

# 三峡水库澎溪河新生湿地 CO<sub>2</sub> 排放研究\*

吴玉源<sup>1,2</sup>, 陈 槐<sup>3</sup>, 林芳森<sup>1,2</sup>, 袁兴中<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 资源及环境科学学院, 重庆 400044; 2. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部  
重点实验室, 重庆 400044; 3. 西北农林科技大学 林学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 自2008年7月初至9月底,采用静态暗箱-气相色谱法观测了三峡水库澎溪河新生湿地4种植物群落的CO<sub>2</sub>排放通量。结果表明,4种植物群落CO<sub>2</sub>排放通量有明显的空间差异。蘆草群落CO<sub>2</sub>排放通量最大,其值为(627.8 ± 335.9) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>,灯芯草群落CO<sub>2</sub>排放通量最低,其值为(450.4 ± 271.5) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>。地上生物量较大的蘆草群落和双穗雀稗群落具有较大的CO<sub>2</sub>排放通量,而地上生物量较小的灯芯草群落及水烛群落CO<sub>2</sub>排放通量较小。与植物呼吸作用相关的地上生物量等生态因子有助于解释不同湿地植物群落CO<sub>2</sub>排放通量的差异。澎溪河新生湿地CO<sub>2</sub>排放通量具有典型的时间动态,即7月中旬到8月中旬之间CO<sub>2</sub>排放通量最大。水温和土壤(5 cm深度)温度与CO<sub>2</sub>排放通量显著相关( $r = 0.577, 0.557, p < 0.001$ ),湿地地表积水和湿地土壤温度季节变化可以解释澎溪河新生湿地CO<sub>2</sub>排放通量的时间变化。

**关键词:** 二氧化碳排放; 新生湿地; 澎溪河; 三峡水库

**中图分类号:** X171

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6693(2012)03-0079-05

工业革命后,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等温室气体的辐射强迫增长率在近万年来是空前的,而古气候信息已证实近50年来气候变暖是1300多年来最为异常的气候事件<sup>[1]</sup>。CO<sub>2</sub>对温室效益的贡献为70%<sup>[2-3]</sup>,其在大气中的体积分数已由工业革命前的 $270 \times 10^{-6} \sim 280 \times 10^{-6}$ 增加到目前的 $379 \times 10^{-6}$ ,增幅达36%<sup>[1]</sup>。因而,作为第一大温室气体的CO<sub>2</sub>,其源、汇研究一直是气候变化研究的重点和热点。普遍认为化石燃料燃烧是CO<sub>2</sub>最为主要的排放源。土地利用变化同样会导致CO<sub>2</sub>排放到大气中,研究较多的有热带雨林砍伐<sup>[3]</sup>及生物质燃烧<sup>[4]</sup>等导致的CO<sub>2</sub>排放。被IPCC列为土地利用变化类型之一的水库,其CO<sub>2</sub>排放监测和研究较为匮乏<sup>[5]</sup>。近年来,科学界逐渐认识到水库(特别是水电水库)CO<sub>2</sub>等温室气体排放及其减排的重要性<sup>[6-7]</sup>,主要关注水体、泄洪沟的温室气体排放及涡轮机带出的大量通过气泡形式排放的温室气体<sup>[8-10]</sup>。但似乎忽视了水库消落带湿地作为水库重要组成部分对水库总温室气体排放的贡献。作为水陆生态系统的交汇地带,

河岸带及湖泊消落带CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O等温室气体排放及生物学机制研究得到科学界的关注<sup>[11-14]</sup>,并逐步成为生物地球化学循环的研究热点。同理,水库消落带(特别是湿地生态系统)温室气体排放及动态的研究也相当重要,然而对水库消落带湿地CO<sub>2</sub>排放通量的研究鲜有报道。本文以三峡水库澎溪河消落带新生湿地作为研究区域,监测区域内CO<sub>2</sub>的排放通量,并探究其排放通量的影响因子。

## 1 研究区域与方法

### 1.1 研究区域概况

三峡库区开县澎溪河湿地自然保护区位于重庆市东北部,地处大巴山麓、三峡库区腹地、长江三峡水库澎溪河支流回水末端。保护区地理坐标为东经108°27'45.05"至108°35'0.05",北纬31°5'37.74"至31°12'30.26",总面积36.86 km<sup>2</sup>,由水库水域、河溪水域、消落带湿地、池塘等组成。其中永久性水域面积382 hm<sup>2</sup>,消落带湿地面积1 920 hm<sup>2</sup>。区内湿地类型多样,生境复杂,在三峡库区的消落带湿地和长

\* 收稿日期:2012-03-02 网络出版时间:2012-5-26 12:13

资助项目:科技部农业科技成果转化资金项目(No. 2011GB2F100010);重庆市科技攻关项目(国际科技合作基地建设/重点)(No. CSTC201120002)

作者简介:吴玉源,男,硕士研究生,研究方向为环境生态学;通讯作者:袁兴中,E-mail:zyxuan63@yahoo.com.cn

网络出版地址: [http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.79\\_016.html](http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120526.1213.201203.79_016.html)

江上游地区的湿地中具有较强的代表性和典型性。受北亚热带季风气候影响,区内具有冬暖夏热、四季分明、无霜期长、日照充足、降雨丰沛。多年平均气温 18.5 ℃。多年平均最高气温 23.1 ℃,多年平均最低气温 14.9 ℃。月平均气温最低为 1 月,其值为 7 ℃;月平均气温最高为 7 月,其值为 29.4 ℃。 $\geq 10$  ℃积温长达 277 d,6 062 ℃,无霜期 306 d。多年平均降水量 1 385 mm。

表 1 实验选取的湿地植物群落类型、其优势物种、地表水位和地上生物量

Tab. 1 Selected plant stands, dominant species of each stand, heir standing water depth and aboveground biomass

湿地群落类型	优势物种	地表水位/cm	地上生物量/(g · DW · m <sup>-2</sup> )
灯芯草群落	<i>Juncus amuricus</i>	2.2 (0 ~ 7)	288
水烛群落	<i>Typha angustifolia</i>	3.5 (0.5 ~ 8)	323
蔗草群落	<i>Scirpus triqueter</i>	8.7 (0 ~ 21)	387
双穗雀稗群落	<i>Paspalum distichum</i>	3.8 (0 ~ 19)	515

1.2.2 气体样品采集 气体采集用通气式静态箱法,采样箱由顶箱和底座组成,箱体用直径 30 cm 的 PVC 管制成,为防止太阳辐射下箱内温度的升高对观测结果的影响,箱体以铝膜包裹。顶箱高 30 cm,在其顶面有一铜管( $\varphi=2$  mm)以联通箱内外空气,铜管的箱内部分制作成为螺旋状。底座高 20 cm,为平衡土壤扰动对试验结果的影响,在实验开始前 48 h 就埋入实验地,其埋入深度视湿地基质的稳定程度而定,一般埋入深度为 8 ~ 10 cm。视植物群落高度情况,用加高箱(20 cm, 50 cm)增加采样箱高度。实验开始时,顶箱、底座和加高箱以橡皮条连接,以使两箱连接间的气路密闭。气体采集使用 5 mL 真空瓶,采样时间间隔为 0、10、20、30 min。

1.2.3 气体样品分析 CO<sub>2</sub> 浓度采用 PE Clarus 500 气相色谱仪进行分析,检测器为离子火焰化检测器(FID),色谱柱为 Porapak 60/80,检测器和色谱柱温度分别为 375 ℃和 35 ℃。载气为高纯氮气,氢气为燃气,空气为助燃气,流速分别为 20、50、450 mL · min<sup>-1</sup>。

1.2.4 其他样品采集与环境因子测定 气样采集的同时,记录环境温度,地表温度,水温,土壤温度(5 cm, 10 cm),氧化还原电位(5 cm, 10 cm, 15 cm),地表水位以及群落高度等。地上生物量八月中旬采集,65 ℃恒温干燥 48 h 后,称取干质量。土壤样品的采集时间同样在八月中旬。土壤理化性质按照中国土壤学会编写的土壤化学分析方法进行,有机质

## 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 本实验选取了区域内 4 种典型新生湿地植物群落(表 1):灯芯草(*Juncus amuricus*)群落,水烛(*Typha angustifolia*)群落,蔗草(*Scirpus triqueter*)群落及双穗雀稗(*Paspalum paspaeoides*)群落。于 2008 年 7 月到 9 月,每 10 d 测量一次上述 4 类典型植物群落湿地的 CO<sub>2</sub> 通量,每种群落类型设立 6 个气体采样箱,测量时间为上午 9:00-11:00。

用重铬酸钾油浴外加热法,全氮用凯氏消煮法,全磷用酸溶-钼锑抗比色法。

## 2 结果与分析

### 2.1 新生湿地植物群落 CO<sub>2</sub> 排放通量的空间差异

对研究区域 4 种植被群落类型 CO<sub>2</sub> 排放通量求均值,得出澎溪河湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量(Mean ± S. D.)为(538.4 ± 324.4) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>。这与三江平原淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量(最大值在(779.33 ~ 965.4) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>之间)<sup>[15]</sup>相比较,但高于青藏高原东部若尔盖泥炭沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量(均值为 203.22 mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>)<sup>[16]</sup>。静态暗箱-气相色谱法测定的 CO<sub>2</sub> 排放通量,包括植物、根系、土壤微生物呼吸 3 部分,即生态系统总呼吸导致的 CO<sub>2</sub> 排放通量<sup>[17]</sup>。该新生湿地较高的生态系统呼吸与其温热的亚热带气候有一定的相关性,且新生湿地处于陆生生态系统向湿地生态系统的过渡阶段,其生态系统呼吸等过程与区域内的陆生生态系统有一定的相似性(土壤理化性质等),而保持较高的生态系统呼吸。三江平原及青藏高原的研究<sup>[15-16, 18]</sup>,均发现湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量要明显低于区域内草地或草甸的 CO<sub>2</sub> 排放通量。因此,澎溪河新生湿地较高的生态系统呼吸,在整个区域的碳循环和碳动态过程中发挥着独特而重要的作用。

澎溪河湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量有明显的空间差异(图 1,表 2)。蔗草群落 CO<sub>2</sub> 排放通量最大为(627.8 ±

335.9) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>,其次为双穗雀稗群落,其 CO<sub>2</sub> 排放通量为(616.3 ± 344.7) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>,再次为水烛群落其 CO<sub>2</sub> 排放通量为(459.5 ± 304.7) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub> 排放通量最低的是灯芯草群落,其值为(450.4 ± 271.5) mg · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>。本研究中地表水位较高的湿

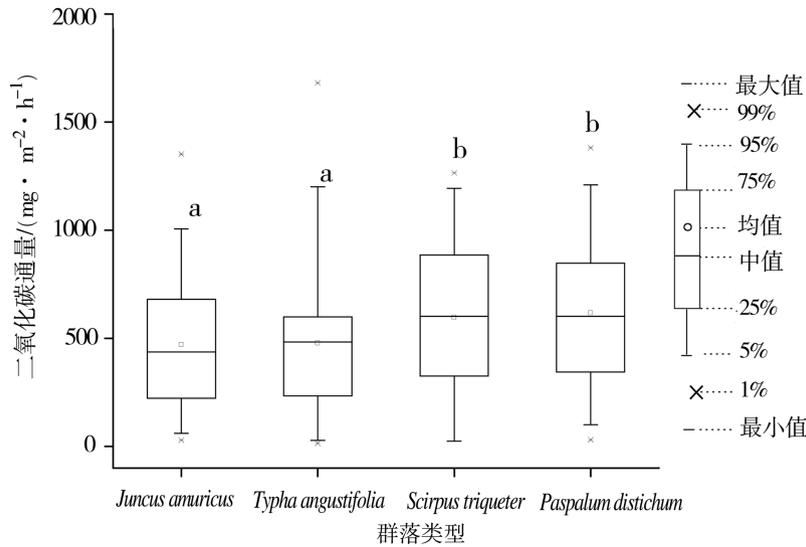


图 1 澎溪河湿地二氧化碳排放通量

Fig.1 CO<sub>2</sub> emissions in different plant stands from July to September, 2008

地(蔗草群落及双穗雀稗群落)CO<sub>2</sub> 排放通量要显著高于地表水位较低的湿地(灯芯草群落及水烛群落)。该研究结果不同于其他区域的部分研究,即水位越高,CO<sub>2</sub> 排放通量变化越小。上文已经提到,本文所研究的 CO<sub>2</sub> 排放通量包括植物、根系、土壤微生物呼吸 3 部分。在土壤水分变化较大时,土壤含水量及水位差异是 CO<sub>2</sub> 排放通量空间差异的主要影响因素<sup>[19]</sup>。而许多研究证实,在湿地土壤中,土壤水分含量充足、不成为限制土壤呼吸(包括根系、土壤微生物呼吸)的因素<sup>[20-21]</sup>。因而,植物地上部分呼吸作用的差异很可能是澎溪河湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量产生差异的主要原因<sup>[22]</sup>。本研究中地上生物量较大的蔗草群落和双穗雀稗群落具有较大的 CO<sub>2</sub> 排放通量,而地上生物量较小的灯芯草群落及水烛群落 CO<sub>2</sub> 排放通量较小(表 1,图 1)。图 1 中字母 a、b 代表不同湿地二氧化碳排放通量显著差异( $p < 0.05, n = 54$ )。与植物呼吸作用相关的地上生物量等<sup>[23]</sup>生态

表 2 不同湿地群落类型、季节变化以及其交互效益对二氧化碳通量和环境要素影响的显著性

Tab.2 Significance of impacts of stand type, season, and their combined effect on CO<sub>2</sub> emission and environmental factors in growing season

	湿地群落类型	季节变化	二者的交互效益
二氧化碳通量/(mg · m <sup>-2</sup> · h <sup>-1</sup> )	*	*	ns
表面温度/℃	**	**	**
5 cm 土壤温度/℃	**	**	**
10 cm 土壤温度/℃	**	**	**
地表水位/cm	**	**	**
植物群落高度/cm	**	ns	**
土壤含水量/%	**	ns	**
总碳的质量分数×10 <sup>-3</sup>	**	ns	**
总氮的质量分数×10 <sup>-3</sup>	**	ns	**
总磷的质量分数×10 <sup>-3</sup>	*	ns	ns
可溶性有机碳的质量分数×10 <sup>-6</sup>	**	**	**
硝态氮的质量分数×10 <sup>-6</sup>	**	**	**
铵态氮的质量分数×10 <sup>-6</sup>	**	ns	**

注: \* α<0.05, \*\* α<0.01; ns 表示无显著影响。

因子有助于解释不同湿地植物群落 CO<sub>2</sub> 排放通量的差异。

### 2.2 澎溪河新生湿地植物群落 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节动态特征

澎溪河新生湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量具有典型的季节动态(图 2),即是在 7 月中旬到 8 月中旬之间 CO<sub>2</sub> 排放通量最大,4 种不同湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化也颇为相似。该 CO<sub>2</sub> 季节排放模式在青藏高原泥炭沼泽湿地<sup>[16, 18, 24-25]</sup>,三江平原沼泽湿地<sup>[15, 22]</sup>等均有报道。同时这些研究均从温度的季节变化来解释 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化<sup>[15, 24]</sup>。本研究同样发现温度与 CO<sub>2</sub> 排放通量之间有显著的正相关性,并且发现水温及土壤 5 cm 温度与 CO<sub>2</sub> 排放通量之间的相关性尤为突出(表 2,图 3)。即,澎溪河新生湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量的季节变化很大程度上能够由湿地地表积水和湿地土壤的温度季节变化来解释。

### 3 讨论

澎溪河新生湿地 CO<sub>2</sub> 排放通量有明显的空间

差异,即不同湿地类型  $\text{CO}_2$  排放通量不同。 $\text{CO}_2$  排

素之间并不相互孤立,很可能存在内在复杂的关系,甚至于有些影响因素还未被发现或重视。例如,氮素在中土壤中的含量及存在形式影响着植物的生长状况与土壤微生物的群落结构组成,从而作用于  $\text{CO}_2$  排放通量;反过来,土壤微生物的群落结构尤其特定群落(硝化菌和反硝化菌)的代谢强度直接影响着土壤氮素的含量及存在形式,间接作用于植物和其他土壤微生物的生长代谢,而作用于  $\text{CO}_2$  排放通量。在今后的研究中,有待更深层次探讨  $\text{CO}_2$  排放通量与其影响因素之间的内在关系。

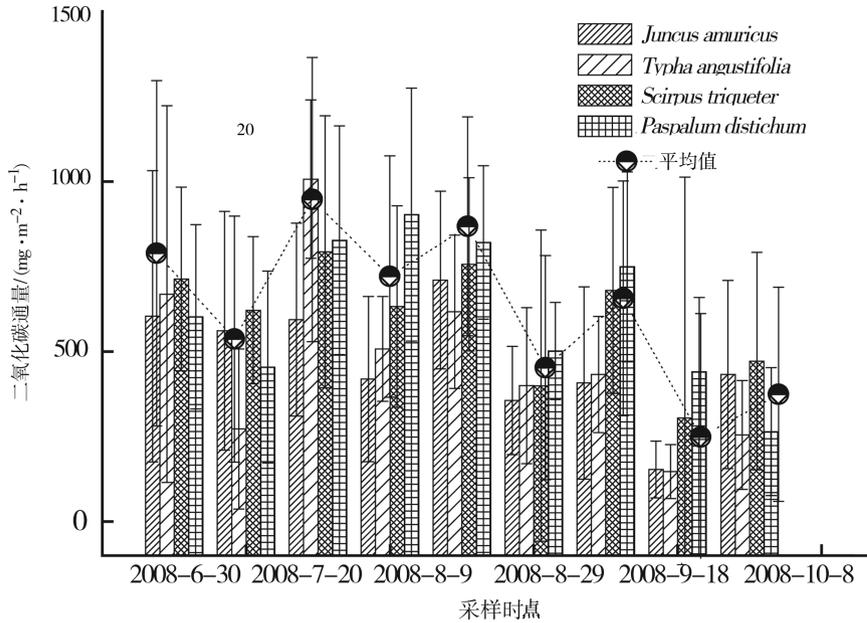


图 2 4 种典型新生湿地  $\text{CO}_2$  排放通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of  $\text{CO}_2$  fluxes from July to September, 2008

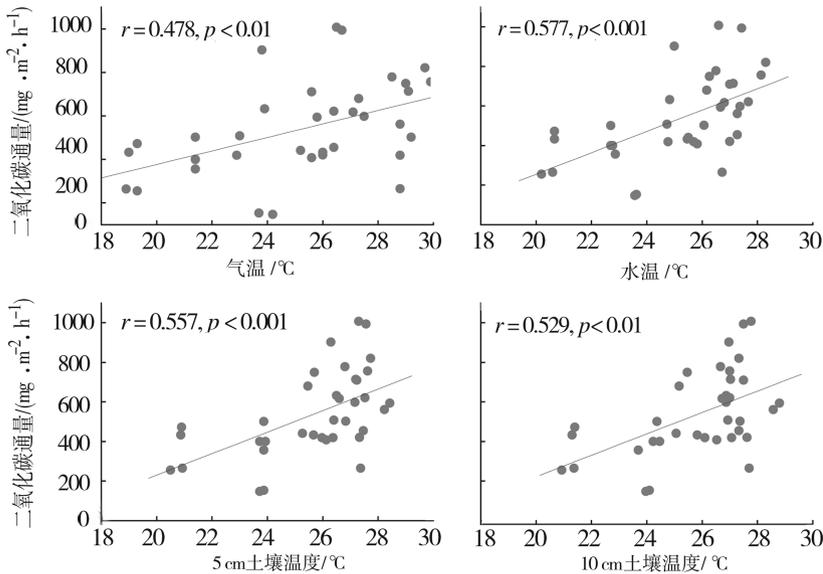


图 3 气温、水温及土壤温度与二氧化碳通量的相关性 ( $n=36$ )

Fig. 3 The relation between  $\text{CO}_2$  fluxes and air, water and soil temperatures in the littoral marches of the TGRR

排放通量的空间差异可以通过地表水位及地上生物量等来解释。澎溪河生湿地  $\text{CO}_2$  排放通量具有典型的季节动态(图 2),即在 7 月中旬到 8 月中旬之间  $\text{CO}_2$  排放通量最大。基于水温和土壤温度与  $\text{CO}_2$  排放通量显著相关,澎溪河新生湿地  $\text{CO}_2$  排放通量的季节变化能由湿地地表积水和湿地土壤的温度季节变化来解释。在湿地  $\text{CO}_2$  排放通量的各个影响因

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers, in climate change 2007: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 吴兑. 温室气体与温室效应 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 204.
- [3] House J I, Prentice I C, Le Que- re C. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric  $\text{CO}_2$  [J]. Global Change Biology, 2002, 8(11): 1047-1052.
- [4] Nevison C D, Mahowald N M, Doney S C, et al. Contribution of ocean, fossil fuel, land bio- sphere, and biomass burning carbon fluxes to seasonal and interan- nual variability in atmospheric  $\text{CO}_2$  [J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2008, 113(G1).
- [5] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inven- tories, prepared by the national greenhouse gas inven- tories programme. Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al [M]. Hayama: the Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [6] Abril G, Guerin F, Richard S, et al. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old

- tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19:GB40074.
- [7] Giles J. Methane quashes green credentials of hydropower [J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 524-525.
- [8] Guerin F, Abril G, Richard S, et al. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs; Significance of downstream rivers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33:L2140721.
- [9] Fearnside P M. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2002, 133(1-4): 69-96.
- [10] Fearnside P M. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curua-Una Dam [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, 10(4): 675-691.
- [11] Hefting M M, Bobbink R, de Caluwe H. Nitrous oxide emission and denitrification in chronically nitrate-loaded riparian buffer zones [J]. *Journal of Environment Quality*, 2003, 32(4): 1194-1203.
- [12] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, et al. Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 609-621.
- [13] van den Heuvel R N, Hefting M M, Tan N, et al. N<sub>2</sub>O emission hotspots at different spatial scales and governing factors for small scale hotspots B-8834-2011 B-9514-2011 [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(7): 2325-2332.
- [14] Wang H J, Wang W D, Yin C Q, et al. Littoral zones as the "hotspots" of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission in a hyper-eutrophic lake in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(28): 5522-5527.
- [15] 宋长春,张丽华,王毅勇,等. 淡水沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 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.
- [16] 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 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 285-289.
- [17] Turetsky M R, Wieder R K, Vitt D H. Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(7): 907-912.
- [18] 王德宣,宋长春,王跃思,等. 若尔盖高原泥炭沼泽湿地 CO<sub>2</sub> 呼吸通量特征 [J]. *生态环境*, 2005, 14(6): 880-883.
- [19] 郝庆菊,王跃思,宋长春,等. 三江平原湿地土壤 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的初步研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2004, 23(5): 846-851.
- [20] Soegaard H, Nordstroem C. Carbon dioxide exchange in a high-arctic fen estimated by eddy covariance measurements and modelling [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(5): 547-562.
- [21] 李兆富,吕宪国,杨青,等. 三江平原小叶章湿地土壤的 CO<sub>2</sub> 通量 [J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2003, 27(3): 51-54.
- [22] 卢妍,宋长春,王毅勇,等. 植物对沼泽湿地生态系统 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(11): 2306-2313.
- [23] 孙文娟,黄耀,陈书涛,等. 作物生长和氮含量对土壤-作物系统 CO<sub>2</sub> 排放的影响 [J]. *环境科学*, 2004, 25(3): 1-6.
- [24] 王俊峰,王根绪,王一博,等. 青藏高原沼泽与高寒草甸草地退化对生长期 CO<sub>2</sub> 排放的影响 [J]. *科学通报*, 2007, 52(13): 1554-1560.
- [25] 张法伟,刘安花,李英年,等. 青藏高原高寒湿地生态系统 CO<sub>2</sub> 通量 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 453-462.

(责任编辑 欧红叶)