

# 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素\*

韩广轩<sup>1</sup> 周广胜<sup>2\*\*</sup> 许振柱<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003 ;<sup>2</sup> 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093 )

**摘 要** 基于东北地区玉米生态系统土壤呼吸连续 2 个生长季的观测, 阐明了土壤呼吸日、季节变化特征。综合分析了水热因子、土壤性质、生物量及叶面积指数(LAI)对土壤呼吸的影响。结果表明: 玉米地土壤呼吸日变化为不对称的单峰型曲线, 最小值和最大值分别出现在 6:00—7:00 和 13:00 左右。2005 年玉米生长季土壤呼吸速率均值为  $3.16 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大值为  $4.77 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 7 月 28 日; 最小值为  $1.31 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 出现在 5 月 4 日。统计分析表明: 土壤温度是玉米生态系统土壤呼吸日变化的驱动因素, 土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸季节变化的关键因素, 二者可以解释玉米生长季土壤呼吸时间变异的 87%; LAI 和根系生物量与土壤呼吸速率呈正相关, 说明生物因子对土壤呼吸季节变化也有影响, 土壤有机质、全氮和碳氮比等土壤理化特性与土壤呼吸速率的关系较弱, 玉米生长季追施氮肥明显促进土壤呼吸速率。

**关键词** 玉米; 土壤呼吸; 时间变异; 影响因素

中图分类号 S513 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2008)10-1698-08

**Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season.** HAN Guang-xuan<sup>1</sup>, ZHOU Guang-sheng<sup>2</sup>, XU Zhen-zhu<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Yantai Institute of Coastal Zone Research for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; <sup>2</sup>State Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2008 27( 10 ) :1698-1705.

**Abstract** : Based on the continuous measurement of soil respiration in a maize field in Northeast China during maize growth seasons in 2004 and 2005, the temporal variation of soil respiration was studied, with the effects of heat and water factors, soil properties, root biomass, and leaf area index (LAI) analyzed. The diurnal variation of soil respiration showed an asymmetric pattern, with the minimum appeared at 6:00-7:00 and the maximum at 13:00. There was a great fluctuation of soil respiration during the growth season in 2005. The mean soil respiration rate was  $3.16 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , with a maximum of  $4.77 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  on July 28 and a minimum of  $1.31 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  on May 4. Statistic analysis showed that soil temperature was the driving factor to the diurnal variation of soil respiration. Soil temperature and soil moisture were the dominant environmental factors affecting the seasonal variation of soil respiration, and explained 87% of its variability. LAI and root biomass were positively related to soil respiration rate, indicating that biotic factors also affected the seasonal variation of soil respiration. However, soil properties such as soil organic content, total nitrogen content, and C/N ratio had poor correlations with soil respiration. Top-dressing nitrogen fertilizer increased soil respiration significantly.

**Key words** : maize ; soil respiration ; temporal variation ; affecting factor.

\* 国家杰出青年基金项目(40625015)和国家重点基础研究发展计划资助项目(2004CB418507-1)。

\*\* 通讯作者 E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

收稿日期:2008-04-08 接受日期:2008-07-20

土壤呼吸是土壤碳库向大气层碳库输入碳的主要途径 (Schimel, 1995), 土壤呼吸主要包括来自植物根系的自养呼吸和土壤微生物异养呼吸。陆地生态系统通过土壤呼吸排放的总碳量约为  $68 \sim 100 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (Raich & Schlesinger, 1992), 而全球陆地生态系统总初级生产力 (GPP) 的估算值为  $100 \sim 120 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (Musselman & Fox, 1991)。因此, 土壤呼吸速率相对微小的改变都会显著改变大气中  $\text{CO}_2$  的浓度和土壤碳的累积速率, 从而加剧或减缓全球气候变暖 (Schlesinger & Andrews, 2000)。据预测, 到 2100 年全球气温会升高  $1 \text{ }^\circ\text{C} \sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$  (IPCC, 2001), 这会导致土壤呼吸速率在其他因子如土壤湿度、土壤有机质等不变的情况下相应增加 (Grace & Rayment, 2000), 释放出更多的  $\text{CO}_2$ , 进一步加剧全球气候变暖 (Sánchez *et al.*, 2003)。

测定不同陆地生态系统土壤呼吸速率及其时空波动, 阐明土壤  $\text{CO}_2$  释放量的环境因子和人为因子的影响, 对于全球碳素平衡预算和估计全球变化的潜在效应是最为基本的数据 (Raich & Schlesinger, 1992)。然而, 土壤呼吸又是碳循环最主要环节和研究最为薄弱的部分, 有关土壤呼吸动态变化及其影响因素的知识仍相当有限 (Maestre & Cortina, 2003)。因此, 要准确估算陆地生态系统碳收支, 理清气候系统的反馈作用就必须加强土壤呼吸过程及其影响因素的研究 (Raich & Tufekcioglu, 2000; Janssens & Pilegaard, 2003; Lee *et al.*, 2004)。

目前, 有关土壤呼吸的研究主要集中在森林生态系统、草原生态系统, 而对农田生态系统土壤呼吸的测定研究较少, 从而制约着国家尺度的碳蓄积和碳排放的准确估算以及增汇减源措施的实施。本文根据东北地区玉米生态系统土壤呼吸连续 2 个生长季的观测资料, 分析土壤呼吸的日、季节变化特征, 阐述水热因子、土壤理化特性、生物量及其叶面积指数 (LAI) 与土壤呼吸的关系, 探讨影响玉米生态系统土壤呼吸时间变异性的关键因子, 以期为农田生态系统碳循环过程与机理研究提供理论依据和数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验在中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站进行。该试验站位于  $41^\circ 49' \text{ N}$ ,  $121^\circ 12' \text{ E}$ , 海拔 17 m, 属于暖温带季风性气候, 多

年平均气温  $9.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 玉米生长季 (4—9 月) 平均气温为  $20.1 \text{ }^\circ\text{C}$ , 非生长季平均气温为  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 多年平均降雨量 568.8 mm。试验田的土壤为典型棕壤, 土壤 pH 值 6.3, 有机质  $6.4 \sim 9.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 全氮  $0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。玉米品种为丹育 47, 2004 年为 4 月 24 日播种, 9 月 28 日收割。氮肥品种为  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , 玉米生长季用量为  $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 分播前和追肥 (6 月 18 日) 两次施到田中。2005 年为 4 月 26 日播种, 9 月 26 日收割。氮肥品种为  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , 玉米生长季用量为  $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 在播种前一次性施到田中。

### 1.2 土壤呼吸测定

用 Li-6400 便携式气体分析系统 (Li-Cor, Lincoln, NE, 美国) 和 Li-6400-09 土壤呼吸室测定土壤呼吸。为了减少对土壤表层的干扰, 土壤呼吸室放置在 PVC 圈 (直径 10 cm, 高度 5 cm) 上, PVC 圈插入土壤 1~2 cm, 在土壤测定的前 1 d 安置。2004 年每个小区安置 9 个土环, 2005 年每个小区安置 15 个土环。土壤呼吸速率测定主要在玉米的生长季进行, 具体时间为 2004 年 6—9 月和 2005 年 4—9 月。玉米生长季每月对土壤呼吸至少进行 1 次观测, 时间为 6:00—18:00, 每 1 h 采样 1 次。另外, 2004 年 6 月 27 日, 9 月 7 日, 9 月 29 日进行了 24 h 连续观测 (6:00—翌日 6:00)。

### 1.3 环境因子测定

在土壤呼吸测定的同时, 土环附近的 10 cm 土壤温度通过土壤热电偶探针 (Li-6400-09 TC, Li-Cor, 美国) 测定, 土壤湿度 (12 cm 和 20 cm) 通过便携式土壤水分测定仪 (Hydrosense, Campbell, 美国) 测定。另外, 还用小气候梯度观测系统 (HMP45C, Vaisala, Helsinki, 芬兰) 对土壤温度 (10、20、30、40 和 60 cm)、土壤剖面上 0~100 cm 不同层次 (每 10 cm 为一个层次) 的土壤水分含量动态 (Diviner 2000 土壤水分观测系统)、降雨量等进行 24 h 全天候观测, 频率为 30 min。

在每次土壤呼吸测定后, 用土钻取出土壤圈中土壤样品, 深度为耕层 0~20 cm, 将土样自然风干, 过 2 mm 筛, 然后分析土壤有机质和全氮。土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法, 土壤全氮测定采用凯氏定氮法。

### 1.4 生物因子测定

在测定土壤呼吸的同时进行玉米生物量与叶面积的测定。每 20 d 左右在样方中一次性采集完整

的玉米植株地上鲜样 5 株,同时,挖取植株下的土壤样方(15 cm 宽×30 cm 长×30 cm 深),挑选土壤中的植物根系。先量取每株叶片的叶面积,植株地上和地下鲜样使用通风高温烘炉在 105 ℃ 下杀青,80 ℃ 下烘干至恒重。LAI 为单位面积上所有叶子表面积的总和与相应土地面积之比。

### 1.5 统计分析

运用相关分析方法分析水热因子、土壤理化特性、生物量及其 LAI 与土壤呼吸的关系;用非线性回归方法分析日时间尺度的土壤呼吸速率与土壤温度关系(式(1)),温度对土壤呼吸的影响效应  $Q_{10}$  值通过式(2)计算;运用多元回归方法分析整个玉米生长季土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度之间的关系(式(3))。所有的数据分析基于统计分析软件 SPSS 11.0 (SPSS, Chicago, IL, USA) 完成。

$$R = \alpha e^{\beta T} \quad (1)$$

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

式中  $R$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T$  为 10 cm 土壤温度(℃),  $\alpha$  和  $\beta$  为参数。

$$R = e^{(a+bT+cW+dTW)} \quad (3)$$

式中  $W$  为 10 cm 土壤湿度(%),  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤呼吸日动态及其影响因素

#### 2.1.1 土壤呼吸昼夜变化

玉米观测场于 2004 年 6 月建设完毕,2004 年主要对玉米生长后期的土壤呼吸速率进行测定。图 1 为 2004 年玉米地土壤呼吸 24 h 的昼夜变化动态。玉米地土壤呼吸存在明显的日变化,土壤呼吸速率昼夜变化幅度较大,表现为不对称的单峰型曲线,其变化趋势与 10 cm 深度土壤温度的变化趋势一致。土壤呼吸速率最大值出现在 13:00—15:00;最小值出现在 6:00 左右。凌晨时土壤温度最低,植物和土壤微生物呼吸作用最弱,两方面的共同作用使得玉米地土壤呼吸速率在凌晨时出现最低值;午后气温最高,植物和土壤微生物呼吸强烈,土壤呼吸速率出现日变化中的最高值(在土温最高值出现以前)。

玉米地土壤呼吸昼夜变化中,白天(6:00—18:00)土壤呼吸速率均值高于夜间(18:00—翌日 6:00),拔节期、乳熟期和成熟期白天土壤呼吸速率与夜间的比值分别为 1.19、1.23 和 1.33(表 1)。玉

米不同生长阶段的土壤呼吸速率均值不同,生长盛期的土壤呼吸速率高于中后期,表现为拔节期( $4.11 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 乳熟期( $1.82 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 成熟期( $1.68 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。玉米生长阶段不同,土壤呼吸速率昼夜变化幅度也不同,拔节期的振幅最大,变异系数为 19.4%,乳熟期的振幅最小,变异系数为 11.9%。

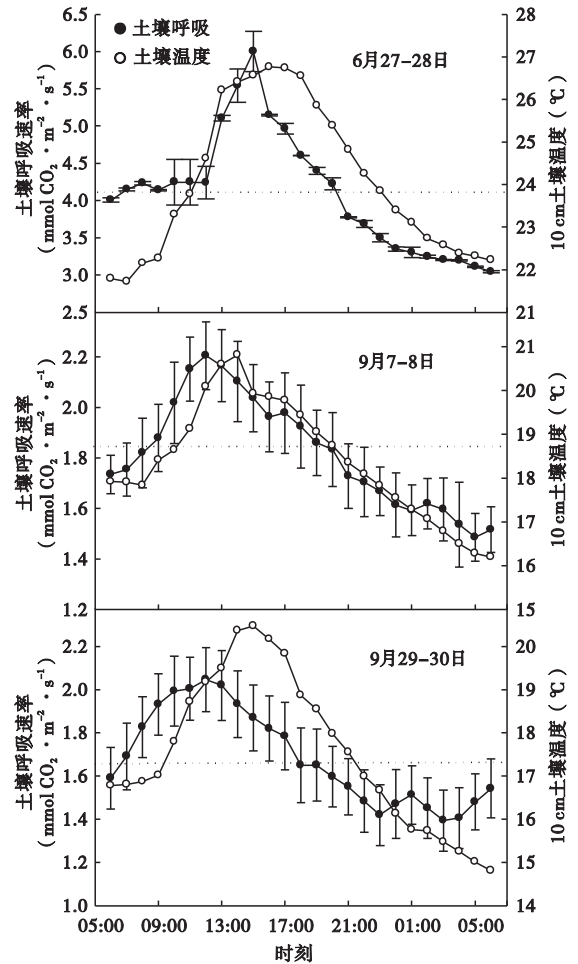


图 1 2004 年玉米农田土壤呼吸昼夜变化 ( $n=9$ )  
Fig. 1 Diurnal variation of soil respiration of a maize agroecosystem in 2004 ( $n=9$ )

表 1 2004 年玉米农田白天(6:00—18:00)与夜间(18:00—翌日 6:00)土壤呼吸速率的比较

Tab. 1 Comparison of soil respiration rates between daytime (6:00—18:00) and nighttime (18:00—6:00) in a maize agroecosystem in 2004 ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

日期	生长期	白天(6:00—18:00)	夜间(18:00—6:00)	均值	白天/夜间
6月27—28日	拔节期	4.66	3.50	4.11	1.33
9月7—8日	乳熟期	1.98	1.66	1.82	1.19
9月28—29日	成熟期	1.86	1.51	1.68	1.23

**2.1.2 土壤呼吸白天的动态变化** 图2为2005年玉米地土壤呼吸白天(6:00—18:00)的动态变化。土壤呼吸日变化动态与2004年一致,表现为单峰型曲线,且其变化趋势与10 cm深度土壤温度的变化趋势一致。白天土壤呼吸速率最小值出现在6:00左右,随着地温的上升,在13:00左右出现最大值。白天土壤呼吸的动态变化表现为不对称的单峰型曲线,峰值之前土壤呼吸速率的上升速度大于峰值之后土壤呼吸速率的下降速度。

玉米生长盛期的土壤呼吸速率明显高于中后期

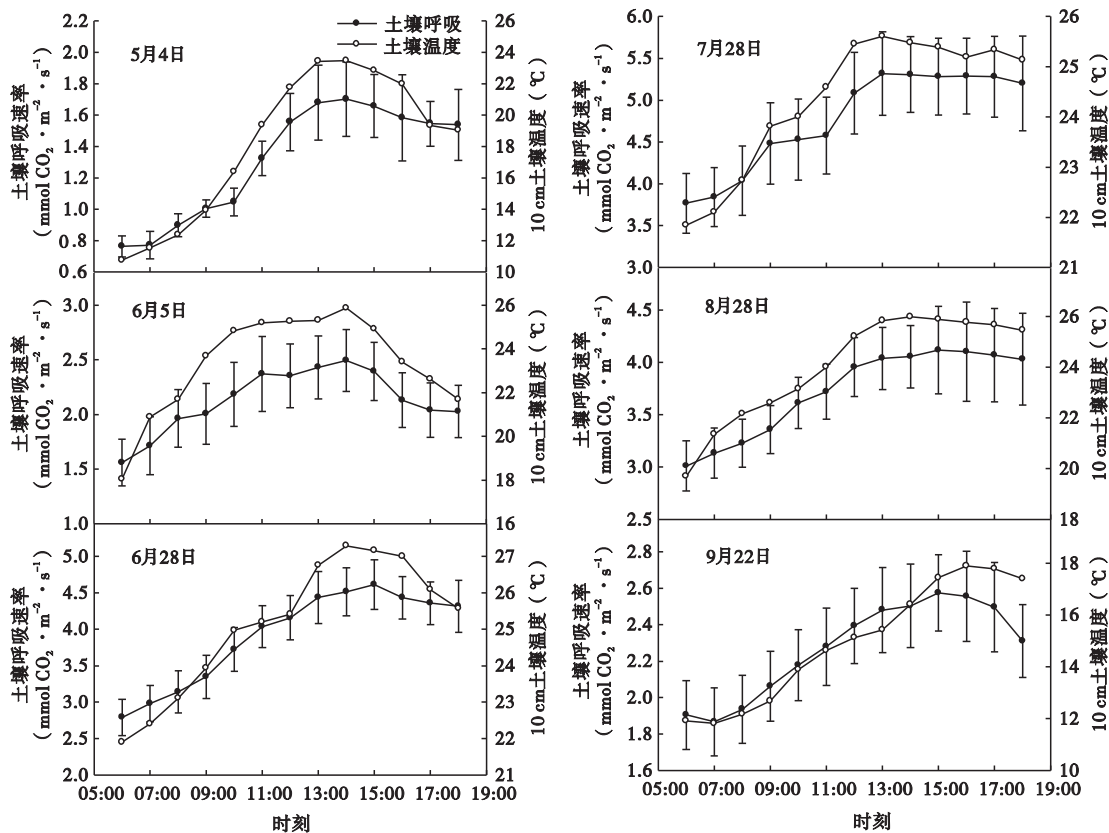


图2 2005年玉米农田土壤呼吸白天的动态变化 (n = 15)

Fig. 2 Dynamic variation of soil respiration during daytime in a maize agroecosystem in 2005 (n = 15)

表2 2005年玉米农田不同测定时期土壤呼吸动态变化规律  
Tab. 2 Dynamic variation of soil respiration of a maize agroecosystem in 2005

日期 (月-日)	玉米 生长期	土壤呼吸速率 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )			变异系数 (%)
		最大值	最小值	均值	
5-4	播种期	1.70	0.76	1.31	27.6
6-5	苗期	2.49	1.56	2.13	13.3
6-28	拔节期	4.51	2.79	3.91	16.4
7-28	开花期	5.30	3.77	4.77	12.5
8-28	乳熟期	4.05	3.01	3.72	11.0
9-22	成熟期	2.50	1.90	2.27	11.4

和前期,表现为开花期( $4.77 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 拔节期( $3.91 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 乳熟期( $3.72 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 成熟期( $2.27 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 苗期( $2.13 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) > 播种期( $1.31 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。玉米生长前期土壤呼吸速率白天的变化幅度明显大于后期,出苗时(5月4日)土壤呼吸速率的振幅最大,变异系数为27.6%,乳熟期(8月28日)和成熟期(9月22日)的振幅较小,变异系数分别为11.0%和11.4%(表2)。

**2.1.3 土壤呼吸日变化的影响因素** 2005年玉米地土壤呼吸日变化与10 cm深度土壤温度的变化趋势一致,表现为单峰型曲线。对土壤呼吸速率与10、20和30 cm深度的土壤温度分别进行单因子相关分析表明,土壤呼吸速率与土壤温度的相关关系显著,其中10 cm土壤温度与土壤呼吸速率的相关关系最为显著(表3)。因此,用10 cm土壤温度分析温度对土壤呼吸的影响。

回归分析表明,各测定时期土壤呼吸速率与10 cm土壤温度均呈显著的指数函数关系(式(2))。

表3 白天土壤呼吸速率与土壤温度的相关关系

Tab.3 Correlation coefficients of soil respiration rate during daytime to soil temperature

日期 (月-日)	10 cm 土壤温度	20 cm 土壤温度	30 cm 土壤温度
5-4	0.976 **	0.475	0.145
6-5	0.955 **	0.682 *	0.483
6-28	0.980 **	0.976 **	0.826 **
7-28	0.979 **	0.923 **	0.693 **
8-28	0.986 **	0.842 **	0.695 **
9-22	0.929 **	0.877 **	0.427

\*\*  $P < 0.01$  时极显著相关; \*  $P < 0.05$  时显著相关。

表4 白天土壤呼吸速率与10 cm土壤温度的指数函数方程和  $Q_{10}$ Tab.4 Exponential regression equations between soil respiration rate during daytime and soil temperature at 10 cm depth and  $Q_{10}$ 

日期(月-日)	回归方程	$r^2$	$F$	$p$	$Q_{10}$
5-4	$R = 0.48e^{0.054T}$	0.840	23.14	0.000	1.71
6-5	$R = 0.56e^{0.056T}$	0.893	59.10	0.000	1.75
6-28	$R = 0.48e^{0.084T}$	0.769	26.68	0.001	2.32
7-28	$R = 0.47e^{0.094T}$	0.969	339.76	0.000	2.56
8-28	$R = 0.83e^{0.062T}$	0.951	195.51	0.000	1.86
9-22	$R = 1.07e^{0.051T}$	0.737	28.08	0.000	1.67

在玉米整个生长季中,  $Q_{10}$  为 1.71 ~ 2.56, 玉米生长中期  $Q_{10}$  较大, 生长初期和末期  $Q_{10}$  较小, 玉米抽雄吐丝期(7月28日)的  $Q_{10}$  最大(表4)。

## 2.2 土壤呼吸季节动态及其影响因素

### 2.2.1 土壤呼吸季节动态

图3为2004年(a)和2005年(b)玉米生长季土壤呼吸的季节动态。2005年玉米生长季中, 土壤呼吸波动较大, 呈明显的单峰型, 土壤呼吸速率的波动趋势与土壤温度基本一致(图3b)。玉米播种时(5月4日)土壤呼吸速率最低, 为  $1.31 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这是由于这段时间玉米处于出苗期, 土壤呼吸主要来源于土壤微生物呼吸, 同时, 这段时间温度较低, 较低的地温抑制了土壤微生物的活性, 减小了土壤呼吸速率。随着地温升高和作物生长, 土壤呼吸速率波动上升, 直到7月28日达到最大值  $4.77 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这个时期为玉米的开花期, 植物生长旺盛, 植物根系呼吸作用强度增大; 同时, 7月为温度、降水均较高的月份, 良好的水热条件促进了微生物呼吸作用。在玉米生育后期, 随着气温降低和玉米生理活性降低, 土壤呼吸速率逐渐下降直到收获。玉米整个生长季土壤呼吸速率均值为  $3.16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图3a为2004年玉米生长后期的土壤呼吸速率季节动态。6月27日土壤呼吸速率值较高, 为  $4.11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 可能是3方面的原因造成: (1)玉

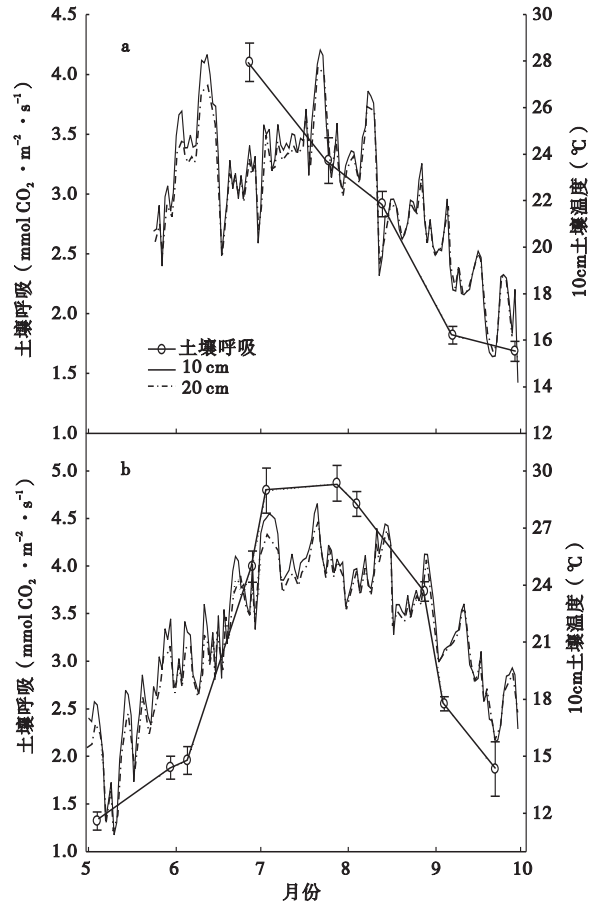


图3 2004年(a  $n=9$ )和2005年(b  $n=15$ )玉米生长季土壤呼吸的季节变化

Fig.3 Seasonal variations of soil respiration during the growth season of maize in 2004 (a  $n=9$ ) and 2005 (b  $n=15$ )

米正处于拔节期, 生长旺盛, 植物根系呼吸作用强度增大; (2) 10 cm 深度土壤温度为  $22^\circ\text{C} \sim 24^\circ\text{C}$ , 有利于微生物呼吸作用; (3) 6月18日进行了追肥, 土壤扰动刺激了土壤呼吸(戴万宏等, 2004; 孟磊等, 2005), 同时, 施肥为微生物提供了充足的碳源和氮源, 土壤微生物活动加强, 促进了有机物分解, 导致土壤呼吸速率增加(王重阳等, 2006)。玉米生育后期, 土壤呼吸速率逐渐下降, 收获时土壤呼吸速率为  $1.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。玉米生长后期, 土壤呼吸速率季节动态与土壤温度的波动趋势基本一致。

### 2.2.2 土壤呼吸季节变化的影响因素

玉米生长季环境因子(土壤温度、土壤湿度、土壤有机质和全氮)和生物因子(生物量和叶面积指数)与土壤呼吸速率的相关分析表明(表5): 与土壤呼吸速率相关的影响因素按影响程度从大到小依次为土壤温度、土壤湿度、LAI、根系生物量、总生物量、地上生物量、

表 5 玉米生长季中土壤呼吸速率与影响因子之间的相关关系

Tab.5 Correlation coefficients of soil respiration rate to affecting factors during the growth season of maize

土壤呼吸	水热因子		生物因子				土壤因子		
	土壤温度	土壤湿度	地上生物量	根系生物量	总生物量	叶面积指数	有机质	全氮	碳氮比
土壤呼吸	1								
土壤温度	0.804**	1							
土壤水分	0.738**	0.705**	1						
地上生物量	0.197	-0.004	0.558	1					
根系生物量	0.428	0.294	0.618	0.780**	1				
总生物量	0.234	0.038	0.582	0.996**	0.830**	1			
叶面积指数	0.592	0.393	0.707	0.673	0.938**	0.733	1		
有机质	0.102	-0.134	0.322	0.499	0.273	0.479	0.090	1	
全氮	-0.051	0.302	-0.301	-0.768	-0.423	-0.747	-0.055	-0.110	1
碳氮比	0.071	-0.303	0.401	0.885**	0.465	0.855*	0.108	0.599	-0.856* 1

\*\*  $P < 0.01$  时极显著相关; \*  $P < 0.05$  时显著相关。

表 6 玉米生长季中土壤呼吸速率与土壤温度和土壤湿度的拟合方程

Tab.6 Relationships between soil respiration and soil temperature and soil moisture during the growth season of maize

模型公式	参数				$r^2$	F	文献来源
	a	b	c	d			
$R = e^{(a+bT+cW+dTW)}$	0.526	-0.036	-0.057	0.004	0.873	55.01	季凌浩等 2000
$R = a + bT + cW + dTW$	4.656	-0.323	-0.180	0.016	0.795	50.99	王凤玉等 2003
$R = ae^{bT}W^c$	0.007	0.108	1.032		0.863	78.77	陈全胜等 2003
$R = ae^{bT}(cW + d)$	0.053	0.109	0.151	0.077	0.863	50.55	杨玉盛等 2005
$R = ae^{bT}e^{cW+dW^2}$	0.073	0.108	0.045	-0.0001	0.863	50.99	Tang & Baldocchi 2005

土壤有机质、碳氮比和土壤全氮,其中土壤温度和土壤水分与土壤呼吸速率的相关关系达到了极显著水平。根据相关系数显著性水平及其大小,可以把土壤呼吸的影响因素分为 3 类:土壤温度和土壤水分与土壤呼吸速率之间存在着显著的相关关系,是影响土壤呼吸的关键因素;LAI 和根系生物量与土壤呼吸速率呈正相关关系,相关系数分别为 0.59 和 0.43,说明生物因子对土壤呼吸也起着重要作用;土壤有机质、全氮和碳氮比等土壤理化特性与土壤呼吸速率的关系较弱。

2.2.3 土壤呼吸季节变化模拟 相关分析表明,土壤温度和土壤湿度是影响土壤呼吸的关键因子,与 Raich 和 Schlesinger (1992)、Maestre 和 Cortina (2003)、Wiseman 和 Seiler (2004)的研究结果一致。关于土壤呼吸与土壤温度和湿度的模型有多种表达形式(表 6),在此采用模型  $R = e^{(a+bT+cW+dTW)}$  描述,两者可以解释玉米生长季中土壤呼吸时间变异的 87%(表 6)。仅考虑温度或湿度时,土壤温度和土壤湿度分别解释了玉米生长季中土壤呼吸时间变异的 73% 和 46%。

### 3 讨论

#### 3.1 土壤温度对土壤呼吸日变化的控制作用

2004 年和 2005 年玉米生长季,土壤呼吸的日

动态为不对称单峰型曲线。这与森林(Xu & Qi, 2001)、草原(Cao *et al.*, 2004;贾丙瑞等,2005)、农田(韩广轩等,2006)和湿地生态系统(李兆富等,2003)的土壤呼吸日变化格局一致。玉米地土壤呼吸速率最大值出现在 13:00—15:00,最小值出现在 6:00 左右。王旭等(2006)研究发现,长白山地区玉米农田土壤呼吸速率最大值出现在 12:00 左右,最小值出现在 5:00 左右。华北平原夏玉米生长盛期土壤呼吸的日变化呈明显的单峰型,且峰值一般出现在 12:00—16:00,谷值出现在 0:00 左右(贾金生等,2003)。黄淮海平原地区玉米生长季土壤呼吸日变化呈现单峰曲线,由 9:00 开始土壤呼吸强度逐渐增强,在 13:00 时左右达到最大值,以后逐渐下降(王立刚等,2006)。

土壤呼吸日变化趋势与温度的变化趋势一致(贾金生等,2003;韩广轩等,2006;王立刚等,2006),而其他重要的环境变量如土壤湿度、生物量和土壤性状等在一天内的变化相对较小,对土壤呼吸的影响不明显。通常土壤呼吸速率与土壤温度之间呈显著的正相关关系(Fang & Moncrieff, 2001; Reth *et al.*, 2004)。微生物呼吸作用和根系呼吸作用都对土壤温度的变化很敏感(Rey *et al.*, 2002)。在一定范围内环境温度升高可增强微生物活性,加速土壤中有机质的分解,从而增加土壤中 CO<sub>2</sub> 浓



度;另一方面,土壤温度直接影响植物生长和生理活动,从而影响根系呼吸;同时,土壤温度影响土壤中CO<sub>2</sub>向大气的输送过程,土壤温度升高,CO<sub>2</sub>向大气的排放增强(Tang *et al.*, 2003)。

玉米生长期不同,土壤呼吸速率昼夜变化幅度也不同,振幅大小受地温波动的影响,同时受植物生长的影响。一天内地温的波动越大,土壤呼吸变化的振幅就越大。例如2004年6月27—28日10 cm深度土壤温度在21.7℃~26.8℃波动,昼夜温差为5.1℃;9月7—8日10 cm深度土壤温度在17.9℃~20.8℃波动,昼夜温差为2.9℃。因而,6月27日土壤呼吸的日变化振幅(19.4%)明显大于9月7日(11.9%)。另外,作物生长也会影响土壤呼吸速率的昼夜变化幅度。杨兰芳和蔡祖聪(2005)研究发现,种植大豆的土壤中,大豆不同生长阶段土壤呼吸速率的昼夜变化幅度都很大,而裸土土壤呼吸速率昼夜变化幅度较小。作物的参与明显增大了土壤呼吸速率的昼夜变化幅度。

### 3.2 土壤呼吸季节变化的影响因素

玉米生长季中,土壤温度和土壤湿度是影响玉米生态系统土壤呼吸季节变化的关键因子,土壤呼吸与土壤温度和水分的关系可以用模型 $R = e^{(a+bT+cW+dTW)}$ 表示,二者可以解释玉米生长季中土壤呼吸时间变异的87%。在一定范围内,环境温度升高可加速CO<sub>2</sub>向大气的排放(Reth *et al.*, 2004; Melling *et al.*, 2005; 刘惠等, 2007)。另外,在一定条件下土壤呼吸速率还受土壤湿度的限制(Buchmann, 2000)。土壤湿度过低时会限制微生物呼吸和根系呼吸,而土壤水分过高时会阻塞土壤空隙,减少土壤中的O<sub>2</sub>浓度,限制CO<sub>2</sub>的释放(Pangle & Seiler, 2002; Gough & Seiler, 2004)。

LAI和根系生物量与土壤呼吸速率呈正相关关系,说明玉米地土壤呼吸的季节动态与作物生长有着密切联系。2005年玉米各个生育期中,土壤呼吸速率开花期>拔节期>乳熟期>成熟期>苗期>播种期。刘巧辉等(2005)研究发现,大豆和玉米根区土壤呼吸速率随根系的生长有明显的季节变化。韩广轩等(2006)研究发现水稻地下生物量和土壤温度的交互作用影响着土壤呼吸的季节变化。水稻生育前期,土壤呼吸主要受水稻生长的影响,而在水稻生育中后期,温度是制约稻田土壤呼吸的关键因素。草地群落一般具有明显的季相变化,季相不同,对应的群落生物量、碳素和分配同化能力、根系的数量和

活性以及根际微生物区系和活性也存在显著差异(Li *et al.*, 1987),从而引起根系和土壤微生物呼吸速率也不相同,因此草地群落的季相变化加剧了土壤呼吸速率的季节变化。

2004年6月27日,玉米地土壤呼吸速率值较高,可能是由于6月18日玉米追加氮肥引起的。追肥引起的土壤扰动刺激土壤呼吸,同时氮肥施用可能会增大土壤呼吸速率(张庆忠等, 2005; 王立刚等, 2006)。杨兰芳和蔡祖聪(2005)指出氮肥促进土壤呼吸的可能原因有:1)施氮能增强植物光合作用,从而提供给根系和土壤的光合产物增加;2)施氮促使根系生长,使根系呼吸增加;3)施氮还可以提供给微生物有效氮,导致微生物呼吸增加。但也有研究认为,氮肥对土壤呼吸量的大小影响不显著(孟凡乔等, 2006),甚至会抑制土壤呼吸(陈述悦等, 2004)。

### 参考文献

- 陈述悦,李俊,陆佩玲,等. 2004. 华北平原麦田土壤呼吸特征. 应用生态学报, 15(9):1552-1560.
- 戴万宏,王益权,黄耀,等. 2004. 农田生态系统土壤CO<sub>2</sub>释放研究. 西北农林科技大学(自然科学版), 32(12):1-7.
- 韩广轩,朱波,江长胜. 2006. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. 植物生态学报, 30(3):450-456.
- 贾丙瑞,周广胜,王凤玉,等. 2005. 放牧与围栏羊草草原土壤呼吸作用及其影响因子. 环境科学, 26(6):1-7.
- 贾金生,李俊,张永强. 2003. 夏玉米生长盛期农田土壤CO<sub>2</sub>排放的研究. 中国生态农业学报, 11(3):1-4.
- 李凌浩,王其兵,白永飞,等. 2000. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究. 植物生态学报, 24(6):680-686.
- 刘惠,赵平,林永标,等. 2007. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸. 生态学杂志, 26(12):2021-2027.
- 刘巧辉,黄耀,郑循华. 2005. 基于BaPS系统的旱地土壤呼吸作用及其分量确定探讨. 环境科学学报, 25(8):1105-1111.
- 孟磊,丁维新,蔡祖聪,等. 2005. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响. 地球科学进展, 20(6):687-692.
- 孟凡乔,关桂红,张庆忠,等. 2006. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律. 环境科学学报, 26(6):992-999.
- 王旭,周广胜,蒋延玲,等. 2006. 长白山红松阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 30(6):887-893.
- 王凤玉,周广胜,贾丙瑞,等. 2003. 水热因子对退化草原羊草恢复演替群落土壤呼吸的影响. 植物生态学报, 27

- (5):644-649.
- 王立刚,邱建军,李维炯. 2006. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究. 土壤肥料, (6):13-17.
- 王重阳,王绍斌,顾江新,等. 2006. 下辽河平原玉米田土壤呼吸初步研究. 农业环境科学学报, 25(5):1240-1244.
- 杨兰芳,蔡祖聪. 2005. 玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响. 土壤学报, 42(1):9-15.
- 张庆忠,吴文良,王明新,等. 2005. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, 25(11):2883-2887.
- Buchmann N. 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 32:1625-1635.
- Cao GM, Tang YH, Mo WH, et al. 2004. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibetan plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 36:237-243.
- Fang C, Moncrieff JB. 2001. The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33:155-165.
- Gough M, Seiler JR. 2004. The influence of environmental, soil carbon, root, and stand characteristics on soil CO<sub>2</sub> efflux in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management*, 191:353-363.
- Grace J, Rayment M. 2000. Respiration in the balance. *Nature*, 404:819-820.
- Granier A, Ceschia E, Damesin C, et al. 2000. The carbon balance of a young beech forest. *Functional Ecology*, 14:312-325.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001. Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press:183-237.
- Janssens IA, Pilegaard K. 2003. Large seasonal changes in  $Q_{10}$  of soil respiration in a beech forest. *Global Change Biology*, 9:911-918.
- Lee MS, Nakane K, Nakatsubo T, et al. 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest. *Plant and Soil*, 255:311-318.
- Li G, Jiang R, Fu Y. 1987. Phytomass and the seasonal dynamics of an alpine meadow in Tianzhu// Proceedings of the International Symposium on Grassland Vegetation. Vol 2. Beijing: Science Press:407-412
- Maestre FT, Cortina J. 2003. Small-scale spatial variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 23:199-209.
- Melling L, Hatano R, Goh KJ. 2005. Soil CO<sub>2</sub> flux from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. *Tellus B*, 57:1-11.
- Musselman RC, Fox DG. 1991. A review of the role of temperate forest in the global CO<sub>2</sub> balance. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 41:798-807.
- Pangle RE, Seiler J. 2002. Influence of seedling roots, environmental factors and soil characteristics on soil CO<sub>2</sub> efflux rates in a 2-year-old loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation in the Virginia Piedmont. *Environmental Pollution*, 116:85-96.
- Raich JW, Schlesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44:81-99.
- Raich JW, Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry*, 48:71-90.
- Reth S, Gökcede M, Falge E. 2004. CO<sub>2</sub> efflux from agricultural soils in Eastern Germany: Comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 85:175-186.
- Rey A, Pegoraro E, Tedeschi V, et al. 2002. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy. *Global Change Biology*, 8:851-866.
- Sánchez ML, Ozores MI, López MJ, et al. 2003. Soil CO<sub>2</sub> fluxes beneath barley on the central Spanish plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118:85-95.
- Schimel DS. 1995. Terrestrial ecosystem and carbon-cycle. *Global Change Biology*, 1:77-99.
- Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 48:7-20.
- Tang JW, Baldocchi DD. 2005. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components. *Biogeochemistry*, 73:183-207.
- Tang JW, Dennis DB, Qi Y, et al. 2003. Assessing soil CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118:207-220.
- Wiseman PE, Seiler JR. 2004. Soil CO<sub>2</sub> efflux across four age classes of plantation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) on the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, 192:297-311.
- Xu M, Qi Y. 2001. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7:667-677.

---

作者简介 韩广轩,男,1978年生,博士,副研究员。主要从事陆地生态系统碳循环与碳收支及植物生态学研究,发表论文14篇,其中SCI论文4篇。E-mail: gxhan@yic.ac.cn  
责任编辑 李凤芹

---