

夏季绿洲气候效应的观测和数值模拟

文莉娟¹ 吕世华¹ 孟宪红¹ 马恒² 奥银焕¹
张宇¹ 尚伦宇¹ 李锁锁¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

2 防化研究院, 北京 102205

摘要 利用“金塔绿洲能量水分循环观测试验”的资料和中尺度数值模式对绿洲小气候效应进行了17天较长序列的研究,在模拟过程中每天替换土壤湿度。研究表明:在分析时段内2004年7月6日前和9日后分别盛行西北风和东风两种背景风;白天,绿洲低层相对沙漠是一个冷源,随着高度的增加逐渐转为暖中心,温度场在600~700 hPa之间转变。当背景风较大时,绿洲上空的温度中心会偏向绿洲中心下游。白天绿洲低层风场平均态为在东风背景场的基础上向南北两侧辐散,随着高度的增加风场逐渐由辐散转为向绿洲的辐合,转变高度在700 hPa以下,且低于温度场的转变高度。白天绿洲上以下沉运动为主,绿洲风次级环流是绿洲上夏季晴天长期存在的平均态。当背景风较小时绿洲低层可形成向四周辐散的风场,当背景风场过大时,无绿洲环流生成。绿洲为高湿场,在绿洲边缘沙漠上存在的逆湿和高水汽柱,既阻止沙漠上干热气流侵入绿洲,又防止绿洲上水汽的流失。白天沙漠、绿洲的地表能量通量差异较大,绿洲上以潜热为主,沙漠上以感热为主,二者量级相当。绿洲上的边界层高度低于沙漠的,对绿洲生态系统起一定的保护作用。

关键词 绿洲 沙漠 绿洲风 冷岛

文章编号 1006-9585 (2008) 03-0300-09 **中图分类号** P404 **文献标识码** A

Observation and Numerical Simulation of Microclimate of Oasis in Summer

WEN Li-Juan¹, LÜ Shi-Hua¹, MENG Xian-Hong¹, MA Heng², AO Yin-Huan¹,
ZHANG Yu¹, SHANG Lun-Yu¹, and LI Suo-Suo¹

1 *Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*

2 *Research Institute of Chemical Defence, Beijing 102205*

Abstract Using data got from Jinta Oasis System Energy and Water Cycle Field Experiment and mesoscale numerical model microclimate of oasis was studied for 17 days. During the simulation, soil moisture was replaced every day using observed data. Results show that northwest wind and east wind prevailed respectively before 6 and after 9 July in 2004. In the day oasis was colder than desert in lower layers and became warm with height and changed to the warm center between 600 and 700 hPa. When background wind velocity was large, the center of temperature appeared on the lower reaches of the oasis center. In the day average wind in lower layers diverged from oasis to south and north on the basis of east wind. Wind gradually converged to oasis with height and the transfer height was below 700 hPa and was lower than that of temperature. Downdraft dominated in the oasis and the second circulation

收稿日期 2007-04-02 收到, 2008-01-28 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40633014 和中国科学院“西部之光”博士资助项目

作者简介 文莉娟, 女, 1978年出生, 博士研究生, 主要从事数值模拟研究。E-mail: wlj@lzb.ac.cn

consisted of wind converging from oasis in lower layer often happened in sunny days in summer. When background wind velocity was very small, wind converging from oasis to every direction would happen; But when it was very large, there was no secondary circulation. There was more vapor in the atmosphere in oasis. Inverse humidity and wet air column on desert near the oasis prevented dry and hot air to invade oasis and the lost of vapor in oasis. In the day surface flux of oasis and desert were very different. The latent heat flux was main in oasis and the sensible heat dominated on desert. Their values were approximate. Lower boundary layer height of oasis than that of desert contributed to the development of oasis ecology system.

Key words oasis, desert, oasis circulation, cold island

1 引言

我国西北干旱半干旱区面积广阔, 绿洲、戈壁和沙漠下垫面是其具有特色的地理景观。西北绿洲的形成主要是由天山和祁连山高山积雪融化形成的内陆河提供了水资源, 通过人工培育和维持, 形成了大大小小的绿洲。在西北地区, 面积不到 5% 的绿洲担负着哺育该地区 95% 以上人口的重任, 是干旱区对抗干旱气候环境的特殊生态系统^[1]。处于戈壁沙漠包围之中的绿洲是干旱区重要的生态资源, 是干旱区人们赖以生存的基础, 也是干旱区经济发展的载体。绿洲的发展、维持与退化对该地区的人民生活水平、农业生产及生存条件都有着重要的影响。

绿洲是西北农业生产的基地, 它提供良好的小气候环境, 是绿洲生态系统发展的摇篮。由于绿洲在西北地区的重要性, 已对其开展了一系列的研究。苏从先等^[2]在 20 世纪 80 年代河西水热平衡研究中提出了绿洲“冷岛效应”概念, Oke^[3]也曾同一时期指出绿洲效应在低温和相对湿度大的地方明显。在黑河试验中证实了绿洲的“冷岛效应”和邻近绿洲的沙漠戈壁的“逆湿现象”^[4~6]。在金塔试验中观测到了白天背景风场较小时绿洲低层向四周的辐散风^[7]。张强等^[8]使用敦煌观测资料, 分析了绿洲边缘戈壁沙漠的边界层特征。在敦煌试验中还给出了描述干旱区荒漠戈壁和绿洲下垫面陆气交换能力的总体输送系数, 探讨了绿洲与邻近荒漠地区的大气水分循环的过程和机理^[9~11]。对绿洲的研究是以观测和数值模拟两种研究手段展开的。薛具奎等^[12]、刘树华等^[13]、牛国跃等^[14]和吴凌云等^[15]则发展了较适合于绿洲、沙漠等区域研究的模式。Lü 等^[16]提出

了绿洲的自保护机制, 姜金华等^[17]则利用 RAMS 中的大涡模式对黑河绿洲斑点进行了模拟研究。文莉娟等^[18,19]给出了绿洲冷岛效应的三维结构特征并探讨了不同环境风场对绿洲效应的影响。通过上述研究对绿洲效应和其内部及与周围沙漠的水热传输等取得了一定认识, 然而以往的研究基本都是关注典型晴天个例, 对较长时段的绿洲效应研究较少。本文拟利用“金塔绿洲能量水分循环观测试验”(简称“金塔试验”)获得的资料和中尺度模式对 2004 年夏季金塔试验第二阶段为期 17 天的时间段进行分析来研究绿洲的小气候效应。

2 研究区域和时段

2004 年 6~8 月在甘肃省酒泉金塔地区开展了“金塔绿洲能量水分循环观测试验”, 该试验选择金塔绿洲为典型绿洲观测区。金塔绿洲 (39°47'~40°59'N, 98°58'~100°20'E) 位于甘肃省酒泉地区的东北部, 河西走廊的中段, 地处源于祁连山北大河下游的冲、洪积三角洲, 面积约 2 152 km²。属温带大陆性气候, 年降水量约 59.5 mm, 年潜在蒸发量为 2 538.6 mm。地势平坦, 海拔高差仅为 84 m; 土质优良, 以灌淤土、潮土、风沙土等土壤类型为主, 绿洲周边为典型的灰棕漠土。观测试验自 2004 年 6 月 5 日开始, 8 月 18 日结束, 共分为 3 个阶段, 第 1 阶段为对比试验, 第 2 阶段主要侧重于绿洲内部和绿洲外围沙漠能量水分特征的研究, 第 3 阶段侧重于绿洲边缘能量水份传输的研究。在第 2 阶段 (6 月 27 日~7 月 17 日) 共设有 7 个试验观测点, 沙漠点围绕绿洲分布, 分别是北沙漠点 (ND)、西沙漠点 (WD)、西南沙漠点 (SWD)、东南沙漠点 (SED) 和东北

沙漠点 (NED), 绿洲上有两个观测点, 分别为东绿洲点 (EO) 和东南绿洲点 (SEO)。

在观测试验第 2 阶段内, 6 月 28~29 日 (北京时间, 下同), 金塔地区有一次天气过程, 降水量 3.1 mm; 7 月 6~7 日又有一次降水过程, 降水量 1.7 mm; 其余时段天气晴好。降水在西北干旱半干旱区为小概率事件, 在绿洲中也不具有重要的生态意义, 而绿洲、沙漠的主要差异在晴天状况下明显, 因此本文避开观测期内第一次降水过程, 选择 7 月 1~17 日进行分析研究。

为在观测基础上更详细描绘绿洲小气候效应的特点, 本文结合模式对分析时段进行了数值模拟。所用模式为 NCAR 的非静力平衡中尺度数值模式 MM5 V3.6, 模式采用三重网格嵌套的双向作用套网格系统, 模拟区域中心位于 (40.1°N, 98.83°E), 母域和子域同一中心, 粗细网格距分别为 9、3 和 1 km, 格点数分别为 80×60、91×73 和 103×85; 模式层顶气压为 50 hPa; 模式采用地形追随坐标, σ 位面垂直分层 $k_\sigma=37$; 地形和下垫面特征分类为 D1、D2 和 D3, 分别采用精度为 5'、2' 和 2' 地形资料和 USGS (United States Geological Survey) 25 类下垫面特征资料, 但替换了第三重模拟域中金塔绿洲及其周围地区与实际不符的植被类型。模拟试验中参数化方案的选择如下: 可分辨尺度降水采用混合冰相方案, 次网格尺度降水不采用积云参数化方案; 行星边界层物理过程均采用 Blackadar 的高分辨行星边界层参数化方案; 大气辐射方案过程均采用简单辐射冷却方案; 调用了 Noah LSM 陆面模式; 使用 NCEP/NCAR 的 1°×1° 的再分析资料作为初始场, 每天替换一次土壤湿度资料。文中仅对第三重模拟域进行分析。

3 结果分析

3.1 绿洲温度场

沙漠和绿洲气温的模拟值与观测值 (图 1a 和 1b) 较为接近, 位相变化也较为近似。最低值一致地出现在早上 6 时, 最大值基本出现在 17 时前后。模式模拟的绿洲上的感热和潜热等与观测值也较为相近 (图 1c 和 1d)。

本次试验绿洲上仅设两个观测点, 其中东南

点绿洲靠近城镇, 且其下垫面为稀疏棉花地, 故该点不能代表植被良好的绿洲; 而东点绿洲下垫面为种植密集的小麦地, 且离城镇较远, 因此在分析绿洲和沙漠气温差异时对东点绿洲和沙漠站点的平均值做比较。观测试验期内绿洲站点的气温在白天总小于 5 个沙漠站点的平均值 (图 2a), 从 14 时到太阳落山这段时间内沙漠上的气温比绿洲上的高 2~3 °C, 日落后到日出两种不同下垫面上的气温相差不大, 仅 1~5 日、8 日和 9 日 4~8 时绿洲温度高于沙漠, 而在观测后期绿洲基本全天平均温度都较低。白天绿洲的温度较低是由于绿洲的土壤湿度和导热率较大, 升温需要更多的能量使其在白天形成一个冷岛, 而在夜晚则应该是绿洲比沙漠温度偏高。但在观测后期情况则并非如此, 东点绿洲的温度高于周边沙漠的平均温度, 通过分析发现造成这种现象的原因可能是背景风向的不同。与绿洲沙漠温度差相对应, 1~5 日、8 日和 9 日 0~6 时平均纬向风为西风, 其余时段恰好为东风 (图 2b), 在不同风向的情况下凌晨的温度场有一定的差异。10~17 日平均的 7 时温度场 (图 3a) 显示: 尽管东点绿洲的气温高于盛行东风时绿洲上游的北点和东南点沙漠的气温, 但处于绿洲下游的西点沙漠由于受流经绿洲的暖平流的影响, 其温度显著高于其他沙漠点, 也略高于处于绿洲边缘的东点绿洲。当西北风盛行时 (图 3b), 北点沙漠和西点沙漠处于绿洲上游, 其气温在夜晚则低于绿洲上的气温。处于绿洲下游之一的东南沙漠点则变得略高于其他沙漠点, 另一个下游的观测点北点沙漠的气温在所有观测点中最低, 是由于其位置最为孤立。尽管处于绿洲下游, 但风场仅经过绿洲三角形边缘角的顶部, 平流作用不明显, 并且从位置来看离绿洲也较远。在黑河试验中也曾观测到绿洲夜晚的冷岛效应, 潘林林等^[20]分析认为是由于夜间风速较小和蒸发造成的; 但在观测期内绿洲上游沙漠的气温总小于绿洲上的, 潘林林等的解释不适合于本文。

尽管背景风场在白天一样对气温场有影响, 但由于白天绿洲冷岛效应显著, 绿洲和沙漠气温差较大, 从多日平均的 13 时气温来看, 绿洲是一个比较明显的冷中心 (图 4a)。模拟的该时刻平均气温场 (见图 4b 和 4c) 按金塔绿洲轮廓分布, 绿洲内部温度比沙漠上的低约 1 °C。绿洲和沙漠的

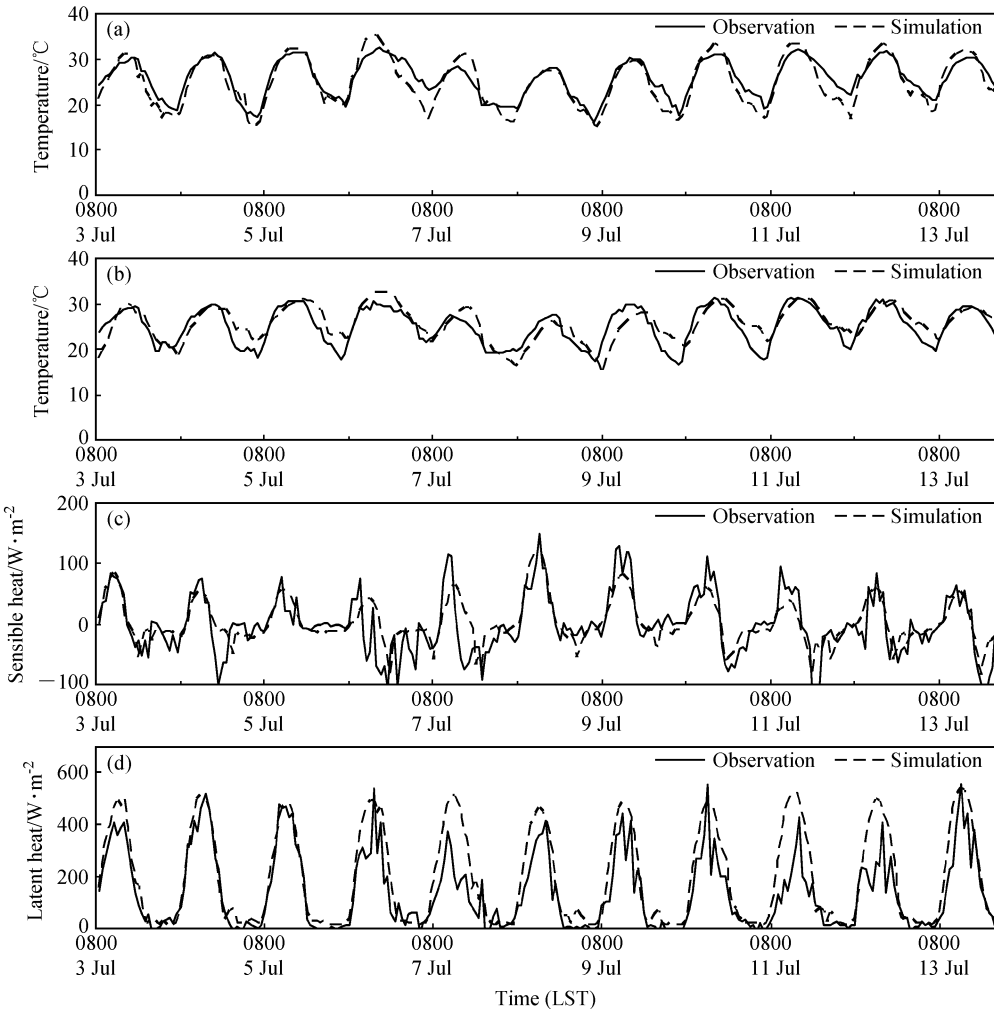


图 1 2004 年 7 月 3~13 日观测和模拟的北点沙漠 2 m 处气温 (a) 及东点绿洲的 2 m 处气温 (b)、感热 (c) 和潜热 (d)
Fig. 1 Observed and simulated temperature of desert north to the oasis (a) and temperature (b), sensible heat (c) and latent heat (d) of east oasis during Jul to 13 Jul 2004

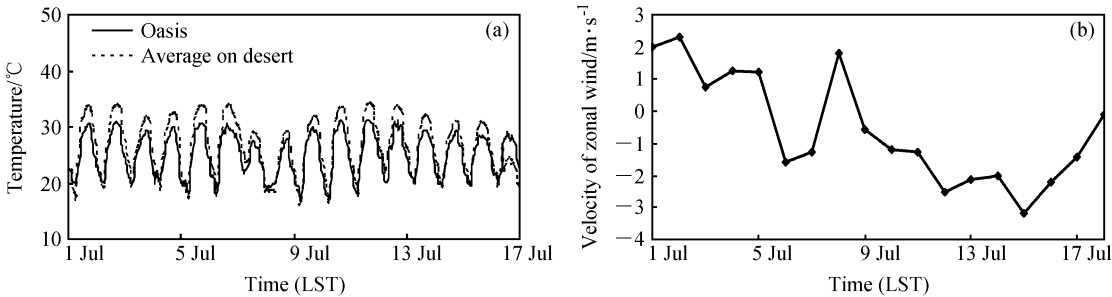


图 2 2004 年 7 月 1~17 日 (a) 东点绿洲的气温和 5 个沙漠站点的平均气温以及 (b) 7 个观测站点每日 0~6 时的平均纬向风
Fig. 2 (a) Observed temperature of east oasis and averaged temperature of five stations on desert and (b) averaged zonal wind of seven observation stations during 0000—0600 LST from 1 to 17 Jul in 2004

温度差异在底层最大，随着高度的增加绿洲和沙漠温差在逐步减小，大约 700 hPa 左右绿洲和沙漠温差由负转正，在 600 hPa 平面图上绿洲的温度比沙漠略高 0.1℃。模拟的绿洲温度场（见图 4d）会受到较大背景风场的影响而使温度中心偏向绿洲中心下游，在背景风场下游的绿洲边缘小

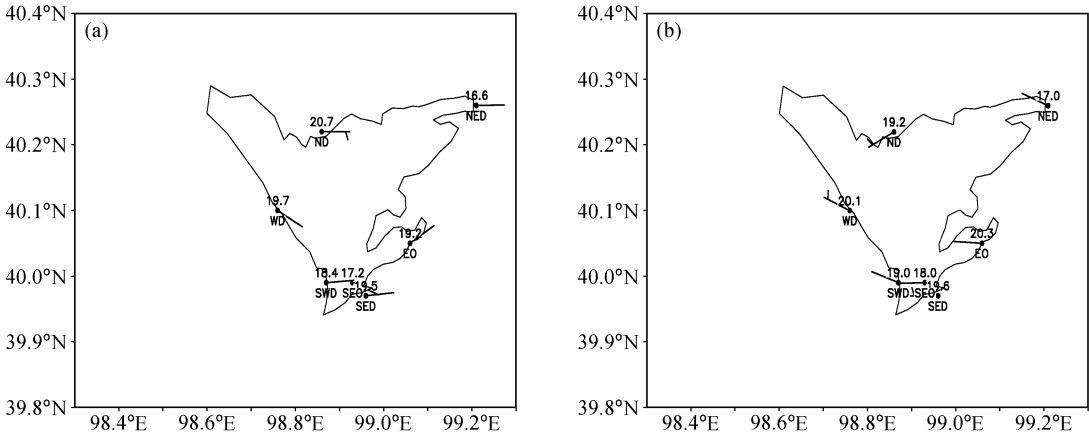


图3 2004年7月 (a) 10~17日和 (b) 1~5日平均的7时气温场 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 及风场 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。实线为金塔绿洲的轮廓
Fig. 3 Observed temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) fields at 0700 LST averaged during 10—17 Jul (a) and 1—5 Jul (b) in 2004. The solid line was the configuration of Jinta Oasis

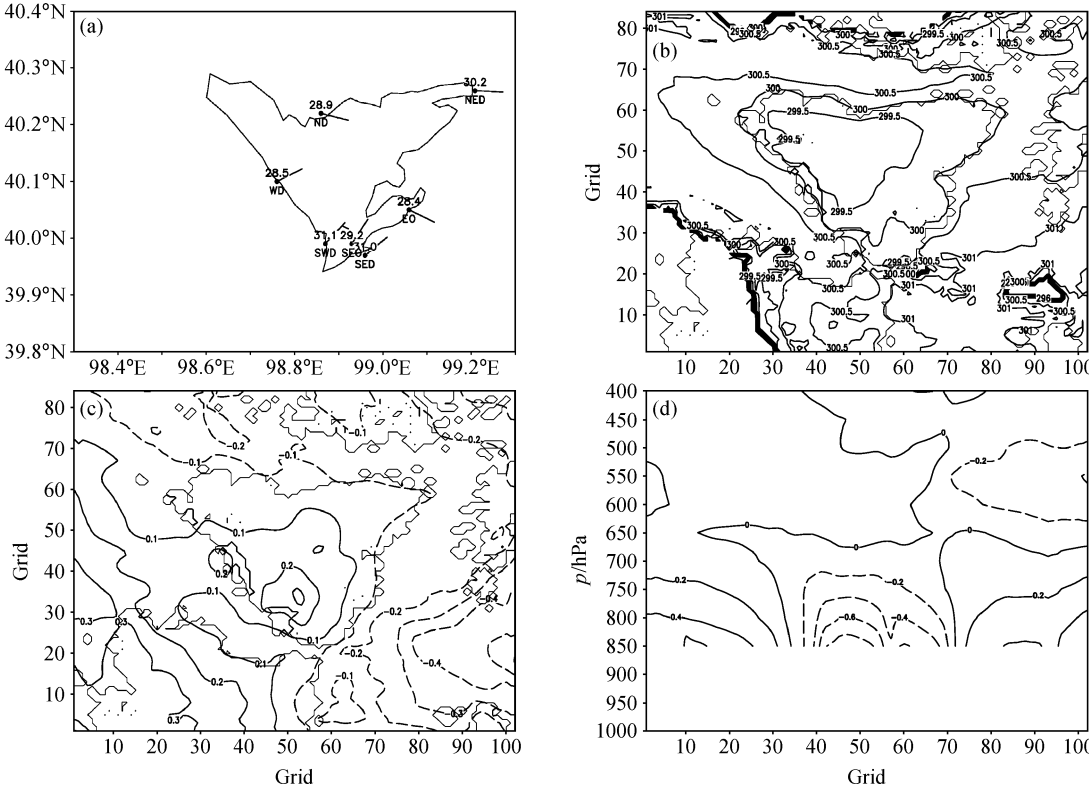


图4 2004年7月1~17日13时 (a) 观测的平均温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、(b) 模拟的850 hPa平均温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$)、(c) 600 hPa扰动温度场和 (d) 过格点 $y=40$ 的扰动温度场 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 的垂直剖面
Fig. 4 (a) Observed temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) and wind fields (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) simulated temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) on 850 hPa, (c) disturbed temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) on 600 hPa (c) and (d) cross section of disturbed temperature (units: $^{\circ}\text{C}$) along $y=40$ at 1300 LST averaged during 10—17 Jul in 2004

范围沙漠上空出现较低的温度场 (图略)。

3.2 绿洲风环流

下垫面的非均匀性可激发局地环流, 例如:

海陆风^[21]和城市热岛激发的局地环流^[22], 类似地在绿洲和沙漠的这两种截然不同的下垫面上会产生次级环流。当背景风速较小时, 受夏季晴空白

天绿洲上低温高压场的驱动，可形成由绿洲向四周辐散的绿洲风（图 5a），而在夜晚则可以看到向绿洲辐合的风场（图 5b）。这种完整的绿洲风和沙漠风在试验期内仅观测到 3 例，分别是 7 月 1、3 和 5 日。它们都是在夏季晴天背景风速较小时出现的，易在背景风向转换期间被观测到^[7]。多日平均的观测风场（图 4a）在白天表现为：以东风背景风场为主风向，由绿洲向南、北两侧沙漠辐散，强大的背景风场掩盖了绿洲冷岛效应激发的向东西向沙漠辐散的绿洲风。个例同平均态相对应，东风盛行（图略）时同前；当西风盛行（图略）时，相对应的只是主风向变为西风，白天同样是向南北辐散。因此，向主风向两侧辐散的绿洲风是夏季晴空白天绿洲风场的平均态。在日落至日出前，由于绿洲和沙漠热力差异较小，背景风较大，平均风场基本呈现为背景风（图 3）。

与观测一致，模拟的多日平均的 13 时低层风场（图 6a）在绿洲上表现为在背景场东风基础上的向南北辐散。随着高度的增加，背景风速增大以及绿洲沙漠温差的减少，辐散风逐渐减弱。由于白天下垫面的非均匀热力差异，在低层持续产生驶离绿洲的辐散风，受质量连续性原理约束，绿洲上空必然是下沉气流控制，而在绿洲上空的高层则会有辐合风场的出现。模拟的情况也正是如此，模拟的 700 hPa 扰动流场已转为向绿洲的辐合（图 6b）。绿洲上空风场由辐散转为辐合的高度低于温度场的转变高度，绿洲的温度场在 700~600 hPa 之间才由冷中心转为暖中心。模拟的多

日平均 13 时垂直速度场（图 6c）中，绿洲上空为显著负值区，最大量值为 $-0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，受背景风场影响，下沉运动区并不连续而是分裂成 3 个中心；在绿洲两侧边缘的沙漠上各分布着一强度大于下沉运动的强上升气流。这样低层辐散风、高层辐合风、绿洲中心的下沉运动以及强上升气流就构成了完整的次级环流（图 6d）。受背景风场影响的多日平均次级环流较为显著，再次表明白天绿洲冷岛效应激发的绿洲风环流长期存在并影响着该地区。

背景风向和风速对模拟的绿洲上空的风场和次级环流同样是有影响的^[18]，当风速很小时，白天模拟的绿洲低空的辐散中心及高空的辐合中心位于绿洲中心，垂直环流也较为对称，在夜晚出现与白天相反的次级环流（图略）；当风速较大时，绿洲低（高）层辐散（合）中心与次级环流中心位于绿洲中心的下游（图略）；当风速过大时不再出现绿洲风环流（图略）。

3.3 湿度场

由于下垫面植被和土壤湿度差异，在低层，绿洲内的大气含水量远高于沙漠上的（图 7a）。模拟的高湿度场在绿洲上均匀分布（图略），且随高度的增加减小。白天植被持续蒸发，绿洲内的水汽不断向上输送，长期在绿洲上空存在的下沉气流恰好抑制了水汽的扩散。比湿在绿洲边缘骤减，但受吹向沙漠的绿洲风平流和向上气流携带水汽的影响，水汽会在沙漠边缘堆砌，形成水汽柱（图 7b）。这种在绿洲边缘长期存在的水汽柱既有

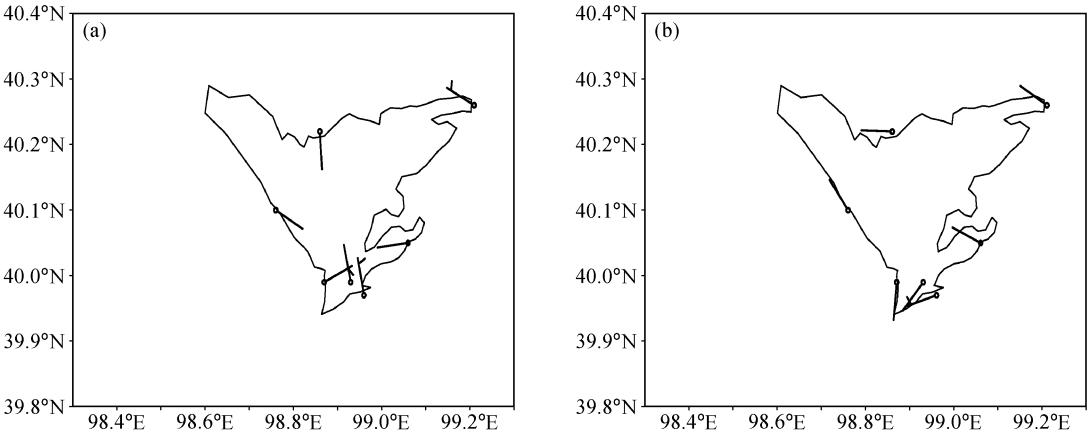


图 5 2004 年 7 月 5 日金塔绿洲的风场（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）：(a) 11 时；(b) 5 时
Fig. 5 Observed wind fields (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Jinta oasis on 5 Jul in 2004: (a) 1100 LST; (b) 0500 LST

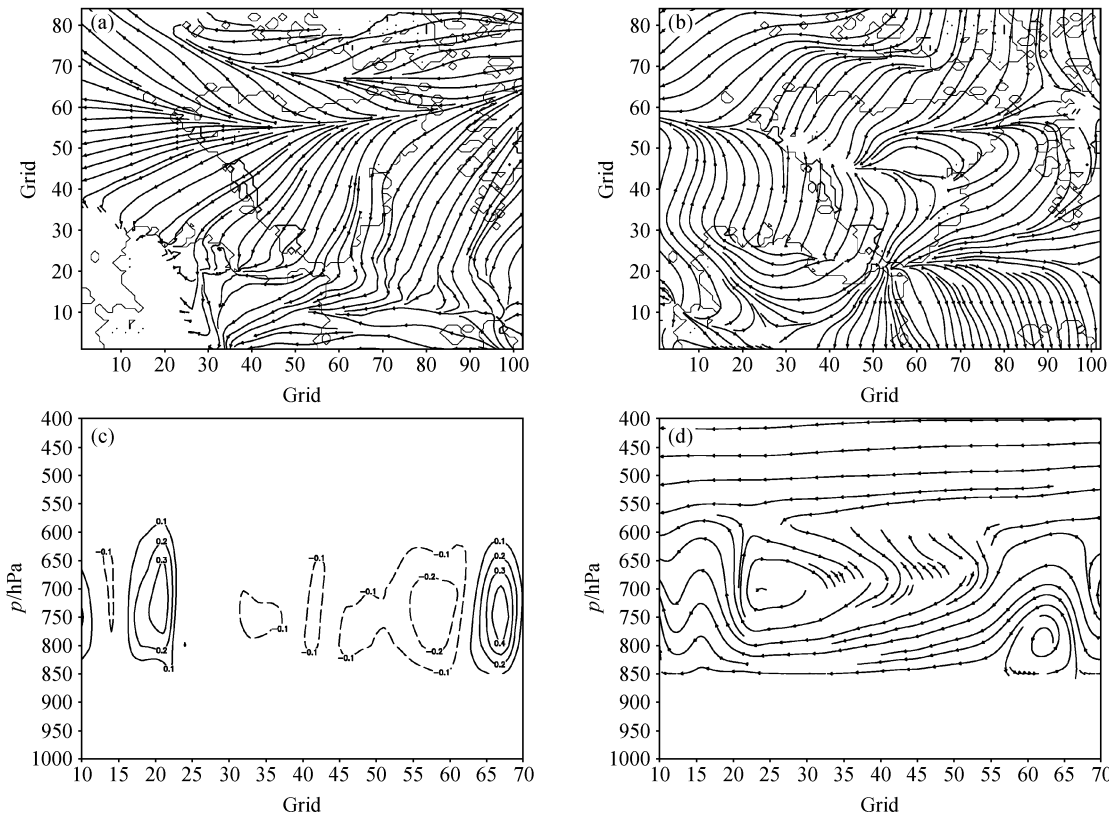


图 6 2004 年 7 月 1~17 日 13 时平均环流场模拟: (a) 850 hPa 流场; (b) 700 hPa 扰动流场; (c) 过 $x=60$ 的垂直速度 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (d) 过 $x=60$ 的垂直环流场

Fig. 6 Simulated circulation fields at 1300 LST averaged during 1–17 Jul in 2004: (a) stream field on 850 hPa; (b) disturbed stream field on 700hPa; (c) cross section of disturbed vertical velocity (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (d) vertical circulation along the grid $x=60$

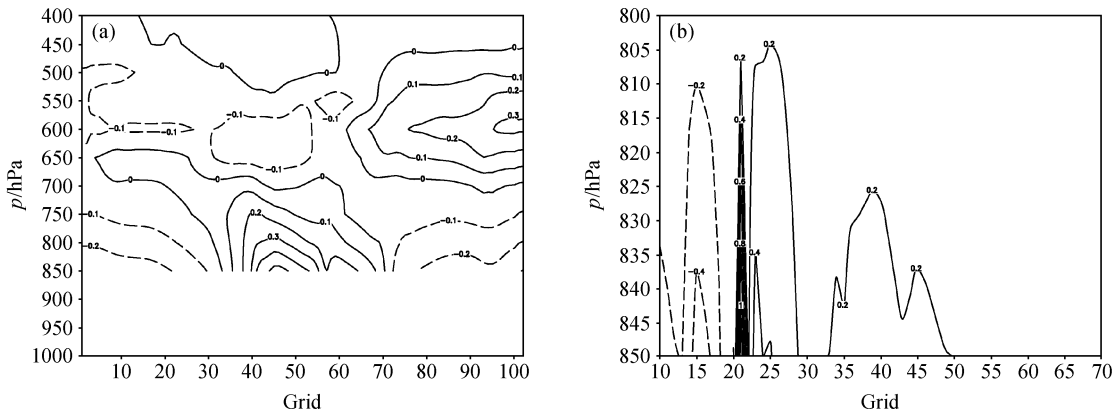


图 7 模拟的 2004 年 7 月 1~17 日平均的 13 时过格点 $y=40$ (a) 和格点 $x=60$ (b) 的比湿 (单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 垂直剖面

Fig. 7 Cross section of simulated specific humidity (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along the grid $y=40$ (a) and the grid $x=60$ at 1300 LST averaged during 1–17 Jul in 2004

利于绿洲向沙漠扩张又阻止了沙漠的干热风对绿洲的侵袭。

3.4 感热、潜热和边界层高度

绿洲沙漠在能量平衡中最显著的差异就是感

热和潜热的差别。白天绿洲上以潜热为主,模拟的平均峰值为 $462 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 由于沙漠上土壤湿度很小,模拟的潜热在沙漠上全天基本为 0。白天感热则在沙漠下垫面的能量平衡中占有很大比

重, 模拟的平均峰值可达 $485 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 与绿洲上的潜热相当; 绿洲上的感热则较小, 平均峰值仅 $63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。绿洲和沙漠上的感热和潜热在夜晚都很小。

韦志刚等^[23]利用 2004 年金塔试验第二阶段观测期内的小球和雷达探空资料, 通过个例分析给出了夏季金塔边界层结构特征。分析认为金塔沙漠绿洲系统的对流边界层顶高度在 3 000 m 以上, 比一般地区要高, 但比张强等^[24]分析的敦煌地区 4 000 m 对流边界层高度要低。与实际较为一致, 模拟的沙漠平均最大边界层高度为 3 681 m, 出现在 16 时左右, 模拟的绿洲上最大高度比沙漠上的低, 约 2 699 m。晚上的边界层高度都较低。绿洲较低的边界层结构实际上是一个保护层, 使得有限的水分和热量保存在绿洲系统内, 对绿洲生态系统的发展起到了保护作用。

4 结论

(1) 17 天平均结果显示白天绿洲低层相对沙漠是一个冷源, 随着高度的增加逐渐转为暖中心, 温度场在 600~700 hPa 之间转变。当背景风较大时绿洲上空的温度中心会偏向绿洲中心下游。夜晚西北风盛行时绿洲较沙漠平均气温偏高, 但东风盛行时则相差不多, 主要是由于各观测点的地理位置以及流经绿洲的平流会影响绿洲下游沙漠站点的气温造成的。

(2) 观测期内主要盛行西北风和东风, 白天绿洲低层风场平均态为在东风背景场的基础上向南北两侧辐散, 随着高度的增加风场逐渐由辐散转为向绿洲的辐合, 转变高度略低于 700 hPa, 且低于温度场的转变高度。白天绿洲上以下沉运动为主, 在绿洲边缘的沙漠上存在上升气流, 配合高低层辐合、辐散形成的绿洲风次级环流是绿洲上的一个平均态。当背景风较小时绿洲低层可形成向四周辐散的风场, 当背景风场过大时, 无绿洲环流生成。

(3) 绿洲为高湿场, 受绿洲次级环流影响, 水汽被抑制在绿洲低层, 在绿洲边缘沙漠上产生逆湿和高水汽柱, 既阻止了沙漠上干热气流侵入绿洲又防止了绿洲上水汽的流失。

(4) 白天沙漠、绿洲上的感热、潜热差异较

大, 绿洲上以潜热为主, 沙漠上以感热为主, 二者量级相当。绿洲上的边界层高度低于沙漠的, 对绿洲生态系统起到了一定的保护作用。

参考文献 (References)

- [1] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应. 地球科学进展, 2002, **17** (4): 477~486
Zhang Qiang, Hu Yinqiao. The geographical features and climatic effects of oasis. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2002, **17** (4): 477~486
- [2] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲的小气候特征和“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. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1987, **11** (4): 390~396
- [3] Oke T R. *Boundary Layer Climates* (2nd ed). London and New York: Methuen, 1987. 20~90
- [4] 胡隐樵, 王俊勤, 左洪超. 邻近绿洲的沙漠上空近地面层内水汽输送特征. 高原气象, 1993, **12** (2): 125~132
Hu Yinqiao, Wang Junqin, Zuo Hongchao. Character of water vapour transportation in the surface layer over desert near oasis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1993, **12** (2): 125~132
- [5] Kai K, Matsuda M, Sato R. Oasis effect observed at the Zhangye oasis in Hexi Corridor, China. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1997, **75** (6): 1171~1178
- [6] Hu Yinqiao, Su Congxian, Zhang Yongfeng. Research on the microclimate characteristics and cold island effect over a reservoir in the Hexi Region. *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, **5** (1): 117~126
- [7] 陈世强, 吕世华, 奥银焕, 等. 夏季金塔绿洲与沙漠次级环流近地层风场的初步分析. 高原气象, 2005, **24** (4): 534~539
Chen Shiqiang, Lü Shihua, Ao Yinhuang, et al. Preliminary analyses on ground level wind field of second circulation in Jinta oasis and desert in summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 534~539
- [8] 张强, 赵鸣. 绿洲附近荒漠大气逆湿的外场观测和数值模拟. 气象学报, 1999, **57** (6): 729~740
Zhang Qiang, Zhao Ming. Field experiment and numerical simulation of inverse humidity of atmosphere over desert near oasis. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (6): 729~740
- [9] Zhang Qiang, Cao Xiaoyan, Wei Guoan, et al. Observation and study of land surface parameters over gebi in typical arid region. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (1): 121~

135

- [10] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Tian Hui. A parameterization scheme of surface turbulent momentum and sensible heat over the gebi underlying surface. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1): 111~118
- [11] Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui, et al. Impact of oasis on the atmosphere hydrological cycle over desert or gebi near it —A study by Dunhuang experiment. *Progress in Natural Science*, 2002, **12** (5): 121~136
- [12] 薛具奎, 胡隐樵. 绿洲与沙漠相互作用的数值实验研究. 自然科学进展, 2001, **11** (5): 514~517
Xue Jukui, Hu Yinqiao. Numerical experiment study on interaction between oasis and desert. *Advance in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11** (5): 514~517
- [13] 刘树华, 胡予, 胡非, 等. 绿洲效应的模拟及内外因子的敏感性实验. 大气科学, 2005, **29** (6): 997~1009
Liu Shuhua, Hu Yu, Hu Fei, et al. Numerical simulation of oasis effect and its sensitivity test of inside and outside factors. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 997~1009
- [14] 牛国跃, 洪钟祥, 孙菽芬. 沙漠绿洲非均匀分布引起的中尺度通量的数值模拟. 大气科学, 1997, **21** (4): 384~395
Niu Guoyue, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. Numerical simulations on mesoscale fluxes generated by desert and oasis heterogeneous distributions. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (4): 384~395
- [15] 吴凌云, 巢纪平. 一个简单陆气耦合模式中的绿洲荒漠化效应. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 350~360
Wu Lingyun, Chao Jiping. The oasis and desert effect in a simple dynamics model of interaction between oasis and desert. *Climatic and Enviromental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 350~360
- [16] Lü Shihua, An Xingqin, Chen Yuchun. Simulation of oasis breeze circulation in the arid region of the Northwestern China. *Science in China* (Ser. D), 2004, **47** (Suppl.): 101~108
- [17] 姜金华, 胡非, 角媛梅, 等. 黑河绿洲区不均匀下垫面大气边界层结构的大涡模拟研究. 高原气象, 2005, **24** (6): 854~864
Jiang Jinhua, Hu Fei, Jiao Yuanmei, et al. Large eddy simulation of atmosphere boundary layer over heterogeneous land surface in oasis area of Heihe River basin. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (6): 854~864
- [18] 文莉娟, 吕世华, 张宇, 等. 金塔绿洲风环流的数值模拟及结构分析. 高原气象, 2005, **24** (4): 478~486
Wen Lijuan, Lü Shihua, Zhang Yu, et al. Numerical simulation and analysis on the structure of the local circulation in Jinta oasis. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (4): 478~486
- [19] 文莉娟, 吕世华, 孟宪红, 等. 环境风场对绿洲效应影响的数值模拟研究. 中国沙漠, 2006, **26** (5): 754~758
Wen Lijuan, Lü Shi hua, Meng Xianhong, et al. Simulation of the influence of background wind fields to oasis effect. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2006, **26** (5): 754~758
- [20] 潘林林, 陈家宜. 绿洲夜间“冷岛效应”的模拟研究. 大气科学, 1997, **21** (1): 39~48
Pan Linlin, Chen Jiayi. The simulation of “cool island” over oasis at night. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (1): 39~48
- [21] 蔡榕硕, 严邦良, 黄荣辉. 台湾海峡海陆风数值模式与数值模拟试验. 大气科学, 2003, **27** (1): 86~96
Cai Rongsuo, Yan Bangliang, Huang Ronghui. A numerical model and its simulation of the land and sea breeze over the Taiwan Strait. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 86~96
- [22] 鞠丽霞, 王勤耕, 张美根, 等. 济南市城市热岛和山谷风环流的模拟研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 467~474
Ju Lixia, Wang Qingeng, Zhang Meigen, et al. A simulation of heat island circulation and mountain valley breeze in Jinan. *Climatic and Enviromental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 467~474
- [23] 韦志刚, 吕世华, 胡泽勇, 等. 夏季金塔绿洲边界层风、温度和湿度结构特征的初步分析. 高原气象, 2005, **24** (6): 846~856
Wei Zhigang, Lü Shihua, Hu Zeyong, et al. A primary research on the characteristics of wind, temperature and humidity in the boundary layer over Jinta summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2005, **24** (6): 846~856
- [24] 张强, 卫国安, 侯平. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界层结构特征的一次观测研究. 高原气象, 2004, **23** (5): 587~597
Zhang Qiang, Wei Guoan, Hou Ping. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang gebi in early summer. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (5): 587~597