

姜海梅, 刘树华, 刘和平. 非均匀灌溉棉田能量平衡特征研究. 地球物理学报, 2012, 55(2): 428-440, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 02. 007.

Jiang H M, Liu S H, Liu H P. A study on energy budget characteristics over a heterogeneously irrigated cotton field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2): 428-440, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 02. 007.

非均匀灌溉棉田能量平衡特征研究

姜海梅^{1, 2}, 刘树华^{1*}, 刘和平³

1 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

2 南京信息工程大学大气物理学院大气物理系, 南京 210044

3 Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, WA 99164 U. S. A.

摘 要 运用国际能量平衡实验(EBEX-2000)的湍流、净辐射和土壤观测资料,运用涡动相关法分析了非均匀灌溉引起的热内边界层发展条件下近地层感热、潜热通量特征,并对有无灌溉两种条件下的能量闭合度进行了对比分析.在计算感热、潜热通量过程中,分别将 Schotanus 订正和 Webb 订正纳入了考虑范围,研究了两种订正方法对计算湍流热通量的影响.研究结果发现,由于非均匀灌溉生成的热内边界层使得近地层感热通量受到抑制,潜热通量出现波动,该现象在 8.7 m 比 2.7 m 更为显著.非均匀灌溉导致的热内边界层的存在使得近地层能量闭合度偏低,能量平衡比率约为 0.65;而没有热内边界层存在时,近地层能量平衡比率约为 0.70.本实验中,Schotanus 订正使得感热通量显著减小,其订正值日平均值约为 -8 W/m^2 ,占净辐射的近 4%;Webb 订正值日平均值约为 2 W/m^2 ,对能量平衡的影响较小.

关键词 非均匀灌溉,潜热通量,感热通量,土壤热通量,土壤热储存,能量闭合度

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 02. 007

中图分类号 P401

收稿日期 2011-04-06, 2011-06-28 收修定稿

A study on energy budget characteristics over a heterogeneously irrigated cotton field

JIANG Hai-Mei^{1,2}, LIU Shu-Hua^{1*}, LIU He-Ping³

1 Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2 Department of Atmospheric Physics, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

3 Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, WA 99164, U. S. A.

Abstract This study uses turbulence, net radiation and soil data from International Energy Balance Experiment (EBEX-2000) to study the characteristics of sensible and latent heat flux under thermal internal boundary layer which is induced by heterogeneous irrigation. Energy balance closure on irrigated days was compared with that on non-irrigated days. Schotanus correction and Webb correction were applied when calculating turbulence heat fluxes and their influences were also analyzed. During this research, eddy covariance method is used. Results indicate that turbulence heat fluxes in the surface layer are affected by thermal internal boundary layer resulted from heterogeneous irrigation, this interaction leads to a decrease of sensible heat

基金项目 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421402)、香港城市大学战略研究基金(8780046)、中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室开放课题项目(LAPC-KF-2009-04)、江苏省高校自然科学研究面上项目(11KJB170005)和南京信息工程大学科研启动项目(20100373)联合资助.

作者简介 姜海梅,女,博士,从事大气边界层物理与大气湍流研究. E-mail: hmjiang@nuist.edu.cn

*** 通讯作者** 刘树华,教授、博士生导师,从事大气边界层物理、陆面过程、气候变化预测教学和研究. E-mail: lshuhua@pku.edu.cn

flux and a oscillation of latent heat flux. This phenomenon is more significant at 8.7 m than that at 2.7 m. The existence of thermal internal boundary layer induced by heterogeneous irrigation result in a decreased energy balance ratio of 0.65; while with no internal thermal boundary layer, the energy balance ratio is close to 0.70. Schotanus correction results in a significant diminution of sensible heat flux in this experiment. The daily average of Schotanus correction reach up to -8 W/m^2 , almost 4% of the net radiation. The daily average of Webb correction to latent heat flux is about 2 W/m^2 , having slight influence on energy balance closure.

Keywords heterogeneous irrigation, latent heat flux, sensible heat flux, soil heat flux, soil heat storage, energy balance closure

1 引言

能量是大气运动的原动力. 地表的能量平衡问题关系到海洋、陆面、植被和大气之间的能量流动分配,水分的蒸发和循环过程,是近年来区域模式和全球气候模式关注的热点问题之一.

自上世纪 80 年代,仪器观测能力的提高和观测方法的改进使得对地表能量不平衡问题的研究越来越受到气象学界的关注. Wilson 系统分析了 Fluxnet 各站点的能量闭合情况,并进行了综合评价,认为湍流量观测中普遍存在 10%~30% 的能量不闭合度^[1]. 最近的研究中,很多学者开始关注平流以及地表非均匀性导致的大尺度运动对通量的贡献以及对能量平衡的影响. Stannard 认为在地形起伏较大的地区,由于局地环流和夜间泄流的形成,能量不平衡项会增大^[2]. Sun 等人认为,即使是在平坦下垫面,夜间稳定边界层也会在近地层形成夜间泄流造成能量不闭合度增大^[3]. Sakai 根据其研究发现生命周期在 4 min 到 30 min 之间的大尺度涡旋对湍流热通量的贡献可以高达 17%,且在小风条件下对湍流通量的贡献会更大^[4]. Vickers 也指出在研究地表能量平衡问题时,必须把较长时间周期的大尺度涡旋纳入考虑范围^[5]. 此外,LI-7500 在有湿雾和结露的条件下对水汽的观测存在很大误差导致对潜热通量的观测存在很大的不确定性也是造成能量不闭合的重要因素之一^[6]. 现有的研究认为涡动相关系统对高低频湍流观测能力的不足,非均匀下垫面上通量观测的空间代表性问题,仪器误差以及资料质量保证和质量控制方法是影响近地层能量平衡闭合的主要因素.

近年来,非均匀下垫面的能量平衡问题也已成为关注的焦点问题之一,但国内现有的观测和研究大多集中在较大尺度的非均匀下垫面上开展^[7-11].

目前国内针对较小尺度的热力非均匀性对地表通量交换和能量平衡的影响的研究还很少. 本文将利用 EBEX-2000 的观测资料分析潜热通量、感热通量、土壤热通量以及辐射通量的特征,并将有无灌溉两种情况进行对比分析,探讨灌溉导致的小尺度热力非均匀性对局地湍流热通量、土壤热通量以及能量平衡的影响.

2 实验介绍

2.1 实验场地

EBEX-2000 实验场地选在美国加利福尼亚州的圣华金峡谷(San Joaquin Valley, California),当地的地理位置为 $36^{\circ}06'N, 199^{\circ}56'W$,海拔高度 67 m. 实验场地为 $1600 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ 的平坦灌溉棉田,场地上游为植被稀疏的干地. 实验场地内棉花高度约 0.9 m,覆盖率为 90%~95%,零平面位移 $d=0.6 \text{ m}$.

实验场地内由北往南共有 10 个观测点,其布局如图 1 所示^[12]. 本文研究中采用的资料来自于香港城市大学和德国 Bayreuth 大学合作的 7 号站点. 实验期间,以晴朗无云天气为主,无较大天气系统经过,盛行风向为受峡谷地形影响的北偏西风. 在整个实验期间,没有观测到降水过程.

值得关注的是在实验期间,棉田有过两次灌溉过程,采用了由北向南逐块漫灌的方式. 这两次灌溉过程导致了实验场地内的土壤水热条件与上游地表产生了较大差异,促进了热力内边界层的发展,使得午后近地层出现逆温(图 7(a)),从而影响了近地层的感热、潜热输送. 实验场地灌溉日程表如图 2 所示^[12].

2.2 实验仪器

实验分为两个阶段:

(1) 对比实验(2000 年 7 月 18 日~2000 年 7 月 29 日)对参加实验的所有仪器进行了比较订正;

(2) 正式实验(2000 年 8 月 1 日~2000 年 8 月

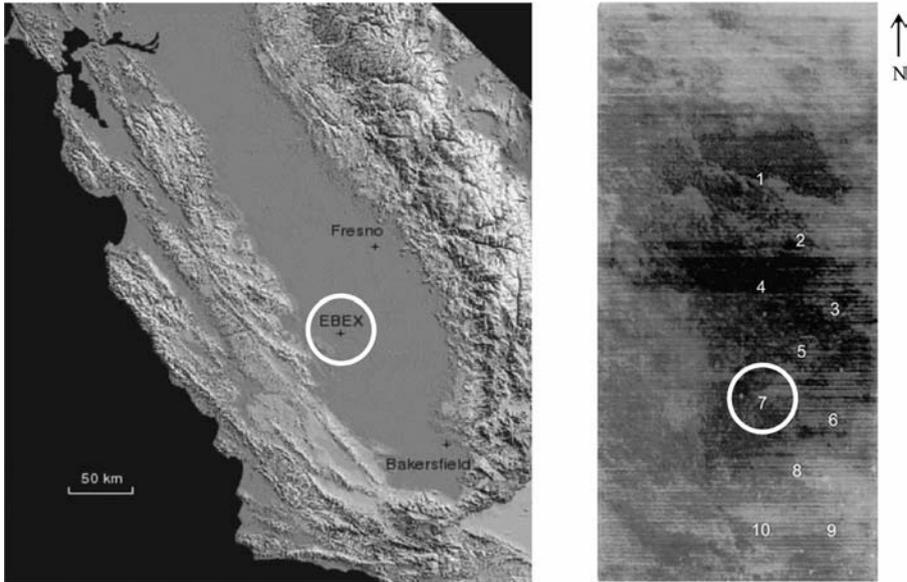


图 1 EBEX-2000 实验场地 (左) 圣华金峡谷地形图; (右) EBEX 站点分布图^[12]

Fig. 1 Experiment field of EBEX-2000 (left panel) topography of San Joaquin Valley; (right panel) layout of EBEX-2000 experiment sites^[12]

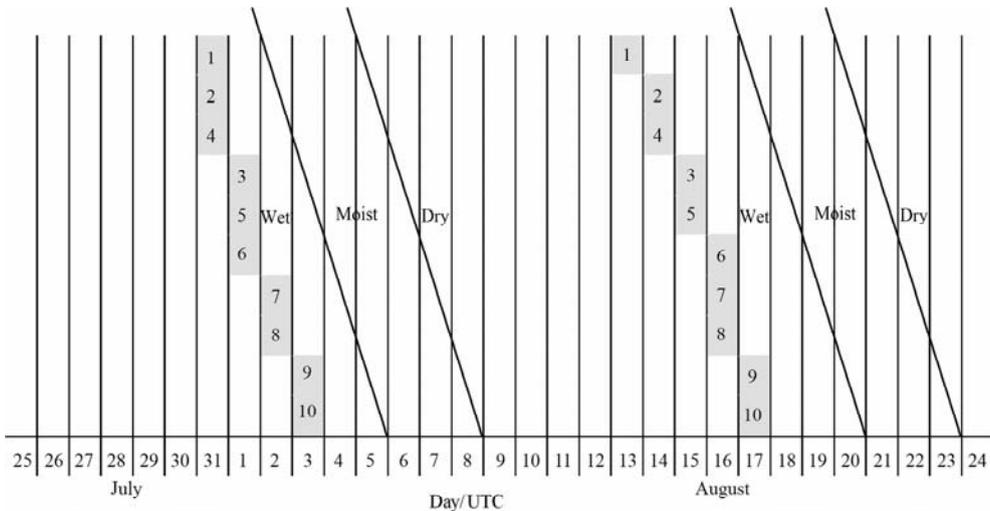


图 2 EBEX-2000 灌溉日程及实验场地土壤干湿变化图 (阴影标注的当天地面存在积水)^[12]

Fig. 2 The irrigation schedule and the variation of soil moisture in EBEX-2000 (there was standing water in the experiment field on the shadowed days)^[12]

22 日) 采集了湍流、近地层廓线、地表辐射和土壤资料。

香港城市大学的涡动相关观测系统分别架设在 8.7 m 和 2.7 m 两个高度, 对湍流风、温、湿进行了观测, 采样频率为 10 Hz。另外, 本实验还对 12 个高度 (0.7, 1.2, 1.7, 2.7, 3.7, 4.7, 5.7, 6.7, 7.7, 8.7, 9.7, 10.7 m) 的风速、干湿球温度进行了观测, 获取了近地层的风温廓线资料。实验中对净辐射的观测设置在距离地面 2 m 高度, 对土壤热通量、土壤温度和含水量的观测在地下 8 cm 深度。实验中用到的观测仪器型号见表 1。

表 1 7 号站点实验仪器列表

Table 1 Instruments at site 7

实验仪器	仪器型号 (安装高度)
超声风温仪	CSAT3 (2.7 m) CSAT3 (8.7 m)
湿度仪	KH20 (2.7 m) KH20 (8.7 m)
铂丝温度计	FW05 (8.7 m)
风速仪	Climatronics F460 (1.2 m, 3.7 m, 5.7 m, 7.7 m, 9.7 m)
温度和相对湿度仪	Frankenberger (0.7 m, 1.2 m, 3.7 m, 7.7 m, 9.7 m)
土壤含水量仪	CS615 (8 cm)
土壤热通量板	HFT-3.1 (8 cm)
净辐射仪	REBS Q7.1 (2 m)

本文主要运用了正式实验期间的净辐射、湍流以及土壤温度和土壤含水量资料,来计算净辐射通量、湍流热通量、土壤热通量和土壤热储存。

3 理论和方法

假设地球表面平坦均一且没有植被覆盖,根据热力学第一定律地表的能量平衡方程可以写为

$$Rn = H + LE + G + S, \quad (1)$$

其中 Rn 是地表接收的净辐射通量, H 是感热通量, LE 是潜热通量, G 是土壤热通量, S 是表层土壤热储存。

3.1 通量计算方法

涡动相关法是计算近地层湍流通量最常用的方法之一,由于它是直接建立在通量定义的基础上,因此从理论上被认为是最直接和有效的方法。随着近年来快速响应仪器精度的提高,观测方法和资料处理技术的改进,涡动相关法计算通量的结果越来越精确。

涡动相关法的通量计算公式为

$$H = \rho C_p \overline{w'\theta'}, \quad (2)$$

$$LE = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (3)$$

其中 ρ 为空气密度 (kg/m^3), C_p 为湿空气定压比热 ($\text{J}/\text{K} \cdot \text{kg}$), L_v 为蒸发潜热 (J/kg), C_p 和 L_v 计算公式为^[13]

$$C_p = C_{pd} \cdot (1 + 0.84q) (\text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}), \quad (4)$$

$$L_v = (2.501 - 0.0237T(^{\circ}\text{C})) \times 10^6 (\text{J}/\text{kg}), \quad (5)$$

选取半小时的湍流资料,去除半小时分段平均值得到垂直风速、温度和湿度的脉动值。

表层土壤热储存的计算公式为^[14]

$$S = \frac{\Delta T(\theta_w \rho_w C_w + \rho_s C_s) \Delta z}{\Delta t}, \quad (6)$$

其中 ΔT 为土壤温度变化, θ_w 为土壤体积含水量, ρ_w 为液态水密度 ($1000 \text{ kg}/\text{m}^3$), C_w 为液态水的比热 ($4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ_s 为土壤密度 ($1400 \text{ kg}/\text{m}^3$), C_s 为干土壤比热约为液态水比热的 $1/5$, ($840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), Δz 为热通量板的深度,在本实验中为 0.08 m ; Δt 为采样时间间隔,本文中运用半小时平均后的土壤温度来计算土壤温度变化,对应的 Δt 为 1800 s 。

地表接受的净辐射通量和土壤热通量在实验中均有直接观测,因此在计算能量平衡时只需对这两项资料进行订正即可。

3.2 通量订正方法

涡动相关系统对超声温度的观测通常受到水汽的影响造成观测到的感热通量存在一定程度的高估。只有当空气湿度为零时,超声风速仪观测到的超声虚温才等于实际空气温度。Schotanus 和 Liu 等人对超声虚温的订正做了相关的研究,根据他们的研究结果,用超声虚温计算感热通量时需要进行以下订正^[15, 16]:

$$\overline{w'T'} = \overline{w'T'_s} - 0.51 \overline{T} \overline{w'q'}, \quad (7)$$

计算潜热通量时,考虑了 Webb 订正^[17],运用下式来计算潜热通量

$$\overline{w'q'} = (1 + \frac{m_a \bar{q}}{m_v})(1 + \frac{L_v \bar{q}}{C_p T_d} Bo_{\text{raw}}) \overline{w'q'_{\text{raw}}}, \quad (8)$$

其中 m_a 为空气摩尔质量; m_v 为水的摩尔质量; L_v 为蒸发潜热,其随温度的变化规律参见《边界层气象学导论》^[13]; C_p 为湿空气比热, $C_p = C_{pd}(1 + 0.84\bar{q})$, C_{pd} 为干空气定压比热,取 $1004.67 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; T_d 为干空气温度; Bo_{raw} 为用未订正的潜热通量计算出的波文比。

3.3 能量平衡指标

两个能量平衡指标被用来评价能量闭合度。第一个是根据湍流热通量 ($H + LE$) 和有效能量 ($Rn - G$) 的线性回归的斜率和截距,线性回归采用最小二乘法。理想的能量平衡状况下有效能量和湍流热通量的回归直线斜率为 1,截距为 0。

另一个指标是能量平衡比率 (Energy Balance Ratio, 缩写为 EBR)^[18],其定义为

$$EBR = \frac{\sum (H + LE)}{\sum (Rn - G - S)}, \quad (9)$$

在本研究中分别以 30 min 和 24 h 为单位对通量进行求和来计算 EBR。

4 结果分析

本文分析了整个实验期间的感热、潜热通量以及能量平衡特征,并选取了有无灌溉两种情形进行对比来分析土壤含水量以及灌溉导致的热力非均匀地表对湍流热通量特征和能量平衡闭合率的影响,并将通量订正方法的影响纳入了考虑范围。

4.1 湍流热通量、土壤热通量和土壤热储存日变化特征

生态系统的水热过程本质上是由进入陆气系统的太阳辐射能量驱动的,因此理想状况下感热通量 H 、潜热通量 LE 均具有与净辐射 Rn 类似的日变化特征。EBEX-2000 实验期间的地表净辐射几乎呈理

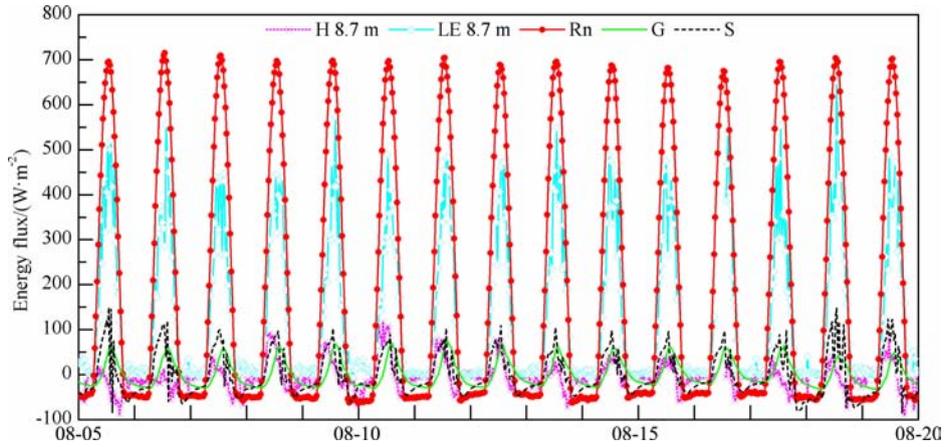


图3 8月5日到8月19日8.7 m净辐射、感热通量、潜热通量、土壤热通量和土壤热储存日变化

Fig. 3 Diurnal variations of net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux and soil heat storage at 8.7 m from August 5 to August 19.

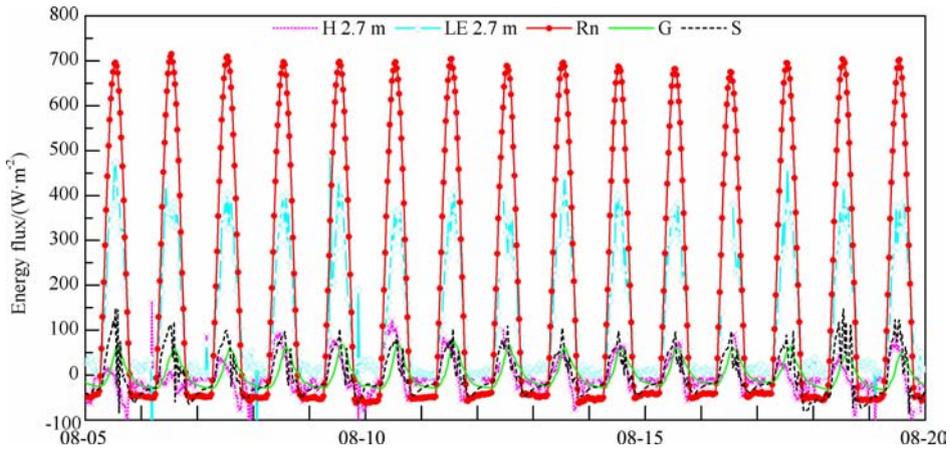


图4 8月5日到8月19日2.7 m净辐射、感热通量、潜热通量、土壤热通量和土壤热储存日变化

Fig. 4 Diurnal variations of net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux and soil heat storage at 2.7 m from August 5 to August 19.

想的余弦曲线(图3,图4),每天的净辐射能量相差很小,辐射强迫对湍流热通量和土壤通量特性的影响几乎可以忽略不计,这为研究土壤湿度和非均匀灌溉过程导致的局地大气稳定度及气流条件对湍流热通量、土壤热通量以及能量平衡的影响提供了可能.为了研究这些问题,本文计算了整个实验期间的净辐射、感热、潜热、土壤热通量、土壤热储存以及能量非平衡项,进行日变化特征分析,并比较灌溉后和没有灌溉的日变化特征来分析灌溉过程导致的土壤含水量变化、平流和大尺度涡旋对湍流热通量日变化规律的影响.

图3和图4分别为8.7 m和2.7 m两个高度上整个实验期间的净辐射、感热、潜热、土壤热通量和土壤热储存的日变化规律.从图中可以总结出以下基本规律:

(1)湍流热通量、土壤热通量和土壤热储存日变

化规律.湍流热通量、土壤热通量和土壤热储存都具有显著的日变化.潜热通量无论在白天还是晚上基本均为正值,最大值出现在午后介于 $400\sim 500\text{ W/m}^2$ 之间,中午前后潜热通量的振荡比较明显;感热通量的日变化规律同样存在,在上午日出后,感热通量由负值转换为正值,下午由正值转为负值.土壤热通量和土壤热储存也具有明显的日变化规律,土壤热通量和土壤热储存白天多为正值,夜晚为负值,白天土壤吸收太阳短波辐射,夜晚土壤以长波辐射向近地层大气释放热量.在实验期间,8 cm深处土壤热通量在 $-30\sim 70\text{ W/m}^2$ 之间;土壤热储存的日变化规律与土壤热通量相似,在实验期间土壤热储存的变化范围在 $-60\sim 150\text{ W/m}^2$.

(2)灌溉前后湍流热通量、土壤热通量和土壤热储存的差异.在灌溉过后的8月5日、8月6日、8月7日以及8月18日、8月19日,在午后1点左右,感

热通量即开始向下输送,而在其他地表较为干旱的日子,感热通量在下午 4 点前后才进入转换期;灌溉过后有内边界层生成的几天午后潜热通量震荡明显强于无灌溉时,具体原因将在后文详细分析.土壤热通量和土壤热储存在灌溉过后几天内白天的最大值明显高于无灌溉时.这是因为土壤含水量较高时土壤热容量也随之增大,对能量的储存能力增强.表层土壤热储存的变化规律与土壤热通量基本类似,灌溉后土壤热储存变化范围在 $-60 \sim 150 \text{ W/m}^2$ 之间,无灌溉时变化范围在 $-40 \sim 100 \text{ W/m}^2$ 之间,均明显高于甘肃平凉黄土高原塬区测得的 $-30 \sim 70 \text{ W/m}^2$ 的土壤热储存量^[19].从实验期间的土壤热储存量的变化趋势来看,土壤含水量较高的时间段土壤热储存量也较大,大小与土壤热通量很接近,因此对于湿润地区的能量平衡研究来说,表层土壤热储存的影响不可忽略.

为进一步研究地表热力非均匀性和土壤含水量对湍流热通量的影响,选取了灌溉过后土壤非常湿润的 8 月 5 日和土壤含水量较低的 8 月 10 日两天的资料进行对比分析(图 5).从图中可以看出,这两天的净辐射变化基本一致,最大值都出现在下午 1 点大小约为 700 W/m^2 .这两种情况下潜热通量都远远大于感热通量,这是因为 EBEX-2000 的下垫面是覆盖率高达 $90\% \sim 95\%$ 的处于生长季的阔叶作物棉花,作物的蒸腾作用和地表的水分蒸发都很剧烈,近地层的潜热通量始终维持在一较高值.从两天的对比来看,8 月 5 日的潜热通量大于 8 月 10 日,感热通量小于 8 月 10 日,说明土壤水分的变化对湍流潜热通量和感热通量的分配有直接影响.在其他学者的相关研究中,也发现潜热通量与地表含水量

存在明显的正相关^[20].

值得注意的是,8 月 5 日当天白天潜热通量出现了剧烈的振荡,潜热通量的震荡则表征着该层结受到了湿度不同的气团在垂直方向的扰动.结合对这一天近地层廓线结构的研究(图 7)发现当天午后近地层出现了逆温,局地土壤湿度与上游存在较大的差异形成了“绿洲效应”^[21],导致了热内边界层的发展,来自近地层上层的大尺度涡旋携带干热空气侵入到近地层引起的垂直方向的上升下沉运动导致了近地层的潜热通量出现振荡.当天的感热通量同样存在着异常,下午 1 点后,感热通量即转为负值,这与当天下午出现了近地层逆温是一致的,逆温结构导致了感热通量向下输送.为了深入分析地表热力非均匀性对湍流热通量的影响,此处将 8.7 m 和 2.7 m 高度的感热通量和潜热通量单独拿出来进行对比分析(图 6).从图中可以看出灌溉后的 8 月 5 日和无灌溉的 8 月 10 日潜热通量和感热通量在两层高度都存在一定程度的差异.8 月 5 日, 8.7 m 处的潜热通量大小和 2.7 m 处基本接近,但是 8.7 m 处上午 9 点到下午 3 点的振荡幅度明显大于 2.7 m ,而潜热通量是由垂直速度的脉动和水汽脉动的二阶矩决定的,因此潜热通量的振荡指征着垂直速度或比湿的异常变化.图 8 给出了 8 月 5 日下午 $14:20 \sim 14:30$ 两个高度的垂直速度、比湿和潜热通量时间序列,从图中发现在 8.7 m 高度垂直速度和比湿的脉动序列中出现了斜波结构,潜热通量脉动序列上对应出现了尖峰状的时间周期约为 200 s 的潜热通量爆发现象(burst-upward),对应的涡旋尺度约为 600 m ,与热力非均匀性的尺度(即实验场地大小)相当.而在 2.7 m 高度,垂直速度和比湿的斜波结

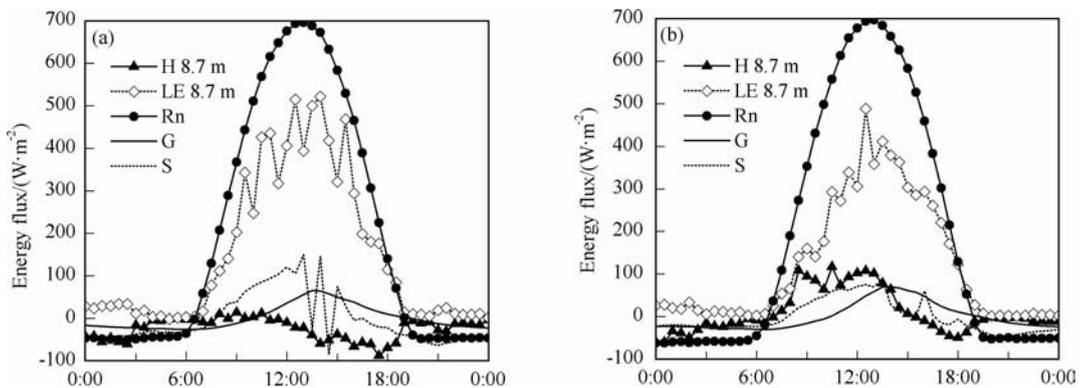


图 5 灌溉后和无灌溉时净辐射、感热、潜热、土壤热通量和土壤热储存日变化规律. (a)8 月 5 日; (b)8 月 10 日

Fig. 5 Diurnal variations of net radiation, sensible heat flux, latent heat flux, soil heat flux and soil heat storage on an irrigated day and a non-irrigated day. (a) August 5; (b) August 10

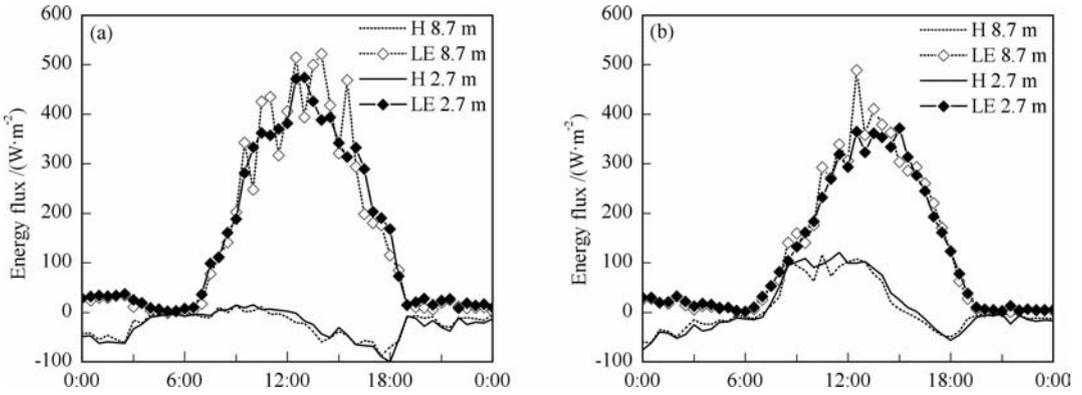


图 6 灌溉后和无灌溉时 8.7 m 和 2.7 m 两个高度感热、潜热通量日变化规律比较. (a)8月5日;(b)8月10日

Fig. 6 Comparison of diurnal variations of sensible heat flux and latent heat flux at 8.7 m and 2.7 m on an irrigated day and a non-irrigated day. (a) August 5; (b) August 10

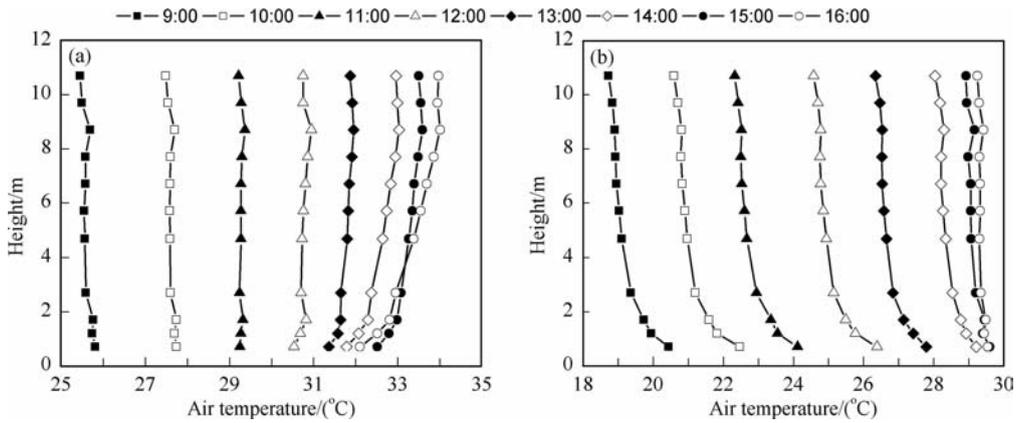


图 7 近地层温度廓线(9:00 am~16:00 pm). (a)8月5日;(b)8月10日

Fig. 7 Temperature profiles of the surface layer (9:00 am~16:00 pm). (a) August 5; (b) August 10

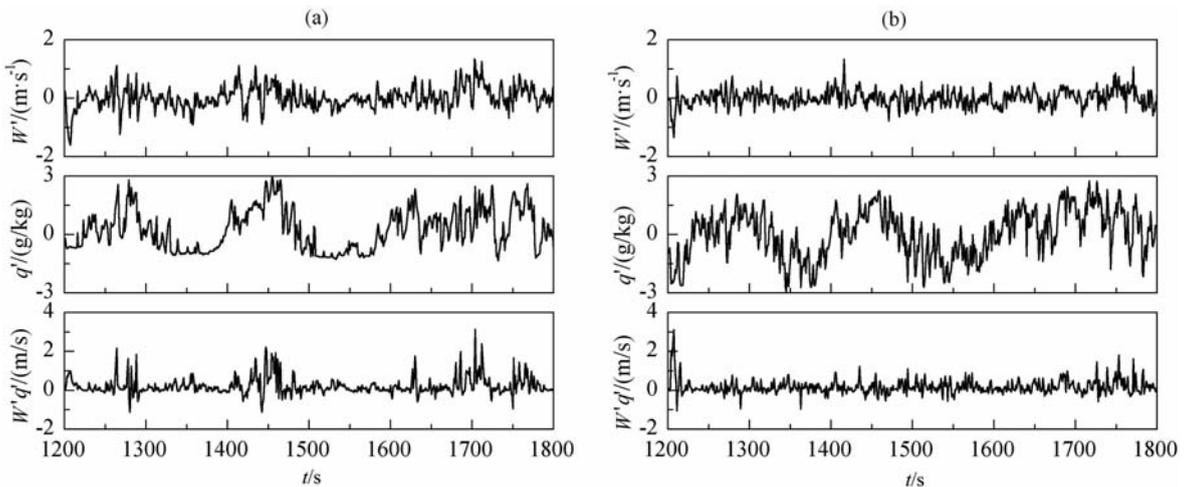


图 8 8月5日垂直风速、比湿和潜热通量脉动时间序列(14:20 pm~14:30 pm). (a)8.7 m;(b)2.7 m

Fig. 8 Time series of vertical wind speed, specific humidity and latent heat flux fluctuations (14:20 pm~14:30 pm). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m.

构以及潜热通量的爆发现象并不明显,进一步证实了对近地层产生扰动的干热气团来自于近地层上层,对 8.7 m 高度的影响更为剧烈.

4.2 能量闭合度特征

图 9 是实验期间所有资料得到的湍流热通量 ($H+LE$)与有效能量($Rn-G-S$)的关系,从两个高度

的线性拟合关系可以看出 8.7 m 的能量闭合度约为 76%, 2.7 m 约为 73%, 8.7 m 数据的离散度大于 2.7 m. Lechner 利用 EBEX-2000 实验 9 号站点的涡动相关资料对能量平衡进行了研究, 他的结果表明在 6.0 m 高度的能量闭合度为 77%, 2.4 m 高度的能量闭合度为 73%, 与本文结果非常接近^[22].

对于能量闭合度指标 EBR , 如果取时间步长为半小时进行求和, 在日落后到夜间会出现较大误差, 有效能量 ($Rn-G-S$) 非常小的情况下, EBR 甚至会出现负值. 其他学者用变分法和空气动力学方法计算得到的 EBR 也存在这一现象^[23]. 因此本文在研究半小时的 EBR 时, 只考虑了上午 9 点到下午 5 点之间的情形 (图 10).

将 8 月 5 日至 8 月 19 日 9 点到 17 点共 228 个点的资料 (其中 8 月 12 日、16 日、19 日部分时次资料缺失) 进行平均, 得到 8.7 m 高度的 EBR 为 0.79, 2.7 m 高度的 EBR 为 0.75, 与线性拟合的结果基

本一致. 另外从图中可以看出 8.7 m 高度的 EBR 数据离散度比 2.7 m 的大. 这是因为白天 8.7 m 的潜热通量振荡幅度明显高于 2.7 m, 而净辐射、感热通量、土壤热通量和土壤热储存的变化趋势都相对平滑, 剧烈变化的潜热通量导致了 EBR 的变化较大.

从能量平衡的周日变化的角度考虑, 本文参照 Lee 的方法对每天 24 小时的有效能量 ($Rn-G-S$) 和湍流热通量 ($H+LE$) 进行了求和来计算每天的 EBR ^[24], 结果如表 2 所示.

由于本实验中净辐射仪安装在 2 m 高度, 且 2.7 m 高度处受近地层上层扰动较弱, 对局地能量平衡的代表性优于 8.7 m, 因此本文在分析能量平衡时主要关注 2.7 m 高度. 从表 2 中可以看出从 8 月 5 日到 8 月 19 日, 每天的净辐射总量总体上有微弱减小趋势, 但是变化范围较小在 $1.5 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ 以内. 土壤热通量和表层土壤热储存的变化趋于一致,

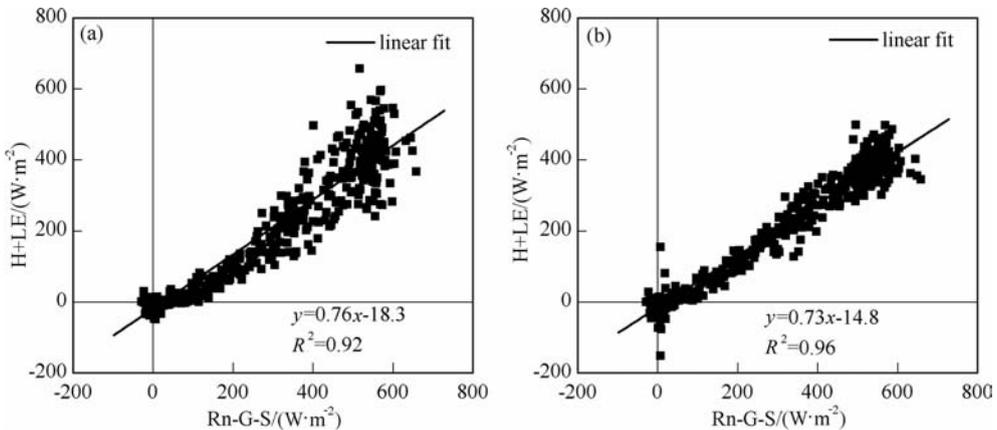


图 9 湍流热通量 ($H+LE$) 与有效能量 ($Rn-G-S$) 的关系. (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

Fig. 9 Comparison of half hourly values of available energy and turbulent heat flux. (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

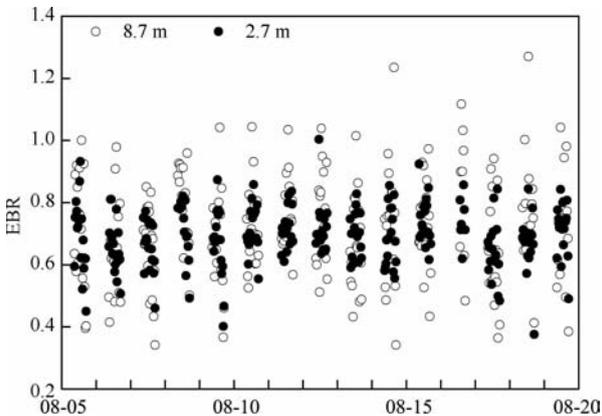


图 10 8 月 5 日到 8 月 19 日 8.7 m 和 2.7 m 能量平衡比率日变化 (9:00 am~17:00 pm)

Fig. 10 Diurnal variations of half hourly values of energy balance ratio at 8.7 m and 2.7 m from August 5 to August 19

土壤含水量较低时土壤热通量和土壤日储存在一天内总和趋近于零, 对能量平衡的影响非常微弱. 但是当土壤含水量很高甚至地面有积水时 (灌溉后的 8 月 17 日和 8 月 18 日), 土壤向近地层大气释放热量, 一天的累积释放热量甚至可以达到净辐射总量的 5%, 造成非平衡能量增大, 能量闭合度锐减. 两个高度的感热通量数值相差较小, 这跟 EBEX-2000 实验期间感热通量一直很小有关. 另外, 在下午 1 点左右出现近地层逆温的 8 月 5、6、7 日, 2.7 m 高度处的感热通量总和均出现了微弱负值, 这是因为近地层逆温直接导致了这些日期感热通量在下午很早便出现了向下输送的现象. 潜热通量由于受净辐射、土壤含水量以及内边界层扰动的影响较大, 其变化关系显得比较复杂. 但是从实验期间 2.7 m 高度的

表 2 实验期间能量平衡各要素及 EBR 日统计表(单位:兆焦耳/平米/天;IMB:非平衡能量;
表中的“—”标记表示当天资料缺失)

Table 2 Energy balance constituents and EBR summed over a 24 hour cycle (unit: MJ m⁻² day⁻¹;
IMB: imbalance energy; “—” in the table indicates data missing)

Day (m/d)	Rn	G	S	H		LE		IMB		EBR	
				8.7 m	2.7 m						
8/05	17.32	-0.19	-0.11	-1.38	-1.49	13.12	12.99	5.89	6.13	0.67	0.65
8/06	17.68	0.02	0.03	-0.55	-0.36	11.67	11.70	6.50	6.28	0.63	0.64
8/07	17.22	-0.11	-0.07	-0.19	-0.42	11.31	11.99	6.28	5.84	0.64	0.66
8/08	16.91	0.01	0.02	1.21	1.08	11.72	10.71	3.96	5.08	0.77	0.70
8/09	16.65	-0.11	-0.06	0.53	0.49	10.72	11.35	5.58	4.99	0.67	0.70
8/10	16.48	-0.09	-0.05	1.46	1.50	10.70	10.25	4.46	4.86	0.73	0.70
8/11	16.81	0	0	1.21	1.29	11.31	10.51	4.30	5.03	0.73	0.70
8/12	16.70	0.23	0.13	—	—	—	—	—	—	—	—
8/13	16.66	-0.11	-0.07	-0.24	-0.07	11.77	11.69	5.30	5.22	0.69	0.69
8/14	16.34	0.08	0.04	1.04	1.16	10.77	10.07	4.41	5.00	0.73	0.69
8/15	16.40	0.06	0.03	0.55	1.03	11.41	10.84	4.34	4.44	0.73	0.73
8/16	16.14	0.09	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—
8/17	16.50	-0.41	-0.43	-0.15	-0.17	10.58	10.86	6.90	6.64	0.67	0.65
8/18	16.42	-0.83	-0.63	0.10	-0.21	12.54	11.21	5.25	6.89	0.71	0.61
8/19	16.42	-0.07	-0.25	—	—	—	—	—	—	—	—

能量闭合度总体变化趋势来看,土壤湿度较小时能量闭合度较好,EBR 最大值可以到达 0.73 左右;而土壤湿度很大时,能量闭合度较差;EBR 最小值 0.61 出现在第二次灌溉后的 8 月 18 日(第二次灌溉 8 月 12 日从实验场地最北端的 1 号站点开始,8 月 17 日下午到达 7 号站点).灌溉引起的热力非均匀性对感热通量的影响比较明显,有内边界层发展的当天,感热通量日总和均出现了负值;对潜热通量的影响主要体现在引起了白天潜热通量的剧烈变化,但是对潜热通量日总和的影响尚不明确.

另外,将表 2 中利用 24 h 资料计算的每日 EBR 与图 10 中白天的 EBR 比较发现运用 24 h 资料计算出的 EBR 平均值明显小于白天的 0.73(2.7 m)和 0.76(8.7 m),说明夜间的能量闭合度要差于白天,该现象在其他学者的研究中也已被证实^[25].

通过以上分析发现在 EBEX-2000 实验中,用线性拟合得到的能量闭合度在 73%左右,而用日平均 EBR 指标计算得到的结果在 60%~73%之间变化.线性拟合的结果优于 EBR 指标计算的结果,但是从较长时段能量平衡的角度考虑,EBR 指标物理意义更为明确.本实验中影响能量平衡的主要有以下两

个因子:

(1)土壤含水量;土壤湿度增大时,能量闭合度明显降低.

(2)灌溉引起的实验场地与上游地表的热力差异.由于地表热力非均匀性催生的大尺度相干结构减少了局地的感热通量蒸发,并引起了潜热通量的剧烈变化.

张宇等的研究也揭示了 EBEX-2000 实验中大尺度相干结构引起了潜热通量的震荡并对通量贡献约 10%~20%^[26].另外仪器观测误差尤其是对夜间弱湍流的能量低估也是潜在的影响因子,通过对湍流时间序列的分析表明夜间的间歇性湍流普遍存在,在本文中未作详细分析.另外忽略植被冠层热储存和植被光合作用也是导致能量闭合度偏低的原因之一. Meyers 和 Hollinger 在研究中发现,较低矮的植被热储存和光合作用对能量平衡也有着重要贡献^[14].在本实验中,棉田的植被覆盖率高达 90%~95%,植被高度 0.9 m,植被的光合作用和热储存效应消耗的能量亦比较可观.如果在能量平衡中考虑植被的能量储存效应,能量闭合度将会得到很大提高.

4.3 订正方法对能量平衡的影响

4.3.1 超声虚温订正

用涡动相关法计算的感热通量由于超声风速仪观测到的是超声虚温而不是真实的空气温度,对感热通量会存在一定程度的高估。根据 Schotanus 的研究结果,利用超声风速仪采集的温度脉动数据计算感热通量时需要运用公式(7)进行订正。当空气中的水汽含量越大时,Schotanus 订正量越大。

图 11 是经过 Schotanus 订正后的 8.7 m 和 2.7 m 的感热通量与未订正前的感热通量的关系,从 H_{cor} (订正后的感热通量)和 H_{raw} (未订正的感热通量)的线性回归关系来看,Schotanus 订正后的感热通量在 8.7 m 和 2.7 m 高度分别为观测值的 83% 和 87%。Schotanus 订正对夜间的感热通量影响较小,对感热通量的减小幅度平均值约为 1 W/m^2 ;而在白天,Schotanus 订正变得比较重要,对感热通量的减

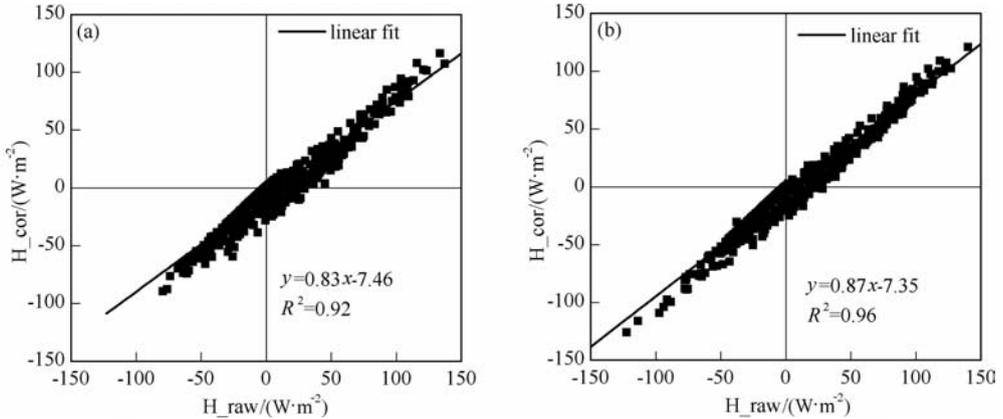


图 11 Schotanus 订正前后的感热通量关系

(H_{cor} : 订正后的感热通量; H_{raw} : 未订正的感热通量). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

Fig. 11 Raw sensible heat flux vs. Schotanus corrected sensible heat flux

(H_{cor} : Schotanus corrected sensible heat flux; H_{raw} : raw sensible heat flux). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m.

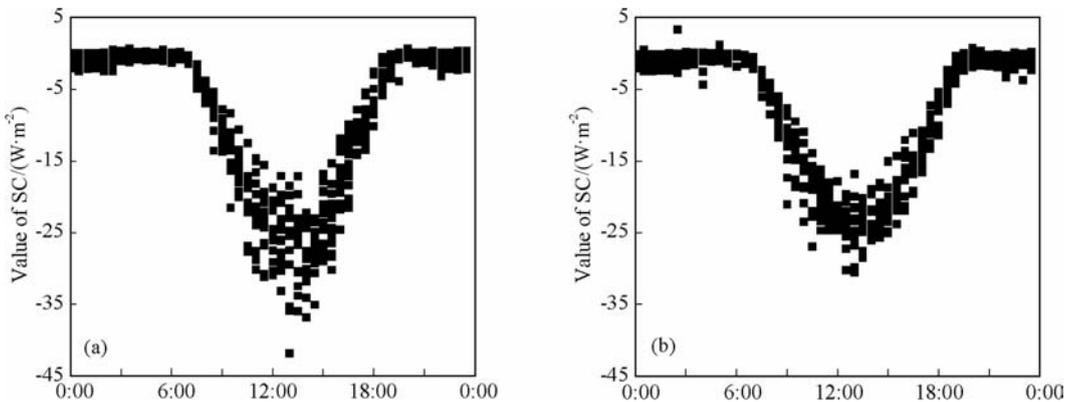


图 12 Schotanus correction (SC) 订正量的日变化

(订正量 = $H_{cor} - H_{raw}$). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

Fig. 12 Diurnal variations of the value of Schotanus correction (SC)

(corrected sensible heat flux minus raw sensible heat flux). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

小幅度最大值可以达到 40 W/m^2 (8.7 m) 和 30 W/m^2 (2.7 m). 在整个实验期间,在 8.7 m 和 2.7 m 高度的订正量日平均值分别为 -8.2 W/m^2 和 -8.0 W/m^2 , 约占净辐射总量的 4% (图 12). 因此对于空气湿度较大的地区,Schotanus 订正对能量平衡有较大影响,必须纳入考虑范围。

4.3.2 Webb 订正

根据公式(8)可知,Webb 订正因子是波文比的函数。在波文比大于 -0.2 时,Webb 订正使得计算出的潜热通量有所增加。而在夜间或午后,感热通量转为向下输送且负值较大,而潜热通量依然向上输送,波文比为负值导致 Webb 订正后的潜热通量值有微弱减小趋势(图 13)。

从 LE_{cor} 和 LE_{raw} 的线性回归关系来看(图 14),Webb 订正后的潜热通量在 8.7 m 和 2.7 m 高度均有约为 2% 的增大。Webb 订正对夜间的潜热通

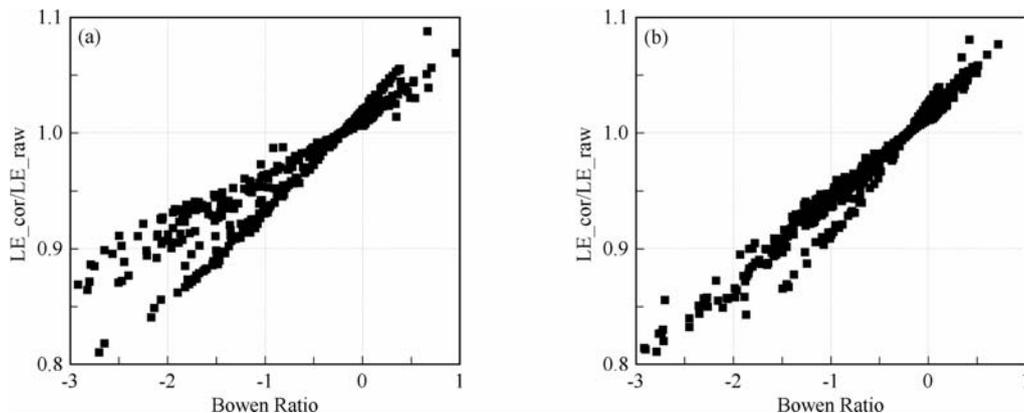


图 13 Webb 订正因子与波文比的关系

(LE_cor; Webb 订正后的潜热通量; LE_raw; 未订正的潜热通量)

(a) 8.7 m; (b) 2.7 m.

Fig. 13 Webb correction factor as a function of Bowen ratio

(LE_cor: Webb corrected latent heat flux; LE_raw: raw latent heat flux). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

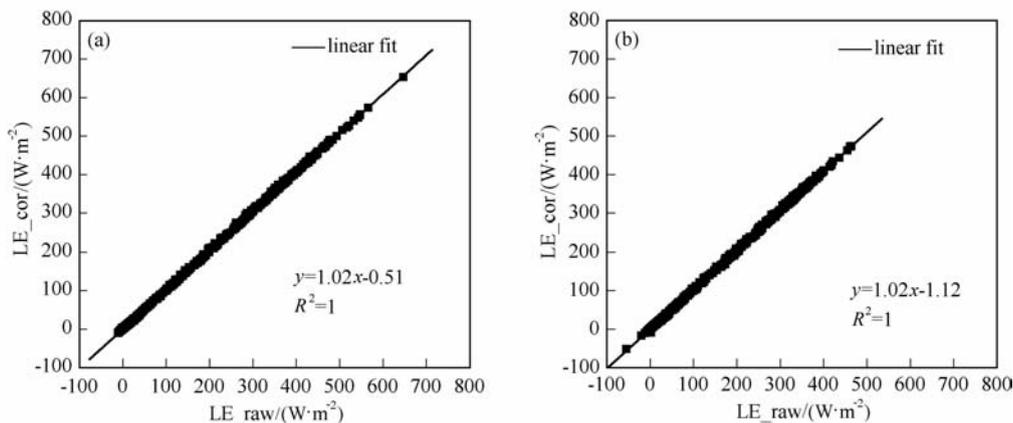


图 14 Webb 订正前后的潜热通量关系

(a) 8.7 m; (b) 2.7 m.

Fig. 14 Raw latent heat flux vs. Webb corrected latent heat flux. (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

量有微弱减小,减小幅度在 5 W/m^2 以内;白天, Webb 订正使得潜热通量有所增大,最大增幅出现在中午 12 点前后,最大值可以达到 15 W/m^2 (图 15),与 Liebethal 利用 EBEX-2000 实验 7 号站点德国 Bayreuth 大学的观测资料分析得到的结果非常接近^[27].在整个实验期间,在 8.7 m 和 2.7 m 高度的订正量日平均值分别为 1.4 W/m^2 和 1.7 W/m^2 ,占净辐射总量不到 1%,因此 EBEX-2000 实验中 Webb 订正对潜热通量的修正量很小,在需要精确考虑能量收支时考虑.

5 结 论

运用 EBEX-2000 实验 7 号站点 8 月 5 日到 8 月 19 日的净辐射、土壤和湍流资料,对净辐射、潜

热、感热、土壤热通量、土壤热储存的日变化规律以及近地层能量闭合度进行了分析,重点通过有无灌溉两种情形下能量平衡各因子的对比研究土壤水分变化和热力非均匀性对通量特征和能量平衡的影响.同时,将 Schotanus 订正和 Webb 订正应用在通量计算中,并对两种订正方法对能量平衡的影响进行了评估.

结果表明,整个实验期间的净辐射、感热通量、潜热通量、土壤热通量和土壤热储存以及非平衡能量都具有明显的日变化规律.但是在土壤湿度不同的情况下,日变化规律有所不同:灌溉过后导致的热力非均匀性在局地形成内边界层发展时,白天尤其是午后近地层的感热通量输送受到抑制,下午一点左右即转为负值;与此同时潜热通量也受到平流和来自混合层的大尺度涡旋的影响,产生剧烈振荡.灌

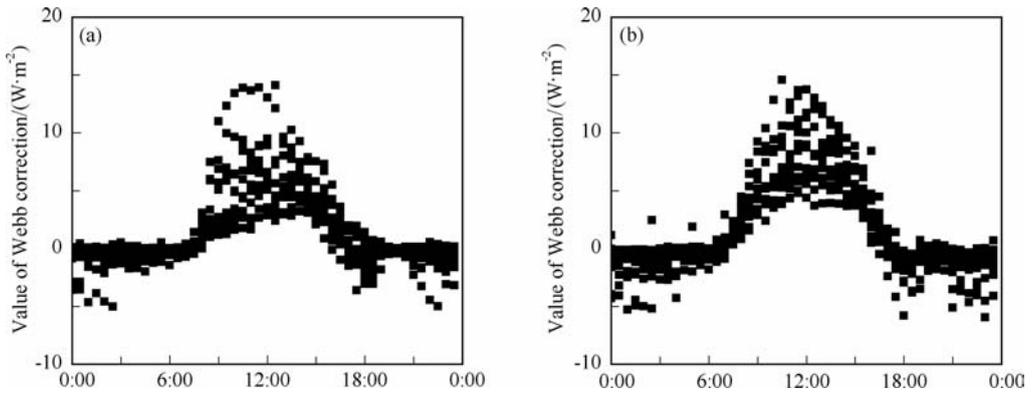


图 15 Webb 订正量的日变化(订正量=LE_cor-LE_raw)

(a)8.7 m;(b)2.7 m.

Fig. 15 Diurnal variations of the value of Webb correction

(corrected latent heat flux minus raw latent heat flux). (a) 8.7 m; (b) 2.7 m

溉过后,土壤热通量和土壤热储存的日较差也高于无灌溉时,且土壤含水量很高时,土壤热通量和热储存的日总和为负值,即土壤向大气释放热量。灌溉对能量平衡也有重要影响。从本文的分析来看,土壤含水量较高,且有热内边界层发展的日子,近地层能量闭合度较差,EBR 仅在 0.65 左右,这主要源于热内边界层的存在对感热和潜热通量的抑制作用;而在无灌溉条件下地表热力状况趋于均一的时段,近地层能量闭合度明显优于灌溉后,EBR 接近 0.70。夜间能量闭合度明显差于白天,这与涡动相关观测系统对弱湍流存在着一定程度的低估有关。

在本实验中,进行 Schotanus 订正会使感热通量减小 15%左右(8.7 m 高度约 17%,2.7 m 高度约 13%),Schotanus 订正量的日平均值约为 -8 W/m^2 ,占到净辐射总量的约 4%,研究能量平衡时必须将其纳入考虑范围。Webb 订正仅会使得潜热通量增大 2%左右,其订正量的日平均值不到 2 W/m^2 ,对能量平衡的影响较小。

参考文献(References)

[1] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 223-243.

[2] Stannard D I, Blanford J H, Kustas W P, et al. Interpretation of surface flux measurements in heterogeneous terrain during the Monsoon '90 experiment. *Water Resources Research*, 1994, 30(5): 1227-1239.

[3] Sun J L, Desjardins R, Mahrt L, et al. Transport of carbon dioxide, water vapor, and ozone by turbulence and local circulations. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (D20): 25873-25885.

[4] Sakai R K, Fitzjarrald D R, Moore K E. Importance of low-

frequency contributions to eddy fluxes observed over rough surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(12): 2178-2192.

- [5] Vickers D, Mahrt L. The cospectral gap and turbulent flux calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(5): 660-672.
- [6] 王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 791-797.
Wang J M, Wang W Z, Ao Y H, et al. Turbulence flux measurements under complicated conditions. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 2007, 22(8): 791-797.
- [7] 胡隐樵. 黑河实验(HEIFE)能量平衡和水汽输送研究进展. *地球科学进展*, 1994, 9(4): 30-34.
Hu Y Q. Research advance about the energy budget and transportation of water vapour in the HEIFE area. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 1994, 9(4): 30-34.
- [8] 马耀明, 姚檀栋, 王介民等. 青藏高原复杂地表能量通量研究. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1215-1223.
Ma Y M, Yao T D, Wang J M, et al. The study on the land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 2006, 21(12): 1215-1223.
- [9] Su Z B, Zhang T, Ma Y M, et al. Energy and water cycle over the Tibetan Plateau: surface energy balance and turbulent heat fluxes. *Advances in Earth Science*, 2006, 21 (12): 1224-1235.
- [10] 刘照明, 胡非, 姜金华, 等. 白洋淀水陆不均匀地区能量平衡特征分析. *大气科学*, 2008, 32(6): 1411-1418.
Liu X M, Hu F, Jiang J H, et al. Energy budget over the water-land heterogeneous surface in Baiyangdian region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2008, 32(6): 1411-1418.
- [11] 李万莉, 吕世华, 傅慎明, 等. 金塔绿洲的辐射平衡特征和地表能量研究. *太阳能学报*, 2009, 30(12): 1614-1620.
Li W L, Lv S H, Fu S M, et al. A study on radiation balance and surface energy in Jinta Oasis. *Acta Energetica Solaris*

- Sinica (in Chinese), 2009, 30(12): 1614-1620.
- [12] Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 123(1): 1-28.
- [13] Stull R B. 边界层气象学导论. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991.
Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1991.
- [14] Meyers T P, Hollinger S E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(1-2): 105-115.
- [15] Liu H P, Peters G, Foken T. New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 100(3): 459-468.
- [16] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26(1): 81-93.
- [17] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [18] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 416-429.
- [19] 刘远永, 文军, 韦志刚等. 黄土高原塬区地表辐射和热量平衡观测与分析. *高原气象*, 2007, 26(5): 928-937.
Liu Y Y, Wen J, Wei Z G, et al. Observation and analysis of the land surface radiation and energy balance over the Loess Plateau mesa region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, 26(5): 928-937.
- [20] 刘树华, 潘英, 胡非等. 沙漠绿洲地区夏季地表能量收支的数值模拟. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1-11.
Liu S H, Pan Y, Hu F, et al. Numerical simulation of summer land surface energy budget in desert and oasis regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5): 1-11.
- [21] 刘树华, 胡予, 胡非等. 沙漠-绿洲陆-气相互作用和绿洲效应的数值模拟. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1019-1027.
Liu S H, Hu Y, Hu F, et al. Numerical simulation of land-atmosphere interaction and oasis effect over oasis-desert. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(5): 1019-1027.
- [22] Lehner I. Energy balance of an irrigated cotton field [Master's thesis]. Basel: Department of Geography-University of Basel, 2003.
- [23] 刘树华, 茅宇豪, 胡非等. 不同下垫面湍流通量计算方法的比较研究. *地球物理学报*, 2009, 52(3): 1-12.
Liu S H, Mao Y H, Hu F, et al. A comparative study of computing methods of turbulent fluxes on different underlying surfaces. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 1-12.
- [24] Lee X, Hu X. Forest-air fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 103(2): 277-301.
- [25] 王春林, 周国逸, 王旭等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析. *热带气象学报*, 2007, 23(6): 643-651.
Wang C L, Zhou G Y, Wang X, et al. Energy balance analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2007, 23(6): 643-651.
- [26] Zhang Y, Liu H P, Foken T, et al. Coherent structures and flux contribution over an inhomogeneously irrigated cotton field. *Theor. Appl. Climatol.*, 103(1-2): 119-131, doi: 10.1007/s00704-010-0287-6.
- [27] Liebethal C, Foken T. On the significance of the Webb correction to fluxes; research note. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 109(1): 99-106.

(本文编辑 刘少华)