorporated into the soil, the earthworm effect disappeared in the late phase of the experiment and with a corresponding increase in the contents of soil NO_3^- -N by 11.7% and up to 21.21 mg/kg . Cumulative emissions of N_2O were positively correlated with the NO_3^- -N content measured at the end of the experiment. The high N_2O emissions in the presence of *Metaphire guillelmi*, when residues mulched, suggest a stimulation of nitrogen mineralization and mixing residue into the soil, switching residue decomposition from an aerobic and low denitrification pathway to one with significant denitrification and N_2O production.

Key Words: earthworm; residue; N_2O emission; soil mineral nitrogen; winter wheat

氧化亚氮(N_2O)是一种重要的大气微量气体,是致臭氧层破坏和温室效应的主要因素。全球 N_2O 排放量 60% 以上来源于土壤的生物活动,其中农田土壤约占土壤排放源的 40%,达 4.2 $\text{Tg N-N}_2\text{O}/\text{a}$ ^[1]。 N_2O 主要由微生物活动引起的土壤硝化和反硝化过程产生,这些过程受到不同的土壤理化因素的调节,比如土壤水分和通气状况,土壤类型和土壤 pH 的影响。蚯蚓是土壤生物的重要组成部分,与土壤理化性状的改变有密切的关系。蚯蚓活动能混合土壤,改善土壤结构,提高土壤透气、排水和深层持水能力,间接影响土壤硝化和反硝化过程,可能成为陆地生态系统 N_2O 排放的生物源之一^[2-3]。近年来在微系统^[4]和不同土壤类型上的中观试验^[5-12]也证实了蚯蚓活动与土壤 N_2O 排放有密切关系。

由于试验土壤类型和蚯蚓生态型的差异,有关蚯蚓对土壤 N_2O 排放影响的研究结果还不尽一致。蚯蚓对土壤 N_2O 排放的影响与施加的外源作物秸秆及取食对策均有关联^[5]。蚯蚓能促使植物残体进入土壤,并将植物残体中的 N 转化为无机态形式,从而易于被植物和土壤微生物吸收利用,在秸秆还田时辅以蚯蚓处理,有助于植物残体向土壤有机碳的转化^[13]。当秸秆混施入土壤时,接种深层种(anecic)蚯蚓 *Apporectodea longa* 能促进土壤 N_2O 排放^[10];秸秆表施时,表层种(epigeic)蚯蚓 *Lumbricus rubellus*^[5-6]和深层种蚯蚓 *A. longa*^[6]将导致土壤 N_2O 排放量的增加。壤土中,内层种(endogeic)蚯蚓 *A. caliginosa* 仅在秸秆混施入土壤或与表层种蚯蚓 *L. rubellus* 一同存在时才会对土壤 N_2O 排放具有促进作用^[5],当 *A. caliginosa* 接种在沙质土壤中,即使和 *L. rubellus* 一同存在,该种蚯蚓也没有如壤土中一样增加 N_2O 的排放,甚至表现出抑制作用^[8],这反映出蚯蚓生态型不同的取食策略。接种不同生态型蚯蚓时,甚至混施作物秸秆的不同深度也会影响到土壤 N_2O 的排放^[14]。

此外,在探讨蚯蚓活动对土壤温室气体 N_2O 排放影响研究上,由于蚯蚓在森林和草地中具有较高的种群密度,过去的结论多来自于这 2 个生态系统^[6-12],对农田生态系统关注不多。但蚯蚓是农田生态系统的重要组成部分,麦田中蚯蚓种群全年平均密度可高达 83.83 条/ m^2 ^[15],明确农田生态系统中蚯蚓对 N_2O 排放的影响,对于了解蚯蚓的生态功能,揭示蚯蚓活动对土壤温室气体代谢的影响,促进农田管理减排具有重要的意义。为此,在接种蚯蚓长期定位试验的基础上,通过农田冬小麦栽种试验,对施用秸秆(表施和混施)及接种蚯蚓后土壤 N_2O 排放通量的变化进行初步研究,并从土壤特性和排放量上对蚯蚓的作用进行评估,为正确评价农田土壤动物的生态功能提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点和材料

盆栽试验于 2007 年 11 月—2008 年 5 月在南京农业大学常年定位网室内实施。供试土壤为江苏省如皋县搬经镇的高沙土。网室内用混凝土砌成 2.8m×1m×0.6m 的池子,填入深 50cm 的供试土壤。

盆钵用紫砂泥烧制而成,钵高和内圆直径均为 20cm 左右,盆钵上口有 1.5cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封,盆钵底部有直径为 2cm 的小孔多个以渗漏降水。每盆装供试土壤 4kg 左右,各供试土壤设

置 3 个重复。为使盆钵土壤的温度与大田土壤温度一致并减少盆钵间的温度差异,盆钵的 4/5 高度埋入土壤。

冬小麦品种为扬麦 158,小麦播种期为 11 月 15 日,11 月 18 日移栽入盆钵内,每盆移栽 4 株,2008 年 5 月 10 日收获。

土壤有机 C 含量为 5.86g/kg,总 N 含量为 0.70g/kg,总 P 含量为 0.66g/kg,速效 P 含量为 0.66mg/kg,速效 K 含量为 47.1mg/kg,pH 为 8.25。

1.2 肥料施用

氮、磷和钾肥用量分别为 225kg/hm²(以纯 N 计)、120kg/hm²(以 P₂O₅计)和 120kg/hm²(以 K₂O 计),肥料品种为尿素、过磷酸钙和氯化钾。其中氮肥的 60%作为基肥,分蘖肥和穗肥各占 20%,磷、钾肥全作基肥。有机物料采用玉米秸秆,其基本性状为 14.63g N/kg,464.33g C/kg,2.85g P/kg,玉米秸秆 C/N 为 31.74,用量为每盆钵施用 23.5g,折合约 7500kg/hm²。玉米秸秆(粉碎至 2cm 左右)与基肥一起施入,混施时与 0—20cm 土壤均匀混和,这种秸秆施用方式与自然还田的实际情况接近;表施时则均匀覆盖于盆钵内土层表面。

1.3 蚯蚓接种

试验所用蚯蚓为威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*),分类上属于 anecic,介于 epigeics 和 endogeics 之间,由于盆钵表面积小,蚯蚓活动范围受到一定的拘束;试验土壤采集地的蚯蚓自然密度约为 60—80g/m²,故折合到每盆钵约 2.5g 蚯蚓生物量,即 2 条成年蚯蚓被接种入盆钵。作物移栽入盆钵后立即进行接种,接种之后浇适量水,以便蚯蚓尽快适应环境。

1.4 试验处理

本实验共设 5 个处理,各处理 3 次重复:(1)对照,即不施用玉米秸秆,不接种蚯蚓(CK);(2)秸秆混施,不接种蚯蚓(I);(3)秸秆表施,不接种蚯蚓(M);(4)秸秆混施,接种蚯蚓(IE);(5)秸秆表施,接种蚯蚓(ME)。

1.5 土壤、气体采样与分析方法

试验的开始和结束期进行土壤理化性状测试,采集各处理土壤表层(0—20cm)样品。用 K₂Cr₂O₇氧化法测定土壤有机碳(SOC);用半微量凯氏定氮法测定全氮(TN)。NH₄⁺-N 用靛酚蓝比色法;NO₃⁻-N 用镀 Cu-Cd 还原法。

本试验气体样品采集采用静态箱-气相色谱法。采样箱为圆筒型,用 PVC 材料制成,高 1m,箱体直径与盆钵凹型槽直径一致。采样箱外侧先包有一层约 5cm 厚的海绵,然后覆盖一层铝箔以减少采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化。气体样品用带有开关的针筒采集,生长季节前中期每周 1 次,3 月中旬后每两周 1 次。根据试验要求,采用 2—3 箱体平行采样,采样时间分别为关箱后的 0、5、10、15、20min,每次抽样 60 mL。气体样品于采样当天用改装的 Agilent 4890D 气相色谱仪分析 N₂O 的排放通量。由于样品采集时采样箱中包含正常生长的作物,因此该研究的温室气体排放通量代表该生态系统的温室气体排放。

N₂O 排放通量结果用每次测定 3 个重复的平均值及标准偏差表示,排放量以生长季排放通量乘以生长季的时间。

1.6 统计学检验方法

数据统计分析采用二因素(蚯蚓×秸秆施用方式)方差分析蚯蚓和秸秆的交互作用,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 不同处理间土壤化学性状的改变

经过冬小麦栽培,在收获期后不同处理土壤中有机碳和全氮含量变化明显(表 1)。与对照相比,加施秸秆处理(M、ME、I、IE)土壤有机碳和全氮含量均显著增加($P<0.05$)。混施秸秆处理(I 和 IE)有机碳和全氮含量显著高于表施秸秆处理(M 和 ME)。接种蚯蚓未对有机碳(SOC)与全氮产生显著影响,表明蚯蚓对有机物

料的取食不会降低土壤有机碳和全氮含量。所有处理土壤碳氮比均为 10 左右,各处理间差异不显著。这表明在秸秆常规施用条件下接种蚯蚓并未引起土壤碳、氮总量的减少,土壤碳、氮基本维持平衡。加施秸秆使土壤有机碳的含量显著提高,这个现象与其它研究结果是一致的。与表施秸秆相比,混施秸秆更有利于土壤有机碳提高^[16]。

表 1 不同处理土壤有机碳、全氮和矿质氮变化

Table 1 Changes of soil organic carbon, total nitrogen and mineral nitrogen content under different treatments

处理 Treatments	有机碳 Organic C/(g/kg)	全氮 Total N/(g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg/kg)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg/kg)
对照 CK	6.88±0.18c	0.69±0.03c	3.59±0.16c	16.69±1.66b
秸秆表施 Mulch(M)	8.71±0.47b	0.85±0.03b	3.86±0.16bc	17.59±0.86b
秸秆表施+蚯蚓 Mulch+earthworm(ME)	8.61±0.14b	0.83±0.02b	4.09±0.19ab	21.13±1.24a
秸秆混施 Incorporate(I)	9.24±0.11ab	0.92±0.01a	4.29±0.19a	18.98±0.77ab
秸秆混施+蚯蚓 Incorporate+earthworm(IE)	9.39±0.55a	0.91±0.04a	4.21±0.13a	21.21±2.87a

同一列数字无相同字母间差异达 5%的显著水平(Duncan 检验)

土壤矿质氮主要包括铵态氮和硝态氮,不同处理间土壤 NO₃⁻-N 含量均显著高于 NH₄⁺-N 含量。蚯蚓的存在显著提高了土壤中硝态氮的含量。表施秸秆时,蚯蚓使硝态氮含量提高了 20.1%($P<0.05$),达到 21.13mg/kg;混施秸秆时,蚯蚓使硝态氮含量提高了 11.7%,并达到最高值 21.21mg/kg。对照 CK 处理的硝态氮含量最低,为 16.69mg/kg。

2.2 蚯蚓和秸秆施用对 N₂O 排放的影响

蚯蚓和秸秆施用对 N₂O 排放的影响如图 1 所示:在小麦生长季整体排放趋势呈现两头高,中间低的走势。其排放峰主要出现在小麦生长的苗期和生长的末期。在小麦生长前期,各处理间 N₂O 排放较高的原因可能是基肥用量较大,提供了充足的 N 源,而且此时温湿度仍较适宜土壤 N₂O 的生成与排放;中期由于气温偏低,蚯蚓进入休眠停育阶段,而冬春季降雨又较多,由于农田土壤 N₂O 排放较强烈地受土壤湿度制约,土壤湿度过大,不利于 N₂O 的生成与排放^[17];后期随着温度的升高,湿度条件适宜,蚯蚓开始取食、活动,小麦生长发育加速,有助于提高 N₂O 的生成和排放通量。

相比对照 CK 处理,施加秸秆和接种蚯蚓均能显著提高 N₂O 排放量(表 2)。在秸秆表施的情况下,接种蚯蚓 ME 处理 N₂O 的排放量最大,全生育期达 14.26 kg/hm²,显著高于未接种蚯蚓 M 处理($P<0.05$),且这种 N₂O 排放的差异性无论在栽培前期还是后期均很显著。在混施秸秆的情况下,接种蚯蚓 IE 处理在栽培前期较未接种蚯蚓的 I 处理差异仍显著,但在后期两处理间排放量无明显差异。整个麦季对照 CK 处理 N₂O 的排放量最低,为 11.42 kg/hm²。

表 2 不同处理 N₂O 排放量(平均数±标准差)

Table 2 Amounts (mean ± SD) of N₂O emission

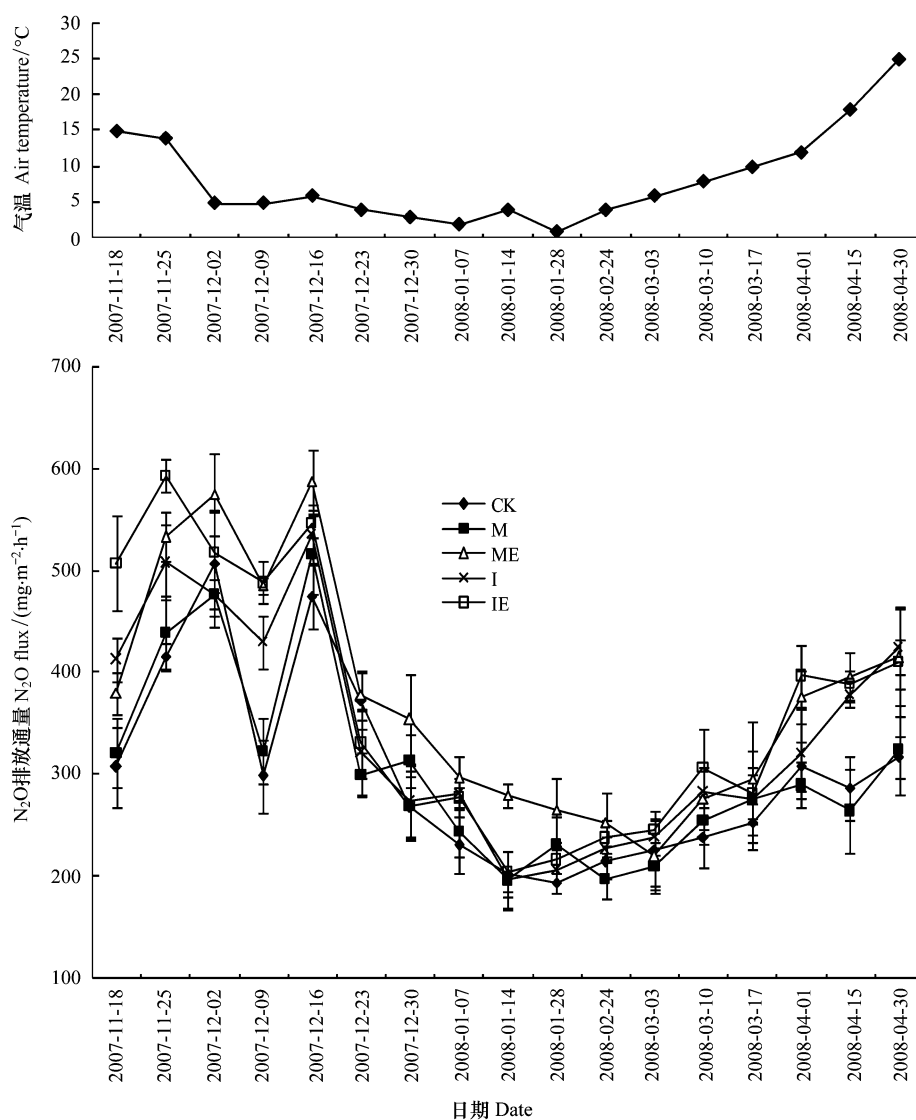
处理 Treatments	N ₂ O 排放量 N ₂ O emission/(kg/hm ²)		
	麦季栽培前期移栽至 2008-01-28	麦季栽培后期 2008-01-28 以后	麦季全生长期
对照 CK	5.55±0.40c	5.87±0.24b	11.42±0.64c
秸秆表施 M	5.71±0.02bc	5.88±0.14b	11.59±0.17c
秸秆表施+蚯蚓 ME	7.02±0.03a	7.23±0.34a	14.26±0.31a
秸秆混施 I	6.18±0.13b	6.84±0.32a	13.02±0.45b
秸秆混施+蚯蚓 IE	6.70±0.42a	7.23±0.08a	13.93±0.34a

同一列数字无相同字母间差异达 5%的显著水平(Duncan 检验)

3 讨论

3.1 蚯蚓与 N₂O 排放

蚯蚓对 N₂O 排放的影响比较显著,虽仍没有达成一致的看法,但普遍认为蚯蚓促进了土壤 N₂O 的排放。

图 1 麦季 N_2O 排放通量的变化Fig.1 Variations of N_2O flux in wheat season

本研究中施加秸秆后,接种蚯蚓能显著提高土壤 N_2O 排放的通量。农田中作物秸秆(混施或表施)是土壤中产生 N_2O 的主要微生物过程——硝化和反硝化作用的重要 C 和 N 源。与无作物秸秆还田相比,在土壤 N 源充裕条件下作物秸秆施用往往导致较高的反硝化作用和 N_2O 排放。

在评估蚯蚓对植物残体分解和温室气体排放影响的研究中,有些研究是将植物残体表施在土壤上^[18-19],但秸秆混施于土壤则是更为常见的农业措施。本试验中,在秸秆表施的情况下,接种蚯蚓后 N_2O 的排放显著增加($P<0.05$);而当秸秆混施时,蚯蚓的相对作用将减小。通过取食并分解有机残体,蚯蚓使秸秆中的 N 素等营养物质在耕作层中更均匀的分布和均衡利用。这种混施秸秆的耕耘活动代替了蚯蚓的部分生态功能。所以当秸秆混施时,蚯蚓尽管在前期对 N_2O 的排放产生一定的影响,但在后期,蚯蚓的存在与否并没有显著差异,这点与 Rizhiya 等观测结果类似^[6]。

目前,解释蚯蚓在土壤中的生态功能机理有 2 种推论^[20],即养分富集过程(NEP)和肠道关联过程(GAP)。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,该过程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,而不过多涉及其生理代谢过程。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。微系统

试验中, GAP 一般能很好的解释蚯蚓对于 N_2O 排放的促进作用^[21]。但本试验中, 在秸秆不同施用方式下(混施和表施)接种蚯蚓对农田 N_2O 排放的影响是有差异的, 在田间的中观尺度下, NEP 的推论能更好的解释这种现象: 因为蚯蚓的活动, 在表施秸秆的情况下, 通过取食活动将秸秆混入土壤, 使秸秆的分解由原来的好氧和低硝化作用的环境转移到一个硝化作用显著加强的环境(NEP), 从而促进 N 的分解和 N_2O 的排放; 而在混施秸秆的情况下, 蚯蚓的作用更多体现在肠道关联过程(GAP)上时, 接种蚯蚓未能始终表现出对 N_2O 排放的促进作用。当然, 蚯蚓在土壤中的生态作用同时包含了 NEP 和 GAP 两个过程, 在中观试验的尺度下接种蚯蚓后土壤所表现出的生态效应, 但仍需大田试验以进一步观测。

3.2 土壤矿质氮与 N_2O 排放

蚯蚓等土壤动物通过掘穴、取食和排泄等活动对生态系统的理化和生物特性产生影响, 这些因素又直接或间接的影响着土壤的硝化与反硝化作用^[22-23]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分别是硝化和反硝化反应的底物, N_2O 的产生受这些底物浓度的制约。在本次试验中, 重点观察了土壤矿质氮(包括 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)含量的变化与 N_2O 排放的关系。在盆栽试验中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均显著高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 土壤中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度没有成为 N 转化的限制性因子。接种蚯蚓处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著提高, 混施秸秆时, 接种蚯蚓 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高, 但在表施秸秆时, 接种蚯蚓使 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有更大的增幅(20.1%)。蚯蚓对氮矿化的影响, 可能与蚯蚓直接排泄富含有效氮的物质及自体代谢分泌有关, 也可能是蚯蚓活动促进了土壤微生物活性的提高及其向营养源富集场所的扩散, 从而加快了微生物对氮的周转和释放^[24]。不同处理土壤矿质氮的分异主要取决于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化。由于土壤中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 不但促进反硝化速率, 而且抑制或延迟 N_2O 还原为 N_2 ^[6], 所以蚯蚓可通过影响土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量间接促进土壤 N_2O 的排放。通过相关性分析也发现, 本试验中的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与 N_2O 排放量显著正相关(见表 3)。

表 3 N_2O 排放量与土壤理化性状的相关分析表

Table 3 The correlation analysis of N_2O emission and soil physical and chemical properties

	N_2O 排放量 N_2O emission	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	全氮 Total N
N_2O 排放量 N_2O emission	1	0.800	0.990 *	0.609
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	0.800	1	0.770	0.926 *
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	0.990 *	0.770	1	0.617
全氮 TN	0.609	0.926 *	0.617	1

* 相关性达 5% 的显著水平(双边检验)

在 Malhi 的研究中^[25], 通过 8a 的田间试验, 他们同样发现大多数情况下, 耕作、施加作物秸秆和 N 肥的输入并没有对作物土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 产生显著影响。但在施加秸秆的处理中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在 0—15 cm 的土壤层中显著高于对照处理。施加秸秆导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失加剧和 N- N_2O 排放量的增加, 尤其是在秸秆过量的情况下。当深层种和内层种蚯蚓多时, 会导致土壤滤出液中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度升高, 而表层种蚯蚓则导致 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度升高^[26]。考虑到土壤矿质氮含量与 N_2O 排放的关系, 不同生态型蚯蚓在土壤微量气体代谢中的作用也会出现差异。

在本试验场所早期进行的一项试验表明, 秸秆两种施用方式下, 蚯蚓于分蘖期显著降低了矿质氮的含量(分别为 24% 和 32%), 且在秸秆表施处理中降低程度更高。在土壤中植物残体含量较高时, 微生物加速繁殖, 生物固定作用加强, 蚯蚓使土壤可溶性有机氮的含量提高, 导致了 N 向下运移和流失^[27]。在这个过程中, 流失的 N 可能经由硝化和反硝化过程, 部分转化为 N- N_2O , 以气态的形式逸失。

4 结论

接种蚯蚓和秸秆施用对土壤 N_2O 排放有显著影响, 不同的研究, 由于所采用的有机肥料和试验设计及方法的不同, 会导致研究结果的差异。总体来说, 施加秸秆后, 蚯蚓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, 而当秸秆混施进土壤后, 尽管接种蚯蚓后将产生较高的排放量, 但蚯蚓

的相对作用将减小。养分富集过程 (NEP) 较肠道关联过程 (GAP) 更好的解释了接种蚯蚓后田间土壤所表现出的生态效应。农田秸秆施用引起的 N_2O 排放量的差异, 应该受外源 C、N 供应水平、土壤供 N 水平、微生物对有机碳的分解及对 N 的争夺利用等多因素制约。因此, 有关秸秆残体施用后接种蚯蚓对土壤 N_2O 排放影响的机理尚需进一步深入研究, 碳氮同位素分析, 分子生物学技术和图像分析技术等的应用将有助于蚯蚓生态功能的研究^[28], 增加对蚯蚓生态型与土壤微生物群落之间的关系的了解。

References:

- [1] IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change 2007, Cambridge University Press, 2007.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Luo T X, Li H X, Wang T, Hu F. Influence of nematodes and earthworms on the emissions of soil trace gases (CO_2 , N_2O). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 993-999.
- [5] Giannopoulos G, Pullemana M M, van Groenigen J W. Interactions between residue placement and earthworm ecological strategy affect aggregate turnover and N_2O dynamics in agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(4): 618-625.
- [6] Rizhiya E, Bertora C, van Vliet P C J, Kuikman P J, Faber J H, van Groenigen J W. Earthworm activity as a determinant for N_2O emission from crop residue. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(8): 2058-2069.
- [7] Sperattia A B, Whalen J K. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil as influenced by anecic and endogeic earthworms. *Applied Soil Ecology*, 2008, 38(1): 27-33.
- [8] Giannopoulos G, van Groenigen J W, Pulleman M M. Earthworm-induced N_2O emissions in a sandy soil with surface-applied crop residues, *Pedobiologia*, 2011(Supplement), 54: 103-111.
- [9] Gao B, Fu S L, Zhang W X, Liu S P, Zhou C Y. Short-term Effects of Earthworm and *Evodia leptia* on Soil N_2O and CH_4 Fluxes in a Subtropical Plantation. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2010, 18(4): 364-371.
- [10] Bertora C, van Vliet P C J, Hummelink E W J, van Groenigen J W. Do earthworms increase N_2O emissions in ploughed grassland? *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 632-640.
- [11] Chapuis-Lardy L, Brauman A, Bernard L, Pablo A L, Toucet J, Mano M J, Weber L, Brunet D, Razafimbelo T, Chotte J L, Blanchart E. 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). *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 201-208.
- [12] Lubbers I M, Brussaard L, Otten W, Van Groenigen J W. Earthworm-induced N mineralization in fertilized grassland increases both N_2O emission and crop-N uptake. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62(1): 152-161.
- [13] Lavelle P, Spain V A. *Soil Ecology*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [14] Paul B K, Lubbers I M, van Groenigen J W. Residue incorporation depth is a controlling factor of earthworm-induced nitrous oxide emissions. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 1141-1151.
- [15] Cao Z P, Qiao Y H, Wang B Q, Chu Q. Impact of soil fertility maintaining practice on earthworm population in high production agro-ecosystem in North China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2302-2306.
- [16] Yu J G, Li H X, Chen X Y, Hu F. effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4): 818-824.
- [17] Zhen X H, Wang M X, Wang Y S, Shen R X, Gong Y B, Luo D M, Zhang W, Jin J S, Li L T. Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3): 273-279.
- [18] 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(2): 142-148.
- [19] Parkin T B, Berry E C. Microbial nitrogen transformations in earthworm burrows. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(13): 1765-1771.
- [20] Devliegher W, Verstraete W. The effect of *Lumbricus terrestris* on soil in relation to plant growth: effects of nutrient-enrichment processes (NEP) and gut-associated processes (GAP). *Soil Biology and Biochemistry*, 1997, 29(3/4): 341-346.
- [21] Drake H L, Horn M A. As the Worm Turns: The Earthworm Gut as a Transient Habitat for Soil Microbial Biomes. *Annual Review of Microbiology*, 2007, 61: 169-189.

- [22] Edwards C A, Bohlen P J. Biology and Ecology of Earthworms, 3rd edn. London: Chapman and Hall, 1996.
- [23] Fonte S J, Kong A Y Y, van Kessel C, Hendrix P F, Six J. Influence of earthworm activity on aggregate-associated carbon and nitrogen dynamics differs with agroecosystem management. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 1014-1022.
- [24] Li H X, Hu F, Shen Q R, Chen X Y, Cang L, Wang X. Effect of earthworm inoculation on soil carbon and nitrogen dynamics and on crop yield with application of corn residues. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1637-1641.
- [25] Malhi S S, Lemke R. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 269-283.
- [26] Sheehan C, Kirwan L, Connolly J, Bolger T. The effects of earthworm functional group diversity on nitrogen dynamics in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2629-2636.
- [27] Wang X, Hu F, Li H X, Shen Q R. Effects of earthworm on soil C, N on upland-rice soil under different manipulations of corn straw. *Ecology and Environment*, 2003, 12(4): 462-466.
- [28] James P C, Olaf S. The feeding ecology of earthworms — a review. *Pedobiologia*, 2007, 50(6): 463-477.

参考文献:

- [2] 韩兴国, 王智平. 土壤生物多样性与微量气体(CO_2 , CH_4 , N_2O)代谢. *生物多样性*, 2003, 11(4): 322-332.
- [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. *生态学报*, 2008, 28(3): 993-999.
- [9] 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. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(4): 364-371.
- [15] 曹志平, 乔玉辉, 王宝清, 徐芹. 不同土壤培肥措施对华北高产农田生态系统蚯蚓种群的影响. *生态学报*, 2004, 24(10): 2302-2306.
- [16] 于建光, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 818-824.
- [17] 郑循华, 王明星, 王跃思, 沈壬兴, 龚宴邦, 骆冬梅, 张文, 金继生, 李老土. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响. *应用生态学报*, 1996, 7(3): 273-279.
- [24] 李辉信, 胡锋, 沈其荣, 陈小云, 仓龙, 王霞. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1637-1641.
- [27] 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. *生态环境*, 2003, 12(4): 462-466.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.23 Dec., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Ozone uptake at the canopy level in *Robinia pseudoacacia* in Beijing based on sap flow measurements WANG Hua, OUYANG Zhiyun, REN Yufen, et al (7323)
- Genetic impact of swimming crab *Portunus trituberculatus* farming on wild genetic resources in Haizhou Bay DONG Zhiguo, LI Xiaoying, ZHANG Qingqi, et al (7332)
- The effect of soil salinity to improve the drought tolerance of arrowleaf saltbush TAN Yongqin, BAI Xinfu, HOU Yuping, et al (7340)
- Effects of *Liriomyza huidobrensis* infestation on the activities of four defensive enzymes in the leaves of cucumber plants SUN Xinghua, ZHOU Xiaorong, PANG Baoping, et al (7348)

Autecology & Fundamentals

- Early effects of simulated nitrogen deposition on annual nutrient input from litterfall in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (7355)
- Relationship between nutrient characteristics and yields of tumorous stem mustard at different growth stage ZHAO Huan, LI Huihe, LÜ Huifeng, et al (7364)
- Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands HUANG Zhangting, ZHANG Yan, SONG Zhaoliang, et al (7373)
- Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape ZHANG Shujie, LIAO Xing, HU Xiaojia, et al (7382)
- The crude protein content of main food plants of François' langur (*Trachypithecus francoisi*) in Fusui, Guangxi, China LI Youbang, DING Ping, HUANG Chengming, et al (7390)
- Effects of nitrogen on photosynthetic characteristics and enzyme activity of nitrogen metabolism in maize under-mulch-drip irrigation GU Yan, HU Wenhe, XU Baijun, et al (7399)
- Ecotoxicological effects of exposure to PFOS on embryo and larva of zebrafish *Danio rerio* XIA Jigang, NIU Cuijuan, SUN Luyin (7408)
- Allelopathic effects of extracts from *Ulva prolifera* powders on the growth of *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* HAN Xiurong, GAO Song, HOU Junni, et al (7417)
- Predation evaluation of *Diaphorina citri*'s (Homoptera: Chermidae) natural enemies using the CO I marker gene MENG Xiang, OUYANG Gecheng, XIA Yulu, et al (7430)
- Effect of volatiles from healthy or worm bored Korean pine on host selective behavior of *Dioryctria sylvestrella* and its parasitoid *Macrocentrus* sp. WANG Qi, YAN Shanchun, YAN Junxin, et al (7437)

Population, Community and Ecosystem

- Relationship between rhizosphere microbial community functional diversity and faba bean fusarium wilt occurrence in wheat and faba bean intercropping system DONG Yan, DONG Kun, TANG Li, et al (7445)
- Characteristics of soil fertility in different ecosystems in depressions between karst hills YU Yang, DU Hu, SONG Tongqing, et al (7455)
- Evaluation on carbon sequestration effects of artificial alfalfa pastures in the Loess Plateau area LI Wenjing, WANG Zhen, HAN Qingfang, et al (7467)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-huai-hai Region LI Yibing, PANG Huancheng, YANG Xue, et al (7478)

- Effects of landscape patterns on runoff and sediment export from typical agroforestry watersheds in the Three Gorges Reservoir area, China HUANG Zhilin, TIAN Yaowu, XIAO Wenfa, et al (7487)
- Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM+ remote sensing data XIAO Jincheng, OU Weixin, FU Haiyue (7496)
- Early responses of soil CH₄ uptake to increased atmospheric nitrogen deposition in a cold-temperate coniferous forest GAO Wenlong, CHENG Shulan, FANG Huajun, et al (7505)
- Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem JIA Bingrui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (7516)
- Seasonal and interannual variability in soil respiration in wheat field of the Loess Plateau, China ZHOU Xiaoping, WANG Xiaoke, ZHANG Hongxing, et al (7525)
- Dynamics of atmospheric ammonia concentrations near different emission sources LIU Jieyun, KUANG Fuhong, TANG Aohan, et al (7537)
- Influence of residues and earthworms application on N₂O emissions of winter wheat ... LUO Tianxiang, HU Feng, LI Huixin (7545)
- Resource and Industrial Ecology**
- Ecological monitoring of the fish resources catching and stocking in Lake Tianmu basing on the hydroacoustic method SUN Mingbo, GU Xiaohong, ZENG Qingfei, et al (7553)
- Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake ZHANG Chengcheng, SHEN Aichun, ZHANG Xiaoqing, et al (7563)
- Research Notes**
- Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China XU Wangming, YAN Wende, LI Jiebing, et al (7570)
- Allelopathic effects of artemisinin on seed germination and seedling growth of vegetables BAI Zhen, HUANG Yue, HUANG Jianguo (7576)
- Nitric oxide participates symbiosis between am fungi and tobacco plants WANG Wei, ZHAO Fanggui, HOU Lixia, et al (7583)
- Mapping wildlife habitat suitability using kernel density estimation ZHANG Guiming, ZHU A'xing, YANG Shengtian, et al (7590)
- Effects of nitrogen fertilizer methods on the content of *Bacillus thuringiensis* insecticidal protein and yield of transgenic cotton MA Zongbin, LIU Guizhen, YAN Gentu, et al (7601)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王德利

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 23 期 (2013 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 23 (December, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元