

# 环境因子和生物因子对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响

陈亮<sup>1</sup> 刘子亭<sup>1</sup> 韩广轩<sup>2\*</sup> 初小静<sup>2</sup> 孙宝玉<sup>2</sup> 刘海防<sup>3</sup> 李建文<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>聊城大学环境与规划学院, 山东聊城 252000; <sup>2</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>3</sup>山东省黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257500)

**摘要** 采用 Li-8150 多通道土壤呼吸自动测量系统对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸进行全年连续测定, 同步测量了温度、土壤含水量、地上生物量以及叶面积指数等环境因子和生物因子。结果表明: 土壤呼吸日动态在全年尺度上多呈单峰型, 但在受到土壤封冻和地表积水干扰时, 土壤呼吸日动态呈多峰型。土壤呼吸具有明显的季节动态特征, 总体呈单峰型, 年平均土壤呼吸速率为  $0.85 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 生长季平均土壤呼吸速率为  $1.22 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在全年尺度上, 土壤温度是滨海湿地土壤呼吸的主要控制因子, 可解释全年土壤呼吸 87.5% 的变化。在生长季尺度上, 土壤含水量和叶面积指数对土壤呼吸的协同影响达到 85%。

**关键词** 滨海湿地; 土壤呼吸; 环境因子; 生物因子; 黄河三角洲

**Effects of environmental and biotic factors on soil respiration in a coastal wetland in the Yellow River Delta, China.** CHEN Liang<sup>1</sup>, LIU Zi-ting<sup>1</sup>, HAN Guang-xuan<sup>2\*</sup>, CHU Xiao-jing<sup>2</sup>, SUN Bao-yu<sup>2</sup>, LIU Hai-fang<sup>3</sup>, LI Jian-wen<sup>3</sup> (<sup>1</sup>College of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China; <sup>2</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>3</sup>Administration Bureau of the Yellow River Delta National Nature Zone Reserve, Dongying 257500, Shandong, China).

**Abstract:** Using the Li-8150 multichannel automatic soil CO<sub>2</sub> efflux system, soil respiration was measured continuously over a one-year period in a coastal wetland in the Yellow River Delta, China. Environmental and biological factors were measured simultaneously, including temperature, soil water content, aboveground biomass and leaf area index. The results showed that the diurnal variation of soil respiration presented a single-peak curve, but it appeared as multiple peaks when disturbed by soil freezing and surface flooding. Soil respiration showed obvious seasonal dynamics and a single peak curve. The average annual soil respiration was  $0.85 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the mean soil respiration rate was  $1.22 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  during the growing season. On one-year scale, soil temperature was a major factor influencing soil respiration in the coastal wetland, which explained 87.5% of the variation in soil respiration. On the growing season scale, soil water content and leaf area index accounted for 85% of the seasonal variation of soil respiration.

**Key words:** coastal wetland; soil respiration; environmental factor; biological factor; Yellow River Delta.

作为陆地生态系统的重要组成部分, 湿地是多

种温室气体重要的源和汇, 影响着 CO<sub>2</sub> 等重要温室气体的全球平衡<sup>[1]</sup>。一方面, 湿地是 CO<sub>2</sub> 的汇, 即通过湿地植物光合作用吸收大气中的 CO<sub>2</sub> 将其转化为有机质, 植物死亡后其残体经腐殖化作用和泥炭化作用形成腐殖质和泥炭, 储存在湿地土壤中。虽然其面积仅占全球陆地表面面积的 3%<sup>[2-3]</sup>, 但由于湿地

本文由国家自然科学基金项目(41301083)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-EW-STS-127)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41301083) and the Science and Technology Service Network Initiative of the Chinese Academy of Sciences (KFJ-EW-STS-127).

2015-11-25 Received, 2016-03-02 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gxhan@yic.ac.cn

植物较高的生产量和较低的分解率,使得湿地土壤能储存大量有机碳.据估计,其碳储量可占到土壤碳总蓄积量的 11%<sup>[4-5]</sup>.另一方面,湿地也是温室气体的源,土壤中的有机质经微生物矿化分解产生的 CO<sub>2</sub> 被直接释放到大气中<sup>[1]</sup>.碳源的增加会加剧气候变暖,这是碳循环与气候变暖间的一个正反馈效应<sup>[6]</sup>.土壤呼吸是湿地生态系统碳素回到大气的主要途径,由于湿地土壤碳库的巨大规模,湿地土壤呼吸的微小变动都会引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度较大的变化,继而对全球气候产生影响<sup>[7]</sup>.

我国关于湿地土壤呼吸及其对环境因子和生物因子响应的研究已有很多,主要集中在九龙江口红树林湿地<sup>[8-9]</sup>、三江平原沼泽湿地<sup>[5,10]</sup>、盘锦湿地<sup>[11]</sup>、嫩江湿地<sup>[12]</sup>.研究表明,湿地土壤呼吸的昼夜变化多呈现出不对称的单峰型<sup>[11]</sup>,且同一地点不同季节测定的昼夜变化、土壤呼吸峰值出现的时间及形式也有差异<sup>[8]</sup>.湿地土壤呼吸的季节动态曲线也呈单峰型<sup>[8,12-15]</sup>,夏季达到峰值<sup>[12]</sup>.湿地土壤呼吸动态变化通常是由环境因子和生物因子等多种因素共同作用导致的<sup>[16]</sup>,且不同湿地类型及不同环境状况下土壤呼吸变化的主导因子和机理也不同.多数研究认为,在一定的范围内,湿地土壤呼吸强度与土壤温度呈正相关<sup>[11,13]</sup>,但是高温会抑制土壤中底栖光合微生物的作用,因此土壤呼吸速率会随温度升高而降低<sup>[8]</sup>.同时,土壤含水量通过影响生物活性、土壤温度<sup>[13]</sup>和土壤通透性<sup>[11]</sup>等直接或间接影响土壤呼吸.另外,地表水文状况对湿地土壤呼吸也有显著影响.例如,地表积水对土壤呼吸起到抑制作用<sup>[3]</sup>,毛茛苔草(*Carex lasiocarpa*)沼泽和小叶章(*Deyeuxia angustifolia*)草甸土壤呼吸速率随水深的增加而降低<sup>[5]</sup>.黄河三角洲滨海湿地地表积水导致土壤呼吸日动态峰值推后或无单峰型规律<sup>[3]</sup>.此外,生物因子也是影响湿地土壤呼吸的重要因素,地上生物量<sup>[16]</sup>、根系生物量、叶面积指数、凋落物、微生物种群是影响土壤呼吸的主要生物因子<sup>[17]</sup>.例如,地上生物量主要通过地上凋落物提供大量土壤有机碳和加强根际呼吸等途径间接影响土壤呼吸<sup>[18]</sup>;根系呼吸占生长季土壤呼吸的比例呈单峰型变化<sup>[19]</sup>,可见植物根系对湿地土壤呼吸,特别是生长季湿地土壤呼吸的影响是不可忽略的;叶面积指数表征植物光合生产力状况<sup>[20]</sup>,是解释生长季土壤呼吸变异的重要指标.

虽然国内针对湿地土壤呼吸的研究已有不少,但仍存在土壤呼吸测定频率低(每季测定一

次<sup>[9,21-22]</sup>,每月测定一次<sup>[3-4,8,10,15]</sup>,两周测定一次<sup>[2,14]</sup>或者一周测定两次<sup>[23-24]</sup>)、注重生长季尺度而缺乏全年尺度研究<sup>[2-3,10,12,25]</sup>、对湿地土壤呼吸白天动态变化的研究多而对夜间动态变化的研究较少<sup>[2-3,8,11]</sup>等不足.针对这些不足,本文采用 Li-8150 多通道土壤 CO<sub>2</sub> 通量自动测量系统,于 2013 年对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸进行了全年自动连续测定(每 2 h 测定一次),分析土壤呼吸日动态和季节动态,阐明环境因子和生物因子对湿地土壤呼吸的协同影响机制.在此基础上,对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸进行动态模拟,并将其与国内其他湿地平均土壤呼吸速率进行对比分析.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验在中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45'50" N,118°59'24" E)进行.该地属暖温带半湿润大陆性季风气候区,四季分明,雨热同期,年平均气温 12.9 °C,年降水量 550~640 mm<sup>[26]</sup>.受平坦的地形和较高的地下水位影响<sup>[26]</sup>,实验区土壤以潮土和盐土分布最广<sup>[27]</sup>,土壤质地主要为砂质黏壤土<sup>[3]</sup>.植被属于温带落叶阔叶林群落,以草甸景观为主体<sup>[26]</sup>,尤以盐生草甸占显著地位<sup>[28]</sup>.实验区内优势种为芦苇(*Phragmites australis*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)和白茅(*Imperata cylindrica*).

### 1.2 土壤呼吸测定

在试验站内选择芦苇-碱蓬典型群落样地布设 Li-8100A 自动土壤 CO<sub>2</sub> 通量测量系统(Li-Cor, Inc, Lincoln, NE, USA),在其周围随机布置 4 个重复的 PVC 环(高 11.4 cm,直径 21.3 cm,插入土壤深度为 8 cm,编号为 1、3、5、7),将 8100-104 长期观测气室与 PVC 环固定在一起并与 Li-8150 多路器相连接,使用交流电变压为系统提供长期供电.土壤呼吸速率测定在 2013 年全年连续进行,每隔 2 h 测定一次.为减少放置 PVC 环对土壤的扰动造成对土壤呼吸速率的影响,初次测定在 PVC 环插入土壤 24 h 后进行.在尽可能不扰动地表凋落物的条件下,定期剪除 PVC 环内的绿色植物并定期检查数据和维护设备以保证全年测定稳定进行.

### 1.3 环境因子和生物因子的测定

气温和降水量等气象数据通过试验区的微气象观测站全天候 24 h 自动采集.气温由距地面 3 m 高处的空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Helsin-

ki, Finland) 测定, 降水量通过距地面 0.7 m 高处的自动雨量计( TE525MM, Texas Electronics, Dallas, USA) 测定. 土壤因子的监测内容主要包括对土壤温度和体积含水量的测定. 土壤温度通过埋深 5、10、20、30、50 cm 的土壤温度传感器( 109SS, Campbell Scientific, Logan, USA) 测定, 土壤湿度由埋深 10、20、40、60、80、100 cm 的土壤湿度传感器( Enviro SMART SDI-12, EnviroScan, Lancaster, USA) 测定. 以上数据均通过数据采集器( CR1000, Campbell, Logan, USA) 每 30 min 在线采集一次并计算平均值和自动存储.

地上生物量采集在生长季进行, 从 2013 年 5 月初开始, 到 10 月底结束, 每月采集 2 次. 地上生物量测定采用收割法. 在土壤呼吸测定样点附近随机选取 5 个 0.5 m×0.5 m 样方, 测定样方内各种植物的株数、株高、盖度、频数等指标, 用剪刀将样方内的全部植物齐地面剪下. 将植物样品装入牛皮纸样品袋中, 在室内迅速剔除其中的枯草后, 置于鼓风机干燥箱内, 在 105 °C 下杀青 1 h, 70 °C 下烘干至恒量并称量生物量. 叶面积指数通过植物冠层分析仪( LAI-2000, LI-COR Inc, USA) 测定, 其假设条件是叶片不透光、无反射、叶片排列和位置分布随机. 叶面积指数的测量在生长季进行 8 d 测量一次, 每次随机测量 5 组数据取平均值.

#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析. 采用 Pearson 法对土壤呼吸与各环境和生物因子进行相关分析, 用非线性回归分析方法分析土壤呼吸与土壤温度的指数关系( 式 1), 用式( 2) 计算土壤呼吸对温度变化的敏感程度(  $Q_{10}$ ), 用多元回归分析方法分析生长季各环境和生物因子对土壤呼吸的协同影响. 利用 SigmaPlot 12.5 软件作图. 图表中数据为平均值±标准差.

$$R_s = ae^{bt} \quad (1)$$

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

式中:  $R_s$  为土壤呼吸速率(  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $t$  为气温( °C);  $a$ 、 $b$  为拟合参数.

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸动态

**2.1.1 土壤呼吸和温度的日动态** 土壤呼吸速率的日动态呈现出明显的季节变化. 黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸日变化主要表现出 3 种情况: 1) 在未受干扰月份, 土壤呼吸速率日变化呈单峰型, 土壤呼吸

速率最大值出现在 12:00—14:00, 最小值出现在 4:00—6:00, 这一趋势与气温日变化相接近, 但各月土壤温度最大值较前二者均表现出 2 h 的滞后; 2) 在温度最低的 1 月, 除 8:00—10:00 外, 白天土壤呼吸速率均低于夜间, 且 8:00—18:00 土壤呼吸变化与气温变化呈相反趋势, 5 cm 深度土壤温度日变化不显著; 3) 在雨季( 7—9 月), 土壤呼吸日变化也发生改变, 最低值均出现在温度快速上升的 8:00—10:00, 7 和 9 月日动态无明显规律, 8 月白天土壤呼吸动态与气温日动态表现出相反的趋势, 且白天土壤呼吸速率明显低于夜间( 图 1).

**2.1.2 土壤呼吸的季节动态** 黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸速率的季节变化总体呈单峰型( 图 2). 全年土壤呼吸速率均值为  $0.85 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 其中最高值出现在 8 月 25 日(  $3.08 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 最低值出现在 2 月 13 日(  $0.02 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). 2013 年 1—7 月初土壤呼吸速率呈逐步上升趋势, 7 月初进入雨季后土壤呼吸波动性增强, 7 月 10 日—8 月 16 日, 因降雨量大, 试验区地面大量积水, PVC 环被积水淹没而导致土壤呼吸无法测量. 从 8 月 17 日积水消退恢复测量起, 土壤呼吸速率再次呈现出迅速上升趋势, 并且在 8 月 25 日达到全年最高日均值, 9—12 月土壤呼吸速率逐步下降.

### 2.2 滨海湿地环境因子和生物因子的季节变化

由图 2 可以看出, 2013 年全年平均气温为 12.09 °C, 与多年年均气温相当, 最高月( 8 月) 和最低月( 1 月) 气温分别为 27.63 和 -4.63 °C, 气温与地下 10 cm 深度土壤温度的季节变化趋势较为接近, 温度值差异不大, 但二者与地下 5 cm 深度土壤温度值及季节变化趋势存在一定差异. 试验区全年降水量为 634.1 mm, 降水主要集中在 7—9 月, 占年降水量的 65.6%. 生长季土壤含水量变化趋势与同期降水量一致. 10 cm 深度土壤含水量与 20 cm 深度土壤含水量的平均值分别为 44.2% 和 50.4%, 其中, 10 cm 深度土壤湿度的波动较明显. 生长季地上生物量和叶面积指数具有明显动态变化, 在生长季初期植被快速生长, 但在刚进入雨季时增速放缓, 地上生物量的最大值出现在 8 月底, 为(  $635.53 \pm 46.16$ )  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . 生长季末生物量减少, 叶面积指数同样呈先增后降的趋势, 最大值出现在 7 月底, 为 0.62.

### 2.3 全年尺度上土壤温度对土壤呼吸的影响

由图 3 可以看出, 全年土壤呼吸速率日均值与土壤温度具有显著相关性. 回归分析表明, 土壤呼吸

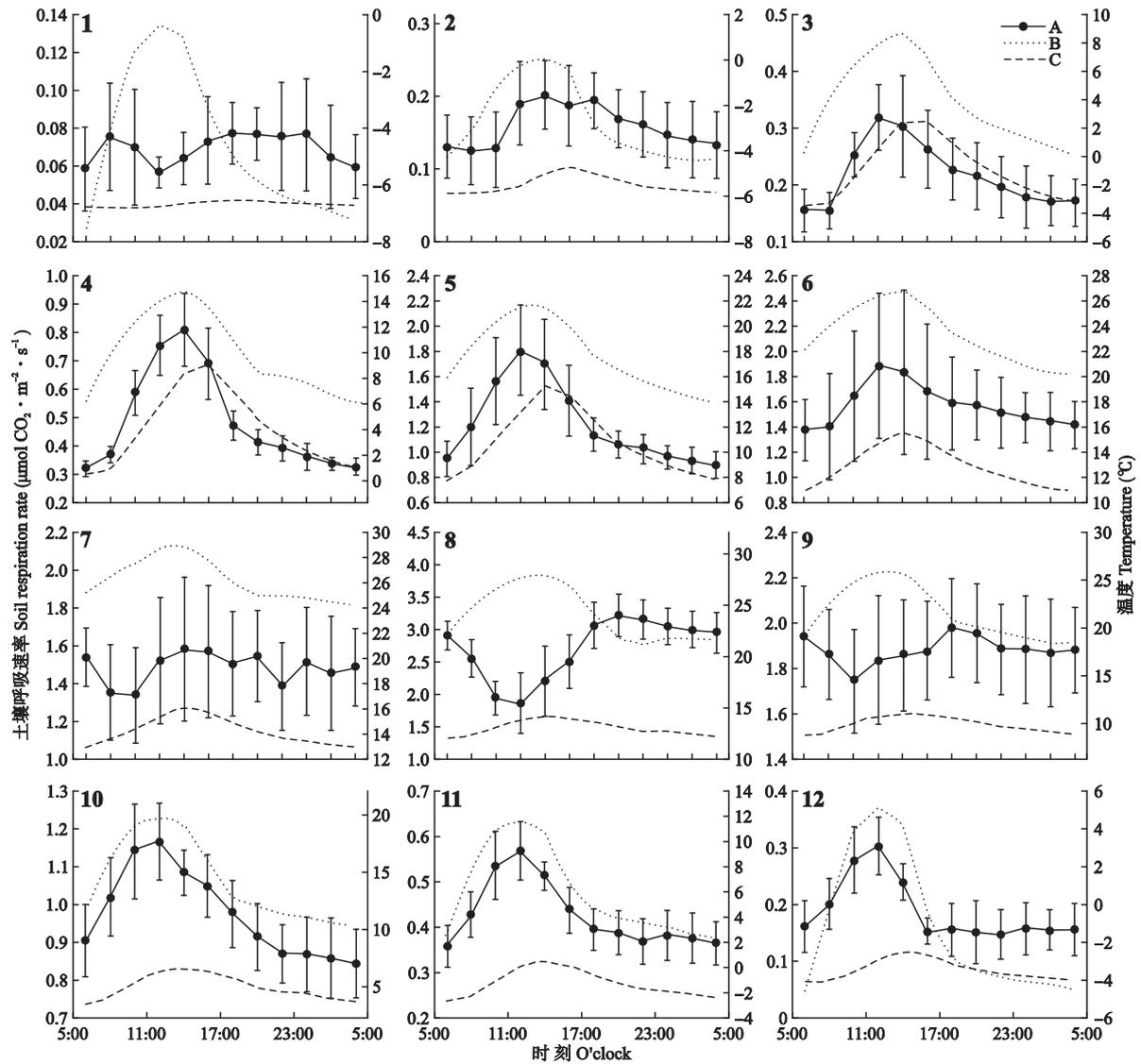


图 1 2013 年滨海湿地土壤呼吸速率 (A)、气温 (B) 和 5 cm 深度土壤温度 (C) 的日动态

Fig.1 Diurnal dynamics of soil respiration rate (A), air temperature (B) and soil temperature at 5 cm depth (C) in 2013.

1~12: 1—12 月 From January to December.

表 1 黄河三角洲湿地生长季土壤呼吸与土壤含水量和叶面积指数的多元回归分析

Table 1 Multiple linear regression of soil respiration with soil water content and leaf area index during the growing season in the Yellow River Delta

参数 Parameter	系数 Coefficient	<i>t</i>	<i>P</i>	偏 $R^2$ Partial $R^2$
常数 Constant	-3.756	0.909	-4.13	0.001
10 cm 深度土壤含水量 Soil water content at 10 cm depth	0.118	0.024	5.00	<0.001
叶面积指数 Leaf area index	1.634	0.478	3.42	0.005

方程 Equation:  $SR = a + b \times SWC + c \times LAI$  ( $R^2 = 0.85$ ).

速率与 10 cm 深度土壤温度呈显著的指数函数关系 ( $R^2 = 0.875$ ), 土壤呼吸的温度敏感性系数  $Q_{10}$

为 2.51.

### 2.4 生长季尺度上土壤含水量和叶面积指数对土壤呼吸的协同影响

多元回归分析发现, 在生长季, 土壤含水量和叶面积指数对土壤呼吸的协同影响达到 85%, 二者分别可解释生长季土壤呼吸 73% 和 12% 的变化 (表 1). 而土壤温度的影响在逐步回归中被剔除.

## 3 讨论

### 3.1 土壤呼吸动态和速率

黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸日动态曲线主要表现为单峰型和非单峰型两种. 在未受干扰时, 土壤呼吸动态呈单峰型. 这与锡林河中游湿地<sup>[2]</sup>、杭州湾滨海湿地<sup>[6]</sup>、九龙江口秋茄红树林湿地<sup>[9]</sup>的研究结

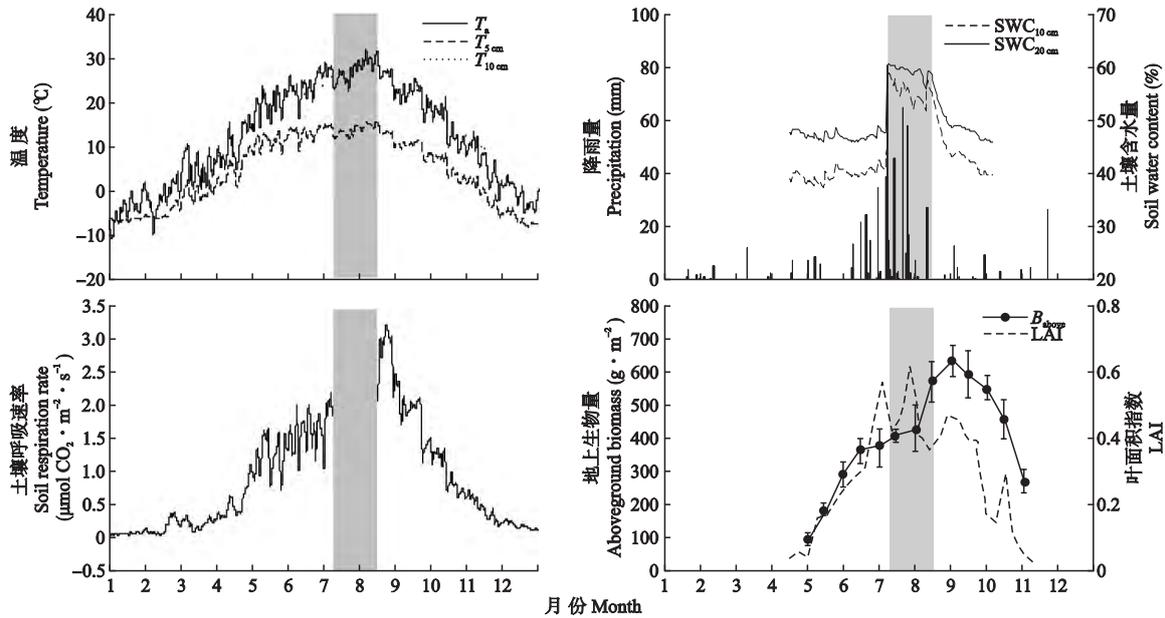


图 2 滨海湿地环境因子、生物因子及土壤呼吸速率的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of environmental factors , biological factors and soil respiration rate of coastal wetland.

$T_a$ : 气温 Air temperature;  $T_{5\text{ cm}}$ : 5 cm 深度土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth;  $T_{10\text{ cm}}$ : 10 cm 深度土壤温度 Soil temperature at 5 cm depth;  $SWC_{10\text{ cm}}$ : 10 cm 深度土壤含水量 Soil water content at 10 cm depth;  $SWC_{20\text{ cm}}$ : 20 cm 深度土壤含水量 Soil water content at 20 cm depth;  $B_{\text{above}}$ : 地上生物量 Aboveground biomass; LAI: 叶面积指数 Leaf area index.

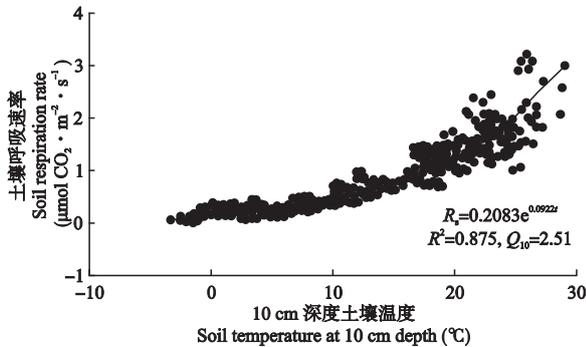


图 3 土壤呼吸速率与 10 cm 深度土壤温度的指数方程

Fig.3 Exponential equations between soil respiration rate and soil temperature at 10 cm depth.

果一致.在土壤冻结和地表积水等影响下,土壤呼吸日动态发生改变,呈非单峰型.因土壤封冻,本区 2013 年 1 月 8:00—18:00 土壤呼吸动态与气温呈相反趋势,这可能是由气温日变化影响下表层土壤冻融过程引起的.在其他湿地研究中也出现过土壤封冻改变土壤呼吸日动态的现象,如冰冻期盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸日动态呈双峰曲线,土壤呼吸的最大值和最小值分别出现在 7:00 和 15:00 左右,最小值出现在 11:00,与气温日变化相反<sup>[11]</sup>.此外,秋茄红树林湿地 1 月的土壤呼吸日动态也发生了改变<sup>[9]</sup>.在雨季,特别是 8 月,黄河三角洲滨海湿地白天土壤呼吸动态与气温变化呈相反趋势,与朱敏

等<sup>[3]</sup> 2012 年生长季在本研究区观测的结果一致;这可能是因为雨季土壤湿度达到饱和时,土壤温度波动趋势发生改变,使峰值滞后,进而影响了土壤呼吸日动态的波动规律.此外,雨季 PVC 环中的少量积水也会抑制土壤微生物的活性,减弱土壤呼吸作用<sup>[29]</sup>.同时,水体可以溶解部分  $CO_2$ ,使  $CO_2$  排放量减少<sup>[3]</sup>.在其他湿地研究中也出现过雨季土壤呼吸日动态呈非单峰型的情况<sup>[9,14]</sup>.

黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的季节动态总体表现为夏季高于冬季,生长季高于非生长季,全年呈单峰型曲线,其变化受环境因子和生物因子的共同影响.春季温度回升,土壤微生物活性增强,特别是进入生长季后植物萌发,根系呼吸加强,土壤呼吸速率呈上升趋势;夏季是植物生长旺季和水热条件最好的季节,土壤呼吸速率在 8 月达到峰值;8 月中旬到生长季末期,随着温度降低、降水减少、植物生长的衰退和枯萎,土壤呼吸速率逐渐下降;在非生长季,土壤呼吸速率始终保持较低值,其变率远小于生长季.这些现象与很多关于湿地土壤呼吸的研究结果相同.例如,九龙江口秋茄林湿地的土壤呼吸季节动态基本呈单峰曲线,最高和最低值分别出现在 7 和 12 月,这一动态与气象因子的变化有关<sup>[8]</sup>;2007 年 7 月—2008 年 5 月,长江口潮滩的 4 个典型区域采样点土壤呼吸动态均呈单峰形变化,高值区出现

表 2 黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸与国内其他地区湿地的比较

Table 2 Comparisons of soil respiration in a coastal wetland in the Yellow River Delta with other wetlands in China

湿地类型 Wetland type	地点 Site	气温 Air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	降雨量 Precipitation (mm)	时间尺度 Time scale	测定频率/时间 Measurement frequency/time	测定方法 Measured method	植被 Vegetation	土壤呼吸速率 Soil respiration rate ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	文献 Reference
沼泽湿地 Marsh wetland	大兴安岭寒温带岛状林沼泽湿地 Island forested swamp in cool temperate zone in the Great Khingan Range	-3	500	生长季	10 天 1 次/9:00—11:00	I	白桦 <i>Betula platyphylla</i>	2.33	[12]
	三江平原漂筏苔草沼泽 <i>Carex pseudooccuriaica</i> marsh in the Sanjiang Plain	1.90	600	7—10 月	每周 2 次/9:00—11:00	I	兴安落叶松 <i>Larix gmelinii</i> 漂筏苔草 <i>C. pseudooccuriaica</i>	1.97 1.40	[23]
	三江平原小叶章沼泽化草甸 <i>Calamagrostis angustifolia</i> meadow in the Sanjiang Plain	1.90	600	8—10 月	每周 2 次/9:00—11:00	I	小叶章 <i>D. angustifolia</i>	2.43	
		1.90	550~600	全年	两天 1 次、每周两次、每月 1 次/9:00—11:00	I	小叶章 <i>D. angustifolia</i>	1.27	[5]
		1.90	600	生长季	每月 3 次/-	II	小叶章 <i>D. angustifolia</i>	1.14	[10]
		1.90	550~600	生长季	每月 1 次, 8:30—11:30	III	小叶章 <i>D. angustifolia</i>	5.19	[30]
	三江平原草甸湿地 Meadow marsh in the Sanjiang Plain	1.6~1.9	565~600	生长季	每月 3 次/-	II	小叶章 <i>D. angustifolia</i>	1.62	[10]
	三江平原毛果苔草沼泽湿地 <i>Carex lasiocarpa</i> marsh in the Sanjiang Plain	1.90	550~600	全年	两天 1 次、每周 2 次、每月 1 次/9:00—11:00	I	毛果苔草 <i>C. lasiocarpa</i>	0.83	[5]
	三江平原恢复湿地 Construction wetland in the Sanjiang Plain	1.90	600	8—10 月	每周 2 次/9:00—11:00	I	-	2.18	[23]
	青藏高原高寒湿地 Alpine wetland on the Qinghai-Xizang Plateau	-1.14	489.02	7—9 月	1~2 周 1 次/9:00—12:00	III	帕米尔藁草、藏蒿草 <i>C. pamirensis</i> , <i>Kobresia tibetica</i>	1.20	[25]
若尔盖高原沼泽化草甸 Peat mire in Ruogai Plateau	-1.7~3.3	650~750	生长季	每周 2 次/24 h 日动态	I	藏蒿草、花萼驴蹄草 <i>K. tibetica</i> , <i>Altha scaposa</i>	2.69	[24]	
河流湿地 River wetland	锡林河中游典型草原区湿地 Wetland in the Xilin River Basin	-	-	8—10 月	每月 2 次/6:00—18:00	III	羊草 <i>Areurolepidium chinense</i> 米氏冰草 <i>Apropryon michnol</i>	4.94 (围封样地) 4.89 (放牧样地)	[2]
湖泊湿地 Lake wetland	鄱阳湖苔草湿地 <i>C. dominated</i> wetland in Poyang Lake	17.6	1450~1550	9 月至次年 4 月	每月 2 次/9:00—11:00	I	灰化苔草 <i>C. cinerascens</i>	1.81	[31]
	干旱区艾比湖湿地 Ebinur Lake wetland in arid area	6~8	90.9	9—10 月 3 年	每季 1 次/6:00—18:00	III	胡杨、芦苇 <i>Populus euphratica</i> , <i>P. australis</i>	3.61 1.11	[22]
	扎龙湿地水旱交错区 Riparian zone of Zhalong wetland	-	-	5—8 月	每月 2 次/24 h 日动态	III	芦苇 <i>P. australis</i>	0.60 (白天) 0.40 (夜晚)	[32]
滨海湿地 Coastal wetland	长江口潮滩 Tidal flat of Yangtze Estuary	15.2~15.7	1149	全年	每月 2 次/9:00—11:00	I	海三棱藨草 <i>Scirpus mariqueter</i>	0.65 (吴淞口) 0.21 (白龙港) 0.14 (东海农场) 0.12 (奉新)	[15]
	九龙江口秋茄红树林湿地 <i>Kandelia candel</i> mangrove wetland in Jiulongjiang Estuary	21	1371	全年	每个季节 1 次/24 h 日动态	III	秋茄纯林 <i>K. candel</i>	2.50	[9]
	黄河三角洲芦苇湿地 Reed wetlands in the Yellow River Delta	11.7~12.6	530~630	全年	每个季节 1 次/24 h 日动态	III	芦苇 <i>P. australis</i>	0.24	[21]
		12.9	530~630	生长季	每月 2 次/6:00—18:00	III	芦苇 <i>P. australis</i>	1.67	[3]
		12.09	634.1	生长季	连续测定/24 h 日动态	III	芦苇、盐地碱蓬 <i>P. australis</i> , <i>Suaeda salsa</i>	1.22	本研究
		12.09	634.1	非生长季				0.21	
		12.09	634.1	全年				0.85	

I: 静态暗箱/气象色谱 Static closed chamber-gas chromatograph; II: 静态箱/碱液吸收法 Alkali absorption method; III: 红外 CO<sub>2</sub> 分析仪 Infrared CO<sub>2</sub> analyzer.

在温度最高的夏季<sup>[15]</sup>; 三江平原草甸湿地土壤呼吸动态在生长季呈单峰型曲线, 土壤呼吸最大值出现在 8 月中旬<sup>[10]</sup>.

通过对比可以发现, 国内各湿地土壤呼吸平均值存在较大差异(表 2), 这主要是由于各区域湿地所处的不同气候和植被状况引起的, 也与测定仪器和频率的不同有关. 黄河三角洲滨海湿地年平均土壤呼吸速率为  $0.85 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 低于三江平原小叶章沼泽化草甸<sup>[5]</sup>、干旱区艾比湖湿地<sup>[22]</sup>、九龙江口红树林湿地<sup>[9]</sup>, 高于长江口潮滩<sup>[15]</sup>, 与三江平原毛果苔草沼泽湿地相当, 总体处于中等偏下水平. 2012 年 9 月—2013 年 7 月在黄河三角洲自然保护区所测年平均值为  $0.24 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[21]</sup>, 明显低于本研究, 可能与其采取每个季节仅选择一昼夜测定土壤呼吸日动态而非连续观测有关. 在生长季, 国内湿地年平均土壤呼吸速率为  $0.60 \sim 5.19 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[2-3, 10, 12, 23-25, 30-32]</sup>, 黄河三角洲滨海湿地生长季平均土壤呼吸速率 ( $1.22 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 在与其他湿地的比较中处于较低水平, 与青藏高原高寒湿地相当<sup>[25]</sup>, 仅高于杨柯等<sup>[32]</sup>在扎龙湿地水旱交错区所测结果. 本研究结果同样低于本研究区 2012 年生长季的测定结果 ( $1.67 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[3]</sup>, 可能是因其仅对土壤呼吸白天的动态 (6:00—18:00) 进行了测量, 没有考虑夜间土壤呼吸速率降低的情况.

### 3.2 环境因子和生物因子对土壤呼吸的协同影响

在全年尺度上, 土壤温度是控制黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸季节变化的关键因子, 使用指数函数土壤温度可解释全年土壤呼吸 87.5% 的变异. 很多研究表明, 温度是调节和控制陆地生态系统生物地球化学过程的关键因子<sup>[15, 33]</sup>, 对湿地土壤微生物活性及植物的生理活动均有重要影响, 进而影响土壤呼吸速率. 在一定范围内, 温度的升高可以增强微生物活性, 促进微生物的代谢<sup>[34]</sup>和氧化分解等活动<sup>[4]</sup>, 加快凋落物的分解<sup>[33]</sup>, 从而促进土壤微生物呼吸; 温度升高会促进植物和植物根系生长<sup>[22]</sup>, 增强根系呼吸. 此外, 温度的升高可促进土壤中  $\text{CO}_2$  的传输和排放<sup>[35-36]</sup>, 在一定范围内温度升高能增大土壤  $\text{CO}_2$  的排放速率<sup>[37-38]</sup>. 但温度过高也会抑制土壤中底栖光合微生物的作用, 进而降低土壤呼吸速率<sup>[8]</sup>.

在生长季尺度上, 土壤含水量和叶面积指数对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的协同影响达到 85%, 二者分别解释生长季土壤呼吸 73% 和 12% 的

变化. 土壤水分对土壤呼吸的影响较为复杂, 不仅影响根系呼吸和微生物呼吸, 还影响  $\text{CO}_2$  在土壤中的传输, 尤其是当土壤水分成为胁迫因子时, 可能取代温度而成为土壤呼吸的主要控制因子<sup>[17, 39]</sup>. 土壤含水量过低会影响植物根系和微生物的代谢活动, 从而限制微生物呼吸和根系呼吸<sup>[40]</sup>; 土壤含水量比较充足时, 土壤含水量不是土壤呼吸的主要限制因子; 而当土壤含水量超过一定阈值, 会阻塞土壤空隙, 减少土壤中  $\text{CO}_2$  浓度, 限制  $\text{CO}_2$  的释放<sup>[17, 41]</sup>. 此外, 土壤水分还是控制凋落物分解速率及其分解过程的重要因素<sup>[42]</sup>, 是好氧微生物活性最主要的控制因素<sup>[40]</sup>. 相对于其他生态系统, 湿地受湿度过低影响而对土壤呼吸产生胁迫的情况较少<sup>[11]</sup>, 有不少湿地土壤呼吸与土壤含水量不相关的报道<sup>[15, 32]</sup>. 而在本研究中, 土壤含水量是影响生长季土壤呼吸速率的主要因子. 叶面积指数是衡量植被覆盖度的指标之一, 在模拟土壤呼吸变异时常被作为植物特征变量<sup>[25, 43]</sup>. 叶面积指数不仅可以反映植物的生产力状况, 而且可以直接影响植被覆盖下土壤的微气候, 对土壤呼吸的季节变化有重要影响. 研究表明, 无论在区域尺度还是全球尺度上, 土壤呼吸与叶面积指数均呈正相关<sup>[33]</sup>. 叶面积指数作为表征植物光合作用能力的一个关键指标, 其大小决定了输送到地下的植物光合产物的多少<sup>[20]</sup>, 进而影响根呼吸和根际微生物呼吸<sup>[44-45]</sup>, 并对土壤呼吸产生影响.

## 4 结 论

在多数月份黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸日动态呈单峰型, 与 5 cm 深度土壤温度的变化趋势一致. 但冬季土壤封冻和雨季地表积水均会干扰温度对土壤呼吸日动态的影响, 使其日变化呈多峰型. 土壤呼吸季节动态呈单峰型, 总体表现出夏季高于冬季, 生长季高于非生长季的特征. 在全年尺度上, 土壤温度是控制黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸日变化和季节变化的关键因子. 在生长季, 土壤含水量和叶面积指数的协同影响决定着土壤呼吸变化. 不管在全年还是生长季尺度, 黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸速率在与国内其他湿地的比较中均处于中等偏下水平.

### 参考文献

- [1] Liu Z-G (刘子刚). Carbon stock and GHG emission of wetland ecosystem. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2004, 24(5): 634-639 (in Chinese)
- [2] Gao J (高 娟), Wang L-X (王立新), Wang W (王

- 炜), *et al.* Comparative research on soil respiration of wetland plant communities under different utilizations in Xilin River Basin. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science)* (内蒙古大学学报: 自然科学版), 2011, **42**(4): 404-411 (in Chinese)
- [3] Zhu M (朱敏), Zhang Z-H (张振华), Yu J-B (于君宝), *et al.* Effect of nitrogen deposition on soil respiration in *Phragmites australis* wetland in the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2013, **37**(6): 517-529 (in Chinese)
- [4] Zhao K (赵魁), Yao D-X (姚多喜), Zhang Z-G (张治国), *et al.* Soil respiration characteristics and its influencing factors in Datong *Phragmites australis* ecological wetland. *Chinese Agricultural Science Bulletin (中国农学通报)*, 2013, **29**(11): 126-131 (in Chinese)
- [5] Jiang C-S (江长胜), Hao Q-J (郝庆菊), Song C-C (宋长春), *et al.* Effects of marsh reclamation on soil respiration in the Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2010, **30**(17): 4539-4548 (in Chinese)
- [6] Yang W-Y (杨文英), Shao X-X (邵学新), Wu M (吴明), *et al.* Effects of simulated short-term elevated temperature on soil respiration rate in the reed community in Hangzhou Bay wetland. *Journal of Southwest University (Natural Science)* (西南大学学报: 自然科学版), 2012, **34**(3): 83-89 (in Chinese)
- [7] Jia J-W (贾建伟), Wang L (王磊), Tang Y-S (唐玉妹), *et al.* Variability in and factors influencing soil microbial respiration in the Jiuduansha wetland under different successional stages. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2010, **30**(17): 4529-4538 (in Chinese)
- [8] Jin L (金亮), Lu C-Y (卢昌义), Ye Y (叶勇), *et al.* Seasonal variation of soil respiration rate and its influence factors in *Kandelia candel* mangrove wetland in Jiulongjiang River Estuary. *Journal of Applied Oceanography (应用海洋学报)*, 2013, **32**(4): 557-562 (in Chinese)
- [9] Lu C-Y (卢昌义), Jin L (金亮), Ye Y (叶勇), *et al.* Diurnal variation of respiration and its temperature sensitivity in *Kandelia candel* mangrove wetland. *Journal of Xiamen University (Natural Science)* (厦门大学学报: 自然科学版), 2012, **51**(4): 793-797 (in Chinese)
- [10] Yang J-S (杨继松), Liu J-S (刘景双), Sun L-N (孙丽娜), *et al.* CO<sub>2</sub>-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)
- [11] 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)
- [12] Liu X (刘霞), Hu H-Q (胡海清), Li W-H (李为海), *et al.* Soil respiration rate and its seasonal variation of island forested swamp in cool temperate zone. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2014, **34**(24): 7356-7364 (in Chinese)
- [13] Yang Q (杨青), Lv X-G (吕宪国). A preliminary study on the soil respiration in wetland ecosystem of Sanjiang Plain. *Chinese Journal of Soil Science (土壤通报)*, 1999, **30**(6): 254-256 (in Chinese)
- [14] Du Z-X (杜紫贤), Zeng H-D (曾宏达), Huang X-H (黄向华), *et al.* Soil respiration and controlling factors at *Phragmites communis* community in riverside wetlands. *Journal of Subtropical Resources and Environment (亚热带资源与环境学报)*, 2010, **5**(3): 49-55 (in Chinese)
- [15] Nie M-H (聂明华), Liu M (刘敏), Hou L-J (侯立军), *et al.* Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in tidal flat of Yangtze Estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报)*, 2011, **31**(4): 824-831 (in Chinese)
- [16] Han G-X (韩广轩), Zhou G-S (周广胜). Review of spatial and temporal variations of soil respiration and driving mechanisms. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2009, **33**(1): 197-205 (in Chinese)
- [17] Wang M (王铭), Liu X-T (刘兴土), Zhang J-T (张继涛), *et al.* Spatio-temporal variations of soil respiration in five typical plant communities in the meadow steppe of the western Songnen Plain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2014, **38**(3): 396-404 (in Chinese)
- [18] Hou J-F (侯建峰), Lv X-T (吕晓涛), Wang C (王超), *et al.* Variation of soil respiration and its underlying mechanism in grasslands of northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2014, **25**(10): 2840-2846 (in Chinese)
- [19] Zhang X-Y (张晓雨), Zhang S (张赛), Wang L-C (王龙昌), *et al.* Contribution of root respiration to soil respiration based on straw mulching in wheat growing season. *Acta Scientiae Circumstantiae (环境科学学报)*, 2014, **34**(11): 2846-2852 (in Chinese)
- [20] Chen S-T (陈书涛), Liu Q-H (刘巧辉), Hu Z-H (胡正华), *et al.* Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes. *Environmental Science (环境科学)*, 2013, **34**(3): 1017-1025 (in Chinese)
- [21] Jia H-L (贾红丽). The Apparent Soil Respiration Flux and Organic Carbon Mineralization Simulation in Typical Wetlands in Yellow River Delta. Master Thesis. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese)
- [22] Qin L (秦璐), Lv G-H (吕光辉), Zhang X-N (张雪妮), *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration at Ebinur Lake wetland nature reserve in arid area. *Arid Land Geography (干旱区地理)*, 2014, **37**(4): 704-712 (in Chinese)
- [23] Hao Q-J (郝庆菊), Wang Y-S (王跃思), Song C-C (宋长春), *et al.* Primary study on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from wetland soils in the Sanjiang Plain. *Journal of Agro-environment (农业环境科学学报)*, 2004, **23**(5): 846-851 (in Chinese)
- [24] 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 Ruorgai Plateau. *Ecology and Environment (生态环境)*, 2005, **14**(6): 880-883 (in Chinese)
- [25] Wang H (汪浩), Yu L-F (于凌飞), Chen L-T (陈立同), *et al.* Responses of soil respiration to reduced

- water table and nitrogen addition in an alpine wetland on the Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2014, **38**(6): 619-625 (in Chinese)
- [26] Han GX, Xing QH, Yu JB, et al. Agricultural reclamation effects on ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a coastal wetland in the Yellow River Delta. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, **196**: 187-198
- [27] Cui B-L (崔步礼), Chang X-L (常学礼), Chen Y-L (陈雅琳), et al. The impact of hydrological characteristics of the Yellow River coastline changes in the Yellow River Delta. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2006, **21**(6): 957-964 (in Chinese)
- [28] Han G-X (韩广轩), Li Y-Z (栗云召), Yu J-B (于君宝), et al. Evolution process and related driving mechanisms of Yellow River Delta since the diversion of Yellow River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(2): 467-472 (in Chinese)
- [29] Zhang X-Y (张徐源), Yan W-D (闫文德), Zheng W (郑威), et al. Effects of nitrogen deposition on soil respiration of *Pinus elliottii*. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2012, **28**(22): 5-10 (in Chinese)
- [30] Wang J-B (王建波), Ni H-W (倪红伟), Fu X-L (付晓玲), et al. Responses of soil respiration to nitrogen deposition in *Calamagrostis angustifolia* marshy meadow in Sanjiang Plain. *Wetland Science* (湿地科学), 2014, **12**(1): 66-72 (in Chinese)
- [31] Hu Q-W (胡启武), Xing R-X (幸瑞新), Zhu L-L (朱丽丽), et al. Characteristics of CO<sub>2</sub> emission from *Carex* dominated wetland in Poyang Lake in non-flooded period. *Chinese Journal of applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(6): 1431-1436 (in Chinese)
- [32] Yang K (杨柯), Liu G-D (刘国栋), Liu F (刘飞), et al. Soil respiration in riparian zone of Zhalong wetland, northeastern China. *Earth Science Frontiers* (地学前缘), 2011, **18**(6): 94-100 (in Chinese)
- [33] Peng SS, Piao SL, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 1008-1014
- [34] Wan SQ, Luo YQ. Substrate regulation of soil respiration in a tall grass prairie: Results of a clipping and shading experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**: 405-414
- [35] Chen Q-S (陈全胜), Li L-H (李凌浩), Han X-G (韩兴国), et al. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of a degraded steppe community in the Xilin river basin of Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2003, **27**(2): 202-209 (in Chinese)
- [36] Qin X-G (秦小光), Cai B-G (蔡炳贵), Wu J-S (吴金水), et al. The diurnal variations of soil CO<sub>2</sub> source, sink and flux in grassland of Lingshan Mts., Beijing and their relationships with temperature and soil moisture. *Ecology and Environment* (生态环境), 2004, **13**(4): 470-475 (in Chinese)
- [37] Lu Y (卢妍), Song C-C (宋长春), Wang Y-Y (王毅勇), et al. Diurnal variation of CO<sub>2</sub> emission flux from *Carex lasiocarp* marsh in the Sanjiang Plain. *Wetland Science* (湿地科学), 2008, **6**(1): 69-74 (in Chinese)
- [38] Zheng ZM, Yu GR, Fu YL, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**: 1531-1540
- [39] Jia B-R (贾丙瑞), Zhou G-S (周广胜), Wang F-Y (王凤玉), et al. A comparative study on soil respiration between grazing and fenced typical *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(9): 1611-1615 (in Chinese)
- [40] Liang C, Das KC, McClendon RW. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. *Bioresource Technology*, 2003, **86**: 131-137
- [41] Bouma TJ, Nielsen KL, Eissenstat DM. Estimating respiration of roots in soil: Interactions with soil CO<sub>2</sub>, soil temperature and soil water content. *Plant and Soil*, 1997, **195**: 221-232
- [42] Jia B, Zhou G, Wang Y, et al. Effects of temperature and soil water content on soil respiration of grazed and ungrazed *Leymus chinensis* steppes, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 2006, **67**: 60-67
- [43] Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dunn M, et al. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply. *Ecosystems*, 2008, **11**: 1352-1367
- [44] Jing Y-L (井艳丽), Guan D-X (关德新), Wu J-B (吴家兵), et al. Research progress on photosynthesis regulating and controlling soil respiration. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(1): 269-276 (in Chinese)
- [45] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: A review of mechanisms and controls. *Global Change Biology*, 2010, **16**: 3386-3406

作者简介 陈 亮,男,1989年生,硕士研究生。主要从事湿地碳收支研究。E-mail: chenliangformal@126.com

责任编辑 孙 菊

陈亮,刘子亭,韩广轩,等. 环境因子和生物因子对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2016, **27**(6): 1795-1803

Chen L, Liu Z-T, Han G-X, et al. Effects of environmental and biotic factors on soil respiration in a coastal wetland in the Yellow River Delta, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(6): 1795-1803 (in Chinese)