

广州市红树林和滩涂湿地生态系统 与大气二氧化碳交换*

康文星** 赵仲辉 田大伦 何介南 邓湘雯

(中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要 在生物量调查和土壤温室气体排放量测定基础上,对广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气 CO₂ 交换进行研究,分析湿地植被净生产力吸收 CO₂ 的能力和不同积水状态下(常年积水、间歇积水、无积水)湿地碳汇功能。结果表明:红树林湿地植被净生产力吸收 CO₂ 33.74 t·hm⁻²·a⁻¹,土壤排放 CO₂(包括 CH₄ 折算成 CO₂ 的温室效应量)12.26 t·hm⁻²·a⁻¹,湿地每年净吸收大气 CO₂ 21.48 t·hm⁻²,说明红树林湿地是一个强的碳汇;滩涂湿地植被净生产力吸收 CO₂ 8.54 t·hm⁻²·a⁻¹,土壤排放 CO₂ 5.88 t·hm⁻²·a⁻¹,排放 CH₄ 0.19 t·hm⁻²·a⁻¹,若按碳素折算,湿地每年吸收大气中碳素 2.33 t·hm⁻²,土壤排放碳素 1.74 t·hm⁻²包括(CH₄ 中的碳),系统净固定碳 0.59 t·hm⁻²,说明滩涂湿地是一个弱的碳汇,若将 CH₄ 的温室效应折算成 CO₂ 量,则土壤排放 CO₂ 9.78 t·hm⁻²·a⁻¹,排放比吸收多 1.24 t·hm⁻²·a⁻¹,对大气温室效应而言,滩涂湿地是一个弱碳源;常年积水下排放的温室气体主要是 CH₄,无积水下排放的温室气体主要是 CO₂,常年积水湿地碳汇功能最大,无积水湿地碳汇功能最小。

关键词 湿地生态系统 红树林 CO₂ CH₄ 碳汇功能

文章编号 1001-9332(2008)12-2605-06 中图分类号 Q148 文献标识码 A

CO₂ exchanges between mangrove- and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou. KANG Wen-xing, ZHAO Zhong-hui, TIAN Da-lun, HE Jie-nan, DENG Xiang-wen (Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2008, 19(12): 2605-2610.

Abstract: Based on the investigation of biomass and the measurement of CO₂ and CH₄ fluxes, the CO₂ exchanges between mangrove- and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou were studied, and the CO₂ absorption capability of the wetlands vegetation net productivity as well as the carbon sink function of the wetlands under different waterlogged conditions (perennial, intermittent, and no water-logging) was analyzed. As for mangrove wetland ecosystem, its vegetation net productivity absorbed 33.74 t·hm⁻²·a⁻¹ of CO₂, and soil emitted 12.26 t·hm⁻²·a⁻¹ of CO₂ (including the greenhouse effect amount of CH₄ converted into that of CO₂), illustrating that mangrove wetland had a 21.48 t·hm⁻²·a⁻¹ net absorption of CO₂, being a strong carbon sink. For shoal wetland ecosystem, its vegetation net productivity absorbed 8.54 t·hm⁻²·a⁻¹ of CO₂, and soil emitted 5.88 t·hm⁻²·a⁻¹ of CO₂ and 0.19 t·hm⁻²·a⁻¹ of CH₄. If converting into carbon, the wetland absorbed 2.33 t C·hm⁻²·a⁻¹, and soil emitted 1.74 t C·hm⁻²·a⁻¹ (including the carbon in CH₄), illustrating that shoal wetland fixed 0.59 t C·hm⁻²·a⁻¹, being a weak carbon sink. If the greenhouse effect amount of CH₄ was converted into that of CO₂, the soil emitted 9.78 t·hm⁻²·a⁻¹ of CO₂, which was 1.24 t·hm⁻²·a⁻¹ more than the absorption. As a result, shoal wetland was a weak carbon source. Between the two test greenhouse gases, CH₄ was the main one emitted under perennial water-logging, while CO₂ was that under no water-logging. Moreover, the wetland under perennial water-logging had the strongest carbon sink function, while that under no water-logging was in adverse.

Key words: wetland ecosystem; mangrove; CO₂; CH₄; carbon sink function.

* 湖南省城市森林生态重点实验室项目(06FJ3083)和广州市林业局重点资助项目(2005-07)。

** 通讯作者。E-mail: kwx1218@126.com

2008-03-11 收稿 2008-10-08 接受。

湿地土壤和泥炭是陆地上重要的有机碳库,土壤密度高,能够相对长期的储存碳。由于湿地类型多种多样,各国学者对湿地的定义理解不同,因而对全球湿地面积及碳贮量估算结果存在较大差异^[1-4]。而湿地单位面积碳贮量是陆地各种生态系统中最高的。

研究结果显示,湿地植物净同化的碳仅有15%再释放到大气中^[5]。据 Corban^[6]1991年估计,北方泥炭地每年可积累碳0.076~0.096 Gt,加拿大、美国和芬兰等国家对湿地泥炭积累速率研究表明,北方泥炭积累速率每年在8~20 g·m⁻²之间,是陆地生态系统一个重要的碳汇^[7-8]。Brix等^[9]对欧洲芦苇(*Phragmites communis*)湿地研究认为,由于湿地排放CH₄,因而其在较短的时间内(少于60 a)可看作是温室气体的源。Roulet^[10]对加拿大北方湿地的研究结果表明,通常情况下,泥炭地是CO₂的汇,但在气候变得较温暖干旱时则成为CO₂的源。

本研究在对广州市红树林和滩涂湿地生物量调查和土壤温室气体排放通量测定的基础上,分析了红树林和滩涂湿地植被年净生产力的固碳作用、土壤温室气体排放量,以及湿地与大气CO₂交换的碳汇功能,比较了常年积水、间歇积水和无积水状态下湿地与大气CO₂交换的碳汇功能,旨在确定广州市红树林和滩涂湿地对大气CO₂是碳源还是碳汇,为湿地生态系统碳汇功能的研究提供基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本项研究在广州市南端的南沙地区进行,地处北回归线以南(22°54'—23°08' N, 113°24'—113°69' E)。该地区属南亚热带海洋性季风气候,年均降水量1 582 mm,年均气温21.9℃,年总辐射量4 400~5 000 MJ·m⁻²·a⁻¹。

研究地中,红树林湿地面积为26 hm²,主要植物有桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)、海桑(*Sonneratia caseolaris*)、秋茄(*Kandelia candel*)和木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)等。滩涂湿地面积1 024 hm²,零星散生有代表性植物茳芏(*Cyperus malaccensis*)、芦苇(*Phragmites communis*)、卡开芦(*Phragmites karka*)、象草(*Pennisetum purpureum*)、小叶榕(*Ficus microcarpa*)、水葱(*Scirpus tabernaemontani*)、马甲子(*Paliurus ramosissimus*)、鸭嘴草(*Ischaemum aristatum*)和刺篱木(*Flacourtia indica*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集及处理 广州市红树林林龄15年左右,属于秋茄+桐花树+白骨壤群落类型。靠高潮线一段木榄树占有一定优势,群落外貌呈矮小乔木林状。在红树林内选取白骨壤、秋茄、桐花树和木榄4种有代表性优势树种的平均木,采用全株收获法(包括根系)现场测定,然后抽取树干、枝、叶、根等样品(每树种的各组分样品各取5个),用烘干恒量法求其干材(林分蓄积量)、枝、叶、根的干物质量,利用干材、枝、叶、根所占的生物量比例,并参照钟晓青等^[11]和林鹏等^[12]的计算方法求出红树林的年净生产力。

滩涂湿地生物量采用样方调查法,在不同植被类型选取25个1 m×1 m小样方。每个小样方生物量用全部收割法(包括根系),从中抽取2个样品(共50个样品)用烘干恒量法测出其干物质量。在样方生物量调查时,把1年生植物和多年生植物分开列出。用多年生植物质量除以5作为1年的生长量(滩涂地多年生植被大都是草本及少量灌木)。再加上1年生植物生长量来求出滩涂湿地每年生产的干物质量。

1.2.2 植物含碳率的测定 分别抽取红树林中的白骨壤、秋茄、桐花树和木榄4种主要树种和滩涂湿地中的茳芏、芦苇、卡开芦、象草、小叶榕、水葱、马甲子和刺篱木8种优势植物的植物组织样品(每种植物5个样品),每个样品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SPSS 13.0软件包进行。

1.2.3 土壤CO₂和CH₄排放通量测定 采用静态箱式方法。在红树林和滩涂湿地各选取常年积水(水深不超过30 cm处)、间歇积水和无积水3种类型,每种湿地类型安装一台采样箱(共6台)。从2005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,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3个气样浓度值经回归分析得出。气体排放通量用下式计算:

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

式中: F 为气体通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为实验室温度下的气体密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); 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(cm^2)和体积(cm^3)。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 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量准确度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 读数分辨率为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

土壤排放的 CO_2 包括微生物呼吸、根系呼吸、土壤动物呼吸和碳矿化物质的化学氧化作用^[13]。土壤呼吸释放的 CO_2 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^[14]。在计算作物吸收 CO_2 时,用净生产量来计算,其中包含根系的呼吸作用。因此,用实测的数据乘上 55% 求得土壤排放 CO_2 量^[14]。

2 结果与讨论

2.1 植被年净生产力的固碳量

由表 1 可以看出,红树林生态系统的净生产力(包括根系)为 $20.01\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。木材组织平均含碳量 $460\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,红树林净生产力吸收的碳为 $9.20\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 $33.74\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。广州市红树林地面积 26 hm^2 ,每年由植物净光合作用固定的碳 239.20 t ,意味着红树林湿地生态

系统每年除了植物自身呼吸消耗以外,从大气净吸收 877.14 t CO_2 。滩涂地因植被较少,其植物净生产力较低,植物组织的平均含碳量 $480\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,固定在植物净增长量中的碳 $2.33\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 $8.54\text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,滩涂湿地面积 1024 hm^2 ,植被净生产力固定碳素 $2385.92\text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,折合成 CO_2 为 $8749.17\text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。红树林湿地单位面积每年植物净生产力吸收的碳量是滩涂湿地的 3.95 倍。

2.2 湿地 CH_4 排放量

由表 2 可以看出,常年积水的红树林湿地土壤 CH_4 排放通量平均为 $119.0\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,间歇积水(4—10 月积水,11 月至翌年 3 月无积水,下同)红树林湿地土壤 CH_4 排放通量平均为 $88.2\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,无积水(海潮除外,下同)红树林湿地土壤 CH_4 排放通量为 $8.79\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。不同积水状态下的滩涂湿地土壤 CH_4 排放通量平均为:常年积水状态 $99\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,间歇积水状态 $67.8\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,无积水状态 $6.24\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。相比之下,红树林湿地无论哪一种积水状态,其土壤 CH_4 排放通量均比滩涂湿地高。这是因为红树林产生的凋落物比滩涂湿地多,其土壤中有机质含量比滩涂湿地丰富,在嫌气环境中,土壤中有机质发酵产生的 CH_4 也相应增多。

王明星等^[15]测定的人工湿地水稻田 CH_4 平均值为 $436.80\text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,王德宣^[16]在三江平原常年积水的沼泽地测定的 CH_4 平均值为 $415\text{ mg} \cdot$

表 1 滩涂和红树林湿地净生产力吸收碳量

Tab. 1 Absorbed carbon amount of net productivity from shoal and mangrove wetland

类型 Type	面积 Area (hm^2)	净生产力 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 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	碳吸收总量 Absorbed amount of carbon ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	折合 CO_2 量 To convert to CO_2 amount ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)
红树林 Mangrove	26	20.01	460	9.20	239.20	877.14
滩涂 Shoal	1024	4.85	480	2.33	2385.92	8749.17

表 2 滩涂和红树林湿地土壤 CH_4 和 CO_2 排放量

Tab. 2 CH_4 and CO_2 emission amount from soil of shoal and mangrove wetland

类型 Type	状态 Status	面积 Area (hm^2)	CH_4 排放速率	CO_2 排放速率	CH_4 排放通量		CH_4 排放总量		CO_2 排放通量		CO_2 排放总量	
			Discharge rate of CH_4 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	Discharge rate of CO_2 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	Discharge flux of CH_4 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)		Discharge total amount of CH_4 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)		Discharge flux of CO_2 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)		Discharge total amount of CO_2 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)	
					CH_4	C	CH_4	C	CO_2	C	CO_2	C
红树林 Mangrove	A	2.6	119.00	218	0.43	0.33	1.13	0.85	0.78	0.21	2.05	0.55
	B	13.0	88.20	1656	0.37	0.28	4.81	3.61	6.04	1.61	78.58	20.96
	C	10.4	8.79	2838	0.03	0.03	0.33	0.25	10.29	2.80	107.05	29.18
滩涂 Shoal	A	51.2	99.00	180	0.36	0.27	18.50	13.88	0.66	0.18	33.64	9.17
	B	665.6	67.80	1380	0.25	0.19	164.72	123.54	5.04	1.37	3352.63	914.27
	C	307.2	6.24	2350	0.02	0.02	7.00	5.25	8.58	2.34	2635.01	718.57

A: 常年积水 Perennial water-logging; B: 间歇积水 Intermittent water-logging; C: 无积水 No water-logging.

$\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 本研究结果与二者有较大出入, 却与王德宣等^[16]在诺尔盖高原常年积水沼泽地测得的 CH_4 排放通量平均值 $88.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 相近, 比刘惠^[17]在广东鹤山水稻田测定的 CH_4 排放通量平均值 $(1.96 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 高。Choi 等^[18]研究表明, 沿海红树林湿地 CH_4 排放通量比内陆淡水湿地少, 其原因在于沿海湿地大量存在的 SO 粒子阻碍了 CH_4 的产生, 从而降低了 CH_4 排放量。

2.3 湿地 CO_2 排放量

由表2可以看出, 常年积水下, 红树林湿地 CO_2 排放通量 $218 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (除去占45%的根呼吸后, 下同), 间歇积水状态下增加到 $1\ 656 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 无积水湿地达到 $2\ 838 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。不同积水状态下滩涂湿地 CO_2 排放通量的变化与红树林湿地相同, 常年积水、间歇积水和无积水滩涂湿地 CO_2 排放通量分别为 180 、 $1\ 380$ 和 $2\ 350 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从不同积水状态下土壤 CO_2 排放通量变化看出, 水位高度对土壤 CO_2 通量有显著影响, 常年积水 CO_2 通量最小, 处于间歇积水时 CO_2 通量增加, 水位下降至无积水状态时, CO_2 通量最大。这与 Freeman 等^[19]的结论相同。

本研究中红树林和滩头湿地 CO_2 通量比陆地森林下土壤 CO_2 排放通量少^[20-23], 表明湿地土壤与一般陆地上森林土壤有所不同。主要原因可能是土壤 CO_2 排放通量与潜水位高低(地下水水位离地表面的高度)呈负相关, 潜水位越低(离地表面距离越远), CO_2 排放通量越大; 潜水位越高(离地表面距离越近), CO_2 排放通量越小^[19]。森林土壤的潜水位比湿地土壤低许多, 因此森林土壤的 CO_2 排放通量高于湿地。

2.4 湿地土壤的碳素排放

从表2可以看出, 在常年积水情况下, 红树林和滩涂湿地碳的排放通量分别为 0.54 和 $0.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中以 CH_4 形式排放的碳量分别是 CO_2 的 1.57 倍和 1.50 倍。

间歇积水红树林地碳的排放量 $1.89 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中以 CO_2 和 CH_4 形式释放分别占 87.3% 和 12.7% ; 滩涂湿地释放的碳量为 $1.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 以 CO_2 和 CH_4 形式释放分别占 87.8% 和 12.2% 。无积水情况下, 两种湿地碳的排放中 99% 是以 CO_2 形式释放。这是由于水位的高低变化, 导致土壤中厌气和好气环境的变化, 以及排放的温室气体的差异。红树林湿地和滩涂湿地平均排放的碳

量分别为 2.13 和 $1.74 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中 91.5% 和 92.0% 是以 CO_2 形式释放的。

2.5 土壤排放温室气体对温室效应的贡献

湿地土壤以 CO_2 和 CH_4 形式排放的温室气体量差别较大, CH_4 的温室效应是 CO_2 的 21 倍^[24]。

在常年积水的红树林湿地, CO_2 和 CH_4 排放量分别为 0.78 和 $0.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 常年积水的滩涂湿地中分别为 0.66 和 $0.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。若将 CH_4 折算成 CO_2 温室效应量, 红树林和滩涂湿地排放的 CH_4 量相当于 9.03 和 $7.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ CO_2 。在常年积水情况下, 两种湿地排放温室气体效应的贡献有 92% 是由于排放 CH_4 。

间歇积水的红树林地排放 CO_2 $6.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率占 43.7% ; 排放 CH_4 折算成 CO_2 温室效应量 $7.77 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率为 56.3% ; 滩涂地排放 CO_2 $5.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 排放 CH_4 折算成 CO_2 温室效应量 $5.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率分别为 49.0% 和 51.0% 。

在无积水红树林地, 以 CO_2 形式排放对温室效应贡献率占 94.2% ($10.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 以 CH_4 形式排放折算成 CO_2 效应量对温室效应贡献只有 5.8% ($0.63 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); 无积水滩涂地排放 CO_2 $8.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对温室效应的贡献率为 94.7% ; 排放 CH_4 折算成 CO_2 $0.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其温室效应贡献率仅占 5.3% 。

以上分析表明, 在常年积水湿地排放的温室气体中, CH_4 对温室效应贡献率最大; 半干半湿状态下, 湿地排放的温室气体对温室效应的贡献率取决于土壤中厌气或好气环境, 以及 CO_2 和 CH_4 的释放量, 而无积水湿地 CO_2 的排放对温室效应的影响占主导地位。

2.6 湿地系统与大气中 CO_2 交换的碳汇功能

由表3可知, 红树林湿地系统净生产力吸收的碳 $239.20 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 每年由土壤排放碳素 55.38 t , 其中以 CO_2 形式排放 50.96 t , 以 CH_4 形式排放 4.42 t 吸收减去排放, 该系统每年净固定大气中的碳 183.80 t , 单位面积固定碳 $7.07 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 说明红树林湿地是一个强大的碳汇系统。用红树林湿地净生产力吸收碳的平均值 $9.2 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 作为各种积水状态单位面积碳吸收的收入项, 则常年积水、间歇积水和无积水的红树林湿地对大气中的碳汇功能有

表 3 滩涂和红树林湿地系统与大气 C 的交换

Tab. 3 Exchange of C element between shoal and mangrove wetland system and atmosphere ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

类型 Type	面积 Area (hm^2)	净生产力固 C 量 C fixation of net productivity	排放 CO_2 中 C 通量 C element flux from CO_2 discharge	排放 CH_4 中 C 通量 C element flux from CH_4 discharge	C 排放总量 C discharge amount	净固 C 量 Net C fixation
红树林 Mangrove	26	9.20	1.96	0.17	2.13	7.07
滩涂 Shoal	1024	2.33	1.60	0.14	1.74	0.59

表 4 滩涂和红树林湿地系统对温室效应的贡献

Tab. 4 System of shoal and mangrove wetland contribute to effect of greenhouse ($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)

类型 Type	面积 Area (hm^2)	净生产力吸收 CO_2 量 CO_2 absorbed amount of net productivity	CO_2 排放通量 CO_2 discharge flux	CH_4 排放通量 CH_4 discharge flux	CH_4 折算成 CO_2 温室效应量 Convert greenhouse amount of CH_4 into CO_2	对温室效应 贡献 CO_2 总量 Total CO_2 contribute to greenhouse effect	净吸收 CO_2 量 Net absorbed CO_2 amount	净排放 CO_2 量 Net discharge CO_2 amount
红树林 Mangrove	26	33.74	7.22	0.24	5.04	12.26	21.48	
滩涂 Shoal	1024	8.54	5.88	0.19	3.90	9.78		1.24

很大差异. 常年积水土壤排放碳 $0.54 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 中的碳,下同), 吸收减去排放后, 净固定碳 $8.66 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 间歇积水土壤排放碳 $1.89 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 收支相抵, 净固定碳 $7.31 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 无积水土壤排放碳 $2.83 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 吸收减去土壤排放后, 净固定碳 $6.37 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 常年积水的红树林湿地系统的碳汇功能是间歇积水的 1.18 倍、无积水的 1.34 倍. 如果以 CH_4 的温室效应是 CO_2 的 21 倍来计算, 红树林湿地每年向大气排放的 CO_2 (包括 CH_4 折算成 CO_2 的温室效应量) 为 $318.72 t$. 系统净生产力吸收 CO_2 $877.14 t \cdot \text{a}^{-1}$, 系统净固定 CO_2 为 $558.42 t \cdot \text{a}^{-1}$, 单位面积净固定 CO_2 为 $21.48 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 4), 说明红树林生态系统是一个强的碳汇.

滩涂湿地的植物净生产力吸收碳 $2385.92 t \cdot \text{a}^{-1}$, 由土壤向大气排放的碳量 $1784.67 t \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 中的碳), 该系统净固定碳 $601.25 t \cdot \text{a}^{-1}$. 对大气中的碳素而言, 单位面积的碳汇功能为 $0.59 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 3), 说明是一个弱碳汇. 如果把排放的 CH_4 按温室效应是 CO_2 的 21 倍折算成 CO_2 量 ($3994.62 t \cdot \text{a}^{-1}$), 加上土壤排放 CO_2 $6021.08 t \cdot \text{a}^{-1}$, 该系统每年土壤排放 CO_2 $10015.9 t$, 比植物净生产力吸收的 CO_2 还多 $1266.73 t$, 从表 5 可以看出, 单位面积土壤多排放 CO_2 $1.24 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 的温室效应折算成 CO_2 量). 对大气温室效应的贡献而言, 滩涂湿地是一个弱碳源.

3 结 论

广州市红树林湿地生态系统植被净生产力吸收 CO_2 $33.74 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 由土壤向大气排放 CO_2

量 $12.26 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 的温室效应值折算成 CO_2 量), 系统的吸收大于排放, 单位面积平均净固定大气 CO_2 $21.48 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对于大气 CO_2 来说, 红树林生态系统是一个强的碳汇.

滩涂湿地植被净生产力吸收大气 CO_2 $8.54 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 由土壤向大气排放 CO_2 量 $9.78 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 的温室效应折算成 CO_2 量), 排放大于吸收, 对大气温室效应而言, 单位面积净排放 CO_2 $1.24 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 是一个弱碳源. 如果把吸收 CO_2 和排放的 CH_4 按碳素量计算, 那么系统由净生产力吸收大气中碳量 $2.33 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 土壤向大气排放的碳 $1.74 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (包括 CH_4 中的碳), 吸收大于排放, 系统净固定碳量 $0.59 t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 对大气中碳素而言是一个弱碳源.

湿地的积水状态不同, 其碳汇功能也不一样. 其中常年积水碳汇功能最大, 无积水的碳汇功能较弱. 常年积水情况下排放的温室气体主要是 CH_4 , CO_2 只有极少量; 长期无积水情况下所排放的温室气体绝大部分是 CO_2 , CH_4 的排放量很少.

本研究的内容只涉及了湿地生态系统与大气 CO_2 的交换问题, 没有涉及湿地的碳循环过程. 湿地碳循环过程研究涉及了水体和泥炭层中的颗粒有机碳、溶解有机碳、颗粒无机碳和溶解无机碳等的输入和输出全过程. 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, 应是今后湿地碳循环研究的重点.

参考文献

- [1] Maltby E, Mmirzi P. Carbon dynamics in peatlands and

- other wetland soils : Regional and global perspectives. *Chemosphere*, 1993, **27** : 999-1023
- [2] Lü X-G (吕宪国), He Y (何 岩), Yang Q (杨青). Carbon cycling in wetland and the meaning under globe changes // Chen Y (陈 宜), ed. Study on Wetland in China. Changchun : Jilin Science and Technology Press, 1995 : 68-72 (in Chinese)
- [3] Schellhase HU, Mac Isaac EA, Smith H. Carbon budget estimates for reservoirs on the Columbia River in British Columbia. *The Environmental Professional*, 1997, **19** : 48-57
- [4] Vitt DH, Halsey LA, Bauer IE, et al. Spatial and temporal of carbon sequestration in peatland of continental western Canada through the Holocene. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2000, **37** : 683-693
- [5] Albuquerque ALS, Mozeto AAC. C:N:P ratios and stable carbon isotope compositions as indicators of organic matter sources in a riverine wetland system (Moji Guacu River, Sao Paulo, Brazil). *Wetlands*, 1997, **17** : 1-9
- [6] Gorham E. Northern peatlands : Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, **1** : 182-195
- [7] Pan G-X (潘根兴). Study on carbon reservoir in soils of China. *Bulletin of Science and Technology (科技通报)*, 1999, **15**(5) : 330-332 (in Chinese)
- [8] Euliss NHJ, Olness A, Gleason RA. Organic carbon in soils of Prairie Wetlands in the United States. The Carbon Sequestration Workshop. Oak Hammock Marsh, Manitoba, 1999, **4** : 19-20
- [9] Brix H, Sorrell BK, Lorenzen B. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? *Aquatic Botany*, 2001, **69** : 313-324
- [10] Roulet NT. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol : Prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, **20** : 605-615
- [11] Zhong X-Q (钟晓青), Huang Y-Y (黄玉源), Zhang H-D (张宏达), et al. Research on primary productivity quantitative parameters and structure of mangrove community in Dayawan Bay of Guangdong Province. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 1999, **35**(2) : 26-30 (in Chinese)
- [12] Lin P (林 鹏), Hu H-Y (胡宏友), Zheng W-J (郑文教), et al. A study on the biomass and energy of mangrove communities in Shenzhen Bay. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 1998, **34**(1) : 18-24 (in Chinese)
- [13] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云). Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 1997, **17**(5) : 469-476 (in Chinese)
- [14] Schlesinger WH. Biogeochemistry : An Analysis of Global Change. 2nd Ed. New York : Academic Press, 1997
- [15] Wang M-X (王明星), Li J (李 晶), Zheng X-H (郑循华). Methane emission and mechanisms of methane production, oxidation, transportation in the rice fields. *Scientia Atmospherica Sinica (大气科学)*, 1998, **22**(4) : 600-612 (in Chinese)
- [16] Wang D-X (王德宣). Influence of major environmental factors on difference of methane emission from Zoige Plateau and Sanjiang Plain Wetlands. *Wetlands Science (湿地科学)*, 2003, **1**(1) : 63-67 (in Chinese)
- [17] Liu H (刘 惠), Zhao P (赵 平), Lin Y-B (林永标), et al. CH₄ and N₂O emission from paddy field of an agroforestry ecosystem in the hilly area of south China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany (热带亚热带植物学报)*, 2006, **5**(1) : 58-64 (in Chinese)
- [18] Choi Y, Wang Y. Dynamics of carbon sequestration in a coastal wetland using radio carbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18** : 195-203
- [19] Freeman C, Liska G, Ostle NJ. Flux of CO₂, CH₄, N₂O from a welsh peat land following simulation of water table drawdown : Potential freed back to climate change. *Biogeochemistry*, 1993, **19** : 51-60
- [20] Fang X (方 晰), Tian D-L (田大伦). A study on the forestry soil CO₂ release rates in Chinese fir plantations. *Scientia Silvae Sinicae (林业科学)*, 1997, **33** (suppl. 2) : 94-103 (in Chinese)
- [21] Liu S-H (刘绍辉), Fang J-Y (方精云), Qing T-X (清田信). Soil respiration of mountainous temperate forests in China. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 1998, **22**(2) : 129-136 (in Chinese)
- [22] Huang C-C (黄承才). Carbon reserves in soil of *Phyllostachys pubescens* plantation and *Camellia sinensis* garden in Zhejiang Province. *Journal of Shaoxing College of Arts and Sciences (绍兴文理学院学报)*, 2001, **21** (1) : 56-59 (in Chinese)
- [23] Chen B (陈 滨), Zhao G-D (赵广东), Leng L (冷 冷), et al. Study on soil respiration of Chinese fir plantation ecosystem in Daganshan of Jiangxi. *Meteorology and Disaster Reduction Research (气象与减灾研究)*, 2007, **30**(3) : 12-15 (in Chinese)
- [24] German Advisory Council on Global Change. The Accounting of Biological Sinks and Sources under the Kyoto Protocol : A Step Forwards or Backwards for Global Environmental Protection. Special Report, Bremerhaven, Germany, 1998

作者简介 康文星,男,1947年生,教授,博士生导师.主要从事森林生态、城市生态和环境生态研究,发表论文70余篇. E-mail : kwx1218@126.com

责任编辑 李凤琴