

刘霞, 牟长城, 李婉姝, 等. 2009 小兴安岭毛赤杨沼泽 CH_4 、 N_2O 排放规律及其对人为干扰的响应 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2642–2650

Li X, Mu C C, Li W S *et al*. 2009 Emissions of CH_4 and N_2O from *Alnus sibirica* swamps and the response to human disturbance in the Xiaoxing'an Mountains [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(12): 2642–2650

小兴安岭毛赤杨沼泽 CH_4 、 N_2O 排放规律及其对人为干扰的响应

刘霞¹, 牟长城^{1*}, 李婉姝¹, 冯登军¹, 于波²

¹ 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

² 黑龙江省出入境检验检疫局漠河办事处, 漠河 165300

收稿日期: 2009-03-25 修回日期: 2009-06-13 录用日期: 2009-09-02

摘要: 选择小兴安岭山区毛赤杨 (*Alnus sibirica*) 沼泽为研究对象, 利用静态暗箱-气相色谱法, 研究两个生长季内 (2007 年和 2008 年) 沼泽湿地在自然状态下 CH_4 、 N_2O 排放通量的变化规律及其主要影响因素, 以及在不同采伐干扰 (皆伐、45% 择伐) 方式下, CH_4 和 N_2O 排放通量的变化过程。结果表明, 2007 年 CH_4 和 N_2O 平均排放通量分别为 $1.03 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $58.56 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 2008 年分别为 $20.57 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $17.41 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; CH_4 排放高峰期均发生在夏、秋两季, N_2O 排放规律不明显。皆伐沼泽和 45% 择伐沼泽 CH_4 平均排放量分别为 597.06 和 $237.05 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, N_2O 平均排放量分别为 35.84 和 $114.51 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; 与天然沼泽相比, CH_4 排放量明显下降, N_2O 排放通量明显升高。水位是 CH_4 排放的主要影响因素, 但当水位达到一定高度时不再成为限制因子, 土壤温度与 CH_4 排放相关性显著, 相对较低水位与相对较高土壤温度有利于 N_2O 排放; 积水水位是影响沼泽不同年份 CH_4 和 N_2O 通量排放差异的主要影响因素, 采伐引起的土壤温度和水位的变化是干扰地与对照地 CH_4 和 N_2O 排放产生差异的主要原因。

关键词: 毛赤杨沼泽; 采伐; CH_4 ; N_2O ; 季节变化规律

文章编号: 0253-2468(2009)12-2642-09 中图分类号: X171 文献标识码: A

Emissions of CH_4 and N_2O from *Alnus sibirica* swamps and the response to human disturbance in the Xiaoxing'an Mountains

LIU Xia¹, MU Changcheng^{1*}, LIW anshu¹, FENG Dengjun¹, YU Bo²

¹ College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040

² Immigration and Quarantine Bureau of Mohe City, Mohe 165300

Received 25 March 2009 received in revised form 13 June 2009; accepted 2 September 2009

Abstract Methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) emissions from an *Alnus sibirica* swamp were studied using a static opaque chamber and gas chromatography during the growing season of 2007 and 2008 in the Xiaoxing'an Mountains. The effects of cutting (clear cutting, selective cutting with an intensity of 45%) on CH_4 and N_2O emission from the *Alnus* swamp were also measured. The results showed that the mean fluxes of CH_4 and N_2O in 2007 were $1.03 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and $58.56 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively, while those in 2008 were $20.57 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ and $17.41 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively. The maximum CH_4 fluxes occurred in the summer and autumn, but there was no clear seasonal pattern for N_2O . The mean CH_4 fluxes due to clear cutting and selective cutting were 597.06 and $237.05 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, and those of N_2O were 35.84 and $114.51 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectively. The CH_4 fluxes decreased due to the disturbances, while the N_2O flux increased. Water table level was the main factor for CH_4 emission, but soil temperature became the limiting factor when the water level reached a certain height. Low water level and high soil temperatures favored N_2O emission. The water level significantly contributed to the annual variations of CH_4 and N_2O emission. Changes in soil temperature and water level resulting from the disturbances were the main reason for the differences of CH_4 and N_2O fluxes between disturbed and control plots.

Keywords *Alnus sibirica* swamp; cutting; CH_4 ; N_2O ; seasonal variation

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 30670349)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30670349)

作者简介: 刘霞 (1980—), 女, E-mail: liuxia-linda@yahoo.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: mcenefu@yahoo.com.cn

Biography: LIU Xia (1980—), female, E-mail: liuxia-linda@yahoo.cn * Corresponding author, E-mail: mcenefu@yahoo.com.cn

1 引言 (Introduction)

CH_4 和 N_2O 是大气中重要的温室气体,目前两者的浓度已从工业化前的 $0.72 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $0.27 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到 $1.77 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $0.32 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (IPCC, 2007), 而且 CH_4 和 N_2O 单分子潜在的增温效应分别是 CO_2 的 23 倍和 296 倍, 是比 CO_2 更活跃的温室气体, 其对全球温室效应的贡献率仅次于 CO_2 (Lelieveld *et al.*, 1998). 因此, 有关 CH_4 和 N_2O 的源汇问题研究倍受科学界所关注.

大气中的 CH_4 和 N_2O 有 70% ~ 90% 来自地表生物源 (Duxberg *et al.*, 1993), 其中, 天然湿地生态系统能够通过物质循环排放 CH_4 和 N_2O (Moore *et al.*, 1995; Sadredin *et al.*, 1996; Song *et al.*, 2003), 湿地 CH_4 的排放量约占全球 CH_4 源的 40% ~ 50% (Whiting *et al.*, 1993), 而湿地一般表现为 N_2O 弱排放源 (Regina *et al.*, 1996; 宋长春等, 2006a). 然而, 沼泽湿地经排水或垦殖后 CH_4 排放量一般会显著减小, 而 N_2O 排放量会显著增加 (Marja *et al.*, 2001; Kristina *et al.*, 1996; Martkainen *et al.*, 1995); 采伐后 CH_4 排放量变化不明显, N_2O 排放量有所升高 (Huttunen *et al.*, 2003). 但由于目前有关采伐干扰的报道相对较少, 人为干扰活动对湿地 CH_4 和 N_2O 的源汇影响还存在很多不确定性, 因此, 仍需对人为干扰后对湿地气体排放影响方面开展深入系统研究.

在湿地气体排放影响因子研究方面, 多数学者认为湿地温室气体动态受温度和水分条件的影响较大 (Bubier *et al.*, 2003; MacDonald *et al.*, 1998; Moore *et al.*, 1993), 随着温度的升高, 光合作用速率和异养微生物活动增强会促进温室气体的产生. 研究表明, 沼泽仅在地表积水或地下水水位较高时排放 CH_4 , 水位升高, 厌氧空间增大, 甲烷产生菌反应空间增大 (Rask *et al.*, 2002; 宋长春等, 2003), 当地下水位较低时, 则转变为 CH_4 的汇 (Moore & Knowles, 1990; Jauhainen *et al.*, 2005). 有学者认为水位是影响湿地 N_2O 生长季节排放通量的主要因素 (Amoah *et al.*, 2005a, 2005b; 杨继松等, 2006); 也有学者认为湿地 N_2O 排放随土壤温度升高而增加 (Song *et al.*, 2006b; Sammerfeld *et al.*, 1993), 温度是 N_2O 排放的主控因子; 还有学者认为相对较低水位和较高的温度有利于硝化和反硝化作用, 可以增加 N_2O 的排放量 (Regina *et al.*, 1996;

Martkainen *et al.*, 1993), N_2O 是由温度和水位共同决定的. 因此, 目前有关湿地 CH_4 排放主要影响因子方面比较一致, 而有关湿地 N_2O 排放主控因子方面尚存有争议. 同时, 湿地森林采伐能够引起湿地土壤温度 (Zerva *et al.*, 2005) 和 水位 (Dub *et al.*, 1995; Sun *et al.*, 2000) 的变化, 可能会对湿地 CH_4 的和 N_2O 排放产生较大的影响 (Huttunen *et al.*, 2003), 但对其影响机制研究尚缺乏明确认识, 仍有待进一步深入探讨.

目前, 国内有关湿地温室气体排放方面的研究主要集中在草丛湿地 (杨继松等, 2004; 王毅勇等, 2006)、红树林湿地 (叶勇等, 2000) 及稻田湿地 (徐华等, 1999; 王德宣等, 2002) 等方面, 而对我国森林湿地主要分布区、大、小兴安岭与长白山林区的森林湿地温室气体排放研究尚少, 而有关采伐对森林湿地温室气体排放影响的研究尚未见有报道. 因此, 本研究选择小兴安岭具有代表性的阔叶林沼泽毛赤杨沼泽为研究对象, 通过对天然毛赤杨沼泽不同年份和生长季节 CH_4 和 N_2O 排放通量的观测, 探讨其排放规律. 同时, 结合环境因子进行分析, 揭示 CH_4 和 N_2O 排放的主控因子, 并与不同采伐强度 (皆伐和 45% 择伐) 下毛赤杨沼泽 CH_4 和 N_2O 排放通量进行对比研究, 评价采伐干扰对其排放的影响效果, 以便为客观评价我国天然湿地温室气体排放总量, 控制温室气体排放及湿地资源保护与合理利用提供科学依据.

2 研究区概况与方法 (Study area and methods)

2.1 研究区概况

研究地点位于小兴安岭中段伊春市友好林业局永青林场, 地理坐标是 $128^\circ 30' 36'' \text{E} \sim 128^\circ 45' 00'' \text{E}$, $48^\circ 03' 53'' \text{N} \sim 48^\circ 17' 11'' \text{N}$, 属于温带大陆湿润季风气候, 受海洋气团和西伯利亚寒流影响, 气温波动较大. 年积温为 $2000 \sim 2500^\circ\text{C}$. 年平均降雨量为 630 mm. 全年有两个降水高峰期, 一个是冬季降雪, 另一个是每年 7 到 8 月间的降雨, 高峰期降水占全年降雨量的 70%. 地带性土壤是暗棕壤, 占有土壤类型的 71%, 其它的土壤还有草甸土、沼泽土和泥炭土, 草甸土和沼泽土占 27%, 泥炭土占 2%. 试验观测期内 2007 年平均水位低于 2008 年, 而平均气温略高于 2008 年, 2007 年生长季节总体上相对干旱 (表 1).

表 1 毛赤杨沼泽 2007、2008年生长季水位和空气温度

Table 1 The water table and air temperature of *A. hus* swamp in the growing season of 2007 and 2008

月份	水位 /mm		空气温度 /℃	
	2007年	2008年	2007年	2008年
5月	-	-4.6	-	20.2
6月	-22.3	-11.9	25.9	22.1
7月	-21.3	-14.5	29.9	23.9
8月	-12.0	-13.1	19.9	20.6
9月	-8.7	-5.4	14.9	15.9
10月	-8.2	-5.1	10.1	12.6
平均值	-14.5	-10.0	20.1	19.4

2.2 样地设置

选取小兴安岭典型阔叶林沼泽毛赤杨 (*Abus sibirica* var *hirsute*)沼泽为研究对象,首先于 2007~2008年生长季对天然毛赤杨沼泽温室气体排放进行观测,研究其年际变化情况;其次,于 2007年 9月进行采伐对温室气体排放影响试验,试验包括天然毛赤杨沼泽、毛赤杨皆伐沼泽、毛赤杨 45% 择伐沼泽 3种处理(各样地面积 100 m × 100m),在每种处理样地,重复设置 3个静态箱,共设置静态箱 9个;最后于次年生长季对各样地进行温室气体取样分析,研究采伐对温室气体排放影响。

2.3 气体采集与分析

气体的采集用静态暗箱法。取样前将规格为 50 cm × 50 cm × 10 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。整个生长季底座放在试验地不动,以保证对底座内部的植被和土壤的干扰最小。不锈钢顶箱规格为 50 cm × 50 cm × 50 cm,箱内顶部安有直径 10 cm 的小风扇,取样时风扇保持转动,避免箱内出现气体浓度差。箱顶部中心开有直径 1 cm 的小孔,内置橡胶塞作为取样口。箱侧面开两个小孔,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。草本植物生长超过一定高度后,需要在顶箱和底座之间加延长箱,延长箱规格为 50 cm × 50 cm × 50 cm,上下开口。顶箱和延长箱外都粘贴保温材料,以减少箱内温度波动。

2007年 6月 4日~10月 24日、2008年 5月 14日~10月 24日对天然毛赤杨沼泽采集气体。为比较人为采伐干扰对自然沼泽的影响,在 2008年 5月 14日~10月 24日同期对采伐后沼泽(皆伐和 45% 择伐)样地采集气体,取样频率都是每月 3次,约 10 d取 1次,每次取样在 9:00~11:00完成。用 60mL

聚氯乙烯医用注射器连接铁针头通过箱顶部橡胶塞取样。取样时,每个采样箱 30m in 内取 4管气体,分别在顶箱扣在底座上以后的第 0、10、20和 30m in 时进行。样品用注射器取出后转移进 500mL 气体采集袋内,为防止转移过程中漏气,注射器和针头间连有三通阀。样品在采样袋内保存,1周内在中国科学院长白山森林生态系统定位站内用 HP5890 气相色谱仪同步分析气体,CH₄ 用离子火焰化检测器(FID)检测,N₂O 用电子捕获检测器(ECD)检测。实验仪器是经大气研究所进行技术改造后可以同时分析 CO₂、CH₄ 和 N₂O 3种气体成分的一台仪器,仪器工作原理详见文献(王跃思, 2003);根据生长季(5~10月)每月上、中、下旬 CH₄ 和 N₂O 排放通量的实测数据,依据公式(王跃思, 2004)计算的通量结果,再求其生长季所测各数值平均值为生长季节平均排放通量,并计算各月份的排放量并加和得到各温室气体在生长季的排放总量。

2.4 数据统计分析

用 SPSS 13.0 统计分析软件包采用 Pearson 相关分析环境因素与排放通量的关系,并对数据进行分析处理。

3 结果 (Results)

3.1 毛赤杨沼泽 CH₄、N₂O 季节变化规律

3.1.1 CH₄ 季节变化规律 天然毛赤杨沼泽与采伐干扰毛赤杨沼泽 CH₄ 排放通量在生长季节呈现出不同的季节变化规律,且其通量变化幅度较大(-0.21~125.03 mg m⁻² h⁻¹)。天然毛赤杨沼泽在 2007、2008 两个生长季节观测期内 CH₄ 排放均为双峰型曲线(图 1),并且春季排放速率都较低,一直持续到 7月中旬才开始升高。2007年 8月上旬和 9月上旬 CH₄ 排放达到峰值,分别为 2.64、3.02 mg m⁻² h⁻¹; 2008年于 7月下旬达到峰值(125.03 mg m⁻² h⁻¹)、8月下旬达到次峰值(59.13 mg m⁻² h⁻¹),之后逐渐下降,秋末之后又回到较低的排放水平。不同年份的 CH₄ 平均排放通量分别为 1.03、20.57 mg m⁻² h⁻¹。

2008年不同人为采伐干扰(皆伐、45% 择伐)后毛赤杨沼泽样地 CH₄ 排放通量季节性变化规律相似(图 2),均为单峰型曲线,排放高峰期发生在秋季,春季排放速率都较低,之后波动式增大,分别于 8月下旬、9月下旬出现排放峰值(5.36 mg m⁻² h⁻¹、3.76 mg m⁻² h⁻¹),之后排放量明显下降直至秋末;干扰样地 CH₄ 平均排放通量分别为 0.60、0.24

mg m⁻² h⁻¹.

由此可见,小兴安岭毛赤杨沼泽不同年份 CH₄ 排放通量存在较大差异,2008年 CH₄ 排放通量是2007年的 20.0倍.不同采伐干扰后毛赤杨沼泽 CH₄ 排放通量有很大程度上的降低,且择伐样地夏季总体表现为吸收现象,生长季节 CH₄ 平均排放通量分别是同年未干扰样地的 3.28%、1.30%,季节性排放通量与对照地相比都大幅度下降.

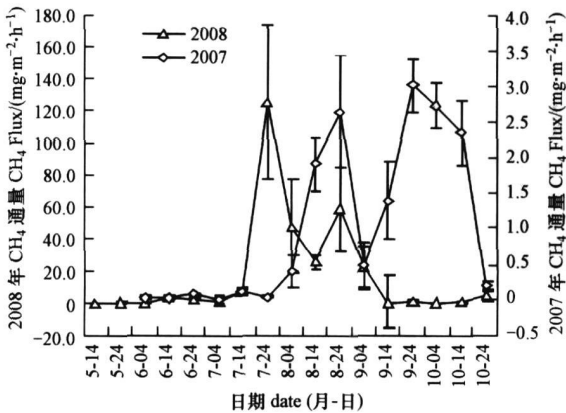


图1 毛赤杨沼泽 2007 年和 2008 年 CH₄ 排放通量季节性变化规律

Fig. 1 Seasonal variations of CH₄ emissions from *Alnus* swamp in 2007 and 2008

~ 469.67 μg m⁻² h⁻¹).天然毛赤杨沼泽在 2007 年观测期内 N₂O 排放呈双峰性曲线(图 3),高数值出现在 6 月初和 8 月中旬,峰值分别为 (178.34, 199.29 μg·m⁻²·h⁻¹),其他时期波动范围较小(10.37~79.17 μg·m⁻²·h⁻¹);2008 年 N₂O 排放通量呈波动式多峰型曲线,春季排放较低,此后逐渐升高形成两个小峰值,至 8 月中旬出现最大峰值(55.26 μg m⁻² h⁻¹),之后又波动式下降,且在秋季出现两次吸收现象.不同年份生长季节 N₂O 平均排放通量分别为 58.56, 17.41 μg m⁻² h⁻¹.

2008 年不同人为采伐干扰(皆伐、45% 择伐)后毛赤杨沼泽样地 N₂O 排放季节性变化规律相似(图 4),高峰期发生在春、秋两季,但排放通量值差异性较大.春季排放速率都较低,之后波动式增大,都于 6 月下旬达到一峰值,皆伐沼泽达到生长季排放最大值(128.88 μg·m⁻²·h⁻¹),择伐沼泽达到次峰值(207.60 μg·m⁻²·h⁻¹);之后排放通量有所下降,皆伐沼泽于 8 月下旬、9 月下旬出现另外两个次峰值(63.13, 64.43 μg·m⁻²·h⁻¹),45% 择伐沼泽 9 月下旬出现排放最大值(469.67 μg·m⁻²·h⁻¹),之后都波动式下降直至生长季末,皆伐、45% 择伐样地 N₂O 平均排放通量分别为 35.84, 114.51 μg·m⁻²·h⁻¹.

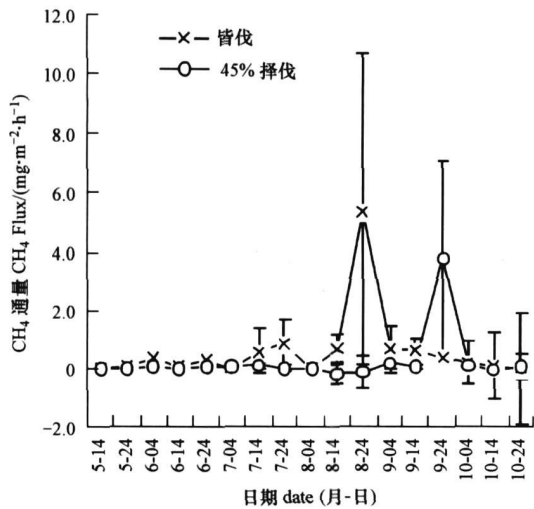


图2 2008 年毛赤杨皆伐沼泽和 45% 择伐沼泽 CH₄ 排放通量季节性变化

Fig. 2 Seasonal variations of CH₄ emissions from clear cutting and selective cutting (45%) for *Alnus* swamp in 2008

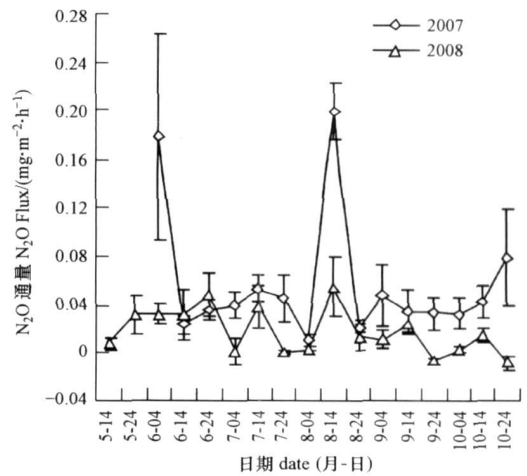


图3 毛赤杨沼泽 2007 年和 2008 年 N₂O 排放通量季节性变化

Fig. 3 Seasonal variations of N₂O emissions from *Alnus* swamp in 2007 and 2008

3.1.2 N₂O 季节性变化规律 天然毛赤杨沼泽与采伐干扰下毛赤杨沼泽 N₂O 排放通量在生长季节呈现出不同的季节性变化规律,变化范围较大(-8.53

由此可见,毛赤杨沼泽不同年份生长季 N₂O 排放量存在较大的差异,2007 年毛赤杨沼泽 N₂O 季节平均通量为 2008 年的 3.4 倍.毛赤杨人为干扰沼泽(皆伐和 45% 择伐沼泽)N₂O 排放通量季节性变化规律相似,与同年对照地相比排放量大大幅度提高,分

别是其 2.0 和 6.5 倍, 并且毛赤杨 45% 择伐沼泽生长季 N₂O 排放通量为皆伐沼泽的 3.2 倍, 因此, 人为干扰后毛赤杨沼泽 N₂O 排放量明显升高, 择伐比皆伐排放量增大更多.

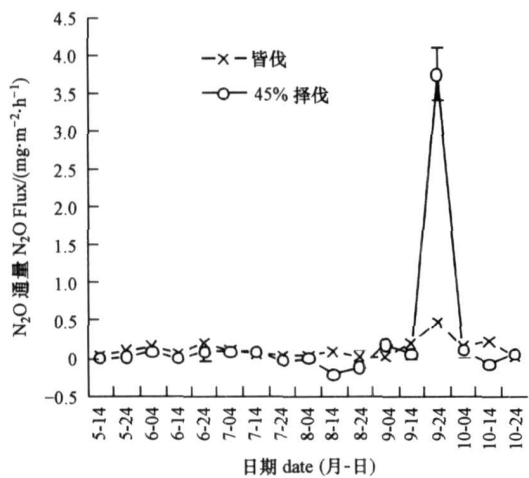


图 4 2008 年毛赤杨皆伐沼泽和 45% 择伐沼泽 N₂O 排放通量季节变化

Fig 4 Seasonal variations of N₂O emissions from *A. hus* swamp clear cutting and selective cutting (45%) in 2008

3.2 采伐对毛赤杨沼泽土壤温度和水位的影响

不同程度采伐干扰后样地空气温度(对照地: 19.1°C, 皆伐地: 20.1°C, 择伐地: 20.1°C)和地表温度(对照地: 15.9°C, 皆伐地: 19.9°C, 择伐地: 19.3°C)都有所升高, 水位(对照地: -9.3 cm, 皆伐地: -14.6 cm, 择伐地: -22.0 cm)有所下降(图 5).

这是由于采伐削减了林内郁闭度, 使达到地面太阳辐射增大, 地表温度上升, 进而增大了地表蒸发作用, 水位出现不同程度下降. 但择伐比皆伐地水位下降更明显, 可能是由于择伐后保留下来的植株生境更为优越, 减少了植株间的竞争能力, 更适宜其生长, 使蒸腾作用蒸发了更多的水分.

表 2 毛赤杨沼泽 CH₄、N₂O 通量与温度、水位相关性分析

Table 2 Correlation analysis between CH₄、N₂O flux and temperature or water table of *A. hus* swamps

群落	通量	水位	气温	土壤温度						
				0 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	30 cm	40 cm
2007年毛赤杨沼泽	CH ₄	0.729*	-0.503	-0.563*	-0.209	-0.078	0.116	0.232	0.492	0.405
	N ₂ O	0.264	-0.134	0.020	0.325	0.233	0.089	-0.001	0.253	0.168
2008年毛赤杨沼泽	CH ₄	-0.335	0.379	0.229	0.436	0.442	0.537	0.465	0.516*	0.493
	N ₂ O	-0.226	0.179	0.123	0.297	0.300	0.240	0.208	0.029	-0.121
2008毛赤杨皆伐沼泽	CH ₄	-0.029	-0.112	-0.057	0.234	0.250	0.275	0.282	0.336	0.236
	N ₂ O	0.323	0.442	0.407	0.259	0.150	0.068	0.001	-0.107	-0.213
2008毛赤杨45%择伐沼泽	CH ₄	0.035	-0.285	-0.352	-0.196	-0.139	-0.070	-0.036	0.062	0.100
	N ₂ O	-0.137	-0.304	-0.248	-0.325	-0.266	-0.200	-0.167	-0.073	-0.053

注: * 和 ** 分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平上显著; Note * and ** Correlation is significant at 0.01 level and 0.05 level

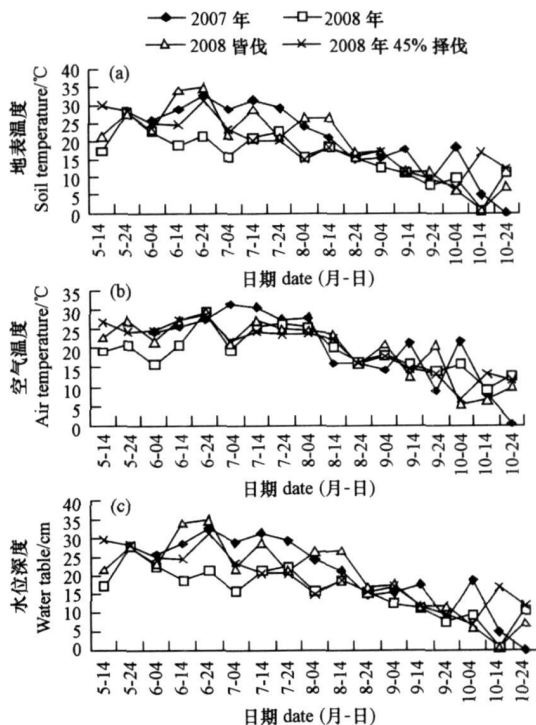


图 5 2007、2008 年天然沼泽及 2008 年皆伐、择伐沼泽温度和水位的季节动态 (a 地表温度, b 空气温度, c 水位深度. 水位深度只观测到 -40cm, ≤ -40cm 时在图中均记为 -40cm)

Fig 5 Seasonal variations of water table and temperature from the nature *A. hus* swamp in 2007, 2008 and clear cutting selective cutting (45%) in 2008 (a 0 cm soil temperature; b air temperature; c water table. Water depth is only observed to -40 cm, so ≤ -40 cm is expressed as -40 cm in the figure)

3.3 CH₄、N₂O 气体排放的影响因子

毛赤杨沼泽样地 CH₄、N₂O 通量季节变化与温度的 Pearson 相关分析表明, 天然毛赤杨沼泽 2007 年 CH₄ 排放通量与地表温度呈显著的负相关 ($p < 0.05$) (表 2), 2008 年 CH₄ 排放通量与 15cm、30cm

土壤温度呈显著的正相关 ($p < 0.05$) (表 2); 2008 年采伐干扰 (皆伐、45% 择伐) 后的毛赤杨沼泽 CH₄ 和 N₂O 排放通量与土壤温度不相关。

各样地温室气体通量季节变化与水位的相关分析表明, 仅 2007 年天然未干扰毛赤杨沼泽 CH₄ 排放通量与水位显著正相关 ($p < 0.01$) (表 2) 外, 其他样地气体通量与水位不相关。

3.4 东北山区毛赤杨沼泽 CH₄、N₂O 排放总量的初步估算

2007、2008 年天然沼泽及 2008 年皆伐和 45% 择伐沼泽生长季节 CH₄ 排放量分别为 37.05、743.04、24.36、9.67 kg hm⁻², 皆伐和 45% 择伐沼泽生长季节 CH₄ 排放量仅相当于当年天然对照地的 3.3% 和 1.3%; N₂O 排放量分别为 2.11、0.72、1.46、4.67 kg hm⁻², 皆伐和 45% 择伐沼泽生长季节 N₂O 排放量较对照地提高了 102.8% 和 548.0%。如按 CH₄ 和 N₂O 潜在增温效应分别是 CO₂ 的 23 和 296 倍计算, 则各样地相当于排放了 CO₂ 1.48、17.30、0.99、1.61 t hm⁻², 皆伐和 45% 择伐沼泽潜

在增温效应只相当于对照地的 5.7% 和 9.3%。因此, 采伐干扰有利于控制温室气体的排放。

在上述研究的基础上, 结合东北地区毛赤杨的分布情况, 对其温室气体排放情况进行初步估算。考虑到我国东北山区湿地分布情况 (刘兴土等, 2007) 及大兴安岭东部山区阔叶林沼泽 (1.02 × 10⁴ hm²) 占沼泽湿地 (101.10 × 10⁴ hm²) 的比例 (1.0%) (庄凯勋等, 2006), 由于调查区域的湿地面积超过东北山区湿地面积的 1/4, 结果具有代表性, 因而假定东北山区内各个沼泽类型的分布都与大兴安岭东部具有相同的比例, 则可求得东北山区阔叶沼泽面积。由于阔叶林沼泽主要包括毛赤杨沼泽和白桦沼泽, 初步假设各类型所占比例相同, 则本实验可初步估算东北地区天然毛赤杨沼泽在不同降水年份 CH₄ 和 N₂O 排放量增温效应相当于排放 CO₂ 范围约为 2.81 × 10⁴ ~ 32.87 × 10⁴ t 而假设全部皆伐或 45% 择伐后则分别相当于排放 CO₂ 约为 1.88 × 10⁴、3.06 × 10⁴ t (表 3)。因此, 对毛赤杨沼泽进行适度经营可有效减少其温室气体排放量。

表 3 东北山区毛赤杨沼泽生长季 CH₄、N₂O 增温潜势估算

Table 3 Estimation of CH₄、N₂O relative potential for them al absorption from *A. hus* swamp in northeast mountain regions

地区	沼泽面积 /10 ⁴ hm ²	毛赤杨面积 /10 ⁴ hm ²	相当于排放 CO ₂ /10 ⁴ t			
			2007天然沼泽	2008天然沼泽	皆伐沼泽	择伐沼泽
小兴安岭	99.20	0.50	0.74	8.65	0.50	0.81
大兴安岭 (黑龙江境内)	101.10	0.51	0.75	8.82	0.50	0.82
大兴安岭 (内蒙古境内)	113.48	0.57	0.84	9.86	0.56	0.92
长白山地区	63.18	0.32	0.47	5.54	0.32	0.52
合计	376.96	1.90	2.81	32.87	1.88	3.06

4 讨论 (Discussion)

4.1 毛赤杨沼泽 CH₄ 排放通量及其影响因子

毛赤杨沼泽各样地 CH₄ 排放有明显的季节规律, 排放峰值都出现在夏季和秋季, 绝大部分时间处于排放状态。2007、2008 年天然沼泽及 2008 年皆伐和 45% 择伐沼泽生长季节 CH₄ 排放量分别为 37.05、743.04、24.36、9.67 kg hm⁻², 毛赤杨皆伐沼泽秋末出现一次吸收现象 (0.035 kg hm⁻²), 45% 择伐沼泽多次出现吸收现象 (夏季总体表现为吸收), 吸收量为 1.15 kg hm⁻², 但生长季节总体都表现为 CH₄ 的排放源。CH₄ 季节性排放变化主要受水分条件限制, 它不但决定了土壤厌氧程度, 影响 CH₄ 的生成 (Segers, 1998), 还会影响温度 (Bubier et al., 1994)、植被 (Ding et al., 2002; Hirota et al., 2004)

等其他环境因子, 从而对 CH₄ 的产生、氧化和排放产生综合作用。夏季 CH₄ 排放速率高, 可能是由于夏季温度较高, 植物生长最旺盛, 有机物质供应充足, 分解速率快, 有机物质的分解促进了还原过程, 逐步降低了氧化还原电位所造成 (Brix et al., 2001; Rask et al., 2002)。而秋季 CH₄ 排放速率高, 可能与碳输入有关, 此时, 当年生长的根开始分解或者落叶增加了碳输入 (Kang & Freeman, 2002), 使可利用活性有机物增加, 从而促进产甲烷菌产生 CH₄。2008 年 CH₄ 排放量远远高于 2007 年, 可能主要是由于年际水位和温度差异的影响 (表 1), 由于生长季期间 2007 年平均水位明显低于 2008 年, 高水位使深层土壤保温能力较高。另外, 水位升高增大厌氧反应空间, 这些都增强了 CH₄ 产生菌活性, 从而加大了甲烷的生成。研究表明, 年际间的甲烷

通量差异少时可以达到 60% (Bubier *et al.*, 2005), 多时可以达到 3~20 倍 (Shannon *et al.*, 1994; Pulliam *et al.*, 1992), 最多直至可以达到 20~50 倍 (Crill *et al.*, 1988), 异常干旱年份水位下降较大时, 甲烷排放不但会减少, 有时甚至转变为甲烷的汇 (Moore *et al.* 1990). 本次试验观测除毛赤杨沼泽外, 同时也测得其他沼泽类型如: 苔草沼泽、灌丛沼泽、白桦沼泽 2008 年生长季平均甲烷通量, 发现其排放通量是 2007 年的 5~31 倍 (孙晓新, 2009). 因而, 本文研究结果处于现有结果的变化范围之内, 但不同年份排放量差距之大的深层次原因有待多年观察进一步进行机理性研究. 人为干扰采伐后水位下降 CH_4 排放通量显著降低 (未干扰对照地沼泽分别是干扰地的 30.5 和 76.8 倍), 这是由于水位下降不利于维持甲烷菌产生所需的厌氧空间, 使其在产生过程中直接被氧化, 这与瑞典南部未排水的赤杨 CH_4 年排放通量 ($(7.6 \pm 3.1) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 是排水赤杨和白桦的近 10 倍 ((0.90 ± 0.47) 、 $(0.90 \pm 0.51) \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) (Amold *et al.*, 2005b) 的结果相似. 择伐沼泽 CH_4 夏季多次出现吸收现象, 是由于夏季平均水位长期低于 -32.5 cm , 并且有多次观测结果低于 -40 cm (图 5), 水位下降到一定深度有可能是导致沼泽吸收 CH_4 的主要原因, 与森林泥炭地当水位下降到 $-28.2 \sim -37.5 \text{ cm}$ 时, 开始吸收 CH_4 的结论相似 (Scott *et al.*, 1999).

4.2 毛赤杨沼泽 N_2O 排放量及其影响因子

毛赤杨沼泽各样地 N_2O 排放季节变化规律差异性较大, 但排放高峰值大都出现在春季和秋季, 生长季节表现为 N_2O 的排放源, 与其他学者研究结果相同 (Brumme *et al.*, 1999; Kammann *et al.*, 1998). 2007、2008 年天然沼泽及 2008 年皆伐和 45% 择伐沼泽生长季节 N_2O 排放量分别为 2.11 、 0.72 、 1.46 、 4.67 kg hm^{-2} , 2008 年排放量大幅度降低 (仅占 2007 年的 34.1%), 秋季出现吸收和排放交替出现现象; 毛赤杨皆伐和择伐沼泽与天然沼泽相比通量大幅度提高 (分别是对照沼泽的 2.0 和 6.5 倍), 分析其原因可能是土壤中 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 (Sammerfeld *et al.*, 1993). Mitsch (1986) 等研究指出, CH_4 是在严格厌氧条件下产生的, 而 N_2O 的产生需要部分厌氧条件, 当水位过高 O_2 供应过低时, 严格的厌氧环境使反硝化作用进行彻底生成

N_2 ; 当水位过低 O_2 充足时, 硝化细菌发生硝化反应生成硝酸 (Parton *et al.*, 1996), 土壤含水量占田间持水率的 45%~75% 时, 硝化和反硝化作用共同作用产生较多的 N_2O . 因而, 08 年水位升高抑制了沼泽 N_2O 的排放, 而采伐沼泽与天然沼泽相比 N_2O 通量又大幅度提高. 这可能是由于采伐后森林沼泽水位相对下降, 采伐后林内透光增强, 使得地表温度升高, 这些都有利于 N_2O 的生成. 采伐后 N_2O 排放量增大 (Huttunen *et al.*, 2003), 以及 Amold 等 (2005b) 对排水沼泽 N_2O 排放量高于未排水的样地 ($30 \sim 90 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $20 \sim 30 \text{ mg m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 的研究结果相似, 同时, 毛赤杨沼泽具有根瘤菌的固 N 作用也是其 N_2O 排放量较大的主要原因.

5 结论 (Conclusions)

1) 毛赤杨沼泽生长季节是 CH_4 排放的源, 2008 年 CH_4 排放量是 2007 年的 20.0 倍, 短期内观测采伐干扰会大大降低 CH_4 的排放. 土壤温度和水分条件是决定 CH_4 排放的主要影响因子, 当水位较低时, CH_4 排放量与水位波动显著相关; 但当水位达到一定高度不再成为限制因子时, 深层土壤温度与 CH_4 排放显著相关, 因此, 土壤温度和水分是影响 CH_4 季节排放的主要因素, 而积水水位又是影响不同类型样地 CH_4 排放差异及年际变化的关键因素.

2) 毛赤杨沼泽生长季是 N_2O 的排放源, 2007 年 N_2O 排放量是 2008 年的 3.4 倍, 短期内观测采伐干扰会大大增大 N_2O 的排放. 生长季节毛赤杨沼泽各样地 N_2O 排放通量与各环境因子不相关, 但水位是不同类型样地 N_2O 排放差异的主要影响因素, 也是 N_2O 年际差异的决定因素.

3) 东北山区毛赤杨沼泽假设全部皆伐或择伐情况下 CH_4 和 N_2O 排放量增温效应只相当于天然毛赤杨沼泽的 5.7% 和 9.3%, 如只从温室气体排放角度考虑, 采伐都会大大降低温室气体潜在的增温效应, 皆伐沼泽降低的效果更明显; 但从生态环境、生物多样性保护和森林经营的角度考虑, 进行择伐可能会对湿地的生态平衡更有利.

责任作者简介: 牟长城 (1963—), 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 森林生态学和湿地生态学.

参考文献 (References):

Amold K V, Weslien P, Nilsson M, *et al.* 2005a Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from drained coniferous forests on organic soils [J]. Soil

- biology & biochemistry, 210: 239–254
- Amold K V, Nilsson M, Hanel B *et al*. 2005b. Fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O from drained organic soils in deciduous forests [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 37: 1059–1071
- Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. 2001. Are phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases [J]. *Aquatic Botany*, 69: 313–324
- Brunner R, Borken W, Finks S. 1999. Hierarchical control on nitrous oxide emissions in forest ecosystems [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 13: 1137–1148
- Bubier J L, Moore T R. 1994. An ecological perspective on methane emission from northern wetlands [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 9: 460–464
- Bubier J L, Gaytri B, Moore T R *et al*. 2003. Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada [J]. *Ecosystems*, 6: 353–367
- Bubier J L, Moore T R, Savage K *et al*. 2005. A comparison of methane flux in a boreal landscape between a dry and a wet year [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: 1–11
- Crill P M, Bartlett K B, Harris R C *et al*. 1988. Methane flux from Minnesota peatlands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2(4): 371–384
- Ding W X, Cai Z C, Tsunoda H. 2002. Effect of standing water depth on methane emissions from freshwater marshes in Northeast China [J]. *Atmospheric Environment*, 36: 5149–5157
- Duxburg J M, Harper L A, Mosier A R. 1993. Contributions of agroecosystems to global climate change. In: American Society of Agronomy ed. *Agricultural Ecosystem Effects on Trace Gases and Global Climate* [M]. Madison: ASA Special Publication, 1–18
- Dub S, Plamondon A P, Rothwell R L. 1995. Watering up after clear-cutting on forested wetlands of the St. Lawrence lowland [J]. *Water Resources Research*, 31(7): 1741–1750
- Hirota M, Tang Y H, Hu Q W *et al*. 2004. Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 737–748
- Huttunen J T, Nykänen H, Martikainen P J *et al*. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland [J]. *Plant and Soil*, 257: 457–462
- Jauhainen J, Takahashi H, Heikkinen J E *et al*. 2005. Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor [J]. *Global Change Biology*, 11: 1788–1797
- Kammann C, Grunhage L, Müller C *et al*. 1998. Seasonal variability and mitigation options for N_2O emissions from different managed grasslands [J]. *Environmental Pollution*, 102: 179–186
- Kang H, Freeman C. 2002. The influence of hydrochemistry on methane emissions from two contrasting northern wetlands [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 141: 263–272
- Kristina R, Hannu N. 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity [J]. *Biogeochemistry*, 35: 401–418
- Lelieveld J, Crutzen P, Dentener F J. 1998. Changing concentration lifetime and climate forcing of atmospheric methane [J]. *Tellus*, 50B: 128–150
- 刘兴士, 吕宪国, 赵魁义. 2007. 湿地资源及其保育. 李文华主编. 东北地区有关水土资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究-林业卷: 东北地区森林与湿地保育及林业发展战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 409–449
- Liu X T, Lv X D, Zhao K Y. 2007. Wetland resources and restoration. In: Li W H. *Important Consultation Item of Chinese Academy of Engineering Several Strategic Issues About Water and Soil Resource Configure, Environment Protection, and Sustainable Development in Northeast China*-Volume of Forest, Forest and Wetlands Restoration and Strategic of Forest Development in Northeast China [M]. Beijing: Science Press, 409–449 (in Chinese)
- Macdonald J A, Fowler D, Hargreaves K J *et al*. 1998. Methane emission rates from a northern wetland: response to temperature, water table and transport [J]. *Atmospheric Environment*, 32: 3219–3227
- Marja M, Pentti J M. 2001. Fluxes of N_2O , CH_4 and CO_2 on afforested boreal agricultural soils [J]. *Plant and Soil*, 231: 113–121
- Martikainen P J, Nykänen H C, Silvola P M. 1993. Effect of a lower water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands [J]. *Nature*, 366: 51–53
- Martikainen P J, Nykänen H C, Silvola A J. 1995. Change in fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide due to forest drainage of mire sites of different trophic [J]. *Plant and Soil*, 168: 571–577
- Mitsch W J, Gosselink J G. 1986. *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold Company [M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1–43: 356–430
- Moore T R, Knowles R. 1990. Methane emission from fen bog and swamp peatlands in Quebec [J]. *Biogeochemistry*, 11: 45–61
- Moore T R, Dalva M. 1993. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils [J]. *Journal of Soil Science*, 44: 551–604
- Moore T R, Dalva M. 2000. Methane and carbon dioxide exchange potentials of peat soils in aerobic and anaerobic laboratory incubations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 29: 1157–1164
- Parton W J, Mosier A R, Ojima D S *et al*. 1996. Generalized model for N_2 and N_2O production from nitrification and denitrification [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(3): 401–412
- Pulliam W M, Meyer J L. 1992. Methane emissions from floodplain swamps of the Ogeechee River: Long-term patterns and effects of climate change [J]. *Biogeochemistry*, 15: 151–174
- Rask H, Schoenau J, Anderson D. 2002. Factors influencing methane flux from a boreal forest wetland in Saskatchewan, Canada [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 34: 435–443
- Regina K, Nykänen H, Silvola J *et al*. 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity [J]. *Biogeochemistry*, 35: 401–418
- Sadredin C, Moosavi Patrick M C. 1996. Controls on CH_4 flux from an Alaskan boreal wetland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(2):

287—296

- Scott K J, Kelly C A, Rudd J W. 1999. The importance of floating peat to methane fluxes from flooded peatlands [J]. *Biogeochemistry*, 47: 187—202
- Segers R. 1998. Methane production and methane consumption—a review of processes underlying wetland methane fluxes [J]. *Biogeochemistry* 41: 23—51
- Shannon R D, White J R. 1994. A three-year study of controls of methane emissions from two Michigan peatlands [J]. *Biogeochemistry* 27: 35—60
- Solomon S D, Qin D, Manning M, *et al*. 2007. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *The Physical Science Basis* [R]. 140—143
- Summerfeld R A, Mosier A R, Messelink R C. 1993. CO₂, CH₄ and N₂O flux through a Wyoming snow pack and implications for global budgets [J]. *Nature*, 361: 140—142
- 宋长春, 阎百兴, 王跃思, 等. 2003. 三江平原沼泽湿地 CO₂ 和 CH₄ 通量及影响因子 [J]. *科学通报*, 48(23): 2473—2477
- Song C C, Yan B X, Wang Y S, *et al*. 2003. Characteristics and impacting factors of CH₄ and CO₂ fluxes in Sanjiang Plain wetlands [J]. *Chinese Science Bulletin* 48(23): 2473—2477 (in Chinese)
- 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 等. 2006a. 淡水沼泽湿地 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放通量年际变化及其对氮输入的响应 [J]. *环境科学*, 27(12): 2369—2375
- Song C C, Zhang L H, Wang Y Y, *et al*. 2006a. Annual dynamics of CO₂, CH₄, N₂O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization [J]. *Environmental Science* 27(12): 2369—2375 (in Chinese)
- 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 2006b. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化 [J]. *地理科学*, 26(1): 82—86
- Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, *et al*. 2006b. Character of the greenhouse gas emission in the fresh water mire under human activities [J]. *Sciences Geographica Sinica* 26(1): 82—86 (in Chinese)
- Sun G H, Riekerk L V, Komhak. 2000. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida [J]. *Wetlands* 20(1): 101—112
- 孙晓新. 2009. 小兴安岭沼泽甲烷排放及其对人为干扰的响应研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学. 26—29
- Sun X X. 2009. Methane emission from natural wetlands and its response to anthropogenic disturbance in Xiaoxing'an Mountains Northeast China [D]. Harbin: Northeast Forestry University. 26—29 (in Chinese)
- 王德宣, 吕宪国, 丁维新, 等. 2002. 三江平原沼泽湿地与稻田 CH₄ 排放对比研究 [J]. *地理科学*, 22(4): 500—503
- Wang D X, Li X G, Ding W X, *et al*. 2002. Comparison of methane emission from marshes and Paddy Field in Sanjiang Plain [J]. *Sciences Geographica Sinica* 22(4): 500—503 (in Chinese)
- 王跃思, 刘广仁, 王迎红, 等. 2003. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 4(10): 84—90
- Wang Y S, Liu G R, Wang Y H, *et al*. 2003. Simultaneous measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control* 4(10): 84—90 (in Chinese)
- 王跃思. 2004. 碳交换的箱法测定 // 陈泮勤主编. 地球系统碳循环 [M]. 北京: 科学出版社. 130—145
- Wang Y S. 2004. Chamber methods for measuring carbon exchange // In: Chen P Q ed. *Carbon Cycling in Earth System* [M]. Beijing: Science Press. 130—145 (in Chinese)
- Whiting G J, Chanton J P. 1993. Primary production control of methane emission from wetlands [J]. *Nature*, 364: 794—795
- 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 1999. 丘陵区稻田 N₂O 排放的特点 [J]. *土壤与环境*, (4): 266—270
- Xu H, Xing G X, Cai Z C, *et al*. 1999. Characteristics of N₂O Emissions from Paddy Fields in Hilly Area [J]. *Soil and Environmental Sciences* 8(4): 266—270 (in Chinese)
- 杨继松, 于家宝, 刘景双, 等. 2004. 三江平原湿地岛状林 CH₄ 和 N₂O 排放通量的特征 [J]. *生态环境*, 13(4): 476—479
- Yang J S, Yu J B, Liu J S, *et al*. 2004. N₂O and CH₄ fluxes in an island forest in wetland Sanjiang Plain [J]. *Ecology and Environment* 13(4): 476—479 (in Chinese)
- 杨继松, 刘景双, 王金达, 等. 2006. 三江平原生长季沼泽湿地 CH₄, N₂O 排放及其影响因素 [J]. *植物生态学报*, 30(3): 432—440
- Yang J S, Li J S, Wang J D, *et al*. 2006. Emissions of CH₄ and N₂O from wetland in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Plant Ecology Formerly Acta Phytocologica Sinica* 30(3): 432—440 (in Chinese)
- 叶勇, 卢昌义, 林鹏. 2000. 海南岛和厦门红树林湿地 CH₄ 排放的时空变化 [J]. *大气科学*, 24(2): 152—156
- Ye Y, Lu C Y, Lin P. 2000. Seasonal and spatial changes of methane emissions from mangrove wetlands in Hainan Island and Xiamen [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* 24(2): 152—156 (in Chinese)
- Zerv A, Mencuccini M. 2005. Short-term effects of clearfelling on soil CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in a Sitka spruce plantation [J]. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 2025—2036
- 庄凯勋, 侯武才. 2006. 大兴安岭东部国有林区的湿地资源现状及保护对策 [J]. *东北林业大学学报*, 34(1): 83—86
- Zhuang K C, Hou W C. 2006. Wetlands resources of state-owned forest region in the East of Daxingan Mountains [J]. *Journal of Northeast Forestry University* 34(1): 83—86 (in Chinese)