

黄 鹤,郭振海,游小宝.白洋淀水陆下垫面上行星边界层空间变动研究.地球物理学报,2010,53(9):2023~2031,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.002

Huang H Guo Z H, Yiu X B, et al. A study of atmospheric boundary layer spatial changes over heterogeneous surface in Baiyangdian area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(9):2023~2031,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.002

白洋淀水陆下垫面上行星边界层空间变动研究

黄 鹤^{1,2},郭振海¹,游小宝¹

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

2 天津市气象科学研究所,天津 300061

摘 要 利用三维非静力中尺度模式 ARPS,对白洋淀地区水陆非均匀下垫面上大气边界层结构及其变动进行了模拟研究.结果表明,晴天弱背景下,白洋淀地区陆地大气比湿高于水域的情况发生在白天大部分时间内,是普遍存在的一种现象,该现象首先出现在近地层,然后不断向高空延伸,与水陆两种不同的下垫面特征密切相关.由于水陆下垫面的差异,导致水域感热和潜热通量全天较小,变化平稳,而陆地日间感热和潜热通量较大,且潜热高于感热.水陆两地近地层湍流运动状态存在较大差异,湍流输送在水陆比湿空间变动过程中起决定性作用.形成的局地环流同样影响着水陆比湿的空间变动,主要表现在环流上下支对近地层湍流发展以及水汽的垂直输送的影响.陆地上空水汽主要来源于土壤植被的蒸发蒸腾,而来自水域的仅占很少一部分.

关键词 中尺度模式,非均匀下垫面,比湿,湍流运动,局地环流

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.09.002

中图分类号 P421

收稿日期 2009-05-27,2010-02-23 收修定稿

A study of atmospheric boundary layer spatial changes over heterogeneous surface in Baiyangdian area

HUANG He^{1,2}, GUO Zhen-Hai¹, YOU Xiao-Bao¹

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Tianjin Meteorology Institute, Tianjin 300061, China

Abstract A three-dimensional non-hydrostatic meso-scale model ARPS (the Advanced Regional Prediction System) is used to study the atmospheric boundary layer structure over heterogeneous surface in Baiyangdian area. The results showed that, in sunny weak background, the situation that the specific humidity over land is larger than that over lake is universal, and it appears at surface layer first, then extends to the upper air. For the different surface characteristics, the sensible and latent fluxes over lake are smaller and stable all day, but over land, both of them are much more in day, and latent flux is much bigger than sensible flux specially. The turbulent motion near the round over land is very different from that over lake, so the turbulent transmissions have clearly effect on the spatial changes of specific humidity. The local circulation also has impact on the spatial changes of vapor, and the upward and downward movements influence the turbulent development, as well as the vertical transmission of vapor. The vapor over land comes mainly from the evapotranspiration, while a small part of them from the lake.

Keywords Meso-scale model, Heterogeneous surface, Specific humidity, Turbulent motion, Local circulation

1 引言

经过几十年的努力,行星边界层不论是观测认识还是理论研究等方面均已取得了显著的进展,特别是建立在均匀下垫面假设下的近地面层理论和行星边界层湍流扩散参数化已经广泛地应用于天气或气候变化等领域的研究.然而,地球表面大都不满足均匀性假设,一些地区地表特征对比鲜明,表现了强烈的非均匀性,例如,沙漠和绿洲、海洋和陆地以及湖泊与陆地等.这些地表非均匀性造成的热力或动力差异,导致感热和潜热通量的空间分布变动,进而影响行星边界层的温湿结构以及湍流输送过程.这种变动不仅会对对流云和局地降水等中小尺度的过程产生明显的作用,而且,由于改变了地表和自由大气之间能量和物质交换过程而对大气环流和气候变化等大尺度的过程产生影响.因此,对于气候变化研究来说,迫切需要在陆面过程或行星边界层湍流扩散参数化中对地表非均匀性引起的大气边界层变动的参数化有一个有效的解决方案.到目前为止,由于问题复杂性、观测事实不足以及数值模拟研究的相对落后,使得很难发现控制非均匀下垫面上大气边界层变动的主要物理因子,参数化也就无从谈起.因此,通过对观测事实分析和数值模拟研究等手段,深入研究非均匀下垫面上大气边界层变动的物理机制、发现主要物理因子、推动该参数化的研究变的尤为重要.

非均匀下垫面上大气边界层物理的理论和数值模拟研究一直是大气边界层物理的重要方向之一,为了揭示非均匀下垫面边界层中地气之间物质、能量、水分等的交换和输送规律,国内外气象学家在观测实验、理论研究和数值模拟等方面做了大量的工作. Deardroff^[1] 首先用大涡模拟对大气边界层进行了模拟,开创了大气边界层数值模拟研究的先河. Hechtel 等^[2] 和 Avissar 等^[3] 分别利用 BLX83 和 FIFE 试验资料作为模式的初始场和下边界条件,对比分析了地表热通量均匀分布与由观测资料统计得到的不均匀条件下边界层内平均量和二阶矩统计量. Lynn 等^[4,5] 认为由地表热力不均匀分布所引起的中尺度环流的强度与海风的强度相当,且由不均匀地表产生的热力通量与湍流热通量的量级相当. Chen、Avissar、Liu^[6~8] 指出非均匀地表引起的环流不仅影响到大气边界层内的大气通量,而且可以产生浅薄对流云和降水.

国内早在 1979 年组织实施的青藏高原气象科学实验 (QXPME) 中就注意到了非均匀下垫面上大气边界层的逆湿现象. 苏从先等^[9] 在对河西地区张掖绿洲进行风、温、湿对比分析观测中,通过对绿洲小气候特征的分析,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”. 黑河观测实验¹⁾ 再次证实了“绿洲冷岛效应”. 胡隐樵等^[10] 利用局地相似性概念计算了沙漠的水汽通量廓线,在一维空间上揭示了沙漠上空水汽运输的复杂特征,指出逆湿现象的本质是平流造成的. 佴抗^[11]、张强等^[12] 认为逆湿现象是由绿洲的扰动造成的,是平流的结果. 左洪超等^[13] 利用 HEIFE、DHEX 和 GAME/Tibet 三个观测实验和部分常规气象资料分析了下垫面非均匀条件下产生的“冷岛效应”和逆湿现象的完整物理图像以及它们对地表能量和“五水”转化的影响. 结果表明,下垫面非均匀特征对“五水”转化有着明显影响,“冷岛效应”和逆湿现象是下垫面非均匀性的必然结果. 薛具奎等^[14] 利用简化的绿洲沙漠相互作用的动力学模式和绿洲系统与沙漠环流的熵平衡方程,从动力学和非平衡热力学角度分析了绿洲和沙漠的相互作用特征,指出绿洲尺度和绿洲湿度是“冷岛效应”的两个重要控制因子,绿洲的维持与发展存在一个最小临界尺度.

不同于 HEIFE 试验中沙漠和绿洲存在强烈的热力对比,白洋淀地区具有鲜明的水陆差异,在该地区的大气边界层观测试验中发现了一些与一般常识相悖的现象. 刘新建等^[15] 利用观测期间探空资料对白洋淀湿地夏末大气边界层湿度垂直廓线特征进行了对比分析,发现陆地上大气湿度高于水面. 在一般常识下,水面上应该更湿. 为了研究造成这种水陆湿度差异的物理机制,本文将利用美国 Oklahoma 大学发展的三维非静力平衡模式 ARPS,利用 NCEP 分析资料作为初始场、以及实际地形和地表特征,对观测期间白洋淀大气边界层特征及其变动进行模拟研究. 本文首先介绍 ARPS 模式以及数值试验方案,其次是模拟结果分析,详细讨论白洋淀地区近地层湍流运动状态以及局地环流对该地区大气边界层内比湿空间变动的的影响,最后是结果讨论.

2 试验方案

ARPS (the Advanced Regional Prediction

1)黑河地区地气相互作用观测实验研究 (HEIFE)学术总结报告. 1987~1994. 4~7, 22~24

System)是由美国俄克拉荷马(Oklahoma)大学风暴分析预报中心(CAPS)发展的三维非静力平衡可压缩的中尺度模式,适用于几米到几千米范围内天气系统的数值模拟.模式垂直坐标采用地形追随坐标,水平坐标采用正交坐标系.控制方程由笛卡尔坐标下控制方程变换得到,采用完全守恒形式.模式的动力和数学框架、次网格参数化、边界层参数化、陆面过程及降水过程的参数化方案详细介绍见参考文献[16,17].在全球范围内,ARPS曾被多次用于各种中尺度天气过程的理想试验和数值模拟^[18~22].

为了准确模拟白洋淀地区非均匀下垫面大气边界层结构与物理特征,本文采用 ARPS5.2.4 版本对模拟区域进行四重嵌套模拟,模式分辨率依次为 54 km、27 km、9 km、3 km 和 1 km,各重模拟区域的中心均设在 38.9°N, 116°E.表 1 中给出了各重模拟试验的格距 ΔX 、格点维数和积分时间步长 ΔT .模拟过程中,边界层参数化采用 Sun 和 Chang 发展的 1.5 阶 TKE 湍流闭合方案,湿过程在 54 km 和 27 km 网格采用 Kain-Fritsch 积云参数化显式方案,在 9 km、3 km 和 1 km 网格采用隐式方案,辐射过程采用大气辐射传输参数化方案,陆面过程采用

Noilhan-Planton 陆面模式.此外,为了减小模式边界对计算结果的影响,最外层网格的初始场和边界条件由 NCEP(1°×1°)分析资料插值产生,然后依次将粗网格的模拟结果插值到细网格上,为细网格提供初始场和边界条件,并分别将 NCAR 1°、5 min 和 30 s 全球地形资料、GED 1°全球陆面资料和 NCAR 30 s 全球陆面资料插值到所需网格上,提供地形和地表特征数据.2005 年 9 月 14 日天气晴好,实验区没有明显天气系统入境,因此模拟试验时间设为 9 月 14 日 02:00(北京时,下同)开始,到次日 02:00 结束,积分 24 h.

3 结果分析

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与北京大学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试验,共选择了四个观测点,包括三个陆地观测点和一个水面观测点,地理位置分别为:赵北口(38°55′48″N, 116°07′12″E),

表 1 格点参数

Table 1 Grid parameters

格点(数)	ΔX /km	伸展长度 ΔZ	格点维数	ΔT /s
外围(A)	54	$\Delta Z_{\min} = 20$ m	8×8×53 (432 km×432 km×15.3 km)	60
第 1 网(B)	27	—	12×12×53 (324 km×324 km×15.3 km)	30
第 2 网(C)	9	—	25×25×53 (225 km×225 km×15.3 km)	10
第 3 网(D)	3	—	51×51×53 (153 km×153 km×15.3 km)	4
第 4 网(E)	1	—	61×61×53 (61 km×61 km×15.3 km)	2

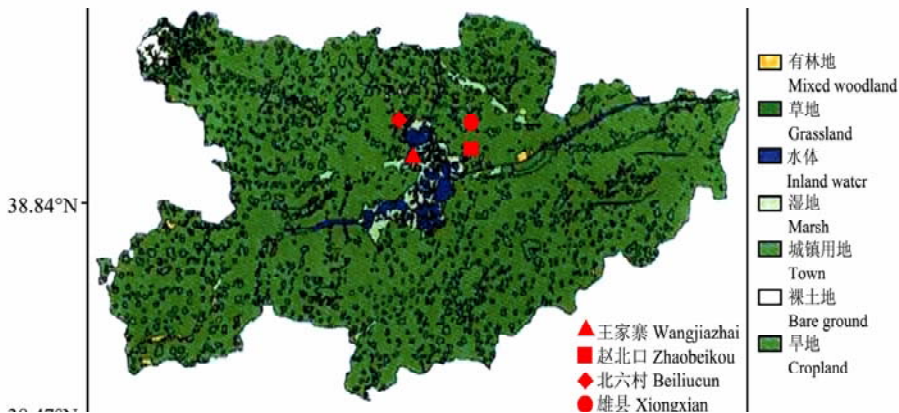


图 1 白洋淀实验区植被类型及各观测点位置

Fig. 1 Landuse types and site locations in the experiment area of Baiyangdian

北六村(38°58′48″N, 115°56′24″E), 雄县(38°55′48″N, 116°07′12″E)和王家寨(38°55′13.98″N, 115°58′31.8″E)^[23](见图 1), 具体实验介绍和观测结果分析见参考文献[15, 23]. 为了与观测结果进行对比, 下面将对四个观测点近地层比湿、热通量和湍流 KTE 的模拟结果以及白洋淀地区的局地环流特征进行分析.

3.1 近地层比湿空间变动的模拟分析

图 2 给出了各观测点近地层大气比湿 QV 日变化的模拟结果. 可以看到, 各观测点近地层大气比湿日变化趋势较为一致, 无论是陆地还是水域均是夜间大, 白天小. 日出之前水陆比湿基本上处于同一水平, 水域略高, 日出之后(7:00), 陆地比湿出现调整, 比湿迅速增加, 到 10:00 左右各陆地比湿达到日间最大值, 而这段时间内水域比湿变化平稳, 略有下降; 之后无论是陆地还是水域, 其比湿均表现出明显下降趋势, 到傍晚 18:00 左右达到一天中的最低值; 18:00 以后, 各观测点比湿开始迅速回升, 水域观测点比湿逐渐超过陆地. 值得注意的是, 在白天大部分时间内(9:00~17:00), 各陆地观测点比湿均高于水域, 这与刘新建等^[15]得到的陆地下垫面上空湿度高于水面的观测事实一致.

图 3 分别给出了各观测点自地面到 1000 m 高

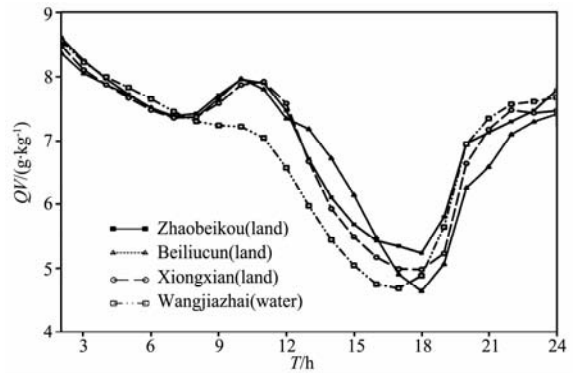


图 2 各点比湿日变化模拟结果
Fig. 2 Simulated specific humidity at four positions as function of time

度每 3 h 比湿垂直廓线的模拟结果. 可以看出, 03:00~6:00 这段时间内各观测点比湿随高度升高而减小, 在近地层水面比湿略大于陆地的, 其他高度上水陆比湿相当; 9:00, 200m 以下水陆比湿出现明显差异, 陆地高于水面的, 200m 以上水陆比湿差异不明显; 12:00, 水陆差异进一步加强, 陆面比湿高于水面的高度升高至 600m, 此时, 200m 以下水陆比湿差异达到最大; 15:00 与 12:00 时刻的相比, 陆面比湿高于水面的高度继续升至 800 m, 在个别观测点上(赵北口)甚至超过 1000 m, 水陆差异仍保持随高度减小的态势, 但高、低空差异开始变

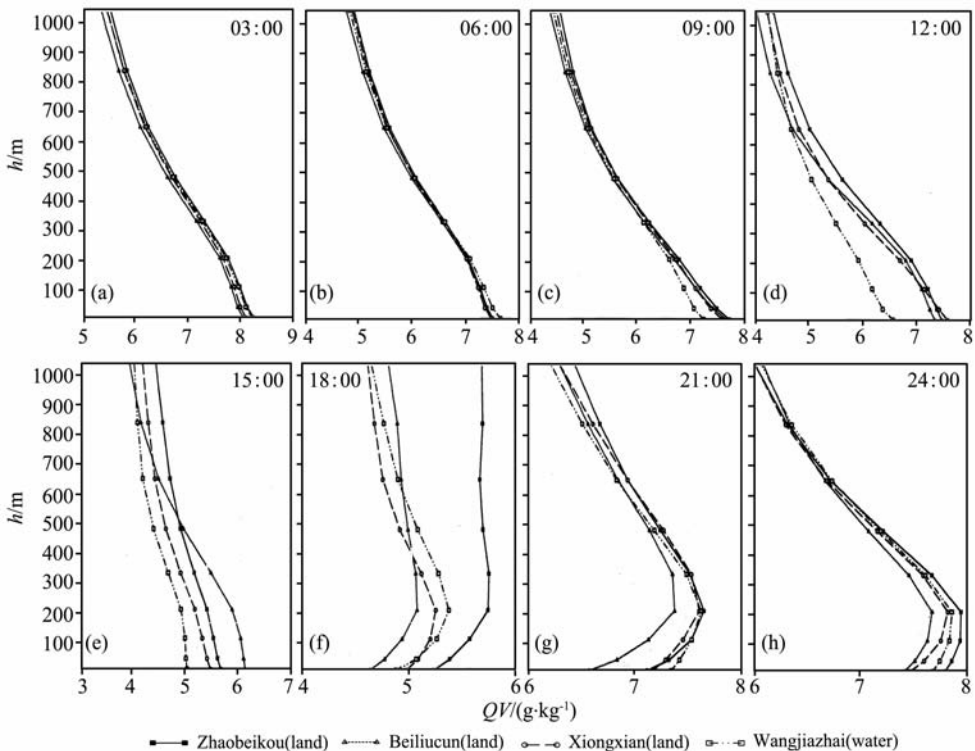


图 3 各点每 3 h 比湿垂直廓线模拟结果

Fig. 3 Vertical profiles of specific humidity at four positions every three hours

小;到 18 : 00,各点垂直向每层比湿出现新的调整,高、低空比湿差异进一步缩小,水陆比湿差异出现低空减小,高空增加的现象,各观测点比湿均在 200 m 高度出现最大值,并随高度的降低不断减小,即出现了所谓的“逆湿现象”,且逆湿强度随着时间向后推移不断增强,到 21 : 00 达到最大;24 : 00 时,各观测点比湿分布与 21 : 00 时的类似,但逆湿强度有所减弱,高、低空比湿差异加大. 通过以上分析可以得到各观测点比湿垂直廓线空间变动的概念模型:日出前各观测点垂直廓线满足一般规律,即比湿随高度升高而减小,水陆差异不明显,日出后出现陆地比湿高于水面的现象,此现象首先出现在近地层,随着时间的推移不断向高空延伸,傍晚前后各点在 200 m 以下高度出现逆湿,并不断增强,到 21 : 00 形成深厚逆湿,之后逐渐减弱,与观测结果^[15,23]一致,说明模拟结果很好地反映了白洋淀地区水汽的空间变动特征.

3.2 感热通量和潜热通量分析

图 4(a、b) 分别给出了各观测点地表感热通量

和潜热通量的日变化曲线模拟结果,可以看到水陆两地呈现截然不同的变化特征. 对于陆地,夜间表现为负的感热通量,即存在向下的热量输送,说明近地层大气释放热量加热地面,而潜热通量接近于零,说明陆气之间的水汽交换很弱;白天则表现为正的感热通量和潜热通量,感热通量最大值在 150~200 W/m² 之间,潜热通量最大值在 250~300 W/m² 之间,在数值上与观测结果有很好的-一致性,且潜热大于感热,说明陆地地面在向近地层大气释放热量的同时还释放了大量的水汽. 而对于水域来说,模拟结果显示,感热通量和潜热通量全天变化比较平稳,几乎接近于零,说明水面与其近地层大气之间的热量和水汽交换全天较弱. 分析认为之所以会出现以上结果,是与水陆各点下垫面特征密切相关的. 陆地观测点下垫面以湿地为主,土壤湿度大,周围植被为草地和农作物,在没有太阳辐射的夜间,由于地表辐射降温的速率远大于近地层大气,因而产生向下的热通量,又由于夜间稳定边界层的存在,从而限制了陆气之间的水汽交换,潜热通量变小,而日间在太阳直

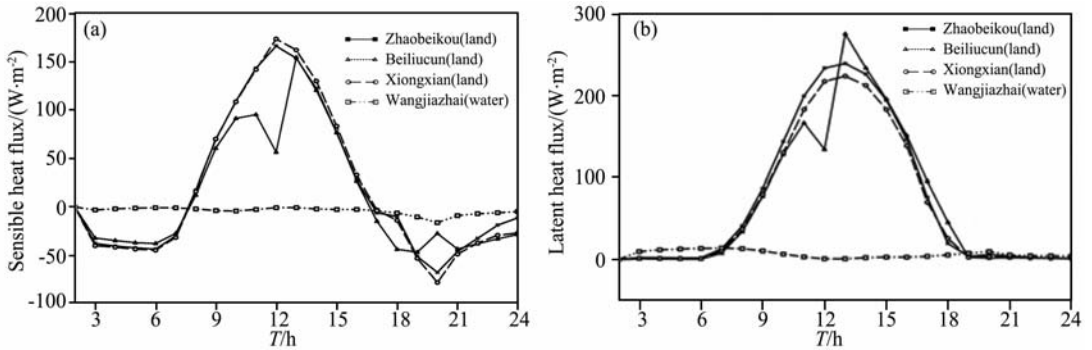


图 4 各点地表运动学热通量(W·m⁻²)日变化模拟结果
(a)感热通量;(b)潜热通量.

Fig. 4 Simulated kinematic heat fluxes(W·m⁻²) at four positions as function of time
(a)Sensible heat flux; (b)Latent flux.

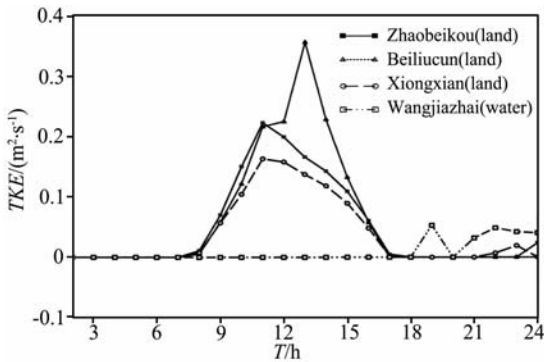


图 5 各点近地层湍流动能(TKE)日变化模拟结果
Fig. 5 Simulated turbulence kinetic energy(TKE) at four positions of surface layer as function of time

接辐射下,地面温度迅速升高,此时不稳定的边界层结构有利于近地层湍流的发展,同时湿地土壤植被的蒸发蒸腾作用提供了大量的水汽,并通过湍流运动向上输送,刘新建等^[15]曾计算过白洋淀陆地土壤日蒸发量为 10 mm/d,植物的蒸腾量为 7 mm/d,因此在陆气之间产生大的感热和潜热通量;对于水体来说,由于其对太阳辐射不敏感,全天温度变化幅度很小,水域近地层湍流运动相对较弱(见图 5),因此不利于水气之间的热量和水汽交换,此外,9 月份,大多数水生植物已经接近成熟,水面广泛分布的荷叶、芦苇和浮萍等水生植物增加了对太阳辐射的反射,造成用于蒸发的能量变小,此外,由于水生植物

的覆盖,不利于水面的蒸发,因为浮萍、荷叶等水生植物的蒸发量比清水面要小得多.由此可见,白洋淀水陆下垫面特征,对其地表感热和潜热通量影响很大,其通过影响地表感热和潜热通量的分布,进而影响其上大气比湿的空间分布.

3.3 近地层湍流运动状态对比湿空间变动的影响

湍流动能(TKE)是湍流强度的度量,是微气象学中最重要变量之一,涉及整个边界层动量、热量和水汽的输送.为了说明湍流运动状态对比湿空间变动的影响,图5给出了水陆各观测点近地层湍流动能(TKE)的日变化模拟曲线.可以看到,子夜到日出前这段时间内,由于夜间稳定边界层的存在,水陆近地层湍流均不发展, TKE 值接近于零,因此无论是陆地还是水域,其表面与大气之间的水汽交换均很弱,造成潜热通量很小,大气比湿基本不受下垫面的影响,只与背景场有关.白天随着太阳辐射的不断增强,陆地夜间稳定边界层被破坏,湍流强度随着混合层的发展逐渐增加,这种情况下,一方面近地层水汽可以通过湍流混合作用不断向上输送,另一方面则有利于地表的蒸发和植被的蒸腾作用的加强.此时水域近地层湍流仍不发展,说明其上边界层仍处于稳定状态(图7d),造成水面蒸发的水汽不能通过湍流向上输送,抑制了蒸发.18:00以后,由于陆地辐射降温以及夜间稳定边界层的逐渐形成,陆地近地层湍流发展受到抑制,而水域近地层湍流有所发展,出现水面比湿高于陆地的现象.通过以上分析得到,由于日间水陆两地边界层结构以及湍流运动状态的差异,使得陆气之间的水汽交换远远大于水气之间的水汽交换,最终导致陆地比湿高于水域的现象,湍流运动状态在水陆近地层比湿空间变动中起着决定性作用,而湍流运动又受到下垫面特征的影响,进一步说明白洋淀地区下垫面特征对其边界层比湿空间变动的影响.

3.4 局地环流对近地层比湿空间变动的影响分析

对于沙漠和绿洲、海洋和陆地以及湖泊与陆地等此类热力和动力不均匀分布的下垫面,在背景风小于 2 m/s 时或背景风场很弱的情况下,容易产生中尺度环流,从而影响边界层的温湿结构以及湍流输送过程,白洋淀地区亦是如此.根据观测记录,2005年9月14日白洋淀地区为晴天,近地面水平风速为 $1\sim 2\text{ m/s}$,位于 500 hPa 槽后,没有天气系统过境.因此下面将对该日的白洋淀局地环流特征进行分析,讨论其对近地层比湿空间变动的影响.

图6给出了2005年9月14日白洋淀地区近地

面风场和比湿场的模拟结果.从图7中可以看出,近地层形成了一个以水域为中心的水平辐散场,从湿度场(阴影部分)分布可以看到,水域近地层出现比湿低值区,而在距离水域较近的陆地上出现高比湿区,环绕整个水域,结合上面的分析结果,陆地比湿高于水域的现象不仅出现在观测点上,而是白洋淀地区普遍存在的一种现象.

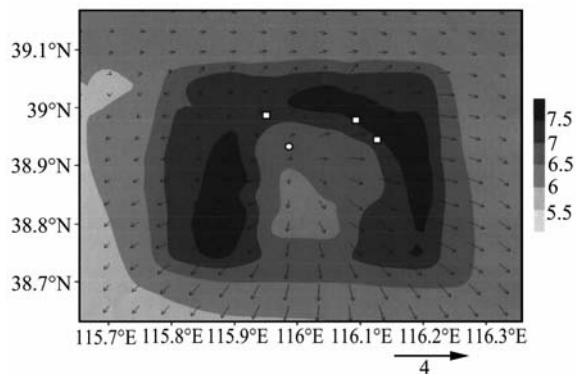


图6 模式运行10 h后近地层风场和湿度场
阴影为比湿($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),矢量箭头为水平风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
○表示水点,□表示陆点.

Fig. 6 The wind and humidity fields of surface layer after the model runs 10 hours
Shadow denotes specific humidity($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), vector denotes horizontal wind($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ○ denotes the water site, □ denotes the land site.

图7(a~d)给出了模式运行10 h时过 38.9°N 的水平风速(U)、垂直风速(W)、水汽混合比(QV)和位温(PT)的纬向垂直剖面.可以看到,由于热力非均匀性作用,水域相对于周围环境是一冷源,形成“冷岛效应”^[9],水陆交界处形成局地环流,水平方向低空为“湖风”,高空为“陆风”,最大水平风速达 3 m/s .由于“冷岛效应”的存在,陆地近地层形成超绝热不稳定层结,垂直方向为弱的上升气流,有利于湍流运动的发展以及近地层热量和水汽的向上输送,对地表土壤植被蒸发蒸腾起到了促进作用;而水面近地层为深厚逆温层,垂直方向上为下沉气流,抑制了湍流运动的发展,不利于水面热量和水汽的向上输送,对水面的蒸发起到了抑制作用.从图7c可以看到,水域不仅是个“冷岛”,而且还是个“干岛”,说明低层由湖面向周围陆地输送的水汽很少,在这种情况下,在靠近水域的陆地上空仍能形成“湿气柱”,且高度可延伸到 400 m 以上,说明环流低空支水汽不是陆地“湿气柱”的主要来源,此外,由前面分析可知,陆地土壤植被的蒸发蒸腾为其上近地层大气提供了大量的水汽,因此可以得到,陆地“湿气柱”

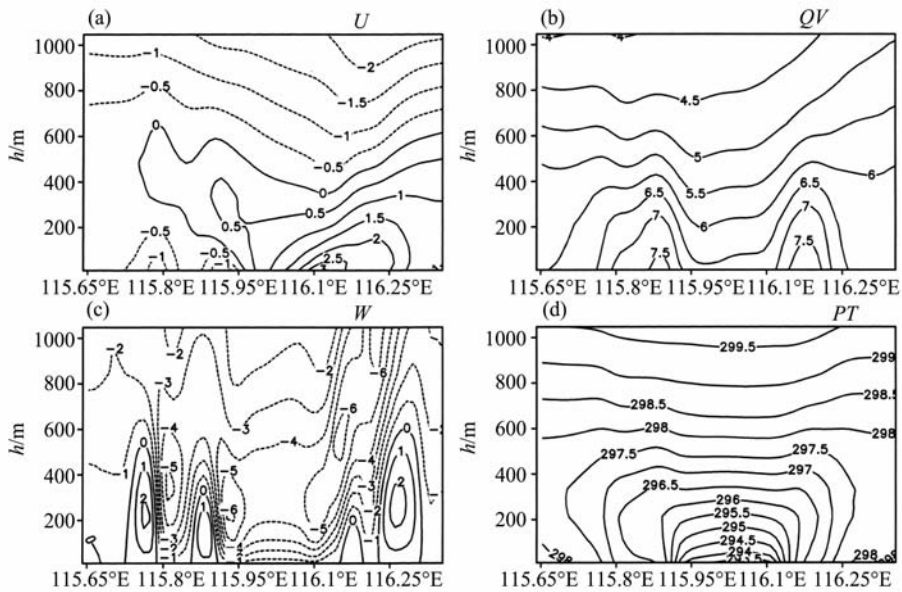


图7 模式运行10 h各气象要素场的垂直剖面图

(a)水平风速 $U(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 向东为正; (b)比湿 $QV(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$; (c)垂直风速 $W(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$, 向上为正; (d)位温 $PT(\text{K})$ 。

Fig. 7 Two-dimensional cross sections ($x-z$ plane) of meteorological elements after the model runs 10 hours

(a)Horizontal wind component $U(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, positive eastward; (b)Specific humidity $QV(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$;

(c)Vertical wind component $W(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$, positive upward; (d)Potential temperature $PT(\text{K})$ 。

的水汽源有两个:土壤植被的蒸发蒸腾和水域,且前者占主要地位,对比图7b和7c可以看到,“湿气柱”恰好与环流上升支重叠,说明局地环流虽不是其水汽的主要来源,但对垂直方向水汽分布存在一定的影响,是“湿气柱”形成的主要动力。通过以上分析可以得到,白洋淀水陆不均匀下垫面上大气比湿空间分布特征与沙漠-绿洲相类似,但形成机理不尽相同,在沙漠-绿洲中沙漠空气比湿高于绿洲的主要原因是局地环流造成的,是平流的结果,其水汽主要来源于绿洲^[9,11],而白洋淀陆地比湿高于水域则是湍流运动和局地环流共同作用的结果,且湍流运动占主导地位,其水汽主要来源于陆地土壤植被蒸发蒸腾,而来自水域的水汽只占很少的一部分。

4 结 论

本文利用中尺度气象模式 ARPS,对晴空弱背景场条件下白洋淀地区水陆非均匀下垫面上大气边界层结构及其变动进行了模拟研究。首先对比分析了该地区水陆近地层大气比湿的模拟结果和观测结果,验证了白洋淀地区陆地比湿高于水域这一观测事实,接着又分析了该地区近地层比湿空间变动的日变化特征,最后从近地层湍流运动状态以及局地环流的角度出发,深入讨论了湍流运动状态和局地环流对该地区比湿空间变动的影响,给出了该地区

特殊水陆湿度差异形成的物理机制。得到结论如下:

(1)白洋淀水陆近地层比湿日变化满足一般变化规律,陆地比湿高于水域的情况不仅仅只存在于近地层,也不仅仅出现在某个陆地观测点上空,而是白洋淀地区距离水域较近陆地上边界层内普遍存在的一种现象。此现象首先出现在近地层,随着时间的推移不断向高空延伸,傍晚前后水陆各观测点在200 m以下高度均出现逆湿现象,到夜间形成深厚逆湿。

(2)陆地感热通量夜间为负值,日间为正值,水域感热通量全天均为负值,且量级接近于零;潜热通量方面,夜间,水陆潜热通量大小相当,且量级很小,水域略高于陆地,日间,陆地潜热通量大,水域潜热通量小。白洋淀水陆两地不同的下垫面特征对近地层感热通量和潜热通量起到了决定性的作用,不同的下垫面通过影响近地层感热和潜热通量的分布,进而影响其上大气比湿的空间分布。

(3)夜间,水陆近地层湍流运动极弱,因而湍流运动对水汽和热量的输送作用很小,使得水陆比湿差异很小。日间,陆地近地层湍流发展旺盛,地表蒸发蒸腾释放的大量水汽可通过湍流输送到大气中,而水域近地层湍流很弱,抑制了水面的蒸发。白天水陆之间不同的湍流运动状态是导致陆地比湿高于水域的主要原因,湍流运动状态在水陆近地层比湿空间变动中起着决定性作用。

(4)由水陆热力和动力差异引起的局地环流同样影响白洋淀地区水陆比湿的空间变动. 环流上升和下沉运动不仅加强了水陆比湿差异,同时上升支对水气的输送作用又是陆地“水汽柱”形成的主要动力因素,其水汽主要来源于陆地土壤植被蒸发蒸腾,而来自水域的水汽只占很少的一部分.

由于模拟过程中初始场和边界条件均是由大尺度 NCEP 背景资料插值生成,并未加入探空资料等实测资料进行修正,且模式分辨率较低,导致模拟结果与实际情况存在一定差异,因此在今后的研究中将考虑加入实测探空资料和提高模式分辨率的尝试,以期给出白洋淀地区更加精细的行星边界层结构.

参考文献(References)

- [1] Deardorff J W. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 1972, **29** (1):91~114
- [2] Hechtel L M, Stull R B, Moeng C-H. The effects of nonhomogeneous surface fluxes on the convective boundary layer: A case study using large-eddy simulation. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**(14):1721~1741
- [3] Avissar R, Eloranta E W, Gurer K, et al. An evaluation of the large-eddy simulation option of the regional atmospheric modeling system in simulating a convective boundary layer: AFIFE case study. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**(7):1109~1130
- [4] Lynn B H, Abramopoulos F, Avissar R. Using similarity theory to parameterize mesoscale heat fluxes generated by subgrid-scale landscape discontinuities in GCMs. *J. Climate*, 1995, **8**: 932~951
- [5] Lynn B H, Rind D, Avissar R. The importance of mesoscale circulations generated by subgrid-scale landscape heterogeneities in general circulation models. *J. Climate*, 1995, **8**:191~205
- [6] Avissar R, Pielke R A. A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. *Monthly Weather Review*, 1989, **117**: 2113~2137
- [7] Vissar R, Chen Fei. Development and analysis of prognostic equations for mesoscale kinetic energy and mesoscale (subgrid scale) fluxes for large-scale atmospheric models. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **50**(22):3751~3775
- [8] Vissar R, Liu Yongqiang. Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land surface forcing. *J G R*, 1996, **101**(D3):7499~7518
- [9] 苏从先, 胡隐樵, 张永平. 河西地区的小气候特征和“冷岛效应”. *大气科学*, 1987, **11**(4):390~396
Su C X, Hu Y Q, Zhang Y P. The microclimate character and “cold island effect” over the oasis in HEXI region. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (in Chinese), 1987, **11**(4):390~396
- [10] 胡隐樵, 王俊勤, 左洪超. 临近绿洲的沙漠上空近地面层内水汽输送特征. *高原气象*, 1993, **13**(2):125~132
Hu Y Q, Wang J Q, Zuo H C. Character of water vapour transportation in the surface layer over desert near oasis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1993, **13**(2):125~132
- [11] 何抗, 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 K, Hu Y Q. Near surface layer experiment at faraway oasis desert station. *Plateau Meteorology* (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 Q, Hu Y Q, Yang Y F, et al. The variability process of atmosphere over heterogeneous underlying surface HEXI region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1996, **15**(3):282~292
- [13] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵等. 非均匀下垫面边界层的观测和数值模拟研究(I):冷岛效应和逆湿现象的完整物理图景. *高原气象*, 2004, **23**(2):155~162
Zuo H C, Lü S H, Hu Y Q, et al. Observation and numerical simulation of heterogenous underlying surface boundary layer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23**(2):155~162
- [14] 薛具奎, 胡隐樵. 绿洲与沙漠相互作用的数值模拟研究. *自然科学进展*, 2001, **11**(5):514~517
Xue J K, Hu Y Q. Numerical simulation of oasis-desert interaction. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11**(5):514~517
- [15] 刘新建, 张宏升, 宋星灼等. 白洋淀湿地夏末大气边界层温湿垂直廓线特征对比分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 2007, **43**(1):36~41
Liu X J, Zhang H S, Song X Z, et al. Characteristics of temperature and humidity profiles in the boundary-layer over Baiyangdian wet land in late summer season. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2007, **43**(1):36~41
- [16] Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. *Meteor. Atmos. Physics*, 2000, **75**: 161~193
- [17] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteor. Atmos. Physics*, 2001, **76**: 134~165
- [18] Vaidya S S, Mukhopadhyay P, Trivedi D K, et al. Prediction of tropical systems over Indian region using mesoscale model. *Meteorol. Atmos. Physics*, 2004, **86**: 63~72
- [19] Carmen J Nappo, Chun Hye-Yeong, Lee Hyuk-Je. A

- parameterization of wave stress in the planetary boundary layer for use in mesoscale models. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**: 2665~2675
- [20] Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Physics*, 2003, **82**: 139~170
- [21] 刘辉志,洪钟祥,桑建国. 对流边界层中过山气流的数值模拟. *气候与环境研究*,2001,**6**(3):305~311
Liu H Z, Hong Z X, Sang J G. Numerical simulation of the flow over terrain on the convective boundary layer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6**(3): 305~311
- [22] 臧增亮,张 铭,沈洪卫等. 江淮地区中尺度地形对一次梅雨锋暴雨的敏感性试验. *气象科学*,2004,**24**(1):27~34
Zang Z L, Zhang M, Shen H W, et al. Experiments on the sensitivity of meso-scale terrains in Jianghuai area to a heavy mold rain. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24**(1):27~34
- [23] 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——实验介绍及近地面层微气象特征分析. *大气科学*,2006,**30**(5):883~893
Hu F, Hong Z X, Chen J Y, 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

(本文编辑 胡素芳)