

申冲<sup>1,2</sup> 王春林<sup>3,4</sup> 赵晓松<sup>3,5</sup> 卢燕宇<sup>6</sup> 唐钰琦<sup>7</sup> 夏北成<sup>2</sup> 李婷婷<sup>3,8</sup>

# 人工红树林碳通量变化特征及其影响因素分析

## 摘要

红树林是重要的滨海蓝碳生态系统.人工红树林在恢复过程中碳交换过程受到气候、植被等环境的影响,与成熟红树林呈现较大差异.本研究采用闭路涡动相关系统对珠江河口人工红树林湿地生态系统进行二氧化碳(CO<sub>2</sub>)通量和甲烷(CH<sub>4</sub>)通量的观测,并基于通径分析方法探讨了环境要素对总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R<sub>e</sub>)、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>通量的影响.结果表明:CO<sub>2</sub>通量呈现明显的日变化特征,受到GPP和R<sub>e</sub>的协同影响,其季节变化特征不明显;CH<sub>4</sub>通量则呈现明显的季节变化特征.2019—2020年CO<sub>2</sub>年通量为74.9~138.4 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>(以C计,下同),CH<sub>4</sub>年通量为25.1~25.9 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>.CO<sub>2</sub>变化特征受到GPP的直接影响,总辐射(R<sub>a</sub>)、气温(T<sub>a</sub>)和植被指数(NDVI)通过影响GPP对净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)产生间接的影响.T<sub>a</sub>、NDVI和R<sub>e</sub>是驱动CH<sub>4</sub>季节变化特征的主要影响因素.

## 关键词

恢复红树林;二氧化碳;甲烷;涡动相关;通径分析

中图分类号 Q148

文献标志码 A

收稿日期 2021-12-10

资助项目 广州市基础研究计划(202002020065);广东省环境污染控制与修复技术重点实验室开放基金(2020B1212060022);中国气象局重点软科学项目(2021ZDIANXM04);中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金(2021SYIAEKFM37)

## 作者简介

申冲,女,博士,工程师,研究方向为大气环境.824599591@qq.com

王春林(通信作者),男,博士,教授级高工,研究方向为生态气象.444217124@qq.com

李婷婷(通信作者),女,博士,副研究员,研究方向为大气物理与大气环境.litinging@mail.iap.ac.cn

## 0 引言

红树林湿地是重要的滨海蓝碳生态系统之一,具有极大的固碳速率以及长期且持续的固碳能力<sup>[1]</sup>.红树林的全球储碳量高达3.7~6.2 Pg<sup>[2]</sup>,其平均碳埋藏率约为38.3 Tg·a<sup>-1</sup>(以C计,下同),比热带陆地森林高50倍以上,能够抵消人为CO<sub>2</sub>年排放量的0.43%<sup>[3]</sup>.另外,红树林湿地还是重要的甲烷自然源之一,其CH<sub>4</sub>排放通量约为11.1~20.3 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>.在20 a的时间尺度内,红树林的CH<sub>4</sub>排放抵消了20%的蓝碳埋藏<sup>[5]</sup>以及其吸收CO<sub>2</sub>所造成的50%的净辐射冷却效应<sup>[6]</sup>.基于红树林湿地既是重要碳汇也是重要碳源的特性,需综合考虑两部分来研究红树林生态系统的碳收支平衡情况,分析其对全球碳收支的影响,评估其对气候变化的贡献.

若要科学定量地评估红树林缓解气候变化的潜力,需准确量化红树林的碳通量收支.早期红树林生态系统的碳通量主要采用箱式法进行观测<sup>[7-9]</sup>,该方法观测成本低且易于使用,但其测量只在地表或生物量的一小部分区域进行,数据缺乏空间整合<sup>[10]</sup>,且箱的影响可能会造成测量样本的不确定性.近年来,涡动相关法(EC)被广泛应用于生态系统与大气间的碳交换观测以克服这些问题.与箱式法相比,EC法能够长期且连续地测量提供生态系统和大气之间的净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE),在生态系统尺度上集成连续通量信息.虽然EC法在红树林的应用越来越多<sup>[11-13]</sup>,但是相比于其他生态系统,采用EC法对红树林湿地进行碳通量观测的研究较少,且研究多针对自然成熟红树林.近年来,利用EC法对碳通量开展的观测实验也揭示了影响红树林湿地碳交换的环境因子.红树林的碳交换过程同时受到气候因子(温度、降水和辐射)和非气候因子(潮汐、高盐度和海风)的影响.温度是决定红树林空间分布和生长的主导因素<sup>[14]</sup>,直接影响植物光合作用及呼吸作用,间接通过影响微生物活性,改变土壤有机碳(SOC)的矿化速率以及CH<sub>4</sub>的产生和氧化过程<sup>[15]</sup>;降水可促进红树林植物

1 广州市气候与农业气象中心,广州,511430

2 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室(中山大学),广州,510275

3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海,519082

4 环珠江口气候环境与空气质量变化野外科学观测研究站,珠海,519082

5 中国科学院南京地理与湖泊研究所 中国科学院流域地理学重点实验室,南京,210008

6 安徽省气象科学研究所/安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥,230031

7 南京大学 大气科学学院,南京,210023

8 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理与大气化学国家重点实验室,北京,100029

的生长,改变厌氧环境和盐分等因素从而影响凋落物和土壤有机质的分解过程,进而改变  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  的净交换和湿地的固碳速度<sup>[16]</sup>;太阳短波辐射可促进红树林植物光合作用的发生<sup>[17]</sup>;潮汐淹没直接影响红树林的淹水环境,使得缺氧条件下生态系统呼吸产生的二氧化碳更少<sup>[18]</sup>,间接影响生态系统呼吸和光合作用;盐胁迫会抑制红树林叶片表面积增长,从而减少光合作用,进而减少红树林的碳积累<sup>[19]</sup>;海风通过冷却作用缓解高温,湿润作用缓解高饱和水汽压差(VPD)产生的大气应力,从而降低生态系统呼吸作用并增加 GPP<sup>[20]</sup>.Zhu 等<sup>[20]</sup>利用 EC 测量碳通量得出环境影响对日 NEE 的重要性依次为光合有效辐射、气温、海风、VPD、潮汐盐度和潮汐淹浸。

随着人口密度的增加,过去半个多世纪大面积红树林湿地被转变为养殖场、农田或城镇.全球红树林面积减少了 30%~50%,导致  $0.02\sim 0.12 \text{ Pg}\cdot\text{a}^{-1}$  的  $\text{CO}_2$  释放大气中,约占全球毁林排放  $\text{CO}_2$  的 10%<sup>[21]</sup>.我国红树林面积在 1950—2000 年间减少了 50%~70%<sup>[22]</sup>.自 1970 年代以来,红树林的生态价值逐渐被认可,世界各地采取了一系列保护和恢复红树林的措施<sup>[23]</sup>.某些温室气体减排计划已将红树林保护和恢复作为其气候缓解的优先事项<sup>[24]</sup>.2000 年以后,考虑到红树林湿地巨大的生态效益,我国开展了大量红树林生态恢复重建工作,使得我国红树林湿地恢复了近  $4\ 000 \text{ hm}^2$ <sup>[22]</sup>.人为恢复、重建的红树林湿地生态系统与大气之间的碳交换过程因位置、气候、沉积物类型、海岸地貌以及再生或再造林方法呈现出巨大的差异<sup>[25]</sup>;此外,由于植物生物量积累率和土壤固碳率在不同恢复阶段发生变化,会影响与光合作用以及呼吸作用相关的碳交换过程<sup>[26]</sup>.然而,迄今为止对于受到人为影响的恢复及重建红树林的碳通量观测及机理研究较少.因此有必要对我国人工恢复红树林的碳交换特征及机制进行深入研究.本研究采用 EC 法对位于珠江河口人工恢复红树林湿地进行  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量观测,并分析其碳交换变化特征及影响因素。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域( $113.64^\circ\text{E}$ ,  $22.60^\circ\text{N}$ ,图 1)位于中国广州南沙滨海湿地公园内,属于亚热带海洋季风气候,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风.该区域全年

平均气温为  $21.8^\circ\text{C}$ ,平均年降水量  $1\ 635.6 \text{ mm}$ <sup>[27]</sup>.南沙湿地属于低沉积平原的河口湿地,是人工围垦改造影响下河流和海洋的泥沙不断淤积形成的滩涂.南沙湿地公园总面积约  $6.5 \text{ km}^2$ ,湿地公园 I 区为 1994 年恢复,面积为  $2.4 \text{ km}^2$ ,湿地公园 II 区为 2008 年恢复,面积为  $4.1 \text{ km}^2$ .涡动相关(EC)系统位于 II 区.湿地的红树林群落以黄槿(70%)和无瓣海桑(17%)为主,黄槿群落的冠层高度为  $3\sim 4 \text{ m}$ ,林冠密度  $0.7\sim 0.8$ .红树林排布呈条纹状,植被冠层约占森林的 60%.湿地公园内水面比例为 40%左右,水体盐度在 1%~8%。

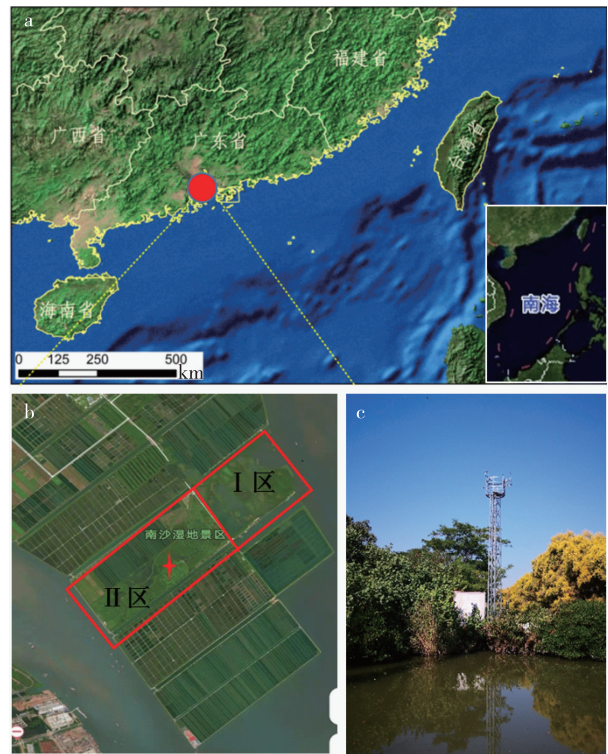


图 1 南沙红树林湿地公园及通量观测示意图  
a.中国东南部及湿地公园位置(红点);b.南沙红树林湿地范围及观测塔位置(红星);c.涡动相关通量观测塔  
Fig. 1 Illustration of study site and eddy covariance system  
a. map of Southeast of China and location of study site (red dot); b. location of Nansha wetland park;  
c. photo of the eddy covariance tower

### 1.2 通量观测方法

测量碳通量用到的方法为涡动相关法(EC法),EC系统安装在湿地公园中心高度为  $5 \text{ m}$  的塔楼内(图 1).该系统由近距离红外气体分析仪(AGG, ABB-Los Gatos Research, USA)和三维声波风速仪(WindMaster Pro, Gill Instruments, USA)组成.

CR3000 数据记录器以 10 Hz 的频率记录  $H_2O$ 、 $CO_2$  和  $CH_4$  的通量测量值.测量的气象和土壤要素包括日平均气温( $T_a$ , $^{\circ}C$ )、相对湿度(RH,%)(HMP155, Vaisala, Finland)、风速(WS, m/s)和风向(WD, $^{\circ}$ )(03002, RM Young, Inc. USA),以及 5 cm 和 10 cm 土壤温度( $T_s$ , $^{\circ}C$ )(109, Campbell Scientific, Inc. USA)和土壤水分(SWC,  $cm^{-3} \cdot cm^{-3}$ )(CS616, Campbell Scientific, Inc. USA).土壤盐度(Hydra Prob 2, Campbell Scientific, Inc. USA)在土壤深度 5 cm 处测量了几个月.所有测量值取 30 min 平均值,均由 CR1000 数据记录器记录.安装在水面下 1 m 管道内的水位探头以 30 min 频率测量水位和水温(CS456, Campbell Scientific, Inc. USA).

观测系统收集了 2019 年和 2020 年的全年数据.在 2020 年 6 月之前,EC 系统安装在 5 m 高度层.系统可观测范围同时覆盖红树林林分和开阔水域,源区范围为观测点周围 100~200 m<sup>[28]</sup>.随着红树林林分的生长,树冠向 5 m 高的塔楼靠近,缩小了通量源区域.为满足 EC 通量观测要求并保持下表面的代表性,在 2020 年 6 月将塔楼调整为 10 m 高.系统随塔楼升至 10 m 高度,源区范围扩大到观测周围 500~600 m.

30 min 的气象数据来自附近(1 km 内)的标准气象站(十九涌),太阳辐射数据来自广州国家气象站(113 $^{\circ}$ 19'E,23 $^{\circ}$ 08'N),这部分数据用于填补数据缺失.从 MOD13Q1/MYD13Q1 产品(空间分辨率 250 m)中提取 16 d 归一化差异植被指数(NDVI)数据.

### 1.3 数据处理与数据分析

#### 1.3.1 数据质量控制和数据插补

基于 EddyPro 软件 v6.1.0 的 FLUXNET 标准程序,对通量数据做后处理.对 10 Hz 原始通量数据分别进行野点剔除<sup>[29]</sup>、延迟时间校正<sup>[30]</sup>、坐标旋转(二次坐标旋转)<sup>[31]</sup>、频率响应修正<sup>[32]</sup>、超声虚温修正和密度(WPL)修正<sup>[33]</sup>等过程.最后,分别去除 33%的  $CO_2$  通量数据和 38%的  $CH_4$  通量数据.通过随机森林方法对缺失数据进行插补,获得完整时间序列的通量数据.

涡动相关法观测的通量值为净生态系统碳交换 NEE,生态系统呼吸  $R_e$  和总初级生产力 GPP 需要通过 NEE 来推算.为了从 NEE 中分离 GPP 和  $R_e$ ,通常的方法是应用下面的表达式:

$$GPP = NEE - R_e. \quad (1)$$

在夜间,没有光合作用,因此  $GPP = 0$ ,  $R_e = NEE$ .

而在生长季的白天,基于白天呼吸速率对温度的响应与夜间相同的假设,应用夜间通量对温度的响应方程来估算白天的呼吸<sup>[34]</sup>,然后再计算 GPP<sup>[35]</sup>.净生态系统碳交换 NEE 为正值,表示植被向大气中释放  $CO_2$ ,NEE 为负值表示植被净吸收大气中  $CO_2$ .NEE 的符号均表示方向,而不代表大小.GPP 通常也用负值表示,代表植被吸收  $CO_2$ .

#### 1.3.2 通径分析

应用通径分析方法解析环境因子与通量之间的关系<sup>[36]</sup>.通径分析是基于多元回归和相关分析的基本原则,通过计算直接和间接通径系数,使得环境因子具有解释性的结构.在分析一个因变量与多个自变量间的关系时,可以很好地解释自变量对因变量的直接、间接作用.分别对 GPP、 $R_e$  和 NEE 日值进行通径分析,通过参数化对 NEE 的标准化直接效应和总效应,统计识别显著影响 NEE 的气候驱动因素,并量化其相对重要性.本研究中与  $CO_2$  和  $CH_4$  通量相关的环境因子包括总辐射( $R_a$ )、气温( $T_a$ )、土壤温度( $T_s$ )、水汽压( $e_a$ )、相对湿度(RH)、风速(WS)、土壤含水量(SWC)、归一化植被指数(NDVI)和水面积比例( $P_w$ ).利用逐步回归的方法,建立环境因子与  $CO_2$  和  $CH_4$  通量之间的线性回归方程,得到环境因子之间的直接通径系数,同时得到环境因子与通量之间的相关系数和各环境因子间的相关系数.间接通径系数= $r_{ij} \cdot P_{jy}$ ,表示自变量  $x_i$  通过自变量  $x_j$  对因变量  $y$  的间接作用.其中: $r_{ij}$  为自变量  $x_i$  与  $x_j$  的相关系数; $P_{jy}$  为自变量  $x_j$  对因变量  $y$  的直接通径系数.通径系数大小表示自变量  $x_i$  对因变量  $y$  的影响大小,正负分别表示正效应和负效应.

## 2 结果与讨论

### 2.1 环境因子变化特征

研究区为典型的亚热带季风气候,夏季温暖湿润,冬季凉爽干燥.总辐射( $R_a$ )的季节变化呈单峰型(图 2a),受降水等天气现象影响,日值波动较大,其变化范围为 10~325  $W \cdot m^{-2}$ ,最大值出现在 8 月.在春季或夏季受连续降水影响,可能出现低值区,如 2020 年 7 月.日均气温( $T_a$ )季节变化明显(图 2b),其变化范围在 9.5~32.1  $^{\circ}C$ ;土壤温度( $T_s$ )的波动小于气温.2019 年年均气温为 24.2  $^{\circ}C$ ,略高于 2020 年的 23.9  $^{\circ}C$ .水汽压( $e_a$ )与气温的变化趋势一致(图 2c),日均值在 0.5~3.4 kPa 之间,峰值多出现在降水少、气温高的夏秋季.植被指数 NDVI 的季节



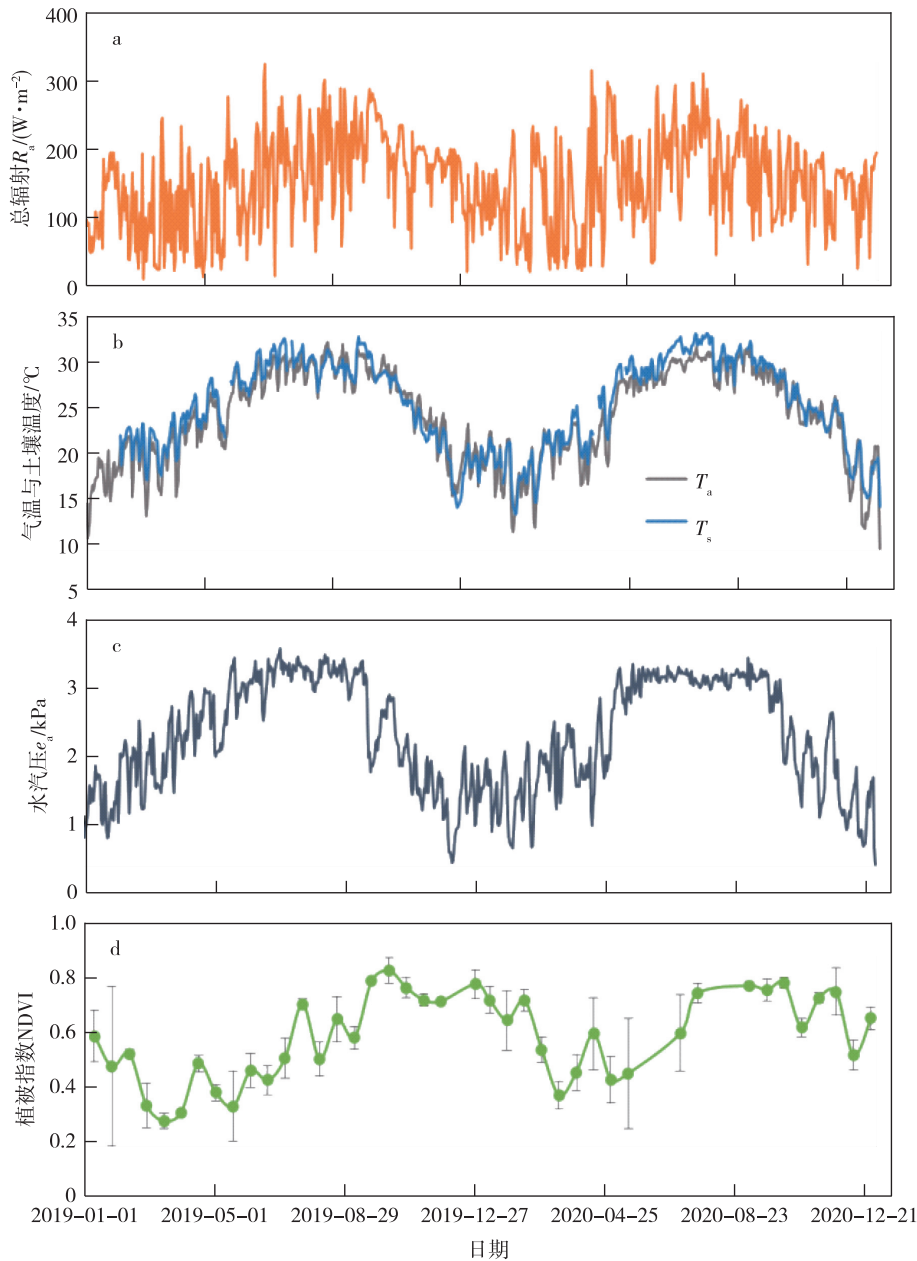


图2 南沙红树林湿地环境因子变化特征

Fig. 2 Variation of environmental factors over Nansha wetland park during 2019–2020

变化呈倒V型(图2d),最大值0.8左右,出现在9—10月,最小值0.2左右,出现在2—3月.2019年和2020年年降水量分别为2085和1356mm.2019年是偏湿润的年份,而2020年是偏干旱的年份.

## 2.2 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 通量日变化特征

$\text{CO}_2$  通量具有明显的日变化特征,即白天负值净碳吸收,夜间为正值净碳排放(图3a).在1—5月,白天NEE的碳吸收在 $-5 \sim -10 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,与夜间的呼吸作用 $R_e$ 量级相当.随着植被生长和温度升高,白天和夜间NEE强度均有增加的趋势.白天

NEE最大值出现在9—10月,峰值可达到 $-20 \sim -28 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ .这一时期的夜间呼吸作用强度为 $15 \sim 20 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ .受全年风向的影响,NEE对应的下垫面水面比例也有所不同,水面比例变化在20%~70%之间,平均为40%左右(图3c). $\text{CH}_4$  通量表现为净排放(图3b),夏季(6月)之前和秋季(10月)之后 $\text{CH}_4$  通量的昼夜差异不大,排放速率在 $0.2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右. $\text{CH}_4$  通量的排放峰值出现在8月,与温度的峰值高度一致,日内最大排放速率可达 $1.2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ,时间出现在正午.

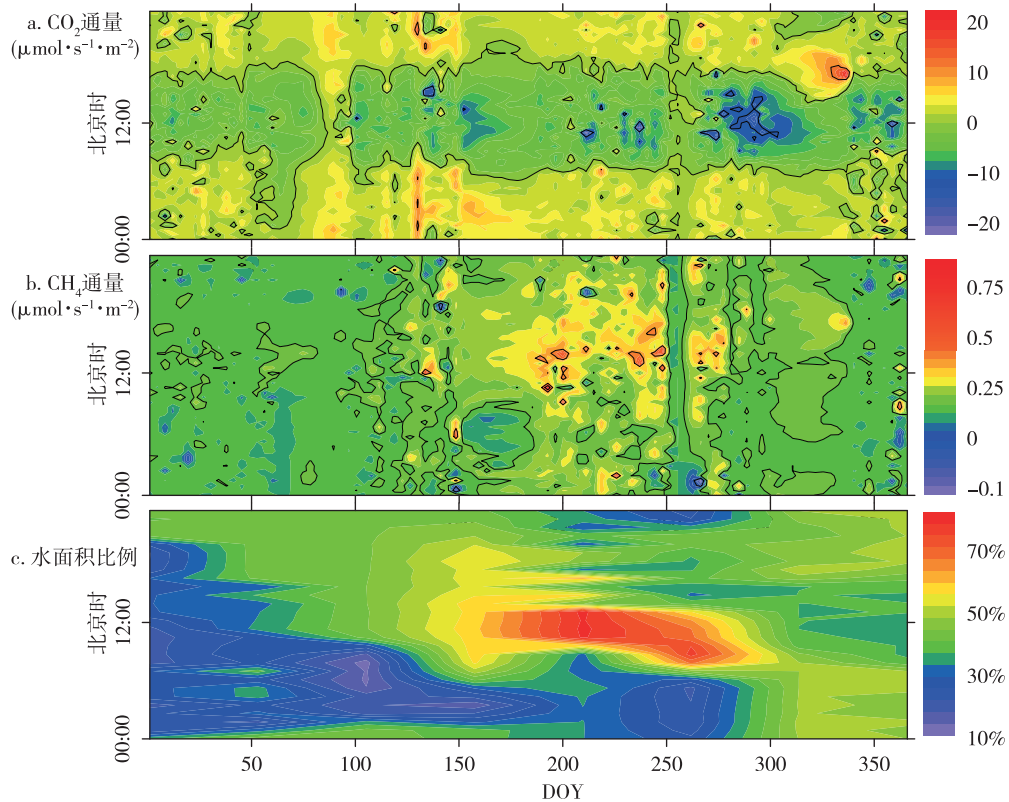


图3 CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub> 通量及下垫面水面积比例日变化特征

Fig. 3 Daily variations of CO<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub> flux and water cover percentage

为进一步分析 NEE 波动及其成因,将 NEE 分为日间 CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )和夜间呼吸( $R_c$ )(图 4)。月均 NEE 变化在 $-1 \sim 2 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,无明显的季节变化规律。日间  $F_c$  变化在 $-2 \sim -6 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,显著低于成熟红树林的日间 CO<sub>2</sub> 交换速率( $-8 \sim -18 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )<sup>[12]</sup>。而夜间  $R_c$  范围在 $3 \sim 7 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 范围,与成熟红树林呼吸速率相当( $2 \sim 7 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )<sup>[12]</sup>。日间  $F_c$  和夜间  $R_c$  的季节变化均呈单峰型,但其峰值出现的时间不同,日间  $F_c$  峰值出现在 8—11 月,而夜间  $R_c$  峰值一般出现在 8—9 月。1—6 月期间,白天净吸收速率为 $-2 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,小于夜间呼吸速率 $3 \sim 4 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ,因此 NEE 为正值,表现为碳释放。当 7—11 月白天净吸收峰值( $-5 \sim -6 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )而夜间呼吸逐渐下降时,NEE 逐渐表现为碳汇,并在 9—11 月达到净碳吸收最大。12 月随着光合和呼吸作用的减弱,NEE 又转为碳源。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量季节变化特征

图 5 所示,NEE 无明显的季节变化规律,在 2—4 月 NEE 为正值,排放速率达到 $2 \sim 3 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (以 C 计,下同),在 8—11 月呈现吸收峰值,达到 $-2 \text{g} \cdot$

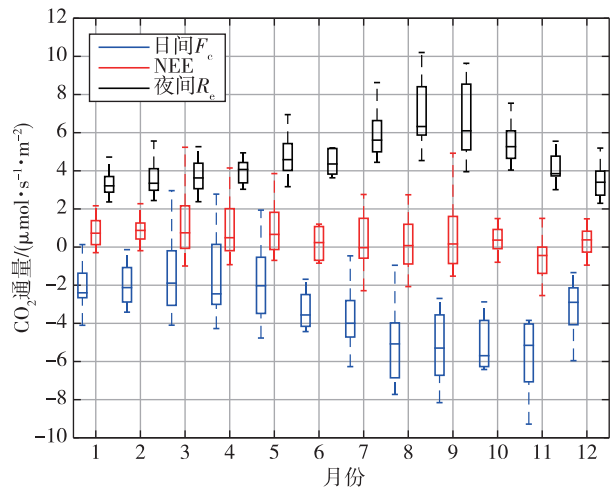


图 4 日间、夜间和净 CO<sub>2</sub> 交换的季节变化箱式图

Fig. 4 Boxplot of monthly variations of daytime CO<sub>2</sub> exchange ( $F_c$ ), nighttime respiration ( $R_c$ ), and daily NEE in 2019

$\text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。为了方便 GPP 与  $R_c$  比较,图 5 中将 GPP 均用正值表示。GPP 和  $R_c$  呈现显著的季节变化。 $R_c$  峰值出现在 8 月,GPP 峰值滞后。GPP 日变化范围在 $-0.5 \sim -7 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间,受到降水增多的影响 3—4 月波动较大。8 月达到峰值,在 8—10 月均维持在较

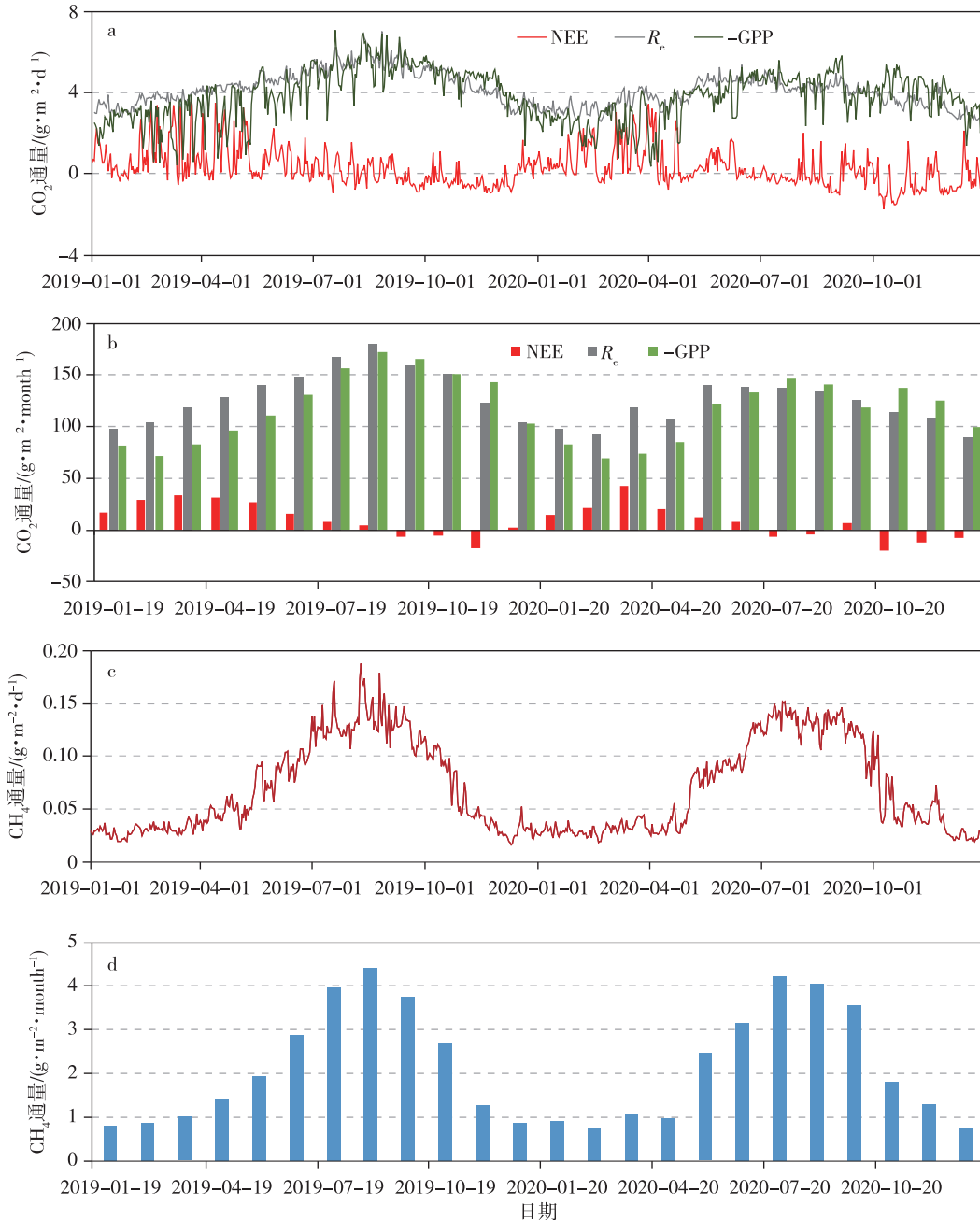


图5  $CO_2$  和  $CH_4$  通量日尺度和月尺度变化特征, NEE,  $R_e$  和 GPP 日变化(a)和月变化(b),  $CH_4$  日变化(c)和月变化(d)  
Fig. 5 (a) Daily variation of NEE,  $R_e$  and GPP; (b) monthly variation of NEE,  $R_e$  and GPP;  
(c) daily variation of  $CH_4$  flux; and (d) monthly variation of  $CH_4$  flux

高的值( $-4.5 \sim -6.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). GPP 的变化与 NDVI 的变化具有一致性.  $R_e$  季节波动较小, 在  $3 \sim 6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  之间, 呈典型的单峰曲线变化, 在 8 月达到最大值, 随后迅速下降. 2019 年和 2020 年最大月 GPP 分别为  $-150$  和  $-145 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$  (图 5b).

NEE 的季节变化是 GPP 和  $R_e$  共同作用的结果. 2019 年月  $R_e$  最大值为  $160 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ , 出现在 8 月. 在 8 月之前月  $R_e$  大于 GPP, 导致 NEE 为正, 并在

3 月达到最大值  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ . 8 月以后,  $R_e$  逐渐下降, 而 GPP 仍处于高值, NEE 转为负值, 吸收峰分别出现在 2019 年 10 月 ( $-10 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ ) 和 2020 年 11 月 ( $-12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ ). 总体而言, 2019—2020 年 GPP 为  $-1334.8 \sim -1465.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,  $R_e$  为  $1398.7 \sim 1620.70 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 红树林湿地公园净  $CO_2$  通量为  $74.9 \sim 138.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .

$CH_4$  排放通量呈现明显的季节变化特征, 排放

高值出现在夏秋季,低值出现在冬春季(图 5c).其季节变化与温度具有很好的一致性. $\text{CH}_4$  日通量范围为  $0.02 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (图 5c),2019 年 8 月峰值为  $4.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ ,2020 年 7 月峰值为  $4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$  (图 5d).2019—2020 年红树林湿地  $\text{CH}_4$  排放通量为  $25.1 \sim 25.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,为  $\text{CH}_4$  碳源.

### 2.4 $\text{CO}_2$ 和 $\text{CH}_4$ 的环境影响因素分析

净生态系统碳交换量受光合作用和呼吸作用两个生理过程控制,而 GPP 和  $R_e$  的变化又受到各种生物物理因素和植物物候学的驱动<sup>[37]</sup>.由于环境因子相互作用信息重叠,先采用通径分析方法判断各环境因子对净生态系统碳交换量的影响.根据多元回归分析,日尺度 NEE 主要受  $R_a$ 、 $P_w$  和  $e_a$  三个因素影响, $R^2 = 0.43$ ,回归方程只能解释 43% 的 NEE 日变化.由于 NEE 与 GPP 和  $R_e$  直接相关,进一步分析环境因子通过 GPP 和  $R_e$  对 NEE 的间接影响.通径分析的结构图显示(图 6a),NEE 与 GPP 的直接通径系数更高.虽然 GPP 和  $R_e$  被认为在空间和时间上都是耦合的,但在响应变化的环境条件时,GPP 往往是 NEE 的主要驱动因素. $R_a$ 、 $T_a$ 、NDVI、 $e_a$  和  $P_w$  通过影响 GPP 和  $R_e$  进而间接影响 NEE.通径系数显示(表 1),无论直接还是间接作用, $R_a$  和  $P_w$  均对 NEE 有高的负相关作用.尽管  $T_a$  和  $e_a$  与 NEE 的直接通径系数很高,但由于它们对 GPP 和  $R_e$  的作用相反,因此对 NEE 的间接作用反而降低.虽然 NDVI 对 NEE 的直接作用很小,但其通过与 GPP 的高度相关性,而对 NEE 有很高的间接影响.综合直接和间接通径关系, $R_a$  为最重要的影响因子,而  $T_a$ 、NDVI 和  $P_w$

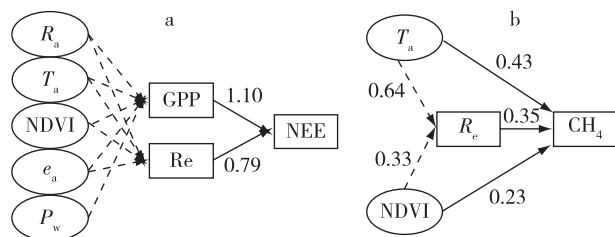


图 6 环境因子与 NEE(a) 和  $\text{CH}_4$ (b) 通量的通径分析 (实线箭头表示直接通径,数值表示通径系数;虚线箭头表示相关性,数值表示相关系数)

Fig. 6 Path diagrams illustrating direct and indirect effects of environmental factors on NEE and  $\text{CH}_4$  fluxes. Solid arrows denote direct path effect, values on which are direct path coefficients. Dashed arrows denote the relationship between parameters, values on which are correlation coefficients

主要通过影响 GPP 而间接影响 NEE.

多元回归分析显示, $\text{CH}_4$  日通量的影响因子为  $T_a$ 、 $R_e$  和 NDVI,直接通径系数分别为 0.43、0.35 和 0.23(图 6b), $R^2 = 0.72$ ,说明方程能解释 72% 的  $\text{CH}_4$  通量日变化特征.同时  $T_a$  和 NDVI 又通过影响  $R_e$  而间接影响  $\text{CH}_4$  通量.通径分析显示了环境因子的这种直接和间接影响结构, $T_a$  和 NDVI 对  $\text{CH}_4$  的间接通径系数分别为 0.22 和 0.12.

表 1 环境因子对 NEE 的直接和间接通径系数

Table 1 Direct and indirect path coefficients of environmental factors on daily NEE

自变量	直接通径系数	间接通径系数	间接通径分系数	作用途径
$R_a$	-0.43	-0.56	-0.75	$R_a \rightarrow \text{GPP} \rightarrow \text{NEE}$
			0.19	$R_a \rightarrow R_e \rightarrow \text{NEE}$
$T_a$	-0.35	-0.18	-0.68	$T_a \rightarrow \text{GPP} \rightarrow \text{NEE}$
			0.50	$T_a \rightarrow R_e \rightarrow \text{NEE}$
NDVI	-0.09	-0.33	-0.57	$\text{NDVI} \rightarrow \text{GPP} \rightarrow \text{NEE}$
			0.24	$\text{NDVI} \rightarrow R_e \rightarrow \text{NEE}$
$e_a$	0.55	-0.02	-0.53	$e_a \rightarrow \text{GPP} \rightarrow \text{NEE}$
			0.51	$e_a \rightarrow R_e \rightarrow \text{NEE}$
$P_w$	-0.31	-0.39	-0.36	$P_w \rightarrow \text{GPP} \rightarrow \text{NEE}$
			-0.03	$P_w \rightarrow R_e \rightarrow \text{NEE}$

### 2.5 人工红树林与自然红树林碳通量对比分析

南沙红树林湿地公园人工恢复 12 a 后,仍然是  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  源,2019—2020 年  $\text{CO}_2$  通量为  $74.9 \sim 138.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , $\text{CH}_4$  通量为  $25.1 \sim 25.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .而已有研究中人工恢复 20~30 a 的红树林碳交换为  $-851 \pm 195 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[11,37-39]</sup>,自然红树林碳交换为  $-664 \pm 171 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[12,20,40-42]</sup>,均为强的碳汇(图 7,为便于比较,图中用正值表示 GPP).对比 GPP 和  $R_e$  发现,南沙红树林的 GPP 明显低于其他人工恢复和自然红树林,而  $R_e$  却接近其他红树林的高值.已有研究中的人工红树林往往选择生长快且树木高的无瓣海桑进行种植,恢复 20~30 a 左右的无瓣海桑植被高度可达 12~15 m,其植被生产力更高<sup>[11,41]</sup>.而自然红树林通常为 3~6 m 高的秋茄,白骨壤和桐花树等植被群落<sup>[12,20,40-42]</sup>,因此,这些人工恢复红树林具有更高 GPP 和  $R_e$ ,碳汇强度也高于自然红树林(图 7).本研究的人工红树林为黄瑾群落,植被高度 4~6 m,林龄短且植被的面积只有 60% 左右,使得群落 GPP 偏低.同时,高达 40% 的水面,造成水体  $\text{CO}_2$  的高排放,使得生态系统呼吸增强.植被光合作用生产



的 GPP 无法抵消植被、土壤和水体的呼吸作用,最终使得南沙红树林湿地成为  $\text{CO}_2$  碳源。

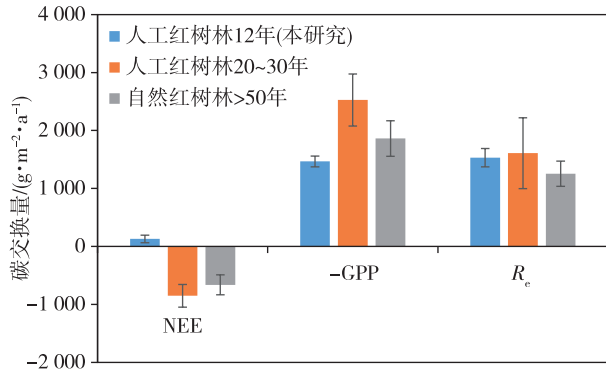


图7 人工和自然红树林碳通量对比分析

Fig. 7 Comparison of carbon exchange between restored and natural mangroves

红树林通常被认为是  $\text{CH}_4$  源<sup>[5]</sup>.南沙红树林湿地  $\text{CH}_4$  年排放量为  $25.1 \sim 25.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,显著高于其他红树林  $\text{CH}_4$  排放 ( $1.2 \sim 11.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>[6,20,42-43]</sup>.造成本研究红树林湿地  $\text{CH}_4$  排放高的原因:一方面,湿地公园不受潮汐的影响,水体盐度较低, $\text{CH}_4$  排放不受盐度高的抑制作用;另一方面,水面比植被具有更高的  $\text{CH}_4$  排放速率,而湿地公园高的水面比例(40%)也是造成  $\text{CH}_4$  排放高的主要原因。

在全球范围内,土地利用/土地覆盖变化(LUCC)造成的天然湿地损失约为 33%~57%<sup>[43]</sup>.LUCC(1990—2018年)每年至少会导致  $0.96 \pm 0.22 \text{ Gt CO}_2\text{-eq}$  的温室气体释放到大气中,占 IPCC 2014 年全球温室气体年排放量的 8.0%~9.6%<sup>[43-44]</sup>.湿地恢复的建设有望弥补全球范围内土地利用/土地覆盖变化造成的碳损失,但不同类型湿地生态系统向碳汇转化的持续时间不同.温带滨海湿地恢复 12 a 后仍然是碳源<sup>[45]</sup>.恢复 20 a 的红树林碳吸收能力可达到  $-851 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[37]</sup>.湄公河三角洲人工红树林恢复 35 a 后与自然红树林的碳储存水平相似<sup>[46]</sup>.随着植被生长,GPP 进一步增加,然而,温度升高会增加  $\text{CH}_4$  和  $R_e$  的排放,因此,南沙红树林湿地达到碳平衡还需要很长的时间.南沙湿地为了鸟类保护和休闲娱乐,而保留了大面积的水域.尽管红树林湿地目前仍是碳源,但其在环境保护和生态旅游等方面仍发挥着重要的作用。

### 3 结论

本研究基于涡动相关观测数据,分析珠江口人

工恢复红树林湿地  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  通量特征及其影响因素.研究发现,NEE 的季节波动较大,日 NEE 以正值碳排放为主,碳吸收出现在 9—11 月.GPP 和  $R_e$  均呈单峰型季节变化, $R_e$  的峰值出现在 8 月,GPP 峰值滞后且持续时间长. $\text{CH}_4$  通量季节变化与温度具有很好的一致性,排放最大值出现在 7—8 月.2019—2020 年红树林湿地  $\text{CO}_2$  通量为  $74.9 \sim 138.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , $\text{CH}_4$  通量为  $25.1 \sim 25.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,均为  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的源.总辐射是控制 NEE 季节变化的最主要因素,尽管气温、NDVI 均对 NEE 和  $\text{CH}_4$  排放产生影响,但其影响途径不同.气温和 NDVI 对 NEE 的影响是通过 GPP 产生间接作用,而对  $\text{CH}_4$  通量的影响则是通过  $R_e$ .由于南沙红树林湿地水面比例较高,其达到碳平衡还需要很长的时间。

### 参考文献

#### References

- [1] Mcleod E, Chmura G L, Bouillon S, et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering  $\text{CO}_2$  [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(10): 552-560
- [2] Ouyang X G, Lee S Y. Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 317
- [3] 王法明,唐剑武,叶思源,等.中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J].中国科学院院刊,2021,36(3):241-251  
WANG Faming, TANG Jianwu, YE Siyuan, et al. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(3): 241-251
- [4] Krauss K W, Holm G O, Perez B C, et al. Component greenhouse gas fluxes and radiative balance from two deltaic marshes in Louisiana: pairing chamber techniques and eddy covariance [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1503-1521
- [5] Rosentreter J A, Maher D T, Erler D V, et al. Methane emissions partially offset "blue carbon" burial in mangroves [J]. *Science Advances*, 2018, 4(6): 1-11
- [6] Liu J G, Zhou Y L, Valach A, et al. Methane emissions reduce the radiative cooling effect of a subtropical estuarine mangrove wetland by half [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 4998-5016
- [7] 叶勇,卢昌义,林鹏.海南岛和厦门红树林湿地  $\text{CH}_4$  排放的时空变化[J].大气科学,2000,24(2):152-156  
YE Yong, LU Changyi, LIN Peng. Seasonal and spatial changes of methane emissions from mangrove wetlands in Hainan Island and Xiamen [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(2): 152-156
- [8] 康文星,赵仲辉,田大伦,等.广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换[J].应用生态学报,2008,19(12):2605-2610



- KANG Wenxing, ZHAO Zhonghui, TIAN Dalun, et al. CO<sub>2</sub> exchanges between mangrove- and shoal wetland ecosystems and atmosphere in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(12):2605-2610
- [9] Xu Y W, Liao B W, Jiang Z M, et al. Emission of greenhouse gases (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) into the atmosphere from restored mangrove soil in South China [J]. Journal of Coastal Research, 2020, 37(1):52-58
- [10] Flechard C R, Neftel A, Jocher M, et al. Temporal changes in soil pore space CO<sub>2</sub> concentration and storage under permanent grassland [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 142(1):66-84
- [11] Cui X W, Liang J, Lu W Z, et al. Stronger ecosystem carbon sequestration potential of mangrove wetlands with respect to terrestrial forests in subtropical China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249:71-80
- [12] Alvarado-Barrientos M A, López-Adame H, Lazcano-Hernández H, et al. Ecosystem-atmosphere exchange of CO<sub>2</sub>, water, and energy in a basin mangrove of the northeastern coast of the Yucatan Peninsula [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(2):e2020JG005811
- [13] Leopold A, Marchand C, Renchon A, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the “Coeur de Voh” mangrove, New Caledonia: effects of water stress on mangrove productivity in a semi-arid climate [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223:217-232
- [14] Chen L Z, Wang W Q, Li Q S, et al. Mangrove species' responses to winter air temperature extremes in China [J]. Ecosphere, 2017, 8(6):e01865
- [15] Dean J F, Middelburg J J, Röckmann T, et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world [J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(1):207-250
- [16] Friesen S D, Dunn C, Freeman C. Decomposition as a regulator of carbon accretion in mangroves: a review [J]. Ecological Engineering, 2018, 114:173-178
- [17] Ow L F, Griffin K L, Whitehead D, et al. Thermal acclimation of leaf respiration but not photosynthesis in *Populus deltoides* × *nigra* [J]. New Phytologist, 2008, 178(1):123-134
- [18] Alongi D M. The Energetics of mangrove forests [M]. Berlin: Springer, 2009
- [19] Ball M C, Farquhar G D. Photosynthetic and stomatal responses of the grey mangrove, *Avicennia marina*, to transient salinity conditions [J]. Plant Physiology, 1984, 74(1):7-11
- [20] Zhu X D, Qin Z C, Song L L. How land-sea interaction of tidal and sea breeze activity affect mangrove net ecosystem exchange? [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(8):e2020JD034047
- [21] Donato D C, Kauffman J B, Murdiyarso D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(5):293-297
- [22] Jia M M, Wang Z M, Zhang Y Z, et al. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: the achievements of mangrove conservation in China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73:535-545
- [23] Sun Z G, Sun W G, Tong C, et al. China's coastal wetlands: conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement [J]. Environment International, 2015, 79:25-41
- [24] Lovelock C E, Duarte C M. Dimensions of blue carbon and emerging perspectives [J]. Biology Letters, 2019, 15(3):20180781
- [25] Sasmito S D, Taillardat P, Clendenning J N, et al. Effect of land-use and land-cover change on mangrove blue carbon: a systematic review [J]. Global Change Biology, 2019, 25(12):4291-4302
- [26] Fu Z, Li D J, Hararuk O, et al. Recovery time and state change of terrestrial carbon cycle after disturbance [J]. Environmental Research Letters, 2017(12):104004
- [27] Qiu P H, Xu S J, Fu Y, et al. A primary study on plant community of Wangqingsha semi-constructed wetland in Nansha district of Guangzhou city [J]. Ecological Science, 2011, 30(1):43-50
- [28] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, et al. A simple two-dimensional parameterisation for flux footprint prediction (FFP) [J]. Geoscientific Model Development, 2015, 8(11):3695-3713
- [29] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3):514-526
- [30] Fan S M, Wofsy S C, Bakwin P S, et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in the central-Amazon-forest [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1990, 95(D10):16851-16864
- [31] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(1):127-150
- [32] Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104(3):185-198
- [33] Webb E K, Pearman G I, Leuning R G. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water-vapor transfer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447):85-100
- [34] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, et al. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modelling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128(3/4):141-162
- [35] Davis K J, Bakwin P S, Yi C, et al. The annual cycles of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange over a northern mixed forest as observed from a very tall tower [J]. Global Change Biology, 2010, 9(9):1278-1293
- [36] Eisenhauer N, Bowker M A, Grace J B, et al. From patterns to causal understanding: structural equation modeling (SEM) in soil ecology [J]. Pedobiologia, 2015, 58(2/3):65-72
- [37] Liu J G, Lai D Y F. Subtropical mangrove wetland is a stronger carbon dioxide sink in the dry than wet seasons [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 278:107644
- [38] Ghosh U, Bose S, Bramhachari R. Living on the edge: climate change and uncertainty in the Indian Sundarbans [R]. STEPS Working Paper 101, Brighton: STEPS Centre, 2018
- [39] Suraj R, Kiran T, Chandra J, et al. Seasonal variations of

- carbon dioxide, water vapor and energy fluxes in tropical Indian mangroves[J]. *Forests*, 2016, 7(2): 1-18
- [40] Chen H, Lu W Z, Yan G H, et al. Typhoons exert significant but differential impacts on net ecosystem carbon exchange of subtropical mangrove forests in China[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(19): 5323-5333
- [41] Barr J G, Engel V, Fuentes J D, et al. Controls on mangrove forest-atmosphere carbon dioxide exchanges in western Everglades National Park[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, 115: 1-14
- [42] Zhu X D, Sun C Y, Qin Z C. Drought-induced salinity enhancement weakens mangrove greenhouse gas cycling[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021, 126(8): e2021JG006416
- [43] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 936-941
- [44] Murray N J, Phinn S R, Dewitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565: 222-225
- [45] Kandel T P, Lærkea P E, Hoffmann C C, et al. Complete annual CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O balance of a temperate riparian wetland 12 years after rewetting[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 127: 527-535
- [46] Nam V N, Sasmito S D, Murdiyarso D, et al. Carbon stocks in artificially and naturally regenerated mangrove ecosystems in the Mekong Delta[J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2016, 24: 231-244

## Variations and controlling factors of carbon fluxes from a restored mangrove wetland

SHEN Chong<sup>1,2</sup> WANG Chunlin<sup>3,4</sup> ZHAO Xiaosong<sup>3,5</sup>  
LU Yanyu<sup>6</sup> TANG Yuqi<sup>7</sup> XIA Beicheng<sup>2</sup> LI Tingting<sup>3,8</sup>

1 Guangzhou Climate and Agrometeorology Center, Guangzhou 511430

2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology  
(Sun Yat-sen University), Guangzhou 510275

3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

4 Field Scientific Observation and Research Station of Climate Environment and  
Air Quality Change in the Pearl River Estuary, Zhuhai 519082

5 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography & Limnology,  
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

6 Anhui Institute of Meteorological Sciences/Key Laboratory of Atmospheric Sciences and  
Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei 230031

7 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

8 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Mangroves are important blue carbon ecosystems. During the restoration processes, the carbon exchange processes of mangroves are affected by climate and vegetation factors, thus show different characteristics from those of mature mangroves. In this study, we observed the characteristics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes from a restored mangrove at Pearl River estuary based on the closed-path eddy covariance system. We further analyzed the influences of environmental factors on carbon fluxes by path analysis method. The observations showed significant diurnal variations in CO<sub>2</sub> fluxes. There were no significant seasonal variations in CO<sub>2</sub> fluxes due to the collaborative impact of Gross Primary Productivity (GPP) and ecosystem respiration ( $R_e$ ). The seasonal variations of CH<sub>4</sub> fluxes were significant. During 2019–2020, the annual CO<sub>2</sub> fluxes were 79.4–138.4 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, and the annual CH<sub>4</sub> fluxes were 25.1–25.9 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>. Path analysis showed that GPP directly influenced the seasonal variation of CO<sub>2</sub> fluxes. The radiation ( $R_a$ ), air temperature ( $T_a$ ) and vegetation index (NDVI) had indirect impact on CO<sub>2</sub> seasonal variations. While seasonal variations of CH<sub>4</sub> fluxes were directly influenced by  $T_a$ ,  $R_e$  and NDVI.

**Key words** restored mangrove; carbon dioxide (CO<sub>2</sub>); methane (CH<sub>4</sub>); eddy covariance; path analysis