冬小麦农田尺度瞬态 CO_2 通量与水分利用效率日变化及影响因素分析*

郭家选 李玉中 梅旭荣**
(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 北京 100081)

摘 要 以华北平原冬小麦农田尺度为研究对象,采用涡度相关技术,研究冬小麦灌浆期瞬态 CO_2 通量日变化特征及其与农田热量平衡各分量的关系。结果表明,非水分胁迫下 CO_2 通量日变化(负值表示通量指向冠层)为U型,群体净光合速率最高值为 $-1.2\sim-1.4mg/m^2\cdot s$,夜间瞬态 CO_2 通量呈非稳定变化,最高值达 $0.4\sim0.54mg/m^2\cdot s$。白天时段内 CO_2 通量与净辐射、潜热通量呈高度相关,8:00~15:30 时段内 CO_2 和水汽通量呈同步日变化趋势,水分利用效率处于稳定状态,瞬态水分利用效率基本维持在 $0.012\sim0.014g(CO_2)/g(H_2O)$ 范围内;但早晨和傍晚时段内水分利用效率变化较大。

关键词 涡度相关法 CO_2 通量 水分利用效率

Diurnal variation of instantaneous carbon dioxide flux and water use efficiency of winter wheat at field scale and analysis of influencing factors. GUO Jia-Xuan, LI Yu-Zhong, MEI Xu-Rong (Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China), *CJEA*, 2006, 14(3): 78~81

Abstract The diurnal variation of instantaneous carbon dioxide flux and the relationship between it and components of farmland energy balance during grain filling stage of winter wheat by eddy correlation technique were studied. The results show that the curve of instantaneous carbon dioxide flux in diurnal course is U-shape, the maximal net photosynthetic rate in crop canopy level ranges from $-1.2mg/m^2\cdot s$ to $-1.4mg/m^2\cdot s$ under no soil water-stress condition during daytime, and during nocturnal periods CO_2 fluxes are erratic and the maximal carbon dioxide ranges from $0.40mg/m^2\cdot s$ to $0.54mg/m^2\cdot s$. Carbon dioxide fluxes are closely related to net radiation flux, and latent heat flux during daytime period. Moreover, there is synchronous trend both carbon dioxide flux and latent heat flux during 8:00~15:30 period, so crop WUE is stable, and it is approximately $0.012\sim0.014g(CO_2)/g(H_2O)$. But instantaneous WUE changes largely around sunrise and sunset.

Key words Eddy correlation method, Carbon dioxide flux, Water use efficiency
(Received Oct. 8, 2005; revised Nov. 6, 2005)

水资源短缺已成为我国农业发展的首要制约因素,如何高效利用有限水资源、提高作物光合速率和水分利用效率、获得作物高产是农业节水的焦点问题[1,2]。作物水分利用效率(WUE)是评价缺水条件下植物生长适宜程度的一个简单且重要指标[14],根据作物生产的叶片光合、群体光合和作物产量3个层次,将水分利用效率相应划分为叶片、群体和产量3个水平[3]。关于作物水分利用效率研究以叶片水平和产量水平的研究较多[4~6],且主要集中在水分利用效率对环境因子的响应及其生理机制,群体水平的作物水分利用效率则是研究的难点和热点,通常以地上部干物质量(产量,干重)与蒸腾蒸发之比来表示[15],多数研究采用模型模拟的方法[7,8],由于受测量方法的限制,对于农田尺度的群体水平作物瞬态水分利用效率的研究则相对较少[9~11]。本研究采用涡度相关技术,分析了冬小麦灌浆期农田尺度 CO_2 通量瞬态变化与农田热量平衡分量之间的相关性以及群体水平作物水分利用效率的日变化。

1 试验材料与方法

试验于2002年在中国科学院栾城农业生态系统试验站综合观测试验场冬小麦生育期进行,试验地土壤

* 科技部社会公益重点项目(2004DIB3J095)、农业结构调整重大技术研究专项"华北粮食主产区农业环境评价体系研究"、挑战计划"黄河流域旱区保护性耕作"资助

** 通讯作者

收稿日期:2005-10-08 改回日期:2005-11-06

质地为壤土,供试冬小麦品种"9204"为当地主栽品种。试验区面积为 200m×170m,在试验田中心位置安装涡度相关仪,试验田与周围农区相连且周围无防护林,栽培作物均为冬小麦,形成大范围均一下垫面,满足应用涡度相关技术观测水热通量时所要求的盛行风向风浪区长度。

农田生态系统热量平衡方程可简化表示为:

$$R_n = H + \lambda E + G \tag{1}$$

式中,R_n 为净辐射通量(W/m^2),G 为土壤热通量(W/m^2),H 为显热通量(W/m^2),λE 为潜热通量(W/m^2)。R_n 和 G 可通过仪器直接测定,λE、H 和 CO_2($mg/m^2 \cdot s$)通量依据涡度相关原理通过涡度相关技术测定并由下式计算:

$$H = \rho_a C_p \overline{W'T'} \tag{2}$$

$$\lambda E = \lambda \overline{w'\rho_v'} \tag{3}$$

$$F_{CO_2} = \overline{w'c'} \tag{4}$$

式中,T'(℃)、ρ_v'(g/m^3)、c'(mg/m^3)和 w'(m/s)为近地面大气湍流运动引起的温度、湿度、CO_2 密度和垂直风速的脉动量,ρ_a 为空气密度(g/m^3),C_p 为空气定压比热(J/kg·K),λ 为水汽化潜热(J/g)。在冬小麦灌浆期(叶面积指数为 5.4,土壤含水量占田间持水量的 75%)选择典型天气(5 月 21～22 日)进行农田热量平衡各分量和作物群体 CO_2 通量的连续平行观测。农田潜热和显热通量由 Campbell 公司生产的涡度相关系统测定,涡度相关仪安装在离地表 3m 高度处,涡度相关系统由测定垂直风速、气温和 CO_2、水汽密度 3 部分传感器组成,采用 CSAT3 型三维超声风速仪测定风向、水平和垂直风速脉动,FW05 型精密细线热电偶测定气温脉动,LI-7500 型开路式 CO_2 和 H_2O 红外分析仪测定 CO_2 和水汽密度脉动,以 10Hz 频率测定温度、CO_2、湿度和三维风速脉动值,由垂直风速脉动值和相关变量脉动值的协方差计算潜热、显热和 CO_2 通量瞬时值,记录 10min 的潜热、显热和 CO_2 通量平均值,正值表示物质和能量向大气方向传输。此外农田冠层上方的净辐射通量由 Q7-1 型净辐射表(REBS,USA)测定,并将 2 个土壤热通量板置于作物行内、行间 2cm 土层深处,求取平均值作为农田土壤热通量。上述数据由 CR23X 型采集器采集。

2　结果与分析

2.1　冬小麦灌浆期 CO_2 通量日变化及影响因素

图 1 为冬小麦灌浆期 CO_2 通量、农田能量平衡分量和风速日变化过程,表 1 为 CO_2 通量观测日期 5 月 21 日(云天,DOY141)和 5 月 22 日(晴天,DOY142)的气象指标,且该观测日期内土壤相对含水量为 75%,冬小麦处于非水分胁迫状态。研究结果表明,非水分胁迫下 CO_2 通量日变化为 U 型,夜间土壤和作物层为 CO_2 源,通过呼吸作用释放大量 CO_2,其通量值为

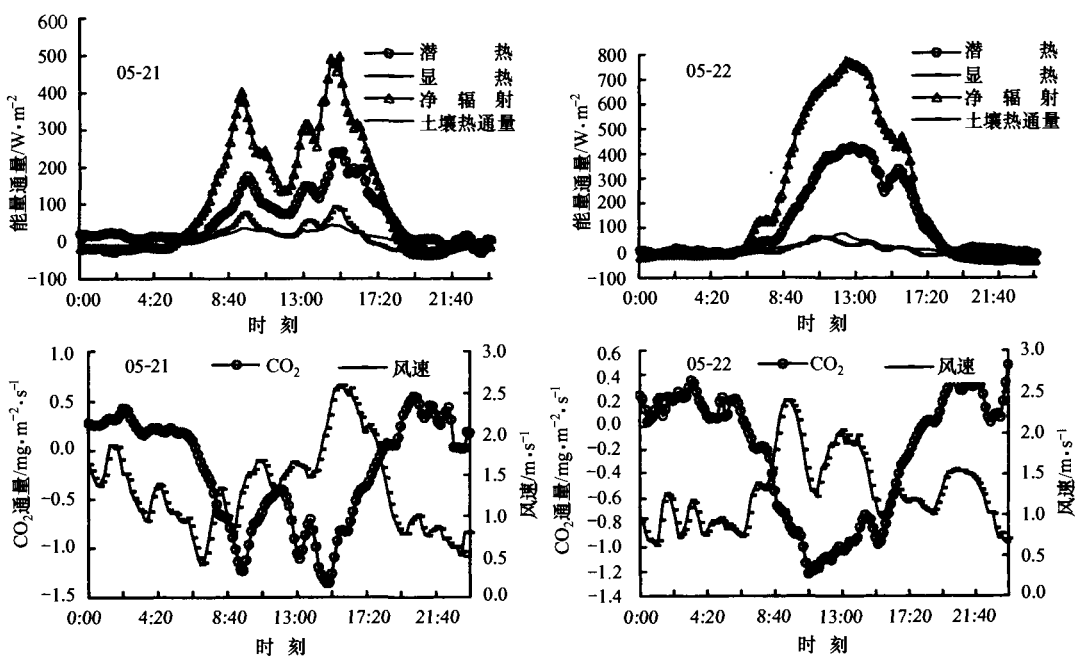

图 1　冬小麦灌浆期农田能量平衡各分量、CO_2 通量与风速日变化

Fig. 1　Diurnal cycle of the components of the surface energy balance and CO_2 flux and wind speed during filling period of winter wheat

表1 冬小麦灌浆期 CO_2 通量观测日期的气象要素

Tab.1 Meteorological factors measured at CO_2 flux monitoring site during filling period of winter wheat

日期(月-日) Date (month-day)	太阳总辐射/MJ·m⁻²·d⁻¹ Daily solar radiation	气温/℃ Air temperature 最高 Max.	最低 Min.	平均风速(2m)/m·s⁻¹ Average wind speed
05-21	15.9	24.6	8.4	1.4
05-22	27.4	28.2	15.9	1.0

0.40～0.54mg/m²·s，且由于夜间风速的阵性扰动引起 CO_2 通量的非平稳变化，出现农田 CO_2 通量突变现象；白天作物光合强度大于呼吸强度，以固定 CO_2 占主导地位，为负向 CO_2 通量，其通量高峰值为 −1.2～−1.4mg/m²·s。早晨6:30和傍晚18:30左右 CO_2 通量值趋向于零，为 CO_2 通量方向发生改变的时间拐点。

对2002年5月21日和5月22日白天7:00～18:00期间测定的 CO_2 通量与热量平衡各分量进行相关分析结果表明，白天时段内净辐射、潜热通量与 CO_2 通量呈极显著线性负相关关系，是引起 CO_2 通量变化的主要能量因子(见表2)，CO_2 通量与净辐射的负相关系数分别为0.9516(5月21日，$n=66$)和0.9581(5月22日，$n=66$)；与潜热通量的相关系数分别为0.8443(5月21日，$n=66$)和0.9288(5月22日，$n=66$)。

表2 冬小麦灌浆期白天 CO_2 通量与净辐射和潜热通量间关系拟合回归方程

Tab.2 Regression equation relating CO_2 flux to net radiation and latent heat flux during filling period of winter wheat

日期(月-日) Date (month-day)	相关因子 Correlation factors	回归方程 Regression equation	自由度(n) Freedom	R^2 Correlative coefficient
05-21	净辐射通量	$F_{CO_2}=-0.0029R_n+0.012$	66	0.9056**
	潜热通量	$F_{CO_2}=-0.005LE-0.1103$	66	0.7129**
05-22	净辐射通量	$F_{CO_2}=-0.0014R_n-0.0554$	66	0.9179**
	潜热通量	$F_{CO_2}=-0.0023LE-0.1776$	66	0.8627**

2.2 冬小麦灌浆期群体水分利用效率日变化

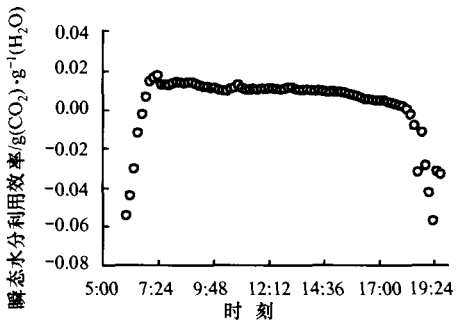

图2 冬小麦灌浆期群体水平水分利用效率日变化

Fig.2 Diurnal variation of water use efficiency during filling period of winter wheat

将2002年5月21～22日观测日期内每天同时段的 CO_2 和水汽通量进行平均，获得群体水分利用效率日变化过程见图2，由于观测时期内包括不同的天气状况，因此尽管观测时间较短，观测结果仍可代表冬小麦灌浆期内水分利用效率基本日变化过程。非水分胁迫状态下水分利用效率日变化过程为6:00～8:00左右呈急速上升阶段，约7:00以后为正效应，8:00～15:30内为相对稳定时期，水分利用效率基本维持在0.012～0.014g(CO_2)/g(H_2O)范围内，下午15:30～18:00水分利用效率处于缓慢下降阶段，18:00以后迅速下降，到18:30时趋向于零。该变化趋势主要是由于 CO_2 和水汽通量日变化过程中并非完全同步所致(图3)，冬小麦灌浆期早晨6:30左右 CO_2 通量迅速由向上通量变为向下通量，而潜热通量的这种变化趋势则推迟到7:20～8:00左右开始，之后两者呈相同变化趋势，到下午18:30左右 CO_2 通量趋于零，且随时间的推移 CO_2 正向(向上)通量在20:30之前呈上升趋势，CO_2 通量极值位于0.40～0.54mg/m²·s范围内，而潜热通量从下午19:00左右基本处于平稳变化趋势。总之，在不存在土壤水分胁迫情况下，冬小麦灌浆期白天 CO_2 和水汽通量呈同步日变化趋势，水分利用效率处于稳定状态，但早晨和傍晚变化较大，这与 CO_2

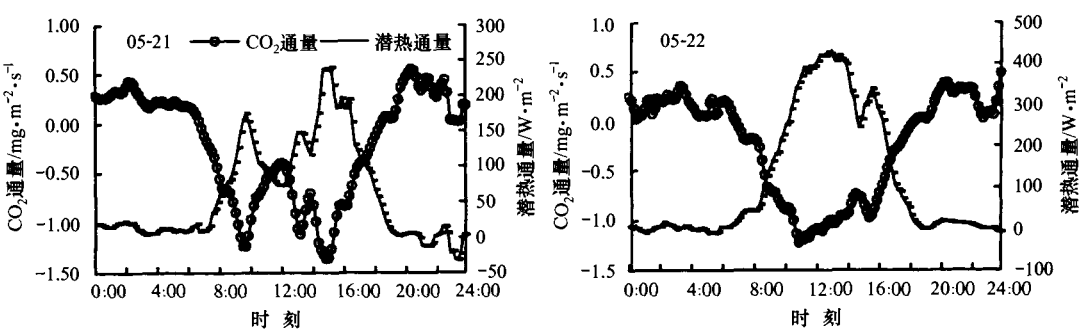

图3 冬小麦灌浆期 CO_2 与潜热通量日变化

Fig.3 Diurnal variations of CO_2 and latent heat flux during filling period of winter wheat

和水汽通量的早晚非同步变化趋势有关。

3　小结与讨论

作物光合速率不仅与土壤水分状况、光照、气温、饱和水汽压差等环境因子相关[4~6,12,13],且与农田热量平衡也有密切关系。在日变化节律过程中白天时段内作物群体水平 CO_2 通量与净辐射通量具有极显著相关关系,随净辐射通量的增加作物群体水平光合速率增大,且 CO_2 通量的剧烈变化随净辐射通量的升降呈相应变化,从农田表面获得的净辐射能量再分配角度看,用于作物光合同化作用消耗的热量在分析农田热量平衡时往往被忽略不计[11],而关于二者之间时空关系的动态变化的深入研究,将为农田热量平衡闭合分析提供理论依据。夜间土壤和作物呼吸释放大量的 CO_2 使作物活动层成为高浓度环境的 CO_2 源,而农田 CO_2 的输送和交换主要依靠湍流交换,通过风速的阵性扰动传输堆积于作物活动层的 CO_2,引起作物群体 CO_2 通量的非稳定性。此外,在土壤水分非胁迫情况下,冬小麦灌浆期白天时段内作物群体 CO_2 通量与潜热通量也呈高度线性相关关系,这与气孔运动机制及其对作物水分和 CO_2 气体交换的控制相吻合[16]。

目前测定作物群体水平水分利用效率的气象学方法主要以经典的波文比/能量平衡/CO_2 浓度梯度法和具有较完善理论的涡度相关法为主。在日变化节律过程中,不同观测方法得出的群体水平瞬态水分利用效率日变化趋势有所不同[11~13]。杨晓光等[12]利用波文比/能量平衡/CO_2 浓度梯度方法测定夏玉米群体水平水分利用效率日变化呈"L"型曲线,上午 8:00 左右达到峰值[0.09g(CO_2)/g(H_2O)],正午前后稳定于 0.001g(CO_2)/g(H_2O)水平,而李俊等[11]采用该方法得出土壤湿度较低时,冬小麦瞬时水分利用效率呈"L"型或"U"型日变化,其变化范围为 -0.0194~0.6414g(CO_2)/g(H_2O),瞬时水分利用效率早晨最高且变化迅速,白天较低且变化平缓。土壤湿度较高时瞬时水分利用效率范围为 -0.0157~0.1381g(CO_2)/g(H_2O),其日变化不明显。而张永强等[13]采用涡度相关法测定夏玉米灌浆期水分利用效率日变化呈倒"U"型,10:00~15:00处于稳定阶段,峰值不明显,最高值为 0.015g(CO_2)/g(H_2O)左右,并认为 10:00 以前水分利用效率迅速上升和 15:00 以后的迅速下降变化趋势与农田 CO_2 通量和潜热通量二者在该时段内的升降变化速度有关。本研究采用涡度相关法研究发现,冬小麦灌浆期瞬态水分利用效率日变化曲线为倒"U"型,且早晚时段内迅速升降变化特征与农田 CO_2 通量和潜热通量强度升降初始时间有一定关系。上述研究试验地点均在同一站点,而对于同类作物不同方法测定的水分利用效率日变化曲线特征差异、以及相同方法所观测的不同作物水分利用效率日变化曲线特征类同这一现象的原因,是否与测定方法原理不同有关尚需进一步深入探讨和研究。

参　考　文　献

1　许　迪,吴普特,梅旭荣等.我国节水农业科技创新成效与进展.农业工程学报,2003,19(3):5~9

2　康绍忠,张建华,梁宗锁等.控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路.干旱地区农业研究,1997,15(1):1~6

3　王天铎.黄淮海平原水资源的农业利用问题之二——水利用的效率.农业现代化研究,1991 (4):33~37

4　黄占斌,山　仑.不同供水下作物水分利用效率和光合速率日变化的时段性及其机理研究.华北农学报,1999,14(1):47~52

5　康绍忠,史文娟,胡笑涛等.调亏灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响.农业工程学报,1998 (4):82~87

6　沈秀瑛,戴俊英,胡安畅等.玉米叶片光合速率与光、养分和水分及产量关系的研究.玉米科学,1994,2(3):56~60

7　房全孝,陈雨海,李全起等.灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究.农业工程学报,2004,20(4):34~39

8　施建忠,王天铎.小麦冠层不同层次叶片水分利用率的研究——光合速率与蒸腾速率之比(P/T)的模拟.农田生态系统试验研究.北京:气象出版社,1996.1~13

9　李　俊,于沪宁,刘苏峡.冬小麦水分利用效率及其环境影响因素分析.地理学报,1997,52(6):351~361

10　杨晓光,于沪宁.农田生态系统二氧化碳通量与群体水分利用率研究.地理科学进展,1998,17(4):16~24

11　张永强,沈彦俊,刘昌明等.华北平原典型农田水、热与 CO_2 通量的测定.地理学报,2002,57(3):333~342

12　杨晓光,于沪宁.土壤水分对夏玉米农田 CO_2 通量和群体水分利用率的影响.农业工程学报,1999,15(3):113~118

13　张荣铣,张玉忠,沈允钢.不同小麦种光合作用对光、温、CO_2 及水分胁迫的反应.作物学报,1995,21(2):161~164

14　Angus J.F., Van Herwaarden A. F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. Agronomy Journal, 2001, 93(2): 290~298

15　Armen R. Kemaniana, Claudio O. Stöcklea, David R. Hugginsb. Transpiration-use efficiency of barley. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 130(1~2):1~11

16　Alistair M. Hetherington, F. Ian Woodward. The role of stomata in sensing and driving environmental change. Nature, 2003, 424: 901~908