第57卷 第3期 地 理 学 报 Vol.57, No.3
2002年5月 ACTA GEOGRAPHICA SINICA May, 2002

华北平原典型农田水、热与CO_2通量的测定

张永强[1,2], 沈彦俊[2], 刘昌明[1,2], 于 强[1], 孙宏勇[2], 贾金生[1], 唐常源[3], A. Kondoh[3]

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 中国科学院石家庄农业现代化研究所, 石家庄 050021;
3. 日本千叶大学 *1-33 Yayoi, Inage, Chiba 263-8522, Japan*)

摘要: 在中国科学院栾城农业生态试验站用波文比－能量平衡法与涡度相关技术对净辐射通量(R_n)、潜热通量(λE)、感热通量(H)、土壤热通量(G)与冠层CO_2通量(F_{CO2})进行了长期定位研究。结果显示R_n大部分用于作物潜热的消耗, 连续2年4个生长季$\lambda E/R_n$都在70 %以上, 在作物生育盛期, 夏玉米$\lambda E/R_n$略高于冬小麦, H/R_n都在15%左右, G/R_n在5 %－13 %之间, 且冬小麦G/R_n明显高于夏玉米。蒸发比值(EF)在不同的理想环境条件下, 随着可供能量(R_n–G)的增加表现出先迅速下降, 后缓慢下降, 最后趋于稳定的趋势, 并在冬小麦环境条件下得到了验证。直角双曲线模型可以模拟F_{CO2}随光通量密度($PPFD$)的响应过程。晴天冠层水分利用效率(WUE)不是在正午出现最高值, 当$PPFD$达到1500 μmol m^{-2} s^{-1}左右时, WUE却略有下降。

关 键 词: 潜热通量; 感热通量; CO_2通量; 水分利用效率; 华北平原

中图分类号: P332.2

1 引言

蒸散是陆地水循环系统的重要组成部分, 在全球尺度上蒸散量可达降水总量60%以上[1]。蒸散与气孔导度, 碳交换与植物冠层水分利用效率的耦联, 成为了生态系统的关键控制器[2,3]。陆地覆被的大面积变化造成蒸散量的减少, 可能减弱水循环中降水和径流的再循环过程[4,5]。作物用水的99 %通过蒸腾而散失, 准确的测定作物的蒸散过程和机制显得非常重要, 在水资源缺乏的地区显得尤为重要。华北平原作为我国粮食主产区之一, 水资源的匮乏已成为威胁农业生产的最大障碍[6]。20世纪90年代以来, 本区工农业的发展, 再加上降水量普遍小于80年代, 更加剧了这种缺水趋势[7]。

收稿日期: 2001-12-16; **修订日期**: 2002-03-26

基金项目: 国家自然科学重大基金项目 (40071008, 49871020, 49890330); 河北省院士节水项目 (01220703D); 中日国际合作项目及地理科学与资源研究所领域前沿项目 (CXIOG-C003-03) [**Foundation Item:** National Natural Science Foundation of China, No. 40071008, 49871020, 49890330; Academician Agricultural Water-saving Foundation, Hebei Province of China, No. 01220703D; Special Fund for Major State Basic Research Project, No. CXIOG-C003-03]

作者简介: 张永强 (1976-), 男, 内蒙古包头市人, 博士生。主要从事界面水文过程、作物生长模型的应用研究。
E-mail: zhangyq@igsnrr.ac.cn

333-342 页

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

CO_2浓度的变化联系到气候、生态以及作物生理等许多问题。从全球尺度上看，大气CO_2浓度的增加给全球造成“温室效应”已成为共识；在局地的时间、空间尺度上CO_2通量的研究成为了植物光合和水分利用效率研究的手段[8]。对CO_2通量的试验观测及模拟CO_2增加对生态系统的影响成为国际研究的焦点之一[9-11]。目前在植物叶片尺度上研究光合速率及其水分利用效率，已有大量的研究成果[12-14]。在我国对冠层CO_2通量及其水分利用效率的研究不是很多。有些学者采用了波文比能量平衡法进行了一定的研究[15]。国际上目前最先进的方法是涡度相关技术，此法测定CO_2通量以及与水分通量耦合的水分利用效率（*WUE*）已被广泛采用[8, 16-18]，仪器的价格昂贵限制了此法在我国的应用，目前此法测定冠层CO_2通量在我国还鲜为报道。

水、热与CO_2通量的传输和耦合过程可从站点尺度揭示作物冠层蒸散、光合与水分利用效率关系的机制。本文采用波文比能量平衡法、涡度相关技术综合研究华北平原典型农田通量平衡过程，以定量揭示水、热传输的长期变化过程。

2 站点概况与研究方法

2.1 站点简介

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行。本站位于北纬37°50′，东经114°40′，隶属于河北栾城县。研究区地貌特征为太行山山前平原，海拔高度为50.1m。农业生产以冬小麦+夏玉米一年两熟为主，农业生产力高，粮食单产在800~900 kg/hm，可代表整个山前平原农业高产区。农业气候条件为暖温带半湿润半干旱大陆性气候，多年平均降水量481 mm，整个冬小麦生长季的平均降水量仅为130 mm，而整个生长季的耗水量在430 mm以上，降水很难满足作物生长需要，作物易受干旱的胁迫，需大量抽取地下水满足作物生长；夏玉米季正逢雨季，如降水充足基本可满足作物生长，遇旱年同样需大量抽取地下水灌溉。本区粮食高产是以消耗浅层地下水资源为代价的。

2.2 试验设计

研究时段为1999~2001年，进行了长达3年的水、热与CO_2通量的定位观测。试验选择在本站的综合观测试验场，试验区与农区相连，构成了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。

采用美国Campbell公司生产的波文比全天候自动观测系统测定冠层上方2个高度的温、湿度，下层安装在冠层上方1 m，上层安装于冠层上方2 m，随作物高度的增长调节高度，同时测定冠层上方的净辐射通量（R_n）、土壤热通量（G）以及冠层上方的风速。CR10型采集器每隔20分钟采集一组数据，每1周用笔记本电脑采集一次数据，并对系统进行检测。本观测系统1998年进行了试运行，1999年3月份正式运行开始，已进行了长达3年的观测。

全自动的涡度相关系统直接测定潜热通量（λE）、感热通量（H）与冠层CO_2通量（F_{CO2}），安置于综合试验场的铁塔，安装高度为24 m，可代表2.4×2.4 km^{2}范围的通量。潜热通量的测定用KH-20型（Campbell公司）高度灵敏的水汽变动计，可以快速测定大气中水汽的脉动，同时用LI-7500型（Li-Cor公司）CO_2/H_2O开路分析系统，进行了潜热通量的同步测定。显热通量测定采用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。CO_2通量测定采用LI-7500型CO_2/H_2O开路分析系统。它的红外分析器可以准确、快速测定CO_2浓度。本系统安置于2001年小麦季和玉米季，由于仪器比较贵重，没有进行全生育期的观测，观测时段为冬小麦生长盛期，以及夏玉米的大部分生育期。

2.3 波文比—能量平衡法

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

波文于 1926 年定义了波文比 (β), 即某一表面上感热通量 (H) 与潜热通量 (λE) 的比值,其为垂直方向上温度梯度和湿度梯度的函数。用公式表示为：

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\rho_a C_p K_h \frac{\Delta T}{\Delta z}}{\rho_a L K_w \frac{\Delta q}{\Delta z}} = \gamma \frac{K_h \frac{\Delta T}{\Delta z}}{K_w \frac{\Delta e}{\Delta z}} \tag{2-1}$$

式中: λ 为水汽化潜热；E 为水蒸气通量；ρ_a 空气密度；C_p 为空气热容量；K_h 和 K_w 分别为热量和水汽的湍流交换系数，为干湿球常数；ΔT、Δq 和 Δe 分别为两个高度的温度、湿度和水汽压差；Δz 为高度差。

根据相似性原理，假设热量和水汽的湍流交换系数 (K_h=K_w) 相等，且在稳定状态下

$$\beta = \frac{C_p}{L} \frac{\Delta T}{\Delta q} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \tag{2-2}$$

地表能量平衡方程为：

$$R_n = \lambda E + H + G \tag{2-3}$$

方程 (2-1) 和 (2-3) 联立得：

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \tag{2-4}$$

式中: R_n 为净辐射通量；G 为土壤热通量。

潜热通量在能量平衡中的比值可以用一个无量纲的参数蒸发比值 (EF) 来表示，其定义为：

$$EF = \frac{\lambda E}{\lambda E + H} = \frac{\lambda E}{R_n - G} \tag{2-5}$$

将 Penman-Monteith 方程计算的 λE 代入方程 (2-5)，EF 成为了空气动力学导度 (g_a)、冠层导度 (g_c)、饱和水汽压差 (e^*_a-e_a) 和可供能量 (R_n-G) 的函数[19]。

2.4 涡度相关方法

在涡度相关方法中，水、热与 CO_2 通量可以用下列方程表达：

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \tag{2-6}$$

$$\lambda E = \rho L \overline{w'q'} \tag{2-7}$$

$$F_{CO_2} = -\overline{w'c'} \tag{2-8}$$

式中: H 为感热通量，λE 为潜热通量，F_{CO2} 为 CO_2 通量，为气体 c 密度的脉动 (mol/m^3)，为垂直风速的脉动 (m/s)

用直角双曲线模型模拟了叶片净光合速率与光通量密度 ($PPFD$) 的关系，取得了很好的效果[20,21]。引入此模型模拟冠层 CO_2 通量随光强的响应过程。

$$F_{CO_2} = \frac{\alpha I F_{max}}{\alpha I + F_{max}} - R_d \tag{2-9}$$

式中: α 为初始 CO_2 同化效率，F_{max} 为最大净同化速率，I 为光通量密度，R_d 为作物呼吸与土壤呼吸之和。

作物冠层水分利用效率 (WUE) 为冠层 CO_2 净同化速率与蒸散通量的比

$$WUE = \frac{F_{CO_2}}{E} \tag{2-10}$$

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

3 结果与分析

3.1 能量平衡的对比分析

KH-20与 LI-7500 两套涡度相关系统测定潜热通量的相关系数 R^2 为 0.9845，斜率为 1.0856 (图 1)，说明两套系统具有非常高的一致性。因此可以看出涡度相关系统方法测定水汽通量不仅具有高的精确性，而且有很好的稳定性。涡度相关系统与波文比方法测定潜热通量的比较显示，两种方法测定的水汽通量相关性并不很好，相关系数 R^2 只有 0.46 左右 (图 2)。这并不能由此推断波文比—能量平衡法测定的潜热通量不可靠，因为波文比观测系统与涡度相关系统安装在冠层上方的高度不同，不能排除尺度效应的影响，涡度相关系统安装于冠层上方 8m，而波文比系统的下壁只安装于冠层上方 1m。当然波文比—能量平衡法测定潜热通量时，有其自身理论上的缺陷，如强平流时就限制其使用了[22]。涡度相关系统测定潜热通量与感热通量和与波文比系统测定冠层上方可供能量 (R_n-G) 的比较显示，λE+H 远远小于 R_n-G (图 3) 这一结果说明涡度相关系统测定的感热与潜热通量之和不等于可供能量，存在能量不平衡性。许多学者得出相似的结果，λE+H 仅为 R_n-G 的 60~90 %左右[23,24]。以下因素可能造成这种现象，首先，λE 的测量值可能偏低，涡度相关系统测定水汽浓度的能量谱与频率比小于 - 2/3 时，传感器测定水汽浓度值比实际值偏小；其次，尺度效应的影响。具体的原因还有待于深入的研究。

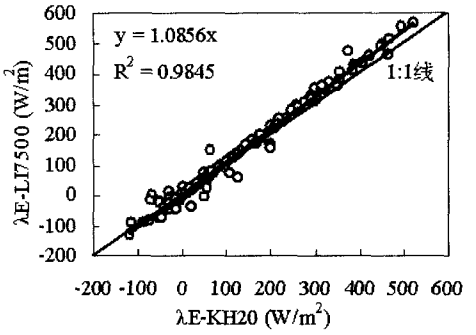

图 1 两套涡度相关系统测定潜热通量结果比较

Fig.1 Comparison of latent heat flux (λE_LI7500) by an eddy correlation system LI-COR7500 and that (λE_KH20) by another KH20

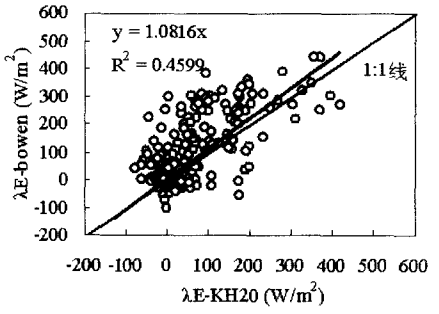

图 2 涡度相关法与波文比—能量平衡法测定潜热通量结果比较

Fig.2 Comparison of latent heat flux (λE_KH20) by an eddy correlation system KH20 and that (λE_bowen) by Bowen-ratio energy balance technique

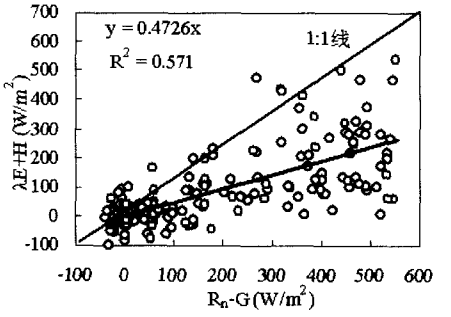

图 3 涡度相关系统测定的潜热通量 (λE) 与感热通量 (H) 之和与波文比 - 能量平衡法测定的可供能量 (R_n-G) 比较

Fig.3 Comparison of the sum of latent heat flux and sensible heat flux ($\lambda E+H$) by eddy correlation system with available energy (R_n-G) by Bowen-ratio energy balance technique

3.2 玉米冠层水、热与 CO_2 通量的日变化过程

将 2001 年夏玉米季 DOY210~DOY234 (2001/7/29~2002/8/22) 每天各时段水、热、

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

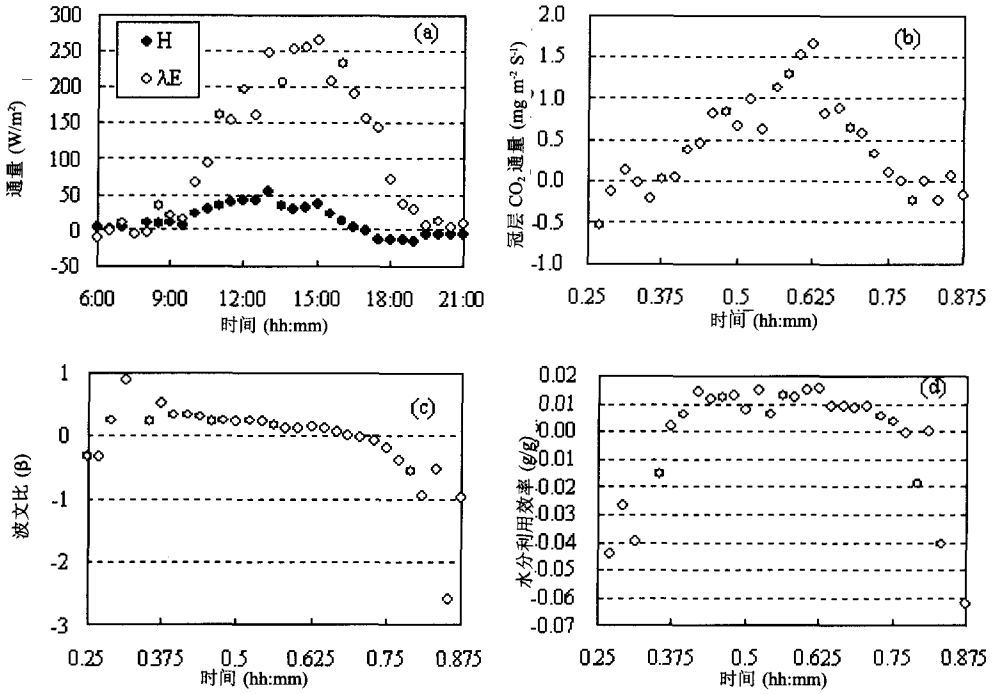

图 4　玉米冠层水、热 (a)、CO_2 通量 (b)、波文比 (c) 及水分利用效率 (d) 的日变化过程 (2001 年)

Fig. 4　Diurnal patterns of latent heat flux, sensible heat flux, CO_2 flux, Bowen ratio and water use efficiency from corn canopy (2001)

CO_2 通量值进行平均，得到冠层潜热通量、感热通量、CO_2 通量、波文比及 *WUE* 的日变化过程 (图 4a、4b、4c 和 4d)。此观测期为抽穗～灌浆期，观测结果可代表夏玉米生长盛期的日变化过程。潜热通量与感热通量的日变化过程呈倒 "U" 字型，二者出现峰值的时间不同，λE 的峰值时间为 14：00~15：00 之间，而 H 的峰值时间为 13：00 左右，且峰值分别为 291.71W/m² 与 53.04W/m² (图 4a)。CO_2 通量日变化也呈不对称的倒 "U" 字型变化，峰值出现的时间为 14:00~15:00，与λE 出现峰值的时间基本一致，峰值为 1.65$mg\ m^{-2}\ s^{-1}$ (图 4b)。波文比的日变化过程则呈早晨迅速升高，然后缓慢下降的趋势，峰值为 0.9 (图 4c)。*WUE* 的日变化呈早晨到 10:00 迅速升高，10:00-15:00 稳定阶段，15:00 以后下降阶段，峰值不很明显，最高值在 0.015 g/g 左右 (图 4d)。*WUE* 的这种变化趋势说明，早晨到 10：00 F_{CO2} 的上升速率要大于λE，而 10:00~15:00 左右二者呈比较一致的变化趋势，15:00 以后λE 的下降速率要大于 F_{CO2}。

3.3　冬小麦、夏玉米冠层能量平衡的季节变化过程

1999、2000 年度冬小麦和夏玉米冠层的能量平衡季节变化过程中，所有的能量平衡各分量都是 10:00~15:00 的平均值 (图 5)，此时波文比法测定结果的误差最小[25]。如图 5 所示，冬小麦选择返青－灌浆期，夏玉米选择拔节－灌浆期进行测定，雨天各通量的中午平均值被排除。4 个生长季 R_n、λE 变化比较大，R_n 变化与 λE 变化一致，且 λE 的值与 R_n 相差不大。H 和 G 相对与 λE 都较小，且变化相对平缓。表 1 显示了 1999 和 2000年度 R_n, λE, H 和 G 地表能量通量的季节平均值，1999 和 2000 年度冬小麦生长季的 R_n 分别是 406.45W m^{-2} 、374.77W m^{-2}，夏玉米生长季 R_n 分别是 392.83W m^{-2} 和 381.91W m^{-2}。在这 4 个生长季里潜热通量与净辐射通量的比值 $\lambda E/R_n$ 都大于 70 %，且玉米季 $\lambda E/R_n$ 略微高于冬小麦生长季。4 个生长季 H/R_n 在 13 % ~ 16 %之间变化，小

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

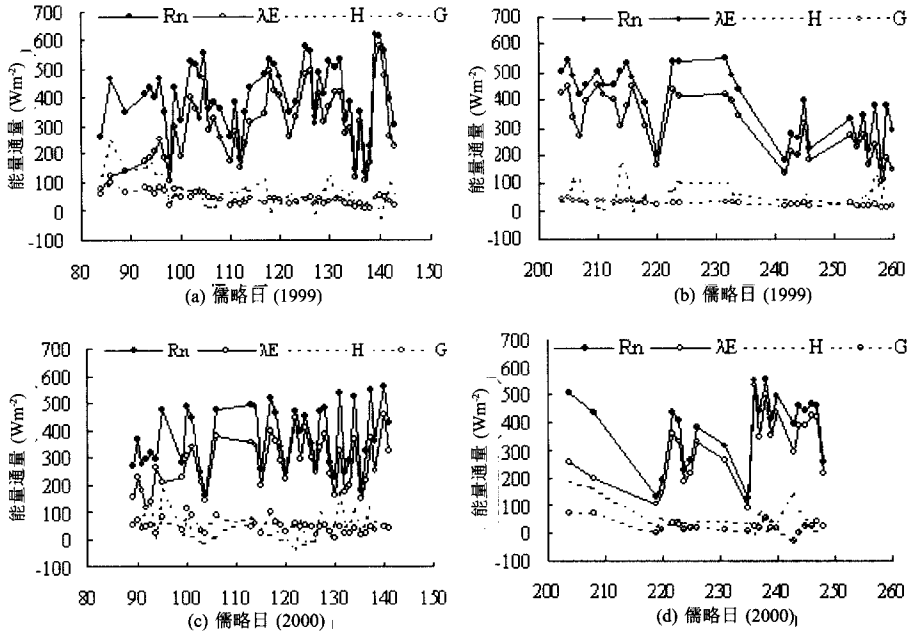

图 5 a、b、c 和 d 1999、2000 年度波文比系统测定冠层表面净辐射通量 (R_n)、潜热通量 (λE)、感热通量 (H)及土壤热通量 (G) 中午平均值 (10:00~15:00) 的季节变化过程

Fig. 5 a, b, c, d. Mean midday (10:00 to 15:00) surface energy fluxes in 1999 and 2000. Net radiation flux (R_n), latent heat flux (λE), sensible heat flux (H) and soil heat flux (G) were measured by BREB technique

麦季 H/R_n 接近于玉米季。4 个生长季 G/R_n 在 5%~13%, 小麦季 G/R_n 明显高于玉米季。玉米季 5%~7%的净辐射通量用于土壤热传导，而 10%~13%的净辐射通量用于土壤热通量的消耗。4 个生长季 β 的均值在 0.22~0.31 之间。

3.4 EF 在不同环境条件下的响应过程

图 6 显示了在理想件下 EF 随 R_n-G 的变化过程 (气温 T_a = 20℃；饱和压差 e_a^* - e_a = 10 hpa)，每条曲线表示某种环境条件下的 EF 对 R_n - G 的响应过程。冠层导度 g_c = 0.02 m/s 表示水分充分供应条件；g_c = 0.005 m/s 表示水分胁迫条件。 g_a = 0.01m/s 表示矮小植物 (如短草) 的环境条件；g_a = 0.1 m/s 表示高大植物 (如森林) 的环境条件。农田冬小麦选择 g_a = 0.04 m/s，g_c = 0.02 m/s。

在水分胁迫条件下 EF 明显小于充分供水条件下的 EF 值 (图 6)。高大植物的 EF 明显高于矮小植物的，而冬小麦正好居于二者之间 (在同样的环境条件下)。在每种环境条件下随着 R_n-G 的增加, EF 呈逐渐减小的趋势。当 R_n-G 小于 200 W/m² 时，EF 下降速

表 1 1999、2000 年度作物冠层表面净辐射通量 (R_n)、潜热通量 (λE)、感热通量 (H) 及土壤热通量 (G) 及比值的平均值

Tab. 1 Seasonal average surface energy fluxes and the relative ratio in 1999 and 2000.

Unit of fluxes: W m^{-2}. β represents the Bowen ratio

能量通量和比值 单位	R_n W m^{-2}	λE W m^{-2}	H W m^{-2}	G W m^{-2}	$\lambda E/R_n$	H/R_n	G/R_n	β
冬小麦 (1999)	406.45	297.99	63.82	44.63	73.32%	15.70%	10.98%	0.31
夏玉米 (1999)	392.83	303.78	62.51	26.53	77.33%	15.91%	6.75%	0.25
冬小麦 (2000)	374.77	276.91	50.86	47.01	73.89%	13.57%	12.54%	0.22
夏玉米 (2000)	381.91	309.45	51.43	21.03	81.03%	13.47%	5.51%	0.22

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

率很快，当 R_n–G 大于 200 W/m² 时呈缓慢的下降趋势，最后在小于 1.0 的某值趋于稳定，稳定值的大小有 g_a 和 g_c 决定。

在冬小麦大田环境条件下，*EF* 随 R_n–G 的变化过程，很接近于理想条件下 *EF* 随 R_n–G 变化的响应过程 (图 7)。R_n–G 接近于 0 W/m² 时，*EF* 的值变动很大，最大可达 8.0 左右，随 R_n–G 的逐渐增大，*EF* 迅速下降，R_n–G 增加到 200W/m² 以后，*EF* 下降逐渐趋于平缓，最后稳定在 0.9 附近。玉米季 *EF* 随 R_n–G 的变化趋势并不明显，可能由于玉米生长季正是雨季，小气候环境的不稳定，土壤水分的剧烈变动造成的。

3.5 CO_2 通量对光强的响应

图 8 所示为 CO_2 净同化速率随光强变化的响应过程。由图可见随着光强的增加 F_{CO2} 呈增加的趋势，由于 CO_2 通量受其它环境因素的影响 (如气温、湿度、土壤湿度等)，F_{CO2} 对光强的响应比较散。用直角双曲线模型模拟响应过程，相关系数 R^2 为 0.7 左右，样本数量 *N* 为 187，α 为 0.00463，F_{max} 为 3.726 mg m^{-2} s^{-1}，R_d 为 0.455 mg m^{-2} s^{-1}。R_d 模拟为土壤呼吸与作物呼吸之和，由于仪器没有到位，同期土壤 CO_2 排放速率没有观测，但 2000 年夏玉米季抽穗－灌浆期白天土壤 CO_2 排放速率在 0.15~0.35 mg m^{-2} s^{-1} 之间，此期间玉米叶片呼吸速率较大，可达 0.14 mg m^{-2} s^{-1} 左右[20]。因此可以认为此模型可以模拟冠层 CO_2 通量对光强的响应过程。

3.6 *WUE* 对光强的响应过程

与单叶水分利用效率相比，冠层水分利用效率更接近于实际情况，可表征田间或区域的水分利用效率[26]。

图 9 为冠层水分利用效率随 *PPFD* 的响应过程，WUE 为 Li-7500 测定的 CO_2 通量与 KH-20 测定的水汽通量之比。由图 9 可见在 *PPFD* 在 0 μmol m^{-2} s^{-1} 左右时水分利用效率变化比较大，变幅在 -0.1–0.02 g/g 之间，随着 *PPFD* 的增加 *WUE* 呈增加趋势，当 *PPFD* 达到 300 μmol m^{-2} s^{-1} 以后 *WUE* 变化平稳，当 *PPFD* 达到 1500 μmol m^{-2} s^{-1} 时 *WUE* 却略有下降。这也说明在晴天正午时水分利用效率不一定最高，CO_2 的同化速率也不是最高 (图 4b)，这种现象和单叶在午间遇强光时出现的光合“午休”现象是一致的。

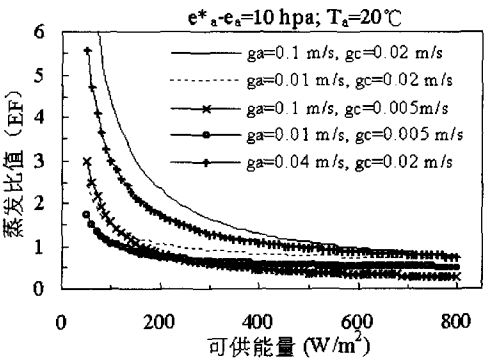

图 6　在不同空气动力学导度 (g_a) 与冠层导度 (g_c) 条件下蒸发比值 (*EF*) 与可供能量 (R_n–G) 的关系

Fig. 6 Relationship between evaporative fraction (EF) and available energy (R_n-G) under a range of aerodynamic (g_a) and canopy conductance (g_c) values. All curves represent moderate air temperature (T_a = 20℃) and vapor pressure deficit (e^*_a – e_a = 10hpa) conditions

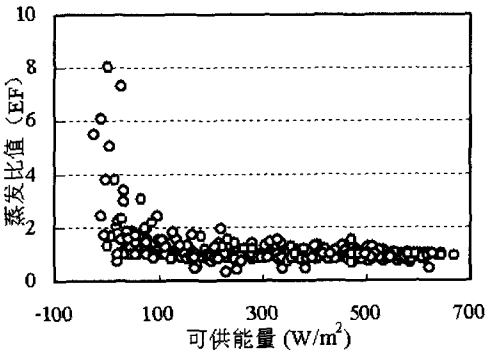

图 7　冬小麦蒸发比值 (*EF*) 随可供能量 (R_n-G) 的变化过程 (2001/5/22~2001/6/4)

Fig.7 Response process of evaporative fraction (EF) to available energy (R_n–G) from winter wheat (2001/5/22~2001/6/4)

4　讨论

华北平原水资源匮乏已直接威胁到农业的可持续生产，而农业用水的绝大多数通过

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

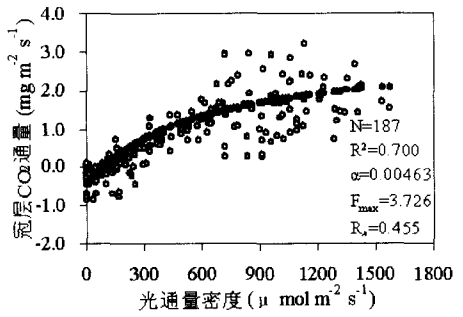

图 8 冠层 CO_2 通量 (F_{CO_2}) 对光通量密度 (*PPFD*) 的响应及模拟

Fig.8 Response and simulation of carbon dioxide flux density (F_{CO_2}) to photosynthesis photo flux density (*PPFD*)

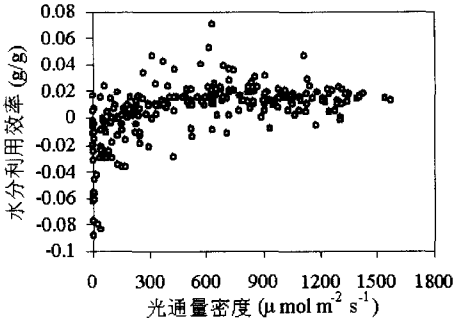

图 9 冠层水分利用效率 (*WUE*) 对光通量密度 (*PPFD*) 的响应

Fig.9 Response of canopy water use efficiency (*WUE*) to photosynthesis photo flux density (*PPFD*)

作物蒸散散失到大气中的，且 λE 是作物冠层能量平衡的主要分量，连续两年四个生长季 $\lambda E/R_n$ 都在 70 % 以上。蒸发比值 (*EF*) 随 R_n–G 的变化可见，*EF* 在理想的不同环境条件，随可供能量 (R_n–G) 的增大都表现为先迅速下降，然后缓慢下降，最后稳定到小于 1.0 的某个值，这个值的大小由空气动力学导度 (g_a) 与冠层导度 (g_c) 决定的。在冬小麦大田环境条件下，由于灌水比较充足，*EF* 随 R_n–G 的变化类似于理想条件，最后 *EF* 稳定在 0.9 左右。华北平原的农民为了追求粮食高产，灌溉用水没有定额，往往是大水漫灌，因此造成很高的 EF 值，如果在一定程度上减少灌水量，使作物接受一定程度的水分胁迫势必降低 *EF*，减少水分耗散，节约水资源。水分胁迫生育期的选择、水分胁迫量需进行专门讨论[7]。

在晴天正午 *PPFD* 出现最高，冠层水平 *WUE* 却没有相应达到最高值，当 *PPFD* 达到 1500 μ *mol* m^{-2} s^{-1} 左右时，*WUE* 却略有下降。可以认为如果作物长期接受强光照射，会降低作物的水分利用效率，不仅表现在叶片尺度上，本实验说明在冠层尺度上同样如此。

涡度相关相关技术测定农田水、热与 CO_2 通量不仅具有非常高的精度，而且稳定性比较好，常规的波文比能量平衡法在研究潜热通量 (λE)、感热通量 (*H*) 时仍然适用，但必须排除平流的影响。综合运用能量平衡法与涡度相关技术分析水、热通量时，首先考虑尺度效应的影响，其次考虑能量不平衡性。直角双曲线模型一般用于模拟叶片尺度光合速率对光强的响应过程。在冠层尺度引用此模型国内还鲜为报道。本研究显示直角双曲线模型可以用于模拟冠层 CO_2 通量对光强的响应过程。

参考文献 (References)

[1] L'vovich M I, White G I. Use and transformation of terrestrial water systems. In: W C C Turner, B L *et al.* (eds), The Earth as Transformed by Human Action. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990. 235-252.

[2] Woodward F I, Smith T M. Global photosynthesis and stomatal conductance: modeling the controls by soil and climate. *Botanical Resources*, 1994, **20**: 1-41.

[3] Sellers P J, Bounoua G J, Collatz D A *et al.* Comparison of radiative and physiological effects on doubled atmospheric CO_2 on climate. *Science*, 1996, **271**: 1402-1406.

[4] Shukla J, Bobre C A, Sellers P J. Amazon deforestation and climate change. *Science*, 1990, **247**: 1322-1325.

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

[5] Durbridge T B, Henderson-Sellers. A large-scale hydrological responses to tropical deforestation. In: Wilkinson B (ed.), Macroscale Modeling of the Hydrolosphere. UK: IAHS Press, 1993. 103-112.

[6] Liu Changming, He Xiwu. Strategy of Water Problem of 21st Century in China. Beijing: Science Press, 1996. 45-50. [刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略. 北京: 科学出版社, 1996. 45-50.]

[7] Zhang Yongqiang, Liu Changming, Yang Yonghui *et al.* Effect of soil water stress on CO_2/H_2O exchange parameters in wheat leaves. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, **20**(2): 8-11. [张永强, 刘昌明, 杨永辉 等. 水分胁迫对冬小麦叶片 H_2O/CO_2 交换参数的影响. 生态学杂志, 2001, **20**(2): 8-11.]

[8] Judd M J, Prendergast P T, McAneney K J. Carbon dioxide and latent heat flux measurements in a windbreak-sheltered orchard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, **66**: 193-210.

[9] Luo Yiqi, Hui Dafeng, Cheng Weixin *et al.* Canopy quantum yield in a mesocosm study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **100**(1): 35-48.

[10] Nobuko Saigusa, Takehis Oikawa, Sha Liu. Seasonal variations of the exchange of CO_2 and H_2O between a grassland and the atmosphere: an experimental study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **89**(2): 131-140.

[11] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **108**(4): 293-315.

[12] Liao Jianxiong, Wang Genxuan. The diurnal variations of photosynthetic rate and water use efficiency in Setaria italica leaves. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1999, **25**(4): 362-368. [廖建雄, 王根轩. 谷子叶片光合速率日变化及水分利用效率. 植物生理学报, 1999, **25**(4): 362-368.]

[13] Shi Jianzhong, Wang Tianduo, Li Linying. Experimental study and mathematical simulation of water use efficiency in wheat leaves affected by some environmental factors. *Acta Botanica Sinica*, 1994, **36**(12): 940-946. [施建忠, 王天铎, 李临颖. 环境因子对小麦叶片水分利用效率的实验研究和数值模拟. 植物学报, 1994, **36**(12): 940-946.]

[14] Zheng Youfei, Wan Changjian, Yan Jingyi *et al.* Water use efficiency and its optimization in wheat. *Agricultural Meterology of China*, 1997, **18**(4): 13-28. [郑有飞, 万长建, 颜景义 等. 小麦水分利用效率及其最优化问题. 中国农业气象, 1997, **18**(4): 13-28.]

[15] Yang Xiaoguang, Yu Huning. A study on the CO_2 flux density and the water use efficiency of crop community in a field ecosystem. *Progress in Geography*, **17**(4): 16-24. [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效率研究. 地理科学进展, 1998, **17**(4): 16-24.]

[16] Morre C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, **37**: 17-35.

[17] Villalobos F J. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **88**: 77-83.

[18] Baldocchi D. A comparative study of mass and energy exchange over a closed C_3 (wheat) and an open C_4 (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, **67**: 191-220.

[19] Zhang L, Lemeur R. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, **74**: 139-154.

[20] Lu Peiling, Yu Qiang, Ma Rui. Response of photosynthesis and transpiration of winter wheat to environment in field in North China Plain. *Progress in Geography*, 1998, **17**(Supp.): 190-197. [陆佩玲, 于强, 刘建栋. 冬小麦光合作用与蒸腾作用对环境因子的响应. 地理科学进展, 1998, **17**(增): 190-197.]

[21] Ma Rui, Yu Qiang, Xie Xianqun *et al.* Physiological response of summer maize to meteorological factors. *Progress in Geography*, 1998, **17**(Supp.): 268-275. [马瑞, 于强, 谢贤群 等. 夏玉米生理因子对气象要素响应模拟. 地理科学进展, 1998, **17**(增): 268-275.]

[22] Zuo Dakang, Qin Wenhan. Progress of evaporation research. In: Calculation and Measurement of Evaporation in Farmland. Beijing: Meteorological Press, 1991. 14-21. [左大康, 覃文汉. 国外蒸发研究进展. 见: 农田蒸发—测定与计算. 北京: 气象出版社, 1991. 14-21.]

[23] Constantin J, Inclan M G, Raschendorfer M. The energy budget of a spruce forest: field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME). *Journal of Hydrology*, 1998, **212–213**: 22-35.

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

[24] Kelliher F M, Hollinger D, Schulze E D *et al.* Evaporation from an eastern Siberian larch forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **85**: 135-147.

[25] Held A A, Steduto P, Orgaz F *et al.* Bowen ratio/energy balance technique for estimating crop net CO_2 assimilation, and comparison with a canopy chamber. *Theor. Appl. Cli.*, 1990, **42**: 203-213.

[26] Wang Huixiao, Liu Changming. Supply and demand of water resources and analysis of crop water use efficiency in the North China Plain. *Eco-Agriculture Research*, 1999, **7**(3): 11-15. [王会肖, 刘昌明. 华北平原水资源供需与作物水分利用效率指征分析. 生态农业研究, 1999, **7**(3): 11-15.]

Measurement and Analysis of Water, Heat and CO_2 Flux from a Farmland in the North China Plain

ZHANG Yongqiang[1,2], SHEN Yanjun[2], LIU Changming[1,2], Yu Qiang[1],
SUN Hongyong[2], JIA Jinsheng[1], TANG Changyuan[3], AKIHIKO Kondoh[3]

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing* 100101, *China*;
2. *Institute of Agricultural Modernization Research, Shijiazhuang* 050021, *China*;
3. *Chiba University*, 33 *Yayoi, Inage, Chiba* 263-8522, *Japan*)

Abstract: Surface energy fluxes including net radiation (R_n), latent heat flux (λE), sensible heat flux (H), soil heat flux (G) and carbon dioxide flux (F_{co2}) were measured by Bowen-ratio energy balance technique and eddy correlation technique from a farmland at Luancheng Agro-ecosystem Station, Chinese Academy of Sciences in the North China Plain from 1999 to 2001. Seasonal variation of a ratio of latent heat flux (λE) divided by net radiation flux (R_n) showed that R_n is mainly used to evapotranspirate by crops. $\lambda E/R_n$ was all higher than 70% during the four observed seasons in the two years. $\lambda E/R_n$ above maize canopy is slightly higher than that above winter wheat canopy. Seasonal average ratio of sensible heat flux (H) divided by R_n keeps about 15% above the field surface; seasonal average ratio of conductive heat flux (G) divided by R_n varies between 5% and 13%, and the average G/R_n from wheat canopy is evidently higher than that from maize canopy. Under given environmental conditions, when the available energy (R_n-G) is less than 200 W/m^2, evaporative fraction (EF) decreases sharply; below R_n-$G \approx 200$ W/m^2, EF decreases gradually until stabilizing at some specific value less than 1.0. The response process of EF to R_n-G under winter wheat field conditions is similar to that under the given conditions. With the increase of photosynthesis photo flux density ($PPFD$), carbon dioxide flux (F_{co2}) changes according to the curve of Michaelis-Mente. Water use efficiency (WUE) does not show the maximum when $PPFD$ is the maximum at noon. On the contrary, WUE gradually decreased with $PPFD$ equal to 1500 μmol m^{-2} s^{-1}.

Key words: latent heat flux (λE); sensible heat flux (H); carbon dioxide flux; water use efficiency (WUE); the North China Plain

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.