

黎伟标, 杜尧东, 王国栋, 等. 2009. 基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1259 - 1266.
Li Weibao, Du Yaodong, Wang Guodong, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1259 - 1266.

基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究

黎伟标¹ 杜尧东² 王国栋¹ 吴美双¹ 许吟隆³

1 中山大学大气科学系/季风与环境研究中心, 广州 510275

2 广东省气候与农业气象中心, 广州 510080

3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要 利用卫星观测 TRMM 降水以及 QuikSCAT 风场资料, 对珠江三角洲地区及临近区域降水的分布特征进行了探讨, 结果表明: (1) 同一纬度相比, 珠江三角洲城市群所处的区域降水明显多于其周边地区, 表明了城市化可能会使所处区域的降水增加; (2) 珠江三角洲城市群所处区域降水的增加存在明显的季节变化特征, 在前汛期城市所处区域的降水增多较其它季节明显; (3) 珠江三角洲城市化对降水的影响与风场的分布密切相关, 降水增多的区域通常位于城市群所在之处及其下风方向的邻近地区; (4) 珠江三角洲城市化使城市群所处区域的降水时次减少, 而降水强度则加强; (5) 珠江三角洲城市群的天气、气候效应只对对流性降水产生影响, 而层状降水的分布则与城市群的位置没有明显关联。

关键词 珠江三角洲 城市化 降水 卫星探测资料

文章编号 1006 - 9895 (2009) 06 - 1259 - 08

中图分类号 P463

文献标识码 A

Urbanization Effects on Precipitation over the Pearl River Delta Based on Satellite Data

LI Weibao¹, DU Yaodong², WANG Guodong¹, WU Meishuang¹, and XU Yinlong³

1 *Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275*

2 *Climatic and Agrometeorological Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080*

3 *Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*

Abstract The urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta area based on TRMM and QuikSCAT data are studied. It is found that: 1) The Pearl River Delta area is a rainfall centre where there is more precipitation than its surrounding area. It is suggested that the urbanization may result in the increase in precipitation over the Pearl River Delta area. 2) The increase in precipitation over the Pearl River Delta area exhibits significant seasonal variabilities. The urbanization-induced precipitation is most remarkable during the first rainy season over South China. 3) The urbanization-induced precipitation is closely related to the wind field. The rainfall centre is located over the leeward area of the city group. 4) The urbanization leads to the strengthening in the intensity of precipitation and the reduction in the rainfall frequency over the Pearl River Delta area. 5) Urbanization seems to affect signifi-

收稿日期 2008 - 06 - 23, 2009 - 04 - 08 收修定稿

资助项目 国家“973”项目 2009CB421404, 国家科技支撑计划项目 2007BAC03A02, 中国气象局气候变化专项项目 CCSF2007-45

作者简介 黎伟标, 男, 1965 年出生, 副教授, 博士, 研究方向: 热带气象学和气候学。E-mail: eeslwb@mail.sysu.edu.cn

cantly the convection rainfall rather than the stratiform rainfall.

Key words Pearl River Delta, urbanization, precipitation, satellite data

1 引言

政府间气候变化委员会 (IPCC) 早在 2001 年完成出版的第三次评估报告 (IPCC, 2001) 中就已经指出, 根据地面气象仪器观测结果, 1860 年以来, 全球平均温度升高了 $0.6 \pm 0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 这种变暖是由自然的气候波动和人类活动共同引起的; IPCC 在 2007 年发布的第四次评估报告 (Trenberth et al., 2007) 则更明确地指出, 全球变暖很可能是由人类活动所造成的。我国增暖趋势与全球增暖大体一致 (翟盘茂等, 1997; 江志红等, 1999; 胡桂芳等, 2004; 娄德君等, 2004), 但是具有明显的季节变化特征和不同的地域特征 (任福民等, 1998; 廖启龙, 1998)。这种气候变化的区域性特征, 显然与不同地区的局地气候因子有关。城市化因为改变了局地的动力和热力学特征, 因而成为了日益引起关注的局地天气、气候因子。

珠江三角洲是我国的三大经济圈之一。自改革开放以来, 珠江三角洲经济的年均增长率达到 16% 以上, 大大高于同期全国年均增长和广东省年均增长的水平。据中华人民共和国国家发展和改革委员会公布的数据, 2005 年, 珠江三角洲都市经济圈 9 个地级市的国内生产总值 (GDP) 为 18116.74 亿元人民币, 约占中国大陆经济总量的 9.2%。

实际上, 经济的飞速发展是与快速的城市化进程相伴随的。城市化的过程中, 除了污染物排放对环境方面所造成的影响外, 由于下垫面动力学、热力学性质以及大气成分的改变, 对局地天气、气候的影响也是不容忽视的。

过去关于珠江三角洲城市化效应的研究大多集中于环境污染 (谷德军等, 1999) 以及热岛效应方面 (曾侠等, 2004; 范绍佳等, 2005)。近年来, 由于灰霾天气频袭珠江三角洲地区, 人们开始更多关注珠江三角洲城市化对当地灰霾天气的影响 (刘爱君等, 2004)。2004 年广州市还在全国率先开展“珠江三角洲城市群陆气相互作用与大气灰霾科学实验”, 对城市化所造成的大气灰霾现象进行观测研究。目前, 尚未看到有关珠江三角洲城市化效应对降水影响方面的研究。

城市化除了造成城市热岛效应以及大气污染 (灰霾) 外, 它的气候效应应该是多方面的。城市化所造成的改变至少在以下三个方面与局地气候有关: (1) 城市化改变了下垫面的动力学特性, 已有的研究表明, 城市建筑群对地表粗糙度会产生影响 (解以扬等, 2004); (2) 城市化改变了下垫面以及城市上空的热力学特性, 除了下垫面热力学性质的改变外, 城市化还使各种废、热气排放量不断增加, 导致城市“热岛效应”的气候特征 (周淑贞, 1985); (3) 城市化使其上空成云致雨的凝结核的状况发生了改变, 城市化所产生的大量悬浮粒子可能使得水汽的凝结核有所增加。这些改变, 会对局地的诸多气候因子 (如温度、降水等) 产生影响。我国学者对长江三角洲、北京、东北以及西北地区城市化的气候效应进行了研究 (赵宗慈, 1991; 李天杰, 1995; 程胜龙, 2005; 吴息等, 2000; 郭家林等, 2005; 任春艳等, 2006; 孙继松等, 2007), 初步的研究成果表明, 城市化不仅对气温产生影响, 还对降水产生重要的影响。如关于北京地区城市化对降水的影响, 吴息等 (2000) 的研究结果表明, 由于城市的热力作用和动力作用, 城市效应对下风区的短历时降水雨量增加影响最明显, 而在市中心, 短历时降水暴雨的发生概率和强度增加最为显著; 孙继松等 (2007) 最近则指出, 北京地区城市化热岛效应通过不同季节城乡间温度梯度的变化对降水的分布有调节作用。对其它城市群的初步研究结果也表明, 城市化对区域降水有“增雨效应” (李天杰, 1995; 任春艳等, 2006)。最近, 蒙伟光等 (2007) 对珠江三角洲城市化对强雷暴天气过程的影响进行了数值模拟研究, 结果表明, 城市化对珠江三角洲地区的强雷暴天气有重要的影响, 城市化的“热岛效应”以及城区粗糙度增大引起的低层辐合增强有可能引起雷暴天气过程的加强。Chen 等 (2007) 最近还指出, 城市化效应使得台北地区午后和傍晚的雷暴频率增加了 67%。

关于城市化的气候效应, 国外学者也进行了众多的研究。从 20 世纪 80 年代开始, 国外的学者就针对城市化对气温及降水的影响进行了众多的研究 (Rao, 1980; Karl et al., 1988; Shepherd, 2005),

大多数的研究指出城市化会造成“热岛效应”并且对降水产生影响。尽管 IPCC (2001) 的报告强调的是人类活动对全球气候变化的影响以及气候的自然变化,但是近年来所发现的一些证据表明,城市化效应在某些地区造成的气候响应是十分显著的。例如, Zhou et al. (2004) 对中国东、南部地区气候变暖幅度的研究发现,1970 年代末以来,城市化对这些地区造成的平均气温增温速率达到了 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。韩国的一项研究也证明城市化和工业化是造成韩国 50 多年间平均气温升高的主要因素,其对地区增暖的贡献在某些季节里甚至超过了地区气候变化的影响幅度 (Chung et al., 2004)。由于数值模式以及数值预报业务的蓬勃发展,最近国外关于城市化的气候效应的研究多集中于探讨在数值模式中如何将城市化效应参数化的问题 (Sugawara et al., 2001; Grimmond et al., 2002; Jericevic et al., 2006)。此外,近年来还有国外学者 (Shepherd, et al., 2002) 利用卫星观测的降水资料 TRMM 分析城市化对降水的影响。

从上述国内外的研究情况来看,城市化气候效应是区域气候变化不可或缺的重要因子。珠江三角洲作为我国最大的城市群之一,它地处气候系统错综复杂的热带季风区,城市化在该区域造成的天气、气候效应,特别是珠江三角洲城市化对降水影响的规律性,对此目前尚缺乏应有的了解。以往的研究大多用雨量筒观测的降水量进行研究,本文将利用卫星观测 TRMM 降水以及 QuikSCAT 风场资料,对珠江三角洲地区城市化对降水的影响进行探讨,通过本文的研究,希望能找出珠江三角洲城市化对区域降水影响的规律性,为天气、气候变化的预测提供有用的线索。

2 资料介绍

以往关于城市化对降水影响的研究大多用雨量筒观测的降水量进行,而站点观测的降雨量往往受测站的空间分布的制约,并且受测站的变迁或者测站周围环境的变迁以及下垫面地形等诸多因素影响,往往难以把城市化的降水效应加以区分。利用卫星探测资料对城市化的区域气候效应进行研究,有着其独特的优点,如:卫星探测可以在较长一段时期内使用同一仪器对同一区域进行观测,资料的相对可比较性强、分布均匀一致性好,便于对城市

及其周边区域的降水情况进行比对;卫星资料则是对一定视场面积内的取样平均值,具有较好的区域代表性;卫星探测可以区分对流和层状等不同性质的降水,等等。本文将利用以下几种卫星探测资料对珠江三角洲及其周边的降水特征进行对比分析。

(1) 1998~2007 年 TRMM 3B43 月平均降水资料(简称 3B43 资料) 热带降水测量卫星测雨雷达 (TRMM) 是第一部星载测雨雷达,该卫星于 1997 年 11 月 28 日发射,携带有世界第一个星载降雨雷达 PR 和微波成像仪 TMI,首次实现对降水三维结构的探测,具有较高水平分辨率和垂直分辨率,TRMM 是卫星遥感全球降水观测的转折点。本文使用的是 TRMM 3B43 月平均降水资料,该资料结合了 TRMM 的降水观测、CAMS (Climate Assessment and Monitoring System) 的降水数据以及 GPCC (Global Precipitation Climatology Centre) 全球雨量筒的观测分析数据,空间分辨率达到了 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,基本上可以满足本研究对降水空间分辨率的要求。

(2) 1998~2007 年 TRMM 3B42 降水强度资料(简称 3B42 资料) 3B42 算法是由 TRMM 科学小组开发的一种综合降水评估算法,它结合了 2B31、2A12、微波成像专用传感器 (SSM/I)、改进的微波扫描辐射计 (AMSR)、高级微波探测器 (AMSU) 等多种高质量的降水评估算法,估测 3 小时平均降水强度(指该时刻前 90 min 和后 90 min 3 小时内每小时的平均降水强度)。该资料的空间分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为每天 8 个时次,每一年有 2920 个时次的值。

(3) 1998~2007 年 TRMM 3A12 层状和对流降水资料(简称 3A12 资料) 3A12 资料是使用 TRMM 2A12 资料来产生全球月平均的 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 格点的垂直水汽廓线和地表降水资料,除了地表的降水率外,该资料还包含了对流降水和层状降水的资料。本文主要使用该资料中的对流和层状降水资料。

(4) 2000~2007 年 QuikSCAT/NCEP 混合风场资料(简称 QuikSCAT 资料) 所谓混合风场是对高分辨率的 QuickSCAT 卫星散射计观测数据和美国环境预报中心风场再分析资料的时-空混合分析的结果,大致的方法就是保留了 QuickSCAT 的沿轨风场数据而在其空白区域加入 NCEP 再分

析风场数据。该混合风场给出的是距下垫面 10 m 处风场沿经向和纬向的速度分量,具有很高的时空分辨率,时间间隔为 6h,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,覆盖了全球从 88°S 到 88°N 的区域。

3 珠江三角洲城市群及其邻近区域降水特征对比分析

珠江三角洲旧称粤江平原,位于中国广东省东部沿海,是西江、北江共同冲积成的大三角洲与东江冲积成的小三角洲的总称,是放射形汉道的三角洲复合体。呈倒置三角形,底边是西起三水市、广州市东到石龙为止的一线,顶点在崖门湾。珠江三角洲面积约 11000 km^2 ,冲积层薄,一般 $20 \sim 30 \text{ m}$,地面起伏较大,四周是丘陵(占面积 30%),中部是平原,分布在广州市以南、中山市以北、江门以东、虎门以西地区。珠江三角洲城市群大体就分布在这一区域。本文将重点比较珠江三角洲核心区域($22.5^\circ\text{N} \sim 23.5^\circ\text{N}$, $113.0^\circ\text{E} \sim 114.5^\circ\text{E}$)与它周边地区降水特征的差异,而这些差异特征将在一定程度上反映出珠江三角洲城市群对降水的影响。

图 1 给出了 1998~2007 年 3B43 资料年平均降水的空间分布特征,从图中可以看到,相对于同一纬度的邻近区域而言,珠江三角洲城市群所处的区域是一个多雨中心,多雨中心点位置大约位于广州市的东北面。珠江三角洲城市群位于地形相对平坦的区域,该多雨中心的出现,我们有理由相信它与城市化的气候效应有关。为了进一步了解多雨中心和风场之间的配置,我们还给出了 2000~2007 年 5~8 月份 QuikSCAT 平均 10 m 风场空间分布(图 2)。从风场的情况来看,华南地区降水较为集中的 5~8 月份盛行南偏东南风,因此,图 2 的多雨中心大致位于图 1 中的珠江三角洲城市群中心区域的下风方向,与国内关于其它城市对降水影响的结果相一致(李天杰, 1995; 吴息等, 2000; 任春艳等, 2006; 孙继松等, 2007)。Shepherd et al. (2002) 利用 TRMM 降水资料对美国 10 个城市对降水的影响结果表明,城市化使降水有不同程度的增加,降水增加中心大约位于大都市(metropolis)中心的下风方向 $30 \sim 60 \text{ km}$ 处。广州市的纬度为 23.2°N ,而图 2 的降水中心所处的纬度为 23.6°N ,这和 Shepherd et al. (2002) 的研究结果十分相似。

图 3a 和 3b 给出了沿 23°N 和 113.25°E 1998~

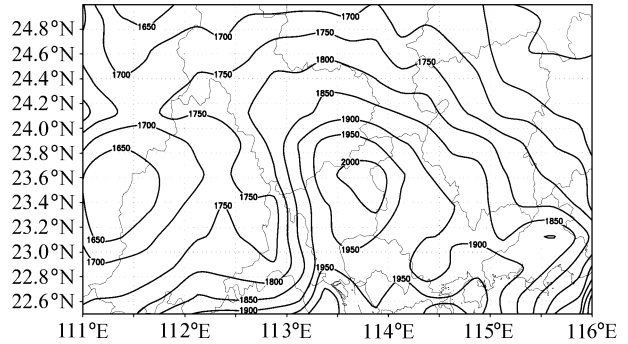


图 1 1998~2007 年 3B43 年平均降水的空间分布(单位: mm)
Fig. 1 Annual mean precipitation (mm) during 1998 - 2007 based on 3B43 data

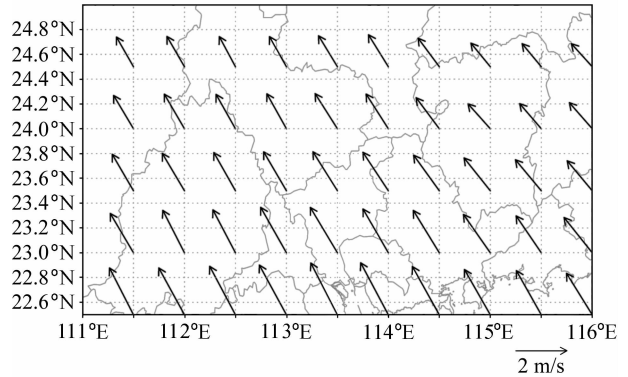


图 2 2000~2007 年 5~8 月份 QuikSCAT 平均 10 m 风场空间分布
Fig. 2 Mean 10-m wind field from May to August during 2000 - 2007 based on QuikSCAT data

2007 年 3B43 月平均降水时间-经向和时间-纬向剖面图,从图中可以看到,珠江三角洲城市群的降水增幅效应随着季节不同是有很大差别的,在夏半年尤其是前汛期(4~6 月)珠江三角洲城市群所处的区域降水明显多于其周边的区域。为了更清楚地看到城市群及其周围降水的比较,我们还特地给出了前汛期(4~6 月)平均降水的空间分布状况(见图 4)。在整个前汛期,珠江三角洲城市群所处的区域及其下风方向为明显的多雨区,在一定程度上表明珠江三角洲城市群对降水的增幅效应可能在前汛期较强。其中的有关机理还有待进一步的探讨。

为了更进一步了解珠江三角洲地区城市群对降水频次和强度的影响,我们还利用了 1998~2007 年 3B42 资料对珠江三角洲城市群及其邻近区域各格点上降水时次进行了统计。图 5 是 1998~2007 年 3B42 资料年平均降水时次的空间分布,从图中可以看出,珠江三角洲城市群所处的位置降水时次

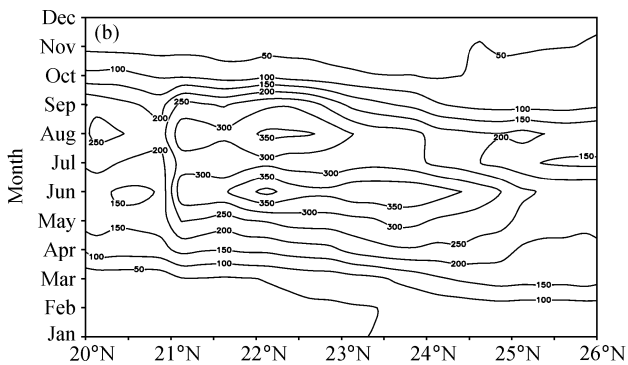
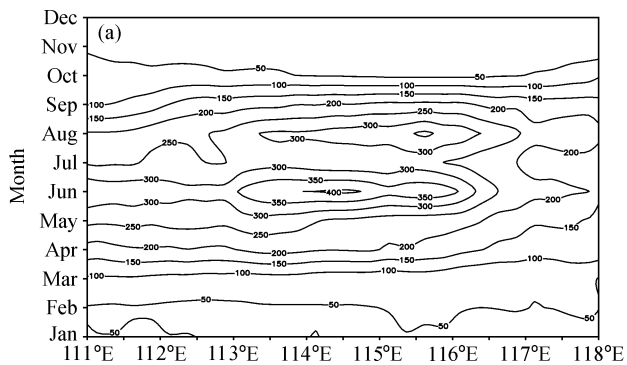


图 3 1998~2007 年 3B43 月平均降水 (a) 沿 23°N 的时间-经向剖面以及 (b) 沿 113.25°E 的时间-纬向剖面图 (单位: mm)
 Fig. 3 (a) Time-longitude cross section along 23°N and (b) time-latitude cross section along 113.25°E for mean monthly precipitation (mm) during 1998-2007 based on 3B43 data

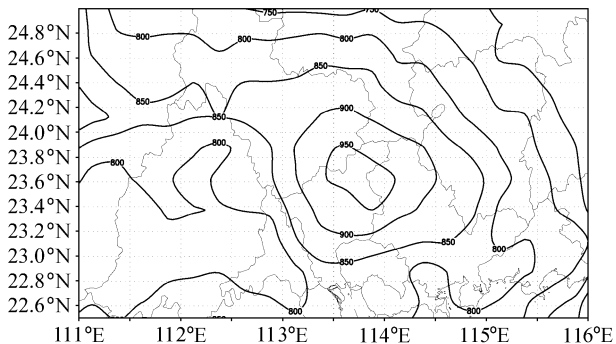


图 4 1998~2007 年 3B43 前汛期 (4~6 月) 平均降水的空间分布 (单位: mm)
 Fig. 4 Apr-Jun mean precipitation (mm) during 1998-2007 based on 3B43 data

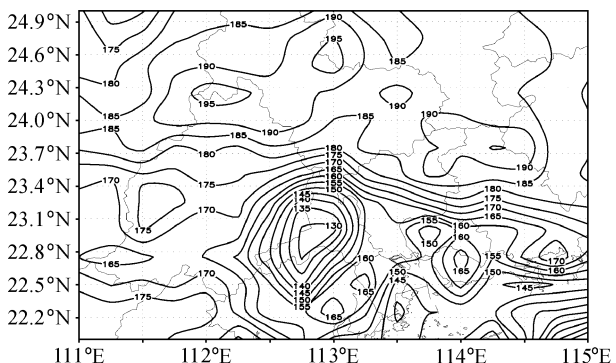


图 5 1998~2007 年 3B42 年平均降水时次的空间分布
 Fig. 5 Annual mean rainfall frequency during 1998-2007 based on 3B42 data

比周围区域少, 降水时次小值中心位于佛山地区, 平均每年探测到有降水的时次在 180 次以下。这一一定程度上表明了城市化可能会导致与城市群相关联的区域降水时次明显的减少, 但是从上述平均降水

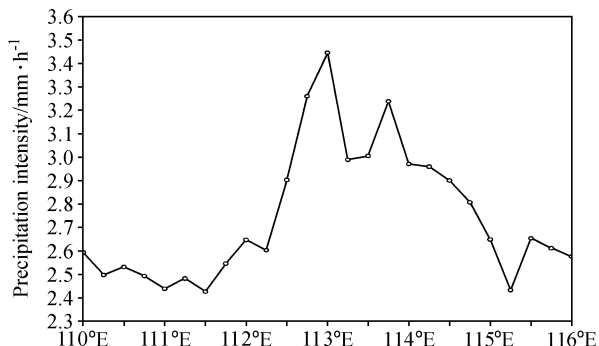


图 6 1998~2007 年 3B42 平均降水强度沿 23°N 的剖面图
 Fig. 6 Annual mean precipitation intensity along 23°N during 1998-2007 based on 3B42 data

量的情况来看, 城市群所处的区域是一个多雨中心, 因此, 城市化可能会导致降水强度的增强。图 6 给出了 1998~2007 年 3B42 资料平均降水强度沿 23°N 的剖面图, 由图可见, 有两个降水强度的峰值区位于 113°E 和 113.75°E, 分别与佛山市和东莞市相对应, 这两个区域恰好是珠江三角洲工业以及经济活动的活跃区。降水强度峰值的出现是否与大气中的凝结核有关, 还是与其它的动力或热力因子有关? 有待进一步的探讨。

4 珠江三角洲城市化对对流性降水和层状降水的影响

城市化是通过热力和动力途径对降水产生影响, 譬如: 城市建筑群对地表粗糙度会产生影响, 城市化改变了下垫面以及城市上空的热力学特性, 城市化使其上空成云致雨的凝结核的状况发生了改变等等。这些动力学和热力学特性的改变对哪种类

型的降水有较大影响？是对层状降水影响大还是对流降水影响大？这是值得我们关注但是又了解甚少的问题。下面，我们将利用 3A12 资料中的对流降水率和层状降水率 (convective/stratiform rain rate) 资料，分析珠江三角洲城市群及其邻近区域的对流降水率和层状降水率的空间分布和时间演变特征，试图找出一定的规律性。

图 7 是 1998~2007 年 3A12 资料年平均对流性降水率空间分布图，为了避免西边山区不规则的降水区域的出现而影响图的美观，我们选取的区域为 (22.5°N~25°N, 112°E~116°E)。从图中可以看到，珠江三角洲城市群所处的位置及其夏季所处的下风方向是全年对流性降水率的大值中心，而该区域的地形特征和周围相比较也没有本质的不同，因此在很大程度上表明了城市化会导致该区域对流性降水的增加。

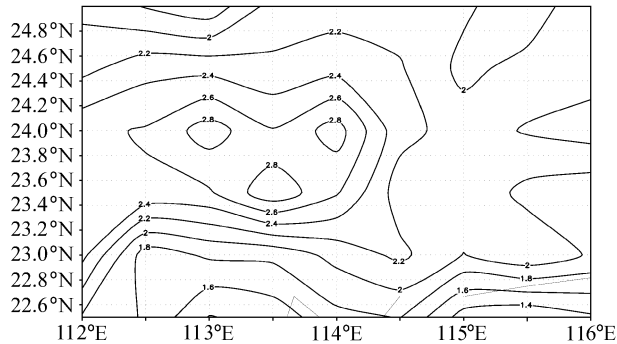


图 7 1998~2007 年 3A12 资料年平均对流性降水率空间分布 (单位: mm/d)

Fig. 7 Annual mean convection rainfall rate (mm/d) during 1998 - 2007 based on 3A12 data

为了更进一步了解城市化对对流性降水影响的季节变化特征，我们还给出了 1998~2007 年 3A12 资料逐月平均对流性降水率沿 113.5°E 的时间-纬向剖面图。由图 8 可见，5~8 月份珠江三角洲城市群所处的经度有一个对流性降水率的大值中心，说明在 5~8 月份珠江三角洲城市群使得该区域的对流性降水增加尤为显著，最大值出现在 6 月份。图 9a 是 1998~2007 年 6 月份 3A12 资料平均对流性降水率空间分布图，考虑到珠江三角洲城市群所处的位置以及 6 月份该地区风场的分布情况 (图 9b)，不难发现对流性降水率增加的区域位于城市群所处的区域并且向其下风方向偏离。

图 10 给出了 1998~2007 年 3A12 资料年平均层状降水率空间分布图，为了与海洋上层状降水的情形进行对比，我们选取的区域为 (20°N~24°N,

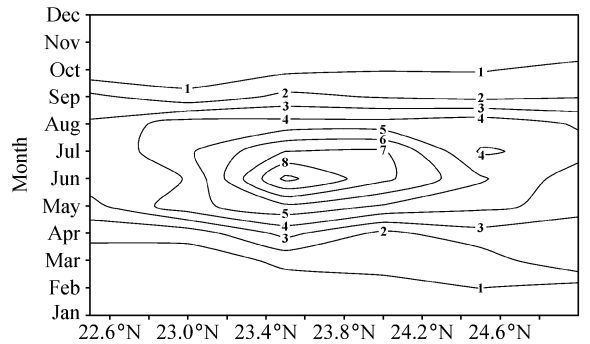


图 8 1998~2007 年 3A12 资料逐月平均对流性降水率沿 113.5°E 的时间-纬向剖面图 (单位: mm/d)

Fig. 8 Time-latitude cross section of mean monthly convection rainfall rate (mm/d) along 113.5°E during 1998 - 2007 based on 3A12 data

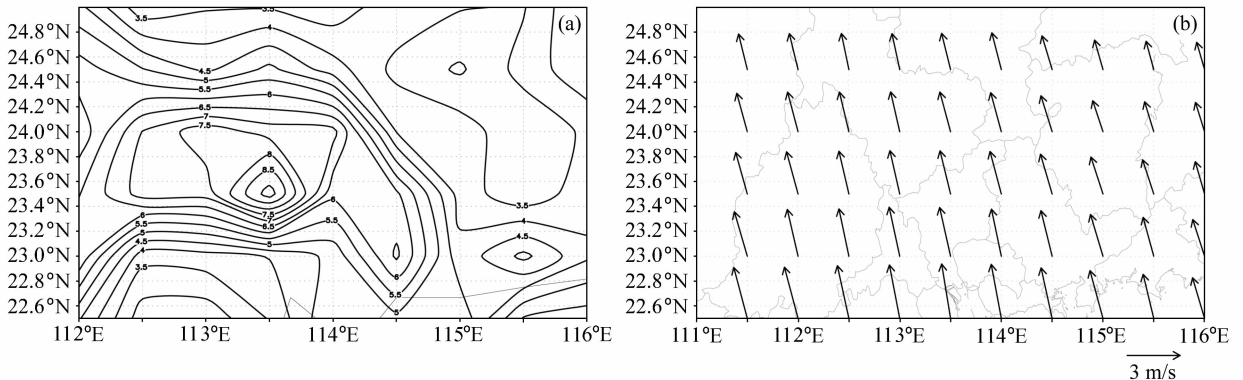


图 9 (a) 1998~2007 年 6 月份 3A12 资料平均对流性降水率空间分布 (单位: mm/d); (b) 2000~2007 年 6 月份 QuikSCAT 平均风场的空间分布

Fig. 9 (a) Mean convection rainfall rate (mm/d) in Jun from 1998 - 2007 based on 3A12 data; (b) mean 10-m wind field in Jun during 2000 - 2007 based on QuikSCAT data

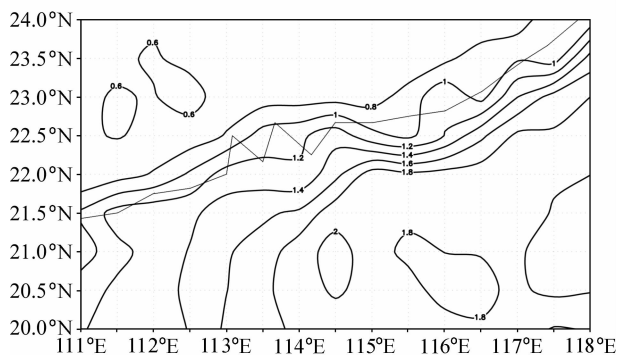


图 10 1998~2007 年 3A12 资料年平均层状降水率空间分布 (单位: mm/d)

Fig. 10 Annual mean stratiform rainfall rate (mm/d) during 1998 - 2007 based on 3A12 data

117°E~118°E)。从图中看到,珠江三角洲城市群及其周围地区层状降水率分布是十分均匀的,层状降水显著的区域集中在海上,和珠江三角洲城市群的空间分布没有明显的关联。由此可见,珠江三角洲城市群的气候效应并不对层状降水分布造成影响,这与对流性降水的结果是迥然不同的。至于为什么城市化只对对流性降水产生影响而对层状降水无明显的影响,其中的机理还有待进一步进行探讨。从过去对城市化影响降水的一些机理描述(周淑贞, 1985)来看,很可能城市热岛效应导致空气层结不稳定以及城市空气中的凝结核增多等因素,是导致城区及下风方向对流性降水增多的重要原因。

5 结论

本文利用卫星观测 TRMM 降水以及 QuikSCAT 风场资料,对珠江三角洲地区及邻近区域降水的分布特征进行了探讨,通过上述的分析研究,主要结果如下:

(1) 同一纬度相比,珠江三角洲城市群所处的区域降水明显多于其周边地区,表明城市化可能会使所处区域的降水增加。

(2) 珠江三角洲城市群所处区域降水的增加存在明显的季节变化特征,在前汛期城市所处区域的降水增多较其它季节明显。

(3) 珠江三角洲城市化对降水的影响与风场的分布密切相关,降水增多的区域通常位于城市群所在之处及其下风方向的邻近地区。

(4) 珠江三角洲城市化使城市群所处的区域降

水时次减少,降水强度加强。

(5) 珠江三角洲城市群的气候效应只对对流性降水产生影响,而层状降水的分布则与城市群的位置没有明显的关联。

参考文献 (References)

- Chen Tsing-Chang, Wang Shih-Yu, Yen Ming-Cheng. 2007. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley: Taipei [J]. *J. Appl. Meteor. Clim.*, 46 (9): 1324 - 1340.
- 程胜龙. 2005. 城市化对兰州气温变化影响的定量分析 [J]. *气象*, 31 (6): 29 - 34. Cheng Shenglong, 2005. Urbanization effect on air temperature change in Lanzhou city for recent 60 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (6): 29 - 34.
- Chung U, Choi J, Yun J I. 2004. Urbanization effect on the observed change in mean monthly temperatures between 1951 - 1980 and 1971 - 2000 in Korea [J]. *Climate Change*, 66: 127 - 136.
- 范绍佳, 董娟, 郭璐璐, 等. 2005. 城市发展对广州温度场影响的分析 [J]. *热带气象学报*, 21 (6): 623 - 627. Fan Shaojia, Dong Juan, Guo Lulu, et al. 2005. Study on the urbanization effect on the temperature of Guangzhou city [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 21 (6): 623 - 627.
- Grimmond C S B, Oke T R. 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS) [J]. *J. Appl. Meteor.*, 41 (7): 41 - 52.
- 谷德军, 吴艳标, 江奕光, 等. 1999. 珠江三角洲城市群污染综合指数预报的模式方法 [J]. *热带气象学报*, 15 (2): 128 - 135. Gu Dejun, Wu Yanbiao, Jiang Yiguang, et al. 1999. The model predictive method of synthesized pollutant index on Pearl River Delta cities [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 15 (2): 128 - 135.
- 郭家林, 王永波. 2005. 近 40 年哈尔滨的气温变化与城市化影响 [J]. *气象*, 31 (8): 74 - 76. Guo Jialin, Wang Yongbo. 2005. Temperature change and urbanization impact in Harbin for last 40 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (8): 74 - 76.
- 胡桂芳, 李芸, 李德萍. 2004. 山东近百年来的最高、最低温度变化 [J]. *气象*, 30 (11): 43 - 46. Hu Guifang, Li Yun, Li Deping. 2004. Changes of maximum and minimum temperature for recent 100 years in Shandong Province [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 30 (11): 43 - 46.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 881pp.
- Jericcevic A, Grisogono B. 2006. The critical bulk Richardson number in urban areas: Verification and application in a numerical weather prediction model [J]. *Tellus*, 58A (1): 19 - 27.

- 江志红, 丁裕国. 1999. 近百年上海气候变暖过程的再认识——平均温度与最低、最高温度的对比 [J]. 应用气象学报, 10 (2): 151-159. Jiang Zhihong, Ding Yuguo. 1999. Renewed study on the warming process of Shanghai during the past 100 years [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 10 (2): 151-159.
- Karl T R, Diaz H F, Kukla G. 1988. Urbanization: Its detection and effect on United States climate record [J]. J. Climate, 50 (1): 1099-1123.
- 李天杰. 1995. 上海市区城市化对降水的影响初探 [J]. 水文, 15 (3): 34-41. Li Tianjie. 1995. A preliminary study of the effects of the urbanization of Shanghai on the precipitation [J]. Hydrology (in Chinese), 15 (3): 34-41.
- 廖启龙. 1998. 中国近半个世纪最高气温变化特征. 气象科学 [J]. 18 (2): 103-112. Miu Qilong. 1998. The maximum temperature change features for near half century in China [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 18 (2): 103-112.
- 刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析 [J]. 气象, 30 (12): 68-71. Liu Aijun, Du Yaodong, Wang Huiying, et al. 2004. Climatic characteristics of haze in Guangzhou. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (12): 68-71.
- 娄德君, 孙卫国, 李治民. 2004. 近百年齐齐哈尔市的气温变化 [J]. 气象, 30 (12): 65-67. Lou Dejun, Sun Weiguo, Li Zhimin. 2004. Temperature variations of Qiqihar city for last 100 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (12): 65-67.
- 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. Meng Weiguang, Yan Jinghua, Hu Haibo. 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31 (2): 364-376.
- Rao A R. 1980. Stochastic analysis of annual rainfall affected by urbanization [J]. J. Appl. Meteor., 19 (1): 41-52.
- 任春艳, 吴殿廷, 董锁成. 2006. 西北地区城市化对城市气候环境的影响 [J]. 地理研究, 25 (2): 233-241. Ren Chunyan, Wu Dianting, Dong Suocheng. 2006. The influence of urbanization on the urban climate environment in Northwest China [J]. Geographical Research (in Chinese), 25 (2): 233-241.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22 (2): 217-227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Study on changes of China's extreme temperatures during 1951-1990 [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 22 (2): 217-227.
- Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. 2002. Rainfall modification by major urban areas; Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite [J]. J. Appl. Meteor., 41 (7): 689-701.
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future [J]. Earth Interactions, 9 (12): 1-27.
- Sugawara H, Narita K-I, Mikami T. 2001. Estimation of effective thermal property parameter of on a heterogeneous urban surface [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 79 (6): 1169-1181.
- 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. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31 (2): 311-320.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change [M] // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 301-403.
- 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 2000. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响 [J]. 南京气象学院学报, 23 (1): 68-72. Wu Xi, Wang Xiaoyun, Zeng Xianning, et al. 2000. The effect of urbanization on short duration precipitation in Beijing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 23 (1): 68-72.
- 解以扬, 由立宏, 刘学军. 2004. 城市化对地表粗糙度影响的分析 [M] // 新世纪气象科技创新与大气科学发展——城市气象与科技奥运. 北京: 气象出版社, 166-168. Xie Yiyang, You Lihong, Liu Xuejun. 2004. Analysis of effect of the urbanization on the surface roughness [M] // Advances of Atmospheric Sciences and the Meteorological Technology Innovations: City Meteorology and Olympics (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 166-168.
- 曾侠, 钱光明, 潘蔚娟. 2004. 珠江三角洲城市群城市热岛效应初步研究 [M] // 新世纪气象科技创新与大气科学发展——城市气象与科技奥运. 北京: 气象出版社, 68-72. Zeng Xia, Qian Guangming, Pan Weijuan. 2004. A preliminary study of the urban heat island effect over the Pearl River Delta area [M] // Advances of Atmospheric Sciences and the Meteorological Technology Innovations: City Meteorology and Olympics (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 68-72.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. 气象学报, 55 (4): 418-428. Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. On the changes of China's maximum and minimum temperatures in the recent 40 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (4): 418-428.
- 赵宗慈. 1991. 近 39 年中国气温变化与城市化影响 [J]. 气象, 17 (4): 14-17. Zhao Zongci. 1991. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 17 (4): 14-17.
- 周淑贞. 1985. 城市气候学导论. 上海: 华东师范大学出版社, 128-132. Zhou Shuzhen. 1985. Introduction to Urban Climatology [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 128-132.
- Zhou Liming, Dickinson Robert E, Tian Yuhong, et al. 2004. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China [J/OL]. PNAS, 101 (26): 9540-9544. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0400357101>.