

岳彩军,唐玉琪,顾问,等,2019.城市阻碍效应对局地台风降水的影响[J].气象,45(11):1611-1620. Yue C J, Tang Y Q, Gu W, et al, 2019. Study of urban barrier effect on local typhoon precipitation[J]. Meteor Mon, 45(11):1611-1620(in Chinese).

城市阻碍效应对局地台风降水的影响^{*}

岳彩军 唐玉琪 顾 问 韩志惠 王晓峰

上海市生态气象和卫星遥感中心,上海 200030

提 要: 城市阻碍效应是城市化影响降水形成过程的可能物理机制之一,在于其改变了风场、风场辐合,甚至改变了天气系统本身,进而改变了湿度平流,最终影响城市降水的落区、强度。风速越大,城市阻碍效应越明显。现有关于下垫面对台风降水影响研究主要着重分析地形及地表状况对台风降水落区及强度的影响,但对作为下垫面因子之一的城市对台风降水的影响作用考虑明显不够。全面系统回顾国内外有关城市阻碍效应对降水影响研究进展,以及下垫面对台风降水影响研究进展。上海是我国城市化程度最高的城市,同时平均每年受到 2~3 个台风影响。已有研究关注到了城市阻碍效应对上海局地台风降水影响作用,但是,对于表征台风降水的城市阻碍效应还存在明显不足。最后具体给出了未来有关城市阻碍效应在上海局地台风降水研究中的应用思考。

关键词: 城市阻碍效应,上海,局地台风降水,城市化,应用

中图分类号: P447

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.011

Study of Urban Barrier Effect on Local Typhoon Precipitation

YUE Caijun TANG Yuqi GU Wen HAN Zhihui WANG Xiaofeng

Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030

Abstract: Urbanization has changed the surface properties and characteristics, and more attentions have been paid to its influence on weather and climate. The urban barrier effect is one of the possible physical mechanisms for the urbanization to influence the formation process of precipitation. The urban barrier effect changes the wind field, wind convergence and even the weather system itself, and further changes the humidity advection, eventually affecting the urban precipitation location and intensity. The greater the wind speed, the more obvious the barrier effect of the city. However, current studies on the effect of underlying surface on typhoon precipitation mainly focus on the impact of topography and surface conditions on typhoon precipitation location and intensity, but the influence of cities as one of underlying surface factors on typhoon precipitation has not been considered enough. In this paper, the research progress on the impact of urban barrier effect on precipitation and the influence of underlying surface on typhoon precipitation are reviewed. Shanghai is the most urbanized city in China, and it is affected by 2—3 typhoons every year on average. Previous studies have focused on the influence of urban barrier effect on local typhoon precipitation in Shanghai, but there are still obvious deficiencies in characterizing the urban barrier effect of typhoon precipitation. Finally, the paper points out the application of urban barrier effect in the study of local typhoon precipitation in Shanghai in the future.

Key words: urban barrier effect, Shanghai, local typhoon precipitation, urbanization, application

^{*} 国家自然科学基金项目(41875059、41775049、41475039、41475041 和 41575048)和上海市气象局研究型项目(YJ201705)共同资助

2018 年 9 月 19 日收稿; 2019 年 3 月 21 日收修定稿

第一作者:岳彩军,主要从事中尺度天气动力学、海气相互作用研究. Email: yuecaijun2000@163.com

引言

随着城市化(指人口向城市地区集中,致使城市区域不断扩张的过程)发展,城市数量不断增加、规模日益扩大。城市化改变了地表属性和地表特征,从而改变了地表对大气的作用,其对天气气候影响问题越来越受到人们的重视。城市化影响降水形成过程的可能物理机制(Changnon, 1981; 杨士弘等, 1997)主要包括三个方面:(1)城市热岛效应,(2)城市阻碍效应,(3)凝结核效应。Bornstein and Lin (2000), Dixon and Mote (2003), Chen et al (2007), Hand and Shepherd (2009), Comarazamy et al (2010)研究表明,城市的热岛效应、阻碍效应和凝结核效应均受限于气象条件,尤其对云覆盖程度和风速大小较为敏感。一般在晴空、弱强迫系统影响的静稳天气背景下,城市热岛效应和凝结核效应相对明显,而此时城市阻碍效应相对较弱;相反,受强天气系统影响云系多、风速大的情况下,尤其是在风速大的情况下,由于热力混合和机械混合作用,城市热岛效应和凝结核效应趋于消失,而此时城市阻碍效应相对明显,且风速越大,城市阻碍效应越明显。Loose and Bornstein (1977), Hjelmfelt (1982), Brown and Arnold (1998)研究明确指出,存在一个风速临界值(地面风速一般不超过 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),在该临界值之下城市热岛效应明显,而临界值之上城市阻碍效应明显。对于台风来讲,常常伴随大风、强降水及密布的螺旋云系。同时,在我国对于某地是否受台风影响也有明确定义,即该区域内有一站满足以下三个条件之一:(1)出现过程降水量 $\geq 50\text{ mm}$;(2)出现 ≥ 7 级($13.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的平均风,或 ≥ 8 级($17.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的阵风;(3)出现过程降水量 $\geq 30\text{ mm}$,且出现 ≥ 6 级($10.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)的平均风或 ≥ 7 级的阵风。这表明受台风影响的地区风雨特征显著。由此可知,在受台风影响的天气背景条件下,城市阻碍效应是相对突出的。城市阻碍效应主要通过四个方面影响城市降水(谈建国和顾问, 2015):(1)延长天气系统滞留在城市的时间,使降水时间延长,降水强度增大;(2)降低近地面风速,导致近地面风场产生辐合,触发对流降水;(3)迫使近地层的平均动能向湍流动能转化,使得城市近地层中

的动量通量增大;(4)城市冠层导致降水云团的分裂或绕流。上海是我国最大经济中心、城市化效率最高、城市化程度最高的城市,尤其进入 21 世纪之后其城市化更为显著(《上海统计年鉴》(2017 版), <http://www.stats-sh.gov.cn/html/sjfb/201901/1003014.html>)。同时,上海东濒东海,平均每年约受 2~3 个台风影响。由于上海城市化程度高,经济发达,也致使其城市脆弱性大,影响上海的台风常常引发狂风暴雨,给经济造成严重损失、城市安全造成极大危害。因此,开展城市阻碍效应对上海局地台风降水影响的应用研究具有重要的科学价值和应用价值,不仅有助于进一步深入理解和全面认识城市化与台风降水形成的内在联系,还将进一步提升城市安全的气象服务保障能力,为我国沿海城市台风降水预报提供一些更有价值的参考依据和方法。

1 国内外关于城市阻碍效应对降水影响研究

关于城市化对降水影响,Shepherd (2005),孙继松 (2014),谈建国和顾问 (2015),胡庆芳等 (2018) 开展过综述性研究并指出,很多研究关注的是城市热岛对局地雷暴作用,且多数研究认为城市热岛有助于降水强度增强,另外,Rosenfeld (2000) 从城市化凝结核作用角度研究所得结论与之相反。这在一定程度上表明城市化对降水影响作用仍然存在争议。鉴于在台风影响的天气背景条件下,城市热岛效应和凝结核效应相对较弱,而城市阻碍效应相对突出,因此,下文我们主要回顾国内外有关城市阻碍效应对降水影响所取得的研究成果。

1.1 国外关于城市阻碍效应对降水影响研究

国外学者从 20 世纪 70 年代开始开展大量城市化对降水的影响研究,包括开展 METROMEX 大型观测试验和利用数值模式模拟。Huff and Changnon (1973), Bornstein and Lin (2000), Shepherd and Burian (2003), Dixon and Mote (2003) 研究发现,城市区域的高大建筑物会影响近地层的风场结构。Landsberg (1981) 指出,当地面风遇到粗糙度明显的城市时,水平风速趋于明显下降。Hjelmfelt (1982), Bornstein and Lin (2000), Thielen et al (2000), Baik et al (2001), Rozoff et al (2003), Lin

et al(2008), Shem and Shepherd(2009)的理论和数值试验研究表明,城市化将增加城市粗糙度,随之导致大气辐合增强,进而促进上升运动增强,引发城市雷暴增加。Bornstein and LeRoy(1990)和 Bornstein and Lin(2000)还指出,由于城市冠层中建筑物阻碍效应,引发降水系统在城市上空延滞,并导致城市及周边区域降水落区呈现分化(bifurcation)。Niyogi et al(2011)基于雷达反射率因子分析 2000—2009 年美国印第安纳波利斯夏季 91 个雷暴过程发现,60%以上雷暴经过城市时结构发生了改变,经过郊区时结构发生改变的雷暴仅占 25%,水平尺度较大的雷暴有在城区上空分裂以后再在市区下游合并的趋势。Rozoff et al(2003)模拟 1999 年美国圣路易斯一次风暴过程发现,城市地表粗糙度引起风场辐合可以触发深厚湿对流。Vogel and Huff(1978)针对美国圣路易斯研究发现,城市地表粗糙度对降水的主要影响在于改变其时空分布特征和短持续降水。Thielen et al(2000)采用一个 γ 中尺度模式模拟法国巴黎城市地表粗糙度对对流性降水发展的影响发现,城市热通量增加和下垫面粗糙度的增加引起局地环流变化而导致市区降水增加。Simpson(2006)研究城市表面粗糙度的作用发现,由于城市表面粗糙度大,增强了城市表面应力,造成城市迎风面的辐合增加,背风面减小,从而造成迎风一侧的降水增多。Kusaka et al(2014)基于集合气候模拟揭示东京城市化引发降水增加的机制指出,通过“应力响应”模拟来增加城市强迫作用,以此来检验降水对城市粗糙度的响应,结果表明,城市化导致东京市区降水量显著增加。原因在于地表感热通量增加和水平湿度通量出现了辐合,并指出水平湿度通量辐合的出现是因为城市化改变了海风所致。Ryu et al(2016)利于 WRF-PUCM 耦合模式针对美国巴尔的摩-华盛顿城市群陆面不均匀性(heterogeneities)对对流降水落区、强度及起止时间影响进行了数值试验研究,结果表明,陆面的不均匀性改变了低层风场及风场辐合,进而改变了城市及周边区域的湿度水平和垂直传输,从而影响了降水的落区、强度。还有研究指出,城市阻碍效应对降水影响还与风向密切相关。Changnon et al(1991)通过分析降水发生之前的低层风场,研究美国圣路易斯城市化对春、秋、冬季降水变化的影响,指出降水发生之前的风向与之后城市下风方向出现的降水落区、强度之间存在一定关联,且这种关系在不同的季节表现

不同:秋季城市下风方向降水增加 17%,并且当风向为 SE 时城市下风方向降水增幅最为明显;冬季城市下风方向降水变化很小,但当风向为 SW 时城市下风方向降水有较为明显增加,而当风向为 SE 或 NW 时,城市下风风向降水则是减少的;春季城市下风方向降水仅增加 4%。他们还分析指出可能是由于不同季节引发降水事件的天气系统不同,以及降水性质存在差异所致。Diem and Mote(2005)基于 1953—2002 年夏季日降水量研究美国亚特兰大和佐治亚州城市化对降水分布特征影响时指出,有必要考虑风向与降水落区的关系。上述研究表明,城市阻碍效应改变了风场、风场辐合,甚至改变了天气系统本身,进而改变了湿度平流,最终影响城市降水的落区、强度。

1.2 国内关于城市阻碍效应对降水影响研究

随着我国城市化进程推进,城市建筑物的密度和高度不断增加。国内学者针对城市阻碍效应也开展了大量观测和数值模拟研究。刘红年等(2008)对南京城市边界层微气象特征观测与分析发现,城区风速明显低于郊区,高度越低,城区与郊区风速相差越大。刘罡等(2009)分析南京 2005 年夏季的边界层风场也发现,市区摩擦速度比郊区大。徐阳等(2009)统计分析 1993—2003 年北京 325 m 气象塔 15 层的风速廓线资料发现,由于城区建筑对近地面层空气具有摩擦作用,城市化使得相对风速减小,并且越靠近地面风速减小越明显。这充分反映了城市建筑对近地层空气流动的摩擦作用。赵娜等(2011)利用 1961—2008 年北京 12 个台站的气候观测资料,研究分析了近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响,指出从 20 世纪 80 年代中期以后郊区的风速普遍大于城区的风速,可能与北京进入快速发展期后,城区增加了大量的高大建筑物,改变了城区下垫面的性质,增大了下垫面的粗糙度有关,进而导致风速的减少。吴息等(2016)通过地面风速 Weibull 概率分布参数的阶段变化来描述城市化对地面风速的影响,在一定程度上反映出城市扩张是城市风速概率分布参数变化的主要原因。张宁等(2002)用一个湍流能量闭合的三维城市街区气流模式对一个居民区的建筑物群对流场结构的影响进行诊断分析发现,由于建筑物的阻挡和拖曳作用,会造成城市区域风速的减弱,这种作用在垂直方向上可达建筑物平均高度的 2 倍。蒙伟光等(2007)认为当雷暴系统移

经城市时,低层的辐合增强与城区粗糙度的增大有着直接联系。低层辐合中心的增大也能够引起强的上升运动,并引发新的单体发展。黎伟标等(2009)利用 TRMM 降水资料以及 QuikSCAT 风场资料开展了珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究,结果表明,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。廖镜彪等(2011)利用 1959—2009 年逐日降水观测数据分析城市化对广州降水的影响得出,城市化进程加快后,广州市的极端降水天气有明显的增加趋势,这可能是由于城市建筑物高低不一,其粗糙程度比附近郊区大,这不仅引起湍流,而且对稳定滞缓的降水系统有阻碍效应,使其移动速度减慢,在城区滞留时间加长,从而导致城区降水强度增大,降水时间延长。Miao et al(2011)用 WRF 模式耦合单层城市冠层模式模拟了 1996 年 8 月 1 日北京市的降水过程,发现飚线经过城市时被分裂成了两个对流单体。Yu and Liu(2015)利用 WRF/BEP 模式对北京“7·21”暴雨进行模拟,基于数值试验分析得出,当锋面到达城市地区以后,由于非均匀的城市地表增加了摩擦力,使得锋面在城区的移动速度逐渐减慢,导致城市地区锋面降水的时间提前而持续时间延长,并最终导致降水量增加。Zhong et al(2015)针对北京 2008 年 6 月 1 日典型锋面降水个例开展的数值试验研究也有相似发现。徐蓉等(2013)用 WRF 模式耦合 Noah/UCM 模式针对南京 2011 年 7 月 23 日雷暴个例数值试验指出,城市立体建筑物较农田下垫面呈现更大粗糙度,低层气流通过上方时减速滞留,影响该区域上空系统的动力结构。这种对低层风场的阻滞效应,使湿空气在城市上方堆积,加上雷暴系统向外流出的气流与城市下垫面上热力环流的相互作用,造成气流在城市迎风一侧产生辐合抬升,雨水混合比增强,从而导致该区域的降水增多,并使雷暴系统降水的落区与强度发生了改变。上述研究表明,我国学者也同样发现城市阻碍效应对降水的影响作用,并取得了有意义的成果。众所周知,城市效应在下垫面中的比重在不断增加,台风又是一个重要的产生降水的天气系统。郑焘等(2018)结合台风韦森特(1208)和海鸥(1415)数值试验发现,地形和陆面特征是影响深圳、香港地区局地阵风强度的重要因子。接下来介绍下垫面对台风降水的影响研究。

2 下垫面对台风降水影响的研究回顾

众所周知,下垫面是指与大气下层直接接触的地球表面。除包括海洋、陆地上的高原、山地、平原、森林、草原等外,还包括数量不断增加、规模日益扩大的城市,是影响天气气候的重要因素之一。陈联寿和丁一汇(1979),陈联寿和孟智勇(2001),陈联寿等(2002;2004),陈联寿(2006),陈联寿和许映龙(2017),章淹等(1995),刘还珠(1998),Meng et al(2002),李江南等(2003;2004),钮学新等(2005a;2005b),程正泉等(2005),董美莹等(2009),Chen et al(2010),丛春华等(2011),任福民和向纯怡(2017)开展台风降水综述性研究指出,下垫面是影响台风降水形成的重要因素之一。地形、地表分布状况对台风降水影响研究一直在热带气旋(TC)研究中占有十分重要的地位。Bosart and Dean(1991),Wu(2001),Wu et al(2002),Lin et al(2002),钮学新等(2005b),冀春晓等(2007),余贞寿等(2007),黄奕武等(2009),岳彩军(2009),Yang et al(2011),Smith et al(2009a;2009b),Gao et al(2009),徐昕等(2010),Dong et al(2010),陈俊等(2017),杨舒楠等(2019)研究着重关注的是地形作用,并发现地形增强了台风降水强度及其水平非对称分布特征。Dunn and Miller(1960)推测认为,在北半球,由于地表与海表摩擦的差异性,将引起登陆 TC 右侧产生摩擦辐合,导致了 TC 路径右侧海岸线上发生较高的降水率。Tuleya and Kurihara(1978)基于理想数值试验结果也认为降水位于 TC 右侧是由来自右侧海洋上的向岸湿度平流和增强的边界层辐合作用引起的。陶诗言(1980),斯公望(1990)研究指出,当台风已经登陆或将要登陆时,在台风右前方向岸边的地形抬升比较显著,致使最大雨量往往出现在台风右前象限或前半部。钮学新等(2005b)结合台风森拉克降水进行了数值模拟及数值试验研究指出,地形作用使迎风坡及降水中心增加雨量,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称、更不均匀。地形分布越不均匀(山脉越高),地形作用越大。这主要是迎风坡使湿空气的上升气流增强,降水大,而背风坡较长时间处于干而下沉的气流中。冀春晓等(2007)分析 2004 年的登陆台风娜娜降水时发现,登陆期间强雷达回波带出现在台风移动的右前方,地形对台风降水不对称分布有明显影响。陈训来等

(2005)对台风 Utor 登陆广东过程的数值研究表明,下垫面粗糙度(摩擦)对台风强度有影响,地形作用(抬升)能使迎风坡的降水明显增加。余贞寿等(2007)数值敏感性试验表明,地形使台风海棠降水分布更加不均匀。黄奕武等(2009)结合日本再分析资料初步分析了 2007 年台风罗莎登陆期间地形对降水的影响作用,指出强降水区主要分布在沿海山体的迎风坡上。Ramsay and Leslie(2008)基于 MM5 模式研究了复杂地形对登陆澳大利亚东北地区热带气旋的影响指出,山地地形对 TC 风场有显著影响,并影响降水的水平分布,导致迎风坡出现局地极端强降水。这主要因为 TC 边界层流场与下垫面相互作用所致。Tang et al(2012)对 2001 年台风 Nari 数值模拟研究指出,地形引起的重力波或者风对降水的平流作用也会引起背风坡的降水。除此之外,还有学者从其他角度研究下垫面与台风降水的关系。登陆台风暴雨常造成陆面近似饱和的湿地状况,这种饱和湿地对台风维持及暴雨增幅有重要影响。Chen(1998)指出,如果登陆后的台风环流停滞在一块大的水面(湖泊、水库)上或一块被台风暴雨浇出的饱和湿地上,则能维持较长时间,同时台风暴雨下饱和土壤层和积水对台风产生水汽反馈,反过来加剧该地的暴雨。李英和陈联寿(2005)进一步通过各种敏感性试验,研究了饱和湿地对热带气旋在大陆上维持和降水的影响。结果表明,湿地边界层内各通量对登陆热带气旋的强度、结构及其降水具有明显影响。潜热和感热通量有利于台风雨带螺旋结构的维持,对台风降水分布有明显影响。动量交换对台风降水具有局地增幅作用。Shen et al(2002)通过数值模拟研究地表水(水面粗糙度、水体深度)对登陆飓风的影响指出,增加水面粗糙度(水面植物高度),导致水面风速减小,但对 TC 中心气压影响不大,主要因为增加了水面粗糙度,也增强了水面蒸发和水面拖曳效应。郑庆林等(1996)研究表明,海岸线的分布既能影响热带气旋降水增幅的发生落区,也影响降水增幅的强度。数值模拟表明暴雨中心随海岸线的扩展而移动,可发生在“扩展陆地”上。由于海岸线的走向不同,热带气旋登陆期间造成的强降水非对称分布,在华南登陆的热带气旋大范围雨区多在热带气旋东侧,而在华东登陆的热带气旋雨区常在北侧。Kimball(2008)基于理想飓风模式,研究了不同下垫面特征对飓风登陆前、登陆期间及登陆后降水形成的影响,指出在 TC 登陆的

不同阶段,TC 环流与下垫面接触面积及相对位置变化,以及下垫面粗糙度和湿度条件的改变,都会引起 TC 降水的落区及强度发生变化。巢清尘和巢纪平(2014)利用中国气象局上海台风研究所整编的《热带气旋年鉴》数据集,研究了全国、长三角和珠三角关键经济区 TC 降水的气候变化趋势。上述研究取得了有意义的成果,着重分析了地形及地表状况对台风降水落区及强度的影响。但对作为下垫面因子之一的城市对台风降水的影响作用考虑明显不够。最近,杨挺等(2018)开展了城市效应对 2016 年登陆热带气旋妮妲的数值模拟研究指出,城市化下垫面对暴雨增幅明显,在登陆热带气旋降水预报中应重视。众所周知,上海是国际化大都市,城市化特征尤为明显,同时平均每年约受 2~3 个台风影响。那么城市阻碍效应对上海市域降水尤其影响上海的局地台风降水落区、强度会产生何种影响?

3 上海城市化特点及城市阻碍效应对上海降水影响研究

上海城市化速率高于中国平均水平,是我国城市化快速发展的典型区域之一(敖翔宇等,2017;杨辰等,2017)。参照上海市统计局整理出版的 2017 年《上海统计年鉴》相关标准,将高度在 8 层(垂直高度约为 20 m)以上建筑视为高层建筑物。进一步统计分析 2000、2005、2010、2015 及 2016 年上海市高度在 8 层以上高层建筑物的幢数资料(图 1)可知,进入 21 世纪以来,上海 8 层以上高层建筑物的高度及其数量均呈倍数增长,尤其是进入 2010 年后更为显著。另一方面,上海平均每年约受 2~3 个台风影响,2018 年,上海遭受 4 个台风影响,其中有 3 个台风直接登陆上海。这也意味着伴随着上海城市化加速,上海城市阻碍效应对天气影响尤其台风降水将

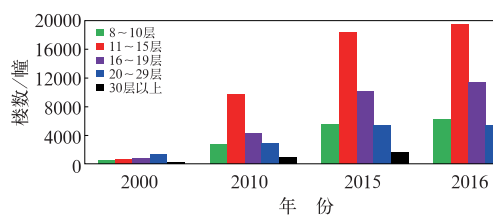


图 1 2000 年以来上海主要年份 8 层以上楼幢数统计情况
Fig. 1 Statistics on the number of buildings above eight floors in Shanghai in major years since 2000

愈加明显。那么究竟产生何种影响?

20世纪90年代以来,已有学者开展了上海城市阻碍效应对降水影响研究。李天杰(1995)基于1984—1988年上海水文总站雨量资料,统计分析上海市区城市化对降水影响的程度和范围指出,市区和其下风方向的降水强度要比郊区大,这是由于市区下垫面粗糙度较郊区大,每当气流行经市区上空时受地层摩擦影响,速度减缓,形成阻碍效应。这种阻碍效应对伴随风速较大的台风暴雨影响更为明显,5年期间上海受14个台风影响,有71%台风影响期间市区降水强度明显大于郊区,并指出与台风路径、强度、移速及时间等也密切相关。殷健和梁珊珊(2010)研究城市化对上海市区域降水影响指出,1999—2007年期间影响上海的主要台风有17个,其中,59%台风影响期间市区降水强度大于郊区,城市阻碍效应造成气流总体移动速度减慢和在城区滞留时间增加,进而导致城区降雨强度增大及降雨时间延长,对台风降水造成了较明显影响。基于数值模拟,齐琳琳和赵思雄(2016)分析研究局地地形、地表特征对2001年8月5—6日热带低压引发上海暴雨过程影响时认为,上海地区的地表分布特征虽不是造成此次局地突发性强暴雨的直接原因,但明显影响着暴雨系统的移动、停滞、发展和加强。另外,上海局地地表城市化特征的加强使得城市近地层空气的暖干特性效应和城区上风方风速辐合,并由此引起暴雨系统内中尺度动力、热力特征出现变化。局地城市地表特征是城市暴雨灾害不容忽视的影响因素。吴风波和汤剑平(2011)研究城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响表明,上海城市化使得这次暴雨过程在城市中心区域和迎风区降雨增强,城市背风区降雨减少;而城市化引起的陆面粗糙度等变化的动力作用对城市地区低层风场产生阻挡,使得城市迎风区垂直上升运动增强、水汽增多,是造成城市迎风区降雨增强的主要原因。上述研究不仅揭示了城市阻碍效应对上海降水的影响,尤其是,已经关注到了城市阻碍效应对上海局地台风降水落区及强度的影响作用。

4 结论、讨论与思考

目前城市阻碍效应对降水影响取得了很多有意义的研究成果,多数研究成果都充分体现了城市阻碍效应对降水的显著影响作用。但黄伟峰和沈雪频(1986),Inamura et al(2011)研究认为,对于城市规

模不大、且高层建筑不多的城市,虽然粗糙度增大,但不足以阻碍大尺度天气系统的移动。并认为对于城市降水机制来说,城市粗糙度的影响不是主要的。可见,城市阻碍效应对降水影响作用还是很复杂的,还与城市的规模以及天气系统尺度相关联。

目前关于城市阻碍效应对城市降水影响有观测和数值模拟研究,需要指出的是,城市阻碍效应可进一步细分为城市阻碍作用和城市摩擦作用,前者强调城市作为一个整体对天气系统的影响,例如城市的存在可能造成上风方辐合增强以及绕流造成对流系统分裂、天气系统移动减缓等,它们对降水分布的影响可能造成城市上风方、城市两侧以及城区降水的不同分布等,这种作用和低矮的非规则地形作用相似;城市摩擦作用造成降水变化往往是通过湍流、拖曳等动力学过程造成天气系统内部动力学过程的影响,从而影响城市内部的降水。城市阻碍作用是一个更为宏观的尺度,城市摩擦作用对应更微观的尺度。但仔细分析发现,许多研究仅是笼统描述城市阻碍效应对降水影响而并没有细致分析同一个天气过程中城市阻碍和城市摩擦各自所起的作用。

关于城市阻碍效应对台风降水影响,也有学者开展了统计分析和个例数值模拟研究,统计分析研究发现市区降水强度大于郊区,个例模拟研究认为城市化有助于城市中心区域和迎风区降雨增强。但仔细分析发现,缺乏上海及周边区域边界层内三维高分辨率气象要素资料;没有细致分析在不同类别的台风路径、强度情况下,上海局地台风过程降水、分时段降水落区及强度的具体特征;没有深入分析风向、风速以及湿度传输与上海局地台风降水落区及强度的对应关系;没有诊断揭示出城市阻碍效应背景下影响上海局地台风降水落区及强度的关键动力、热力因子;敏感性数值试验研究没有细致考虑上海城市高层建筑物高度、密度、方位以及城市规模等城市下垫面特征对局地台风降水落区、强度的影响,同样也没有细致分析城市阻碍作用和城市摩擦作用各自对局地台风降水的影响作用,致使对影响机理的理解和认识也不够深入和全面。因此,未来可尝试从以下几个方面开展研究:

(1) 开展上海局地台风降水落区及强度特征分析研究。针对影响上海台风历史样本以及上海境内地面雨量资料,依据台风路径、强度统计分析,得到这些台风在上海产生的降水落区和强度特征。

(2) 开展风场、湿度场与上海局地台风降水落区及强度的关系研究。将上海各种常规、非常规观

测资料与 ERA-Interim 逐日 4 次、 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 、垂直方向 37 层高分辨率再分析资料进行融合分析,采用融合后的高分辨率再分析资料,统计分析风向、风速及湿度传输与上海局地台风降水落区、强度的对应关系,揭示城市阻碍效应。

(3) 开展影响上海局地台风降水落区及强度的关键因子研究。降水发生发展与垂直上升运动条件密切相关,基于融合后的高分辨率再分析资料,着重考虑与垂直运动产生密切相关的动力、热力强迫因子,开展多物理量组合诊断分析,揭示城市阻碍效应背景条件下,影响上海局地台风降水落区及强度的关键动、热力因子。

(4) 开展城市阻碍效应对上海局地台风降水落区及强度影响的可能机理研究。选取典型影响上海台风降水个例,开展城市冠层模式参数上海本地化及与中尺度 WRF 模式耦合模拟研究,并通过改变与城市阻碍效应密切相关的高层建筑物高度、密度、方位以及城市规模和下垫面属性开展敏感性试验,将从宏观尺度上(把城市看作一个整体)探究城市阻碍作用是否可能减慢台风系统的移动和强度?或者说,它是否可能改变台风螺旋雨带的生消、强弱或滞留时间的长短?从微观尺度上探究城市摩擦作用如何影响台风系统经过城市时对流或者其他?通过量化揭示城市阻碍作用和城市摩擦作用,以期进一步深入理解和全面认识城市阻碍效应对上海局地台风降水落区及强度影响的可能机理。

致谢:对美国国家大气研究中心(NCAR)刘长海研究员给予的深入指导,在此表示感谢。

参考文献

- 敖翔宇,谈建国,刘冬韡,等,2017.一种城市地表能量平衡模式在上海的模拟评估[J].气象,43(8):973-986. Ao X Y, Tan J G, Liu D W, et al, 2017. Evaluation of a surface urban energy balance model in Shanghai[J]. Meteor Mon, 43(8): 973-986 (in Chinese).
- 巢清尘,巢纪平,2014.影响中国及关键经济区热带气旋降水的气候趋势及极端性特征[J].大气科学,38(6):1029-1040. Chao Q C, Chao J P, 2014. Climatic trends and extremes of tropical cyclone precipitation affecting China and its key economic zones[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6): 1029-1040(in Chinese).
- 陈俊,平凡,王秀春,等,2017.台湾岛地形对“麦德姆”台风的影响[J].大气科学,41(5):1037-1058. Chen J, Ping F, Wang X C, et al, 2017. Topographic influence of Taiwan Island on Typhoon “Matmo”[J]. Chin J Atmos Sci, 41(5): 1037-1058(in Chinese).
- 陈联寿,2006.热带气旋研究和业务预报技术的发展[J].应用气象学报,17(6):672-681. Chen L S, 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6): 672-681(in Chinese).
- 陈联寿,丁一汇,1979.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社:440-488. Chen L S, Ding Y H, 1979. Outline of the Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press: 440-488(in Chinese).
- 陈联寿,罗哲贤,李英,2004.登陆热带气旋研究的进展[J].气象学报,62(5):541-549. Chen L S, Luo Z X, Li Y, 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteor Sin, 62(5): 541-549(in Chinese).
- 陈联寿,孟智勇,2001.我国热带气旋研究十年进展[J].大气科学,25(3):420-432. Chen L S, Meng Z Y, 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chin J Atmos Sci, 25(3): 420-432(in Chinese).
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等,2002.热带气旋动力学引论[M].北京:气象出版社:17-27, 211-313. Chen L S, Xu X D, Luo Z X, et al, 2002. Introduction to Tropical Cyclone Dynamics[M]. Beijing: China Meteorological Press: 17-27, 211-313(in Chinese).
- 陈联寿,许映龙,2017.中国台风特大暴雨综述[J].气象与环境科学,40(1):3-10. Chen L S, Xu Y L, 2017. Review of typhoon very heavy rainfall in China[J]. Meteor Environ Sci, 40(1): 3-10(in Chinese).
- 陈训来,吴池胜,何夏江,等,2005.台风 Utor 登陆广东过程的数值研究[J].中山大学学报(自然科学版),44(2):102-106. Chen X L, Wu C S, He X J, et al, 2005. A numerical study of the landfall of typhoon Utor[J]. Acta Sci Nat Univ Suny, 44(2): 102-106(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,徐祥德,等,2005.近 10 年中国台风暴雨研究进展[J].气象,31(12):3-9. Cheng Z Q, Chen L S, Xu X D, et al, 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon, 31(12): 3-9(in Chinese).
- 丛春华,陈联寿,雷小途,等,2011.台风远距离暴雨的研究进展[J].热带气象学报,27(2):264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al, 2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall[J]. J Trop Meteor, 27(2): 264-270(in Chinese).
- 董美莹,陈联寿,郑沛群,等,2009.登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展[J].热带气象学报,25(4):495-502. Dong M Y, Chen L S, Zheng P Q, et al, 2009. Research progress on abrupt intensification of heavy rainfall and super heavy rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. J Trop Meteor, 25(4): 495-502(in Chinese).
- 胡庆芳,张建云,王银堂,等,2018.城市化对降水影响的研究综述[J].水科学进展,29(1):138-150. Hu Q F, Zhang J Y, Wang Y T, et al, 2018. A review of urbanization impact on precipitation [J]. Adv Water Sci, 29(1): 138-150(in Chinese).
- 黄伟峰,沈雪频,1986.广州城市对降水的影响[J].热带地理,6(4):309-315. Huang W F, Shen X P, 1986. The influence of urban districts on the precipitation in Guangzhou[J]. Trop Geogr, 6(4): 309-315(in Chinese).
- 黄奕武,端义宏,余晖,2009.地形对超强台风罗莎降水影响的初步分析[J].气象,35(9):3-10. Huang Y W, Duan Y H, Yu H, 2009. A study of the impact of terrain on the precipitation of “Krosa” [J]. Meteor Mon, 35(9): 3-10(in Chinese).
- 冀春晓,薛根元,赵放,等,2007.台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J].大气科学,31(2):233-244. Ji

- C X, Xue G Y, Zhao F, et al, 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of Typhoon Ranim during landfall[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(2): 233-244 (in Chinese).
- 李江南, 龚志鹏, 王安宇, 等, 2004. 近十年来台风暴雨研究的若干进展与讨论[J]. *热带地理*, 24(2): 113-117. Li J N, Gong Z P, Wang A Y, et al, 2004. Progress in the study of typhoon rainstorm in recent ten years[J]. *Trop Geogr*, 24(2): 113-117 (in Chinese).
- 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等, 2003. 台风暴雨的研究进展[J]. *热带气象学报*, 19(S1): 152-159. Li J N, Wang A Y, Yang Z L, et al, 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm [J]. *J Trop Meteor*, 19(S1): 152-159 (in Chinese).
- 李天杰, 1995. 上海市区城市化对降水的影响初探[J]. *水文*, (3): 34-41. Li T J, 1995. Preliminary study on the influence of urbanization on the precipitation[J]. *J China Hydrol*, (3): 34-41 (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[J]. *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[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(6): 1259-1266 (in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 2005. 湿地边界层通量影响热带气旋登陆维持和降水的数值试验[J]. *气象学报*, 63(5): 683-693. Li Y, Chen L S, 2005. Numerical study on impacts of boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of Landfalling tropical cyclone [J]. *Acta Meteor Sin*, 63(5): 683-693 (in Chinese).
- 廖镜彪, 王雪梅, 李玉欣, 等, 2011. 城市化对广州降水的影响分析[J]. *气象科学*, 31(4): 384-390. Liao J B, Wang X M, Li Y X, et al, 2011. An analysis study of the impacts of urbanization on precipitation in Guangzhou[J]. *J Meteor Sci*, 31(4): 384-390 (in Chinese).
- 刘罡, 孙鉴泞, 蒋维楣, 等, 2009. 城市大气边界层的综合观测研究——实验介绍与近地层微气象特征分析[J]. *中国科学技术大学学报*, 39(1): 23-32. Liu G, Sun J N, Jiang W M, et al, 2009. Comprehensive observation research on urban atmospheric boundary layer—description of field experiment and analysis of micrometeorological properties in the surface layer[J]. *J Univ Sci Technol China*, 39(1): 23-32 (in Chinese).
- 刘红年, 蒋维楣, 孙鉴泞, 等, 2008. 南京城市边界层微气象特征观测与分析[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 44(1): 99-106. Liu H N, Jiang W M, Sun J N, et al, 2008. An observation and analysis of the micrometeorological characteristics of the Nanjing urban boundary layer, Eastern China[J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 44(1): 99-106 (in Chinese).
- 刘还珠, 1998. 台风暴雨天气预报的现状和展望[J]. *气象*, 24(7): 5-9. Liu H Z, 1998. The current state and prospect of the operational weather forecast for tropical cyclone and torrential rain [J]. *Meteor Mon*, 24(7): 5-9 (in Chinese).
- 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): 364-372. Meng W G, Yan J H, Hu H B, 2007. Possible impact of urbanization on severe thunderstorms over Pearl River Delta[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(2): 364-372 (in Chinese).
- 钮学新, 董加斌, 杜惠良, 2005a. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J]. *应用气象学报*, 16(3): 402-407. Niu X X, Dong J B, Du H L, 2005a. Climatic analysis on typhoon rainfall of East China and affecting factors of the precipitation[J]. *J Appl Meteor Sci*, 16(3): 402-407 (in Chinese).
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇, 2005b. 0216号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. *气象学报*, 63(1): 57-68. Niu X X, Du H L, Liu J Y, 2005b. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons Sinlaku (0216)[J]. *Acta Meteor Sin*, 63(1): 57-68 (in Chinese).
- 齐琳琳, 赵思雄, 2016. 局地地形、地表特征对上海暴雨过程影响的研究[J]. *气候与环境研究*, 11(1): 33-48. Qi L L, Zhao S X, 2016. The analysis of the influence of the terrain and the earth's surface on the heavy rainfall in Shanghai[J]. *Climatic Environ Res*, 11(1): 33-48 (in Chinese).
- 任福民, 向纯怡, 2017. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J]. *海洋气象学报*, 37(4): 8-18. Ren F M, Xiang C Y, 2017. Review and prospect of researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones[J]. *J Mar Meteor*, 37(4): 8-18 (in Chinese).
- 斯公望, 1990. 暴雨和强对流环流系统[M]. 北京: 气象出版社: 128. Si G W, 1990. Heavy Rains and Strong Convective Circulation System[M]. Beijing: China Meteorological Press: 128 (in Chinese).
- 孙继松, 2014. 城市精细天气预报的理论与技术研究进展[J]. *气象科技进展*, 4(1): 15-21. Sun J S, 2014. The essential theory and technology on accurate urban weather forecast[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 4(1): 15-21 (in Chinese).
- 谈建国, 顾问, 2015. 城市化降水效应研究进展[J]. *气象科技进展*, 5(6): 17-22. Tan J G, Gu W, 2015. Research progress on urban-induced rainfall effect[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 5(6): 17-22 (in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 132. Tao S Y, 1980. Torrential Rain of China[M]. Beijing: Science Press: 132 (in Chinese).
- 吴风波, 汤剑平, 2011. 城市化对2008年8月25日上海一次特大暴雨的影响[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 47(1): 71-81. Wu F B, Tang J P, 2011. The impact of urbanization on a heavy rainfall case in Shanghai on 25 August 2008[J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 47(1): 71-81 (in Chinese).
- 吴息, 吴文倩, 王彬滨, 2016. 城市化对近地层风速概率分布及参数的影响[J]. *气象学报*, 74(4): 623-632. Wu X, Wu W Q, Wang B B, 2016. Effects of urbanization on surface layer wind speed probability distribution and its parameters[J]. *Acta Meteor Sin*, 74(4): 623-632 (in Chinese).
- 徐蓉, 苗峻峰, 谈哲敏, 2013. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J]. *大气科学*, 37(6): 1235-1246. Xu R, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface characteristics on thunderstorm in Nanjing [J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(6): 1235-1246 (in Chinese).
- 徐昕, 王其伟, 王元, 2010. 迎风坡降水对中国东南地区降水贡献的估测[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 46(6): 625-630. Xu X, Wang

- Q W, Wang Y, 2010. On the contribution of upslope precipitation to the observational precipitation over southeastern China [J]. *J Nanjing Univ (Nat Sci)*, 46(6): 625-630 (in Chinese).
- 徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等, 2009. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响[J]. *大气科学*, 33(4): 859-867. Xu Y Y, Liu S H, Hu F, et al, 2009. Influence of Beijing urbanization on the characteristics of atmospheric boundary layer[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(4): 859-867 (in Chinese).
- 杨辰, 王强, 顾宇丹, 2017. 上海市城市暴雨内涝评估建模及模拟研究[J]. *气象*, 43(7): 879-886. Yang C, Wang Q, Gu Y D, 2017. Study of Shanghai urban flooding assessment modeling and simulation[J]. *Meteor Mon*, 43(7): 879-886 (in Chinese).
- 杨士弘, 廖重斌, 郑宗清, 1997. 城市生态环境学[M]. 北京: 科学出版社. Yang S H, Liao C B, Zheng Z Q, 1997. *Urban Ecological Environment*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 杨舒楠, 曹勇, 陈涛, 等, 2019. 台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J]. *气象*, 45(1): 38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on day 2 after landing[J]. *Meteor Mon*, 45(1): 38-49 (in Chinese).
- 杨挺, 端义宏, 徐晶, 等, 2018. 城市效应对登陆热带气旋妮妲降水影响的模拟[J]. *应用气象学报*, 29(4): 410-422. Yang T, Duan Y H, Xu J, et al, 2018. Simulation of the urbanization impact on precipitation of landfalling tropical cyclone Nida (2016)[J]. *J Appl Meteor Sci*, 29(4): 410-422 (in Chinese).
- 殷健, 梁珊珊, 2010. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. *水文*, 30(2): 66-72, 58. Yin J, Liang S S, 2010. Influence of urbanization on regional precipitation in Shanghai City[J]. *J China Hydrol*, 30(2): 66-72, 58 (in Chinese).
- 余贞寿, 高守亭, 任鸿翔, 2007. 台风“海棠”特大暴雨数值模拟研究[J]. *气象学报*, 65(6): 864-876. Yu Z S, Gao S T, Ren H X, 2007. A numerical study of the severe heavy rainfall associated with the Typhoon Haitang (0505)[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(6): 864-876 (in Chinese).
- 岳彩军, 2009. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J]. *大气科学*, 33(1): 51-70. Yue C J, 2009. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with Typhoon Haitang[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(1): 51-70 (in Chinese).
- 张宁, 蒋维楣, 王晓云, 2002. 城市街区与建筑物对气流特征影响的数值模拟研究[J]. *空气动力学学报*, 20(3): 339-342. Zhang N, Jiang W M, Wang X Y, 2002. A numerical simulation of the effects of urban blocks and buildings on flow characteristics[J]. *Acta Aerodynam Sin*, 20(3): 339-342 (in Chinese).
- 章淹, 张义民, 白建强, 1995. 台风暴雨[J]. *自然灾害学报*, 4(3): 15-22. Zhang Y, Zhang Y M, Bai J Q, 1995. Torrential rains of typhoon[J]. *J Nat Dis*, 4(3): 15-22 (in Chinese).
- 赵娜, 刘树华, 虞海燕, 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析[J]. *大气科学*, 35(2): 373-385. Zhao N, Liu S H, Yu H Y, 2011. Urbanization effects on local climate in Beijing in recent 48 years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(2): 373-385 (in Chinese).
- 郑庆林, 吴军, 蒋平, 1996. 我国东南海岸线分布对 9216 号台风暴雨增幅影响的数值研究[J]. *热带气象学报*, 12(4): 304-313. Zheng Q L, Wu J, Jiang P, 1996. Numerical study on the effect of the distribution of the southeast sealine of China on the amplifying of the torrential rain of the landing Typhoon 9216[J]. *J Trop Meteor*, 12(4): 304-313 (in Chinese).
- 郑焘, 李晴岚, 王兴宝, 等, 2018. 台风对深港局地风影响数值模拟及地形敏感性试验[J]. *气象*, 44(3): 361-371. Zheng T, Li Q L, Wang X B, et al, 2018. Numerical simulation of the local wind influence induced by tropical cyclones and topographic sensitivity tests in Shenzhen-Hong Kong Region[J]. *Meteor Mon*, 44(3): 361-371 (in Chinese).
- Baik J J, Kim Y H, Chun H Y, 2001. Dry and moist convection forced by an urban heat island[J]. *J Appl Meteor*, 40(8): 1462-1475.
- Bornstein R, LeRoy G M, 1990. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms [C] // Preprints, 4th Conf on Mesoscale Processes. Boulder: Amer Meteor Soc; 25-29.
- Bornstein R, Lin Q L, 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies[J]. *Atmos Environ*, 34(3): 507-516.
- Bosart L F, Dean D B, 1991. The Agnes rainstorm of June 1972: surface feature evolution culminating in inland storm redevelopment [J]. *Wea Forecasting*, 6(4): 515-537.
- Brown M E, Arnold D L, 1998. Land-surface-atmosphere interactions associated with deep convection in Illinois[J]. *Int J Climatol*, 18(15): 1637-1653.
- Changnon S A Jr, 1981. METROMEX: A Review and Summary[M]. Boston: American Meteorological Society; 40, 81.
- Changnon S A, Shealy R T, Scott R W, 1991. Precipitation changes in fall, winter, and spring caused by St. Louis[J]. *J Appl Meteor*, 30(1): 126-134.
- Chen L S, 1998. Decay after landfall [C] // WMO, TD, 875; 1-5.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q, 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. *Adv Atmos Sci*, 27(5): 967-976.
- Chen T C, Wang S Y, Yen M C, 2007. Enhancement of afternoon thunderstorm activity by urbanization in a valley; Taipei[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 46(9): 1324-1340.
- Comarazamy D E, González J E, Luvall J C, et al, 2010. A land-atmospheric interaction study in the coastal tropical city of San Juan, Puerto Rico[J]. *Earth Interact*, 14(16): 1-24.
- Diem J E, Mote T L, 2005. Interepochal changes in summer precipitation in the southeastern United States; evidence of possible urban effects near Atlanta, Georgia[J]. *J Appl Meteor*, 44(5): 717-730.
- Dixon P G, Mote T L, 2003. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation [J]. *J Appl Meteor*, 42(9): 1273-1284.
- Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al, 2010. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 67(11): 3541-3558.
- Dunn G E, Miller B I, 1960. *Atlantic Hurricanes*[M]. New Orleans: Louisiana State University Press; 377.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al, 2009. Observational analysis of

- heavy rainfall mechanisms associated with severe Tropical Storm Bilis (2006) after its landfall[J]. *Mon Wea Rev*, 137(6): 1881-1897.
- 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]. *J Appl Meteor Climatol*, 48(2): 251-269.
- Hjelmfelt M R, 1982. Numerical simulation of the effects of St. Louis on mesoscale boundary-layer airflow and vertical air motion; simulations of urban vs non-urban effects[J]. *J Appl Meteor*, 21(9): 1239-1257.
- Huff F A, Changnon S A Jr, 1973. Precipitation modification by major urban areas[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 54(12): 1220-1233.
- Inamura T, Izumi T, Matsuyama H, 2011. Diagnostic study of the effects of a large city on heavy rainfall as revealed by an ensemble simulation; a case study of central Tokyo, Japan[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50(3): 713-728.
- Kimball S K, 2008. Structure and evolution of rainfall in numerically simulated Landfalling hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*, 136(10): 3822-3847.
- Kusaka H, Nawata K, Suzuki-Parker A, et al, 2014. Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(4): 824-839.
- Landsberg H E, 1981. *The Urban Climate*[M]. New York: Academic Press: 275.
- Lin C Y, Chen W C, Liu S C, et al, 2008. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan[J]. *Atmos Environ*, 42(13): 2934-2947.
- Lin Y L, Ensley D B, Chiao S, et al, 2002. Orographic influences on rainfall and track deflection associated with the passage of a tropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev*, 130(12): 2929-2950.
- Loose T, Bornstein R D, 1977. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area[J]. *Mon Wea Rev*, 105(5): 563-571.
- Meng Z Y, Chen L S, Xu X D, 2002. Recent progress on tropical cyclone research in China[J]. *Adv Atmos Sci*, 19(1): 103-110.
- 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.
- Niyogi D, Pyle P, Lei M, et al, 2001. Urban modification of thunderstorms; an observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 50(5): 1129-1144.
- Ramsay H A, Leslie L M, 2008. The effects of complex terrain on severe Landfalling tropical cyclone Larry (2006) over northeast Australia[J]. *Mon Wea Rev*, 136(11): 4334-4354.
- Rosenfeld D, 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. *Science*, 287(5459): 1793-1796.
- Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O, 2003. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms[J]. *J Appl Meteor*, 42(6): 716-738.
- Ryu Y H, Smith J A, Bou-Zeid E, et al, 2016. The influence of land surface heterogeneities on heavy convective rainfall in the Baltimore-Washington metropolitan area[J]. *Mon Wea Rev*, 144(2): 553-573.
- Shem W, Shepherd M, 2009. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta; two numerical model case studies[J]. *Atmos Res*, 92(2): 172-189.
- Shen W X, Ginis I, Tuleya R E, 2002. A numerical investigation of land surface water on landfalling hurricanes[J]. *J Atmos Sci*, 59(4): 789-802.
- Shepherd J M, 2005. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future[J]. *Earth Interact*, 9(12): 1-27.
- Shepherd J M, Burian S J, 2003. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city[J]. *Earth Interact*, 7(4): 1-17.
- Simpson M D, 2006. Role of urban land use on mesoscale circulations and precipitation[D]. North Carolina State; North Carolina State University: 294.
- Smith R B, Schafer P, Kirshbaum D J, et al, 2009a. Orographic enhancement of precipitation inside Hurricane Dean [J]. *J Hydrometeorol*, 10(3): 820-831.
- Smith R B, Schafer P, Kirshbaum D J, et al, 2009b. Orographic precipitation in the tropics; experiments in Dominica[J]. *J Atmos Sci*, 66(6): 1698-1716.
- Tang X D, Yang M J, Tan Z M, 2012. A modeling study of orographic convection and mountain waves in the Landfalling Typhoon Nari (2001)[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(663): 419-438.
- Thielen J, Wobrock W, Gadian A, et al, 2000. The possible influence of urban surfaces on rainfall development; a sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale[J]. *Atmos Res*, 54(1): 15-39.
- Tuleya R E, Kurihara Y, 1978. A numerical simulation of the landfall of tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 35(2): 242-257.
- Vogel J L, Huff F A, 1978. Relation between the St. Louis urban precipitation anomaly and synoptic weather factors[J]. *J Appl Meteor*, 17(8): 1141-1152.
- Wu C C, 2001. Numerical simulation of Typhoon Gladys (1994) and its interaction with Taiwan terrain using the GFDL hurricane model[J]. *Mon Wea Rev*, 129(6): 1533-1549.
- Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al, 2002. Rainfall simulation associated with Typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I; the topographic effect[J]. *Wea Forecasting*, 17(5): 1001-1015.
- Yang M J, Braun S A, Chen D S, 2011. Water budget of Typhoon Nari (2001)[J]. *Mon Wea Rev*, 139(12): 3809-3828.
- Yu M, Liu Y M, 2015. The possible impact of urbanization on a heavy rainfall event in Beijing[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(10): 8132-8143.
- Zhong S, Qian Y, Zhao C, et al, 2015. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area; urban heat island versus aerosol effects[J]. *J Geophys Res Atmos*, 120(20): 10903-10914.