

城市化降水效应研究进展

谈建国 顾问

(上海市气象科学研究所, 上海 200030)

摘要: 大量观测事实已经证实城市化降水效应的存在。城市化进程通过改变城市下垫面属性、城郊热平衡差异、局地环流等, 从而影响了降水的时空分布。随着各国城市化的加剧, 城市化对降水的影响越来越受到科学家和城市规划者的关注。回顾了城市影响降水强度和降水空间分布的观测事实, 城市化降水效应的机制以及研究方法, 提出了城市化降水效应研究中存在的问题, 并对今后的研究方向作了展望。

关键词: 城市化, 降水, 城市边界层, 研究进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.06.003

Research Progress on Urban-Induced Rainfall Effect

Tan Jianguo, Gu Wen

(Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030)

Abstract: A large number of observations have proven the existence of urbanization precipitation effect. Urbanization process affects the precipitation distribution by the process of urban underlying surface properties changing, urban-suburban thermal equilibrium difference and local circulation. With the city sprawling, scientists and city planners are increasingly focusing on the influence of precipitation by urbanization. This paper reviews the observations of precipitation intensity and spatial distribution differences, mechanism and research methods for urbanization effect. Finally, the problems and further research directions of urbanization precipitation effect are discussed.

Keywords: urbanization, rainfall, urban boundary layer, research progress

0 引言

城市化是指人口向城市地区集中, 致使城市区域不断扩张的过程。世界城市化发展的经验表明, 城市化快速发展是任何一个国家或地区无法逾越的阶段^[1]。据联合国估计, 世界人口已超70亿, 其中一半生活在城市区域。预计到2025年, 有近50亿人将生活在城市^[2]。城市化给城市环境、基础设施建设带来新机遇和新挑战的同时, 也改变了自然环境的本来面貌。其中城市下垫面的改变是最为直接的, 城市下垫面通常是由混凝土、沥青等构成的建筑物和道路组成的, 这些表面具有较小的反照率、较大的热容量、较大的粗糙度和不透水性^[3]。人类的生产生活又产生了额外的人为热源和气溶胶。城市化进程加快, 使得城市热岛等现象越来越显著, 也改变了城市局地的能量

平衡、边界层结构和大气成分, 导致局地天气、气候及环境的变化^[4]。以往城市气候研究主要集中在城市热岛和环境污染方面, 近数十年来的外场试验和观测事实表明城市的迅速发展也影响着城市降水的时空分布。城市区域局地感热和潜热输送加强了大气低层的位势不稳定, 直接触发了对流; 地表温度在加强感热输送触发降水上扮演了最重要的角色, 城市下垫面的非均匀性加强了降水的局地性; 局地对流降水的水汽来源于地表的蒸发和低层风场辐合时水汽的向上输送^[5]; 沿海城市海风锋和城市热岛可对最大降水落区起到触发机制或“诱导”、增幅作用^[6], 城市对气候的影响不仅限于以上方面。城市化效应改变了城市局地环流状况, 影响了降水的分布和强度。本文回顾了城市影响降水的观测事实、城市化降水效应的机制和研究方法, 最后提出了城市化降水效应研究中存在的问题并对今后的研究方向作了展望。

1 城市影响降水的强度和空间分布

城市的迅速发展改变局地环流状况, 影响城市降水的时空分布, 已引起了广泛关注。周淑贞^[7]在我国首先提出了城市“五岛”效应, 其中包括“雨岛”,

收稿日期: 2014年3月12日; 定稿日期: 2014年7月10日
 第一作者: 谈建国(1969—), Email:jianguot@21cn.com
 资助信息: 国家自然科学基金(41275021); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306010, GYHY201306055); 上海市气象局研究型科研专项(YJ201301, YJ201303)

许多研究都发现城市化导致大城市降水量和强降水事件增多。例如：周建康等^[8]将南京雨量站1922—1999年雨量分为7个阶段进行统计分析，发现该区域发生大雨、暴雨的频率及年降水量均有增加的趋势。廖镜彪等^[9]统计了广州51年降水资料发现城市化造成广州大雨、暴雨和大暴雨等强降水日数增加。更多国外文献记载了城市化影响降水的分布，城市有使城区及其下风方向降水增多的效应。Changnon^[10]用美国伊利诺伊州乌尔班纳1950—1959年的降水资料绘制了等雨量图，发现该市东部（下风方向）的降水量大于城市中心和其他区域。这是最早直接指出城市化对降水有影响的文章。Huff等^[11]分析了美国圣路易斯长期降水资料后发现，在城市及其下风方向，月平均和季平均降水量以及降水天气现象的发生频率，明显高于周围邻近地区；这种降水分布的异常在夏季最显著，并且表现出随着城市化进程有进一步增强的趋势。20世纪70年代在Changnon的建议下，美国实施了METROMEX计划，目标是研究大城市对中尺度和对流性降水的影响。METROMEX计划的主要研究结果表明，城市效应导致了暖季降水增加，在大城市及其下风方向50~75km范围降水要比其他地方增加5%~25%，降水增加的范围和强度与城市规模有关^[12]，城市对降水分布的影响^[13]见图1；这一结果得到了许多研究的证实^[14-18]。除了在美国，Molders^[19]对德国莱比锡和德累斯顿的研究同样发现，城市两边外侧缘和下风方向降水增加。

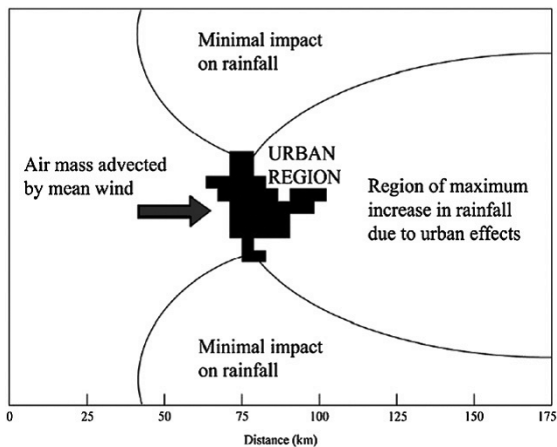


图1 城市影响降水分布示意图（引自参考文献[13]）

城市影响降水分布的研究在国内相对较少。吴息等^[20]通过对1996年北京城区与郊区一年自动站小时降水数据的分析指出，由于城市的热力和动力作用，城市效应对下风区短历时降水雨量增加的影响最明显，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。周丽英等^[21]利用40年的降水资料从气候学角

度分析了上海城郊降水的空间差异，发现市区降水增加率为郊区的1.5倍，且城、郊降水差异呈现了扩大趋势。不仅单个城市，城市群对降水分布也有影响。赵文静等^[22]基于TRMM卫星探测资料研究了长江三角洲降水特征，发现长三角城市群所在区域与邻近平原地区相比有明显的降水增幅，夏季降水高值中心在城市群下风方向，上海市表现最为突出，降水高值中心在上海市中心下风方向约60~70km。

2 城市化降水效应的机制

城市是如何增强降水并影响其局地性分布的？

Changnon等^[12]在对METROMEX观测资料分析和数值模拟的基础上，指出城市对夏季中等以上强度的对流性降水的增雨效果尤其显著，并提出了城市增强降水并影响其分布的三种假说机制：一是城市热岛效应；二是城市下垫面和冠层的摩擦效应；三是城市凝结核效应。虽然这三种城市化增加降水的机制存在不确定性，但是几十年来仍不断地出现新的研究结果支持METROMEX计划的研究结论。

2.1 城市热岛效应

城市热岛效应使城市上空层结不稳定，容易形成对流云和对流性降水。城市热岛效应对降水的影响一般体现在夏季（暖季），尤其是盛夏弱风、无云的情况下。Atkinson^[23]分析了1959年8月21日在伦敦发生的雷暴，首次将城市热岛和雷暴的发生联系起来。Changnon^[24]分析了圣路易斯市连续5年的天气过程，发现热岛环流可以触发并增强雷暴、强降水和强风暴等对流性天气，改变了云和风暴的动力结构。Shepherd等^[15, 25]发现城市热岛向下风方向传播时会促进低云生长，城市热岛效应改变边界层结构主要通过以下途径（图2）：（1）使近地面的气温升高，层结更加不稳定；（2）城市表面强迫使热空气上升，城市表面由于风的辐合形成相对低压；（3）城市热岛环流和海陆风环流耦合，在城市或者城市下风方向形成边界层辐合线^[26]。

Vukovich等^[27]对城市热岛效应下边界层气象要素的变化做了敏感性试验，发现在有城市的情况下近地层的温度廓线是超绝热的，城市热岛越强近地面的垂直风速就越大，层结越趋于不稳定。Bornstein等^[28]研究发现纽约城市对夏季白天雷暴的形成和移动两方面都有影响。在平静的区域流场情况下，纽约热岛激发对流活动。Bornstein等^[14]对1999年7月26日发生在亚特兰大的对流过程进行分析，发现雷暴发生之前城市热岛强度在2.0~2.5K，城市热岛形成的水平风场辐合可达 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。Dixon等^[29]也发现在亚特兰大夜间，热

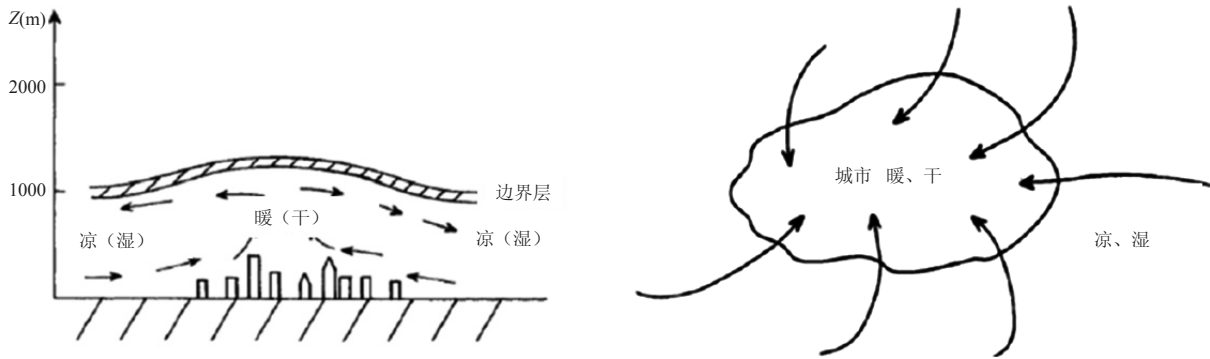


图2 城市热岛影响边界层结构示意图 (引自参考文献[26])

岛在适当的稳定性和湿度条件下可以激发雷暴。Guo等^[30]对北京2003年7月4日的降水过程做了分析,发现城市化以后感热通量增加但是潜热通量减少,降水空间分布会更加集中。孙继松等^[31]从暴雨个例分析角度,研究了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,发现在夏季晴空背景下,城市热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,这种强迫有利于对流降水的维持。

2.2 城市下垫面和拖曳效应

随着城市化进程的推进,建筑物的密度和高度不断增加。城市高楼林立,城市下垫面的拖曳作用可使经过城市的气流减速。下垫面的粗糙度与建筑物高度有关,城市建设导致了城市空气动力学粗糙度明显增大。刘罡等^[32]对南京2005年夏季的边界层风场做了分析,发现市区观测点的摩擦速度平均值为0.55m/s,郊区为0.4 m/s。市区摩擦速度比郊区大,反映出城市建筑物扰动平均气流场而产生机械湍流,加强了湍流运动,使得城市近地层中的动量通量增大。张宁等^[33]用一个湍流能量闭合的三维城市街渠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了诊断分析,

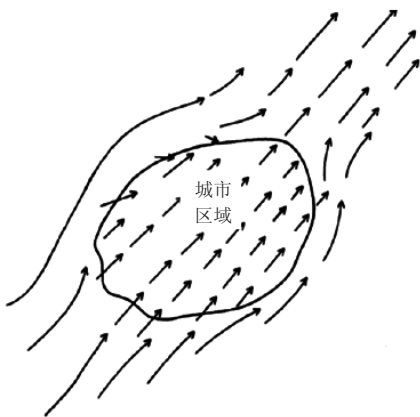


图3 城市拖曳作用造成城市区域风速减弱示意图 (引自参考文献[26])

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(图3),这种作用在垂直方向上可达建筑物平均高度的2倍。

城市拖曳效应主要通过以下四个方面影响城市的降水:(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^[12,14,34];(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)城市冠层导致的降水云团的分裂或绕流^[14,35]。

Vogel等^[36]对圣路易斯市的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。Tomohiko等^[37]对东京地区1999—2007年的8个短时强降水过程做了模拟,发现城市的存在使得城市背风位置有风场辐合区,辐合区输送的水汽足以抵消城市下垫面水汽供应不足而使得城市背风方向的降水偏多。Rozoff等^[38]用中尺度模式模拟了1999年圣路易斯市的一个风暴过程,发现城市地表的粗糙度引起的风场辐合可以触发深厚的湿对流。Miao等^[39]用WRF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。Niyogi等^[40]用雷达反射率因子对美国印第安纳波利斯市2000—2009年夏季的91个雷暴过程作了分析,发现超过60%的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。

2.3 城市热岛与海陆风、山谷风的相互作用

由于许多城市位于沿海、沿湖或者山地地区城市热岛和复杂地形的相互作用对降水的影响也多有研究。Yoshikado^[41, 42]运用二维静力边界层模式模拟了日本东京的环流状况,指出由于海风锋和热岛环流的辐合,沿海的垂直速度会加强,而且是没有城市情况下

的2倍,垂直尺度加大。Yoshikado^[43]发现在海陆风的影响和作用下,城市热岛会持续;若海风锋具有在城市上空滞留的倾向,更易造成风场辐合。国内,苗曼倩等^[44]和李维亮等^[45]运用数值模拟证实,由于海风、江(湖)风环流与城市热岛效应之间存在相互增强的过程,长江三角洲地区沿江一带容易形成水平风速辐合,并和该地区降水量的增加有直接关系。Wang等^[46]通过对北京2004—2007年的加密自动站降水和风场数据进行分析,发现夏季北京市区的降水在傍晚有个高峰,这与城市热岛效应和山谷风的耦合在市区形成的风场辐合有关。Lin等^[47]对台湾1994年7月22日的一次暴雨过程做了敏感性试验,发现城市热岛环流和山地迎风面的抬升作用能促发对流,且城市规模越大,该城市下风方向的降水增幅就越显著。东高红等^[48]对2010年8月16日天津城区出现的一次局地强降水过程进行分析,发现城市热岛与海风锋叠加而成的辐合线能激发局地不稳定能量的释放,从而产生局地强对流天气。

2.4 城市气溶胶效应

城市排放的大量污染物中含有吸湿性凝结核。城市空气中的凝结核比郊区多,可能有利于降水的形成^[49]。但这些凝结核对降水的形成究竟起什么作用,却仍是一个有争议的问题。Kar等^[50]调查了1989—1999年云地闪资料发现城市与周边地区相比闪电密度增加,这与城市空气存在较高的PM₁₀和SO₂浓度有正相关。Rosenfeld^[51]研究认为城市和工业排放的气溶胶大部分是小云滴的凝结核,小尺度的云滴碰撞粘附很弱,形成不了大雨滴,从而抑制雨雪的形成。Borys等^[52]发现城市气溶胶会抑制冬季的降水,气溶胶提供了大量小尺度云滴凝结核,小尺度云滴的下落速度和碰并受到抑制,只能产生小冰晶和较弱的降雪。但是,Andreae等^[53]认为气溶胶对对流降水是有促进作用的。尽管气溶胶抑制了云滴的碰并增长,但增加了云滴在空中滞留的时间,使云滴能经过凝结作用继续增长,如果有合适的上升气流,云滴可以到达较高的海拔成为冰晶,使云体变得深厚,导致闪电和对流性的强降水。Rosenfeld等^[54]用显式的云微物理过程模拟了热带地区的降水过程,发现在开始阶段,气溶胶抑制暖云降水的同时也抑制了下沉气流,使得活跃的上升气流有时间产生更深厚的强对流系统。Khain等^[55]针对气溶胶“动力学效应”的研究发现,由于下沉气流推迟发生以及冰相过程释放潜热的加热作用还可增强上升运动,这都有可能使降水最终出现增多。总的来说,气溶胶对城市降水的影响确实存在,

但是气溶胶对降水的抑制或者是加强要取决于云的类型、季节、气候带和城市的地理位置及地形。

3 城市影响降水的研究方法

3.1 单站分析和中尺度网观测

限于观测手段和数值模式效果等条件的制约,早期研究仅限于单站分析,对城市中某个站点进行时序观测,或者对多个城郊站点进行对比观测和统计分析,其精度和代表性不足,一般较难准确地反映出城市化对区域降水的影响,但还是得出了一些有启示性的结果,例如在北京、上海、南京和广州等大城市利用城区和郊区长时间序列的气象要素分析得出的城市化后城、郊降水的差异^[7-9,20-21]。

随着中尺度网的建设,精细化自动气象站网的资料逐渐运用到分析城市对雷暴、降水分布等的影响中来。20世纪70年代在Changnon等^[12]的建议下,美国实施了METROMEX计划,旨在研究由于城市化导致的城市气象要素和天气气候的改变。该计划以圣路易斯市为中心约80.5km半径范围内建立了天气观测网,其中包括250个雨量筒、24个温-湿记录仪、6个雷暴声频探测器、3部探空仪、2部雷达和大气化学分析仪器等,试验持续了5年。20世纪90年代为了对1996年的奥林匹克运动会进行气象保障,美国实施了亚特兰大观测计划(PROJECT ATLANTA)。美国国家气象局在亚特兰大市建立了由52个地面站组成的中尺度网。其中大部分站每15min采集一次温度、相对湿度、降水、风向风速数据^[56]。这两次大规模系统性的观测计划为城市化降水效应的研究提供了大量珍贵数据,并诞生了很多经典的原创性的研究进展。

3.2 卫星和地面遥感观测

近年来,随着遥感技术的蓬勃发展,许多学者已经开始利用遥感手段来分析城市化对降水的影响。与台站资料相比,遥感探测得到的降水资料具有空间分布均匀、区域代表性强等优点,因此,更适合于分析城市及其周边区域的降水情况。Shepherd等^[15]采用TRMM卫星资料分析了1998—2000年美国10个大城市夏季降水分布,发现大城市下风30~60km处的月降水率平均增加28%,市区增加约为5.6%。Mote等^[17]用Doppler雷达资料分析发现由于城市降水效应亚特兰大东部郊区(下风方)夏季夜间和早晨这段时间内的降水增多30%。江志红等^[57]基于CMORPH卫星降水资料分析了长江三角洲地区南京、杭州、上海和苏州等主要城市的降水分布特征,结果表明:长三角城市效应主要表现在夏半年降水强度和空间分布上,在700hPa平均引导气流控制下,城市中心和下风向地区的夏半

年降水强度比上风向地区增加5%~15%，最大值通常位于城市中心下游20~70 km。

3.3 综合观测

无论是单站和中尺度网观测，还是卫星和地面遥感观测都是只揭示了城市或城市群是否对降水产生影响，但其原因和机制尚不清楚。近年来，国际上开展了一系列的针对城市天气研究的综合观测项目，这些观测项目都采用地面观测网、地基遥感（天气雷达、激光雷达）和卫星遥感等手段对发生在城市边界内的物理过程及其对降水的影响进行综合观测和分析，尝试从物理机制上解释城市影响降水的原因。例如：芬兰赫尔辛基Testbed关注城市及周边的中尺度预报和扩散问题^[58,59]，美国休斯敦的环境气溶胶与雷暴项目（HEAT）关注城市污染物与雷暴之间的关系^[60]，日本东京大都市圈对流研究（TOMACS）关注城市区域各种的中尺度过程^[61]。

3.4 数值模拟

除了综合观测分析外，数值模式也被用到城市化降水效应的研究中。基于多种模拟手段的数值模拟研究已经证实，城市热岛效应可以对环境流场产生重要作用，从而影响降水。Thielen等^[34]采用一个 γ 中尺度模式（Clark模式）模拟巴黎地区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。为了更好地表征城市下垫面变化、城市建筑物和城市人为热源等城市化因素对城市热岛、海陆风环流的影响，许多研究尝试将高分辨率的土地利用资料、城乡能量平衡模型引入到城市边界层数值模拟中^[62]。Lemonsu等^[63]把能量平衡模型（Town Energy Budget）耦合到Meso-NH大气模式模拟海陆风条件下法国马赛城市边界层的垂直结构。Shem等^[64]采用中尺度WRF模式来模拟亚特兰大城市化对夏季雷暴的影响。与没有城市参数化方案对比，考虑了城市影响后的降水在城市下风向增加10%~13%。Gutiérrez等^[65]利用WRF模式耦合了多层城市冠层模式的高分辨率uWRF模式模拟纽约的海陆风环流和城市热岛。Chen等^[66]利用ARE-WRF模式耦合城市冠层模式（UCM）研究城市地表强迫和海陆风环流的相互作用。Miao等^[39]运用WRF模式采用500m空间分辨率模拟分析城市过程对2006年8月1日一次局地暴雨的影响。

4 存在问题和展望

城市化影响了局地降水的时空分布，但以往的研究着重于对该现象的描述和对城市化降水效应可能原因的定性分析，对其中的微物理过程认识还不足。这

主要是因为：（1）缺乏高密度观测资料，尤其是缺乏对城市边界层和城市下垫面的观测。特别需要加强对城市边界层垂直廓线和边界层高度、不同下垫面能量平衡中各通量的观测，以及多部雷达、多波段雷达组合的云物理观测等。（2）降水的数值模拟研究一般侧重于中尺度，因此需要引入高分辨的城市下垫面资料、地表热量平衡、城市人为热源排放及城市边界层观测信息，发展复杂的城市冠层模式来描述实际的城市形态，城市边界层与下垫面、地-气相互作用等过程。数值模拟在城市化降水效应方面有以下问题尚待解决，包括：（1）基于地理信息系统、卫星遥感等手段将细致的建筑物三维信息和下垫面属性引入到城市冠层模式中；（2）城市人为热源参数化方案的确定；（3）城市气溶胶排放清单的引入；（4）城市水文过程的建立；（5）云物理参数化过程等。

参考文献

- [1] 陈波翀, 郝寿义. 自然资源对中国城市化发展水平的影响研究. 自然资源学报, 2005, 20(3): 394-399.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Population Prospects: The 2012 Revision, Key Findings and Advance Tables. Working Paper No.ESA.P/WP.226, 2013. http://esa.un.org/unpd/wpp/Documentation/pdf/WPP2012_20KEY%20FINDINGS.pdf.
- [3] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望. 气象学报, 2010, 70(3): 338-353.
- [4] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 2007, 31(1): 37-47.
- [5] 李昉英, 宇如聪, 傅云飞, 等. 一次热对流降水成因的分析和模拟. 气象学报, 2008, 66(2): 190-202.
- [6] 束炯. 上海城市在热岛和海风锋影响下特大暴雨的初步分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 1987, (4): 81-87.
- [7] 周淑贞. 上海城市气候中的“五岛”效应. 中国科学 化学, 1988, 18(11): 1227-1234.
- [8] 周建康, 黄红虎, 唐运忆, 等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响. 长江科学院院报, 2003, 20(4): 44-46.
- [9] 廖镜彪, 王雪梅, 李玉欣, 等. 城市化对广州降水的影响分析. 气象科学, 2011, 31(4): 384-390.
- [10] Changnon S A. A climatological evaluation of precipitation patterns over an urban area// Air over cities. Technical Report A 62-65. Washington D C: US Public Health Service, 1962, 37-67.
- [11] Huff F A, Vogel J L. Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region. J Appl Meteor, 1978, 17(5): 565-577.
- [12] Changnon S A, Semonin R G, Auer A H, et al. METROMEX: A review and summary (Meteorological Monographs Volume 18, No. 40). Boston: Amer Meteor Soci, 1981.
- [13] Hand L M, Shepherd J M. An investigation of warm-season spatial rainfall variability in Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. J Appl Meteorol and Climato, 2009, 48: 251-269.
- [14] Bornstein R, Lin Q. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. Atmos Environ, 2000, 34: 507-516.
- [15] Shepherd J M, Pierce H, Negri A J. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. J Appl Meteor, 2002, 41, 689-701.
- [16] Shepherd J M. A review of current investigations of urban induced rainfall and recommendations for the future. Earth Interactions, 2005, 9: 1-7.
- [17] Mote T L, Lacke M C, Shepherd J M. Radar signatures of the urban effect on precipitation distribution: A case study for

- Atlanta, Georgia. *Geophysical Res Letters*. 2007, 34, L20710. DOI:10.1029/2007GL031903.
- [18] Hand L, Shepherd J M. An investigation of warm season spatial rainfall variability on Oklahoma City: Possible linkages to urbanization and prevailing wind. *J Appl Meteor Climatol*, 2009, 48: 251-269.
- [19] Molders N. Landscape changes over a region in East Germany and their impact upon the processes of its atmospheric water-cycle. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 1998, 68: 79-98.
- [20] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响. *南京气象学院学报*, 2000, 23(1): 68-72.
- [21] 周丽英, 杨凯. 上海降水百年变化趋势及其城郊的差异. *地理学报*, 2001, 56(4): 467-476.
- [22] 赵文静, 张宁, 汤建平. 长江三角洲城市带降水特征的卫星资料分析. *高原气象*, 2011, 30(3): 668-674.
- [23] Atkinson B W. A preliminary investigation of the possible effect of London's urban area on the distribution of thunder rainfall, 1951-1960. *Trans Inst Brit Geogr*, 1968, 44: 97-118.
- [24] Changnon S A. Urban effects on Severe Local Storms at St.Louis. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 578-586.
- [25] Shepherd J M, Burian S J. Detection of urban-induced rainfall anomalies in a major coastal city. *Earth Interactions*, 2003, 7(4): 1-17.
- [26] Cotton W R, Pielke R A. Inadvertent human impacts on regional weather and climate. *Human Impacts on Weather and Climate*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 73-148.
- [27] Vukovich F M, Dunn J W. A theoretical study of the St. Louis heat island: Some parameter variations. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 1585-1594.
- [28] Bornstein R, LeRoy M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms. Preprint volume, Fourth AMS Conference on Mesoscale Processes, Boulder, CO, 25-29 June, 1990.
- [29] Dixon P G, Mote T L. Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *J Appl Meteor*, 2003, 42(9): 1273-1284.
- [30] Guo X L, Fu D H, Wang J. Mesoscale convective precipitation system modified by urbanization in Beijing City. *Atmospheric Research*, 2006, 82: 112-126.
- [31] 孙继松, 王华, 王令, 等. 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*, 2006, 30(2): 221-234.
- [32] 刘罡, 孙鉴宇, 蒋维楣, 等. 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. *中国科学技术大学学报*, 2009, 39: 23-32.
- [33] 张宁, 蒋维楣, 王晓云. 城市街区与建筑物对气流特征影响的数值模拟研究. *空气动力学学报*, 2002, 20(3): 339-342.
- [34] Thielen J, Wobroch G W, Mestayer A, et al. The possible influence of urban surfaces on rainfall development: A sensitivity study in 2D in the meso- γ -scale. *Atmos Res*, 2000, 54: 15-39.
- [35] Loose T, Bornstein R D. Observations of mesoscale effects on frontal movement through an urban area. *Mon Wea Rev*, 1977, 105(5): 563-571.
- [36] Vogel J L, Huff F A. Relation between the St.Louis urban rainfall anomaly and synoptic weather factors. *J Appl Meteor*, 1978, 17: 1141-1152.
- [37] Tomohiko I, Takeki I, Hiroshima A. 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 Appl Meteor*, 2011, 50: 713-728.
- [38] Rozoff C M, Cotton W R, Adegoke J O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. *J Appl Meteorol*, 2003, 42: 716-738.
- [39] Miao S G, Chen F, Li Q C. Impacts of urban processes and urbanization on summer precipitation: A case study of heavy rainfall in Beijing on 1 August 2006. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 806-825.
- [40] Niyogi D, Pyle P, Lei M. Urban modification of thunderstorms: An observational storm climatology and model case study for the Indianapolis urban region. *J Appl Meteor*, 2011, 50: 1129-1144.
- [41] Yoshikado H. Vertical structure of the sea breeze penetrating through a large urban complex. *J Appl Meteor*, 1990, 29: 878-891.
- [42] Yoshikado H. Numerical study of the daytime urban effect and its interaction with the sea breeze. *J Appl Meteor*, 1992, 31: 1146-1164.
- [43] Yoshikado H. Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations. *J Meteor Soc Japan*, 1994, 72: 139-142.
- [44] 苗曼倩, 唐有华. 长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响. *高原气象*, 1998, 17: 280-289.
- [45] 李维亮, 刘洪利, 周秀骥, 等. 长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究. *中国科学: 地球科学*, 2003, 33(2): 97-104.
- [46] Wang J L, Zhang R H, Wang Y C. Areal differences in diurnal variations in summer precipitation over Beijing metropolitan area. *Theor Appl Climatol*, 2012, 110: 395-408.
- [47] Lin C Y, Chen W C, Liu S C, et al. Numerical study of the impact of urbanization on the precipitation over Taiwan. *Atmos Environ*, 2008, 42: 2934-2947.
- [48] 东高红, 刘一玮, 孙蜜娜, 等. 城市热岛与海风锋叠加作用对一次局地强降水的影响. *气象*, 2013, 39(11): 1422-1430.
- [49] Rosenfeld D. New insights to cloud seeding for enhancing precipitation and for hail suppression. *J Wea Mod*, 2007, 39: 61-69.
- [50] Kar S K, Liou Y A, Ha K J. Aerosol effects on the enhancement of cloud-to-ground lightning over major urban areas of South Korea. *Atmos Res*, 2009, 92(1): 80-87.
- [51] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban air pollution. *Science*, 2000, 287: 1793-1796.
- [52] Borys R D, Lowenthal D H, Mitchell D L. The relationships among cloud microphysics, chemistry and precipitation rate in cold mountain clouds. *Atmos Environ*, 2000, 34(16): 2593-2602.
- [53] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, 2004, 303: 1337-1341.
- [54] Rosenfeld D, Ulbrich C W. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities. *Meteorological Monographs*, 2003, 30: 237-258.
- [55] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2005, 131(611): 2639-2663.
- [56] 梁丰, 陈明轩, 王玉彬. 近两届奥运会气象服务保障综述. *气象*, 2002, 28(10): 3-8.
- [57] 江志红, 唐振飞. 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*, 2011, 31(4): 355-364.
- [58] Dabberdt W F, Koistinen J, Poutiainen J, et al. The Helsinki Mesoscale Testbed - An invitation to use a new 3-D observation Network. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86, 906-907.
- [59] Koskinen J T, Poutiainen J, Schultz D M, et al. The Helsinki Testbed: A mesoscale measurement, research, and service platform. *Bull Amer Meteor Soc*, 2011, 92: 325-342.
- [60] Orville R, Zhang R, Nielsen G J, et al. Houston Environmental Aerosol Thunderstorm (HEAT) Project. Department of Atmospheric Sciences, Texas A&M University, College Station, TX, 2013. http://atmo.tamu.edu/ciams/heat/HEAT_plan.pdf.
- [61] Maki M, Misumi R, Nakatani T, et al. Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS). ERAD 2012-The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2013. http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/NET_236_ext_abs.pdf.
- [62] Ohashi Y, Kida H. Local circulations developed in the vicinity of both coastal and inland urban areas: A numerical study with a mesoscale atmospheric model. *J Appl Meteor* 2002, 41: 30-45.
- [63] Lemonsu A, Bastin S, Masson V, et al. Vertical structure of the urban boundary layer over Marseille under sea-breeze conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118: 477-501.
- [64] Shem W, Shepherd J M. On the impact of urbanization on summertime thunderstorms in Atlanta: Two numerical model case studies. *Atmos Res*, 2009, 92(2): 172-189.
- [65] Gutiérrez E J, Gonzalez J E, Bornstein R D, et al. Numerical simulations of sea breeze circulations and urban heat islands in NYC with a high resolution urban-mesoscale model(uWRF). Ninth symposium on the urban environment, 5, August, 2010.
- [66] Chen F, Miao S, Tewari M, et al. A numerical study of interactions between surface forcing and sea breeze circulations and their effects on stagnation in the greater Houston area. *J Geophys Res*, 2011, 116, D12105.