

刘熙明, 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 Ximing, Hu Fei, Jiang Jinhua, 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

白洋淀水陆不均匀地区能量平衡特征分析

刘熙明^{1, 2} 胡非¹ 姜金华¹ 甄灿明¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 江西省气象科学研究所, 南昌 330046

摘 要 应用 2005 年 9 月在河北白洋淀地区进行的大气边界层综合观测实验资料, 对水陆不均匀地表条件下的白洋淀地区陆地的能量平衡特征进行了分析。结果表明: (1) 该地区存在能量不闭合现象。涡动相关法得到的感热、潜热之和仅为有效能的 75%, 其中涡动相关法得到的潜热通量为 Bowen 比法得到的潜热通量的 70%, 而涡动相关法得到的感热通量为 Bowen 比法得到的感热通量的 77%。(2) 地表潜热通量和感热通量随着净辐射的变化而变化。但潜热通量明显比感热通量大, 净辐射主要消耗于地表的水汽蒸发。(3) 该地区白天的 Bowen 比平均在 $-0.4 \sim 0.4$ 之间, 总体平均为 0.131。受天气条件影响较大, 有明显的日变化, 午后 15:00 以后近地面层会出现逆温, Bowen 比变为负值。(4) 能量闭合程度有一定的日变化, 随着太阳高度角的增大而增大。

关键词 非均匀地表 能量平衡 Bowen 比 涡动相关

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1411-08

中图分类号 P404

文献标识码 A

Energy Budget over the Water – Land Heterogeneous Surface in Baiyangdian Region

LIU Ximing^{1, 2}, HU Fei¹, JIANG Jinhua¹, and ZHEN Canming¹

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Meteorological Sciences Institute of Jiangxi Province, Nanchang 330046*

Abstract The phenomenon of energy imbalance over heterogeneous surface is very significant. In this paper, a comprehensive field experiment of atmospheric boundary layer (ABL) over the water – land heterogeneous surface was briefly introduced – “Baiyangdian Field Experiment for Heterogeneous Boundary Layer”. The experiment was performed in Baiyangdian area of North China during 8 – 27 September 2005. Some characteristics of energy budget over this water – land heterogeneous surface are analyzed. The results show that (1) there exists energy imbalance in Baiyangdian region. The sum of sensible heat flux and latent heat flux measured by the Eddy Correlation (EC) method is about 75% of the available energy, while the latent heat flux measured by the EC method is about 70% of that measured by the Bowen Ratio (BR) method, and the sensible heat flux measured by the EC method is about 77% of that by the BR method. (2) The surface latent heat flux and sensible heat flux vary with the net radiation energy. But the latent heat flux is larger than sensible heat flux, which means that the net radiation is consumed for

收稿日期 2006-08-16, 2007-08-20 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233030、40605006

作者简介 刘熙明, 男, 1963 年出生, 博士, 高级工程师。主要从事大气边界层物理和城市气候与环境研究。E-mail: xmliu@mail.lap.ac.cn

evaporating water from surface. (3) The value of daytime Bowen ratio β is between -0.4 and 0.4 , with mean value 0.131 , which is influenced greatly by weather condition. The diurnal variation of β is obvious, and the value of β becomes minus when the temperature inversion appears over surface after 1500 LST. (4) The energy balance closure changes diurnally, and increases with the solar altitude.

Also, a few remarks and some discussion about the mechanism of energy imbalance over heterogeneous surfaces are given at the end of this paper.

Key words heterogeneous surface, energy balance, Bowen ratio, eddy correlation method

1 引言

大气边界层是地球大气动量、能量和各种物质上下输送的通道,全球变化的区域响应以及地表变化和人类活动对气候的影响也是通过大气边界层过程实现的^[1]。因此,了解地气之间能量和物质的交换过程以及大气边界层湍流结构具有十分重要的科学意义和实用价值。传统的大气边界层理论是以 Monin-Obukhov 相似理论为基础,但 Monin-Obukhov 相似理论仅在近于定常和水平均匀下垫面的条件下成立,而实际地表总是呈现不同尺度和不同程度的非均匀性。非均匀下垫面上的边界层结构和物理过程显然要比均匀下垫面上的复杂得多。由于地表性质的不均匀分布,导致地表动量通量、感热通量和水汽通量的分布不均,改变边界层大气的结构和物理过程^[2~5],并由此影响到自由大气,产生各种不同的天气气候变化。因此,如何更准确地估算非均匀地表条件下的各地表通量变得越来越重要。

常规的地气之间的热通量的估算方法主要有 Bowen 比法、涡动相关法、空气动力学法^[6,7]等。但是,观测结果表明,不同的估算方法得到的地表热通量不同。也就是说,不均匀地表条件下的边界层存在地表能量不闭合现象。

一般来讲,地表能量平衡方程^[8]可以表示为:

$$R_n = H_s + L_e + G, \quad (1)$$

其中, R_n 是净辐射能, H_s 是感热通量, L_e 是潜热通量, G 是土壤热通量。在公式(1)中,忽略了植被热储存和植被光合耗能等项。由于植被热储存和植被光合耗能等非常难以直接测量,因此人们一般都在公式(1)的框架下讨论所谓能量平衡问题,但

这显然是不平衡的一个误差来源。

观测中的能量不平衡是近年来野外观测试验所遇到的一个比较突出的问题^[9,10]。陆龙骅^①观测结果表明,稻田和旱地中的 $R_n - (H_s + L_e)_{ec} - G$ 值为净辐射的 $20\% \sim 25\%$ 。朱治林等^[11]对 HUBEX 期间的观测资料分析发现,用涡动相关方法测定的感热和潜热之和 $(H_s + L_e)_{ec}$ 与下垫面有效能量 $(R_n - G)$ 的一致性比较好,但用 Bowen 比方法估算的潜热通量比用涡动相关法测定的潜热通量约高 10% 。McNeil 等^[12]对松树林中的 Bowen 比方法和涡动相关法的结果进行比较发现,涡动相关法所测到的感热通量较鲍恩比法测得的约小 24% 。Dugas 等^[13]得到涡动相关法所测到的感热和潜热通量都较鲍恩比法测得的小。张宇等^[14]对夏季绿洲边缘的能量平衡进行分析发现地表能量不平衡的差额达到 28% 。可以说,非均匀地表条件下的边界层中都存在能量不闭合现象。

然而,对于造成地表能量不平衡的物理机制目前仍在探究当中。张宇等^[14]认为夏季绿洲边缘的能量不平衡与绿洲边缘和沙漠存在比较大的热力差异所引起的平流以及绿洲林带内的中尺度对流有关。Brotzge 等^[15]认为,仪器的误差、地表非均匀性以及观测环境等都会影响能量闭合。王介民^②认为,地表能量不闭合,表明对准确测量公式中的各项或部分项的能力不足,或对系统在物理上缺乏完全的了解,非均匀下垫面和地形起伏下的平流影响以及夜间等弱湍流条件下波动和流动分裂的出现都会造成地表能量不闭合。

2 试验简介及试验期间天气

2.1 试验简介

白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊,位于河北

① 陆龙骅. 边界层物理过程观测研究及关键问题. “第三届大气边界层战略研讨会”报告. 南京, 2004

② 王介民. 湍流通量观测与计算中的新问题. “第四届大气边界层战略研讨会”报告. 兰州, 2005

省中部平原,总面积超过 360 km²。它是由多条河流将各个淀泊连在一起,沟壕纵横,芦荡、莲塘星罗棋布,淀淀相连,是水陆非均匀地表条件下的边界层试验比较理想的场所。试验分两次,即:2004 年 11 月 15~22 日和 2005 年 9 月 7~27 日,其中 2004 年的试验设有 2 个观测点——雄县(代表陆地)和王家寨(淀中岛上,代表水域);2005 年在陆地上又增设了 2 个观测点——北六村和赵北口。由于试验仅在陆地观测点(雄县、北六村)同时设有湍流观测、辐射观测和 Bowen 比观测,而北六村的湍流观测在试验期间出现了故障,另外,雄县 2005 年 9 月份的资料比 2004 年 11 月份的时间长,连续性较好。因此,本文所用资料来自 2005 年 9 月 11~26 日期间雄县的观测,其中 14 日 07:00~11:00(北京时,下同)缺 Bowen 比辐射资料。

雄县观测点(38°56.91'N, 116°01.81'E)位于白洋淀地区的东北部的雄县县城西偏南城郊的一桃园内,2005 年观测期间桃树比较茂盛,树高约 2.0 m,地表以果树植被为主,四周则为平坦的陆地。

试验中三维风速和超声虚温的湍流观测仪器为美国 Campbell 公司的 CSAT3 探头,水汽和二氧化碳的脉动观测仪为 LICOR7500,采样频率均为 10 Hz,探头的安装高度为 3.5 m,比果树约高 1.5 m。Bowen 比观测仪器是北京大学生产的,辐射观测项目包括:向上长波辐射、向下长波辐射、向上短波辐射、向下短波辐射、土壤热通量以及 4 层土壤温度(分别为地下 1 cm、5 cm、10 cm、20 cm)等。数据记录频率为 10 分钟一次,在高度差为 2 m 的高一低两个层次之间的进行干、湿球测量。有关白洋淀实验的详细情况请参阅文献[16]。

2.2 实验期间天气

2005 年 9 月 11~26 日期间,实验地区以多云天气为主,11~13 日以多云天气为主,14 日为晴天,15 日下午~16 日早晨出现了 10.0 mm 左右的较强降水;17 日晴天多云,18 日多云,19~21 日上午以阴雨天气为主;19 日凌晨出现了 1.0 mm 左右的降水,20 日和 21 日的降雨量分别达到 5.0 mm 和 3.0 mm 左右;21 日白天~26 日为晴到多云天气,其中 24 日夜間出现了小雨天气,降雨量在 1.0 mm 以内。

3 计算方法

3.1 Bowen 比法

从近地面层大气热量和水汽的湍流扩散方程出发,由梯度观测结果来计算地表感热通量 H_s 和潜热通量 L_e 。

$$H_s = \rho c_p K_h \Delta t / \Delta z, \quad (2)$$

$$L_e = \rho L_v K_m \Delta q / \Delta z, \quad (3)$$

其中, ρ 为空气密度, c_p 为空气比热, L_v 为水汽蒸发潜热, K_h 和 K_m 分别为热量和水汽湍流交换系数, Δt 和 Δq 分别为两层温差和湿度差, Δz 为两层高度差。

令

$$\beta = \frac{H_s}{L_e}, \quad (4)$$

β 为 Bowen 比。假设 $K_h = K_m$, 则由 (2)、(3) 式得到:

$$\beta = \gamma \Delta t / \Delta q, \quad (5)$$

其中, $\gamma = c_p / L_v$ 。则由方程 (1)~(5) 得到:

$$H_s = \beta (R_n - G) / (1 + \beta), \quad (6)$$

$$L_e = (R_n - G) / (1 + \beta). \quad (7)$$

由于 R_n 、 G 、 Δt 、 Δq 、 Δz 均可由试验直接测得,从 (6)、(7) 式可得到感热通量和潜热通量。

3.2 涡动相关法

涡动相关法 (Eddy Correlation method) 又称直接法。由快速响应仪器测得风、温、湿时间序列资料,然后由下列方程得到感热、潜热通量:

$$H_s = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (8)$$

$$L_e = \rho L_v \overline{w'q'}, \quad (9)$$

其中, w' 、 T' 、 q' 分别为垂直速度、温度、湿度在一段时间内(本文为 30 min)的湍流值,“ $\overline{\quad}$ ”为时间平均。在应用涡动相关法计算湍流通量时,须先对原始资料进行去趋、去野点和坐标旋转等处理。

4 结果分析

4.1 Bowen 比法与涡动相关法结果比较

图 1 为 2005 年 9 月 11~26 日期间雄县观测点涡动相关法得到的感热、潜热之和 $(H_s + L_e)_{ec}$ 与有效能 $(R_n - G)$ 的对比。可以看到,大部分点都偏于 1:1 线的右侧,说明 $(H_s + L_e)_{ec}$ 总体比 $(R_n - G)$ 偏小,存在能量不闭合现象。两者的线性回归方程为

$$Y = 0.7502X + 9.1021, \quad (10)$$

其中, Y 为涡动相关法得到的感热、潜热之和 ($H_s + L_e$)_{ec}, X 为有效能 ($R_n - G$), 两者的相关系数为 0.7502, 截距为 9.1021。除去观测数据的间断以及奇异点, 数据样本为 725 个, $R^2 = 0.8556$ 。

图 2 分别为雄县观测点 2005 年 9 月 11~26 日

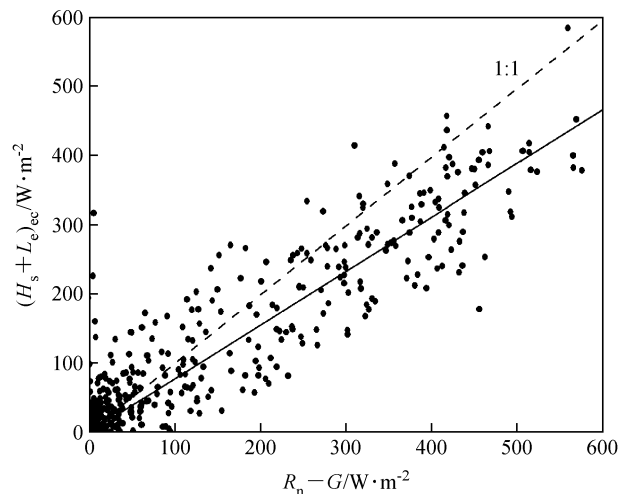
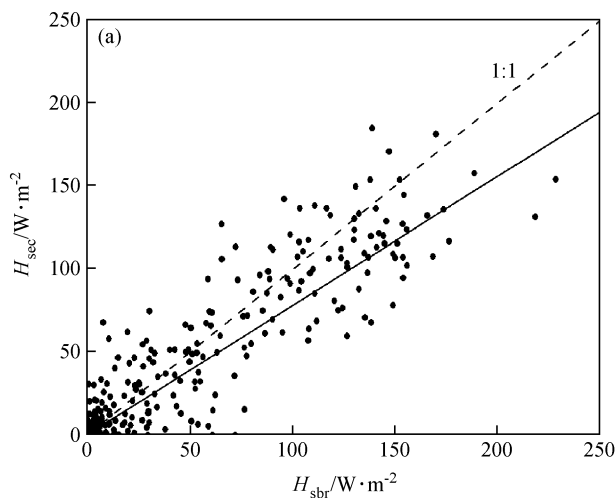


图 1 2005 年 9 月 11~26 日期间雄县 ($H_s + L_e$)_{ec} 与 ($R_n - G$) 的比较。图中实线为线性拟合线, 黑点为有效能 ($R_n - G$) 与涡动相关法得到的感热、潜热之和 ($H_s + L_e$)_{ec} 的一一对应

Fig. 1 Comparison of the sum of sensible and latent heat fluxes by the eddy correlation method ($H_s + L_e$)_{ec} with the available energy ($R_n - G$) during 11-26 Sep 2005 in Xiong County. The solid line is the linear regression fitting line; the black dots are ($R_n - G$) vs. ($H_s + L_e$)_{ec}



观测期间, 应用涡动相关法得到的感热 H_{sec} 、潜热 L_{ec} 与 Bowen 比 (BR) 法得到的感热 H_{sbr} 、潜热 L_{ebr} 的比较。同样, 总体上看, 不管是感热还是潜热, 涡动相关法得到的都比 Bowen 比法的小。它们的线性回归方程分别为:

$$Y_{H_s} = 0.7671X_{H_s} + 1.5174, \quad (11)$$

$$Y_{L_e} = 0.6976X_{L_e} + 9.5426, \quad (12)$$

其中, X_{H_s} 、 X_{L_e} 分别为 Bowen 比法得到的感热和潜热, Y_{H_s} 、 Y_{L_e} 分别为涡动相关法得到的感热和潜热。数据样本数均为 725, 协方差分别为: $R_{H_s}^2 = 0.7778$, $R_{L_e}^2 = 0.8067$ 。从方程 (11)、(12) 可以看到, 潜热通量的相关系数为 0.6976, 而感热通量的相关系数为 0.7671, 比潜热通量的大。说明该地区的能量不闭合现象在潜热通量方面更突出。

造成能量不闭合的原因可能是: (1) 观测仪器的精确性和可比性^[15]。由于涡动相关法和 Bowen 比法是两套独立的观测设备, 不仅精确度有差别, 而且仪器精度的漂移也不同。(2) 地表非均匀性。非均匀地表能激发中尺度环流和平流^[14, 17], 而目前观测原理基本上是基于均匀地表条件下, 例如: 在 Bowen 比法中是假设 $K_h = K_m$, 但在非均匀地表条件下, 常常是 $K_h \neq K_m$ 。另外, 非均匀地表条件下, 湍流更复杂, 使得在实验观测以及资料分析当中, 忽略了一些有用的项, 如高阶距湍流项、平均垂直输送项以及中尺度的影响等。(3) 天气条件的

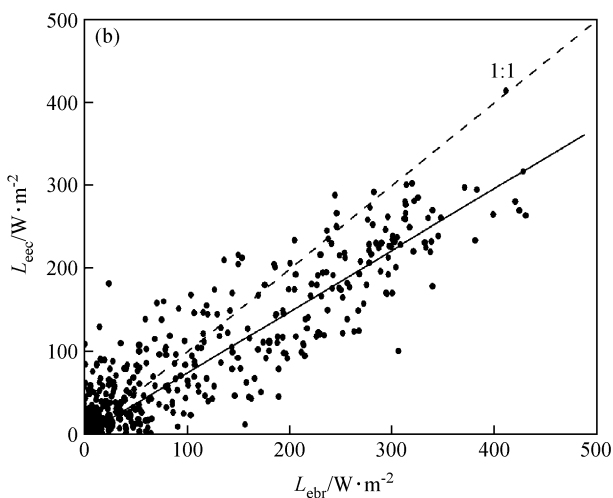


图 2 2005 年 9 月 11~26 日期间涡动相关法与 Bowen ratio 法得到的感热通量 (a)、潜热通量 (b) 比较。图中实线为线性拟合线, 黑点为 Bowen 比法得到的感热通量 (a) 和潜热通量 (b) 与涡动相关法得到的感热通量 (a) 和潜热通量 (b) 的一一对应

Fig. 2 Comparisons of (a) sensible and (b) latent heat fluxes by the eddy correlation method with those by the Bowen ratio method during 11-26 Sep 2005 in Xiong County. The solid line is the linear regression fitting line; the black dots are (a) sensible and (b) latent heat fluxes by the Bowen ratio method vs. those by the eddy correlation method

影响。由于天气系统的变化，导致风向、风速及大气稳定度的变化。而通量的观测不仅与观测高度有关，还与风速、风向、地表粗糙度以及源区与观测位置之间的距离有关^[18]。

4.2 能量平衡因子及 Bowen 比特征

图 3 为 2005 年 9 月份雄县的 R_n-G 、 H_s 和 L_e 的平均日变化情况。可以看到，潜热通量与感热通量都是随着净辐射的增大（减小）而增大（减小），但潜热通量比感热通量大，说明 9 月份该地区以潜热通量为主，净辐射主要用于地表水分的蒸发。并且，下午 15:00 以后，潜热通量超过 R_n-G ，感热通量变为负值，意味着有逆温出现。从图 4 的 Bowen 比平均日变化可以看到，9 月份该地区白天的平均 Bowen 比在 $-0.4\sim0.4$ 之间，总体平均为 0.131。Bowen 比随着太阳高度角的增大缓慢增大，说明上午感热通量增大幅度较潜热通量大。但午后 Bowen 比下降非常明显，并且在 15:00 以后转为负值，与 Zhu 等^[11]得到的 HUBEX 期间 1999 年 7 月份的结果一致。这是因为随着太阳高度角的减小，地表感热通量迅速减小，并且 15:00 以后在近地层出现感热向下传输的逆温结构。出现负的感热通量（逆温）可能是由于果树较高造成的，因为到下午的时候，果树对通量观测的探头有一定的遮挡。

实际上，Bowen 比的变化受风向、风速、大气稳定度等多种因子的影响。图 5 为 9 月 15~26 日期间雄县的 Bowen 比白天（07:00~17:00）的逐日变化。可以看到，总体上来讲，该地区白天的 Bowen 比在 $-0.8\sim0.8$ 之间，并有明显的日变化。

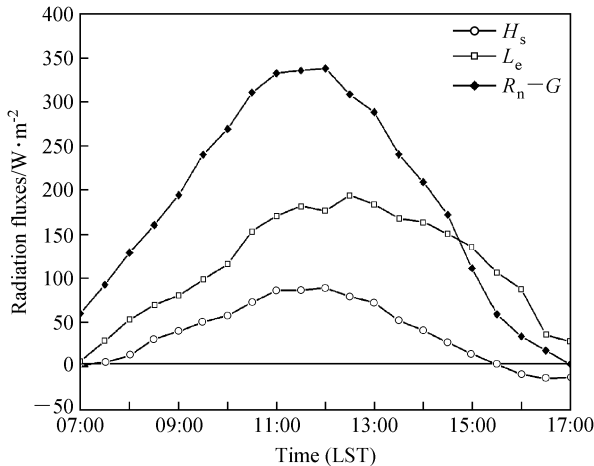


图 3 2005 年 9 月雄县的 R_n-G 、 H_s 和 L_e 的平均日变化
Fig. 3 Diurnal variations of R_n-G , H_s and L_e in Sep 2005 in Xiongqian

天气晴好时，上午 Bowen 比均呈增大趋势，中午前后开始迅速减小，15:00~16:00 之后变为负值，近地面层的逆温开始出现。但是，同样可以看到，Bowen 比受天气影响较明显：15 日受高空槽和低层切变的影响，出现比较明显的降水，Bowen 比绝对值很小，基本上小于 0.2，说明感热通量很小，并且在中午前后为负感热通量；18~19 日天空云系较多，Bowen 比的变化幅度不大，白天最大不超过 0.4；20 日降水较明显，同样，Bowen 比变化幅度小，并且以负的感热通量为主。

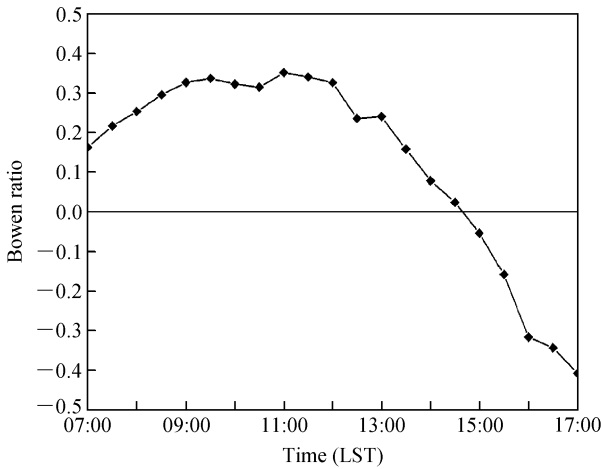


图 4 2005 年 9 月雄县白天平均 Bowen 比日变化
Fig. 4 Diurnal variation of mean Bowen ratio in Sep 2005 in Xiongqian

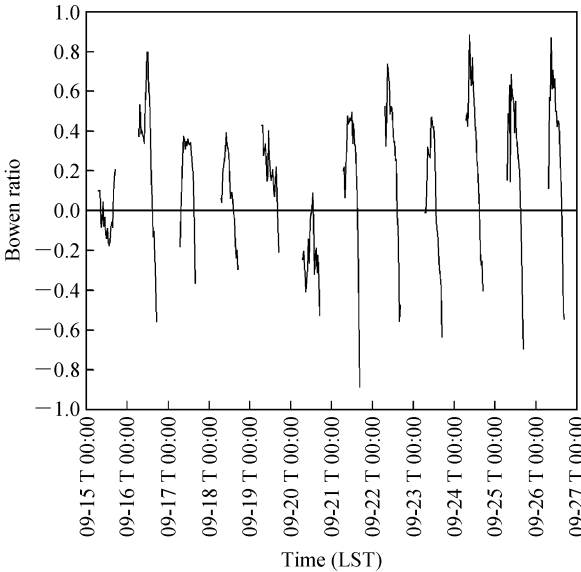


图 5 2005 年 9 月 15~26 白天雄县 Bowen 比的变化
Fig. 5 Diurnal changes of Bowen ratio during 15-26 Sep 2005 in Xiongqian

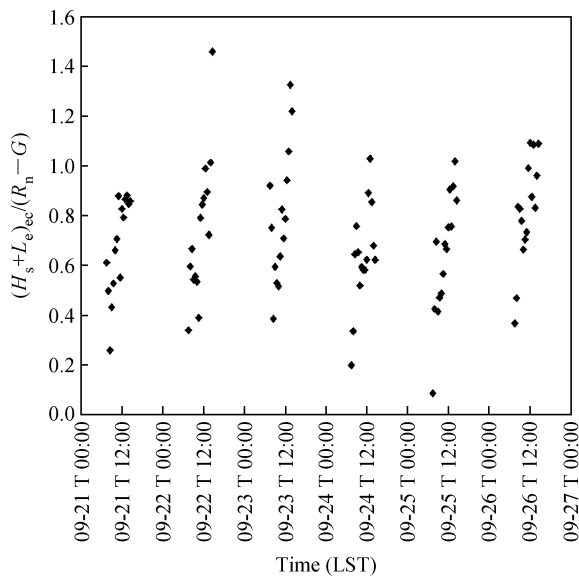


图6 9月21~26日能量闭合度的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of energy balance closure during 21–26 Sep

4.3 能量闭合度特征

定义能量闭合度为 $C = (H_s + L_e)_{ec} / (R_n - G)^{[14]}$, 显而易见, 在忽略植被热储存和植被光合耗能等项的条件下 (这也是能量“不闭合”的一个误差来源), 当 C 趋于 1.0 时能量平衡达到最好, 但实际上 C 并不是一个恒定的值。21~26 日的天气比较稳定, 这里分析这段时间的白天 (07:30~14:30) 能量闭合度的日变化情况 (图 6)。可以看到, 能量闭合度大部分情况在 0.4~1.0 之间, 各天的平均值分别为: 0.6852、0.748、0.8006、0.6385、0.648、0.8207, 6 天平均为 0.724, 与方程 (2) 中的平均相关系数 0.7502 基本相符。另外, 闭合度有明显的日变化, 早晨最小, 然后逐渐增大, 到中午前达到最大值。造成这种日变化的原因可能是: (1) 早晨日出前后, 近地层有平流和弱湍流, 影响通量的观测不准确; (2) 在湍流资料处理过程中, 坐标旋转后 $\bar{W} = 0.0$, 忽略了平均垂直运动对通量输送的影响。

图 7 为 21~26 日期间 $(R_n - H_{sec} - L_{ecc} - G) / R_n$ 的日变化情况。可以看到, $(R_n - H_{sec} - L_{ecc} - G) / R_n$ 大部分情况在 0~0.5 之间, 各天的平均值分别为: 0.2969、0.2369、0.1844、0.3354、0.3208、0.1689。6 天平均为 0.258, 与陆龙骅^①报道的稻田和旱地中的结果是一致的。同时, 可以发

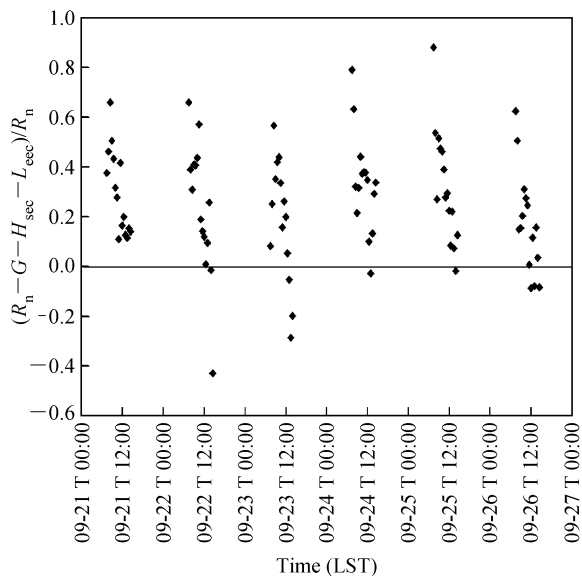
图7 9月21~26日 $(R_n - H_{sec} - L_{ecc} - G) / R_n$ 的日变化

Fig. 7 Diurnal variations of $(R_n - H_{sec} - L_{ecc} - G) / R_n$ during 21–26 Sep

现, $(R_n - H_{sec} - L_{ecc} - G) / R_n$ 同样存在明显的日变化, 但这种日变化与能量闭合度 $(H_s + L_e)_{ec} / (R_n - G)$ 相反, 早晨最大, 然后逐渐减小。这可能是与净辐射的日变化特点有关。

5 结语与讨论

本文利用 2005 年 9 月在河北白洋淀地区进行的非均匀边界层试验资料, 对水陆不均匀地表下的白洋淀地区的能量平衡特征进行了分析, 该地区存在能量不闭合现象。

(1) 平均来讲, EC 法得到的感热与潜热通量之和 $(H_s + L_e)_{ec}$ 为有效能 $(R_n - G)$ 的 0.75 左右, 这种能量不闭合现象在潜热通量方面表现更突出。虽然潜热通量与感热通量都是随着净辐射的增大 (减小) 而增大 (减小), 但潜热通量比感热通量大, 净辐射主要用于地表水分的蒸发。

(2) 该地区 Bowen 比白天平均值在 -0.4~0.4 之间, 总体平均为 0.131, 有明显的日变化, 并且受天气条件影响较大, 下午 15:00~16:00 以后变为负值, 近地面层有逆温出现。

(3) 天气稳定时, 能量闭合度 $(H_s + L_e)_{ec} / (R_n - G)$ 平均为 0.724, 同样有日变化, 早晨最小,

① 陆龙骅. 边界层物理过程观测研究及关键问题. “第三届大气边界层战略研讨会”报告. 南京, 2004

然后逐渐增大,到中午前达到最大值。

能量不闭合现象已受到广泛关注,一般认为其原因主要有:仪器观测误差,即观测方法问题,观测高度及时空尺度差异,观测地区下垫面不均匀性等。此外,地表湍流通量的估算大都采用涡动相关法(EC)和Bowen比法,Bowen比法中假设湍流动量和热量交换系数是相等的,即 $K_h = K_m$,而在非均匀边界层湍流中,这是一个重要的误差来源。长期以来涡动相关法也是一个行之有效的方法,但严格说来涡动相关法要求大气湍流处于均匀各向同性和定常的条件,这就要求观测时段内无平均垂直速度、无平流,而且湍流得到充分发展,而实际地表大都呈现不均匀,实际的湍流并不完全是均匀各向同性的,存在间歇性和相干结构(包括低频涡运动),这些都必然会影响到涡动相关法对实际的湍流通量估算的准确性^[19~21],从而也是导致能量不平衡的原因。另外,观测点的高度、风速、风向、大气稳定度、地表粗糙度以及源区与观测位置之间的距离都对地表通量有影响^[22, 23]。最近十多年来,人们越来越重视研究如何更准确地估算湍流通量的方法,例如footprint方法、Webb订正等,这方面的工作目前仍是大气边界层和大气湍流研究的热点之一。

致谢 北京大学张宏升教授、蔡旭辉教授,中国科学院大气物理研究所李爱国、周肖森高级工程师以及曲绍厚研究员、刘宇博士主要负责完成了本文的外场观测实验。

参考文献 (References)

- [1] 胡非,洪钟祥,雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学, 2003, **27** (4): 712~728
Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 712~728
- [2] Mason P J. The formation of areally-averaged roughness lengths. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1988, **114** (480): 399~420
- [3] Claussen M. Estimation of areally-averaged surface fluxes. *Bound.-Layer Meteor.*, 1991, **54**: 387~410
- [4] Grant A L M. Surface drag and turbulence over an inhomogeneous land surface. *Bound.-Layer Meteor.*, 1991, **56**: 309~337
- [5] Mahrt L. Surface heterogeneity vertical structure of the boundary layer. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **96**: 33~62
- [6] Garratt J R. The measurement of evapotranspiration by meteorological methods. *Agricultural Water Management*, 1984, **8**: 99~117
- [7] 胡隐樵. 近地面层湍流通量观测误差的比较. 大气科学, 1990, **14** (2): 215~224
Hu Yinqiao. Comparisons of observational error of turbulent flux in near surface layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1990, **14** (2): 215~224
- [8] Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1988
- [9] Gao Zhiqiu, Bian Lin'gen, Zhou Xiuji. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D13): 4387~4399
- [10] Culf A D, Foken T, Gash J H C. The energy balance closure problem. *Vegetation, Water, Humans and Climate. A New Perspective on an Interactive System*. Kabat P, Claussen M, Dirmeyer P A, et al. Eds. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. 159~166
- [11] Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H. Statistical analysis and comparative study of energy balance components estimated using micrometeorological techniques during HUBEX/IOP 1998/99. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (2): 285~291
- [12] McNeil D D, Shuttleworth W J. Comparative measurements of the energy fluxes over a pine forest. *Bound.-Layer Meteor.*, 1975, **9**: 297~313
- [13] Dugas W A, Fritschen L W, Gay A A, et al. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, **56**: 1~20
- [14] 张宇,吕世华,陈世强,等. 绿洲边缘夏季小气候特征及地表辐射与能量平衡特征分析. 高原气象, 2004, **24** (4): 527~533
Zhang Yu, Lü Shihua, Chen Shiqiang, et al. Characteristics of energy budget and microclimate on the edge of oasis summer. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 2004, **24** (4): 527~533
- [15] Brotzge J A, Crawford K C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement system. *Journal of Hydrometeorology*, 2003, **4**: 160~178
- [16] 胡非,洪钟祥,陈家宜,等. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析. 大气科学, 2006, **30** (5): 883~893
Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area—introduction and preliminary data analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 883~893
- [17] Segal M, Artritt R W. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradient. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**: 1593~1604
- [18] Horst T W. The footprint for estimation of atmospheric-sur-

- face exchange fluxes by profile techniques. *Bound.-Layer Meteor.*, 1999, **90**: 171~188
- [19] Cockede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modeling for the characterization of complex sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **127**: 175~188
- [20] 陈家宜, 范邵华, 赵传峰, 等. 涡旋相关法测定湍流通量偏低的研究. *大气科学*, 2006, **30** (3): 423~432
Chen Jiayi, Fan Shaohua, Zhao Chuanfeng, et al. The underestimation of the turbulent fluxes in eddy correlation techniques. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 423~432
- [21] 刘树华, 李洁, 刘和平, 等. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征. *大气科学*, 2005, **29** (2): 213~224
Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, et al. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 213~224
- [22] Rannik U, Aubinet M, Kurbanmuradov O. et al. Footprint analysis for measurements over a heterogeneous forest. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **97**: 137~166
- [23] Schmid H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**: 159~183

新书介绍 ——《Regional Climate Studies of China》

由符淙斌等人主编的《Regional Climate Studies of China》一书已于 2008 年 8 月由世界著名的科学技术出版集团 Springer 公司正式出版。

这本英文专著是应 Springer 公司“Regional Climate Studies”丛书编委会之邀组织编写的。书中系统总结了过去十余年来我国学者在中国区域气候研究领域的最新进展和成果。全书共分 11 章, 计 476 页, 包括插图 164 幅, 表格 42 件。

本书内容涵盖了中国和东亚季风气候的基本特征、与太平洋和印度洋海温变化相联系的年际-年代际时间尺度上的气候变率, 以及利用我国丰富的代用气候环境指标开展的古代 (特别是全新世以来) 气候变化研究。青藏高原对我国气候形成和变异的影响以及北方干旱化等问题具有显著的中国区域特色, 书中为此专门设立了相应章节进行总结和探讨。同时, 在极端气候事件、土壤湿度、未来气候变化情景预测以及气候变化对农业、水资源影响和适应对策被日益关注的今天, 本书还分别介绍了我国学者在上述领域取得的最新研究成果。

区域气候模式是开展气候变化机理和趋势预测研究的有力工具, 本书也介绍了我国发展的区域环境系统集成模式及其应用效果, 以及我国科学家发起的亚洲区域模式比较计划的主要进展。

丛书编委会对本书的编写质量给予了充分肯定, 认为该书: “第一次全面系统地向国外读者总结了过去十年来关于中国区域气候变化的最新研究成果。本书的显著特色之一就是將一系列基于先进科技手段, 如野外实验观测和遥感, 以及数值模拟研究等获得的关于区域气候变化的知识进行了有机的综合集成, 将极大地促进我们对中国区域气候变化的认识水平”。

2008-10-08

中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室供稿