科学通报 2013 年 第 58 卷 第 13 期: 1221 ~ 1227
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验

陈海山[①②*], 张叶[①②③]

① 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044;
② 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044;
③ 河北省气象台, 石家庄 050021
* 联系人, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

2012-06-21 收稿, 2012-10-26 接收, 2013-04-24 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2010CB428505)、全球变化国家重大科学研究计划(2011CB952004)、江苏省"333 高层次人才培养工程"、"青蓝工程"和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助

摘要 利用包含城市冠层参数化方案的全球大气环流模式 CAM4.0, 通过理想化试验探讨了中国东部大规模城市化对东亚冬季风的可能影响. 结果表明: 大规模城市化能够引起我国东部大范围地区地表温度、气温的显著升高; 明显改变东部区域的地表能量平衡, 引起地表净长波辐射和感热通量的显著增加, 进而加强了地表对大气的加热. 在城市化引起的地表热力异常强迫下, 东亚冬季风环流发生了显著的改变. 我国东部大规模城市化总体上将导致东亚冬季风强度减弱, 但会引起我国东北地区异常增强的偏北风, 使得该区域的冬季风表现出区域性的异常增强.

关键词
大规模城市化
东亚冬季风
敏感性试验

近年来, 土地利用/土地覆盖变化(LULCC)所引发的气候变化引起了科学家的广泛关注. IPCC AR4[1]指出, 土地利用和土地覆盖的变化会引起局地和区域尺度的气候变化, 并通过大气环流的调整对更大范围的气候产生影响. 一系列的研究表明大范围的土地利用/土地覆盖变化会对季风环流产生一定的影响[2~5]; 植被覆盖变化对气候也具有重要的影响[6~10].

城市化是土地利用/土地覆盖变化中最为极端的一种变化, 研究表明城市化可以影响到区域尺度环流和气候[11~14]. 城市化对气候的影响最终要归因于城市特殊的下垫面特性, 在城区会形成 Howard[15]发现和提出的城市热岛. 一些研究表明, 冬季城市热岛效应更加明显[16~18]. Fan 等人[19]研究发现, 人为热对冬季城市热岛的形成有重要贡献. 而一些研究发现, 在反气旋背景下热岛强度最强[20~25].

Zhou 等人[26]指出, 中国东南部地区城市化效应非常明显. 而目前, 大量的研究主要关注城市化局地或区域尺度的影响, 关于城市化大尺度气候效应的研究还很少. 尽管目前的研究认为, 城市化的影响主要是局地的, 而对全球尺度的影响是很有限的. 但是, 随着城市规模的不断扩大, 大规模城市化无疑将会引起更大尺度的陆面特性的变化, 尤其是引起陆面对大气的热力强迫的变化, 上述变化能否显著改变区域大气环流和气候等问题值得深入探讨. 我国地处东亚季风区, 海陆热力差异是季风形成的本质因素. 那么, 大规模城市化能否引起陆面热力异常的显著变化, 从而对季风系统产生影响? 目前还没有强有力的证据可以直接回答这些问题. 正是基于上述考虑, 本文试图通过理想化试验, 针对大规模城市化对季风系统的潜在影响开展探索性的研究. 鉴于冬季的城市热岛效应较强, 同时考虑到目前全球气候模式对东亚夏季气候的模拟能力较差[27,28], 本文重点考察大规模城市化对东亚冬季风和我国冬季气候的影响.

引用格式: 陈海山, 张叶. 大规模城市化影响东亚冬季风的敏感性试验. 科学通报, 2013, 58: 1221–1227
英文版见: Chen H S, Zhang Y. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon. Chin Sci Bull, 2013, 58: 809–815, doi: 10.1007/s11434-012-5579-z

1 模式和试验方案

1.1 NCAR CAM4.0 模式

本文采用的是美国国家大气研究中心(NCAR)的全球大气环流模式 NCAR CAM4.0 (Community Atmosphere Model Version 4.0)[29]. CAM4.0 是公共地球系统模式 CESM (Community Earth System Model)的一个分量, 它可与陆面模式 CLM4.0 (Community Land Model Version 4.0)、海洋模式 POP2 以及海冰模式 CICE4 相耦合运行; 也可与陆面模式、热力学海冰模式(CICE)及数据海洋模式(DOCN)相耦合来运行, 海洋和海冰作为模式的边界条件由观测提供, 本文的研究采用了第 2 种运行方式.

目前, 陆面模式 CLM4.0 中包含了城市模块[30,31], 城市模块的主要参数包括 3 个方面: 城市的空间范围、城市的形态学特性、建筑材料的热力学和辐射学特性, 具体采用 28 个参数来表征城市冠层的基本特征, 同时对城市冠层的相关过程进行了较为详细的描述, 因此可以用来研究城市化问题. 根据全球的人口、文化、社会形态等因素将全球分为 33 个区, 每个区域中城市参数相同. 前人已利用该模式进行了一些关于城市化问题的研究, 如 Oleson[32]利用 CCSM4 分析了城市与乡村未来气候对 CMIP5 不同情景的响应; Oleson 等人[33]的研究表明该模式是模拟城市效应的有效工具.

1.2 试验方案

本文设计了 2 组试验来研究中国东部大规模城市化对冬季东亚季风及中国气候的可能影响. 模式运行采用了 EUL 动力核, 水平分辨率采用 T42, 垂直分层为 26 层.

(1) 参照试验(CTL). 采用模式默认的地表参数及覆盖类型, 自 1 月 1 日起, 以气候态的海温(1949~2004 年月平均海温)驱动模式, 连续积分 25 年.

(2) 敏感试验(PCT50). 将中国东部沿海网格中城市的百分比增加到 50%, 相应网格中植被覆盖减少(各种植被类型在植被总体中所占权重保持不变), 考虑了制冷和取暖所导致的人为热源排放, 其他与参照试验设置相同; 参数修改覆盖的范围详见图 1.

这里重点分析模式后 20 年的结果, 通过比较 2 组试验结果的差异, 来探讨大规模城市化的可能影响; 后文给出的结果均为 PCT50 试验与 CTL 试验冬季要素 20 年平均的差值场.

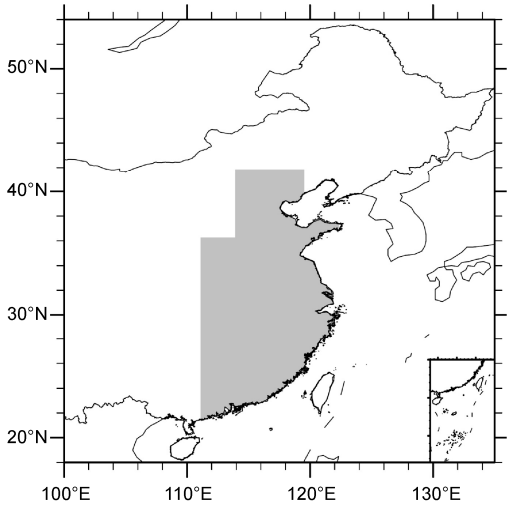

图 1 模式参数修改区域的示意图(阴影部分)

2 结果分析

2.1 参照试验

在分析敏感性试验的结果前, 首先将参照试验的结果与美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料进行简单比较, 检验模式对研究区域气候的模拟能力. 图 2(a)给出了 2 m 气温的模拟情况. 总体而言, 模式对于我国中低纬度地区气温的模拟效果较好, 但对高纬地区的模拟稍差, 对高纬度地区温度的模拟存在明显偏低的现象, 参照试验与 NCEP 再分析资料的空间相似系数达 0.993, 通过了 0.001 的显著性检验, 均方根误差为 3.067℃. 从图 2(b)可以看出, 模式对东亚区域 850 hPa 环流(风场和位势高度场)形势的模拟也总体较好, 参照试验位势高度场与 NCEP 再分析资料的空间相似系数为 0.989, 通过 0.001 的显著性检验, 均方根误差为 21.91 gpm. 总体说来, 模式对冬季大气环流和基本要素有一定模拟能力, 这为后文的研究奠定了基础.

2.2 敏感性试验

考虑到我们重点关注大规模城市化可能对东亚地区及东亚季风环流产生的影响, 这里将研究的区域集中在我国东部季风区, 重点分析温度、地表通量、大气环流及风场对大规模城市化的可能响应.

已有的研究表明, 城市区域具有较低的反照率, 能够更加有效地吸收太阳的短波辐射, 同时与自然

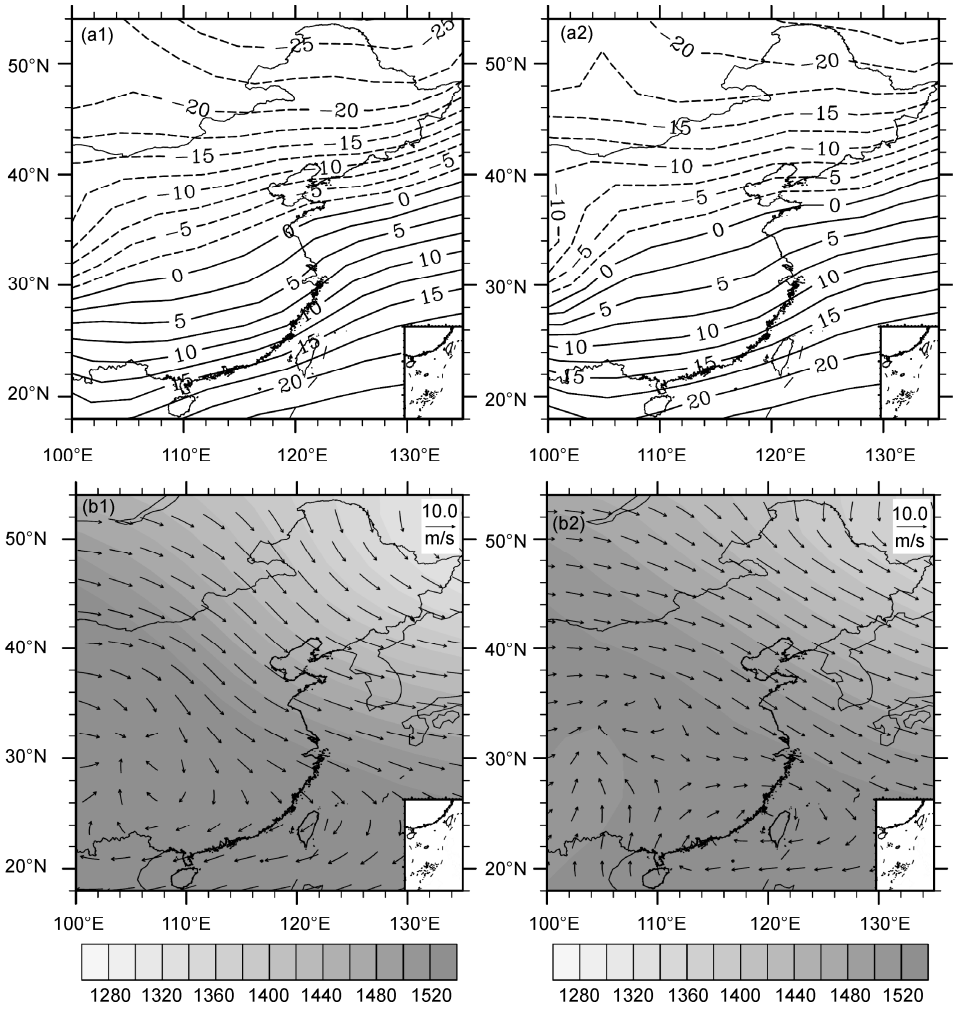

图 2　参照试验模拟的 2 m 气温(℃) ((a1), (a2)), 850 hPa 环流场(gpm)和风场(m/s) ((b1), (b2))与 NCEP 再分析资料的比较

阴影为位势高度, 矢量为风场; (a1), (b1)为参照试验, (a2), (b2)为 NCEP 再分析资料

表面相比, 有更强的储热能力; 再加之人为热源的排放, 使得城市区域的温度明显升高, 产生城市的热岛效应, 从而体现出与自然下垫面完全不同的热力状态. 图 3 给出了理想城市化试验 PCT50 与参照试验 CTL 地表温度及近地层气温的差值分布, 用来反映大规模城市化对温度可能产生的影响. 可以看出, 大规模城市化将导致冬季地表温度显著升高, 这种温度的显著变化主要集中出现在在模式参数修改的整个中国东部地区, 上述区域的地表温度的增加均超过 1℃, 最大达到 3℃左右(图 3(a)). 大规模城市化造成的地表温度的升高, 又将直接导致近地面气温的变化, 2 m 平均气温、最高温度、最低温度都出现了不同程度的升高, 其分布特征与地表温度的差值分布总体较为类似(图 3(b)~(d)). 总体来说, 城市化区域最低温度的增幅明显大于最高温度的增幅. 为了更好刻画城市的热岛效应, 这里还利用城市区域与郊区的温度差值计算并给出了热岛强度(UHI)的差值分布(图 3(e)). 不难发现, 大规模城市化的情形下冬季我国东部地区的热岛强度明显增强, 最高增幅为 0.36℃.

大规模城市化的影响除了能够引起表层温度的显著变化, 也明显改变了地表的能量平衡(图 4). 与自然下垫面的情况相比, 大规模城市化情况下不同地表能量分量和地表对大气的加热均发生了明显的变化. 总体而言, 大规模城市化会导致地表吸收的净短波辐射、净长波辐射和感热通量均出现了不同程度的增加, 同时引起地表潜热通量减小. 在地表能量平衡分量的变化中, 以感热通量的变化最为显著, 净长波辐射次之, 净短波辐射和潜热通量的变化相对较

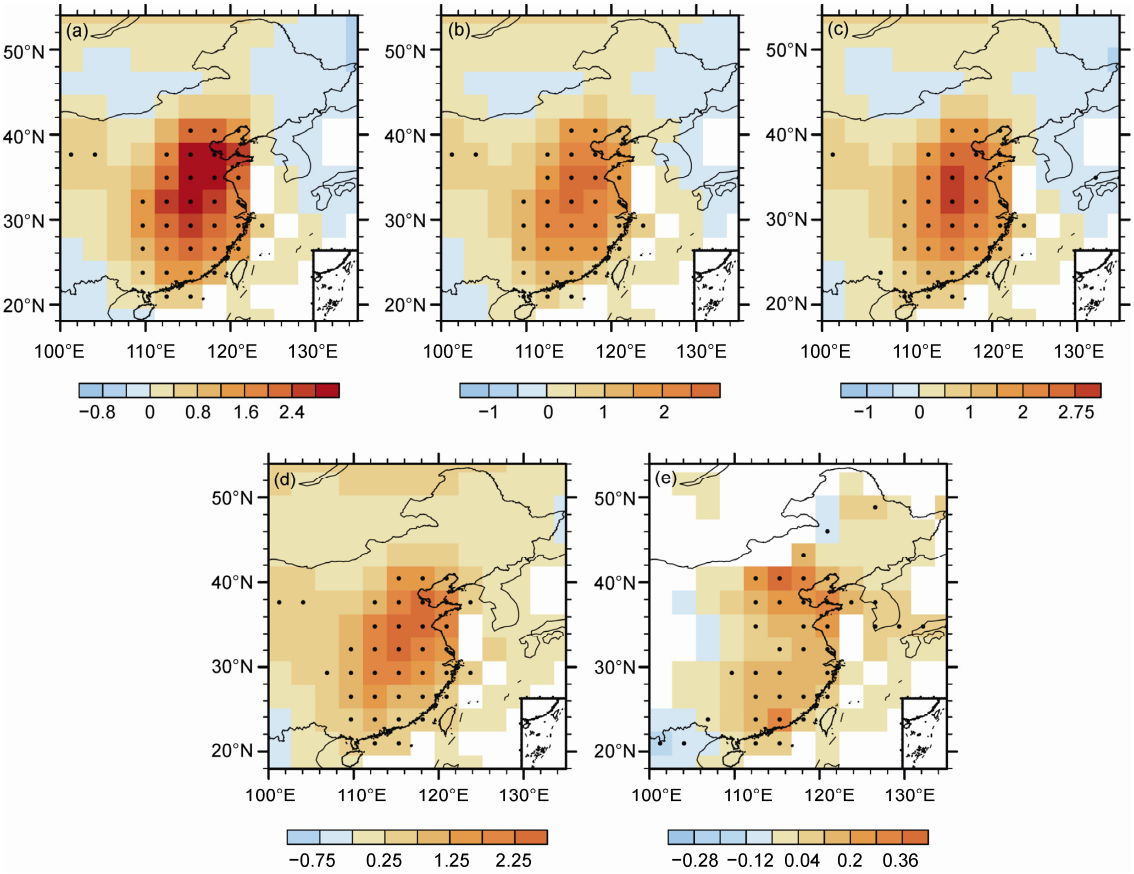

图 3 PCT50 与 CTL 冬季地表温度(a)、2 m 气温(b)、日最低气温(c)、日最高气温(d)和城市热岛的强度(e)(℃)的差值分布

点阴影区为通过 90%显著性检验的区域

小. 净长波辐射和地表感热通量在大规模城市化区域均发生了显著的增加, 感热通量的最大增幅可达 20 W/m^2, 而净长波辐射的最大增幅则在 10 W/m^2 以上(图 4(b)~(c)). 相比之下, 地表净短波辐射和地表潜热通量的变化总体并不显著. 我们也注意到, 大规模城市化情况下, 地表对于大气的加热也显著增强, 最大增幅可达 30 W/m^2(图 4(e)). 上述结果表明, 大规模城市化, 将明显增加地表的感热通量和地表的净长波辐射, 进而增强地表对大气的地表加热; 大规模城市化改变了地表对大气的热力强迫, 是其引起大气环流异常的根本原因.

图 5 给出了 PCT50 试验与参照试验模拟的不同层的位势高度和风场的差值分布, 可以反映冬季环流对城市化热力强迫的异常响应特征. 在大规模城市化情况下, 冬季东亚地区的大气环流发生了显著的变化, 东亚地区冬季的位势高度场从低层(850 hPa)到高层(200 hPa, 图略)均对城市化引起的地面热力异常强迫表现出明显的响应. 在与城市化引起的加热异常区域对应, 我国东部大部分地区上空的位势高度场都出现了不同程度的抬升, 显著的位势高度场正异常主要出现在加热异常区以北自渤海湾, 经华北, 延伸至蒙古的带状区域上空, 而在位势高度场显著正异常区域的下游区域则出现了较明显的负值; 高度场的这种异常分布特征在低层(850 hPa)、中层(500 hPa)和高层(200 hPa, 图略)均有很好的体现. 低层高度场异常存在明显的闭合中心, 主要位于城市化异常加热区域东北部的渤海湾附近. 此外, 高度场对城市化引起的异常加热响应体现了较弱的斜压性特征, 东亚区域显著的位势高度场正异常区随高度增加向西倾斜且强度有所减弱. 东亚大部分区域位势高度场的抬升, 可以理解为对城市化引起的地表热力强迫的直接响应; 而下游地区位势高度场的降低, 则是大气环流调整的结果.

为了更直观地反映冬季风环流对城市化的响应,

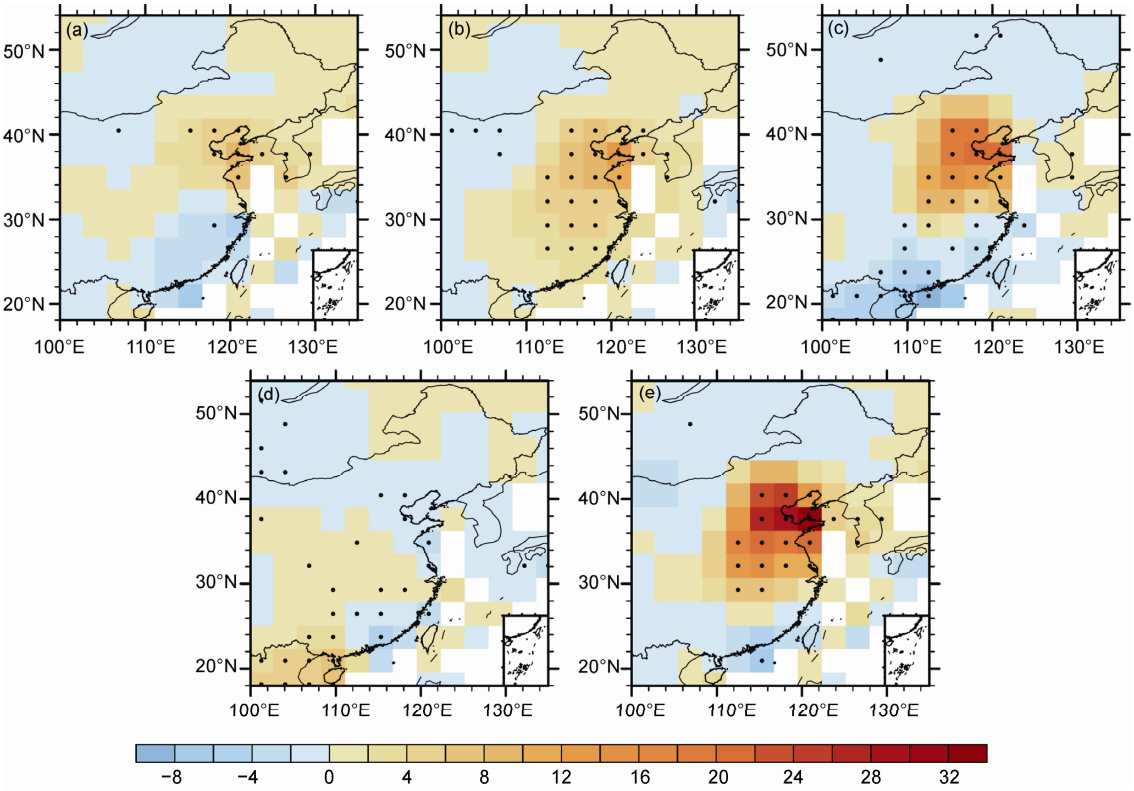

图 4　PCT50 与 CTL 冬季地表净短波辐射(a)、净长波辐射(b)、感热通量(c)、潜热通量(d)和地表(e)对大气的加热(W/m^2)的差值分布

点阴影区为通过 90%显著性检验的区域

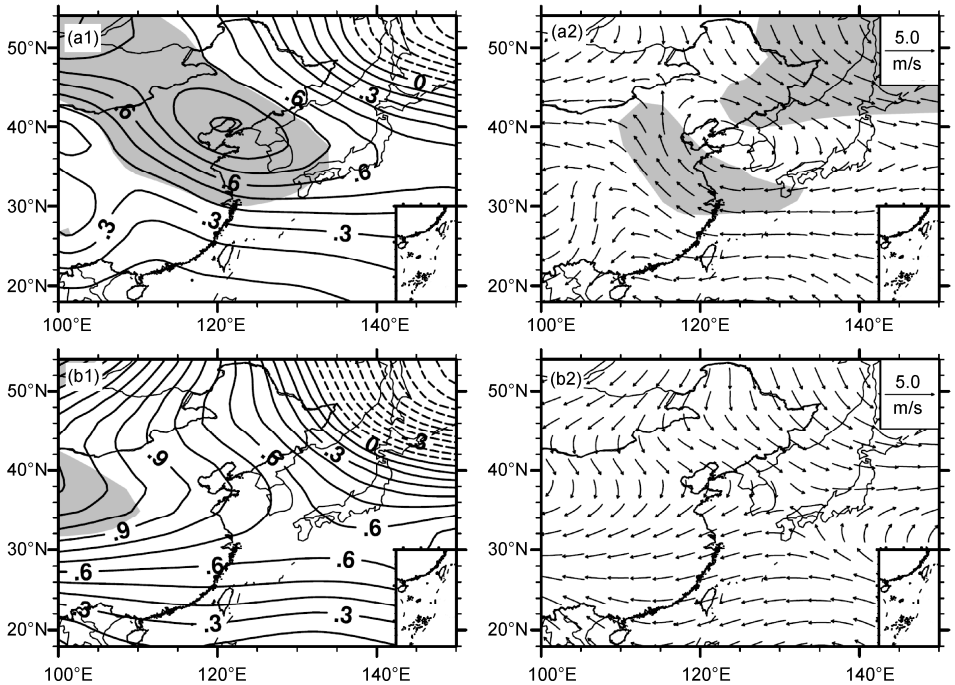

图 5　PCT50 与 CTL 冬季 850 hPa (a1), 500 hPa (b1)位势高度场(dagpm)和 850 hPa (a2), 500 hPa (b2)风场(m/s)的差值分布

阴影区为通过 90%显著性检验的区域

以下重点分析不同层次风场的差值分布. 与高度场的异常分布形势相对应, 低层(850 hPa)风场在城市化情形下也出现了显著的改变, 在我国东部(110°~120°E)为显著的南风异常, 在其东北侧(西南)区域则存在反气旋(气旋)性环流异常, 在东北东部及其以东则有明显的气旋性异常环流; 我国东部区域出现明显的南风异常, 而在东北区域则为异常的偏北风. 相比之下, 高层风场异常的主要表现为 35°N 以北的北风异常和以南地区的东风异常, 但均没能通过显著性检验. 总的说来, 我国东部大规模城市化总体上将导致东亚冬季风强度的减弱, 但会引起我国东北地区异常增强的偏北风, 使得该区域的冬季风表现出区域性的异常增强; 且城市化对冬季风环流的显著影响主要出现在中低层.

3 结论与讨论

本文基于 NCAR CAM4.0 模式的大规模城市化理想试验, 探讨了我国东部大规模城市化对东亚冬季风环流的可能影响. 结果表明, 在我国大规模城市化的情形下:

(1) 我国东部区域的地表温度、地面气温均出现大范围的显著增暖. 地表温度最大升温幅度可达 3℃, 气温的最高增幅大致为 2.5℃; 冬季平均的日最低气温和日最高气温均明显升高, 其中日最低温度的增温幅度要显著大于日最高温. 与此同时, 城市热岛强度也发生了较明显的变化, 城乡温差最高可达 0.36℃.

(2) 我国东部区域的地表能量平衡发生了显著变化. 地表向上的净长波辐射和地表感热通量热均明显增强, 而地表短波辐射的增加和潜热通量的减小则相对较小; 由于大规模城市化导致的地表能量平衡的变化, 将明显加强地表对大气的加热.

(3) 地表能量平衡的变化及地表对大气的加热异常, 能够对东亚冬季风环流产生显著的影响. 我国东部大规模城市化, 总体上将导致东亚冬季风强度的减弱, 但会引起我国东北地区异常增强的偏北风分量, 使得该区域的冬季风表现出区域性的异常增强; 且城市化对冬季风环流的显著影响主要出现在中低层.

本文通过敏感性试验, 采用虚拟试验探讨了大规模城市化对大尺度大气环流和气候可能产生的影响. 结果表明, 大气环流对大规模城市化响应明显, 这也为进一步深入探讨大规模城市化可能产生的气候效应及其相关的物理机制提供了一定的依据. 当然, 本文所设计的试验为虚拟极端的理想试验, 本文的结果也并非真实城市化过程所产生的气候效应. 到底多大规模的城市化能够对大尺度大气环流和气候产生较为显著的影响? 其机制是什么? 这些问题还有待进一步深入, 采用高分辨率的区域气候模式进行真实的城市化试验也是很有必要的. 此外, 本研究重点考虑了城市化所引起的地表物理属性变化的影响, 而没有涉及到与城市化相关的气溶胶的影响问题; 要全面理解城市化的大尺度气候效应, 综合考虑这两个因素也是十分必要的, 这也是我们今后研究所关注的问题.

参考文献

1 IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

2 符淙斌, 袁慧玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. 科学通报, 2001, 46: 691–695

3 Feddema J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. The important of land-cover change in simulating future climates. Science, 2005, 310: 1674–1678

4 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 397–404

5 Li Q, Xue Y. Simulated impacts of land cover change on summer climate in the Tibetan Plateau. Environ Res Lett, 2010, 5: 015102

6 Notaro M, Gutzler D. Simulated impact of vegetation on climate across the North American monsoon region in CCSM3. 5. Clim Dyn, 2011, 38: 795–814

7 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响Ⅰ: 初步模拟结果. 气象学报, 2002, 60: 1–16

8 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响Ⅱ: 机理分析. 气象学报, 2002, 60: 17–30

9 Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. Simulation of effects of land use change on climate in China by a regional climate model. Adv Atmos Sci, 2003, 20: 583–592

10 Wu L Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China. Chin Sci Bull, 2011, 56: 900–905

11 Landsberg H E. Man-made climatic changes: Man's activities have altered the climate of urbanized areas and may affect global climate in the future. Science, 1970, 170: 1265–1274
12 Lamptey B L, Barron E J, Pollard D. Impacts of agriculture and urbanization on the climate of the northeastern United States. Glob Planet Change, 2005, 49: 203–221
13 Trusilova K, Jung M, Churkina G, et al. Urbanization impacts on the climate in Europe: Numerical experiments by the PSU–NCAR Mesoscale Model (MM5). J Appl Meteorol Climatol, 2008, 47: 1442–1455
14 Trusilova K, Jung M, Churkina G. On climate impacts of a potential expansion of urban land in Europe. J Appl Meteorol Climatol, 2009, 48: 1971–1980
15 Howard L. The Climate of London. London: W. Phillips, 1818
16 Magee N, Curtis J, Wendler G. The urban heat island effect at Fairbanks, Alaska. Theor Appl Climatol, 1999, 64: 9–47
17 Kumar S, Prasad T, Ashidharan N V, et al. Heat island intensities over Brihan Mumbai on a cold winter and hot summer night. Mausam, 2001, 52: 703–708
18 Brázdil R, Budiková M. An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, the Czech Republi. Atmos Environ, 1999, 33: 4211–4217
19 Fan H L, David J S. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. Atmos Environ, 2005, 39: 73–84
20 Unwin D J. The synoptic climatology of Birmingham's heat island. Weather, 1980, 35: 43–50
21 Unger J. Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. Theor Appl Climatol, 1996, 54: 147–151
22 Shahgedanova M, Burt T P, Davies T D. Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow. Int J Climatol, 1997, 17: 1451–1465
23 Tumanov S, Stansion A, Lupu A, et al. Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters. Atmos Environ, 1999, 33: 4173–4183
24 Morris C J G, Simmonds I. Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. Int J Climatol, 2000, 20: 1931–1954
25 Beranová R, Huth R. Long-term changes in the heat island of Prague under different synoptic conditions. Theor Appl Climatol, 2005, 82: 113–118
26 Zhou L M, Dickinson R E, Tian Y, et al. Evidence of a significant urbanization effect on climate in China. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101: 9540–9544
27 Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. Theor Appl Climatol, 2006, 86: 173–185
28 Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. Meteorol Atmos Phys, 2008, 100: 73–86
29 Neale R B, Richter J H, Conley A J, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 4.0). Tech Rep NCAR/TN-485+STR. Boudlder: National Center for Atmophere Research, 2010
30 Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part I: Formulation and evaluation for two cities. J Appl Meteorol Climatol, 2008, 47: 1038–1060
31 Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An urban parameterization for a global climate model. Part II: Sensitivity to input parameters and the simulated urban heat island in offline simulations. J Appl Meteorol Climatol, 2008, 47: 1061–1076
32 Oleson K W. Contrasts between urban and rural climate in CCSM4 CMIP5 climate change scenarios. J Clim, 2012, 25: 1390–1412
33 Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. Geophys Res Lett, 2010, 37: L03701