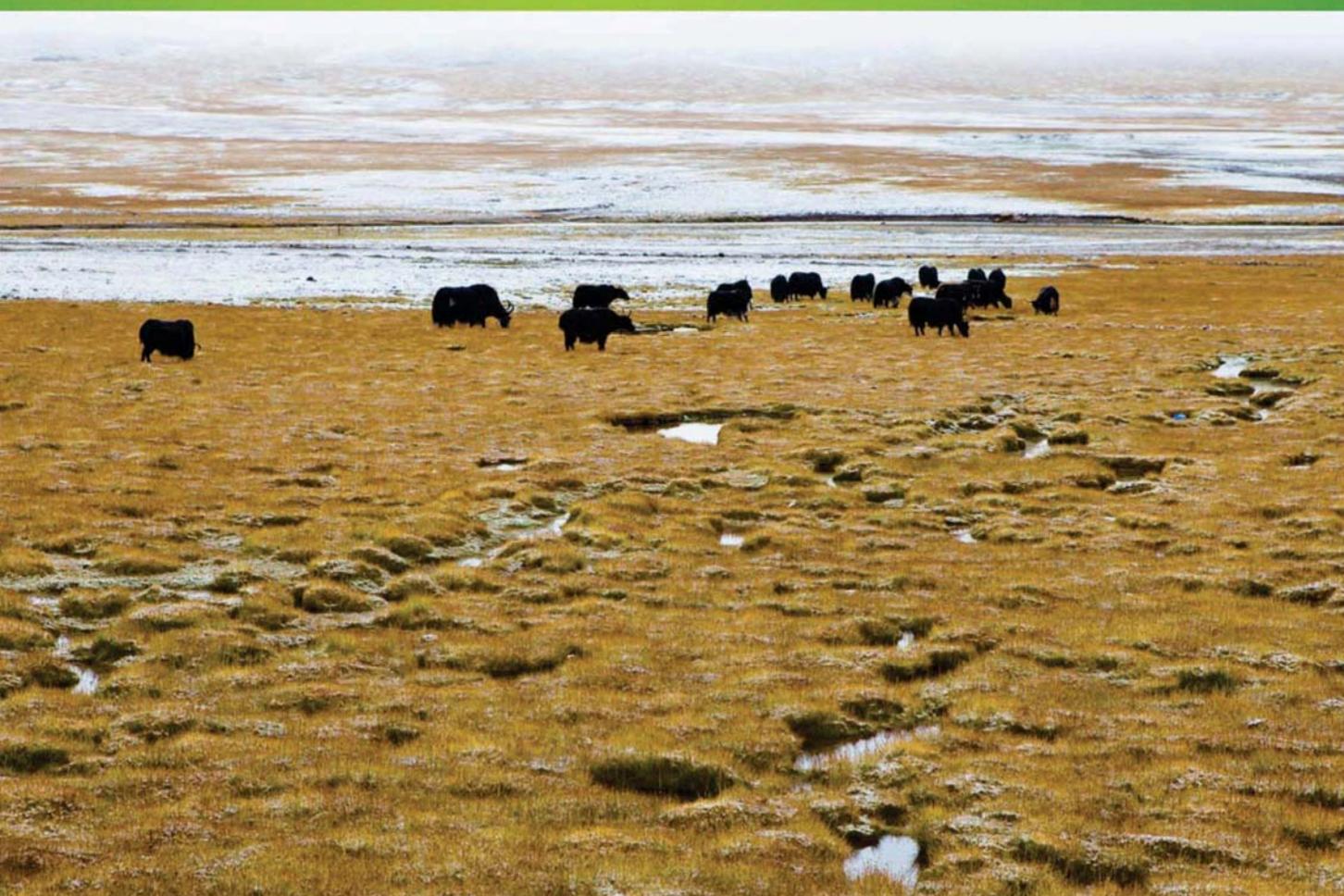


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **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 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N₂O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 刘耕源,杨志峰,陈彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 张锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例 敖长林,陈瑾婷,焦扬,等 (5109)

研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆璞,张伟,华彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-08



封面图说: 高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4200m,是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地,也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来,国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示,近年来,三江源湖泊湿地面积逐步扩大,植被覆盖度得到提高,三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

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/stxb201301240151

张蛟蛟, 李永夫, 姜培坤, 周国模, 童雪峰, 周高峰. 施肥对板栗林地土壤 N₂O 通量动态变化的影响. 生态学报, 2013, 33(16): 4939-4948.

Zhang J J, Li Y F, Jiang P K, Zhou G M, Tong X F, Zhou G F. Effect of fertilization on the dynamic of soil N₂O fluxes in Chinese chestnut stands. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4939-4948.

施肥对板栗林地土壤 N₂O 通量动态变化的影响

张蛟蛟¹, 李永夫^{1,*}, 姜培坤¹, 周国模¹, 童雪峰², 周高峰³

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 临安 311300;

2. 临安市板桥镇林业工作站, 临安 311300; 3. 临安市岛石镇林业工作站, 临安 311300)

摘要: 2011 年 6 月—2012 年 6 月期间, 在浙江省临安市典型板栗林地进行施肥对土壤 N₂O 通量变化影响的试验研究。目的在于探明不同施肥处理下板栗林地土壤 N₂O 通量的动态变化规律, 并探讨土壤 N₂O 通量和土壤环境因子之间的关系。试验设置 4 个处理: 对照 (不施肥)、无机肥、有机肥、有机无机复合肥。采用静态箱-气相色谱法测定了板栗林地土壤 N₂O 通量, 并测定了土壤温度、水分、水溶性有机碳 (WSOC) 和微生物量碳 (MBC) 含量。结果表明: 板栗林土壤 N₂O 通量呈显著季节性变化, 最大值出现在夏季, 最小值出现在冬季; 而且, 施肥处理显著提高土壤 N₂O 年均通量和年累积量; 在整个试验期间, 无机肥、有机肥和有机无机复合肥处理下土壤 N₂O 的排放系数分别达到 0.96%、1.45% 和 1.29%。此外, 施肥也显著增加了土壤 WSOC 和 MBC 的含量 ($P < 0.05$)。不同施肥处理条件下, 土壤 N₂O 通量与土壤 5 cm 处温度、WSOC 含量间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 但与 MBC 含量之间的相关性不显著。土壤 N₂O 排放与土壤含水量间除对照处理外均没有显著相关性。综上所述, 施肥引起土壤 WSOC 含量的增加可能是施肥增加板栗林地土壤 N₂O 排放速率的主要原因之一。

关键词: N₂O 通量; 施肥; 水溶性有机碳; 微生物量碳

Effect of fertilization on the dynamic of soil N₂O fluxes in Chinese chestnut stands

ZHANG Jiaojiao¹, LI Yongfu^{1,*}, JIANG Peikun¹, ZHOU Guomo¹, TONG Xuefeng², ZHOU Gaofeng³

1 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, China

2 Banqiao Town Forestry Workstation of Lin'an City Lin'an 311300, China

3 Daoshi Town Forestry Workstation of Lin'an City Lin'an 311300, China

Abstract: Response of soil N₂O emissions to inorganic fertilizer and organic fertilizer in the typical *Castanea mollissima* was studied from June 2011 to June 2012 in Lin'an, Zhejiang Province. The objectives were to evaluate the response of the soil N₂O efflux to different fertilization and explore the relationships between the various environmental factors and N₂O efflux. Four treatments were applied in this study: Control (CK), inorganic fertilizer (IF), organic fertilizer (OF), and half organic plus half inorganic fertilizer (OIF). Soil N₂O emission were analyzed by static closed chamber-GC technique. Soil temperature, soil moisture, WSOC and MBC concentrations were determined as well. Our results showed that soil N₂O emission exhibited a strong seasonal pattern, the highest rates observed in summer season and the lowest in winter season. The mean annual soil N₂O flux and soil N₂O annual accumulative in IF were significantly higher than that in CK, but lower than that in OF and OIF treatments ($P < 0.05$). Soil N₂O emission factors of IF, OF, and OIF treatment were 0.96%, 1.45%, and 1.29%, respectively. Fertilization treatments significantly increased soil water-soluble organic carbon and microbial biomass carbon concentrations ($P < 0.05$). Soil N₂O emission rates had a significant positive correlation with soil

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31170576); 国家“973”重点基础研究发展规划项目基金 (2011CB302705); 浙江省科技厅重点项目 (2011C12019); 浙江省重点科技创新团队 (2010R50030)

收稿日期: 2013-01-24; 修订日期: 2013-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yongfuli@zafu.edu.cn

temperature at 5 cm depth and WSOC concentration ($P < 0.01$), but had no significant correlation with soil MBC concentration in all treatments. However, soil N_2O emission did not correlate with soil moisture except in CK treatment. In conclusion, the increase of WSOC caused by fertilization was probably one of the important reasons for the increase in N_2O emission in the soil of Chinese chestnut stands induced by fertilization.

Key Words: fertilization; N_2O efflux; water-soluble organic carbon (WSOC); microbial biomass carbon (MBC)

N_2O 是仅次于 CO_2 和 CH_4 的一种重要的温室气体,在大气中以痕量存在但十分稳定,且在百年尺度单位质量的全球增温潜势(GWP)是 CO_2 的 298 倍左右^[1]。大气中 N_2O 可以参与多种光化学反应,破坏大气臭氧层,进而引起全球气候变暖^[2-3]。土壤通过硝化和反硝化过程向大气中排放 N_2O 是全球 N 循环中最重要的生物过程,现今已受到国内外的广泛关注^[1,3]。然而,土壤 N_2O 排放受到施肥、土地利用方式和生态系统类型等多种因素的影响^[4-8]。例如,Liu 等^[3]报道,土壤 N_2O 排放变化规律很大程度可以通过土壤底物(如 DOC、TSN 和 MBC 等)的有效性和土壤环境因子(如土壤温度、土壤水分和 pH 等)的变化来解释。

以往的不少研究者对不同生态系统的研究发现,施肥可通过改变土壤底物和土壤环境因子来控制影响土壤硝化作用和反硝化作用过程,进而影响土壤 N_2O 排放^[6,9-10]。然而,在各生态系统中施肥对土壤 N_2O 的影响至今还没有统一的结论。在农田生态系统中,郑燕等^[11]研究发现,施氮肥可以显著增加水稻土的 N_2O 释放量;Wang 等^[12]和 Lin^[10]等分别在蔬菜地和油菜地中也发现,N 肥施用显著增加了 N_2O 排放,并且随着 N 肥施用量的增加而增加;但罗良国等^[13]在稻田中的研究却发现,施肥对土壤 N_2O 排放没有显著性差异。在草地生态系统中,Sawamoto 等^[14]的研究发现,粪肥和化肥处理对土壤 N_2O 排放显著增加;而 Mori 等^[15]在草地中的研究表明,施肥后第 1 年和第 2 年有机肥显著高于化肥处理下土壤 N_2O 排放,但第 4 年和第 5 年却发现有机肥处理显著低于化肥处理。在森林生态系统中,Zhang 等^[16]在鼎湖山地区的研究表明:常绿阔叶林中 N 增加后土壤 N_2O 排放显著提高(与 CK 相比, LN($50\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)、MN($100\text{ N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)和 HN($150\text{ N}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)分别增加了 38%、41% 和 58%);松树林中 N 增加后土壤 N_2O 排放在 MN 下显著增加(35%),而在 LN 下没有显著增加;松树和常绿阔叶混交林中 N 增加对 N_2O 排放均没有显著影响。然而,Jassal 等^[9]在大西洋地区研究化肥对杉木林地 N_2O 排放规律影响中发现,施肥后第 1 年土壤 N_2O 排放增加,第 2 年施肥与不施肥林地没有显著差异,且土壤均没有明显的 N_2O 排放甚至有少量吸收。因此,如何准确评价施肥对土壤 N_2O 的影响机理作用还比较困难,具有很大的不确定性,而且前人在中国亚热带地区人工林中研究还比较少,特别是施肥对中国亚热带板栗林地土壤 N_2O 排放的研究国内外还没见到相关报道。

板栗(*Castanea mollissima*)是中国重要的经济林种之一,分布广泛遍及全国 26 个省市,目前仅浙江省板栗林面积就达到 7.80 万 hm^2 , 占全省经济林面积的 9.0%。随着产业化结构调整,板栗林普遍采用集约化经营模式,化肥施用不断增加投入尤为突出^[17],而施肥将对板栗林土壤 N_2O 排放产生何种影响至今还尚不明确。鉴于此,在浙江临安集约化经营板栗林地设置了 4 种不同施肥处理,利用静态箱-气相色谱法进行全年土壤 N_2O 通量的测定,同时测定了不同处理下土壤环境因子的变化规律。旨在探明板栗林土壤 N_2O 排放的动态变化规律及其对不同施肥处理的响应规律,探讨施肥引起的土壤环境因子变化与土壤 N_2O 排放变化规律的相互关系;研究结果将为深入评价和科学估算亚热带地区森林生态系统温室气体研究提供基础资料与科学依据。

1 研究区概况

试验区位于浙江省临安市青山湖镇($119^\circ 86' \text{ E}, 30^\circ 25' \text{ N}$)。该地区为典型的亚热带季风气候,年平均温度 16.4°C , 年均降雨量为 1629 mm, 年有效积温为 5774°C , 年日照时数为 1774 h, 地形为低山丘陵区,海拔为 150—250 m, 土壤类型为红壤土类(黄红壤亚类)。试验进行期间月累积降雨量和月平均温度如图 1 所示。试验样地是由常绿阔叶林改造而来的板栗林地,林龄为 18 a, 种植密度 $540\text{ 株}/\text{hm}^2$, 采用中等强度的集约经营

模式。每年5月下旬左右对板栗林进行施肥,然后再作翻耕处理。2011年3月,通过野外调研,选择典型的板栗林样地,并在5月采集样地土壤进行基本理化性质测定。具体测定方法参照鲁如坤^[18],结果如下:pH值和容重分别为4.64和1.14 g/cm³,有机质和全氮含量分别为25.7和1.84 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为98.32、9.86和101.2 mg/kg。

2 研究方法

2.1 试验设计

2011年5月,在板栗林地选择土壤类型、坡度(20°左右)与坡向等基本一致的区域作为试验样地。本试验共设4个处理:(1)对照(不施肥,CK);(2)无机肥(IF);(3)有机肥(OF);(4)有机肥无机复合肥(1/2无机肥和1/2有机肥)(IOF)。肥料处理具体内容如表1所示。试验中所使用的有机肥为商品有机肥(N:3%;P₂O₅:1.8%;K₂O:2.6%;C:35.1%),无机肥分别为尿素(46.5%N)、过磷酸钙(12%P₂O₅)、氯化钾(60%K₂O)。各施肥处理,肥料用量均以等氮量(87 kg N/hm²)计算,有机肥处理中,磷钾肥不足部分用化学肥料过磷酸钙和氯化钾进行补充。试验小区面积为256 m²(16 m × 16 m),4次重复。按照相同坡位设置不同处理,采用随机区组设计,目的是用区组来控制由于不同处理小区之间土壤本底值的差异对处理效应的影响。每个试验小区间隔距离为3 m。6月3日进行撒施施肥,并翻耕入土,同时进行静态箱的布置(每个小区布置1个静态箱)。试验采样在2011年6月到2012年6月进行,施肥后的第1个月采样2次,接下来每个月采样1次。

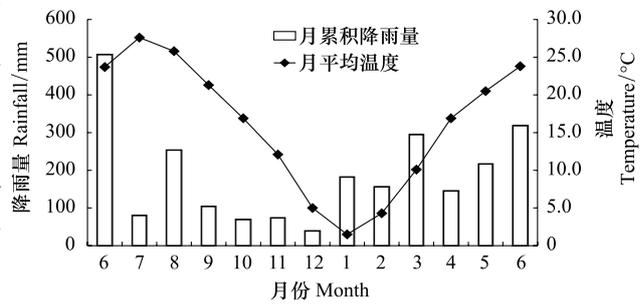


图1 试验期间月累积降雨量和月平均温度

Fig. 1 Monthly cumulative rainfall and mean air temperature during the experimental period

表1 试验各处理肥料用量

Table 1 The amount and composition of different fertilizer treatments

处理 Treatment	有机肥 Organic fertilizer	尿素 Urea	过磷酸钙 Calcium superphosphate	氯化钾 Potassium chloride
对照 CK	0	0	0	0
无机肥 IF/(kg/hm ²)	0	188	488	135
有机肥 OF/(kg/hm ²)	2906	0	52	9
有机无机复合肥 OIF/(kg/hm ²)	1453	94	270	72

2.2 气体采样及测定方法

利用静态箱-气相色谱法对N₂O通量进行测定。采样箱为组合式,即由顶箱和底座两部分构成,制作材料均为PVC板。静态箱的规格尺寸为30 cm × 30 cm × 30 cm。采样气袋采用大连光明化工设计研究院生产的铝箔采气袋。每次采样时间均安排在9:00—11:00之间^[7]。采样前一天,利用充气法检查气袋密封性,选择气密性好的带去样地进行采样。采样时,将顶箱插入底座凹槽中,在底座凹槽中倒入适量的蒸馏水(2—3 cm左右),接着盖上顶箱,蒸馏水起到密封作用。然后,用60 mL注射器分别于0、10、20、30 min进行取样。在气体取样的同时,测定土壤5 cm温度及大气温度,并在每个试验小区按照五点取样法采集0—20 cm土壤样品。将样品带回实验室,气样利用岛津GC-2014气相色谱仪进行N₂O浓度测定^[19]。土壤含水量用烘干法进行测定。土壤WSOC含量的测定方法参照Wu等^[20]方法提取,然后用有机碳分析仪(TOC-V_{CPH},岛津公司)测定滤液中的有机碳含量。土壤微生物量碳参照Vance等^[21]用氯仿熏蒸法-0.5 mol/L K₂SO₄提取法提取进行测定。

2.3 数据计算

(1)土壤N₂O通量的计算公式为^[22]:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{d_t} \quad (1)$$

式中, F 为被测气体的排放通量 ($\mu\text{g N}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下被测气体的浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); A 为箱体底面积 (m^2); V 为箱体体积 (m^3); $\frac{dC_t}{d_t}$ 为单位时间取样箱内被测气体浓度的变化量 (h^{-1}); T_0 和 P_0 分别为标准状态下的空气绝对温度 ($^\circ\text{C}$) 和气压 (Pa); P 和 T 为取样时箱内的实际气压 (Pa) 和气温 ($^\circ\text{C}$)。土壤 N_2O 排放量用插空法进行计算^[7]。

(2) N_2O 排放系数 (f), 即肥料中的氮素以 N_2O 气体形式损失百分比, 计算公式^[23] 如下:

$$F = (T - T_0) \times (28/44) / M \times 100\% \quad (2)$$

式中, T 为施肥处理试验观察期间 N_2O 的累积排放量, kg/hm^2 ; T_0 为空白处理生长季内 N_2O 的累积排放量, kg/hm^2 ; $28/44$ 为 N_2O 中氮素的比例; M 为试验观察期间总施氮量, kg/hm^2 。

(3) 施加氮肥对 N_2O 排放的贡献率 (F_c), 即由于施肥引起的土壤 N_2O 排放量占施肥处理下 N_2O 排放量的百分比^[6], 计算公式如下:

$$F_c = (\text{N}_2\text{O}_{\text{treatment}} - \text{N}_2\text{O}_{\text{control}}) / \text{N}_2\text{O}_{\text{treatment}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\text{N}_2\text{O}-\text{N}_{\text{treatment}}$ 表示施肥处理下土壤 N_2O 的年排放量 ($\text{kg N}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), $\text{N}_2\text{O}_{\text{control}}$ 表示不施肥处理下土壤 N_2O 的年排放量 ($\text{kg N}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

2.4 数据处理

本文中所有数据处理均是利用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件上进行数据分析, 图表所用数据均是 4 次重复的平均值, 如土壤 5cm 温度、土壤水分、土壤 N_2O 通量、WSOC 含量和 MBC 含量。数据分析采取随机区组单因素方差分析 (One-way ANOVA), 利用新复极差法 (DMRT) 在 $P < 0.05$ 显著性水平下分析不同处理间的差异性。用一元线性回归分析法分析土壤 N_2O 排放通量和土壤温度、土壤水分、WSOC 与 MBC 之间的相关性。

3 结果与分析

3.1 不同施肥处理下土壤温度和土壤含水量的动态变化特征

由图 2 和图 1 可见, 在试验研究期间, 4 种不同处理条件下, 土壤温度与大气月平均温度都具有相似的季节性变化规律, 均表现为 6—8 月温度较高, 12—2 月温度最低; 同时, 不同施肥处理间土壤温度没有明显的差异性。如图 2 所示, 在试验研究期间, 5 种不同处理条件下, 土壤含水量变化均呈一定的季节性规律。结合图 2 和图 1 可知, 与对照处理相比, 3 种施肥处理下土壤含水量显著增加 ($P < 0.05$), 但施肥处理间没有明显差异。同时, 对照和有机肥处理下土壤含水量与月平均降雨量之间呈现显著的线性正相关 ($P < 0.05$), 而添加无机肥处理下两者之间没有相关性。

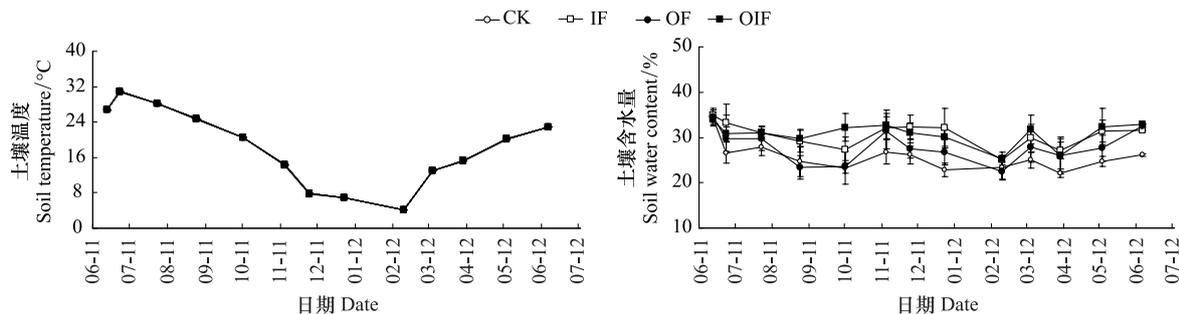


图 2 板栗林土壤温度 (5 cm) 及土壤含水量的年动态变化

Fig. 2 Season variation in soil temperature at 5 cm depth and soil moisture content of the 0—20 cm depth in Chinese chestnut stands

误差线表示标准差 ($n = 4$)

3.2 不同施肥处理下土壤 WSOC 和 MBC 含量的动态变化特征

从图 3 可见,土壤 WSOC 含量呈现出明显的季节性特征,基本表现为 7—8 月含量较高,而 2—3 月含量较低。同时,CK、IF、OF 和 OIF 处理下土壤 WSOC 含量的变化幅度分别为 62.02—96.13、84.47—147.88、109.76—173.04 和 96.73—157.03 mg/kg。结合图 3 和表 2 可知,施肥虽然没有明显改变 WSOC 的季节性变化,但施肥显著增加了土壤 WSOC 的含量($P < 0.05$),表现为:IF、OF 和 OIF 处理下土壤 WSOC 年平均含量分别比 CK 处理增加了 37%、74% 和 58%。

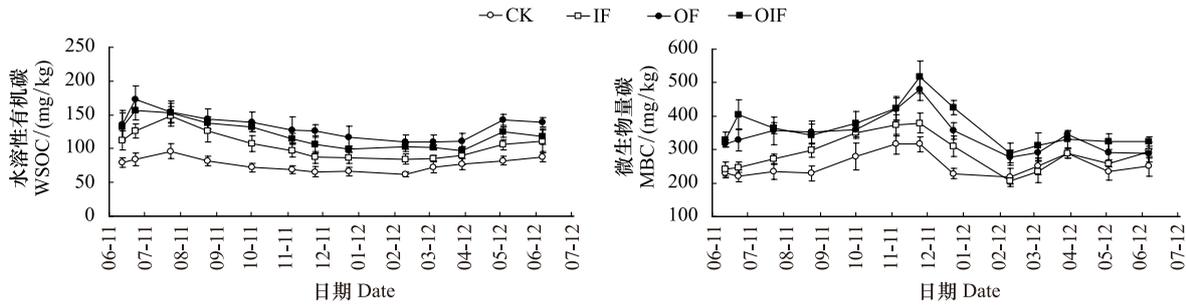


图 3 板栗林土壤 WSOC 和 MBC 含量的季节变化规律

Fig.3 Seasonal variations in soil WSOC and MBC concentrations in Chinese chestnut stands

WSOC: Water-soluble organic carbon; MBC: Microbial biomass carbon

表 2 不同施肥处理下土壤年平均 N₂O 通量、年累积量、WSOC 和 MBC 含量的差异性

处理 Treatment	N ₂ O 通量 N ₂ O fluxes		WSOC /(mg/kg)	MBC /(mg/kg)
	年平均通量	累积量		
	Mean annual flux /($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	Cumulative /($\text{kg N}_2\text{O}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)		
CK	24.99c	1.91a	76.58d	253.42d
IF	41.96b	3.23b	105.08c	288.64c
OF	47.31a	3.90a	133.01a	343.34b
OIF	46.54a	3.68a	121.17b	366.36a

同一列数据带不同字母表示新复极差法多重比较差异显著($P < 0.05$)

如图 3 所示,施肥处理没有改变土壤 MBC 变化的整体趋势,各处理均呈现出一定的季节性变化,基本上峰值出现在 11—12 月,最小值出现在 2 月份。CK、IF、OF 和 OIF 处理下土壤 MBC 含量最小值分别为 217.13、206.68、275.76 和 289.00 mg/kg;最大值为 316.73、379.41、480.04 和 516.76 mg/kg。从表 2 中可知,与 CK 处理(MBC 年平均值为 253.42 mg/kg)相比,IF、OF 和 OIF 处理分别增加了 14%、35% 和 45%。

3.3 不同施肥处理对土壤 N₂O 通量变化的影响

如图 4 所示,板栗林土壤 N₂O 通量呈现出明显的季节性变化特征,表现为最大值出现在 6—8 月,最小值在 12—2 月。CK、IF、OF 和 OIF 处理下,土壤 N₂O 通量范围分别为 6.43—48.68、13.26—90.94、15.38—89.75 和 15.40—89.86 $\mu\text{g N}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。结合表 2 和图 4 可知,施肥显著增加了土壤 N₂O 年平均通量和年累积量($P < 0.05$),具体表现为:与 CK 处理相比,IF、OF 和 OIF 处理下,土壤 N₂O 年平均通量分别增加了 68%、89% 和 86%,而 N₂O 累积量分别增加了 69%、104% 和 93%。同时,施肥对土壤 N₂O 累积量的贡献率表现为 IF 处理(41%)明显低于 OF 处理(51%)和 OIF 处理

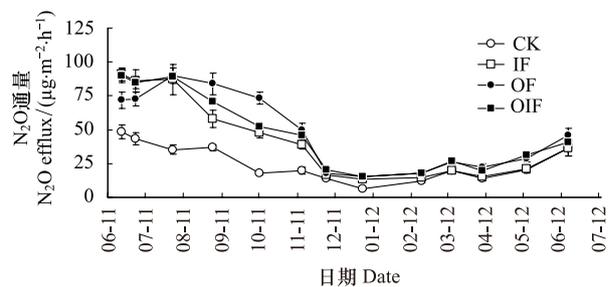


图 4 不同施肥处理对板栗林地土壤 N₂O 通量季节变化特征的影响

Fig.4 Effect of different fertilizer treatments on seasonal variation of soil N₂O efflux in Chinese chestnut stands

(48%),且 OF 和 OIF 处理间没有明显的差异。此外,整个试验观察期间,IF、OF 和 OIF 处理下,板栗林土壤 N_2O 排放系数分别为 0.96%、1.45% 和 1.29% (表 1 和表 2)。

3.4 土壤 N_2O 通量与土壤环境因子的相关性

从表 3 中可知,不同施肥处理条件下,土壤 N_2O 通量与土壤 5 cm 温度、WSOC 含量之间均有强烈的显著正相关性($P < 0.01$),而与 MBC 含量之间没有显著的相关性。在 CK 处理下,土壤 N_2O 通量与土壤含水量之间呈现极显著正相关($P < 0.01$),而施肥处理下均没有相关性。

表 3 土壤 5cm 温度、土壤含水量、WSOC 和 MBC 含量与土壤 N_2O 通量的相关性

Table 3 Correlation between soil N_2O fluxes and soil temperature at 5cm depth, soil moisture, WSOC and MBC concentrations

处理 Treatment	土壤温度 Soil temperature (R^2)	土壤水分 Soil moisture (R^2)	WSOC (R^2)	MBC (R^2)
CK	0.78 **	0.56 **	0.53 **	0.16 ^{NS}
IF	0.75 **	0.21 ^{NS}	0.73 **	0.03 ^{NS}
OF	0.74 **	0.05 ^{NS}	0.59 **	0.00 ^{NS}
OIF	0.79 **	0.19 ^{NS}	0.83 **	0.00 ^{NS}

* * 表示相关性极显著水平($P < 0.01$);NS:表示相关性不显著($P > 0.05$)

4 讨论

4.1 板栗林地土壤 N_2O 排放特征

本试验研究中,板栗林土壤表现为 N_2O 净排放源,这与前人在森林生态系统中的研究结果一致^[24-28]。由表 2 可知,试验研究期间,板栗林土壤 N_2O 年排放量($1.91-3.68 \text{ kg } N_2O \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)显著高于 Matson 等^[28]人在寒带森林中的土壤 N_2O 年排放量($0.50-1.30 \text{ kg } N_2O \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),但低于热带雨林^[24]和南亚热带^[25]森林土壤 N_2O 年排放量(分别为 $4.24-5.81$ 和 $5.03 \text{ kg } N_2O \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。这说明土壤不同纬度森林土壤 N_2O 的年排放量具有明显的差异性,并且随着纬度增加呈现逐渐降低的趋势,这主要是由于不同纬度气候气温和降雨量分布的差异性造成的^[29]。与亚热带地区其他研究报道相比,本研究中板栗林土壤 N_2O 排放量和苏王娟等^[26]在湖南地区的研究结果相似,但低于 Liu 等^[5]在浙江临安地区高度集约化毛竹林(氮肥施入量为 $209 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)土壤 N_2O 排放量($15.80 \text{ kg } N_2O \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。这说明即使同纬度条件下,施肥量、植被类型、土壤属性及测定方法和估算方法的差异均会对土壤 N_2O 排放量造成显著影响。

本研究中,板栗林土壤 N_2O 排放表现为夏季最高,春秋次之,冬季最低(图 4),这与前人的结果相似^[5, 7, 10]。这可能是土壤温度和 WSOC 浓度的季节性变化引起的(图 2 和图 3)。夏季高温多雨,一方面,微生物活动有了适宜的生长环境,微生物活性增强,特别是硝化细菌和反硝化细菌,硝化和反硝化作用加快最终导致 N_2O 排放增加^[5, 10];另一方面,土壤中有有机氮矿化速度快,土壤中无机氮增加,为硝化和反硝化反应提供了充足的底物,影响土壤 N_2O 的排放^[10]。相反,冬季低温少雨,硝化和反硝化细菌活性下降,进而造成土壤 N_2O 排放速率减弱^[10]。

4.2 不同施肥处理下土壤环境因子对土壤 N_2O 排放的影响

施肥可以引起土壤环境和生物因子的变化如土壤温度、土壤水分、WSOC 和 MBC 等^[9-10],而这些因子改变都会影响土壤微生物活性,进而影响硝化作用和反硝化作用,最终影响土壤 N_2O 的排放^[3, 7]。本研究表明,不同施肥处理下土壤温度没有显著差异(图 1),且土壤 N_2O 排放随温度的升高而升高(表 3),这与前人^[4-5, 30]的研究结果一致。这主要是因为温度高导致微生物活性增强,特别是硝化和反硝化菌,进而促进 N_2O 排放。但 Lin 等^[10]和纪洋等^[31]分别在施氮肥经营措施下的油菜地和水稻田中研究却发现,土壤温度对 N_2O 排放没有明显的影响。Tang 等^[25]在华南地区 3 种森林生态系统也发现土壤温度与土壤 N_2O 排放之间没有显著相关性的结果。而 Mahmood 等^[32]在亚热带地区棉田的研究中发现,当温度较高时($22-38^\circ\text{C}$),随着温度的升高土壤 N_2O 排放速率显著降低。造成这些结果的差异可能是由于农耕措施(如施肥,耕作,灌溉

等),观测时间、土壤特性,土壤水分,植被类型不同改变了土壤温度对土壤 N₂O 的影响规律。

土壤水分可以影响土壤的通气性和营养的有效性,进而影响硝化和反硝化过程^[7,30]。Lin 等^[7]在中国中亚热带地区的研究报道,在林地和山地中土壤水分与 N₂O 排放显著相关,而在施肥较多的稻田和果园中两者却没有显著的相关性。在本研究中也类似的结论,土壤水分和 N₂O 排放只在不施肥处理下具有显著的相关性(表 3)。这一现象最可能原因是施肥改变了板栗林地林下植被的生长状况,从而引起了土壤水分的改变(图 1),进而改变了板栗林地土壤水分对土壤 N₂O 排放的影响;或者说施肥对 N₂O 排放的影响掩盖了水分状况对土壤 N₂O 通量的影响。不同的结论其他林地研究也有报道,如李海防等^[30]在厚荚相思林的研究中发现土壤湿度与 N₂O 排放呈负相关关系;刘实等^[33]在四种温带森林的研究中发现,土壤水分和 N₂O 排放之间的关系在红松林中没有相关性,而在其他林型土壤中两者呈现显著正相关;不同林分下土壤 N₂O 排放与土壤湿度之间关系的差异性在邓杰等^[34]研究 4 种典型亚热带森林中的研究也有报道。这些结果差异表明,土壤水分与土壤 N₂O 排放之间的关系不是单独存在的,而是林地类型,土壤特性,气候条件和人为经营等相互制约,相互影响的结果。

本研究中,施肥对土壤 WSOC 含量增加具有显著影响(表 2),这与^[35-36]前大量的研究结果相似。以往研究发现^[3,7],土壤 N₂O 排放与 WSOC 有着密切的正相关关系,本试验中也验证了这一结论(表 3),而且施肥提高了土壤 WSOC 和土壤 N₂O 之间的相关性(表 3)。这是由于 WSOC 是土壤有效碳的重要来源,WSOC 含量增加为微生物提供了充足的营养源,进而生长活性增强,反过来微生物活动加快,土壤 N₂O 排放增加^[3,7]。

在本研究中,施肥显著提高了土壤 MBC 含量(表 2),这与马晓霞等^[37]农田施肥管理下的研究结果一致。然而,在不同施肥处理条件下土壤 N₂O 排放与 MBC 之间均没有显著相关性(表 3),这与李海防等^[30]在森林生态系统中两者关系的报道一致。Lin 等^[7]在果园中发现土壤 N₂O 排放与 MBC 没有明显的相关性,但在稻田、林地和山地中具有显著相关性。这主要是由于试验观察期间果园中水分较低(<32%)造成的。而本研究中板栗林水分基本都在 34% 以下(图 2),这可能也是本研究中土壤 MBC 和土壤 N₂O 排放两者之间没有明显相关性的原因。本研究中出现的结果也可能是由于 WSOC 和土壤温度对土壤 N₂O 排放的影响占主导地位(表 3),从而掩盖了 MBC 对土壤 N₂O 排放的影响。

4.3 不同施肥处理对板栗林地土壤 N₂O 排放的影响

Zhang 等^[16]研究报道,不同水平 N 的增加均可以显著常绿阔叶林土壤 N₂O 排放,并随着增加 N 量的增加而增加。这与本研究中施肥可显著增加土壤 N₂O 排放($P < 0.05$)的结果相似(表 2 和图 4)。原因可能是:(1)施加氮肥为微生物提供了充足营养源,微生物生长繁殖加快,活性加强,对土壤氮的利用性加强,导致 N₂O 排放增加;(2)施加氮肥直接为硝化和反硝化作用提供有效氮源,进而影响 N₂O 排放;(3)施肥促进了作物生长,根系呼吸增强,消耗土壤中的 O₂,为反硝化细菌提供了局部厌氧环境,反硝化作用加快。然而,Jassal 等^[9]研究中却发现施肥第 1 年对杉木林土壤 N₂O 排放有显著影响,而第 2 年施肥没有显著影响。施肥对土壤 N₂O 排放没有影响的发现在罗良国等^[13]在稻田中的研究也有报道。这说明施肥对土壤 N₂O 排放的影响会因为施肥时间,肥料类型,土地利用和测定周期的不同而不同。

本研究中,不同施肥处理间土壤 N₂O 年平均排放量和累积量,均表现为无机肥处理显著高于对照,但明显低于有机肥和有机无机混合肥(表 2)。这与 Zhai 等^[6]在农田土壤中的研究结果一致。这一现象的原因可能是:与单纯无机肥处理相比,有机肥和有机无机混合肥处理增加了土壤水溶性有机碳的含量(表 2)和有机氮增加,硝化和反硝化作用底物增加,最终影响土壤 N₂O 增加。同时,施用有机肥处理提高了土壤 pH 值,这可能也是添加有机肥处理的土壤 N₂O 排放比单纯无机肥处理高的原因之一^[6]。本研究中无机肥处理(6 月 22 日)比有机肥处理(8 月 2 日)土壤 N₂O 通量达到峰值的时间存在一定的差异(图 4)。这可能是施入尿素后不久,尿素水解作用,迅速改变了土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度,硝化和反硝化作用底物迅速增加^[9],而且施肥后 6 月份较大的降雨量和较高的温度,都为硝化和反硝化细菌提供了适宜的生长环境,土壤 N₂O 排放快速达到最大值^[4-5]。

土壤 N_2O 排放量占施氮量的比例不仅是计算某一地区一定施氮水平下 N_2O 排放总量的重要参数,也是预测氮肥利用率的重要参数。本整个试验观察期间,无机肥、有机肥和有机无机混合肥处理下,土壤 N_2O 排放系数分别为 0.96%、1.45% 和 1.29%,这符合与 Jassal 等^[9]在林地发现的土壤 N_2O 排放系数 1.3%—5.5%,而且也与 ICPP 报道的农田生态系统中 N_2O 排放系数平均值为 1.25% 相一致^[38]。同时,本研究中发现有有机肥处理 N_2O 排放系数显著高于无机肥处理。Mori 等^[15]也发现,等氮条件下有机肥处理 N_2O 排放系数为 2.5%,无机肥处理为 2.2%。此外,Lin 等^[10]研究报道, N_2O 排放系数随着施氮量的增加而减少。这说明 N_2O 排放系数会因肥料类型和施肥量的不同而不同。

施肥对 N_2O 排放的贡献率是施肥影响土壤 N_2O 排放通量的重要指标。本研究表明,施肥对土壤 N_2O 累积量的贡献率,在施用有机肥(51%)或有机无机混合肥(48%)处理下显著高于无机肥处理(41%),相似的结果在 Zhai 等^[6]的研究中也有报道,他们发现在施等氮($300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)水平下,无机肥和有机肥处理下施肥对 N_2O 的贡献率分别为 55% 和 80%。但贡献率大小有一定的差异性,这可能是因为在本研究施氮水平($87 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和 Zhai 等^[6]施氮水平($300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)存在差异所引起的。

总之,土壤 N_2O 排放是众多影响因子综合的结果,规律比较复杂,只要可以影响到硝化和反硝化作用的因素均可以对土壤 N_2O 排放造成不同的结果。因此,需要在今后研究中针对土壤硝化和反硝化微生物特性对施肥的响应做进一步的研究。

5 结论

(1) 板栗林地土壤 N_2O 排放具有明显的季节性变化特征,表现为温度较高的夏季排放通量较大,温度较低的冬季排放通量较小;

(2) 3 种施肥处理均显著提高了板栗林地土壤 N_2O 排放通量,同时也提高了土壤 WSOC 和 MBC 的含量。

(3) 不同处理条件下,板栗土壤 N_2O 排放与土壤 5cm 温度、土壤 WSOC 含量之间均呈极显著正相关,但土壤 MBC 含量没有相关性。而只有在不施肥情况下,土壤水分与土壤 N_2O 排放通量才具有显著相关性。

References:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: the physical science basis//Solomon, S, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [2] Ravishankara, A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide: the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 2009, 326: 123-125.
- [3] Liu X, Chen C R, Wang W J, Hughes J M, Lewis T, Hou E Q, Shen J P. Soil environmental factors rather than denitrification gene abundance control N_2O fluxes in a wet sclerophyll forest with different burning frequency, *Soil Biology and Biochemistry*. 2012, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.10.009>.
- [4] Lin S, Iqbal J, Hu R, Feng M L. N_2O emissions from different land uses in mid-subtropical China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136: 40-48.
- [5] Liu J, Jiang P K, Li Y F, Zhou G M, Wu J S, Yang F. Responses of N_2O flux from forest soils to land use change in subtropical China. *Botanical Review*, 2011, 77: 320-325.
- [6] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z, Huang J, Wang B R. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N_2O and CO_2 emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10 (11): 1748-1757.
- [7] Lin S, Iqbal J, Hu R G, Ruan L L, Wu J S, Zhao J S, Wang P J. Differences in nitrous oxide fluxes from red soil under different land uses in mid-subtropical China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 136: 40-48.
- [8] Mori A, Hojito M. Effect of combined application of manure and fertilizer on N_2O fluxes from a grassland soil in Nasu, Japan *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 160: 40-50.
- [9] Jassal R S, Andrew Black T, Trofymow J A, Roy R, Nescic Z. Soil CO_2 and N_2O flux dynamics in a nitrogen-fertilized Pacific Northwest Douglas-fir stand. *Geoderma*, 2010, 157: 118-125.
- [10] Lin S, Iqbal J, Hu R G, Wu J S, Zhao J S, Ruan L L, Malghani S. Nitrous oxide emissions from rape field as affected by nitrogen fertilizer

- management; A case study in Central China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 1775-1779.
- [11] Zheng Y, Hou H J, Qin H L, Zhu Y J, Wei W X. Effect of N application on the abundance of denitrifying genes (*narG* / *nosZ*) and N₂O emission in paddy soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (11): 3386-3393.
- [12] Wang J Y, Xiong Z Q, Yan X Y. Fertilizer-induced emission factors and background emissions of N₂O from vegetable fields in China. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 6923-6929.
- [13] Luo L G, Kondo M, Itoh S. N₂O and CH₄ emission from Japan rice fields under different long-term fertilization patterns and its environmental impact. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3200-3206.
- [14] Sawamoto T, Yoshida R, Abe K, Matsunaka T. No significant difference in N₂O emission, fertilizer-induced N₂O emission factor and CH₄ absorption between anaerobically digested cattle slurry and chemical fertilizer applied timothy (*Phleum pratense* L.) sward in central Hokkaido, Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56: 492-502.
- [15] Mori A, Hojito M. Effect of combined application of manure and fertilizer on N₂O fluxes from a grassland soil in Nasu, Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 160: 40-50.
- [16] Zhang W, Mo J M, Yu G R, Fang Y Y, Li D J, Lu X K, Wang H. Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 2008, 306: 221-236.
- [17] Wu Q F, Jiang P K, Wang J J, Wu J S, Xu Q F. Evaluation of soil active organic carbon after intensive management of Chinese chestnut forest. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2005, 9 (5): 7-9.
- [18] Lu R K. *Analysis Methods for Soil and Agro-chemistry*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999, 146-226.
- [19] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20 (5): 842-844.
- [20] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, Lin Y. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China. *Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90 (1): 27-36.
- [21] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19: 703-707.
- [22] Li Y F, Jiang P K, Liu J, Wang X D, Wu J S, Ye G P, Zhou G M. Effect of fertilization on water-soluble organic C, N and emission of greenhouse gases in the soil of *Phyllostachys edulis* stands. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46 (12): 166-170.
- [23] Huang H Y, Cao J L, Jin H M, Chang Z Z. Influence of application of digested pig slurry on nitrous oxide emission under rice-wheat rotation system. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [24] Yan, Y P, Sha L P, Cao M, Zheng Z, Tang J W, Wang Y H, Zhang Y P, Wang R, Liu G R, Wang Y S, Sun Y. Fluxes of CH₄ and N₂O from soil under a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 207-215.
- [25] Tang X L, Liu S G, Zhou G Y, Zhang D Q, Zhou C Y. Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, 2006, 12: 546-560.
- [26] Su W J, Fu X Q, Li Y, Shi H, Xiao R L, Tong C L, Wu J S. Annual nitrous oxide fluxes from the *pinus massoniana* woodland in a typical hilly region of the southern subtropical China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48 (5): 130-135.
- [27] Du R, Huang J H, Wan X W, Jia Y H. The research on the law of greenhouse gases emission from warm temperate forest soils in Beijing region. *Environmental Science*, 2004, 25 (2): 12-16.
- [28] Matson A, Pennock D, Bedard-Haughn A. Methane and nitrous oxide emissions from mature forest stands in the boreal forest, Saskatchewan, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258: 1073-1083.
- [29] Han L, Wang G, Wang W, Zhao X. Factors affecting global forest soil N₂O emission flux. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 446-452.
- [30] Li H F, Zhang X F. Soil greenhouse gases emission from an *Acacia crassiparva* plantation under effects of understory removal and *Cassia alata* addition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 563-568.
- [31] Ji Y, Zhang X Y, Ma J, Li X P, Xu H, Cai Z C. Effects of applying controlled-release fertilizer and its combination with urea on nitrous oxide emission during rice growth period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (8): 2031-2037.
- [32] Mahmood T, Ali R, Iqbal J, Robab U. Nitrous oxide emission from an irrigated cotton field under semiarid subtropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44: 773-781.
- [33] 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (15): 4075-4084.
- [34] Deng J, Deng X W, Huang Z H, Chen H, Xiang W H, Peng C H, Zhang L Y. Surface N₂O from 4 difference typical forest stands in growing season in subtropical south China. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2012, 28(13): 6-13.
- [35] Liao M, Peng Y, Chen Y, Xie X M, Wu C Y, Tang X, Liu Y X, Yang S M. Effect of long-term different fertilizer management on soil carbon

stock characteristics in paddy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 129-134.

- [36] Cao H J, Wang J K. Effect of long-term fertilization on different fractions of organic carbon on Black soil. *Territory and Natural Resources Study*, 2012, 3: 39-41.
- [37] Ma X X, Wang L L, Li Q H, Zhang S L, Sun B H, Yang X Y. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502-5511.
- [38] National Greenhouse Gas Inventory Committee (NGGIC), National greenhouse gas inventory 1999, Aust. Greenhouse Off, Canberra, ACT, Australia. 2001.

参考文献:

- [11] 郑燕,侯海军,秦红灵,朱亦君,魏文学. 施氮对水稻土 N_2O 释放及反硝化功能基因 (*narG / nosZ*) 丰度的影响. *生态学报*, 2012, 32(11): 3386-3393.
- [13] 罗良国,近藤始彦,伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田 N_2O 和 CH_4 排放特征及其环境影响. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3200-3206.
- [17] 邬奇峰,姜培坤,王纪杰,吴家森,徐秋芳. 板栗林集约经营过程中土壤活性碳演变规律研究. *浙江林业科技*, 2005, 9(5): 7-9.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999, 146-226.
- [23] 李永夫,姜培坤,刘娟,王旭东,吴家森,叶耿平,周国模. 施肥对毛竹林土壤水溶性有机碳氮与温室气体排放的影响. *林业科学*, 2010, 46(12): 166-170.
- [24] 黄红英,曹金留,靳红梅,常志州. 猪粪沼液施用对稻麦轮作系统土壤氧化亚氮排放的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2353-2361.
- [26] 苏王娟,付晓青,李勇,石辉,肖润林,童成立,吴金水. 亚热带典型丘陵坡地马尾松林土壤的年通量特征. *林业科学*, 2012, 48(5): 130-135.
- [27] 杜睿,黄建辉,万小伟,贾月慧. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. *环境科学*, 2004, 25(2): 12-16.
- [29] 韩琳,王鸽,王伟,赵熙. 全球森林土壤 N_2O 排放通量的影响因子. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 446-452.
- [30] 李海防,张杏锋. 剔除灌草和添加翅荚决明对厚荚相思林土壤温室气体排放的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 563-568.
- [31] 纪洋,张晓艳,马静,李小平,徐华,蔡祖聪. 控释肥及其与尿素配合施用对水稻生长期 N_2O 排放的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2031-2037.
- [33] 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. *生态学报*, 2010, 30(15): 4075-4084.
- [34] 邓杰,邓湘雯,黄志宏,陈槐,项文化,彭长辉,张丽云. 4 种典型亚热带森林生态系统生长季地表 N_2O 通量特征. *中国农学通报*, 2012, 28(13): 6-13.
- [35] 廖敏,彭英,陈义,谢晓梅,吴春艳,唐旭,刘玉学,杨生茂. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 129-134.
- [36] 曹宏杰,汪景宽. 长期不同施肥处理对黑土不同组分有机碳的影响. *国土与自然资源研究*, 2012, 3: 39-41.
- [37] 马晓霞,王莲莲,黎青慧,李花,张树兰,孙本华,杨学云. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响. *生态学报*, 2012, 32(17): 5502-5511.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013(Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advances in theoretical issues of species distribution models LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguang, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

Autecology & Fundamentals

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F₁ progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and
crossostephium XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanxia, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N₂O fluxes in Chinese chestnut stands
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

Population, Community and Ecosystem

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal
Landsat TM images: a case study of the Yingxiu-Wenchuan section XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire
disturbance NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Exploring the space syntax under negative planning: a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge
species YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

《生态学报》2013 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,300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 王克林 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16期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 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@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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