

基于 TRMM PR 探测的夏季合肥 地区降水特征分析^{*}

邵 慧¹ 洗 桃² 陈凤娇³ 傅云飞² 杨元建⁴ 潘邦龙¹

SHAO Hui¹ XIAN Tao² CHEN Fengjiao³ FU Yunfei² YANG Yuanjian⁴ PAN Banglong¹

1. 安徽建筑大学电子与信息工程学院,合肥,230601

2. 中国科技大学地球和空间科学学院,合肥,230026

3. 安徽省气象信息中心,合肥,230031

4. 安徽省气象科学研究所安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥,230031

1. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Anhui Meteorological Information Center, Hefei 230031, China

4. Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China

2016-11-17 收稿,2017-05-31 改回.

邵慧,洗桃,陈凤娇,傅云飞,杨元建,潘邦龙. 2017. 基于 TRMM PR 探测的夏季合肥区域降水特征分析. 气象学报, 75(5):744-756

Shao Hui, Xian Tao, Chen Fengjiao, Fu Yunfei, Yang Yuanjian, Pan Banglong. 2017. Analysis of precipitation characteristics over Hefei district in summer based on TRMM PR. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(5):744-756

Abstract In order to study the urbanization impact on precipitation and explore the corresponding effect mechanism, the characteristics of convective and stratiform precipitation are investigated based on measurements of the TRMM Precipitation Radar over Hefei in summer (June, July, August) during 1998–2012. The results show that the development of urbanization significantly affects the spatial distribution of precipitation with higher convective and stratiform precipitation rate over the urban area and lower value over the rural area. Moreover, convective precipitation frequency is lower in the urban area than over the rural area, while stratiform precipitation frequency is higher over the rural area. In addition, the vertical structure of precipitation shows that the precipitation echo top over the urban area is higher than that over its surrounding rural area, which reveals that urbanization is conducive to the development of precipitation system but suppresses precipitation rate over the urban area. Consistent with the urban heat island diurnal variability, there is an increase in the rate and frequency of convective precipitation in the urban area during afternoon and nocturnal hours, while there is no significant diurnal cycle in the rural precipitation. In general, urbanization has a great impact on local precipitation rate, while the effect on local precipitation frequency is not significant. The long-term trend in precipitation shows that the rate and frequency decline over the urban area, while there is an upward trend in precipitation rate and a declining trend in precipitation frequency over the rural area. Additionally, the difference in precipitation characteristic between urban and rural areas becomes significant due to the urbanization. By analyzing the distribution of extreme precipitation, it is found that strong precipitation frequency over the urban area is lower than that over the

^{*} 资助课题:安徽省教育厅重点项目(KJ2016ZD149、KJ2015B321)、安徽建筑大学博士启动基金项目(2015QD07)、国家自然科学基金项目(41505033、91337231)、安徽省自然科学基金项目(1608085QD75)。

作者简介:邵慧,主要从事城市气象与城市气候的研究。E-mail:ahjzshaohui@163.com

通讯作者:傅云飞,主要从事卫星光谱和微波遥感探测结果的分析、反演及在天气、气候现象诊断分析和数值模式评估等领域的应用研究。E-mail:fyf@ustc.edu.cn

rural area. In particular, it is 75% lower than that in downwind of the city, whereas weak precipitation frequency in the urban area is higher than that over the rural area and 18% higher than that in the downwind area.

Key words Urbanization effects, TRMM PR, Precipitation structure, Convective precipitation, Stratiform precipitation

摘 要 利用热带测雨卫星 TRMM 搭载的测雨雷达(PR)1998—2012 年的观测资料,研究了合肥地区夏季(6、7、8 月)不同类型降水的降水强度和频次的水平空间分布、降水垂直结构、日变化特征以及气候变化等特征,揭示了城市化效应造成城市及其周边区域降水特征在时空上的分布差异。研究表明,(1)主城区对流和层云降水强度低于周边区域,对流降水频次也低于周边区域,但层云降水频次则相反。可见城市化发展是改变降水的空间分布的因素之一,且对不同的降水类型空间分布影响不同。(2)主城区降水回波信号高度高于周边区域,而降水强度低于周边区域,表明城市效应促进降水云发展而未造成降水强度增强。(3)合肥地区对流和层云降水的强度和频次日循环存在时空分布不均匀性,其中城区的对流降水强度和频次日循环与城市热岛效应日循环具有一致性。总体来看,城市化对局地降水强度影响较大,而对局地降水频次的总体影响不是很明显。(4)通过降水气候变化分析表明,城区两种类型降水强度和频次均呈逐年下降趋势,周边区域降水强度呈不显著上升趋势,降水频次呈逐年下降趋势,其中层云降水频次下降趋势较显著。城市化进程使得城市及其周边区域降水不均匀性逐年增强。极端降水空间分布特征分析表明,城市周边区域强降水频次高于主城区,尤其在城市的下风区高出主城区 75%;而周边区域弱降水发生的频次低于主城区,城市下风区最低,低于主城区约 18%。

关键词 城市化效应, TRMM PR, 降水结构, 对流降水, 层云降水

中图法分类号 P407, P426.6, P463.3

1 引 言

随着城市化进程的加快,城区面积快速扩张,城市人口也不断增加,从而引起城市区域下垫面组成结构显著变化;城市生活生产所排放的废热、废气和水汽,影响了城市上覆大气热力状况的分布,这些均会直接或间接影响到局地天气和气候。降水作为大气环境和气候变化最直接的反映,了解城市化进程和降水气候变化的关系,可为城市规划、环境建设与保护、防洪排涝、为推进“海绵城市”设计和建设决策提供相关参考。

城市化进程对降水的影响是在某种特定的条件集合下导致的改变(Ren, 2015)。一方面,城市降水是城市热岛与环境流场相互作用的结果(Baik, et al, 2001; Changnon, 2003; Shepherd, 2005; Ren, et al, 2011),孙继松等(2007)通过研究北京地区城市热岛效应与降水变化的关系指出,城市热岛效应使降水量增加并改变降水的空间分布。另一方面,城市区域工业生产和汽车尾气所排放的人为气溶胶也是影响城市降水的一个重要因子。研究表明,在一定的气象环境条件下小粒径气溶胶粒子会减小云滴有效碰并效率,进而抑制降水(Rosenfeld, 2000; Ramanathan, et al, 2001)。此外,城市下垫面几何结构和建筑物高度也是影响城市气候和改变降水形式的重要原因,Carraça 等(2007)通过研究高层建筑对降

水的激发作用,指出小范围高层建筑产生的感热通量对对流的激发作用不小于大范围低矮建筑的影响,因此,随着城市建筑物的不断增高,城市降水特征也会发生相应的变化。

由于不同学者所研究的城市及所处环境不同,每个城市所处的地理气候、发展速度、城市面积和人口等亦不相同,人们采用多种研究方法和不同的数据资料来探讨城市化对降水的影响,得到的结论存在着较大的差异,如 Shepherd 等(2002)、Mote 等(2007)、Hand 等(2009)和 Halfon 等(2009)的研究表明,城市化进程会促进降水发生和发展,而 Rosenfeld(2000)、Ramanathan 等(2001)、Givati 等(2004)和张朝林等(2007)的研究则表明,城市化进程会抑制城市区域降水。目前,城市化进程对降水量的定量化影响尚不清楚(Shepherd, et al, 2002; Chen, et al, 2015),亟待进一步研究。

对城市区域降水的研究通常采用台站雨量计的实测资料(Huff, et al, 1973; Kaufmann, et al, 2007; Alpert, et al, 2008; 王喜全等, 2007; 范泽孟等, 2009; 林恒等, 2014; Han, et al, 2015),但由于雨量计空间布局的不均匀性,测量的数据仅为小范围区域的降水量,难以准确反映大区域和剧烈时空变化降水特征(傅云飞等, 2012)。此外,随着城市的发展,观测场周围环境的变迁以及下垫面组成等诸多因素发生变化,也将导致观测准确性和气候代表性

产生变化(黎伟标等,2009;杨元建等,2011)。近年来数值模式和数值预报业务得到蓬勃发展,已在数值模式中实现了城市化对降水影响的机制研究(Guo, et al, 2006; Shem, et al, 2009; Gutowski, et al, 2010; 苗世光等,2010)。虽然数值模拟提供了很多有价值的见解,但研究主要集中在如何将城市化效应参数化。现在的数值模式存在着城市地表参数缺少且不能同步于城市发展节奏,或对城市湿微物理过程的表示过于简化且表征不足,或耦合动力学、微物理过程、气溶胶、陆面过程的大气地面模型计算能力限制等问题(Rozoff, et al, 2003; 黎伟标等, 2009),而限制其在实际应用中的指导作用。近年来,随着遥感技术的发展,利用遥感探测资料探讨城市化进程对天气、气候的影响有明显优势,由于遥感探测资料是一定视场面积内的取样平均值,具有较好的区域代表性,同时资料分布均匀一致且具有较强的可比性,有利于对城市及其周边区域的降水特征进行对比和讨论。尤其是卫星探测实现了对不同性质降水(如对流和层云等)的观测(Fu, et al, 2001, 2003a, 2003b, 2007)。Shepherd 等(2002)首先利用3年的空间测雨雷达资料对城市降水进行研究,说明了遥感探测资料可用于城市降水的研究,证实了城市化引起降水的增加,特别在大城市的下风区降雨明显增加。此后,很多学者利用遥感探测资料探讨大城市或城市群城市化进程对降水特征的影响

(Shepherd, et al, 2002, 2003; 黎伟标等, 2009; 江志红等, 2011; Li, et al, 2011; 赵文静等, 2011; Carr, et al, 2015; Chen, et al, 2015)。

迄今为止,中外学者对城市降水效应的研究主要针对单个特大城市(Shepherd, et al, 2002, 2003; Kaufmann, et al, 2007; Shem, et al, 2009)或城市群对局地降水的影响(Kaufmann, et al, 2007; 黎伟标等 2009; 江志红等, 2011; Li, et al, 2011; 赵文静等, 2011; Chen, et al, 2015),对于处于快速发展的一般城市的城市化进程对降水产生影响的讨论尚不多见;而研究这类城市发展对局地降水特征时空变化的影响,对了解和认识城市化和局地气候的关系具有现实意义。本研究选取的研究对象安徽合肥地区就属于这类城市的典型,该区域为内陆地区,南接中国五大淡水湖之一的巢湖,西南距大别山区约150 km,北边为淮北平原;该地区的地形较为平坦,夏季主要盛行西南风。近20年来,合肥地区的经济快速发展,城市规模发展较快,合肥主城区的面积增长迅速,下垫面的组成变化显著(图1,其中图1c紫框为2012年主城区范围),城区人口从1998年127.94万增加到2012年222.17万(取自合肥统计年鉴)。那么,城市化进程加快的合肥地区对局地降水时空分布产生多大的影响?

文中将利用1998—2012年夏季(6、7、8月)的TRMM PR降水资料,通过分析合肥城区及其周边

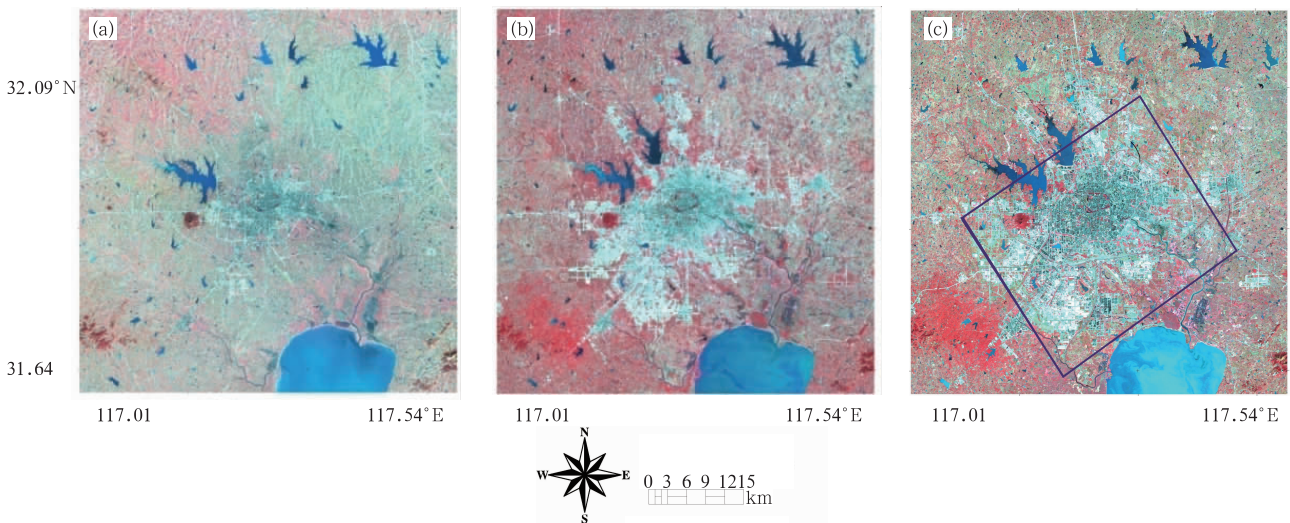


图1 Landsat TM 波段4(R)、3(G)、2(B)1999年(a)、2007年(b)和2012年(c)合肥地区假彩色合成

Fig. 1 The false-color of Hefei by bands 4(R), 3(G) and 2(B) Landsat TM synthesis

in 1999 (a), 2007 (b) and 2012 (c)

区域夏季不同类型降水(层云降水、对流降水)的水平分布特征、日变化特征、气候变化趋势以及极端降水的空间分布特征等,来回答合肥城市化进程对主城区及其周边区域降水分布的影响程度,借此提高对城市发展与城市气候变化特征关系的理解和认识。

2 资料和方法

所用资料是 GSFC/NASA (Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration) 发布的 TRMM 逐轨标准产品 2A25 降水资料。2A25 是由测雨雷达(PR)测得的回波信号经反演得到的逐轨三维降水率,测雨雷达的扫描角度为 17° ,在地表上对应的扫描宽度为 215 km;每条扫描线上有 49 个像素,其星下点像素的分辨率为 4.5 km,垂直分辨率为 250 m,探测高度自地表向上 20 km(80 层)。基于 1998—2012 年该数据集对合肥地区进行统计分析,分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,其中 2001 年 8 月升轨,该月没有观测数据。由于夏季大尺度天气强迫较小,城市效应最为显著(Changnon, 2003; Shepherd, 2005),文中将探讨夏季(6、7、8 月)降水特征。

大量的城市气候研究结果表明,城市化效应会影响到距离城市中心 30—75 km 的区域(Shepherd, et al, 2002; Shepherd, 2005, 2006; Mote, et al, 2007; Halfon, et al, 2009; Hand, et al, 2009; Shem, et al, 2009),文中选取距离主城区中心 50 km 的范围区域作为周边区域(图 2 蓝框区域),紫框区域为高度发展的主城区(同图 1c 中紫框区域)。1998—2012 年夏季风场资料采用 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 的 ERA-Interim 再分析资料,以 700 hPa 平均风场作为平均引导气流方向(Hagemeyer, 1991; Shepherd, et al, 2002; 江志红等, 2011; Ganeshan, et al, 2013),对城市降水影响区域进行简单划分(图 2),合肥夏季盛行西南风,其上风西南区域大气较为干洁,而下风东北区域大气相对污染。选取合肥主城区 2 个自动气象观测站(巢湖路 CHL 和科技园 KJY)和周边区域 5 个自动气象观测站(紫蓬山 ZPS,小庙 XM,双墩 SD,磨店 MD 和众兴水库 ZXSK)作为代表性站点,雨量资料始于 2006 年,部分雨量资料(磨店和众兴水库)始于 2009 年。

地面雨量计观测雨量为站点时间累计观测,而

测雨雷达扫描探测反演的降水为瞬时量,两者给出的降水量或降水强度存在差异,但在多年年平均和季平均的气候统计上具有较好的一致性(刘鹏等, 2010)。为了便于比较,采用距平值。从 2006—2012 年夏季降水距平(图 3)可以看出,虽然 TRMM PR 探测的降水距平稍高于地面雨量计测得的小时降水距平,但不论是城市还是周边区域,两者所得的年平均降水距平的变化趋势一致性较好,均呈下降趋势。由于磨店和众兴水库站点的资料从 2009 年开始,重新计算城市周边 5 个雨量计日降水资料得到年变化趋势,与 TRMM PR 探测的降水距平仍具有较高的一致性。由于雨量计无法给出不同类型降水的观测量,将利用 TRMM PR 探讨合肥城市化效应对不同类型降水特征产生的影响。

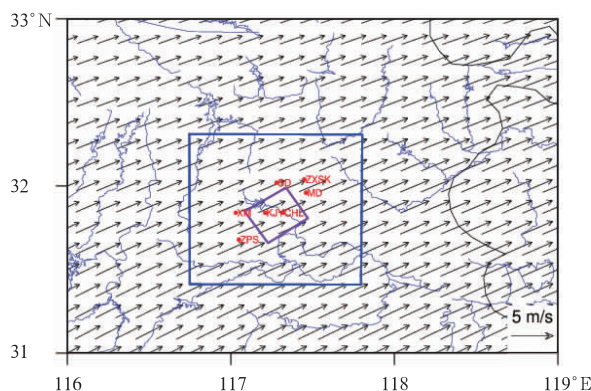


图 2 1998—2012 年夏季 700 hPa 风场分布
(紫框为合肥城区,蓝框为距离主城区中心 50 km 周边区域,红点为选用的合肥区域自动气象观测站)

Fig. 2 Spatial distribution of 700 hPa wind field over Hefei area in summer from 1998 to 2012
(purple block is Hefei, blue block is the surrounding rural area, red points are selected meteorological stations)

3 结果

3.1 降水的水平分布特征

为研究合肥主城区及周边区域夏季降水的水平分布特征,首先分析 15 年夏季降水强度和频次空间分布特征(图 4)。采用傅云飞等(2008)的方法计算降水频次,即 0.1° 格点内的合肥地区夏季某类降水像素与该格点总降水像素个数的百分比,得出合肥地区 15 年不同类型的降水频次水平空间分布。

从图 4 可以看出,合肥地区层云降水频次高于

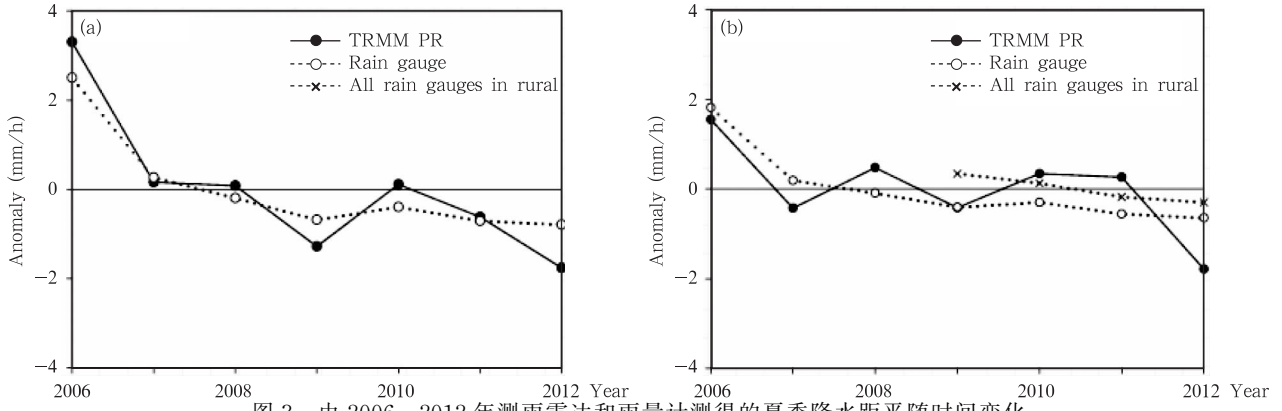


图3 由2006—2012年测雨雷达和雨量计测得的夏季降水距平随时间变化
(a. 主城区, b. 周边影响区域)

Fig. 3 Temporal variation of rain anomaly over the main urban area (a) and its surrounding area (b) calculated from observations of the TRMM PR and rain gauges in summer from 2006 to 2012

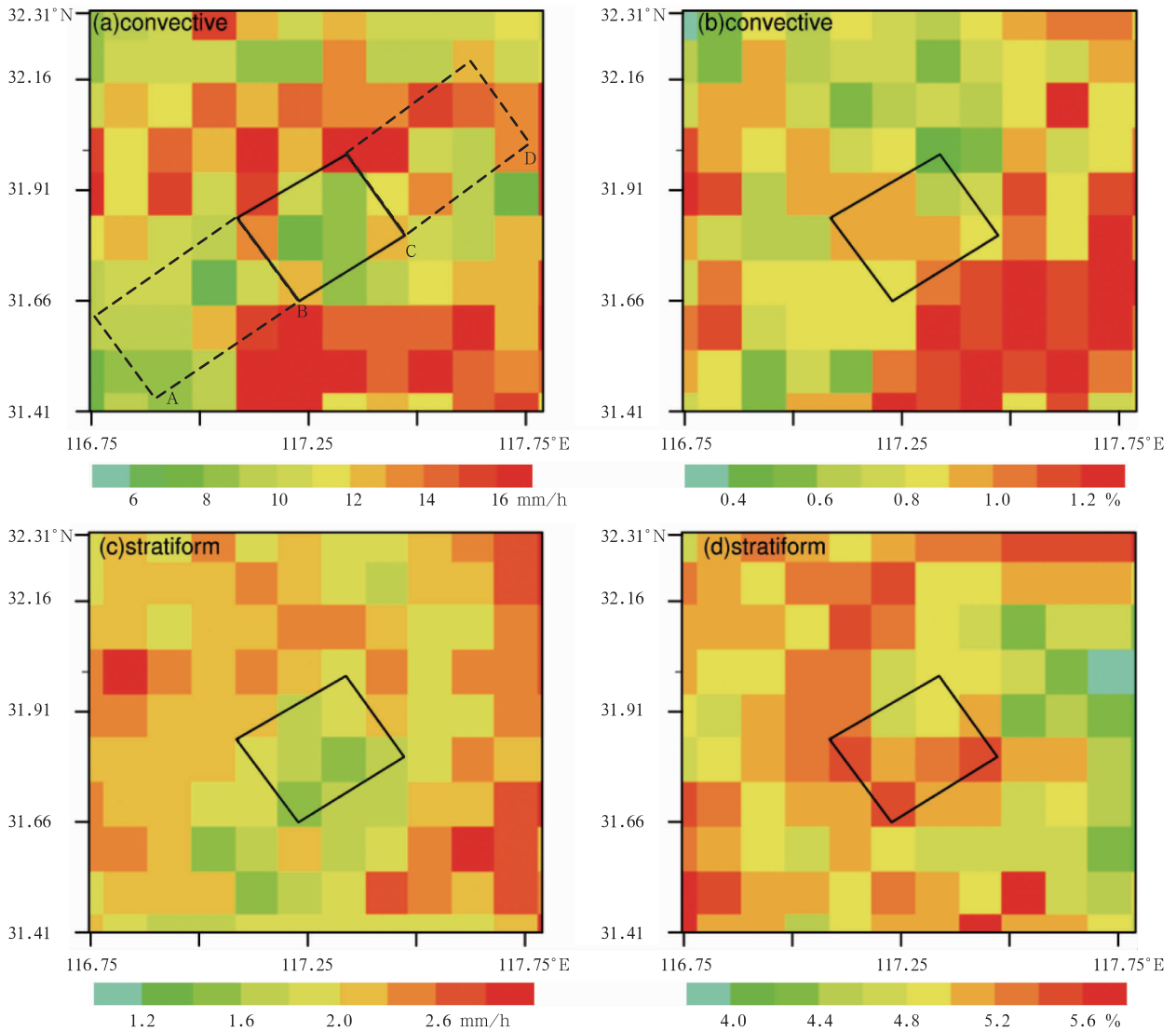


图4 1998—2012年夏季对流(a,b)和层云(c,d)降水强度(a,c)、降水频次(b,d)的空间分布
(BC, AB和CD分别是文中选择主城区及其上风和下风区)

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation rate (a, c) and occurrence frequency (b, d) of convective (a, b) and stratiform (c, d) precipitation in summer from 1998 to 2012
(region BC, AB and CD are the Main City Area (Hefei), and upwind and downwind areas, respectively)

对流降水,由于对流降水的强度较大,两种降水对总的降水量的贡献相当。如图 4a、b 所示,对流降水强度和频次的大值区均出现在合肥东南区域(巢湖水体区域),分别达到 14 mm/h 和 1.1%。从主城区及其周边区域不同降水类型强度和频次对比(表 1)可以看出,主城区对流降水强度和频次分别为 11.4 mm/h 和 0.8%,层云降水强度和频次分别是 1.75 mm/h 和 5.25%;周边区域对流降水强度和频次分别为 12.4 mm/h 和 0.92%,层云降水强度和频次分别为 2.13 mm/h 和 4.92%。而下风区的对流降水强度和频次分别为 12.9 mm/h 和 0.89%,分别高出主城区约 13.16%和 11.25%;层云的降水强度和频次分别为 2.75 mm/h 和 4.75%,其中降水强度高出主城区约 57.14%,而降水频次低于主城区约 9.5%。可见,不论对流降水还是层云降水,

主城区降水强度明显低于其周边区域,这很可能一是由于城市扩张使得局地下垫面的蒸发减少,二是城市区域人为活动量大,产生了大量的污染物凝结核,而城市热岛效应的上升运动使得凝结核升至云中,有利于小云滴核化,使得云滴谱分布更加均匀,降低了云水向雨水的转化率,抑制了降水(Rosenfeld, 1999, 2000; Rosenfeld, et al, 2008)。此外,在夏季盛行西南季风的影响下,城市热岛环流与湖陆风环流相互作用,可能使得大量水汽输送至主城区的下风区(东部和东北区域),使得下风区的对流和层云降水强度增强,这与 Shepherd 等(2002)研究城市下风区降水增加的情况类似,而主城区层云降水频次高于下风区,降水量却低于下风区,这与 Chen 等(2015)结论类似。

表 1 合肥地区不同降水类型强度和频次对比
Table 1 Comparison of participation rate and frequency over Hefei district

	对流降水		层云降水	
	降水强度(mm/h)	降水频次(%)	降水强度(mm/h)	降水频次(%)
合肥主城区	11.4	0.8	1.75	5.25
城市下风区	12.9	0.89	2.13	4.92
城市周边区域	12.4	0.92	2.75	4.75
下风区相对于城区改变	13.16%	11.25%	57.14%	-9.5%

3.2 降水的垂直结构特征

利用高度频率分布图 CFADs(Contoured Frequency by Altitude Diagrams)统计方法分析降水的垂直分布特点,是一种较为有效的方式(Yuter, et al, 1995),该方法能显示出物理量频次在二维坐标中(高度坐标和雷达反射率因子坐标或雨强坐标)的分布信息,由于高层雷达探测的降水样本少,易产生高空虚假的高值分布。为此,Fu 等(2003a)利用二维坐标平面上的总探测样本对各高度层上样本进行归一化处理,获得二维坐标平面上降水强度的等值线分布,来描述降水强度在垂直方向上的分布。文中采用改进的 CFADs 方法来研究合肥地区不同降水类型的垂直结构。

从图 5 可以看出,主城区及周边区域的对流和层云降水多数回波信号不低于 14 dBz,且多数回波信号高度大于 1 km;主城区对流降水的 CFADs 高度达到 14 km,而周边区域的高度约为 12.5 km;可见主城区降水回波垂直分布比周边区域的约高 1.5 km。主城区层云降水的 CFADs 高度达到

11 km,而周边区域 CFADs 高度为 10 km。对比主城区及其周边区域的对流降水 CFADs(图 5c、d),可以看出两者外形相似,19—42 dBz 出现频数最高,位于 1.5—5 km,在这个高度以上,同样大小的反射率因子迅速随高度减小。层云降水为合肥地区夏季常见降水,最易出现降水回波的高度和强度范围分别为 1—8 km、20—32 dBz。一般情况下,地表降水强度与雷达回波顶高度关系密切,地表降水强度越大,雷达回波顶高度越高(陈凤娇等,2015),按照这一结果推测主城区对流和层云降水强度应要高于城市周边区域,但实际情况却相反,主城区对流和层云降水强度低于其周边区域,如图 4a、c。造成这一现象的原因很可能如上所述,城市区域因下垫面干燥和空气污染,使得降水粒子无法长大,因此降水强度变小。

由此可见,城市区域降水云发展深厚,可能原因是地表粗糙度增加以及城市热岛引起的大气低层气流的辐合增强,而降水强度却低于周边区域,主要由于城市扩张,植被减少使得局地蒸发减少,引起低层水汽缺乏,造成明显的干岛效应(Zhang, et al, 2009;

张珊等,2015),而城市区域大量的污染物凝结核有利于小云滴核化,降低了云水向雨水的转化率,抑制了降水(Rosenfeld, 1999, 2000; Rosenfeld, et al, 2008)。

为了进一步了解合肥与其上下风区降水垂直分

布特点,给出了沿着径向剖面回波强度的垂直分布(图6),其中AB、BC和CD对应区域如图4a所示。可以看出合肥上风区(AB区域)的对流降水云顶回波强度最高约为12 km,主城区(BC区域)回波顶高度可以接近15 km,下风区最高值也可达到15 km,

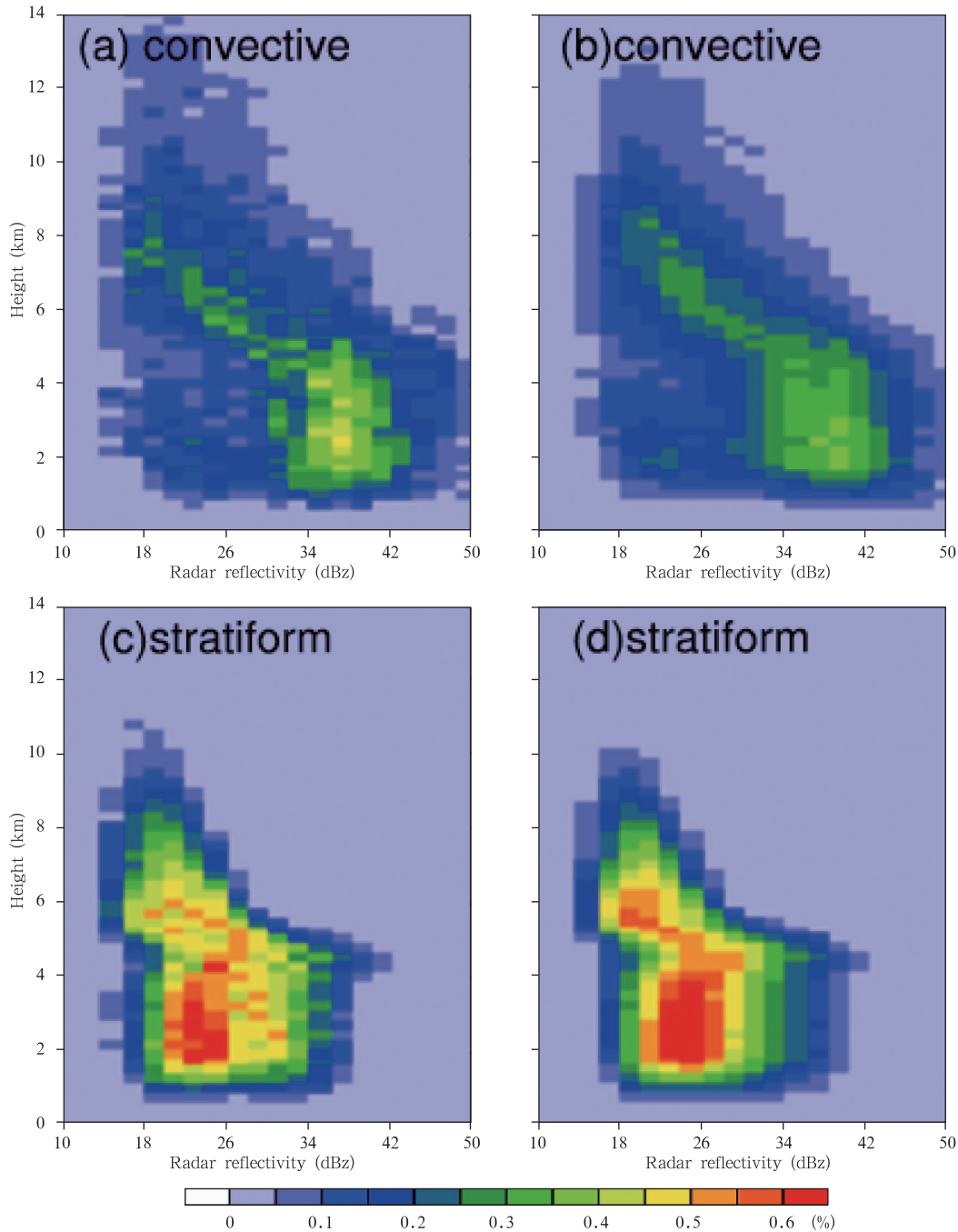


图5 1998—2012年夏季合肥城区(a,c)和周边区域(b,d)的对流(a,b)和层云(c,d)降水云的雷达回波-高度CFADs

Fig.5 CFADs of convective (a, b) and stratiform (c, d) precipitation over the main urban area (a, c) and its surrounding area (b, d) in summer from 1998 to 2012

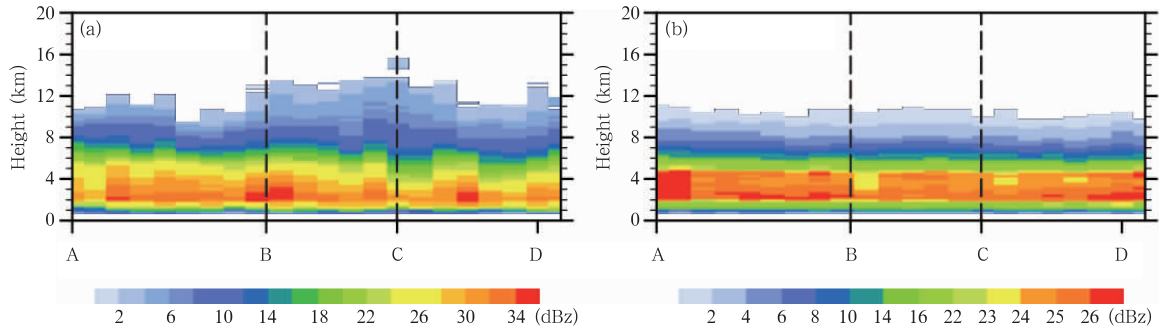


图 6 沿径向剖面的回波强度
(a. 对流降水, b. 层云降水)

Fig. 6 Cross-sections of the mean reflectivity for (a) convective precipitation and (b) stratiform precipitation

平均回波强度上风区最低,主城区最高。对于层云降水回波顶高度 3 个区域差别不大。可见城市化效应对对流降水和层云降水存在截然不同的影响(黎伟标等,2009),由于城市区域植被减少造成局地蒸发减少,引起低层水汽缺乏,造成城区的层云和对流降水的减少。地表粗糙度增加以及城市热岛引起的空气层结的不稳定,造成城市区域及其下风区对流降水云发展更为深厚。具体的机理尚有待进一步的观测来揭示。

3.3 降水日变化特征

降水日变化是大气热力过程对水汽循环影响的综合反映,当降水经常在特定的时段内发生,表明这时段内的大气条件和物理过程有利于降水系统的发展(Sorooshian, et al, 2002),这里对合肥主城区及周边区域降水强度和频次日变化进行分析,希望能借此来理解城市化进程对降水影响的机理。

为研究合肥夏季降水日循环特征,将 1 d 分成

以 2 h 为间隔的 12 个时段,即分别为 00—02、02—04、04—06、06—08、08—10、10—12、12—14、14—16、16—18、18—20、20—22 和 22—24 时,对合肥及周边区域对流和层云降水强度空间分布进行分段统计。从合肥地区降水强度分时段日变化(图 7)可以看出,主城区的对流降水强度峰值出现在 12—14 时,此时城市不透水路面和建筑物对太阳辐射吸收达到最大值,导致大气稳定度下降,同时城市热力强迫有利于形成城市中尺度低空风场辐合线,并加强边界层内中心城区风场垂直切变,有利于对流降水的发生、发展(孙继松等,2006,2007),导致降水量增大;次峰值出现在夜间,虽然城市热岛引起的边界层环流在午后表现最为显著,而城市热岛在夜间达到峰值,使得城市夜间降水强度增强(Shepherd, et al, 2003; Ganeshan, et al, 2013),但其强度低于午后。周边区域的对流降水强度亦呈双峰状,主峰值出现在 02—04 时,次峰出现在 22—24 时,而周边地

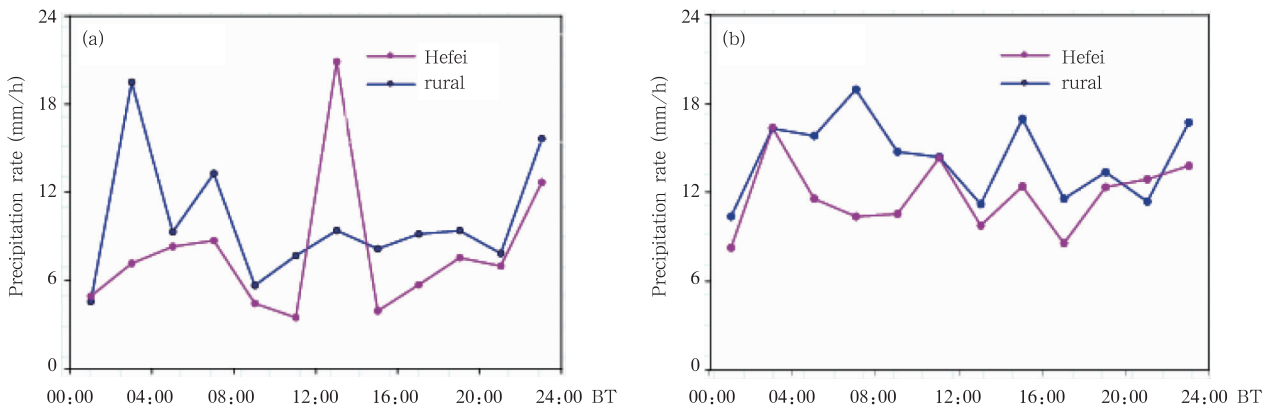


图 7 1998—2012 年夏季合肥城区和周边区域对流(a)和层云(b)降水强度的日变化

Fig. 7 Diurnal cycle of convective (a) and stratiform (b) precipitation rates over urban area and its surrounding region in summer from 1998 to 2012

区对流降水主要发生在夜间。对于层云降水,主城区降水强度呈波动状态,峰值出现在 02—04 时,而城市周边区域峰值出现 06—08 时,主城区及其周边区域的谷值均出现在 00—02 时和 16—18 时。

从合肥地区降水频次分时段日变化(图 8)可以看出,主城区对流降水频次最高发生在 22—24 时,对应最强的城市热岛效应,这个时间段城市热岛引起的边界层环流最有利于对流降水的发生、发展,而对流降水强度不是最大(图 7a);12—14 时的降水频次高,但此时段的降水强度却是最大,这可能是午后大气边界层的稳定性极差的缘故,主城区和周边区域降水频次出现峰谷的时间不同,而值相差不大。

对于层云降水频次,主城区及周边区域的峰值出现时间比较一致,但城区的降水强度略低于其周边区域(图 7b),很可能是因为层云降水主要受到大范围的大气环流场控制(Fu, et al, 2016; Lu, et al, 2016)。因此,城区层云降水强度则受到了城市效应的作用,降水强度略低,而层云降水的频次没有表现出区域性差异,城市化效应对城区降水改变相对于区域降水的大尺度的气候变化是有限的(李书严等, 2011)。此外,城市化对局地降水强度影响较大,城区和周边区域有明显差异,而对局地降水频次的总体影响不是很明显,不同降水频次区域间差异并不是太大,这与郑祚芳等(2015)结论相似。

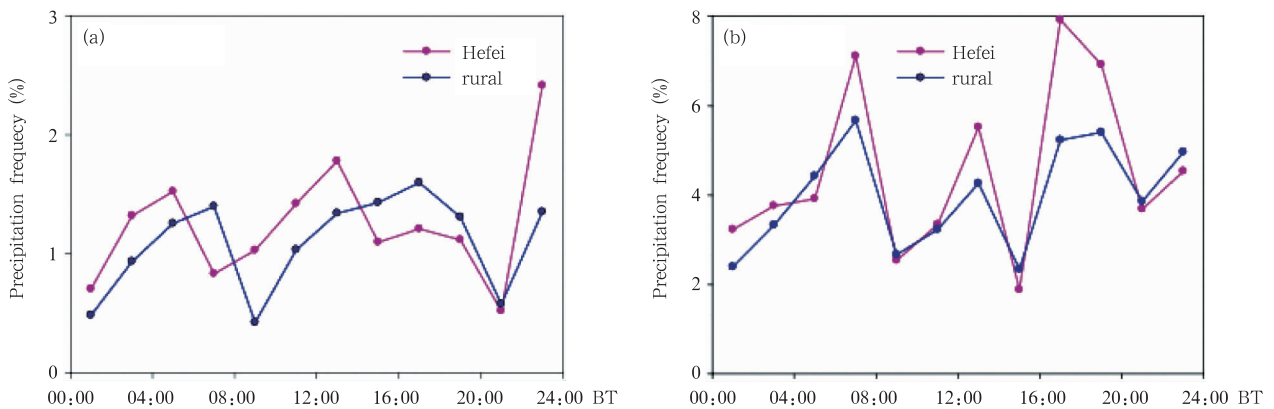


图 8 同图 7, 但为降水频次

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for precipitation frequency

3.4 降水气候变化

合肥地区夏季平均降水强度的变化及线性趋势(图 9)显示,主城区两种降水强度均呈逐年下降趋势,

而对流降水强度呈更显著下降趋势。城市周边区域的对流降水呈下降趋势,而层云降水呈不显著的上升趋势。其原因可能是城区面积扩大导致的地

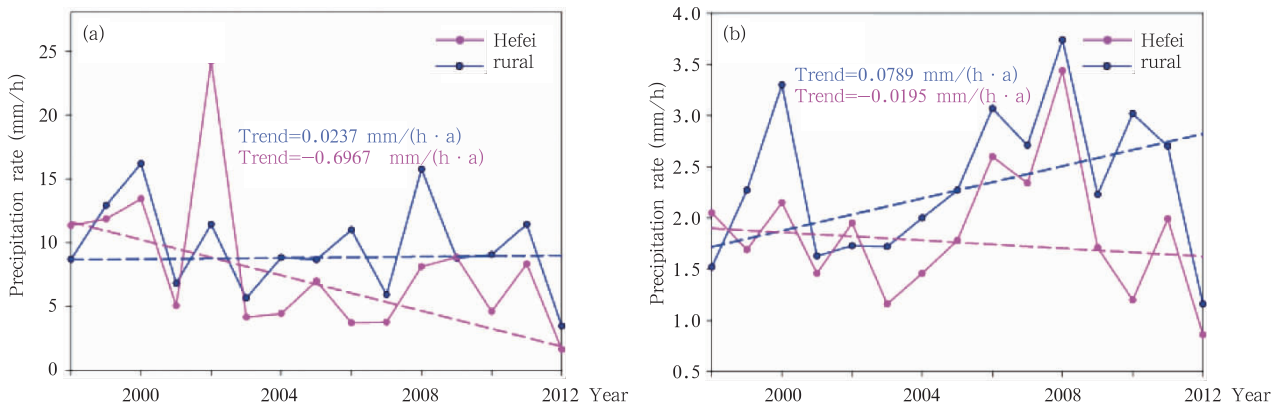


图 9 1998—2012 年夏季逐年合肥城区和周边区域对流(a)和层云(b)降水强度的变化

Fig. 9 Interannual changes in convective (a) and stratiform (b) precipitation rates over the main urban area and its surrounding area in summer from 1998 to 2012

表蒸发及局地大气水分供应的减少,此外,城市高层建筑逐年增多导致边界层高度逐渐加深和大气水汽混合的增强不利于降水的发生和发展(张朝林等,2007;苗世光等,2010)。从2002年开始主城区对流降水强度低于周边区域,而且两者差值呈逐渐增大的趋势;从2000年开始,主城区与其周边区域层云降水强度差值逐渐增大,城市化进程使得城市及其周边区域降水不均匀性逐年增大,可见随着城市人口的增加和城市面积的扩大,城市效应对城市区域降水的影响越来越大。

合肥及周边区域年平均降水频次的变化及线性

趋势(图 10)显示,主城区及周边区域 15 年的对流降水频次没有明显的变化,而层云降水频次呈逐年下降趋势,其中城市周边区域下降趋势较显著。

对极端降水进行统计和分析,将降水强度 ≥ 10 mm/h 定义为强降水(傅云飞等,2011),降水强度 ≤ 1 mm/h 定义为弱降水。1998—2012 年夏季合肥城区发生强降水频次约为 3%,周边区域降水频次约为 5%,下风区降水频次约为 6.5%,比城区高约 75%(图 11a)。城区弱降水频次约为 33.1%,而周边区域降水频次约为 30.8%,而下风区降水频次约为 28%,比城区降低约 18%(图 11b)。可见 1998—

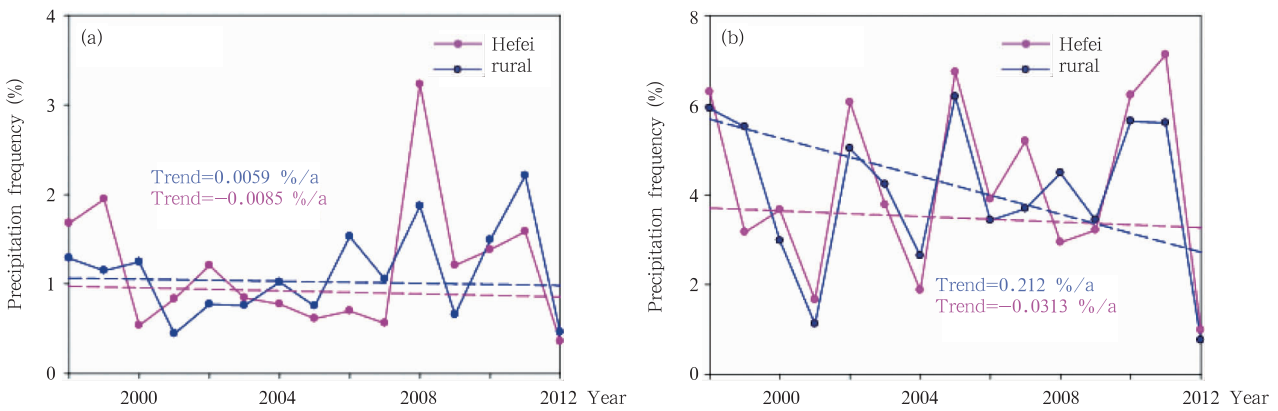


图 10 同图 9,但为降水频次
Fig. 10 Same as Fig. 9 but for precipitation frequency

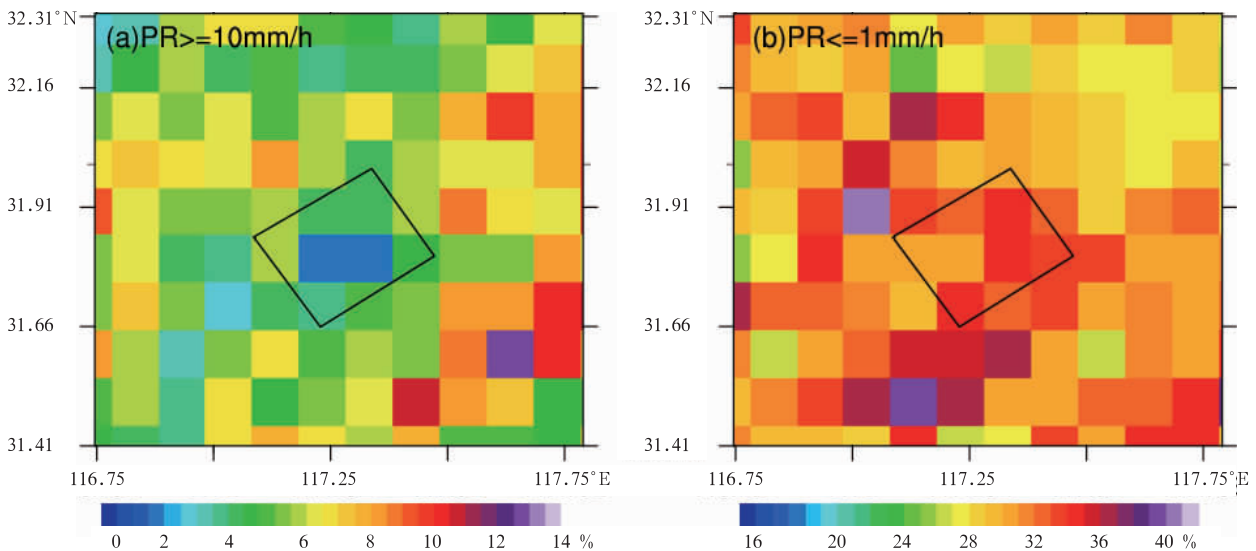


图 11 1998—2012 年合肥城区夏季极端降水频次分布
(a. 降水强度 ≥ 10 mm/h, b. 降水强度 ≤ 1 mm/h)

Fig. 11 Distributions of extreme precipitation occurrence frequency over Hefei district in summer-season from 1998 to 2012

(a. precipitation rate ≥ 10 mm/h, b. precipitation rate ≤ 1 mm/h)

2012年合肥地区夏季极端降水空间分布差异较明显,合肥城区的强降水频次低于城市周边区域,而弱降水城区频次高于周边区域,其中城市的下风区强降水频次要高于城区,而弱降水频次则在合肥地区最低。极端降水的发生、发展及分布特征尚需进一步探测和研究。

4 结 论

基于热带测雨卫星 TRMM 上搭载的测雨雷达 15 年观测资料,对合肥地区夏季对流和层云降水水平空间和垂直分布特征、降水的日变化特征、降水气候变化规律以及极端降水分布特征进行了研究,得到以下结论:

(1) 合肥地区层云降水的频次高于对流降水频次,由于对流强度较大,两种降水对总降水量的贡献相当;主城区层云和对流的降水强度均低于周边区域,对流降水频次低于周边区域,而层云降水频次高于周边区域。说明城市化发展是改变降水的空间分布的因素之一,对不同的降水类型空间分布影响存在差异性。

(2) 就降水的垂直结构特征而言,合肥城区的两种降水回波信号均高于周边区域,而降水强度均低于周边区域。表明地表粗糙度增加和城市热效应引起的大气低层气流辐合加强使得降水云发展深厚,同时城市面积扩张导致下垫面的改变,城市区域污染气溶胶粒子的存在,抑制了降水。

(3) 针对合肥地区降水日循环特征研究表明,两种降水的降水强度在不同时段差异性较大。城区对流降水主要受到白天城市热岛效应致边界环流和夜间热岛的影响,主城区降水强度峰值出现在午后,次峰出现在夜间,对应的降水频次峰值出现在夜间,次峰为午后;周边区域降水强度峰值出现在凌晨,主城区和周边区域降水频次峰谷出现的时间不同,但值相差不大。对于层云降水,主城区与其周边区域降水频次峰值出现时间比较一致,而主城区降水强度略低。可见合肥地区对流和层云降水的强度和频次日循环存在时空分布不均匀性,城区对流降水强度和频次与城市热岛效应日循环一致;总体来看城市化对局地降水强度影响较大,而对局地降水频次的总体影响不是很明显。

(4) 合肥地区降水强度和频次气候变化趋势分析表明,主城区两种类型降水强度和频次均呈逐年

下降趋势,其中对流降水强度呈较显著下降趋势。周边区域的降水强度呈逐年不显著上升趋势,降水频次呈逐年下降趋势,其中层云降水频次下降趋势较显著。快速城市化进程使得城市及其周边区域降水不均匀性逐年增大。

(5) 对于极端降水空间分布研究表明,城市快速发展造成了合肥地区强降水和弱降水不均匀分布,主城区强降水频次低于周边区域,而弱降水频次高于周边区域,其中下风区强降水频次最高,高于主城区约 75%,而弱降水频次在合肥地区最低,低于主城区约 18%。

城市化效应对降水分布特征的影响中尚有很多问题亟待解决,如城市区域降水的垂直结构和城市建筑高度以及城市人为气溶胶的关系,极端降水的发生、发展及分布特征需要进一步深入研究。

致 谢:感谢日本国家空间发展署(JAXA)的地球观测研究中心(EORC)和美国航空航天局(NASA)的戈达德空间飞行中心(GSFC)为本研究提供了 TRMM PR 资料,感谢中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)提供了 Landsat 数据资料。

参考文献

- 陈凤娇,傅云飞. 2015. 基于 PR 和 VIRS 融合资料的东亚台风和非台风降水结构分析. 气候与环境研究, 20(2): 188-200. Chen F J, Fu Y F. 2015. Characteristics of typhoon precipitation and non-typhoon precipitation over East Asia based on merged PR and VIRS data. Climatic Environ Res, 20(2): 188-200 (in Chinese)
- 范泽孟,岳天祥,宋印军. 2009. 基于 YUE-HASM 方法的气温与降水时空变化趋势. 地理研究, 28(3): 643-652. Fan Z M, Yue T X, Song Y J. 2009. Changing trends of temperature and precipitation based on YUE-HASM method. Geograph Res, 28(3): 643-652 (in Chinese)
- 傅云飞,张爱民,刘勇等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析. 气象学报, 66(5): 730-746. Fu Y F, Zhang A M, Liu Y, et al. 2008. Characteristics of convective and stratiform precipitation at seasonal scale in Asia based on measurements by TRMM Precipitation Radar. Acta Meteor Sinica, 66(5): 730-746 (in Chinese)
- 傅云飞,刘鹏,林锦冰等. 2011. 星载测雨雷达探测的中国南部雨季对流性暴雨频次分析. 暴雨灾害, 30(1): 1-5. Fu Y F, Liu P, Lin J B, et al. 2011. Analysis on frequency of convective storm rain in rainy season over southern China based on measurements by TRMM Precipitation Radar. Torrent Rain Dis, 30(1): 1-5 (in Chinese)
- 傅云飞,刘奇,王雨等. 2012. 热带测雨卫星搭载的仪器及其探测

- 结果在降水分析中的应用. 中国工程科学, 14(10): 43-50. Fu Y F, Liu Q, Wang Y, et al. 2012. TRMM satellite on board instruments and the application on precipitation analysis of their measurements. Eng Sci, 14(10): 43-50 (in Chinese)
- 江志红, 唐振飞. 2011. 基于 CMORPH 资料的长三角城市化对降水分布特征影响的观测研究. 气象科学, 31(4): 355-364. Jiang Z H, Tang Z F. 2011. Urbanization effects on precipitation over the Yangtze River Delta based on CMORPH data. J Meteor Sci, 31(4): 355-364 (in Chinese)
- 李书严, 马京津. 2011. 城市化进程对北京地区降水的影响分析. 气象科学, 31(4): 414-421. Li S Y, Ma J J. 2011. Impact of urbanization on precipitation in Beijing area. J Meteor Sci, 31(4): 414-421 (in Chinese)
- 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. 大气科学, 33(6): 1259-1266. Li W B, Du Y D, Wang G D, et al. 2009. Urbanization effects on precipitation over the Pearl River Delta based on satellite data. Chinese J Atmos Sci, 33(6): 1259-1266 (in Chinese)
- 林恒, 孙鉴泞. 2014. 城市化对长江三角洲区域降水的可能影响. 南京大学学报(自然科学), 50(6): 792-799. Lin H, Sun J N. 2014. Possible effects of urbanization on regional precipitation over Yangtze River Delta area. J Nanjing Univ(Nat Sci), 50(6): 792-799 (in Chinese)
- 刘鹏, 傅云飞, 冯沙等. 2010. 中国南方地基雨量计观测与星载测雨雷达探测降水的比较分析. 气象学报, 68(6): 822-835. Liu P, Fu Y F, Feng S, et al. 2010. A comparison of the precipitation from rain gauge observations with from TRMM PR measurements in the southern China. Acta Meteor Sinica, 68(6): 822-835 (in Chinese)
- 苗世光, Chen F, 李青春等. 2010. 北京城市化对夏季大气边界层结构及降水的月平均影响. 地球物理学报, 53(7): 1580-1593. Miao S G, Chen F, Li Q C, et al. 2010. Month-averaged impacts of urbanization on atmospheric boundary layer structure and precipitation in summer in Beijing area. Chinese J Geophys, 53(7): 1580-1593 (in Chinese)
- 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. 大气科学, 30(2): 221-234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004. Chinese J Atmos Sci, 30(2): 221-234 (in Chinese)
- 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. 大气科学, 31(2): 311-320. Sun J S, Shu W J. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region. Chinese J Atmos Sci, 31(2): 311-320 (in Chinese)
- 王喜全, 王自发, 齐彦斌等. 2007. 城市化与北京地区降水分布变化初探. 气候与环境研究, 12(4): 489-495. Wang X Q, Wang Z F, Qi Y B, et al. 2007. Preliminary inspect about the effect of urbanization on precipitation distribution in Beijing area. Climatic Environ Res, 12(4): 489-495 (in Chinese)
- 杨元建, 石涛, 唐为安等. 2011. 气象台站环境的卫星遥感调查与评估——以安徽代表气象站为例. 遥感技术与应用, 26(6): 791-797. Yang Y J, Shi T, Tang W A, et al. 2011. Study of observational environment of meteorological station based remote sensing: Cases in six stations of Anhui province. Remote Sens Technol Appl, 26(6): 791-797 (in Chinese)
- 张朝林, 苗世光, 李青春等. 2007. 北京精细下垫面信息引入对暴雨模拟的影响. 地球物理学报, 50(5): 1373-1382. Zhang C L, Miao S G, Li Q C, et al. 2007. Impacts of fine-resolution land use information of Beijing on a summer severe rainfall simulation. Chinese J Geophys, 50(5): 1373-1382 (in Chinese)
- 张珊, 黄刚, 王君等. 2015. 城市地表特征对京津冀地区夏季降水的影响研究. 大气科学, 39(5): 911-925. Zhang S, Huang G, Wang J, et al. 2015. Impact of urban surface characteristics on summer rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei area. Chinese J Atmos Sci, 39(5): 911-925 (in Chinese)
- 赵文静, 张宁, 汤剑平. 2011. 长江三角洲城市带降水特征的卫星资料分析. 高原气象, 30(3): 668-674. Zhao W J, Zhang N, Tang J P. 2011. Analyses on precipitation characteristics in the Yangtze River Delta city belt based on the satellite data. Plateau Meteor, 30(3): 668-674 (in Chinese)
- 郑祚芳, 祁文, 李青春等. 2015. 基于自动站观测的北京夏季降水特征. 气候与环境研究, 20(2): 201-208. Zheng Z F, Qi W, Li Q C, et al. 2015. Statistical characteristics of precipitation in summer in Beijing area during 2007 - 2011. Climatic Environ Res, 20(2): 201-208 (in Chinese)
- Alpert P, Halfon N, Levin Z. 2008. Does air pollution really suppress precipitation in Israel? J Appl Meteor Climatol, 47(4): 933-943
- Baik J J, Kim Y H, Chun H Y. 2001. Dry and moist convection forced by an urban heat island. J Appl Meteor, 40(8): 1462-1475
- Carr N, Kirstetter P E, Hong Y, et al. 2015. The influence of surface and precipitation characteristics on TRMM microwave imager rainfall retrieval uncertainty. J Hydrometeorol, 16(4): 1596-1614
- Carraça M G D, Collier C G. 2007. Modelling the impact of high-rise buildings in urban areas on precipitation initiation. Meteor Appl, 14(2): 149-161
- Changnon S A. 2003. Urban modification of freezing-rain events. J Appl Meteor, 42(6): 863-870
- Chen S, Li W B, Du Y D, et al. 2015. Urbanization effect on precipitation over the Pearl River Delta based on CMORPH data. Adv Climate Change Res, 6(1): 16-22
- Fu Y F, Liu G S. 2001. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data. J Appl Meteor, 40(12): 2130-2143
- Fu Y F, Liu G S. 2003a. Precipitation characteristics in mid-latitude

- East Asia as observed by TRMM PR and TMI. *J Meteor Soc Japan*, 81(6): 1353-1369
- Fu Y F, Lin Y H, Liu G S, et al. 2003b. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR. *Adv Atmos Sci*, 20(4): 511-529
- Fu Y F, Liu G S. 2007. Possible misidentification of rain type by TRMM PR over Tibetan Plateau. *J Appl Meteor Climatol*, 46(5): 667-672
- Fu Y F, Chen F J, Liu G S, et al. 2016. Recent trends of summer convective and stratiform precipitation in mid-eastern China. *Sci Rep*, 6: 33044
- Ganeshan M, Murtugudde R, Imhoff M L. 2013. A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall. *Urban Climate*, 6: 1-23
- Givati A, Rosenfeld D. 2004. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. *J Appl Meteor*, 43(7): 1038-1056
- Guo X L, Fu D H, Wang J. 2006. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing city. *Atmos Res*, 82(1-2): 112-126
- Gutowski W J, Arritt R W, Kawazoe S, et al. 2010. Regional extreme monthly precipitation simulated by NARCCAP RCMs. *J Hydrometeorol*, 11(6): 1373-1379
- Hagemeyer B C. 1991. A lower-tropospheric thermodynamic climatology for March through September: Some implications for thunderstorm forecasting. *Wea Forecasting*, 6(2): 254-270
- Halfon N, Levin Z, Alpert P. 2009. Temporal rainfall fluctuations in Israel and their possible link to urban and air pollution effects. *Environ Res Lett*, 4(2): 025001
- Han L F, Xu Y P, Yang L, et al. 2015. Changing structure of precipitation evolution during 1957 - 2013 in Yangtze River Delta, China. *Stoch Environ Res Risk Assess*, 29(8): 2201-2212
- Hand L M, Shepherd J M. 2009. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma city: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteor Climatol*, 48(2): 251-269
- Huff F A, Changnon S A Jr. 1973. Precipitation modification by major urban areas. *Bull Amer Meteor Soc*, 54(12): 1220-1232
- Kaufmann R K, Seto K C, Schneider A, et al. 2007. Climate response to rapid urban growth: Evidence of a human-induced precipitation deficit. *J Climate*, 20(10): 2299-2306
- Li W B, Chen S, Chen G X, et al. 2011. Urbanization signatures in strong versus weak precipitation over the Pearl River Delta metropolitan regions of China. *Environ Res Lett*, 6(3): 034020
- Lu D R, Yang Y J, Fu Y F. 2016. Interannual variability of summer monsoon convective and stratiform precipitations in East Asia during 1998 - 2013. *Int J Climatol*, 36(10): 3507-3520
- Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. 2007. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for Atlanta, Georgia. *Geophys Res Lett*, 34(20): L20710
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001. Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549): 2119-2124
- Ren G Y. 2015. Urbanization as a major driver of urban climate change. *Adv Climate Change Res*, 6(1): 1-6
- Ren Y Y, Ren G Y. 2011. A remote-sensing method of selecting reference stations for evaluating urbanization effect on surface air temperature trends. *J Climate*, 24(13): 3179-3189
- Rosenfeld D. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. *Geophys Res Lett*, 26(20): 3105-3108
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science*, 287(5459): 1793-1796
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? *Science*, 321(5894): 1309-1313
- Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteor*, 42(6): 716-738
- Shem W, Shepherd M. 2009. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 92(2): 172-189
- 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 Appl Meteor*, 41(7): 689-701
- Shepherd J M, Burian S J. 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. *Earth Interact*, 7(4): 4
- Shepherd J M. 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future. *Earth Interact*, 9(12): 12
- Shepherd J M. 2006. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes. *J Arid Environ*, 67(4): 607-628
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information. *J Climate*, 15(9): 983-1001
- Yuter S E, Houze R A Jr. 1995. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus. Part II: Frequency distributions of vertical velocity, reflectivity, and differential reflectivity. *Mon Wea Rev*, 123(7): 1941-1963
- Zhang C L, Chen F, Miao S G, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area. *J Geophys Res*, 114(D2): D02116