

小兴安岭不同沼泽甲烷排放及其影响因子

石兰英¹, 牟长城^{2,*}, 田新民¹, 金建丽¹, 金志民¹

(1. 牡丹江师范学院生物系, 牡丹江 157012; 2. 东北林业大学林学院 哈尔滨 150040)

摘要: 2007 和 2008 年在植物生长季内采用静态箱-气相色谱法, 研究了小兴安岭典型修氏苔草 (*Carex schmidtii*) 沼泽和油桦-修氏苔草 (*Betula ovalifolia-Carex schmidtii*) 灌木沼泽 CH₄ 通量的季节动态、年际动态及其与环境因子的关系, 并估算了排放总量。结果表明, 苔草和灌木沼泽 2007 年生长季 CH₄ 排放总量分别为 66.60 和 3.20 kg·hm⁻²; 2008 年分别为 1482.60 和 18.15 kg·hm⁻²。苔草和灌木沼泽 CH₄ 排放通量具有明显的季节变化, 最大排放量出现在夏季或夏、秋季, 其中, 2007 和 2008 年 CH₄ 排放平均通量分别为 1.88 和 0.092 mg·m⁻²·h⁻¹, 34.18 和 0.43 mg·m⁻²·h⁻¹, 年际间和不同类型间排放差异均极显著。温度是季节变化的关键因子, 2007 年 CH₄ 排放通量和温度 (空气温度、箱温、地表温度、5、10、15、20、30、40 cm 土温) 间存在正、负两种相关关系, 2008 年 CH₄ 排放通量和温度呈正相关, 水位是年际间和不同类型间排放差异的主要控制因子。

关键词: CH₄ 排放; 苔草沼泽; 灌木沼泽; 水位; 温度

CH₄ emission and its driving factors from different marshes in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China

SHI Lanying¹, MU Changcheng^{2,*}, TIAN Xinmin¹, JIN Jianli¹, JIN Zhimin¹

1 Department of Biology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157012, Heilongjiang, China

2 College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The observation of CH₄ fluxes was performed in the *Carex schmidtii* marsh and *Betula ovalifolia-Carex schmidtii* shrub swamp ecosystems of Xiaoxing'an Mountains in the growing seasons of 2007 and 2008, using a static chamber and gas chromatography, to study the seasonal and inter-annual variations of CH₄ flux and its relationships to environmental factors. The results showed that annual CH₄ emissions from *Carex schmidtii* marsh and *Betula ovalifolia-Carex schmidtii* shrub swamp were, respectively, 66.60 and 3.20 kg·hm⁻² in 2007 and 1482.60 and 18.15 kg·hm⁻² in 2008. There was an obvious seasonal changes in CH₄ emissions during the whole observation period, with the largest emissions in summer or in summer and fall for both years (1.88 and 0.092 mg·CH₄·m⁻²·h⁻¹ for the marsh and shrub swamp in 2007 and 34.18 and 0.43 mg·CH₄·m⁻²·h⁻¹ in 2008). There were significant differences of CH₄ emissions between types of ecosystems and inter-annual changes. The seasonal variations of CH₄ fluxes from both ecosystems were mainly associated with temperature, there were positive or negative relationships between CH₄ fluxes and temperatures (air temperature, temperature inside the chamber, surface temperature and soil temperature of 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40 cm) in 2007 and they were positively related in 2008. Water table was one of main indicators which can affect seasonal and inter-annual changes in CH₄ fluxes from the marsh and shrub swamps.

Key Words: CH₄ emission; *Carex schmidtii* marsh; shrub swamps; water table; temperature

气候变暖的主要原因是大气中温室气体浓度的不断增加^[1], 而甲烷 (CH₄) 是比 CO₂ 更活跃的最重要温室

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670349); 黑龙江省教育厅科研项目 (11551515, 11553118)

收稿日期: 2009-09-03; **修订日期:** 2009-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mcnefu@yahoo.com

气体之一,单个分子增温效应为 CO_2 的 25 倍^[2]。截止到 2005 年,大气中 CH_4 含量已达到 65 万 a 以来的最高值^[3]。关于 CH_4 的源与汇的问题,以及在全球气候变暖过程中的作用,仍然是目前研究的热点^[4]。

天然湿地是大气 CH_4 的最大来源,年排放量约为 $110\text{Tg}^{[5]}$, 占全球排放总量的 20% 左右^[6], 其中,高纬度地区泥炭湿地 CH_4 排放量占天然湿地 CH_4 总排放量的 50%—60%^[5, 7], 此地区天然湿地 CH_4 排放对大气 CH_4 含量具有重要的调节作用。因此,进行此地区湿地 CH_4 排放研究对深刻地理解全球气候变暖的机理具有重要意义。

CH_4 从湿地中的排放是发生在土壤中的一系列生物和物理过程的结果。在厌氧环境条件下, CH_4 通过 CH_4 产生菌的作用而产生; 在氧化条件下, CH_4 通过土壤中微生物作用而被氧化^[8]。湿地中 CH_4 通量在时空两个方面都有较大变化, 时间变化一般表现为夏季和秋季大于春季和冬季^[9-14]; 空间变化一般随着植物及水位在空间上的较大变化呈现一定的分异规律^[8, 15]。湿地水文条件是决定 CH_4 排放的关键控制因子, 水位决定了湿地有氧和厌氧微生物过程在泥炭层中的位置和程度^[16], 因此, 当水位达到或接近泥炭表层时, CH_4 排放速率最大^[17-18], 但水位再进一步升高时, 对 CH_4 排放的影响并不大, 而此时泥炭地表温度对 CH_4 排放的影响有所增强^[19]。因此, 有必要加强不同湿地类型和不同区域间的比对研究。

我国天然沼泽湿地约占全国湿地总面积三分之一, 主要分布于东北的三江平原、大小兴安岭、若尔盖高原及海滨、湖滨、河流沿岸等地区^[20], 而国内对草本和灌木沼泽湿地 CH_4 排放研究主要集中于三江平原^[10-11]、若尔盖高原^[21] 和青藏高原^[22] 等地区。因此, 进行小兴安岭林区湿地 CH_4 排放的研究对区域及全球湿地 CH_4 排放量的精确估算具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于小兴安岭中段, 黑龙江省东北部伊春市友好林业局永青林场, 地理坐标是 $\text{E } 128^\circ 30' 36''$ — $128^\circ 45' 00''$ 、 $\text{N } 48^\circ 03' 53''$ — $48^\circ 17' 11''$, 平均海拔在 260—500 m, 属于温带大陆湿润季风气候。冬季干冷而漫长, 夏季闷热多雨但短暂。年平均气温约 0.4°C , 年积温为 2000—2500 $^\circ\text{C}$ 。年平均降雨量为 630 mm, 全年有 2 个降水高峰期, 一个是冬季降雪, 另一个是每年 7—8 月份的降雨, 高峰期降水占全年降雨量的 70%。无霜期约为 110 d。最早霜期在 9 月上旬, 最晚霜期在次年的 5 月中旬结束, 霜期长达 6 个月。地带性土壤是暗棕壤, 占有土壤类型的 71%, 其他的土壤还有草甸土、沼泽土和泥炭土, 草甸土和沼泽土占 27%, 泥炭土占 2%^[4, 23]。

本研究有两种沼泽, 参照郎惠卿的标准^[24], 以优势植被进行分类, 分别为: 修氏苔草 (*Carex schmidtii*) 沼泽和油桦-修氏苔草 (*Betula ovalifolia*-*Carex schmidtii*) 灌木沼泽。

1.2 气体采集与分析

气体的采集与分析采用静态暗箱法-气相色谱法。取样前将规格为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 不锈钢底座插入土壤中 10 cm, 底座上部四周带有凹槽, 取样时注水密封。安装底座时对底座内的所有植物未进行干扰, 整个生长季底座放在试验地不动, 以保证对底座内部植被和土壤的干扰最小。不锈钢顶箱规格为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$, 箱内顶部安有直径 10 cm 风扇, 取样时风扇保持转动, 避免箱内出现气体浓度差, 箱顶部直径 1 cm 内置橡胶塞作为取样口, 箱侧面 2 个小孔用于数字温度计探头和风扇电源线通过, 分别用橡胶塞和硅胶密封。草本植物和灌木生长超过一个箱高度后加延长箱, 规格为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 。顶箱和延长箱外都粘贴保温材料, 以减少箱内温度波动。每个类型沼泽内设置 3 次重复, 采样时站在草丘上, 使踩踏的影响降至最低^[4, 23]。

取样时间为 2007 年 6 月 4 日—10 月 24 日, 2008 年 5 月 14 日—10 月 24 日, 取样频率为每月 3 次, 约 10d 取 1 次, 每次取样在 9:00—11:00 完成, 用 60 mL 聚氯乙烯医用注射器经三通阀连接铁针头通过箱顶部橡胶塞取样。每个静态箱封闭后 0、10、20 min 和 30 min 时分别取 1 管气体, 气体样品用 500 mL 气体采集袋(大连光明化工研究设计院设计)保存, 1 周内用 HP5890 II 气相色谱仪分析^[25]。气体排放通量为单位时间、单位面

积观测箱内排放的被测气体质量的变化:

$$F = (\Delta m / \Delta t) \times \rho \times (V/A) = h \times \rho \times (\Delta m / \Delta t)$$

式中, F 为气体的通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), V 为观测箱的容积 (m^3), A 为观测时包围的土壤面积 (m^2), ρ 为箱内气体密度 ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), $\Delta m / \Delta t$ 为气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率, h 为观测箱的高度 (m)。 F 为正值时表示释放, 负值时表示吸收。30 min 内采集的 4 个气体样品浓度与采样时间间隔存在线形相关的关系, 所有样品的相关系数均在 $R^2 > 0.95$ 时视为有效并被采用^[23]。

1.3 环境因子测定

气体采样时, 原位同步测定气温、箱温、0、5、10、15、20、30、40 cm 土温以及观测点水位。温度的测定使用 JM624 便携式数字温度计(天津今明有限公司生产)。通过在采样箱附近挖井来测量地下水位深度。

1.4 数据处理

用 SPSS 11.0 统计分析软件包和 Microsoft Office Excel 2003 对数据进行分析处理。

2 结果

2.1 CH_4 通量的季节动态

小兴安岭苔草和灌木沼泽 2007 和 2008 年生长季为大气 CH_4 的源, 排放具有明显季节规律, 除 2007 年灌木沼泽 CH_4 最大排放出现在秋季外, 苔草沼泽和 2008 年的灌木沼泽均出现在夏、秋季节, 季节变化规律比较相似。一般在 6—7 月份为上升阶段, 9—10 月份逐渐下降, 苔草沼泽 CH_4 排放呈现出明显的双峰型变化; 灌木沼泽 2007 年呈现出明显的单峰型变化, 2008 年则为 3 峰型变化规律性(图 1 和图 2)。

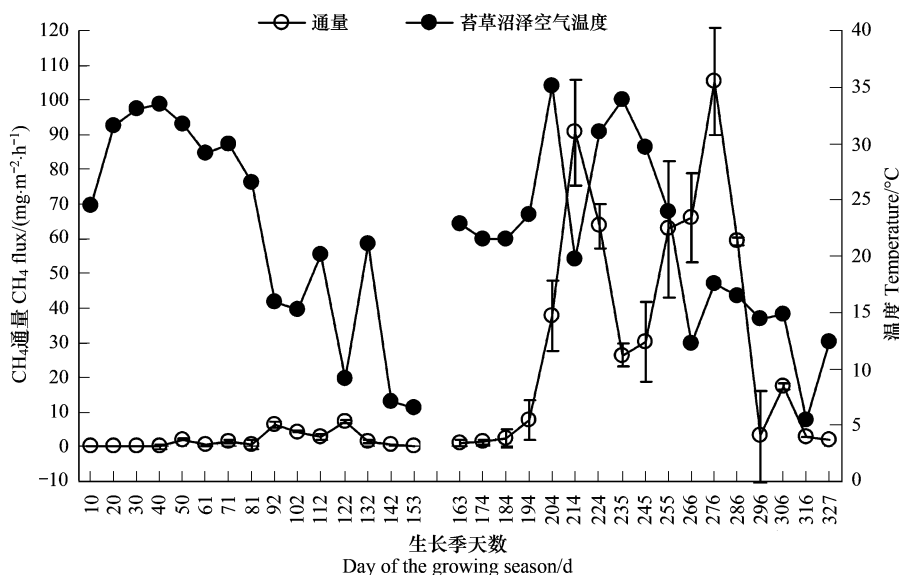


图 1 苔草沼泽 CH_4 排放通量及空气温度的季节和年际变化

Fig. 1 Seasonal and inter-annual variations of CH_4 fluxes from the *Carex schmidtii* marsh and air temperature

2.2 不同沼泽类型及年际间排放量对比

苔草沼泽与灌木沼泽 2008 年生长季节 CH_4 排放平均通量均显著高于 2007 年 ($P < 0.01$)。其中, 苔草沼泽 2008 年约为 2007 年的 18 倍 ($n = 15$); 灌木沼泽 2008 年约为 2007 年的 5 倍 ($n = 15$)。2 年生长季节平均排放通量苔草沼泽显著高于灌木沼泽 ($P < 0.01$), 约为灌木沼泽的 70 倍 ($n = 32$)。

不同年份生长季 CH_4 排放平均通量根据生长季每月上、中、下旬 CH_4 排放通量的实测数据计算获得, 苔草和灌木沼泽 2007 年(6—10 月) CH_4 排放平均通量分别为 1.88 和 0.092 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 2008 年为 34.18、0.43 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。计算各月份排放量并加和得到 CH_4 在生长季的排放总量, 苔草和灌木沼泽 2007 年(6—10 月)

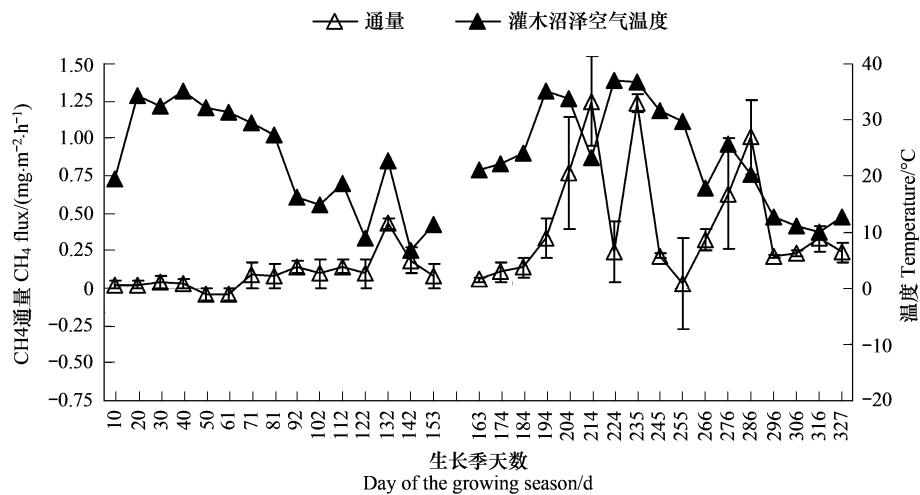


图2 灌木沼泽CH₄排放通量及空气温度的季节和年际变化

Fig. 2 Seasonal and inter-annual variations of CH₄ fluxes from the shrub swamp and air temperature

CH₄排放总量分别为 66.60、3.20 kg·hm⁻²;2008 年(5 月中旬—10 月)排放总量分别为 1482.60、18.15 kg·hm⁻²。

2.3 环境因子对 CH₄排放通量的影响

小兴安岭苔草和灌木沼泽 CH₄通量与水位均呈负相关,但仅苔草沼泽 2008 年 CH₄通量与水位的负相关性显著。苔草和灌木沼泽 2007 年 CH₄通量与温度(空气温度、箱温、地表温度、5、10、15、20、30、40 cm 土温),而 2008 年 CH₄通量与温度间均具有正相关性(表 1)。其中,苔草沼泽 2007 年 CH₄通量与空气温度和 40 cm 土壤温度相关性达到显著水平,而 2008 年 CH₄通量与 5—30 cm 土壤温度均具显著正相关;灌木沼泽仅 2007 年 CH₄通量与地表温度呈显著负线性相关(表 1)。这说明影响 CH₄产生因子的相对重要性在不同的时空尺度上会独立地变化。

表 1 苔草和灌木沼泽水位、温度与 CH₄通量之间的相关关系

Table 1 Correlation coefficients between water table, temperatures and CH₄ flux from the *Carex schmidtii* marsh and shrub swamps

因子 Factors	苔草沼泽 <i>Carex schmidtii</i> marsh		灌木沼泽 Shrub swamp	
	2007 (n = 15)	2008 (n = 17)	2007 (n = 15)	2008 (n = 17)
水位 Water level	-0.04	-0.56 *	-0.009	-0.47
空气温度 Air temperature	-0.81 **	0.11	-0.29	0.26
箱温 Temperature inside the chamber	-0.35	0.29	-0.46	0.30
地表温度 Surface temperature	-0.40	0.43	-0.59 *	0.28
5 cm 土温 Temperature at 5 cm depth	0.05	0.57 *	-0.45	0.40
10 cm 土温 Temperature at 10 cm depth	0.22	0.70 **	-0.31	0.44
15 cm 土温 Temperature at 15 cm depth	0.32	0.73 **	-0.20	0.44
20 cm 土温 Temperature at 20 cm depth	0.43	0.74 **	-0.12	0.43
30 cm 土温 Temperature at 30 cm depth	0.56, n = 12	0.62 *, n = 13	0.03, n = 14	0.22, n = 15
40 cm 土温 Temperature at 40 cm depth	0.67 *	0.45, n = 13	0.20, n = 13	-0.04, n = 13

* 与 ** 为 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 时显著相关

3 讨论

3.1 沼泽 CH₄排放季节动态

苔草和灌木沼泽 CH₄通量呈现此规律,可能是因为春季融雪后,由于降水的减少地下水位都大幅下降,出现了一个短时的干旱期,干旱不利于产 CH₄ 菌的生长^[26];同时,虽然生长季初温度逐渐升高(图 1 和图 2),但

土壤化冻刚刚接近 40 cm 深度, CH_4 菌活性受到抑制, 因此, 排放量不高^[11]。而 6 月下旬以后土壤解冻加深, 降雨量增加, 温度继续升高(图 1 和图 2), 同时夏季植物生长旺盛, 有机物质供应充足, 促进了还原过程, 逐步降低了氧化还原电位^[14, 27], 促进了 CH_4 生成; 秋季(9—10 月份)当年生长的根开始分解或者落叶增加了碳输入^[28], 从而促进产 CH_4 菌产生 CH_4 , 因此, 小兴安岭苔草和灌木沼泽在夏、秋季 CH_4 排放最高, 这与大多数研究结论一致^[9-13, 26]。

3.2 不同类型及年际间排放对比

CH_4 与大气的净通量由 CH_4 产生速率、氧化速度共同决定, 并且受传输机制重要影响^[6]。小兴安岭林区苔草和灌木沼泽在气候状况相同的条件下, 水文条件以及植被类型可能成为影响 CH_4 排放差异的重要因素。首先, 苔草沼泽比灌木沼泽积水时间长, 积水深度大, 为 CH_4 产生提供了有利的厌氧条件^[24]; 而灌木沼泽长期的低水位使厌氧层局限在很深的位置, 降低了 CH_4 产生能力, 增加了 CH_4 氧化层的厚度。其次, 苔草植物发达的通气组织为 CH_4 的传输起到了促进作用^[26](苔草沼泽内苔草生物量为 466 g/m^2 , 灌木沼泽内的苔草生物量为 218 g/m^2)。再次, 曹广民等^[22]发现灌木植物具有吸收甲烷的能力, 而草本植物具有排放甲烷的能力, 这也可能成为小兴安岭苔草沼泽 CH_4 排放量显著高于灌木沼泽的重要原因。

本研究通过分析观测的气候数据发现, 在温度因子相差不多的情况下, 苔草与灌木沼泽 2008 年 CH_4 的排放量均显著高于 2007 年, 可能主要由于 2008 年样地水位与 2007 年相比显著提高(苔草沼泽 2008 年为 2007 年的约 2.6 倍, 灌木沼泽约为 1.3 倍), 较高的水位更有利于 CH_4 的产生, 因此, 年际排放差异极其显著。在季节排放通量方面, 本研究值除了高于杨继松等^[9]的研究中小叶章湿地 CH_4 排放值外, 均明显低于很多三江平原沼泽同期研究值几倍至十几倍不等^[10-11, 27]。

3.3 环境因子对 CH_4 排放通量的影响

CH_4 排放要经历 CH_4 生成、 CH_4 氧化与传输和 CH_4 释放 3 个过程, 温度对这 3 个过程的综合作用才是最终观察到的结果^[29]。本研究中 CH_4 通量与温度具有正、负的相关性, 这说明 CH_4 排放受温度的影响非常复杂, 苔草和灌木沼泽 2007 年 CH_4 通量与空气温度、箱内温度和浅层土壤温度呈负相关性, 主要原因是由于 2007 年降水较少, 水位较低^[24], 厌氧层被局限在很深的位置, 导致更多的 CH_4 在传输过程中被氧化所致。

水位是影响湿地 CH_4 排放的最重要因子之一, 它不但决定了土壤厌氧程度, 影响 CH_4 的生成^[29], 还会影响温度等其他环境因子^[6], 从而对 CH_4 的产生、氧化和排放产生综合作用。本研究中 CH_4 通量变化与水位呈现负相关性, 这可能是由于水位的升高导致土壤温度降低, 进而影响 CH_4 产生过程中所涉及的一系列微生物菌群的数量、结构和活性^[10-11], 同时, 有研究表明, 水位对 CH_4 的影响大部分都存在时滞效应^[4], 水位升高或下降不会立刻对 CH_4 排放产生影响, 因此, 在较高水位时具有较低 CH_4 产生量, CH_4 通量与水位呈负的相关性。

References:

- [1] Zhang L H, Song C C, Wang D X, Wang Y Y. Relationship of ecosystem respiration with temperature, nitrogen and plant in freshwater marshes. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 1-8.
- [2] Lelieveld J, Crutzen P, Dentener F J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus*, 1998, 50B: 128-150.
- [3] Spahni R, Chappellaz J, Stocker T F, Loulergue L, Hausamann G, Kawamura K, Flückiger J, Schwander J, Raynaud D, Masson-Delmotte V, Jouzel J. Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science*, 2005, 310: 1317-1321.
- [4] Sun X X, Mu C C, Shi L Y, Cheng W, Liu X, Wu Y X, Feng D J. Methane emission from forested swamps in Xiaoxing'an Mountains, northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3): 535-545.
- [5] Mathews E, Fung I. Methane emission from natural wetlands: global distribution, area and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycles*, 1987, 1: 61-86.
- [6] Bubier J L, Moore T R. An ecological perspective on methane emission from northern wetlands. *Trends in Ecology and Evolution*, 1994, 9: 460-464.

- [7] Barklett K B, Harriss R C. Review and assessment of methane flux from wetlands. *Chemosphere*, 1993, 26(4): 261-320.
- [8] Song C C, Yang W Y, Xu X F, Lou Y J, Zhang J B. Dynamics of CO₂ and CH₄ Concentration in the Mire Soil and Its Impact Factors. *Environmental Science*, 2004, 25(4): 1-6.
- [9] Yang J S, Liu J S, Wang J D, Yu J B, Sun Z G, Li X H. Emissions of CH₄ and N₂O from a wetland in the Sanjiang Plain. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 432-440.
- [10] Hao Q J, Wang Y S, Song C C, Wang Y Y, Wang M X. Primary study on CO₂ and CH₄ emissions from wetland soils in the Sanjiang plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 846-851.
- [11] Hao Q J, Wang Y S, Song C C, Liu G R, Wang Y Y, Wang M X. Study of CH₄ emission from wetlands in Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3): 194-199.
- [12] Huttunen J T, Nykänen H, Turunen J, Martikainen P J. Methane emissions from natural peatlands in the northern boreal zone in Finland, Fennoscandia. *Atmospheric Environment*, 2003, 37: 147-151.
- [13] Van der Pol-van Dasselaar A, van Beusichem M L, Oenema O. Determinants of spatial variability of methane emissions from wet grasslands on peat soil. *Biogeochemistry*, 1999, 44: 221-237.
- [14] Sugimoto A, Fujita N. Characteristics of methane emission from different vegetations on a wetland. *Tellus*, 1997, 49: 382-392.
- [15] Bubier J L, Moore T R, Bellisario L, Comer N T. Ecological controls on methane emissions from a northern peatland complex in the zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, 9: 455-470.
- [16] Liikanen A, Huttunen J T, Karjalainen S M, Heikkinen K, Väisänen T S, Nykänen H, Martikainen P J. Temporal and seasonal changes in greenhouse gas emissions from a constructed wetland purifying peat mining runoff waters. *Ecological Engineering*, 2006, 26: 241-251.
- [17] Jauhainen J, Takahashi H, Heikkinen J E P, Martikainen P J, Vasander H. Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1788-1797.
- [18] Moore T R, Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils. *Journal of Soil Science*, 1993, 44: 651-604.
- [19] Hargreaves K J, Fowler D, Pitcairn C E R, Aurela M. Annual methane emission from Finnish mires estimated from eddy covariance campaign measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 2001, 70: 203-213.
- [20] State Forestry Administration. First investigation of wetland resources of China. *New Safety*, 2004, 2(9): 24-25.
- [21] Wang D X, Lu X G, Ding W X, Cai Z C, Gao J F, Yang F M. Methane emission from marshes in Zoige Plateau. *Advance In Earth Sciences*, 2002, 17(6): 877-880.
- [22] Cao G M, Xu X L, Long R J, Wang Q L, Wang C T, Du Y G, Zhao X Q. Methane emissions by alpine plant communities in the Qinghai-Tibet Plateau. *Biology Letters*, 2008, 4: 681-684.
- [23] Mu C C, Shi L Y, Sun X X. Fluxes and controls of CO₂, CH₄ and N₂O in a marsh wetland of Xiaoxing'an mountains, northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 33(3): 617-623.
- [24] Lang H Q. *Wetland Vegetation in China*. Beijing: Sciences Press, 1999: 35-74.
- [25] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 842-844.
- [26] Sun X X, Mu C C, Feng D J, Liu X, Cheng W, Shi L Y. Effects of wetland draining for forestation on methane emissions in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4251-4259.
- [27] Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, Zhao Z C. Annual dynamics of CO₂, CH₄, N₂O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization. *Environmental Science*, 2006, 27(12): 2369-2375.
- [28] Kang H, Freeman C. The influence of hydrochemistry on methane emissions from two contrasting northern wetlands. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 141: 263-272.
- [29] Segers R. Methane production and methane consumption-a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 1998, 41: 23-51.

参考文献:

- [1] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 王毅勇. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系. *环境科学*, 2007, 28(1): 1-8.
- [4] 孙晓新, 牟长城, 石兰英, 程伟, 刘霞, 吴云霞, 冯登军. 小兴安岭森林沼泽甲烷排放及其影响因子. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 535-

545.

- [8] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 姜彦景, 张金波. 沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素. 环境科学, 2004, 25(4): 1-6.
- [9] 杨继松, 刘景双, 王金达, 于君宝, 孙志高, 李新华. 三江平原生长季沼泽湿地 CH_4 、 N_2O 排放及其影响因素. 植物生态学报, 2006, 30(3): 432-440.
- [10] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 王毅勇, 王明星. 三江平原湿地土壤 CO_2 和 CH_4 排放的初步研究. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 846-851.
- [11] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 刘广仁, 王毅勇, 王明星. 三江平原湿地 CH_4 排放通量研究. 水土保持学报, 2004, 18(3): 194-199.
- [20] 国家林业局. 全国首次湿地资源调查. 新安全, 2004, 2(9): 24-25.
- [21] 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 蔡祖聪, 高景福, 杨福明. 若尔盖高原沼泽湿地 CH_4 排放研究. 地球科学进展, 2002, 17(6): 877-880.
- [23] 牟长城, 石兰英, 孙晓新. 小兴安岭典型草丛沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放动态及其影响因素. 植物生态学报, 2009, 33(3): 617-623.
- [24] 郎惠卿. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999: 35-74.
- [26] 孙晓新, 牟长城, 冯登军, 刘霞, 程伟, 石兰英. 排水造林对小兴安岭沼泽甲烷排放的影响. 生态学报, 2009, 29(8): 4251-4259.
- [27] 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 赵志春. 淡水沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应. 环境科学, 2006, 27(12): 2369-2375.