

余荣, 江志红, 马红云. 2016. 中国东部城市群发展对南海夏季风爆发影响的模拟研究 [J]. 大气科学, 40 (3): 504–514. Yu Rong, Jiang Zhihong, Ma Hongyun. 2016. A numerical study on the impact of urban land-use change over eastern China on the onset of the South China Sea monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 504–514, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15116.

中国东部城市群发展对南海夏季风爆发影响的模拟研究

余荣 江志红 马红云

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 本文利用 NCAR 开发的 CAM5.1 (Community Atmosphere Model Version 5.1) 模式, 针对我国东部大规模城市下垫面发展对南海夏季风爆发的影响进行了数值模拟研究。结果表明我国东部大规模城市群发展可能使得南海夏季风提前 1 候爆发; 机理分析表明: 在南海夏季风爆发之前, 中国东部城市群发展引起的陆面增温, 使得南海及其附近地区南北温差提前逆转、中国东部区域海平面气压降低, 导致中南半岛到南海地区西南气流加强, 中南半岛到南海地区降水增加, 而凝结潜热垂直变化强迫出的异常环流, 促进了南亚高压的加强及提前北跳, 相伴随的高层抽吸作用有助于季风对流的建立和西太平洋副高的减弱东撤, 从而形成了有利于南海夏季风爆发的高低层环流条件, 导致南海夏季风提前爆发。另外, 观测结果表明 1993 年之后南海夏季风爆发的日期相对上一个年代明显提前约 2 候, 城市化快速发展阶段与南海夏季风爆发的年代际变化存在时间段的吻合, 表明城市下垫面发展可能是南海夏季风提前爆发的原因之一。

关键词 城市化 南海夏季风爆发 数值模拟 全型涡度方程

文章编号 1006-9895(2016)03-0504-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15116

A Numerical Study on the Impact of Urban Land-Use Change over Eastern China on the Onset of the South China Sea Monsoon

YU Rong, JIANG Zhihong, and MA Hongyun

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract The effect of urban land-use change over eastern China on the onset of the South China Sea summer monsoon (SCSSM) is investigated using Community Atmosphere Model Version 5.1 (CAM5.1). Results show that the seasonal transition characteristics of large-scale atmospheric circulation during the SCSSM onset are reproduced well in CAM5.1. Comparison of two runs show that urbanization over eastern China may advance the date of SCSSM onset by one pentad. Possible mechanisms are analyzed, revealing that urbanization induces strengthened warming and sensible heating from land to air in the middle to high latitudes over continental eastern China, and the thermal contrast between ocean and land

收稿日期 2015-01-21; **网络预出版日期** 2015-05-07

作者简介 余荣, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: yurong0519@163.com

通讯作者 江志红, E-mail: zhjiang@huist.edu.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2010CB428505, 国家自然科学基金重点项目 41230528, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD), 江苏省高校“青蓝工程”创新团队项目共同资助

Founded by National Program on Key Basic Research Project of China (973 Program) (Grant 2010CB428505), Key Subjects of National Science Foundation (Grant 41230528) Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD), and Jiangsu Provincial Qinglan Project

is reduced, causing the advancement of the formation of continental low pressure and leading to the early appearance of zonal wind over the South China Sea. This provides abundant vapor, conducive to precipitation over the South China Sea. The increase in precipitation causes the increase in condensation latent heat release, making the control (CTRL) experiment generate a condensation latent heating center in advance. The related dynamic diagnosis shows that the vertical change in condensation latent heating has an important influence on the vorticity field, causing abnormal circulation that contributes to a northerly jump and strengthening of the South Asian high. This then prompts the western Pacific subtropical high into an eastward withdrawal, and the generation of low-level cyclonic circulation, leading to an advanced SCSSM onset. An earlier SCSSM onset is detected due to the urban land-use change over eastern China, implying that urban land-use change probably plays an important role in the observed earlier SCSSM onset around 1993.

Keywords Urban land-use change, South China Sea monsoon onset, Numerical simulation, Complete-form vorticity equation

1 引言

南海季风不仅是南亚季风和东亚季风连结的媒介,也是亚澳季风相互联系、相互作用的表现(何金海等, 2004)。它的爆发标志着东亚夏季风的来临和中国东部雨季的开始(丁一汇等, 2004; Chen et al., 2001),其爆发的早晚及强度直接影响东亚夏季风的进程及我国汛期降水的时空变化(黄荣辉等, 2005; He et al., 2007)。因此,有关南海夏季风爆发日期变化及其机理的研究一直是东亚季风研究中的热点。

1990 年代以来, Wang et al. (2004)、Kajikawa and Wang (2012) 通过分析观测资料发现在 1993 年以后南海夏季风的爆发日期相对上一个年代明显提前约 2 候。Liu et al. (2009) 通过对南海夏季风爆发早晚年的合成分析指出, 春季 40°N 以北的大陆温度偏高会使得南海季夏季风提前爆发; 吴国雄等 (2004) 统计分析了 1980~1998 年亚洲季风爆发日期序列与 400 hPa 月平均温度场的时滞相关, 发现春季青藏高原加热异常对于后期亚洲夏季风爆发具有显著的影响; 钱永甫等 (2004) 认为在影响夏季风爆发早晚的主要因子中, 陆地加热异常可能比海洋更为重要。

显然, 导致陆地加热异常的原因有很多 (Kalnay and Cai, 2003; Pitman et al., 2012; Christidis et al., 2013; Li et al., 2014; 王东东等, 2014; 周莉等, 2015), 值得注意的是, 1990 年代以来, 我国城市化水平持续增加, 1996 年城镇化率突破 30%, 2000 年来进入快速城市化阶段, 城镇化率从 36.22% 上升至 2005 年的 40.68% (叶嘉安等, 2006), 中国东部大规模的城市化无疑也会引起中国东部陆地加热异常 (Miao et al., 2011; Li et al., 2013; Wang et al., 2014; 刘鹏等, 2011), 可能导致陆面对大气热力强迫的变化。Wan and Zhong (2014) 利用 WRF 模

式模拟长江三角洲区域有无城市的敏感性试验, 发现城市区域有显著的增温, 上海和南京近地面温度增幅超过 4°C, 并且在城市群的下风方向降水增加; 郑益群等 (2013) 利用中尺度模式 (MM5) 研究不同纬度带上城市化对东亚夏季风气候的影响, 指出城市下垫面扩展使得扩展区及其周边地区的降水减少、气温升高, 而由城市扩展激发出的次级大气环流具有较强的区域性特征; Shao et al. (2013) 利用模式 RegCM3 探究城市化对东亚季风的影响, 发现城市下垫面的增加使得在夏季风初期中国东部西南风加强; 可见不少区域模式能模拟出城市化对陆地加热和大气强迫的作用, 并且其影响具有局地性; 而 IPCC AR5 (Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report) 明确指出, 土地利用和土地覆盖的变化会引起局地 and 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。因此近期一些研究者也利用全球模式来分析城市化问题, 邓洁淳和徐海明 (2014) 认为由于近地面对不同程度城市范围扩展的热力响应具有非线性变化, 导致东亚春季低空环流的变化也具有一定的不确定性, 但总体上会减弱长江中下游以南地区的西南气流; Chen and Zhang (2013) 利用全球大气环流模式 NCAR CAM4.0, 通过增加中国东部地区城市百分比来探讨大规模城市化对东亚冬季风的可能影响, 发现中国东部地区城市下垫面发展使得东亚冬季风强度减弱, 年平均风速在城市区域都有所减小。

可见, 大规模城市发展作为影响陆面加热异常的重要因素, 已有一些研究开始关注城市发展对气候及其季风变化的影响, 但目前研究很少涉及到其对大尺度季风环流及气候季节内尺度变化的影响。南海夏季风作为东亚夏季风季节内演变的重要过程之一, 对东亚夏季风的推进过程及中国东部夏季降水异常都有重要影响, 但分析大规模的城市化对

南海夏季风爆发的影响及其机理的研究尚不多见。因此,本文利用高分辨率的 CAM5.1 模式,通过对比中国东部有无城市下垫面模拟试验的结果,研究中国东部城市群下垫面发展对南海夏季风爆发的可能影响,并进一步分析其影响机理。

2 试验方案及资料和方法

2.1 模式简介和试验方案

2.1.1 模式简介

研究采用美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的全球大气环流模式 CAM5.1 (Community Atmosphere Model Version 5.1)。CAM5.1 是公共地球系统模式 CESM (Community Earth System Model) 的一个分量,文中将其与陆面模式 (CLM)、热力学海冰模式 (CICE) 及数据海洋模式 (DOCN) 相耦合来运行,其中陆面模式 CLM 中包含了城市模块。很多学者已利用该模式进行了一些关于城市化问题的模拟,研究表明该模式能对其进行有效的研究 (Oleson et al., 2010; Ma et al., 2015; Deng et al., 2014)。

2.1.2 试验方案

为了研究我国东部城市下垫面发展对南海夏季风爆发的可能影响,本文设计了两个数值试验:

(1) 对比试验 (简称 CTRL): 采用模式默许的地表参数及覆盖类型,其中城市下垫面百分率分布如图 1a; (2) 去除城市试验 (简称 NOURB): 去除了中国东部 (20°~50°N, 100°~125°E) 网格中的城市下垫面 (图 1b),并用对应网格中比重最大的植被覆盖类型代替,其他条件则与控制试验相同。研究选取水平分辨率为 0.9°×1.25°的 CAM5.1 模式,模式垂直方向上采用 σ - p 混合坐标。文中使用英国气象局哈德莱中心 1988~2007 的逐年月平均海温资料 (HadISST; Met Office Hadley Centre sea ice and SST dataset) 作为大气低层海洋边界条件。试验从 1988 年积分至 2007 年共 20 年,取后 15 年 (1993~2007 年) 的模拟结果进行分析,后文给出的差值场均为 CTRL 试验减去 NOURB 试验 15 年平均的结果,用于代表中国东部城市下垫面发展所带来的影响。

2.2 研究资料和方法

2.2.1 资料

本文选用了美国国家环境预报中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 1978~2007 年逐日、逐

月的风场、位势高度场、温度场再分析资料,水平分辨率为 2.5°×2.5°,用于检验模式 CTRL 试验的结果。

2.2.2 大气视热源

利用倒算法计算大气视热源 (何金海等, 2002; 刘伯奇, 2013) Q_1 :

$$Q_1 = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \omega \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \right), \quad (1)$$

其中, $\kappa = R/c_p$, R 和 c_p 分别为干空气气体常数和定压比热, θ 为位温, T 为气温, q 为比湿, $\mathbf{V}$ 水平风向量, $p_0=1000$ hPa, 其他为气象常用符号; 右端圆括号中的三项分别为局地变化项, 水平平流项和垂直输送项; 视热源 Q_1 表示单位时间内单位质量空气的加热率。

对 (1) 式从 $p_t=100$ hPa 到 p_s (地面气压), 整层垂直积分可得

$$\langle Q_1 \rangle = \langle Q_R \rangle + LP + S_H, \quad (2)$$

其中, $\langle Q \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q dp$, P 、 S_H 分别为地面降

水量、单位面积向上输送的感热通量, $\langle Q_R \rangle$ 为辐射加热 (冷却)。可见大气视热源 $\langle Q \rangle$ 由三部分组成: 辐射加热 (冷却)、净的水汽凝结 (降水) 和地面向上的感热通量输送。

2.2.3 全型涡度方程

为探讨加热场和环流场之间的相互作用, 利用吴国雄等 (1999)、刘屹岷等 (1999a, 1999b) 在不考虑大气内部热力结构的变化、热源本身及摩擦耗散的影响, 仅考虑大气视热源 Q_1 情况下, 得到简化的全型涡度方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta + \beta v = \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_1}{\partial z}, \quad (3)$$

其中, ζ 为相对涡度, θ_z 表示位温的垂直分量。

2.2.4 南海夏季风爆发定义

目前已有很多研究从季风区降水、高低空环流以及综合指标等方面定义了南海夏季风的爆发日期。本文从低空环流场的角度出发 (Wang et al., 2004), 用 U_{scs} 代表南海地区 (5°~15°N, 110°~120°E) 850 hPa 的平均纬向风 (下文涉及南海地区均采用这一范围), 定义南海夏季风爆发日期需满足以下条件: (1) 自第 24 候开始, 爆发当候的 $U_{scs} > 0$; (2) 此后连续 4 候 (含爆发候) 中, 至少有 3 候的 U_{scs} 为正值, 且这 4 候的平均 $U_{scs} > 1 \text{ m s}^{-1}$ 。

3 城市下垫面发展对南海夏季风爆发的影响模拟

3.1 南海夏季风爆发阶段模式模拟能力评估

在分析模式试验结果之前, 首先将 CTRL 试验的模拟结果与 NCEP/NCAR 再分析资料进行简单比较。图 2 给出了 CTRL 试验和 NCEP/NCAR 再分析资料 1993~2007 年平均的 4~6 月 850 hPa 风场和位势高度场的逐月演变情况。4 月份, CTRL 试验(图 2a)西太平洋副高脊线控制着中南半岛—南海地区, 孟加拉湾为低值区, 索马里急流以及越赤道气流均未形成, 对比再分析资料结果(图 2d), 发现 CTRL 试验能较好地呈现中低纬度环流的特征, 只是给出的西太平洋副热带高压的位置略微偏西; 到了 5 月份, CTRL 试验中(图 2b)副热带高压略有东撤, 整个中南半岛和南海的南部地区开始受西南气流控制, 出现了索马里急流和东亚地区越赤道气流, 对比再分析资料结果(图 2e), 可知 CAM5.1 模式对副高和印缅槽都有较好地模拟, 只是模拟的越赤道气流的强度较再分析资料偏弱; 6 月份, CTRL 试验中(图 2c)越赤道气流得到进一步加强, 阿拉伯海和孟加拉湾上空的西风气流也随之加强, CTRL 试验结果和再分析资料(图 2f)比较吻合。从风场和位势高度场的逐月演变模拟结果来看, CAM5.1 模式模拟的 CTRL 试验 4~6 月 850 hPa 大气环流场与 NCEP/NCAR 再分析资料是比较一致的。

图 3 给出了 CTRL 试验和 NCEP/NCAR 再分析资料 1993~2007 年 4~6 月平均的 1000 hPa 气温

场。从图 3a 可知, 在 CTRL 试验中南海夏季风爆发前后气温场从西南到东北温度呈现递减趋势, 东亚低湿槽和东亚大槽相对应。在中国低温区域出现在东北地区, 气温小于 20°C, 高温区域在云南及两广地区。而在中南半岛、西太平洋和印度洋区域为广阔的温度高值区。对比再分析资料结果(图 3b), CAM5.1 模式对 1000 hPa 气温场有一定的模拟能力, 其中对我国东亚低湿槽和中高纬度地区气温的模拟效果较好, 但对低纬度地区的模拟能力稍差, 对青藏高原和低纬度地区温度的模拟存在明显偏高的现象。

进一步我们给出 CTRL 试验和 NCEP/NCAR 再分析资料 1993~2007 年南海夏季风爆发候的逐年演变(图 4), 通过比较发现, CAM5.1 对南海夏季风爆发日期具有一定的模拟能力, 其中, 对 2000 年以后模拟的效果较之前好。总体而言, CAM5.1 模式能较好地模拟大尺度环流场和基本要素的气候特征, 并且对东亚夏季风各子系统在季风爆发前后的变化特征均有较好地体现, 因此, 可以用来研究城市化效应对南海夏季风爆发的影响。

3.2 中国东部城市下垫面发展对南海夏季风爆发的影响模拟

春末夏初, 亚洲季风区开始由冬季风向夏季风转换, 大气环流也随之发生明显的季节性调整。为了探究城市下垫面发展对南海夏季风爆发前后环流场的影响, 首先给出了不同试验下 850 hPa 差值风场沿 5°~15°N 平均的时间—经度分布图(图 5)。从图中可以看出, 相比于 NOURB 试验, CTRL 试

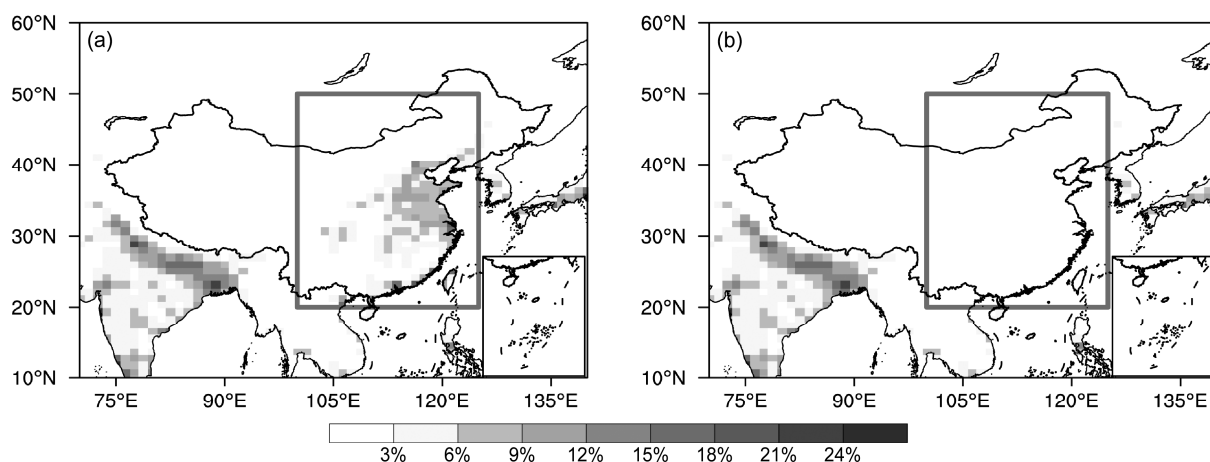


图 1 不同模式试验中城市下垫面百分率分布: (a) CTRL 试验; (b) NOURB 试验

Fig. 1 Distribution of urban land-use percentage in experiments: (a) CTRL run; (b) NOURB run

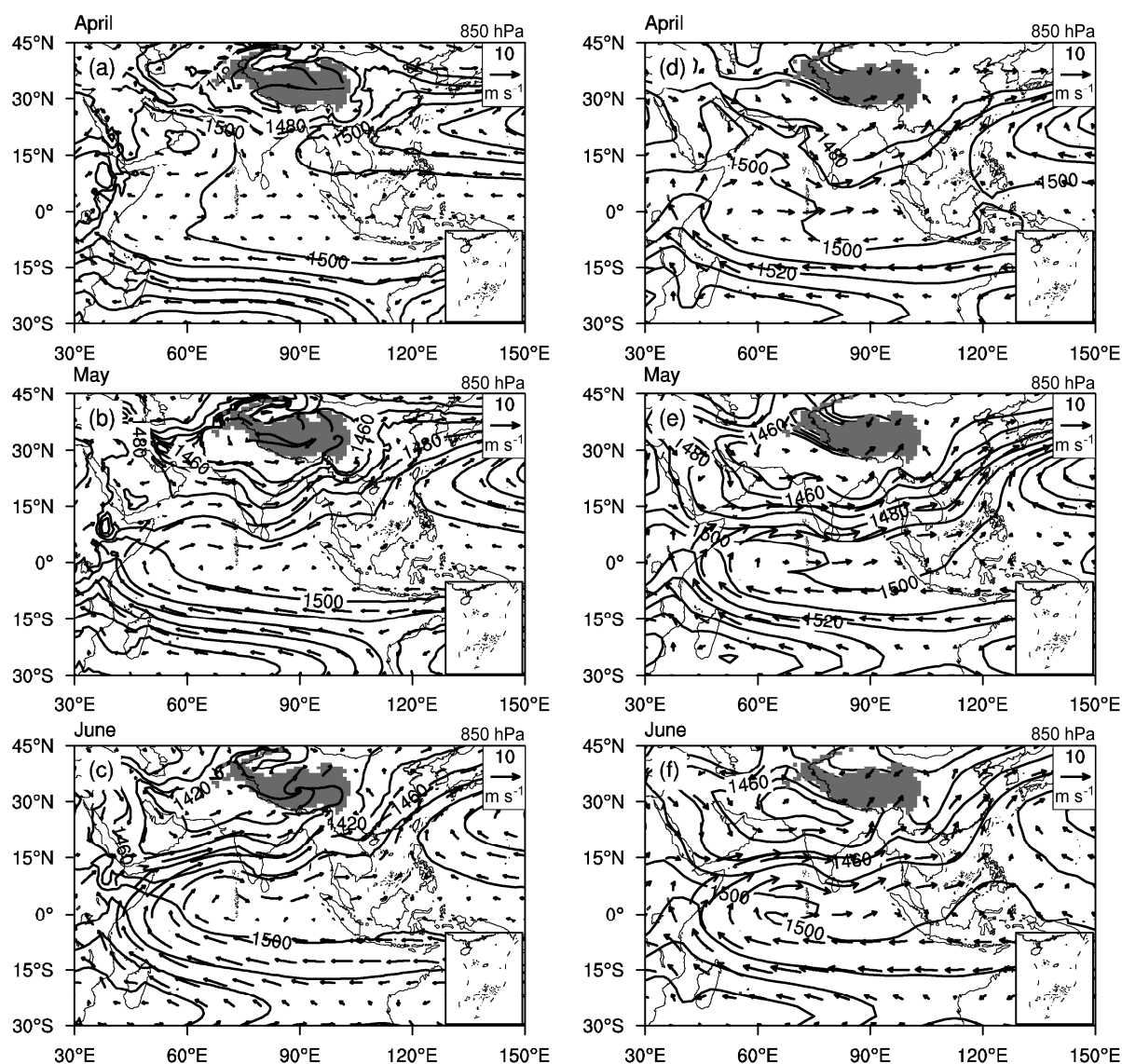


图2 CTRL 试验(左列)和NCEP/NCAR 再分析资料(右列)中4~6月850 hPa 风场(单位: m s^{-1})和位势高度等值线(单位: gpm): (a、d) 4月; (b、e) 5月; (c、f) 6月

Fig. 2 Distribution of monthly mean (April–June) 850-hPa wind (units: m s^{-1}) and geopotential height (units: gpm) from (a–c) CTRL run and (d–f) NCEP/NCAR reanalysis data: (a, d) April; (b, e) May; (c, f) June

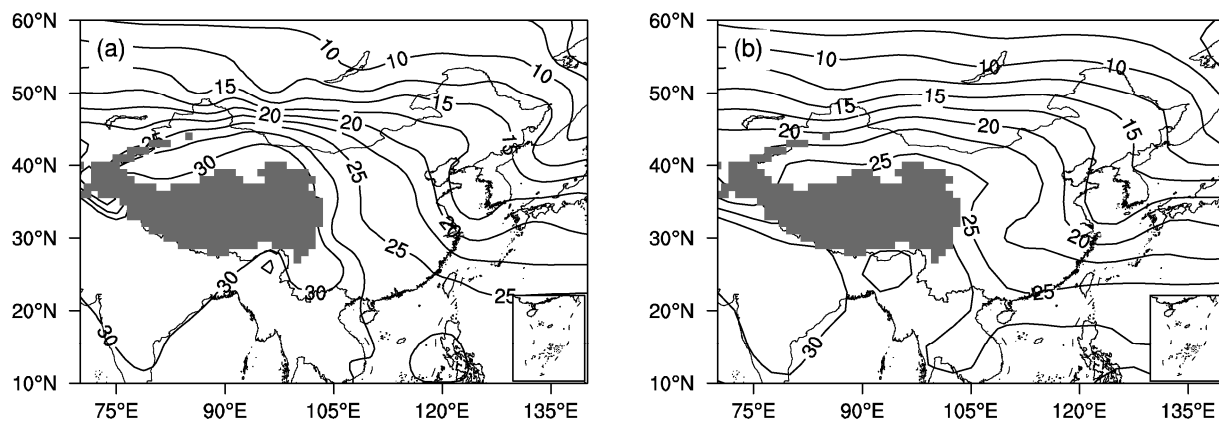


图3 (a) CTRL 试验和(b) NCEP/NCAR 再分析资料中4~6月平均的1000 hPa 气温场(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Distribution of 1000 hPa air temperature averaged from April to June (units: K) from (a) CTRL run and (b) NCEP/NCAR reanalysis data

验中东西风分界线在 5 月上中旬 (5 月 2~3 候) 有一次明显向东扩展的过程, 南海地区出现了显著的西/西南风差值气流。根据 2.2.4 节对南海夏季风爆发的定义, 计算得到 CTRL 和 NOURB 试验南海夏季风爆发的平均日期分别为 5 月 3 候 (27 候) 和 5 月 4 候 (28 候)。同时, 利用高辉等 (2001) 定义的南海夏季风爆发指标, 发现 CTRL 试验和 NOURB 试验南海夏季风爆发时间也依次为 27、28 候, 表明 CTRL 试验较 NOURB 试验南海夏季风提前 1 候爆发。

进一步根据 2.2.4 节定义, 计算 NCEP/NCAR 再分析资料中南海夏季风爆发候的年际变化如图 4。可以看到, 1978~1993 年间南海夏季风的平均爆发日期约为 29.5 候, 1994~2007 年则明显提前至约 27.5 候, 表明 1993 年以后南海夏季风的爆发日期相对上一个年代明显提前约 2 候。值得注意的是, 90 年代以后正值我国东部城市化快速发展阶段, 因此, 城市化和年代际自然变率共同作用导致了近年来南海季风提前爆发, 那么城市化是如何影响南海季风提前爆发? 显然值得进一步分析。

4 城市下垫面发展对南海夏季风爆发影响的可能机理

一般认为季风系统形成主要是海陆热力差异季节变化造成的风系的季节变化 (丁一汇等, 2004)。何金海等 (2004) 提出南海及其附近地区 ($5^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 南北温差在 5 月发生转变, 与南海夏季风建立有内在联系。图 6 给出了

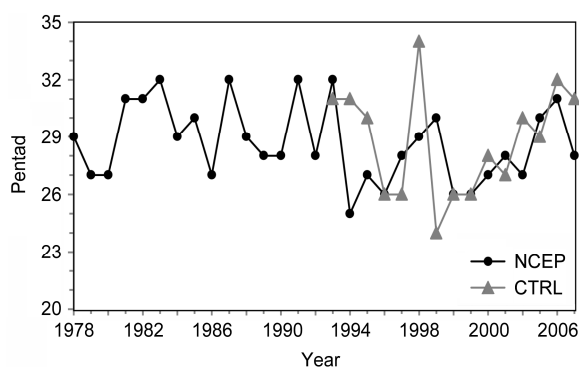


图 4 1978~2007 年南海夏季风爆发候的逐年演变。圆点实线为 NCEP/NCAR 再分析资料的逐年日期变化; 三角实线为 CTRL 试验的逐年日期变化; 虚直线为 NCEP/NCAR 再分析资料的年代际平均日期变化

Fig. 4 SCSSM (South China Sea summer monsoon) onset dates during 1978–2007. Solid line with dots refers to year-by-year change of onset dates from NCEP data, while solid line with triangles refers to change from CTRL run, dashed line refers to interdecadal variation

该区域 500 hPa 南北温差 ($T_{5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}} - T_{20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}}$) 随时间的演变, 图中从 23 候开始, CTRL 试验的南北温差要小于 NOURB 试验, 并且 CTRL 试验于 28 候由正转负, 而 NOURB 试验在 29 候才发生这种转换。因此, CTRL 试验的南北温差转变先于 NOURB 试验, 有利于南海夏季风的提前建立。CTRL 试验较 NOURB 试验在 1000 hPa 南北温差的转换进程也是提前的 (图略)。同时, 钱永甫等 (2004) 指出, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 中高纬东亚大陆的加热, 致使大陆高压首先在中国东部减弱而形成低压, 从而引导西南气流到达南海地区。他们认为中国东部区域 ($25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 陆面的迅速加热对南海夏季风爆发早晚有关键作用, 而该区域正好是我国东部城市密集区 (图 1a)。图 6 给出了该区域 ($25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) CTRL 和 NOURB 试验平均海平面气压差值随时间的演变, 可以发现, 从 23 候开始, 海平面气压差值一直为负值, 即 CTRL 试验中该地区的海平面气压一直小于 NOURB 试验。因此, 城市下垫面发展使得南海及其附近地区南北温差提前逆转并伴随中国东部区域海平面气压降低, 这有利于引导西南气流提前到达南海地区, 可能引起南海夏季风提前建立。

从图 6 我们可以发现, 南海南北温差和陆地区域海平面气压差值在 25~27 候差异最显著, 那么

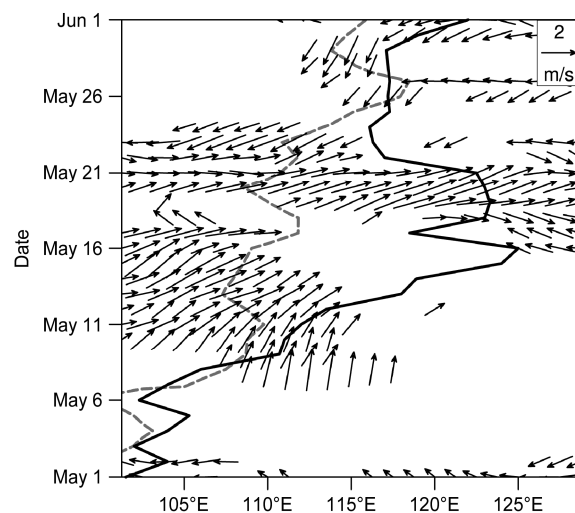


图 5 850 hPa 差值风场沿 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 平均的时间—经度剖面图 (CTRL 减 NOURB; 单位: m s^{-1})。实线和虚线分别为 CTRL 和 NOURB 试验 850 hPa 东西风分界线

Fig. 5 Time–longitude cross section averaged over $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$ for the 850 hPa wind field difference between the CTRL run and NOURB run (CTRL minus NOURB, units: m s^{-1}). Solid line and dashed line correspond to the zero zonal wind boundary lines in the CTRL run and NOURB run, respectively

由城市下垫面发展导致的陆面热力状况的改变对环流场有何影响呢? 我们给出了 CTRL 与 NOURB 试验 25~27 候 850 hPa 的南海地区附近的风场差值分布图(图 7), 从图中我们可以看到, 在 25 候(图 7a), 南海地区附近存在一个弱的气旋性异常环流, 西南差值气流较弱; 26 候(图 7b), 从中南半岛南部到南海南部和中部都存在西南差值气流, 并在南海北部存在一个闭合的气旋性异常环流, 西南差值气流加强; 27 候(图 7c) 西南差值气流继续北推, 并延伸到整个南海地区, 强度进一步发展。而由图 2e 可知, 5 月份南海地区附近 850 hPa 盛行西南气流, 表明在南海夏季风爆发之前, 中国东部城市下垫面发展使得从中南半岛到南海地区 CTRL 试验较 NOURB 试验存在西南气流的加强, 并为该地区提供更充沛的水汽条件。

同时, 图 8 进一步给出了 CTRL 和 NOURB 试验 25~27 候南海地区附近的降水率差值分布图, 从图中可知, 26~27 候 CTRL 试验在从中南半岛到南海地区的降水率整体上大于 NOURB 试验。其中 25 候(图 8a) CTRL 和 NOURB 试验在中南半岛降水差异为负, 而在南海地区降水的差异很小; 26 候(图 8b) CTRL 较 NOURB 试验降水略有增加; 而 27 候(图 8c) 整个中南半岛到南海地区都呈现出降水的正异常。可见, 敏感性试验结果表明: 中国东部城市化发展可能引起中南半岛到南海地区西南气流加强, 出现中南半岛到南海地区降水增加。

降水过程会伴随着凝结潜热加热增加, 基于何金海等(2006)的研究: 4 月中旬以后, 凝结潜热加热(Q_{LH})是视热源加热(Q_1/c_p)的主要贡献者。图 9 给出了 23~29 候中南半岛及其附近地区($5^\circ\sim$

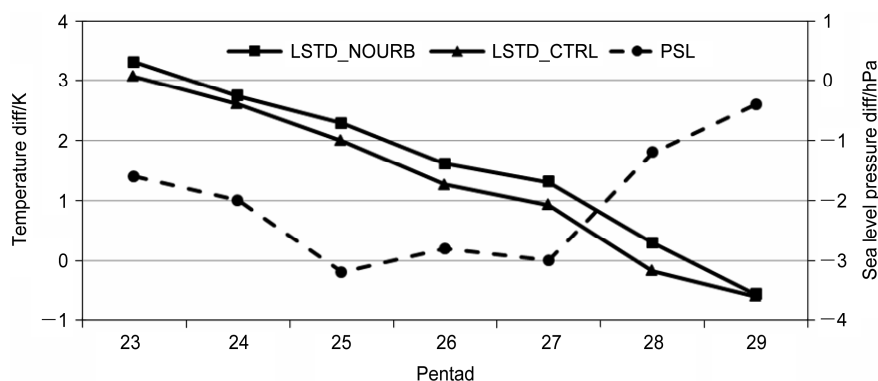


图 6 南海及其附近地区 500 hPa 南北温差 (LSTD) ($T_{5^\circ S-5^\circ N}-T_{20^\circ-30^\circ N}$) (单位: K) 和中国东部区域 ($25^\circ\sim 40^\circ N$, $110^\circ\sim 120^\circ E$) 平均海平面气压 (SLP) 差值 (CTRL 减 NOURB) (单位: hPa) 的时间演变图

Fig. 6 Time series of 500-hPa land-sea temperature (units: K) difference ($T_{5^\circ S-5^\circ N}-T_{20^\circ-30^\circ N}$) near the South China Sea, and sea level pressure difference (CTRL minus NOURB) (units: hPa) averaged over eastern China ($25^\circ\sim 40^\circ N$, $110^\circ\sim 120^\circ E$) from pentad 23 to pentad 29

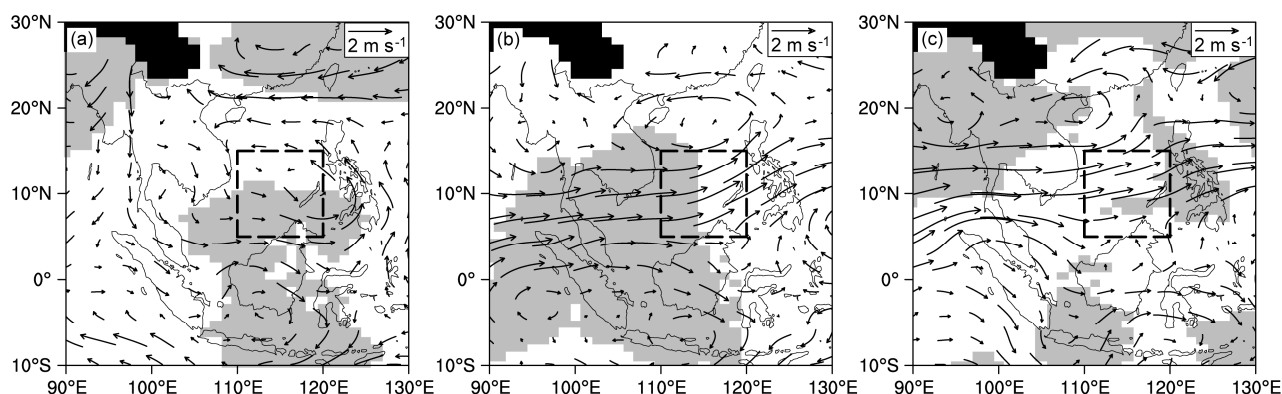


图 7 850 hPa 南海地区附近的风场差值分布图 (CTRL 减 NOURB; 单位: $m s^{-1}$): (a) 25 候; (b) 26 候; (c) 27 候。虚线方框区域表示南海地区; 阴影区域表示通过 90% 信度检验的区域

Fig. 7 Distribution of 850-hPa wind difference between the CTRL run and NOURB run near the South China Sea (CTRL minus NOURB, units: $m s^{-1}$) [(a-c) refer to pentads 25, 26, and 27, respectively; the area shown in the box is the South China Sea; shaded regions are significant at the 90% confidence level, based on the Student's t -test]

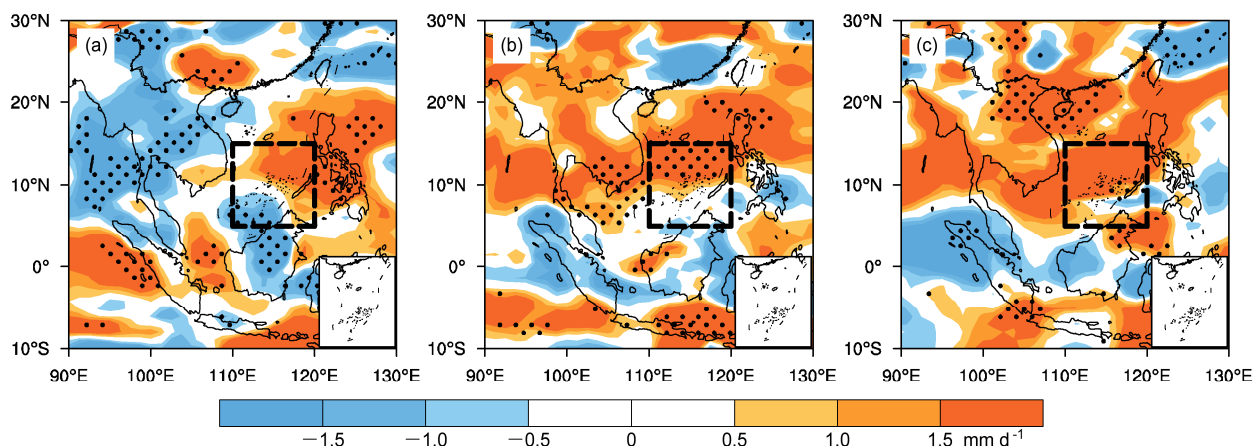


图8 南海地区附近的降水率差值分布图 (CTRL 减 NOURB; 单位: mm d^{-1}): (a) 为 25 候、(b) 为 26 候、(c) 为 27 候; 虚线方框区域表示南海地区; 通过 90% 信度检验的区域用黑色圆点表示

Fig. 8 Distribution of the precipitation rate difference between the CTRL run and NOURB run near the South China Sea (CTRL minus NOURB) (units: mm d^{-1}) [(a-c) refer to pentads 25, 26, and 27, respectively; the area shown in the box is the South China Sea; dotted regions are significant at the 90% confidence level, based on the Student's *t*-test)

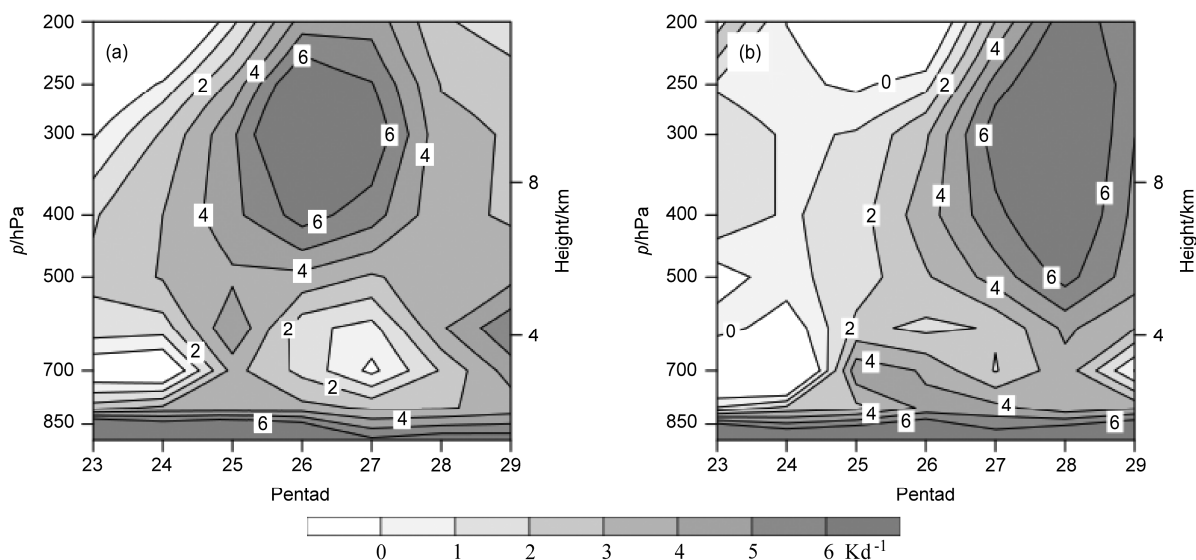


图9 中南半岛及其附近地区 ($5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 上空 Q_1/c_p 的时间—高度剖面图 (单位: K d^{-1}): (a) CTRL 试验; (b) NOURB 试验

Fig. 9 Time-height cross section of Q_1/c_p averaged over the South China Sea ($5^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) (units: K d^{-1}): (a) CTRL run; (b) NOURB run

30°N , $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 上空视热源加热的时间—高度剖面图, 可以看到: CTRL 试验中凝结潜热加热中心 (大于 4 K d^{-1}) 出现的时间在 25~26 候, 而 NOURB 试验在 26 候以后才出现。根据吴国雄等 (1999) 推导的全型涡度方程[见公式 (3)], 考虑到时间尺度较长时, 在最大潜热热源的上方, 方程 (3) 简化为

$$\beta v \propto \frac{f + \zeta}{\theta_z} \frac{\partial Q_{LH}}{\partial z} < 0$$

可见 β 效应将使得热源区上方出现偏北风异常, 在热源西侧出现反气旋式异常环流, 在热源东

侧出现气旋式异常环流。以 26 候为例, 在 200 hPa (图 10a), 中南半岛以西地区出现反气旋性异常环流, 它有利于南亚高压的北跳及加强。这一过程在 200 hPa 流场上也有清楚表现, 图 11 中 CTRL 试验南亚高压较 NOURB 试验位置偏北、范围更大, 而与之相伴随的是孟加拉湾南部上空出现“喇叭口”状流场, 高层抽吸作用加大, 对应高空辐散强度超过 $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。图 11a 中南海北部地区也存在高层辐散中心, 且 600 hPa 上明显的上升运动, 这种高层辐散和中层上升气流之间的密切耦合表明在南海夏季风爆发前, CTRL 试验南海地区低层存在明

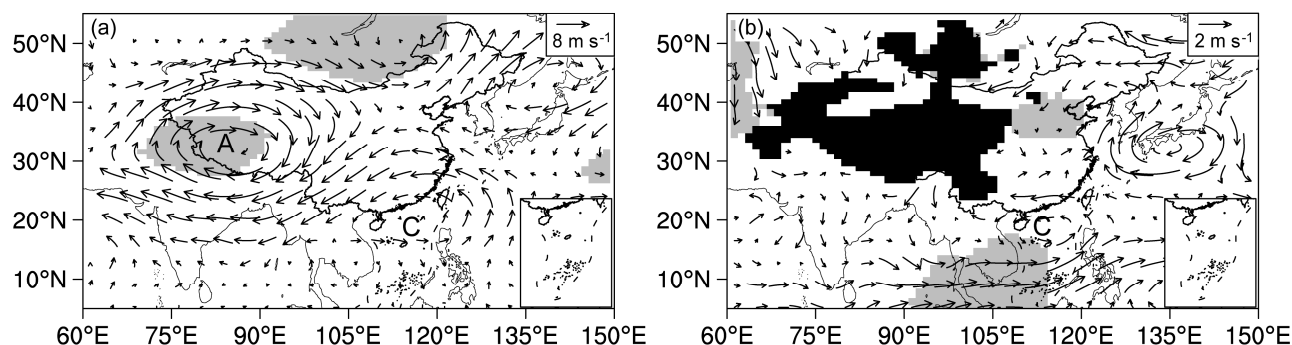


图 10 26 候 200 hPa 和 850 hPa 风场差值分布图 (CTRL 减 NOURB; 单位: m s^{-1}): (a) 200 hPa; (b) 850 hPa。阴影区域表示通过 90% 信度检验的区域

Fig. 10 Distribution of the (a) 200 hPa and (b) 850 hPa wind difference between the CTRL run and NOURB run in pentad 26 (CTRL minus NOURB, units: m s^{-1}). Shaded regions are significant at the 90% confidence level, based on the Student's t -test

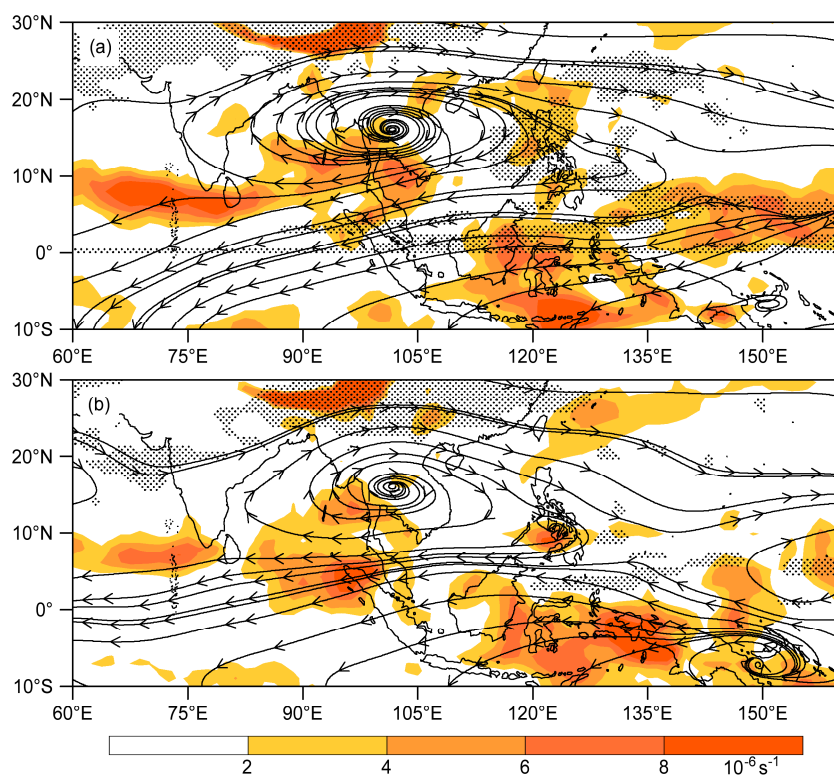


图 11 26 候 200 hPa 流场、散度场 (单位: 10^{-6}s^{-1}) 和 600 hPa 上升运动 (单位: Pa s^{-1}): (a) CTRL 试验; (b) NOURB 试验。阴影区表示 200 hPa 散度场, 加黑色圆点区域表示 600 hPa 上升运动小于 -0.05Pa s^{-1} 的区域

Fig. 11 Distribution of the flow field and divergence field at 200 hPa and upward movement at 600 hPa in pentad 26: (a) CTRL run; (b) NOURB run (shaded regions refer to the divergence field at 200 hPa; dotted regions stand for 600-hPa upward movement with values less than -0.05Pa s^{-1})

显的高层抽吸作用,这种抽吸作用使得南海地区 850 hPa 表现为气旋性异常环流 (见图 10b), 有利于西太平洋副热带高压提前减弱东撤。而 NOURB 试验 (图 11b) 在南海地区没有明显的高层抽吸作用。可见这种与南亚高压北跳加强有关的高层抽吸作用有助于季风对流的建立和西太平洋副高的减弱

东撤, 为南海季风爆发提供了有利条件, 最终导致南海夏季风提前爆发。

综上所述可见: 从春季到夏季太阳辐射不断增强, 城市下垫面升温更快, 使得南海及其附近地区南北温差提前逆转并伴随中国东部区域海平面气压降低, 导致中南半岛到南海地区西南气流加强,

出现中南半岛到南海地区降水增加,由此带来凝结潜热的垂直变化,而其强迫出的异常环流,促进了南亚高压的加强及提前北跳,而与南亚高压北跳加强有关的高层抽吸作用有助于季风对流的建立和西太平洋副高的减弱东撤,形成了有利于南海夏季风爆发的高低层环流条件,导致南海夏季风提前爆发。

5 结论

本文利用高分辨率的 CAM5.1 模式,通过对比中国东部有无城市下垫面的模拟结果,探讨我国东部地区城市化发展对南海夏季风爆发的影响及其可能机制。

(1) 中国东部有无城市下垫面的敏感性试验发现:控制试验和去除城市试验中南海夏季风爆发的日期分别为 5 月 3 候和 5 月 4 候,表明中国东部地区的大规模城市群发展可能使南海夏季风提前 1 候爆发。

(2) 模拟试验结果分析表明,在南海夏季风爆发之前,中国东部城市群发展引起的陆面增温,使得南海及其附近地区南北温差提前逆转并伴随中国东部区域海平面气压降低,导致中南半岛到南海地区西南气流加强,出现中南半岛到南海地区降水增加,由此带来凝结潜热的垂直变化,其强迫出的异常环流,促进了南亚高压的加强和提前北跳,伴随的高层抽吸作用有助于季风对流的建立和西太平洋副高的减弱东撤,形成了有利于南海夏季风爆发的高低层环流条件,导致南海夏季风提前爆发。

参考文献 (References)

- Chen H S, Zhang Y. 2013. Sensitivity experiments of impacts of large-scale urbanization in East China on East Asian winter monsoon [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (7): 809–815, doi:10.1007/s11434-012-5579-z.
- Chen L X, Li W, Zhao P, et al. 2001. On the process of summer monsoon onset over East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 15 (4): 436–449, doi:10.3969/j.issn.0894-0525.2001.04.005.
- Christidis N, Stott P A, Hegerl G C, et al. 2013. The role of land use change in the recent warming of daily extreme temperatures [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (3): 589–594, doi:10.1002/grl.50159.
- 邓洁淳, 徐海明. 2014. 中国东部地区城市范围扩展对东亚春季气候的可能影响 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, (6): 748–758.
- Deng Jiechun, Xu Haiming. 2014. Possible impact of urbanization extension over eastern China on spring climate in East Asia [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), (6): 748–758, doi:10.13232/j.cnki.jnju.2014.06.003.
- Deng J C, Xu H M, Ma H Y, et al. 2014. Numerical study of the effect of anthropogenic aerosols on spring persistent rain over eastern China [J]. *J. Meteor. Res.*, 28 (3): 341–353.
- 丁一汇, 李崇银, 何金海, 等. 2004. 南海季风试验与东亚夏季风 [J]. *气象学报*, 62 (5): 561–586.
- Ding Yihui, Li Chongyin, He Jinhai, et al. 2004. South China Sea monsoon experiment (SCSMEX) and the East-Asian monsoon [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (5): 561–586, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.005.
- Fu C B. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon [J]. *Global and Planetary Change*, 37 (3–4): 219–229, doi:10.1016/S0921-8181(02)00207-2.
- 高辉, 何金海, 谭言科, 等. 2001. 40 a 南海夏季风建立日期的确定 [J]. *南京气象学院学报*, 24 (3): 379–383.
- Gao Hui, He Jinhai, Tan Yanke, et al. 2001. Definition of 40-year onset date of South China Sea summer monsoon [J]. *J. Nanjing Inst. Meteor.* (in Chinese), 24 (3): 379–383, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2001.03.012.
- 何金海, 温敏, 施晓晖, 等. 2002. 南海夏季风建立期间副高带断裂和东撤及其可能机制 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 38 (3): 318–330.
- He Jinhai, Wen Min, Shi Xiaohui, et al. 2002. Splitting and eastward withdrawal of the subtropical high belt during the onset of the South China Sea summer monsoon and their possible mechanism [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), 38 (3): 318–330, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2002.03.006.
- 何金海, 王黎娟, 徐海明, 等. 2004. 南海夏季风建立的气候特征及其机制的讨论 [J]. *新疆气象*, 27 (1): 1–7.
- He Jinhai, Wang Lijuan, Xu Haiming, et al. 2004. Climatic features of SCS summer monsoon onset and its possible mechanism [J]. *Bimonthly of Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 27 (1): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1002-0799.2004.01.001.
- 何金海, 温敏, 丁一汇, 等. 2006. 亚澳“大陆桥”对流影响东亚夏季风建立的可能机制 [J]. *中国科学 D 辑 地球科学*, 36 (10): 959–967.
- He Jinhai, Wen Min, Ding Yihui, et al. 2006. Possible mechanism of the effect of convection over Asian–Australian “land bridge” on the East Asian summer monsoon onset [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(11): 1223–1232, doi:10.3321/j.issn:1006-9267.2006.10.008.
- He J H, Ju J H, Wen Z P, et al. 2007. A review of recent advances in research on Asian monsoon in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24 (6): 972–992, doi:10.1007/s00376-007-0972-2.
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系 [J]. *大气科学*, 29 (1): 20–36.
- Huang Ronghui, Gu Lei, Xu Yuhong, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the east Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the tropical western Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*. (in Chinese), 29 (1): 20–36, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.01.04.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Kajikawa Y, Wang B. 2012. Interdecadal change of the South China Sea summer monsoon onset [J]. *J. Climate*, 25 (9): 3207–3218, doi:10.1175/JCLI-D-11-00207.1.
- Kalnay E, Cai M. 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate [J]. *Nature*, 423 (6939): 528–531, doi:10.1038/nature01675.
- Li Y, Zhu L J, Zhao X Y, et al. 2013. Urbanization impact on temperature

- change in China with emphasis on land cover change and human activity [J]. *J. Climate*, 26 (22): 8765–8780, doi:10.1175/JCLI-D-12-00698.1.
- 刘伯奇. 2013. 南亚高压的生成和形态变异对亚洲夏季风爆发的影响 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文, 193pp. Liu Boqi. 2013. Formation and pattern variations of the South Asian high and their impacts on the Asian summer monsoon onset [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 193pp.
- Liu P, Qian Y F, Huang A N. 2009. Impacts of land surface and sea surface temperatures on the onset date of the South China Sea summer monsoon [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 493–502, doi:10.1007/s00376-009-0493-2.
- 刘鹏, 钱永甫, 严蜜. 2011. 东亚下垫面热力异常与南海夏季风爆发早晚和强弱的关系 [J]. *热带气象学报*, 27 (2): 209–218. Liu Peng, Qian Yongfu, Yan Mi. 2011. The relation between the underlying surface thermal anomalies and the onset and intensity of the South China Sea summer monsoon [J]. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 27 (2): 209–218, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.02.009.
- 刘屹岷, 刘辉, 刘平, 等. 1999a. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 II: 陆面感热与东太平洋副高 [J]. *气象学报*, 57 (4): 385–396. Liu Yimin, Liu Hui, Liu Ping, et al. 1999a. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part II: Land surface sensible heating and east Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 57 (4): 385–396, doi:10.11676/qxxb1999.037.
- 刘屹岷, 吴国雄, 刘辉, 等. 1999b. 空间非均匀加热对副热带高压形成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高 [J]. *气象学报*, 57 (5): 525–538. Liu Yimin, Wu Guoxiong, Liu Hui, et al. 1999b. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part III: Condensation heating and South Asia high and western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 57 (5): 525–538, doi:10.11676/qxxb1999.051.
- Ma H Y, Jiang Z H, Song J, et al. 2015. Effects of urban land-use change in East China on the East Asian summer monsoon based on the CAM5.1 model [J]. *Clim Dyn.*, 2015: 1–13, doi:10.1007/s00382-015-2745-4.
- Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2011. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006 [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50 (4): 806–825, doi:10.1175/2010JAMC2513.1.
- Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. 2010. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (3): L03701, doi:10.1029/2009GL042194.
- Pitman A J, de Noblet-Ducoudré N, Avila F B et al. 2012. Effects of land cover change on temperature and rainfall extremes in multi-model ensemble simulations [J]. *Earth System Dynamics*, 3 (2): 597–641, doi:10.5194/esdd-3-597-2012.
- 钱永甫, 江静, 张艳, 等. 2004. 亚洲热带夏季风的首发地区和机理研究 [J]. *气象学报*, 62 (2): 129–139. Qiang Yongfu, Jiang Jing, Zhang Yan, et al. 2004. The earliest onset area of the tropical Asian summer monsoon and its mechanisms [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (2): 129–139, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.02.001.
- Shao H Y, Song J, Ma H Y. 2013. Sensitivity of the East Asian summer monsoon circulation and precipitation to an idealized large-scale urban expansion [J]. *J. Meteor. Res. Japan*, 91 (2): 163–177, doi:10.2151/jmsj.2013-205.
- Wan H C, Zhong Z. 2014. Ensemble simulations to investigate the impact of large-scale urbanization on precipitation in the lower reaches of Yangtze River valley, China [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140: 258–266, doi:10.1002/qj.2125.
- Wang B, Zhang Y S, Lu M M. 2004. Definition of South China Sea monsoon onset and commencement of the East Asia summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (4): 699–710, doi:10.1175/2932.1.
- 王东东, 朱彬, 江志红, 等. 2014. 硫酸盐气溶胶直接辐射效应对东亚副热带季风进程的影响 [J]. *大气科学*, 38 (5): 897–908. Wang Dongdong, Zhu Bin, Jiang Zhihong, et al. 2014. Direct effect of sulfate aerosols on the process of the East Asian subtropical monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (5): 897–908, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13193.
- Wang Y L, Feng J M, Gao H. 2014. Numerical simulation of the impact of land cover change on regional climate in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 115 (1–2): 141–152, doi:10.1007/s00704-013-0879-z.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘平. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压带形成和变异的影响 I: 尺度分析 [J]. *气象学报*, 57 (3): 257–263. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Liu Pin. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical high. Part I: Scale analysis [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 57 (3): 257–263, doi:10.11676/qxxb1999.025.
- 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的新进展 [J]. *气象学报*, 62 (5): 528–540. Wu Guoxiong, Mao Jiangyu, Duan Anmin, et al. 2004. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (5): 528–540, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.05.002.
- 叶嘉安, 徐江, 易虹. 2006. 中国城市化的第四波 [J]. *城市规划*, 30 (增刊): 13–18. Ye Jiaan, Xu Jiang, Yi Hong. 2006. The fourth wave of urbanization in China [J]. *City Planning Review* (in Chinese), 30 (S1): 13–18.
- 郑益群, 贵志成, 强学民, 等. 2013. 中国不同纬度城市群对东亚夏季风气候影响的模拟研究 [J]. *地球物理学进展*, 28 (2): 554–569. Zheng Yiqun, Gui Zhicheng, Qiang Xuemin, et al. 2013. Simulation of the impacts of urbanization in different areas of China on East Asia summer monsoon climate [J]. *Progress Geophys.* (in Chinese), 28 (2): 554–569, doi:10.6038/pg20130204.
- 周莉, 江志红, 李肇新, 等. 2015. 中国东部不同区域城市群下垫面变化气候效应的模拟研究 [J]. *大气科学*, 39 (3): 596–610. Zhou Li, Jiang Zhihong, Li Zhaoxin, et al. 2015. Numerical simulation of urbanization climate effects in regions of East China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (3): 596–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14157.