

三江平原生长季沼泽湿地 CH₄、N₂O 排放及其影响因素

杨继松^{1,2} 刘景双¹ 王金达¹ 于君宝¹ 孙志高^{1,2} 李新华^{1,2}

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

摘要 2003年6~9月采用静态箱-气相色谱法,对三江平原生长季不同淹水条件下沼泽湿地 CH₄、N₂O 的排放进行了同步对比研究,并探讨了影响气体排放的主要影响因素。结果表明,生长季沼泽湿地 CH₄ 和 N₂O 排放具有明显的时空变化特征。长期淹水的毛果苔草 (*Carex lasiocarpa*) 和漂筏苔草 (*Carex pseudocuraica*) 植物带 CH₄ 的平均排放强度分别为 259.2 和 273.6 mg·m⁻²·d⁻¹, 高于季节性淹水的小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 植物带的排放强度 (38.16 mg·m⁻²·d⁻¹) ($p < 0.0001$), 而生长季 N₂O 的平均排放强度分别为 0.969、0.932 和 0.983 mg·m⁻²·d⁻¹, 植物带间无显著差异 ($p = 0.967$)。相关分析表明,气温和 5 cm 深地温对沼泽湿地 CH₄ 生长季排放通量的影响较大,而水位则是影响长期淹水沼泽 N₂O 排放通量的主要因素,不同类型湿地间 CH₄ 平均排放强度的差异主要受水位的控制,而强烈的还原环境可能是导致不同类型湿地具有近似的 N₂O 排放强度的原因。

关键词 CH₄ N₂O 生长季 植物带 沼泽湿地 三江平原

EMISSIONS OF CH₄ AND N₂O FROM A WETLAND IN THE SANJIANG PLAIN

YANG Ji-Song^{1,2} LIU Jing-Shuang¹ WANG Jin-Da¹ YU Jun-Bao¹ SUN Zhi-Gao^{1,2} and LI Xin-Hua^{1,2}

(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)

Abstract In order to understand more about mechanisms of and factors that influence CH₄ and N₂O production in wetlands, fluxes of CH₄ and N₂O were measured using static-chamber and gas-chromatography methods in a marsh wetland, located at the Honghe Farm in eastern part of Heilongjiang Province, China (47°35'17.8" N, 133°37'48.4" E), from June to September, 2003. Three plant communities, *Carex pseudocuraica*, *Carex lasiocarpa* and *Deyeuxia angustifolia*, were selected to measure fluxes of CH₄ and N₂O to contrast the variance of the emission rates of both greenhouse gases in these different plant zones. Air temperature and soil temperature at 5 cm depth, soil redox potential (0–100 cm), and standing water depth at each site also were measured to determine the main factors that control CH₄ and N₂O emissions within and among plant zones.

The wetland was a source of both CH₄ and N₂O during the growing season and emissions showed conspicuous temporal and spatial variations. Similar temporal variations of CH₄ and N₂O fluxes were observed in the *C. pseudocuraica* and *C. lasiocarpa* sites. Emission rates of CH₄ were higher in July and August while emissions of N₂O were higher in July and September. However, the highest emissions of CH₄ and N₂O in the *C. angustifolia* site occurred about one month earlier than in the *C. pseudocuraica* and *C. lasiocarpa* sites. The highest CH₄ emissions observed in the wetland were in the *C. pseudocuraica* site on July 19 with a rate of 696.24 mg·m⁻²·d⁻¹, and the highest N₂O emissions were in the *D. angustifolia* site on June 12 with a rate of 2.53 mg·m⁻²·d⁻¹. The average CH₄ flux from the *C. pseudocuraica* site was 273.6 mg·m⁻²·d⁻¹, the highest among the three sites over the growing season but was not significantly different from 259.2 mg·m⁻²·d⁻¹ of the *C. lasiocarpa* site. However, both were significantly higher than the 38.16 mg·m⁻²·d⁻¹ measured in the *D. angustifolia* site ($p < 0.0001$). These results showed that average CH₄ fluxes in submerged wetlands were higher than in seasonal wetlands. N₂O fluxes from the *C. pseudocuraica*, *C. lasiocarpa* and *D. angustifolia* sites were not significantly different ($p = 0.967$) with an average flux of 0.969, 0.932 and 0.983 mg·m⁻²·d⁻¹, respectively, suggesting that submerged and seasonal wetlands had similar rates of N₂O emissions.

Air temperature, soil temperature, soil redox potential and standing water depth were important factors in-

fluencing emission rates of CH₄ and N₂O from the wetlands. Relationship analysis showed that CH₄ fluxes were correlated weakly with air temperature and soil temperature at 5 cm depth within a site ($0.201 < r < 0.560$) but not correlated with standing water depth ($0.100 < r < 0.176$). Strong correlations were found between N₂O fluxes and standing water depth ($r_1 = -0.701$; $r_2 = -0.528$), but no correlation between N₂O fluxes and air temperature and soil temperature at 5 cm depth in the *C. pseudocuraica* and *C. lasiocarpa* sites ($-0.089 < r < 0.211$) was found. However, in the *D. angustifolia* site, there were no correlations between N₂O fluxes and the three factors ($r < 0.344$). These results indicated that temperature was more important in influencing CH₄ emissions in the seasonal and submerged wetlands whereas standing water depth was more important in influencing N₂O emissions in the submerged wetlands. Furthermore, standing water table was the main control of the difference in CH₄ emissions among plant zones. However, there appeared to be similar rates of N₂O emissions among plant zones in the wetlands with strongly anaerobic conditions.

Key words CH₄, N₂O, Growing seasons, Plant zones, Wetland, Sanjiang Plain

CH₄ 和 N₂O 是大气中重要的温室气体,其分子增温潜势分别高出 CO₂ 21 和 290 倍(Lloyd, 1995),目前,大气中 CH₄ 和 N₂O 的浓度分别为 1.72 和 0.312 μmol·mol⁻¹,并以每年 0.6% 和 0.2%~0.3% 的速率增长(Simpson *et al.*, 1999)。CH₄ 和 N₂O 对生态环境的影响主要是能使全球气候变暖以及破坏臭氧层(Pei *et al.*, 2003),因此,近几十年来其对环境 and 气候变化的影响越来越引起人们的关注。大气中的 CH₄ 和 N₂O 有 70%~90% 来自于地表生物源(Duxberg *et al.*, 1993),而湿地(包括天然湿地和水稻田)CH₄ 的排放约占全球 CH₄ 源的 40%~50%(Whiting & Chanton, 1993),是大气 CH₄ 的主要生物排放源;有些研究者也指出,湿地中 N₂O 排放的增加是目前全球 N₂O 通量的一个重要部分(Letey *et al.*, 1981)。因此,湿地生态系统 CH₄ 和 N₂O 向大气的排放已成为科学研究的热点。

温度、水文条件是影响湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的重要环境因素。水位是影响湿地 CH₄ 排放的重要因素,它决定了湿地土壤的厌氧度及氧化带的深度(Moore & Dalva, 1993),而土壤的水分状况不仅影响土壤 N₂O 的生成量,也极大地影响了 N₂O 向大气的传输速率(刘景双等, 2003)。土壤温度是限制分解过程,特别是 CH₄ 生成的主要因素(Sorrell *et al.*, 1997);同时温度又是影响微生物硝化、反硝化活性的重要因子(Smith *et al.*, 1998)。而湿地植物则是湿生环境的外在标志,其分布的差异性体现了湿地水文和湿地土壤环境的分异。三江平原湿地是我国最大的沼泽湿地集中、连片分布区,各类湿地总面积达 83.5×10^4 hm²(李颖等, 2002)。已有的研究表明,该湿地生长季是一个 CH₄ 排放源和 N₂O 可能的汇,土壤温度、水位和氧化还原电位是影响两种温室气体的重要影响因素,但缺少 CH₄ 和 N₂O 排放的同步

观测,而且对于影响不同类型湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的主导环境因子的确定还不十分清楚。本文通过对沼泽湿地生长季不同植物带 CH₄ 和 N₂O 排放的对比研究,探讨影响不同植物带 CH₄、N₂O 排放的主要环境要素,以期深入认识沼泽湿地温室气体排放的特征及主导因子的影响,有助于进一步揭示 CH₄ 和 N₂O 产生和排放的机理。

1 试验材料与方法

1.1 研究样点的选取

研究区选在三江平原腹地典型沼泽湿地分布区,区内海拔高度 55.4~57.9 m,属北温带湿润大陆性季风气候,1 月平均气温 -18~-21 °C,7 月平均气温 21~22 °C,年均温 1.6~1.9 °C。冰冻期达 5 个月,最深冻深达 1.9 m。年降水量 565~600 mm,60% 以上集中在 6~8 月,年蒸发量 542.4~580 mm。气体观测试验布置在黑龙江省东北部的洪河农场内的一处碟型沼泽洼地内(47°35' 17.8" N, 133°37' 48.4" E),距离中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站 10.9 km,面积 20 hm²。该沼泽洼地的植被类型及其分布特征与三江平原沼泽湿地生态试验站极其类似,在三江平原沼泽湿地类型中颇具代表性。分布的主要植物群落类型为小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)、毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)和漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)。主要优势植物群落围绕洼地中心沿不同的水分梯度带由中心到边缘呈环带状分布(图 1)。土壤类型依次为泥炭沼泽土和草甸沼泽土。各群落带 0~25 cm 土壤理化性质及植物地上最大生物量见表 1。

在碟形沼泽洼地区,依据地表淹水状况依次选取 3 个观测点,即处于洼地边缘,季节性淹水的小叶章植物带(A);靠近洼地中心,长期淹水的毛果苔草

表 1 不同植物带 0~25 cm 土壤化学性质及植物地上生物量
Table 1 Chemical properties of soils(0~25 cm) and above-ground biomass in different plant zones

群落类型 Plant type	有机碳 Organic carbon (%)	全氮 Total nitrogen (%)	植物地上生物量 Above-ground biomass (g·m ⁻²)
漂筏苔草 <i>Carex pseudocuraica</i>	21.30	1.55	494.2
毛果苔草 <i>C. lasiocarpa</i>	19.56	1.67	540.8
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	11.97	0.55	716.4

植物带(B),位于洼地中心,长期淹水的漂筏苔草植物带(C)(图1)。

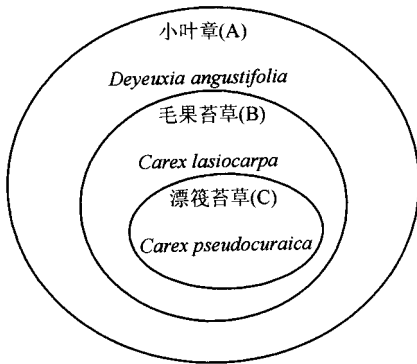


图 1 碟形洼地植物群落分布示意图

Fig. 1 Distribution of plant communities in the freshwater marsh

1.2 研究方法

采用静态箱-气相色谱法测定 CH₄、N₂O 的气体通量。已往的研究发现,使用透明箱均出现了明显的温室效应,箱内外温差可达 5~8 °C(刘景双等, 2003)。为了降低静态箱内外温度的差异,本试验中采用暗箱采样。气体采集箱材质为不透明 PVC 板(厚度 3 mm),外刷白漆并罩两层白布,内置搅气小风扇和采气三通阀。箱体底面积为 50 cm × 50 cm,高为 50 cm。为了防止采样时箱内的气体不外泄,采样前一周在各观测点埋入不锈钢底座,采样时将采样箱扣在底座的水槽里并加水密封。采样期为 2003 年 6 月 1 日至 9 月 27 日,每周观测 1 次。样品采集用 100 ml 医用玻璃注射器(注射嘴安装有采气三通阀),在 30 min 时段内,每 10 min 通过采样箱上的采气三通阀抽取箱内气体 100 ml。采集的气体通过采气三通阀注入铝塑复合气袋(化工部大连光明化工研究所生产,1L),密封储存。采集气体样品的同时原位同步测定气温、箱温、5 cm 地温以及各观测点水位。

气体采集后一周内在中国科学院三江平原湿地生态试验站完成对样品中 CH₄ 及 N₂O 气体浓度的分析。气体用配有⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD)的岛

津 GC-14A 气相色谱仪测定。利用下列公式计算气体通量(宋长春等, 2003):

$$J = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H$$

式中, J 为气体通量(mg·m⁻²·h⁻¹), $\frac{dc}{dt}$ 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率, M 为被测气体的摩尔质量, P 为采样点气压, T 为采样时绝对温度, V_0 , P_0 , T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积、空气气压和绝对温度, H 为水面以上采样箱高度。

2 结果与分析

2.1 生长季沼泽湿地 CH₄ 排放特征

生长季沼泽湿地不同植物带在整个观测期内 CH₄ 排放通量均具有明显的季节变化(图 2a)。由于 3 种植物带所处湿地类型水文条件的差异, CH₄ 排放通量的特征各异。主要体现在两个方面: 1) CH₄ 排放通量随时间的变化特征不同。6 月, 长期淹水的 B 和 C 带 CH₄ 的排放通量逐渐增大, 7、8 月是 CH₄ 高排放的集中期, 其通量分别达到最高值 696.24 和 530.4 mg·m⁻²·d⁻¹; 9 月 CH₄ 的排放通量较低。季节性淹水的 A 带 CH₄ 排放通量在 6 月同样有一个逐渐增大的过程, 至 7 月初达最大排放值 204.96 mg·m⁻²·d⁻¹, 之后通量迅速降低, 8 月底降至最小为 1.34 mg·m⁻²·d⁻¹, 之后的 9 月又出现一个较小的排放峰。总体看来, A 带 CH₄ 的高排放期主要集中在 6 月底至 7 月初, 较 B 和 C 带有所提前, 而持续的时间明显小于前两者。2) 群落类型不同, 其排放强度也有很大的差异($p < 0.0001$)(表 2)。生长季 B 和 C 带的平均排放通量分别为 259.2 和 273.6 mg·m⁻²·d⁻¹, 无明显差别, 而 A 带的平均排放通量为 38.16 mg·m⁻²·d⁻¹, 分别为 B、C 带的 14.7% 和 13.9%。由此看出, CH₄ 排放强度在群落带间差异明显, 且沿洼地中心到边缘呈依次降低的趋势(表 2)。对比表 3 中所列数据发现, 本研究中 A、B 两带生长季 CH₄ 的平均排放通量分别较该地区同时期已往研究结果低 12 和 0.8 倍。根据排放变化特征,

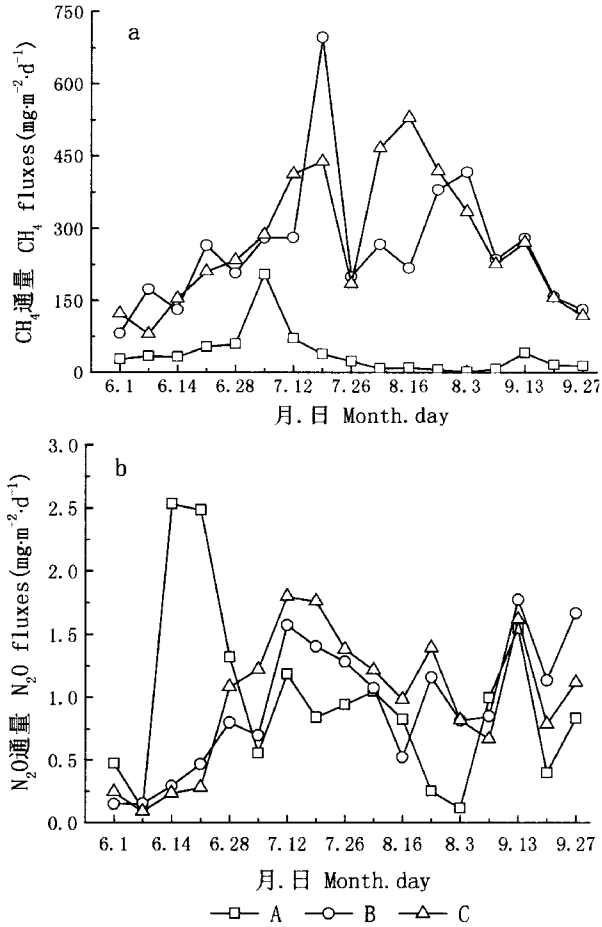


图2 沼泽湿地环状植物带 CH₄、N₂O 排放通量的季节变化
Fig.2 Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions from different plant zones in the wetland
A: 小叶章 *Deyeuxia angustifolia* B: 毛果苔草 *Carex lasiocarpa*
C: 漂筏苔草 *Carex pseudocuraica*

逐时段累加估算出 6~9 月 A、B、C 3 带 CH₄ 总排放量分别为: 4.63、32.26 和 34.26 g·m⁻²。

2.2 生长季沼泽湿地 N₂O 排放特征

图 2b 给出了沼泽湿地生长季不同植物带 N₂O 排放通量的季节变化特征。结果表明, B、C 带 N₂O 排放通量的季节变化特征较为一致, 而又与 A 带除在 6 和 8 月的中下旬差异较大外, 生长季其余时间的变化均保持较好的同步性。6 月是 B 和 C 带 N₂O 排放通量逐渐增大的时期, 于 7 月中下旬出现排放峰, 最大排放通量 1.57 和 1.80 mg·m⁻²·d⁻¹, 之后通量开始下降, 经过 8 月的相对排放低值期后, 9 月初 N₂O 又开始增加, 并于 9 月中旬再次出现 N₂O 的排放峰, 最大排放通量 1.78 和 1.62 mg·m⁻²·d⁻¹。A 带 N₂O 则在 6 月中旬出现一个持续两周的脉冲排放, 最大排放通量 2.53 mg·m⁻²·d⁻¹, 该时期总排放量占整个生长季的 1/3。8 月中下旬出现一个排放低谷, 最低值 0.116 mg·m⁻²·d⁻¹, 其余时间 A 带 N₂O 排放通量变化特征与 B、C 带几乎同步。总的来看, 3 类群落带 N₂O 排放通量都表现出“升高—降低—升高”的变化趋势, 但 A 带出现第一个排放高值区的时间要明显提前于 B 和 C 带。生长季 A、B、C 带 N₂O 的平均排放通量分别为: 0.969、0.932 和 0.983 mg·m⁻²·d⁻¹, 群落带间无明显差异 ($p = 0.967$)(表 2)。由表 3 显示, 生长季 A、B 两带 N₂O 的平均排放通量分别较已往研究结果高出 22 和 185 倍。根据通量变化特征, 逐时段累加估算出 6~9 月 A、B、C 3 带 N₂O 总排放量分别为 0.103、0.93 和 0.99 g·m⁻²。

表 2 生长季沼泽湿地不同植物带 CH₄ 和 N₂O 排放通量、5 cm 深地温、水位和不同深度氧化还原电位 (Eh) 的均值 (±SD) 及 ANOVA 分析
Table 2 Mean rates (±SD) of CH₄ and N₂O emissions, soil temperature at 5 cm depth, standing water table and redox potential of soil (Eh) at different depth of three plant zones in the wetland in growing seasons and ANOVA analysis

	CH ₄ 通量 CH ₄ flux (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	N ₂ O 通量 N ₂ O flux (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	5 cm 深地温 Soil temperature at 5 cm depth (°C)	水位 Standing water depth (cm)	氧化还原电位 Redox potential of soil (Eh) (mV)
A	38.24 ± 47.49 ^b	0.969 ± 0.708 ^a	13.8 ± 3.1 ^a	-2.9 ± 5.4 ^b	-130.2 ± 235.8 ^a
B	259.30 ± 141.98 ^a	0.932 ± 0.513 ^a	12.2 ± 2.2 ^a	16.1 ± 4 ^a	-264 ± 47.1 ^a
C	273.64 ± 137.55 ^a	0.983 ± 0.542 ^a	12.6 ± 2.5 ^a	18.8 ± 4 ^a	-315.2 ± 99.6 ^a
F	21.49	0.033	1.82	102.24	2.43
p	< 0.000 1	0.967	0.172	< 0.000 1	0.122
n	17	17	17	15	6

同一列标有不同字母的表示差异显著 Values with different letters at the same column are significantly different ($p < 0.05$) A、B、C: 同图 2 See Fig.2

2.3 不同植物带 5 cm 深地温、水位及 Eh

图 3 为生长季不同植物带相关环境因子的变化。各观测点 5 cm 深地温在 6 月初均随气温的上升逐渐升高, 至 7 月中旬达较大值后, 又随气温的下

降逐渐降低(图 3a)。由于各点所处水热条件的差异, A 带 5 cm 深地温平均高出 B、C 带 1.2~1.6 °C, 但这种差异没有达到显著水平(表 2)。3 个观测带水位的季节变化模式基本一致(图 3b): 6~7 月, 水

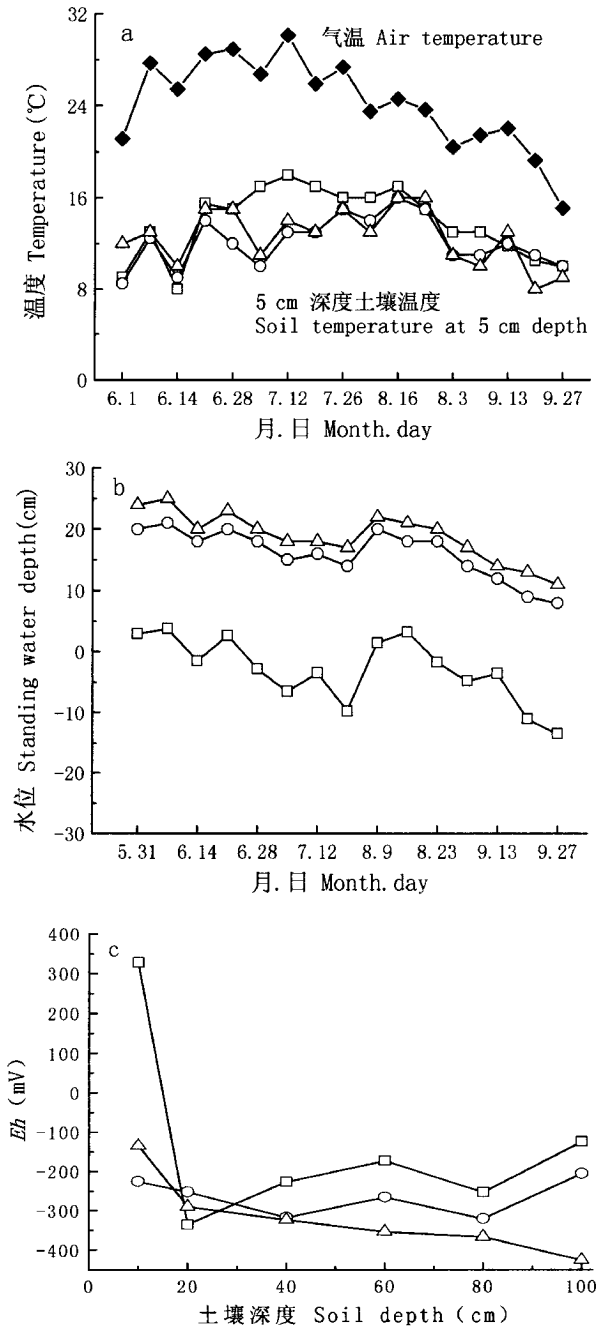


图3 各观测点气温、土壤温度(5 cm)、水位和 Eh
 Fig.3 Temperatures of air and soil at 5 cm depth, standing water depth and Eh in observed sites

Eh: 氧化还原电位 Redox potential of soil mV: 毫伏 Millivolt
 A, B, C: 同图 2 See Fig. 2

位呈下降趋势,并于7月底降至较低水位,之后,7月底至8月初又有一个迅速上升过程,其中A带水位上升13 cm,B和C带上升4 cm。8月中旬后,水位逐渐下降,9月末降至观测期最低。观测期内,B、C带平均水位比A带的平均水位高出20 cm左右,而B和C两带间的水位无显著差异(表2)。A带土

壤各深度氧化还原电位值(E_h) (在335~328 mV(CV = 181.1%)之间,除20 cm深度A的 E_h 小于B、C带外,其余深度土壤的 E_h 均为A带最大,而B(CV = 17.8%)和C带(CV = 31.6%)不同深度 E_h 的变化范围均小于A带,但各观测点间0~100 cm深度 E_h 并无显著差异(表2)。相关分析表明,A、B、C带 CH_4 排放通量与气温和5 cm深度地温具有一定的相关性,但除C带($p < 0.05$)外均未达到显著水平,而 N_2O 排放通量与气温和5 cm地温之间的相关性均较差(表4)。A带 N_2O 排放通量与水位之间的相关性较差,B、C带 N_2O 的排放通量与水位呈显著负相关($r_1 = -0.701, r_2 = -0.528$),而各点 CH_4 排放通量与水位的相关性均较差,但群落间 CH_4 排放与水位呈显著正相关关系。群落间 CH_4 与 E_h 之间具有弱相关性,而 N_2O 与 E_h 的相关性很差(表4)。

3 讨论

3.1 生长季沼泽湿地不同植物带 CH_4 、 N_2O 排放通量

湿地中 CH_4 的释放取决于其生成和氧化消耗的共同作用(Roslev & King, 1996)。最近的研究表明,在一些湿地中 CH_4 的氧化甚至高达其潜在生成量的90%(King, 1990),因此,湿地土壤的氧化状况在很大程度上决定了其 CH_4 释放强度的大小。而湿地土壤氧的渗透能力又与湿地的水分状况密切相关(Bubier & Moore, 1994; Aerts & Ludwig, 1997)。与该地区已往的研究结果相比,本研究中测得的漂筏苔草、毛果苔草和小叶章生长季平均 CH_4 排放通量明显偏低(表3),其原因除了研究地点土壤性质的差异外,与年季降水差异而导致的湿地水分条件的不同亦有很大的关系。2003年6~9月,所在研究地区降雨量较往年偏少,累积降水量只有261 mm,相当于同时期多年平均降雨量的70%左右,沼泽湿地水位相对较低,土壤氧化带深度增加,从而削弱了 CH_4 的排放强度。特别是A带,由于处于季节性积水带,生长季的大部分时间地表无积水(图3b),表层土壤暴露于空气中,氧气的渗透能力相对提高,增强了土壤对 CH_4 的氧化消耗作用,致使 CH_4 排放强度较往年减弱。

相对于刘景双等(2003)的报道结果,本研究中 N_2O 的平均排放强度要高得多(表3)。其可能的原因:一方面2003年7、9月沼泽湿地水位相对较低,土壤强烈的还原环境得以改善,氧化作用部分增强。

表 3 三江平原生长季沼泽湿地不同植物带 CH₄ 和 N₂O 的排放速率均值Table 3 Mean values of CH₄ and N₂O emissions from different plant zones of wetlands in growing seasons in Sanjiang Plain according to previous studies

植被类型 Vegetation	CH ₄ emission (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	N ₂ O emission (mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	观测期 Observation period	引自 Cited from
漂筏苔草 <i>Carex pseudocuraica</i>	273.6	0.969	2003 年 6 至 9 月 June to September in 2003	本研究 This study
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	259.2	0.932		
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	38.16	0.983		
芦苇-小叶章 <i>Phragmites communis-Deyeuxia angustifolia</i>	942.72		1995 年 6 至 9 月、1996 年 5 月 June to September in 1995 and May in 1996	崔保山 (1997) Cui (1997)
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	496.08			
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	854.4		2001 年 8 月 August in 2001	Ding <i>et al.</i> (2002)
乌拉苔草 <i>Carex meyeriana</i>	746.4			
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	616.8			
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	414.96		2001 年 5 月至 10 月 May to October in 2001	王德宣等 (2002) Wang <i>et al.</i> (2002)
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	307.2 ^a		2002 年 6 月至 2003 年 4 月 June in 2002 to April in 2003	宋长春等 (2003) Song <i>et al.</i> (2003)
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	205.44 ^a			
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>	285.6		2002 年 6 月至 10 月 June to October in 2002	郝庆菊等 (2004) Hao <i>et al.</i> (2004)
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	204			
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>	7.1 ~ 453.9 ^b		2002 年 6 月至 2004 年 5 月 June in 2002 to May in 2004	王毅勇等 (2004) Wang <i>et al.</i> (2004)
毛果苔草 <i>Carex lasiocarpa</i>		0.005	2001 年 8 月至 9 月 August to September in 2001	刘景双等 (2003) Liu <i>et al.</i> (2003)
小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>		0.042		

a: CH₄ 年排放通量均值 Annual mean values of CH₄ fluxes b: 生长季 CH₄ 排放通量范围值 The range of CH₄ fluxes in growing seasons表 4 不同植物带内和植物带间 CH₄ 和 N₂O 与影响因素之间的相关性Table 4 The relationships between CH₄ and N₂O fluxes and factors within and among different plant zones

影响因素 Factors	A		B		C		植物带间 Among plant zones	
	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O	CH ₄	N ₂ O
AT	0.450	0.344	0.201	-0.295	0.240	0.032		
ST	0.359	-0.089	0.392	0.165	0.560*	0.211	-0.956	0.477
SW	0.176	-0.122	-0.100	-0.701**	0.035	-0.528*	0.998*	-0.140
Eh							0.977	-0.017

AT: 气温 Air temperature ST: 5 cm 深地温 Soil temperature at 5 cm SW: 水位 Standing water depth Eh: 氧化还原电位 Redox potential of soil * : 0.05 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.05 level ** : 0.01 水平上显著相关 Correlation is significant at the 0.01 level A, B, C 同图 2 See Fig. 2

根据李仲根¹⁾的研究报道, 这种环境条件下, 土壤中的硝化作用及反硝化作用都能以较高速率进行。另一方面, 由于本研究采用的是不透明静态箱, 避光条件可能增大了植物排放 N₂O 的能力。陈冠雄等 (2003) 研究指出, 在弱光照条件下, 光合作用下降, NO₃⁻ 和 NO₂⁻ 积累, 异化还原作用加强, N₂O 排放量

增加。再者, 特殊事件的贡献。特别是 A 带 N₂O 在 6 月中旬出现一个持续两周的脉冲排放, 最大排放值 2.53 mg·m⁻²·d⁻¹, 其总排放量占整个生长季的 1/3。这可能与此期间 A 带土壤冻层融通, 从而导致土壤中积累的 N₂O 集中释放有关。根据宋长春等 (2003) 的研究, 三江平原沼泽湿地在 7 月初冻土

1) Li ZG (李仲根) (2003). Study on characteristics of nitrous oxide fluxes of wetland in Sanjiang Plain. Master dissertation, Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecosystem, the Chinese Academy of Sciences, Changchun, 37-38. (in Chinese)

层全部融通,而季节性积水沼泽冻土层的融通时间还要提前。王跃思等(2002)在内蒙古半干旱草原的研究则发现,由于春融引起的 N_2O 爆发式排放有可能使其月平均通量值跃居至年排放最高值。

3.2 CH_4 、 N_2O 排放与环境因子的关系

一般认为,温度是影响 CH_4 、 N_2O 释放的重要因素(Smith *et al.*, 1998),其作用机理主要是通过制约土壤的产甲烷菌、硝化菌和反硝化菌活性,从而影响土壤 CH_4 、 N_2O 的释放。本研究结果表明,A、B、C带 CH_4 排放通量与气温和 5 cm 深度地温具有一定的相关性,而 N_2O 排放通量与气温和 5 cm 地温之间的相关性均较差。这说明沼泽湿地 CH_4 的排放对温度变化的敏感性较强,而湿地 N_2O 的释放受温度之外的其它因素的影响较大。该结果与前人的研究一致(郑循华等,1997; Macdonald *et al.*, 1998)。此外,由于水文条件和土壤性质的差异,不同群落类型间 5 cm 土壤温度表现出一定的差异性(表 2)。然而,群落间 CH_4 和 N_2O 排放与 5 cm 地温之间无显著的相关关系。说明温度不是导致群落间 CH_4 和 N_2O 排放差异的主要原因,除温度外的其它因素可能对群落间的排放差异起着主导作用(Ding *et al.*, 2003)。

水位是制约湿地 CH_4 和 N_2O 释放的一项重要因素(Smith *et al.*, 1998)。研究结果发现,A带 N_2O 排放通量与水位之间的相关性较差,B、C带 N_2O 的排放通量与水位呈显著负相关($r_1 = -0.701$, $r_2 = -0.528$)。由此可见,水位是影响常年积水沼泽 N_2O 排放的主要因素(刘景双等,2003)。而从排放强度上来看, CH_4 的排放速率在群落间差异明显,表现为B、C带较为接近且约为A带的7倍(表2)。相关分析表明,群落间 CH_4 排放与水位呈显著正相关关系,说明水位的差异是导致群落间 CH_4 排放差异的主要原因。 CH_4 排放与水位之间的相关关系已被众多野外和室内研究所证实(Aerts & Ludwig, 1997; Ding *et al.*, 2002)。群落内 CH_4 释放与水位的相关性很差,这可能是由于群落内 CH_4 的释放模式受温度季节变化的影响较大(Singh *et al.*, 2000),从而掩盖了水位变化的影响。而群落间 CH_4 释放与水位的相关性显著,则主要是由于群落间水位的差异(表2),决定了湿地植物种类的分布格局,进而影响到产 CH_4 菌易利用性碳源的数量和 CH_4 气体的传输(Ding *et al.*, 2002)。不同植物带间 N_2O 排放通量的差别甚小(表2),这可能是由于A带虽然地表经常无积水,但土壤仍处于饱和或过湿状态,土壤环境

以厌氧还原环境为主,从而削弱了与B、C带之间微生物硝化、反硝化作用活性的差别所致。

关于 CH_4 和 N_2O 产生的条件,Mitsch 和 Gosselink(1986)指出 CH_4 是在严格厌氧条件下($Eh < -250$ mV)产生的,而 N_2O 的产生需要部分厌氧条件($Eh < 250$ mV)。各群落 0~100 cm 深度土壤平均 Eh 在 $-130 \sim -315$ mV 之间,土壤处于强烈还原环境,基本趋势是 $A > B > C$,但群落间的差异不显著。相关分析表明,群落间 CH_4 与 Eh 具有弱相关性,即 Eh 低的样点,其 CH_4 排放强度大,而 Eh 高的样点,其 CH_4 排放强度小。Kludze 等(1993)的研究表明,土壤的氧化还原电位越低, CH_4 的产生量越大。本试验结论与此一致。群落间 N_2O 与 Eh 的相关性很差,说明在强烈还原条件下 Eh 不是 N_2O 释放的唯一控制因素,群落间近似的 N_2O 释放还可能与供给反硝化作用的氮源(蔡祖聪和 Mosier, 1999; Pathak, 1999)、 N_2O 气体的传输(陈冠雄等,2003)以及 N_2O 的还原生成 N_2 有关(侯爱新等,1997)。

4 结 论

1) 生长季沼泽湿地 CH_4 通量具有不同的排放模式和排放强度:季节性淹水沼泽 CH_4 的排在 7、9 月各出现一次排放峰,而长期淹水沼泽 CH_4 的高排放集中在 7、8 月,最大排放通量值 $696.24 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 出现在常年淹水的毛果苔草植物带,气温和 5 cm 地温对两类沼泽湿地 CH_4 生长季排放通量的影响较大,长期淹水沼泽 CH_4 的平均排放强度分别为 259.2 (毛果苔草)和 $273.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (漂筏苔草),明显高于季节性淹水沼泽(小叶章)的平均排放通量值 $38.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ($p < 0.0001$),水位是主要控制因素。

2) 生长季长期淹水沼泽湿地 N_2O 排放通量的季节变化特征较为一致,而又与季节性淹水沼泽除在 6 和 8 月的中下旬差异较大外,生长季其余时间的变化均保持较好的同步性,7、9 月是沼泽湿地 N_2O 排放的高排放期,而生长季最大排放通量值 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 出现在 6 月 14 日的小叶章植物带,水位是影响常年积水沼泽 N_2O 生长季排放通量的主要因素,长期淹水沼泽 N_2O 的平均排放通量分别为 0.932 (毛果苔草)和 $0.983 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (漂筏苔草),与季节性淹水沼泽(小叶章)的平均排放通量值 $0.969 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 无显著差异($p = 0.967$),说明强还原条件下($-130 < Eh < -315$ mV)不同类型沼泽湿地可能具有近似的 N_2O 排放强度。

参 考 文 献

- Aerts R, Ludwig F (1997). Water-table changes and nutritional status affect trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 29, 1691 – 1698.
- Bubier JL, Moore TR (1994). An ecological perspective on methane emissions from northern wetlands. *Trends in Ecology and Evolution*, 9, 460 – 464.
- Cai ZC (蔡祖聪), Mosier AR (1999). Effect of soil water status on CH₄ oxidation and emissions of N₂O and CO₂. *Soils (土壤)*, 6, 289 – 298. (in Chinese with English abstract)
- Chen GX (陈冠雄), Xu H (徐慧), Zhang Y (张颖), Zhang XJ (张秀军), Li YY (李钥莹), Shi RJ (史荣久), Yu KW (于克伟), Zhang XD (张旭东) (2003). Plant: a potential source of the atmospheric N₂O. *Quaternary Sciences (第四纪研究)*, 23, 504 – 511. (in Chinese with English abstract)
- Cui BS (崔保山) (1997). The pattern and budget of CH₄ emissions from marsh wetlands in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 17, 93 – 95. (in Chinese with English abstract)
- Ding WX, Cai ZC, Tsuruta H, Li XP (2002). Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in Northeast China. *Atmospheric Environment*, 36, 5149 – 5157.
- Ding WX, Cai ZC, Tsuruta H, Li XP (2003). Key factors affecting spatial variation of methane emissions from freshwater marshes. *Chemosphere*, 51, 167 – 173.
- Duxburg JM, Harper LA, Mosier AR (1993). Contributions of arecosystems to global climate change. In: American Society of Agronomy ed. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate Change*: 55. ASA Special Publication, Madison, WI, 1 – 18.
- Hao QJ (郝庆菊), Wang YS (王跃思), Song CC (宋长春), Liu GR (刘广仁), Wang YY (王毅勇), Wang MX (王明星) (2004). Study of CH₄ emission from wetlands in Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 18, 194 – 199. (in Chinese with English abstract)
- Hou AX (侯爱新), Chen GX (陈冠雄), Wu J (吴杰), Wang ZP (王正平), van Cleemput O (1997). Relationship between CH₄ and N₂O emissions from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 8, 270 – 274. (in Chinese with English abstract)
- King GM (1990). Regulation by light of methane emission from a wetland. *Nature*, 345, 513 – 515.
- Kludze HK, Delaune RD, Partick WH (1993). Aerenchyma formation and methane and oxygen exchange in rice. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 386 – 391.
- Letey J, Valoras N, Focht DD, Ryden JC (1981). Nitrous oxide production and reduction during denitrification as affected by redox potential. *Soil Science Society of America Journal*, 45, 727 – 730.
- Li Y (李颖), Zhang YZ (张养贞), Zhang SW (张树文) (2002). The landscape pattern and ecologic effect of the marsh changes in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica (地理科学)*, 22, 677 – 682. (in Chinese with English abstract)
- Liu JS (刘景双), Wang JD (王金达), Li ZG (李仲根), Yu JB (于君宝), Zhang XL (张学林), Wang CM (王春梅), Wang Y (王艳) (2003). N₂O concentration and its emission characteristics in Sanjiang Plain wetland. *Environmental Science (环境科学)*, 24, 33 – 39. (in Chinese with English abstract)
- Lloyd D (1995). Microbial processes and the cycling of atmospheric trace gases. *Trends in Ecology and Evolution*, 10, 476 – 478.
- Macdonald JA, Fowler D, Hargreaves KJ, Skiba U, Dleith I, Murray MB (1998). Methane emission rates from a northern wetland: response to temperature, water table and transport. *Atmospheric Environment*, 32, 3219 – 3227.
- Mitsch JM, Gosselink JG (1986). *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 93 – 104.
- Moore TR, Dalva M (1993). The influence of temperature and water table position on Methane and carbon dioxide emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science*, 44, 651 – 664.
- Pathak H (1999). Emissions of nitrous oxide from soil. *Current Science*, 77, 359 – 369.
- Pei ZY, Ouyang H, Zhou CP, Xu XL (2003). Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from alpine grassland in the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 13, 27 – 34.
- Roslev P, King GM (1996). Regulation of methane oxidation in a freshwater wetland by water table changes and anoxia. *FEMS Microbiology Ecology*, 19, 105 – 115.
- Simpson IJ, Edwards GC, Thurtell GW (1999). Variations in methane and nitrous oxide mixing ratios at the southern boundary of a Canadian boreal forest. *Atmospheric Environment*, 33, 1141 – 1150.
- Singh SN, Kulshreshtha KK, Agnihotri S (2000). Seasonal dynamics of methane emission from wetlands. *Chemosphere: Global Change Science*, 2, 39 – 46.
- Smith KA, Thomson PE, Clayton H, McTaggart IP, Conen F (1998). Effects on temperature, water content and nitrogen fertilization on emissions of nitrous oxide by soil. *Atmospheric Environment*, 32, 3301 – 3309.
- Song CC (宋长春), Yan BX (阎百兴), Wang YS (王跃思), Wang YY (王毅勇), Lou YJ (娄彦景), Zhao ZC (赵志春) (2003). Characteristics and impacting factors of CH₄ and CO₂ fluxes in Sanjiang Plain wetlands. *Chinese Science Bulletin (科学通报)*, 48, 2473 – 2477. (in Chinese)
- Sorrell BK, Brix H, Schiierup HH, Lorenzen B (1997). Die-back of *Phragmites australis*: influence on the distribution and rate of sediment methanogenesis. *Biogeochemistry*, 36, 173 – 188.
- Wang YY (王毅勇), Song CC (宋长春), Zheng XH (郑循华), Wang DX (王德宣), Yan BX (阎百兴), Zhao ZC (赵志春), Lou YJ (娄彦景) (2004). Characteristics of methane exchange

- between *Deyeuxia angustifolia* wet meadow and atmosphere in the Sanjiang Plain. *Rural Eco-Environment* (农村生态环境), 20, 1 - 5. (in Chinese with English abstract)
- Wang DX(王德宣), Liu XG(吕宪国), Ding WX(丁维新), Cai ZC(蔡祖聪), Wang YY(王毅勇) (2002). Comparison of methane emission from marsh and paddy field in Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 22, 500 - 503. (in Chinese with English abstract)
- Wang YS(王跃思), Wang MX(王明星), Hu YQ(胡玉琼), Huang Y(黄耀), Du R(杜睿), Zheng XH(郑循华) (2002). Study on relationship between the variations of greenhouse gases efflux/uptake and the key environmental factors in Mongolia Semi-Arid grasslands. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 3, 295 - 310. (in Chinese with English abstract)
- Whiting GJ, Chanton JP (1993). Primary production control of methane emission from wetlands. *Nature*, 364, 794 - 795.
- Zheng XH(郑循华), Wang MX(王明星), Wang YS(王跃思), Shen RX(沈壬兴), Zhang W(张文), Gong YB(龚晏邦) (1997). Impacts of temperature on N₂O production and emission. *Environmental Science* (环境科学), 18, 1 - 5. (in Chinese with English abstract)

责任编辑:刘世荣 责任编辑:张丽赫