

华北平原冬小麦生态系统齐穗期 水碳通量日变化的非对称响应

王建林¹, 温学发², 孙晓敏², 王玉英³

(1. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院 石家庄农业现代化研究所, 河北 石家庄 050021)

摘要: 陆地生态系统 CO₂ 和水热通量变化特征及其环境控制机制是理解生态系统水碳耦合循环过程和模型开发的基础。农田生态系统水碳通量特征的研究对把握作物生产力水平和水分利用效率的高低具有重要意义。本研究基于涡度相关技术对华北平原冬小麦农田生态系统齐穗期水碳通量的日变化特征进行了分析。结果表明: 以 C₃ 作物冬小麦构成的农田生态系统晴天 CO₂ 通量、水汽通量和冠层导度均存在明显的“午休”现象, “午休”的原因是晴天强光造成的“光抑制”; CO₂ 通量对光合有效辐射呈米氏响应, 其表观量子效率为 0.002 997 mg/μmol, 潜在最大碳通量为 3.349 4 mg/(m²·s); 水汽通量和冠层导度与光合有效辐射之间均存在极显著线性关系, 但在相同光合有效辐射下, 下午的冠层导度明显小于上午, 其原因在于同化产物的反馈抑制; 下午的水汽通量明显大于上午, 则主要受控于温度和 VPD 的变化。由于下午的水汽通量大于上午, 而 CO₂ 通量在上午和下午无明显差异, 使得农田生态系统上午的水分利用效率明显高于下午。

关键词: 农田生态系统; 碳通量; 水汽通量; 冠层导度; 日变化; 冬小麦

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7091(2009)05-0159-05

Asymmetry Characteristic on the Diurnal Changes of CO₂ and H₂O Fluxes at Full Heading Time of Winter-wheat in North China

WANG Jian-lin¹, WEN Xue-fa², SUN Xiao-min², WANG Yu-ying³

(1. Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Institute of Geographic Sciences
and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental
Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Characteristics of CO₂, water and heat fluxes of terrestrial ecosystems and related mechanisms involved provide insights into the coupling cycle of water and carbon and the model development. It is necessary to investigate the characteristics of water and carbon fluxes for understanding the crop productivity and water use efficiency. In this study, we analyzed the diurnal changes of water and carbon fluxes at full heading time of winter-wheat in North China based on the eddy covariance technique. The results showed that there existed evident midday depression of CO₂, water vapor and canopy conductance under clear sky condition, as a result of photo-inhibition caused by strong radiation. The responses of CO₂ flux to photosynthetically active radiation could be expressed by Michaelis-Menten function, with apparent quantum yield 0.002 997 mg/μmol photons and maximum potential of carbon flux 3.349 4 mg/(m²·s). The water vapor flux and canopy conductance were significantly correlated with photosynthetically active radiation. However, at the same light condition, canopy conductance in afternoon was apparently smaller than that in the morning due to the feedback restrain of photosynthate, whereas water vapor flux in afternoon was much larger than that in the morning, resulting from the changes of air temperature and vapor pressure deficit. Note that water use efficiency in the morning was higher than that in the afternoon, because water vapor flux in afternoon was much larger than that in the morning, while no obvious difference existed

收稿日期: 2009-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(30770409; 30871485; 30971687; 30970517); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-432); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目

作者简介: 王建林(1976-), 男, 河北唐山人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事植物生理生态方面研究。

通讯作者: 温学发(1975-), 男, 辽宁铁岭人, 博士, 副研究员, 主要从事生态系统水碳循环研究。

for CO_2 flux between the morning and afternoon.

Key words : Cropland ecosystems ; CO_2 flux ; Water vapor flux ; Canopy conductance ; Diurnal changes ; Winter-wheat

全球变暖与淡水资源短缺是世界经济可持续发展所面临的两个重要环境问题。陆地生态系统的碳循环和水循环是地圈—生物圈—大气圈相互作用关系的纽带,是最基本的两个耦合的生态学过程^[1]。目前,陆地生态系统 CO_2 和水热通量的长期观测研究已经成为国际上关注的热点问题^[2]。为估计陆地生态系统水碳通量的时空变化,科学家们正在关注各种类型陆地生态系统水碳通量的日变化、季节变化和年际变化特征及其环境控制机制^[3-9]。水碳通量具有明显的日变化、季节变化和年际变化特征^[1],其中日变化是季节变化和年际变化的步长单位。深入分析水碳通量的日变化特征有助于理解生态系统过程和相关过程机理模型的开发。

农田生态系统相对于其他陆地生态系统而言,受人类活动影响最大,与人类生存的关系最密切,人类能对其进行有效的调控。人类所需粮食的 90% 以上直接来源于作物光合作用对 CO_2 的固定。农田水碳通量特征直接反映作物生产力水平和水分利用效率的高低,体现了为人类生存提供粮食的能力。因此研究农田生态系统水碳通量特征也对我国的粮食安全预测具有重要的意义。

基于上述原因,本研究以通量观测网络 FLUXNET 的标准观测方法——涡度相关技术测定了农田生态系统 CO_2 和水热通量,分析其日变化特征与环境因子的关系,为生态系统水循环和碳循环机理模型的开发与粮食安全预测提供一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院栾城农业试验站进行,该站位于河北省石家庄市栾城县,114°40'E,37°50'N,海拔高度 50.1 m。其所处的地理位置为华北山前平原高产农区的典型代表区,属中国东部暖温带半湿润季风气候,年均气温 12.2℃,年均降水量 536.8 mm。农作制度为冬小麦+夏玉米一年两熟。冬小麦的生育期一般为 10 月上旬至翌年 6 月上旬,夏玉米的生育期从 6 月中旬至 10 月上旬。在作物生长期有灌溉,水分供应充足。试验地与周围大片农区相连,构成大范围均一的下垫面,满足了试验要求盛行风向的风浪区长度。

1.2 观测方法

采用美国 Campbell 公司生产的涡度相关系统

在栾城试验站对小麦田水热、 CO_2 通量进行了连续的定位观测。采用 KH20 型 (Campbell 公司) 高度灵敏的水汽变动计测定潜热通量,可以快速测定大气中水汽的脉动;采用 CSAT3 型 (Campbell 公司) 超声风速仪测定水平、垂直方向上风速、温度的脉动;采用 LF7500 型 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 开路分析系统测定 CO_2 通量。本套仪器安装于栾城站的综合观测实验场,高度为 2.1 m,风浪区与大片农区相连,长度满足试验观测的要求。采用全自动气象观测系统同步测定太阳辐射、气温、大气湿度、土壤温度、冠层温度、土壤湿度等数据,观测数据通过 CR23X 采集器自动采集,每 30 min 储存一次。

1.3 数据处理

在小麦抽穗期选择无农事操作的连续晴天进行分析。经筛选,2008 年 5 月 4 日至 5 月 6 日符合要求,期间的太阳光合有效辐射如图 1 所示。采用异常值剔除法剔除涡度相关测定的异常数据,对涡度相关系统测定的 CO_2 通量和潜热通量进行了 WPL 校正^[10]。经过 WPL 校正后的潜热通量 (LE) 由式 1 计算水汽通量 (ET),式中 t_a 为大气温度。

$$\text{ET} = \text{LE} / (2500 - 2.4 t_a) \quad (1)$$

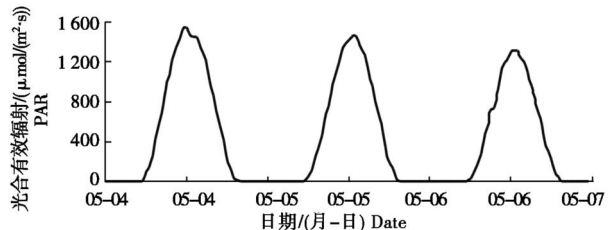


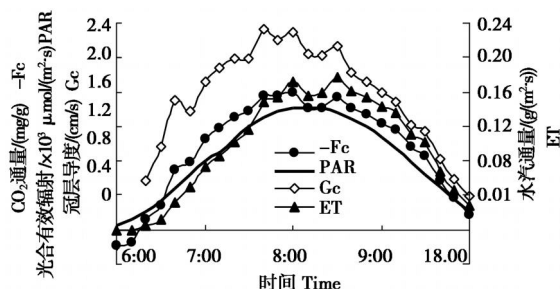
图 1 光合有效辐射的逐日变化

Fig. 1 Diurnal changes of PAR

2 结果与分析

2.1 CO_2 通量、水汽通量和冠层导度的日变化特征

将选取的 3 个晴天数据进行平均后,白天 CO_2 通量 (F_c) 和水汽通量 (ET) 的日变化特征如图 2 所示。从图 2 可以看出,上午 CO_2 通量和水汽通量随着光合有效辐射的增强而增大,下午 CO_2 通量和水汽通量随着光合有效辐射的减弱而减小。而在中午前后, CO_2 通量和水汽通量均有所降低,从而出现“双峰”现象,“双峰”分别出现在 12:00 和 13:30。进一步分析冠层导度 (G_c) 的日变化发现,冠层导度也随光合有效辐射的变化而变化,并且在 12:00 - 13:30 之间有明显的降低现象。即 CO_2 通量、水汽通量和冠层导度均存在明显的“午休”现象。

图2 CO₂ 通量、水汽通量和冠层导度的日变化Fig. 2 Diurnal changes of CO₂ flux, ET and Gc

2.2 水分利用效率的日变化特征

以 CO₂ 通量 (Fc) 和水汽通量 (ET) 的比值计算农田水分利用效率 (式 2), 农田水分利用效率的日变化情况如图 3 所示。

$$WUE = - Fc / ET \quad (2)$$

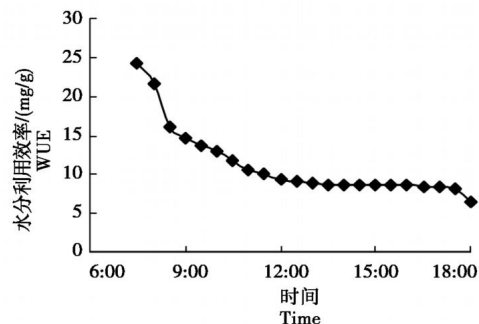


图3 水分利用效率的日变化

Fig. 3 Diurnal changes of WUE

从图 3 可以看出, 上午随时间的推移农田水分利用效率越来越小, 而到中午前后达到恒定, 下午基本保持恒定直至傍晚。进一步用日变化数据对 CO₂ 通量和水汽通量的关系作图如图 4 所示。从图 4 可以看出, 在上午和下午 CO₂ 通量和水汽通量的关系存在显著差异, 在一天中二者关系形成一个“环状”结构。

2.3 CO₂ 通量对光合有效辐射的响应

白天净生态系统碳通量对光合有效辐射的响应如图 5 所示。从图 5 可以看出, 用净生态系统碳通量随光合有效辐射的增强而增大, 而随着光合有效辐射增强, 碳通量增大的幅度逐渐减弱。可以用 Michaelis-Menten 方程 (式 3) 进行拟合 (图 5)。

$$- F_c = \frac{\cdot PAR \cdot F_{\max}}{\cdot PAR + F_{\max}} - R_{eco} \quad (3)$$

式中 \cdot 为表观量子效率, 拟合结果为 0.002 997 mg/ μ mol, F_{\max} 为最大潜在碳通量, 拟合结果为 3.349 4 mg/(m²·s), R_{eco} 为生态系统呼吸, 拟合结果为 0.381 0 mg/(m²·s)。

2.4 水汽通量和冠层导度对光合有效辐射的响应

白天水汽通量和冠层导度的响应如图 6、图 7 所示。从图 6 和 7 可以看出, 水汽通量和冠层导度

与光合有效辐射之间均存在极显著线性关系。但同时也看到, 无论是水汽通量还是冠层导度, 在上午和下午对光合有效辐射的响应都存在明显: 在相同光合有效辐射下, 上午的水汽通量明显小于下午, 而上午的冠层导度则明显大于下午。

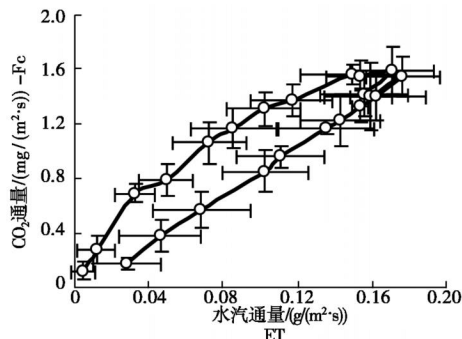
图4 CO₂ 通量和水汽通量的关系

Fig. 4 Relationship between Fc and ET

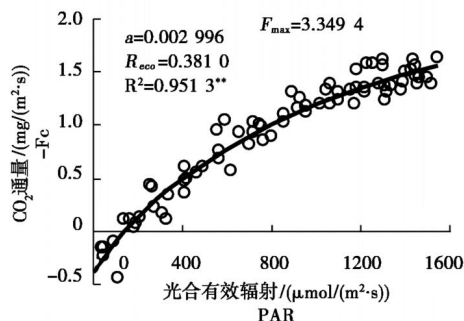
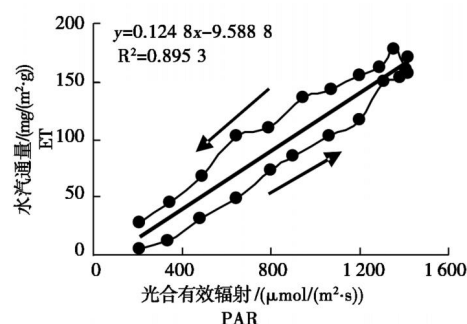
图5 CO₂ 通量对光合有效辐射的响应Fig. 5 Response of CO₂ flux to PAR

图6 水汽通量对光合有效辐射的响应

Fig. 6 Response of water vapor flux to PAR

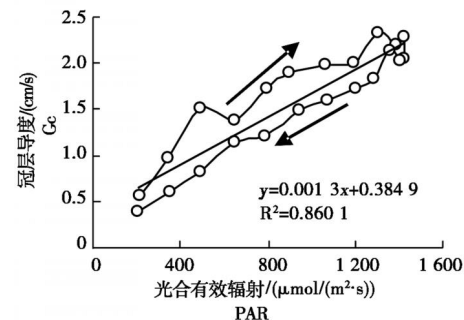


图7 冠层导度对光合有效辐射的响应

Fig. 7 Response of Gc to PAR

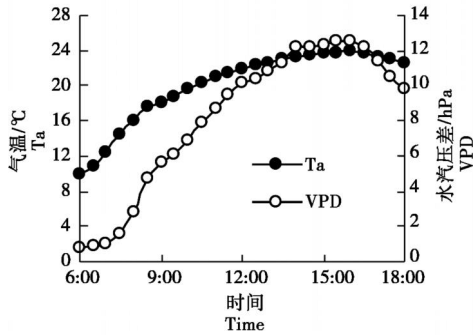


图8 气温和饱和水汽压差的日变化

Fig.8 Diurnal changes of Ta and VPD

3 讨论与结论

3.1 农田生态系统水碳通量“午休”的原因

在晴天的一天中光合有效辐射随时间基本呈正弦分布,而从图1 CO_2 通量和水汽通量的日变化规律看,在PAR最大的中午前后,水碳通量已经开始降低,即出现“午休”现象。对于“午休”现象,在叶片水平上并将其归因于“气孔因素”与“非气孔因素”两个方面。前者即为气孔关闭造成光合原料 CO_2 供应不畅,后者则为强光产生光抑制致使光合效率下降。在小麦齐穗期,冠层已经完全覆盖地面,农田蒸散(水汽通量)主要由叶片蒸腾引起,把整个小麦冠层看成一片“大叶”,可以引用叶片水平的原理对农田生态系统水碳通量“午休”的原因进行解释:如果是“气孔因素”,则随着PAR增大,叶片温度和VPD上升,气孔(冠层)导度也逐渐增大,VPD的上升和气孔(冠层)导度的增大使蒸腾作用逐渐增大;当气孔(冠层)导度和VPD增大到一定程度,蒸腾作用相当强烈,气孔会部分关闭对蒸腾作用进行反馈抑制,但反馈抑制只能减小而不能消除其变化趋势,因此蒸腾作用会继续增大,而气孔(冠层)导度的反馈作用也逐渐增大,气孔(冠层)导度逐渐降低。但从图1发现,在中午前后,水汽通量并非继续增大(12:00 - 13:30 减小),冠层导度也并非逐渐降低(13:30 增大)。因此“气孔因素”不能很好地解释农田生态系统水碳通量“午休”的原因。如果是“光抑制”,则“午休”现象会因强光而产生,并随光强减弱而消除,图1中 CO_2 通量和水汽通量的日变化符合这一特征,因此可以对农田生态系统水碳通量“午休”的原因做出如下解释: CO_2 通量、水汽通量和冠层导度都随PAR的增强而增大,当PAR超过叶片的光饱和点,产生“光抑制”,并造成 CO_2 通量减小。对于强光,小麦会做出上层叶片卷曲、减小有效叶面积的生理性反应,这也必然造成水汽通量和冠层导度的减小,而当PAR逐渐减弱,上层叶片舒展, CO_2 通量、水汽通

量和冠层导度又会逐渐恢复。因此,农田生态系统水碳通量“午休”的原因可以归结为“光抑制”。

3.2 上午和下午水汽通量和冠层导度非对称响应的原因

从叶片到冠层的尺度扩展方法是把植物冠层看成一片“大叶”,即“大叶模型”的假设。一般认为,当冠层的叶面积指数 $\text{LAI} > 3$ 时,大叶模型的假设是成立的。在这个假设下,系统水分的丧失主要来自植物叶片气孔的蒸腾。在小麦齐穗期,冠层已经完全覆盖地面,农田蒸散(水汽通量)主要由叶片蒸腾引起,冠层导度主要由气孔导度决定。叶片尺度的研究证明气孔导度对环境因子(特别是光)反应敏感,随着光照强度增强,气孔导度变大,叶片的光合能力增强。由于经过一夜的呼吸消耗,植物的同化产物上午一般不会对叶片积累,从而不会产生同化产物对气孔的反馈抑制,而下午产生的同化产物则会因上午产生的大量同化产物而造成对气孔的反馈抑制,因此在叶片尺度上往往表现为:相同PAR下,上午的光合速率和气孔导度比下午高。本研究中的冠层导度主要由气孔导度决定,也必然表现出与气孔导度相似的规律。高的冠层导度意味着高的气体交换速度,但本研究中并未发现上午碳通量比下午大的现象,其原因在于农田生态系统夜间呼吸产生的 CO_2 在上午逐渐释放,从而在生态系统水平上抵消了上午叶片水平上高光合速率对 CO_2 的吸收,因此在表现上无法得以体现。而对于农田蒸散(水汽通量),其大小则主要受控于温度和VPD。上午虽然冠层导度较大,但由于温度较低、VPD较小,因此水汽通量也相对较小;下午冠层导度降低,但由于温度的升高、VPD的增大,不但抵消了冠层导度降低对农田蒸散(水汽通量)的影响,反而使水汽通量更大。

对冬小麦齐穗期华北平原农田生态系统的水碳通量进行了研究。结果表明:以 C_3 作物冬小麦构成的农田生态系统晴天 CO_2 通量、水汽通量和冠层导度均存在明显的“午休”现象,“午休”的原因是晴天强光造成的“光抑制”; CO_2 通量对光合有效辐射呈米氏响应,其表观量子效率为 $0.002\ 997\ \text{mg}/\mu\text{mol}$,最大潜在碳通量为 $3.349\ 4\ \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;水汽通量和冠层导度与光合有效辐射之间均存在极显著线性关系,但在相同光合有效辐射下,下午的冠层导度明显小于上午,其原因在于同化产物的反馈抑制,下午的水汽通量明显大于上午,则主要受控于温度和VPD的变化。由于下午的水汽通量大于上午,而 CO_2 通量在上午和下午无明显差异,使得农田生态系统上午的水分利用效率明显高于下午。

参考文献:

- [1] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [2] Baldocchi D D, Falge E, Gu L, *et al.* FLUXNET: A new tool to study The Temporal and spatial variability of ecosystem scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82 (11): 2415 - 2434.
- [3] Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, *et al.* On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96: 257 - 291.
- [4] 刘允芬,宋霞,于贵瑞,等. 人工针叶林不同高度碳通量季节变化及其环境因子研究[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(增刊 II): 109 - 117.
- [5] 于贵瑞,温学发,李庆康,等. 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[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(增刊): 84 - 94.
- [6] 朱咏莉,吴金水,童成立,等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(4): 1040 - 1044.
- [7] 李双江,刘文兆,高桥厚裕,等. 黄土塬区麦田 CO₂ 通量季节变化[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 1987 - 1992.
- [8] 张军辉,于贵瑞,韩士杰,等. 长白山阔叶红松林 CO₂ 通量季节和年际变化特征及控制机制[J]. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 I): 60 - 69.
- [9] 关德新,吴家兵,金昌杰,等. 长白山红松针阔混交林 CO₂ 通量的日变化与季节变化[J]. *林业科学*, 2006, 42 (10): 123 - 128.
- [10] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, 1980, 106: 85 - 100.
- [11] 王建林,齐华,房全孝,等. 水稻、大豆、玉米光合速率的日变化及其对光强响应的滞后效应[J]. *华北农学报*, 2007, 22(2): 119 - 124.

《植物遗传资源学报》征订启事

《植物遗传资源学报》是中国农业科学院作物科学研究所和中国农学会主办的学术期刊,为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀农业期刊。该刊为中国科技论文统计源期刊、中国科学引文数据库来源期刊(核心期刊)、中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,又被《中国生物学文摘》和中国生物学文献数据库、中文科技期刊数据库收录。据中国期刊引证研究报告统计,2007 年度《植物遗传资源学报》影响因子达 0.914。

报道内容为大田、园艺作物,观赏、药用植物,林用植物、草类植物及其一切经济植物的有关植物遗传资源基础理论研究、应用研究方面的研究成果、创新性学术论文和高水平综述或评论。诸如,种质资源的考察、收集、保存、评价、利用、创新,信息学、管理学等;起源、演化、分类等系统学;基因发掘、鉴定、克隆、基因文库建立、遗传多样性研究。

双月刊,大 16 开本,128 页。定价 20 元,全年 120 元。各地邮局发行,邮发代号:82 - 643。国内刊号 CN11 - 4996/S,国际统一刊号 ISSN1672 - 1810。

本刊编辑部常年办理订阅手续,如需邮挂每期另加 3 元。

地 址:北京市中关村南大街 12 号 中国农业科学院《植物遗传资源学报》编辑部

邮 编:100081 电话:010 - 82105794 010 - 82105796(兼传真)

E - mail: zwyczyxb2003 @163. com zwyczyxb2003 @sina. com