

退水期鄱阳湖藁草 (*Carex cinerascens*) 和藜蒿 (*Artemisia selengensis*) 洲滩湿地 CO₂ 通量变化及其影响因子*

刘 胜^{1,2}, 陈宇炜^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 于 2014 年 10 月到 2015 年 5 月鄱阳湖退水期, 利用密闭箱—气相色谱法对鄱阳湖北部星子县洲滩两种代表性的植被群落——藁草 (*Carex cinerascens*) 和藜蒿 (*Artemisia selengensis*) 进行 CO₂ 通量的对比观测, 结果表明: 藁草和藜蒿湿地的生态系统呼吸具有明显季节变化模式, 其最小值均出现在冬季, 最大值均出现在春季, 平均值分别为 3291.80 和 2581.89 mg CO₂/(m² · h), 退水期藁草和藜蒿湿地累积的 CO₂ 通量分别为 213.71 ± 2.27 和 176.39 ± 11.48 t CO₂/hm². 较高的生物量是藁草湿地 CO₂ 通量高于藜蒿湿地的原因. 5 cm 土温是影响藁草和藜蒿湿地 CO₂ 通量季节变化最重要的影响因子, 藜蒿湿地生态系统呼吸的温度敏感性指数 (Q_{10}) 高于藁草湿地. 水分、植物生物量和湿地 CO₂ 通量之间无显著相关性.

关键词: 鄱阳湖; 藁草; 藜蒿; 生态系统呼吸; 温度敏感性指数

Variations and impact factors of CO₂ fluxes of *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland in Lake Poyang during drawdown periods

LIU Sheng^{1,2} & CHEN Yuwei^{1**}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: By using static chamber and gas chromatography, the CO₂ fluxes from *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland in Xingzi County (in the Northern Lake Poyang) were measured during drawdown periods (from October 2014 to May 2015). Ecosystem respiration of the two wetlands showed an obvious seasonal variations, with the minimum value in winter and the peak value in spring, and the mean CO₂ flux for the *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland were 3291.80 and 2581.89 mg CO₂/(m² · h), respectively. The cumulative CO₂ fluxes were 213.71 ± 2.27 and 176.39 ± 11.48 t CO₂/ha for the two wetlands during drawdown periods, respectively. Furthermore, the higher CO₂ flux from *Carex cinerascens*-dominated wetland resulted from higher biomass. Soil temperature (5 cm) was the key factor controlling the seasonal variations of the CO₂ fluxes. The temperature coefficient (Q_{10}), an index of temperature sensitivity for respiration, was higher in *Artemisia selengensis*-dominated wetland, comparing to *Carex cinerascens*-dominated wetland. No significant correlations were found between soil moisture content and vegetation biomass and CO₂ fluxes.

Keywords: Lake Poyang; *Carex cinerascens*; *Artemisia selengensis*; ecosystem respiration; temperature coefficient

湿地在全球碳储存方面扮演了一个重要的角色, 尽管湿地只占陆地表面积的 5% ~ 8%^[1], 但是据估计地球土壤碳库 (2500 Pg) 的 20% ~ 30% 储存在湿地中^[2-4]. 湿地由于较低的有机质分解速率和较高的生产力而成为重要的碳汇^[5], 但是随着未来气候变化, 湿地中储存的碳有可能以 CO₂ 或 CH₄ 的形式释放到大气中, 从而加剧人类活动造成的温室效应^[6-7]. 那么湿地到底是“源”还是“汇”? 要回答这个问题, 关键在于弄清不

* 国家重点基础研究发展规划项目 (2012CB417005) 资助. 2016-09-08 收稿; 2017-01-03 收修改稿. 刘胜 (1983~), 男, 博士研究生; E-mail: liusheng882006@126.com.

** 通信作者; E-mail: ywchen@niglas.ac.cn.

同区域不同湿地类型的碳排放及其影响因子,并评估其碳平衡.但是由于不同气候区不同湿地类型的 CO₂ 排放信息极为缺乏,这无疑阻碍了我们认识湿地碳循环的特征以及对未来气候变化或水文条件的响应,也限制了湿地有关碳循环模型的发展.

鄱阳湖是中国第一大淡水湖,其湿地面积达到 3130 km²,约占鄱阳湖总面积的 80%,超过了洞庭湖或太湖的全湖面积^[8].由于鄱阳湖是通江湖泊,年内、年际水位变化巨大,高水位时以湖泊为主体,低水位时以洲滩为主体,鄱阳湖这种独特的水文过程形成了多样的湿地类型以及显著的植被垂向分布,剧烈的水文波动以及由此引起的植被变化必然引起湿地碳动态的极大变化.目前对鄱阳湖湿地 CO₂ 排放的研究只有零星报道^[9-11],且多位于鄱阳湖南部湖区,北部湖区研究较少,鄱阳湖南部湖区受地形、水情等影响,洲滩淹水与出露时间、代表性群落类型等存在一定的差异,因而,本研究在鄱阳湖北部星子洲滩沿水位梯度选择广泛分布于鄱阳湖典型洲滩湿地的 2 种代表性植被——藁草(*Carex cinerascens*)和藜蒿(*Artemisia selengensis*)群落开展 CO₂ 通量及其影响因子的观测,比较不同植被群落 CO₂ 通量释放的差异,为评估鄱阳湖湿地碳平衡,降低区域碳收支估测的不确定性,深入认识不同湿地类型对温室气体排放的贡献将具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区域

实验样地位于中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站附近的洲滩湿地(位于星子县)(29°26′40″N, 116°3′24″E).鄱阳湖属亚热带湿润季风气候,流域气候四季分明.年平均降水量为 1878 mm,降雨主要集中在 4—9 月,降水量占全年降水量的 70%左右.年平均温度为 18℃,7 月平均温度为 29.5℃,1 月平均温度为 5.1℃,实验样地土壤类型为草甸沼泽土.鄱阳湖退水期时间的长短取决于当地的降雨和长江的水文状况,在 165~271 d 之间变化.

于 2014 年 10 月依水位梯度选择鄱阳湖两种代表性的湿生植被群落——藁草和藜蒿.藁草是鄱阳湖区面积最大,分布最广的群落类型,常常是多种藁草混生在一起组成群落,常被湖区群众用作饲料、绿肥和燃料,也是重要的放牧场所,于每年春、秋两季定期刈割.藁草是莎草科藁草属多年生草本,在鄱阳湖分春草和秋草,春草 2 月冬芽萌发,3—5 月为生长期,4—5 月为花期,丰水季节被水淹,藁草大量死亡或休眠,秋草 9—12 月为萌发生长期,开花数量较少,第二年涨水被淹时枯萎.该类型群落高度一般在 40~60 cm 之间,盖度大,常可达 100%,结构简单,一般由 6~8 种植物组成,常见伴生种有:下江萎陵菜(*Potentilla limprichtii*)、水田碎米荠(*Cardamine lyrata*)、水蓼(*Polygonum hydropiper*)、蚕茧草(*Polygonum japonicum* Meissn)、糠稷(*Panicum bisulcatum* Thunb)、紫花地丁(*Viola philippica*)、七重楼(*Paris polyphylla*)等^[12].藜蒿是菊科蒿属的多年生草本植物,也是湖区牲畜以及部分鸟类的食物来源之一.藜蒿从 10 月份萌发,11 月至来年 4 月为生长期,4—6 月为枯黄期,丰水季节被水淹,藜蒿不同于藁草,它只有一个生长季.藜蒿群落主要分布在河道两侧滩地、堤坝及土丘上,藜蒿群落高度一般在 45~65 cm,盖度在 95% 左右,主要伴生种有:水蓼、灰化藁草等.

1.2 样品采集和分析方法

选择分布均一、具有代表性的藁草和藜蒿群落.每种群落设置 3 个重复,3 个重复群落的间距大于 5 m 小于 10 m.实验于 2014 年 10 月—2015 年 5 月(鄱阳湖退水期)进行.

1.2.1 气体样品的采集和分析 通量观测采用密闭静态箱—气相色谱法,观测频率为每月 2~3 次,遇到不可预测的事件比如下雨或大风等取样时间会有所调整.观测时间选择在 9:00—11:00 之间(代表一天中的平均值)^[13].采样箱由箱体和底座 2 部分组成.箱体长、宽、高规格为 50 cm×50 cm×50 cm,底座为 15 cm×50 cm×50 cm(底座于通量观测前埋入土壤中,为避免土壤扰动采样期间不再取出,并且为了减少土壤的干扰 CO₂ 通量的测定在底座安装完成的几天之后进行).采样箱外粘贴一层 2 cm 厚的铝箔隔热板,以防止太阳辐射下箱内温度的升高而影响观测结果.采样时底座密封槽内加水,使底座与顶箱间的气路密封,切断箱内外空气的自由交换.箱顶上安装 1 个搅拌风扇,外接移动充电电源,以充分混匀气体,箱侧面安装取气接口.样品采集用 100 ml 注射器,在 30 min 时间内每 10 min 采集 1 次气体样品(每次共采集 4 个气体样品).在进行气体收集的同时,还采用便携式土壤水分测量仪(TDR300, Spectrum Technologies, USA)对土壤 10cm 含

水率进行测定,采用便携式温度计(JM624, Jin Ming Instruments, China)测定土壤 5 cm 温度. 假如地表有积水,也要记录积水的深度和温度. 同时利用鄱阳湖站气象观测场记录每天的气温、地表温度、降雨、大气压等数据. 并在每个测量日登陆江西省水利厅的网站(<http://www.jxsl.gov.cn>)查询当日的鄱阳湖星子水位数据. 气体样品采集后注入气袋运回实验室利用气相色谱仪(Agilent 4890D, Agilent Technologies, USA)进行 CO₂ 气体浓度分析,其中 CO₂ 检测器为 FID(氢焰离子化检测器). 载气为氮气,流速 30 ml/min; 氢气为燃气,流速为 30 ml/min; 空气为助燃气,流速为 400 ml/min,检测器温度为 200℃,柱箱温度为 55℃. 气体排放通量采用式(1)进行计算:

$$F = \rho \cdot H \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为气体排放通量($\text{mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$); ρ 为标准状态下的被测气体密度(g/L); H 为测量时采样箱的高度(m); T_0 和 P_0 分别为标准状况下的空气绝对温度(K)和气压(hPa); P 为采样地点的气压(hPa); T 为采样时的绝对温度(K); dc/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率($\text{mg}/(\text{mol} \cdot \text{h})$). F 值为正数时表示湿地生态系统释放 CO₂ 到大气中,为负数时表示湿地生态系统从大气中吸收 CO₂. CO₂ 的线性回归系数(R^2)要求大于 0.9.

退水期藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸的累积释放量计算公式为:

$$F_j = \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{n} \times 24 \times M_j \quad (2)$$

式中, F_i 指每月测得的 CO₂ 通量($\text{mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), n 指每月采样的次数,24 指将温室气体通量换算成小时, M_j 指采样所在月份的天数, F_j 指退水期的 CO₂ 释放通量($\text{t CO}_2/\text{hm}^2$).

1.2.2 生态系统呼吸温度敏感性的计算 通常使用 Q_{10} 来表示生态系统呼吸或土壤呼吸对温度的敏感性,它是指温度每升高 10℃ 生态系统呼吸或土壤呼吸增加的倍数. 公式如下:

$$R = a \cdot e^{b \cdot t} \quad (3)$$

$$Q_{10} = e^{10b} \quad (4)$$

式中, R 为生态系统呼吸速率($\text{mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), t 为温度($^{\circ}\text{C}$), a 和 b 为拟合常数.

1.2.3 生物量的收集 生物量测定采用收获法,在藁草和藜蒿群落分布区域内,每个群落设置生物量调查样方,样方大小为 50 cm×50 cm,随机设置 3 个重复. 收集样方内植物地上部分活体及地下植物根系. 其中,地下部分根系采取挖掘法,野外初步分离根系与土壤后带回实验室清洗,生物量利用烘箱烘干后称量(85℃/48 h),得出地上和地下生物量. 同时统计样方内植物的数量(包括优势种和伴生种),植物地上和地下根系的长度,估计每个样方植被的盖度. 植被生物量每月收集 1 次. 藁草分为秋草和春草,它们的第 1 次生物量测量分别在退水区域露出 10 d 后和 2 月初,藜蒿的第 1 次生物量测量在退水区域露出 10 d 后进行.

1.2.4 土壤理化指标的测定 用土钻在每个样方随机钻取 0~10 cm 土样,每个样地 20 个土钻样品混合成一个样品,样品过 2 mm 筛除去可见的土壤动物、石块、根系等. 土壤样品风干后用于土壤理化指标的测定. 称取过 100 目筛的风干样品 15~20 mg 使用元素分析仪(Model CNS, Elementar Analysen Systeme GmbH, Germany)测定总有机碳、全氮、全磷. 土壤 pH 值使用土水比 1:2.5 浸提,电位法测定;土壤容重采用环刀法测定.

1.2.5 数据分析 采用非参数 Mann-Whitney U 检验比较 2 种植被环境因子(土温、土壤含水率、pH 值、全氮、全磷、土壤有机碳等)、生物因素(地上地下生物量、总生物量、密度)和 CO₂ 排放通量的差异,相关分析选择 Pearson 相关分析法,逐步多元线性回归分析被用来分析影响 CO₂ 排放通量的影响因子. 所有统计分析用 SPSS 20.0 软件完成,绘图用 Sigma Plot 11.0 软件完成,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$. 文中数据均为平均值±标准误, $n=3$.

2 结果

2.1 藁草与藜蒿湿地上层土壤基本理化性状

藜蒿湿地的 10 cm 土壤含水率为 28.31%, 显著低于藁草湿地的土壤含水率 58.44% ($P < 0.01$), 两种植被 5 cm 土温、pH 值、总有机碳、全氮、全磷、碳氮比、容重等其它理化性质没有显著差异 ($P > 0.05$, 表 1)。藜蒿湿地的植株密度为 224 株/m², 显著小于藁草湿地的密度 811 株/m² ($P < 0.01$, 表 1)。

2.2 藁草与藜蒿湿地生物量、5 cm 土壤温度、10 cm 土壤含水率以及水位的季节变化

藁草和藜蒿湿地地上生物量较地下生物量具有明显的季节变化动态。藁草地下生物量变化范围在 808.00 ~ 2666.67 g/m² 之间, 平均值为 1460.73 g/m²; 地上生物量变化范围在 101.33 ~ 308.27 g/m² 之间, 平均值为 222.73 g/m²; 总生物量季节变化范围在 946.67 ~ 2768.00 g/m² 之间, 平均值为 1683.47 g/m²。藜蒿地下生物量变化范围在 131.20 ~ 1516.27 g/m² 之间, 平均值为 949.87 g/m², 地上生物量变化范围在 149.87 ~ 680.53 g/m² 之间, 平均值为 361.93 g/m²; 总生物量季节变化范围在 433.60 ~ 1778.67 g/m² 之间, 平均值为 1311.80 g/m²。藁草的年均总生物量高于藜蒿(图 1)。

藁草和藜蒿湿地 5 cm 土壤温度具有相似的季节变化, 自秋季开始逐渐降低, 至冬季降至最低值, 随着春季气温的上升逐渐升高。水位的季节变化与 5 cm 土壤温度相似, 藁草 10 cm 土壤含水率的季节变化与水位变化相反, 藜蒿 10 cm 土壤含水率的季节变化与水位变化相似(图 2)。

表 1 藁草和藜蒿湿地上层土壤基本理化性状*

Tab.1 Physicochemical properties of the top soil from *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland

理化因子	藜蒿湿地	藁草湿地
10 cm 土壤含水率/%	28.31±4.57 ^a	50.07±8.47 ^b
5 cm 土温/℃	18.71±0.27 ^a	18.64±0.30 ^a
pH	4.81±0.16 ^a	4.74±0.06 ^a
总有机碳/%	1.99±0.29 ^a	1.89±0.30 ^a
全氮/(mg/g)	0.83±0.07 ^a	0.83±0.13 ^a
全磷/(mg/g)	0.12±0.01 ^a	0.12±0.02 ^a
碳氮比	23.94±1.77 ^a	22.95±0.97 ^a
容重/(g/cm ³)	1.66±0.02 ^a	1.60±0.01 ^a
密度/(株/m ²)	224±9 ^a	811±66 ^b

* 同一行上标不同小写字母代表差异达到显著水平 ($P < 0.05$), $n = 3$ 。

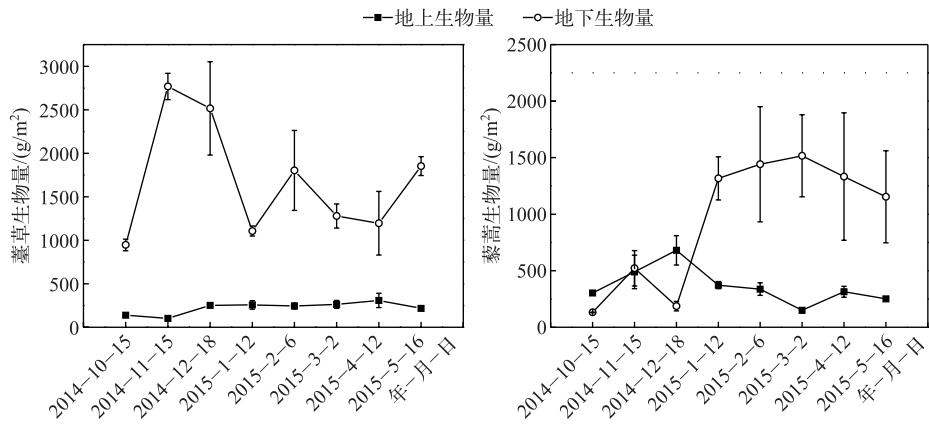


图 1 藁草和藜蒿湿地生物量的季节变化

Fig.1 Seasonal variations of biomass from *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland

2.3 藁草和藜蒿湿地土壤—植物系统 CO₂ 释放季节动态

藁草湿地的生态系统呼吸具有明显季节变化模式, 自秋季开始逐渐降低, 至冬季降至最低值; 随着气温的上升及春季藁草的萌发, 生态系统呼吸速率逐渐上升。藁草湿地生态系统呼吸变化范围在 411.87 ~ 6016.32 mg CO₂/(m² · h) 之间, 平均值为 3291.80 mg CO₂/(m² · h), 最小值出现在 2014 年 12 月 29 日(冬季), 最大值出现在 2015 年 4 月 12 日(春季)。藜蒿湿地生态系统呼吸季节变化模式与藁草湿地相似, 变化范围在 185.84 ~ 7213.94 mg CO₂/(m² · h) 之间, 平均值为 2581.89 mg CO₂/(m² · h), 最小值出现在 2014 年

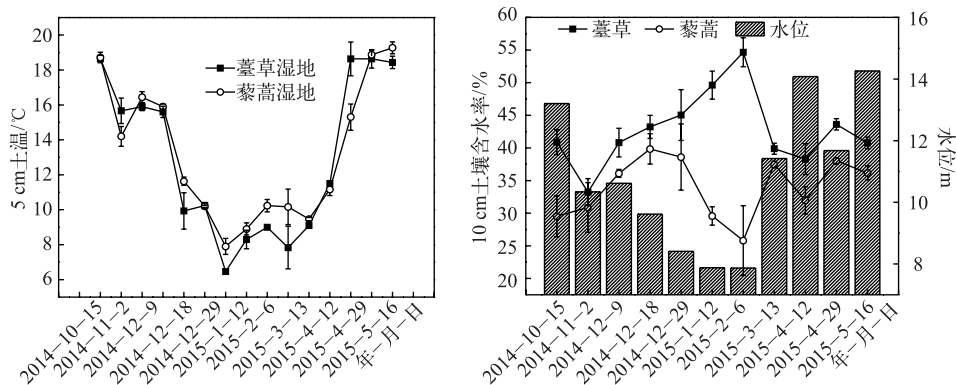


图2 藁草和藜蒿湿地 5 cm 土壤温度、10 cm 土壤含水率以及水位的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of soil temperature at 5 cm depth, soil moisture at 10 cm depth and water level from *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland

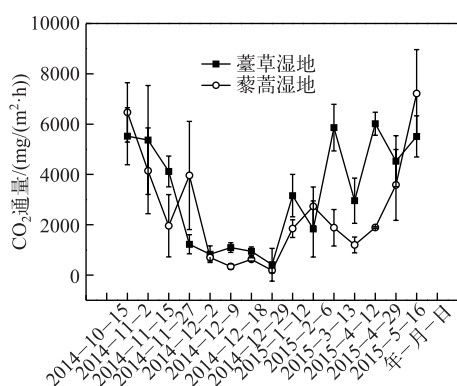


图3 藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸季节变化
Fig.3 Seasonal variations of ecosystem respiration from *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland

12月29日,在2015年5月16日出现最大值(春季)(图3)。退水期藁草湿地生态系统呼吸的平均值是藜蒿湿地生态系统呼吸的1.27倍。退水期藁草和藜蒿湿地累积的生态系统呼吸分别为 213.71 ± 2.27 和 176.39 ± 11.48 t CO₂/hm²,藁草湿地生态系统呼吸的累积释放量高于藜蒿湿地。

2.4 生态系统呼吸与温度、水分、生物量的关系

Pearson 相关分析显示藁草湿地生态系统呼吸与 5 cm 土温呈显著正相关($P < 0.01$),藜蒿湿地生态系统呼吸与 5 cm 土温、气温均呈显著正相关($P < 0.01$)(图4)。逐步多元回归分析表明,藁草湿地生态系统呼吸与 5 cm 土温呈显著正相关(藁草湿地生态系统呼吸 = $-1538.922 + 398.914 \times (5 \text{ cm 土温})$, $F = 51.744$, $R^2 = 0.896$, $P < 0.001$),5 cm 土温是影响藁草湿地生态系统呼吸季节变化最重要的影响因子。藜蒿湿地生态系统呼吸与 5 cm 土温呈显著正相关,与气温呈显著负相关(藜蒿湿地生态系统呼吸 =

3 讨论

3.1 藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸与其它地区的比较

本研究实验样地位于中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站附近的洲滩湿地(位于星子县),是鄱阳湖洲滩湿地的一个典型区域。鄱阳湖退水期时间的长短取决于当地的降雨和长江的水文状况,在 165~271 d 之间变化^[12]。有研究指出当湿地水位下降到一定程度时,湿地土壤的通气状况会改变,有机质分解产生的 CO₂ 也会增加,湿地可能由碳汇变成碳源^[14]。本研究鄱阳湖退水期达到 8 个月,那么退水期湿地的 CO₂ 排放 在鄱阳湖碳平衡中将占有十分重要的地位。将鄱阳湖湖滨湿地的 CO₂ 排放与其他地区进行比较(表 2),整个

退水期藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸的平均值为 $2936.84 \pm 1219.35 \text{ mg CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 高于鄱阳湖南矶湿地^[11]、蚌湖^[15]以及鄱阳湖水汽界面的 CO₂ 排放^[16], 这说明了鄱阳湖 CO₂ 排放的空间变异性, 将来需要更加详细尺度的调查. 并且鄱阳湖湖滨湿地的 CO₂ 排放远远高于三峡水库^[17]、青藏高原沼泽化草甸^[18]、诺尔盖高原沼泽湿地^[19]、东北三江平原沼泽湿地^[20], 以及芬兰^[21]、日本^[22]、南极洲^[23] 的湖泊湿地, 可能原因是鄱阳湖湿地植被生物量较高, 土壤表面没有明显的立地积水以及适宜的温度所致^[11].

3.2 藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸之间的差异

退水期藁草湿地生态系统呼吸大于藜蒿湿地生态系统呼吸, 可能原因是藁草的生物量相比藜蒿较高. 有研究显示, 植物的生物量与 CO₂ 排放有正相关效应, 这是因为植物的呼吸作用与其相对生长速率呈正相关^[25-26], 生长速率快的植物需要更多物质和能量的输出, 以满足较高生长速率的需要^[27]. 由于藁草的总生物量高于藜蒿, 导致其生态系统呼吸水平也高于藜蒿.

通过实验观测, 2014—2015 年退水期鄱阳湖藁草和藜蒿湿地均具有较高的生态系统呼吸排放. 鄱阳湖独特的水文状况决定了湿地植被的分布和生物量, 不同湿地植被的分布和生物量影响着湿地生态系统呼吸的排放. 光合作用和呼吸作用决定着植物的生产力, 温度是影响植物生产力的最重要影响因子^[28], 因此, 气候微小的变化将引起植物生产力和生物量的巨大变化^[29]. 近年来, 气候变化和三峡大坝的建设改变了鄱阳湖的水文状况, 造成鄱阳湖夏季丰水期持续时间的缩短以及退水期的延长^[30], 那么藁草和藜蒿的生长期也会相应延长, 藁草和藜蒿湿地的生态系统呼吸将会加强.

3.3 温度、水分和生物量对生态系统呼吸的影响

本研究表明 5 cm 土温是影响藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸最重要的影响因子, Q_{10} 值通常被用来评价土壤或生态系统呼吸对于温度变化的敏感性. 不同地区湿地生态系统的 Q_{10} 值有很大差异, 全球土壤呼吸 Q_{10} 平均值为 2.4^[31]. 北方泥炭地的 Q_{10} 值在 1.6~4.1 之间^[32], 青藏高原湿地的 Q_{10} 值在 2.0~8.9 之间^[33], 三江平原沼泽湿地的 Q_{10} 值在 2.37~2.98 之间^[34]. 在本研究中, 藁草湿地的 Q_{10} 值为 2.82, 介于上述报道的湿地 CO₂ 排放的温度敏感性指数之间. 藜蒿湿地的 Q_{10} 值较高, 为 7.33, Q_{10} 值容易受到根呼吸、土壤有机碳的有效性和微生物活动等因素的影响^[35], 藜蒿和藁草湿地之间 Q_{10} 值较大的差异还需要进一步的研究.

水分也是控制呼吸过程的一个重要环境因子, 但是本研究未发现藜蒿和藁草湿地 CO₂ 的排放通量与土壤含水率有显著相关性, 这可能是由于藁草和藜蒿湿地土壤含水率较高且季节变异较小, 对湿地 CO₂ 排放影

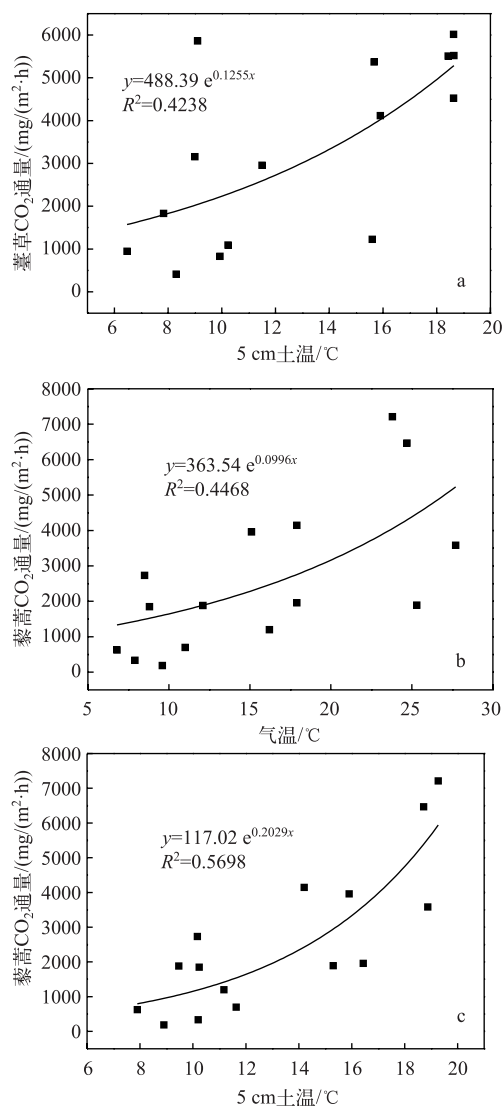


图4 藁草生态系统呼吸与 5 cm 土温(a), 藜蒿湿地生态系统呼吸与气温(b)、5 cm 土温(c)的相关性

Fig.4 Relationship between soil temperature at 5 cm depth and ecosystem respiration from *Carex cinerascens*-dominated wetland (a); Relationship between air temperature(b), soil temperature at 5 cm depth(c) and ecosystem respiration from *Artemisia selengensis*-dominated wetland

响较小所致^[11]. 研究表明植物呼吸速率与植物生物量呈显著线性正相关^[36-37], 植物生物量大, 会有更多的光合产物向土壤运输, 同时产生更多的根系分泌物, 为土壤微生物提供能源, 从而促进土壤呼吸, 但是本研究未发现湿地生态系统呼吸与生物量呈显著相关性, 可能原因是 5 cm 土温对湿地生态系统呼吸的影响削弱了植被生物量的作用, 具体影响机理还需要进一步的研究.

表 2 鄱阳湖湖滨湿地 CO₂ 通量与其他地区的比较
Tab.2 Comparison of CO₂ flux from littoral wetland in Lake Poyang with other regions

观测点	区域	CO ₂ 通量/ (mg CO ₂ / (m ² · h))	年均气温/℃	采样时间	参考文献
鄱阳湖星子洲滩	湖滨带(藁草和藜蒿)	2936.84±1219.35	18.00	10 月—次年 5 月	本研究
鄱阳湖南矶山	藁草湿地	89.57~1243.99	17.60	9 月—次年 4 月	[11]
鄱阳湖蚌湖	芦苇—藁草—菊叶委陵菜	148.70	16~18.00	3 月	[15]
	藁草	187.93	16~18.00	3 月	[15]
鄱阳湖	远洋区	36.43	17.10	10 月	[16]
三峡水库	龙溪河	321.20	nd	6 月—次年 5 月	[17]
	澎溪河	31.24	nd	6 月—次年 5 月	[17]
青藏高原	沼泽化草甸	672.09±152.37	-1.70	7—9 月	[18]
若尔盖高原	沼泽化草甸	203.22	-1.70~3.30	4—10 月	[19]
三江平原	毛果藁草	548.04	1.90	6 月—次年 4 月	[20]
	小叶章	713.08	1.90	6 月—次年 4 月	[20]
芬兰	Lake Kevätön	110.00~2340.00	nd	室内培养	[21]
日本	Lake Nakaumi	14.00~725.00	14.80	8 月	[22]
南极洲	湖滨带	20.68~127.60	-10.00	12 月—次年 2 月	[23]
全球	湖泊	29.17	nd	分析文献	[24]

nd 表示原文献无此数据.

4 结论

1) 退水期藁草和藜蒿湿地的生态系统呼吸具有明显季节变化模式, 它们的最小值均出现在 2014 年 12 月(冬季), 最大值分别出现在 2015 年的 4 月和 5 月(春季), 退水期藁草和藜蒿湿地累积的生态系统呼吸分别为 213.71±2.27 和 176.39±11.48 t CO₂/hm². 较高的生物量是藁草湿地生态系统呼吸高于藜蒿湿地的原因.

2) 5 cm 土温是影响藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸季节变化最重要的影响因子, 藜蒿湿地生态系统呼吸对温度的敏感性高于藁草湿地. 水分和植物生物量与藁草和藜蒿湿地生态系统呼吸无显著相关性.

致谢: 感谢中国科学院鄱阳湖湖泊湿地观测研究站刘贺和邓秋婷实验员在采样方面给予的支持和帮助!

5 参考文献

[1] Mitsch WJ, Gosselink JG eds. Wetlands(fourth ed). Hoboken: Wiley, 2007.

[2] Roulet N. Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. *Wetlands*, 2000, **20**: 605-615.

[3] Bridgham S, Megonigal J, Keller J *et al.* The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 2006, **26**: 889-916.

[4] Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2008, **363**: 815-830.

[5] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A *et al.* Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review. *Wetlands*, 2009, **30**: 111-124.

[6] Gorham E. The biogeochemistry of northern peatlands and its possible responses to global warming. In: Woodwell GM, Mackenzie FT eds. *Biotic Feedbacks in the global climatic system*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1995: 169-187.

[7] Keller JK, White JR, Bridgham SD *et al.* Climate change effects on carbon and nitrogen mineralization in peatlands

- through changes in soil quality. *Global Change Biology*, 2004, **10**: 1053-1064.
- [8] Liu Xinzong, Ye Juzheng eds. Jiangxi Wetland. Beijing: Chinese Forestry Press, 2000. [刘信中, 叶居正. 江西湿地. 北京: 中国林业出版社, 2000.]
- [9] Hu Qiwu, Xin Ruixin, Zhu Lili *et al.* Characteristics of CO₂ emission from *Carex*-dominated wetland in Poyang lake in non-flooded period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(6): 1431-1436. [胡启武, 辛瑞新, 朱丽丽等. 鄱阳湖苔草湿地非淹水期 CO₂ 释放特征. 应用生态学报, 2011, **22**(6): 1431-1436.]
- [10] Lin Mao, Xu Ming, Geng Yuqing *et al.* Spatial heterogeneity and controlling factors of autumn CH₄ flux at water-air interface in Poyang Lake of Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8): 2112-2118. [林茂, 徐明, 耿玉清等. 鄱阳湖秋季水—气界面 CH₄ 排放通量的区域差异及影响因素. 生态学杂志, 2012, **31**(8): 2112-2118.]
- [11] Hu QW, Wu Q, Yao B *et al.* Ecosystem respiration and its components from a *Carex* meadow of Poyang Lake during the drawdown period. *Atmospheric Environment*, 2015, **100**: 124-132.
- [12] Hu Zhenpeng, Ge Gang, Liu Chenglin *et al.* Structure of Poyang Lake wetland plants ecosystem and influence of lake water level for the structure. *Resource Environment Yangtze Basin*, 2010, **19**(6): 597-605. [胡振鹏, 葛刚, 刘成林等. 鄱阳湖湿地植物生态系统结构及湖水水位对其影响研究. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 597-605.]
- [13] Tang XL, Liu SG, Zhou GY *et al.* Soil-atmospheric exchange of CO₂, CH₄, and N₂O in three subtropical forest ecosystems in southern China. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 546-560.
- [14] Oechel WC, Vourlitis GL, Hastings SJ *et al.* The effects of water table manipulation and elevated temperature on the net CO₂ flux of wet sedge tundra ecosystems. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 77-90.
- [15] Wan HX, Qin ZH, Liu YB *et al.* Estimates of carbon fluxes from Poyang Lake wetlands vegetation in the growing season. In: Frouin RJ, Yoo HR, Won JS *et al.* eds. Remote sensing of the coastal ocean, land, and atmosphere environment. Proceeding of SPIE Vol.7858; 2010 Nov 4; New York: SPIE.
- [16] Liu LX, Xu M, Lin M *et al.* Spatial variability of greenhouse gas effluxes and their controlling factors in the Poyang Lake in China. *Polish Journal of Environment Study*, 2013, **22**: 749-758.
- [17] Li Zhe, Bai Lei, Guo Jinsong *et al.* Comparative study on water-air CO₂, CH₄ flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1008-1016. [李哲, 白镭, 郭劲松等. 三峡水库两条支流水气界面 CO₂、CH₄ 通量比较初探. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016.]
- [18] Hu QW, Cao GM, Wu Q *et al.* Comparative study on CO₂ emissions from different types of alpine meadows during grass exuberance period. *Journal of Geographical Sciences*, 2004, **14**: 167-176.
- [19] Wang Dexuan, Song Changchun, Wang Yiyong *et al.* CO₂ flux in mire and grassland on Ruogai plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(2): 285-289. [王德宣, 宋长春, 王毅勇等. 若尔盖高原沼泽湿地与草地二氧化碳通量的比较. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 285-289.]
- [20] Song CC, Yan BX, Wang YS *et al.* Fluxes of carbon dioxide and methane from swamp and impact factors in Sanjiang Plain, China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**: 2749-2753.
- [21] Liikanen A, Ratilainen E, Saarnio S *et al.* Greenhouse gas dynamics in boreal, littoral sediments under raised CO₂ and nitrogen supply. *Freshwater Biology*, 2003, **48**(3): 500-511.
- [22] Hirota M, Senga Y, Seike Y *et al.* Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. *Chemosphere*, 2007, **68**: 597-603.
- [23] Ding W, Zhu RB, Ma DW *et al.* Summertime fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ from the littoral zone of Lake Daming, East Antarctica: Effects of environmental conditions. *Antarctic Science*, 2013, **25**(6): 752-762.
- [24] Cole JJ, Caraco NF, Kling GW *et al.* Carbon dioxide supersaturation in the surface water of lakes. *Science*, 1994, **265**: 1568-1570.
- [25] Villar R, Held AA, Merino J. Comparison of methods to estimate dark respiration in the light in leaves of two woody species. *Plant Physiology*, 1994, **105**: 167-172.
- [26] Reich PB, Walters MB, Ellsworth DS *et al.* Relationships of leaf dark respiration to leaf nitrogen, specific leaf area and leaf life-span: a test across biomes and functional groups. *Oecologia*, 1998, **114**: 471-482.
- [27] Atkin OK, Westbeek M, Cambridge ML *et al.* Leaf respiration in light and darkness (A comparison of slow- and fast-growing *poa* species). *Plant Physiology*, 1997, **113**: 961-965.
- [28] Aber JD, Melillo JM. Resource allocation and net primary production, seconded, Terrestrial Ecosystems. San Diego, CA:

- Harcourt/Academic Press, 2001: 183-189.
- [29] Hirota M, Tang YH, Hu QW *et al.* Methane emissions from different vegetation zones in a Qinghai-Tibetan Plateau wetland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 737-748.
- [30] Zhang Q, Li L, Wang YG *et al.* Has the Three-Gorges Dam made the Poyang Lake wetlands wetter and drier? *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(20): L20402.
- [31] Raich JW, Schlesinger WH. The globe carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81-99.
- [32] Bubier JL, Bhatia G, Moore, TR *et al.* Spatial and temporal variability in growing-season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 2003, **6**: 353-367.
- [33] Hirota M, Tang YH, Hu QW *et al.* Carbon dioxide dynamics and controls in a deep-water wetland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecosystems*, 2006, **9**: 673-688.
- [34] Song CC, Xu XF, Tian HQ *et al.* Ecosystem-atmosphere exchange of CH₄ and N₂O and ecosystem respiration in wetlands in the Sanjiang Plain, Northeastern China. *Global Change Biology*, 2009, **15**: 692-705.
- [35] Davidson EA, Janssens IA, Luo YQ *et al.* On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond Q₁₀. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 154-164.
- [36] Lu Yan, Song Changchun, Wang Yiyong *et al.* Influence of plants on CO₂ and CH₄ emission in wetland ecosystem. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2007, **27**(11): 2306-2313. [卢妍, 宋长春, 王毅勇等. 植物对沼泽湿地生态系统 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响. 西北植物学报, 2007, **27**(11): 2306-2313.]
- [37] Sun Wenjuan, Huang Yao, Chen Shutao *et al.* CO₂ emission from soil-crop system as influenced by crop growth and tissue N content. *Environmental Science*, 2004, **25**(3): 1-6. [孙文娟, 黄耀, 陈书涛等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO₂ 排放的影响. 环境科学, 2004, **25**(3): 1-6.]