

# 黄河三角洲芦苇湿地生长季净生态系统 CO<sub>2</sub>交换及其环境调控机制\*

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>中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 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** 采用涡度相关法, 对2011年生长季的黄河三角洲芦苇湿地净生态系统CO<sub>2</sub>交换(NEE)进行了观测, 研究湿地NEE的变化规律及其影响因子。结果表明: 不同月份芦苇湿地的NEE日变化均呈“U”形曲线, CO<sub>2</sub>最大净吸收率和释放率的日均值分别为(0.44±0.03)和(0.16±0.01) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>; 芦苇湿地NEE、生态系统呼吸( $R_{eco}$ )、总初级生产力(GPP)的季节变化均呈现生长旺季(7—9月)较高、生长初期(5—6月)和生长末期(10—11月)较低的趋势;  $R_{eco}$ 和NEE在8月达到峰值, GPP在7月达到峰值。芦苇湿地生态系统的CO<sub>2</sub>交换受到光合有效辐射(PAR)、土壤温度( $T_s$ )和土壤体积含水量(SWC)的共同影响。白天NEE与PAR呈直角双曲线关系; 5 cm深处 $T_s$ 与夜间生态系统呼吸( $R_{eco,n}$ )呈指数关系, 生态系统呼吸的温度敏感性( $Q_{10}$ )为2.30, SWC和 $T_s$ 是影响芦苇湿地 $R_{eco,n}$ 的主要因子。在整个生长季, 黄河三角洲芦苇湿地生态系统是一个明显的CO<sub>2</sub>的汇, 总净固碳量为780.95 g CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>.

**关键词** 净生态系统CO<sub>2</sub>交换 总初级生产力 生态系统呼吸 芦苇湿地 黄河三角洲

**文章编号** 1001-9332(2013)09-2415-08 **中图分类号** X171.1 **文献标识码** A

**Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and its environmental regulation mechanisms in a reed wetland in the Yellow River Delta of China during the growth season.** 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>, MAO Pei-li<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; <sup>3</sup>Management Bureau of the Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong, China; <sup>4</sup>College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(9): 2415–2422.

**Abstract:** By using eddy covariance technique, this paper measured the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE) in a reed (*Phragmites australis*) wetland in the Yellow River Delta of China during the growth season of 2011, and investigated the variation patterns of the NEE and related affecting factors. The average diurnal variation of the NEE in different months showed a U-type curve, with the maximum net CO<sub>2</sub> uptake rate and release rate being (0.44±0.03) and (0.16±0.01) mg CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively. The NEE, ecosystem respiration ( $R_{eco}$ ), and gross primary productivity (GPP) were all higher in vigorous growth season (from July to September) and lower in early growth season (from May to June) and late growth season (from October to November). Both  $R_{eco}$  and NEE reached their maximum values in August, while GPP reached its peak value in July. During the growth season, the ecosystem CO<sub>2</sub> exchange was mainly dominated by photosynthetic active radiation (PAR), soil temperature ( $T_s$ ), and soil water content (SWC). There was a rectangular hyperbolic relationship between the daytime NEE and PAR. The nighttime ecosystem respiration ( $R_{eco,n}$ ) was exponentially correlated with the  $T_s$  at 5 cm depth, and the temperature sensitivity of

\*“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223)和中国科学院“百人计划”项目资助。

\*\*通讯作者. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

2012-10-29 收稿, 2013-06-18 接受.

the ecosystem respiration ( $Q_{10}$ ) was 2.30. SWC and  $T_s$  were the main factors affecting the  $R_{\text{eco},n}$ . During the entire growth season, the reed wetland ecosystem in the Yellow River delta was an obvious carbon sink, with the total net carbon sequestration being  $780.95 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ .

**Key words:** net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange; gross primary productivity; ecosystem respiration; reed wetland; Yellow River Delta.

湿地是陆地生态系统的重要组成部分。全球现有湿地面积占陆地总面积的 2% ~ 6%<sup>[1]</sup>,但是,储存在湿地泥炭中的碳总量为 120 ~ 260 Pg,约占地球碳总量的 15%<sup>[2]</sup>。湿地对全球碳平衡和气候变化起着重要作用,研究不同类型湿地生态系统的碳循环过程是认识陆地生态系统碳源/汇机制的基础<sup>[3]</sup>。近年来,随着涡度相关技术的发展,使得直接测定陆地生态系统与大气间的  $\text{CO}_2$  和水热通量成为可能。涡度相关技术是对大气与森林、草原或农田等生态系统间的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和热量通量进行非破坏性测定的一种微气象观测技术<sup>[4]</sup>。目前,该技术已广泛应用于陆地生态系统  $\text{CO}_2$  吸收与排放的测定中,所观测的数据已成为检验各种模型估算精度的权威资料<sup>[5]</sup>。

国外对湿地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换的研究已有很多报道<sup>[6-8]</sup>。我国的湿地生态系统碳收支研究主要集中在青藏高原的若尔盖高原草丛湿地<sup>[9-10]</sup>、三江平原草丛湿地<sup>[11-12]</sup>等河口和内陆湿地,但是对滨海湿地碳通量的研究相对较少<sup>[13-14]</sup>。滨海湿地是陆地生态系统和海洋生态系统的交错过渡地带,是自然保护和全球变化研究的重要对象。黄河三角洲处于海陆交错地带,受河海淡咸水双重影响,加之地貌和人为作用,发育了多种多样的湿地生态系统,成为陆-海相互作用研究的热点地区<sup>[15-17]</sup>。前人对黄河三角洲湿地生态系统的研究主要集中在生态系统植物群落分布<sup>[15-16]</sup>、生态系统演变<sup>[17-18]</sup>以及人类活动的影响<sup>[19-20]</sup>上,对湿地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换(NEE)的研究还鲜有报道。因此,本研究采用涡度相关法,通过研究黄河三角洲芦苇(*Phragmites australis*)湿地 NEE 及其环境要素,分析芦苇湿地 NEE 的变化规律及其影响因素,旨在为揭示黄河三角洲地区芦苇湿地生态系统  $\text{CO}_2$  源/汇功能提供数据支持和理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

黄河三角洲位于山东省东营市东北部,是我国天然湿地分布最集中的区域之一。该区域属于温带

半湿润大陆性季风气候,年均气温  $11.7 \sim 12.8^\circ\text{C}$ ,年均蒸发量  $1900 \sim 2400 \text{ mm}$ <sup>[15]</sup>,年均降雨量  $530 \sim 630 \text{ mm}$ ,降雨量的季节和年际变化较大。土壤类型以潮土和盐碱土为主,质地多为轻壤土和中壤土<sup>[16]</sup>。该区域滨海浅洼地及滩涂湿地植被类型主要有:柽柳(*Tamarix chinensis*)群落、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、獐茅(*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群落和香蒲(*Typha angustifolia*)群落等<sup>[17]</sup>。

研究样地设在中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站( $37^{\circ}45'50''\text{N}$ ,  $118^{\circ}59'24''\text{E}$ )。试验站植被类型以湿地植被为主,优势种为:芦苇、盐地碱蓬、柽柳、白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)和獐茅,植被覆盖度为 70% ~ 90%。涡度相关系统设在地势平坦、植物生长茂盛的芦苇湿地中央部,在降雨集中的 8—10 月,地面有较多积水,植被高度在 1.0 ~ 1.8 m。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 观测方法** 运用开路式涡度相关设备与常规气象观测仪器进行长期定位观测。涡度相关系统包括三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell, USA)和开路红外  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  分析仪(LI-7500, LI-COR, USA),架设于距地表 3 m 处,原始数据采样频率为 10 Hz。微气象观测系统包括:2 m 高处的风向和风速(034B, Campbell, USA)、空气温度(HMP45C, Vaisala, Finland)、净辐射(CNR4, Kipp & Zonen, the Netherlands)和降水量(TE525MM, Texas Electronics, USA)。土壤因子监测主要包括:5、10、20、30、50 cm 深处土壤温度(109SS, Campbell, USA)和 10、20、40、60、80、100 cm 深处土壤体积含水量(EnviroSMART SDI-12, EnviroScan, USA)。所有数据通过数据采集器(CR1000, Campbell, USA)在线采集并按 30 min 计算平均值进行存储。经由开路式涡度相关设备所监测到的净生态系统  $\text{CO}_2$  交换(NEE)数据,负值表示生态系统吸收  $\text{CO}_2$ ,正值表示生态系统释放  $\text{CO}_2$ 。

**1.2.2 数据处理** 数据取自 2011 年 5 月 1 日—10 月 31 日所有微气象数据和通量数据,均进行数据质量控制。在原始通量数据分析之前,需先进行数据的预处理:野点去除、坐标旋转、WPL 校正、夜间通量校正等。分析数据时进行以下处理:1)去除所有降

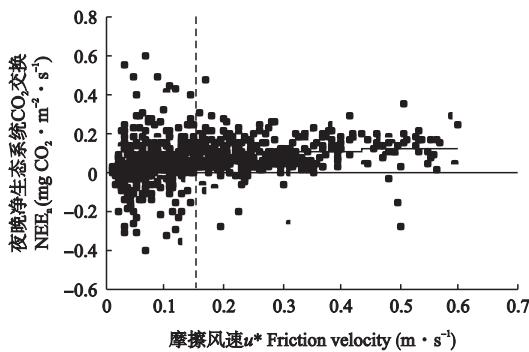


图 1 生长季芦苇湿地夜晚净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换与摩擦风速的关系

**Fig. 1** Relationship between friction velocity and nighttime net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange (NEE<sub>n</sub>) during the growing season.

雨时段对应的数据;2)去除生长季 | NEE | > 1 mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup><sup>[9]</sup> 的数据;3)去除夜间 NEE 为负以及摩擦风速( $U_*$ )小于某一阈值  $U_{*c}$  对应的 NEE 数据。

对芦苇湿地下垫面进行分析,绘制夜间 NEE 和  $U_*$  的散点图(图 1). 当  $U_*$  达到 0.15 m · s<sup>-1</sup> 之后, CO<sub>2</sub> 通量的变化基本处于稳定,故选择  $U_{*c} = 0.15$  m · s<sup>-1</sup> 作为临界值.

对于夜间缺失的数据,利用夜间土壤温度( $T_s$ )与夜晚生态系统呼吸( $R_{eco,n}$ , mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)的指数关系插补<sup>[21]</sup>. 用式(2)得到生态系统呼吸的温度敏感性指数( $Q_{10}$ ),代表温度每升高 10 ℃时生态系统呼吸的相对增长量<sup>[21]</sup>. 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<sup>[22]</sup>插补[式(3)].

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

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

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

式中: $a$  和  $b$  为拟合系数; $T_s$  为土壤温度(℃);PAR 为光合有效辐射(μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>); $\alpha$  和  $A_{max}$  分别为生态系统表观光量子效率(mg CO<sub>2</sub> · μmol<sup>-1</sup> pho)和潜在最大 CO<sub>2</sub> 同化速率(mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 即 PAR 趋于极大时生态系统净光合速率); $R_e$  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>).

由于涡度相关系统观测的 CO<sub>2</sub> 通量为 NEE, 白天生态系统呼吸( $R_{eco,d}$ , mg CO<sub>2</sub> · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)依据  $R_{eco,n}$  与  $T_s$  的函数关系外延来估算<sup>[9]</sup>,  $R_{eco,d}$  与  $R_{eco,n}$  之和即可得到生态系统的总呼吸量( $R_{eco}$ ). 生态系统的总初级生产力(GPP)为 NEE 与  $R_{eco}$  之差<sup>[23]</sup>.

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

运用线性回归分析方法分析  $R_{eco,n}$  与  $T_s$  的指数关系和  $R_{eco,n}$  与土壤体积含水量的二次曲线关系;用非线性拟合方法分析生长季各月白天 NEE 与 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 软件完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 滨海湿地环境因子的季节变化

由图2可以看出, 2011年5—10月, 该地区平

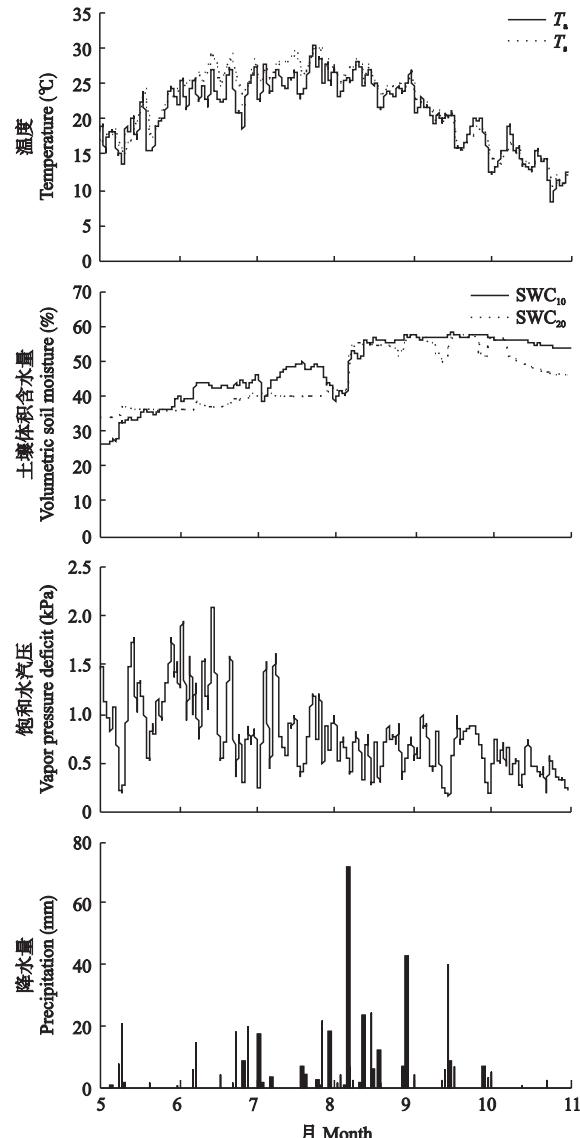


图 2 生长季芦苇湿地的气温( $T_a$ )、5 cm 土壤温度( $T_s$ )、10 cm(SWC<sub>10</sub>) 和 20(SWC<sub>20</sub>) cm 土壤体积含水量、饱和水汽压和降水量的月变化

**Fig. 2** Variations of air temperature ( $T_a$ ), soil temperature at 5 cm depth ( $T_s$ ), volumetric soil moisture at 10 cm (SWC<sub>10</sub>) and 20 cm (SWC<sub>20</sub>) depth, vapor pressure deficit and precipitation during the growing season in 2011.

均气温为 $21.1^{\circ}\text{C}$ ,月均最高(7月)和最低气温(10月)为 $26.0$ 和 $13.6^{\circ}\text{C}$ ;5 cm 深处土壤温度平均为 $22.2^{\circ}\text{C}$ .在生长季的前期,降雨稀少,10 和 20 cm 处的土壤体积含水量(SWC)维持在一个较低的水平,随着降雨量的增大,10 cm 处的 SWC 较 20 cm 处的 SWC 先快速增高,而后维持在一个较高的水平.饱和水汽压差(VPD)有明显的季节差异,最大值出现在 6 月中旬.研究区 2011 年生长季的降雨量为 496.2 mm,降水主要集中在 7—9 月,8 月降雨最多,达 215.3 mm,占整个生长季降雨量的 43%.

## 2.2 生长季湿地生态系统 $\text{CO}_2$ 交换的变化

**2.2.1** 净生态系统  $\text{CO}_2$  交换的日变化 由图 3 可以看出,在 2011 年生长季,芦苇湿地生长季净生态系统  $\text{CO}_2$  交换(NEE)的日变化整体呈“U”形曲线:在 6:00 左右 NEE 由正值(释放)转为负值(吸收),随着光合有效辐射(PAR)的增加,中午前后达到  $\text{CO}_2$  净吸收的最大值;然后吸收量减小,到 18:00 左右,NEE 由吸收转为释放.其中,昼夜交替的月际变化明显.在生长季的白天,芦苇湿地生态系统净  $\text{CO}_2$  吸收的最大值一般出现在 12:00 左右,7 月湿地 NEE 日平均值达到极值( $-0.44\pm0.03$ )  $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,夜间湿地生态系统  $\text{CO}_2$  排放最大值为( $0.16\pm0.01$ )  $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**2.2.2** 净生态系统  $\text{CO}_2$  交换、生态系统呼吸和总初级生产力的季节动态 在生长季中,芦苇湿地生态系统 NEE、生态系统呼吸( $R_{\text{eco}}$ )和总初级生产力(GPP)的季节变化均呈 7—9 月较高,5—6 月和 10—11 月较低的趋势.进入生长季后,随着水热条件的改变以及地上植被的生长,芦苇湿地的 NEE、 $R_{\text{eco}}$ 、GPP 均呈增长趋势; $R_{\text{eco}}$  和 NEE 分别在 8 月 9 日和 8 月 17 日达到峰值,GPP 于 7 月 11 日达到峰

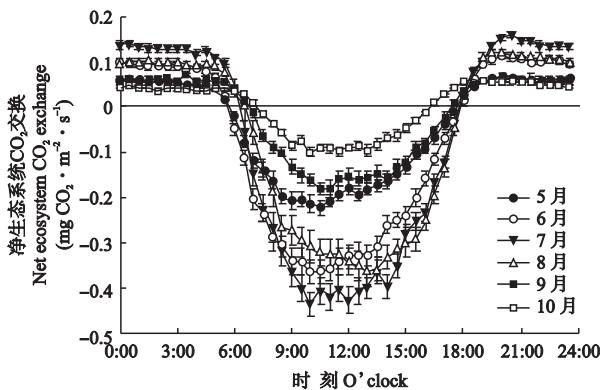


图 3 生长季芦苇湿地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange in a reed wetland during the growing season in 2011 (mean $\pm$ SE).

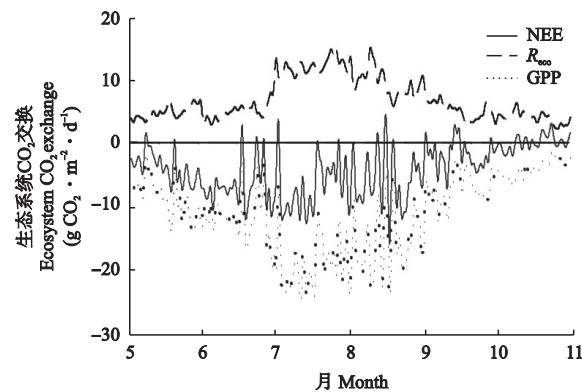


图 4 生长季芦苇湿地生态系统总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸( $R_{\text{eco}}$ )和净生态系统  $\text{CO}_2$  交换(NEE)

Fig. 4 Variations in the ecosystem gross primary production (GPP), ecosystem respiration ( $R_{\text{eco}}$ ) and net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange (NEE) in a reed wetland during the growing season in 2011.

值.进入 9 月以后,NEE、GPP 和  $R_{\text{eco}}$  均呈减小趋势.在整个生长季,GPP 总量高达  $2022.77 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ , $R_{\text{eco}}$  为  $1241.82 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,芦苇湿地生态系统总净固碳量为  $780.95 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ (图 4).

## 2.3 净生态系统 $\text{CO}_2$ 交换的环境控制机制

**2.3.1** 光合有效辐射对白天 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,NEE 和 PAR 之间呈直角双曲线关系(图 5).生长季各月 NEE 随 PAR 增加都呈增加趋势,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, $A_{\text{max}}$  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  $0.0081 \text{ mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ pho}$ (表 1).

**2.3.2** 土壤温度和体积含水量对夜晚生态系统呼吸

表 1 生长季芦苇湿地各月白天 NEE 和 PAR 基于 Michaelis-Menten 模型模拟参数的比较

Table 1 Comparison of analog parameters between daytime net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange and photosynthetic active radiation using a Michaelis-Menten model in a reed wetland ecosystem during the growing season in 2011

月份 Month	最大光合速率 $A_{\text{max}}$ ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观光量子产率 $\alpha$ ( $\text{mg CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \text{ pho}$ )	白天生态系统暗呼吸速率 $R_e$ ( $\text{mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$R^2$
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

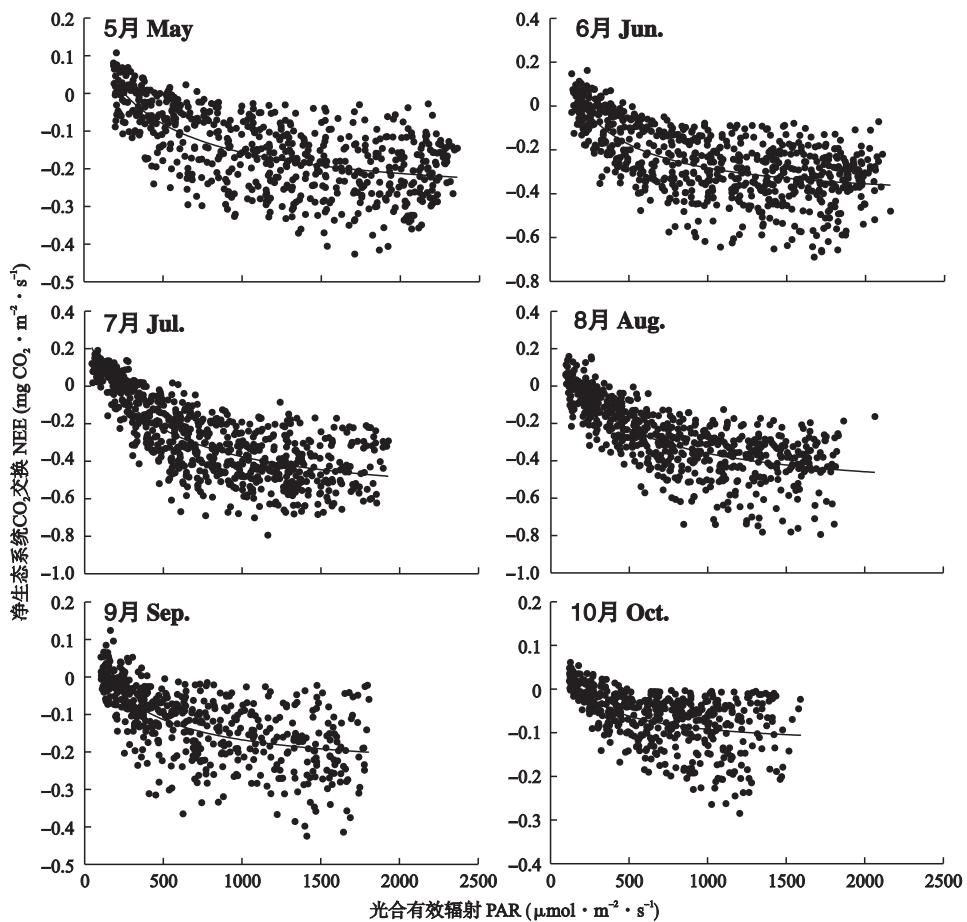


图 5 生长季芦苇湿地白天净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换和光合有效辐射的拟合曲线

Fig. 5 Simulated curves of relationship between daytime NEE and PAR in a reed wetland during the growing season in 2011.

的影响 利用  $U_* > 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时的夜晚生态系统呼吸 ( $R_{\text{eco},n}$ ) 数据与不同深度 (5、10、20、30 cm) 土壤温度 ( $T_s$ ) 进行相关分析, 其中 5 cm 深处的  $T_s$  与  $R_{\text{eco},n}$  的相关性最为显著 (表 2). 因此采用 5 cm 深处的  $T_s$  分析温度对  $R_{\text{eco},n}$  的影响. 回归分析表明,  $T_s$  与  $R_{\text{eco},n}$  呈指数关系, 随着土壤温度的升高,  $R_{\text{eco},n}$  增大

表 2 夜晚生态系统呼吸与土壤温度的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of nighttime ecosystem respiration with soil temperature

月份 Month	土壤温度 Soil temperature (°C)			
	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm
5	0.53 **	0.54 **	0.51 **	0.47 **
6	0.23 **	0.11 **	0.12 **	0.42 **
7	0.24 **	0.23 **	0.20 **	0.19 **
8	0.44 **	0.39 **	0.32 **	0.09
9	0.36 **	0.34 **	0.31 **	0.23 **
10	0.39 **	0.40 **	0.41 **	0.08
生长季 Growing season	0.66 **	0.65 **	0.60 **	0.58 **

\* \*  $P < 0.01$

(图 6). 当  $T_s > 15^\circ\text{C}$  时,  $R_{\text{eco},n}$  随着  $T_s$  的升高而急剧增加. 根据式(2)得到该生态系统  $Q_{10}$  值为 2.30.

回归分析表明, 生长季  $R_{\text{eco},n}$  与 20 cm 处土壤体积含水量 (SWC) 呈显著的二次曲线关系 (图 7), SWC 可解释  $R_{\text{eco},n}$  约 10% 的变化. 由表 3 可以看出, 当 SWC 在 40% ~ 50% 时,  $Q_{10}$  值最大, 随着 SWC 降低或者增加,  $Q_{10}$  均降低, 表明土壤水分和温度共同影响着  $R_{\text{eco},n}$ .

表 3 不同水分条件下芦苇湿地夜晚生态系统呼吸 ( $R_{\text{eco},n}$ ,  $y$ ) 与 5 cm 深处土壤温度 ( $T_s$ ,  $x$ ) 的关系

Table 3 Relationships between nighttime ecosystem respiration ( $R_{\text{eco},n}$ ,  $y$ ) and soil temperature ( $T_s$ ,  $x$ ) at 5 cm depth under different ranges of volumetric soil moisture in a reed wetland during the growing season

土壤体积含水量 Volumetric soil moisture (%)	$R_{\text{eco},n} - T_s$	n	$R^2$	P	$Q_{10}$
<40	$y = 0.0132e^{0.0728x}$	904	0.34	<0.001	2.07
40~50	$y = 0.0150e^{0.0815x}$	653	0.63	<0.001	2.26
≥50	$y = 0.0119e^{0.0810x}$	608	0.28	<0.001	2.24

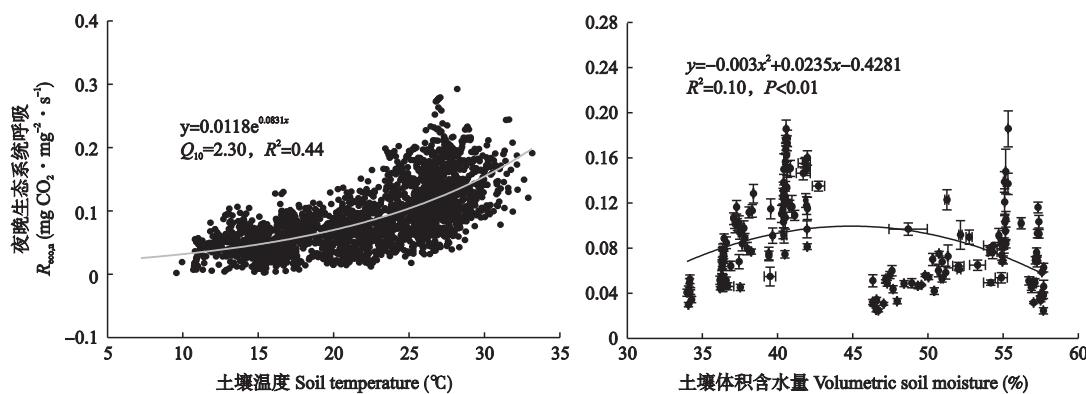


图 6 生长期芦苇湿地夜晚生态系统呼吸与 5 cm 土壤温度和 20 cm 土壤体积含水量的关系

Fig. 6 Relationship between nighttime ecosystem respiration ( $R_{\text{eco},n}$ ) and soil temperature at 5 cm depth, volumetric soil moisture (SWC) at 20 cm depth in a reed wetland during the growing season in 2011.

### 3 讨 论

#### 3.1 生长期湿地 NEE 的变化特征

本研究表明,生长期芦苇湿地各月 NEE 的日均值呈现“U”形变化曲线,这与以往的研究结果一致<sup>[13,24–26]</sup>. 湿地净生态系统  $\text{CO}_2$  交换的年际变化可以反映特定生态系统的碳源/汇功效. 由于生态系统覆盖的植被及气候环境的不同,各湿地生态系统的碳收支状况往往表现不一(表 4). 在本研究中,整个生长期芦苇湿地为  $\text{CO}_2$  的汇,生态系统总净固碳量为 780.95 g  $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,与加拿大亚伯达地区适度营养育林沼泽地的净固碳量相当<sup>[24]</sup>;明显低于中国盘锦芦苇湿地和加拿大渥太华流域的温带香蒲沼泽地的净固碳量<sup>[8,25]</sup>;高于青藏高原湿地生态系统生长期(5—9 月)的净固碳量<sup>[9]</sup>和中国三江源人工草地生态

系统的净固碳量<sup>[26]</sup>,说明黄河三角洲是一个净固碳量相对较高的地区. 与此同时,特定的生态系统可能由于降水格局等的改变而表现出碳源/汇的不确定性<sup>[5,27]</sup>.

#### 3.2 NEE 的环境控制机制

**3.2.1 光合有效辐射** PAR 是影响植物光合作用的主要限制因子<sup>[29]</sup>. 当太阳辐射强度较低时,净生态系统  $\text{CO}_2$  交换随着 PAR 的增加而增加,其变化趋势符合直角双曲线方程<sup>[30]</sup>. 本研究采用 Michaelis-Menten 方程拟合得到,黄河三角洲湿地生态系统生长期的初始光能利用率为( $\alpha$ )、最大光合作用速率( $A_{\max}$ )、白天生态系统呼吸速率( $R_{\text{eco},d}$ )均在 6 月达到最大值,高于青海三江源区人工草地生态系统生长期的  $\alpha$  和  $A_{\max}$  最大值<sup>[31]</sup>. Zhou 等<sup>[25]</sup>认为,不同生长阶段  $A_{\max}$  的变化与植物生长及环境条件有关. 同

表 4 生长期不同湿地植被类型净生态系统  $\text{CO}_2$  交换的比较

Table 4 Comparison of net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange (NEE) in different wetland vegetations during the growing season

地点 Location	主要植被类型 Main vegetation type	净生态系统 $\text{CO}_2$ 交换 NEE (g $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ )	观测时间 Observation time	文献 Reference
中国长江口 Yangtze Estuary, China	芦苇湿地 Reed wetland	-310.00	生长季 Growing season	[13]
中国青藏高原 Qinghai-Tibetan Plateau, China	高寒湿地 Alpine wetland	-230.16	2005-05—09	[9]
中国三江源 Sanjiangyuan Region, China	垂穗披碱草地 <i>Elymus nutans</i> pasture	-268.00	2006-05—10	[26]
中国青海湖北岸 Northern Shore of Qinghai Lake, China	高寒草甸草原 Alpine meadow grassland	-511.79	05—09	[28]
中国盘锦 Pangjin, China	芦苇湿地 Reed wetland	-1437.00	2005-05—10	[25]
加拿大亚伯达 Alberta, Canada	云杉和落叶松沼泽 <i>Picea</i> and <i>Larix</i> fen	-645.33	2004-05—10	[24]
加拿大渥太华流域 Ottawa River Valley, Canada	香蒲沼泽 Cattail marsh	-1194.60	2005-05—10	[8]
中国黄河三角洲 Yellow River Delta, China	芦苇湿地 Reed wetland	-780.95	2011-05—10	本研究 This study
- 吸收 Absorption.				

小娟等<sup>[32]</sup>认为, 夏玉米田生态系统月平均  $\alpha$ 、 $A_{\max}$  和  $R_{\text{eco},d}$  均随叶面积指数(LAI)增加呈指数增长。

**3.2.2 土壤温度** 有研究表明, 夜晚生态系统呼吸速率( $R_{\text{eco},n}$ )随着  $T_s$  的升高而增加<sup>[9,33-34]</sup>。本研究中, 生长季芦苇湿地  $R_{\text{eco},n}$  与 5 cm 处  $T_s$  呈指数关系(图 6)。这与徐玲玲等<sup>[35]</sup>对青藏高原高寒草甸生态系统和吴力博等<sup>[26]</sup>对三江源区人工草地的研究相一致。 $Q_{10}$  是衡量生态系统呼吸对温度变化的敏感程度。在 2011 年生长季, 芦苇湿地生态系统的  $Q_{10}$  值为 2.30, 接近于盘锦芦苇湿地的年均  $Q_{10}$  值(2.38)<sup>[25]</sup>, 但是远低于三江源地区人工草地生态系统的  $Q_{10}$  值(4.81)<sup>[26]</sup>, 说明黄河三角洲湿地生态系统呼吸对温度变化的敏感性相对较低。温度与水分对生态系统 CO<sub>2</sub> 通量起着重要作用<sup>[36-38]</sup>。

**3.2.3 土壤水分** 水分条件对生态系统  $R_{\text{eco},n}$  的影响仅次于温度<sup>[39]</sup>。相对于其他陆地生态系统, 湿地通常不会因土壤水分过低而影响土壤呼吸, 反而会由于土壤水分过高, 导致呼吸产物 CO<sub>2</sub> 的排放受到限制<sup>[40]</sup>。Zhou 等<sup>[25]</sup>研究认为, 在 7、8 月, 土壤水分饱和导致  $R_{\text{eco},n}$  主要来自植被呼吸, 从而影响 NEE 与  $T_s$  的关系。本研究中,  $T_s$  和土壤水分共同影响着  $R_{\text{eco},n}$ 。黄祥忠等<sup>[41]</sup>对锡林河流域羊草草原的研究表明, 土壤含水量和土壤温度控制着 NEE 的大小; 王俊峰等<sup>[42]</sup>也认为, 5 cm 处  $T_s$  和土壤水分与 CO<sub>2</sub> 排放通量显著相关。除此之外, 淹水时的水位也是影响湿地 NEE 的重要因素, 高水位可能抑制湿地生态系统呼吸和阻碍 CO<sub>2</sub> 的传输<sup>[13]</sup>。但是, 宋涛<sup>[11]</sup>对三江平原生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的长期观测研究表明, 尽管在观测期间水位的变化范围很大(2~28 cm), 但是平均  $R_{\text{eco},n}$  与水位并没有显著的相关性; Bonneville 等<sup>[8]</sup>也认为, CO<sub>2</sub> 通量和水位没有明显的关系。今后应加强有关水分对湿地生态系统呼吸影响机制的研究。

## 参考文献

- [1] Mitra S, Wassmann R, Vlek PLG. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 2005, **88**: 25-35
- [2] Franzen LG. Can Earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect? Proceeding of the 9th International Peat Congress, Uppsala, Sweden, 1992: 1-18
- [3] Wan Z-M (万忠梅), Song C-C (宋长春), Yang G-S (杨桂生), et al. 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* (环境科学学报), 2009, **29**(2): 406-412 (in Chinese)
- [4] Baldocchi DD. Assessing ecosystem carbon balance: Problems and prospects of the eddy covariance technique. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 478-492
- [5] Hao Y-B (郝彦宾). Characteristics of Net Ecosystem Exchange of Carbon Dioxide and Their Driving Factors over a Fenced *Leymus chinensis* Steppe in Inner Mongolia. PhD Thesis. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2006 (in Chinese)
- [6] Smith CJ, DeLaune RD, Patrick Jr WH. Carbon dioxide emission and carbon accumulation in coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, **17**: 21-29
- [7] Clair TA, Arp P, Moore TR, et al. Gaseous carbon dioxide and methane, as well as dissolved organic carbon losses from a small temperate wetland under a changing climate. *Environmental Pollution*, 2002, **116**: S143-S148
- [8] Bonneville MC, Strachan IB, Humphreys ER, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a temperate cattail marsh in relation to biophysical properties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 69-81
- [9] Zhang F-W (张法伟), Liu A-H (刘安花), Li Y-N (李英年), et al. CO<sub>2</sub> flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 453-462 (in Chinese)
- [10] Li L (李丽). Methane Fluxes from Zoige Marshes and Estimation of Greenhouse Gas Emission under Different Land Use. Master Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2011 (in Chinese)
- [11] Song T (宋涛). Long Term Carbon Dioxide Flux Measurements in Sanjiang Plain, Northeastern China. PhD Thesis. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007 (in Chinese)
- [12] Guo X-L (郭雪莲). Study on the Characteristics of Nitrogen Cycling in Plant-soil System in Wetlands Along a Water Level Gradient in the Sanjiang Plain. PhD Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2008 (in Chinese)
- [13] Ma A-N (马安娜), Lu J-J (陆健健). Net ecosystem exchange of carbon and tidal effects in Chongxi Wetland, Yangtze Estuary. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2011, **24**(7): 716-721 (in Chinese)
- [14] He Q-J (何奇瑾). Characteristics of Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Exchange over Panjin Reed Wetland and its Simulation. Master Thesis. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2007 (in Chinese)
- [15] Song C-Y (宋创业), Liu G-H (刘高焕), Liu Q-S (刘庆生), et al. Distribution patterns of plant communities in the Yellow River Delta and related affecting factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(12): 2042-2048 (in Chinese)
- [16] Feng Z-J (冯忠江), Zhao X-S (赵欣胜). The environment interpretation for the space change of the reed biomass in the Yellow River Delta. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2008, **15**(3): 170-174 (in Chinese)
- [17] Cui B-S (崔保山), Liu X-T (刘兴土). Ecological character changes and sustainability management of wetlands in the Yellow River Delta. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2001, **21**(3): 250-256 (in Chinese)
- [18] Li Y-Z (栗云召), Yu J-B (于君宝), Han G-X (韩广)

- 轩), et al. Dynamic evolution of natural wetlands in Yellow River Delta and related driving factors. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2011, **30**(7): 1535–1541 (in Chinese)
- [19] Xu J-X (许炯心). Land-accretion of the Huanghe River Delta influenced by drainage basin factors. *Acta Oceanologica Sinica* (海洋学报), 2004, **26**(3): 68–74 (in Chinese)
- [20] Chen L-D (陈利顶), Fu B-J (傅伯杰). Analysis of impact of human activity on landscape structure in Yellow River Delta: A case study of Dongying region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1996, **16**(4): 337–344 (in Chinese)
- [21] Lloyd J, Taylor JA. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, **8**: 315–323
- [22] Ruimy A, Jarvis PG, Baldocchi DD, et al. CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, 1995, **26**: 1–68
- [23] Barr AG, Griffis TJ, Black TA, et al. Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, **32**: 813–822
- [24] Syed KH, Flanagan LB, Carlson PJ, et al. Environmental control of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a treed, moderately rich fen in northern Alberta. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, **140**: 97–114
- [25] Zhou L, Zhou GS, Jia QY. Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China. *Aquatic Botany*, 2009, **91**: 91–98
- [26] Wu L-B (吴力博), Gu S (古松), Zhao L (赵亮), et al. 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* (植物生态学报), 2010, **34**(7): 770–780 (in Chinese)
- [27] Shurpali NJ, Verma SB, Kim J, et al. Carbon dioxide exchange in a peatland ecosystem. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**: 14319–14326
- [28] Zhang F-W (张法伟), Li Y-N (李英年), Cao G-M (曹广民), et al. 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* (植物生态学报), 2012, **36**(3): 187–198 (in Chinese)
- [29] Flanagan LB, Johnson BG. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**: 237–253
- [30] Wang H, Saigusa N, Yamamoto S, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 7021–7032
- [31] Zhao L (赵亮), Gu S (古松), Zhou H-K (周华坤), et al. CO<sub>2</sub> fluxes of artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32**(3): 544–554 (in Chinese)
- [32] Tong X-J (同小娟), Li J (李俊), Liu D (刘渡). Characteristics and controlling factors of photosynthesis in a maize ecosystem on the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(17): 4889–4899 (in Chinese)
- [33] Peng Z-H (彭镇华), Wang Y (王妍), Ren H-Q (任海青), et al. Research on the variation of carbon flux and the relationship of environmental factors and carbon flux of *Populus* forest ecosystem in the reaches of Yangtze River in Anqing. *Forest Research* (林业科学研究), 2009, **22**(2): 237–242 (in Chinese)
- [34] Liang Y (梁宇), Xu J-W (许嘉巍), Hu Y-M (胡远满), et al. Soil respiration of degraded Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(5): 1097–1104 (in Chinese)
- [35] Xu L-L (徐玲玲), Zhang X-Z (张宪洲), Shi P-L (石培礼), et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange of alpine meadow in the Tibetan Plateau from August to October. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25**(8): 1948–1952 (in Chinese)
- [36] Hao Y-B (郝彦宾), Wang Y-F (王艳芬), Sun X-M (孙晓敏), et al. Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (中国科学 D 辑 · 地球科学), 2006, **36**(suppl. I): 174–182 (in Chinese)
- [37] Li Q (李琪), Xue H-X (薛红喜), Wang Y-L (王云龙), et al. The preliminary study on the impact of soil temperature and moisture on carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(3): 605–610 (in Chinese)
- [38] Wang M (王森), Liu Y-Q (刘亚琴), Hao Z-Q (郝占庆), et al. Respiration rate of broadleaved Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(10): 1789–1795 (in Chinese)
- [39] Yu G-R (于贵瑞), Wen X-F (温学发), Li Q-K (李庆康), et al. Season mode and environmental response characteristics of ecosystem respiration over China subtropical and temperate typical forest. *Science in China (Series D: Earth Sciences)* (中国科学 D 辑 · 地球科学), 2004, **34**(suppl. II): 84–94 (in Chinese)
- [40] Xie Y-B (谢艳兵), Jia Q-Y (贾庆宇), Zhou L (周莉), et al. Soil respiration and its controlling factors at *Phragmites communis* wetland in Panjin. *Journal of Meteorology and Environment* (气象与环境学报), 2006, **22**(4): 53–58 (in Chinese)
- [41] Huang X-Z (黄祥忠), Hao Y-B (郝彦宾), Wang Y-F (王艳芬), et al. Impact of extreme drought on net ecosystem exchange from *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30**(6): 894–900 (in Chinese)
- [42] Wang J-F (王俊峰), Wang G-X (王根绪), Wang Y-B (王一博), et al. The influence of marsh and alpine meadow grassland degradation to CO<sub>2</sub> emissions in the Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2007, **52**(13): 1554–1560 (in Chinese)

**作者简介** 杨利琼,女,1987年生,硕士研究生。主要从事滨海湿地碳循环研究。E-mail: lqyang@yic.ac.cn

**责任编辑** 李凤琴