

# 外源氮对沼泽湿地 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 通量的影响

张丽华<sup>1,2</sup>, 宋长春<sup>1,\*</sup>, 王德宣<sup>1</sup>, 王毅勇<sup>1</sup>, 顾江新<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2. 中国科学院研究生院 100039;

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 三江平原沼泽湿地受到大气沉降、地表径流、农业排水等外源氮素的输入, 对湿地生态系统  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量有重要影响。采用野外原位施肥试验模拟外源氮输入, 设 0、60、120、240  $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$  4 种试验处理, 探讨外源氮对沼泽湿地  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量的影响。结果表明, 外源氮促进了  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放。与对照处理比较, 各施氮水平  $\text{CH}_4$  平均排放通量分别增加了 181%、254% 和 155%,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别增加了 21%、100% 和 533%。外源氮输入对  $\text{CH}_4$  排放的季节变化形式影响不大, 而  $\text{N}_2\text{O}$  的季节变化形式随着氮输入表现出波动变化的趋势。不同施氮水平对  $\text{CH}_4$  排放的促进作用与植物生长阶段和产  $\text{CH}_4$  的微生物过程密切相关,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量随氮输入量呈指数增加 ( $R^2 = 0.97$ ,  $p < 0.01$ )。外源氮通过影响湿地微生物过程来进一步影响  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放。

**关键词** 外源氮, 沼泽湿地,  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量

文章编号: 1000-0933 (2007) 04-1442-08 中图分类号: Q93 文献标识码: A

## Effects of exogenous nitrogen input on the $\text{CH}_4$ and $\text{N}_2\text{O}$ fluxes in freshwater marshes

ZHANG Li-Hua<sup>1,2</sup>, SONG Chang-Chun<sup>1,\*</sup>, WANG De-Xuan<sup>1</sup>, WANG Yi-Yong<sup>1</sup>, GU Jiang-Xin<sup>2,3</sup>

1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (4) 1442 ~ 1449.

**Abstract** :  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  are the two main greenhouse gases with great contribution to global warming. Natural wetland in the north hemisphere is recognized as one of the most important global sources of atmospheric  $\text{CH}_4$ . But its role in contribution to  $\text{N}_2\text{O}$  is not clear. Nutrient enrichment may impact the greenhouse gas emission from freshwater marshes. As the largest freshwater marsh distribution area in China, Saijiang Plain has experienced the extensive reclamation over the past 50 years. Large area of the marshes was drained for agricultural production. The remained marshes are often subject to high levels of nitrogen enrichment from atmospheric deposition, surface runoff loading and agricultural drainage, which affected the  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission from marsh ecosystem. In this work, we discuss the effects of exogenous Nitrogen on the  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes of marshes using an *in situ* field fertilization experiment with the static chamber technique. Ammonia Nitrate solution were applied at a rate of 0 (control), 60, 120  $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$  and 240  $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ . Monitoring results showed the maximum  $\text{CH}_4$  flux of these four levels is 3.67  $\text{mg CH}_4\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ , 11.01  $\text{mg CH}_4\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ , 11.28  $\text{mg CH}_4\text{ m}^{-2}\text{ h}^{-1}$  and 5.82

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40471124); 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01, KZCX3-SW-332)

收稿日期 2006-04-06; 修订日期 2006-12-15

作者简介 张丽华 (1976 ~), 女, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事环境变化与物质循环研究. E-mail: lihuozhang788403@sina.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songcc@neigae.ac.cn

**Foundation item** The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471124), the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01, KZCX3-SW-332)

**Received date** 2006-04-06; **Accepted date** 2006-12-15

**Biography** ZHANG Li-Hua, Ph. D., mainly engaged in global change and carbon/nitrogen cycling in wetland. E-mail: lihuozhang788403@sina.com

mg CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> , While the maximum N<sub>2</sub> O flux is 0. 27 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> , 0. 65 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> , 1. 0 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> , 2. 26 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup> . The results indicated exogenous nitrogen input increases the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> O emission. Comparing with the control level , the CH<sub>4</sub> flux of other three fertilization levels increases by 181% , 254% and 155% , and the N<sub>2</sub> O fluxes increased 21% , 100% and 533% , respectively. During the growing season , nitrogen input does not have obvious influence upon the seasonal dynamic pattern of CH<sub>4</sub> emission flux. But every Nitrogen input , especially of the highest level , brings about the obvious fluctuation of the N<sub>2</sub> O emission flux. With the increasing of nitrogen input , there is an exponential increase trend of N<sub>2</sub> O flux ( $R^2 = 0.97$   $p < 0.01$  ). CH<sub>4</sub> flux under the high nitrogen input was lower than those under the low and medial nitrogen input , which was related to the plant growing stages and the microbial activity of CH<sub>4</sub>-producing. The exogenous nitrogen input changed the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> O fluxes not only via the direct effect but also by affecting the wetland microbial process.

**Key Words :** exogenous nitrogen ; freshwater marshes ; CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> O fluxes

大气中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 等 3 种主要温室气体的浓度正在以每年 0.4%、1.6% 和 0.25% 的速度增加<sup>[1]</sup> , CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 作为两种主要的痕量温室气体 ,其增温效应分别是 CO<sub>2</sub>的 15 ~ 30 倍和 150 ~ 200 倍<sup>[2]</sup>。大气中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 和其他温室气体浓度升高导致的全球变化是人类共同关注的环境问题之一。湿地因其独特的地形结构和景观功能在全球变化中具有重要作用 ,湿地转为农业用地和湿地退化都将释放大量的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 等其他温室气体。目前 ,沼泽湿地已被证明是巨大的 CO<sub>2</sub>汇和 CH<sub>4</sub>源<sup>[3,4]</sup> ,湿地土壤作为 CH<sub>4</sub>主要的自然源其排放速率大约为 100 ~ 200 Tg a<sup>-1</sup> ,占每年全球 CH<sub>4</sub>排放量的 53%<sup>[5]</sup>。关于湿地 N<sub>2</sub>O 的源/汇功能说法不尽一致<sup>[6,7]</sup>。宋长春等的研究<sup>[8]</sup>表明 ,冬季沼泽湿地是 N<sub>2</sub>O 的汇 ,而冻融期随着土壤温度升高逐渐成为 N<sub>2</sub>O 的源。土壤湿度是影响 N<sub>2</sub>O 排放的一个重要因素<sup>[9]</sup> ,湿地因各种因素变干会促进其排放 N<sub>2</sub>O。北方沼泽泥炭地相对于全球 250 ~ 450Pg 的碳储量 ,以每年 10 ~ 30gm<sup>-2</sup> 的速度积累 ,累计量高达 5 ~ 250kgm<sup>-2</sup> <sup>[10,11]</sup>。基于 10 ~ 30g m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> 的碳累积速度 ,氮的积累为 0.3 ~ 1.0gNm<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> <sup>[10]</sup>。沼泽湿地生态系统 ,氮是一种重要的植物生长受限制的营养元素<sup>[12]</sup>。湿地 CH<sub>4</sub>排放受土壤氮素有效性调节<sup>[13]</sup> ,N<sub>2</sub>O 排放直接与土壤氮素有效性有关。通过干湿沉降、地表径流、农业废水等途径进入湿地中的氮很容易被湿地生物固定和利用<sup>[14]</sup> ,影响湿地的生物地球化学过程 ,导致湿地 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的产生和排放发生变化<sup>[15]</sup>。

三江平原是我国沼泽湿地分布面积最大的地区 ,近来许多湿地被开垦为农田。农事活动中流失的氮素进入未被开垦的湿地 ,引起氮的积累 ,促进湿地 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[15]</sup>。同时 ,该地区每年都有大量的干湿氮沉降被固定到湿地土壤 ,影响湿地生态系统。总之 ,湿地面临外源氮输入增加 :大气沉降、来自施肥农田的地表径流、富含氮的污水等 ,其 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放可能会发生变化。为了探讨近年来 (<100a) 外源氮输入对沼泽湿地 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量的影响 ,本研究在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站试验场内 ,选取代表性的小叶章沼泽化草甸进行野外原位施肥试验 ,用静态暗箱-气相色谱法定期进行 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的通量观测。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究工作选取三江平原别拉洪河与浓江河河间地带 (133°31'E , 47°35'N) ,区内分布有大面积的沼泽湿地及由湿地垦殖而成的农田。本区属于温带湿润半湿润季风气候 ,气温年较差和日较差均较大 ,冰冻期长 ,降水集中于夏秋 2 季 ,年均降雨量 550 ~ 600mm。区内沼泽湿地类型主要为常年积水的毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*) 沼泽和季节性积水的小叶章 (*Doyeuxia angustifolia*) 草甸。植被分布一般表现为 ,低洼地及河流两侧多为毛果苔草沼泽、乌拉苔草沼泽 ,向外围出现积季节性积水的小叶章草甸 ,周边地形较高处为以灌木为主的岛状林。主要土壤类型为草甸沼泽土和泥炭沼泽土。沼泽湿地土壤有机质含量较高 ,表层土壤有机质含量为 9.30% ~ 58.63% ,全氮含量变化为 0.66% ~ 2.05%。本项试验研究主要布置在季节性积水的小叶章草甸进

行 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的通量观测。供试土壤的理化特性如表 1 所示,观测场设有气象站和湿地小气候观测系统。

1.2 试验布置

按照“典型性、代表性、可操作性”的原则设置 4 个试验区域,分别布置 4 个施氮水平,即对照 (CK, 0 kg·hm<sup>-2</sup>)、低氮 (LN, 60 kg·hm<sup>-2</sup>)、中氮 (MN, 120 kg·hm<sup>-2</sup>)和高氮 (HN, 240 kg·hm<sup>-2</sup>),每种处理各设 3 个重复。2003 年在沼泽湿地试验场 4 个区域分别埋入不锈钢底座 (50cm × 50cm × 20cm),并在样点附近搭好栈桥,防止采样时的扰动。为了防止氮素的水平运移以及流失对周围环境的影响,施氮处理试验点周围用 PVC 板 (100cm × 100cm × 50cm)进行防护。其中 60 kg·hm<sup>-2</sup>是参照了当地农田的施肥水平,其它各施氮水平均是在此基础上的倍增,目的探讨不同水平的外源氮对 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量的影响及发生机理。自 2005 年 5 月 14 日起,各水平的外源氮平均分成 9 份以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 水溶液的形式每隔 2 周均匀撒入 1 次,同时在没有施氮的试验点撒入等量的水。

表 1 供试土壤的理化特性  
Table 1 The physical and chemical features of the experiment soil

湿地类型 Wetland type	土壤类型 Soil type	深度 Depth (cm)	有机碳 SOC (%)	全氮 TN (%)	C:N	容重 (mg·cm <sup>-3</sup> ) Bulk density
小叶章沼泽化草甸 Deyeuxia angustifolia	草甸沼泽土 Meadow swamp soil	0 ~ 5	14.81 ± 5.10	0.95 ± 0.25	17.55 ± 5.25	0.56 ± 0.21
		5 ~ 15	7.63 ± 0.72	0.82 ± 0.25	9.72 ± 2.11	0.79 ± 0.17

1.3 样品采集与分析

本试验采用静态暗箱——气相色谱法<sup>[16]</sup>观测 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的通量。箱体由不锈钢材料制成分别由底座 (50cm × 50cm × 20cm) 加长箱 (50cm × 50cm × 50cm)和采样箱 (50cm × 50cm × 50cm)3 部分组成,采样时各部分之间均用水密封。采样时间分别为罩箱后的 0、10、20、30min,每次抽样 60ml,气体样品在 24h 内在实验室用 Agilent 4890 气象色谱仪进行分析。整个生长季 2 种气体 30min 罩箱时间内的排放浓度呈线性积累 ( $r^2 > 0.9$   $p < 0.05$ ),所有观测数据均在  $r^2 > 0.9$  的情况下才视为有效,否则弃之不用。利用公式  $J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{t} \times H$  计算气体通量<sup>[15~18]</sup>。为了尽量减少罩箱以及采样过程中的人为干扰,自 2005 年 5 月开始,每周进行 2 ~ 3 次通量观测,其中 1 次在每次施肥之后进行。每次样品采集在 7:30 ~ 10:00 完成,同时记录箱内温度、箱外大气温度、土壤温度等环境要素以及小叶章的生长发育期。

小叶章地上生物量分析采用文献<sup>[19~21]</sup>里描述的方法,收获生长季末的地上当年生植株,在 80℃ 高温下烘干后称重,获得小叶章地上生物量。同时在进行通量观测的样点内每 10d 测量 1 次株高,每月测量 1 次叶面积。

1.4 数据统计与分析方法

数据处理与分析分别用 Microsoft excel 2003 和 origin 7.5 数据统计和处理软件包。用 origin7.5 方差分析中的单因子方差分析 (One-Way ANOVA) 统计不同氮输入水平对 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量的影响以及对地上生物量的影响。

2 结果与讨论

2.1 外源氮对小叶章生物量的影响

植物生长状况对 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 通量有一定的影响<sup>[22~23]</sup>,而生物量和株高是直接反映植物生长状况的两个明显指标。由于施肥试验地点没有足够的试验空间定期采集地上生物量,所以只收获了生长季末的小叶章地上生物量 (表 2)。由表 2 可以看出,与对照处理相比较,各施氮水平生长季末的地上生物量分别升高了 26% ( $p = 0.5$ )、44% ( $p = 0.1$ )和 375% ( $p = 0.05$ )。

根据每 10d 测量 1 次观测点的小叶章株高,获得对照处理和不同施氮水平的株高动态曲线 (图 1)。由图

1 可以看出,仅高氮水平的株高显著高于对照处理,用 origin7.5 的 One-Way ANONA 分析,低氮和高氮水平的株高与对照处理相比差异不显著 ( $p > 0.5$ ),高氮水平的株高显著高于对照处理 ( $p = 0.05$ )。表明,氮输入增大了小叶章地上生物量,促进了植物生长。而对株高的影响不显著,仅高氮输入显著增大了株高。

2.2 外源氮对 CH<sub>4</sub> 通量的影响

图 2 为不同施氮水平下 CH<sub>4</sub> 通量的季节变化,各处理的 CH<sub>4</sub> 通量季节变化形式基本一致。从 5 月份开始逐渐增大,到 6 月 7 日前后达到极大值,之后排放通量开始减小,呈现出明显的单峰变化的趋势。其中,对照处理的最大值为  $3.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,出现在 6 月 6 日前后,低氮和中氮处理的最大值分别为  $11.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $11.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,出现在 6 月 8 日前后,高氮处理的最大值为  $5.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,出现在 6 月 15 日前后。不同处理之间,CH<sub>4</sub> 排放通量差异很大(表 3)。中氮处理的 CH<sub>4</sub> 生长季平均通量最高,为  $2.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。与对照处理比较,低、中、高各施氮水平 CH<sub>4</sub> 平均通量分别升高了 181% ( $p = 0.05$ ),254% ( $p = 0.01$ )和 155% ( $p = 0.05$ )。由表 3 还可以看出,不同时期外源氮对 CH<sub>4</sub> 通量的影响不同。5、6 月份随着氮输入的增加,CH<sub>4</sub> 排放通量先增大后减小,而 7~9 月份伴随着氮输入 CH<sub>4</sub> 排放通量表现出升高的趋势。且高氮处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化模式与其它 3 种处理差异较大,不仅极大值出现的时间滞后于其它处理,且与其它 3 种处理比较,表现出明显的波动变化的趋势(图 2)。

各处理的峰值出现在 6 月上中旬,初步分析主要由于以下 2 个原因。其一,正好处于小叶章的积水期,且温度适宜,同时施入了氮肥,充足的有机质分解产物为产 CH<sub>4</sub> 过程提供了丰富的反映底物,从而产生并排放出更多的 CH<sub>4</sub>。其二,三江平原地处我国东北地区永久冻土带的南侧,为季节性冻融区<sup>[8]</sup>,每年 5 月初,表层土壤开始解冻,冬季产生的可能被封存在冻结土壤层中的 CH<sub>4</sub> 气体被逐渐释放出来<sup>[8]</sup>,同时随着萌芽期的到来和植物进入快速生长的时期,各种生物化学过程产生的 CH<sub>4</sub> 有利于通过发达的植物组织传输到地表<sup>[24]</sup>,观测到 CH<sub>4</sub> 排放的峰值。5、6 月份是沼泽植物快速生长期,适量的氮促进小叶章根系生长和根系分泌功能增强,根系分泌物在土壤中积累,使小叶章根际产 CH<sub>4</sub> 菌的有效底物相应增加,促进了产 CH<sub>4</sub> 菌的代谢活性,增加了 CH<sub>4</sub> 产量<sup>[25]</sup>。7~9 月份植物已经进入成熟期和枯萎期,植物本身的各种生命活动已经减弱,根系脱落组织、衰老根系以及分泌物的可降解性减弱,导致 CH<sub>4</sub> 排放的变化不明显<sup>[26]</sup>。这一时期外源氮对 CH<sub>4</sub> 排放的促进作用可能受植物的影响较小,体现了不同氮输入量对 CH<sub>4</sub> 排放的促进作用与植物生长阶段密切相关。

氮输入后 CH<sub>4</sub> 排放通量增大,与以前的研究结论<sup>[15]</sup>一致。但相同处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量年际之间差异显著,相差接近 1 个数量级(与 2004 年的数据比较),不同年际间的积水水位变化是导致该差异的主要原因<sup>①</sup>,

表 2 施氮对小叶章地上生物量的影响(±表示标准偏差)

Table 2 effects of nitrogen on the *Doyeuxia angustifolia* above-ground biomass (± indicate the standard deviation)

施氮水平*		地上生物量
Nitrogen level (kg·hm <sup>-2</sup> )		Above-ground biomass (g·m <sup>-2</sup> )
对照 Control	0	201 ± 49
低氮 Low nitrogen level	60	252 ± 40
中氮 Medial nitrogen level	120	290 ± 47
高氮 High nitrogen level	240	954 ± 115

\* 下同 the same below

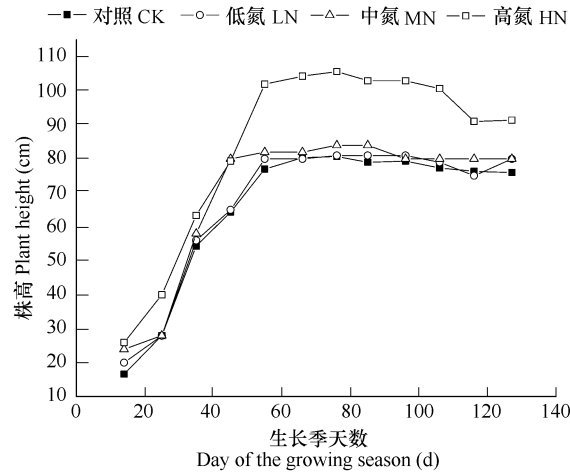


图 1 各处理小叶章株高动态

Fig. 1 Dynamics of *Doyeuxia angustifolia* plant height

① 宋长春,张丽华,王毅勇,等. 淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 通量年际变化及其对氮输入的响应. 投环境科学

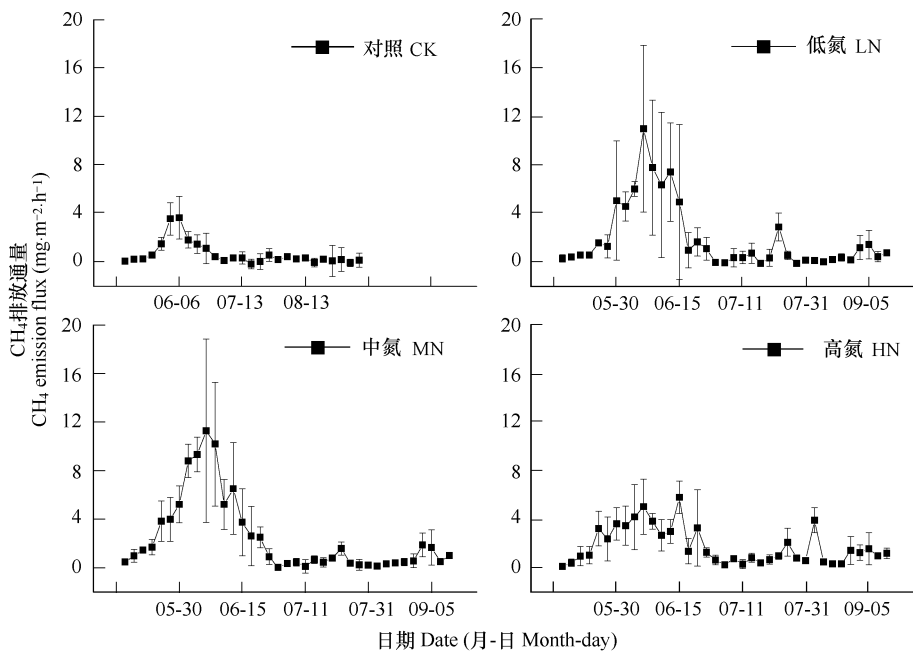


图 2 各施氮水平下 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of CH<sub>4</sub> emission in all nitrogen levels

误差线表示标准偏差  $n = 3$  The vertical bars represent standard error of the mean  $n = 3$

对水位的观测发现 2005 年的积水水位显著低于 2004 年。沼泽湿地释放到大气中的 CH<sub>4</sub> 总量主要是由于湿地土壤 CH<sub>4</sub> 产生和氧化的差异<sup>[27-28]</sup> ,氮沉降能够影响产 CH<sub>4</sub> 微生物和 CH<sub>4</sub> 氧化微生物的活性<sup>[29]</sup>。本试验不同施氮处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量均高于对照处理 ,表明 输入的氮对 CH<sub>4</sub> 产生的促进作用大于对 CH<sub>4</sub> 氧化的促进作用 ,CH<sub>4</sub> 排放通量增大。高氮处理的 CH<sub>4</sub> 排放通量反而低于低氮和中氮处理 (图 2 ,表 3 ) ,表明 随着氮输入量的增加 ,多余的氮可能更有利于 CH<sub>4</sub> 氧化作用的发生 ,产生的 CH<sub>4</sub> 部分被氧化<sup>[30]</sup> ,导致高氮处理的 CH<sub>4</sub> 平均排放通量反而低于低氮和中氮处理 5、6 月份高氮处理的 CH<sub>4</sub> 通量反而低于低氮和中氮处理。根据试验记录的氮输入时间分析发现 ,高氮处理的每个峰值总是在每次氮输入的前后观测到。表明 ,氮输入量达到一定水平时 ,不只是简单的促进 CH<sub>4</sub> 排放 ,而是通过影响一系列复杂的微生物等过程来影响 CH<sub>4</sub> 的排放。湿地和旱地 CH<sub>4</sub> 的产生和氧化均受到氮输入的影响 ,硝态氮仅在高浓度时对 CH<sub>4</sub> 的产生起抑止作用<sup>[30]</sup> ,故本实验中出现高氮浓度的 CH<sub>4</sub> 排放反而低于低氮和中氮浓度的 CH<sub>4</sub> 排放。

表 3 不同时期各处理 CH<sub>4</sub> 排放通量的平均值

Table 3 Average CH <sub>4</sub> fluxes in all treatments during the different stages (mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )						
处理 Treatment	CH <sub>4</sub> 排放通量 CH <sub>4</sub> emission flux					生长季均值 The average of the growing season
	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	
对照 (CK)	1.06aA	1.72aA	0.23aA	0.24aA	0.11aA	0.68a
低氮 (LN)	1.28aA	4.72aC	0.53aA	0.37aA	0.90aA	1.91b
中氮 (MN)	2.27aC	5.57aD	0.53aA	0.64aA	1.07aA	2.40b
高氮 (HN)	1.49aA	3.15aB	0.77bA	1.29aA	1.26bA	1.73b

a , b , 表示不同处理月平均值在 5% 置信度上的统计显著差异 ;A , B , C , D , 表示同一处理月平均值在 5% 置信度上的统计显著差异 The difference in a column with different letters a / b or A / B , C , D is significant at the 5% level. Comparison of the mean among the treatments in the same month or the months in the same treatment

2.3 外源氮对 N<sub>2</sub>O 通量的影响

N<sub>2</sub>O 的季节变化趋势不明显 ,没有明显的峰值出现的时间 ,基本上是呈波动状态变化的 (图 3 )。随着氮

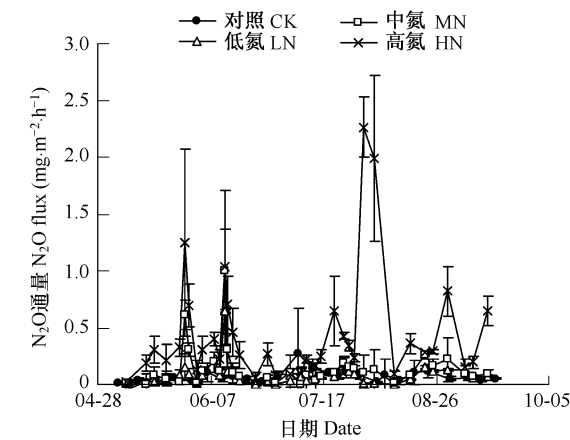


图3 各施氮水平下 N<sub>2</sub>O 通量的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of N<sub>2</sub>O fluxes in all nitrogen levels  
误差线表示标准偏差  $n=3$  The vertical bars represent standard error of the mean ,  $n=3$  ;下同 the same below

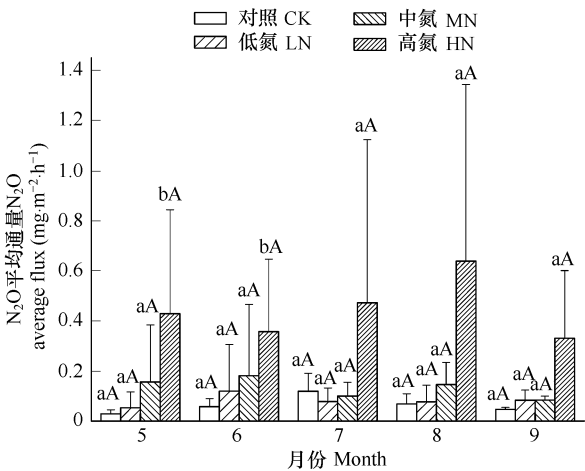


图4 不同时期氮输入后 N<sub>2</sub>O 平均通量的变化

Fig. 4 Variation of average N<sub>2</sub>O fluxes after nitrogen applied in different stages  
a , b , 表示不同处理月平均值在 5% 置信度上的统计显著差异 ;A 表示同一处理月平均值在 5% 置信度上的统计显著差异 ,误差线表示标准偏差  $n=37$  The difference in a column with different letters a , b or A , B , C , D is significant at the 5% level. Comparison of the mean among the treatments in the same month or the months in the same treatment

似。表明 沼泽湿地受到外源氮素后 N<sub>2</sub>O 排放通量增加。且随氮输入量的增多呈指数增加 (图 5) ,与 Milton<sup>[5]</sup>在加勒比海东北岸波多黎各红树林湿地的研究结论一致。一般情况下沼泽湿地氮素是受限制的营养元素<sup>[11]</sup> ,此时土壤中的氮一般都被植物吸收利用。土壤中的硝化和反硝化过程因为缺少有效氮而受阻 ,故对照处理的 N<sub>2</sub>O 通量值小。但当受到外源氮

输入量的增加 ,波动现象越明显 (图 3) 。对照处理的通量值很小 ,大都在 0 附近波动 ,有时甚至出现负的通量值 (表现为 N<sub>2</sub>O 的弱吸收) 。对照处理的最大值 0.27 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,与 Liikanen<sup>[31]</sup>在芬兰滨海淡水湿地的最大值 0.28 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 基本一致。整个生长季的平均排放通量为 0.07 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,略高于 Liikanen<sup>[31]</sup>的平均值 0.025 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 和 Regina<sup>[32,33]</sup>北方自然泥炭地的平均值 0.02 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 。各施氮水平的最大值分别为 ,低氮 0.65 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,中氮 1.0 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,高氮 2.26 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,均略低于 Liikanen<sup>[31]</sup>以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 形式施氮后的最大值 2.56 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 。低氮和中氮处理的最大值均出现在 6 月份氮输入后的第 2 天 ,且每次氮输入后的第 2 天均能观测到 1 个较小的 N<sub>2</sub>O 排放峰值。而高氮处理的最大值出现在 7 月份氮输入后的第 8 天 (即在前后 2 次氮输入的中间时段观测到了排放高峰值) ,除此之外的其它较小峰均在每次氮输入后第 2 天观测到。即施氮处理表现出的 N<sub>2</sub>O 季节波动现象主要是由每次持续的氮输入导致。高氮处理出现的异常高峰可能由于当时土壤温度和湿度正好同时适宜该施氮水平下硝化和反硝化过程产生 N<sub>2</sub>O 的水分和 O<sub>2</sub> 供给状况 ,引起了显著的 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[34]</sup>。

随着氮输入量的增加 N<sub>2</sub>O 通量值逐渐增大 (图 4 ,图 5) 。整个生长季各施氮水平的平均值分别为 0.08 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,0.14 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> ,0.43 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> 。与对照处理相比较 ,分别增大了 21% ( $p=0.1$ ) ,100% ( $p=0.1$ ) ,533% ( $p<0.01$ ) 。中氮处理的与 Liikanen<sup>[31]</sup>施氮后 N<sub>2</sub>O 平均排放通量增加了 100 倍类

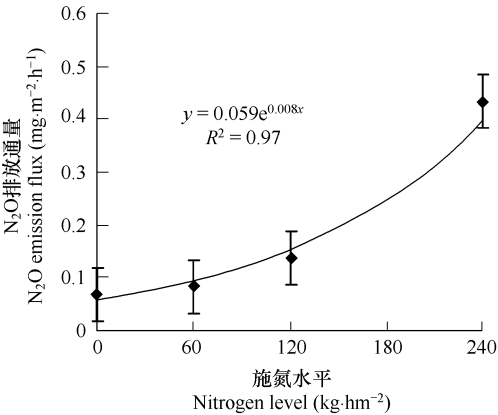


图5 N<sub>2</sub>O 平均排放通量与氮输入量的相关性

Fig. 5 Average N<sub>2</sub>O fluxes in response to the nitrogen applied  
误差线表示标准偏差  $n=3$  The vertical bars represent standard error of the mean  $n=3$

素输入后,在土壤温度、水分和其它环境状况一致的条件下,有效氮源供应水平是影响土壤 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素<sup>[36]</sup>。土壤中多余的有效氮可以用来增加硝化和反硝化作用的反映底物,导致 N<sub>2</sub>O 排放增加。本试验结果表明,外源氮素输入后,对三江平原沼泽湿地 N<sub>2</sub>O 排放具有明显的促进作用(图 3,图 4,图 5)。

3 结论

外源氮进入三江平原沼泽湿地,促进了植物生长,导致了 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放通量的增加。CH<sub>4</sub>排放的季节变化形式受外源氮的影响不大,N<sub>2</sub>O 通量随每次氮输入表现出波动变化的趋势。外源氮对生态系统 CH<sub>4</sub>通量的促进作用与植物生长阶段密切相关,且随着氮输入量的增加,对 CH<sub>4</sub>排放的促进作用先增大后减小,N<sub>2</sub>O 通量随氮输入量的增大呈指数增加。

References :

[1 ] IPCC. Climate Change 1995 , the Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press ,Cambridge ,UK. , 1996.

[2 ] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. Science ,1990 ,248 1217 – 1219.

[3 ] Cao M ,Gregson K ,Marshall S. Global methane emission from wetlands and its sensitivity to climate change. Atmospheric Environment ,1998 ,32 :3293 – 9299.

[4 ] Whalen S C ,Reeburgh W S. Methane oxidation ,production ,and emission at contrasting sites in a boreal bog. Geomicrobiology Journal ,2000 ,17 237 – 251.

[5 ] Le Mer J and Roger P. Production ,oxidation ,emission and consumption of methane by soils :Areview. European Journal of Soil Biology ,2001 ,25 – 50.

[6 ] Maljanen M ,Martikainen P J ,Aaltonen H ,*et al.* Short-time variation in fluxes of carbon dioxide ,nitrous oxide and methane in cultivated and forested organic boreal soils. Soil Biology and Biochemistry ,2002 ,34 :577 – 584.

[7 ] Zhang J B ,Song C C ,Yang W Y. Cold season CH<sub>4</sub> ,CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from freshwater marshes in northeast China. Chemosphere ,2005 ,59 :1703 – 1705.

[8 ] Song C C ,Wang Y Y ,Wang Y S ,*et al.* Dynamics of CO<sub>2</sub> ,CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission fluxes from Mires During Freezing and Thawing Season. Environmental Science ,2005 26 (4 ) 7 – 12.

[9 ] Zheng X H ,Wang M X ,Wang Y S ,*et al.* Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands :a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. Chemosphere-Global Change Science 2 ,2000 ,207 – 224.

[10 ] Gorham E. Northern peatlands :role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. Ecological Applications. 1991 ,1 :182 – 195.

[11 ] Turunen J ,Pitkanen A ,Tahvanainen A ,*et al.* Carbon accumulation in West Siberian mires ,Russia. Global Biogeochemical Cycles ,2001 ,15 :285 – 296.

[12 ] Berendse F ,van Breemen N ,Rydin H ,*et al.* Raised atmospheric CO<sub>2</sub> levels and increased N deposition cause shifts in plant species composition and production. Global Change Biology ,2001 ,7 591 – 598.

[13 ] Cai Z C ,Xing G X ,Yan X Y ,*et al.* Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management. Plant and Soil ,1997 ,196 7 – 14.

[14 ] Urban N R ,Eisenreich S J. Nitrogen cycling in a forested Minnesota bog. Canadian Journal of Botany ,1988 ,66 435 – 449.

[15 ] Zhang L H ,Song C C ,Wang D X. CO<sub>2</sub> ,CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to the atmosphere upon nitrogen addition in the swamp wetland. Acta Scientiae Circumstantiae 2005 25 (8 ) 1112 – 1118.

[16 ] Wang Y S ,Wang Y H. Quick measurement of CH<sub>4</sub> ,CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a short-plant ecosystem. Advances in Atmospheric Sciences ,2003 20 ,842 – 844.

[17 ] Song C C ,Yan B X ,Wang Y S *et al.* Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain ,China. Chinese Science Bulletin 2003 48 (28 ) 2473 – 2477.

[18 ] Wichland K P. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland ,1996 – 1998. Global Biogeochem Cycles ,2001 15 (2 ) 677 – 682.

[19 ] Bubier J L ,Bhatia G ,Moore T R ,*et al.* Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange at a Large Peatland in Ontario ,Canada. Ecosystems ,2003 ,6 353 – 367.

[20 ] Whiting G J. Seasonal CO<sub>2</sub> exchange in communities of the Hudson Bay lowlands. Journal of Geophysical Research ,1994 99 (D1 ) ,1519 – 1528.

[21 ] Moore T R ,Bubier J L ,Steve E ,*et al.* Plant biomass and production and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic bog. Journal of Ecology ,2002 ,90 (1 ) :25 – 36.

[22] Ambus P ,Robertson G P. Fluxes of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in aspen stands grown under ambient and twice-ambient CO<sub>2</sub>. *Plant Soil* ,1999 ,209 (1 ) :1 – 8.

[23] Jiang J Y ,Huang Y ,Zong L G. Influence of Environmental Factors and Crop-Growing on Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from Rice Paddy. *Journal of Agro-Environment Science* 2003 22 (6 ) :711 – 714.

[24] Xu Z J ,Zheng X H ,Wang Y S ,*et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization on CH<sub>4</sub> emissions from paddy rice fields. *Global Biogeochemical Cycles* ,2004 ,18 :1 – 9.

[25] Xu Z J ,Zheng X H ,Wang Y S ,*et al.* Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* 2002 ,13 (10 ) :1245 – 1248.

[26] Cotrufo M F ,Ineson P. Elevated CO<sub>2</sub> reduces field decomposition rates of *Betula pendula* (Roth ) leaf litter. *Oecologia* ,1996 ,106 (4 ) :525 – 530.

[27] Sundh I ,Nilsson M ,Granberg G ,*et al.* Depth distribution of microbial methane production and methane oxidation rates in northern boreal peatlands. *Microbiol. Ecol.* ,1994 ,27 :253 – 265.

[28] Sundh I ,Mikkela C ,Nilsson M ,*et al.* Potential aerobic methane oxidation in a Sphagnum dominated peatland-Controlling factors and relation to methane emission. *Soil Boil. Biochem.* ,1995 ,27 :829 – 837.

[29] Nykanen H ,Vasander H ,Huttunen J T ,*et al.* Effects of experimental nitrogen load on methane and nitrous oxide fluxes on ombrotrophic boreal peatland. *Plant and Soil* ,2002 ,242 :147 – 155.

[30] Bodelier Paul L E ,Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology* ,2004 (47 ) :265 – 277.

[31] Liikanen A ,Ratilainen E ,Saarino S ,*et al.* Greenhouse gas dynamics in boreal , littoral sediments under raised CO<sub>2</sub> and nitrogen supply. *Freshwater Biology* ,2003 ,48 :500 – 511.

[32] Regina K ,Nykanen H ,Silvola J ,*et al.* Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type , water table and nitrification capacity. *Biogeochemistry* ,1996 ,35 :401 – 418.

[33] Regina K ,Silvola J , and Martikainen P J. Short-term effects of changing water table on N<sub>2</sub>O fluxes from peat monoliths from natural and drained boreal peatlands. *Global Change Biology* ,1999 ,5 :183 – 189.

[34] Zheng X H ,Wang M X ,Wang Y S ,*et al.* CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from Rice Paddy Fields in Southeast China. *Scientia Atmospherica Sinica* ,1997 ,21 (2 ) :231 – 237.

[35] Milton M H ,Morell J M ,Corredor J E. Increase of nitrous oxide flux to the atmosphere upon nitrogen addition to red mangroves sediments. *Marine Pollution Bulletin* ,2002 ,44 :992 – 996.

[36] Hou A X ,Chen G X. Effect of different nitrogen fertilizers on N<sub>2</sub>O emission from soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,1998 9 (2 ) :176 – 180.

参考文献：

[8] 宋长春,王毅勇,王跃思,等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放动态. *环境科学* 2005 26 (4 ) :7 ~ 12.

[15] 张丽华,宋长春,王德宣. 沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放对氮输入的响应. *环境科学学报* 2005 25 (8 ) :1112 ~ 1118.

[17] 宋长春,阎百兴,王跃思,等. 三江平原沼泽湿地 CO<sub>2</sub>和 CH<sub>4</sub>通量及影响因子. *科学通报* 2003 48 (28 ) :2473 ~ 2477.

[23] 蒋静艳,黄耀,宗良纲. 环境因素和作物生长对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的影响. *农业环境科学学报* 2003 22 (6 ) :711 ~ 714.

[25] 徐仲均,郑循华,王跃思,等. 开放式空气 CO<sub>2</sub>增高对稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的影响. *应用生态学报* 2002 ,13 (10 ) :1245 ~ 1248.

[34] 郑循华,王明星,王跃思,等. 华东稻田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放. *大气科学* ,1997 21 (2 ) :231 ~ 237.

[36] 候爱新,陈冠雄. 不同种类氮肥对土壤释放 N<sub>2</sub>O 的影响. *应用生态学报* ,1998 9 (2 ) :176 ~ 180.