

滇中地区夏季城市热岛效应的数值模拟研究

郑亦佳^{1,2} 刘树华^{1,†} 何萍^{3,†} 缪育聪⁴ 王姝⁵

1. 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2. 浙江省气象台, 杭州 310017; 3. 云南楚雄师范学院地理科学与旅游管理学院, 楚雄 675000; 4. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 5. 中国电力科学研究院新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192; † 通信作者, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn (刘树华), heping@cxtc.edu.cn (何萍)

摘要 为了探究滇中地区不同城市化程度和湖泊下垫面对城市热岛效应的影响, 利用中尺度气象模式 WRF (the weather research and forecasting model) 对昆明等城市的夏季城市热岛效应进行模拟研究。结果显示, 夏季夜间, 昆明等城市的热岛现象具有明显的下游效应, 城市的扩张使得城市热岛下游效应的影响范围扩大, 但热岛的强度不会明显地增强。城市的存在会增加地表的粗糙度, 使得夜间的近地面风速减小。在白天, 湖泊和城市下垫面主要通过改变局地的热力差异影响近地面的风速, 城市的存在会加强湖泊与陆地间的热力差异, 促进湖陆风环流, 进而加大近地面的风速。城市的存在还会减少下垫面对低层水汽的供应, 但城市面积的增加对低层水汽的影响相对较小。清晨, 城市地区表现为湿岛(湿度较周边地区略大), 这与城市地区的近地面辐合流场有关; 而在其他时段, 城市地区多为干岛(湿度比周边地区低), 且干岛现象也存在下游效应。

关键词 城市热岛; 湖陆风; WRF 模式; 滇中地区

中图分类号 P404

Numerical Study of Summertime Urban Heat Island in Dianzhong

ZHENG Yijia^{1,2}, LIU Shuhua^{1,†}, HE Ping^{3,†}, MIAO Yucong⁴, WANG Shu⁵

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; 2. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017; 3. The college of Geography and Tourism Management, Chuxiong Normal University, Chuxiong 675000; 4. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 5. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy and Storage Systems, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192; † Corresponding authors, E-mail: lshuhua@pku.edu.cn (LIU Shuhua), heping@cxtc.edu.cn (HE Ping)

Abstract In order to study the effect of urbanization and lakes on the urban heat island (UHI) effect of cities in Yunnan midland in summer, the weather research forecasting model (WRF) numerical model is used. The downwind urban heat island is found in these cities in the summer night. The expansion of city will expand the scope of the downwind urban heat island, but the intensity of the heat island would not be enhanced significantly. The presence of the city will change the surface roughness, resulting in the reduction of wind speed near the surface. In the daytime, lakes and the city influence surface wind speed by changing the local thermal difference. The existence of city increases the thermal difference between city and lake, which enhances both the lake-land breeze and the surface wind speed. The presence of city will reduce the supply of low-level moisture, but the impact of urban expansion on moisture is relatively small. In the early morning, the wet island exists in the city (humidity in city is slightly larger than the surrounding area), due to the convergence filled near surface. At other moments, the dry island exists in the city (humidity in city is smaller than the surrounding area), and has the downwind effect as well.

Key words urban heat island; lake-land breeze; WRF model; Dianzhong region

大气运动会受到地形及下垫面的影响。人类活动引起的土地利用和土地覆盖变化的突出表现是城市化,城市化对局地大气环流和区域气候具有重要影响。城市化过程不仅改变了地表的物理过程特征,城市中人为热和污染物的辐射效应也影响着地表的物质能量平衡,改变了近地层大气的物理层结。随着城市化进程的加快,城市化对区域天气和气候的影响在科学界受到广泛关注。

城市热岛效应指由于城市化改变了区域原有的地貌特征以及地表对太阳辐射的反射率,增大了地表的摩擦阻力,使得地表能量平衡、区域水循环及热力学、动力学过程发生改变,导致城市区域温度高于郊区温度的现象。城市热岛效应被广泛地认为是城市化对区域气候影响的重要证据。对城市热岛效应的研究开展较早,也较为深入^[1-3]。

关于城市热岛效应与城市面积的关系及其动力学基础,Oke^[4-5]进行了较全面的总结,他提出的典型城市热岛剖面主要分为三部分:从郊区农村到城市边缘的近郊下垫面发生巨大变化,引起气温陡然升高,称为“陡崖(cliff)”;从城市边缘到城市中心,气温梯度比较平缓,称为“高原(plateau)”;城市中心人口、建筑密度及人为热释放量最大的地点,气温也最高,称为“高峰(peak)”。随后,有学者总结出城市热岛效应的一些典型特征^[6-12]:城市热岛效应的强度随风速及云覆盖度的增加而减小^[6-7],随城市面积或人口数量的增加而增加^[8-9]。此外,城市热岛效应还会影响其他边界层的局地环流,如 Ohashi 等^[13]、刘振鑫等^[14-15]及 Miao 等^[16]通过数值模拟,发现城市热岛环流可能与城市周边的海陆风环流、山谷风环流产生相互作用。Zhang 等^[17-18]使用耦合的 WRF (weather research and forecasting model) 和 UCM (urban canopy model) 模式研究华盛顿-巴尔的摩城市热岛效应时发现,在特定风向条件下,巴尔的摩的城市热岛可能会受到上风方向城市热岛的影响而加剧,两个城市的热岛效应甚至会叠加,即存在城市热岛的“上下游效应”。

近几十年来,随着国内城市化水平的不断提高,有关城市热岛效应的研究越来越多。李耀锟等^[19]通过在能量平衡方程中引入气溶胶的吸收和散射作用,并与三维行星边界层运动方程组耦合,研究城市热岛效应和气溶胶浓度的动力学、热力学特征。桑建国等^[20-21]从大气热力、动力方程组出发,分析城市人为热引起的热岛环流特征。刘树华等^[22]及

胡小明等^[23]在利用二维大气边界层模式研究北京城郊大气边界层结构的基础上,模拟分析北京夏季风场和温度场特征。Miao 等^[24]通过敏感性试验,发现城市热岛效应对具有较强水平涡度的对流卷涡的空间波长和深度都有影响。但是,现有研究主要针对京津冀地区、长三角地区和珠三角地区^[16,25-28],很少开展针对我国西部高原地区城市热岛效应的研究。

云南滇中城市群由 4 个中小型城市组成,地处高原地区,位于我国季风系统的上游,是孟加拉湾水汽及南海水汽输送的必经之路。根据滇中城市群的相关规划,到 2030 年末,滇中城市群区的城镇化水平达到 75%,城市化的迅速发展可能会对该地区的区域气候环境产生一定影响。何云玲等^[29]2002 年指出,昆明存在热岛效应,且在夜间最为明显。赵庆由等^[30]结合 1987—2006 年昆明及周边气象站的观测数据以及昆明城区的城市发展资料,利用统计学方法研究发现,昆明市热岛效应呈现持续增强的趋势,且不同时段城市发展对热岛强度的影响因素不同。孙绩华等^[31]的研究表明,昆明市热岛效应具有日、季节和年际变化特征,其强度夜间大于白天。何萍等^[32]分析了楚雄市的气温、降水、相对湿度及低云量资料,发现楚雄市的热岛效应越来越明显,其雨岛及干岛效应也逐渐显现出来。本文利用新一代中尺度天气模式 WRF,研究云南滇中地区的夏季城市热岛效应,研究结果可为今后深入研究滇中城市群发展对区域气候,乃至对我国季风区大气环流及季风降水的影响机理提供基础。

1 模式及试验方案设计

1.1 模式介绍

WRF 模式是美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心联合开发的新一代中尺度天气模式。该模式是完全可压缩的非静力模式,其中包含大量物理过程参数化方案以及与模式相协调的资料同化系统。WRF 模式不仅可以用于真实天气的个案模拟,也可以将其包含的模块组作为探讨基本物理过程的理论依据。

1.2 试验设计

本研究使用的模式版本为 WRF v3.6.1,由分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP/NCAR 全球分析资料提供初始场和边界条件,再分析资料每 6 小时输入一次。WRF 模式的模拟时间、模拟区域设置及参数化方

案选择如表 1 所示。使用的地表类型资料为 2010 年的 MODIS (the moderate resolution imaging spectra radiometer)地表类型数据,分辨率为 500 m^[33]。WRF 模式的模拟区域如图 1 所示,采用三层双向嵌套网格,最外层网格(区域 A)的水平分辨率为 27 km,网格数为 150×130;次外层网格(区域 B)的水平分辨率为 4.5 km,网格数为 201×201;最内层网格(区域 C)的水平分辨率为 1.5 km,网格数为 202×151。垂直方向分为 35 层,采用上疏下密的分层方式。模拟区域中心位于 99.13°E, 25.63°N, 模式最内层网格包括昆明及其周边的几个城市(玉溪、楚雄和曲靖)。模式的物理过程参数化方案选择如下:微物理过程采用 Thompson graupel 方案^[34],

表 1 WRF 模式模拟时间、模拟区域设置及参数化方案选择
Table 1 Run-time, domain configurations and physics options used in the WRF simulation

模式参数	参数设置
模拟时间	2010-08-09 06:00 至 2010-08-11 24:00
水平分辨率	27, 4.5, 1.5 km
水平格点数	150×130, 201×201, 202×151
土地利用类型数据	MODIS
微物理参数化方案	Thompson graupel 方案
辐射参数化方案	RRTMG 方案
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch 方案
边界层参数化方案	YSU 方案
陆面过程参数化方案	Noah 耦合 UCM 城市冠层陆面方案

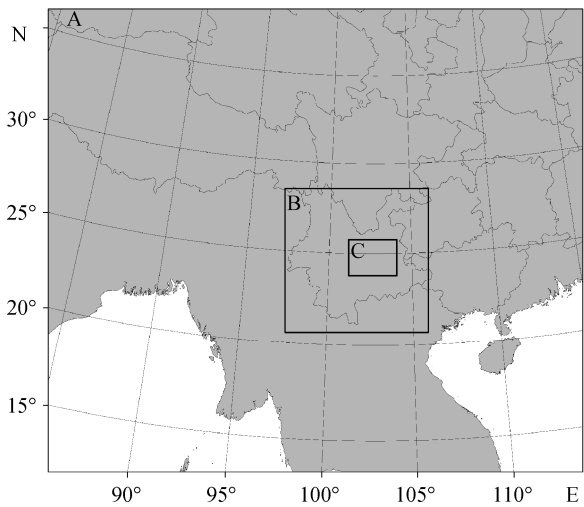


图 1 WRF 模拟的区域设置
Fig. 1 Nested computational domains in the WRF model simulation

长短波辐射采用 RRTMG 方案^[35];陆面过程采用 Noah 方案^[36],并启用单层城市冠层方案 UCM (urban canopy model)^[37-38]来更好地模拟城市热岛效应;积云对流采用 KF 方案^[39];边界层采用 YSU 方案^[40-41],并启用近地面风场的地形订正方案^[42-43]。模拟时间段为 2010 年 8 月 9 日 06:00 至 8 月 11 日 24:00 (北京时,下同),连续模拟 66 小时,其中前 18 小时为模式的调整时间。在研究时段内,滇中地区没有出现强对流天气过程。

为了研究滇中地区湖泊下垫面 and 不同城市化程度对城市热岛效应和边界层结构的影响,本文设置 4 个模拟试验(表 2 和图 2): 1) CTL 试验为控制试验,即采用默认的 MODIS 地表利用类型数据; 2) Nourb 试验,将城市下垫面替换为农田下垫面; 3) Urban 试验为城市扩张的敏感性试验,将城市周围的农田下垫面替换为城市下垫面; 4) Nolake 试验,将湖泊替换为农田下垫面。

2 模拟结果分析

2.1 模式验证

为了验证 WRF 模式对滇中地区城市热岛现象的模拟能力,我们将 CTL 试验模拟得到的 2 m 气温和 10 m 风速与地面气象站的观测资料进行对比,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,模拟得到的气温与观测资料基本上一致;另外,模式也较好地模拟出风速的波动变化。总体上看,WRF 模式能够较好地模拟滇中地区近地面的气象要素场。

2.2 模拟结果分析

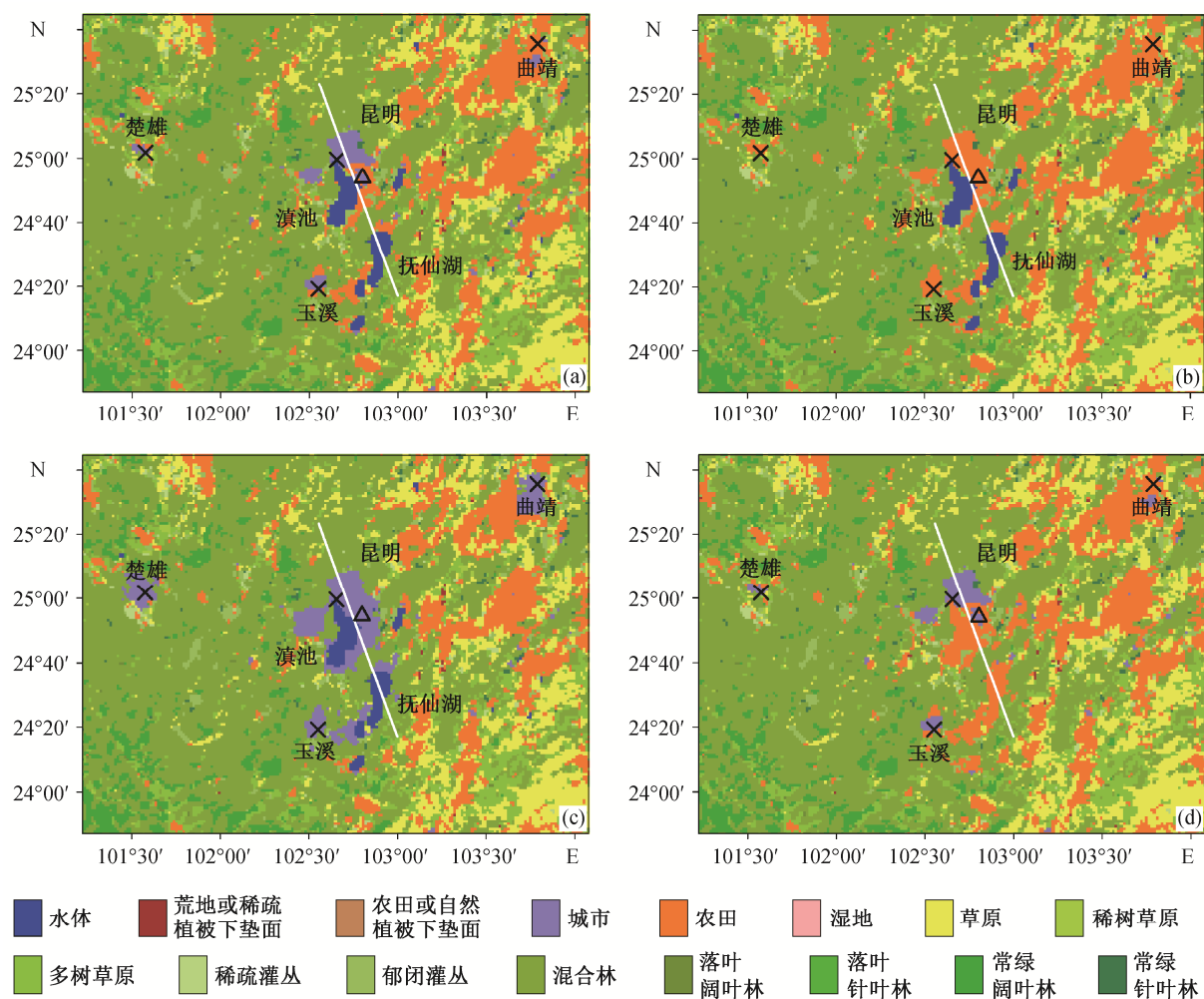
模拟区域最内层(区域 C)的滇中地区,地理环境较为复杂,湖泊以及城市下垫面同时影响着该地区的近地面气象场。本文通过对比敏感性试验的模拟结果,探讨湖泊和不同程度城市化对城市热岛效应和边界层结构的影响。

2.2.1 近地层气象场的水平分布特征

为了直观地反应城市下垫面对研究区域内近地

表 2 敏感性模拟试验中土地利用类型设置
Table 2 Landuse in different WRF model simulation

模拟试验	土地利用类型
CTL	采用默认的 MODIS 地表利用类型数据
Nourb	将 CTL 试验中的城市下垫面改为农田
Urban	将 CTL 试验中的城市周边的农田改为城市
Nolake	将 CTL 试验中的湖泊改为农田



(a) CTL; (b) Nourb; (c) Urban; (d) Nolake. “x”指示楚雄、玉溪、昆明和沾益 4 个地面气象站的位置; 白线指示图 7 和图 8 垂直剖面的位置; 黑色三角形指示图 9 中垂直廓线的提取位置

图 2 各组试验模拟区域最内层(区域 C)的土地利用类型

Fig. 2 Landuse of the innermost domain (domain C) in different WRF model simulation

层气象要素场的影响,图 4 和 5 分别给出不同试验之间温度和湿度的差值场,图中叠加的风矢量是对应时刻 CTL 试验模拟得到的 10 m 风场。图 4(a)给出中午 14:00 CTL 试验与 Nourb 试验的 2 m 温度差值场,可以发现,城市下垫面使昆明市区在白天增温 0.4~0.6℃,即形成城市热岛效应。夜间,昆明市区的增温更为强烈,可以达到 1.6℃以上(图 4(c));城区相对较暖的空气会被带到城市的下游地区,使下游地区增温,形成城市热岛的下游效应^[17-18,44]。当昆明城区面积扩大后,不仅形成城市热岛的区域变大,夜间城区下游增温的区域也随之增大(图 4(b)和(d))。

除昆明外,其他几个城市(如楚雄和玉溪)都能

观察到城市热岛现象,但强度和范围都要小于昆明(图 4)。由于滇中各城市间的距离较远(直线距离均超过 60 km),无论在 CTL 试验还是 Urban 试验中,夜间上游城市的热岛效应都不足以影响下游城市。

除影响地表温度外,城市下垫面还会抑制地表的潜热释放,使得城区近地面湿度减小,但是城市热岛引起的近地面辐合运动也会将城市周边相对较湿的空气带到城市中。如图 5(a)和(b)所示,在清晨,当地表的蒸发和蒸腾作用较弱时,城区近地面辐合运动会使城区的湿度略微增高,使得城区的比湿能够比郊区高出 0.1~0.3 g/kg。随后,随着地表温度的升高,城市下垫面对地表潜热释放的抑制作用逐渐增强,使 CTL 试验中城区的湿度远低于郊

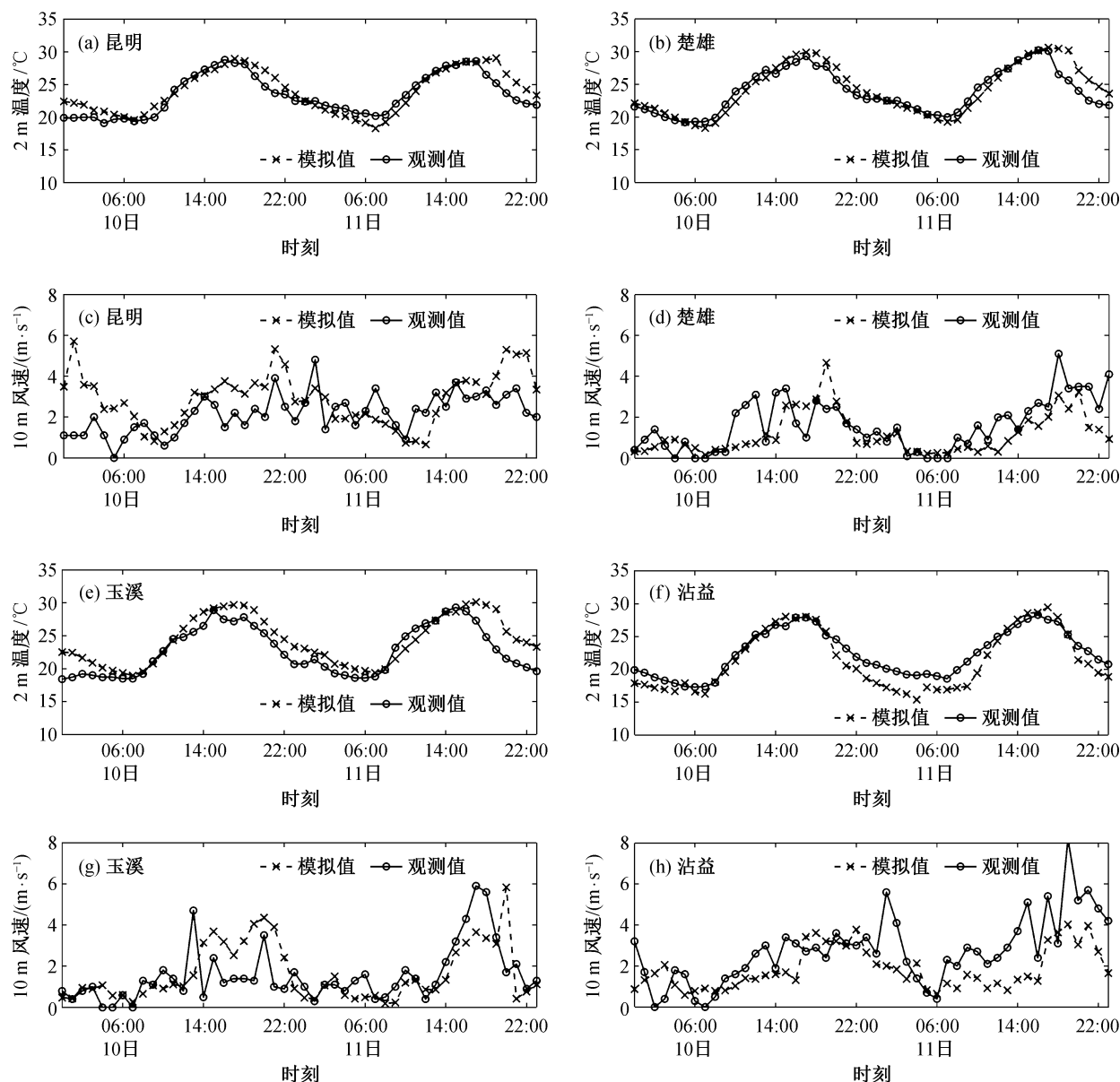


图3 8月10—11日CTL试验模拟的2 m气温和10 m风速与观测值对比
Fig. 3 Comparison of observed and simulated values of 2 m temperature and 10 m wind speed from the CTL run during August 10–11

区的模拟结果(图5(c)~(f))。夜间,城区相对较干的空气会被带到城市的下游,使得下游地区的空气湿度降低(图5(e)~(f))。

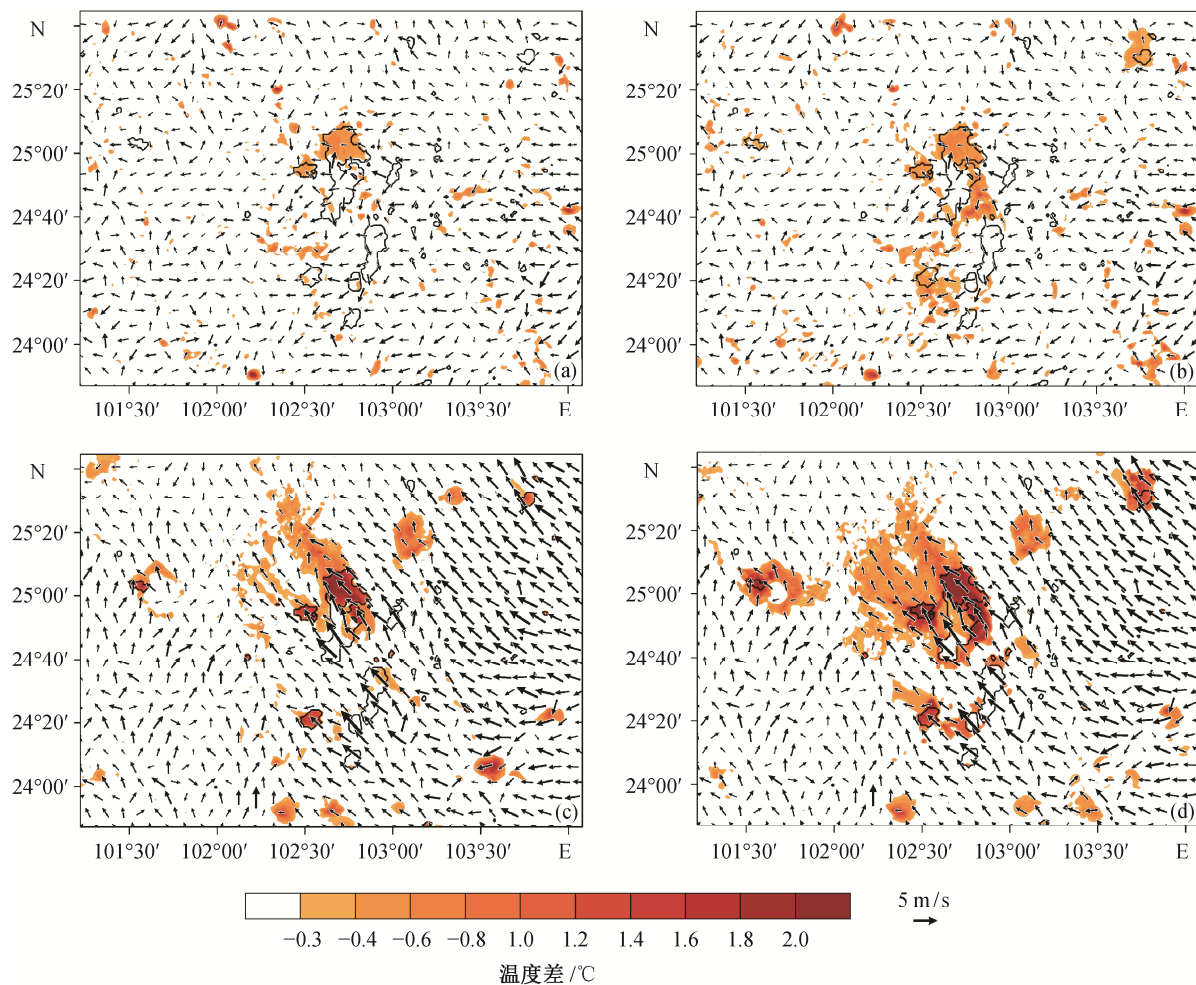
除城市外,滇中地区还有一个很特别的地表特征就是湖泊,滇池和抚仙湖也有可能对近地面气象场产生一定的影响。图6给出CTL模拟试验和Nolake模拟试验近地面温度和风矢量的差值场。白天,湖泊是一个相对冷源,会给近地面风场叠加上微弱的辐散流场;夜间,湖泊是一个相对热源,会给近地面风场叠加上微弱的辐合风场。这里需要

注意的是,上述这些因湖泊存在而形成的扰动场都很弱,即使是在差值场(图6)中,也只有在湖区上空才能观察到。

2.2.2 城市热岛的垂直结构特征

为了解滇中地区城市热岛的垂直结构,图7和8分别给出4个试验模拟得到的夜间(8月10日03:00)和午后(8月11日16:00)风场的垂直剖面。

如图7(a)中CTL试验的模拟结果所示,在夜间,在湖陆交界处和城区上空都存在明显的上升运动;其中,湖边上升运动的形成与大尺度的背景风



(a) CTL-Nourb, 14:00; (b) Urban-Nourb, 14:00; (c) CTL-Nourb, 20:00; (d) Urban-Nourb, 20:00

图 4 模拟试验 8 月 11 日 14:00 和 20:00 的 2 m 温度差值场和 10 m 风场分布

Fig. 4 Distributions of the differences in 2 m temperature superposed on 10 m wind vectors from CTL run at 14:00 and 20:00 LST on August 11

有关,在背景风的作用下,湖面上相对较暖的空气被带到岸上,遇到岸上相对较冷的空气,会形成较强的垂直上升运动。另外,背景风强迫的作用下,在剖面图上无法观察到闭合的城市热岛环流。

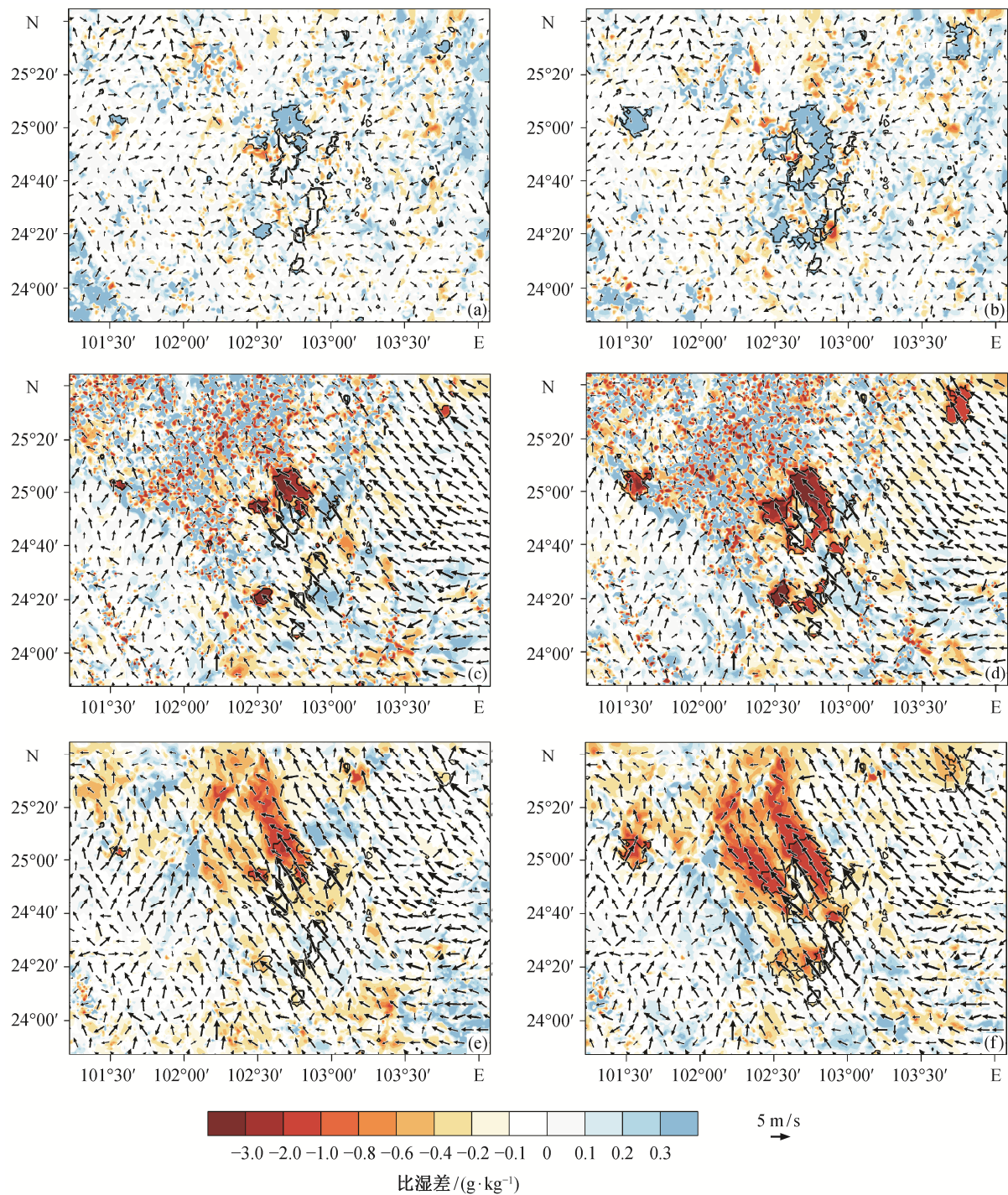
对比 CTL 试验(图 7(a))和 Nourb 试验(图 7(b))可以发现,在夜间,当城市被农田取代后,城区上空的上升运动消失了,但随着陆地上温度的降低(没有城市下垫面的加热作用),湖陆间的热力差异增大,湖陆交界处的上升运动会得到一定的加强。

与 Nourb 试验相反,在 Urban 试验(图 7(c))中,当城区被扩大到湖边后,湖陆间的热力差异会有所减小。这种湖城相连的状况,可能会使得原本城区的上升运动与湖陆间的上升运动合并,在湖城交界

处形成一个较强的上升运动,可以达到约 3.5 km 的高度。

在 Nolake 试验中,将湖区替换为农田后,原本湖陆交界处的垂直上升运动消失了(图 7(d))。另外,尽管城市和农田间的热力差异依然存在,但城区上空的上升运动却减弱了许多,表明除了热力因素外,下垫面在动力上(即粗糙度)的非均匀性也有可能影响城区的垂直运动。相比于农田-城市的下垫面分布(Nolake 试验),湖泊-农田-城市(CTL 试验)这种极度非均匀的下垫面分布更有利于夜间垂直扰动的产生。

白天与夜间的情况有所不同。午后,在湖泊(冷)与城市(暖)间较强热力差异作用下,可以在湖



(a) CTL-Nourb, 08:00; (b) Urban-Nourb, 08:00; (c) CTL-Nourb, 20:00; (d) Urban-Nourb, 20:00; (e) CTL-Nourb, 21:00; (f) Urban-Nourb, 21:00

图 5 模拟试验 8 月 11 日 08:00、20:00 和 21:00 的 2 m 比湿差值场和 10 m 风场分布

Fig. 5 Distributions of the differences in 2 m specific humidity superposed on 10 m wind vectors from CTL run at 08:00, 20:00 and 21:00 LST on August 11

区和城市上空看到闭合的环流结构(图 8(a)), 由湖风环流和城市热岛环流耦合而成。此外, 还可以在山顶附近观察到比较强的上升运动, 指示可能有谷

风环流存在。

当城市扩大以后, 湖区与城市间的闭合环流依然存在, 并且城市上空的垂直上升运动更加明显

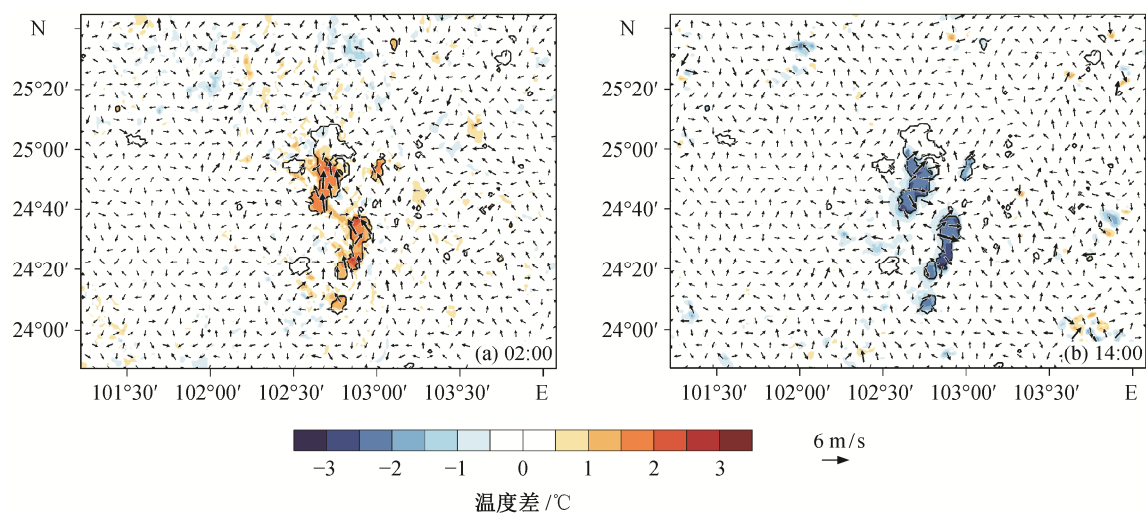
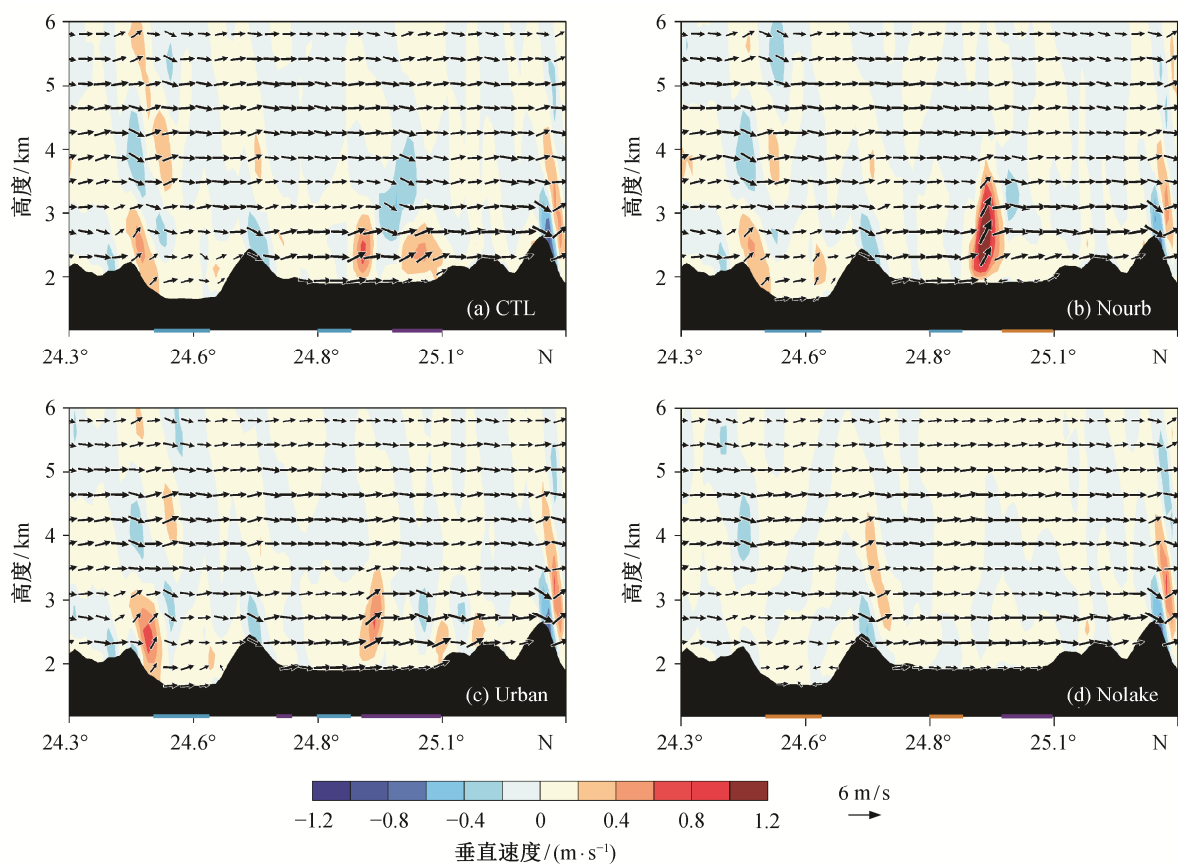


图 6 CTL 试验与 Nolake 模拟试验的 8 月 11 日 02:00 和 14:00 的 2 m 温度和 10 m 风速差值场
Fig. 6 Difference distribution of 2 m temperature and 10 m wind vector for CTL minus Nolake at 02:00 and 14:00 LST on August 11



黑色区域为山体, 城市范围用紫色线段标记, 湖区范围用蓝色线段标记(24.6°N 附近为抚仙湖, 24.8°N 附近为滇池), 农田下垫面范围用线段实线标记, 剖面位置如图 2 中白色实线所示。为了更好地看出剖面的流场特征, 水平方向风速为实际风速的 1/2, 垂直方向的风速为实际风速的 5 倍

图 7 模拟试验的 8 月 10 日 03:00 东南-西北向剖面垂直速度及风矢量
Fig. 7 Distribution of vertical speed and wind vector in the southeast-northwest cross section simulated by different experiments at 03:00 LST on August 10

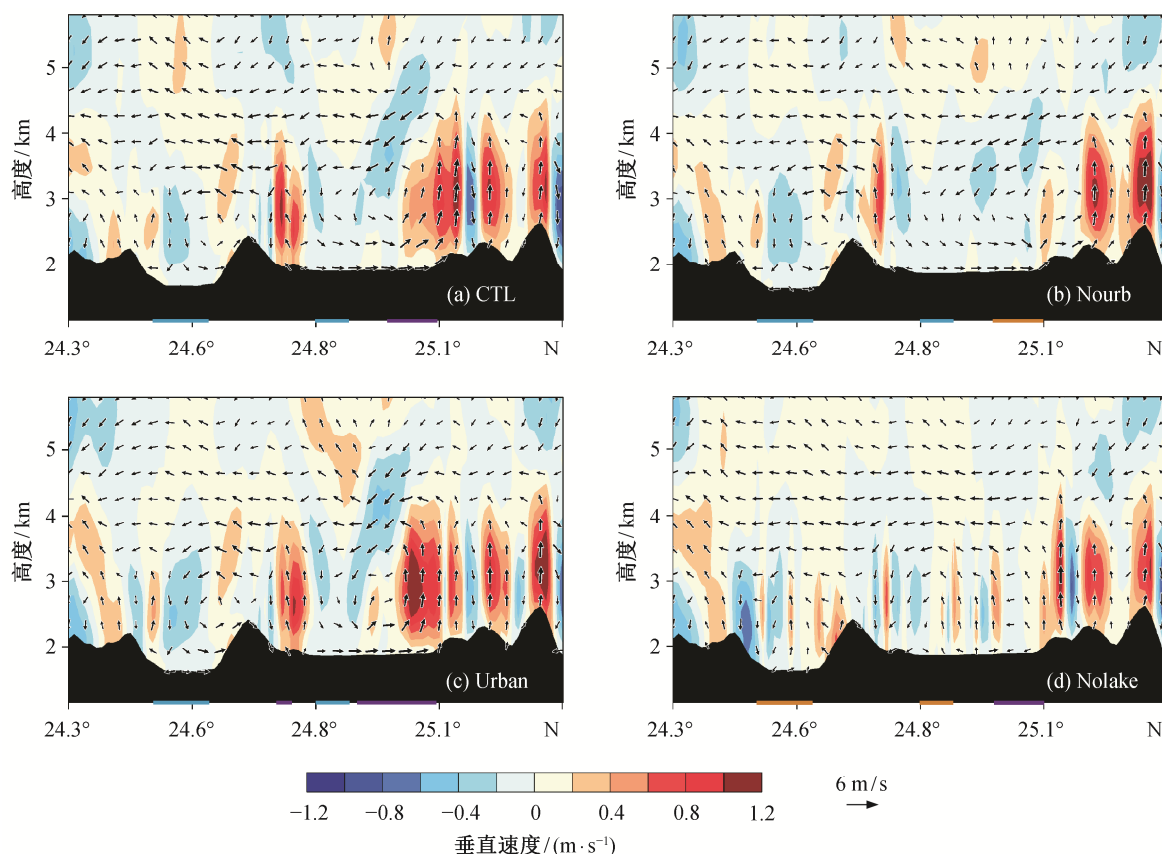


图 8 模拟试验的 8 月 11 日 16:00 东南-西北向剖面垂直速度及风矢量

Fig. 8 Distribution of vertical speed and wind vector in the southeast-northwest cross section simulated by different experiments at 16:00 LST on August 11

(图 8(c))。当湖泊被农田替换后,湖区与城市间的闭合环流消失了,取而代之的是几个比较小的环流,分布在城市周边(图 8(d))。在 Nourb 试验中,当城市被农田取代后,湖风环流会与山区的谷风环流耦合,形成一个大的闭合环流(图 8(b))。Nourb 试验和 Nolake 试验的模拟结果表明,城市和湖泊的存在会对昆明和滇池地区的边界层过程和结构产生很大的影响。

2.2.3 近地层气象要素垂直变化特征

为了更好地了解湖泊和城市下垫面对边界层结构的影响,我们选取一个位于 102.79°E, 24.92°N 的具有代表性的格点(图 2 中黑色三角形处),绘制该格点处的风速、位温、湿度廓线(图 9)。该格点的地表利用类型在 CTL, Urban 和 Nolake 试验中为城市下垫面,在 Nourb 试验中为农田。

如图 9(a)所示,在夜间 03:00,各试验模拟得到的低层风速从大至小依次为 Nourb 试验、CTL 试验、Urban 试验和 Nolake 试验,夜间低层风速的差

异主要受下垫面粗糙度的影响。当城市下垫面改为农田下垫面后,粗糙度减小,最底层的风速由 CTL 试验的 2.5 m/s 增加到 Nourb 试验的 4.5 m/s;城市扩张之后(Urban 试验),近地面的风速也会相应地减小;湖区的粗糙度较小,将湖泊替换为农田后(Nolake 试验),地表粗糙度增加,低层风速略微减小。午后 16:00(图 9(b)),城市和湖泊下垫面主要通过改变局地的热力差异来影响近地面风速。Urban 试验的风速最大, Nourb 试验的风速最小。

与风速廓线相比,不同试验模拟得到的位温廓线的差异略小一些(图 9(c)和(d))。夜间,所有试验模拟得到的结果都是逆温结构, Nourb 试验的逆温最强,其余 3 个试验中,城市下垫面的存在使得逆温的强度有所减小(图 9(c))。白天与夜间的情况类似,城市的存在对低层大气有明显的加热作用,但各试验模拟得到的低层位温的差异不如夜间明显(图 9(d))。

无论白天还是夜间,城市下垫面对湿度廓线的

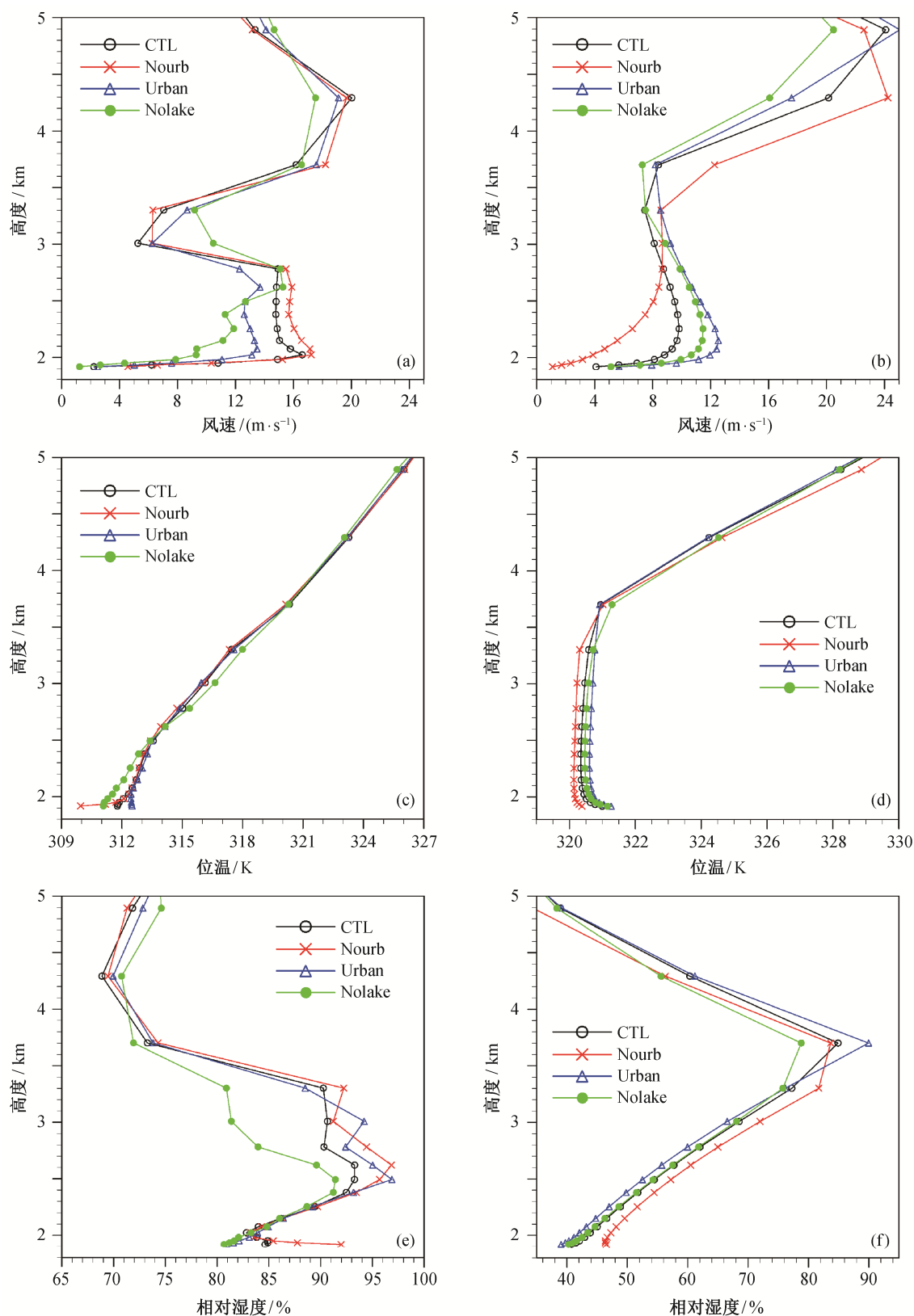


图 9 模拟试验的 8 月 10 日 03:00 ((a), (c)和(e))和 11 日 16:00 ((b), (d)和(f))位于 102.79°E, 24.92°N 格点的风速、位温和相对湿度廓线

Fig. 9 Vertical profile of wind speed, potential temperature and relative humidity simulated by different experiments at 03:00 LST August 10 ((a), (c) and (e)) and 16:00 LST on August 11 ((b), (d) and (f)) on grid located at 102.79°E, 24.92°N

影响都是减少低层大气中的水汽,湖区则是增加低层大气中的水汽。城市的存在与否对最底层大气中的水汽影响较为明显,去除城市后,最底层大气中的水汽白天和夜间分别增加 7%和 3%,而城市面积的增加对低层水汽的影响相对较小(图 9(e)和(f))。此外,不同性质的下垫面主要影响是 3700 m 以下的大气湿度垂直结构,对 3700 m 以上的湿度基本上没有影响。

3 总结与讨论

为了探究不同城市化程度及湖泊对昆明等城市热岛效应的影响,本文利用 WRF 模式对昆明及其周边城市的夏季城市热岛效应进行数值模拟研究,得到以下结论。

1) 在夏季夜间,城市热岛现象具有明显的下游效应。城市的扩张会使得城市热岛下游效应的影响范围扩大,但热岛强度不会明显增大。滇中各个城市间的距离较远,即使城市扩张,其热岛的下游效应也不足以使相邻两个城市的热岛效应相互叠加。清晨,城市为湿岛;而在其他时刻,城市区域多为干岛现象,干岛现象也存在下游效应。

2) 除城市外,滇中地区另外一个特殊的地表特征就是湖泊,滇池和抚仙湖的存在也可能对近地面的气象场产生一定影响。白天,湖泊是一个相对冷源,会给近地面风场叠加微弱的辐散流场;夜间,湖泊是一个相对热源,会给近地面风场叠加微弱的辐合风场。

3) 滇中城市地区的近地面水平风场主要受大尺度背景风、城市热岛效应和湖泊效应的共同影响。以昆明地区为例,随着城市面积的增加,夜间城市热岛效应的强度及影响范围会有所增加,同时城区的存在缩小了城区与湖区之间的温差,可能会对夜间陆风的形成产生一定的抑制作用。白天,城市的存在加大了城市与湖区之间的温差,会促进热岛环流与湖风环流的耦合。

4) 城市和湖泊的存在还会对近地面的气象要素和边界层结构产生影响。首先,城市的存在会增加地表的粗糙度,使得夜间的近地面风速减小;另外,城市的存在还会减弱夜间的近地面逆温程度。在白天,湖泊和城市下垫面主要通过改变局地的热力差异,从而对近地面的风速产生影响;城市的存在会加强湖泊与陆地间的热力差异,促进湖风环流,进而加大近地面的风速。城市的存在减少了对低层

水汽的输送,而城市面积的增加对低层水汽的影响相对较小。

需要指出的是,本文仅研究了云南滇中地区夏季的城市热岛效应和边界层过程。但是,城市热岛效应和湖陆风环流存在季节性的变化^[30-31,45-46]。刘树华等^[25]模拟研究了京津冀地区不同季节海陆风、山谷风和城市热岛环流的耦合效应,发现上述 3 种环流的耦合效应存在明显的季节变化。滇中城市的城市热岛环流和湖陆风环流间的相互作用及影响范围在不同季节也会有不一样的特征,需要进一步研究。此外,滇中城市群所在的云南高原地形复杂,有关高原城市化效应与同纬度平原城市有何异同以及地形对城市化效应的影响及其季节变化特征等问题,也需要更深入的研究。

参考文献

- [1] Howard L. The climate of London: deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it. Charleston: Nabu Press, 1833
- [2] Manley G. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1958, 84: 70-72
- [3] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. 气象学报, 2012, 70(3): 338-353
- [4] Oke T R. City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 1973, 7(8): 769-779
- [5] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1982, 108: 1-24
- [6] Morris C J G, Simmonds I, Plummer N. Quantification of the influences of wind and cloud on the nocturnal urban heat island of a large city. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(2): 169-182
- [7] Unger J, Sümeşgy Z, Zoboki J. Temperature cross-section features in an urban area. Atmospheric Research, 2001, 58(2): 117-127
- [8] Morris C J G, Simmonds I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. International Journal of Climatology, 2000, 20(15): 1931-1954
- [9] 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. 地球物理学报, 2006, 49(1): 69-77

- [10] Adebayo Y R. A note on the effect of urbanization on temperature in Ibadan. *Journal of Climatology*, 1987, 7(2): 185–192
- [11] Tereshchenko I E, Filonov A E. Air temperature fluctuations in Guadalajara, Mexico, from 1926 to 1994 in relation to urban growth. *International Journal of Climatology*, 2001, 21(4): 483–494
- [12] Yang P, Ren G, Liu W. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(8): 1803–1816
- [13] Ohashi Y, Kida H. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: a numerical study with a mesoscale atmospheric model. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(1): 30–45
- [14] 刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(2): 301–312
- [15] 刘振鑫. 应用城市冠层模式与 WRF 模式耦合研究城市化效应[D]. 北京: 北京大学, 2013
- [16] Miao Y C, Liu S H, Zheng Y J, et al. Numerical study the effects of topography and urbanization on the local atmospheric circulations over the Beijing-Tianjin-Hebei, China. *Advances in Meteorology*, 2015, Article ID: 397070
- [17] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R. Upstream urbanization exacerbates urban heat island effects. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(24): 88–113
- [18] Zhang D L, Shou Y X, Dickerson R R, et al. Impact of upstream urbanization on the urban heat island effects along the Washington-Baltimore Corridor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(10): 2012–2029
- [19] 李耀锟, 巢纪平, 匡贡献. 城市热岛效应和气溶胶浓度的动力学、热力学分析. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 729–740
- [20] 桑建国. 城市热岛效应的分析解. *气象学报*, 1986, 44(2): 251–255
- [21] 桑建国, 张治坤, 张伯寅. 热岛环流的动力学分析. *气象学报*, 2000, 58(3): 321–327
- [22] 刘树华, 李洁. 城市及乡村大气边界层结构的数值模拟. *北京大学学报: 自然科学版*, 2002, 38(1): 90–97
- [23] 胡小明, 刘树华, 梁福明, 等. 北京区域近地边界层特征数值模拟. *北京大学学报: 自然科学版*, 2005, 41(4): 514–522
- [24] Miao S, Chen F, LeMone M A, et al. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 484–501
- [25] 刘树华, 刘振鑫, 李炬. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. *中国科学: D 辑*, 2009, 39(1): 88–98
- [26] 刘树华, 刘振鑫, 郑辉, 等. 多尺度大气边界层与陆面物理过程模式的研究进展. *中国科学: G 辑*, 2013, 43(10): 1332–1355
- [27] Zhang N, Chen Y. A case study of the upwind urbanization influence on the urban heat island effects along the Suzhou-Wuxi Corridor. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53: 333–345
- [28] Zhao W J, Zhang N, Sun J N, et al. Evaluation and parameter-sensitivity study of a single-layer urban canopy model (SLUCM) with measurements in Nanjing, China. *Journal of Hydrometeorology*, 2014, 15: 1078–1090
- [29] 何云玲, 张一平, 刘玉洪, 等. 昆明城市气候水平空间分布特征. *地理科学*, 2002, 22(6): 724–729
- [30] 赵庆由, 明庆忠. 近 20 年来昆明市城市化进程对城市热岛效应的影响研究. *云南地理环境研究*, 2010, 22(4): 87–92
- [31] 孙绩华, 冯健武, 段玮. 昆明城市热岛效应变化特征研究. *气候与环境研究*, 2015, 20(6): 645–653
- [32] 何萍, 李宏波, 黄惠. 1960—2009 年云南高原楚雄市气候年代际变化特征及城市气候分析. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 65–72
- [33] Broxton P D, Zeng X, Sulla-Menashe D, et al. A global land cover climatology using MODIS data. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(6): 1593–1605
- [34] Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(12): 5095–5115
- [35] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): 1395–1400
- [36] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5

- modeling system. Part I : model implementation and sensitivity. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 569–585
- [37] Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 101(3): 329–358
- [38] Kusaka H, Kimura F. Coupling a single-layer urban canopy model with a simple atmospheric model: impact on urban heat island simulation for an idealized case. *Journal of the Meteorological Society of Japan: Ser II*, 2004, 82(1): 67–80
- [39] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1): 170–181
- [40] Hong S Y, Pan H L. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Monthly weather review*, 1996, 124(10): 2322–2339
- [41] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 103–120
- [42] Mass C F, Ovens D. WRF model physics: problems, solutions and a new paradigm for progress. Preprints, WRF Users' Workshop, Boulder, CO, NCAR [EB/OL]. (2010) [2014-04-17]. <http://www.atmos.washington.edu/cliff/WRFworkshop2010b.ppt>
- [43] Mass C F, Ovens D. Fixing WRF's high speed wind bias: a new subgrid scale drag parameterization and the role of detailed verification // 24th Conference on Weather and Forecasting/20th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: Amer Meteor Soc B, 2011 [EB/OL]. (2011-01-26) [2014-04-17]. <https://ams.confex.com/ams/91Annual/webprogram/Paper180011.html>
- [44] 杨建博, 刘红年, 费松, 等. 太湖湖陆风背景下的苏州城市化对城市热岛特征的影响. *气象科学*, 2013, 33(5): 473–484
- [45] Dutra E, Stepanenko V M, Balsamo G, et al. An offline study of the impact of lakes on the performance of the ECMWF surface scheme. Helsinki: Finnish Environment Insitute, 2010
- [46] Sills D M L, Brook J R, Levy I, et al. Lake breeze in the southern Great Lakes region and their influence during BAQS-Met 2007. *Atmospheric Chemisrty and Physics*, 2011, 11(15): 7955–7973