

沼泽湿地生态系统土壤 CO_2 和 CH_4 排放动态及影响因素

宋长春^{1,2}, 杨文燕¹, 徐小锋¹, 娄彦景¹, 张金波¹

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130021; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100083)

摘要: 湿地在全球陆地生态系统碳循环中具有重要作用, 沼泽湿地温室气体排放特别是 CO_2 和 CH_4 排放具有明显的时空变化特征. 沼泽湿地 CO_2 和 CH_4 的产生和排放与土壤有机碳、溶解有机碳及氮素含量有密切关系, 同时受土壤温度和水文条件的影响. 三江平原沼泽湿地土壤中 CO_2 和 CH_4 具有较高的浓度值, 浓集中心位于植物根层(10~35cm), 9月下旬到10月中旬沼泽湿地植物地上部分枯死后, 土壤中 CH_4 和 CO_2 浓度有阶段性增加的趋势, 且土壤中 CO_2 与 CH_4 间呈显著正相关关系. 沼泽湿地生态系统呼吸及土壤呼吸对 CH_4 排放通量也有较大的影响, 二者间呈显著正相关关系.

关键词: 沼泽湿地; 土壤; 温室气体; 有机碳; 生态系统呼吸

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)04-0001-06

Dynamics of CO_2 and CH_4 Concentration in the Mire Soil and Its Impact Factors

SONG Chang-chun^{1,2}, YANG Wen-yan¹, XU Xiao-feng¹, LOU Yan-jing¹, ZHANG Jin-bo¹

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, China; 2. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: The wetland plays a important role in global carbon cycling in terrestrial ecosystem, the greenhouse gas emission in the mire, especially the CO_2 and CH_4 level, show distinctly spatial and temporal variation. The product and emission of the CO_2 and CH_4 are related to soil organic carbon (SOC), dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen content, meanwhile which are affected by the soil temperature and hydrological condition. The concentration of CO_2 and CH_4 are high in mire soil in the Sanjiang plain, especial at the root layer(10~35cm). From the middle of September to October, the aboveground of plant came into die, but the CO_2 and CH_4 level increase significantly in mire soil, and show significantly positive relationship between them. The ecosystem respiration and the soil respiration affected the methane emission distinctly, also with the significantly positive relationship.

Key words: mire; soil profile; greenhouse gas; organic carbon; ecosystem respiration

湿地在陆地生态系统碳循环具有重要作用, 大多数湿地是碳的汇, 其中储藏在不同类型湿地中的碳约占地球陆地碳总量的 15 %^[1], 同时, 湿地生境又是大气 CH_4 主要的自然来源, 估计全世界每年有 110×10^{12} g CH_4 是来自天然湿地中的厌氧分解, 天然湿地每年向大气中排放的 CH_4 占全球 CH_4 排放总量的 15 % ~ 30 %^[2~4].

湿地植物从大气中获取大量的 CO_2 , 又通过分解和呼吸作用以 CO_2 和 CH_4 的形式排放到大气中, 此过程受气候变化较大的影响, 如气候变暖或降水减少可加速湿地沉积有机质的分解速率, 促使它们成为大气中碳的源^[5,6]. 湿地中不同沉积阶段的沉积物所释放的 CH_4 、 CO_2 量不同, 新输入有机物质受环境条件的影响较大, 更易于被氧化, 通常浅层土壤中 CH_4 、 CO_2 的产生率高于深层土壤^[7]. 另外, 由于有机质的不完全分解导致大多数湿地中碳和营养物质的积累, 此过程的重要控制因子是植物群落、温度、水文条件特别是水位, 它直接影响氧的可利用

率、气体的扩散率及微生物的活性^[8]. 土壤呼吸通量是植物根和土壤微生物活性等的综合反映, 其与近地表土壤温度呈正相关关系^[9], 并随着水位降低线性增加, 从而直接影响土壤氧化-还原电位^[10]. CH_4 从湿地土壤中的排放和吸收经过几个生物和物理过程^[11,12], 在厌氧环境条件下, CH_4 通过甲烷产生菌的作用产生, 土壤处于缺氧及沉积环境下, 当大量不稳定有机质输入且 SO_4^{2-} 浓度较高时, 碳质发生矿化并最终形成 CH_4 , 其中土壤中乙酸盐降解与 CO_2 还原是生成 CH_4 的主要途径^[12,13]. 湿地中 CH_4 通量在时空 2 个方面都有较大变化, 这种在空间上的变化与 CH_4 产生、氧化和迁移过程有关, 同时受不同地域的特殊因素如水文状况、植物群落等有

收稿日期: 2003-10-19; 修订日期: 2004-01-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01, KZCX3-SW-332 和 KZCX1-SW-19)

作者简介: 宋长春(1968~), 男, 博士, 研究员, 主要从事湿地生物地球化学研究 E-mail: Songcc@mail.neigae.ac.cn

关^[13,14],模型计算结果表明,土壤剖面 CH_4 浓度及每天 CH_4 向大气中的排放量及 CH_4 的产生和氧化率受土壤温度控制,而水位位置决定缺氧和氧化层的范围和氧化程度^[15].湿地土壤中 CO_2 和 CH_4 浓度变化是湿地生态系统生物地球化学过程与环境因子变化的综合体现,其受温度、水文、及植物群落等多种因素制约,并与土壤呼吸及土壤有机质含量等密切相关,其年季动态对湿地生态系统碳循环具有重要影响。

本文研究的目的是深入识别沼泽湿地土壤剖面中 CO_2 和 CH_4 的浓度变化及浓集特征,评价其与土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)、溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、氮素含量等的关系,并探讨湿地生态系统呼吸和土壤呼吸对 CH_4 排放的影响。

1 试验材料与方法

研究工作选取三江平原有代表性的别拉洪河与浓江河间地带($\text{E}133^\circ 31'$, $\text{N}47^\circ 35'$),区内分布有大面积的天然沼泽湿地.本区海拔 55 m ~ 65 m,年平均降雨量 550 ~ 600 mm,主要湿地类型为常年季水型毛果苔草(*Carex lasiocarpa*)沼泽和季节性积水型小叶章(*Doyeuxia augustifolia*)草甸,观测试验主要布置在位于区内的中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站沼泽湿地综合观测试验场内。

在沼泽湿地试验场选取有代表性的常年积水沼泽湿地——毛果苔草沼泽,分别布置 5、10、20、30、50、70、100、120 和 150 cm 土壤温度传感器,传感器灵敏度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,利用 DT500 进行连续数据采集,采集时间步长为 1 次/h(整点采集),数据存贮按常规气象要素计录格式.在沼泽湿地中布置 4 个土壤剖面 CO_2 和 CH_4 采集点,每个采样点分 5、10、15、20、25、30、40 和 45 cm 层埋设内径 2 cm 不锈钢管,不锈钢管下端有一排 0.2 mm 小孔,另一端安装气体采集装置.气体采集后在实验室用 HP4890 气相色谱仪同时测定 CO_2 和 CH_4 浓度. CO_2 和 CH_4 采用单阀单柱柱进样分离系统,共用同一个离子火焰化检测器(FID)检测,土壤 DOC 及 DIC 采用日本产 TOC-V_{CPH} 仪测定。

生态系统呼吸(植物地上部分呼吸+土壤呼吸)、土壤呼吸(植物根呼吸+土壤异养呼吸)及 CH_4 通量观测点,也布置在毛果苔草沼泽湿地试验场,测定土壤呼吸速率时,不透明箱基座内的地表植物被剔除,而测定生态系统呼吸时,地表植物不被扰动。

观测采用遮光密闭箱采样/气相色谱分析方法,共布置 3 个土壤呼吸,4 个生态系统呼吸及 CH_4 通量观测点,利用不透明箱采集气体样品,在 30 min 时间内,用 100 mL 针管采集 4 次气体样品,24 h 内在实验室用 HP4890 气相色谱仪同时测定 CO_2 浓度和 CH_4 浓度,气体通量采用以下公式计算:

$$J = \left| \frac{dc}{dt} \right| \frac{M}{V_0} \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} H$$

式中, J 为气体通量 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率, M 为被测气体摩尔质量, p 为采样点气压, T 为采样时绝对温度, V_0 、 p_0 和 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积、空气绝对温度和气压, H 为水面以上采样箱高度。

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面温度变化和植物根系发育特征

土壤温度影响植物的生长及温室气体的排放,三江平原沼泽湿地土壤温度具有明显的季节性变化(图 1).主要表现在:5~6 月根层土壤温度变化较大,50~70 cm 土壤层是温度的明显转折点;5~8 月土壤温度逐渐升高,9 月份又开始降低.植物生长季与土壤温度变化相一致,7~8 月根层土壤温度最高($14.10^\circ\text{C} \pm 0.77^\circ\text{C} \sim 17.73^\circ\text{C} \pm 1.24^\circ\text{C}$),这一时期也是植物的生长旺季,土壤呼吸通量最大 [$58.95 \pm 33.35 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1} \sim 364.91 \pm 87.00 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$],反映了土壤温度对土壤碳排放的影响.三江平原沼泽湿地优势种群为生长在长年积水区的毛果苔草,由于特殊的水文条件,毛果苔草根系发育具有特殊性,在垂直剖面中根系主要分布于 0~30 cm 深度范围,土壤表层常具有 8 cm 左右厚的草根层,土壤容重较小($< 0.60 \text{ g/cm}^3$),40 cm 以下多为白浆土层,土壤质地粘重,植物根系很少,有机质含量一

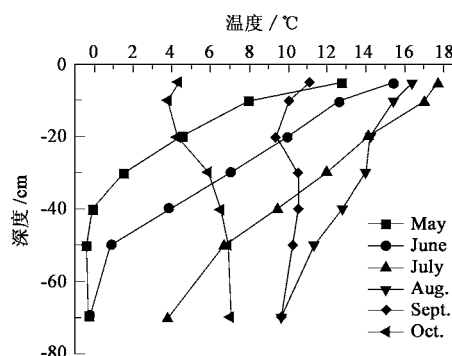


图 1 沼泽湿地土壤温度季节性变化(月均值)

Fig.1 The seasonal dynamic of mire soil temperature

般小于 1 % , 湿地植物根系发育特征及土壤结构对土壤中 CO_2 、 CH_4 浓度分布产生较大的影响.

2.2 土壤剖面有机碳及氮素含量特征

土壤有机碳是土壤质量的核心,也是营养元素生物地球化学循环的主要组成部分,其质量和数量影响和控制着植物初级生产量.碳、氮素及微生物特征与有机质的输入密切相关^[16,17].三江平原沼泽湿地土壤中有有机质含量较高,且主要集中于根层(图 2),表层土壤有机碳含量一般大于 15 %,氮素含量特征与有机碳相似(图 3),以根层土壤含量最高.土

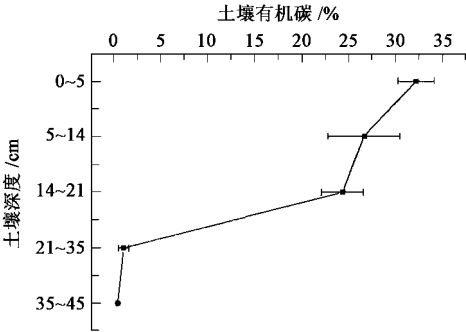


图 2 沼泽湿地土壤有机碳含量特征
Fig. 2 Levels of soil organic carbon in mire

壤轻组有机碳是土壤有机碳的重要组成部分,其呈游离态,具有较高的分解率,随植物凋落物的输入呈现季节性波动和空间上的变化^[18].沼泽湿地根层土壤轻组有机碳部分占有较大比例,同时溶解有机碳的含量也较高,其对植物生长及微生物的活性有较大的影响,从而影响 CH_4 的产生与排放,当然这种变化受土壤水文条件及温度条件制约.溶解有机碳是湿地生态系统碳循环的重要基础,植物根际生物特征及根的呼吸强度与土壤 DOC 浓度间可能存在着非常重要的联系,其产生受植物凋落物的输入与分解作用影响,常在土壤 0 ~ 40 cm 深度迁移过程中组成发生变化.三江平原沼泽湿地土壤 DOC 浓中心位于 15 ~ 40 cm (图 4),浓度值较高,平均为 $95.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 16.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \sim 113.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 16.397.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但浓集中心与土壤有机碳含量并不完全一致,同时沼泽湿地土壤无机碳(DIC)含量也表现为在深部土壤中的含量高于在表层土壤(图 5),由于 DOC 和 DIC 的产生机理及迁移性的差异,因此二者在土壤中的分异特征也有所不同.土壤 DOC 与土壤 C/N 比间存在着密切的关系,进入土壤根际 DOC 的特征及被生物利用的有效性,影响土

壤有质的分解及 C/N 比值^[19],土壤及水体中 DOC 的产生、迁移与转化对湿地土壤碳通量具有重要的影响.

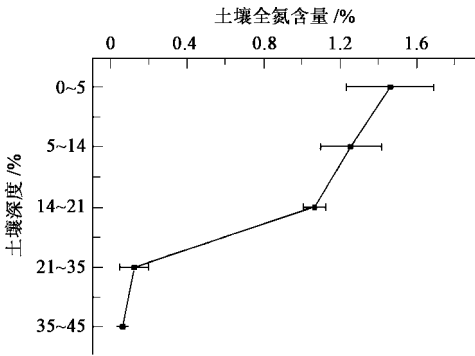


图 3 沼泽湿地土壤氮素含量特征
Fig. 3 Levels of total nitrogen in mire soil

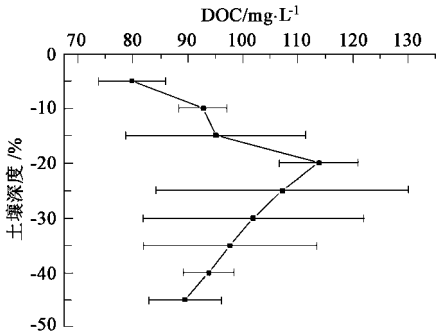


图 4 沼泽湿地土壤 DOC 含量变化
Fig. 4 Changes of DOC content in mire soil

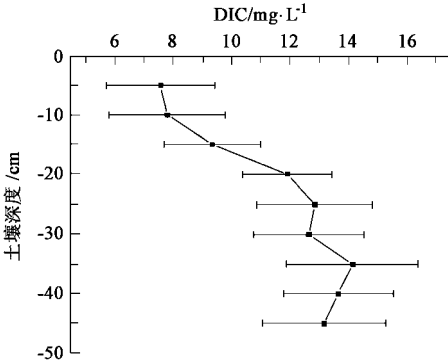


图 5 沼泽湿地土壤 DIC 含量变化
Fig. 5 Changes of DIC content in mire soil

2.3 土壤剖面 CO_2 和 CH_4 浓度变化

三江平原沼泽湿地土壤中 CO_2 、 CH_4 浓度值较高(图 6),且以根层中部和下部土壤浓度值最高,9 月份 5 ~ 45 cm 土壤 CO_2 平均体积浓度值为 1.80 %

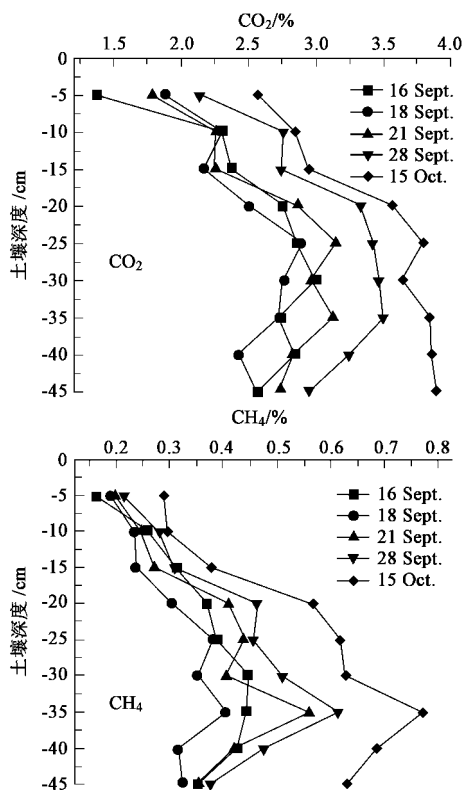


图6 沼泽湿地土壤 CO_2 浓度和 CH_4 浓度变化

Fig. 6 Carbon dioxide and methane levels in mire soil

$\pm 0.32\% \sim 3.04\% \pm 0.30\%$, CH_4 体积浓度值为 $0.191\% \pm 0.022\% \sim 0.507\% \pm 0.097\%$ 。从9月下旬至10月中旬土壤中 CO_2 、 CH_4 浓度值有升高的趋势。湿地土壤中 CO_2 浓度与植物的生长状况有密切关系,植物根的呼吸是决定土壤中 CO_2 浓度的主要因素,但根的发育与土壤不同生长阶段有关,温度是决定植物生长的关键因子,而土壤温度对异养呼吸速率具有重要的控制作用。植物根对 CH_4 的产生也非常重要,由图6可以看出,根系较为发育的上土层(0~20cm)与根系相对较少的下土层相比,土壤 CH_4 的浓度值有一定的差异,其主要原因是上土层根系生物量高,在一定程度上使周围土壤氧化, CH_4 浓度低,但下层土壤则相反^[12],但到了较深层位的白浆土层, CH_4 又明显降低。土壤温度是湿地 CH_4 产生与排放的重要驱动因子,同时 CH_4 的产生和排放还受土壤有机质含量、分解率及土壤的通气性影响,维管植物对 CH_4 排放通量具有重要作用,其可占湿地总 CH_4 排放量的 $75\% \sim 90\%$ ^[20,21],同时维管植物向植物根系传输氧以供根呼吸,其在根层土壤中的分异会导致 CH_4 的氧化^[22,23]。三江平原沼泽植物主要为维管植物,从9月下旬以后植物地上

部分大部分枯死,此时土壤温度仍较高(图7),5~20cm 土壤平均温度为 $7.09^\circ\text{C} \pm 1.58^\circ\text{C} \sim 8.37^\circ\text{C} \pm 1.58^\circ\text{C}$,微生物活性仍较强,但温室气体通过植物向地表传输率因植物地上部分的枯死而受到较大的影响,因此,9月末至10月中旬,虽植物生长季已结束,但土壤中 CO_2 、 CH_4 浓度出现短时期增高的现象。

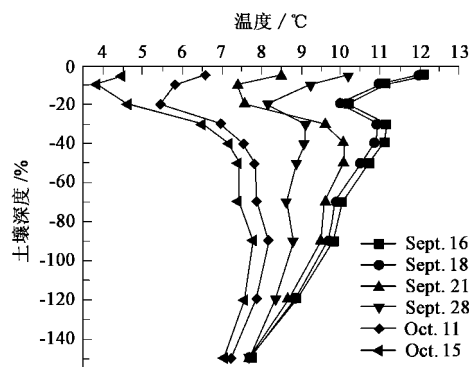


图7 沼泽湿地土壤剖面温度变化(日均值)

Fig. 7 Dynamics of the soil temperature in mire

土壤剖面 CO_2 和 CH_4 浓度值与土壤温度、有机碳及 DOC 等含量有密切的关系,同时受土壤结构和植物类型的影响。三江平原沼泽湿地 0~35cm 土壤有机质含量较高,土壤中 DOC 浓集中心虽与有机质有些差异,但高浓度值位于 40cm 以上土壤中,土壤剖面 CO_2 、 CH_4 分布特征与其完全一致,反映了其与土壤有机质、DOC 及氮素的相关性,同时这种分布特征与植物根系的分布特征相一致。

2.4 生态系统呼吸与 CH_4 排放通量的关系

土壤呼吸通量综合反映了植物根和土壤微生物的活性及土壤中碳的代谢作用,决定土壤碳循环的速率^[24],生态系统呼吸包括植物呼吸和土壤微生物呼吸,可综合反映植物的生产能力,通常植物主生长季生态系统呼吸通量最大。已有研究发现,湿地 CH_4 排放通量与生态系统净生产力(NEP)间存在密切的相关关系^[25,26], CH_4 排放通量约占生态系统净 CO_2 交换量(NEE)的 $2\% \sim 10\%$ ^[27],植物根的分泌物及呼吸作用产生的 CO_2 是 CH_4 产生的重要基质,较强的光合作用必然增大根系分泌物的产生,从而影响 CH_4 的产生与排放通量^[28]。通过对三江平原沼泽湿地生态系统呼吸和土壤呼吸与 CH_4 排放关系的研究,发现沼泽湿地生态系统呼吸与 CH_4 的排放间存在着密切的相关关系(图8),表现为随着生态系统呼吸通量的增加, CH_4 排放通量增加,同时,

湿地土壤呼吸强度与 CH_4 排放通量间也存在一定的相关关系(图 9),沼泽湿地土壤中 CO_2 与 CH_4 间呈显著的正相关关系(图 10),其更进一步说明了植物根的呼吸对 CH_4 产生与排放的重要影响.这些特征综合反映了湿地植物的生长状况是 CH_4 产生与排放又一重要的影响因子.

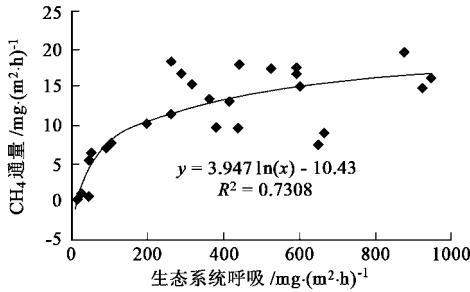


图 8 沼泽湿地生态系统呼吸与 CH_4 排放通量间的关系

Fig.8 The relationship between ecosystem respiration and CH_4 emission flux in mire

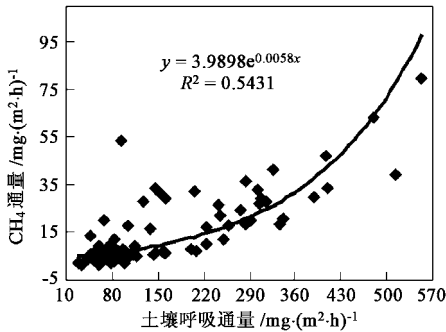


图 9 沼泽湿地土壤呼吸与 CH_4 排放通量间的关系

Fig.9 The relationship between ecosystem respiration and CH_4 emission flux in mire

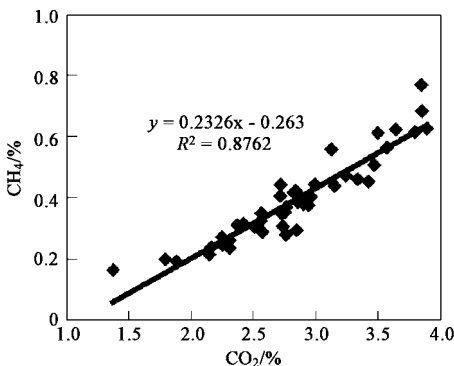


图 10 沼泽湿地土壤中 CO_2 与 CH_4 的关系

Fig.10 The liner character between CO_2 and CH_4 in mire soil

3 结论

(1)三江平原沼泽湿地土壤中 CO_2 和 CH_4 具有较高的浓度值,浓集中心位于是土壤剖面 10 cm ~ 35 cm,与土壤有机碳、DOC 及氮素含量分布特征一致,同时受植物根系发育和土壤温度等的影响.

(2)9 月下旬植物地上部分基本枯死,但土壤中 CO_2 、 CH_4 浓度呈现出阶段性增加的趋势,反映了沼泽湿地的特殊水文环境,及植物的特殊生理生态特征对温室气排放的重要影响.

(3)三江平原沼泽湿地 CH_4 排放通量与生态系统呼吸和土壤呼吸间具有密切的相关关系,说明植物生长状况和根的呼吸对湿地 CH_4 的排放也具有重要的影响.

参考文献:

- [1] Franzen L G Can. The earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect[A]. International Peat Society Proceedings of International Peat Congress[C]. Uppsala, 1992, 1 ~ 18 .
- [2] Bartlett K B, Harriss R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands[J]. Chemosphere, 1993, 26 :61 ~ 320 .
- [3] Cicerone R J, Oremland R S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane[J]. Global Biogeochem. Cycles, 1988, 2 : 299 ~ 327 .
- [4] Khaliq M A K, Shearer M J, Rasmussen R A. CH_4 sink and distribution in atmospheric CH_4 : Sources, sink, and role in global change[A]. NATO ASI Series[C]. Khalil M A K. New York : Springer Verlag, 1993a, 113 :168 ~ 179 .
- [5] Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. Ecol. Appl., 1991, 1:182 ~ 195 .
- [6] Oechel W C, Vourlitis G L, Hastings S J, Bochkarev S A. Change in arctic CO_2 flux over two decades: Effects of climate change at Barrow, Alaska[J]. Ecol. Appl., 1995, 5 :846 ~ 855 .
- [7] Roulet N, Bhardwaj A, Comer N, et al. Modelling biospheric climatic feedbacks in peatland ecosystems[A]. Presentation to impacts of climate change to Inland wetlands: a Canadian Perspective[C]. Oak Hammock Marsh Conservation Centre, Stonewall, Manitoba, 1997, 67 ~ 87 .
- [8] Moore T R, Roulet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands[J]. Clim. Change, 1998, 40 :229 ~ 245 .
- [9] Griffis T J, Rouse W R, Waddington J M. Interannual variability of net ecosystem CO_2 exchange at a subarctic fen[J]. Global Biogeochem., Cycles, 2000, 14 :1109 ~ 1121 .
- [10] Moore T R, Roulet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands[J]. Clim. Change, 1998, 40 :229 ~ 245 .

- [11] Conrad R. Control of methane production in terrestrial ecosystems[A]. Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere[C]. Andreae M O, Schimel D D, New York :John Wiley press, 1989, 39 ~ 58 .
- [12] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京 :科学出版社, 2001 .
- [13] Schimel J P. Plant transport and methane production as controls on methane flux from arctic wet meadow tundra[J]. Biogeochemistry, 1995, **28**:183 ~ 200 .
- [14] Moore T R, Routlet N T, Waddington J M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands[J]. Clim. Change, 1998, **40**:229 ~ 245 .
- [15] Walter B P. A process-based, climate-sensitive model to derive methane emission from natural wetlands: application to five wetland sites, sensitivity to model parameters, and climate[J]. Global Biogeochem. Cycles, 2000, **14**:745 ~ 765 .
- [16] Yeates G W. Contrasting response to cropping of populations of earthworms and predacious nematodes in four soils[J]. Soil Till. Res., 1998, **48**:255 ~ 264 .
- [17] Saggiar S. Changes in soil microbial biomass, metabolic quotient, and organic matter turnover under Hieracium[J]. Biol. Fert. Soil, 1999, **30**:232 ~ 238 .
- [18] Boone R D. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration[J]. Nature, 1998, **396**:570 ~ 572 .
- [19] Aitkenhead J A, McDowell W H. Soil C:N ratio as a predictor of annual riverine DOC flux at local and global scales[J]. Global Biogeochem. Cycles, 2000, **14**:127 ~ 138 .
- [20] Schimel J P. Plant transport and methane production as controls on methane flux from arctic wet meadow tundra[J]. Biogeochemistry, 1995, **28**:183 ~ 200 .
- [21] Whiting G J, Chanton J P. Plant-dependent CH₄ emission in a subarctic Canadian fen[J]. Global Biogeochem. Cycles, 1992, **6**:225 ~ 231 .
- [22] Gerard G, Chanton J. Quantification of methane oxidation in the rhizosphere of emergent aquatic macrophytes: Defining upper limits[J]. Biogeochemistry, 1993, **23**:79 ~ 97 .
- [23] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. A semiempirical model of methane emission from flooded rice paddy soils[J]. Global Change Biol., 1998, **4**: 247 ~ 268 .
- [24] Schesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, **48**:7 ~ 20 .
- [25] Alm J, Talanov A, Saarnio S, Silvola J, *et al.* Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland[J]. Oecologia, 1997, **110**:423 ~ 431 .
- [26] Bellisario L M, Bubier J L, Moore T R. Controls on CH₄ emissions from a northern peatland[J]. Global Biogeochem. Cycles, 1999, **13**:81 ~ 91 .
- [27] Bellisario L M. Net ecosystem exchange and methane emissions from a boreal peatland[M]. Thompson, Manitoba, M.Sc. thesis, McGill Univ., Canada, 1998, 20 ~ 45 .
- [28] Chanton J P, Whiting G J. Trace gas exchange in freshwater and coastal marine environments: ebullition and transport by plants[A]. Methods in Ecology. Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water[C]. Matson P A, Harriss R C, Blackwell, Oxford, 1995, 98 ~ 125 .