

淡水沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入响应

宋长春, 张丽华, 王毅勇, 赵志春

(中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 利用静态暗箱-气相色谱法自 2002~2004 年连续 3a 观测了三江平原淡水沼泽湿地 CO₂、CH₄ 和 N₂O 3 种主要温室气体排放特征及外源氮素输入条件下温室气体通量的变化。结果表明, 三江平原 CO₂、CH₄ 和 N₂O 3 种主要温室气体排放具有明显的季节及年际变化规律。其中生态系统呼吸 CO₂ 排放的最大值[779.33~965.40 mg·(m²·h)⁻¹] 出现在 7、8 月份, CH₄ 通量最大值[19.19~30.52 mg·(m²·h)⁻¹] 出现在 8 月, N₂O 通量最大值[0.072~0.15 mg·(m²·h)⁻¹] 出现在 5 月和 9 月, 3 种温室气体通量最小值 CO₂ 为 2.36~18.73 mg·(m²·h)⁻¹; CH₄ 为 -0.35~0.59 mg·(m²·h)⁻¹; N₂O 为 -0.032~-0.009 mg·(m²·h)⁻¹ 大都出现在冬季, 且冬季淡水沼泽湿地表现为 N₂O 的吸收。对气候因子的分析发现, 温度条件是影响淡水沼泽湿地温室气体排放通量季节性变化的主要因子, 而降水和积水水位变化是影响其排放年际变化的关键因素, 特别是降水对 CH₄ 排放通量的影响较其它 2 种温室气体更显著, 且冬季雪融水对夏季 CH₄ 的排放起重要作用。CO₂ 和 CH₄ 排放与土壤温度(5cm) 呈显著的指数相关关系, 而 N₂O 排放通量与土壤温度和水深相关性不显著。氮输入促进了三江平原 CO₂、CH₄ 和 N₂O 3 种主要温室气体的排放, 与对照处理相比, 其排放通量分别升高了 34%、145% 和 110%。

关键词: 淡水沼泽; 温室气体排放; 氮输入; 环境因素

中图分类号: X131.1; X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2369-07

Annual Dynamics of CO₂, CH₄, N₂O Emissions from Freshwater Marshes and Affected by Nitrogen Fertilization

SONG Chang-chun, ZHANG Li-hua, WANG Yi-yong, ZHAO Zhi-chun

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

Abstract: Annual dynamics of CO₂, CH₄, N₂O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization were studied *in situ* in Sanjiang Plain of Northeast China from June 2002 to December 2004, using the static opaque chamber-GC techniques. The results showed that there was significant seasonal and annual variation in the CO₂, CH₄ and N₂O emissions. The ecosystem emission of CO₂ reached a maximum of 779.33~965.40 mg·(m²·h)⁻¹ in July and August, CH₄ reached a maximum of 19.19~30.52 mg·(m²·h)⁻¹ in August, N₂O reached a maximum of 0.072~0.15 mg·(m²·h)⁻¹ in May and September, respectively. While the minimum of the CO₂, CH₄, N₂O emission was 2.36~18.73 mg·(m²·h)⁻¹, -0.35~0.59 mg·(m²·h)⁻¹, -0.032~-0.009 mg·(m²·h)⁻¹, respectively, which occurs in winter. The freshwater marsh was the sink of N₂O in winter. Temperature was a primary factor, controlling greenhouse gas seasonal emissions in freshwater marshes; while the precipitation and floodwater depth were the dominating influencing factors, affecting the greenhouse gas annual variations. Especially, the influence of precipitation on CH₄ emissions was more obvious, comparing with the CO₂ and N₂O emissions. And the summer higher CH₄ emission was mainly induced by the ice and snow thawing water in winter. Respiration of the ecosystem and CH₄ emission were exponentially dependent on soil temperature of 5cm depth, while the N₂O emission was not related to the soil temperature and water depth. The greenhouse gas (CO₂, CH₄, N₂O) emissions were significantly influenced by nitrogen fertilization in Sanjiang Plain. The CO₂, CH₄, N₂O flux of fertilization increased 34%, 145%, 110%, respectively, comparing to the control treatment.

Key words: freshwater marshes; greenhouse gas emissions; nitrogen fertilization; environmental factors

湿地作为重要的生态系统之一在陆地生态系统碳循环具有重要作用, 大气中 3 种主要的温室气体 CO₂、CH₄、N₂O 同时参与湿地生态系统地气物质交换过程。一方面, 湿地植物通过自身的生命活动固定大量的 CO₂, 成为巨大的 CO₂“汇”, 另一方面又通过物质循环过程排放 CH₄ 和 N₂O 而扮演着 CH₄“源”的角色。此过程受气候变化的影响较大。目前, 大气中 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的浓度正分别以每年

0.4%、0.6% 和 0.25% 的速度增长^[1]。EUROFLUX 研究计划的监测结果表明, 生态系统呼吸(植被呼吸 + 土壤呼吸) 在全球碳平衡中起着及其重要的作

收稿日期: 2005-12-13; 修订日期: 2006-02-22

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

作者简介: 宋长春(1968~), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为湿地生物地球化学与湿地生态系统管理, E-mail: songcc@neigae.ac.cn

用^[2]. 沼泽湿地因聚集了大量的有机碳^[3], 而对气候变化表现出较高的敏感性和不确定性^[4,5]. 近期研究表明, 由于植物生长、CO₂ 施肥效应和 N 沉降的综合作用, 不少地区的陆地碳库有所增加, 但这一现象并没有在全球尺度上得到证实^[6,7]. 且与森林、草地等自然生态系统比较, 沼泽湿地的研究相对薄弱. 近年来, 由于湿地在温室气体减排中“汇”的作用巨大, 对湿地温室气体排放的研究日益增多^[8], 但大多是对 CO₂^[9~11] 或 CH₄ 排放的研究^[12,13], 受各种条件制约, 对于 3 种主要温室气体的同时连续观测相对较少. 仅有日本学者 Inubushi 等曾在加里曼丹南部的热带泥炭沼泽地, 进行过 3 种温室气体的季节变化动态的研究^[14].

三江平原是我国淡水沼泽湿地分布面积最大的地区, 近年来由于人类活动的影响, 农业生产过程中流失的氮素随大气沉降、地表径流等途径进入湿地中, 打破了湿地生态系统原有的物质循环和能量平衡过程^[15], 影响到其原来的温室气体排放. 本研究通过对该区典型沼泽地连续 3a 的野外原位观测试验, 探讨 3 种主要温室气体 (CO₂, CH₄ 和 N₂O) 的季节和年际变化动态及其主要环境影响因子, 以及在外源氮素输入的条件下排放通量的变化, 以期对沼泽湿地碳管理提供基础资料.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取三江平原有代表性的别拉洪河与农江河河间地带, 区内分布有大面积的天然沼泽湿地及由湿地垦殖而成的农田. 试验主要布置在区内中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站沼泽湿地综合试验场内 (47°35' N, 133°31' E), 试验场设有自动气象站和湿地小气候自动观测系统. 本区海拔 55~65m, 属温带大陆性季风气候, 年均气温 1.9℃, 1 月平均气温 -21℃, 7 月平均气温 22℃, 年均降雨量 550~600mm, 无霜期 125d 左右. 观测场分布有多种类型的草本沼泽和沼泽化草甸, 主要湿地类型为常年积水型毛果苔草沼泽和季节性积水型小叶章湿地, 主要植被类型有毛果苔草 (*Carex lasiocapa*), 乌拉苔草 (*Carex meyeriana*) 和小叶章 (*Doyeuxia augustifolia*) 等. 主要土壤类型为草甸沼泽土和泥炭沼泽土.

1.2 样品采集与分析

CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体的采集用静态暗箱-气相色谱法. 采样箱采用标准式组合设计, 由箱体、加长箱和底座 3 部分组成. 箱体和加长箱的规格为 50cm

× 50cm × 50cm, 底座为 20cm × 50cm × 50cm, 采集气体样品时各部分之间均用水密封. 采样箱外用棉被包裹以确保采样时箱内温度变化不大, 箱内装有搅气小风扇、温度传感器及采气三通阀, 样品采集用 100mL 注射器, 在 30min 时间段内每 10min 采集 1 次气体样品 (每次共采集 4 个气体样品). 样品采集后 12h 内, 在实验室用 Agilent4890 气相色谱仪同时分析 CO₂、CH₄ 和 N₂O 气体浓度, 并计算气体排放通量^[16]. 30min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在线性相关的关系, 所有样品的相关系数均在 $R^2 > 0.95$ 时视为有效.

为防止扰动, 在观测点附近架设栈桥. 自 2002-06~2004-12 连续 3a 对沼泽湿地 3 种气体通量同步进行观测. 每个观测点设置 3 个重复, 取平均得到标准误差. 同时记录箱内温度、土壤温度、水温及水深等环境要素. 为探讨 CO₂、CH₄、N₂O 排放对氮素输入响应, 另选取相同大小的 3 个重复样地 (称为氮输入处理), 每隔 2 周以水溶液的形式模拟外源氮素输入 1 次 (外源氮素每时每刻都在输入, 故时间和频率都尽量均匀以便更接近实际), 整个生长季累计施氮 24g·m⁻². 氮输入处理试验点周围用 PVC 板进行防护, 以防止氮素的流失对周围环境的影响, 样品采集与分析采用与以上相同的方法.

2 结果与分析

2.1 环境因素

研究区 5cm 土壤温度连续 3a 的季节变化动态及其相似, 呈现出明显的正态曲线形状分布 (图 1). 最高值都是出现在夏季的 6、7 月份, 最低值出现在冬季的 3 个月内. 其中, 2002 年的最高值 (19.88℃) 和最低值 (-12.79℃) 分别出现在 2002-07-20 和 2002-01-02, 2003 年最高值 (21.40℃) 和最低值 (-12.89℃) 分别出现在 2003-06-23 和 2003-01-01, 2004 年的最高值 (19.83℃) 和最低值 (-5.48℃) 分别出现在 2004-07-18 和 2004-01-15. 连续 3a 的记录值均表明 4 月份土壤温度开始迅速上升, 到 6、7 月份达到最大值. 连续 3a 季节变化动态极其相似, 只是最大值出现时间 2003 年与 2002 年和 2004 年相比较略有差异. 月平均温度最高值都是出现在夏季的 7 月份, 2002~2004 年 7 月的平均温度分别为 17.60℃, 18.60℃ 和 17.99℃.

2002~2004 年间, 每年月平均降水量最大值都是出现在夏季的 7、8 月 (图 2), 这一时期的降水量主要是由降雨构成, 冬季以降雪为主, 2004 年的冬

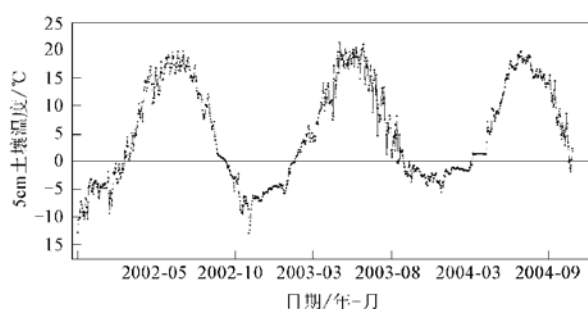


图 1 三江平原淡水沼泽湿地土壤温度年际变化(5cm)

Fig. 1 Annual variation of soil temperature (5cm) in freshwater marshes of Saijiang Plain

季降水量较前 2a 都明显增高. 2002 年和 2003 年的最大降水量都是出现在 8 月份, 2004 年由于 5 月份的降雨量和积雪融水均较大, 导致其降水量最大值出现在 5 月. 连续 3a 的月降水量分别为 39.73mm、39.41mm 和 35.96mm, 年均降水量差别不大, 但是降水季节分布差异较大. 2002 年降水量较大的主要是 4 月, 6~8 月和 10 月这几个月, 其余各月均较小. 而 2003 年降水主要集中在 8 月份, 且夏季各月降水明显高于其它月份降水量. 2004 年降水量最大值出现在 5 月, 其次是 7 月, 其余各月的降水相对较少但分布均匀, 冬季冰雪融水对全年的降水量贡献较大.

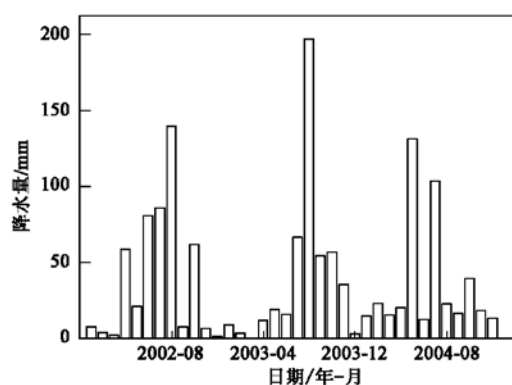


图 2 三江平原沼泽湿地分布区年际降水量变化

Fig. 2 Annual variation of precipitation in freshwater marshes of Sanjiang Plain

图 3 为连续 3a 的水位变化趋势, 2004 年的水位显著高于前 2a. 且 2004 年从 4 月份开始水位就一直上升, 较高的水位深度一直持续到 8 月底. 9 月份开始水位开始降低. 整个观测试验期间水位均显著高于前 2a.

2.2 淡水沼泽湿地温室气体通量的季节及年际变化

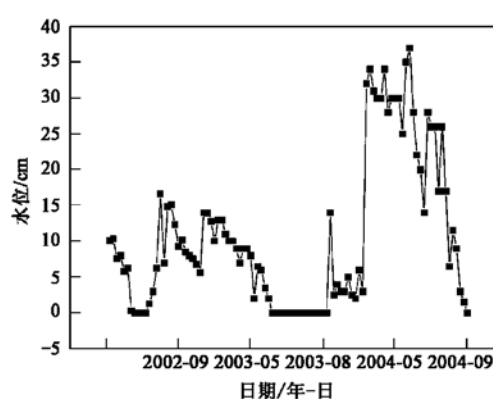


图 3 沼泽湿地积水水位年际变化

Fig. 3 Annual variation of the water table in freshwater marshes

2.2.1 沼泽湿地生态系统呼吸排放 CO₂ 通量

淡水沼泽湿地生态系统呼吸(植被呼吸+土壤呼吸)具有明显的季节变化和年际差异, 最高值都是出现在夏季温度较高降水较多的季节, 最低值都是出现在冬季的月份里(图 4). 连续 3a 的 CO₂ 排放变化范围 2.36~965.4 mg·(m²·h)⁻¹, 2003 年和 2004 年的最高值[2003 年为 779.33 mg·(m²·h)⁻¹; 2004 年为 873.65 mg·(m²·h)⁻¹]均出现在 8 月份, 最小值[2003 年为 11.07 mg·(m²·h)⁻¹; 2004 年为 2.36 mg·(m²·h)⁻¹]分别出现在 1 月和 2 月, 而 2002 年的观测是从 6 月份开始的, 故观测到的最小值[18.73 mg·(m²·h)⁻¹]出现时间(12 月)与后 2a 不太一样, 最大值[965.40 mg·(m²·h)⁻¹]出现在 7 月份. 2002 年夏季(6~8 月)的平均排放通量为 610.92 mg·(m²·h)⁻¹, 冬季(1, 2, 11, 12 月)的平均排放通量为 21.31 mg·(m²·h)⁻¹, 2003 年夏季和冬季的平均排放通量分别为 495.25 mg·(m²·h)⁻¹和 mg·(m²·h)⁻¹, 而 2004 年的分别为 498.39 mg·(m²·h)⁻¹和 31.55 mg·(m²·h)⁻¹, 连续 3a 的年均排放通量分别为 428.81 mg·(m²·h)⁻¹(2002 年), 328.53 mg·(m²·h)⁻¹(2003 年)和 281.13 mg·(m²·h)⁻¹. 可以看出 2003 年和 2004 年夏季的 CO₂ 排放通量差别不大, 而 2002 年比后 2a 的要高一些.

2.2.2 沼泽湿地 CH₄ 排放通量

CH₄ 的排放通量季节和年际变化动态与 CO₂ 相比, 差异均较大(图 5). 其中, 2002 年和 2004 年的 CH₄ 排放通量都是呈较明显的单峰型变化趋势, 而 2003 年 CH₄ 排放通量则出现 2 个较明显的峰. 连续 3a 的观测时间内各月平均排放速率如表 1 所示, 可以看出 2004-06~2004-09 每月的平均排放速率均

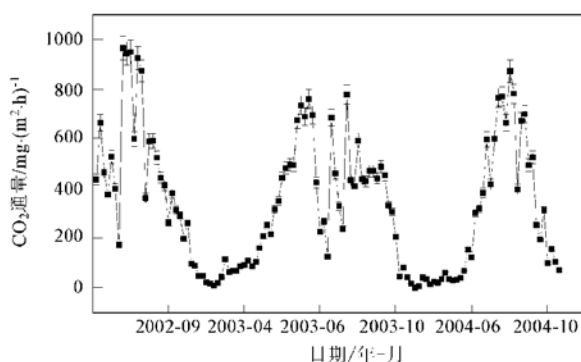


图 4 沼泽湿地生态系统呼吸 CO_2 排放通量年际变化
Fig. 4 Annual variation of ecosystem respiration emission from the freshwater marshes

远高于前 2a 这 4 个月的月均排放速率. 但是 CH_4 排放通量的极值出现的时间与 CO_2 排放通量的极值出现的时间较一致, 都是夏季出现极大值, 冬季出现极小值. 其中夏季 (6~8 月) 的 CH_4 平均排放通量

表 1 连续 3a 每月的 CH_4 平均排放速率/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

Table 1 Mean monthly CH_4 emission of the three years/ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

年份	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	—	—	—	—	—	10.30	7.92	16.17	13.25	6.54	1.11	0.59
2003	0.54	0.45	0.66	2.39	6.07	5.78	1.94	13.06	9.34	5.30	2.28	0.71
2004	0.19	0.25	0.15	0.49	2.32	11.79	25.22	23.90	14.18	2.81	-0.04	—

5cm 土壤温度与 CH_4 排放存在一定的指数相关关系 (图 6), $y = 2.9404e^{0.0912x}$ ($R^2 = 0.618$, $n = 84$), 但相关性不如 CO_2 显著, 表明温度也是影响沼泽湿地 CH_4 排放的因素之一. 2003 年第 1 个 CH_4 峰的出现 4~6 月, 可能跟该时期土壤温度较高以及冻融期的融冻作用有关.

2.2.3 沼泽湿地 N_2O 排放通量

与 CO_2 和 CH_4 相比较, 沼泽湿地 N_2O 的排放

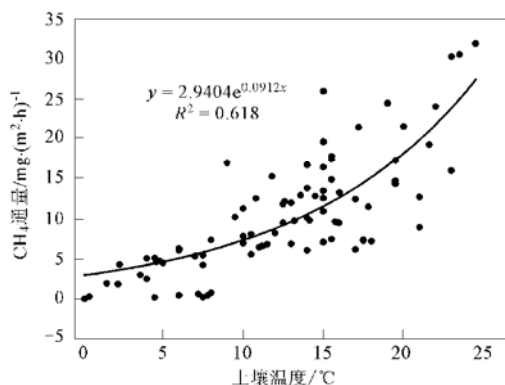


图 6 沼泽湿地 CH_4 排放通量与土壤温度 (5cm) 的关系
Fig. 6 Relationship between soil temperature (5cm) and CH_4 flux from the freshwater marshes

比较 2004 年 [$18.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 2002 年 [$12.22 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$] > 2003 年 [$6.87 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 跟 CO_2 的夏季平均排放通量年际变化略有差异.

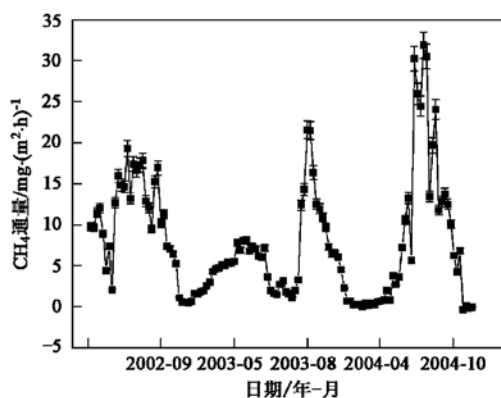
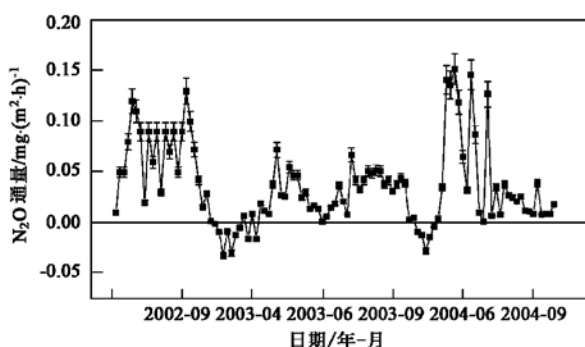


图 5 沼泽湿地 CH_4 排放年际变化

Fig. 5 Annual variation of CH_4 emission from freshwater marshes

通量季节变化规律性不显著 (图 7), 但年际差异较显著, 且冬夏季的季节变化较分明. N_2O 的排放通量值较小但变化较大 [$-0.032 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 每年的冬季都表现为较弱的 N_2O 吸收, 表明三江平原沼泽湿地冬季是 N_2O 的汇. 但通过全年的均值来看, 仍然表现为 N_2O 的源, 其中 2002 年的平均排放速率为 $0.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 2003 年和 2004 年分别为 $0.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.04 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 年均值的平均排放通量年际差异变化趋势与 CH_4 的变化趋势一致. 但极值出现的时间跟 CO_2 和 CH_4 的略有差异, 2002 年的 N_2O 排放最大值出现在 9 月份, 而 2003 年和 2004 年的排放最大值均出现在 5 月份, 体现出 N_2O 排放的无规律性. 由图 7 还可以看出, 2003 年夏季 N_2O 的排放通量与 2002 年和 2004 年比较明显偏低. 与降水和积水水位的变化趋势较一致, 表明其年际变化主要是由降水和积水水位决定. 而其排放通量的季节变化受温度的影响较大一些.

2.3 氮输入影响下淡水沼泽生态系统呼吸和 CH_4 , N_2O 通量的变化

图 7 沼泽湿地 N₂O 排放年际变化Fig. 7 Annual variation of N₂O flux from the freshwater marshes

氮输入后淡水沼泽湿地 3 种温室气体月均排放速率发生的变化(表 2), 表现为氮输入后, 3 种温室气体通量均有显著提高. 与对照处理相比较, CO₂, CH₄ 和 N₂O 分别升高了 34%, 145% 和 110%. 其中, 生态系统总呼吸导致的 CO₂ 排放通量在氮素输入的最初 1 个月内没有显著变化, 2 种处理 CO₂ 的平均排放通量分别为 885.78 mg·(m²·h)⁻¹ 和 870.8 mg·(m²·h)⁻¹, 并没有受到氮输入的显著影响(95% 置信度的 *t* 检验, *p* = 0.93). 但在以后的几个月内, 氮素输入处理的 CO₂ 排放量远远高于对照处理(表 2). 7~9 月份氮输入处理的 CO₂ 平均排放量与对照处理相比分别升高了 26%, 54%, 49%, 远高于对照处理(在 95% 置信度的 *t* 检验, *p* < 0.01). 整个生长季的均值分别为 983.28 mg·(m²·h)⁻¹ 和 1319 mg·(m²·h)⁻¹, 表明氮输入处理的 CO₂ 排放强度远远高于对照处理(95% 置信度的 *t* 检验, *p* = 0.007). 与 CO₂ 不同, 氮输入开始就极大的促进了 CH₄ 的排放, 进入 8、9 月份以后氮素对其影响反而不显著(表 2). 氮输入对 CH₄ 排放影响最明显的时期是 6、7 月份, 与对照处理相比分别升高了 88% 和 329%, 表明氮输入在 6、7 月极大的促进了 CH₄ 排放. 而 8、9 月份, 2 种处理的 CH₄ 排放通量差别不大, 尤其是 9 月份以后, 2 种处理均表现出 CH₄ 的吸收现象而不是排放. 而氮输入对 N₂O 影响最明显的时期是 7 月份, 其排放速率与对照处理相比升高了 661%. 虽然和 CH₄ 一样氮输入从开始就促进了 N₂O 的排放, 但其促进作用与 CH₄ 相比不明显. 其中 6 月份氮输入处理的 N₂O 排放通量与对照处理相比仅提高了 28%, 8 月份与对照处理相比提高了 37%. 6~8 月份氮输入对 N₂O 排放均表现出促进的作用, 而 9 月份的 N₂O 排放与对照处理比较反而有降低的趋势. 除 CO₂ 外, CH₄ 和 N₂O 排放对氮输

入的响应在 9 月份均表现出降低的趋势, 与对照处理相比分别降低了 20% 和 1.4%.

表 2 氮输入后沼泽湿地 3 种主要温室气体月均

排放通量/mg·(m²·h)⁻¹Table 2 Effects of nitrogen fertilization on the mean monthly emission of the three greenhouse gases/mg·(m²·h)⁻¹

月份	CO ₂		CH ₄		N ₂ O	
	对照处理	氮输入处理	对照处理	氮输入处理	对照处理	氮输入处理
6	885.78	870.80	15.13	28.52	0.15	0.19
7	1321.23	1668.53	4.22	18.12	0.04	0.34
8	1096.51	1683.98	1.82	2.15	0.15	0.20
9	719.83	1069.15	0.06	0.05	0.05	0.05

3 讨论

用静态暗箱-气相色谱法测定的生态系统 CO₂ 排放通量, 包括植物、根系、土壤微生物呼吸 3 部分, 即生态系统总呼吸导致的 CO₂ 排放通量^[17]. 气候、植被和土壤过程在不同时期对 CO₂ 排放产生不同的影响^[18]. 土壤温度和湿度是影响土壤微生物反应的 2 个重要因素, 包括微生物异养呼吸和植物根系呼吸产生 CO₂ 的过程^[13]. 因此, 降水量增加和温度升高能提高 CO₂ 的排放量, 故沼泽湿地生态系统呼吸排放通量夏季明显大于其它季节. 这同时也反映了植物生长状况对 CO₂ 排放有重要影响^[16]. 5cm 土壤温度和生态系统呼吸排放 CO₂ 存在显著的相关关系(图 8), 二者拟合符合 Arrhenius 方程^[19~24], 相关方程为: $y = 132.817e^{0.0866x}$ ($R^2 = 0.6704$, $n = 86$). 氮素输入后 CO₂ 排放通量显著增大, 尤其是在植物生长旺盛的 7、8 月份. 表明温度、降水和营养元素(N)等均影响 CO₂ 的排放, 且温度条件是影响其季节变化的主要因素. 温度升高能够促进北方土壤中储存的大量碳的分解^[25], 增强有机营养元素的矿化作用^[26]. 已有研究表明, 分解速率在受温度影响的同时还受到土壤基质和排水状况等其它因素的影响^[18]. 在湿草甸冻原(wet meadow tundra)区, 土壤呼吸在水位较低的情况下随着温度升高而有显著升高^[27]. 在北方泥炭沼泽地区, 生态系统呼吸与温度变化存在强相关关系但对水位的变化反映也很敏感^[28]. 土壤有机质分解时, 原来有机形式的营养成分被矿化成容易被植物吸收的无机养分的形式^[29]. 因此, 氮素输入后, 夏季较高的温度和水分条件有利于微生物活性的提高和土壤有机质分解, 更多的养分被植物吸收利用, 促进了植物生长, 因而生态系统总呼吸排放的 CO₂ 增多. 故氮素输入后 7、8 月份 CO₂ 排放通量显著高于其他月份. 即温度、水分和营养元素相

互影响植物的生长和土壤微生物过程以及有机质的矿化分解,共同对 CO_2 排放起了促进作用。

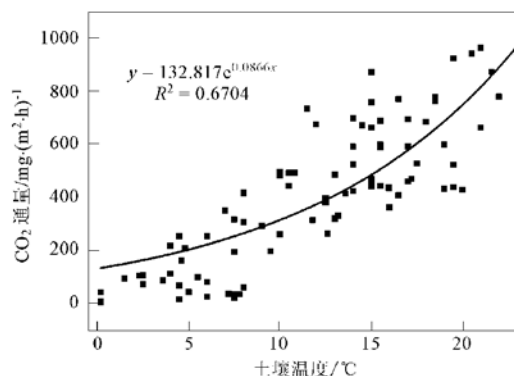


图 8 沼泽湿地 CO_2 排放通量与土壤温度(5cm)的关系

Fig. 8 Relationship between soil temperature(5cm) and ecosystem respiration in freshwater marshes

CH_4 排放的季节变化主要受水分条件限制^[30], 且与水位深度变化表现出较显著的一致性(图 3, 图 5). 这与 CH_4 产生需要极端的厌氧条件一致. 故 CH_4 的排放高峰出现在夏季降水较多的月份或者是春末沼泽湿地淹水较深的时期(图 5). 这跟前人的研究结论 CH_4 的产生与水深存在一定的相关关系一致^[30, 31], 跟以前的研究结论 CH_4 排放与水位深度呈显著的指数相关关系一致^[18]. 2003 年出现 2 个明显的 CH_4 排放峰, 跟峰值期间的水位和降水量较大有关(图 2, 图 3), 其中第 1 个峰值的出现主要与冻融期的融冻现象有关^[32]. 2004 年夏季 CH_4 的排放通量远高于前 2a 夏季的 CH_4 排放通量, 笔者通过分析观测的气候数据还发现 2004 年冬季的冰雪融水远高于前 2a, 而 3a 的夏季降水量以及年均降水量差别均不大. 表明, 在降水量中对夏季 CH_4 排放起主要作用的是冬季降雪融水而不是夏季本身的降雨量. 且 3a 的年均温度值变化不大, 而降水和积水水位差异较大, 表明, 温度主要影响其排放的季节变化差异, 而降水和积水水位变化影响其排放的年际变化差异. 氮输入后 CH_4 排放通量显著增大, 尤其是沼泽植物迅速生长的 6、7 月份(表 2). 主要是由于温度适宜, 同时施入了氮肥, 充足的有机质分解产物为产 CH_4 过程提供了丰富的反应底物, 同时迅速增大的生物量引起的茎密度增大也加速 CH_4 的传输^[31], 从而产生并排放出更多的 CH_4 . 也可能由于氮输入导致沼泽植物根系生长和根系分泌物功能增强, 根系生物量和分泌物在土壤中积累, 使沼泽植物根际产甲烷菌的有效底物也相应增加, 从而促进了产甲烷菌的代谢活动, 增加了 CH_4 排放量. 可以

看出, 沼泽湿地 CH_4 排放通量受温度和水文条件的综合影响, 氮输入后这种作用更加明显.

土壤中 N_2O 的产生和排放主要来源于微生物的硝化和反硝化过程, 土壤温度升高和 N 利用率增加都会促进 N_2O 的产生和排放^[33]. O_2 供应充足, 则硝化的最终产物是 NO_3^- , 同样 O_2 供应过低, 严格的厌氧环境则使反硝化作用进行彻底生成 N_2 ^[34]. 在沼泽湿地连续 3a 的观测, 生长季与非生长季、冻融与融冻期的交替过程中, 若正好有一时期的土壤湿度导致了同时适宜硝化和反硝化过程产生 N_2O 的 O_2 供给状况, 就会引起显著的 N_2O 排放^[35]. 所以表现出 N_2O 排放的季节变化规律性没有 CO_2 和 CH_4 明显, 且 N_2O 与 5cm 土壤温度关系不显著. 冬季观测到的几乎是 N_2O 的吸收现象, 可能与冬季的积雪深度有关(主要是观测期内积雪深达 50cm, 较以往年份高). 而夏季的排放量较大(图 7). 表明湿地水分状况是决定 N_2O 季节变化的主要因素. 另外, 氮素输入后 N_2O 排放通量也明显增大(表 2), 可能的原因有 4 个: ①增加氮会刺激作物生长, 植株特别是根生物量积累增加, 有助于土壤微生物从根获得更多的 C 源作为反硝化所需能量, 促进 N_2O 的排放; ②氮输入促进沼泽湿地植物的生长和生物量积累^[14], 由此而对 N_2O 排放产生影响; ③氮输入土壤微生物活性提高, 促进了硝化和反硝化作用, 促使一部分氮以 N_2O 的形式排放; ④氮输入还可能导致沼泽湿地植株中 N 供给过剩, 使植物直接排放的 N_2O 量增加.

4 结论

(1) 淡水沼泽湿地生态系统呼吸 CO_2 排放通量与 5cm 土壤温度呈显著的指数相关关系, 生长季排放通量最高, 冬季也有 CO_2 排放. 氮素输入后呼吸通量显著增大.

(2) 淡水沼泽湿地是 CH_4 的源, 氮输入后 CH_4 排放通量增大. 土壤温度和水文条件是决定 CH_4 排放的主要影响因子, 两者相互制约共同影响湿地 CH_4 的排放. 冬季的冰雪融水直接影响到夏季的 CH_4 排放强度.

(3) 温度条件是影响淡水沼泽湿地生态系统呼吸和 CH_4 排放通量季节性变化的主要因子, 而降水和积水水位变化是影响其排放年际变化的关键因素.

(4) 冬季三江平原沼泽湿地是 N_2O 的汇, 随着融冻期的到来逐渐变成 N_2O 的源. N_2O 排放与土壤

温度相关关系不明显,水分状况是影响 N_2O 季节变化的主要因素。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 1995 [A]. the Science of Climate Change. In: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as main determinant of carbon balance in European forests [J]. *Nature*, 2000, **404**: 861~ 865.
- [3] 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 [J]. *Ecosystems*, 2003, **6**: 353~ 367.
- [4] Alm J, Schulman L, Walden J, *et al.* Carbon balance of a boreal bog during a year with an exceptionally dry summer [J]. *Ecology*, 1999, **80**(1): 161~ 174.
- [5] Baron J S, Hartman M D, Band L E, *et al.* Sensitivity of a high-elevation Rocky Mountain watershed to altered climate and CO_2 [J]. *Water Resource Res.*, 2000, **36**(1): 89~ 99.
- [6] Braaten W, Steffen W. The terrestrial biosphere and global change: implications for natural and managed ecosystems, A synthesis of GCTE and related research [A]. In: IGBP science, No. 1 [C]. 1997. 20~ 23.
- [7] 于贵瑞,李海涛,王绍强. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [8] 董云社,章申,齐玉春,等. 内蒙古典型草地 CO_2 , N_2O , CH_4 通量的同时观测及其日变化 [J]. *科学通报*, 2000, **45**(3): 318~ 322.
- [9] Frohking S, Roulet N T, Moore T R, *et al.* Modeling seasonal to annual carbon balance of Mer Bleue Bog, Ontario, Canada [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2002, **16**(3): 41~ 421.
- [10] Bubier J. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO_2 chambers [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2003, **17**(2): 351~ 3515.
- [11] Roehm C L, Roulet N T. Seasonal contribution of CO_2 fluxes in the annual C budget of a northern bog [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2003, **17**(1): 291~ 299.
- [12] Bubier J. A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2005, **19**: 1~ 11.
- [13] Bartlett K B, Crill P M, Sass R L, *et al.* Methane emissions from tundra environments in the Yukon-Kuskokwim delta, Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(16): 645~ 660.
- [14] Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, *et al.* Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**: 603~ 608.
- [15] 宋长春,张金波,张丽华. 氮素输入影响下淡水湿地碳过程变化 [J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(11): 1243~ 1249.
- [16] 宋长春,阎百兴,王跃思,等. 三江平原沼泽湿地 CO_2 和 CH_4 通量及影响因子 [J]. *科学通报*, 2003, **48**(23): 2473~ 2477.
- [17] Turetsky M R, Wieder R K, Vitt D H. Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**: 907~ 912.
- [18] Hobbie S E, Nadelhoffer K J, Hogberg P. A synthesis: The role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions [J]. *Plant and soil*, 2002, **242**: 163~ 170.
- [19] 郑循华,徐仲均,王耀思,等. 开放式空气 CO_2 浓度增高影响稻田-大气 CO_2 净交换的静态暗箱法观测研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(10): 1240~ 1244.
- [20] Longdoz B, Yernaux M, Aubinet M. Soil CO_2 efflux measurement in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution [J]. *Global Change Biology*, 2000, **6**: 907~ 917.
- [21] Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **83**: 140~ 170.
- [22] Chen W J, Black T A, Yang P C, *et al.* Effect of climatic variability on the annual carbon sequestration by a boreal aspen forest [J]. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 41~ 53.
- [23] Hollinger D Y, Kelliher F M, Schulze E D, *et al.* Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **90**: 291~ 306.
- [24] Wang H M, Saigusa N, Yamamoto S, *et al.* Net ecosystem CO_2 exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(40): 7021~ 7032.
- [25] Post W M. Report of a workshop on climate feedbacks and the role of peatlands, tundra and boreal ecosystems in the global carbon cycle [R]. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1990.
- [26] Shaver G R, Billings W D, Chapin F S, *et al.* Global change and the carbon balance of arctic ecosystems [J]. *BioScience*, 1992, **42**: 433~ 441.
- [27] Billings W D, Luken J O, Mortensen D A, *et al.* Arctic tundra: a source or sink for atmospheric carbon dioxide in a changing environment? [J]. *Oecologia*, 1982, **53**: 7~ 11.
- [28] Updegraff K, Bridgman S D, Pastor J, *et al.* Response of CO_2 and CH_4 emissions from peatlands to warming and water table manipulation [J]. *Ecol. Appl.*, 2001, **11**: 311~ 326.
- [29] Rastetter E B, Nadelhoffer K J, Giblin A E. Biomass accumulation and CO_2 flux in wet sedge tundra: Responses to nutrients, temperature and light [J]. *Ecol. Monogr.*, 1998, **68**: 75~ 97.
- [30] Bubier J L. The relationship of vegetation to methane emission and hydrochemical gradients in northern peatlands [J]. *Journal of Ecology*, 1995, **83**: 403~ 420.
- [31] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H, *et al.* Effects of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 5149~ 5157.
- [32] 宋长春,王毅勇,王跃思,等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放动态 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 7~ 12.
- [33] Sommerfeld R A, Mosier A R, Messelman R C. CO_2 , CH_4 and N_2O flux through a Wyoming snowpack and implications for global budgets [J]. *Nature*, 1993, **361**: 140~ 142.
- [34] Parton W J, Mosier A R, Ojima D S, *et al.* Generalized model for N_2 and N_2O production from nitrification and denitrification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(3): 401~ 412.
- [35] 郑循华,王明星,王跃思,等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放 [J]. *大气科学*, 1997, **21**(2): 231~ 237.