

冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水、热通量日变化

郭家选^{1,2}, 梅旭荣^{1*}, 林琪², 赵全胜¹, 卢志光³

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 水资源与旱地农业研究室, 北京 100081;

2. 莱阳农学院农学系, 莱阳 265200; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要:以冬小麦农田尺度为研究对象, 采用涡度相关技术测定农田能量平衡各分量, 研究暂时水分胁迫状况下农田蒸散通量和蒸发比值(evaporative fraction)日变化特征。结果表明, 冬小麦在农田郁闭(LAI ≥ 3)且土壤含水量为田间持水量的55%~65%时, 晴天日农田潜热通量日变化在正午前后存在明显的“蒸散高地(evapotranspiration plateau)”现象, 持续时间达2.5~4h, 表现为蒸散通量增量日变化突然极显著降低, 即蒸散通量呈相对稳定、甚至下降的变化趋势; 反映在蒸发比值日变化过程方面, 夜间和日出日落前后时刻蒸发比值变化较大, 7:00~18:00时段内蒸发比值曲线近似呈倒“S”型, 9:00~16:00时段内蒸发比值比较稳定, 正午前后蒸散高地出现时, 蒸发比值有所下降大约在0.5~0.65范围内, 12:00~13:30时段内蒸发比值平均值接近9:00~16:00时段内蒸发比值平均值。

关键词: 涡度相关技术; 水分胁迫; 潜热通量; 蒸发比值

文章编号: 1000-0933(2006)01-0130-08 **中图分类号:** P464, Q945, S154.1, S181 **文献标识码:** A

Diurnal variation of water and heat flux under transient water stress in a winter wheat field

GUO Jia-Xuan^{1,2}, MEI Xu-Rong^{1*}, LIN Qi², ZHAO Quan-Sheng¹, LU Zhi-Guang³ (1. Laboratory of Water Resources and Dryland Farming, Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Department of Agronomy, Laiyang Agricultural College, Laiyang 265200, China; 3. College of Resource and Environmental Science, Chinese Agricultural University, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 130~137.

Abstract: An understanding how changes in evapotranspiration and evaporative fraction (EF), the ratio of latent heat flux to the available energy (the value of net radiation flux subtract soil heat flux), is important for determining the irrigation schedule in arid and semiarid area. In the present work, the evapotranspiration and EF over a closed-canopy of winter wheat with transient water stress was investigated over daily time courses at Luancheng Agro-ecosystem Station, Chinese Academy of Science in the North China Plain from 2001 to 2002. Surface energy fluxes including net radiation (R_n), latent heat flux (LE), sensible heat flux (H) and soil heat flux (G) were measured based on the eddy covariance technique. When the soil water content was below 65% of field moisture capacity, a plateau in the evapotranspiration occurred during the middle part of clear days. The plateau was marked by a sudden change in slope of the evapotranspiration curve, and lasted for about 2.5~4hr. Evapotranspiration flux indicated a change in the trend from a decline to relative stabilization. The EF showed a distinct diurnal variation. The stabilization of EF over daily time courses differed during each time period. It had a large variations during nighttime, around

基金项目: 国家 863 资助项目(2002AA2Z4311; 2002AA2Z4021; 2004 AA2Z4050); 国家科技部社会公益研究专项资助项目; 国家科技部社会公益重点资助项目(2004DIB3J095); 农业结构调整重大技术研究资助项目; 挑战计划项目博士基金资助项目(630309)

收稿日期: 2005-05-08; **修订日期:** 2005-10-17

作者简介: 郭家选(1966-), 女, 山东莱西人, 博士, 副教授, 主要从事微气候和农田节水研究. E-mail: gsfmn@tom.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: meixr@caj.ac.org.cn

Foundation item: National 863 Program (No. 2002AA2Z4311; 2002AA2Z4021; 2004 AA2Z4050), National Society Commonweal Research Special Foundation Project of Ministry of Science and Technology of China, National Society Commonweal Research Key Program of Ministry of Science and Technology of China (No. 2004DIB3J095), Agricultural Structure Adjustment Research Challenge Program, Ph.D. Program Foundation of Laiyang Agricultural College (No. 630309)

Received date: 2005-05-08; **Accepted date:** 2005-10-17

Biography: GUO Jia-Xuan, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in microclimate and farmland water-saving. E-mail: gsfmn@tom.com

sunrise and at sundown, but little variation during the daytime from 9:00 to 16:00, and shape of the curve of EF was an inverse "S" shape from 7:00 to 18:00. The value of EF declined and ranged from 0.5 to 0.65 when the evapotranspiration plateau occurred when the relative moisture of the soil ranged from 55% to 65%. Midday EF at 12:00 ~ 13:30 was nearly equal to the average daylight EF at 9:00 ~ 16:00 over a relatively homogeneous winter wheat field under clear sky conditions.

Key words: eddy covariance technique; transient water stress; latent heat flux; evaporative fraction

植物响应太阳辐射、气温和湿度等气象环境要素的日尺度变化节律,其光合、蒸腾作用以及气孔开度等生理活动具有节律性的昼夜变化。在土壤水分亏缺时,晴天日正午前后就会产生短时间的植物体内水分胁迫,影响植物生理活动的正常进行,这种暂时水分胁迫类似于昼间水分亏缺,区别在于后者当地温过低或土壤内含盐量过多时均可造成水分胁迫。我国北方干旱和半干旱地区由于水资源匮乏农作物经常遭受水分胁迫的影响,为了制定实时补充灌溉计划和管理策略,需要对水分胁迫的影响进行定量化。农田蒸散是发生在土壤-植被-大气系统这一复杂体系内的连续过程,其通量多少与植物生理活动、生态和小气候特征密切相关。在较小的时间和空间尺度内,蒸散通量的确定将有助于了解植物光合作用和水分利用效率等生理过程;而植物和环境的相互作用以及人类管理活动对其影响,可以从植株水平或数公顷大面积的空间尺度,持续观测时间为数分钟、数天甚至季节时间尺度进行研究。然而,对于水资源合理利用和管理,以及合理的灌溉制度、灌溉方式与灌溉时间的确定,农田尺度甚至区域范围内生育期以及季节蒸散通量变化规律则具有更大的生产实践指导意义。

为了缓解水资源短缺问题,提高作物水分利用效率,国内外科研人员提出了非充分灌溉、有限灌溉和调亏灌溉等不同的水分调节措施,并对植物生理机制和水分利用效率的影响进行了大量研究,证明适时适度水分亏缺显著抑制蒸腾速率,而光合速率下降不明显^[1~3],但研究主要侧重于植物组织和单株生理生态指标的研究^[3,4],关于农田尺度作物群体对水分亏缺的响应缺乏研究,而且该方面的有关研究将为农田进行科学灌溉管理提供理论依据。本文以冬小麦农田尺度为研究对象,采用涡度相关技术,测定农田生态系统能量平衡各分量,分析和探讨土壤水分不足状况下农田潜热通量的日变化规律。

1 研究区概况与方法

1.1 研究方法

农田热量平衡方程可简化表示为^[5]:

$$R_n = H + \lambda E + G \quad (1)$$

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 和 H 依据涡度相关原理通过涡度相关技术测定并由下式计算^[6]:

$$H = \rho_a C_p \overline{w'T'} \quad (2)$$

$$\lambda E = \lambda \overline{w'\rho'_v} \quad (3)$$

式中, T' 、 ρ'_v 和 w' 为近地面大气湍流运动引起的温度($^{\circ}C$)、湿度(g/m^3)和垂直风速(m/s)的脉动量, ρ_a 为空气密度(g/m^3), C_p 为空气定压比热($J/(kg \cdot K)$), λ 为水汽化潜热(J/g)。

1.2 研究区域自然概况

试验于 2001 ~ 2002 年在中国科学院栾城生态农业系统试验站(N37°50', E114°40')综合观测试验场冬小麦生育期进行。本站隶属于河北省栾城县,研究区地貌特征为太行山山前平原,海拔高度为 50.1m,为大陆性季风型暖温带半湿润半干旱气候。本站多年平均降水量 480.7mm,整个冬小麦生长季的平均降水量仅为 129.8mm,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。该站的地下水埋深从 20 世纪 80 年代的 10m 下降到目前 30m 以下。该站所在地地势平坦,试验地土壤质地为壤土,土层深厚,土壤类型为潮褐土,质地为壤土,土壤比较肥沃,耕层(0 ~ 30cm)有机质含量 1.2% ~ 1.3%,全氮含量 0.07% ~ 0.08%。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 ~ 900kg/hm²,可

代表整个山前平原农业高产区。

1.3 试验设计

本试验基于涡度相关系统进行能量和物质通量测定时对下垫面地形和风浪区的特殊要求,按照当地常规水肥管理进行设计,不设处理和重复,供试冬小麦品种 9204 为当地主栽品种。试验区面积为 $200\text{m} \times 170\text{m}$,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。

1.4 观测项目与方法

冬小麦农田潜热和显热通量由 Campbell 公司生产的涡度相关系统测定。涡度相关仪安装高度为离地表 3m 高度处,涡度相关系统由测定垂直风速、气温和水汽密度 3 部分传感器组成,采用 CSAT3 型三维超声风速仪(a three-dimensional sonic anemometer, Campbell Scientific Inc.)测定风向、水平和垂直风速脉动,KH20 型氦紫外湿度仪(an ultraviolet krypton hygrometer, Campbell Scientific Inc.)测定水汽密度脉动,FW05 型精密细线热电偶(fine wire thermocouple, Campbell Scientific Inc.)测定气温脉动,以 10Hz 频率测定温度、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和显热通量瞬时值,记录 10min 的潜热和显热通量平均值,正值表示物质和能量向大气方向传输。另外,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 深度处,求取平均值作为农田土壤热通量。上述数据由 CR23X 型(Campbell Scientific Inc.)采集器采集。

冬小麦农田 0~20cm 耕层土壤含水量采用烘干法测定,深土层土壤含水量使用英国 IH- II 型中子仪测定,并用烘干法对中子仪测定值进行标定;作物叶面积指数测定时,抽样方法参照“农业气象观测方法”^[7];农业气象要素资料来自试验田附近气象观测场;并且,农田净辐射通量、土壤热通量、土壤含水量以及其它相关项目的田间试验测定,均在涡度相关仪探测范围(footprint)内进行。

2 结果与分析

2.1 农田能量平衡闭合分析

在冬小麦灌浆期进行不同涡度相关仪连续 3d 对比观测(另一涡度相关仪安装高度为 2.5m)。三维超声风速仪(CSAT3)是涡度相关系统的关键组成部分,其正常工作与否直接影响湍流通量数据测定的可靠性,如图 1 所示,本实验所采用不同 CSAT3 测定的虚温值之间具有很好的线性相关关系($r = 0.9986$, $p < 0.01$, $n = 428$)说明显热通量数据的可靠性;另外,开路式 CS7500 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ Analyzer, Campbell Scientific Inc.)和 KH20 型传感器测定潜热通量相关系数为 0.9626 ($p < 0.01$, $n = 382$),其斜率为 1.02 (图 2),涡度相关仪具有非常好的一致性。因此,基于完善理论基础和精密探测仪器的涡度相关法测定的水热通量具有较高的精确性和很好的稳定性,是进行地表与大气间物质和能量交换的重要科研工具。

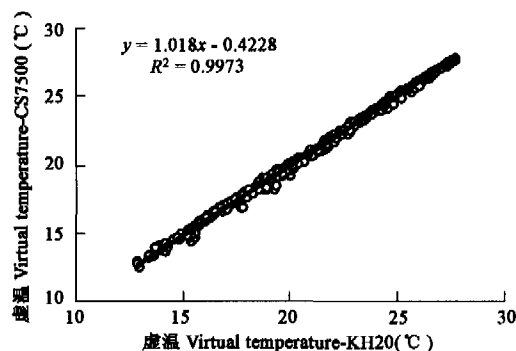


图1 CS7500 和 KH20 开路式涡度相关系统 CSAT3 测定虚温比较
Fig.1 Comparison of the values of virtual temperature measured by CSAT3 sensors of CS7500 and KH20 open-path eddy correlation system

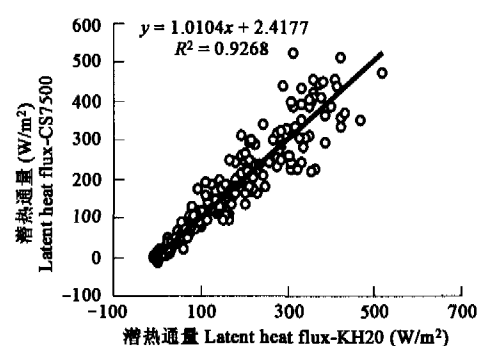


图2 CS7500 和 KH20 开路式涡度相关系统测定潜热通量值比较
Fig.2 Comparison of the values of latent heat flux measured by CS7500 and KH20 open-path eddy correlation system

根据冬小麦灌浆期间涡度相关仪测定的潜热和显热通量(白天时间的日变化资料),及同时测定的冬小麦冠层上方净辐射通量和土壤热通量进行农田生态系统能量平衡闭合分析(图3)。结果表明,潜热与显热通量之和($\lambda E + H$)占可供能量($R_n - G$)的比值平均为75.7% ($r = 0.9854, p < 0.01, n = 182$),且能量平衡闭合程度在早、晚时间较低而正午前后则较高。另外,图4结果证明,农田能量平衡闭合程度的高低与下垫面摩擦速度(U^*)的大小具有极显著的正相关关系($r = 0.7994, p < 0.01, n = 61$),随着摩擦速度的增大湍流强度增强,农田能量平衡闭合程度提高,对于完全闭合的大约占20%,这表明在 U^* 较低时,由于湍流强度较弱,在一定程度上引起能量平衡的非闭合性。对能量平衡是否闭合与风向变化之间的关系进行分析得出二者之间不相关,同时也说明本实验研究在风浪区内不存在平流现象,但存在能量不平衡的原因有多个方面,例如能量平衡各分量测定时由于仪器造成的误差、各分量测定方法所代表的空间尺度不同以及其它气象因素例如风速较低等原因。

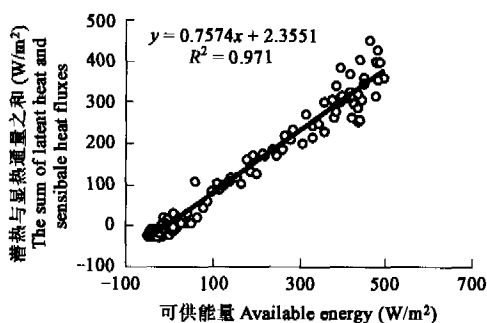


图3 涡度相关系统测定的潜热与显热通量之和($\lambda E + H$)同可供能量($R_n - G$)比较

Fig.3 Comparison of the sum of latent heat and sensible heat fluxes ($\lambda E + H$) with available energy ($R_n - G$)

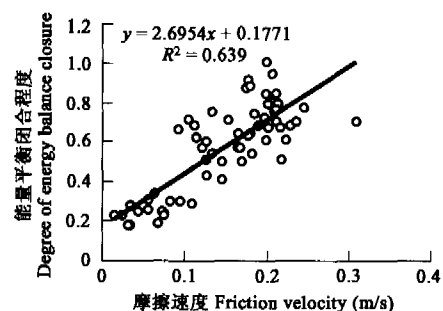


图4 冬小麦农田能量平衡闭合程度($\lambda E + H$)/($R_n - G$)与摩擦速度之间的关系

Fig.4 Relationship between the degree of energy balance closure($\lambda E + H$)/($R_n - G$) and friction speed in wheat filed

2.2 暂时水分胁迫状况下农田能量平衡和蒸发比值日变化过程

冬小麦农田郁闭、晴天且土壤水分非充足情况下,蒸发比值(EF)在白天时间内呈现相对稳定的变化趋势,且在正午前后蒸发比值略有下降。在冬小麦孕穗至抽穗期,选择4月10日(DOY100)、4月13日(DOY103)、4月17日(DOY107)、4月24日(DOY114)的能量通量资料,分析能量平衡及蒸发比值的日变化过程。观测日期的日照时数在9~12.1h之间,叶面积指数(LAI)大于5,土壤表层0~20cm和土层厚度0~150cm土壤相对湿度分别在50%以下和55%~67%范围内(表1),在该时期内4月15日出现一次6mm左右的降水,4月16日晚出现一次晚霜冻。如图5所示,左图为冬小麦农田能量平衡的日变化过程,右图为同日的冬小麦蒸发比值的日变化过程, $R_n - G$ 为可供能量, $EF = \lambda E / (R_n - G)$ 为蒸发比值,代表作物群体对可供能量蒸散能力。在土壤非充分供水时,7:00~18:00时段内蒸发比值曲线近似呈倒“S”型,由早晨到10:30左右以前逐渐增大,正午前后有所下降 EF 值大约在0.5~0.65范围内,14:00左右以后则缓慢上升,傍晚日落前后 EF 值上升幅度增大且超过1。在较为干燥的土壤条件下,作物的蒸散能力明显降低,晴天日早晨作物充分利用有限的土壤水分和夜间结露,使 EF 值较高;假如早晨因雾影响则 EF 值较低,而在接近中午时由于太阳辐射通量较高,即使有较大的饱和水汽压差,在水分胁迫影响作用下导致作物保持相对较低的蒸散能力,午后随着太阳辐射的减弱作物对可供能量的消耗能力提高。 EF 值日变化曲线图表明,9:00~16:00时段内蒸发比值相对比较稳定,而在夜间和早晚时刻则极不稳定;对不同时段内的蒸发比值进行平均对比分析(表2),其结果表明12:00~13:30时段内的 EF 平均值更接近9:00~16:00时段内蒸发比值。

2.3 农田暂时水分胁迫状况下蒸散通量日变化过程

在冬小麦拔节到抽穗生长发育期内,晴天日且土壤水分非充足状况下,潜热通量日变化正午前后存在明

显的蒸散高地(图 6),表现为蒸散曲线斜率的突然变化,在这两个拐点之间蒸散通量保持某相对稳定的高值,DOY100、DOY103、DOY107 和 DOY114 蒸散高地持续时间分别为 4、3.5、2.5h 和 4h,约从 10:30 到 15:00,并且蒸散高地随着时间推移趋向向下倾斜。潜热通量日变化过程表明,DOY100、DOY103、DOY107 和 DOY114 等 4d 蒸散高地之前和之后的早晚时间蒸散通量相差较小,中午前后蒸散通量 DOY103 低于 DOY100,DOY114 略低于 DOY107;而 DOY107 与 DOY114 的蒸散通量则明显高于 DOY100 与 DOY103,其原因是由于 DOY107 与 DOY114 的 LAI 以及正午前后农田表面获取的净辐射通量大于 DOY100 与 DOY103。蒸散高地存在的原因,一方面由于土壤水分不充足,土壤表层 0~20cm 土壤含水量低于田间持水量的 50%,土层厚度 0~150cm 的土壤含水量低于田间持水量的 65%;另外正午前后太阳辐射通量高以及饱和水汽压差(VPD)大时,由于土壤含水量低导致气孔阻力急速上升,造成蒸散高地的形成及时间的持续。蒸散高地的存在可用蒸发比值的变化来解释,例如图 5 右图中 DOY100、DOY103、DOY107 和 DOY114 的 EF 值日变化过程,正午前后在蒸散高地出现时,伴随着蒸发比值的明显下降,即可供能量($R_n - G$)用于作物蒸腾耗热比例降低。由此推断当蒸散高地出现时,将伴随出现作物冠层温度升高的现象,该现象发生说明利用冠层温度遥感信息监测农田土壤和作物水分状况的可行性。

表 1 冬小麦农田能量平衡各分量日变化观测日期作物叶面积系数、气象和土壤环境要素指标

Table 1 Crop leaf area index, meteorological and soil environmental factors in those days when data used to analyze diurnal pattern of components of surface energy balance in winter wheat field

儒略日 DOY	日平均气温 Daily mean temperature(℃)	日最高气温 Daily maximum temperature(℃)	日照时数 Sunlightduration (h)	叶面积指数 Leaf area index	土壤相对湿度(0~20cm) Relative soil moisture in the layer of 0~20cm(%)	土壤相对湿度(0~150cm) Relative soil moisture in the layer of 0~150cm(%)
100	9.3	16.9	10.1	5.78	63.2	66.7
103	17.4	30.4	9.1	6.12	45.2	63.1
107	11	18.2	10.5	6.52	45.7	65.5
114	8.9	15.5	12.1	6.8	36.2	56.0

土壤相对湿度为土壤的绝对湿度占田间持水量的百分数 Relative moisture of the soil means the percent of absolute moisture of the soil in field water-holding capacity

表 2 冬小麦生育期内日变化过程中不同时段蒸发比值的比较

Table 2 Comparison of evaporation fraction at diurnal pattern during different time period in winter wheat field

儒略日 DOY	日平均 EF 值 Daily mean EF value	7:00~18:00 平均 EF 值 Mean EF value at 7:00~18:00	9:00~16:00 平均 EF 值 Mean EF value at 9:00~16:00	10:00~11:00 平均 EF 值 Mean EF value at 10:00~11:00	12:00~13:30 平均 EF 值 Mean EF value at 12:00~13:30
100	0.34	0.76	0.62	0.51	0.59
103	0.28	0.87	0.62	0.49	0.57
107	0.1	0.85	0.70	0.70	0.66
114	0.15	0.58	0.61	0.59	0.60

3 讨论

3.1 基于涡度相关技术测定的农田能量平衡存在非闭合现象

农田生态系统能量平衡可用方程 $R_n = \lambda E + H + G + S_r$ 简化表示^[6],理论上不同时间尺度内能量平衡各分量均应闭合,但在实际观测中由于各种因素的影响常引起农田能量不平衡问题,采用涡度相关系统进行观测时同样存在农田能量平衡各分量不闭合现象,而观测仪器及气象方面的因素是造成该问题的主要原因。

涡度相关技术可以直接测定潜热(λE)、显热(H)通量,是国际上所采用的通量测定最先进的仪器,因为其测定原理完善并基于高精度的测量仪器,在国际上被广泛应用森林、草原、农田等生态系统的物质和能量的交换传输研究^[8~10]。尽管涡度相关技术测定水、热通量的精度高,但很多研究发现,涡度相关技术测定的潜热和显热通量的和小于可供能量(净辐射通量与土壤热通量的差)^[11~13],能量平衡闭合程度在 60%~90%,本研究

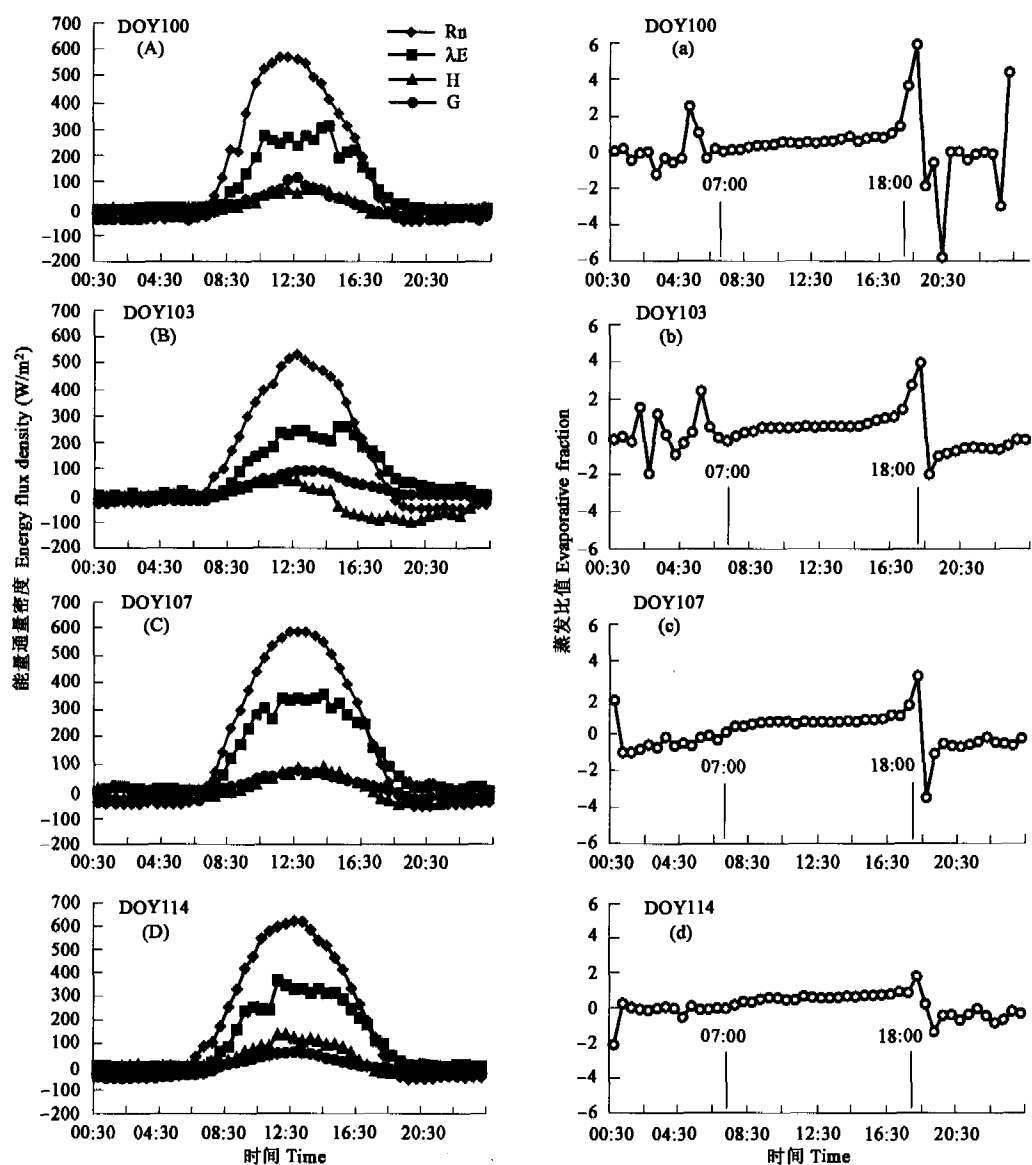


图5 冬小麦拔节后农田能量平衡(左)和蒸发比值(右)日变化

Fig.5 Diurnal patterns of energy balance(left) and evaporative fraction (right) after stem elongation of winter wheat

得出冬小麦农田的潜热和显热通量之和占可供能量的 75.7%,而在农田生态系统测定的最低能量平衡闭合程度为 47.3%^[13]。Morre^[14]和 Villalobas^[15]认为水汽传感器与超声风速仪的分离,是造成涡度相关技术测定的潜热和显热通量之和低的主要原因。Sauer 等^[16]认为涡度相关系统测定玉米留茬农田的潜热和显热通量偏低,造成能量不平衡的原因是系统测量误差和玉米留茬后冻融交替及土壤表层对潜热的影响。在农田能量平衡各分量观测过程中,从地表到冠层顶部空间范围内植被和空气总的能量存储部分(S_T),包括冠层内空气水汽潜能、空气内能变化、植被茎叶储热以及光合作用能量消耗常不被观测,对于高秆植被(森林、玉米)短时间例如半小时的能量平衡分析时,这部分存储能量的忽略计算将造成大约近 10%的误差。地表土壤热通量应包括土壤热通量板测定值、地表与土壤热通量板之间土层热量存储率两部分,而对于后者能量观测的忽略同样可造成 2%~5%的误差^[17]。另外,由于潜热、显热、净辐射通量、土壤热通量仪器测定值所代表的空间尺度不匹配,是能量平衡不闭合的另一误差来源。除上述仪器误差原因造成能量平衡不闭合以外,还存在诸如气象方面的因素,例如能量平衡程度与摩擦速度呈线性正相关关系^[17],风速、摩擦速度较低时能量不平衡性较大。

3.2 蒸发比值日变化过程中不同时段内稳定程度不同

蒸发比值为陆地生态系统潜热通量占可供能量的比值,表征了地表获取能量再分配情况。Shuttleworth 等^[18]首次报道白天时段内 EF 具有稳定性,此后许多学者对这一参数的变化规律以及在陆地生态系统实际蒸散量估算方面的应用进行了研究^[19-22]。在日变化过程中土壤水分充足状况下,7:00 至 18:00 时段内 EF 为“米氏”型,即早晨 7:00~8:00 迅速上升,8:00~9:00 以后缓慢增加 EF 值维持在 0.9 左右^[19],6:00~18:00 白天时段内蒸发比值曲线为 U 型^[22]。白天时段内蒸发比值曲线形态的差异原因,一方面与土壤含水量高低有关,直接影响农田蒸散速率的大小,另一方面与研究者的

确定的研究时间范围密切相关,本试验研究证明冬小麦田 EF 日变化过程(图 5),不同时段内该参数稳定程度不同,晴天日白天 9:00 至 16:00 时段内 EF 相对比较稳定,7:00 至 18:00 时段内 EF 曲线近似呈倒“S”型,而在夜间和早晚时刻则极不稳定。另外,许多学者研究证明,晴天日森林、草原以及农田生态系统,正午前后的 EF 与白天时段的 EF 平均值之间具有较好的相关性^[21-23],近正午时刻的 EF 与白天时段的 EF 平均值近乎相等^[18]。在本实验研究中对不同时段内的 EF 进行平均对比分析发现,12:00 至 13:30 时段内的 EF 平均值较接近 9:00 至 16:00 时段内 EF 平均值(表 2)。

陆地生态系统实际蒸散量的测定与估算,一直是水文学、气象学、生态学、农学等相关学科及研究领域共同关注的重要课题之一。基于地表热量平衡方程和能量通量分配比值估算实际蒸散量的各种方法中,比较经典的方法是波文比值(β)常数法。研究证明,晴天日白天时段 EF 的稳定性高于 β ,采用瞬时 EF 和白天时段可供能量总量估算实际蒸散日总量的准确性较高^[20]。基于白天时段 EF 的稳定性,结合正午前后卫星遥感信息资料和常规气象资料,估算区域范围实际蒸散量,对于水资源合理利用和管理,以及合理的灌溉制度、灌溉方式与灌溉时间的确定将具有更大的生产实践指导意义。

3.3 暂时水分胁迫状况下晴天日正午前后郁闭农田存在明显的蒸散高地

晴天状况下当土壤水分不足时,冬小麦农田正午前后出现持续几个小时的潜热通量保持平稳或呈下降趋势的变化,从蒸散通量日变化过程来看,这种现象类似于“高原”,因而称之为蒸散高地。造成蒸散高地现象出现的原因有多个方面,主要是土壤水分不足,同时还受其它因素的影响,特别是气象因素和植物内部限制因素,例如入射太阳辐射通量、饱和水汽压差和临界叶水势这一重要植物内部因素。土壤含水量不足时,作物根系吸水速率低于腾发速率,导致气孔阻力急速上升造成蒸散高地的形成和时间的持续。因此,在土壤含水量相对较低而大气和太阳辐射因子所决定的蒸散力较高时,或者在干燥土壤及大气蒸散力较低条件下均会形成蒸散高地。本研究结果证明,冬小麦生长盛期当根区土壤含水量下降到田间持水量的 65% 以下时,这种状况就可能发生;Carlson 等^[24]曾研究发现夏玉米在土壤含水量降到田间持水量的 50% 时,即可探测到蒸散高地的存在。假如植物通过正午前后的蒸散高地现象来响应土壤水分亏缺,避免水分过渡损失以维持其正常的生理生化活动,然而由于蒸散通量的降低意味伴随着气孔阻力和叶温的升高,关于暂时水分胁迫状况下此三者之间的相互影响作用有待于进一步研究探讨。但是,在多云或阴天时由于太阳辐射通量的降低将导致水分胁迫信号的消失,因此这种天气情况下的蒸散和冠层温度指标难以监测土壤水分状况。

4 结论

冬小麦农田根层土壤相对湿度低于 65% 时,晴天日农田潜热通量日变化正午前后存在明显的蒸散高地,且白天时段内农田蒸发比值处于较稳定状态,12:00~13:30 时段内蒸发比值平均值接近 9:00~16:00 时段内蒸发比值平均值,夜间和日出日落前后时刻蒸发比值变化较大,7:00~18:00 时段内蒸发比值曲线近似呈倒

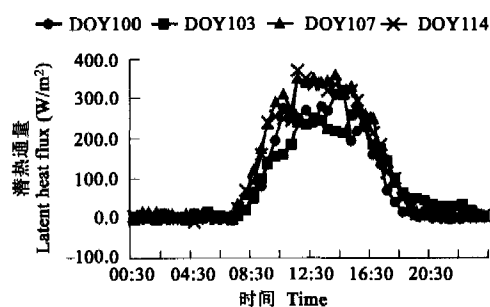


图 6 冬小麦田拔节后暂时水分胁迫下潜热通量日变化(DOY100、103、107 和 114)

Fig. 6 Latent heat flux versus time for DOY100, 103, 107 and 114 under transient water stress after stem elongation in winter wheat field

“S”型,正午前后蒸散高地出现时,蒸发比值有所下降。

References:

- [1] Chalmers D J, Wilson I B. Productivity of peach trees: tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand. *Annual Botany*, 1978, 42: 285 ~ 294.
- [2] Mitchell P D, Chalmer D J. The effect of regulated water supply on peach tree growth and yields. *Journal American Society Horticulture Science*, 1982, 107 (5): 853 ~ 856.
- [3] Kang Shaozhong, Shi Wenjun, Hu Xiaotao. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize. *Transactions of the CSAE*, 1998, 14(4): 82 ~ 87.
- [4] Guo Xiangping, Kang Shaozhong. After-effect of regulated deficit irrigation on maize. *Transactions of the CSAE*, 2000, 16(4): 58 ~ 60.
- [5] Monteith J L. Principles of environmental physics. London: Edward Aronold, 1973. 241.
- [6] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331 ~ 1340.
- [7] Yao Kenning, Jian Weimin, Zheng Haishan. Experiment study method of agricultural meteorology. Beijing: Meteorology Press, 1995. 156 ~ 215.
- [8] Ohta T, Suzuki K, Kodama Y, *et al.* Characteristics of the heat balance above the canopies of evergreen and deciduous forests during the snowy season. *Hydrological Processes*, 1999, 13(14-15): 2383 ~ 2394.
- [9] Kondoh, A, Higuchi A. Relationship between satellite-derived spectral grightness and evapotranspiratuin from a grassland. *Hydrological Processes*, 2001, 15 (10): 1761 ~ 1770.
- [10] Cain J D, Rosier P T W, Meijninger W, *et al.* Spatially averaged sensible heat fluxes measured over barley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 307 ~ 322.
- [11] 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.
- [12] Constantin J, Inelan 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.
- [13] Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, *et al.* Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(3): 333 ~ 342.
- [14] Morre C J. Frequency response correction for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorology*, 1986, 37: 17 ~ 35.
- [15] Villalobos F J. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 88 (1-4): 77 ~ 83.
- [16] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, *et al.* Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89: 155 ~ 168.
- [17] Blanken P D, Black T A, Yang P C, *et al.* Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partioning overstory and understory components. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28915 ~ 28927.
- [18] Shuttleworth W J, Gurney R J, Hsu A Y, *et al.* FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites. *IAHS Publ.* 1989, 186: 67 ~ 74.
- [19] Steduto P, Hsiao T C. Maize canopies under two soil water regimes III. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89: 201 ~ 213.
- [20] Crago R, Brutsaert W. Daytime evaporation and the self-preservation of the evaporative fraction and the Bowen ratio. *Journal of Hydrology*, 1996a, 178: 241 ~ 255.
- [21] Farah H O, Bastiaanssen W G M, Feddes R A. Evaluation of the temporal variability of the evaporative fraction in a tropical watershed. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2004, 5(2): 129 ~ 140.
- [22] Nichols W E, Cuenca R H. Evaluation of the evaporative fraction for the parameterization of the surface energy balance. *Water Resource Research*, 1993, 29(11): 3681 ~ 3690.
- [23] Crago R D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. *Journal of Hydrology*, 1996b, 180: 173 ~ 194.
- [24] Carlson T N, Belles J E, Gillies R R. Transient water stress in a vegetation canopy: Simulations and measurements. *Remote Sensing Environment*, 1991, 35: 175 ~ 186.

参考文献:

- [3] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛. 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, 14(4): 82 ~ 87.
- [4] 郭相平, 康绍忠. 玉米调亏灌溉的后效性. *农业工程学报*, 2000, 16(4): 58 ~ 60.
- [7] 姚克敏, 简慰民, 郑海山. 农业气象试验研究方法. 北京: 气象出版社, 1995, 156 ~ 215.
- [13] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO₂ 通量的测定. *地理学报*, 2002, 57(3): 333 ~ 342.