

洞庭湖白沙洲 4 种植被系统与大气中碳素交换

谭三清¹, 康文星^{1,2,3,*}, 何介南¹, 田 徵¹, 崔莎莎¹, 胡燕平¹

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004;

3. 国家野外科学观测会同杉木林生态系统研究站, 湖南会同 418307)

摘要:近年来由于气候变化, 极端天气现象及其相应的自然灾害的频繁发生, 致使人类面临严峻的挑战, 全球环境问题已备受瞩目。湿地碳循环在全球气候变化中具有不可忽视的作用, 研究湿地系统与大气中碳素的交换, 有助于深入了解湿地生态系统对大气环境的影响。在生物量和土壤温室气体排放测定的基础上, 对洞庭湖白沙洲湿地 4 种主要植被系统与大气碳素交换进行研究, 结果表明: 杨树人工林、芦苇和苔草 3 种植被系统净生产力吸收大气中碳量分别为 9.88 、 6.83 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 4.07 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 土壤排放碳量(包括 CH_4 中的碳素)分别为 3.08 、 2.79 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 2.80 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 3 种植被系统每年净吸收大气中的碳 6.80 、 4.07 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 1.27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 都是大气 CO_2 的汇; 黑藻与竹叶眼子菜混交群落净生产力吸收大气碳 1.23 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 土壤排放的碳 1.32 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 该系统每年向大气净排放 0.09 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 是一个弱的 CO_2 排放源; 将 CH_4 温室效应是 CO_2 的 21 倍折算成 CO_2 量, 杨树林土壤排放 CO_2 量(包括 CH_4 折算成 CO_2 量)为 16.19 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 比植被净生产力吸收的少 16.64 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 对大气温室效应而言, 该系统是温室气体的汇; 芦苇、苔草以及黑藻与竹叶眼子菜混交群落土壤排放 CO_2 量(包括 CH_4 折算成 CO_2 量)分别是 43.68 、 39.19 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 32.22 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 比植被净生产力吸收的还多 20.60 、 24.27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 27.71 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 对大气温室效应而言, 这 3 种湿地植被系统都是温室气体排放源。

关键词:湿地; 植被; CO_2 ; CH_4 ; 碳汇功能

The exchange between four types of vegetation system of Baishazhou in Dongting Lake and carbon of atmosphere

TAN Sanqing¹, KANG Wenxing^{1,2,3,*}, HE Jienan¹, TIAN Zheng¹, CUI Shasha¹, HU Yanping¹

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Laboratory for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha 410004, China

3 National Field Station for Scientific Observation & Experiment, Hunan 418307, China

Abstract: Due to climate change in recent years, extreme weather and corresponding natural disasters are frequently occurring, and people face severe challenges. Global environmental problem has attached a lot of attention. Wetland is one of the four terrestrial ecosystem. Although the world's wetland only accounts for 4%—5% of the total land area, its carbon storage is up to 450Gt, equivalent to 20% of carbon in global terrestrial ecosystem. Wetland ecosystem doubles as carbon sink and carbon resource. Carbon cycle has an important influence on global carbon budget and global climate change. Researching the exchange between wetland system and carbon of atmosphere contributes to thoroughly understand the effects that wetland ecological system act on environment of atmosphere. On the basis of biomass and determining green house gas emission, the exchange between four types of vegetation system of Baishazhou in Dongting Lake and carbon of atmosphere were studied. The results indicated: Poplar plantation, *Phragmites* and *Carex* these three types vegetation system its productivity respectively absorb carbon 9.88 、 6.83 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and 4.07 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, Carbon emitted by soil (including carbon of CH_4) 3.08 、 2.79 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and 2.80 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, the three types vegetation system are sink which absorbs carbon 6.80 、 4.07 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ and 1.27 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ every year. Mictium of *Hydrilla* and *Potamogeton* its net productivity

基金项目:湖南省科技厅重点资助项目(2006SK4059); 国家林业局重点资助项目(2006-11)

收稿日期:2009-12-31; **修订日期:**2010-04-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kwx1218@126.com

absorb carbon $1.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, soil discharge carbon $1.32 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, the system is carbon source, which discharge carbon $0.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ every year. If that CH_4 green house effect is 21 times of CO_2 convert into CO_2 , soil of Poplar forestry release CO_2 (including CH_4 converting into CO_2) $16.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which is less $16.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ than net productivity of vegetation. This system is sink of green house for green house effect of atmosphere; *Phragmites*, *Carex* as well as mictium of *Hydrilla* and *Potamogeton*. Soil release CO_2 (including CH_4 converting into CO_2) 43.68 、 39.19 and $32.22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which is more 20.26 、 24.27 and $27.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ than vegetation net productivity absorbing. These three types wetland vegetation system are emission source of green house gas for green house effect of atmosphere, which reminds us that in the wetland study, we not only concentrate wetland soil organic carbon on accumulation of loss, but also care about CO_2 which may be carbon sink of atmosphere or sources of emissions of atmospheric greenhouse effect.

Key Words: wetland; vegetation; CO_2 ; CH_4 ; carbon sequestration function

湿地作为一个水陆相互作用形成的独特生态系统,是陆地生态系统碳循环的重要组成部分,在稳定全球气候变化中占有重要位置。全球湿地面积仅占陆地面积的 4%—6%^[1-2],碳储量约占陆地生态系统碳储量的 12%—20%^[3-4]。

湿地中植物通过光合作用吸收 CO_2 形成有机物,植物死后的残体经腐殖化作用和泥炭化作用形成腐殖质和泥炭。湿地植物残体因受湿地多水和还原性强的限制,其分解转化速率比较缓慢,通常以泥炭或有机质形式表现为净积累^[5-7]。

湿地又是向大气排放 CO_2 尤其是 CH_4 的最大排放源,全球排入大气中的 CH_4 有 15%—22% 来自于湿地^[2],据估计,目前 CH_4 对温室效应的贡献率达 22%^[8],同时, CH_4 在目前温室气体种类中年增长率最快^[9]。有效控制湿地生态系统的碳循环过程,对稳定全球气候变化有着非常重要的意义。

本研究在对洞庭湖白沙洲湿地 4 种植被群落生物量调查和土壤温室气体排放通量测定的基础上,分析了 4 种植被群落通过光合作用吸收大气中的碳素量和土壤向大气排放的碳素量,比较了 4 种植被群落与大气中的碳素交换,为我国亚热带地区湿地生态系统碳循环的研究和湿地保护、管理提供科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地概况

本研究是在洞庭湖的白沙洲进行的,白沙洲位于湖南省沅江市境内,夹在洞庭湖中的东南湖和万子湖之间,地理位置 $28^\circ 28'—28^\circ 36' \text{N}$, $112^\circ 36'—112^\circ 43' \text{E}$ 。属于亚热带季风湿润气候区,年平均气温 $16.6—17.0^\circ \text{C}$,年平均降雨量 $1250—1380 \text{ mm}$,年辐射总量 $419.6—428.3 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均风速 $2.5—3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,热量丰富,雨量充沛,水热大部分时间同步。白沙洲湿地土壤组成主要为河相冲积物形成的湖潮土。土层深度 100cm 以上。白沙洲的前沿浅水区水生植物主要为黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 和竹叶眼子菜 (*Potamogeton. x malaianoides* Miki) 混交群落。苔草 (*Carex*) 广泛分布在地势平坦只有轻微泥沙淤积地段,芦苇 (*Phragmites communis*) 分布在靠近河流(洪道)附近的沼泽地段。白沙洲地势高的原苔草地段是 1999 年营造的杨树人工林 (*Populus tomentosa* Carr) (根据中德财政合作湖南洞庭湖生态造林项目计划),2005 年,林龄 6 年,密度 $2360 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$,平均树高 7.5m,平均胸径 6.3cm;2006 年,平均树高 8.7m,平均胸径 7.5cm。植物群落分布及观测点位置见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 植被系统净生产力测定

在芦苇和苔草 2 种草本植物群落以及黑藻与竹叶眼子菜水生植物混交群落各选取 5 个 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 有代表性的小样方。每个小样方生物量(包括活的植物和凋落物及根系)测定用全部收获法,用烘干恒重法测其干物重。在样方生物量调查时,把多年生灌木植物分开列出,用多年生灌木植物干重除以 4 作为 1a 的生长

量^[10],再加上 1 年生植物(包括多年生草本植物)的生长量求出草地和水生植物净生产力。

2005 年 11 月份,在杨树人工林中选取一块有代表性的样地(样地面积 667m²),进行林分现存生物量测定。根据人工林特点,按克拉夫特分级标准(I 代表优势木,II 代表优势亚木,III 代表平均木,IV 代表被压木,V 代表濒死木),对样地每木生长势进行分级,然后测定样地内每木的树高和胸径。选取各生长级样木加上样地平均木(6 株),连根挖出,在现场用 2m 长分层截取法测定杨树的根、枝、叶、干生物量鲜重。抽取杨树各组分样品用烘干恒重法测其干物质重量,然后建立相对

生长回归方程,估算林分的现存量。2006 年 11 月份,在原样地内又进行 1 次林分现存生物量测定。利用 2006 年样地林分现存生物量与 2005 年林分现存生物量之差,求出 2006 年林分净生产力生产的生物量。

1.2.2 林分年凋落物量和根系枯死量的估算

在杨树人工林样地设置 10 个面积各为 1m²的凋落物承接器,每半个月收集 1 次凋落物。用烘干恒重法求出凋落物的干物质质量。将 1a 内的测定数据求和并根据林分面积得到 1a 内林分产生的凋落物量。林木根系细根每年的枯死量,按照亚热带常绿阔叶林细根年枯死量和地上年凋落物量平均 1.1212 比例^[11]估算。

1.2.3 植物组织含碳率测定

分别抽取杨树的干、枝、叶、根、凋落物、林下植被和枯死根样品和芦苇、苔草、黑藻和竹叶眼子菜 4 种草本植物的地上和地下植物组织样品,每个样品的碳素含量用重铬酸钾-水合加热测定,平均值差异显著性分析用 SPSS13.0 软件进行。

1.2.4 土壤 CO₂和 CH₄排放通量测定

采用静态箱式方法,在每种植被湿地类型中选取有代表性的没有植被覆盖的小空隙(周边距植被覆盖的位置约 10cm 左右),测定 CO₂排放量,在有植被覆盖的地段也各安装 1 台采样箱,测定 CH₄的排放量(CH₄主要是从植物体内排放)。采样箱用不锈钢制成,箱体外包一层优质棉保温被,目的在于防止在太阳辐射下采样箱温度升高影响观测结果。从 2006 年 3 月 1 日至 12 月 31 日,每月上、中、下旬各选择一个晴天进行 24 h 观测,白天 2 h 一次,晚上 3 h 一次。各箱体同时平行采样,采样时间分别为盖箱后的 0、10、20 min 和 30 min,每次抽样 100 mL 气体样品,带回实验室在 24 h 内用改装后的 HP5890II 型气相色谱分析仪分析气体中的 CO₂和 CH₄浓度。CO₂和 CH₄检测器为 FID(氢焰离子化检测器),载气为 N₂,流速 30 mL·min⁻¹,H₂为燃气,流速 30 mL·min⁻¹(色谱柱类型为 HP-5mm 毛细管柱),空气为助燃气,流速为 40 mL·min⁻¹。检测器温度为 200℃,分离柱温度为 55℃,气体排放速率由每次 4 个时间观测值经线性回归分析得出。气体排放通量用下式计算:

$$F = \frac{\Delta m}{A \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta C}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot h \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

式中, F 为气体通量/(mg·m⁻²·h⁻¹); ρ 为实验室温度下的气体密度/(g·cm⁻³); Δm 和 ΔC 分别为 Δt 时间内采样箱中气体质量(g)和混合比浓度; h 、 A 、 V 分别表示箱高(cm)、底面积(cm²)和体积(cm³)。在每次采样时,用 JM624 型便携式数字温度计测定各箱的气温、地表温度、地下 5 cm 的土壤温度,温度计的测量范围在 -30—50℃,测量准确度为 0.5℃,读数分辨率为 0.1℃。

土壤排放的 CO₂包括微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸和矿化物质的化学氧化作用^[12]。土壤呼吸释放的 CO₂中约 30%—50% 来自根系活动或自养呼吸,其余部分主要源于土壤微生物对有机质的分解作用,即异养呼吸作用^[13]。在计算植物吸收 CO₂时,用净生产量来计算,其中包含根系的呼吸作用。虽然,本研究测



图 1 植物群落分布及观测点地理位置

Fig. 1 Plant community distribution and observation points located

定 CO_2 的采样箱安置在没有植被覆盖的小空隙地被,但是湿地植被地下根系盘根错节,即使无植被覆盖的小空隙地下也有大约 6—7 cm 深的草根层,因此,在计算土壤异养呼吸 CO_2 排放量时,根据文献^[13] 中的土壤呼吸释放 CO_2 中约有 30%—50% 来自根系的自养呼吸,结合实验地的实际情况,取文献^[13] 的中值,即用实测的数据乘上 55% 求得土壤排放 CO_2 量。

1.2.5 CH_4 和 CO_2 排放量计算

利用每个测定日(晴天),白天 6 次,晚上 4 次的测定数据,计算出该测定日 CH_4 和 CO_2 的日排放量,然后根据每个月上、中、下旬 3 个晴天,一年共 30 个 CH_4 和 CO_2 的日排放量数据(1—2 月份没有测定),求出年的日平均排放量和一年内湿地单位面积的 CH_4 和 CO_2 排放量。

2 结果与分析

2.1 植被年净生产力的吸收碳量

从表 1 看出,杨树人工林(7 年生)生态系统净生产力吸收的碳为 $9.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 量 $36.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。芦苇和苔草群落净生产力吸收的碳分别为 $6.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $4.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 量分别是 23.08 和 $14.92 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。水生植物黑藻与竹叶眼子菜群落净生产力吸收的碳与折合成 CO_2 量分别为 1.23 和 $4.51 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。表明洞庭湖白沙洲湿地 4 种植被群落生态系统每年除了植物本身呼吸消耗外,从大气净吸收碳 1.23— $9.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 1 洞庭湖滩涂植物净生产力吸收碳量

Table 1 Absorbed carbon amount of net productivity from shoal vegetation in Dong Ting Lake

类型 Type	净生产力生物量 Net productivity /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	含碳量 Carbon content /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	净生产力吸收碳量 Absorbed carbon amount of net productivity /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	折合 CO_2 量 To convert to CO_2 amount /($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	13.58	512	6.83	23.08
苔草 <i>Carex</i>	7.79	523	4.07	14.92
杨树人工林 <i>Populus tomentosa</i> Carr	20.36	485	9.88	36.23
黑藻与竹叶眼子菜 <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	2.46	501	1.23	4.51

2.2 湿地 CH_4 排放量

白沙洲湿地 4 种主要植被生态系统中,芦苇草甸土壤 CH_4 排放量最高为 $1.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其次是苔草草甸土壤为 $1.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,水生植物黑藻与竹叶眼子菜群落的土壤 CH_4 排放量略低于芦苇和苔草为 $1.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,杨树人工林土壤 CH_4 排放通量最少,仅为 $0.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

湿地 CH_4 排放速率与土壤积水状态关系极大,而且季节性或常年积水湿地积水深度的变化也直接影响着 CH_4 的排放^[14]。水生植物湿地处于常年积水状态下,芦苇处于洪道旁边的沼泽地,苔草大都处在滩涂地势低洼的地段,每年汛期都有被洪水淹没的可能,属于季节性淹水湿地,杨树人工林处于滩涂高地,基本上属于无积水状态(特大洪水除外)。土壤的积水状态不同,造成无积水杨树林土壤 CH_4 排放量与其它季节性积水或常年积水土壤 CH_4 排放量差别极大。 CH_4 是土壤有机质厌氧分解的最终产物,土壤中 CH_4 产生的速率与土壤有机质含量直接相关^[15]。芦苇、苔草每年产生的凋落物量比水生植物多,其土壤有机质含量比水生植物丰富,尽管水生植物湿地嫌气环境比苔草和芦苇地更好,但其归还到土壤中的有机物质比它们少,因此,土壤中有机质发酵产生的 CH_4 也相应减少。

2.3 湿地 CO_2 排放量

从表 2 看出,水生植物群落湿地 CO_2 排放量年平均 $0.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (已除去占 45% 的根呼吸量,下同),季节性积水的芦苇、苔草湿地 CO_2 排放量分别增加到 5.25 和 $6.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,处于滩涂高地常年无积水的杨树人工林林地高达 $10.71 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从不同积水状态下土壤 CO_2 排放量变化看出,湿地水位高度是影响土

壤 CO₂ 通量的主要因素^[16], 一般情况下, 湿地 CO₂ 排放与湿地水位呈正相关关系^[17]。常年积水 CO₂ 通量最小, 处于间隙积水时 CO₂ 通量增加, 常年无积水状态时, CO₂ 通量最大。

表 2 洞庭湖湿地土壤 CH₄ 和 CO₂ 的排放量
Table 2 CH₄ and CO₂ emission amount from soil of Ding Ting Lake

类型 Type	CH ₄ 排放速率 Discharge rate of CH ₄ /(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	CO ₂ 排放速率 Discharge rate of CO ₂ /(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	CH ₄ 排放量 Account of dischargedCH ₄ / (t·hm ⁻² ·a ⁻¹)		CO ₂ 排放量 Account of dischargedCO ₂ /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	
			CH ₄	C	CO ₂	C
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	502	1438	1.83	1.37	5.25	1.42
苔草 <i>Carex</i>	434	1635	1.58	1.18	6.01	1.62
杨树人工林 <i>Populus tomentosa</i> Carr	76	2936	0.28	0.19	10.71	2.89
黑藻与竹叶眼子菜 <i>Hydrilla verticillata</i> , <i>Potamogeton malaianus</i>	412	198	1.50	1.12	0.72	0.20

2.4 湿地土壤的碳素排放

从表 3 可知, 常年积水的黑藻与竹叶眼子菜湿地碳的排放量 1.32 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中以 CH₄ 形式排放的 1.12 t·hm⁻²·a⁻¹, 以 CO₂ 形式排放的 0.20 t·hm⁻²·a⁻¹, 以 CH₄ 形式排放的碳素量是以 CO₂ 形式排放的 5.62 倍。季节性积水的芦苇草地碳的排放量 2.79 t·hm⁻²·a⁻¹, 其中以 CO₂ 和 CH₄ 形式释放的分别占 50.9% 和 40.1%。季节性积水的苔草草地释放的碳 2.80 t·hm⁻²·a⁻¹, 以 CO₂ 和 CH₄ 形式释放的分别占 57.9% 和 42.1%。无积水状态的杨树人工林林地碳素的排放 3.08 t·hm⁻²·a⁻¹, 有 93.8% 是以 CO₂ 形式释放的, 以 CH₄ 形式释放的仅占 6.2%。这种不同积水状态下湿地碳素以不同的温室气体形式释放以及其释放的碳素量不同, 主要是由于湿地水位的高低变化, 导致土壤中厌气和好气环境的变化, 产生了不同的温室气体引起的。

表 3 洞庭湖湿地植被系统与大气 C 的交换
Table 3 Exchange of C element between the vegetation system of Dong Ting Lake and atmosphere

类型 Type	净生产力 吸收的 C 量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) C fixation of net productivity	排放 CO ₂ 中 C 通量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) C element flux from CO ₂ discharge	排放 CH ₄ 中 C 通量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) C element flux from CH ₄ discharge	C 排放总量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) C discharge amount	净吸收 C 量 /(t·hm ⁻² ·a ⁻¹) C net absorbed
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	6. 83	1. 42	1. 37	2. 79	4. 04
苔草 <i>Carex</i>	4. 07	1. 62	1. 18	2. 80	1. 27
杨树人工林 <i>Populus tomentosa</i> Carr	90. 88	2. 89	0. 19	3. 08	6. 80
黑藻与竹叶眼子菜 <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Poamogeon malaianus</i>	1. 23	0. 20	1. 12	1. 32	-0. 09

2.5 湿地系统与大气中碳素交换

杨树人工林湿地系统净生产力从大气中吸收的碳 9.88 t·hm⁻²·a⁻¹; 每年由土壤向大气排放的碳(包括 CH₄ 中的碳, 下同)3.08 t·hm⁻²·a⁻¹, 该系统每年净吸收大气中碳 6.80 t·hm⁻²·a⁻¹, 表明该系统是大气碳素的一个强大的汇。芦苇湿地每年净生产力从大气吸收碳 6.83 t·hm⁻²·a⁻¹, 每年由土壤向大气排放的碳 2.79 t·hm⁻²·a⁻¹, 系统每年净吸收大气中 4.04 t·hm⁻²·a⁻¹ 碳量。苔草湿地每年净生产力从大气吸收的碳和土壤向大气排放的碳相抵后, 系统净吸收大气中碳 1.27 t·hm⁻²·a⁻¹, 表明这两个系统都是大气碳素的汇。水生植物净生产力较少, 从大气中吸收的碳素只有 1.23 t·hm⁻²·a⁻¹, 但是土壤释放碳 1.32 t·hm⁻²·a⁻¹, 系统向大气净

排放的碳为 $0.09 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 该系统是一个弱的 CO_2 排放源。除水生植物群落外, 白沙洲湿地其它 3 种植被系统, 对于大气中碳素来说都具有汇的功能。各种植被系统的碳汇功能很不相同, 杨树林湿地系统碳汇能力最大, 分别是芦苇、苔草系统的 1.68 倍和 5.35 倍。

2.6 土壤排放的温室气体对温室效应的贡献

湿地土壤主要以 CO_2 和 CH_4 形式排放温室气体, 但是这两种温室气体的温室效应差异极大, CH_4 的温室效应是 CO_2 的 21 倍^[18]。因此, 要讨论湿地排放的各种气体对温室效应的贡献量, 就必须把 CH_4 的温室效应折算成 CO_2 的 21 倍的量来分析。

黑藻与竹叶眼子菜混交水生植物群落湿地 CO_2 和 CH_4 的排放量分别为 0.72 和 $1.50 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 将 CH_4 折算成 CO_2 温室效应量, 水生植物湿地土壤排放的温室气体量(按 CO_2 温室效应量) $32.22 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中有 97.7% 是以 CH_4 的形式贡献的, 有 2.3% 是以 CO_2 形式贡献的。

芦苇草地排放 CO_2 $5.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率占 12.1%, 排放的 CH_4 折算成 CO_2 温室效应量 $38.43 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率为 87.9%。苔草草地排放 CO_2 $6.01 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 CH_4 $1.58 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 当 CH_4 折算成 CO_2 温室气体效应量后, 对温室效应的贡献率分别为 15.3% 和 84.7%。杨树人工林林地以 CO_2 形式排放对温室效应贡献率占 64.6%, CH_4 折算成 CO_2 量对温室效应的贡献率只有 35.4%。

以上分析表明, 常年积水湿地排放温室气体中, CH_4 对温室效应贡献率最大; 干湿交替状态下, 湿地排放的温室气体对温室效应的贡献率取决于土壤的厌氧或好气环境的变化, 以及 CO_2 和 CH_4 的释放量; 无积水的湿地 CO_2 排放对温室效应的影响占主导地位。

表 4 洞庭湖湿地植被系统对温室效应的贡献
Table 4 The vegetation system of Dong Ting Lake contribute to effect of greenhouse

类型 Type	净生产力 吸收 CO_2 量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ CO_2 absorbed amount of Net productivity	CO_2 排放通量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ CO_2 discharge flux	CH_4 排放通量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ CH_4 discharge flux	CH_4 折算成 CO_2 温室 效应量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ Convert greenhouse amount of CH_4 into CO_2	对温室效应 贡献 CO_2 总量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ Total CO_2 contribute to greenhouse Effect	净吸收 CO_2 量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ Net absorbed CO_2 amount	净排放 CO_2 量 $/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$ Net discharge CO_2 amount
芦苇 <i>Phragmites communis</i>	23.08	5.25	1.83	38.43	43.68		20.60
苔草 <i>Carex</i>	14.92	6.01	1.58	33.18	39.19		24.27
杨树人工林 <i>Populus tomentosa</i> Carr	36.23	10.71	0.28	5.88	16.59	19.64	
黑藻与竹叶眼子菜 <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	4.51	0.72	1.50	31.50	32.22		27.71

3 结论与讨论

本研究中 4 种植被湿地的 CH_4 通量远高于广州市红树林和滩涂湿地的 CH_4 测定值^[19], 其原因可能在于沿海湿地大量存在的 SO 粒子, SO 粒子阻碍了 CH_4 的产生^[20], 从而也降低了 CH_4 排放量。在芦苇草甸湿地测定 CH_4 结果比三江平原芦苇湿地 $374 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[21] 大 34.2%, 苔草湿地 CH_4 测定值比三江平原苔草湿地 $343 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[22] 高 26.5%。水生植物湿地的测定值也比三江平原沉水植物湿地 $124 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[21]、沼泽化湿地 $189 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ^[22] 的测定值大 117.9%—232.2%。这是因为三江平原属于温带地区, 洞庭湖属于亚热带地区, 水热条件的差异造成的, 同时也表明温度条件也是影响 CH_4 排放的主导因子。

处于季节性积水的芦苇、苔草湿地的 CO_2 排放量是常年积水水生植物湿地 7.26—8.25 倍。其原因一方

面因为水生植物湿地还原环境比芦苇、苔草湿地强,另一方面洞庭湖的滩涂草甸湿地具有“涨水为湖,落水为洲”的特点,经常遭受洪水的淹没,由于洪泛对湿地具有较大的扰动作用,对湿地水环境等有很大的影响,这种干、湿的经常交替会引起土壤微生物活性及种群落的改变,并对有机碳的分解转化过程产生影响,增大湿地 CO₂ 排放量^[23]。杨树林地土壤 CO₂ 排放量比芦苇和苔草地多 79.8%—84.3%。杨树林是地势较高的苔草地营造的,潜水位高度对土壤 CO₂ 排放通量的影响是显著的^[16-17]。另外,尽管造林已有 7a,但造林时全垦整地,挖穴栽植,对表层土壤物理结构和氧化条件到目前还有影响,使得土壤中有有机质的分解和氧化速率比没有造林的苔草地快。湿地草地转化为林地在较长的一段时间内都会造成更多的土壤有机碳释放到大气中^[24]。

本研究结果表明,白沙洲 4 种植被湿地系统在与大气中碳素的交换中,除水生植物群落是弱的 CO₂ 的排放源以外,其它 3 种植被系统都表现出碳汇的功能。这与众多研究结果认为,湿地土壤有机碳是在不断积累,是大气 CO₂ 的汇^[25-27] 相一致。

将 CH₄ 的温室效应量折算成 CO₂ 温室效应量,杨树林系统土壤共排放 CO₂ 16.59 t·hm⁻²·a⁻¹ (包括 CH₄ 折算成 CO₂ 的温室效应量,下同),仍比该系统净生产力吸收的少 19.64 t·hm⁻²·a⁻¹。该系统不仅是大气 CO₂ 的汇,而且也是温室气体的汇。芦苇、苔草和黑藻与竹叶眼子菜湿地系统排放 CH₄ 折算成 CO₂ 温室效应的量加上土壤排放的 CO₂ 量,其系统共排出的 CO₂ 温室效应量分别为 43.68、39.19 t·hm⁻²·a⁻¹ 和 32.22 t·hm⁻²·a⁻¹,比系统净生产力吸收的 CO₂ 还多出 20.60、24.27 t·hm⁻²·a⁻¹ 和 27.71 t·hm⁻²·a⁻¹。尽管芦苇、苔草群落系统对大气中碳素而言是碳汇,对大气温室效应的贡献而言,这 3 种湿地植被系统都是温室气体的排放源。在今后的湿地碳循环研究中,不仅要把注意力集中在湿地土壤有机碳的积累或损失上,而且更应关注他们是大气 CO₂ 的汇的同时,可能也是大气温室效应的温室气体排放源。

本研究的内容只涉及了湿地生态系统与大气中碳素交换问题,并没有涉及湿地的碳循环全过程。湿地的碳循环全过程除了与大气 CO₂ 交换有关外,还涉及水体和泥炭层的碳输入和输出全过程。因此,关于湿地碳循环与水文地球化学过程及湿地演替群落的关系,气候变化与环境变化对湿地碳生物地球化学循环的影响等,是湿地碳循环研究的重点。

References:

- [1] Matthews E, Fung I Y. Methane emissions from natural wetlands: global distribution, area, and environmental characteristics of sources. *Global Biogeochemical Cycle*, 1987, 1: 61-86.
- [2] Aselmann I, Crutzen P J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emission. *Journal Atmosphere Chemistry*, 1998, 32: 3257-3264.
- [3] Maltby E, Mmizti P. Carbon dynamics in peatland and other wetland soils: Regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993, 27: 999-1023.
- [4] Schellhase H U, Mac Isaac E A, Smith H. Carbon budget estimates for reservoirs on the Columbia River in British Columbia. *The Environmental Professional*, 1997, 19: 48-57.
- [5] Vitt D H, Halsey L A, Bauer I E. Spatial and temporal of carbon sequestration in peatland of continental western Canada through the Holocene. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2000, 37: 683-693.
- [6] Brix H, Sorrell B K, Lorenzen B. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases?. *Aquatic Botany*, 2001, 69: 313-324.
- [7] Kasim K A, Klemetsson L. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management*, 1997, 13: 245-250.
- [8] Lelieveld J, Crutzen P, Dentener F J. Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus*, 1998, (Ser B 5): 128-150.
- [9] Khalil M A K. Non-CO greenhouse gases in the atmosphere. *Annual Review of Energy and the Environment*, 1999, 24: 645-661.
- [10] Zhang L, Luo T X, Deng K M. Biomass and net primary productivity of secondary evergreen broadleaved forest in Huangmian Forest Farm, Guangxi. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11): 2029-2033.
- [11] Zhang X Q, Wu K H. Fine-root production and turnover for forest ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3): 126-135.
- [12] Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469-476.

- [13] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. 2nd Ed. New York: Academic Press, 1997:136-143.
- [14] Macdonald J A, Foeller D, Hargreaves K L. Methane emission rates from a northern wetland: response to temperature, watertable and transport. *Atmospheric Environment*, 1998, 32:3219-3227.
- [15] Gisela W, Sabine F, Kornelia Z. Variability of soil methane production on the micro scale: spatial association with hot spots of organic material and population. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32:1121-1130.
- [16] Carroll P, Crill P. Carbon balance of a temperate poor fen. *Global Biogeochem Cycle*, 1997, 11:349-356.
- [17] Silvola J. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology*, 1996, 84:219-228.
- [18] Liu Z G. Carbon stock and greenhouse gasses emission of wetland ecosystem. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(5):635-639.
- [19] Kang W X, Zhao Z H, Tian D L, He J N, Deng X W. CO₂ exchanges between mangrove and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12):2005-2010.
- [20] Choi Y, Wang Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radio carbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:195-203.
- [21] Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y. Evaluation of wetland ecosystem services in Wuliangshui. *Resources Science*, 2005, 27(2):110-114.
- [22] Hao Q J, Wang Y S, Le 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-environmental Science*, 2004, 23(5):846-851.
- [23] Hojeong K, Freeman C. Enzyme activities in constructed wetlands: implication for water quality amelioration. *Hydrobiologia*, 1998, 368(1/3):231-235.
- [24] Mitra S, Wassmann R, Vlek P L G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 2005, 88:25-35.
- [25] Bartlett K B, Harris R C. Review and assessment of methane emission from wetlands. *Chemosphere*, 1993, 26:261-320.
- [26] Holly R, Jeff S, Darwin A. Factors influencing methane flux from a boreal forest wetland in Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34:435-443.
- [27] Gorham E. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1:182-195.

参考文献:

- [10] 张林, 罗天祥, 邓坤枚. 广西黄冕林场次生常绿阔叶林生物量及净第一生产力. *应用生态学报*, 2004, 15(11):2029-2033.
- [11] 张小全, 吴可红. 森林细根生产和周转研究. *林业科学*, 2001, 37(3):126-135.
- [12] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5):469-476.
- [18] 刘子刚. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究. *地理科学*, 2004, 24(5):635-639.
- [19] 康文星, 赵仲辉, 田大伦, 何介南, 邓湘雯. 广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换. *应用生态学报*, 2008, 19(12):2005-2010.
- [21] 段晓南, 王效科, 欧阳志云. 乌梁素海湿地生态系统服务功能及价值评价. *资源科学*, 2005, 27(2):110-114.
- [22] 郝庆菊, 王跃思, 乐长春, 王毅勇, 王明星. 三江平原湿地土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放的初步研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5):846-851.