

# 开垦对黄河三角洲湿地净生态系统CO<sub>2</sub>交换的影响

杨利琼<sup>1,2</sup> 韩广轩<sup>1\*</sup> 于君宝<sup>1</sup> 吴立新<sup>3</sup> 朱敏<sup>4</sup> 邢庆会<sup>1,2</sup> 王光美<sup>1</sup> 毛培利<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; <sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup>黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091; <sup>4</sup>鲁东大学地理与规划学院, 山东烟台 264025

**摘要** 近年来, 由于对湿地的不合理利用, 自然湿地被大面积地垦殖为农田, 导致湿地生态系统碳循环的模式发生改变, 从而影响了湿地生态系统碳汇功能。本研究通过涡度相关法, 对山东省东营市黄河三角洲芦苇(*Phragmites australis*)湿地和开垦多年的棉花(*Gossypium* spp.)农田的净生态系统CO<sub>2</sub>交换(*NEE*)进行了对比观测, 以探讨该地区典型生态系统*NEE*的变化规律及其影响因子, 揭示开垦对芦苇湿地*NEE*和碳汇功能的影响。结果表明: 在生长季, 湿地和农田生态系统*NEE*的日平均值各月均呈明显的“U”型变化曲线, 非生长季*NEE*的变幅很小。生长季湿地生态系统日最大净吸收值和释放值分别为16.04 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (8月17日)和14.95 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (8月9日); 农田生态系统日最大净吸收值和释放值分别为18.99 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (8月22日)和12.23 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> (7月29日)。生长季白天两个生态系统*NEE*与光合有效辐射(*PAR*)之间呈直角双曲线关系; 非生长季*NEE*主要受土壤温度(*T<sub>s</sub>*)的影响; 生态系统生长季夜间*NEE*受*T<sub>s</sub>*和土壤含水量(*SWC*)的共同影响; 湿地和农田的生态系统呼吸熵(*Q<sub>10</sub>*)分别为2.30和3.78。2011年生长季, 黄河三角洲湿地和农田生态系统均表现为CO<sub>2</sub>的汇, 总净固碳量分别为780.95和647.35 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>, 开垦降低了湿地的碳吸收能力; 而在2011年非生长季, 黄河三角洲湿地和农田生态系统均表现为CO<sub>2</sub>的源, CO<sub>2</sub>总释放量分别为181.90和111.55 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>。全年湿地和农田生态系统总净固碳量分别为599.05和535.80 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>。

**关键词** 涡度相关, 净生态系统CO<sub>2</sub>交换, 开垦, 芦苇湿地, 黄河三角洲

## Effects of reclamation on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in wetland in the Yellow River Delta, China

YANG Li-Qiong<sup>1,2</sup>, HAN Guang-Xuan<sup>1\*</sup>, YU Jun-Bao<sup>1</sup>, WU Li-Xin<sup>3</sup>, ZHU Min<sup>4</sup>, XING Qing-Hui<sup>1,2</sup>, WANG Guang-Mei<sup>1</sup>, and MAO Pei-Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying, Shandong 257091, China; and <sup>4</sup>College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

### Abstract

**Aims** Wetland ecosystems are an obvious carbon sink, but with constant land reclamation, many wetlands disappeared and degenerated, and reclamation also influences the carbon-cycle between wetland ecosystems and the atmosphere. Cropland is a dominant use of reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta, but the CO<sub>2</sub> flux of wetland ecosystems under escalating human influences remains unclear. Our objective was to investigate the impact of wetland reclamation on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (*NEE*) dynamics and quantify CO<sub>2</sub> exchange of the two ecosystems' response to environmental and biological factors.

**Methods** Based on eddy covariance technique, we measured CO<sub>2</sub> fluxes over the reed wetland and cropland ecosystems and monitored environmental and biological factors in 2011.

**Important findings** The averaged diurnal variation of *NEE* showed the U-type curve in different months of the growing season over wetland and cropland ecosystems. In the non-growing season, *NEE* lacked a diurnal pattern and the range of *NEE* was very small as the result of soil microbial activity. Analyses of *NEE* showed that the wetland was a net sink for each month from April to September 2011 and a source of CO<sub>2</sub> to the atmosphere for the fall and winter months of November to March. In contrast, the cropland was calculated to be a significant net sink for CO<sub>2</sub> in the growing season (May to October), while significant net losses of CO<sub>2</sub> occurred in the non-growing season (November to April). During the growing season, the maximum daily CO<sub>2</sub> uptake and release rates were 16.04 (August 17) and 14.95 (August 9) g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> and 18.99 (August 22) and 12.23 (July 29) g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup> over wetland and cropland, respectively. Daytime *NEE* values were strongly correlated with photosynthetic active

radiation (*PAR*) in the growing season. The  $\text{CO}_2$  flux was mainly affected by temperature of soil ( $T_s$ ) in the non-growing season. Soil water content (*SWC*) and  $T_s$  were the main factors that influenced nighttime *NEE* in the growing season. The two ecosystem respiration quotient ( $Q_{10}$ ) were 2.30 (wetland) and 3.78 (cropland) during the growing season. The wetland and cropland ecosystems were both carbon sinks during the growing season as they absorbed 780.95 and 647.35  $\text{g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively, which means wetland reclamation can reduce its carbon sequestration ability. During the non-growing season, the two ecosystems were carbon sources, releasing 181.90 (wetland ecosystem) and 111.55 (cropland ecosystem)  $\text{g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ . Over all of 2011, the wetland and cropland ecosystems both were obvious carbon sinks with absorption of 599.05 and 535.80  $\text{g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively.

**Key words** eddy covariance, net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange, reclamation, reed wetland, Yellow River Delta

湿地是介于陆地和水体之间的一种过渡类型的特殊生态系统(崔保山和刘兴土, 2001)。虽然全球湿地总面积约占全球表面积的1% (宋长春, 2003), 但是储存在全球湿地中的碳约占地球陆地碳总量的15% (Franzen, 1992)。近年来, 由于全球气候的变化及人类对湿地的不合理利用, 世界范围内的许多自然湿地生态系统转化为旱生植被生态系统、城市用地或农田。从20世纪50年代至90年代中期, 中国湿地面积锐减50%, 而1990–2000年中国湿地面积减少了14.83% (陈广生和田汉勤, 2007)。随着湿地面积的迅速减小, 其碳汇作用正在丧失。

农业开垦已经对湿地碳通量造成了重大影响(马安娜和陆健健, 2008)。当湿地开垦为农田后, 植物残体及沉积泥炭分解速率提高, 碳的释放量增加, 改变了湿地生态系统碳循环的模式(宋长春, 2003), 进而使湿地作为碳库的功能发生变化。目前, 对湿地及开垦之后的研究多集中于土壤有机质(张金波和宋长春, 2004; 迟光宇等, 2006; 万忠梅, 2009; Wang *et al.*, 2011)、土壤呼吸变化(杨青和吕宪国, 1999; 谢艳兵等, 2006; 杜紫贤等, 2010)等方面, 而对于湿地生态系统开垦前后的净生态系统 $\text{CO}_2$ 交换(*NEE*)的研究还较少。

黄河三角洲处于海陆的交错地带, 受河海淡咸水双重影响, 加之地貌、人为作用, 发育了多种多样的湿地生态系统(张晓龙等, 2007)。自1989年以来, 人类活动的增强, 区域人口的增加, 区域生态压力骤增, 使得湿地面积减少, 湿地在区域面积中所占的比重降低(栗云召等, 2011)。王海梅等(2007)对黄河三角洲2002年土地利用景观数据分析后认为, 农田景观占总面积的46.64%, 平均斑块面积远大于其他景观类型, 说明农田在该地区整个景观中占有绝对优势, 即黄河三角洲土地以农业利用为主。农业开垦会导致湿地生态系统的自然演化规律遭到破

坏(刘兴土和马学慧, 2000), 从而会影响生态系统与大气之间 $\text{CO}_2$ 交换的动态过程。因此, 揭示开垦对湿地生态系统 $\text{CO}_2$ 净交换的影响规律, 对于正确地评估该区域陆地生态系统碳库功能, 以及评价土地利用类型转变对区域碳收支的影响有着非常重要的现实意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市黄河三角洲的中国科学院烟台海岸带研究所滨海湿地生态试验站(37°45'50" N, 118°59'24" E)。该研究区属于温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温为11.7–12.8 °C, 年降水量530–630 mm, 降水集中于8–10月, 降水量的季节和年际变化较大, 年蒸发量为1 900–2 400 mm (宋创业等, 2008)。该地区地势平坦, 植物生长茂盛, 土壤质地以轻壤土和中壤土为主, 土壤类型以潮土和盐碱土为主(冯忠江和赵欣胜, 2008), 以黄河沉积泥沙为主要成土母质, 成土年龄较晚, 受海洋作用强烈。具有土体厚、植被类型少, 盐化程度重、矿物养分含量高的特点(蔡为民等, 2004)。主要的植被为芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa* = *S. heteroptera*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)和白茅(*Imperata cylindrical* var. *major*)。试验站目前有自然湿地综合观测场和农田综合观测场, 湿地观测场的主要植被类型为芦苇, 农田观测场种植作物为棉花。2011年5月中下旬播种棉花, 10月中旬收获棉花。在本研究中, 生长季为5–10月, 非生长季为1–4月及11–12月。

### 1.2 研究方法

利用涡度相关系统以及常规气象观测系统对湿地和农田生态系统 $NEE$ 和环境因子进行对比观测。涡度相关系统包括三维超声风速仪(CSAT-3,

Campbell Scientific, Logan, USA)和开路红外CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪(IRGA, LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA), 分别架设于距地表2.8 m (农田生态系统)和3.0 m (湿地生态系统)处, 原始数据采样频率为10 Hz。微气象观测系统包括2 m高度的风向和风速(034B, Campbell Scientific, Logan, USA)、空气温度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)、净辐射(CNR4, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)和降水量(TE525MM, Texas Electronics, Dallas, USA)。土壤因子监测主要包括: 5、10、20、30、50 cm深处的土壤温度(109SS, Campbell Scientific, Logan, USA)和10、20、40、60、80、100 cm深处的土壤含水量(EnviroSMART SDI-12, EnviroScan, Lancaster, USA)。所有数据通过数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, Logan, USA)在线采集, 并按30 min计算平均值进行存储。*NEE*数据为负值表示生态系统吸收CO<sub>2</sub>, 即碳汇; *NEE*数据为正值表示生态系统释放CO<sub>2</sub>, 即碳源。

### 1.3 通量数据质量控制与插补

涡度相关系统和常规微气象仪器架设在野外, 不可避免地会出现由于降雨、电力中断或者仪器故障等原因而导致的数据缺失或者异常值的出现等现象。在对原始通量数据进行分析之前, 需先进行数据的预处理, 主要包括: 去除所有降雨时段对应的数据、非生长季由于仪器加热效应出现的*NEE*数据为负和生长季  $|NEE| \geq 1 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (张法伟等, 2008)的不合理数据。由于夜间大气层结比较稳定, 导致湍流发展不充分, 所以舍去夜间摩擦风速小于0.15 m·s<sup>-1</sup>所对应的*NEE*数据。

对于缺失的数据, 一般是通过经验方程进行插补。夜间(净辐射 < 20 W·m<sup>-2</sup>)缺失的数据采用(1)式, 利用夜间土壤温度(*T<sub>s</sub>*)与夜间通量值(*R<sub>eco,n</sub>*, mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)的指数关系插补(Lloyd & Taylor, 1994)。采用(2)式可以得到生态系统呼吸熵*Q<sub>10</sub>*, 代表温度每升高10 °C时生态系统呼吸的相对增长量(Lloyd & Taylor, 1994)。

$$R_{eco,n} = a \exp(bT_s) \quad (1)$$

$$Q_{10} = \exp(10b) \quad (2)$$

(1)和(2)式中, *a*和*b*是拟合系数, *T<sub>s</sub>*指土壤温度, 单位为°C。

对于白天缺失的*NEE*数据(净辐射 > 20 W·m<sup>-2</sup>),

采用Michaelis-Menten方法((3)式) (Ruimy *et al.*, 1995), 与光合有效辐射(*PAR*)进行拟合。

$$NEE = R_e - \frac{A_{max} \times \alpha \times PAR}{A_{max} + \alpha \times PAR} \quad (3)$$

(3)式中, *PAR*为光合有效辐射(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), *α* (mg CO<sub>2</sub>·μmol<sup>-1</sup>·photon)和*A<sub>max</sub>* (mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)分别为生态系统表观光量子效率和最大光合速率(即*PAR*趋于极大时生态系统净光合速率), *R<sub>e</sub>*为白天生态系统暗呼吸速率(mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)。 *NEE*为直接从涡度相关仪器测定的CO<sub>2</sub>通量数据。

### 1.4 生态系统总初级生产力(*GPP*)和生态系统呼吸(*R<sub>eco</sub>*)

由于涡度相关系统观测的CO<sub>2</sub>通量是*NEE*, 白天生态系统呼吸(*R<sub>eco,d</sub>*)是依据夜间生态系统呼吸(*R<sub>eco,n</sub>*)与5 cm深处*T<sub>s</sub>*的函数关系外延的方法来估算的(张法伟等, 2008)。*R<sub>eco,d</sub>*与*R<sub>eco,n</sub>*之和即为生态系统的总呼吸量(*R<sub>eco</sub>*)。生态系统的总初级生产力(*GPP*)为*NEE*与*R<sub>eco</sub>*之差(Barr *et al.*, 2002), 用(4)式来表示。

$$GPP = NEE - R_{eco} \quad (4)$$

### 1.5 数据处理方法

本研究主要是用相关分析法分析湿地和农田*NEE*与*T<sub>s</sub>*、土壤含水量(*SWC*)的关系。用单因素方差分析法(one-way ANOVA)分析两个生态系统环境因子的差异性、各月*NEE*日变化的差异性, 以及*NEE*、*GPP*和*R<sub>eco</sub>*月平均值的差异性。运用线性回归分析方法分析夜间净生态系统CO<sub>2</sub>交换与*T<sub>s</sub>*的关系; 用非线性拟合方法分析生长季各月白天*NEE*与光合有效辐射(*PAR*)的直角双曲线关系。所有数据分析均基于统计分析软件SPSS 16.0完成, 相关的图形均基于SigmaPlot 11.0完成。

## 2 结果和分析

### 2.1 环境因子季节变化

两个生态系统在同一个试验站内, 单因素方差分析表明: 湿地和农田生态系统大气温度(*T<sub>a</sub>*)和降水量(*P*)应是一样的(*T<sub>a</sub>*: *p* = 0.74, *P*: *p* = 0.91)。2011年该地区平均*T<sub>a</sub>*为12.4 °C, 处在该地区多年平均大气温度变幅11.7–12.8 °C之内(宋创业等, 2008); 月平均*T<sub>a</sub>*最高出现在7月份, 最低出现在1月份, 分别为30.3和-8.2 °C (图1A)。从图1B和1C可知, 在非生长季, 2011年两个生态系统5 cm和10 cm深处的*T<sub>s</sub>*

差异均不显著(5 cm深处 $p < 0.33$ , 10 cm深处 $p < 0.68$ ); 而在生长季, 5和10 cm深处的 $T_s$ 差异均为极显著(5 cm深处 $p < 0.01$ , 10 cm深处 $p < 0.01$ ), 湿地生态系统中5和10 cm深处的 $T_s$ 明显大于农田生态系统。在生长季的前期, 降雨稀少, 两个生态系统在20 cm深处的SWC维持在一个较低的水平, 在整个生长季, 只有8和9月湿地的SWC高于农田, 其余的月份, 农田生态系统的SWC均高于湿地生态系统, 而在非生长季的1、2月, 农田的SWC明显低于湿地(图1D), 这可能与农田边的排水沟有关系, 在非生长季, 排水沟干涸, 农田的地下水流向排水沟, 使得农田SWC维持在一个较低的水平。研究区2011年的总降水量为599.8 mm, 主要集中在7–9月份, 8月份降雨最多, 为215.3 mm, 占全年降水量的36% (图1E)。

## 2.2 湿地和农田生态系统的NEE日变化特征

将2011年两个生态系统的NEE按每月每天从0:00到23:30每0.5 h进行平均, 得到生态系统NEE日平均变化特征图(图2)。方差分析表明, 生长季以及非生长季的4月, 两个生态系统NEE日平均变化差异不显著( $p > 0.05$ ), 而非生长季的1–3月和11–12月, 两个生态系统NEE日平均变化差异显著( $p < 0.05$ )。

在生长季, 两个生态系统的NEE日变化规律明显, 整体呈现为“U”形。在生长季的白天, 两个生态系统CO<sub>2</sub>吸收的最大值一般出现在12点左右, 7月湿地NEE日平均值达到极值( $-0.44 \pm 0.03$ ) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 而农田生态系统在8月到达极值( $-0.44 \pm 0.04$ ) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。夜间湿地生态系统排放最大值出现在7月, 为( $0.16 \pm 0.01$ ) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 而农田生态系统夜间排放最大值出现在8月, 为( $0.14 \pm 0.01$ ) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

在非生长季, NEE日变化规律不明显, 且波动性比较小。非生长季夜间, 基本保持了碳排放状态, 但由于冬季植被凋零, 温度很低, 明显小于生长季夜间CO<sub>2</sub>的排放量; 在1–3月和12月的白天, 生态系统整体呈现CO<sub>2</sub>的排放状态。只有在气温回暖的4月以及地表植被凋落末期的11月, 白天才会有比较微弱的CO<sub>2</sub>吸收作用。

## 2.3 NEE、R<sub>eco</sub>和GPP的季节动态

2011年, 黄河三角洲湿地和农田生态系统NEE、

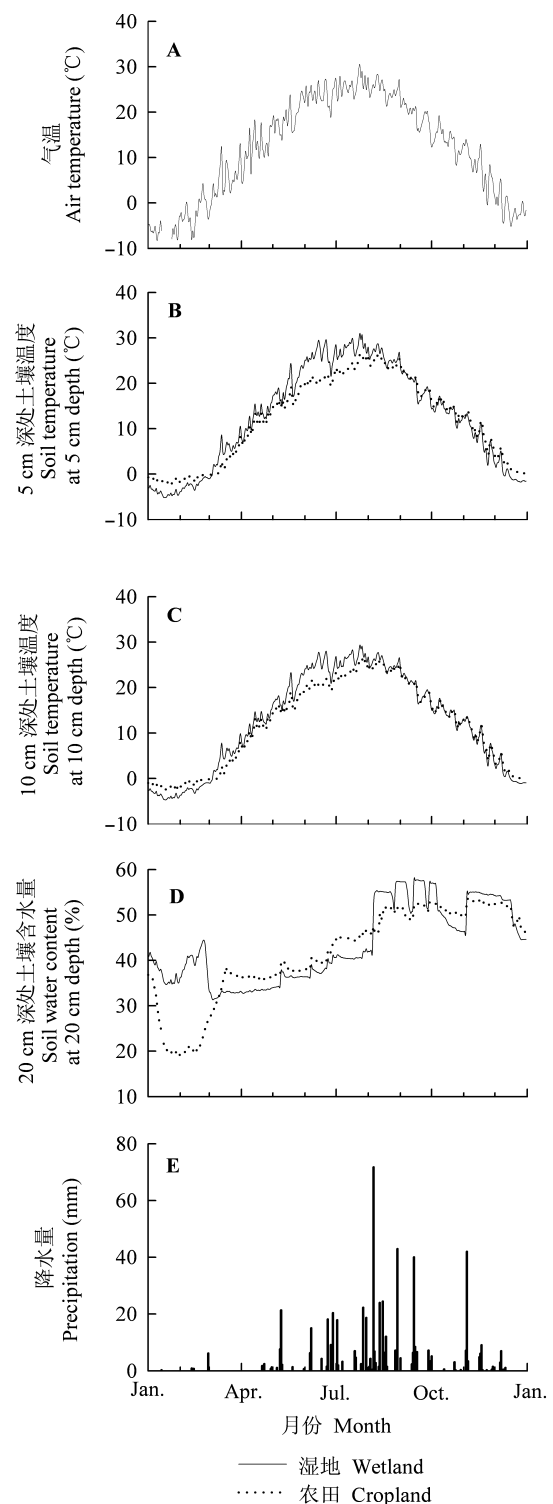


图1 2011年湿地和农田生态系统环境因子的季节变化。A, 气温。B, 5 cm深处土壤温度。C, 10 cm深处土壤温度。D, 20 cm深处土壤含水量。E, 降水量。

Fig. 1 Seasonal variations of environmental factors in wetland and cropland ecosystems in 2011. A, Air temperature. B, Soil temperature at 5 cm depth. C, Soil temperature at 10 cm depth. D, Soil water content at 20 cm depth. E, Precipitation.

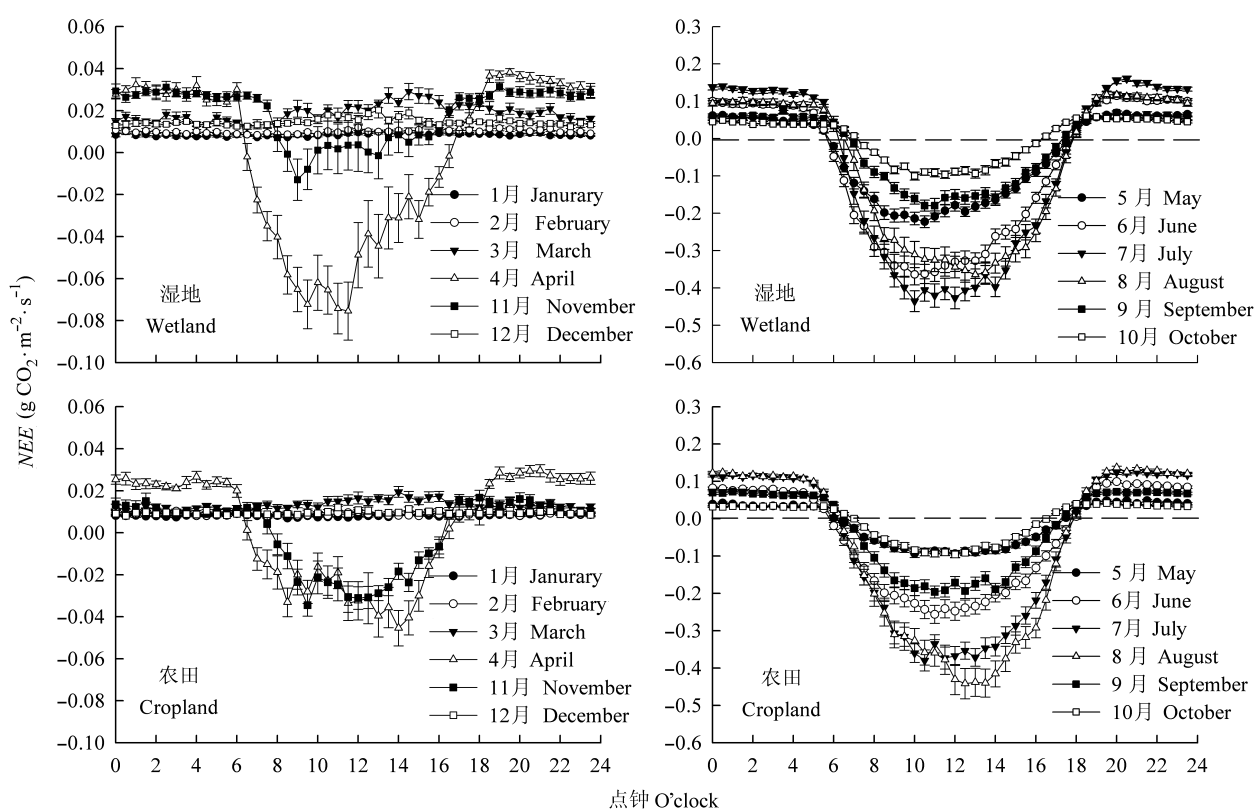


图2 2011年湿地和农田净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)的日变化(平均值±标准误差)。

Fig. 2 Diurnal variations of the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) between wetland and cropland ecosystems in 2011 (mean ± SE).

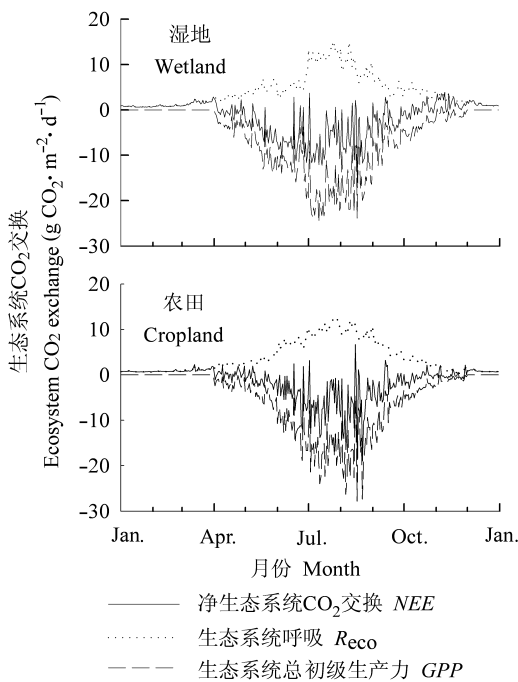
$R_{eco}$ 、 $GPP$ 的季节变化均呈5–10月较高, 1–4月和11–12月较低的分布(图3)。在非生长季,  $NEE$ 、 $R_{eco}$ 、 $GPP$ 均起伏不大, 数值较小。自从植被4月末进入生长季后, 随着水热条件的改变以及植被的快速增长, 农田和湿地生态系统 $NEE$ 、 $R_{eco}$ 、 $GPP$ 均呈现不同的增幅趋势。湿地生态系统日最大净吸收值和释放值分别出现在8月17日的 $16.04 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和8月9日的 $14.95 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 农田生态系统日最大净吸收值和释放值分别为 $18.99 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (8月22日)和 $12.23 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  (7月29日) (图3)。

对2011年两个生态系统各月 $NEE$ 、 $GPP$ 及 $R_{eco}$ 进行了单因素方差分析。在非生长季, 2月和3月以及11月和12月两个生态系统的 $NEE$ 差异极显著;  $GPP$ 仅在4月达到极显著差异;  $R_{eco}$ 于2–4月和11–12月均达到了极显著的差异。在生长季,  $NEE$ 在5和6月有极显著差异, 10月差异显著;  $GPP$ 在5月呈极显著差异;  $R_{eco}$ 在5–7月和10月有极显著差异(图4)。

2011年, 湿地生态系统 $GPP$ 总值高达 $2140.43 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $R_{eco}$ 总释放量高达 $1541.38 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。开垦为农田后,  $GPP$ 和 $R_{eco}$ 值变小, 其 $GPP$ 总值为 $1920.55 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $R_{eco}$ 总释放量为 $1384.75 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ 。2011年, 湿地和农田生态系统总净固碳量分别为 $599.05$ 和 $535.80 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$  (图5)。

#### 2.4 PAR对生态系统生长季白天NEE的影响

将生长季5–10月白天的 $NEE$ 与 $PAR$ 按照Michaelis-Menten模型进行拟合, 两个生态系统各月 $NEE$ 和 $PAR$ 之间均呈直角双曲线关系(图6)。生长季各月 $NEE$ 随 $PAR$ 增加呈增加趋势, 且随着光照的增强, 光饱和点也升高。用模型对生长季各月的参数进行了估计, 湿地生态系统 $A_{max}$ 和 $\alpha$ 均于6月达到最大值, 分别为 $1.06 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.0081 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ , 农田的 $A_{max}$ 和 $\alpha$ 分别于8月和9月达到最大值, 分别为 $0.97 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.0032 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$  (表1)。

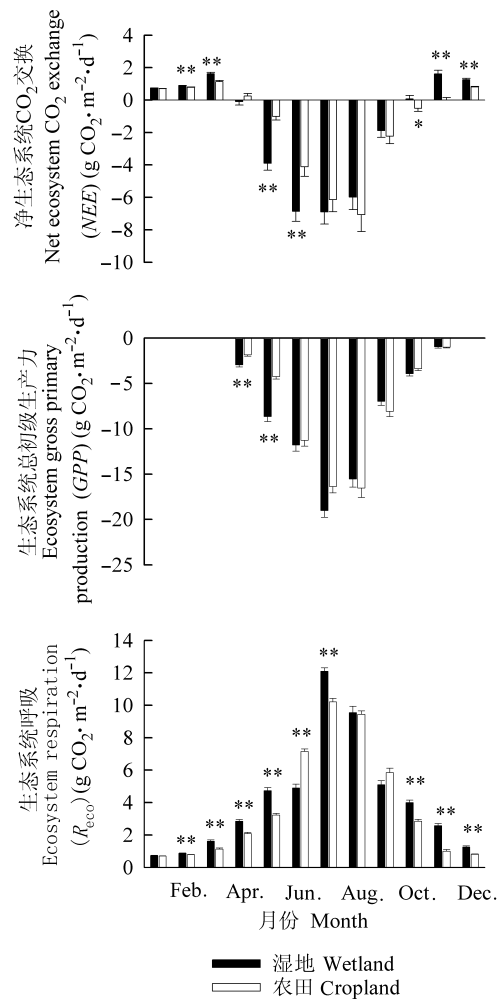


**图3** 2011年湿地和农田生态系统总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸( $R_{eco}$ )和净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)的季节变化。  
**Fig. 3** Seasonal variations in the ecosystem gross primary production (GPP), ecosystem respiration ( $R_{eco}$ ) and net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) between wetland and cropland ecosystems in 2011.

### 2.5 $T_s$ 和SWC对夜晚净生态系统CO<sub>2</sub>交换( $R_{eco,n}$ )的协同作用

生长季白天湿地生态系统NEE与5、10 cm深处的 $T_s$ 呈显著的负相关关系,而与10、20 cm深处的SWC呈显著的正相关关系;生长季白天农田NEE与湿地不同,其与 $T_s$ 和SWC均呈显著的负相关关系。湿地与农田生长季 $R_{eco,n}$ 均与 $T_s$ 呈显著正相关关系,两个生态系统 $R_{eco,n}$ 与20 cm深处的SWC都呈显著相关关系。湿地非生长季NEE与 $T_s$ 为显著的正相关关系,农田非生长季NEE与 $T_s$ 和SWC都达到显著相关。在全年尺度上,湿地和农田生态系统均与 $T_s$ 和SWC为显著的相关关系(表2)。

对两个生态系统生长季20 cm深处SWC按小于40%、40%–50%和大于50%三个区间划分,然后分别拟合 $T_s$ 与 $R_{eco,n}$ 的曲线关系,同时计算 $Q_{10}$ 。结果表明,湿地生态系统中,当SWC处于40%–50%时, $Q_{10}$ 最大,同时,随着SWC降低或者增加, $Q_{10}$ 均降低,表明SWC和 $T_s$ 共同影响着湿地生态系统 $R_{eco,n}$ ;而在农田生态系统中,随着SWC的增加, $Q_{10}$ 逐渐减小,表明随着SWC的增加,使得 $R_{eco,n}$ 对 $T_s$ 的响应程度减



**图4** 2011年湿地和农田生态系统总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸( $R_{eco}$ )和净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)的季节动态(平均值±标准误差)。\*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ 。  
**Fig. 4** Seasonal variations in the ecosystem gross primary production (GPP), ecosystem respiration ( $R_{eco}$ ) and net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) between wetland and cropland ecosystems in 2011 (mean ± SE). \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ .

弱。在整个生长季中,农田生态系统 $Q_{10}$ 为3.78,明显高于湿地生态系统的2.30(表3)。

## 3 讨论

### 3.1 生态系统生长季白天NEE对PAR的响应

在生长季的白天,作物以光合作用为主,PAR是影响植物光合作用的主要限制因子(Flanagan & Johnson, 2005)。因此,PAR是影响NEE生长季白天变化的主要因素(薛红喜等, 2012)。本文研究也发现NEE随着PAR的增加而增加,其变化趋势符合直角双曲线方程,与以往很多研究的结果一致(石培礼等, 2006; Zhou et al., 2009; 张法伟等, 2012)。在本

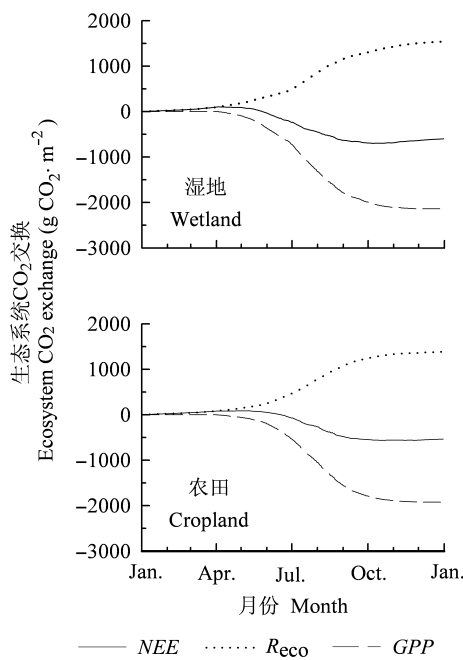


图5 2011年湿地和农田生态系统总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R<sub>eco</sub>)和净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)的累计动态变化。

Fig. 5 Dynamic changes in accumulated ecosystem gross primary production (GPP), ecosystem respiration (R<sub>eco</sub>) and net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) between wetland and cropland ecosystems in 2011.

研究中, 采用Michaelis-Menten方程拟合得到黄河三角洲湿地生态系统生长季 $\alpha$ 、 $A_{max}$ 均于6月份达到最大值, 分别为 $0.0081 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ 和 $1.06 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $A_{max}$ 小于盘锦芦苇湿地生态系统生长季的最大值( $1.28 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 但是生长季 $\alpha$ 最大值大于盘锦芦苇湿地生态系统 ( $0.0043 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ) (Zhou *et al.*, 2009)。在生长季, 湿地生态系统 $A_{max}$ 和 $\alpha$ 的平均值分别为 $0.68 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.0031 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ; 远大于青海湖北岸高寒草甸(其 $A_{max}$ 和 $\alpha$ 的平均值分别为 $0.54 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.00087 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ) (张法伟等, 2012)。农田生态系统 $A_{max}$ 和 $\alpha$ 的平均值分别为 $0.57 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.0019 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ , 均远小于华北平原夏玉米(*Zea mays*)的多年观测值阈值( $\alpha$ 为 $0.0024\text{--}0.0055 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ,  $A_{max}$ 为 $1.72\text{--}2.93 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (同小娟等, 2011)。

湿地和农田生态系统 $A_{max}$ 均与每月大气平均气温呈显著的指数关系(湿地:  $R^2 = 0.80, p < 0.05$ ; 农田:  $R^2 = 0.72, p < 0.05$ )。Zhou等(2009)研究认为 $A_{max}$ 在不同生长阶段的变化与植物的生长和环境条件有关。同小娟等(2011)认为夏玉米生态系统月平均

表1 2011年湿地和农田生长季各月白天净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)和光合有效辐射(PAR)根据Michaelis-Menten模型(方程(3))模拟参数的比较

Table 1 Comparison of analog parameters from daytime net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) and photosynthetic active radiation (PAR) using a Michaelis-Menten model (Eq. (3)) between wetland and cropland ecosystems during growing season in 2011

类型 Type	月份 Month	最大光合速率 Maximum photo-synthesis rate ( $A_{max}$ ) ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观量子产率 Apparent quantum yield ( $\alpha$ ) ( $\text{mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ )	白天生态系统暗呼吸速率 Dark ecosystem respiration in daytime ( $R_d$ ) ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R^2$
湿地 Wetland	5	0.60	0.0027	0.33	0.45
	6	1.06	0.0081	0.65	0.47
	7	0.94	0.0025	0.31	0.62
	8	0.83	0.0021	0.23	0.60
	9	0.37	0.0013	0.12	0.43
	10	0.29	0.0018	0.16	0.30
农田 Cropland	5	0.25	0.0004	0.09	0.44
	6	0.59	0.0020	0.26	0.45
	7	0.89	0.0028	0.35	0.58
	8	0.97	0.0022	0.26	0.58
	9	0.48	0.0032	0.23	0.37
	10	0.23	0.0008	0.09	0.43

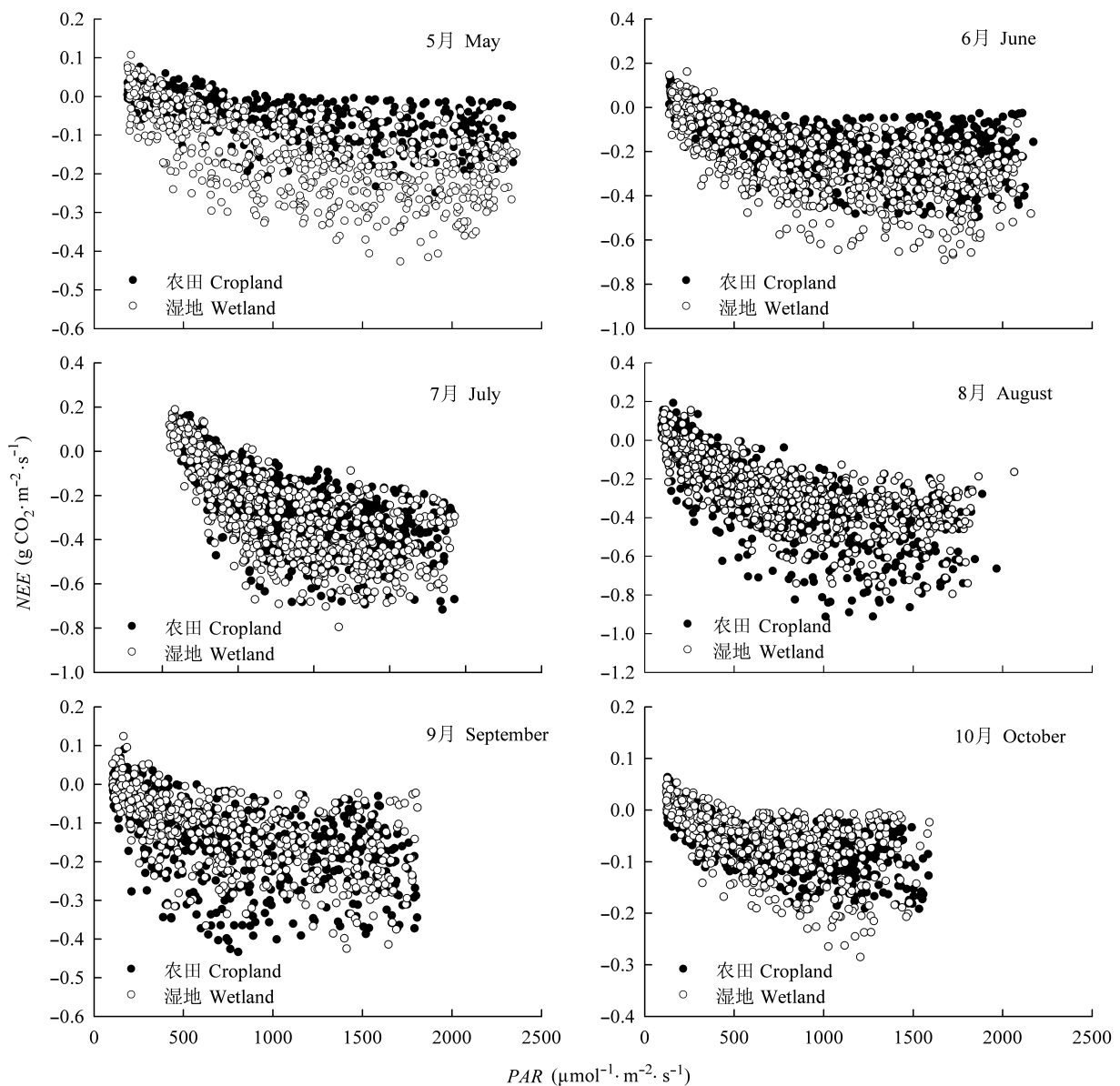


图6 2011年湿地和农田生长季白天净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)和光合有效辐射(PAR)的关系。

Fig. 6 Relationships between daytime net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) and photosynthetic active radiation (PAR) between wetland and cropland ecosystems during growing season in 2011.

$\alpha$ 、 $A_{\max}$ 均随叶面积指数(LAI)增加呈指数增长,并指出约50%的 $\alpha$ 、 $A_{\max}$ 变化可由LAI来解释。但有学者指出,NEE对太阳辐射的响应程度同时还受到其他因子的限制,只有在合适的温度范围内,辐射强度对生态系统CO<sub>2</sub>净交换的影响才较明显(Carrara *et al.*, 2004)。所以,在今后的分析中,应综合考虑各种因子对NEE的影响。

### 3.2 夜晚净生态系统CO<sub>2</sub>交换( $R_{\text{eco,n}}$ )对土壤温度( $T_s$ )和土壤含水量(SWC)协同作用的响应

生长季湿地和农田生态系统的 $R_{\text{eco,n}}$ 与 $T_s$ 均呈现

显著的正相关关系,与先前很多研究结果一致(石培礼等, 2006; 张法伟等, 2008; 李琪等, 2011)。 $T_s$ 是影响生态系统NEE的主要因素, $R_{\text{eco,n}}$ 随着 $T_s$ 的升高而呈指数增长(石培礼等, 2006; 张法伟等, 2008; 李琪等, 2011)。除土壤温度外, $R_{\text{eco,n}}$ 还受到SWC的显著影响(石培礼等, 2006)。水分影响根系生长、根系呼吸、土壤微生物群落构成、微生物活力以及土壤代谢活力(郭明英等, 2011)。本研究中,从一年的尺度来看,两个生态系统的 $R_{\text{eco,n}}$ 均与 $T_s$ 和SWC显著相关,与王俊峰等(2007)的研究结果一致。但是在不同



表2 湿地和农田净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)与土壤温度(T<sub>s</sub>)和土壤含水量(SWC)的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) with soil temperature (T<sub>s</sub>) and soil water content (SWC) in wetland and cropland ecosystems

项目 Item	类型 Type	5 cm深处土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth	10 cm深处土壤温度 Soil temperature at 10 cm depth	10 cm深处土壤含水量 Soil water content at 10 cm depth	20 cm深处土壤含水量 Soil water content at 20 cm depth
生长季白天 Daytime in growing season	湿地 Wetland	-0.39**	-0.34**	0.10**	0.14**
	农田 Cropland	-0.42**	-0.42**	-0.04**	-0.10**
生长季夜间 Nighttime in growing season	湿地 Wetland	0.66**	0.65**	0.14**	-0.15**
	农田 Cropland	0.80**	0.80**	-0.04	0.17**
非生长季 Non-growing season	湿地 Wetland	0.19**	0.17**	0.04*	0.00
	农田 Cropland	0.13**	0.13**	-0.07**	-0.09**
夜晚NEE NEE of nighttime	湿地 Wetland	0.66**	0.65**	0.21**	-0.04**
	农田 Cropland	0.73**	0.73**	0.18**	0.31**

\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ .

表3 生长季湿地和农田生态系统不同土壤含水量(SWC)条件下夜间净生态系统CO<sub>2</sub>交换(R<sub>eco.n</sub>)与土壤温度(T<sub>s</sub>)的关系

Table 3 Relationships between nighttime net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (R<sub>eco.n</sub>) and soil temperature (T<sub>s</sub>) under different ranges of soil water content (SWC) between wetland and cropland ecosystems during growing season

类型 Type	土壤含水量 Soil water content (SWC) (%)	R <sub>eco.n</sub> -T <sub>s</sub>	生态系统呼吸熵 Ecosystem respiration quotient (Q <sub>10</sub> )	R <sup>2</sup>	p
湿地 Wetland	< 40	$y = 0.0132e^{0.0728x}$	2.07	0.34	<0.001
	40 ≤ SWC < 50	$y = 0.0150e^{0.0815x}$	2.26	0.63	<0.001
	≥ 50	$y = 0.0119e^{0.0810x}$	2.24	0.28	<0.001
农田 Cropland	生长季 Growing season	$y = 0.0118e^{0.0831x}$	2.30	0.44	<0.001
	< 40	$y = 0.0028e^{0.1558x}$	4.75	0.51	<0.001
	40 ≤ SWC < 50	$y = 0.0065e^{0.1193x}$	3.30	0.43	<0.001
	≥ 50	$y = 0.0086e^{0.0996x}$	2.71	0.47	<0.001
	生长季 Growing season	$y = 0.0045e^{0.1331x}$	3.78	0.63	<0.001

x, T<sub>s</sub> (°C); y, R<sub>eco.n</sub> (mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

的SWC条件下, R<sub>eco</sub>对温度的敏感性是不同的。当SWC处于过高或者过低的水平时, T<sub>s</sub>已经不是影响R<sub>eco</sub>的主导因子(薛红喜等, 2012)。只有在SWC适宜的情况下, 植物生长才会较少受到SWC的影响, T<sub>s</sub>才能成为影响R<sub>eco</sub>的重要因子(李祎君, 2008)。这是因为SWC过低时, 水分亏缺会引起作物的气孔关闭, 导致光合能力下降; 水分充足时, 适宜的条件会使R<sub>eco</sub>随着T<sub>s</sub>的增加而增加; 但当SWC过高时, 会造成土壤通透能力减弱, 影响根系活力, 致使根系的吸水能力减弱, 也会影响作物的固碳能力(李祎君, 2008; 林同保等, 2008)。湿地相对于别的陆地生态系统, 一般不会由于SWC过低影响呼吸作用, 反而会由于SWC过高, 导致呼吸产物CO<sub>2</sub>的排放受到限制(谢艳兵等, 2006)。从整个生长季来看, R<sub>eco.n</sub>受T<sub>s</sub>和SWC的共同影响, 这与前人的很多研究结果相一致(郝彦宾等, 2006; 李琪等, 2011)。

对湿地和农田不同植被类型Q<sub>10</sub>的比较(表4)发现: 2011年生长季R<sub>eco.n</sub>对T<sub>s</sub>的响应研究中, 湿地的Q<sub>10</sub>为2.30, 接近中国盘锦(Q<sub>10</sub> = 2.38)和加拿大渥太华流域(Q<sub>10</sub> = 2.80)的研究值, 在已有研究结果2.00–2.60的范围之内(Mahecha et al., 2010), 远远低于同阶段农田的Q<sub>10</sub>(3.78)。这是因为Q<sub>10</sub>值的大小受土地覆盖与土地利用类型的影响, 人类通过灌溉、翻耕和施用氮肥能增大呼吸的Q<sub>10</sub>值(周涛和史培军, 2006)。已有的研究表明, 湿地生态系统的Q<sub>10</sub>在1.00–7.70之间(Bonneville et al., 2008), 这两个生态系统的Q<sub>10</sub>值均在这一范围内。

### 3.3 开垦对湿地净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)的影响

从全年来看, 湿地生态系统R<sub>eco</sub>高达1 541.38 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>。开垦为农田后, 其R<sub>eco</sub>为1 384.75 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>。可见, 当湿地开垦成农田之后, R<sub>eco</sub>变小。可能的原因是: 虽然开垦使土壤温度和湿度条件得

表4 不同湿地和农田植被类型生态系统呼吸熵 $Q_{10}$ 的比较Table 4 Comparison of ecosystem respiration quotient ( $Q_{10}$ ) in different wetland and cropland vegetations

地点 Location	主要植被类型 Main vegetation type	生态系统呼吸熵 Ecosystem respiration quotient ( $Q_{10}$ )	观测时间 Observation time (year-month-day)	文献 Reference
加拿大亚伯达北部 Northern Alberta, Canada	泥炭藓 <i>Sphagnum</i>	1.80	2004年生长季	Glenn <i>et al.</i> , 2006
	藁草属植物 <i>Carex</i>	1.90	Growing season in 2004	
加拿大亚伯达 Alberta, Canada	云杉和落叶松沼泽 <i>Picea</i> and <i>Larix</i> fen	1.92	2003年8月 August 2003	Syed <i>et al.</i> , 2006
加拿大渥太华流域 Ottawa River Valley, Canada	香蒲沼泽 Cattail marsh	2.80	2005-05-09–2006-05-30	Bonneville <i>et al.</i> , 2008
中国盘锦 Panjin, China	芦苇湿地 Reed wetland	2.38	2005	Zhou <i>et al.</i> , 2009
中国青藏高原 Qinghai-Xizang Plateau, China	莎草科、毛茛科 Cyperaceae and Ranunculaceae	2.64 ± 0.1	2005	Zhang <i>et al.</i> , 2008
中国鄱阳湖 Poyang Lake, China	藁草 <i>Carex cinerascens</i>	3.31	2009年9月–2010年4月非淹水期 Non-flooded period (2009-09–2010-04)	Hu <i>et al.</i> , 2011
中国青海 Qinghai, China	垂穗披碱草草地 <i>Elymus nutans</i> pasture	4.81	2006	Wu <i>et al.</i> , 2010
中国华北平原 North China Plain	冬小麦、夏玉米 Winter wheat and summer maize	2.94	2002-11–2003-10	Li <i>et al.</i> , 2006
		2.49	2003-11–2004-10	
中国三江平原 Sanjiang Plain, China	稻田 Rice field	2.50	2004-05-15–2004-09-23	Song <i>et al.</i> , 2006

以改善,极大地促进了土壤呼吸作用,加速了上层土壤有机质的分解(迟光宇等, 2006),但是,一方面,与芦苇相比,棉花的枯落物较少。例如,2011年9月下旬,棉花叶片干重仅占整株干重的5%;生长季结束后,棉花秸秆以及根部都被转移出棉田。由此降低了农田的凋落物数量,从而导致其土壤腐殖质的减少。另一方面,耕作会导致土壤有机碳含量迅速减少,并且使土壤有机碳的可利用性降低(郝庆菊等, 2007a)。因此,使得 $R_{eco}$ 的强度减弱。

2011年,芦苇湿地生态系统总净固碳量为 $599.05 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,远大于盘锦芦苇湿地的研究结果(总净固碳量约为 $(238.33 \pm 51.33) \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ )和长江口芦苇湿地的研究结果(总净固碳量约为 $225 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ) (Zhou *et al.*, 2009; 马安娜和陆健健, 2011)。这可能与生态系统地表植被和周围环境因子有关,因为净生态系统 $\text{CO}_2$ 交换反映了光合作用固定碳的过程和生态系统呼吸释放碳的过程,凡是影响这两个过程的因素均会影响湿地的 $\text{CO}_2$ 交换过程(马安娜和陆健健, 2011)。在生长季,芦苇湿地总净固碳量为 $780.95 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,而盘锦芦苇湿地为 $1437.33 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,可能是由于盘锦湿地是淡水沼泽湿地,与黄河三角洲相比,有较高的地上生物量;非生长季芦苇湿地释放的 $\text{CO}_2$ 为 $181.90 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,

远低于盘锦芦苇湿地的释放量( $1199 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ),这可能与土壤有机质含量有关。研究表明,黄河河口湿地土壤有机质含量约为0.07%–0.84% (董洪芳等, 2010),而盘锦辽河河口湿地的土壤有机质含量远高于黄河河口湿地,为2.2%–2.5% (吕国红等, 2006)。

在本研究中,2011年农田生态系统总净固碳量约为 $535.80 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ ,小于湿地的总净固碳量 $599.05 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}$ 。虽然2011年全年农田表现为碳汇,并且与湿地总净固碳量相差不多,但是农田作物固定的大气中的 $\text{CO}_2$ 主要集中在作物体内,在每年秋季作物收获之后,会将农田里作物的果实和秸秆清理掉,而作物的收获会对农田生态系统的碳汇功能有所影响(郝庆菊等, 2007b)。换言之,在综合评价开垦对湿地生态系统 $\text{CO}_2$ 净交换量的影响时,应该考虑到这个问题。

**基金项目** 国家科技支撑计划项目(2011BAC02-B01)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)和国家林业科技支撑计划项目(2009BADB2B0502-01)资助。

**致谢** 感谢中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站杨长利、马秀枝在野外监测工作中给予的帮助。

## 参考文献

- Barr AG, Griffis TJ, Black TA, Lee X, Staebler RM, Fuentes JD, Chen Z, Morgenstern K (2002). Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 813–822.
- Bonneville MC, Strachan IB, Humphreys ER, Roulet NT (2008). Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a temperate cattail marsh in relation to biophysical properties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 69–81.
- Cai WM, Tang HJ, Chen YQ, Zhang FR (2004). Landscape pattern of rural residential areas in Yellow River Delta in recent 20 years. *Resources Science*, 26(5), 89–97. (in Chinese with English abstract) [蔡为民, 唐华俊, 陈佑启, 张凤荣 (2004). 近20年黄河三角洲典型地区农村居民点景观格局. 资源科学, 26(5), 89–97.]
- Carrara A, Janssens IA, Yuste JC, Ceulemans R (2004). Seasonal changes in photosynthesis, respiration and NEE of a mixed temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 15–31.
- Chen GS, Tian HQ (2007). Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 189–204. (in Chinese with English abstract) [陈广生, 田汉勤 (2007). 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 31, 189–204.]
- Chi GY, Wang J, Chen X, Shi Y (2006). Dynamic changes of soil organic carbon (SOC) of different land use types in Sanjiang Plain. *Soil*, 38, 755–761. (in Chinese with English abstract) [迟光宇, 王俊, 陈欣, 史奕 (2006). 三江平原不同土地利用方式下土壤有机碳的动态变化. 土壤, 38, 755–761.]
- Cui BS, Liu XT (2001). Ecological character changes and sustainability management of wetlands in the Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica*, 21, 250–256. (in Chinese with English abstract) [崔保山, 刘兴土 (2001). 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策. 地理科学, 21, 250–256.]
- Dong HF, Yu JB, Sun ZG, Mu XJ, Chen XB, Mao PL, Wu CF, Guan B (2010). Spatial distribution characteristics of organic carbon in the soil-plant systems in the Yellow River estuary tidal flat wetland. *Environmental Science*, 31, 1594–1599. (in Chinese with English abstract) [董洪芳, 于君宝, 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 毛培利, 吴春发, 管博 (2010). 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征. 环境科学, 31, 1594–1599.]
- Du ZX, Zeng HD, Huang XH, Wei GJ, Li XB, Zhang J, Yang YS (2010). Soil respiration and controlling factors at *Phragmites communis* community in riverside wetland. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 5(3), 49–54. (in Chinese with English abstract) [杜紫贤, 曾宏达, 黄向华, 魏国军, 李熙波, 张静, 杨玉盛 (2010). 城市沿江芦苇湿地土壤呼吸动态及其影响因子分析. 亚热带资源与环境学报, 5(3), 49–54.]
- Feng ZJ, Zhao XS (2008). The environmental interpretation for the space change of the reed biomass in the Yellow River Delta. *Research of Soil and Water Conservation*, 15(3), 170–174. (in Chinese with English abstract) [冯忠江, 赵欣胜 (2008). 黄河三角洲芦苇生物量空间变化环境解释. 水土保持研究, 15(3), 170–174.]
- Flanagan LB, Johnson BG (2005). Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130, 237–253.
- Franzen LG (1992). Can earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect? In: *Proceeding of the 9th International Peat Congress*, Uppsala, Sweden. 1–18.
- Glenn AJ, Flanagan LB, Syed KH, Carlson PJ (2006). Comparison of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in two peatlands in western Canada with contrasting dominant vegetation, *Sphagnum* and *Carex*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 115–135.
- Guo MY, Wei ZJ, Yun XJ, Wu YL, Liu HM, Li Y, Xin XP (2011). Effect of grazing on grassland soil respiration. *Pratacultural Science*, 28, 729–736. (in Chinese with English abstract) [郭明英, 卫智军, 运向军, 吴艳玲, 刘红梅, 李耀, 辛晓平 (2011). 放牧对草原土壤呼吸的影响. 草业科学, 28, 729–736.]
- Hao QJ, Wang YS, Song CC, Jiang CS (2007a). CO<sub>2</sub> budget in agro-ecosystems in the Sanjiang Plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 26, 1556–1560. (in Chinese with English abstract) [郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 江长胜 (2007a). 三江平原农田生态系统CO<sub>2</sub>收支研究. 农业环境科学学报, 26, 1556–1560.]
- Hao QJ, Wang YS, Song CC, Jiang CS (2007b). Effects of marsh reclamation on methane and nitrous oxide emissions. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 3417–3426. (in Chinese with English abstract) [郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 江长胜 (2007b). 垦殖对沼泽湿地CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响. 生态学报, 27, 3417–3426.]
- Hao YB, Wang YF, Sun XM, Huang XZ, Cui XY, Niu HS, Zhang YH, Yu GR (2006). Seasonal variation in carbon

- exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(Suppl. I), 174–182. (in Chinese) [郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 黄祥忠, 崔晓勇, 牛海山, 张亚红, 于贵瑞 (2006). 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析. 中国科学D辑: 地球科学, 36(增刊I), 174–182.]
- Hu QW, Xing RX, Zhu LL, Wu Q, Yao B, Liu Y, Hu BH (2011). Characteristics of CO<sub>2</sub> emission from *Carex*-dominated wetland in Poyang Lake in non-flooded period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 1431–1436. (in Chinese with English abstract) [胡启武, 幸瑞新, 朱丽丽, 吴琴, 尧波, 刘影, 胡斌华 (2011). 鄱阳湖苔草湿地非淹水期CO<sub>2</sub>释放特征. 应用生态学报, 22, 1431–1436.]
- Li J, Yu Q, Sun XM, Tong J, Ren CY, Wang J, Liu EM, Zhu ZL, Yu GR (2006). Carbon exchange and environment regulation mechanism in cropland ecosystem on the China North Plain. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(Suppl. I), 210–223. (in Chinese) [李俊, 于强, 孙晓敏, 同娟, 任传友, 王靖, 刘恩民, 朱治林, 于贵瑞 (2006). 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. 中国科学D辑: 地球科学, 36(增刊I), 210–223.]
- Li Q, Xue HX, Wang YL, Hu ZH, Li J (2011). The preliminary study on the impact of soil temperature and moisture on carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem. *Journal of Agro-Environment Science*, 30, 605–610. (in Chinese with English abstract) [李琪, 薛红喜, 王云龙, 胡正华, 李洁 (2011). 土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响初探. 农业环境科学学报, 30, 605–610.]
- Li YJ (2008). *Dynamics of Carbon, Water and Heat Fluxes and Their Environmental Controls in a Maize Agroecosystem*. PhD dissertation, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing. (in Chinese with English abstract) [李祎君 (2008). 玉米农田水热碳通量动态及其环境控制机理研究. 博士学位论文, 中国科学院植物研究所, 北京.]
- Li YZ, Yu JB, Han GX, Wang XH, Wang YL, Guan B (2011). Dynamic evolution of natural wetlands in Yellow River Delta and related driving factors. *Chinese Journal of Ecology*, 30, 1535–1541. (in Chinese with English abstract) [栗云召, 于君宝, 韩广轩, 王雪宏, 王永丽, 管博 (2011). 黄河三角洲自然湿地动态演变及其驱动因子. 生态学杂志, 30, 1535–1541.]
- Lin TB, Wang ZQ, Song XL, Qu YW, Meng ZY (2008). CO<sub>2</sub> flux and impact factors in winter wheat field ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 16, 1458–1463. (in Chinese with English abstract) [林同保, 王志强, 宋雪雷, 曲奕威, 孟战赢 (2008). 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析. 中国生态农业学报, 16, 1458–1463.]
- Liu XT, Ma XH (2000). Influence of large-scale reclamation on natural environment and regional environmental protection in the Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 20, 14–19. (in Chinese with English abstract) [刘兴土, 马学慧 (2000). 三江平原大面积开荒对自然环境影响及区域生态环境保护. 地理科学, 20, 14–19.]
- Lloyd J, Taylor JA (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315–323.
- Lü GH, Zhou L, Zhao XL, Jia QY, Xie YB, Zhou GS (2006). Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 384–389. (in Chinese with English abstract) [吕国红, 周莉, 赵先丽, 贾庆宇, 谢艳兵, 周广胜 (2006). 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征. 应用生态学报, 17, 384–389.]
- Ma AN, Lu JJ (2008). The progress of research on carbon flux in wetland ecosystems. *Wetland Science*, 6, 116–123. (in Chinese with English abstract) [马安娜, 陆健健 (2008). 湿地生态系统碳通量研究进展. 湿地科学, 6, 116–123.]
- Ma AN, Lu JJ (2011). Net ecosystem exchange of carbon and tidal effects in Chongxi Wetland, Yangtze Estuary. *Research of Environmental Sciences*, 24, 716–721. (in Chinese with English abstract) [马安娜, 陆健健 (2011). 长江口崇西湿地生态系统的二氧化碳交换及潮汐影响. 环境科学研究, 24, 716–721.]
- Mahecha MD, Reichstein M, Carvalhais N, Lasslop G, Lange H, Seneviratne SI, Vargas R, Ammann C, Arain MA, Cescatti A, Janssens IA, Migliavacca M, Montagnani L, Richardson AD (2010). Global convergence in the temperature sensitivity of respiration at ecosystem level. *Science*, 329, 838–840.
- Ruimy A, Jarvis PG, Baldocchi DD, Saugier B (1995). CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: a review. *Advances in Ecological Research*, 26, 1–68.
- Shi PL, Sun XM, Xu LL, Zhang XZ, He YT, Zhang DQ, Yu GR (2006). The net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and its influence factor in pole grass meadow, Tibet Plateau. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 36(Suppl. I), 194–203. (in Chinese) [石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 张宪洲, 何永涛, 张东秋, 于贵瑞 (2006). 青藏高原草原化嵩草草甸生态系统CO<sub>2</sub>净交换及其影响因子. 中国科学D辑: 地球科学, 36(增刊I), 194–203.]

- Song CC (2003). Advance in research on carbon cycling in wetlands. *Scientia Geographica Sinica*, 23, 622–628. (in Chinese with English abstract) [宋长春 (2003). 湿地生态系统碳循环研究进展. 地理科学, 23, 622–628.]
- Song CY, Liu GH, Liu QS, Cao MC, Huang C (2008). Distribution patterns of plant communities in the Yellow River Delta and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 2042–2048. (in Chinese with English abstract) [宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 曹铭昌, 黄翀 (2008). 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素. 生态学杂志, 27, 2042–2048.]
- Song T, Wang YS, Song CC, Shi LQ, Huang Y, Wang PX (2006). CO<sub>2</sub> fluxes from rice fields of Sanjiang Plain and its environmental response factors. *China Environmental Science*, 26, 657–661. (in Chinese with English abstract) [宋涛, 王跃思, 宋长春, 石立庆, 黄耀, 王盘兴 (2006). 三江平原稻田CO<sub>2</sub>通量及其环境响应特征. 中国环境科学, 26, 657–661.]
- Syed KH, Flanagan LB, Carlson PJ, Glenn AJ, van Gaalen KE (2006). Environmental control of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a treed, moderately rich fen in northern Alberta. *Agricultural and Forest Meteorology*, 140, 97–114.
- Tong XJ, Li J, Liu D (2011). Characteristics and controlling factors of photosynthesis in a maize ecosystem on the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 4889–4899. (in Chinese with English abstract) [同小娟, 李俊, 刘渡 (2011). 华北平原玉米田生态系统光合作用特征及影响因素. 生态学报, 31, 4889–4899.]
- Wan ZM, Song CC, Yang GS, Huang JY, Wang LL, Li YC (2009). The active soil organic carbon fraction and its relationship with soil enzyme activity in different types of marshes in the Sanjiang Plain. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29, 406–412. (in Chinese with English abstract) [万忠梅, 宋长春, 杨桂生, 黄靖宇, 王丽丽, 李英臣 (2009). 三江平原湿地土壤活性有机碳组分特征及其与土壤酶活性的关系. 环境科学学报, 29, 406–412.]
- Wang H, Wang R, Yu Y, Mitchell MJ, Zhang L (2011). Soil organic carbon of degraded wetlands treated with freshwater in the Yellow River Delta, China. *Journal of Environmental Management*, 92, 2628–2633.
- Wang HM, Li ZH, Han GD, Han JW (2007). Analysis of dynamical characteristics of landscape patterns in Yellow River Delta. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 27, 81–85. (in Chinese with English abstract) [王海梅, 李政海, 韩国栋, 韩经纬 (2007). 黄河三角洲土地利用及景观格局的动态分析. 水土保持通报, 27, 81–85.]
- Wang JF, Wang GX, Wang YB, Li YS (2007). The influence of marsh and alpine meadow grassland degradation to CO<sub>2</sub> emissions in the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 52, 1554–1560. (in Chinese) [王俊峰, 王根绪, 王一博, 李元寿 (2007). 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. 科学通报, 52, 1554–1560.]
- Wu LB, Gu S, Zhao L, Xu SX, Zhou HK, Feng C, Xu WX, Li YN, Zhao XQ, Tang YH (2010). Variation in net CO<sub>2</sub> exchange, gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 770–780. (in Chinese with English abstract) [吴力博, 古松, 赵亮, 徐世晓, 周华坤, 冯超, 徐维新, 李英年, 赵新全, 唐艳鸿 (2010). 三江源地区人工草地的生态系统CO<sub>2</sub>净交换、总初级生产力及其影响因子. 植物生态学报, 34, 770–780.]
- Xie YB, Jia QY, Zhou L, Li RP, Lü GH (2006). Soil respiration and its controlling factors at *Phragmites communis* wetland in Panjin. *Journal of Meteorology and Environment*, 22(4), 53–58. (in Chinese with English abstract) [谢艳兵, 贾庆宇, 周莉, 李荣平, 吕国红 (2006). 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析. 气象与环境学报, 22(4), 53–58.]
- Xue HX, Li F, Li Q, Wang LX, Wang YL, Hu ZH (2012). Research progress on carbon flux over agro-ecosystem based on the eddy covariance method in China. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 4, 226–232. (in Chinese with English abstract) [薛红喜, 李峰, 李琪, 王连喜, 王云龙, 胡正华 (2012). 基于涡度相关法的中国农田生态系统碳通量研究进展. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 4, 226–232.]
- Yang Q, Lü XG (1999). A preliminary study on the soil respiration in wetland ecosystem of Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 30, 254–256. (in Chinese) [杨青, 吕宪国 (1999). 三江平原湿地生态系统土壤呼吸动态变化的初探. 土壤通报, 30, 254–256.]
- Zhang FW, Li YN, Cao GM, Li FX, Ye GJ, Liu JH, Wei YL, Zhao XQ (2012). CO<sub>2</sub> fluxes and their driving factors over alpine meadow grassland ecosystems in the northern shore of Qinghai Lake, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 187–198. (in Chinese with English abstract) [张法伟, 李英年, 曹广民, 李凤霞, 叶广继, 刘吉宏, 魏永林, 赵新全 (2012). 青海湖北岸高寒草甸草原生态系

- 统CO<sub>2</sub>通量特征及其驱动因子. 植物生态学报, 36, 187–198.]
- Zhang FW, Liu AH, Li YN, Zhao L, Wang QX, Du MY (2008). CO<sub>2</sub> flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 453–462. (in Chinese with English abstract) [张法伟, 刘安花, 李英年, 赵亮, 王勤学, 杜明远 (2008). 青藏高原高寒湿地生态系统CO<sub>2</sub>通量. 生态学报, 28, 453–462.]
- Zhang JB, Song CC (2004). Effects of different land-use on soil physical-chemical properties in the Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 35, 371–373. (in Chinese with English abstract) [张金波, 宋长春 (2004). 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响. 土壤通报, 35, 371–373.]
- Zhang XL, Li PY, Liu YL, Xu XY, Cao CX, Shan K (2007). Studies on the wetland of the Yellow River Delta: a review. *Marine Sciences*, 31(7), 81–85. (in Chinese with English abstract) [张晓龙, 李培英, 刘月良, 徐兴永, 曹成效, 单凯 (2007). 黄河三角洲湿地研究进展. 海洋科学, 31(7), 81–85.]
- Zhou L, Zhou GS, Jia QY (2009). Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China. *Aquatic Botany*, 91, 91–98.
- Zhou T, Shi PJ (2006). Indirect impacts of land use change on soil organic carbon change in China. *Advances in Earth Science*, 21, 138–143. (in Chinese with English abstract) [周涛, 史培军 (2006). 土地利用变化对中国土壤碳储量变化的间接影响. 地球科学进展, 21, 138–143.]

责任编辑: 张守仁 责任编辑: 王 葳