

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

胡 非¹ 洪钟祥¹ 陈家宜² 刘熙明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 北京大学大气科学系, 北京 100871

摘 要 介绍了国家自然科学基金重点项目“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”在河北省白洋淀地区进行的两次综合观测实验(时间分别是2004年11月16~22日和2005年9月8~27日), 这两次实验获得了大量宝贵的资料, 全面深入的资料分析正在进行中。此文主要限于白洋淀地区水陆不均匀地表近地面层微气象特征的分析。结果表明: 陆地上近地面层的气温日变化比水域上的大, 而风速比水域上的小, 其中9月份陆地上白天的气温比水域上的高, 夜间比水域上的低, 11月份两地白天气温接近, 但夜间陆地上的气温明显偏低; 无论是9月还是11月, 水域上近地面层都是以下沉气流为主, 而陆地则在中午前后存在弱的上升运动; 9月份, 两地的近地面层短波射入辐射比较接近, 但水域上的短波射出辐射比陆地上的大; 长波射入辐射则是陆地比水域的大, 而长波射出辐射则是水域的比陆地的大; 两地的净辐射白天接近, 夜间水域地区负的净辐射值明显比陆地的大; 9月份, 水陆两地的感热通量相差不大, 为 $150\sim 200\text{ W/m}^2$, 而潜热通量比感热通量大, 天气晴朗时可达 300 W/m^2 ; 11月份, 陆地的感热通量比潜热通量大, 为 $100\sim 120\text{ W/m}^2$, 而水域地区的感热通量则与潜热通量相当; 两地的潜热通量相差不大, 一般不超过 50 W/m^2 。无论是9月还是11月, 水域地区夜间都存在水汽向下输送的逆湿现象, 而陆地只在9月份存在逆湿现象。2005年9月份的水温观测结果表明, 白洋淀水体平均温度比水表平均温度明显偏高, 而且日变化幅度很小, 水表平均温度则日变化较大。

关键词 非均匀边界层 综合观测 微气象 白洋淀

文章编号 1006-9895(2006)05-0883-11

中图分类号 P404

文献标识码 A

The Field Experiment of Atmospheric Boundary Layer over Heterogeneous Surface in Baiyangdian Area—Introduction and Preliminary Data Analysis

HU Fei¹, HONG Zhong-Xiang¹, CHEN Jia-Yi², and LIU Xi-Ming¹

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

2 *Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871*

Abstract A comprehensive field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface is introduced. The experiments were held in Baiyangdian area of North China during 16–22 November 2004 and 8–27 September 2005. Some micrometeorological characteristics from preliminary data analysis shows that (1) the diurnal variation of air temperature over the land is more obvious than that over the water area and the wind speed over the land is less than that over the water area. In September, the air temperature over the land is higher than that over the water area in the daytime, but lower at nighttime. In November, the air temperature over the land is almost the

same as that over the water area in the daytime, but is lower obviously at nighttime. Either in November or in September, the vertical speed over the water area is always negative, but over the land, there is sometimes a positive vertical speed at noon; (2) in September, the incident shortwave radiations over the land and the water area are almost the same, but the reflected shortwave radiation over the water area is much more than that over the land. The incident long wave radiation over the land is much more than that over the water area, but the reflected long wave radiation over the land is less than that over the water area. The net radiations over the land and water area are almost the same in the daytime, but there is a difference at night; (3) the albedo over the land is smaller than that over the water area; (4) in September, the sensible heat fluxes over two sites are about $150\text{--}200\text{ W/m}^2$, and the latent heat fluxes are near 300 W/m^2 in shiny days. In November, the sensible heat flux is larger than the latent heat flux over the land, and the sensible heat flux is smaller than the latent heat flux over the water area. There are always minus latent heat fluxes over the water area; (5) in September, the water body temperature is much higher and changes more slightly than the water surface temperature.

Key words heterogeneous surface, micrometeorology, field experiment, Baiyangdian

1 引言

大气边界层是人类生活和生产活动的主要空间,地气之间的物质、能量和各种通量的交换以及大气污染等都主要发生在这里,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来实现的^[1]。但是,由于地表的非均匀性和大气运动的多尺度性以及湍流运动的复杂性,使得我们对非均匀大气边界层的深入了解遇到困难,从而影响我们对地气之间物质和能量交换、输送规律的认识。非均匀和复杂下垫面不仅使大气边界层结构和湍流运动变得更加复杂,而且也给大气模式中的边界层参数化造成极大困难,制约了现代大气模式的发展^[2, 3]。当前,非均匀大气边界层研究是大气科学领域一个十分重要的前沿课题。

近年来,全球范围内开展了多次针对不同下垫面边界层中地气之间的物质、能量、水分等交换的大型野外实验^[4~7],从不同方面揭示了非均匀下垫面大气边界层的一些特征。通过观测实验发现:只要非均匀性尺度达到边界层厚度的大小时,均会对地面通量造成影响;大于十公里尺度的非均匀性可导致中尺度环流,从而影响整个边界层的结构,特别是影响感热和潜热通量;小于几公里尺度的非均匀性对于边界层平均廓线和热通量影响不大,但是会影响湍流二阶和三阶矩;在许多大气背景条件下,由非均匀性引起的中尺度环流造成的次网格通量甚至比湍流通量还要强;非均匀地表通过影响水汽的空间分布可以使浅层对流降水增强;植被覆盖、土壤湿度、地表粗糙度通过影响边界层的发展

可以改变对流单体的位置等。科学家们还提出一些新的刻划非均匀边界层的概念和方法^[3],例如“掺混高度”(blending height)的概念,依此可修正非均匀地面的通量估计中平流作用的影响;“马赛克”方法,可用于改善次网格通量的估计;又如“印痕”(footprint)的概念,可以用来研究某一高度上观测到的通量资料能够代表多大的空间范围等等。

国内学者在非均匀下垫面边界层研究方面也已经做了不少工作^[3, 8]。例如,在实验方面,发现了河西地区非均匀下垫面可导致“绿洲效应”和“冷岛效应”^[9],并探讨了其形成机理。左洪超等^[10]对比黑河地区绿洲和戈壁的小气候特征时发现,夏季,绿洲和戈壁的小气候特征相差甚远,晴天白天绿洲中存在冷岛效应,临近绿洲的戈壁上有逆湿现象;在近地面层的能量传输中绿洲以潜热为主,戈壁以感热为主。卮抗等^[11]和张强等^[12]认为逆湿现象是由于绿洲的扰动造成的,是平流的结果。沈志宝等^[13]分析了黑河地区沙漠和绿洲的地面辐射能量收支,得到:由于沙漠和绿洲的地面反射率不同,造成两地表面的热力性质夏季差别很大,沙漠的向上长波辐射明显大于绿洲。张宇等^[14]分析绿洲边缘小气候特征及地表辐射和能量平衡,得到:白天,绿洲边缘的垂直运动仍然是以上升气流为主,其小气候特点主要受土壤湿度的影响。

地表的不均匀性不仅会导致地表的热力差异,影响感热和潜热通量的分布,而且对积云和降水的形成^[15]、边界层的温湿场结构^[16]有显著影响,并且可能导致非典型中尺度环流的形成^[17~19]。

2004 年 11 月和 2005 年 9 月期间,在国家自然

科学基金重点项目“地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究”的资助下,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与北京大学物理学院大气科学系在河北省白洋淀地区联合开展了两次非均匀大气边界层综合观测实验,获得了一批宝贵的水陆不均匀下垫面条件下大气边界层的实际观测资料,为深入开展非均匀边界层的理论和数值模拟研究提供了基础。目前,对这些资料全面深入的分析正在进行中。本文重点对这两次观测实验的情况进行介绍,并初步给出观测得到的白洋淀地区水陆不均匀地表近地面层的一些微气象特征,包括平均风速、气温、水温,以及辐射和感热、潜热通量等。

2 实验介绍

2.1 实验场地、仪器和观测项目

白洋淀被称为“华北明珠”,是华北地区最大的淡水湖泊,位于河北省中部平原,总面积约 360 多平方公里。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,河淀相连,是水陆非均匀地表条件下的边界层试验比较理想的场所。观测实验分两次,即 2004 年 11 月 16~22 日和 2005 年 9 月 8~27 日,试验共设 4 个观测点。其中 2004 年 11 月 16~22 日设 2 个观测点:雄县(陆地)和王家寨(白洋淀中的岛上);2005 年 9 月 8~27 日设 4 个观测点,除雄县和王家寨外,在陆地增设了北六村和赵北口 2 个观测点。各观测点具体位置及白洋淀地区地表特征分布见图 1。

雄县观测点位于白洋淀地区东北部的雄县西偏南城郊的一桃树园内(38°56′54.6″N, 116°01′48.72″E),四周为平坦的陆地,西边约 50 m 为一条公路。2004 年试验观测项目有:系留气球(含风速、风向、温度、湿度、气压、高度、比湿、位温),10 Hz 三维风速和超声虚温的湍流观测(CSAT3, 探头安装高度为 3.5 m),10 Hz 水汽和二氧化碳的脉动观测(LICOR7500, 探头安装高度为 3.5 m),Bowen 比(两层干湿球温度,干湿球高低层之间的高度差为 2 m),辐射(含向上长波辐射、向下长波辐射、向上短波辐射、向下短波辐射),土壤热通量和 6 层土壤温度(分别为地下 1、5、10、20、40、80 cm)。Bowen 比、辐射、土壤热通量及土壤温度的数据记录频率为 10 分钟 1 次。观测期间,桃树已落叶,地表以裸土为主。2005 年的观测项目及仪器型号、安装高度、采样频率除系留气球取消外,其余均同 2004 年。但观测期间桃树比较茂盛,树高约 2.0 m 左右,比湍流探头低 1.5 m,下午对辐射有遮挡。地表以果树植被为主。

雄县 2004 年的湍流观测试验起始时间为:从 2004 年 11 月 15 日 13:00(北京时,下同)开始,到 2004 年 11 月 22 日 09:00 结束。但 18 日缺测资料较多,仅有 06:00~08:00 和 19:00~23:00 的资料。辐射及鲍恩比观测分 2 个阶段,2004 年 11 月 15 日 11:30~16 日 14:30 为试验比较阶段,11 月 16 日 15:00~22 日 09:00 为正式观测阶段。因此,2004 年试验期间雄县观测点的辐射及鲍恩比资料时间为 11 月 16 日 15:00~22 日 09:00。2005 年的

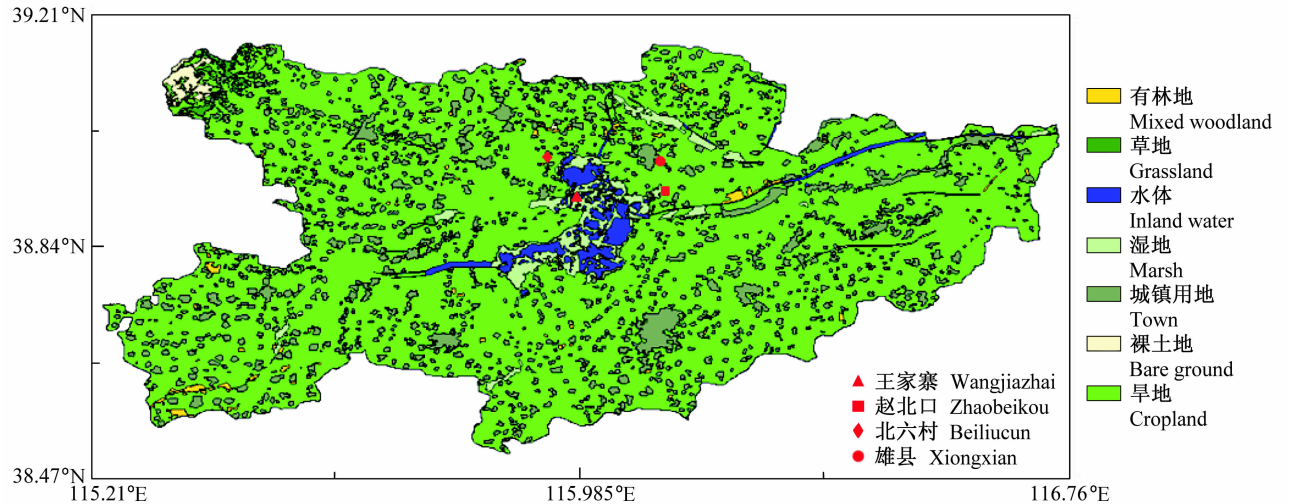


图 1 白洋淀实验区植被类型及各观测点位置
Fig. 1 Landuse types and site locations in the expt area of Baiyangdian

湍流观测起始时间为 2005 年 9 月 10 日 10:00~27 日 09:00。其中, 14 日 06:00~12:00、15 日 18:00~16 日 05:00 和 17 日 16:00~19:00 缺资料。辐射及鲍恩比观测时间为 2005 年 9 月 10 日 10:00~9 月 27 日 09:00, 其中, 14 日 06:00~12:00 缺资料。系留汽艇施放起始时间为: 2004 年 11 月 18 日 16:00~22 日 01:00。每天施放 8 次, 具体时间分别为 01:00, 04:00, 07:00, 10:00, 13:00, 16:00, 19:00, 22:00。共施放系留汽艇 28 次。

王家寨观测点位于白洋淀水域地区的北部一面积约为 $100\text{ m}\times 200\text{ m}$ 的岛屿上 ($38^{\circ}55'13.98''\text{N}$, $115^{\circ}58'31.8''\text{E}$), 岛的四周为水域(草淀), 实验期间岛的地面稍高出水面约 1 米多。小型观测塔安装在岛的东部, 塔的北面约 15 m 处有约为 3 m 高的平房, 南面约 15 m 处有树, 但树比塔矮, 东面是水域, 东南面水域有大片的荷花, 9 月份荷花仍然泛青, 但 11 月份已枯萎。西面为裸土。2004 年试验观测项目有: 系留气球(含风速、风向、温度、湿度、气压、高度、比湿、位温), 10 Hz 三维风速和超声虚温的湍流观测(CSAT3, 探头安装高度为 8.0 m), 10 Hz 水汽和二氧化碳的脉动观测(LICOR7500, 探头安装高度为 8.0 m)。2005 年的观测项目为: 探空小球(含风速、风向、温度、湿度、高度, 其中湿度探头由北京大学开发研制), 10 Hz 三维风速和超声虚温的湍流观测(CSAT3, 探头安装高度为 12.0 m), 10 Hz 水汽和二氧化碳的脉动观测(LICOR7500, 探头安装高度为 12.0 m), 3 层温湿(4.0 m、8.0 m、12.0 m)梯度, 辐射观测(含向上长波辐射、向下长波辐射、向上短波辐射、向下短波辐射, 数据记录频率为 10 分钟一次)以及水温(包括水体温度和水表温度)。水温观测沿岛的东面长约 500 m 水道, 每隔 50 m 设一观测点, 利用一艘小船采取人工观测的办法, 在每个观测点测 3 次水表温度和水体温度, 观测时间为每天早(05:00)、中(12:30)和晚(19:00)三次。水表温度的测量采用激光测温仪, 精度为 1°C , 水体温度的测量采用测电阻法。精度为 0.1°C 。

2004 年, 王家寨湍流观测起始时间为 2004 年 11 月 16 日 13:00~22 日 08:00。系留汽艇施放起始时间为 2004 年 11 月 16 日 19:00~21 日 13:00。每天施放 8 次, 具体时间同雄县点。其中, 18 日夜间受弱冷空气影响, 停放 2 次。试验期间共施放系留汽

艇 30 次。2005 年湍流观测起始时间为 9 月 8 日 12:00~27 日 12:00, 其中 12 日 05:00~10:00 及 26 日 01:00~05:00 缺资料。辐射观测起始时间为 2005 年 9 月 8 日 10:00~27 日 12:00, 其中 12 日 06:00~11:00 及 26 日 01:00~06:00 缺资料。3 层温湿梯度观测起始时间为 2005 年 9 月 8 日 19:00~27 日 12:00。水温观测起始时间为 2005 年 9 月 16~25 日。探空小球施放起始时间为 2005 年 9 月 8 日 09:00~9 月 24 日 07:00, 每天施放 8 次, 具体时间分别为: 04:00, 07:00, 09:00, 11:00, 13:00, 17:00, 20:00, 23:00。除去因天气原因未放外, 试验期间共施放探空小球 122 次。

北六村观测点位于安新县城北部的八一体工训练基地 ($38^{\circ}58'48''\text{N}$, $115^{\circ}56'24''\text{E}$), 该训练基地的面积约为 $800\text{ m}\times 1000\text{ m}$, 观测期间地表为平坦的草地。2005 年 9 月北六村的观测项目包括: 探空小球(含风速、风向、温度、湿度、高度), 10 Hz 三维风速和超声虚温的湍流观测(CSAT3, 探头安装高度为 12.0 m), 10 Hz 水汽和二氧化碳的脉动观测(LICOR7500, 探头安装高度为 12.0 m), LAP3000 低层大气风温廓线仪, Bowen 比(两层干湿球温度, 干湿球高低层之间的高度差为 2 m。), 辐射观测(含向上长波辐射、向下长波辐射、向上短波辐射、向下短波辐射), 土壤热通量和 4 层土壤温度(分别为地下 1、5、10、20 cm)。Bowen 比、辐射、土壤热通量及土壤温度的数据记录频率为 10 分钟 1 次。

2005 年 9 月北六村观测点的辐射及鲍恩比观测起始时间是 2005 年 9 月 8 日 10:00~27 日 12:00。其中 12 日 05:00~11:00 及 26 日 01:00~06:00 缺资料。小球探空施放起始时间及施放时次同王家寨观测点。

赵北口观测点 ($38^{\circ}55'48''\text{N}$, $116^{\circ}07'12''\text{E}$) 主要是安装了一套自动气象观测站(芬兰 Vaisala 公司生产), 观测项目包括: 气压、气温、湿度、风向、风速、辐射和地表温度。

2.2 实验期间的天气背景

2004 年 11 月 16~22 日期间, 试验地区的天气形势基本为地面高压控制, 无明显的天气系统影响, 以晴天多云天气为主。其中在 19~20 日, 受弱冷空气影响, 风速有所增大, 气温略有下降。2005 年 9 月 8~27 日期间, 影响试验地区的高空槽和低层切变比较频繁, 该地区以多云天气为主, 时

有小雨。其中 8~9 日为晴天, 10~13 日以多云天气为主, 14 日为晴天, 15 日下午至 16 日早晨出现 10 mm 左右的较强降水; 17 日晴天, 18 日多云, 19~21 日上午以阴雨天气为主; 19 日凌晨出现 1 mm 左右的降水, 20、21 日的降雨量分别达到 5 mm 和 3 mm 左右; 21 日下午至 27 日为晴到多云天气, 其中 24 日夜间出现了小雨天气, 降雨量为 1 mm 以内。表 1 列出了实验期间的逐日天气情况。

表 1 实验期间逐日天气情况
Table 1 Weather record during the experiment period

日期 Date	天气 Weather	天气形势 Synoptic situation	备注 Note
16-22 Nov 2004	晴 Sunny; 风速 Wind speed V: 0~3 m/s	地面高压控制 High pressure at the surface	19 日 07:00~14:00 受弱冷空气影响, 200 m 高度以上风速超过 10.0 m/s Wind speed over 200 m height is large than 10.0 m/s due to weak cold air dur- ing 0700-1400 LST 19 Nov
8 Sep 2005	晴 Sunny; V: 0~1 m/s	500 hPa 槽后 Behind trough at 500 hPa	
9 Sep 2005	晴 Sunny; V: 1~2 m/s, 3~4 m/s at noon	500 hPa 槽后 Behind trough at 500 hPa	
10 Sep 2005	晴转多云 Sunny to cloudy; V: 1~2 m/s	500 hPa 有浅槽影响 Shallow trough at 500 hPa	
11-12 Sep 2005	多云 Cloudy; V: 1~2 m/s, 3~4 m/s at noon	500 hPa 为偏南气流, 850 hPa 为低压 Southerly at 500 hPa, low pressure at 850 hPa	
13 Sep 2005	多云转阴天 Cloudy to over- cast, V: 1 m/s, 3 m/s at noon	500 hPa 有浅槽 Shallow trough at 500 hPa	
14 Sep 2005	晴天多云 Sunny to cloudy; V: 1~2 m/s	500 hPa 槽后 Tail of trough at 500 hPa	
15 Sep 2005	阴转小雨 Overcast to rainy; V: 0~1 m/s	500 hPa 有槽, 850 hPa 有切变 Trough at 500 hPa and wind shear at 850 hPa	15 日 13:30~16 日 04:00 有降水, 降雨 量为 10 mm Rainfall is 10 mm during 1330 LST 15 Sep-0400 LST 16 Sep
16 Sep 2005	阴天 Overcast; V: 1~2 m/s	500 hPa 槽前, 850 hPa 有切变 Ahead of trough at 500 hPa and wind shear at 850 hPa	
17 Sep 2005	晴 Sunny; V: 1~2 m/s	500 hPa 槽后、850 hPa 切变后部 Behind trough at 500 hPa and tail of wind shear at 850 hPa	
18 Sep 2005	多云转阴 Cloudy to overcast; V: 1~2 m/s	500 hPa 槽前、850 hPa 有切变 Ahead of trough at 500 hPa and wind shear at 850 hPa	
19 Sep 2005	阴有小雨 Overcast with rain; V: 2 m/s	500 hPa 有槽、850 hPa 有切变 Trough at 500 hPa and wind shear at 850 hPa	5:00 左右有降水, 降雨量为 1 mm Rainfall is 1mm around 0500 LST
20 Sep 2005	阴有小雨 Overcast with rain; V: 2~3 m/s	500 hPa 和 850 hPa 槽前 Ahead of trough at 500 hPa and 850 hPa	20 日 10:00~21 日 04:00 之前有降水, 降 雨量为 5 mm 左右 About 5 mm rainfall during 1000 LST20-0400 LST 21 Sep
21 Sep 2005	小雨转多云 Rainy to overcast; V: 1~2 m/s	500 hPa 转为槽后, 850 hPa 转为高压 Behind trough at 500 hPa and high pressure at 850 hPa	04:00 之前有降水 Precipitation before 0400 LST
22 Sep 2005	晴天多云 Sunny to cloudy; V: 1~2 m/s	500 hPa 槽后, 850 hPa 高压 Behind trough at 500 hPa and high pressure at 850 hpa	
23 Sep 2005	阴 Overcast; V: 2 m/s	500 hPa 和 850 hPa 有槽东移 Trough mov- ing eastward at 500 hPa and 850 hPa	
24 Sep 2005	晴天多云 Sunny to cloudy	850 hPa 转为高压 High pressure at 850 hPa	
25-27 Sep 2005	晴 Sunny; V: 1~3 m/s	850 hPa 高压 High pressure at 850 hPa	

3 观测得到的一些近地层微气象特征

3.1 平均场特征

图 2 分别给出了 2004 年 11 月和 2005 年 9 月期间的水、陆下垫面上的平均气温。可以看到：在秋末冬初的 11 月份，水域和陆地的日最高气温基本相同，而夜间陆地的气温明显比水域的低（约低 2~4℃），陆地最低气温可达 0℃ 以下，而水域地区

的夜间最低气温基本在 0℃ 以上，这主要是因为水体的热容量比陆地的大。而夏末秋初的 9 月份期间，白天陆地的气温比水域高 2~3℃，夜间则比水域低 2~4℃。图 3 为应用湍流超声资料计算的半小时平均的水域和陆地的风速之比较，可以看到：无论是 9 月还是 11 月，水域上的风速都比陆地上的大，说明陆地的表面粗糙度比水域地区大。垂直速度方面如图 4 所示：11 月份（图 4a），水域地区的垂直速度基

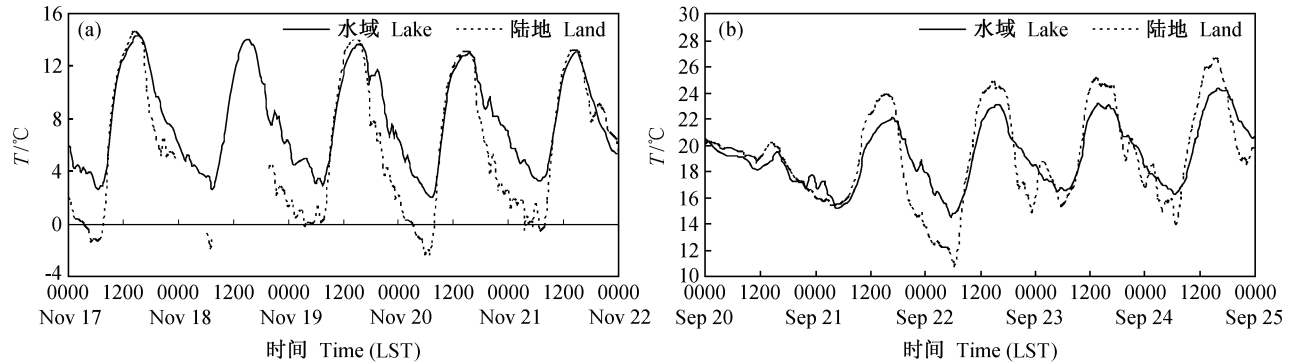


图 2 白洋淀地区水陆平均气温时间序列：(a) 2004 年 11 月 17~21 日；(b) 2005 年 9 月 20~25 日
Fig. 2 Time series of mean air temperature over Baiyangdian region: (a) 17–21 Nov 2004; (b) 20–25 Sep 2005

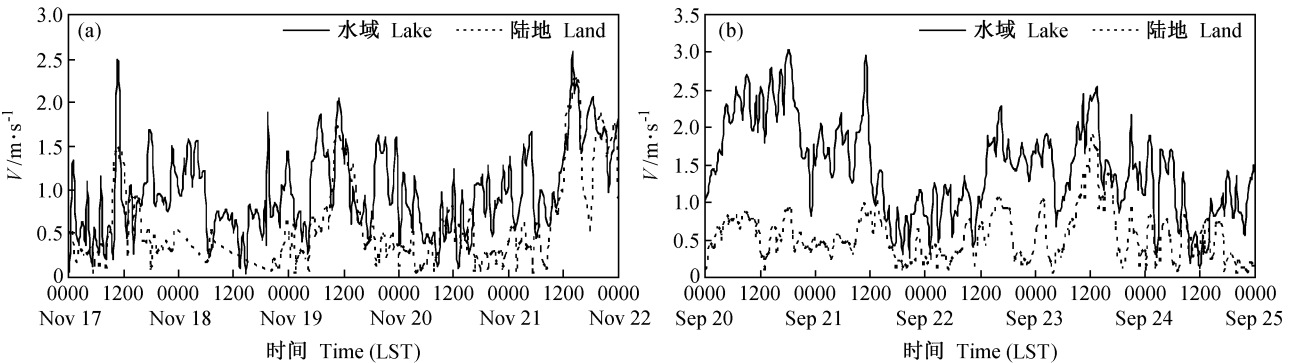


图 3 白洋淀地区水陆风速时间序列：(a) 2004 年 11 月 17~21 日；(b) 2005 年 9 月 20~25 日
Fig. 3 Time series of mean wind speed over Baiyangdian region: (a) 17–21 Nov 2004; (b) 20–25 Sep 2005

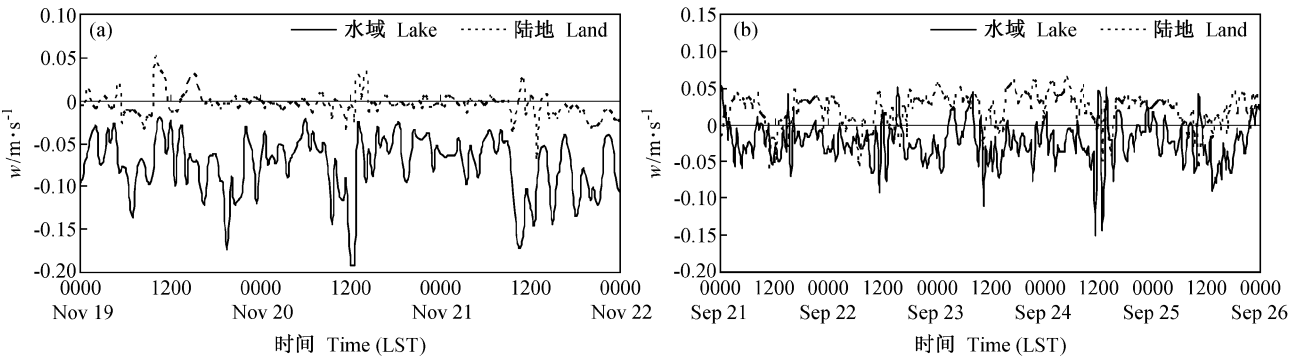


图 4 白洋淀地区水陆垂直风速时间序列：(a) 2004 年 11 月 19~21 日；(b) 2005 年 9 月 21~25 日
Fig. 4 Time series of mean vertical speed over Baiyangdian region: (a) 19–21 Nov 2004; (b) 21–25 Sep 2005

本上为负值, 以下沉气流为主, 量级可达 $-0.15 \sim -0.2 \text{ m/s}$, 而陆地上的垂直速度基本上在 0 m/s 附近, 中午前后会出现较弱的向上垂直速度, 说明在 11 月份的中午前后, 水陆之间可能存在弱的局地环流。而在 9 月份 (图 4b), 总体上看, 水陆两地既有上升气流也有下沉气流, 但陆地是以上升气流为主, 最大垂直速度一般可超过 0.05 m/s , 而水域地区则以下沉气流为主, 尤其是在中午前后下沉速度最大可达 $-0.1 \sim -0.15 \text{ m/s}$ 。与 11 月份相比, 水域地区的下沉速度明显偏小, 这同样与季节有关。

为了了解白洋淀地区水温的变化情况, 2005 年 9 月, 我们对白洋淀的 500 m 长水域地区 10 个点的水体温度和水表温度进行了定时观测, 对这些点的观测资料进行分析, 得到白洋淀水域的水体温度和水表温度如图 5 所示。可以看到: 水体温度比水表温度明显偏高, 而且日变化幅度很小, 一般在 2°C 以内, 这是因为水体的热容量较大, 在经过近乎整个夏季的太阳短波的强烈辐射, 其热含量大, 使得其温度偏高, 且变化幅度不大; 水表则由于白天吸收太阳短波辐射, 温度上升较明显, 而夜间其较强的向上的长波辐射使得水面温度下降幅度很大, 从而导致水表温度比水体温度低, 并且日变化较大。另外, 从图 5 中还可以看到, 从 9 月中旬到下旬, 无论是水体温度还是水表温度都呈下降趋势, 说明 9 月份开始, 我国北方地区逐渐进入秋季, 气温开始下降。

3.2 辐射特征

水和光热资源是生态系统最主要的自然资源要素, 地表辐射收支和地表热量平衡是重要的气候特征。白洋淀地区具有旱地、湿地、农田以及水体等多种类型的地表, 其表现出来的辐射特征有一定的

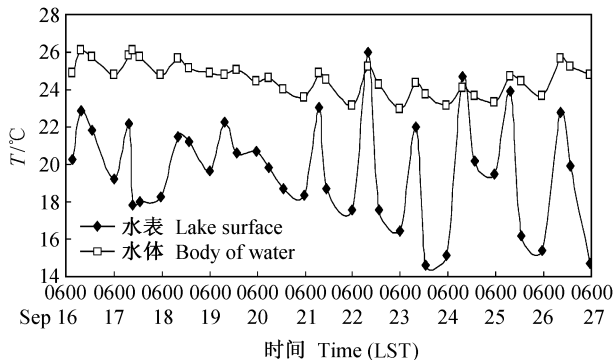


图 5 2005 年 9 月 16~27 日白洋淀地区平均水温时间序列

Fig. 5 Time series of mean water temperature over Baiyangdian region during 16–27 Sep 2005

差异。由于实验只在 2005 年水 (王家寨)、陆 (雄县) 两地布设了辐射观测, 本文仅对 2005 年期间的辐射进行分析。图 6 为 2005 年 9 月期间陆地和水域地区的各种辐射量的比较。可以看到: 陆地上的长波入射辐射比水域地区的大 (图 6a), 而反射辐射则相反 (图 6b), 是水域地区的比陆地的稍大。从量级上看, 长波反射辐射比入射辐射大。短波辐射方面 (图 6c、d), 水陆地区的短波入射辐射比较相近, 晴天时为 $600 \sim 800 \text{ W/m}^2$, 并且有逐日减小的趋势, 其中水域地区的入射辐射比陆地的略大; 而短波反射辐射方面水域地区明显比陆地大, 这可能与两地的地表反照率有关。水陆两地的净辐射白天非常接近 (陆地略大), 晴天时在 $500 \sim 600 \text{ W/m}^2$ 之间, 夜间两地的净辐射为负值, 但水域地区的负的净辐射比陆地明显大, 水域地区夜间的净辐射最大可达 $-50 \sim -80 \text{ W/m}^2$, 而陆地的一般在 $-20 \sim -30 \text{ W/m}^2$ (图 6e), 这种净辐射的差异可能是由夜间两地的潜热通量差异造成的 (参见图 8)。

图 7 为 2005 年 9 月 20~25 日期间水陆地区白天 (08:00~17:00) 地表反照率的变化情况。可以看到: 水陆地区的地表反照率随太阳天顶角的改变有明显的日变化, 呈倒“U”字型, 中午最大, 其中, 水域地区中午前后的地表反照率在 $0.14 \sim 0.16$ 之间, 而陆地中午前后的地表反照率在 $0.10 \sim 0.12$ 之间, 明显比水域地区的小。这是因为水域地区的地表是裸土而不是水体, 陆地地表是植被而不是裸土。另外, 水陆地区的地表反照率呈逐日增大趋势, 这可能与季节变化有关。

3.3 热通量特征

图 8 为两次实验期间应用涡动相关法计算得到的半小时平均的水陆地区感热、潜热通量。从图 8 可以看出: 9 月份 (图 8c、d), 水陆地区的感热通量相差不大, 为 $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$, 而潜热通量比感热通量大, 天气晴朗时可达到 $250 \sim 300 \text{ W/m}^2$, 并且陆地潜热通量比水域地区稍大。两地夜间都会出现负的潜热通量现象, 说明有水汽向下传输的逆湿现象。11 月份 (图 8a、b), 陆地的感热通量比潜热通量大, 而水域地区的感热通量与潜热通量相当。其中陆地的感热通量比水域大, 为 $100 \sim 120 \text{ W/m}^2$, 而水域地区的感热通量在 $50 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 之间, 潜热通量方面, 两地相差不大, 一般不超过 50 W/m^2 , 但水域地区夜间负潜热通量比较明显, 说明到 11

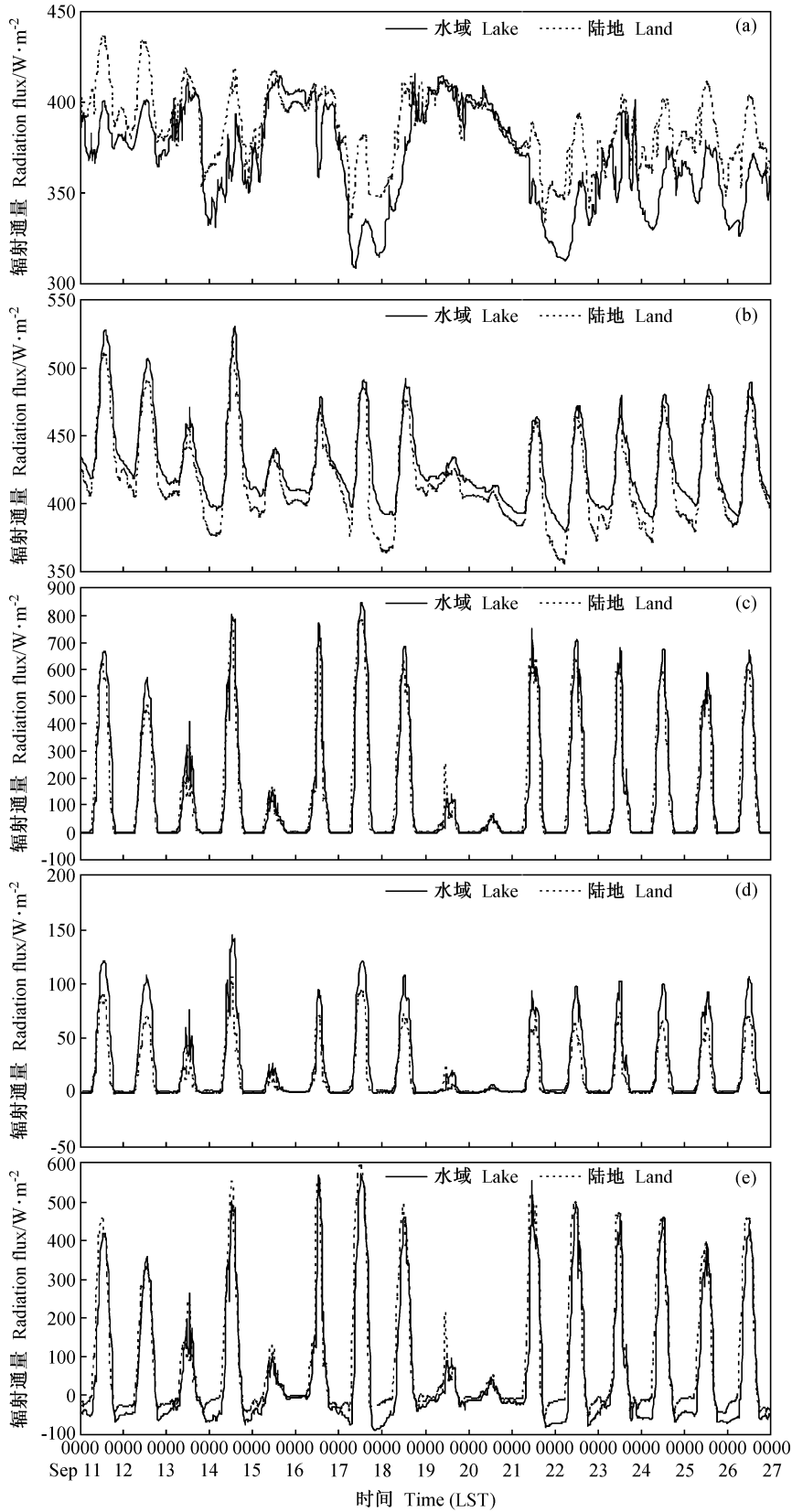


图 6 2005 年 9 月水陆地区各辐射通量时间序列: (a) 长波向下辐射; (b) 长波向上辐射; (c) 短波向下辐射; (d) 短波向上辐射; (e) 净辐射
Fig. 6 Time series of radiant fluxes over Baiyangdian region in Sep 2005; (a) Longwave down; (b) longwave up; (c) shortwave down; (d) shortwave up; (e) net radiation

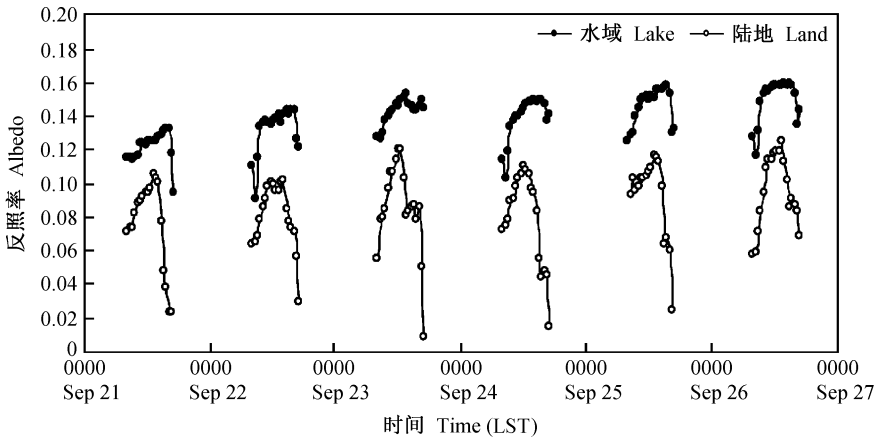


图 7 2005 年 9 月 21~26 日白天水陆地区地表反照率的时间序列
Fig. 7 Time series of albedo over land and water regions during 21–26 Sep 2005

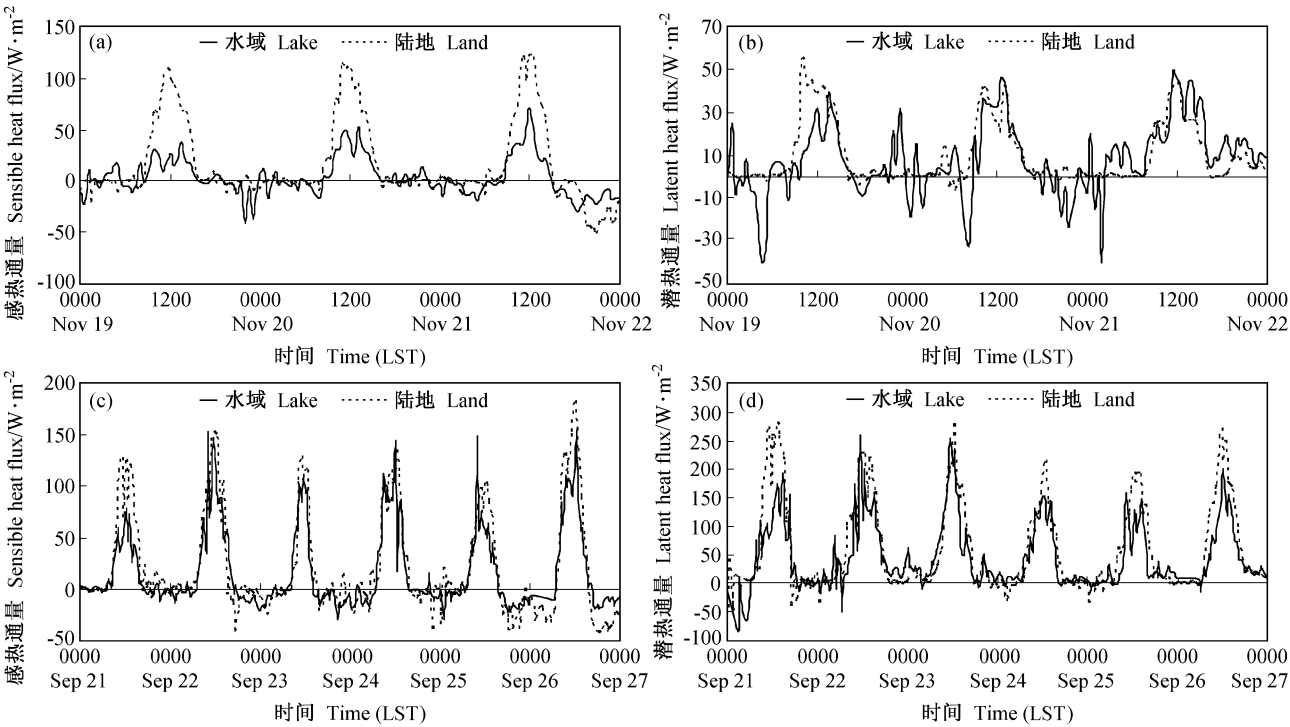


图 8 白洋淀水陆地区感热通量 (a、c) 和潜热通量 (b、d) 时间序列: (a、b) 2004 年 11 月 19~21 日; (c、d) 2005 年 9 月 21~27 日
Fig. 8 Time series of sensible heat fluxes (a, c) and latent heat fluxes (b, d) over Baiyangdian region during 19–21 Nov 2004 (a, b) and 21–27 Sep 2005 (c, d)

月份, 水域地区仍然存在水汽向下传输的逆湿现象。

4 结语

近年来, 非均匀下垫面上的大气边界层结构和湍流运动的特征是大气科学工作者关注的重点问题之一。地表的不均匀性主要表现在热力和动力的不均匀分布, 这种动、热力的不均匀分布不仅会影响

大气边界层的物理过程和结构, 形成局地小气候, 还可引发局地环流, 甚至对区域气候产生影响。本文介绍了在我国华北白洋淀地区进行的水、陆非均匀大气边界层两次综合观测实验, 并根据观测资料初步对该地区近地面微气象特征进行了分析。结果表明无论是平均的风、温、湿场还是辐射因子, 以及湍流量, 水、陆地区的都有一定的差异, 从而形成局地的微气象特征:

(1) 与水域地区相比, 陆地上的气温日变化比较明显, 风速则明显偏小。无论是 9 月份还是 11 月份, 水域地区均以下沉气流为主, 而陆地则在中午前后会出现弱的上升运动。

(2) 9 月份, 陆地上的长波入射辐射比水域地区的大, 而反射辐射则相反, 是水域地区的比陆地的稍大。水陆地区的短波入射辐射比较相近, 晴天时为 $600 \sim 800 \text{ W/m}^2$, 而短波反射辐射方面水域地区明显比陆地大。水陆两地的净辐射白天非常接近(陆地略大), 晴天时在 $500 \sim 600 \text{ W/m}^2$ 之间, 夜间两地的净辐射为负值, 但水域地区的负的净辐射比陆地明显大, 水域地区夜间的净辐射最大可达 $-50 \sim -80 \text{ W/m}^2$, 而陆地的一般在 $-20 \sim -30 \text{ W/m}^2$ 。

(3) 9 月份, 水域地区的反照率比陆地大。

(4) 水陆地区的感热、潜热通量表明, 9 月份, 水、陆地区的感热通量相差不大, 为 $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$, 而潜热通量比感热通量大, 天气晴朗时可达 $250 \sim 300 \text{ W/m}^2$; 11 月份, 两地的潜热通量相差不大, 一般不超过 50 W/m^2 , 但陆地的感热通量明显比水域地区大; 两地夜间都有负的潜热通量存在, 有水汽向下传输的逆湿现象。

致谢 北京大学张宏升教授、蔡旭辉副教授, 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] 胡非. 非均匀边界层研究的若干问题. 高原气象, 2004, **23** (3): 414
Hu Fei. Some problems on the study of heterogeneous atmospheric boundary layer. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 2004, **23** (3): 414
- [3] 刘罡, 蒋维楣, 罗云峰. 非均匀下垫面边界层研究现状与展望. 地球科学进展, 2005, **20** (2): 223~230
Liu Gang, Jiang Weimei, Luo Yunfeng. Status quo and prospects of researches on atmospheric boundary layer over an inhomogeneous underlying surface. *Advances in Earth Sciences* (in Chinese), 2005, **20** (2): 223~230
- [4] Andre J C, Goutorbe J P, Perrier A. HAPEX-MOBILHY: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1986, **67** (2): 138~144
- [5] Sellers P J, Hall F G, Asrar G, et al. The first ISLSCP field experiment (FIFE). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1988, **69** (2): 22~27
- [6] 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果. 高原气象, 1994, **13** (3): 225~236
Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. Some achievements in scientific research during HEIFE. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1994, **13** (3): 225~236
- [7] Halldin S, Gryning S-E, Gottschalk L. Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape-NOPEX experiences. *Agric. For. Meteor.*, 1999, **98-99** (1): 5~29
- [8] 徐大鹏. 非均匀下垫面上大气边界层研究进展. 力学进展, 1989, **19** (2): 211~216
Xu Dapeng. Advances in the study of atmospheric boundary layer over a non-homogeneous underlying surface. *Advances in Mechanics* (in Chinese), 1989, **19** (2): 211~216
- [9] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲小气候特征和冷岛效应. 大气科学, 1987, **11** (4): 390~396
Su Congxian, Hu Yinqiao, Zhang Yongfeng, et al. The microclimate character and "cold island effect" over the oasis in Hexi region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1987, **11** (4): 390~396
- [10] 左洪超, 胡隐樵. 黑河地区绿洲和戈壁小气候特征的季节变化及其对比分析. 高原气象, 1994, **13** (3): 246~256
Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. Seasonal variation of microclimatic characteristics for oasis and Gobi in HEIFE and their comparative analysis. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1994, **13** (3): 246~256
- [11] 仵抗, 胡隐樵. 远离绿洲的沙漠近地面观测实验. 高原气象, 1994, **13** (3): 282~290
Nai Kang, Hu Yinqiao. Near surface layer experiment at far-away oasis desert station. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1994, **13** (3): 282~290
- [12] 张强, 胡隐樵, 杨瑜峰, 等. 河西地区非均匀下垫面的大气变性过程. 高原气象, 1996, **15** (3): 282~292
Zhang Qiang, Hu Yinqiao, Yang Yufeng, et al. The variability process of atmosphere over heterogenous underlying surface in Hexi region. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1996, **15** (3): 282~292
- [13] 沈志宝, 邹基玲. 黑河地区沙漠和绿洲的地面辐射能收支. 高原气象, 1994, **13** (3): 314~322
Shen Zhibao, Zou Jiling. The radiative energy budget on the ground surface over desert and oasis in HEIFE area. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1994, **13** (3): 314~322
- [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] Clark C A, Arritt R W. Numerical simulations of the effect of soil moisture and vegetation cover on the development of deep convection. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 2029~2045

[16] Schwartz M D, Karl T R. Spring phenology: Nature's experiment to detect the effect of "green-up" on surface maximum temperature. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **118**: 883~890

[17] Segal M, Arritt R W. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradient. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1992, **73**: 1593~1604

[18] 王俊勤, 胡隐樵, 陈家宜, 等. HEIFE 区边界层某些结构特征. *高原气象*, 1994, **13**: 299~306
Wang Junqin, Hu Yinqiao, Chen Jiayi, et al. Some characteristics of structure of planetary boundary layer over HEIFE area. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1994, **13**: 299~306

[19] 姜金华, 胡非. 大涡模拟方法在非均匀边界层研究中的应用. *科学技术与工程*, 2004, **4** (5): 352~354
Jiang Jinhua, Hu Fei. Application of large-eddy simulation to investigate heterogeneous atmospheric boundary layer. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 2004, **4** (5): 352~354