东高红，李英华，刘一玮，等，2018. 天津城市热岛效应对海风(锋)环流影响的数值模拟试验[J]. 气象，44(6)：825-836.

天津城市热岛效应对海风(锋)环流影响的数值模拟试验*

东高红[1,2] 李英华[3] 刘一玮[1] 易笑园[1]

1 天津市气象台，天津 300074

2 天津市环境气象中心，天津 300074

3 天津市气象科学研究所，天津 300074

提 要：利用中尺度数值天气模式 TJ-WRF，通过对发生在天津城区的局地雷暴天气个例进行模拟，重点通过改变模式中下垫面土地利用类型进行敏感性模拟试验，研究天津城市热岛对海风(锋)环流强度及移动速度等的影响。结果表明：不同土地利用类型城市下垫面造成的城市热岛效应不同，当城市周边郊区下垫面土地类型改为城市建筑用地时，城市热岛效应更加明显且影响范围明显扩大；当城市下垫面改为旱作农地和牧场时，天津城区附近没有出现城市热岛效应。当海风(锋)环流向城区方向移动还未到城区附近时，城市热岛对其有明显加强和加速作用，城市热岛效应越明显其对海风(锋)环流的加强和加速作用越明显，海风(锋)环流移动加快的速度比没有城市热岛时快 9.3 $km \cdot h^{-1}$。当海风(锋)环流移动到城区附近时与城市热岛环流相遇，海风(锋)环流受到城市热岛环流阻挡其移速又迅速减慢，其后侧气流南、北分支绕流和向上爬升现象变得明显，两环流相遇叠加后辐合上升运动也明显加强；城市热岛效应越明显其对海风(锋)环流的阻挡作用越明显，海风(锋)环流的移动速度减慢得越多，两环流相遇叠加后的辐合上升运动就越强。另外在向城区移动过程中，海风(锋)环流会使其经过地区低层空气增湿降温，但其后侧湿空气层厚度会因城市热岛效应的存在而明显减小；城市热岛效应越明显，海风(锋)环流后侧湿空气层厚度减小得越明显。

关键词：城市热岛效应，海风(锋)环流，中尺度数值天气模式，敏感性试验

中图分类号：P445，P49 **文献标志码**：A **DOI**：10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.010

Numerical Simulation Test of Tianjin Urban Heat Island Effect on Sea Breeze (Front) Circulation

DONG Gaohong[1,2] LI Yinghua[3] LIU Yiwei[1] YI Xiaoyuan[1]

1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

2 Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074

3 Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074

Abstract: Using the mesoscale TJ-WRF model, we studied the influence of Tianjin urban heat island effect on the sea breeze (front) circulation triggered local thunderstorms which tend to occur in urban areas by changing the land use type of the underlying surface in the sensitivity numerical simulation tests. The results show that the effect of urban heat island is different due to the different types of urban underlying surfaces. The urban heat island effect is more obvious and the impact scope is expanded when the land type of suburb surface is changed to urban and built-up land; when the urban surface is changed to dry land and pasture, there is no urban heat island effect near Tianjin City. At the same time, we can see that when there is urban heat island effect near urban area of Tianjin, the sea breeze (front) circulation is strengthened

* 天津市科委自然科学基金项目(14JCYBJC21600)和国家自然科学基金项目(41575049)共同资助

2017 年 2 月 6 日收稿； 2018 年 1 月 31 日收修定稿

第一作者：东高红，主要从事城市气象和中尺度天气预报技术研究. Email：qwerty8825@sina.com

and its speed is accelerated. So, the more obvious the urban heat island effect is, the more obvious the strengthening and acceleration of the sea breeze (front) circulation is. The speed of the sea breeze (front) is faster than the speed without urban heat island by 9.3 km·h^{-1}. But when it moves near the city and encounters the urban heat island circulation, the sea breeze (front) circulation is blocked and its speed slows down quickly. And the north-south branch flowing and climbing up of its rear airflow becomes obvious. The convergence and upward motion are also enhanced when the two circulations meet and superimposed. The more obvious the effect of urban heat island is, the more obvious the blocking effect of sea wind (front) circulation is, the slower down the speed of the sea breeze (front) circulation is, and the stronger the convergence and upward motion are when the two circulations meet and superimposed. In addition, when sea breeze (front) circulation moves toward the city, it will result in the decrease in temperature and the increase in moisture content of the lower-level air. However, due to the existence of the urban heat island effect, the thickness of the wet air layer in the airflow after the sea breeze (front) circulation is greatly reduced, and the more obvious the effect of the urban heat island is, the more obvious the thickness of the wet air layer decreases.

Key words: urban heat island effect, sea breeze (front) circulation, mesoscale numerical weather model, sensitivity test

引 言

近年来一些突发性、局地性强的雷暴天气事件越来越多地出现在一些大城市中，如上海2001年8月5日强降水(曹晓岗等，2011)，北京2004年7月10日局地强雷雨(孙继松等，2006)等。关于城市化对降雨的影响，国内外学者均做过许多研究，包括开展大型观测试验和利用数值模式模拟。如Lei et al(2008)通过研究城市化过程对孟买一次暴雨过程的影响表明孟买城市化明显影响垂直风场和降雨，这种影响在暴雨初期更为明显。国内，郑祚芳和张秀丽(2009)对北京地区一次局地强降雨过程数值分析表明，城市和郊区热力差异造成的温度梯度有利于局地的水汽输送和上升气流的加强，从而有利于降雨的形成和维持；孙继松(2005)、孙继松和舒文军(2007)针对北京地区分析了地形与城市热岛及下垫面物理属性造成的热力差异对不同天气过程的作用；吴庆梅等(2012)分析了北京地形和城市热岛对一次中尺度暴雨的作用；吴风波和汤剑平(2011)分析研究了城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响，指出城市化引起的陆面粗糙度等变化的动力作用对城市地区低层风场产生阻挡，使得城市迎风区垂直上升运动增强和水汽增多，这是造成城市迎风区降雨增强的主要原因；张赟程等(2017)利用数值模拟分析了海风与热岛耦合对上海强对流天气的影响；苗曼倩和唐有华(1998)通过数值模拟证实了长江三角洲地区的海(江、湖)风环流与城市热岛效应之间存在相互增强的过程；蒙伟光等(2007)研究了城市化对珠江三角洲强雷暴天气的影响后指出，模拟的与城市影响有关的低层辐合主要位于500 m以下的近地面层，由此引起的强烈上升运动有利于新的对流的启动和发展，促使雷暴强度增强。

天津作为环渤海区域的中心，是我国城市化快速发展的典型区域之一，同时天津受渤海海陆风环流影响也非常明显(何群英等，2011；易笑园等，2012)。近年来关于天津城市热岛与海陆风相互作用的研究已有不少，如黄利萍等(2013)和许启慧等(2013)通过观测分析了天津地区海陆风与城市热岛的相互作用；刘树华等(2008)研究发现，天津地区的地理环境特征能使城市热岛环流和海陆风环流相互耦合，通常海陆风环流极盛时可深入陆地200 km左右，而城市热岛环流只发生在城市中心周围几十千米的范围内；于恩洪等(1987)、陈彬和于恩洪(1989)的研究表明，渤海湾西部海陆风与城市热岛效应的相互作用主要表现为：在城市东部，海风环流和城市热岛环流的叠加使海风加强，在城市西部热岛环流又阻止了海风的西伸，海陆风效应和城市热岛效应使海风加强西伸到天津市中心，进而又削弱

了城市热岛效应;东高红等(2015)通过中尺度 WRF 模式模拟分析了城市热岛环流与海风环流的空间结构特征和相互作用,指出城市热岛环流与海风环流相遇、两环流会出现叠加,叠加后的辐合上升明显加强,并在不稳定天气形势条件下能触发局地强雷暴天气的出现。上述研究多围绕天津地区城市热岛与海陆风相互作用的观测及模拟分析,而利用中尺度模式通过更改天津城市下垫面土地利用类型,进行城市热岛效应有无及强度变化对海风(锋)环流强度和移动速度特征等影响的试验研究还相对较少。

本文利用天津中尺度数值天气模式(Weather Research and Foreasting Model,TJ-WRF),对 2010 年 8 月 16 日发生在天津城区的局地强雷暴过程进行数值模拟和敏感性试验研究,通过更改模式内天津城市下垫面土地利用类型,研究城市热岛效应对海风(锋)环流强度及移动速度等特征的可能影响,以期为研究沿海地区海风环流的影响及其可能触发局地雷暴的机制提供参考依据。

1　模式介绍和试验方案

1.1　中尺度 TJ-WRF 模式简介

中尺度 TJ-WRF 模式是天津市气象科学研究所与北京大学合作引进并本地化业务运行的一套数值预报业务系统。该模式模拟区域中心在 40.0°N、115°E,采用两重嵌套方案,大区域水平分辨率为 5 km,格点数为 401×369,垂直方向 51 层,边界层内大致有 11 层,模式层顶为 50 hPa;模拟积分步长 30 s,积分 24 h,预报时效 72 h,每小时输出一次预报结果。模拟区域如图 1a 所示(内层区域仅包括天津地区,图 1b 为内层区域放大图)。模拟试验所用物理过程参数化方案为 WSW6 微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Noah 陆面过程、Monin-Obukhov 方案和 YSU 边界层方案,不采用积云对流参数化方案。模式中气象初始场和侧边界使用 GFS 预报场,每 6 h 更新一次边界条件。模式中土地利用类型分布是在美国地理测量土地利用系统提供的 24 类全球土地利用分布基础上(戴俐卉等,2008),使用 ArcGIS 软件,对部分特殊格点数据进行逐点人工订正获得,能够反映出沿海城市化等真实信息(图 1b)。

1.2　模式试验方案

本文共设计了三种模式试验方案,均采用相同的物理参数配置,仅更改模式内城市下垫面的土地利用类型。

(1) 控制试验(简称 WRF 试验):采用 TJ-WRF 模式原有的土地利用类型(图 1b),该土地利用类型中天津城区下垫面土地利用类型为城市建筑用地。

(2) 敏感性试验 1(简称 new1 试验):将天津城区下垫面的土地利用类型替换为和周边郊区一样的土地类型——旱作农地和牧场;与 WRF 试验对比可以反映城市下垫面特征及城郊差异造成的城市热岛特征(图 1c)。

(3) 敏感性试验 2(简称 new2 试验):将天津城区周围四郊区下垫面土地利用类型替换为城市建筑用地;进一步分析城市化发展导致城市覆盖范围极度扩张后城市热岛效应变化特征及其对海风(锋)环流的可能影响(图 1d)。

2　资料和个例天气概况

2.1　所用资料

本文选取 2010 年 8 月 16 日下午发生在天津城区附近的局地强雷暴典型天气个例进行模拟试验。所用资料包括,中尺度 TJ-WRF 模式模拟资料,模拟开始时间为 2010 年 8 月 16 日 08 时(北京时,下同);常规观测资料、天津自动气象站观测资料,包括风向、风速、温度、相对湿度、降水、海平面气压。

2.2　个例过程天气概况

2010 年 8 月 16 日下午天津城区附近出现局地强雷雨、冰雹天气,强降水主要发生在 16—18 时的 2 h 内,20 mm 以上的降水区域仅有几平方千米,单站最大降水量为 31.6 mm,而且雨区移动方向为自东向西移动,到城区附近时雨强突然加强,造成城区一个自动站单站 1 h 降水 29.8 mm 的短时暴雨(图略)。从降水发生的天气形势看,此次过程发生在高空槽区、低层槽后弱的反气旋环流天气形势下,地面则处于高压后部弱的偏南气流里(图略),相关

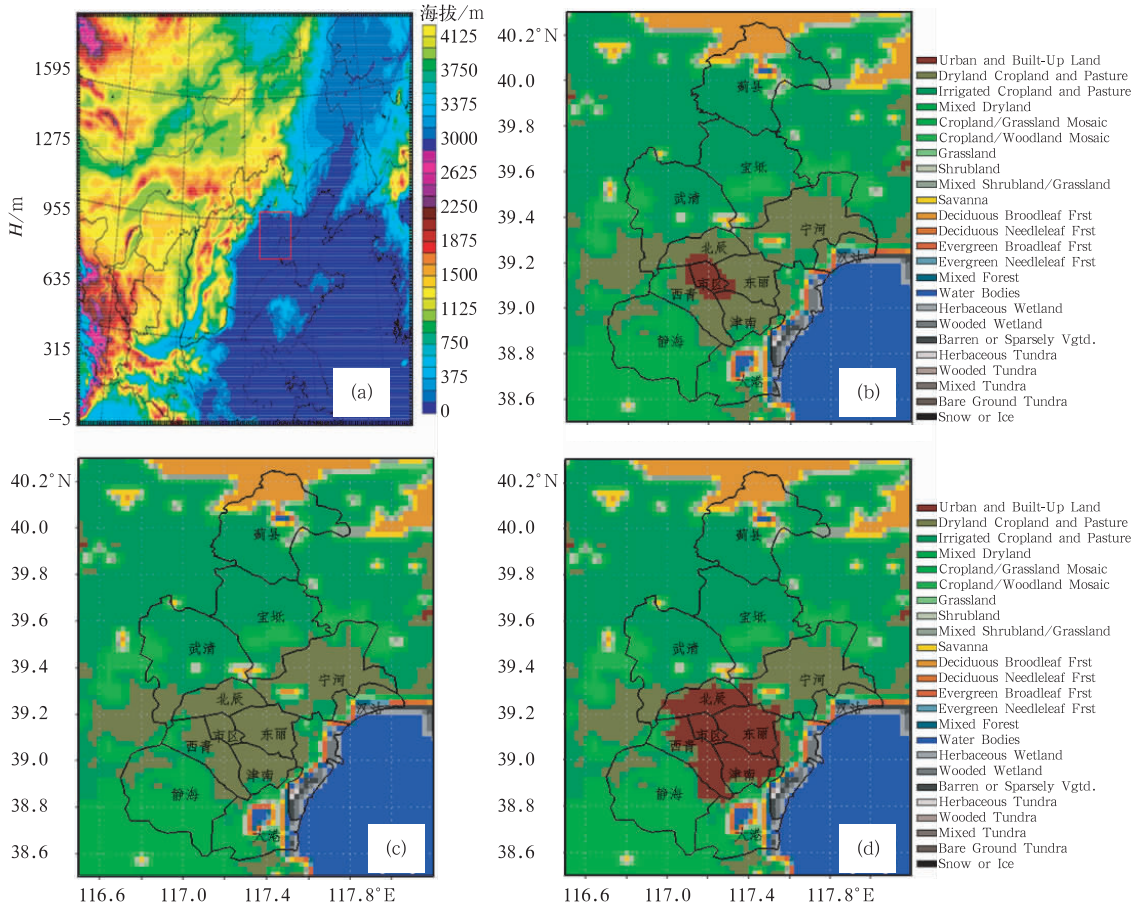


图 1 TJ-WRF 模式模拟范围(a)和下垫面土地利用类型(b,c,d)

(b)控制试验(WRF):天津城区为城市建筑用地,

(c)敏感性试验 1(new1):天津城区用周围旱作农地和牧场代替,

(d)敏感性试验 2(new2):城区周围郊区用城市建筑用地代替

Fig. 1 TJ-WRF model simulations range (a) and land use types in TJ-WRF model (b, c, d)

(b) land use type for control sensitivity test (WRF): Tianjin City with urban and built-up land,

(c) land use type for sensitivity test 1 (new1): Tianjin City with dryland cropland and pasture,

(d) land use type for sensitivity test 2 (new2): Tianjin City and suburbs with urban and built-up land

天气过程具体分析见文献(东高红等,2013;2011)。

3 模拟试验结果分析

3.1 WRF 试验结果可用性分析

我们将此次过程 WRF 试验模拟的降水时间、降水量和落区与实况进行对比看到,模式模拟的降水有较好的主观预示作用,但降水量值明显偏小,降水范围和落区也有偏差(图略);对比降水出现前模式输出的气温与风场分布看到,WRF 试验模拟的气温与风场分布和观测实况大体相同(图 2)。另外为进一步对比模拟结果的可用性,我们选取天津城区地面自动观测站点(54517 站)逐时观测资料,将 WRF 试验模拟的该站点位置格点的逐小时气温、相对湿度、海平面气压值与该站观测实况值进行对比看到,模拟的气温、相对湿度、海平面气压与实况的变化趋势基本一致(图 3),其中模拟的气温值比实况值偏低,中午前后偏低 1～2℃,强降水发生后实况观测气温降幅更明显;模拟的相对湿度比实况值偏大,降水出现后实况值上升幅度较大,这可能和数据所在高度不同有关(模拟数据为 1000 hPa 相对湿度);模拟的海平面气压值和实况观测基本相同,只是在降水出现前后实况气压值降幅更明显、降水

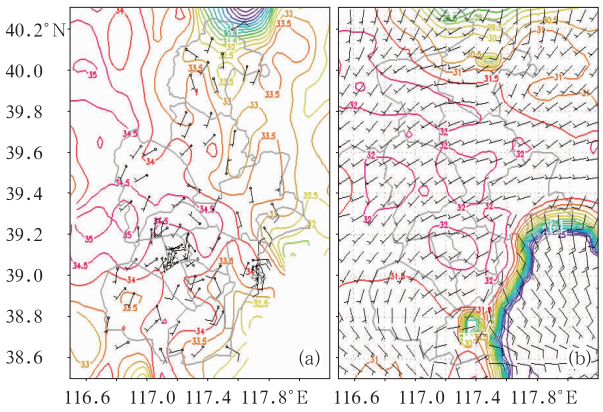


图 2　2010 年 8 月 16 日 14 时气温(单位：℃)与风场实况分布(a)和 TJ-WRF 模式 WRF 试验模拟结果(b)

Fig. 2　Temperature and wind field distribution at 14:00 BT 16 August 2010 (a), and WRF test simulation results (b)

时观测气压值比模拟值低近 1 hPa。总体上看，控制试验模拟的此次过程的气温与风场分布与实况大体相同，降水区单站的气象要素变化特征与实况观测的变化趋势大体一致。这说明模式模拟结果可以近似地反映出此次局地强雷暴天气发生前后气象要素的变化特征，可以利用中尺度 TJ-WRF 模式对这次过程进行数值模拟和敏感性试验研究，通过更改模式内天津城市下垫面土地利用类型，来研究城市热岛效应对海风(锋)环流强度及移动速度等特征的可能影响。

3.2　不同土地利用模拟试验结果对比

3.2.1　城市热岛效应及热岛强度的对比

城市热岛是指城市区域气温高于周围郊区或乡村地区的现象。热岛强度通常用城乡温差表示。本

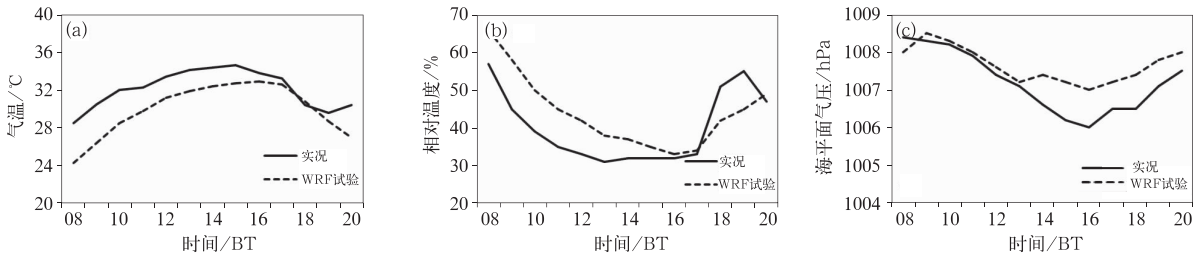


图 3　2010 年 8 月 16 日 08—20 时 WRF 试验气象要素时间模拟结果与 54517 站实况观测对比

(a) 气温，(b)相对湿度(模拟结果为 1000 hPa 相对湿度)，(c)海平面气压

Fig. 3　Control sensitivity test (WRF) simulation results compared with the 54517 observation data during 08:00—20:00 BT 16 August 2010

(a) temperature, (b) relative humidity (Simulation result is 1000 hPa relative humidity), (c) sea surface pressure

文作者通过统计近 5 年天津地区年平均气温和温度距平分布(图略)看到，天津城区存在明显的城市热岛效应，城区年平均气温比周围郊区高约 1℃，比远郊高出约 1.5℃。从天津地区城市热岛强度日变化看，城市热岛强度呈两锋一谷型，早晨和晚上热岛强度较强，早晨最强，强度最强可达到 1.8℃，白天热岛强度较弱，午后(13—15 时)最弱，强度仅为 0.3℃。

本文通过 TJ-WRF 模式进行模拟试验，对比分析 2010 年 8 月 16 日不同试验结果天津城市热岛强度变化特征。从 WRF 试验结果看到，12 时开始在天津城区出现明显高温区，到 16 时 32.5℃以上高温区正好覆盖天津城区，城区温度比近郊高出 0.5℃，比远郊高出 1℃以上(图 4a)，这说明模式能够模拟出天津的城市热岛效应。new1 试验城区附近气温和周围地区气温一致，天津城区附近没有出现高温区(图 4b)，说明将城市下垫面土地利用类型改为和周围郊区一样的旱作农地和牧场后，天津城区附近没有出现城市热岛特征或城市热岛特征很弱，从温度空间分布看不出明显的特征。但 new2 试验天津城区附近高温区范围明显扩大(图 4c)，和扩张后城市覆盖范围接近(图 1d)，高温区最高气温达到 33.25℃，比 WRF 试验结果高出 0.75℃。说明更改城市土地利用类型(旱作农地和牧场改为城市建筑用地)后，城区附近城市热岛效应更加明显，其影响范围也明显扩大。

为进一步对比不同土地利用类型城市热岛效应强度变化，我们将模式小区域范围在 38.5°～

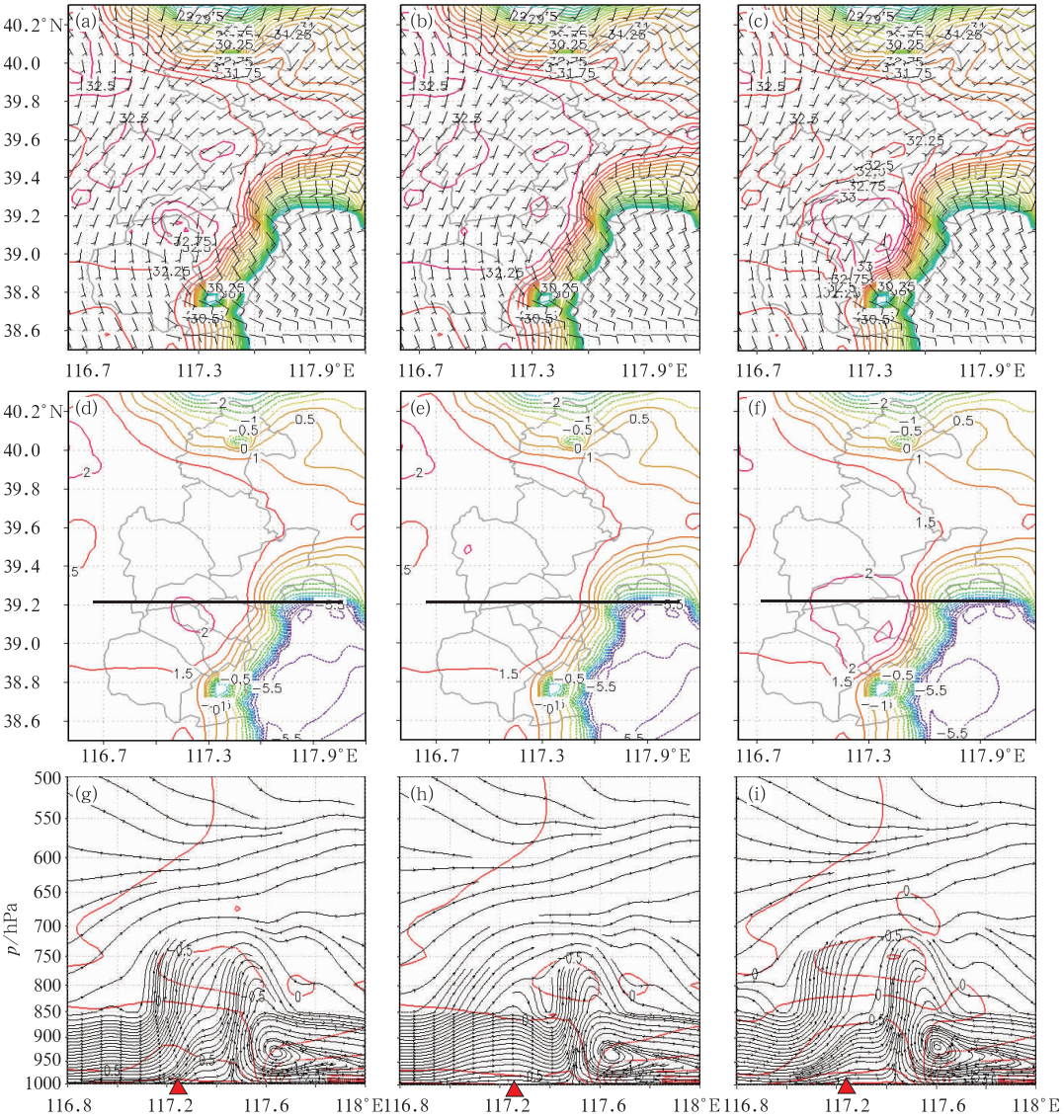


图 4 2010 年 8 月 16 日 16 时 WRF(a,d,g),new1(b,e,h)和 new2(c,f,i)试验结果对比(a,b,c)风场与温度分布(彩色线为等温线,单位:℃;由绿到红反映温度升高),(d,e,f)扰动温度分布(彩色线为等扰动温度线,单位:℃,由绿到红反映扰动温度升高),(g,h,i)过市区沿 39.2°N 做的流场与扰动温度垂直剖面(带箭头黑线为流线,红色线为等扰动温度线,▲为市区位置)

Fig. 4 Comparison of three sensitivity test results of WRF (a,d,g), new1 (b,e,h) and new2 (c,f,i) at 16:00 BT 16 August 2010

(a,b,c) wind field and temperature distribution (color line: isotherm, unit: ℃; rising from green to red), (d,e,f) perturbation temperature distribution (color line: the perturbation temperature, unit: ℃; rising from green to red), (g,h,i) flow field and perturbation temperature vertical profiles of the 39.2°N cross section through the city center at 16:00 BT (arrows line: streamline, red line: perturbation temperature, ▲: urban area of Tianjin)

40.3°N、116.6°～118.2°E(图 1a)内的温度进行滤波得到扰动温度分布情况(图 4d～4f)。对比可见,WRF 试验在城区附近存在 2℃以上扰动温度大值中心,只是范围较小,new1 试验不存在扰动温度大值中心,new2 试验在城区附近存在明显的 2℃以上扰动温度大值区,范围和扩张后的城市范围一致,中心最大值为 2.5℃,比 WRF 试验的高出 0.5℃。随时间变化,WRF 试验和 new2 试验的扰动温度大值

区范围均有所扩大,到 17 时 WRF 试验城区附近扰动温度最大值达到 2.5℃,只是范围明显小于 new2 试验的(图略)。过市区沿 39.2°N 做流场与扰动温度垂直剖面图(图 4d～4f 中直线位置),从剖面图上看到(图 4g～4i),WRF 试验城区上空 0.5℃扰动温度等值线所在高度接近 930 hPa 高度、new1 试验中所在高度仅在 980 hPa 高度附近,而 new2 试验中达到 870 hPa 附近,明显高于 WRF 和 new1 试验的,而且 new2 试验 0.5℃扰动温度等值线在城区上空的覆盖范围明显大许多。到 17 时(图略)三种试验0.5℃ 扰动温度等值线所在高度均有所升高,其中 WRF 试验的上升到 900 hPa 高度以上,new1 试验的上升到 950 hPa 高度附近,new2 试验的上升到 850 hPa 高度附近且范围明显大于 WRF 和 new1 试验的。这表明当城市下垫面土地利用类型改为和周围郊区一样的旱作农地和牧场后,天津城区附近没有出现城市热岛特征或城市热岛特征很弱;但当城区附近城市建筑用地被极度扩张后,城区附近城市热岛效应更加明显、城市热岛环流垂直伸展高度更高、空间影响范围更大。

3.2.2　城市热岛对海风(锋)环流阻挡作用的对比分析

当受海风影响时,天津东部沿岸为一致的东南风。海风上岸后,在海风前沿形成一海风锋,锋区内等温线较密集(图 4a～4c),海风锋后为明显的海风环流。从图 4a 和 4b 可见,16 时 WRF 和 new1 试验海风(锋)环流还没有移到城区附近,海风锋锋区保持与海岸线近似平行的形态向西推进。而此时 new2 试验因城市范围扩大,海风(锋)环流已移到城区附近受到城市热岛阻挡,海风锋锋区等温线出现明显向后弯曲现象(图 4c)。我们沿 117.5°E(图 5a 中虚线 1 位置)做流场与垂直速度剖面看到(图 5j),WRF 试验海风锋锋区内在近地层出现南北分支气流和向上气流分量,因海风本身为东南风,所以向北气流分量较强,向南的气流分量很弱。对比 new1 和 new2 试验存在同样特征(图略),分析应为海风(锋)上岸后海陆热力差异造成的。这和东高红等(2011)之前研究得出的海风锋自身存在一辐合抬升区、锋区内有弱对流存在的结论一致。

至 17 时 WRF 试验海风(锋)环流移到城区附近受到城市热岛阻挡,海风锋锋区等温线出现明显向后弯曲现象,其后侧低层风场受阻挡风速减速并出现明显分支绕流(图 5a),从沿 117.3°E(图 5a 中虚线 2 位置)做的流场与垂直速度剖面上也能清楚看到,此时近地层向南气流和向北气流分量略有加强,但向上的气流分量却比上一时刻明显加强(图 5k),上升气流伸展高度由不到 750 hPa 升高到 700 hPa 附近。这表明城市热岛对海风(锋)气流的阻挡作用明显。对比 new1 试验因没有城市热岛效应存在,海风(锋)环流移近到城区附近时没有受到阻挡仍保持与海岸线基本平行的形态继续向西移动(图 5b)。而此时 new2 试验因城市热岛效应影响范围较大,海风(锋)环流移近城区附近时就开始受到阻挡,且受阻挡程度更明显、锋区等温线发生向后弯曲范围更大,低层气流出现分支绕流范围也扩大许多(图略),只是等温线弯曲的程度比 WRF 试验的小一些(图 5a 和 5c)。

3.2.3　城市热岛对海风(锋)强度影响的对比分析

为具体分析城市热岛对海风(锋)环流强度的影响,沿 39.2°N 做流场与垂直速度及散度剖面(图 5a～5c 中实线位置)看到,中午开始 WRF 和 new2 两种试验在天津城区附近和东部沿岸海风环流前沿上空均有两个明显的垂直上升区。随时间城区附近城市热岛环流的垂直上升区范围明显扩大、垂直上升速度略加强、低层辐合高层辐散也变得明显。WRF 试验的垂直上升速度由 15 时的 0.09 $m \cdot s^{-1}$ 到 16 时加大为 0.2 $m \cdot s^{-1}$,上升区的高度也从低于 800 hPa 伸展到 750 hPa 高度附近(图 5d),低层散度值由 -10×10^{-5} s^{-1} 加强为 -20×10^{-5} s^{-1}(图略),且中层无辐散高度与上升运动中心对应。new2 试验城市热岛效应随时间也变得更明显,只是城市热岛环流内低层辐合及垂直上升速度要略弱一些(图 5f),应是因城市范围扩大使得城区内温度梯度减弱造成的。而 new1 试验在城区附近上空没有出现城市热岛环流和辐合上升运动,只在天津东部沿海有海风(锋)环流存在(图 5e)。另外,对比看到 WRF 和 new2 试验城市热岛环流的辐合上升运动要略弱于海风(锋)环流的。

随时间推移,三种试验海风(锋)环流高度均有所升高、辐合上升运动加强,其中 WRF 试验海风(锋)环流前沿海风锋的垂直上升速度由 15 时的 0.18 $m \cdot s^{-1}$ 到16时加大到0.25 $m \cdot s^{-1}$、环流高

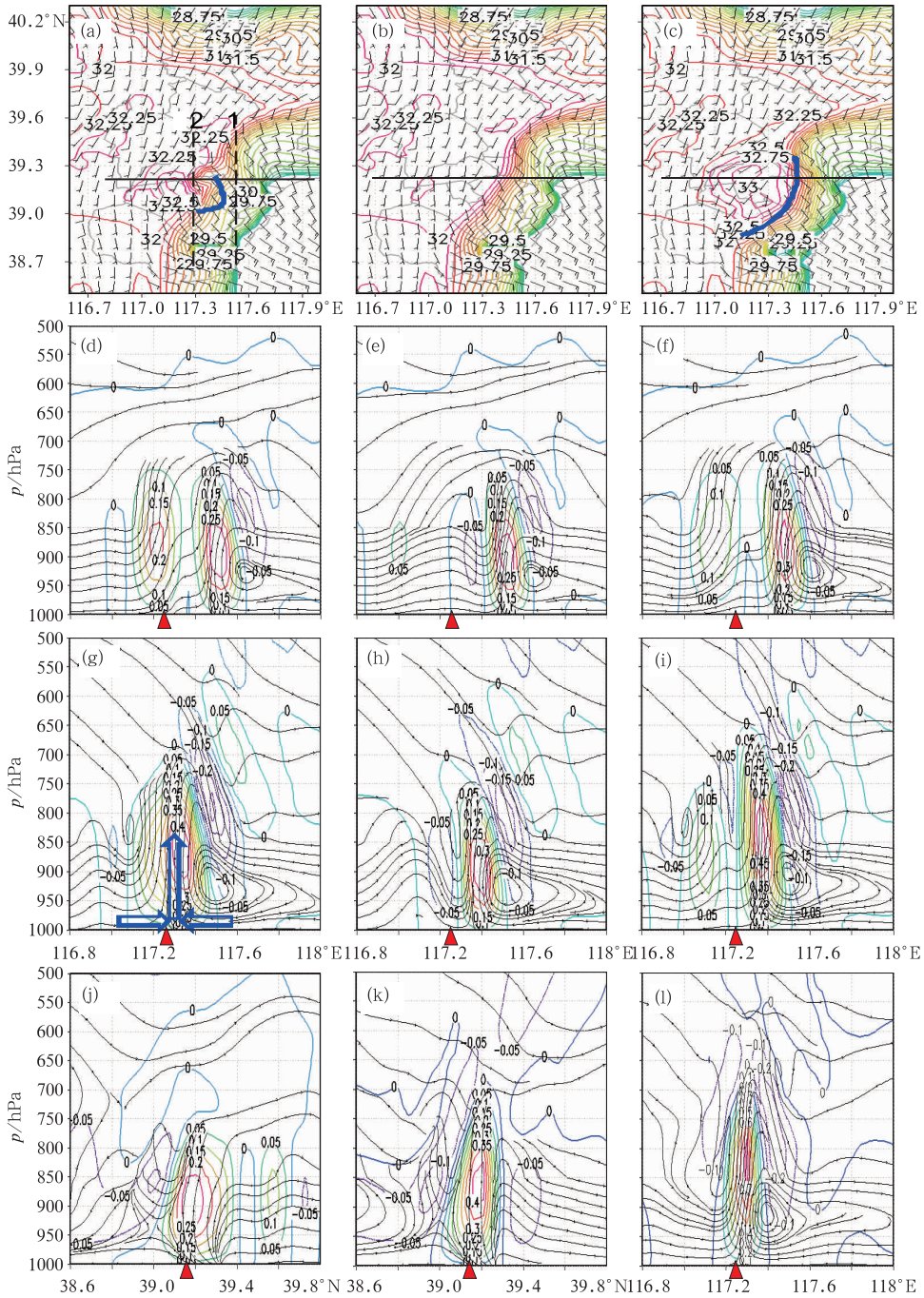


图 5 2010 年 8 月 16 日 WRF 试验(a,d,g,j,k),new1 试验(b,e,h)和 new2 试验(c,f,i,l)
(a,b,c)17 时风场与温度分布(彩色线为等温线,单位:℃,由绿到红为温度升高),
(d～f)16 时和(g～i)17 时过市区沿 39.2°N 做的流场与垂直速度(单位:m·s^{-1})剖面,
(j,k)16 时沿 117.5°E 和 17 时沿 117.3°E 做的流场与垂直速度剖面
(l)18 时过市区沿 39.2°N 做的流场与垂直速度剖面,
(图中▲为市区位置,图 5g 中箭头表示低层东、西气流及上升气流;图 5d～5l 中彩色线为垂直速度,
由绿到红反映垂直速度加大,正值表示上升,蓝到紫反映垂直速度减小,负值表示下沉)

Fig. 5 The wind field and temperature distributions of three sensitivity tests of WRF (a,d,g,j,k), new1 (b,e,h) and new2 (c,f,i,l) on 16 August 2010
(a,b,c) temperature and the flow field at 17:00 BT (color line: isotherm, rising from green to red);
(d－i) vertical velocity profiles of the 39.2°N cross section through the city center at 16:00 BT (d－f)－17:00 BT (g－i);
(j,k) vertical velocity profiles of the 117.5°E at 16:00 BT and 117.3°E cross section at 17:00 BT through the city center; (l) vertical velocity profiles of the 39.2°N cross section through the city center at 18:00 BT
(▲ is the urban area of Tianjin, in Fig. 5g arrows indicate low-level east-west airflow and rising airflow;
in Figs. 5d－5l the color line is vertical velocity, increasing from green to red, and the positive value represents increasing; whereas decreasing from blue to purple, and the negative value indicates sinking)

度上升至 750 hPa;new2 试验的垂直上升速度由 0.2 m·s^{-1} 加大到 0.3 m·s^{-1},环流高度上升至 720 hPa,new1 试验的垂直上升速度也由 0.18 m·s^{-1}增大为 0.25 m·s^{-1},环流高度上升至 760 hPa。对比三种试验海风锋的辐合上升速度值无论是同时刻对比还是随时间增幅的对比,new2 试验结果均明显强于 WRF 及 new1 试验结果,且 new2 试验海风(锋)环流的环流高度及范围相对也最大,WRF 试验次之、new1 试验相对最小。这表明在海风(锋)环流向城区移动过程中城市热岛效应对其有加强作用,而且城市热岛效应越明显对海风(锋)环流的加强作用越明显。

至 17 时 WRF 试验海风(锋)环流已移到城区附近,海风(锋)环流与城市热岛环流在城区附近相遇叠加,相遇处在低层有东、西两支气流在此处产生强的辐合上升(图 5g 中箭头所指),两环流相遇叠加后低层最大散度值达到-50×10^{-5} s^{-1},中心最大上升速度也加强到 0.4 m·s^{-1}以上(图 5g),同时辐合上升气流高度超过 700 hPa,均明显强于之前海风(锋)环流与城市热岛环流各自的高度。而 new1 试验在城区附近上空没有出现城市热岛效应和辐合上升运动,海风(锋)环流移到城区附近时没有受到阻挡,当其向西移过城区后环流垂直上升速度和环流高度均有所减弱(图 5e 和 5h)。而 new2 试验此时海风(锋)环流与城市热岛环流已相遇但并没有完全叠加,叠加环流西侧还有一弱的城市热岛环流(图 5i);至 18 时两环流完全叠加,叠加后环流上升高度达到 650 hPa 高度,中心最大上升速度达到0.8 m·s^{-1}(图 5l),比上一时次增大 0.35 m·s^{-1},低层散度值也由-60×10^{-5} s^{-1}增强到-70×10^{-5} s^{-1}。而此时 WRF 试验海风(锋)环流已越过城区,其环流高度和垂直上升速度均明显减弱(图略)。这说明城市范围扩大后,天津城市热岛效应更加明显,当海风(锋)环流移动到城区附近与城市热岛环流相遇,两环流完全叠加需要的时间会加长,叠加后环流的辐合上升运动会更强。

3.2.4　城市热岛对海风(锋)移动速度影响的对比分析

一般来说,当海风(锋)上岸后,由于受到地面摩擦及陆地热力属性影响,其移动速度会有所减慢。我们以海风(锋)环流前沿上升气流所在位置为依据来计算其不同时刻的移动速度。从不同时刻流场垂直剖面图上看到(图略),new1 试验海风(锋)环流上岸后 16 时前的 2 h 移动速度基本保持在 6～6.5 km·h^{-1},之后其移动速度明显加快,仅 1 个小时(16—17 时)海风(锋)环流前沿就从 117.49°E 移动到 117.36°E 附近,移动速度达到 13.5 km·h^{-1},比前 1 h 快了 1 倍,之后继续加快速度向西移动(表 1)。因为 new1 试验模拟的是没有城市存在的情况,所以海风(锋)环流移到城区附近没有受到城市热岛阻挡而快速移过城区。我们以 new1 试验不同时刻海风锋的移动速度作参照,对比 WRF 和 new2 两种试验海风(锋)环流移动速度的快慢,来分析城市热岛效应对海风(锋)环流移动速度的影响。

表 1　不同试验海风(锋)环流移动速度对比(单位:km·h^{-1})

Table 1　The sea breeze (front) circulation velocity contrast for different test results (unit: km·h^{-1})

	时间/BT			
	15	16	17	18
new1	6	6.5	13.5	20
WRF－new1	2	2	9.3	－4
new2－new1	5.5	6	1	－10
new2－WRF	3.5	4	－8.3	－6

注:正值表示加快的速度,负值表示减慢的速度。

Note: Positive value represents increasing velocity, negative value represents decreasing velocity.

为便于对比,我们分别将同时刻 WRF 和 new1 两种试验及其沿 39.2°N 做的流场垂直剖面相叠加,计算得到不同试验结果海风(锋)环流移动速度的快慢值(表 1)。从表 1 看到,WRF 试验海风(锋)环流上岸后向城区方向移动中,其移动速度比 new1 试验的快 2 km·h^{-1},而 new2 试验移动速度比 new1 试验的快约 5.5 km·h^{-1},其加快的速度比 WRF 试验的还快了 1.5 倍以上。这说明由于城市热岛存在,使得海风(锋)环流上岸后移速加快,而且城市热岛效应越明显使海风(锋)环流移动速度加快得越多。另外从上文分析可知,17 时的 WRF 试验海风(锋)环流已经移动到城区附近与城市热岛环流相遇,这 1 h 的移动速度是前 1 h 移动速度加快的 4.6 倍多,这比 new1 试验的移动速度快 9.3 km·h^{-1};而后一时刻,WRF 试验海风(锋)环流移动速度迅速减慢,反而比 new1 试验的移动速度减慢 4 km·h^{-1}。16—17 时海风(锋)环流的移速加快 9.3 km·h^{-1},约为 2.6 m·s^{-1},与 Freitas et al(2007)研究得到的城市热岛使海风加快 3.2 m·s^{-1}的结论基本一致。

对比 new2 试验 16—17 时海风(锋)环流移动速度看,这 1 h 海风(锋)环流移动速度明显减慢,其移速仅比 new1 试验的快 1 km·h^{-1},却比 WRF 试验的慢了 8.3 km·h^{-1}。从上文分析知,由于 new2 试验城市热岛效应影响范围明显扩大(图 4c 和图 5c),两环流相遇时间比 WRF 试验的早一些,应在 16—17 时,所以在这 1 h 内受城市热岛环流阻挡,海风(锋)环流的移动速度会明显变慢,至下一时刻其移动速度仍然比 WRF 试验的慢 6 km·h^{-1},而且比 new1 试验的移动速度慢了 10 km·h^{-1}。这进一步说明由于城市热岛效应影响范围扩大,当海风(锋)环流移动到城区附近与城市热岛环流相遇时,城市热岛环流对其阻挡作用更明显。但由于中尺度 WRF 模式输出资料时间分辨率的限制,城区范围扩大城市热岛效应变强和热岛范围扩大后,当海风(锋)环流移到城区附近与城市热岛环流相遇前,城市热岛对海风(锋)环流的移动速度具体加快多少还有待进一步模拟试验研究。

3.2.5 城市热岛对海风(锋)环流后侧水汽影响的对比分析

一般情况下,受海风(锋)影响地区会出现增湿和降温,这与海风(锋)携带丰富的水汽及其气温相对陆地气温较低有关。为具体分析城市热岛效应对海风(锋)环流携带水汽的影响,沿 39.2°N 做流场与比湿及扰动温度的垂直剖面(图 5a～5c 中实线位置)。对比天津城区附近低层(850 hPa 以下)水汽条件看到(图 6a～6c),15 时 new1 试验低层空气水汽含量最大,比湿＞10 g·kg^{-1}的湿空气层最厚达到 950 hPa 高度附近,扰动温度大值区范围相对最小,WRF 试验的次之,比湿＞10 g·kg^{-1}的湿空气层仅出现在 1000 hPa 以下;new2 试验天津城区低层为相对干区,近地层空气比湿＜10 g·kg^{-1}且扰动温度大值区范围相对最大。这说明由于城市热岛效应存在,城区上空是相对暖干空气,则城市热岛效应越明显城区上空空气越暖越干。

同时对比看到,15 时 new1 试验海风(锋)环流后侧气流水汽含量最大,比湿＞11 g·kg^{-1}的湿空气层最厚,最高达到 900 hPa 高度以上;WRF 试验比湿＞11 g·kg^{-1}的湿空气层厚度在 930 hPa 高度附近;new2 试验海风(锋)环流后侧湿空气层最薄,比湿＞11 g·kg^{-1}的湿空气层厚度仅在 970 hPa 高度附近。且随时间三种试验结果均显示,海风(锋)环流在向城区移动过程中,其经过地区低层空气湿度明显增大、温度降低,海风锋的上升运动对近地层水汽的垂直输送使得海风锋锋后低层形成向后倾斜的厚度较大的水汽高值区,表现为等比湿线随高度出现向后倾斜特征(海风锋的背风方向)(图 6);但海风(锋)环流后侧自身携带的湿空气层厚度却都有不同程度减弱,当海风(锋)环流移动到城区附近时,new1 试验因城区附近不存在城市热岛效应,海风(锋)环流后湿空气层厚度仅下降 20 hPa 达到 900 hPa 高度附近,而 WRF 和 new2 试验因城区附近存在城市热岛效应,比湿＞11 g·kg^{-1}的湿空气层厚度均明显下降,相比较 new2 试验比湿＞11 g·kg^{-1}的湿空气层厚度下降最明显,到 17 时下降到 990 hPa 高度附近。这表明海风(锋)环流在向城区方向移动过程中,会使其经过地区低层空气增湿降温;但海风(锋)环流后侧湿空气层厚度会因城市热岛效应的存在而明显减小,且城市热岛效应越明显,海风(锋)环流后测湿空气层厚度减小得越明显。

4 结论与讨论

本文利用中尺度数值天气模式(TJ-WRF)、常规观测资料和天津加密自动站观测资料等,通过改变模式中下垫面土地利用类型对发生在天津城区附近的局地强雷暴典型天气个例进行敏感性模拟试验,得到以下结论:

(1) 不同土地利用类型下垫面对城市热岛效应影响不同,当城市周边郊区下垫面土地类型改为城市建筑用地时城市热岛效应变得更加明显,其影响范围明显扩大;当城市下垫面改为旱作农地和牧场时天津城区附近没有出现城市热岛效应。

(2) 天津城区附近不存在城市热岛时,海风(锋)环流在上岸移动一段时间后其会加速移过城区。当城区附近存在城市热岛时,当海风(锋)环流向城区方向移动还未移到城区附近时,城市热岛对海风(锋)环流有明显加强和加速作用,且城市热岛效应越明显对海风(锋)环流的加强和加速作用越明显。海风(锋)环流移动加快的速度比没有城市热岛时快 9.3 km·h^{-1}。

(3) 当海风(锋)环流移动到城区附近时与城市热岛环流相遇会受到阻挡,其移速会迅速减慢,海风(锋)后侧气流南、北分支绕流和向上爬升现象明显加强,但两环流相遇叠加后的辐合上升运动会明显加强;城市热岛效应越明显,其对海风(锋)环流的阻

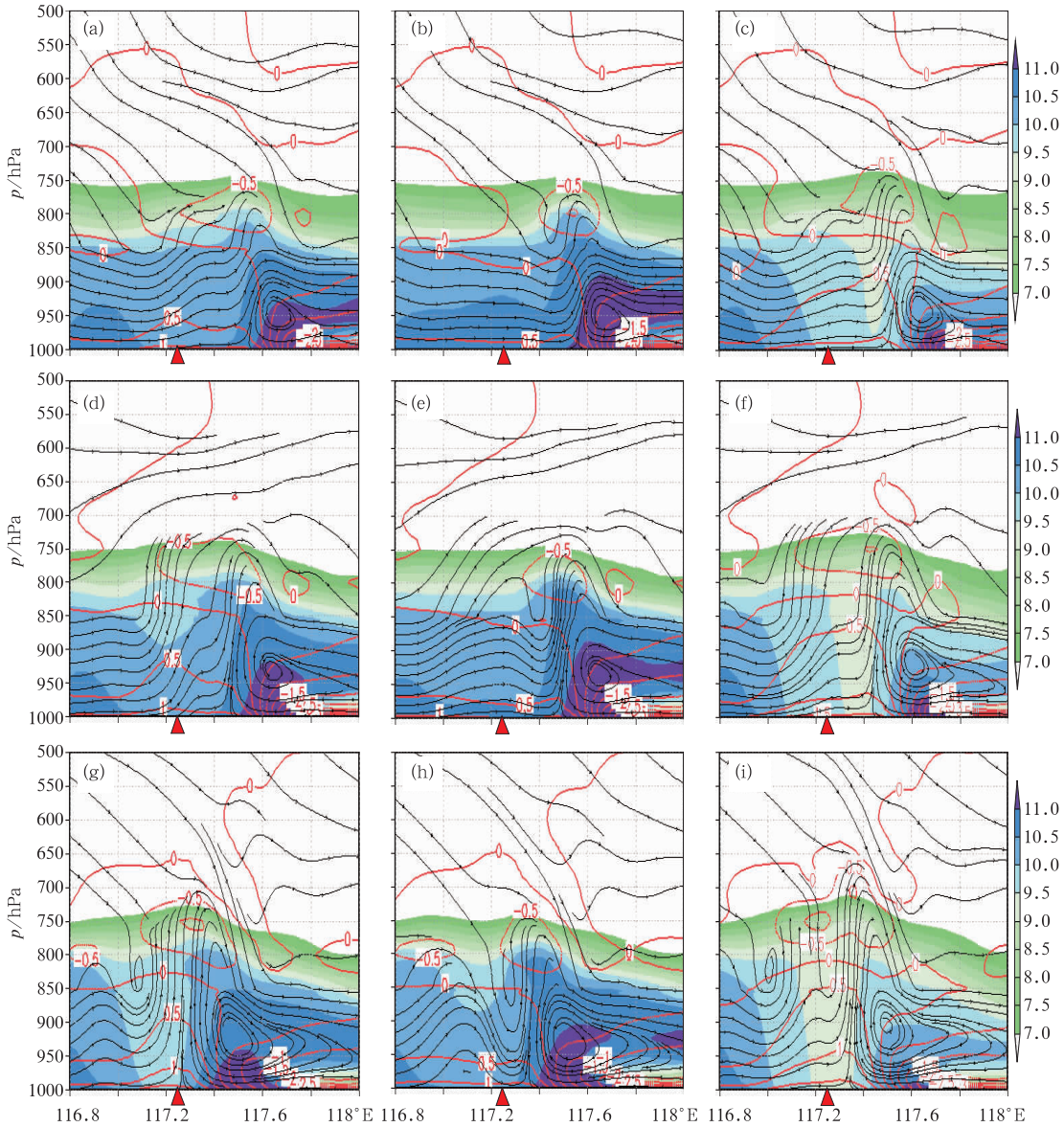


图 6　2010 年 8 月 16 日 15 时(a,b,c)、16 时(d,e,f)和 17 时(g,h,i)过市区沿 39.2°N 做的流场与比湿(单位:g·kg^{-1})及扰动温度(单位:℃)的垂直剖面

(a,d,g)WRF 试验,(b,e,h)new1 试验,(c,f,i)new2 试验

(图中▲为市区位置,阴影为比湿,红色等值线为扰动温度)

Fig. 6　The flow field, perturbation temperature (unit: ℃), and specific humidity (unit: g·kg^{-1}) vertical profiles of the 39.2°N cross section through the city center at 15:00 BT (a, b, c), 16:00 BT (d, e, f) and 17:00 BT (g, h, i) 16 August 2010

(a, d, g) WRF, (b, e, h) new 1, (c, f, i) new 2

(▲ represents the urban area of Tianjin, shadow shows specific humidity and red solid line is perturbation temperature)

挡作用越明显,海风(锋)环流移动速度减慢得也越多,其移过城区所需要时间越长,两环流相遇叠加后的辐合上升运动也就越强。另外在向城区移动过程中,海风(锋)环流会使其经过地区低层空气增湿降温;但海风(锋)环流后侧湿空气层厚度会因城市热岛效应的存在而明显减小,且城市热岛效应越明显,海风(锋)环流后侧湿空气层厚度减小得越明显。

由于本文仅是利用中尺度 TJ-WRF 模式对发

生在天津城区的一次局地强雷暴过程进行的模拟试验研究，而且模式控制试验的下垫面土地利用类型已经不能客观反映天津目前的城市范围，所以本文所得结论的客观真实性和普遍试用性还需今后进一步的试验研究进行验证。

参考文献

曹晓岗，王慧，邹兰军，等，2011. 上海“010805”特大暴雨与“080825”大暴雨对比分析[J]. 高原气象，30(3)：739-748.

陈彬，于恩洪，1989. 渤海湾西部海陆风的天气气候特征[J]. 海洋通报，8(1)：23-29.

戴俐卉，洪景山，庄秉洁，等，2008. WRF模式台湾地区土地利用类型之更新与个案研究[J]. 大气科学，36(1)：43-62.

东高红，何群英，刘一玮，等，2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J]. 气象，37(9)：1100-1107.

东高红，刘一玮，孙蜜娜，等，2013. 城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响[J]. 气象，39(11)：1422-1430.

东高红，尉英华，解以扬，等，2015. 天津地区城市热岛环流与海风环流相互作用的研究[J]. 气象，41(12)：1447-1455.

何群英，解以扬，东高红，等，2011. 海陆风环流在天津2009年9月26日局地暴雨过程中的作用[J]. 气象，37(3)：291-297.

黄利萍，苗峻峰，刘月琨，等，2013. 天津地区夏季海陆风对城市热岛日变化特征影响的观测分析[J]. 大气科学学报，36(4)：417-425.

刘树华，刘振鑫，马雁军，等，2008. 京津冀地区局地大气环流耦合效应与区域可持续发展的战略思考[J]. 前沿科学，2(4)：61-74.

蒙伟光，闫敬华，扈海波，2007. 城市化对珠江三角洲强雷暴天气的可能影响[J]. 大气科学，31(2)：364-376.

苗曼倩，唐有华，1998. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响[J]. 高原气象，17(3)：280-289.

孙继松，2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象，24(1)：62-69.

孙继松，舒文军，2007. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学，31(2)：311-320.

孙继松，王华，王令，等，2006. 城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用[J]. 大气科学，30(2)：221-234.

吴风波，汤剑平，2011. 城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响[J]. 南京大学学报(自然科学)，47(1)：71-81.

吴庆梅，杨波，王国荣，等，2012. 北京地形和热岛效应对一次β中尺度暴雨的作用[J]. 气象，38(2)：174-181.

许启慧，苗峻峰，刘月琨，等，2013. 渤海湾西岸海陆风特征对城市热岛响应的观测分析[J]. 气象科学，33(4)：408-417.

易笑园，张义军，沈永海，等，2012. 一次海风锋触发的多单体雹暴及合并过程的观测分析[J]. 气象学报，70(5)：974-985.

于恩洪，陈彬，白玉荣，1987. 渤海湾西部海陆风的空间结构[J]. 气象学报，45(3)：379-381.

张赟程，王晓峰，张蕾，等，2017. 海风与热岛耦合对上海强对流天气影响的数值模拟[J]. 高原气象，36(3)：705-717.

郑祚芳，张秀丽，2009. 北京地区一次局地强降水过程的数值分析[J]. 热带气象学报，25(4)：442-448.

Freitas E D，Rozoff C M，Cotton W R，et al，2007. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of Sao aulo，Brazil[J]. Bound-Layer Meteor，122(1)：43-65.

Lei M，Niyogi D，Kishtawal C，et al，2008. Effect of explicit urban land surface representation on the simulation of the 26 July 2005 heavy rain event over Mumbai，India[J]. Atmospheric Chemistry and Physics，8(20)：5975-5995.