2016-02-25 DOI: 10.3724/SP.J.1145.2015.05050 http://www.cibj.com/
应用与环境生物学报 Chin J Appl Environ Biol 2016, 22 (1): 0013-0019

广州海珠湖城市湿地CO_2通量特征*

徐志伟[1,2] 肖荣波[2**] 邓一荣[2] 黄柳菁[2] 陈 敏[1]
[1]广东工业大学 广州 510006
[2]广东省环境科学研究院 广州 510045

摘 要 城市湿地是陆地湿地生态系统碳库的重要组成部分, 研究城市湿地在人为干预环境下的碳排放特征以及影响因素对控制湿地排放温室气体具有重要意义. 本研究通过静态箱–气相色谱法研究广州市海珠湖湿地在2013年12月至2014年11期间的美人蕉(*Canna indica*, CI)、野芋(*Colocasia tonoimo*, CT)、蓝花草(*Aphelandra ruellia*, AR)群落湿地的CO_2通量季节性变化以及相关环境因子. 结果显示: CO_2的通量季节性变化明显, 美人蕉、野芋通量最大值集中在3月至5月期间, 而蓝花草通量峰值集中在9月至10月期间, 分别为–1 168.37、–607.57、–751.02 mg m^{-2} h^{-1}, 季节性CO_2通量强弱表现为夏季>春季>秋季>冬季. 美人蕉、蓝花草、野芋的年平均通量分别为–579.30、–373.05、–290.43 mg m^{-2} h^{-1}, 3种湿地植物的CO_2固定能力强弱比较为美人蕉>蓝花草>野芋. 湿地植物、大气温度、水力条件是影响城市湿地CO_2通量的主要因子, 高温促使城市湿地排放更多的CO_2, 而高水位则主要通过限制土壤呼吸以减少CO_2排放; 水中的氨氮含量上升显著增强美人蕉群落CO_2吸收能力. 本研究表明, 观测期内海珠湖湿地生态系统表现为CO_2的汇, CO_2固定量约为1 524.02 t, 人为的湿地植物管理和水文调控能进一步促进湿地植物吸收CO_2并减少湿地土壤和植物排放CO_2, 从而提升城市湿地的碳汇能力. (图7 表2 参54)

关键词 城市湿地; CO_2通量; 水位; 湿地植物; 氨氮
CLC X171.4

Carbon dioxide emission from urban wetland of the Haizhu Lake*

XU Zhiwei[1,2], XIAO Rongbo[2**], DENG Yirong[2], HUANG Liujing[2] & CHEN Min[1]
[1]*Guangdong University of Technology,* Guangzhou 510006, China
[2]*Guangdong Provincial Academy of Environmental Science,* Guangzhou 510045, China

Abstract Among terrestrial ecosystems, the urban wetland (UW) ecosystem plays a significant role because it is estimated to contain 11% of total carbon in global territorial ecosystems. Most of existing researches focus on the influences of soils and plants on emissions of the greenhouse gases, only few are about the ammoniacal nitrogen of the water of the wetlands. A better understanding of CO_2 exchange between urban wetlands and the atmosphere is important for quantifying the contributions of the urban wetlands to the global carbon cycle, as well as evaluating urban climate impact and response to global climate changes. The enclosed static chamber-gas chromatograph method was used to analyze the CO_2 fluxes of *Canna indica* (CI), *Colocasia tonoimo* (CT), and *Aphelandra ruellia* (AR) from the typical urban wetland of the Haizhu Lake in Guangzhou Province from December 2013 to November 2014. The main measurements included the CO_2 fluxes during different seasons and the environmental factors including atmospheric temperature (AT), ammoniacal nitrogen (AN) of the water, hydraulic condition (HC), biomass and height of the wetland plants (WP). The results showed the CO_2 fluxes of CI (-1 168.37 mg m^{-2} h^{-1}) and CT (-557.68 mg m^{-2} h^{-1}) fluxes peaked between March and May, but the CO_2 fluxes of AR peaked (-751.02 mg m^{-2} h^{-1}) between September and October. The seasonal variation of the fluxes of CO_2 was in the order of summer > spring > autumn > winter. The monthly average was -525.62 mg m^{-2} h^{-1} for CI fluxes, -373.05 mg m^{-2} h^{-1} for CT, and-290.43 mg m^{-2} h^{-1} for AR. The consistently negative CO_2 fluxes throughout the year indicated that the wetlands with plants were net sinks of CO_2 to the atmosphere because of CO_2 uptake by plant photosynthesis during the growing season. The variation of CO_2 fluxes of the three plants was in the order of CI > AR > CT. HC and AT were the main factors affecting the variation of CO_2 fluxes, while AN significantly affected the monthly variation of CO_2 fluxes. The CO_2 fluxes were positively correlated to AT but negatively to AN. Based on the results we calculated that approximately 1 474.84 t of CO_2 was absorbed into the wetland in a year, indicating that the urban wetlands is an important net carbon sink in urban areas. It is suggested that the urban wetlands can absorb more

收稿日期 Received: 2015-05-29 接受日期 Accepted: 2015-07-08
*国家自然科学基金项目(41301058, 41201601)、广东省自然科学基金项目(S2013040011866)和广东省低碳技术创新与示范重大科技专项(2012A010800011)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (41301058, 41201601), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (S2013040011866), and the Key Foundation of Low Carbon Technology Innovation and Demonstration of Guangdong Province (2012A010800011)
* 通讯作者 Corresponding author (E-mail: ecoxiaorb@163.com)

CO_2 with appropriate wetland plants and high water level.

Keywords urban wetland; carbon dioxide; hydraulic condition; wetland plants; ammonia nitrogen

湿地生态系统是陆地生态系统的重要组成部分，尽管仅约占地球表面积的1%，但其储碳量（Carbon storage）占地球陆地碳总量的11% [1-2]，约为225 Gt（1 Gt = 10^9 t）[3]. 城市湿地（Urban wetlands）受到人为的强烈干扰和集中管理[4-6]，在湿地植物（Wetland plants, WP）[7-8]、水文条件（Hydraulic conditions, HC）[9]、土壤（Soil）[10]等方面影响着城市湿地的碳汇功能，城市湿地CO_2通量研究集中于湿地生态系统的碳排放特征及其土壤[11]、植物因素[5, 12-14]，而相关的水质因素分析还是比较有限[15]. 近年，我国兴起了城市湿地公园建设的热潮[16-19]，引起了社会各界关注，若管理不当，将导致城市湿地排放更多的CO_2 [20]. 从控制湿地温室气体排放角度，研究城市湿地碳排放特征以及影响因素成为新型的课题.

我们以广州市海珠湖湿地为研究对象，对美人蕉（*Canna indica*, CI）、野芋（*Colocasia tonoimo*, CT）、蓝花草（*Aphelandra ruellia*, AR）群落的CO_2通量进行研究，通过监测2013年12月至2014年11月间每月湿地的CO_2通量及其主要环境因子，分析城市湿地植物群落CO_2通量的季节性规律，探讨植物群落、水力条件、氨氮对城市湿地CO_2通量的影响，估算该城市湿地的CO_2固定量并与其他类型湿地进行比较，为城市湿地的低碳化规划设计和管理、控制和减少温室气体排放提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验地概况

研究样地位于广州市海珠区海珠国家湿地公园内（23°4′36”N, 113°19′5”E）. 海珠湖湿地是广州中心城区内规模最大、保存最完整的湿地生态系统，被称为广州的“南肾”. 海珠湖是市内典型的城市湿地，公园总面积1.5 km^2，其中湖心区湿地0.95 km^2（水面面积0.53 km^2，陆地面积0.42 km^2），其他用地0.55 km^2. 平均气温为22.3 ℃，平均降水量为1 801.5 mm，属于亚热带季风气候. 海珠湖内的水生植物分布面积较广，典型的湿地植物有美人蕉、野芋、蓝花草等[21].

分别选取了淹水区和无水区的水生美人蕉、野芋、蓝花草以及无植被样地为观测对象，采样点共8个，每个点进行2个重复实验. 样点的具体特征如表1所示.

1.2 实验样品采集与处理

采用静态暗箱–气相色谱法（Enclosed static chamber - gas chromatograph techniques）进行观测. 采样箱采用标准式组合设计，由底座（Base）、延长箱（Extending chamber）、顶箱（Upper chamber）3个部分（图1），采集气体样品时各部分之间均用水密封. 底座尺寸为50 cm × 50 cm × 20 cm，底座在整个观测期固定埋设在采样点，露出地面约10 cm. 根据湿地植物的生长情况，采用不同数量的延长箱. 顶箱的侧板和顶板由无色、光滑的4 mm有机玻璃制成，能透过93%的光合有效辐射[22]，尺寸为50 cm × 50 cm × 50 cm，顶部设有采样孔、搅拌用风扇、温度检测孔等等. 如果湿地植物的高度高于箱子就将植株轻轻弯曲，放入箱中.

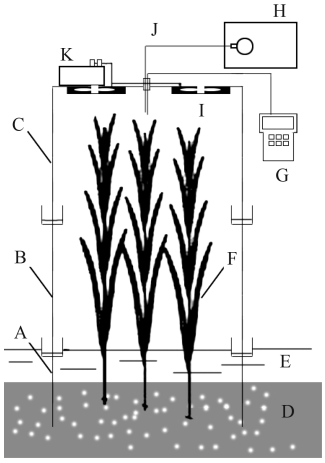


图1 静态箱示意图. A：底座；B：延长箱；C：顶箱；D：底泥；E：积水；F：被测植物；G：数字温度计；H：100 mL采样袋；I：风扇；J：采样管线；K：12 V电源.

Fig. 1 The sketch of the static chamber. A: Base; B: Extending chamber; C: Upper chamber; D: Soil; E: Water; F: Plants; G: Digital thermometer; H: 100 mL sampling bag; I: Fan; J: Sampling tube; K: 12 V battery.

观测期从2013年12月到2014年11月，观测频率为每月1次，每月上旬晴天进行采样，观测时间选择在9:00-11:00 [23-25]之间. 将箱子固定后，每隔10 min取1次样，共采集4个样品，用Agilent 7890A气相色谱仪测定CO_2浓度. 炉温、注射器和检测器的温度分别是70、150和250 ℃，色谱柱采用长度为2 m、直径2 mm的60-80目Porapak Q填充物来分离CO_2，载气（N_2）流速48 mL/min，燃气H_2和压缩空气的流速分别为45 mL/min和375 mL/min.

大气温度和相对湿度通过便携式气象仪（Kestrel 4200）进行测定，水温、水质（溶解氧、总盐度、pH）由Hach HQ40d便携式测定仪测定，土壤温度湿度用Luge L99-TWS-1测定，湖水氨氮含量用纳氏试剂分光光度法（HJ 535-2009 GB 7479-87）测定.

表1 海珠湖样点基本特征

Table 1 Characteristics of sampling plots in Haizhu Lake

植物类型 Plant	水位 WL (*H*/m)	植物密度 Density of the plants (*N*)	植物高度 Height of the plants (*h*/cm)	种植面积 Planting area (*A*/km^2)
无 None	0-0.30	0	0	0.53
美人蕉 *Canna indica*	0-0.36	40±5	33.5-132	0.21
野芋 *Colocasia tonoimo*	0-0.12	36±4	33.7-93	0.13
蓝花草 *Aphelandra ruellia*	0-0.12	241±18	31.2-117	0.084

1.3 计算方法

通过静态箱计算的温室气体通量可用以下公式[24, 26]表示：

$$F=\rho\times H\times\frac{P}{P_0}\times\frac{T_0}{T}\times\frac{\Delta C}{\Delta t}\qquad\text{（公式1）}$$

式中：F为气体交换通量（mg m^{-2} h^{-1}），ρ为标准状态下CO_2密度（1.963 mg/mL）；H为采样箱高度（m）；P为采样点的气压（kPa）；P_0和T_0分别为标准状态下的大气压和空气绝对温度，即为101.325 kPa和273.15 K；T为采样时该点的温度（K）；$\Delta C/\Delta t$为气体质量浓度随时间的变化率. 交换量为正值时表示系统向大气排放气体，为负值时表示系统从大气吸收气体[27-28].

1.4 数据处理

所有数据采用SPSS 19.0和Excel 2010软件进行处理，图表用Origin 8.5绘制. 采用SPSS Pearson相关性系数分析不同处理条件下，各个环境因子和CO_2通量的相关性大小.

2 结果与分析

2.1 CO_2通量季节变化特征

淹水区的实验表明，不同植被类型城市湿地有较大的季节性差异（图2），美人蕉群落呈现双峰趋势，年平均通量为−525.62 mg m^{-2} h^{-1}，分别在3月、7月CO_2通量达到峰值，为−1 168.37、−813.56 mg m^{-2} h^{-1}，在5月出现CO_2通量最低值，为−254.62 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差4.6倍. 野芋群落呈现双峰趋势，年平均通量为−290.43 mg m^{-2} h^{-1}，5、10月通量分别为−519.65、−557.68 mg m^{-2} h^{-1}，在3月出现CO_2通量最低值，为−87.75 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差5.9倍. 蓝花草群落呈现单峰趋势，年平均通量为−373.05 mg m^{-2} h^{-1}，在9月在通量达到峰值，为−751.02 mg m^{-2} h^{-1}，在5月出现CO_2通量最低值，为−173.03 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差4.3倍. 而无植被覆盖湿地年平均通量为−46.75 mg m^{-2} h^{-1}，3月达到峰值，为−412.56 mg m^{-2} h^{-1}，在4月出现CO_2通量最小值，为103.33 mg m^{-2} h^{-1}，在4、8、11月由CO_2的汇转化为源.

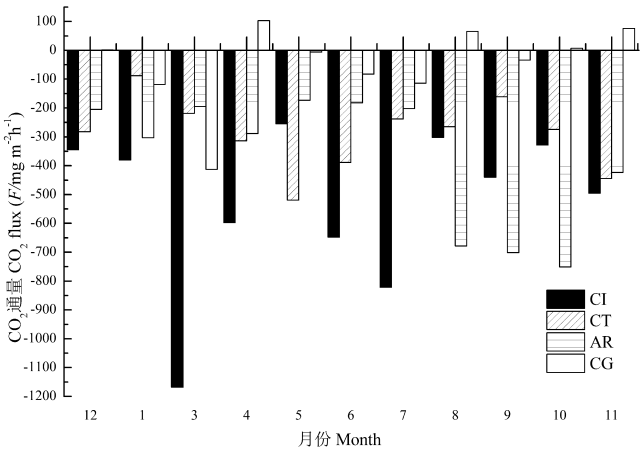


图2 海珠淹水区植物群落样点CO_2排放季节性变化规律. CI：美人蕉；CT：野芋；AR：蓝花草；CG：对照.

Fig. 2 Seasonal variations of carbon dioxide emission from the wetland plots of Haizhu Lake. CI: *Canna indica*; CT: *Colocasia tonoimo*; AR: *Aphelandra ruellia;* CG: Control group.

在无水区的实验结果（图3）表明，美人蕉群落呈现单峰趋势，年平均通量为−442.79 mg m^{-2} h^{-1}，在11月CO_2通量达到峰值，为−726.35 mg m^{-2} h^{-1}，在9月出现CO_2通量最低值，为−88.73 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差7.1倍. 野芋群落呈现单峰趋势，年平均通量为−303.78 mg m^{-2} h^{-1}，在5月CO_2通量达到峰值，为−607.57 mg m^{-2} h^{-1}，在1月出现CO_2通量最低值，为−143.76 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差4.2倍. 蓝花草群落呈现单峰趋势，年平均通量为−291.06 mg m^{-2} h^{-1}，在9月在通量达到峰值，为−547.70 mg m^{-2} h^{-1}，在5月出现CO_2吸收最低值，为−146.19 mg m^{-2} h^{-1}，两者相差3.7倍. 而无植被覆盖湿地年平均通量为91.06 mg m^{-2} h^{-1}，7月为246.72 mg m^{-2} h^{-1}，10月最低值为18.84 mg m^{-2} h^{-1}，全年表现为CO_2的源.

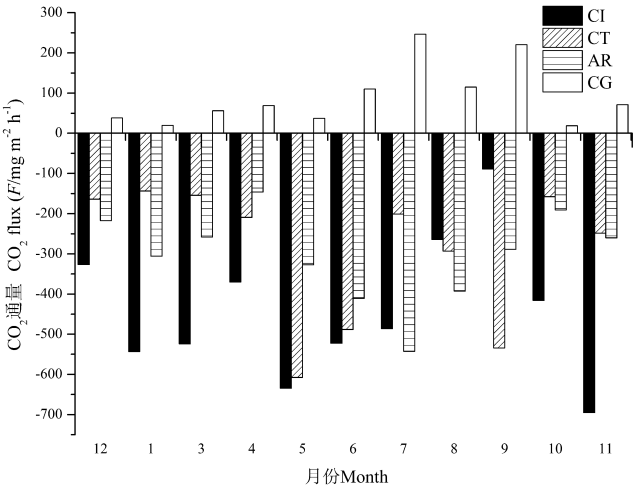


图3 海珠湖无水区植物群落样点CO_2排放季节性变化规律. CI：美人蕉；CT：野芋；AR：蓝花草；CG：对照.

Fig. 3 Seasonal variations of CO_2 flux from the shore plots of Haizhu Lake. CI: *Canna indica*; CT: *Colocasia tonoimo*; AR: *Aphelandra ruellia;* CG: Control group.

淹水区的CO_2通量的季节强弱表现为春季＞夏季＞秋季＞冬季，而无水区的CO_2通量则表现为夏季＞春季＞秋季＞冬季. 两者的差异可能主要在于淹水区植物在春季生长旺盛[29]，湖水中含有的氮、磷元素为湿地植物提供的生长必需的养分，增强了湿地植物的CO_2固定能力. 到了夏季，淹水区的植物、土壤的呼吸也随之增强[30]，导致湿地CO_2排放增多，使其夏季的CO_2通量低于春季时的通量. 而无水区湿地缺少湖水的干预，其湿地CO_2通量主要受土壤和植物影响[31-32]，夏季的通量高于春季.

2.2 影响湿地CO_2通量的环境因素

2.2.1 植物群落对CO_2通量的影响 3种群落的通量显著高于空白对照组，达到极显著差异（$P < 0.01$）. 其中，无水区和淹水区美人蕉群落CO_2通量显著大于野芋和蓝花草群落（$P < 0.05$），说明了美人蕉群落是城市湿地内固定CO_2能力较强的湿地植物，其能力远大于野芋和蓝花草群落. 对于无水区的植物群落，野芋CO_2通量明显高于蓝花草（$P < 0.05$）；对于淹水区的植物群落，野芋CO_2通量与蓝花草无显著性差异（$P > 0.05$），说明了两者固定CO_2的能力相差不大. 在城市湿地生态系统中，有植被覆盖的湿地的CO_2固定能力显著高于无

植被覆盖的湿地，而且植被物种对整个湿地生态系统的CO_2通量作用相当显著，说明湿地植物能够有效吸收CO_2，增加了生态系统的固碳能力[33]，结果与前人的研究成果[34]一致. 3种湿地植物的CO_2通量大小比较为美人蕉＞蓝花草＞野芋，原因在于三者的叶面积大小、生物量等存在差异，美人蕉的叶片呈卵状长椭圆形，长约20-40 cm，宽约10 cm，而蓝花草的叶片呈线状披针形，叶长约8-15 cm，叶宽约0.5-1.0 cm，远小于美人蕉的叶片，而叶片面积越大，植物的光合速率也越大[35]，因此，美人蕉的CO_2固定能力远大于蓝花草. 野芋的叶片呈盾状卵形，长约20-60 cm，宽约25-30 cm，虽然叶片面积较大，但是其生物量远小于上述两者. 由于生物量越小，植物生产力越小[36]，所以野芋的CO_2固定能力小于蓝花草.

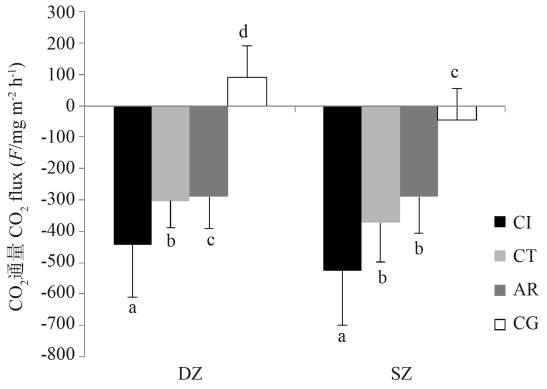


图4 不同水位的湿地植物CO_2通量平均值比较. CI：美人蕉；CT：野芋；AR：蓝花草；CG：对照；DZ：无水区；SZ：淹水区. 不同字母表示两种湿地的CO_2通量达到显著差异（$P < 0.05$）.

Fig. 4 Comparison of average CO_2 flux from wetlands of 3 types of plants in different hydraulic conditions. CI: *Canna indica*; CT: *Colocasia tonoimo*; AR: *Aphelandra ruellia*.; CG: Control group; DZ: Dry zone; SZ: Submerged zone. Lowercase letters indicate significant difference between wetlands at 0.05 level.

2.2.2 **水力条件对CO_2通量的影响** 淹水区植物的CO_2通量均与无水区的无显著性差异（$P > 0.05$），而淹水区的空白样方的CO_2通量明显低于无水区的通量，达到极显著差异（$P < 0.01$）. 由此可知，水位主要通过影响土壤呼吸以限制土壤的CO_2排放量，对植物的影响不大. 水位是影响湿地CO_2排放的重要控制因子之一[33, 37]，不但能直接改变湿地的理化性状，如养分的有效性、基质的缺氧程度、基质盐度、沉淀性质和pH等，而且是最终选择生物群落的主要因素之一[38]. 随着水位升高，湿地会淹没在湖水中，土壤呼吸效率下降[39]，土壤微生物处于厌氧环境，呼吸受到抑制[40]，CO_2排放减少. 同时，健康的湿地在水位较高的季节，固碳能力也相对较高[33]. 因此，高水位湿地通过减少土壤排放CO_2以及增加植物的CO_2固定量，以提高湿地整体的CO_2固碳能力.

2.2.3 温度对CO_2通量的影响 对于无水区无植被样方，CO_2通量与大气温度呈正相关关系（$r = 0.57$, $P < 0.05$），表明大气温度越高，土壤的CO_2通量越大；对于无水区植物群落，美人蕉、野芋、蓝花草群落的CO_2通量与大气温度相关性系数分别为−0.32、−0.50、−0.61（$P < 0.05$）；对于淹水区湿地，无植被湿地、美人蕉、野芋、蓝花草群落的CO_2通量与湖水温度相关性系数分别为−0.48、−0.21、−0.65、−0.27（$P <$ 0.05），其结果与其他研究的成果[37, 41]相同，可知温度是土壤CO_2通量变化的影响因子，这与前人研究结果[42]一致. 温度可以通过提高作物根系的呼吸、加速土壤中有机质的分解和提高微生物的活性等促进CO_2的释放[11, 43]. 在全球暖化背景下，城市湿地更容易受到大气以及水体温度影响的响应，排放更多CO_2，削弱城市湿地固定CO_2的能力.

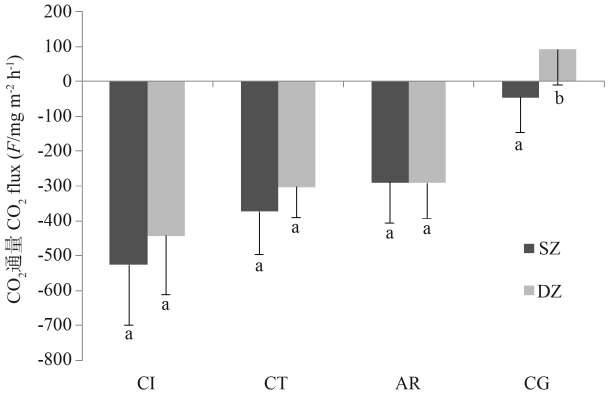


图5 3种湿地植物群落不同水位的CO_2通量同平均值比较. CI：美人蕉；CT：野芋；AR：蓝花草；CG：对照；DZ：无水区；SZ：淹水区. 不同字母表示相邻两种湿地CO_2通量达到显著差异（$P < 0.05$）.

Fig. 5 Comparison of average CO_2 flux from wetlands of 3 types of plants. CI: *Canna indica*; CT: *Colocasia tonoimo*; AR: *Aphelandra ruellia*; CG: Control group; DZ: Dry zone; SZ: Submerged zone. Lowercase letters indicate significant difference between wetlands at 0.05 level.

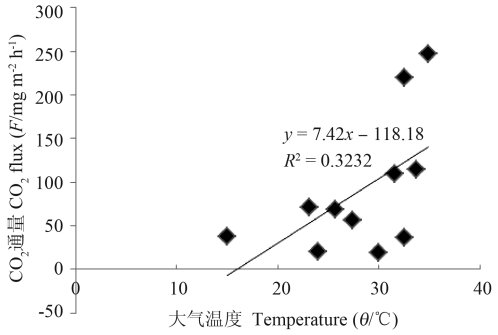


图6 湿地CO_2通量与大气温度的关系.

Fig. 6 Relationship between CO_2 flux and atmospheric temperature.

2.2.4 **湖水水质（氨氮）对CO_2通量的影响** 海珠湖湖水氨氮与淹水区美人蕉群落的CO_2通量的相关性达到了极显著水平（$r = -0.87$, $P < 0.01$），与空白对照组相比（$r = -0.81$, $P < 0.01$），两者拟合曲线（图7），两者的线性关系分别为$y = -197.5x + 130$（$R^2 = 0.66$）、$y = -404.7x - 163.4$（$R^2 = 0.76$），说明了水中氨氮浓度在0-2.5 mg/L内，能显著增加湿地固定CO_2. 研究表明，水体氮含量上升，湿地土壤微生物分解水中氨氮，为湿地植物提供可利用的氮元素，促使其固定更多的CO_2，导致湿地CO_2通量显著提高[2, 44]. 因此，湖水氨氮能显著促进湿地吸收CO_2.

2.3 与其他湿地类型的CO_2通量比较

将本研究结果与国内外其它类型自然湿地进行比较，如表2所示. 海珠湖美人蕉湿地比滩涂湿地[46]、半人工湖湿地[47]、潮汐湿地[48]、泥炭草甸[49]更能吸收CO_2，其吸收能力

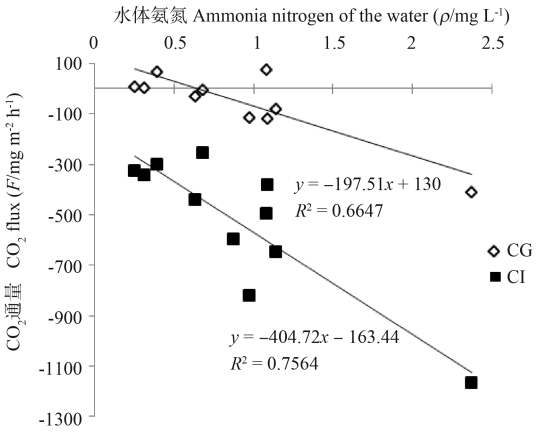


图7 湿地淹水区CO_2通量与水体氨氮的关系. CI: 美人蕉; CG: 对照.
Fig. 7 Relationship between CO_2 flux and ammonia nitrogen of the water. CI: *Canna indica*; CG: Control group.

仅次于上海崇明岛东滩湿地[45], 说明城市湿地与自然湿地一样, 也能具有较强的CO_2固定能力, 是城市生态系统中重要的碳汇. 同时, 由于广州市地处亚热带气候地区, 气候常年温暖湿润, 适合美人蕉、蓝花草、野芋等湿地植物常年生长, 有助于提高湖滨湿地的碳汇能力. 因此, 根据城市湿地的气候、自然条件, 选择适宜的本土湿地植物在控制城市CO_2排放、城市湿地的低碳化规划设计和管理过程中具有重要的作用.

2.4 海珠湖CO_2固定量估算

湿地具有很高的初级生产力, 湿地植物可通过光合作用固定大气中的CO_2, 在全球碳循环中占有极其重要的地位[50]. 研究表明, 湿地植物净同化的碳只有15%再释放到大气中[51], 因此湿地生态系统是一个重要的碳汇. 根据本研究结果, 海珠湖美人蕉、野芋、蓝花草的CO_2年固定量分别为4.52、2.55、2.96 kg/m^2, 2014年城市湿地的CO_2固定量为1 474.84 t, 高于俄罗斯科雷马河湿地16.06 t [52]、天津湿地的232.37 t [53], 表现为较强的CO_2的汇.

3 结论

海珠湖城市湿地CO_2通量具有明显的季节性差异, 美人蕉、野芋、蓝花草3种湿地植物的CO_2通量的季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季, 说明温度是造成城市湿地CO_2通量季节性变化的主要环境因子.

城市湿地中水生美人蕉湿地的CO_2吸收能力最强, 蓝花草湿地次之, 野芋湿地最弱, 说明叶面积较大或生物量较大的湿地植物具有更强的CO_2吸收能力. 在植物的生长季节中, 湿地CO_2通量显著高于其非生长季节, 此时城市湿地植被生长旺盛, 固碳能力增强, 和城市绿地[54]一样, 是城市中相当重要的碳汇.

水力条件也是影响城市湿地CO_2排放的主要环境因子, 高水位主要通过限制土壤呼吸以及增加植物的CO_2固定能力, 以减少湿地整体的CO_2排放. 此外, 水中氨氮浓度在0-2.5 mg/L内能显著促进湿地吸收CO_2.

在城市湿地的低碳化规划设计和管理过程中, 可考虑种植叶面积大或者生物量较大的湿地植物, 并在其非生长季

表2 不同湿地CO_2通量比较
Table 2 Comparison of CO_2 flux from different wetlands

湿地地点 Site	TP	OP	CDF (F/mg m^{-2} h^{-1})	参考文献 References
上海市崇明岛东滩 Chongming Dongtan, Shanghai, China	盐沼带 (AL) Salty marsh beach (AL)	2004-2005	–24.80	[45]
	潮滩 (SM) Intertidal beach (SM)		–794.00	
	光滩带 (N) Bare beach (N)		–79.80	
	滩涂湿地 (AS) Intertidal wetland (AS)	2012.03-2012.12	–101.93	[12]
湖北省天鹅洲 Swan Islet, Hubei Province, China	滩涂湿地 (CC、HA) Intertidal wetland (CC, HA)	2005.05-2006.04	–388.80	[46]
美国俄亥俄州牛扼湖 Olentangy River Wetland, Ohio, USA.	半人工湖湿地 (N) Seasonal created riverine wetland (N)	2009.09-2010.09	–10.5	[47]
巴西尼格罗河盆地 Negro River Basin, Brazil	潮汐湿地 (N) Interfluvial wetland (N)	2005.02-2006.01	335.06	[48]
荷兰Horstermeer Horstermeer, Holand	泥炭草甸 (HL、EA) Peaty meadow	2004-2006	666-887	[49]
广东省广州市海珠湖 Haizhu Lake, Guangzhou, China	湖滨湿地 (CI) Lakeside wetland (CI)	2013.12-2014.11	–515.90	本研究 This research
	湖滨湿地 (AR) Lakeside wetland (AR)		–338.41	
	湖滨湿地 (CT) Lakeside wetland (CT)		–290.74	
	湖滨湿地 (N) Lakeside wetland (N)		–46.75	

AL: 藻类; SM: 海三棱藨草; N: 无植被; AS: 芦苇; CC: 灰化苔草; HA: 牛鞭草; HL: 绒毛草; EA: 大问荆; CI: 美人蕉; CT: 野芋; AR: 蓝花草; TP: 湿地类型; OP: 研究时段; CDF: CO_2通量.
AL: Algae; SM: *Scirpus mariqueter*; N: Without plants; AS: *Acrocephalus scirpaceus*; CC: *Carex cinerascens* Kükenth; HA: *Hemarthria altissima*; HL: *Holcus lanatus*; EA: *Equisetum arvense*; CI: *Canna indica*; CT: *Colocasia tonoimo*; AR: *Aphelandra Ruellia*; TP: Type of wetland (plant); OP: Observation period; CDF: CO_2 flux.

节种植或者修剪, 使城市湿地在植物生长季节时候保持较高的碳汇能力; 通过维持城市湿地的高水位条件减少城市湿地的CO_2排放; 在城市湿地深度处理地表水的过程中, 湖水中少量的氨氮能显著增强湿地吸收CO_2.

参考文献 [References]

1 Chen QF, Ma JJ, Liu HH, Zhao CS, Liu W. Characteristics of greenhouse gas emission in the Yellow River Delta wetland [J]. *Intern Biodeter Biodegr*, 2013, **85**: 646-651

2 宋长春, 张丽华, 王毅勇, 赵志春. 淡水沼泽湿地CO_2、CH_4和N_2O排放通量年际变化及其对氮输入的响应[J]. 环境科学, 2006, **27** (12): 2369-2375 [Song CC, Zhang LH, Wang YY, Zhao ZC. Annual dynamics of CO_2, CH_4, N_2O emissions from freshwater marshes and affected by nitrogen fertilization [J]. *Chin J Environ Sci*, 2006, **27** (12): 2369-2375]

3 IPCC. Land-use, Land-use Change And Forestry [M]// Watson R, Noble I, Bolin B. A Special Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 45-49

4 徐小锋, 宋长春, 宋霞. 小叶章生态系统根际土壤微生物及CO_2、CH_4、N_2O动态(英文) [J]. 生态学报, 2005, **25** (1): 182-187 [Xu XF, Song CC, Song X. Linking of microorganisms to CO_2, CH_4 and N_2O dynamics in *Calamagrostis angustifolia* rhizosphere soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (1): 182-187]

5 Zeng ZQ, Zhang CM, Li J, Yang N, Li XH, Niu YD, Wu ZJ. Carbon stock and carbon cycle of wetland ecosystem [J]. *Asian Agric Res*, 2014, **7** (2): 64-68

6 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 丁恺, 王艳芬, 崔骁勇, 梅旭荣. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征[J]. 生态学报, 2014, **34** (15): 4400-4411 [Li Y, Kang XM, Hao YB, Ding K, Wang YF, Cui XY, Mei XR. Carbon, water and heat fluxes of a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (15): 4400-4411]

7 Koelbener A, Ström J, Edwards PJ. Plant species from mesotrophic wetlands cause relatively high methane emissions from peat soil [J]. *Plant Soil*, 2010, **326** (1): 147-158

8 Zhang CB, Ge HY, Ying S. Plant species richness enhanced the methane emission in experimental microcosms [J]. *Atmos Environ*, 2012, **62**: 180-183

9 Xiao SB, Wang YC, Liu DF, Yang ZJ, Lei D, Zhang C. Diel and seasonal variation of methane and carbon dioxide fluxes at Site Guojiaba, the Three Gorges Reservoir [J]. *J Environ Sci*, 2013, **25** (10): 2065-2071

10 Beringer J, Livesley SJ, Randle J, Hutley LB. Carbon dioxide fluxes dominate the greenhouse gas exchanges of a seasonal wetland in the wet–dry tropics of northern Australia [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, **182-183**: 239-247

11 欧强, 王江涛, 周剑虹, 李艳, 姜楠, 王开运. 滨海湿地不同水位梯度下的土壤CO_2通量比较[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (6): 992-998 [Ou Q, Wang JT, Zhou JH, Li Y, Jiang N, Wang KY. Comparison of soil CO_2 flux among different water levels in coastal wetlands [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (6): 992-998]

12 胡泓, 王东启, 李杨杰, 陈振楼, 吴杰, 尹秋晓, 管永健. 崇明东滩芦苇湿地温室气体排放通量及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2014, **27** (1): 43-50 [Hu H, Wang DQ, Li YJ, Chen ZL, Wu J, Yin QX, Guan YJ. Greenhouse gases fluxes at Chongming Dongtan *Phragmites australis* wetland and the influencing factors [J]. *Res Environ Sci*, 2014, **27** (1): 43-50]

13 孙海龙, 张彦东, 吴世义. 东北温带次生林和落叶松人工林土壤CH_4吸收和N_2O排放通量[J]. 生态学报, 2013, **33** (17): 5320-5328 [Sun HL, Zhang YD, Wu SY. Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (17): 5320-5328]

14 于浩, 李宁. 湖泊碳循环及碳通量的估算方法[J]. 环境科技, 2008, **21** (S2): 1-5 [Yu H, Li L. Carbon cycle of lake and estimate method of air-water carbon dioxide exchange quantifies [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **21** (S2): 1-5]

15 窦军霞, 刘伟东, 苗世光, 李炬. 北京城郊地区二氧化碳通量特征研究[J]. 生态学报, 2015, **35** (15): 1-14 [Dou JX, Liu WD, Miao SG, Li J. Carbon dioxide fluxes in a suburban area of Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (15): 1-14]

16 李玉凤, 刘红玉, 郑囡, 曹晓. 基于功能分类的城市湿地公园景观格局——以西溪湿地公园为例[J]. 生态学报, 2011, **31** (4): 1021-1028 [Li YF, Liu HY, Zheng N, Cao X. A functional classification method for examining landscape pattern of urban wetland park: a case study on Xixi Wetland Park, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (4): 1021-1028]

17 王立龙, 陆林. 湿地公园研究体系构建[J]. 生态学报, 2011, **31** (17): 5081-5095 [Wang LL, Lu L. The studying system construction of wetland parks [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (17): 5081-5095]

18 张庆辉, 赵捷, 朱晋, 程莉, 海全胜, 同丽嘎. 中国城市湿地公园研究现状[J]. 湿地科学, 2013, **11** (1): 129-135 [Zhang QH, Zhao J, Zhu J, Cheng L, Hai QS, Tong LG. The studying system construction of wetland parks [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **11** (1): 129-135]

19 王立龙, 陆林, 唐勇, 汪长根. 中国国家级湿地公园运行现状、区域分布格局与类型划分[J]. 生态学报, 2010, **30** (9): 2406-2415 [Wang LL, Lu L, Tang Y, Wang CG. Running status, distribution pattern and type classification of the state-level wetland parks in China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (9): 2406-2415]

20 Zhou XP, Wang XK, Tong L, Zhang HX, Lu F, Zheng FX, Hou PQ, Song WZ, Ouyang ZY. Soil warming effect on net ecosystem exchange of carbon dioxide during the transition from winter carbon source to spring carbon sink in a temperate urban lawn [J]. *J Environ Sci*, 2012, **24** (12): 2104-2112

21 洪淑媛, 梁世铃. 海珠湖水生植物配置和应用研究[J]. 广东园林, 2012, **34** (3): 63-65 [Hong SY, Liang SL. The configuration and application of aquatic plants in Haizhu Lake of Guangzhou [J]. *J Guangdong Landscape Arch*, 2012, **34** (3): 63-65]

22 段晓男, 王效科, 陈琳, 牟玉静, 欧阳志云. 乌梁素海湖泊湿地植物区CH_4排放规律[J]. 环境科学, 2007, **28** (3): 455-459 [Duan XN, Wang XK, Chen L, Mu YJ, Ouyang ZY. Methane emission from aquatic vegetation zones of Wuliangsu Lake, Inner Mongolia [J]. *Chin J Environ Sci*, 2007, **28** (3): 455-459]

23 Sha CY, William Ülo, Mitsch J. Methane emissions from freshwater riverine wetlands [J]. *Ecol Eng*, 2011 (37): 16-24

24 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 曹广民, 王跃思, 杜明远, 李俊, 李英年. 涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较[J]. 应用生态学报, 2008, **19** (2): 290-298 [Zheng ZF, Yu GR, Sun XM, Cao GM, Wang YS, Du MY, Li J. , Li YN. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2008, **19** (2): 290-298]

25 Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum [J]. *Agric For Meteorol*, 1999,

93 (2): 121-139

26 Mielnick PC, Dugas WA. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32** (2): 221-228

27 陈伟民, 黄祥飞. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005 [Chen WM, Huang XF. The research methods in the lake ecosystem. [M]. Beijing. China Environmental Science Press, 2005]

28 刘惠, 赵平, 孙谷畴, 林永标, 饶兴权, 王跃思. 华南丘陵区冬闲稻田CO_2、CH_4和N_2O的排放特征[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (1): 57-62 [Liu H, Zhao P, Sun GC, Lin YB, Rao XQ, Wang YS. Characteristics of CO_2, CH_4 and N_2O emissions from winter-fallowed paddy fields in hilly area of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (1): 57-62]

29 Søvik AK, Kløve B. Emission of N_2O and CH_4 from a constructed wetland in southeastern Norway [J]. *Sci Tot Environ*, 2007, **380** (1-3): 28-37

30 沙晨燕, 王敏, 王卿, 陆健健. 湿地碳排放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2011, **30** (9): 2072-2079 [Sha CY, Wang M, Wang Q, Lu JJ. Wetland methane and carbon dioxide emission and affecting factors [J]. *Chin J Ecol*, 2011, **30** (9): 2072-2079]

31 Str M Lena, C Torben R. Below ground carbon turnover and greenhouse gas exchanges in a sub-arctic wetland [J]. *Soil Biol Biochem*, 2007, **39** (7): 1689-1698

32 Miao Y, Song C, Sun L, Wang X, Meng H, Mao R. Growing season methane emission from a boreal peatland in the continuous permafrost zone of Northeast China: 3ffects of active layer depth and vegetation [J]. *Biogeosciences*, 2012, **9** (11): 4455-4464

33 孟伟庆, 吴绽蕾, 王中良. 湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件[J]. 生态环境学报, 2011, **20** (8): 1359-1366 [Meng WQ, Wu ZL, Wang ZL. Control factors and critical conditions between carbon sinking and sourcing of wetland ecosystem [J]. 2011, **20** (8): 1359-1366]

34 Ström M, Mikhail M, Christensen TR. Species-specific effects of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from wetlands [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **75** (1): 65-82

35 王义芹, 杨兴洪, 李滨, 童依平, 李振声. 小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J]. 华北农学报, 2008, **23** (S2): 10-15 [Wang YQ, Yang XH, Li B, Tong YP, Li ZS. Study on the relation between leaf area, photosynthetic rate and yield of wheat [J]. *Acta Agric Bor-Sin*, 2008, **23** (S2): 10-15]

36 Nunes L, Lopes D, Rego FC, Gower ST. Aboveground biomass and net primary production of pine, oak and mixed pine–oak forests on the Vila Real district, Portugal [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **305**: 38-47

37 仝川, 鄂焱, 廖稷, 姚顺, 王维奇, 黄佳芳, 张林海, 杨红玉, 曾从盛. 闽江河口潮汐沼泽湿地CO_2排放通量特征[J]. 环境科学学报, 2011, **32** (12): 2830-2840 [Tong C, E Y, Liao S, Yao S, Wang WQ, Huang JF, Zhang LH, Yang HY, Zeng CS. Carbon dioxide emission from tidal marshes in the Min River Estuary [J]. *Acta Sci Circumst*, 2011, **32** (12): 2830-2840]

38 马安娜, 陆健健. 湿地生态系统碳通量研究进展[J]. 湿地科学, 2008, **6** (2): 116-123 [Ma AN, Lu JJ. The Progress of Research on Carbon Flux in Wetland Ecosystems [J]. *Wetland Sci*, 2008, **6** (2): 116-123]

39 Mantlana KB, Arneth A, Veenendaa EM, Wohland P, Wolski P, Kolle O, Wagner M, Lloyd J. Photosynthetic properties of C4 plants growing in an African savanna/wetland mosaic [J]. *J Exp Bot*, 2008 (59): 3941-3952

40 Davison EA, Janssens IA, Luo YQ. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q10 [J]. *Global Change Biol*, 2006, **12** (2): 154-164

41 孙春健, 王春林, 申双和, 张锦标. 珠三角城市绿地CO_2通量的季节特征[J]. 生态学报, 2012, **32** (4): 269-278 [Sun CJ, Wang CL, Shen SH, Zhang JB. Seasonal characteristics of CO_2 fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (4): 269-278]

42 Zhou GS, Jia BR, Han GX, Zhou L. Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR) [J]. *Sci China (Ser C: Life Sci)*, 2008, **51** (3): 254-262

43 刘惠, 赵平, 王跃思, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵区农林复合生态系统稻田CO_2排放及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2006, **25** (5): 471-476 [Liu H, Zhao P, Wang YS, Lin YB, Rao XQ. CO_2 emission and its affecting factors in paddy field of agroforestry ecosystem in South China hilly area [J]. *Chin J Ecol*, 2006, **25** (5): 471-476]

44 Picek T, Cizkova H, Dusek J. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland—Plants as important sources of carbon [J]. *Ecol Eng*, 2007, **31** (2): 98-106

45 杨红霞. 长江口滨岸湿地CH_4和CO_2的排放和吸收[D]. 上海: 华东师范大学, 2006 [Yang HX. Emission and consumption of CH_4, CO_2 in coastal wetland of Yangtze estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006]

46 黎明. 天鹅洲湿地生态系统CO_2通量动态变化及其影响因子评价[D]. 武汉: 中国科学院武汉植物园, 2007 [Li M. Study on dynamics of CO_2 flux in Swan Islet Wetland and effeets of environmental factors [D]. Graduate School of the Chinese Academy of Science, 2007]

47 沙晨燕. 不同类型河滨湿地甲烷和二氧化碳排放的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011 [Sha CY. Methane and carbon dioxide emissions from different types of riverine wetlands [D]. Shanghai: East China Normal University, 2011]

48 Belger L, Forsberg BR, JM Melack. Carbon dioxide and methane emissions from interfluvial bwetlands in the upper Negro River basin, Brazil [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **105**: 171-183

49 Hendriks DMD, Huissteden JV, Dolman AJ, Molen MKVD. The full greenhouse gas balance of an abandoned peat meadow [J]. *Biogeosci Discuss*, 2007, **4** (1): 411-424

50 梅雪英, 张修峰. 长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以崇明东滩芦苇带为例[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16** (2): 269-272 [Mei XY, Zhang XF. Carbon storage and fixation by a typical wetland vegetation in Changjiang River Estuary-A case study of Phragmites australis in east beach of Chongming Island [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2008, **16** (2): 269-272]

51 Hans B, Brian KS, Bent L. Are Phragmites-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? [J]. *Aquat Bot*, 2001, **69** (2-4): 313-324

52 Corradi C, Kolle O, Walter O, Zimov SA, Schulze ED. Carbon dioxide and methane exchange of a north-east Siberian tussock tundra 2005, **11** (11): 1910-1925

53 Meng S, Lee Y. Preliminary research of carbon-sink effect of Tianjin's wetlands system in the context of global climate change [Z]. Bali Island, Indonesia: 2014

54 李霞, 孙睿, 李远, 王修信, 谢东辉, 严晓丹, 朱启疆. 北京海淀公园绿地二氧化碳通量[J]. 生态学报, 2010, **30** (24): 6715-6725 [Li X, Sun R, Li Y, Wang XX, Xie DH, Yan XD, Zhu QJ. Carbon dioxide fluxes on green space in Haidian Park, Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (24): 6715-6725]