

张掖灌区玉米农田生态系统 CO₂ 通量的变化规律和环境响应*

张 蕾^{1,2,3} 孙 睿^{1,2,3**} 乔 晨² 刘绍民^{1,2} 徐自为^{1,2} 唐 饶² 郝虑远² 张荣华²

(¹ 遥感科学国家重点实验室(北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所), 北京 100875; ² 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875; ³ 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘 要 采用涡动相关法对张掖灌区玉米农田生态系统生长季(6—9月) CO₂ 通量进行了连续观测, 分析了玉米农田生态系统 CO₂ 通量变化特征及其对环境的响应。结果表明: CO₂ 通量具有明显的日变化特征, 白天以碳吸收为主, 夜间以碳排放为主, CO₂ 吸收的最大值出现在灌浆期, 峰值为 $-1.426 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 农田生态系统在 4 个生育期均表现为碳吸收, 但吸收 CO₂ 能力存在显著差异, 日吸收总量灌浆期 > 拔节期 > 成熟期 > 苗期。利用 Michaelis-Menten 方程和指数曲线拟合方法, 分别分析了光合有效辐射对白天 CO₂ 通量的影响, 及温度对夜间生态系统呼吸的影响。结果表明: 白天 CO₂ 吸收强度随着光合有效辐射的增大而增大, 在低光阶段, 光照是控制光合作用的主导因子, 之后随着光合有效辐射的增大, 净吸收量增加减缓; 玉米的光量子利用效率变化范围为 $0.00098 \sim 0.0022 \text{ mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 。夜间生态系统呼吸与温度呈显著的指数关系, 不同生育期的主导因子不同, 苗期土壤温度是主导因子, 其余生育期气温是主导因子。

关键词 CO₂ 通量; 温度; 光合有效辐射; 玉米生态系统

中图分类号 Q948 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2014)7-1722-07

Variation of CO₂ flux and its response to environmental factors in a maize agroecosystem in Zhangye irrigation area. ZHANG Lei^{1,2,3}, SUN Rui^{1,2,3**}, QIAO Chen², LIU Shao-min^{1,2}, XU Zi-wei^{1,2}, TANG Yao², HAO Lü-yuan², ZHANG Rong-hua² (¹ State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100875, China; ² School of Geography and Remote Sensing Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; ³ Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(7): 1722–1728.

Abstract: CO₂ flux was measured continuously in a maize agroecosystem in Zhangye irrigation area during the growing season (June to September) using the eddy covariance technique to study the variation of CO₂ flux and its response to key environmental factors. The results showed that there was a distinct diurnal variation of CO₂ flux, with CO₂ absorption in the daytime and emission at night. The maximum CO₂ absorption occurred at filling stage and with a maximum value of $-1.426 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Maize agroecosystem is characterized by carbon absorption during the growing season, and the ability to absorb CO₂ is significantly different at different growth stages, which was ordered as filling stage > jointing stage > maturity stage > seedling stage. We also used the Michaelis-Menten equation and exponential curve fitting method to analyze the impact of photosynthetically active radiation (PAR) on daytime CO₂ flux, and the impact of temperature on the ecosystem respiration at night. The results showed that CO₂ absorbing intensity increased with PAR. PAR was the dominant factor to control photosynthesis under low solar radiation, and the carbon assimilation rate increased slowly under high solar radiation. The light quantum efficiency

* 国家自然科学基金重点项目(91125002)、国家科技支撑计划项目(2013BAC03B02)和国家高技术研究发展计划项目(2012AA12A304)资助。

** 通讯作者 E-mail: sunrui@bnu.edu.cn

收稿日期: 2013-11-18 接受日期: 2014-03-16

of maize ranged between 0.00098 and 0.0022 mg · μmol⁻¹ during the observing period. The nighttime ecosystem respiration exponentially increased with temperature, and the dominant factor varied with growth stage. Soil temperature was the dominant factor of nighttime ecosystem respiration at the seedling stage, while air temperature was the dominant factor at the other growth stages.

Key words: CO₂ flux; temperature; PAR; maize agroecosystem.

近年来,大气中 CO₂、CH₄ 等温室气体浓度的增加导致全球气温明显上升,引发一系列严重的全球环境问题(Canadell *et al.*, 2007; Le *et al.*, 2009),严重威胁着人类社会的生存和可持续发展(IPCC, 2007)。气候变化与全球碳循环的关系密切,而陆地生态系统碳循环和驱动机制的研究是全球碳循环研究的关键环节(Schimel *et al.*, 2001; 李克让, 2002; Baldocchi, 2003)。作为陆地生态系统的重要组成部分,农田生态系统受人类因素控制和干扰强烈,农业活动已经成为全球变暖不容忽视的活动之一,因此,农田生态系统碳循环的研究得到了发展和重视(Berbigier *et al.*, 2001; 李晶等, 2003; Hutchinson *et al.*, 2007)。对农田生态系统碳通量的研究表明,生态系统的光合和呼吸过程非常复杂,受到多种生物和非生物因子的影响。其中,光合有效辐射、温度、水分、土壤湿度和叶面积指数是最重要的影响因子,而这些因子间的交互作用会对生态系统碳循环的生理生态过程产生影响(Carrara *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004; Lei & Yang, 2010; 孙春健等, 2012)。

张掖灌区是中国西北地区典型的灌溉绿洲农业区,同时也是气候变化敏感区。其周围分布着荒漠、湿地、戈壁和沙漠,土地沙漠化与荒漠化等生态环境问题越来越严重,严重制约着农业经济和农业的持续发展。深入开展农田碳循环特征的研究对于未来气候变化条件下的作物研究十分必要。因此,本文基于 2012 年生长季张掖绿洲农田生态系统野外观测的涡动相关系统观测资料,分析玉米生育期的碳通量变化特征及其对环境因子的响应,为进一步定量研究区域碳循环及气候变化对农业生产的影响提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 试验地概况

张掖市位于甘肃省西北部,地处河西走廊中部,黑河贯穿全境,形成了特有的荒漠绿洲景象。天气主要受中高纬度地区西风带环流控制和极地冷气团

影响,属于典型的大陆性草原荒漠气候。该区域干燥少雨,冬季寒冷时长,夏季温暖时短,多大风、风沙天气,年平均气温 6℃,7 月气温最高,1 月气温最低,年平均降雨量 114.9 mm,70% 在 6—9 月,全年无霜期 169 d。观测站位于甘肃省张掖市西北部的大满灌区农田内(100.37225°E, 38.85557°N),隶属于“黑河流域生态-水文过程综合遥感观测试验:水文气象要素与多尺度蒸散发观测试验”(Heihe Watershed Allied Telemetry Experiment Research: the Multi-Scale Observation Experiment on Evapotranspiration over Heterogeneous Land Surfaces, HiWATER-MUSOEXE)(Liu *et al.*, 2011; 李新等, 2012; Li *et al.*, 2013)超级站。站点所在地玉米占地 200 hm²,观测塔安装在玉米地中央,试验场周围平坦开阔,满足涡动相关系统对水、碳和能量的测量要求。该区域种植的玉米均为制种玉米,品种是郑单 985,玉米种植的垄距为 50.8 cm,行距为 43.3 cm,株距为 22 cm,生长季每月进行一次灌溉,灌溉前施肥,每公顷施氮肥和磷肥约 450 kg。风向以北风、西风为主。

1.2 数据观测

在玉米生长季(2012 年 6 月 10 日—9 月 15 日)采用涡动相关系统对农田生态系统碳通量进行连续测量。通量观测塔高 40 m,装有 2 层开路涡动相关(OPEC)通量观测系统,观测探头高度分别为 34 和 4.5 m。涡动相关系统主要由三维超声风温仪(CSAT3, Campbell Scientific, USA)和开路 CO₂/H₂O 红外气体分析仪(Li-7500A, Li-Cor Inc., USA)组成,原始数据采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出一组平均通量以及 10 Hz 原始数据。超声朝向是正北方向,超声风速仪与 CO₂/H₂O 红外气体分析仪之间的距离是 17 cm。在通量塔上配有风、温、湿梯度观测以及四分量辐射、光合有效辐射、红外温度等传感器,光合有效辐射和辐射架高 12 m,塔体西侧有雨量计观测,塔下不同深度的土壤温度和湿度等相关参数也进行了测定。本实验用的土壤温湿度数据均为埋深 4 cm 处,通量数据和空气温湿度数据采用 4.5 m 高度处的观测数据。

1.3 数据处理

采用 Edire 软件 (<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe>) 对涡动相关仪原始 10 Hz 数据进行重新计算,其处理的主要步骤包括:野点值剔除,延迟时间校正,坐标旋转(二次坐标旋转),频率响应修正,超声虚温修正和密度(WPL)修正等(徐自为等 2008)。同时,对各通量进行质量控制,主要是大气平稳性和湍流相似性特征的检验。由于大气稳定度、天气原因以及仪器的物理限制等影响,Edire 软件输出的 30 min 通量值仍然存在一些野点,需要进一步对通量数据进行质量控制,剔除符合如下任意一条的数据:(1)降雨前后一小时的数据;(2)夜间 CO₂ 通量为负的值;(3)超出仪器测量量程或者合理范围的数据。根据 Zhu 等(2006)对禹城站 2003 年农田夜间通量数据处理时所采用的经验阈值以及 ChinaFLUX 推荐的筛选标准,我们将 $-1.80 \sim 0.60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为玉米农田 CO₂ 通量有效的范围;(4)夜间摩擦风速(u_*)低于临界值的数据。利用平均值检验法可确定一个临界摩擦风速 u_{*c} (Zhu *et al.* 2006),本文的摩擦风速阈值为 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;(5)异常突出的数据(某一点与连续 5 个点平均值之差的绝对值大于 5 个点方差的 2.5 倍)。

观测期间数据的缺失量占 6%,剔除的不合理数据占 34%,因此,总有效数据占 60%。将观测期间的玉米按照生长状况分为 4 个不同的生育期:苗期(6 月 10 日—6 月 19 日)、拔节期(6 月 20 日—7 月 20 日)、灌浆期(7 月 21 日—8 月 5 日)和成熟期(8 月 6 日—9 月 15 日),由于观测时玉米已经长到七叶期,故本研究的苗期从七叶期开始算起。4 个生育期的有效数据分别占该生育期总数据的 68%、54%、51% 和 62%。为了减小数据插补时可能带来的较大误差,在不同的生育期建立不同的模型分别进行插补。

夜间数据的缺失值利用夜间生态系统呼吸与夜间温度的关系建立插补模型进行插补,夜间生态系统呼吸与温度的关系式为:

$$R_{\text{eco}} = ae^{bT} \quad (1)$$

式中 a 、 b 为拟合系数, R_{eco} 为夜间生态系统的呼吸 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T 为空气温度或者土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

白天 CO₂ 通量数据的缺失值采用查找表法进行插补,查找表由 CO₂ 通量与光合有效辐射、气温组成。

直角双曲线 (Michaelis-Menten) 方程 (Hollinger *et al.*, 1994) 用于白天净生态系统碳交换量 (net ecosystem exchange, NEE) 随光合有效辐射响应过程的模拟,可以表示为:

$$NEE = R_{\text{eco}} - \frac{P_{\text{max}} PAR}{K_m + PAR} \quad (2)$$

式中 NEE 为白天净生态系统交换量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), R_{eco} 为生态系统的暗呼吸速率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), PAR 为光合有效辐射 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); P_{max} 为光饱和时的光合速率,也称为最大光合速率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), K_m 为与生态系统光合作用有关的系数 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

由以上参数可以计算表观初始光能利用率 α ($\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$):

$$\alpha = \frac{P_{\text{max}}}{K_m} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 不同生育期碳通量的动态及日变化

2012 年观测期内玉米不同生育期 CO₂ 通量日变化见图 1。不同生育期 CO₂ 通量日变化规律较为一致,均呈“U”型分布,早上 8:00 以前和傍晚 20:00 之后通量值均为正,白天通量值为负,这说明该生态系统夜间由于土壤和植被的呼吸,整个生态系统表现为碳排放,日出后光合作用增强,生态系统由 CO₂ 释放转变为 CO₂ 吸收。

4 个生育期 CO₂ 通量的日变化均存在吸收单峰现象,且变化幅度存在显著差异。苗期,日出后到中午 12:00 碳吸收值逐渐增大,12:00 左右达到一天中的吸收峰,峰值为 $-0.516 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,12:00 后碳吸收量逐渐减小。相对于其他生育期,苗期由于玉米植株较小,发育不完全,植被的光合作用和呼吸

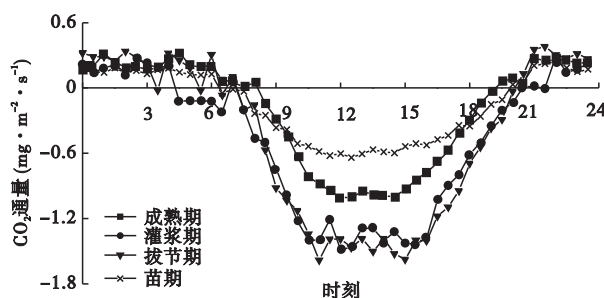


图1 不同生育期碳通量平均日变化规律

Fig. 1 Average diurnal variation of carbon flux in different growth stages

作用相对较弱,碳吸收量较低。到拔节期,玉米的生长加快,植被的光合作用增强,这一时期的空气温度比苗期有所升高,生态系统的呼吸作用也随之增强,此期间 CO₂ 通量迅速增加,生态系统的净 CO₂ 交换量远远高于苗期并维持在较高的水平,吸收高峰在 11:00 左右,峰值为 $-1.301 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。灌浆期是玉米植株生长旺盛时期,随着玉米的生长植株发育趋于成熟,植被光合能力达到鼎盛,这一时期空气温度也达到整个生长季的最高值,生态系统的呼吸作用也随之增强,所以此期间 CO₂ 的吸收量为整个生长季的最高值,灌浆期日间碳吸收峰在 12:00 左右,峰值为 $-1.426 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着玉米的进一步生长,植株发育进入成熟期并逐渐衰老,植株的光合作用逐渐减弱,CO₂ 的吸收量也逐渐变小,12:00 左右达到吸收的最大值,最大值为 $-1.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,这个时期 CO₂ 的吸收能力比拔节期和灌浆期要小。张掖灌区玉米的最大吸收峰值在灌浆期,这与郭建侠等(2007)和李祎君(2008)的研究结果一致,本研究 CO₂ 吸收峰值为 $-1.426 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,与华北平原夏玉米的吸收峰相近($-1.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)(李俊等 2006),低于姚玉刚(2007)对山东禹城夏玉米研究得到的 CO₂ 吸收值($-2.36 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

2.2 碳通量的季节动态

图 2 揭示了生态系统日 CO₂ 通量的季节变化规律。生态系统的 CO₂ 通量除了少数几天外,均表现为负值,即观测期间吸收的 CO₂ 量都大于释放的 CO₂ 量。8 月 6 日和 10 日这 2 天通量出现正值,是因为这 2 天有强降雨。9 月 13 日之后通量值为正值,是由于植被枯黄衰老而失去了固定 CO₂ 的能力。玉米生态系统日 CO₂ 总量呈明显的季节变化,日累积量逐日增大,观测期间生态系统只有一个明显的碳吸收峰,到 7 月达到最大值,最大日 CO₂ 通量为

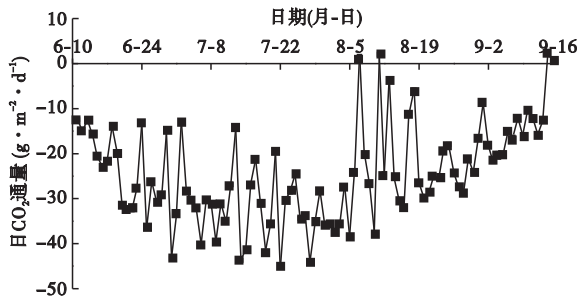


图 2 观测期间日 CO₂ 通量变化规律
Fig. 2 Variation of CO₂ flux during the observation period

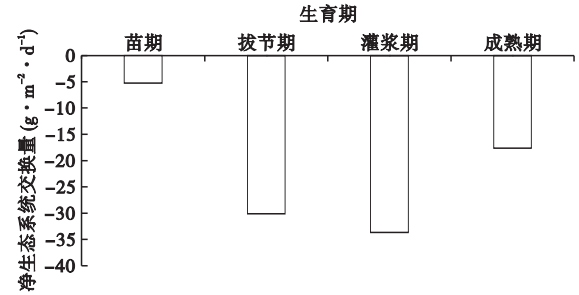


图 3 农田生态系统不同生育期的日净交换量
Fig. 3 Daily net ecosystem exchange during the different growth stages in maize agroecosystem

$-45.180 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,之后逐渐减少。玉米不同生育期的平均日 CO₂ 净交换量如图 3 所示。

玉米在 4 个生育期日净碳交换量均为负值,即吸收大气中的 CO₂。但在不同的生育期,玉米吸收 CO₂ 的能力存在显著差异,苗期的日平均交换量为 $-5.276 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,拔节期的日平均交换量为 $-30.116 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,灌浆期的日平均值交换量为 $-33.657 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,成熟期日平均交换量为 $-17.612 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,可见日吸收量灌浆期 > 拔节期 > 成熟期 > 苗期。净生态系统碳交换量受叶片同化作用控制,随着植被进入生长旺盛阶段而增加,之后随植被进入缓慢生长阶段而减小。苗期植被吸收 CO₂ 的能力最弱,随着玉米的生长,到拔节期生态系统吸收 CO₂ 的能力随之提高。随着玉米开花-吐丝(灌浆期),植被吸收 CO₂ 的能力达到整个生长季的最大值,成熟期之后随着作物的逐渐衰老,碳吸收呈下降趋势。

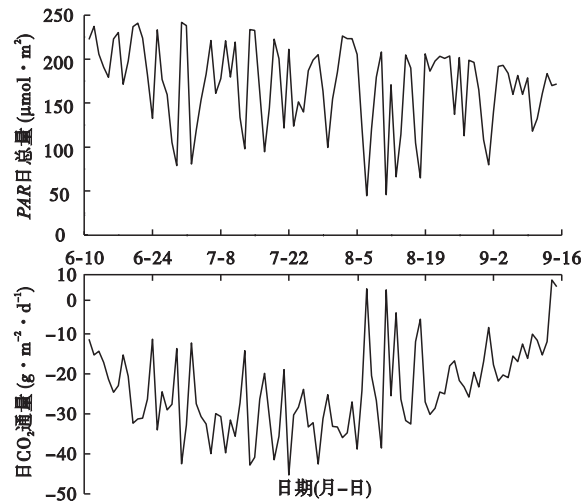


图 4 日 CO₂ 通量与日总光合有效辐射的关系
Fig. 4 Relationship between total CO₂ flux and total daily photosynthetically active radiation

2.3 CO₂通量的环境影响因子

2.3.1 光合有效辐射对碳通量的影响 作为影响农田生态系统碳通量的重要因子之一, *PAR* 与农田生态系统碳通量间存在显著相关关系(李俊等, 2006; 赵育民等, 2007; Lei & Yang, 2010)。由图4可知, 日 CO₂ 通量随 *PAR* 日总量的变化而变化。*PAR* 日总量越大, 日 CO₂ 通量越小, 即植被吸收的碳越多; *PAR* 日总量越小, 日 CO₂ 通量越大, 即植被吸收的碳越少。

为了进一步分析 *PAR* 与碳吸收量的关系, 将植被分为不同的生育期进行分析。利用各生育期的有效数据, 依据直角双曲线方程(式2)进行拟合, 拟合的结果如图5所示, 各生育期 *NEE* 与 *PAR* 呈显著的负相关, 即各生育期 CO₂ 净吸收量随着 *PAR* 的增大而增大。朱咏莉等(2008)对水稻的研究也发现, 不同生育期 CO₂ 通量(绝对值)与光强呈显著正相关。林同保等(2008)对河南冬小麦的研究也得出相同的结果, 不同生育期 *NEE* 与光合有效辐射均呈极显著负相关, 但不同生育期的相关程度不同。研究发现, 玉米农田生态系统在低光阶段 (*PAR* < 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), CO₂ 净吸收量呈线性增加, 可见在这个阶段光照是控制光合作用的主导因子, 随后随着 *PAR* 的增大, 增加速率逐渐降低, 到光合有效辐射观测的最大值 2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 净吸收量仍在缓慢增加,

可见玉米的光饱和点要大于 2000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其他的研究发现, 水稻群体光合作用的饱和点为 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (朱咏莉等, 2008), 小麦的光饱和点为 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (陆佩玲等, 2000), 这是因为玉米是 C₄ 作物, 其光饱和点要高于 C₃ 作物(蒋高明, 2005)。

玉米不同生育期 CO₂ 通量对 *PAR* 响应曲线的拟合参数存在较大的差异(表1)。光饱和时的净生态系统交换 (*P*_{max}) 随玉米生育进程逐渐增加, 最高为 3.153 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (成熟期)。光量子效率 (α) 由式3 计算获得, 是反映植物光能利用、CO₂ 吸收和光合物质生产效率的基本参数。该参数在不同植被类型间差异较大, 旱地作物(小麦、大豆)的光量子利用效率一般为 0.00088 ~ 0.0022 $\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ (Rochette *et al.*, 1995), 朱咏莉等(2008)对水稻研究发现早稻生长季的光量子利用效率的变化范围为 0.00077 ~ 0.0024 $\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 。本研究发现, 玉米的光量子利用效率变化范围为 0.00098 ~ 0.0022 $\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 与 Ruimy 等(1995)对 C₄ 作物的模拟结果一致(0.0013 ~ 0.0026 $\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$)。相比而言, C₄ 植被的光量子利用效率等于或高于 C₃ 植物, 这是由于 C₃ 植物存在光呼吸的缘故(蒋高明, 2005)。

2.3.2 夜间生态系统呼吸对温度变化的响应 目前国际上常用的呼吸模型有 Van't Hoff 方程、

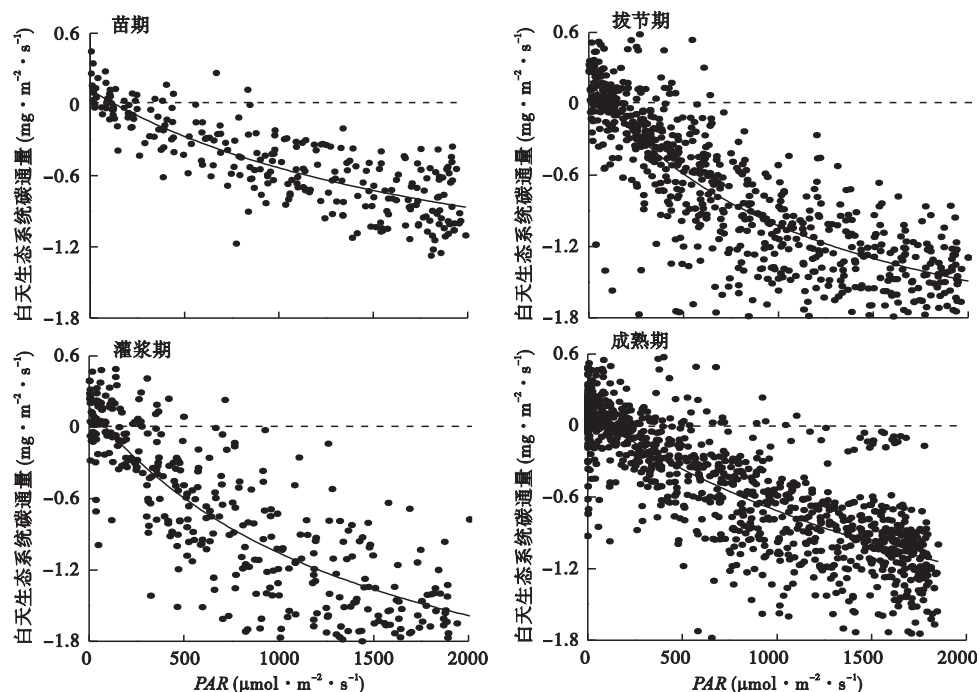


图5 不同生育期 CO₂ 通量对光合有效辐射的响应

Fig. 5 Light response curves of CO₂ flux in different stages during maize growing season

表 1 不同生育期白天 CO₂ 通量对光合有效辐射的响应曲线拟合参数

Table 1 Light response parameters of CO₂ flux in different growing stages

生育期	P_{\max}	K_m	R_{eco}	α	R^2	n
苗期	2.013	2055	0.124	0.00098	0.680	279
拔节期	2.725	1220	0.202	0.0022	0.708	716
灌浆期	3.075	1509	0.168	0.0020	0.696	355
成熟期	3.153	2822	0.110	0.0011	0.671	1073

P_{\max} 和 R_{eco} 的单位是 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, K_m 的单位是 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, α 的单位是 $\text{mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 。

Arrhenius 方程、Lloyd – Taylor 方程和简单的指数方程 (Fang & Moncrieff 2001)。虽然表达式有一定的差别,但是没有本质的区别,通常认为生态系统呼吸与温度之间呈指数关系 (Lloyd & Taylor, 1994)。本文采用简单的指数方程 (式 1) 来描述生态系统呼吸 (R_{eco}) 对温度的响应特征,为了消除植被大小差异对通量的影响,对植被 4 个生育期分别进行拟合。

不同生育期拟合的温度因子与 R_{eco} 的关系如表 2,气温和土温均与 R_{eco} 呈显著的指数相关。苗期,玉米生态系统呼吸通量与土壤温度拟合的解释方差高于 0.30,拟合的效果比与气温 ($R^2 = 0.177$) 拟合的好, Q_{10} 也显示呼吸对土壤温度的敏感性要高于气温。相比于夜间呼吸通量与土壤温度的拟合精度,拔节期、灌浆期、成熟期的呼吸通量与气温的拟合精度要高,而 Q_{10} 显示拔节期呼吸对气温的敏感性要高于土壤温度,灌浆期和成熟期呼吸对土壤温度的敏感性更高。从拟合方程的决定系数来看,空气温度能够解释观测期间玉米生态系统呼吸通量变异的 12% ~ 51%,土壤温度能够解释观测期间玉米生态系统呼吸通量变异的 1% ~ 31%。

生态系统呼吸是土壤微生物和植被各器官呼吸的总和。大量研究得出,温度是影响生态系统呼吸特征的重要环境因素 (李祎君 2008; Lei & Yang,

表 2 不同生育期夜间呼吸与温度拟合关系

Table 2 Relationship of nighttime respiration and temperature in different growing stages

生育期	温度因子	Q_{10}	R^2
苗期	土温	2.05	0.312
	气温	1.68	0.177
拔节期	土温	1.13	0.014
	气温	1.48	0.126
灌浆期	土温	4.78	0.487
	气温	1.75	0.512
成熟期	土温	2.07	0.251
	气温	1.50	0.293

Q_{10} 为温度系数。

2010; 白炜等 2011)。但是,由于观测区域的各种环境因素以及植被类型、植被生理状况等差异,影响生态系统呼吸的最适宜温度指标也存在一定的差异。朱咏莉等 (2008) 用 Van't Hoff 方程对夜间通量和温度的平均值进行拟合,结果表明,最适宜反映稻田夜间碳通量变化的指标是 5 cm 土层温度。李俊等 (2006) 对华北平原玉米生态系统研究发现,土壤温度与夜间呼吸有较强的相关关系。于贵瑞等 (2004) 研究发现,生态系统呼吸与空气温度和土壤温度都具有很好地相关性,干烟洲人工针叶林生态系统与空气温度的相关性最强,而长白山温带阔叶林生态系统则与土壤表层温度相关性最强。生态系统呼吸的最适宜温度指标没有统一的标准来界定,目前一般主要以温度与呼吸的相关系数或决定系数来进行评价。本研究结果表明,气温和土温均与夜间生态系统呼吸呈显著的指数相关。但是,在不同生育期,不同温度指标对呼吸通量的影响程度略有差异。苗期,土壤温度是最适宜反映玉米夜间碳通量变化的指标,其余生育期,空气温度能更好地反映夜间玉米碳通量的变化。这是因为夜间生态系统呼吸强度直接受控于热量条件,因此气温和土壤温度都会影响到生态系统的呼吸速率,温度升高会加速植物和微生物的新陈代谢,从而加强了碳排放的强度。

3 结 论

玉米生态系统在不同生育期 CO₂ 通量日变化均呈“U”型分布,且变化幅度具有明显差异,碳吸收的最大值出现在灌浆期,峰值为 $-1.426 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4 个生育期玉米生态系统均表现为 CO₂ 吸收,日吸收总量灌浆期 > 拔节期 > 成熟期 > 苗期。

4 个生育期的日 CO₂ 通量与光合有效辐射均呈显著的负相关。各生育期在低光阶段 ($PAR < 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),日 CO₂ 通量值随着光合有效辐射的增大而变小,这时期光照是控制光合作用的主导因子。之后随着光合有效辐射的增大,日 CO₂ 通量值减小的速度变缓慢。玉米的光量子利用效率变化范围为 $0.00098 \sim 0.0022 \text{ mg} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 。

夜间生态系统呼吸与温度呈显著的指数关系,即空气温度和土壤温度都是影响生态系统呼吸的重要驱动因子,只是不同的生育期主导因子有差异,苗期土壤温度是生态系统呼吸的主导因子,拔节期、灌浆期和成熟期空气温度是生态系统呼吸的主导因子。

致谢 本文数据来自 HiWATER 试验,感谢 HiWATER 试验全体参加人员。

参考文献

- 白 炜,王根绪,刘光生. 2011. 青藏高原高寒草甸生长期 CO₂ 排放对气温升高的响应. *生态学杂志*, **30**(6): 1045–1051.
- 郭建侠,卞林根,戴永久. 2007. 在华北玉米生育期观测的 16 m 高度 CO₂ 浓度及通量特征. *大气科学*, **31**(4): 695–707.
- 蒋高明. 2005. 植物生理生态学. 北京: 高等教育出版社.
- 李 晶,王明星,王跃思,等. 2003. 农田生态系统温室气体排放研究进展. *大气科学*, **27**(4): 740–749.
- 李 俊,于 强,孙晓敏,等. 2006. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. *中国科学(D 辑)*, **36**(增刊 1): 210–223.
- 李 新,刘绍民,马明国,等. 2012. 黑河流域生态——水文过程综合遥感观测联合试验总体设计. *地球科学进展*, **27**(5): 481–498.
- 李克让. 2002. 土地利用变化和温室气体净排放与陆地生态系统碳循环. 北京: 气象出版社.
- 李祎君. 2008. 玉米农田水热碳通量动态及其环境控制机理研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院植物研究所.
- 林同保,王志强,宋雪雷,等. 2008. 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析. *中国生态农业学报*, **16**(6): 1458–1463.
- 陆佩玲,罗 毅,刘建栋,等. 2000. 华北地区冬小麦光合作用的光响应曲线的特征参数. *应用气象学报*, **11**(2): 236–241.
- 孙春健,申双和,王春林,等. 2012. 珠三角城市绿地 CO₂ 通量的环境响应特征. *生态学杂志*, **31**(1): 138–144.
- 徐自为,刘绍民,宫丽娟,等. 2008. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究. *地球科学进展*, **23**(4): 357–370.
- 姚玉刚. 2007. 两种方法测定华北平原农田生态系统净碳交换量的研究(硕士学位论文). 合肥: 安徽农业大学.
- 于贵瑞,温学发,李庆康,等. 2004. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学(D 辑)*, **34**(增刊 II): 84–94.
- 赵育民,牛树奎,李贵才,等. 2007. 植被光能利用率研究进展. *生态学杂志*, **26**(9): 1471–1477.
- 朱咏莉,吴金水,董成立,等. 2008. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征. *环境科学*, **29**(4): 1040–1044.
- Baldocchi DD. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, **9**: 479–492.
- Berbigier P, Bonnefond JM, Mellmann P. 2001. CO₂ and water vapor fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, **108**: 183–197.
- Canadell JG, Le QC, Raupach MR, et al. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **104**: 18866–18870.
- Carrara A, Janssens IA, Yuste JC, et al. 2004. Seasonal changes in photosynthesis, respiration and NEE of a mixed temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **126**: 15–31.
- Fang C, Moncrieff JB. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, **33**: 155–165.
- Hollinger DY, Kelliher FM, Byers JN, et al. 1994. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, **75**: 134–150.
- Hutchinson JJ, Campbell CA, Desjardins RL. 2007. Some perspectives on carbon sequestration in agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology*, **142**: 288–302.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.
- Le QC, Raupach MR, Canadell JG, et al. 2009. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosciences*, **2**: 831–836.
- Lei HM, Yang DW. 2010. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain. *Global Change Biology*, **16**: 2944–2957.
- Li X, Cheng G, Liu S, et al. 2013. Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (HiWATER). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **94**: 1145–1160.
- Liu SM, Xu ZW, Wang WZ, et al. 2011. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrology and Earth System Sciences*, **15**: 1291–1306.
- Lloyd J, Taylor JA. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, **8**: 315–323.
- Rochette P, Desjardins RD, Pattey E, et al. 1995. Crop net carbon dioxide exchange rate and radiation use efficiency in soybean. *Agronomy Journal*, **87**: 22–28.
- Ruimy A, Jarvis PG, Baldocchi DD, et al. 1995. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, **26**: 1–68.
- Schimel DS, House JI, Hibbard KA, et al. 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, **414**: 169–172.
- Wang HM, Saigusa N, Yamamoto S, et al. 2004. Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokaido, Japan. *Atmospheric Environment*, **38**: 7021–7032.
- Zhu ZL, Sun XM, Wen XF, et al. 2006. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, **49**: 36–46.

作者简介 张 蕾,女,1985 年生,博士研究生,研究方向为生态与环境遥感. E-mail: zhangleiai66@mail.bnu.edu.cn
责任编辑 李凤芹