



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.02.010

王丹, 陈永金, 裴巍, 等. 黄河三角洲湿地芦苇和棉田土壤呼吸试验研究[J]. 2016, 14(2): 49-54, 69.

WANG Dan, CHEN Yong jin, PEI Wei, et al. Soil respiration of reed and cotton fields in Yellow River delta wetland[J]. 2016, 14(2): 49-54, 69. (in Chinese)

# 黄河三角洲湿地芦苇和棉田土壤呼吸试验研究

王丹, 陈永金, 裴巍, 刘加珍

(聊城大学 环境与规划学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 为探究温带河口湿地原生芦苇群落和人工棉田群落的土壤碳通量特征及其与各环境因子的关系, 利用 Li 8100 开路式土壤碳通量测量系统对黄河三角洲湿地棉田和芦苇两种植被覆盖下的土壤呼吸速率进行了监测, 同时测定了土壤和大气的温度、湿度, 分析了两种不同利用方式的土壤呼吸变化规律及相关影响因子。结果表明: 棉花群落和芦苇群落样地的土壤呼吸速率日变化曲线均呈不对称的单峰形式, 且变化趋势基本相同, 在 12 时-14 时达到峰值, 在 6 时-8 时到达谷值, 棉田的土壤呼吸高于芦苇地, 且平均呼吸速率表现为棉花群落 ( $0.927 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 高于芦苇群落 ( $0.705 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 这证明人为耕作会增加土壤碳通量的释放, 导致碳排放量的增加。经相关性分析得出, 土壤温度和大气湿度是影响棉花群落和芦苇群落土壤呼吸日变化的主要因素, 其中前者对芦苇地影响更大, 而后者对棉田的影响更大。

**关键词:** 黄河三角洲; 湿地; 土壤呼吸; 农田耕作; 环境因子

**中图分类号:** Q948.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0049-06

## Soil respiration of reed and cotton fields in Yellow River delta wetland

WANG Dan, CHEN Yong jin, PEI Wei, LIU Jia zhen

(School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** To discuss the variations in carbon dioxide emission rate between reed and cotton fields of estuary wetland in temperate zone, we analyzed the differences of soil respiration rate between cotton community and reed community. The experiment was held in Autumn, 10, 6, 2012, and the experiment field lay in Yellow River delta, which is the youngest wetland in temperate area. The soil respiration rate was measured by Li 8100 (produced by USA), the data of soil temperature and moisture were also recorded by the instrument of Li 8100, atmospheric temperature and relative humidity were monitored synchronously. The results showed that the daily changing curves of soil respiratory rate of both cotton community and reed community were asymmetric unimodal, the maximum rate appeared at 12:00-14:00, and the minimum rate was observed at 6:00-8:00. However, the mean respiratory rate of the two communities showed great difference, the average respiratory rate of cotton community and reed community were  $0.927 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and  $0.725 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , respectively. These phenomena indicated that the cultivated wetland can lead to the increase in carbon emission and contributes to the global warming. The correlation analysis disclosed that soil temperature and atmospheric humidity were the main factors influencing soil respiration of the two communities. In detail, soil temperature was the primary environmental factor influencing soil respiration of reed community, and the atmospheric humidity influenced soil respiration of cotton community mainly. The experiment data can be used as the parameters of estuary

收稿日期: 2015-04-08    修回日期: 2016-03-11    网络出版时间: 2016-04-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1504.030.html>

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAC15B02); 国家自然科学基金(40901276); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(2011BSB01256); 聊城大学大学生创新项目(SF2013136)

Fund: National Science and Technology key program(2014BAC15B02); National Natural Science Foundation of China(40901276); Research Award Fund for Outstanding Young Scientists in Shandong Province(2011BSB01256); Innovative Project for Undergraduate in Liaocheng University(SF2013136)

作者简介: 王丹(1992), 女, 河北邯郸人, 主要从事湿地环境与生态过程方面研究, E-mail: misswangdan@163.com

通讯作者: 陈永金(1968), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士(后), 主要从事湿地生态水文研究。Email: chen Yongjin@lcu.edu.cn

wetland ecosystem carbon cycle.

**Key words:** Yellow River delta; wetland; soil respiration; agriculture; environmental factors

自 1901 年至 2005 年,全球平均气温大约上升了  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,全球变暖的重要原因之一是  $\text{CO}_2$  升高引起的温室效应<sup>[2]</sup>,而土壤呼吸释放的  $\text{CO}_2$  是全球碳循环中最重要的组成部分<sup>[3]</sup>,因此土壤呼吸作用已成为全球碳循环和气候变化研究的核心问题之一<sup>[4]</sup>。湿地是一类特殊的生态系统,其土壤中碳的储量占土壤碳总储蓄量的 11%<sup>[6]</sup>,湿地碳循环能够对全球气候变化产生重大影响。因此,湿地土壤呼吸被越来越多的学者关注。目前国内有关湿地土壤呼吸的研究主要集中在三江平原沼泽湿地、辽河下游芦苇湿地、长江中下游湿地等<sup>[7-8]</sup>,且研究内容多在阐述环境因子与土壤呼吸的相互关系上<sup>[9-13]</sup>。相对而言,研究人为干扰对新生河口湿地土壤呼吸影响的文章还不多见。黄河三角洲地区的典型原生植被为芦苇群落,典型人工种植作物为棉花群落,本文通过对黄河三角洲地区棉花群落和芦苇群落植被下土壤呼吸速率及土壤、大气的温度和湿度进行直观监测,通过对比两群落样地土壤呼吸速率,探究河口湿地开垦对原自然湿地土壤呼吸的影响。此外,本试验的数据同时可作为河口湿地生态系统碳循环的参数。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地点位于山东省东营市黄河入海口国家湿地生态保护区的潮间带(图 1),属于暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温  $12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量为  $542.3\text{ mm}$ ,降水多集中在夏季,占 63.9%。年平均蒸发量为  $926.1\text{ mm}$ ,全年平均日照时数为  $2728.5\text{ h}$ ,平均无霜期为 210 d。该区域土壤分为褐土、潮土、盐土、水稻土和砂姜黑土 5 个类别。天然植被以滨海盐生植被为主,主要的植被群落有芦苇群落、翅碱蓬群落、白茅群落、柽柳群落、獐茅群落等,部分地块被开垦成了农田,主要种植棉花。

### 1.2 土壤呼吸的测定

本试验使用 LF8100A(LF-COR, Lincoln, NE, USA) 开路式土壤碳通量测量系统对土壤呼吸速率进行测量。试验选取温带地区最年轻的湿地—黄河三角洲湿地上人工种植的棉田和芦苇群落作为研究样地。观测时间为 2012 年 10 月 6 日 6 时—18 时,每 2h 测定一次,每次测定持续 3~5 min,每个

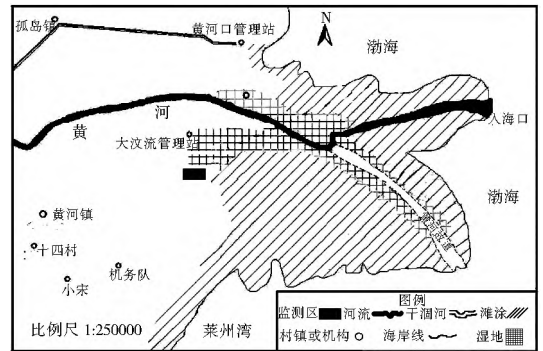


图 1 试验地示意图

Fig. 1 Map of experimental field

监测点测定两个循环。该日天气晴朗,测得的数据能够体现土壤呼吸的一般特征。试验时,在每个样地随机选取 5 个土壤呼吸观测点,各监测点之间距离不小于 5 m,提前 24 h 在观测点布设基座。基座是直径 20 cm,高 10 cm 的聚氯乙烯圆柱体,并在测定期间定点测量。基座高 7 cm,插入土壤 3 cm,尽量放置在植株的间隙。试验前将基座中活的植株齐地面剪除,并尽量避免触动地表的凋落物。经过 1 d 的平衡后,基座内的土壤呼吸速率基本恢复到正常水平,避免布设基座造成土壤呼吸速率的波动对试验产生影响。

### 1.3 环境因子的测定

在测定土壤呼吸速率的同时,利用大气温湿度计测定气室上空近地面(约半米高)的大气温度和湿度,并将土壤湿度计和地温计插入气室周围的土壤中测定土壤湿度及温度,利用地温计分别测量地面以下 0~5 cm、5~10 cm、11~15 cm、16~20 cm、21~25 cm 的土壤温度。

### 1.4 数据计算和分析

本文首先采用 Pearson 分析法对各环境因子和土壤呼吸速率进行相关性分析,找出环境因子与土壤呼吸速率相互依存关系的强度指数,而后使用回归分析法计算环境因子与土壤呼吸速率之间的具体关系表达式。在土壤呼吸速率与温度的分析中,为了更好地说明两者之间的相关关系,采用 Van't Hoff 模型进行  $Q_{10}$  值的计算,见式(1)。

$$Q_{10} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}} \quad (1)$$

式中: $R$  为土壤呼吸速率; $R_1$  为前一刻测得的土壤呼吸值; $R_2$  为后一刻测得的土壤呼吸速率; $T$  为观

测时的温度;  $T_1$  为前一刻测得的温度,  $T_2$  为后一刻测得的温度。

本文中所有的数据统计和分析在 SPSS17.0 和 EXCEL2003 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉花群落和芦苇群落湿地土壤呼吸日动态特征

图 2 为 2012 年 10 月 6 日棉花群落和芦苇群落样地土壤呼吸在 6 时-18 时的日变化曲线。可以看出, 两种植被条件下土壤呼吸均表现为明显的不对称单峰型日变化规律。两样地土壤呼吸曲线峰值均出现在 12 时, 呼吸速率分别为 1.167、0.995  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ; 棉花群落土壤呼吸速率最小值为 0.732  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 6 时左右, 而芦苇群落样地的土壤呼吸速率最小值为 0.418  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 出现在 8 时左右。棉花群落土壤呼吸日动态变异系数为 0.215, 芦苇群落的变异系数为 0.308, 这表示棉花群落的土壤呼吸速率比芦苇群落稳定。整体来说, 棉田的土壤呼吸率(平均值为 0.927  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ) 都高于芦苇地(平均值为 0.705  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ), 这表示农田耕作增加了土壤的碳排放量。

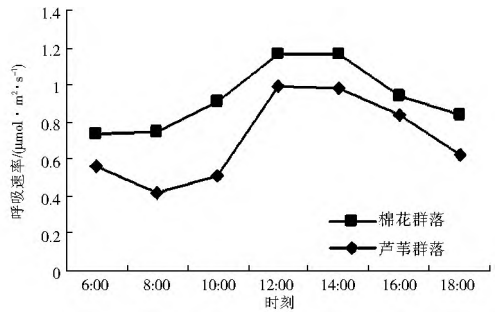


图 2 土壤呼吸日变化

Fig. 2 Daily change of soil respiration rate

### 2.2 土壤呼吸与环境因子的关系

#### 2.2.1 土壤温度对土壤呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的重要因子。本试验测得的是 0~25 cm 深的土壤温度, 结果显示两样地土壤温度日变化均呈现单峰型曲线, 棉花群落土壤温度在 14 时达到最大值, 而芦苇群落在 16 时达到最大值。相关分析显示棉花群落和芦苇群落的呼吸速率与土壤温度的相关系数分别为 0.681、0.81。芦苇群落样地的  $P$  值小于 0.05, 表现出显著正相关关系。采用  $Y = aX^2 + bX + c$  二次项函数来对呼吸速率与土壤温度拟合(图 3), 结果显示棉花群落和芦苇群落的呼吸速率与土壤温度拟合优度  $R^2$  值分别为 0.51、0.73(表 1)。

表 1 土壤呼吸与各影响因子相关性分析和拟合方程

Tab. 1 The correlaton analysis and matching formula of the soil respiration and the impact factor

影响因子	植被类型	均值	变异系数 $C_V$	相关系数 $C_A$	$n$	$P$	拟合方程	$R^2$	温度敏感系数 $Q_{10}$
土壤温度	棉花群落	19.29 °C	0.106	0.681	7	> 0.05	$Y = 0.014X^2 - 0.459X + 4.505$	0.51	2.59
	芦苇群落	19.37 °C	0.104	0.813	7	< 0.05	$Y = 0.018X^2 - 0.589x + 5.372$	0.73	1.60
大气温度	棉花群落	23.92 °C	0.332	0.669	7	> 0.05	$Y = 0.003X^2 - 0.118X + 1.801$	0.74	1.90
	芦苇群落	24.80 °C	0.270	0.669	7	> 0.05	$Y = 0.003X^2 - 0.096X + 1.453$	0.60	1.69
土壤湿度	棉花群落	54.43%	0.505	-0.656	7	> 0.05	$Y = 0.0001X^2 - 0.018X + 1.473$	0.48	-
	芦苇群落	53.56%	0.486	-0.767	7	< 0.05	$Y = 0.0003X^2 - 0.037X + 1.831$	0.82	-
大气湿度	棉花群落	42.96%	0.031	0.895	6	< 0.05	$Y = 0.034X^2 - 2.779X + 57.689$	0.87	-
	芦苇群落	39.99%	0.020	0.781	5	> 0.05	$Y = 0.162X^2 - 12.775X + 252.6$	0.70	-

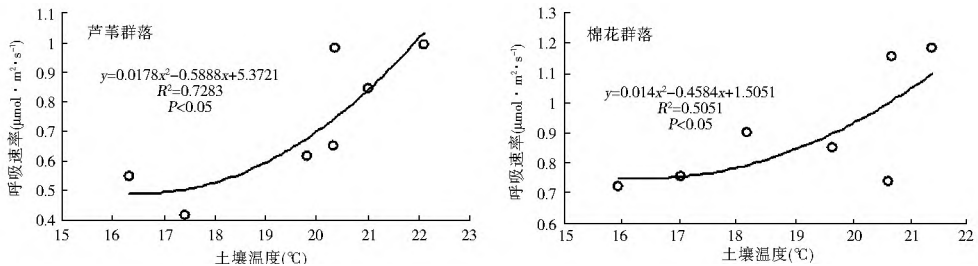


图 3 土壤温度与呼吸速率关系

Fig. 3 The relationship between soil temperature and soil

为了说明土壤呼吸速率与土壤温度之间存在的显著性相关关系, 本文采用 Van't Hoff 模型计算两样地  $Q_{10}$  值。结果显示: 两样地的土壤温度与土壤

呼吸具有较好的相关性, 芦苇地的土壤温度与呼吸速率  $P < 0.05$ , 呈显著相关; 棉田的土壤温度与呼吸速率在 0.1 水平下基本达到显著相关。两样地的

$Q_{10}$  值为: 棉花群落 (2.59) > 芦苇群落 (1.60), 人为干扰增加了棉花群落的土壤呼吸速率对土壤温度的敏感性。

## 2.2.2 土壤湿度对土壤呼吸的影响

土壤湿度是影响土壤呼吸的另一重要因子。棉花群落和芦苇群落的土壤湿度日变化曲线都呈“U”型, 其中棉花群落土壤湿度最小值出现在 14 时, 芦苇群落的最小值出现在 12 时; 在 6 时-13 时土壤湿度表现为棉花群落高于芦苇群落, 而 13 时-18 时则芦苇群落高于棉花群落。相关分析表明: 棉花群落和芦苇群落的土壤呼吸速率与土壤湿度的相关系数分别为 -0.656、-0.767, 这表示两样地土壤呼吸速率与土壤湿度之间呈显著负相关关系, 且芦苇群落土壤呼吸速率随土壤湿度变化更显著。采用  $Y = aX^2 + bX + c$  二次项函数对土壤湿度和土壤呼吸速率日变化观测数据进行拟合发现(表 1), 土壤湿度

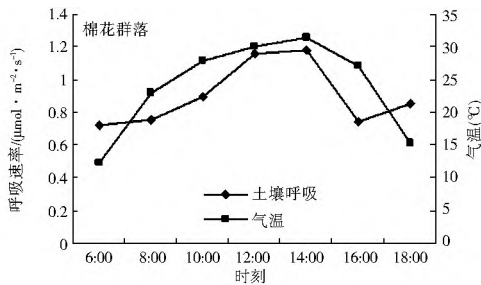


图 4 土壤呼吸与气温日动态趋势

Fig. 4 Daily change of soil respiratory rate and atmospheric temperature

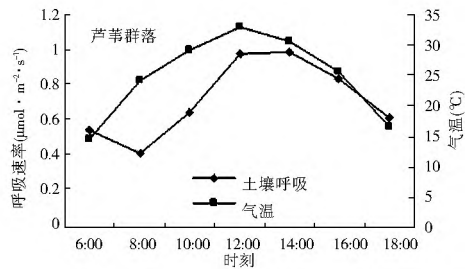
能够解释棉花群落土壤呼吸日变化的 48%, 芦苇群落的 82%。

## 2.2.3 大气因子对土壤呼吸的影响

### (1) 气温对土壤呼吸的影响

由图 4 和表 1 可知, 棉花群落和芦苇群落的土壤呼吸与气温均呈正相关。本试验中两样地的土壤呼吸速率与气温均呈单峰型曲线, 两种植被下的土壤呼吸速率与气温的最大值出现在 12 时-14 时之间, 土壤呼吸速率与气温变化趋势近乎同步。

相关性分析显示两样地土壤呼吸与气温之间的相关系数都为 0.669, 这表示两样地土壤呼吸与气温之间呈正相关关系。采用  $Y = aX^2 + bX + c$  二次项系数回归方程对气温和土壤呼吸速率日变化数据进行拟合发现(表 1), 气温能够解释棉花群落土壤呼吸日变化的 74%, 芦苇群落的 60%, 说明近地面气温对棉花群落呼吸速率日变化的影响作用更加显著。



### (2) 大气湿度对土壤呼吸的影响

根据试验监测, 两样地近地面大气湿度日变化在 38%~45% 之间, 棉花群落和芦苇群落大气湿度的变异系数分别为 0.031 和 0.020, 试验当日大气湿度比较稳定。大气湿度最高值都出现在 10 时左右, 且棉花群落 (44.62%) > 芦苇群落 (40.92%); 棉花群落大气湿度最低值出现在 14

时, 芦苇群落大气湿度最低值出现在 6 时, 表现为棉花群落 (40.82%) > 芦苇群落 (39.12%); 棉花群落的大气湿度始终高于芦苇群落。通过观察图 5 发现土壤呼吸速率随大气湿度变化有着明显的滞后性, 棉花群落的土壤呼吸速率对大气湿度的响应明显推迟了 2 h 左右, 芦苇群落则滞后约 3~4 h。

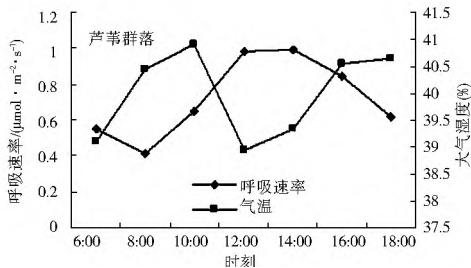
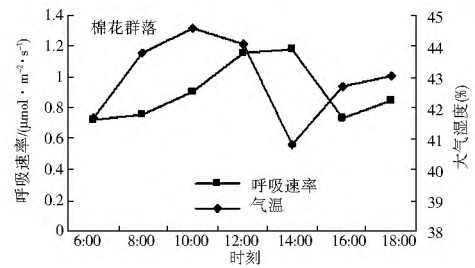


图 5 土壤呼吸速率与大气湿度日动态趋势

Fig. 5 Daily change of soil respiratory rate and atmospheric humidity



在排除土壤呼吸速率随大气湿度变化的滞后响应后, 采用 Pearson 相关分析法对所得数据进行分析, 结果显示(表 1) 土壤呼吸速率和大气湿度相关系数为棉花群落 0.895、芦苇群落 0.781, 这说明两

样地的土壤呼吸速率都与大气湿度有着显著的正相关关系。采用  $Y = aX^2 + bX + c$  二次项系数回归方程对大气湿度和土壤呼吸速率日变化观测数据进行拟合发现, 大气湿度能够解释棉花群落土壤呼吸日

变化的87%, 芦苇群落的70%, 说明近大气湿度对棉花群落呼吸速率日变化的影响作用更加显著。

### 3 讨论

#### 3.1 棉花群落与芦苇群落土壤呼吸的日动态变化

土壤呼吸作用的日变化多成单峰型曲线<sup>[17]</sup>。朱敏等<sup>[18]</sup>在黄河三角洲芦苇湿地土壤呼吸试验中发现, 地面无积水时, 土壤呼吸速率呈单峰型曲线且最大值出现在12时点左右。王慧清等<sup>[19]</sup>认为锡林河湿地土壤呼吸生长季日变化呈单峰曲线, 生长季呼吸速率在13时达到最大值。本研究中两种土壤呼吸日变化呈现明显的单峰曲线, 峰值出现在12时左右, 最小值出现在6时-8时, 这与其他人的研究结果基本一致, 说明湿地土壤呼吸的整体日动态大致相同, 都呈现单峰型曲线。但王慧清等<sup>[19]</sup>和谢艳兵等<sup>[9]</sup>的研究也指出土壤冻结后, 呼吸速率日变化呈双峰型曲线, 可能是土壤冻融过程造成的。此外, 本实验中两样地土壤呼吸速率最低值出现在清晨, 原因可能是清晨植被呼吸作用较弱, 且大气温度较低, 湿度较高。

对于黄河三角洲地区芦苇群落日呼吸速率, 本研究测得的结果在 $0.41 \sim 0.99 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间, 均值为 $0.705 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 与朱敏等<sup>[18]</sup>的 $1.25 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右和李华兵等<sup>[20]</sup>的 $0.8 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右相比, 日均呼吸速率略低, 这可能与试验地时空分布不同有关。而杨利琼等<sup>[21]</sup>测得土壤呼吸速率为 $0.11 \sim 0.26$ 之间, 远低于其他研究结果, 原因可能是其测量样地内积水较多, 抑制了芦苇土壤呼吸速率。

本研究结果显示, 棉田土壤呼吸速率大于芦苇地。这与棉田的植株较密集, 而芦苇群落的植株分布相对较分散有关。宋长春等也曾指出湿地土壤中 $\text{CO}_2$ 浓度与植物的生长状况有密切关系, 植物根的呼吸是决定土壤中 $\text{CO}_2$ 浓度的主要因素<sup>[7]</sup>。但是江长胜等<sup>[22]</sup>在三江平原湿地土壤呼吸试验中发现沼泽地垦殖为农田后土壤呼吸作用减弱, 与本试验研究结果不符, 其原因可能是实验时间空间不同, 且本试验样地都选取的是无积水的地表。同时, 本试验也证明了人为耕作会增加土壤碳通量的释放, 导致碳排放量的增加, 因此退耕还林、增加自然保护区是降低碳排放的重要途径。

#### 3.2 水热因子对土壤呼吸的影响

在温带河口湿地, 土壤温度和大气湿度是影响

棉花群落和芦苇群落土壤呼吸日变化的主要因素。本研究中对影响土壤呼吸速率的水热因子进行相关性分析得出: 芦苇群落的呼吸速率与环境因子的相关性为: 土壤温度( $0.813$ ) > 大气湿度( $0.781$ ) > 土壤湿度( $-0.767$ ) > 气温( $0.669$ ); 棉花群落则为: 大气湿度( $0.895$ ) > 土壤温度( $0.681$ ) > 气温( $0.669$ ) > 土壤湿度( $-0.656$ )。从中可以看出: 土壤温度对芦苇群落呼吸速率产生更大影响, 而大气湿度对棉花群落呼吸速率有更大影响。本试验中土壤呼吸速率明显受到土壤温度的制约, 这与大部分人的研究结果是一致的<sup>[12, 23, 24]</sup>。棉花群落的土壤呼吸速率对大气湿度的响应推迟了2h左右, 芦苇群落则推迟3~4h, 可能是受水分蒸发的影响, 丛生的芦苇间隙很少, 水分蒸发后不易扩散使大气湿度保持时间长, 而棉田的植株存在间隙<sup>[25]</sup>, 太阳光可以透过植株空隙使间隙周围的温度升高, 使大气中的水分迅速蒸发扩散。此外, 棉花群落和芦苇群落的土壤呼吸速率都与土壤湿度呈明显负相关, 可能是土壤含水量多则土壤透气性变差, 从而减少了土壤碳通量。

在分析大气湿度对土壤呼吸速率的影响时, 一开始没有排除呼吸速率对大气湿度响应有明显的滞后性, 因此得出的相关系数为负值且在 $-0.1 \sim -0.4$ 之间, 与观察到的土壤呼吸速率和大气湿度曲线图明显矛盾。在排除滞后响应后, 结果显示棉花群落土壤呼吸速率与大气湿度相关系数为 $0.859$ ,  $P$ 值为 $0.016$ , 芦苇群落土壤呼吸速率与大气湿度相关系数为 $0.781$ , 与土壤呼吸速率和大气湿度曲线图趋势分析相一致, 这与赵哈林等<sup>[26]</sup>的“近地面大气湿度是影响土壤呼吸速率日变化的关键因子”这一研究结果相符。

### 4 结论

(1) 棉田和芦苇群落的土壤呼吸速率日变化曲线都呈不对称的单峰形式, 两者都在12时-14时左右达到峰值, 在清晨6时-8时达到谷值, 且两者的变化趋势基本一致。棉花群落土壤呼吸速率日均值 $0.927 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 芦苇群落土壤呼吸速率均值为 $0.705 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。人为耕作会增加土壤碳通量的释放, 导致碳排放量的增加

(2) 土壤温度和大气湿度是影响棉花群落和芦苇群落土壤呼吸日变化的主要因素。且土壤温度对芦苇群落呼吸速率产生更大影响, 而大气湿度对棉花群落呼吸速率产生更大影响。

(3) 土壤呼吸速率随大气湿度变化有着明显的滞后性。棉花群落的土壤呼吸速率对大气湿度的响

应明显推迟了 2 h 左右, 芦苇群落则滞后约 3~ 4 h。

#### 参考文献(References):

- [1] 李海防, 段文军. 华南地区典型人工林土壤二氧化碳和氧化亚氮通量研究[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(1): 26-32. (LI Hai fang, DUAN Wen jun. Soil CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> fluxes from four typical plantations in southern China[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(1): 26-32. (in Chinese))
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Raich J W, Tufekci Oglu A. Vegetation and Soil Respiration: Correlations and Controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 71-90.
- [4] Schlesinger W H, An Drew S J A. Soil Respiration and the Global Carbon Cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 7-20.
- [5] Saussure Th. DE. Recherches chimiques sur la. Vegetation [M]. Paris: Gauthier Villars, 1804.
- [6] Roehm C L. Respiration in wetland ecosystems[A]. Giorgoi P A, Williams P J I B. Respiration in aquatic ecosystem [C]. New York: Oxford University Press(USA) Inc, 2005: 93-102.
- [7] 宋长春, 杨文燕, 徐小锋, 等. 沼泽湿地生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放动态及影响因素[J]. 环境科学, 2004, 25(4): 1-6. (SONG Chang chun, YANG Wen yan, XU Xiao feng, et al. Dynamics of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentration in the mire soil and its impact factors[J]. Environmental Science, 2004, 25(4): 1-6. (in Chinese))
- [8] 王毅勇, 宋长春, 阎百兴, 等. 三江平原不同土地利用方式下湿地土壤 CO<sub>2</sub> 通量研究[J]. 湿地科学, 2003, 1(2): 111-114. (WANG Yi yong, SONG Chang chun, YAN Bai xing, et al. Study on Soil CO<sub>2</sub> fluxes from different land use types in the Sanjiang plain[J]. Wetland Science, 2003, 1(2): 111-114. (in Chinese))
- [9] 谢艳兵, 贾庆宇, 周莉, 等. 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 53-58. (XIE Yan bing, JIA Qing yu, ZHOU Li, et al. Soil respiration and its controlling factors at *Phragmites communis* Wetland in Panjin[J]. Journal of Meteorology And Environment, 2006, 22(4): 53-58. (in Chinese))
- [10] 聂明华, 刘敏, 侯立军, 等. 长江口潮滩土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 824-831. (NIE Ming hua, LIU Min, HOU Li jun, et al. Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in tidal flat of Yangtze Estuary[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(4): 824-831. (in Chinese))
- [11] 杨青, 吕宪国. 三江平原湿地生态系统土壤呼吸动态变化的初探[J]. 土壤通报, 1992, 30(6): 254-256. (YANG Qing, LU Xian guo. The dynamic change of soil respiration in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1992, 30(6): 254-256. (in Chinese))
- [12] 刘春英, 周文斌. 我国湿地碳循环的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1264-1268. (LIU Chun ying, ZHOU Wen bin. Progress of research on carbon cycle of wetlands in China[J]. Chinese journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1264-1268. (in Chinese))
- [13] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719-733. (HAN Guang xuan, ZHOU Guang sheng, XU Zhen zhu. Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 719-733. (in Chinese))
- [14] Bubier J, Crillpm, Mooretr, et al. Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a boreal peatland complex[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1998, 12: 703-714.
- [15] Bubier J L, Bhatia G, Moore T R, et al. Spatial and temporal variability in growing season net ecosystem carbon dioxide exchange at a large peat land in Ontario, Canada[J]. Ecosystems, 2003, 6: 353-367.
- [16] 刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 193-196. (LIU He man, CAO Li hua, MA He ping. Diurnal dynamics of soil respiration and response to atmospheric temperature, humidity in Linzhi farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(1): 193-196. (in Chinese))
- [17] 韩广轩, 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望[J]. 植物生态学报, 2009, 33(1): 197-205. (HAN Guang xuan, ZHOU Guang sheng. Review of spatial and temporal variations of soil respiration and driving mechanisms [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(1): 197-205. (in Chinese))
- [18] 朱敏, 张振华, 于君宝, 等. 氮沉降对黄河三角洲芦苇湿地土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(6): 517-529. (ZHU Min, ZHANG Zhen hua, YU Jun bao, et al. Effect of nitrogen deposition on soil respiration in *Phragmites australis* wetland in the Yellow River delta, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(6): 517-529. (in Chinese))
- [19] 王慧清, 王云龙, 杜金玲. 锡林河湿地土壤呼吸日变化及温度响应特征研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(14): 8395-8397. (WANG Hui qing, WANG Yun long, DU Jin ling. Study on diurnal variation of wetland soil respiration and characteristics of temperature response in Xilin River[J]. Journal of Anhui Agri. Sci. 2011, 39(14): 8395-8397. (in Chinese))
- [20] 李华兵, 杜国云, 张贵军. 黄河三角洲芦苇群落土壤呼吸日动态研究[J]. 鲁东大学学报: 自然科学, 2011, 28(1): 67-71. (LI Hua bing, DU Guo yun, ZHANG Gui jun. Diurnal dynamics research of soil respiration of reed (*Phragmites australis*) community in the Yellow River Delta[J]. Ludong University Journal: Natural Science Edition, 2011, 28(1): 67-71. (in Chinese))
- [21] 杨利琼, 韩广轩, 于君宝, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2415-2422. (YANG Li qiong, HAN Guang xuan, YU Jun bao, et al. 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[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(9): 2415-2422. (in Chinese))
- [22] 江长胜, 郝庆菊, 宋长春, 等. 垦殖对沼泽湿地土壤呼吸速率的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(17): 4539-4548. (JIANG Chang sheng, HAO Qing ju, SONG Chang chun, et al. Effects of marsh reclamation on soil respiration in the Sanjiang Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4539-4548. (in Chinese))

(下转第 69 页)

- of Water Resources Planning and Management, 2010, 137(5): 381-390.
- [9] 刘平平, 粟晓玲. 冯家山水库供水持续性评价[J]. 排灌机械工程学报, 2013(07): 580-585. (LIU Ping ping, SU Xiaoling. Evaluating water supply sustainability of Fengjiashan Reservoir [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013(07): 580-585. (in Chinese))
- [10] 张士锋, 孟秀敬, 廖强. 北京市水资源与水量平衡研究[J]. 地理研究, 2012(11): 1991-1997. (ZHANG Shifang, MENG Xiujing, LIAO Qiang. Research on water resources and water balance in Beijing [J]. Geographical Research, 2012(11): 1991-1997. (in Chinese))
- [11] 王明明, 谢永生, 王恒俊, 等. 水库集水区水土保持与流域产水量——以密云水库上游潮白河流域为例[J]. 中国水土保持科学, 2007(5): 79-82. (WANG Mingming, XIE Yongsheng, WANG Hengjun, et al. Soil and water conservation of reservoir watershed and its water yield: a case study of Chaobaihe River basin on the upper reaches of Miyun Reservoir [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007(5): 79-82. (in Chinese))
- [12] 高迎春, 姚治君, 刘宝勤, 等. 密云水库入库径流变化趋势及动因分析[J]. 地理科学进展, 2002(06): 546-553. (GAO Yingchun, YAO Zhijun, LIU Baqin, et al. Evolution trend of Miyun Reservoir inflow and its motivating factors analysis [J]. Progress in Geography, 2002(06): 546-553. (in Chinese))
- [13] 夏军, 李璐, 严茂超, 等. 气候变化对密云水库水资源的影响及其适应性管理对策[J]. 气候变化研究进展, 2008(6): 319-323. (XIA Jun, LI Lu, YAN Maoshao, et al. Impacts of climate changes on water resource of Miyun Reservoir and adaptation managements [J]. Advances in Climate Change Research, 2008(6): 319-323. (in Chinese))
- [14] 田雨, 雷晓辉, 孙甲岚, 等. 南水北调通水前北京市水资源情势及应对措施[J]. 南水北调与水利科技, 2011(2): 60-63. (TIAN Yu, LEI Xiaohui, SUN Jialan, et al. Current situation and corresponding solutions of water resource carrying capacity in Beijing before the completion of South to North Water Diversion project [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011(2): 60-63. (in Chinese))
- [15] 北京市水务局. 北京水资源公报[R]. 2013. (MWR-PRC. Beijing Water Resources Bulletin. Ministry of Water Resources of PRC, Beijing Water Authority [R]. 2013. (in Chinese))
- [16] 何慧凝. 北京市需用水规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2010. (HE Huining. Study on the water use and water demand of Beijing City [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese))
- [17] 邢贵海. 怀柔水库流域径流分析与未来水资源管理[J]. 中国防汛抗旱, 2011(S1): 40-42. (XING Guihai. Runoff in Huairou reservoir basin and future water management [J]. China Flood and Drought Management, 2011(S1): 40-42. (in Chinese))
- [18] 唐颖, 麻军, 郭金燕. 白河堡水库为延庆平原区集中供水的可行性分析[J]. 北京水务, 2008(5): 31-33. (TANG Ying, MA Jun, GUO Jinyan. Feasibility of Yanqing plain area concentrated water supply from Baihebao reservoir [J]. Beijing Water, 2008(5): 31-33. (in Chinese))
- [19] 陈月平. 人类活动对官厅水库入库径流的影响[J]. 北京水利, 2003(2): 35-36. (CHEN Yueping. Human activities on runoff of the Guanting reservoir [J]. Beijing Water Resources, 2003(2): 35-36. (in Chinese))
- [20] 汪珊, 张彤, 黄大英, 等. 北京市地下水合理开发与保护: 首届全国地下水开发利用与污染防治技术交流研讨会[C]. 南京, 2009. (WANG Shan, ZHANG Tong, HUANG Daying, et al. The rational utilization and protection of groundwater in Beijing: First National Exploitation and Utilization of Groundwater and Pollution Prevention Technology Interchange Conference [C]. Nanjing, 2009. (in Chinese))
- [21] 中国南水北调[EB/OL]. [2015/4/16]. <http://www.nsb.gov.cn/>. (South to North Water Diversion [EB/OL]. [2015/4/16]. <http://www.nsb.gov.cn/>. (in Chinese))

(上接第 54 页)

- [23] 陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1018-1024. (CHEN Shutao, LIU Qiaohui, HU Zhenghua, et al. Factors influencing the spatial variability in soil respiration under different land use regimes [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1018-1024. (in Chinese))
- [24] Lloyd J, Taylor J. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [25] Larionova A, Yermolayev A M, Blagodatsky S A, et al. Soil respiration and carbon balance of gray forest soils as affected by land use [J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27: 251-257.
- [26] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 1972-1980. (ZHAO Hailin, LI Yuqiang, ZHOU Ruilian. Soil respiration rates and its relation with environmental factors in Horqin Sand Land [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 1972-1980. (in Chinese))