

鄱阳湖苔草湿地非淹水期 CO₂ 释放特征*胡启武^{1,2**} 幸瑞新¹ 朱丽丽¹ 吴琴¹ 尧波¹ 刘影¹ 胡斌华³¹ 江西师范大学地理与环境学院, 南昌 330022; ² 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022; ³ 鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区, 南昌 330127)

摘要 2009年9月至2010年4月非淹水期,在鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区,选择以灰化苔草为建群种的洲滩湿地,设置土壤-植物系统(TC)、剪除植物地上部分(TJ)2个试验处理(分别代表生态系统和土壤呼吸),利用密闭箱-气相色谱法测定了非淹水期鄱阳湖苔草湿地 CO₂ 释放通量.结果表明:苔草湿地生态系统呼吸与土壤呼吸均具有明显的季节变化模式,释放速率变化范围分别为 89.57~1243.99 和 75.30~960.94 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹,土壤呼吸占生态系统呼吸的比例为 64%(39%~84%);土壤温度是苔草湿地 CO₂ 通量的主要控制因子,可以解释呼吸速率 80% 以上的变异;生态系统呼吸与土壤呼吸的温度敏感性指数(Q₁₀)分别为 3.31 和 2.75,且冬季的 Q₁₀ 值明显高于春秋季节;土壤水分与 CO₂ 释放速率之间未达到显著相关;非淹水期,鄱阳湖苔草湿地是大气 CO₂ 的汇,其强度为 1717.72 g C · m⁻².

关键词 鄱阳湖 湿地 生态系统呼吸 土壤呼吸 Q₁₀

文章编号 1001-9332(2011)06-1431-06 中图分类号 Q149 文献标识码 A

Characteristics of CO₂ emission from *Carex*-dominated wetland in Poyang Lake in non-flooded period. HU Qi-wu^{1,2}, XING Rui-xin¹, ZHU Li-li¹, WU Qin¹, YAO Bo¹, LIU Ying¹, HU Bin-hua³ (¹*School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*; ²*Ministry of Education Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China*; ³*Poyang Lake Nanji Wetland National Nature Reserve, Nanchang 330127, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(6): 1431-1436.

Abstract: By using static chamber/gas chromatography, the CO₂ fluxes in a *Carex cinerascens*-dominated wetland in the Poyang Lake Nanji Wetland National Nature Reserve were measured in non-flooded period (from September 2009 to April 2010). Two treatments were installed, *i. e.*, soil-plant system (TC) and aboveground plant removal (TJ), representing ecosystem respiration and soil respiration, respectively. There was an obvious seasonal variation in the ecosystem respiration and soil respiration. The respiration rate in treatment TC ranged from 89.57 to 1243.99 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹, and that in TJ was from 75.30 to 960.94 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹. Soil respiration accounted for 39%–84% of ecosystem respiration, with an average of 64%. Soil temperature was the main factor controlling the ecosystem respiration and soil respiration, explaining more than 80% of the respiration variance. The temperature coefficient (Q₁₀), an index of temperature sensitivity for respiration, was 3.31 for ecosystem respiration and 2.75 for soil respiration. The Q₁₀ value was higher in winter than in autumn and spring. No significant correlation was observed between soil moisture and CO₂ fluxes. In non-flooded period, the *C. cinerascens*-dominated wetland acted as a carbon sink of atmospheric CO₂, with a carbon uptake of 1717.72 g C · m⁻².

Key words: Poyang Lake; wetland; ecosystem respiration; soil respiration; Q₁₀.

湿地面积仅占地球陆地面积的 2%~3%,但其

储存的碳却占陆地土壤碳库的 18%~30%^[1].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^[2].当前,在气候变化情景下,气温升高或水文条件改变对湿地固碳功能将产生怎样的影响?湿地碳过程将发生怎样的变化?要回答这些问

* 国家自然科学基金项目(40803022)和江西省教育厅青年科学基金项目(GJJ10094)资助.

** 通讯作者. E-mail: huqiwu1979@gmail.com

2010-12-07 收稿,2011-03-12 接受.

题,关键在于全面弄清不同气候区不同湿地类型的碳排放时空格局、碳过程控制因子,以及对不同湿地类型的碳平衡加以评估.迄今,有关湿地碳循环研究大多集中于高纬^[3-4]、高山^[5-6]或低温区域(例如我国的青藏高原和三江平原地区)^[7-9],低纬度地区特别是亚热带地区的湿地碳循环研究亟待加强.

鄱阳湖独特的自然地理条件以及与长江复杂的水情关系,形成了独具特色的湖泊湿地生态系统,其面积近 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^[10].鄱阳湖湿地地处中亚热带,年均气温高达 17℃,其湿地碳过程及温度敏感性势必有别于高纬度或低温区.此外,鄱阳湖年内、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,剧烈的水文波动与植被变化必然引起湿地碳动态的极大变化.为此,本研究选择鄱阳湖苔草湿地开展 CO₂ 释放通量及影响因子研究,以期为进一步评估鄱阳湖湿地碳平衡提供基础数据,其结果对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气候变化的响应机理将具有重要意义.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地设置在鄱阳湖南矶湿地国家级自然保护区内,地理坐标为 28°52′05″—29°06′50″ N, 116°10′33″—116°25′05″ E.南矶湿地自然保护区位于鄱阳湖南部,赣江三角洲前沿地带,在南昌市新建县界内,区内除南山岛和矾山岛(乡行政机构所在地,面积仅 4 km²)外,其余为洲滩和水域,总面积约 330 km².洲滩淹没时间视当年具体水文情势一般在 3~5 个月不等,非淹水时间长达 7~9 个月.多年平均气温 17.6℃,平均降水量为 1450~1550 mm.

湿地植被主要有湿生植物、沉水植物和挺水植物 3 种类型,其中湿生植物以灰化苔草(*Carex cinerascens*)为优势种,是保护区面积最大的群丛,遍布整个湿地.该类型群落高度一般在 30~50 cm,盖度 95%~100%.群落外貌整齐,组成物种较少.主要伴生种有:下江委陵菜(*Potentilla limprichtii*)、水田碎米荠(*Cardamine lyrata*)和水蓼(*Polygonum hydropiper*)等.土壤为草甸沼泽土,pH 在 5.0~5.6 之间,有机质和全氮含量分别为 4% 和 0.19%.沉水植物以轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)及穗花狐尾藻(*Mgriophyllum spicatum*)为优势种,挺水植物以南荻(*Triarrhena lutarioriparia*)为优势种,植株高度为 140~

160 cm,盖度为 90%~98%^[11].

1.2 试验设计

选择苔草分布均一、具有代表性的地段建立试验观测点,于 2009 年 9 月至 2010 年 4 月洲滩非淹水期间,设置 2 种处理,TC:保持自然状态下的苔草土壤-植物系统,代表生态系统呼吸;TJ:齐地面剪除植物地上部分并清除地表凋落物(此工作在每次试验前 1 d 进行),代表土壤呼吸,主要包括土壤微生物对有机质的分解和植物根系呼吸两大部分;每个处理随机设置 3 个重复.

1.3 研究方法

1.3.1 气体样品的采集与分析 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,观测时间选择在 9:00—11:00 之间(代表一天中的平均值).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 20 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).采样箱外粘贴一层 3 cm 的泡沫隔热板,外覆白色防雨布,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.箱顶壁安装 2 个搅拌风扇,箱侧面分别安装电源插头、取气接口和便携式温度计探头,并配有 F46 采气管线及采气三通阀.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).样品采集后注入气袋运回实验室利用 Agilent 4890D 气相色谱仪进行 CO₂ 气体浓度分析,并计算 CO₂ 释放通量.

1.3.2 CO₂ 通量(F)计算

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt}$$

式中: V 为箱内空气体积; A 为箱子覆盖的面积; C 为 t 时刻箱内被测气体的体积混合比浓度; t 为时间; ρ 为标准状态下的被测气体密度; T_0 和 P_0 分别为标准状况下的空气绝对温度和气压; P 为采样地点的气压; T 为采样时的绝对温度.

1.3.3 其他环境因子的测定 通量观测的同时记录箱内温度、地表温度、土壤 5 cm 温度、土壤 10 cm 水分等环境因子,其中温度测定采用 JM624 便携式温度仪,土壤水分测定采用 TDR 水分仪.植物生长季每月下旬在试验样地周边设置生物量调查样方,样方大小 25 cm×25 cm,3 个重复.生物量测定采用收获法,收集样方内植物地上部分活体、凋落物及地下

0~40 cm 深度植物根系. 地上部分及清洗后的地下根系利用烘箱烘干后称量(70 °C/48 h); 净初级生产力(net primary productivity, NPP)采用“增量积累法”计算, 即把各期生物量按时间排列, 进行差值累加.

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SigmaPlot 10.0 软件进行数据处理及制图. 采用 SPSS 10.0 软件对数据进行平均值的比较、相关、回归等统计分析, 显著性水平设定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 苔草湿地土壤-植物系统 CO₂ 释放季节动态

苔草湿地生态系统呼吸具有明显的季节变化模式. 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苔草的萌发, 生态系统呼吸速率逐渐上升. 生态系统呼吸速率变化范围在 89.57 ~ 1243.99 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹ 之间, 最高值出现在 9 月, 最低值出现在 1 月, 二者之间相差近 14 倍(图 1). 试验期间跨越了 2 个短暂的生长季节, 第 1 个生长季从 9 月中下旬洲滩出露水面之后开始至次年 1 月初苔草枯萎; 第 2 个生长季节从 1 月底开始至 4 月中旬(4 月下旬后洲滩开始淹水). 前 1 个生长季生态系统呼吸平均速率为 512.60 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹, 后 1 个生长季平均释放速率为 399.2 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹, 秋冬季节的释放速率明显高于冬春季的释放速率.

2.2 苔草湿地土壤呼吸季节动态

苔草湿地土壤呼吸与生态系统呼吸表现出相近的季节变化模式, 二者之间的释放速率差异显著

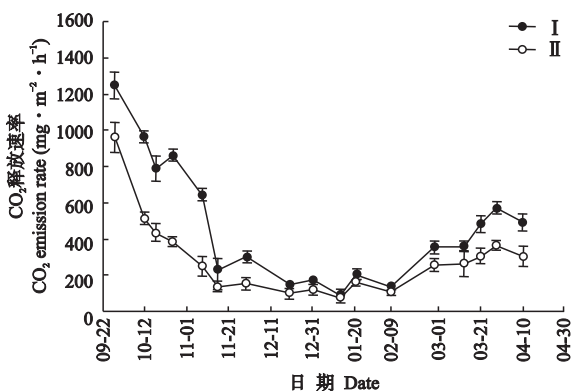


图 1 苔草湿地 CO₂ 释放的季节变化

Fig. 1 Seasonal variations of CO₂ emission from *Carex*-dominated wetland.

I: 生态系统呼吸 Ecosystem respiration; II: 土壤呼吸 Soil respiration. 下同 The same below.

($t=4.99, P<0.01$). 土壤呼吸速率变化范围在 75.30 ~ 960.94 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹ 之间, 释放峰值和低值出现的时间与生态系统呼吸一致(图 1). 随着季节的变化, 土壤呼吸占生态系统呼吸比例的平均值为 64% (39% ~ 84%); 地上植物部分的呼吸所占比例平均值为 36% (16% ~ 61%). 受植物生长的影响, 土壤呼吸与生态系统呼吸速率之间的差异在春秋季节明显高于冬季.

2.3 温度、水分对苔草湿地 CO₂ 释放的影响

试验期间, 气温、地表温度、土壤 5 cm 温度与生态系统呼吸和土壤呼吸之间均存在显著正相关关系, 且土壤 5 cm 温度与呼吸速率之间的相关性最为显著($r=0.95, 0.86, n=17, P<0.01$). 土壤温度可以解释生态系统呼吸 90% 的变异, 83% 的土壤呼吸变异可以用温度来解释, 温度成为苔草湿地生态系统呼吸与土壤呼吸的主要控制因子. 生态系统呼吸、土壤呼吸速率与土壤温度之间可以用指数关系很好地拟合(图 2). 非淹水期间, 苔草湿地土壤水分变化范围为 48.1% ~ 65.4%, 统计分析显示, 土壤水分与呼吸速率之间未达到显著性相关, 水分未成为苔草湿地 CO₂ 释放的限制因子.

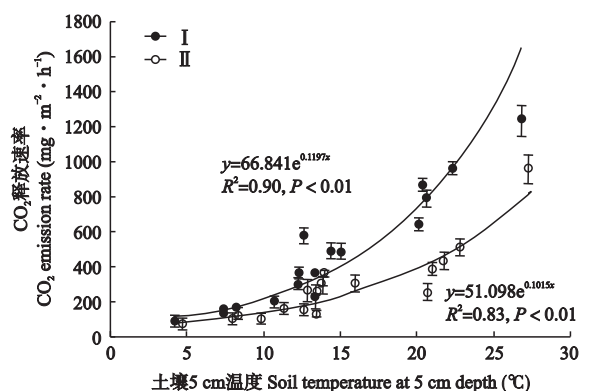


图 2 苔草湿地 CO₂ 释放与土壤温度之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil temperature at 5 cm depth and CO₂ emission from *Carex*-dominated wetland.

3 讨论

3.1 鄱阳湖苔草湿地 CO₂ 释放与其他地区的比较

鄱阳湖年内水位变化巨大, 高水位时以湖泊为主体, 低水位时以洲滩为主体. 以本试验观测点所在苔草洲滩为例, 一年中非淹水时间达到 7 ~ 10 个月. 有研究指出, 当水面下降到湿地基底表面以下或处于低水位时, 土壤有机质分解释放 CO₂ 的速率增加, 湿地可能变成潜在的碳源^[4, 12]. 因此, 洲滩非淹

水期 CO₂ 释放在整个鄱阳湖湿地碳平衡中占有十分重要的地位. 根据我们的试验结果, 整个非淹水期间, 苔草洲滩生态系统呼吸与土壤呼吸速率平均值分别为 472.59 和 286.50 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹, 而在 9—10 月苔草进入秋季生长高峰期时, 生态系统呼吸和土壤呼吸速率分别达到 964.96 和 571.50 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹, 显著高于若尔盖高原、三江平原常年积水沼泽湿地, 以及北方泥炭湿地、淡水草本沼泽的全球平均 CO₂ 释放速率^[13-15]. 苔草土壤呼吸占生态系统呼吸的比例因植物生长季差异在 39% ~ 84% 范围内波动, 与文献报道^[16] 较为一致.

由于非淹水期苔草洲滩地表无积水, 类似于沼泽化草甸或湿草甸, 因此, 将鄱阳湖苔草洲滩与国内其他地区草甸、草原的 CO₂ 释放进行了比较(表 1). 由表 1 可以看出, 苔草洲滩非淹水期的 CO₂ 释放接近或略高于高寒草甸^[17-18]、沼泽化草甸^[19-20]

以及全球热带草原的平均值^[13]; 明显高于高寒草原^[21]、内蒙古草甸草原^[22]、典型草原^[22] 以及全球温带草原土壤呼吸平均速率^[13]; 低于松嫩平原羊草草甸草原^[23]. 不同草地类型土壤/生态系统呼吸通量相差较大主要与各研究区的水热条件、植物群落组成以及土壤理化性状差异密切相关, 此外, 不同草地群落的生物量及其对土壤的碳归还量、微生物种类、数量与活性等也会有所差异.

3.2 鄱阳湖苔草湿地 CO₂ 释放的温度敏感性

Q₁₀ 值被广泛应用于评价土壤或生态系统呼吸对于温度变化的敏感性^[13], 不同区域湿地生态系统呼吸的 Q₁₀ 值不一致, 其中北方湿地 Q₁₀ 值范围在 1.6 ~ 4.1 之间^[26-27], 青藏高原湿地的 Q₁₀ 值则在 2.0 ~ 8.9 之间^[7]. 根据生态系统呼吸、土壤呼吸与温度之间的指数关系, 分别计算了苔草湿地 CO₂ 释

表 1 鄱阳湖苔草湿地 CO₂ 释放与其他地区的比较

Table 1 Comparison of CO₂ fluxes from Poyang Lake *Carex*-dominated wetland to other areas

观测点 Location	植被类型 Vegetation type	测定时间 Measurement period	年均气温 <i>T</i> (°C)	年降水量 <i>P</i> (mm)	土壤呼吸 <i>R_s</i> (mg · m ⁻² · h ⁻¹)	生态系统呼吸 <i>R_e</i> (mg · m ⁻² · h ⁻¹)	文献 Reference
鄱阳湖 Poyang Lake	草洲 Marshland	9月—次年4月 Sep. to next Apr.	17.6	1450 ~ 1550	286.50	472.59	本研究 This study
全球 Global	温带草原 Temperate grassland	全年 One year	nd	nd	185.01	nd	[13]
全球 Global	热带草原 Tropical grassland	全年 One year	nd	nd	263.68	nd	[13]
若尔盖高原 Ruoergai Plateau	沼泽化草甸 Swamp meadow	5—10月 May to Oct.	-1.7 ~ 3.3	650 ~ 750	nd	425.5	[15]
若尔盖高原 Ruoergai Plateau	高寒草甸 Alpine meadow	4—10月 Apr. to Oct.	-1.7 ~ 3.3	650 ~ 750	nd	323.03	[17]
青海 Qinghai	高寒草甸 Alpine meadow	6月—次年1月 Jun. to next Jan.	-1.7	426 ~ 860	313.20	438.34	[18]
青海 Qinghai	沼泽化草甸 Swamp meadow	7—8月 Jul. to Aug.	-1.7	426 ~ 860	nd	659.20	[19]
三江平原 Sanjiang Plain	沼泽化草甸 Swamp meadow	5—9月 May to Sep.	1.6 ~ 1.9	565 ~ 600	180.42	nd	[20]
三江平原 Sanjiang Plain	湿草甸 Wet meadow	5—9月 May to Sep.	1.6 ~ 1.9	565 ~ 600	256.25	nd	[20]
青海 Qinghai	高寒草原 Alpine steppe	7—8月 Jul. to Aug.	-5.6	266.5	72.86	nd	[21]
内蒙古 Inner Mongolia	草甸草原 Meadow steppe	全年 One year	-1.4	>450	143.49	nd	[22]
内蒙古 Inner Mongolia	典型草原 Typical steppe	全年 One year	-1.3 ~ 1	350 ~ 450	110.69	nd	[22]
内蒙古 Inner Mongolia	典型草原 Typical steppe	全年 One year	-1.3 ~ 1	350 ~ 450	64.99	nd	[22]
内蒙古 Inner Mongolia	典型草原 Typical steppe	全年 One year	1 ~ 2	250 ~ 350	36.90	nd	[22]
松嫩平原 Songnen Plain	草甸草原 Meadow steppe	6—10月 Jun. to Oct.	4.9	470	1211.53	nd	[23]
松嫩平原 Songnen Plain	草甸草原 Meadow steppe	全年 One year	4.9	470	61.78 ~ 388.08	nd	[24]
祁连山 Qilian Mountains	森林草原 Forest steppe	5—11月 May to Nov.	0.5	435	307.3 ~ 1476.29	nd	[25]

nd: 原文献无此数据 No data in the reference; *R_s*: Soil respiration rate; *R_e*: Ecosystem respiration rate; *T*: Annual mean air temperature; *P*: Annual mean precipitation.

放基于气温和土壤温度的敏感性指数 Q_{10} , 其中, 生态系统呼吸的 Q_{10} 值为 2.43 和 3.31, 土壤呼吸的 Q_{10} 值为 2.13 和 2.75, 介于上述湿地 CO₂ 释放的温度敏感性指数之间. 苔草湿地生态系统呼吸、土壤呼吸对土壤温度变化的敏感性高于气温; 此外, 生态系统呼吸的温度敏感性高于土壤呼吸, 这可能与植物部分用于呼吸的基质活性 (substrate availability) 高于土壤有关. 试验期间可划分成春秋时段 (9—11 月及次年 3—4 月) 和冬季时段 (12 月至次年 2 月) 2 个时段, 根据呼吸速率与土壤温度之间的关系, 计算出春秋时段与冬季时段呼吸的 Q_{10} 值分别为 2.37 和 3.66. 冬季呼吸的温度敏感性高于春秋时段约 1.54 倍. 早期研究认为, 冬季土壤呼吸速率很小, 因此在分析地气 CO₂ 交换过程中可以忽略不计. 但最近的研究发现, 冬季土壤呼吸占全年土壤呼吸的很大比例, 即使在高纬度和高寒地区也不能忽略^[28-29]. 鄱阳湖湿地地处亚热带地区, 年均气温达到 17.6 °C, 即使在冬季, 平均气温亦在 0 °C 以上, 因此, 冬季土壤呼吸对整个湿地碳平衡具有重要影响. 本研究结果显示, 在冬季的 12 月至次年 2 月, 生态系统呼吸和土壤呼吸平均速率分别达到 183.64 和 136.64 mg CO₂ · m⁻² · h⁻¹.

3.3 非淹水期苔草湿地的碳平衡

苔草湿地的碳平衡取决于碳吸收与碳排放之间的差值, 碳吸收来自于净初级生产力 (NPP), 碳排放则来源于微生物对土壤有机质分解所释放的 CO₂、CH₄. 苔草在非淹水期间有 2 个生长季, 秋季苔草从洲滩退水之后开始萌发, 至次年 1 月左右完全枯萎; 春季苔草从 1 月底 2 月初开始萌发至洲滩淹水后结束. 依据试验期间每月的生物量调查, 计算出苔草净初级生产力 (NPP) 为 1923.83 g C · m⁻². 依据土壤微生物呼吸约占土壤总呼吸的 40%^[30] 计算出 CO₂ 释放量为 205.99 g C · m⁻²; 非淹水期 CH₄ 释放量极低, 约为 0.12 g C · m⁻² (数据未发表). 综合考虑碳吸收与碳排放, 非淹水期苔草湿地成为一个较明显的碳汇, 碳汇强度为 1717.72 g C · m⁻².

参考文献

[1] Smith LC, MacDonald GM, Velichko AA, *et al.* Siberian peatlands: A net carbon sink and global methane source since the early Holocene. *Science*, 2004, **303**: 353–356

[2] Kayranli B, Scholz M, Mustafa A, *et al.* Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review. *Wetlands*, 2010, **30**: 111–124

[3] Sulman BN, Desai AR, Saliendra NZ, *et al.* CO₂ fluxes at northern fens and bogs have opposite responses to inter-annual fluctuations in water table. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**: L19702, doi: 10.1029/2010GL044018

[4] Sonnentag O, Vander Kamp G, Barr AG, *et al.* On the relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes in a minerotrophic fen. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 1762–1776

[5] Wickland KP, Striegl RG, Mast A, *et al.* Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**: 321–335

[6] Mu C-C (牟长城), Shi L-Y (石兰英), Sun X-X (孙晓新). Fluxes and controls of CO₂, CH₄ and N₂O in a marsh wetland of Xiaoxingan Mountains, northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(3): 617–623 (in Chinese)

[7] 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

[8] Shi F-C (石福臣), Li R-L (李瑞利), Wang S-Q (王绍强), *et al.* Profile distribution and accumulation characteristics of organic carbon and total nitrogen in typical marshes in Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(7): 1425–1431 (in Chinese)

[9] 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

[10] Liu X-Z (刘信中), Ye J-Z (叶居正). Jiangxi Wetland. Beijing: China Forestry Press, 2000 (in Chinese)

[11] Liu X-Z (刘信中), Fan S-B (樊三宝), Hu B-H (胡斌华). Comprehensive and Scientific Survey of Jiangxi Nanjishan Wetland Nature Reserve. Beijing: China Forestry Press, 2006 (in Chinese)

[12] Oechel WC, Vourlitis GL, Hastings SJ, *et al.* The effect of water table manipulation and elevated temperature on the CO₂ flux of wet sedge tundra ecosystems. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 77–90

[13] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81–99

[14] Hao Q-J (郝庆菊), Wang Y-S (王跃思), Song C-C (宋长春), *et al.* Primary study on CO₂ and CH₄ emissions from wetland soils in the Sanjiang Plain. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2004, **23**(5): 846–851 (in Chinese)

[15] Wang D-X (王德宣), Song C-C (宋长春), Wang Y-S (王跃思), *et al.* Carbon dioxide flux from peat mire in Ruoenai Plateau. *Ecology and Environment* (生态环境), 2005, **14**(6): 880–883 (in Chinese)

[16] Davidson EA, Richardson AD, Savage KE, *et al.* A distinct seasonal pattern of the ratio of soil respiration to total ecosystem respiration in a spruce-dominated forest.

- Global Change Biology*, 2006, **12**: 230–239
- [17] Wang D-X (王德宣), Song C-C (宋长春), Wang Y-Y (王毅勇), *et al.* CO₂ fluxes in mire and grassland on Ruorgai Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(2): 285–289 (in Chinese)
- [18] Wu Q (吴琴), Cao G-M (曹广民), Hu Q-W (胡启武), *et al.* A primary study on CO₂ emission from soil-plant systems of *Kobresia humilis* meadow. *Resources Science* (资源科学), 2005, **27**(2): 96–102 (in Chinese)
- [19] 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
- [20] Yang J-S (杨继松), Liu J-S (刘景双), Sun L-N (孙丽娜). CO₂ release rate of soil respiration and litter decomposition of meadow marshes in Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 805–810 (in Chinese)
- [21] Pei Z-Y (裴志永), Ouyang H (欧阳华), Zhou C-P (周才平). A study on carbon fluxes from alpine grassland ecosystem on Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(2): 231–236 (in Chinese)
- [22] Dong Y-S (董云社), Qi Y-C (齐玉春), Liu J-Y (刘纪远), *et al.* Characteristics of soil respirations from 4 grassland types along different precipitation gradient. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2005, **50**(5): 473–480 (in Chinese)
- [23] Wang W (王妮), Guo J-X (郭继勋). Contribution of CO₂ emission from soil respiration and from litter decomposition in *Lymus chinensis* community in northeast Songnen grassland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(5): 655–660 (in Chinese)
- [24] Wang W (王妮), Guo J-X (郭继勋). Contribution of root respiration to soil total respiration in *Puccinellia tenuiflora* community in northeast Songnen grassland. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2006, **51**(5): 559–564 (in Chinese)
- [25] Chang Z-Q (常宗强), Feng Q (冯起), Si J-H (司建华), *et al.* Influence of soil moisture, temperature conditions on surface CO₂ efflux in desert steppe of the Qilian Mountains, the Northwest of China. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2007, **30**(6): 812–819 (in Chinese)
- [26] 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
- [27] Bubier JL, Crill PM, Moore TR, *et al.* Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, **12**: 703–714
- [28] Wang W (王妮), Wang T (汪涛), Peng S-S (彭书时), *et al.* Review of winter CO₂ efflux from soils: A key process of CO₂ exchange between soil and atmosphere. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2007, **31**(3): 394–402 (in Chinese)
- [29] Monson RK, Lipson DL, Burns SP. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. *Nature*, 2006, **439**: 711–714
- [30] Hanson PJ, Edwards NT, Garten CT, *et al.* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 115–146

作者简介 胡启武,男,1979年生,博士,副教授。主要从事生态系统格局与过程研究。E-mail: huqiwu1979@gmail.com

责任编辑 李凤琴
