

乌梁素海湖泊湿地植物区甲烷排放规律

段晓男, 王效科*, 陈琳, 牟玉静, 欧阳志云

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:运用静态箱法, 对内蒙古乌梁素海不同水位的芦苇群落(*Phragmites australis*)和龙须眼子菜群落(*Potamogeton pectinatus*)的甲烷排放通量进行 2 a(2003 ~ 2004)野外观测. 发现龙须眼子菜群落(沉水植物)甲烷平均排放速率为 $(3.44 \pm 1.60) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 仅为芦苇群落(挺水植物)的平均排放速率的 21.94%. 高水位芦苇的排放速率要大于低水位芦苇群落. 芦苇群落的甲烷排放具有明显的季节性和日变化规律, 并且 5 cm 土壤温度和光合有效辐射分别是影响季节性和日变化的主要环境因子. 根据观测数据和植物的分布面积, 计算得出乌梁素海 2003 和 2004 年的甲烷排放量为 1 024.6 t 和 1 156.7 t.

关键词:湖泊湿地; 甲烷; 芦苇; 龙须眼子菜; 乌梁素海

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)03-0455-05

Methane Emission from Aquatic Vegetation Zones of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia

DUAN Xiao-nan, WANG Xiao-ke, CHEN Lin, MU Yu-jing, OUYANG Zhi-yun

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: To quantify the variations of methane fluxes from different aquatic vegetation zones, two-year measurements were measured at different aquatic vegetation zones and water depths using static chamber technique during two growing season from April to October in 2003 and 2004. Results showed that the average emission flux of CH_4 from *Potamogeton pectinatus* (submerged macrophyte) growing zones was $(3.44 \pm 1.60) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 78.06% lower than that from *Phragmites australis* (emergent macrophyte). Significant seasonal and diurnal variations of CH_4 emission were observed for *Phragmites* community; however, the variations were minor for *P. pectinatus*. Sediment temperature at 5 cm and photosynthesis active radiation were important factors influencing seasonal and diurnal variations of CH_4 fluxes from *Phragmites* zone. Annual methane flux from the lake was 1 024.6 t and 1 156.7 t in 2003 and 2004, respectively.

Key words: lake wetland; methane; reed; pondweed; Wuliangsu Lake

甲烷是大气中丰度仅次于二氧化碳的具温室效应的气体, 对全球变暖和对流层臭氧的损耗具有重要的影响^[1]. 而自然湿地是甲烷主要的排放源之一, 约占全球甲烷自然源排放量的 75%^[2], 引起越来越多的关注. 但全球对自然湿地的甲烷排放研究在区域分布和湿地类型上并不是均衡的, 主要以欧洲和北美的泥炭湿地和沼泽湿地为主. 在我国, 三江平原^[3,4], 若尔盖湿地^[4], 海南和厦门的红树林湿地^[5], 青藏高原泥炭沼泽^[6]开展了多年的观测, 并在此基础上完成了全国沼泽湿地甲烷排放量的初步估算^[4], 但对于分布面积同样广阔的湖泊湿地, 尤其是干旱区的湖泊甲烷排放观测, 却很少涉及.

水生植物是湖泊湿地的重要组成部分, 也被认为是湿地甲烷排放的影响因素之一, 对甲烷的产生, 氧化和排放过程有重要的影响^[7]. 由于我国大部分湖泊是浅水湖泊, 适宜水生植物的分布和生长, 加上富营养化的影响, 一些湖泊大型水生植物生长茂盛, 这就对湖泊湿地的甲烷排放产生重要的影响. 本研

究通过对内蒙古乌梁素海的不同类型植物群落的甲烷排放通量进行观测, 分析湖泊湿地植物群落甲烷排放的规律及其影响因素, 探讨水生植物在湖泊湿地甲烷排放中的作用, 以期为我国湖泊湿地甲烷排放量的估算提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验地概况

本实验在内蒙古乌梁素海渔场进行. 乌梁素海(40°47' ~ 41°03'N, 108°43' ~ 108°57'E), 位于内蒙古自治区乌拉特前旗境内. 湖区面积 293 km², 平均水深 0.7 m, 湖面高程平均为 1 018.5 m. 乌梁素海是我国黄河流域最大的湖泊, 也是世界上同一纬度最大的湿地. 平均气温为 7.3℃, 平均降水量为 215.7

收稿日期: 2006-04-26; 修订日期: 2006-09-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412503); 国家自然科学基金委员会创新群体项目(40321101)

作者简介: 段晓男(1979 ~)男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湿地生态系统碳循环, E-mail: duanxn@cees.ac.cn

mm,年蒸发量为 $3.45 \times 10^8 \text{ m}^3$,属于典型的温带大陆性气候.80%的水面在 0.8 m 以下.水生植物在乌梁素海的分布面积较广,其中优势种就是龙须眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 和 芦 苇 (*Phragmites australis*).芦苇的分布水深一般是 0~1.5 m,而龙须

眼子菜几乎占据了所有的明水区.
实验选取了不同水位的芦苇(Reed-H 和 Reed-L)和龙须眼子菜群落(Pondweed-H 和 Pondweed-L)进行甲烷通量的观测,样点的具体特征如表 1 所示.

1.2 实验方法

表 1 乌梁素海样点基本特征

Table 1 Characteristics of sampling plots in Wuliangsu Lake

样方	植物类型	水位/m	植物密度/株·m ⁻²	株高 /cm	地上生物量/kg·m ⁻²
Reed-L	芦苇	0.46 ± 0.09	131 ± 23	223 ± 21	1.86 ± 0.41
Reed-H	芦苇	0.83 ± 0.12	108 ± 17	301 ± 35	2.52 ± 0.53
Pondweed-L	龙须眼子菜	0.51 ± 0.11			1.65 ± 0.25
Pondweed-H	龙须眼子菜	0.78 ± 0.14			1.85 ± 0.62

实验采取静态箱法进行观测.在芦苇群落,根据芦苇的生长情况,采用不同规格的同化箱(50 cm × 50 cm × 50 cm, 50 cm × 50 cm × 100 cm),采样箱的侧板和顶板由无色、光滑的 3 mm 有机玻璃制成,能透过 93%的光合有效辐射.如果芦苇的高度高于箱子的高度,就将芦苇植株轻轻弯曲,放入箱中.而在龙须眼子菜群落使用的是静态浮箱(50 cm × 50 cm × 50 cm).将箱子固定在救生圈上,漂浮在水面上进行测定.

每年的观测期从 4 月湖面解冻到 11 月湖面封冻结束.期间每 2 周对所有样点取样 1 次,取样时间在 10:00~12:00 之间,并且每个月进行 1 次间隔为 2 h 的甲烷通量日变化观测.

将箱子固定后,每隔 10 min 取 1 次样,共采集 4 个样品.气体通过手持式气泵(Sibate, 1 L·min⁻¹)收集到气袋(1 L)中.然后带回实验室,通过带离子火焰化监测器(FID)的 GA 112A 气相色谱仪进行甲烷浓度测定.炉温,注射器和检测器的温度分别是 80, 100 和 180℃,色谱柱采用长度为 2 m,直径 2 mm 的 60~80 目 13XMS 填充物来分离 CH₄,载气(N₂)流速为 30 mL·min⁻¹,燃气 H₂ 和压缩空气的流速分别为 20 mL·min⁻¹和 30 mL·min⁻¹.

大气温度和相对湿度通过温湿度传感器(Vaisala, HMP35A)进行测定,光合有效辐射(PAR)通过光量子传感器(Li-COR, QZ190)测定,水温由 5、15 和 50 cm 处的土壤温度通过 T 型热电偶测定.测定数据通过数据采集器(Campbell Scientific CR10X)以 10 min 为步长进行收集.土壤的 pH 以及氧化还原电位通过 pH/Eh 仪(HANNA, HI8414)现场测定.

甲烷的排放通量为单位时间单位面积观测箱内排放气体的质量变化,可以用下式表示:

$$F = \rho \times dc/dt \times 273/(273 + T) \times H \quad (1)$$

式中,ρ 为标准状态下甲烷的密度(0.714 kg·m⁻³),H 为箱子顶部到水面的高度(m),T 为箱内的平均温度(℃),dc/dt 为单位时间内箱内甲烷浓度的变化.

2 结果与讨论

2.1 植物群落的甲烷排放通量年际变化特征

各个植物样方甲烷的年平均排放通量如表 2 所示.Reed-H 和 Reed-L 2 个样方 2 a 的观测结果存在一定的差异,2004 年的数据要高于 2003 年,这可能与植物的生长有关.2003 年由于乌梁素海春天灌水导致芦苇的生长活动受到影响,生物量也要低于 2004 年.其次样方间也存在差异,Reed-H 2a 的平均观测结果[(17.81 ± 9.18) mg·(m²·h)⁻¹]要高于 Reed-L [(13.55 ± 7.06) mg·(m²·h)⁻¹].由于 Reed-H 的生物量要大于 Reed-L,这说明芦苇甲烷的排放通量受植物的生长状况的影响.

表 2 不同水位的水生植物样方的甲烷
年平均排放通量/mg·(m²·h)⁻¹

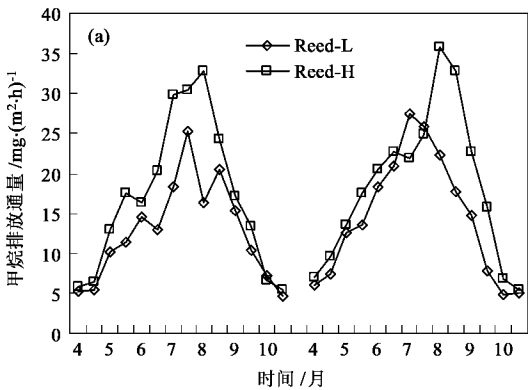
Table 2 Average methane flux from plots with different
water table /mg·(m²·h)⁻¹

水生植物样方	2003 年平均排放通量	2004 年平均排放通量
Reed-H	17.93 ± 8.77	19.13 ± 9.62
Reed-L	12.67 ± 6.18	14.87 ± 7.65
Pondweed-H	2.09 ± 0.78	4.26 ± 1.44
Pondweed-L	2.32 ± 0.91	4.20 ± 1.46

2003 年 Pondweed-L 样方的甲烷排放通量为 1.26~5.20 mg·(m²·h)⁻¹,平均为(2.49 ± 1.05) mg·(m²·h)⁻¹;2004 年平均为(4.20 ± 1.46) mg·(m²·h)⁻¹.Pondweed-H 样方 2 a 的平均排放通量为(2.81 ± 1.64) mg·(m²·h)⁻¹和(4.26 ± 1.44) mg·(m²·h)⁻¹.2 个样方的 2004 年的观测结果要大

于 2003 年,但同年度的样方间甲烷排放速率没有明显的差异($p > 0.05$).年度之间的差异是由于在 2003 年乌梁素海大规模的蓝藻暴发,沉水植物和藻类之间存在竞争性,导致植物的生长受到严重的影响.可见沉水植物群落甲烷排放同样受到沉水植物生长状况的影响.

芦苇样方(Reed-H 和 Reed-L)的甲烷排放速率要远远大于龙须眼子菜样方(Pondweed-H 和 Pondweed-L),一方面,芦苇和龙须眼子菜的传输能力有所不同,芦苇作为挺水植物可以将土壤中产生的甲烷直接输送到大气中,而沉水植物只能将气体输送到水体中^[8].另一个可能的原因是 2 种植物对甲烷产生和氧化过程的影响有所差异.



2.2 植物群落的甲烷排放通量季节性变化特征

2003 ~ 2004 年,Reed-H 和 Reed-L 群落的甲烷排放通量有相似的季节性变化特征.4 月份,甲烷的排放通量比较低,随着植物的生长,排放速率逐渐增加,Reed-H 和 Reed-L 分别在 7 月下旬和 8 月上旬植物生长成熟时达到最大值.之后芦苇逐渐进入衰老期,甲烷排放速率也随之减小,如图 1(a).

Pondweed-H 和 Pondweed-L 的季节性变化趋势没有芦苇群落显著.2003 年受到富营养化造成的蓝藻暴发的影响,2 个样方全年的甲烷排放量没有明显的变化规律.在 2004 年,甲烷排放速率从 4 月份波动上升,夏季的排放量较大,之后逐渐降低,如图 1(b).

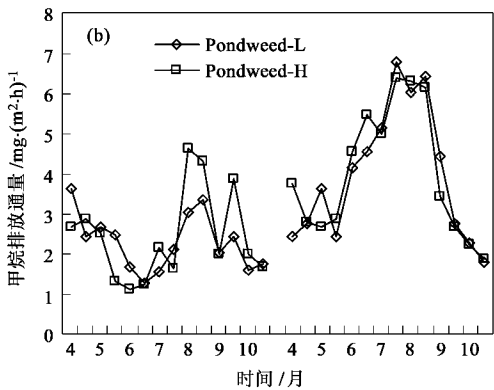


图 1 乌梁素海植物群落样点甲烷排放季节性变化规律

Fig.1 Seasonal variations of methane emission from plots of Wuliangsu Lake

2.3 植物群落的甲烷排放通量日变化特征

在芦苇不同的生长期,甲烷排放的日变化规律是不同的,但 Reed-H 和 Reed-L 群落的甲烷日变化具有相似性.以 2003 年为例,在植物的生长初期,甲烷排放的昼夜变化比较小,夜间和白天的排放通量比为 0.72 和 0.70.在 7,8 月份植物生长期,昼夜甲烷排放速率差异变大[Reed-H 和 Reed-L 的夜间和白天的平均排放速率为 37.05 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 15.12 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 18.18 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 10.04 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$].在 9 月和 10 月植物的衰老期,2 个样方的日变化趋势变小,Reed-H 和 Reed-L 的夜间和白天的排放通量比分别变成 0.57 和 0.72, 0.43 和 0.64(图 2).

Pondweed-H 和 Pondweed-L 样方的日变化趋势不是很显著.但甲烷排放速率在夜间比较低,日间较高,通常在土壤温度最高的 14:00 ~ 18:00 达到最大值(图 2).

2.4 影响植物群落甲烷排放通量的环境因素

2.4.1 水位

水位被认为是影响湿地甲烷排放的重要控制因子^[9].由于乌梁素海是河套灌区农田退水的接纳水体,每年有 $6.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量注入乌梁素海,所以乌梁素海的水位不像自然湿地变化那样依赖于降水量,变化幅度比较小,所以在时间尺度上,对于特定的研究样方,水位对于甲烷排放的影响并不显著($p > 0.05$).但在空间尺度上却有重要的指示意义,首先水位是植物分布的重要影响因素.以乌梁素海为例,在湖周零星分布着香蒲、纱草,随着水位升高,出现成片的芦苇群落,当水位超过 1.5 m,就几乎没有挺水植物的分布.而沉水植物的分布不受水位的限制.有无植物分布^[10]和植物类型^[11,12]的差异都会影响甲烷排放通量的高低.并且水位是影响植物生长的重要因素,乌梁素海芦苇群落的生物量和水位成正相关关系^[13].植物的初级生产力或者生物量表征着水生植物固定碳的能力.由于植物所固定的碳会被输送到地下,部分会成为甲烷产生菌的原

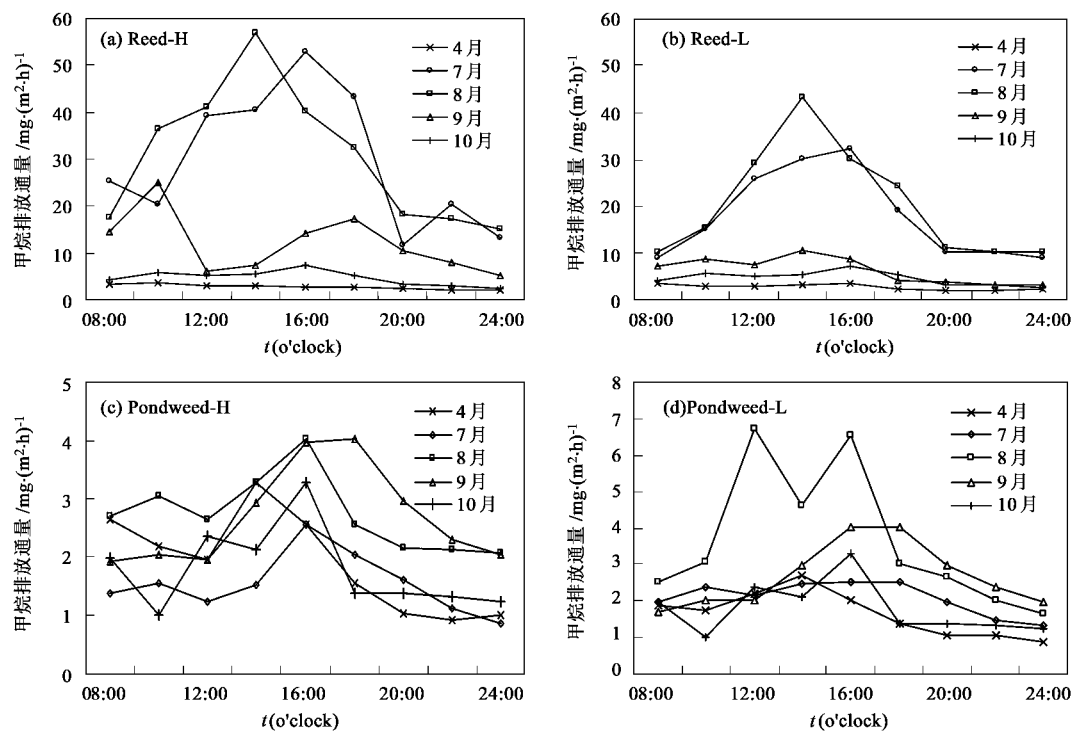


图 2 乌梁素海植物样点甲烷排放日变化变化规律

Fig.2 Diel variations of methane emission from plots of Wuliangsu Lake

料^[14]. 因此净生态系统生产力 (net ecosystem production, NEP)^[15]和生物量^[16]被认为是甲烷排放通量差异的指示因子之一. 所以水位是通过影响水生植物的分布和生长而作用于湖泊湿地甲烷气体的释放.

2.4.2 温度

将各个环境影响因子和 Reed-H、Reed-L 的甲烷排放速率进行相关分析, 发现 5 cm 土壤温度和芦苇群落的甲烷季节性排放量成指数相关关系, 说明甲烷的排放速率随着土壤温度的升高而增加. 因为土壤中产甲烷细菌的活动是温度限制过程^[17], 所以温度的升高会对甲烷的产生起到促进作用 (图 3). 但由于甲

烷气体从土壤进入大气是 1 个复杂的过程, 所以受地下微环境的影响, 甲烷的排放通量与土壤温度的相关关系在不同的观测中呈现不同的表现形式^[18-20].

2.4.3 光合有效辐射

光合有效辐射 (PAR) 是影响芦苇甲烷排放另外 1 个重要的环境因子. 在芦苇的生长期, Reed-H 和 Reed-L 的甲烷排放速率的日变化和 PAR 成正相关关系, 而 Pondweed-H 与 Pondweed-L 和 PAR 则无相关关系 (图 4), 这和不同植物所采取的不同甲烷传输机制有关. 芦苇在黑暗的条件下, 采取扩散传输的机制; 而在有光照的情况下, 采取对流传输的机制^[21].

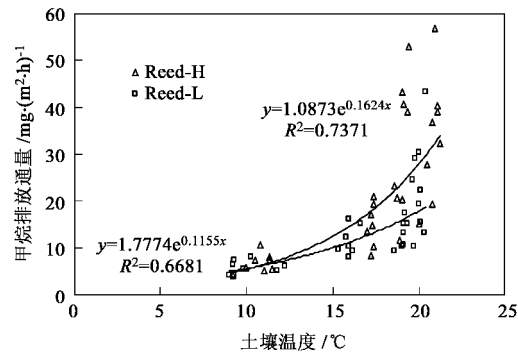


图 3 乌梁素海芦苇样点甲烷排放速率和 5 cm 土壤温度的关系

Fig.3 Relationship between methane fluxes and sediment temperature at 5 cm

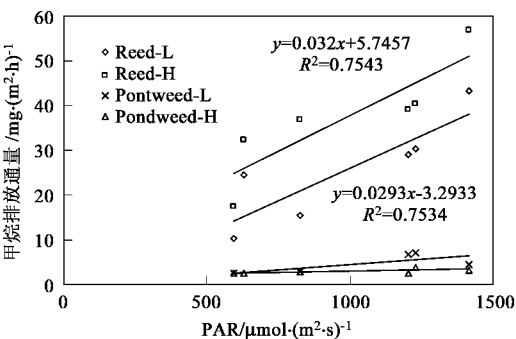


图 4 乌梁素海植物样点甲烷排放通量和 PAR 的相关关系

Fig.4 Relationships between CH₄ fluxes and PAR in daytime in sampling plot

由于对流传输的效率要高于扩散传输,所以光照会促进芦苇群落甲烷的排放速率.而龙须眼子菜群落采用的扩散传输的机制,光照对甲烷排放速率的影响较小.

2.5 乌梁素海甲烷排放量估算

根据乌梁素海的芦苇和龙须眼子菜的分布面积以及对2个群落的4~11月的甲烷观测数据,计算出2003年和2004年全湖的非冰封期的甲烷排放量分别是1 024.6 t和1 156.7 t.其中芦苇群落的甲烷排放量分别占到2 a总的排放量的84.85%和79.87%,说明芦苇群落在乌梁素海湿地甲烷排放中起着重要的作用.和湖北东湖的观测结果^[22]相比,虽然乌梁素海的所处的纬度要高于东湖,但由于东湖的优势种为藻类,排放速率远远低于乌梁素海.因此在估算湖泊湿地甲烷排放量时,水生植物类型是1个不容忽视的因素.

3 结论

- (1) 乌梁素海芦苇分布区的甲烷排放通量具有明显的季节性和日变化规律.
- (2) 土壤温度和光合有效辐射分别是解释芦苇群落甲烷排放季节性和日变化的主要环境因子.
- (3) 乌梁素海龙须眼子菜分布区的甲烷排放通量要显著低于芦苇分布区.
- (4) 乌梁素海的2003年和2004年的甲烷排放量分别为1 024.6 t和1 156.7 t.

参考文献:

[1] Jugsjinda A, Delaune R D, Lindau C W, *et al.* Factors controlling carbon dioxide and methane production in acid sulfate soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 1996, **87**: 345 ~ 355.

[2] IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2001[M]. The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

[3] Song C C, Wang Y Y, Wang Y S, *et al.* Carbon dynamics of wetland in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Geographical Research, 2003, **13**(3): 228 ~ 231.

[4] Ding W X, Cai Z C, Wang D X. Preliminary budget of methane emissions from natural wetlands in China [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**: 751 ~ 759.

[5] 叶勇, 卢昌义, 林鹏. 海南岛和厦门红树林湿地 CH₄ 排放的时空变化[J]. 大气科学, 2000, **24**: 152 ~ 156.

[6] 金会军, 吴杰, 程国栋, 等. 青藏高原湿地 CH₄ 排放评估[J]. 科学通报, 1999, **44**: 1758 ~ 1762.

[7] Joabsson A, Christensen T R, Wellen B. Vascular plant controls on methane emissions from methane peatforming wetlands[J]. Trends in Ecology and Evolution, 1999, **14**: 385 ~ 388.

[8] Hirota M, Tang Y H, Hu Q W, *et al.* Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, **36**(5): 737 ~ 748.

[9] MacDonald J A, Flower D, Hargreaves K J, *et al.* Methane emission rates from a northern wetland: response to temperature, water table and transport[J]. Atmospheric Environment, 1998, **32** (19): 3219 ~ 3227.

[10] 宋长春. 湿地生态系统甲烷排放研究进展[J]. 生态环境, 2004, **13**(1): 69 ~ 73.

[11] Van der Nat F J W A, Middelburg J J. Effects of two common macrophytes on methane dynamics in freshwater sediments [J]. Biogeochemistry, 1998, **43**: 79 ~ 104.

[12] Ding W X, Cai Z C, Tsuruta H. Plant species effects on methane emissions from freshwater marshes[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(18): 3199 ~ 3207.

[13] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析[J]. 植物生态学报, 2004, **28**(2): 246 ~ 251.

[14] King J Y, Reebergh W S. A pulse-labeling experiment to determine the contribution of recent plant photosynthates to net methane emission in arctic wet sedge tundra [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, **34**: 173 ~ 180.

[15] Whiting G J, Chanton J P. Control of the diurnal pattern of methane emission from emergent aquatic macrophytes by gas transport mechanism[J]. Aquatic Botany, 1996, **54**: 237 ~ 253.

[16] Kankaala P, Mäkelä S, Bergström I, *et al.* Midsummer spatial variation in methane efflux from stands of littoral vegetation in a boreal meso-eutrophic lake[J]. Freshwater Biology, 2003, **48**: 1617 ~ 1629.

[17] Zimov S A, Davidov S P, Zimova G M, *et al.* Contribution of disturbance to high-latitude amplification of atmospheric CO₂ [J]. Sciences, 1999, **284**: 1973 ~ 1976.

[18] Crill P M, Bartlett K B, Sebacher D I, *et al.* Methane flux from Minnesota peatlands[J]. Global Biogeochemistry Cycles, 1988, **2**: 371 ~ 384.

[19] Rask H, Schoenau J, Anderson D. Factors influencing methane flux from a boreal forest wetland in Saskatchewan, Canada [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, **34**: 435 ~ 443.

[20] Roulet N T, Ash R, Moore E R. Low boreal wetlands as a source of atmospheric methane [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, **97**: 3739 ~ 3749.

[21] Van der Nat F J W A, Middelburg J J. Methane emission from tidal freshwater marshes [J]. Biogeochemistry, 2000, **49**: 103 ~ 121.

[22] Xing Y P, Xie P, Yang H, *et al.* Methane and carbon dioxide fluxes from a shallow hypereutrophic subtropical Lake in China[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**: 5532 ~ 5540.