

垦殖对沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> O 排放的影响

郝庆菊<sup>1 2</sup> ,王跃思<sup>1</sup> ,宋长春<sup>3</sup> ,江长胜<sup>2</sup>

(1. 中国科学院大气物理研究所 ,北京 100029 2. 西南大学资源环境学院 ,重庆 400716 ;  
3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所 ,长春 130012 )

摘要 :三江平原是我国最大的沼泽化低平原 ,同时也是受人类活动影响最剧烈的区域之一。选取三江平原两类典型湿地-常年积水的毛果苔草 (*Carex lasiocapa*) 沼泽和季节性积水的小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*) 草甸及其垦殖水田和旱田为研究对象 ,利用静态暗箱-气相色谱法进行 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> O 的田间原位观测。研究结果表明 ,垦殖导致沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放量大幅度降低 ,而 N<sub>2</sub> O 排放量有所升高。三江平原沼泽湿地、水田、旱田的 CH<sub>4</sub> 排放量分别为 329. 56、94. 82 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 -1. 37 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> ,N<sub>2</sub> O 排放量分别为 1. 93、2. 09 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 4. 90 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。沼泽湿地垦殖使 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> O 的综合温室效应降低 ,在 20a 到 500a 的时间尺度上 ,水田综合 GWP 为沼泽湿地的 30. 8% ~ 37. 9% ,旱田综合 GWP 仅为沼泽湿地的 6. 0% ~ 28. 7%。垦殖同时也改变了沼泽湿地对大气 CO<sub>2</sub> 的源汇功能 ,2004 年 ,小叶章草甸、水田和旱田碳排放量分别为 -3. 08、1. 79 t·hm<sup>-2</sup> 和 3. 35 t·hm<sup>-2</sup> ,沼泽湿地垦殖为旱田后碳源的功能较水田更强。

关键词 :沼泽湿地 ;垦殖 ;CH<sub>4</sub> ;N<sub>2</sub> O

文章编号 :1000-0933 (2007) 08-3417-10 中图分类号 :X511 文献标识码 :A

Effects of marsh reclamation on methane and nitrous oxide emissions

HAO Qing-Ju<sup>1 2</sup> ,WANG Yue-Si<sup>1</sup> ,SONG Chang-Chun<sup>3</sup> ,JIANG Chang-Sheng<sup>2</sup>

1 Institute of Atmospheric Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100029 ,China  
2 College of Resources and Environment ,Southwest University ,Chongqing 400716 ,China  
3 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology ,Chinese Academy of Sciences ,Changchun 130012 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3417 ~ 3426.

**Abstract :** The Sanjiang Plain is the largest low-altitudinal swampy plain in China where has been strongly affected by human activities particularly the conversion of marsh to cropland. To evaluate the effect of marsh reclamation on methane and nitrous oxide emissions ,field observations were made at the Sanjiang Mire Wetland Experimental Station (47°35'N ,133°31' E ) , Chinese Academy of Sciences , located in the eastern part of Heilongjiang Province. The mean annual precipitation and temperature in this region is 550 — 600 mm and 1. 9 °C , respectively. Dominant vegetations are marshes and wet meadows. Soil types are typically marsh soil , meadow soil and lessive soil. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub> O fluxes were measured by using the static opaque chamber and gas chromatography system. Four plots of *Carex lasiocarpa* marsh , *Deyeuxia angustifolia* marsh , rice field and upland were selected. During the experiment periods , measurements were made twice a week in growing season and once a month in the winter. Three replicates were conducted for each plot.

基金项目 :国家自然科学基金重点项目 (40431001 ) ;中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01 ) ;西南大学博士启动基金项目  
收稿日期 :2006-09-05 ;修订日期 :2007-05-24

作者简介 :郝庆菊 (1976 ~ ) ,女 ,山东泰安人 ,博士 ,副教授 ,主要从事湿地碳循环研究。 E-mail haoqingju@163. com

致谢 :本实验的现场采样及室内分析工作是在中国科学院三江平原沼泽湿地生态实验站全体工作人员的大力协助下完成的 ,在此表示感谢 !

**Foundation item :** The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40431001 ) ; The Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01 ) ; The doctoral start-up program of Southwest University

**Received date** 2006-09-05 ; **Accepted date** 2007-05-24

**Biography :** HAO Qing-Ju , Ph. D. , Associate professor , mainly engaged in carbon cycling in wetlands. E-mail haoqingju@163. com

Results showed that there existed significant spatial difference in CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from the two marsh plots. The *Carex lasiocarpa* marsh emitted more CH<sub>4</sub> while less N<sub>2</sub>O than the *Deyeuxia angustifolia* marsh. Water regime and soil character regulated CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes significantly. Gas exchange between the land and atmosphere in the winter season contributed greatly to the annual budget. CH<sub>4</sub> emission in the winter season contributed 2.3%—4.6% to the annual total, while N<sub>2</sub>O uptake accounts for approximately 14% of the total N<sub>2</sub>O emission in the growing-season.

Field observations also indicated that the conversion of marsh to cropland reduced CH<sub>4</sub> emission significantly but increased N<sub>2</sub>O emission slightly. CH<sub>4</sub> emissions from marsh, rice field and upland were 329.56, 94.82 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> and -1.37 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively. N<sub>2</sub>O emissions from corresponding plots were 1.93, 2.09 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> and 4.90 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, respectively. An integrated global warming potential (GWP) of the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions were assessed for the four plots. The results showed that the integrated GWP for rice field and upland were 30.8%—37.9% and 6.0%—28.7% lower than those for marsh, respectively. The conversion of marsh to cropland resulted in a transformation of carbon sink to carbon source, namely marsh acted as a carbon sink and cropland acted as a carbon source. In 2004, carbon emissions were -3.08, 1.79 t·hm<sup>-2</sup> and 3.35 t·hm<sup>-2</sup> in *Deyeuxia angustifolia* marsh, rice field and upland, respectively. The carbon source of upland was stronger than that of rice field.

**Key Words** : marsh ; reclamation ; CH<sub>4</sub> ; N<sub>2</sub>O

CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 是大气中直接受人类活动影响的主要温室气体,过去几十年中这两种气体的浓度一直在不断增加,对全球变暖的贡献分别为 23% 和 5%,仅次于大气中的 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>。随着全球气温的不断升高,温室气体排放正成为人们关注和研究的焦点。大气中温室气体浓度的升高除了来自工业排放外,土地利用变化也是一个非常重要的因素<sup>[2]</sup>。据估算,在过去的 150a 中,因土地利用变化造成的 CO<sub>2</sub>排放约相当于同期化石燃料燃烧向大气排放的 CO<sub>2</sub>量<sup>[3]</sup>,而且土地利用变化也是大气 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 浓度增加的主要原因<sup>[4]</sup>。

湿地 (Wetland)是地球上水陆相互作用而形成的独特生态系统,由于具有很高的生产率及氧化还原能力使其成为生物地球化学作用非常活跃的场所在碳氮的储存方面起着极其重要的作用,是温室气体排放的一个重要的潜在源<sup>[5]</sup>。三江平原是我国最大的低海拔淡水沼泽湿地分布区,也是近 50a 来受人类活动影响最剧烈的区域之一。近年来,研究者对三江平原温室气体排放进行了大量的研究,但主要集中在沼泽湿地温室气体的排放以及影响温室气体排放的控制因子方面<sup>[6-7]</sup>,沼泽湿地土地利用方式变化对温室气体排放影响的研究则并不多见,仅有的几篇文献报道也只是以土壤为研究对象,并未把植物包括在内<sup>[8-9]</sup>。本文以三江平原沼泽湿地及其开垦而来的耕地为研究对象,探讨沼泽湿地垦殖对 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的影响。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

实验点位于中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站 (以下简称三江站) (133°31'E, 47°35'N)内,本站位于别拉洪河与浓江的河间地带,海拔高度 55~65 m。本站所在地属温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温暖湿润,年平均气温 1.9℃,年均降水量 550~600 mm 左右。站内微地貌复杂,由各种洼地、低平地和平地组成,分布有多种类型的草本沼泽和沼泽化草甸。

本实验选取三江平原最具典型和代表性的两类湿地:长期积水的毛果苔草沼泽和季节性积水的小叶章草甸,并在湿地附近选取由沼泽湿地垦殖而来的水田和旱田各一块,每种土地利用类型各设置 3 个重复。农田的耕作管理措施 (包括水肥及其它管理)按当地的常规方式进行。旱田种植方式为大豆-冬闲,大豆的品种为美国黑塔,2004 年播种日期为 5 月 18 日,6 月 3 日出苗,9 月 25 日收割。化肥的施用量为撒可富 (N:P:K = 16:12:12) 8 kg/666.7 m<sup>2</sup>,磷酸二铵 10 kg/666.7 m<sup>2</sup>,在播种前作为基肥一次性施入。在大豆生长期间,没有任何灌溉措施。水田的种植方式为水稻-冬闲,水稻的品种为 117。2004 年 4 月 20 日育苗,5 月 15 日耕地泡

田 5 月 25 日耙地、施肥、移栽,10 月 15 日水稻收割,水稻种植期间为浅水淹灌。化肥品种为撒可富,水稻生长期共施两次,一次在耕地时作为基肥施入,施肥量为 10 kg/666.7 m<sup>2</sup>;一次在水稻分蘖时作为追肥施入,施肥量为 15 kg/666.7 m<sup>2</sup> (6 月 28 日施肥)。

1.2 气体的采集和分析

本研究采用静态暗箱法采集气体。采样箱由底座、顶箱和延长箱组成,3 种箱体均由不锈钢制成,外覆绝热材料。底座的几何尺寸为 50 cm×50 cm×20 cm,整个观测期间都固定在采样点上,延长箱和顶箱容积相同,长、宽、高均为 50 cm,根据作物的生长需要可适时安装延长箱。底座和延长箱的上端均有深 3cm、宽 2cm 的密封水槽,实验时往槽里浇水以防止箱子和底座的接触处漏气,在冬季则用密封条来防止漏气。顶箱上部有两个轴流扇,用于混合箱内气体。箱子侧面安装有电源插头和气体样品采集口。扣箱后立即用 60ml 注射器采集第一次样品,之后每间隔 10 min 采样一次,罩箱时间为 30 min,一共采集 4 个气体样品。在采样同时记下箱内温度和气压。样品采集好后迅速带回实验室,用气相色谱仪分析,分析方法详见参考文献<sup>[10]</sup>。为了尽量减少采样时对周围环境的扰动和破坏,每个采样点周围都搭设木桥,在整个采样过程中,实验操作人员在木桥上完成。

为了尽可能减少气体排放本身的日变化对不同观测点观测结果的可比性的影响,采样工作固定在 9:00~11:00 (地方时)之间完成。在植物的生长季内,每周观测两次,非生长季内,每月观测 1 次。在春融期间每两天观测一次。

1.3 气体排放通量的计算

气体的通量表示单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化,根据 4 个气样浓度随采样时间的变化速率计算<sup>[11]</sup>,用公式表示为:

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

对于特定的目标化合物,式中的  $M$  为其摩尔质量, $P_0$  和  $T_0$  为理想气体标准状态下的空气压力和气温, $V_0$  为目标化合物在标准状态下的摩尔体积, $H$  为正方体或长方体采样箱内气室高度, $P$  和  $T$  为采样时箱内的实际气压和气温, $dc/dt$  为箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

本研究中视 30 min 内密闭观测箱内呈线性累积 ( $p < 0.05$ ) 的浓度计算的排放通量为有效排放通量观测值,其它值视为无效数据,只有有效数据方可进行气体排放通量的计算,并通过线性内插累加计算全年的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放总量。

2 结果和讨论

2.1 气温和降水

2004 年三江站日平均气温和降水量见图 1,全年日平均气温为 2.3℃。7 月份气温最高,为 21.9℃,1 月份气温最低,为 -20.5℃。年降雨量为 431.6 mm,季节分配差异明显,主要集中在春季和夏季,占全年总降雨量的 69.4%,秋季降雨量最少,仅为 50.7 mm,占全年总降雨量的 11.5%。

2.2 CH<sub>4</sub> 排放

图 2 为沼泽湿地和农田 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化,由图 2 可以看出,沼泽湿地是大气 CH<sub>4</sub> 的排放源,毛果苔草沼泽和小叶章草甸具有相同的季节变化趋势。2004 年 CH<sub>4</sub> 排放通量表现为单峰型,毛果苔草沼泽排放高峰期从 6 月底一直持续到 8 月中旬,最高值达到 45.10 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,小叶章草甸出现在 6 月份,最大排放通量为 20.69 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。冬季 CH<sub>4</sub> 排放通量较低,接近于零。CH<sub>4</sub> 排放的季节变化模态是由温度、春季融雪和夏季降雨共同决定的,春季随着温度的升高和冰雪的融化,CH<sub>4</sub> 排放通量升高,随着夏季降雨的来临,温度的持续上升,CH<sub>4</sub> 排放通量持续增加一直到秋季温度降低、植物死亡排放通量才迅速减弱,CH<sub>4</sub> 排放通量呈单峰型模态。

春季沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放通量升高的原因主要有两个:一是与土壤微生物活性和土壤溶液中活性 C、N 含

量增加有关。冬季死亡微生物释放的 C、N 可为融冻期存活的微生物提供重要的基质,冻融作用能够促进有机碎屑物的分解和 C、N 的矿化,融冻期表层土壤 (5 ~ 10 cm) 微生物的活性明显增加<sup>[12]</sup>,这些条件都有利于 CH<sub>4</sub> 的产生;二是每年 4 月末,三江平原沼泽湿地表层土壤开始解冻,冬季产生的可能被“封存”在冻结土壤层中的 CH<sub>4</sub> 气体也被释放出来<sup>[13]</sup>,同时随着萌芽期的到来,多年生植物的根也开始复苏,期间出现 CH<sub>4</sub> 高排放通量。

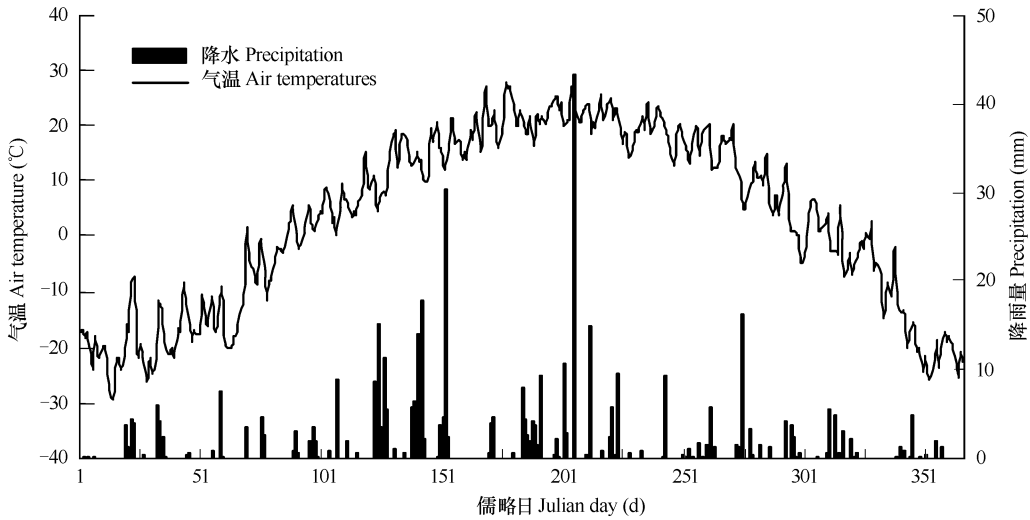


图 1 2004 年三江站日平均气温和降水量的季节变化

Fig. 1 Seasonal course of daily totals for precipitation and daily mean air temperature in 2004

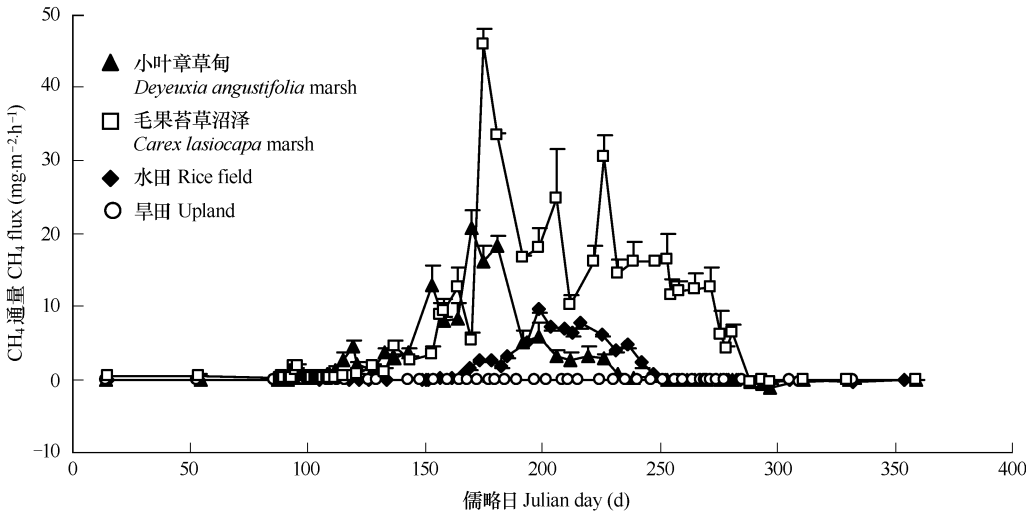


图 2 沼泽湿地和农田 CH<sub>4</sub> 排放通量的季节变化

Fig. 2 The seasonal change of CH<sub>4</sub> flux from marshes and farmlands in the Sanjiang Plain

许多基于北方沼泽湿地温室气体排放的研究指出,冬季温室气体排放对于其全年的净收支具有重要作用<sup>[14]</sup>,他们认为冬季虽然严寒,温室气体排放通量低,但由于冬季漫长,其所累积的温室气体排放量也不容忽视。本研究 2004 年冬季毛果苔草沼泽和小叶章草甸 CH<sub>4</sub> 累积排放量分别为 32.12 kg·hm<sup>-2</sup> 和 5.61 kg·hm<sup>-2</sup>,占全年净排放量的 2.3% ~ 4.6%。这个比例与已报道的其它地区湿地的低值比较接近,比如明尼苏达沼泽冬季 CH<sub>4</sub> 排放量占全年排放量的 4% ~ 21%,新罕布什尔沼泽为 2% ~ 10%,西伯利亚沼泽为 3.5% ~ 11%<sup>[12, 15]</sup>。

有研究认为冬季沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放主要有两个来源：(1) 植物生长季内由嗜温微生物产生并储存在土壤中的 CH<sub>4</sub><sup>[6]</sup>；(2) 由耐寒微生物在冬季土壤中产生的 CH<sub>4</sub>。在漫长而严寒的冬季，冻土中还存在着有利于 CH<sub>4</sub> 产生的环境。Panikov 和 Dedysh<sup>[12]</sup>研究发现在 -16℃ 时，微生物仍有活性，土壤微生物的降解作用仍然存在。Stadler<sup>[17]</sup>指出，即使在 -5℃ 下冻土中还有 8%~20% 的土壤水没有冻结，在液体水中可能存在着有利于 CH<sub>4</sub> 产生的条件，一是由于外在冰层的阻隔，使土壤水处于厌氧环境；二是由于冰冻作用，土壤中可供微生物利用的 C、N 含量增加。在这两个有利的条件下，土壤 CH<sub>4</sub> 浓度可能升高，并通过土壤冻结形成的裂缝排放出去。根据近 3a 来的定位监测结果，三江平原冬季表层土壤温度最低为 -13℃ 左右，根层土壤 (10~30 cm) 最低温度为 -4~-7℃，可以说明三江平原沼泽湿地冬季 CH<sub>4</sub> 排放至少部分是由土壤微生物作用产生的。

毛果苔草沼泽 CH<sub>4</sub> 年平均排放通量为 6.29 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，这与美国明尼苏达州中北部区玛塞实验站 (93°28' W, 47°32' N) 泥炭沼泽 CH<sub>4</sub> 排放通量接近，而小叶章草甸 CH<sub>4</sub> 年平均排放通量为 2.27 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>，与玛塞实验站泥炭藓沼泽相同<sup>[8]</sup>。毛果苔草沼泽 CH<sub>4</sub> 排放通量高于小叶章草甸 (成对 *t* 检验 *p* = 0.0004)，这种差异主要是由积水环境造成的。大量研究表明，地貌和积水条件是造成同一地区不同类型湿地 CH<sub>4</sub> 排放差异的主要原因，从洼地的边缘到中心，随着地势的逐渐降低和积水深度的逐渐增加，CH<sub>4</sub> 排放通量也逐渐增大<sup>[19, 20]</sup>。毛果苔草沼泽地势较低，处于洼地的中心，长期积水且积水较深，而小叶章草甸地势较高，处于洼地的边缘，积水时间短且积水较浅。2004 年毛果苔草沼泽和小叶章草甸的积水时间分别为 154 d 和 53 d，最大积水深度分别为 40 cm 和 10 cm (图 3)。积水状况决定了土壤厌氧环境的强弱从而影响了土壤中 CH<sub>4</sub> 的产生和氧化<sup>[20]</sup>。

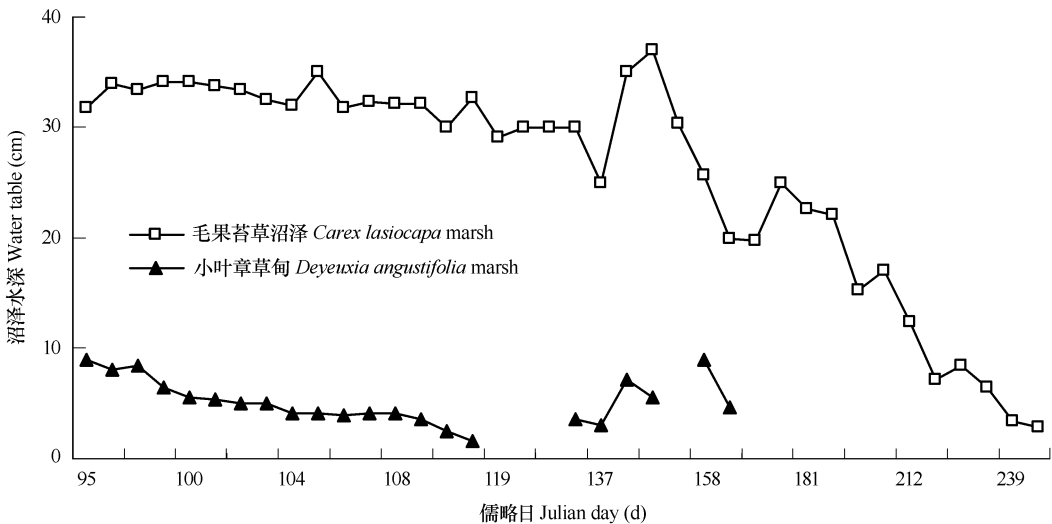


图 3 毛果苔草沼泽和小叶章草甸春夏期间积水深度对比

Fig. 3 The comparison of water tables between *Carex lasiocapa* marsh and *Deyeuxia angustifolia* marsh in spring and fall season

稻田 CH<sub>4</sub> 排放通量具有明显的季节变化，在一个生长周期内呈现单峰型。稻田从播种或插秧后直至 8 月底，一直保持淹水状态。在生长初期随着气温的逐渐升高以及植物生理活动的逐渐增强，CH<sub>4</sub> 排放通量也逐渐升高，到 7、8 月份出现排放峰值，该期间内，温度最高，水稻处于扬花期，植物生理活动最为旺盛，各种因素综合在一起导致了 CH<sub>4</sub> 排放高峰的出现。8 月底水田开始排水，气温逐渐降低，CH<sub>4</sub> 排放通量也随之逐渐降低。

大豆田有时吸收 CH<sub>4</sub>，有时排放 CH<sub>4</sub>，但通量值非常低，季节变化趋势不明显。这与黄国宏等<sup>[21]</sup>在中国科学院沈阳生态站 (41°32' N, 123°23' E) 对大豆田 CH<sub>4</sub> 排放通量的观测结果是相似的。

4 种土地利用类型全年的 CH<sub>4</sub> 排放量，自然湿地具有最高 CH<sub>4</sub> 排放量，毛果苔草沼泽和小叶章草甸分别为 550.95 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和 199.12 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，湿地开垦为水田后 CH<sub>4</sub> 排放量降低，为 94.82 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>，湿

地开垦为旱田后则由 CH<sub>4</sub>排放源转变为较弱的 CH<sub>4</sub>吸收汇 ,排放量为 -1.37 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

2.3 N<sub>2</sub>O 排放

目前对沼泽湿地N<sub>2</sub>O排放的研究还比较少。因为土壤中 N<sub>2</sub>O 的产生过程非常复杂 ,又受诸多因素的影响和制约 ,因此其通量具有很强的时间变异性<sup>[22]</sup>。如图 4 所示 ,沼泽湿地 N<sub>2</sub>O 排放通量较低且排放特征比较复杂 ,毛果苔草沼泽在春季出现一个排放高峰 ,而小叶章草甸主要是由一系列脉冲释放峰组成。沼泽湿地 N<sub>2</sub>O 排放主要表现为由土壤向大气的排放 ,但在寒冷的冬季以及地表水位较高的淹水时期 ,也会出现 N<sub>2</sub>O 吸收的现象。

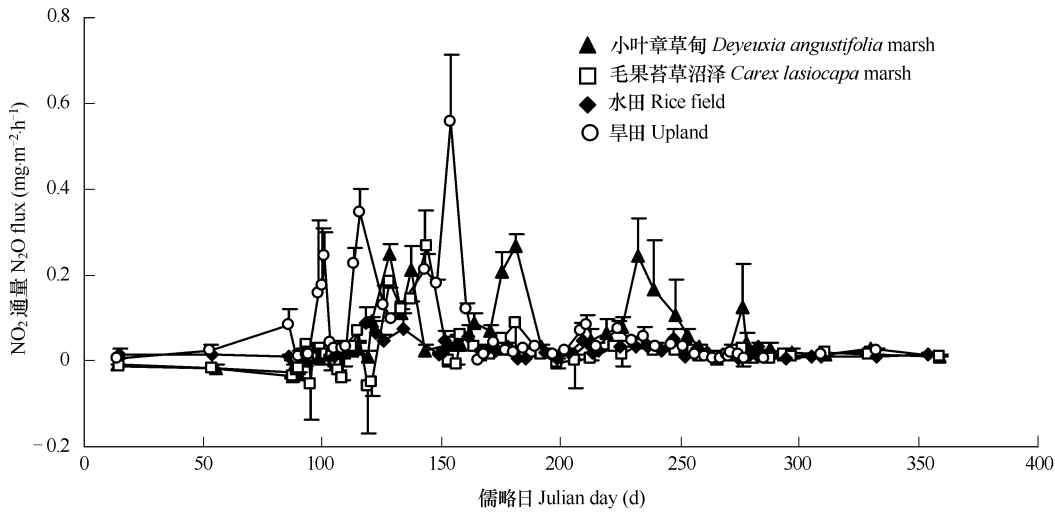


图 4 沼泽湿地和农田 N<sub>2</sub>O 排放通量的季节变化

Fig. 4 The seasonal change of N<sub>2</sub>O flux from marshes and farmlands in the Sanjiang Plain

冬季沼泽湿地 N<sub>2</sub>O 汇的作用也不容忽视 ,2004 年冬季 ,毛果苔草沼泽和小叶章草甸累积 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 -0.40 kg·hm<sup>-2</sup>和 -0.54 kg·hm<sup>-2</sup> ,分别占生长季排放量的 13.8% 和 13.7%。沼泽湿地冬季对 N<sub>2</sub>O 的吸收机制现在还不是很清楚 ,基于农田和草原的研究表明 ,冬季土壤的冰冻作用会促进 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[23]</sup>。他们认为冰冻期土壤中活性 C、N 含量增加 ,并且在未上冻的土壤水溶液中还存在着微生物活性 ,由于水外冰层的存在阻碍了氧气的进入 ,而且水溶液中微生物的呼吸消耗了氧 ,为 N<sub>2</sub>O 的产生提供了厌氧环境。但在本研究中可能该厌氧环境过于强烈 ,以致 N<sub>2</sub>O 被彻底还原为 N<sub>2</sub>。土壤中 CH<sub>4</sub>的产生需要严格的厌氧环境 ,结合前文所分析的冬季 CH<sub>4</sub>的排放特征 ,也支持了这个假设。

小叶章草甸 N<sub>2</sub>O 排放通量高于毛果苔草沼泽 (成对 *t* 检验 *p* = 0.001 ) ,主要是由土壤湿度和土壤的理化性质决定的。毛果苔草沼泽长期积水 ,土壤中的厌氧环境强烈 ,反硝化作用较强 ,容易把 N<sub>2</sub>O 进一步还原为 N<sub>2</sub>。同时 ,由于土壤长时间处于厌氧状态 ,硝化作用很弱 ,NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 基质得不到补充 ,使反硝化作用速率最终也很低。因此 ,在淹水期间由于淹水条件创造了一个严格的厌氧环境限制了 N<sub>2</sub>O 的形成和排放 ,所以检测不到明显的 N<sub>2</sub>O 排放 ,有时甚至表现为吸收 N<sub>2</sub>O。小叶章草甸地势较高 ,表现为雨季时地表积水 ,而旱季时地表积水消失但土壤保持湿润状态 ,这种干湿交替有利于 N<sub>2</sub>O 的产生和排放 ,因为此时土壤湿度适中 ,导致了同时适宜硝化和反硝化过程的 O<sub>2</sub> 供应状况 ,因而引起显著的 N<sub>2</sub>O 排放。

另外 ,土壤的物化性质也是影响 N<sub>2</sub>O 排放的重要参数 ,Oleg 和 Bernd<sup>[24]</sup>通过室内培养实验发现 ,不同森林树种下土壤的化学性质以及生物性质也不同 ,由此导致不同土壤的 N<sub>2</sub>O 排放模式各异。实验结果表明 ,培养期间土壤 N<sub>2</sub>O 排放量与 C : N 比呈显著负相关 ,并且与 DOC (可溶性有机碳)和 C 含量均呈负相关 ,通过逐步回归分析也表明 ,在众多土壤参数中 ,只有 C : N 比这一参数被列入方程中 ,可以解释不同土壤间 N<sub>2</sub>O 排放差异的 87%。黄耀等<sup>[25]</sup>通过土壤培养试验以及 Teepe 等<sup>[23]</sup>通过野外观测实验均表明土壤 N<sub>2</sub>O 排放与 SOC

(土壤有机碳)含量呈负相关,而且黄耀等<sup>[25]</sup>的研究还表明土壤 N<sub>2</sub>O 排放与土壤 TN (全氮)以及 C:N 均呈负相关。Stevenson 概括植物残体的 C:N 和矿质 N 释放的关系为: C:N < 20,净释放矿质 N; C:N 比为 25 ~ 30,不吸收也不释放; C:N > 30,微生物净吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> <sup>[26]</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 作为 N<sub>2</sub>O 产生的前体物质,由于微生物的吸收必然会导致 N<sub>2</sub>O 的产生与排放减少。在土壤 C:N < 20 的情况下, C:N 越低, N<sub>2</sub>O 的排放越高, C:N 越接近 20, N<sub>2</sub>O 的排放越低。土壤 N<sub>2</sub>O 主要产生于表层和亚表层,毛果苔草沼泽表层和亚表层 SOC、C:N、DOC、TN 的含量均高于小叶章草甸 (见表 1)。

表 1 沼泽湿地土壤化学性质对比

Table 1 The comparison of soil chemical characters between *Carex lasiocarpa* marsh and *Deyeuxia angustifolia* marsh

湿地类型 Marsh type	土层 Soil level	SOC (g·kg <sup>-1</sup> )	TN (g·kg <sup>-1</sup> )	DOC (g·kg <sup>-1</sup> )	C:N
毛果苔草沼泽	草根层 Root level	405.0	20.3	12.23	26.0
<i>Carex lasiocarpa</i> marsh	腐殖质层 Humus level	369.2	24.2	6.19	18.6
小叶章草甸	草根层 Root level	158.7	13.1	5.72	15.2
<i>Deyeuxia angustifolia</i> marsh	腐殖质层 Humus level	123.1	11.5	2.16	12.7

水田 N<sub>2</sub>O 排放的季节变化趋势不明显 (图 4)。虽然都处于东北地区,但我们在水稻生长季内没有观测到陈冠雄等<sup>[27]</sup>报道的 N<sub>2</sub>O 吸收现象,在整个生长季内, N<sub>2</sub>O 均表现为比较低的由土壤向大气的排放。

旱田则具有明显的 N<sub>2</sub>O 排放通量季节变化,排放高峰出现在春季播种后 (图 4),这种季节变化模态主要是由土壤湿度决定,其次还受施肥方式以及植株的影响<sup>[1, 21]</sup>。旱作农田 N<sub>2</sub>O 产生途径主要取决于水分的控制和调节,而降水事件是影响旱田土壤水分状况变化的主要因素,许多研究者均观测到旱田 N<sub>2</sub>O 排放与降雨的关系,普遍认为降雨能够促进土壤 N<sub>2</sub>O 的产生和排放<sup>[11]</sup>,本研究发现旱田 N<sub>2</sub>O 排放通量与降雨量呈极显著线性正相关 [N<sub>2</sub>O 排放通量 (μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>) = 21.23 × 平均日降水量 (mm·d<sup>-1</sup>) + 24.89, r<sup>2</sup> = 0.42\*\*] 2004 年 5 月份降雨量最大,而且此时农田刚刚施加了 N 肥,土壤湿度的升高刺激了土壤中无机 N 对 N<sub>2</sub>O 的转化,由此导致了 N<sub>2</sub>O 排放通量的升高。尽管 2004 年 7 月份也出现了较大的降雨,但却没有引起 N<sub>2</sub>O 排放通量的大幅度升高,这可能是与当地的施肥方式有关,无机氮肥作为基肥在大豆播种时一次性施入,然后在大豆生长期不再施加,而且 7 月份正是植株生长旺盛时期,植物对 N 素的吸收减少了土壤中 N 的含量从而抑制了 N<sub>2</sub>O 的排放。

从四种土地利用类型全年 N<sub>2</sub>O 排放量来看,毛果苔草沼泽和小叶章草甸 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 1.80 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和 4.07 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,开垦为水田后 N<sub>2</sub>O 排放为 2.09 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,开垦为旱田后 N<sub>2</sub>O 排放增加,为 4.90 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。

2.4 沼泽湿地垦殖所引起的 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放的全球增温潜势

在三江平原对沼泽湿地及农田温室气体排放进行了两年半的野外观测 (2002.7 ~ 2004.12) <sup>①</sup>。其中,沼泽湿地具有两年的连续的观测资料 (2003 年和 2004 年),但农田由于缺失 2002 年和 2003 年冬季的观测资料,所以只有 2004 年的观测结果是连续完整的。2003 年和 2004 年毛果苔草沼泽 CH<sub>4</sub>排放量分别为 347.65 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和 550.95 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,小叶章草甸分别为 220.52 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和 199.12 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,2003 和 2004 年毛果苔草沼泽 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 0.81 和 1.80 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,小叶章草甸分别为 1.05 和 4.07 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。用毛果苔草沼泽和小叶章草甸的两年平均排放量来表示三江平原沼泽湿地 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放量,农田 CH<sub>4</sub>和 N<sub>2</sub>O 的排放量用 2004 年的观测结果表示,则三江平原沼泽湿地、水田、旱田的 CH<sub>4</sub>排放量分别为 329.56、94.82 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和 -1.37 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,沼泽湿地、水田、旱田的 N<sub>2</sub>O 排放量分别为 1.93、2.09 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>和 4.90 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>。沼泽湿地垦殖为农田后导致 CH<sub>4</sub>排放通量降低,而 N<sub>2</sub>O 排放通量升高,与

① 郝庆菊. 三江平原沼泽土地利用变化对温室气体排放影响的研究. 中国科学院研究生院博士学位论文. 2005.

Abdul Hadi 等在热带泥炭地的研究结果相似<sup>[28]</sup>。

根据 IPCC<sup>[4]</sup>报告提供的数据,在 20 a 时间尺度上,单位质量 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的 GWP (Global Warming Potential)分别为 CO<sub>2</sub> 的 62 倍和 275 倍;100 a 时间尺度上,分别对应为 CO<sub>2</sub> 的 23 倍和 296 倍;500 a 时间尺度上,分别为 CO<sub>2</sub> 的 7 倍和 156 倍。若以 CO<sub>2</sub> 1 kg·hm<sup>-2</sup> 的 GWP 为 1,则可求得沼泽湿地、水田和旱田所排放的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的综合 GWP (表 2)。

通过表 2 可以看出,在只考虑 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 两种温室气体排放的综合 GWP 下,不论时间长短,水田和旱田的综合 GWP 都比沼泽湿地要低很多。在 20 a 到 500 a 的时间尺度上,水田综合 GWP 为沼泽湿地的 30.8% ~ 37.9%,旱田综合 GWP 仅为沼泽湿地的 6.0% ~ 28.7%。

### 2.5 沼泽湿地垦殖所引起的 CO<sub>2</sub> 排放

因为本研究应用静态暗箱采集气体,故无法直接观测沼泽及农田生态系统 NEE。根据张丽华等 2004 年在三江平原小叶章草甸进行的 NEE 观测表明<sup>[29]</sup>,在植物生长季 (4 ~ 10 月份)小叶章草甸 NEE 为 -3.35 t·hm<sup>-2</sup>。在植物的非生长季 (1 ~ 3 月份和 11 ~ 12 月份),因为此时地上植物已经枯萎死亡,不能再利用光合作用固定吸收大气中的碳,只能通过呼吸作用向大气排放碳,暗箱观测表明,此阶段内小叶章草甸通过呼吸作用向大气排放的碳量为 0.27 t·hm<sup>-2</sup>。因此 2004 年小叶章草甸 NEE 为 -3.08 t·hm<sup>-2</sup>,表现为吸收固定大气中的碳,呈现为碳汇的功能。

农田 (包括水田和旱田)利用经验公式  $NEE = RH - NPP$  计算获得生态系统与大气之间的净碳交换量,其中 RH 为土壤异养呼吸速率,NPP 为净初级生产力。研究表明<sup>①</sup>,在 2004 年的植物生长季,水田和旱田 NEE 分别为 -6.19 t·hm<sup>-2</sup>和 -3.55 t·hm<sup>-2</sup>,在植物的非生长季,水田和旱田 NEE 分别为 0.80 t·hm<sup>-2</sup>和 1.12 t·hm<sup>-2</sup>。因而 2004 年水田和旱田 NEE 分别为 -5.39 t·hm<sup>-2</sup>和 -2.43 t·hm<sup>-2</sup>。虽然农田表现为碳汇,但事实上,农田吸收固定的大气中的碳主要集中在作物体内,而作物的收获会对农田生态系统的碳汇功能有所影响。在三江平原,不论水田还是旱田,每年秋季地上作物收获完毕后,就把秸秆清理出农田,并立即犁田,然后耙地整平,把作物的根系也清理出农田,籽粒收获后被运输到城市或别的地方进行消费。作物的秸秆、根系以及籽粒都又转化为 CO<sub>2</sub> 排放到大气中,假如由站点尺度扩大到区域尺度,这部分碳也应算入农田碳平衡中。2004 年,水田和旱田的生物量分别为 15.29 t·hm<sup>-2</sup>和 12.84 t·hm<sup>-2</sup>,水稻和大豆植株生物量转换为碳的系数分别取 0.47 和 0.45,那么,水稻和大豆植株的碳含量为 7.18 t·hm<sup>-2</sup>和 5.78 t·hm<sup>-2</sup>,因此,考虑到作物碳的释放后,农田由碳汇转变为碳源,水田和旱田在 2004 年向大气释放的碳分别为 1.79 t·hm<sup>-2</sup>和 3.35 t·hm<sup>-2</sup>。沼泽湿地垦殖后,由碳汇转变为碳源,而且转变为旱田后,碳源的功能较水田而言更强。

通过以上分析可以看出,沼泽湿地开垦为农田虽然降低了 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 这两种温室气体的综合温室效应,但却导致了 CO<sub>2</sub> 排放量的激增。垦殖使湿地失去了碳汇功能,转而变为了碳源。

### 3 结论

- (1)沼泽湿地是大气 CH<sub>4</sub> 的一个重要排放源,同时也是 N<sub>2</sub>O 的排放源。毛果苔草沼泽和小叶章草甸相比,CH<sub>4</sub> 排放通量高而 N<sub>2</sub>O 排放通量低,积水环境是造成不同类型湿地 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放差异的主要原因;
- (2)垦殖导致沼泽湿地 CH<sub>4</sub> 排放量大幅度降低,而 N<sub>2</sub>O 排放量有所升高;
- (3)垦殖改变了沼泽湿地对大气 CO<sub>2</sub> 的源汇功能。沼泽湿地开垦为农田导致 CO<sub>2</sub> 排放量激增,使湿地失去了碳汇功能,转变为碳源。

表 2 沼泽湿地开垦对 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 综合温室效应的影响  
Table 2 Corresponding CO<sub>2</sub> equivalents of the CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from marsh and farmland in the Sanjiang Plain

时间尺度 Time scale (a)	GWP*		
	沼泽湿地 Marsh	水田 Rice field	旱田 Upland
20	20.96	6.45	1.26
100	8.15	2.80	1.42
500	2.61	0.99	0.75

\* CO<sub>2</sub> 等量物 CO<sub>2</sub> equivalents (t·a<sup>-1</sup>)

① 郝庆菊. 三江平原沼泽土地利用变化对温室气体排放影响的研究. 中国科学院研究生院博士学位论文. 2005



References :

[1 ] Houghton J T , Meira L G , Callander , B A , *et al.* Climate Change 1995 :the Science of Climate Change. New York :Cambridge University Press , 1998.

[2 ] Li K R. Land use change and greenhouse gases emission and carbon cycle in terrestrial ecosystems. Beijing :Meteorology Press ,2002.

[3 ] Skole D L. Terrestrial carbon budget. In :IGBP. Natural and Anthropogenic Changes :Impacts on Global Biogeochemical Cycle. Beijing :Science Press ,1995.

[4 ] IPCC. Climate Change 2001-Synthesis Report :Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge :University Press ,2001.

[5 ] Inubushi K ,Furukawa Y ,Hadi A , *et al.* Seasonal changes of CO<sub>2</sub> , CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan. Chemosphere ,2003 ,52 :603 — 608.

[6 ] Wang Y Y , Zheng X H , Song C C , *et al.* Characteristics of CH<sub>4</sub> , N<sub>2</sub>O exchange between wetland and atmosphere in the Sanjiang Plain. Geographical Research ,2006 ,25 ( 3 ) :457 — 467.

[7 ] Yang J S , Liu J S , Wang J D , *et al.* Emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from a wetland in the Sanjiang Plain. Journal of Plant Ecology ,2006 ,30 ( 3 ) :432 — 440.

[8 ] Song C C , Wang Y Y , Wang Y S , *et al.* Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities. Scientia Geographica Sinica ,2006 ,26 ( 1 ) :82 — 86.

[9 ] Song C C , Wang Y Y , Wang Y S , *et al.* Difference of soil respiration and CH<sub>4</sub> flux between mire and arable Soil. Chinese Journal of Soil Science , 2005 ,36 ( 1 ) :45 — 49.

[10 ] Wang Y S , Wang Y H. Quick measurement of CO<sub>2</sub> , CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from agricultural ecosystem. Advances in Atmospheric Sciences. 2003 ,20 ( 5 ) :842 — 844.

[11 ] Huang Y , Jiang J Y , Zong L G , *et al.* Influence of planting density and precipitation on N<sub>2</sub>O emission from a winter wheat field. Environmental Science ,2001 ,22 ( 6 ) :20 — 23.

[12 ] Panikov N S , Dedysh S N. Cold season CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from boreal peat bogs (West Siberia ) :Winter fluxes and thaw activation dynamics. Global Biogeochemical Cycles ,2000 ,14 :1071 — 1080.

[13 ] Wickland K P , Striegl R G , Mast M A , *et al.* Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland ,1996 — 1998. Global Biogeochemical Cycles ,2001 ,15 :321 — 335.

[14 ] Charlotte L R , Nigel T R. Seasonal contribution of CO<sub>2</sub> fluxes in the annual C budget of a northern bog. Global Biogeochemical Cycles ,2003 ,17 ( 1 ) :1029 — 1038.

[15 ] Melloh R A , Crill P M. Winter methane dynamics in a temperate peatland. Global Biogeochemical Cycles ,1996 ,10 :247 — 54.

[16 ] Flanagan P W , Bunnell F L. Microfloral activities and decomposition , An Arctic Ecosystem :The Coastal Tundra of Northern Alaska , edited by J. Brown *et al.* , New York : Van Nostrand Reinhold ,1980.

[17 ] Stadler D. Water and solute dynamics in frozen forest soils-Measurements and modeling. Diss. ETH Zürich ,1996 ,115 :74 — 79.

[18 ] Dise N B. Methane emission from Minnesota peatlands :spatial and seasonal variability. Global Biogeochemical Cycles ,1993 ,7 ( 1 ) :123 — 142.

[19 ] Singh S N , Kulshreshtha K , Agnibotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands. Chemosphere :Global Change Science ,2000 ,2 :39 — 46.

[20 ] Huttunen J , Hannu N , Jukka T. Methane emissions from natural peatlands in the northern boreal zone in Finland , Fennoscandia. Atmospheric Environment ,2003 ,37 :147 — 151.

[21 ] Huang G H , Chen G X , Wu J , *et al.* N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes from typical upland fields in northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology , 1995 ,6 ( 4 ) :383 — 386.

[22 ] Groffmann P , Brumme R , Butterbach-Bahl K , *et al.* Evaluating nitrous oxide fluxes at the ecosystem scale. Global Biogeochemical Cycles ,2000 ,14 :1061 — 1070.

[23 ] Teepe R , Brumme R , Beese F. Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural , fallow and forest land. Soil Biology & Biochemistry ,

2000 , 32 : 1807 — 1810.

[24] Oleg V M , Bernd H. Activity of denitrification and dynamics of N<sub>2</sub>O release in soils under six tree species and grassland in central Siberia. J. Plant Nutr. Soil Sci. , 1999 , 162 : 533 — 538.

[25] Huang Y , Jiao Y , Zong L G , *et al.* N<sub>2</sub>O emission from wheat cultivated soils as influenced by soil physicochemical properties. Acta Scientiae Circumstantiae , 2002 , 22 ( 5 ) 598 — 602

[26] Chen W X. Soil and environmental microbiology. Beijing : Beijing Agricultural Press , 1990.

[27] Chen G X , Huang G H , Huang B , *et al.* CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from a rice field and effect of Azolla and fertilization on them. Chinese Journal of Applied Ecology , 1995 , 6 ( 4 ) 378 — 382.

[28] Hadi A , Inubushi K , Purnomo E , *et al.* Effect of land-use changes on nitrous oxide emission from tropical peatlands. Chemosphere-Global Change Science , 2000 , 2 347 — 358.

[29] Zhang L H , Song C C , Wang D X. CO<sub>2</sub> , CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions to the atmosphere upon nitrogen addition in the swamp wetland. Acta Scientiae Circumstantiae , 2005 , 25 ( 8 ) : 1112 — 1118.

参考文献：

[2] 李克让主编. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京：气象出版社，2002.

[6] 王毅勇，郑循华，宋长春，等. 三江平原湿地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 的地-气交换特征. 地理研究，2006 25 ( 3 ) : 457 ~ 467.

[7] 杨继松，刘景双，王金达，等. 三江平原生长季沼泽湿地 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放及其影响因素. 植物生态学报 2006 , 30 ( 3 ) : 432 ~ 440.

[8] 宋长春，王毅勇，王跃思，等. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化. 地理科学，2006 , 26 ( 1 ) : 82 ~ 85.

[9] 宋长春，王毅勇，王跃思，等. 沼泽垦殖前后土壤呼吸与 CH<sub>4</sub> 通量变化. 土壤通报，2005 26 ( 3 ) : 45 ~ 49.

[11] 黄耀，蒋静艳，宗良纲，等. 种植密度和降水对冬小麦田 N<sub>2</sub>O 排放的影响. 环境科学 2001 , 22 ( 6 ) : 20 ~ 23.

[21] 黄国宏，陈冠雄，吴杰，等. 东北典型旱作农田 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放通量研究. 应用生态学报，1995 , 6 ( 4 ) : 383 ~ 386.

[25] 黄耀，焦燕，宗良纲，等. 土壤理化特性对麦田 N<sub>2</sub>O 排放影响的研究. 环境科学学报，2002 , 22 ( 5 ) 598 ~ 602.

[26] 陈文新主编. 土壤和环境微生物学. 北京：北京农业大学出版社，1990.

[27] 陈冠雄，黄国宏，黄斌，等. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放及养萍和施肥的影响. 应用生态学报，1995 , 6 ( 4 ) 378 ~ 382.

[29] 张丽华，宋长春，王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响. 环境科学 2006 27 ( 7 ) : 1257 ~ 1263.