

陈静,刘琳.2011 年汛期北京城市暴雨特征及其灾害成因初步分析[J].暴雨灾害,2011,30(3):282-287

## 2011 年汛期北京城市暴雨特征及其灾害成因初步分析

陈 静<sup>1</sup>, 刘 琳<sup>2</sup>

(1. 中国气象局数值预报中心, 北京 100081; 2. 成都信息工程学院, 成都 610225)

**摘 要:** 利用 2011 年北京加密自动观测站降水资料、北京站(54511)24 h 降水量多年历史资料及 NCEP 再分析资料, 对北京 2011 年 6 月 1 日—8 月 11 日(下称北京汛期)城市暴雨过程、暴雨灾害特点、极端降水特征以及城市化进程对暴雨灾害的影响和成因进行了初步分析。结果表明: (1) 2011 年 6 月和 7 月北京降水量分布不均, 呈现从城区向郊区递减的特点, 最大降水量中心位于北京城区; 汛期共发生 8 次较强降水天气过程, 其中 3 次造成的气象灾害较大。(2) 2011 年汛期北京降水量比常年同期偏多 54.8 mm, 降水量距平自 1999 年连续 12 年呈负距平后首次转为正距平。(3) 2011 年北京极端降水频次、强度分别达到 3 次和 80.7 mm, 极端降水量占总降水量的 61.4%, 较前 10 年显著提高。(4) 2011 年北京降水频次变化不大, 但暴雨频次显著上升, 比前 10 年同期多 2~3 次, 暴雨量占总降水量比例达 60% 以上。(5) 2011 年汛期北京多暴雨是由大气环流和城市化特征共同影响所致。

**关键词:** 城市暴雨; 灾害成因; 2011 年汛期; 北京

中图分类号: P458.1\*21.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-9045(2011)03-0282-06

### Characteristics of Urban Rainstorm and its Disaster Cause over Beijing in Flood Season of 2011

CHEN Jing<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>

(1. Numerical Weather Prediction Center, CMA, Beijing 100081;

2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract:** Based on the precipitation data from Beijing automatic weather station, the 24 h precipitation of historical data from Beijing Station (54511) and NCEP reanalysis data, the urban rainstorm events from 1 June to 11 August of 2011 are tentatively studied including rainstorm disaster features, extreme precipitation characteristics, and influence of urbanization on rainstorm disaster and cause of rainstorm disaster by urbanization. The result shows that the precipitation in June and July 2011 in Beijing tends to be inhomogeneous and decreases from the urban area to the suburbs, and the maximum rainfall center is located in urban area. There are eight heavy precipitation weather processes in Beijing in 2011, resulting in three main weather disasters. The precipitation of Beijing flood season in 2011 is 54.8 mm heavier than usual showing a positive anomaly after the negative anomalies have lasted for 12 years since 1999. The extreme precipitation frequency and intensity in Beijing station in flood season of 2011 is increased to 3 times and 80.7 mm respectively, and the extreme precipitation accounts for 61.4% of the total precipitation, all have significantly increase over the last 10 years. The precipitation frequency in Beijing in 2011 changed a little, but the frequency of heavy rainfall is increased significantly to 2~3 times more than that of the corresponding period over the last 10 years, and the heavy rainfall proportion accounts for more than 60% of the total. The joint function of atmospheric circulation and urbanization factors resulted in more urban rainstorm events in Beijing in 2011.

**Key words:** urban rainstorm; disaster cause; flood season in 2011; Beijing

## 0 引言

2011 年 6 月 1 日—8 月 11 日, 北京先后发生 8

次强降水天气过程, 几乎每次过程都出现局地暴雨或特大暴雨, 其中 6 月 23 日、7 月 24—26 日、8 月 9 日三次降水过程造成严重城市气象灾害, 极大地影响了

收稿日期: 2011-08-26; 定稿日期: 2011-09-10

资助项目: 国家自然科学基金“基于贝叶斯统计理论的降水集合预报概率化方法研究”(41075035), 中国气象局公益性行业(气象)科研专项“基于多模式集合预报的交互式应用技术研究”(GYHY200906007)

第一作者: 陈静, 女, 1966 年生, 研究员, 主要从事数值预报研究。E-mail: chenjing@cma.gov.cn

人们的工作、生活及市区交通。以 6 月 23 日暴雨灾害为例,北京城区多处严重积水,导致地铁 1 号线部分停运、地铁 4 号线陶然亭站淹没、飞机航班延误,还引起北部山区泥石流、崩塌、滑坡等地质灾害,甚至在北京苹果园街道办事处附近有 2 名在京打工的外地青年被卷入排水管道淹死,这是造成北京市 2011 年 6 月份暴雨灾害最严重的一次强天气过程。8 月 9 日的暴雨,同样造成北京市部分街道积水、中央电视塔遭雷击、公交受阻、地铁 13 号线和 S2 线因积水淹没铁轨而停运,同时造成北京机场 42 架次航班延误。

近 50 年来,随着北京城市化发展进程不断加快,城市功能和环境面貌发生巨大变化,城区面积迅速扩大。据文献[1, 2],至 2000 年北京城市化面积约为 750 km<sup>2</sup>,较 1985 年的 500 km<sup>2</sup>增加 250 km<sup>2</sup>,其中城区面积从 20 世纪 90 年代初的 300 km<sup>2</sup>扩大到 500 km<sup>2</sup>、卫星城(包括亦庄、黄村、通州等远郊 14 个城镇)面积达到 200 km<sup>2</sup>,中心城区面积为 40 km<sup>2</sup>。城市下垫面状况的改变,使城市地表水汽和热量输送发生改变,形成典型的都市气候现象,如城市热岛、湿岛、浊岛等。当城区发生短时强降水时,若短时间出现 80~100 mm 降水,就会出现局部洪涝、公路交通中断、航班延误等事件,形成城市暴雨灾害<sup>[3]</sup>。同时,北京暴雨变化特征也随城市化进程和全球气候变化而变化。孙激<sup>[4]</sup>研究指出,8 月上旬是北京地区暴雨出现最为集中的时期,1961—2007 年北京地区暴雨日数总体表现为缓慢下降。李建等<sup>[5]</sup>研究发现,北京市夏季降水频率在午后至次日清晨为高峰区,最容易降水,中午前后降水最少。然而,具体到 2011 年,北京汛期暴雨属偏多还是正常?若偏多,其到底多到什么程度?这种多雨现象是否正常?为探明此类问题,本文利用北京地区 2011 年加密自动气象观测站降水资料,结合北京站(54511)1951—2011 年 24 h 降水量气候资料及 1948—2011 年 NCEP 再分析资料,对 2011 年汛期北京暴雨过程、暴雨灾害特点、极端降水特征、城市化进程对暴雨灾害的影响及成因进行了初步研究。

需要说明的是,常年平均,北京主汛期在 7 月下旬到 8 月上旬,因此文中北京 2011 年汛期指 6 月 1 日—8 月 11 日这一段。

### 1 2011 年北京汛期暴雨概况

#### 1.1 6、7 月降水

2011 年 6、7 月北京市降水量分布不均,呈现从城区向郊区递减的特点(图 1a、b);6 月最大降水量中心位于城区石景山、丰台及海淀部分区域,该区域累计降水量大于 150 mm,石景山个别观测站降水量达

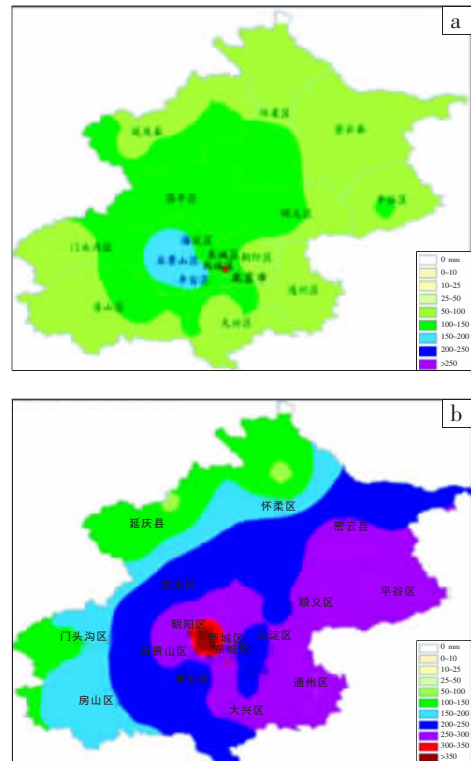


图 1 2011 年 6 月(a)、7 月(b)北京市累计雨量分布图

220 mm,累计降水量较小的区域在怀柔、密云、通州、大兴等城市远郊区,平均为 50~100 mm(图 1a);7 月累计最大降水量中心(>350 mm)位于海淀区,其他城区和东南部的通州、平谷、顺义等郊县为降水次多区域,雨量超过 250 mm,北部和西部郊县降水量相对较少,平均为 100~200 mm(图 1b)。相对于城市郊区,北京城区人口密集,2011 年 6—7 月降水量最大中心与城市人口、交通均较密集的区域吻合。

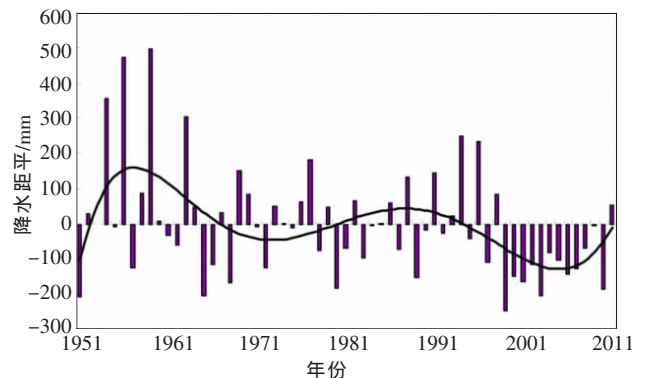


图 2 1951—2011 年北京站主汛期(6 月 1 日—8 月 11 日)降水量距平(柱体)及六阶拟合曲线变化

图 2 是位于城区的北京站 1951—2011 年 6 月 1 日—8 月 11 日降水量距平时间演变图。该站降水量常年平均为 339.6 mm,2011 年汛期为 394.4 mm,比常年同期多 54.8 mm。从图 2 中可见,1999 年以来北京降水量连续 12 年为负距平,2011 年首次转为正距平。

## 1.2 重要的暴雨过程及主要灾害

统计结果表明,2011年6月1日—8月11日北

京市共出现8次较强的降水天气过程。其降水特点和造成的主要灾害详见表1。

表1 2011年6月1日—8月11日北京主要强降水过程(北京时)

编号	降水时段	降水概况	主要灾害
1	6月11日	北京地区出现大范围雷雨大风天气,始发于15时左右,持续10 min,部分地区有冰雹。11日08—15时全市平均降水量1.0 mm,其中最大降水量(25.4 mm)在雁栖西栅子,穆家峪、石城其次,分别为18.0、16.0 mm。	因强天气持续时间短,灾害不严重。
2	6月15日	北京普降中到大雨,个别地方下了暴雨,城区强降水出现在20时左右。	无灾情详细报道
3	6月23日	16时北京突降暴雨,暴雨从北部地区进入北京,并向城区移动,伴有雷电、大风,24 h最大降水量128 mm。	多处严重积水,地铁1号线部分停运,地铁4号线陶然亭站淹没,飞机航班延误,北部山区发生泥石流、崩塌、滑坡,北京苹果园2名青年被卷入排水管道死亡。
4	7月14日	北京西部2站24 h降水达到暴雨量级,城区强降水出现在23—24时。	灾害不严重
5	7月19日	单站24 h降水最大达80 mm,其余各站中到大雨,城区强降水出现在20日01—02时。	灾害不严重
6	7月24—26日	北京发生特大暴雨,平均降水量62 mm,累计最大降水量出现在密云北山下,降水量244 mm。	顺义区遭雷击死亡2人,密云县因灾死亡2人、失踪1人。
7	7月29日	08—09时,北京自西向东普降中到大雨,截至11时,全市平均雨量15 mm,城区平均雨量23 mm。降水量最大的昌平小汤山地区,雨量达64.1 mm,其中仅07时后1个多小时,降水量近50 mm。	北京机场若干航班飞机延误,城区部分路段积水严重。
8	8月9日	北京傍晚至夜间出现暴雨、冰雹、雷电、短时大风等强对流天气,暴雨伴随雷暴袭击北京市区,造成大量降雨。17—18时1 h市区石景山等3个自动观测站雨量超过50 mm,最大达58 mm。	部分街道出现积水,中央电视塔遭雷击,公交受阻,地铁13号线、S2线因积水淹没铁轨而停运,同时造成42架次航班延误,短时强降水给市区交通造成较大影响。

## 1.3 2011年北京城市致灾暴雨的特点

2011年北京城市致灾暴雨过程属典型的中尺度天气过程,其特点是暴雨强度大、突发性强。如7月26日夜间(26日20时至27日06时),北京地区出现强对流天气,全市平均降水量虽仅17 mm,但分布不均,北京城区、顺义以及密云、怀柔部分地区10 h降水量超过50 mm(图3),10 h最大降水量出现在海淀区,最大值超过100 mm,其中中国气象局自动气象站为125 mm,甘家口水文站为132 mm。再如,7月29日08—09时北京中到大雨过程(图略),2 h降水量最大值(64.1 mm)在昌平小汤山地区,其中仅07时后1个多小时雨量就达50 mm。

2011年北京城市致灾暴雨的另一个特点是暴雨过程主要发生在交通高峰期。如6月23日暴雨,主要发生在下午16时左右,接近下班高峰;7月24—26日暴雨过程,其持续时间较长,上班高峰期和非交通高峰期降水强度均较大。再如,7月29日上午08—09时的暴雨以及8月9日17时的突发性暴雨,其分别发生在早、晚交通高峰时期。

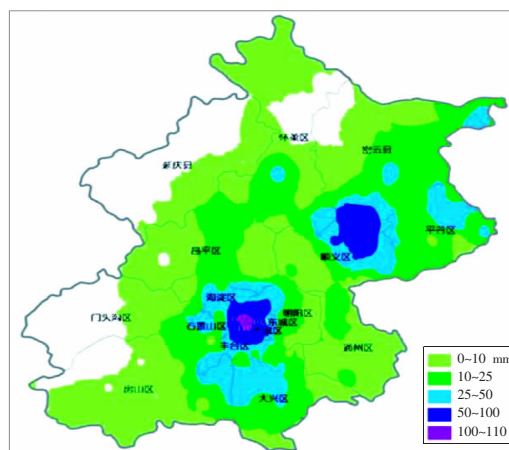


图3 2011年7月26日20时—27日06时北京市累计雨量分布

## 2 2011年北京汛期极端降水事件特征分析

## 2.1 北京站极端降水事件阈值定义

本文参照 Bonsal 方法<sup>[9]</sup>,确定极端事件阈值。假设某个气象要素有  $n$  个值,将这  $n$  个值按升序排列,即  $x_1, x_2, \dots, x_m, \dots, x_n$ ,某个值小于或等于  $x_m$  的概率( $P$ )为:

$$P=(m-0.31)/(n+0.38) \quad (1)$$

式(1)中,  $m$  为  $x_m$  的序号,  $n$  为某个气象要素值的个数。如果有 30 个值, 95 百分位上的值为排序后的  $x_{29}$  ( $P=94.4\%$ ) 和  $x_{28}$  ( $P=97.7\%$ ) 的线性插值。

根据上述百分位法, 将北京站 1971—2000 年 6 月 1 日至 8 月 11 日这一时段逐日降水量 ( $n=72$ ) 按升序排列, 定义 95 百分位上值的 30 a 平均为北京站极端降水事件阈值, 当某日降水量超过该极端降水事件阈值时, 称该日出现极端降水事件。为更好地描述极端降水事件的细节, 建立极端降水频数 ( $F_R$ )、极端降水平均强度 ( $I_R$ ) 和极端降水量占总降水量比例 ( $S_R$ ) 三个极端降水指数。其定义分别为:  $F_R$  指日降水量超过极端降水事件阈值的降水日数;  $I_R$  指日降水量超过极端降水事件阈值的平均降水量;  $S_R$  指日降水量超过极端降水事件阈值的降水量占年降水量的比例。

### 2.2 北京极端降水指数的变化

图 4 给出 1951—2011 年北京汛期 (6 月 1 日—8 月 11 日) 极端降水频数(图 4a)、强度(图 4b)和极端降水占总降水量比例(图 4c)的变化曲线。

从图 4 中可见, 自 1951 年开始, 北京极端降水频数、强度和占总降水量比例均有减弱趋势; 但从 3 个极端降水指数随时间变化的六阶拟合曲线上看出, 北京自 2005 年起极端降水频数、强度和极端降水占总降水量比例却均呈明显增加趋势, 尤其是 2011 年北京极端降水次数达 3 次之多, 是自 1998 年之后又一个极端降水频发年份; 极端降水强度达 80.7 mm, 2011 年是 1987 年以来近 25 年最强的; 极端降水占总降水量比例也突破 50%, 达到 61.4%, 仅低于 1998 年的 65.5%。

### 2.3 主汛期总降水频次和暴雨频次的变化

图 5 给出 1951—2011 年北京汛期 (6 月 1 日—8 月 11 日) 降水频次与暴雨频次的变化。从中可见, 自 1951 年以来, 北京总的降水频次呈微弱减少趋势(图 5a), 其整体变化不大, 2011 年降水频次未出现显著增加;

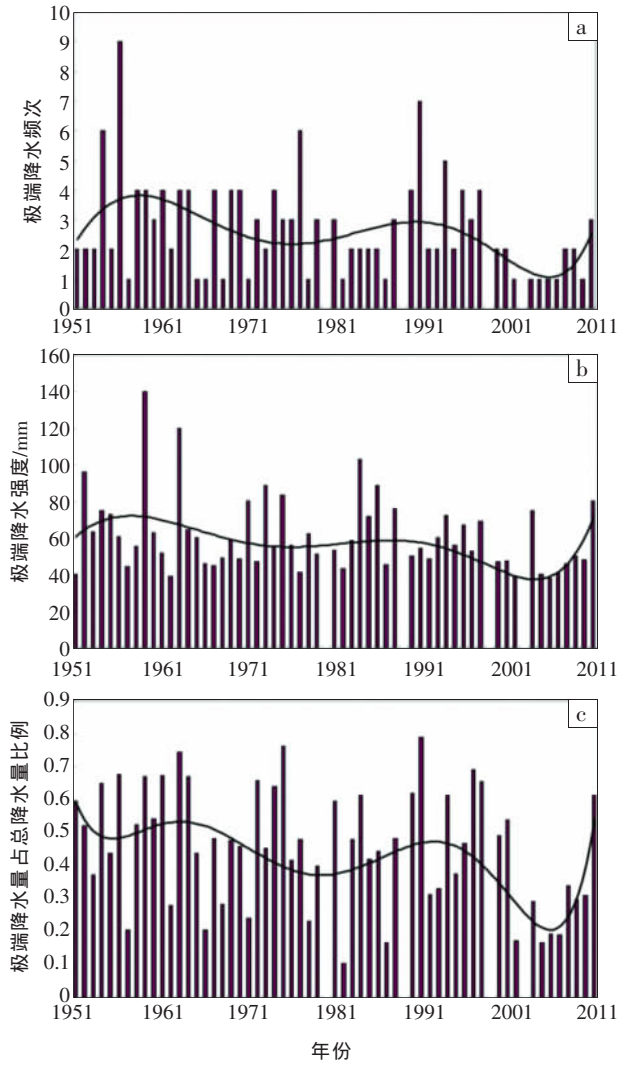


图 4 1951—2011 年北京汛期(6 月 1 日—8 月 11 日) 极端降水频数(a)、强度(b)与其占总降水量比例(c)变化(柱体)及其六阶拟合曲线

比较近 10 年降水频次, 2011 年多于 2010、2009、2007、2001 年, 少于 2008、2006、2004、2003、2002 年; 但 2011 年突出的特征是暴雨频次显著增多(图 5b), 近 61 a 来北京暴雨频次变化非常明显, 经历了从 20 世纪 80 年代的突增到本世纪初的骤降, 其波动变化明

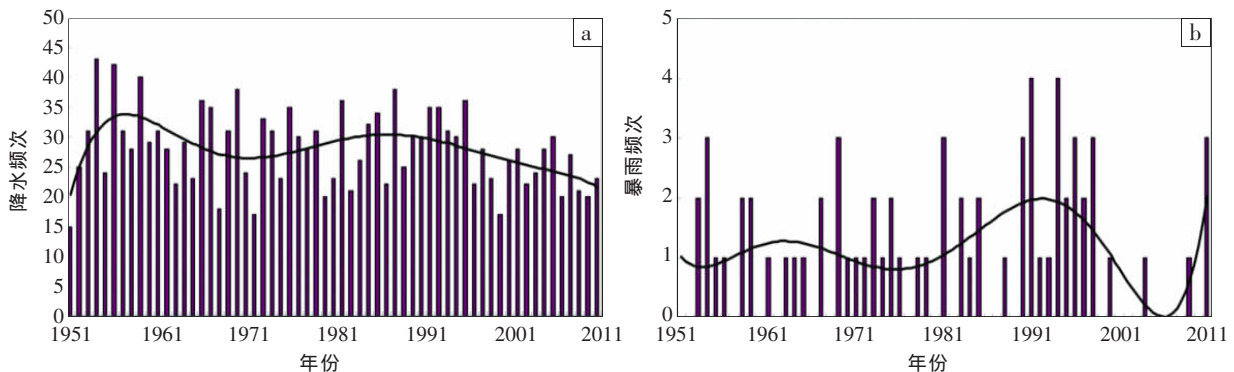


图 5 1951—2011 年北京汛期降水频次(a)、暴雨频次(b)变化(柱体)及其六阶拟合曲线

显,2011年北京暴雨频次达3次之多,是近10年来最多的一年,从而印证了社会公众的“2011年北京多暴雨”的直观感觉。

### 3 北京城区极端降水特征成因初析

#### 3.1 2011年6—7月环流特征和演变

图6是利用美国NCEP再分析资料获得的2011年6月1日—7月31日东北半球500 hPa平均高度、700 hPa水汽通量图及同期气候平均值。从中可见,2011年6—7月,中高纬度为两脊三槽型多波动环流,我国东北至华北一带受低槽控制,新疆东部至河套地

区受高脊控制,且高度距平超过2 dagpm(图略),表明这一地区高脊较常年同期略偏强,华北地区低槽后部的偏北气流也相应较常年偏强,有利于北方冷空气南压;西太平洋副热带地区,副热带高压588 dagpm特征线西脊点偏东,并有一大片中心值为1 dagpm的正距平区(图略),表明西太平洋副热带高压位置偏东、偏北,从而使副热带高压西侧西南暖湿气流位置也偏东、偏北。进一步分析图6可知,2011年700 hPa水汽通量较常年平均偏东、偏强。由此可见,2011年汛期北京处于北支低槽区域和副高控制下西南暖湿气流带的冷暖空气交汇处,有利于降水频繁发生。

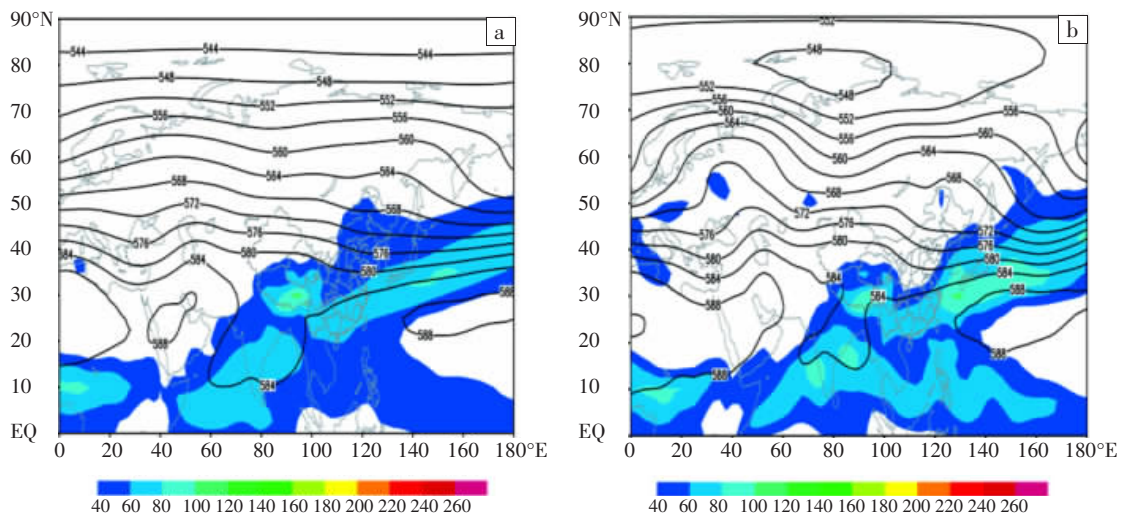


图6 2011年6月1日—7月31日东北半球500 hPa平均高度(等值线,单位: dagpm)和700 hPa水汽通量(填色区,单位:  $10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 1948—2010气候平均场; (b) 2011年平均场

#### 3.2 北京城市化进程对暴雨灾害的影响

2011年北京汛期降水表明,城区降水显著多于同期非城区降水。这一定程度上验证了郑思钦等<sup>[7]</sup>的研究结论“在北京城市化过程中,城区排放大量气溶胶及温室气体有利于降水形成;城区降水波动性增强,旱年愈旱,涝年愈涝”。但与刘熙明等<sup>[8]</sup>分析1994—2003年北京市7、8月夏季常规地面观测资料所得到的结论“受全球变暖和城市化影响,北京夏季降水量逐年下降非常明显,城区降水比郊区降水偏少,且有逐年下降趋势”不同。究其原因,城市降水形成机理十分复杂,城市化对降水的影响机制主要有城市热岛效应、城市阻碍效应、城市凝结核效应等<sup>[9]</sup>。

热岛效应促使城区上空大气层结不稳定,易产生热力对流,当有云团移至城区上空时,热力对流作用使云团加速发展;若此时空气中水汽充足,就易形成对流云及产生对流性降水,这种降水表现的主要特性是降水强度增加并常伴随冰雹、大风、暴雨等灾害性天气。2011年北京汛期强降水及其造成的灾害事实,

也说明城市热岛效应对降水可能具有增幅作用。值得注意的是,科研人员在研究珠江三角洲城市群对降水的影响时发现<sup>[10]</sup>,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加大;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,而层状云降水的分布则与城市群位置没有明显关联。

北京城市化发展促使城区地面粗糙度发生很大变化,当气流从郊区向城区移动时,城区中高度不一且规模庞大的高层建筑如同屏障,使空气产生机械湍流,而人工热源则导致热力湍流;同时受地层摩擦影响,空气动力糙率发生改变,空气运动受到明显影响,强风在城区减弱而微风得到加强。城市阻碍效应造成气流总体移速减慢并在城区滞留时间增加,进而导致城区降水强度增大及降水时间延长。这种城市阻碍效应对城区降水的影响在上海市也有明显反映<sup>[11]</sup>。

城市空气中灰尘等凝结核多于郊区,有利于云中雨滴形成,这可能对2011年北京汛期降水也有增幅作用。上海市城郊大气质量对比表明<sup>[12]</sup>,城区大气污染

物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、飘尘、降尘等)平均浓度明显大于郊区,城区混浊度因子显著高于郊区,并以市区为中心形成一个显著的混浊岛,其混浊效应随上海城市化发展而逐渐增强。可见,城区气流条件不利于污染物传输与扩散,气溶胶的污染浓度高,尘埃和废气的微小颗粒长期漂浮在空中,易于吸收水汽,形成较多的云凝结核和冰核,从而有利于形成云内胶性不稳定,进而起到增雨作用。

我国传统的洪水灾害通常分为两种类型:一是由于台风、风暴潮引起的沿海地区洪涝灾害;二是由于暴雨或持续性降水引起江河流域洪水灾害,这也是我国气象学家至今都非常重视研究的暴雨类型及暴雨预警系统和防灾体系。但近年来,随着我国城市化迅速推进,城市人口越来越密集,城市功能越来越多样,由城市内部遭遇强降水产生的城市暴雨带来大量新问题。如在城市低洼、排水不畅地区易发生洪涝灾害,冲毁城市道路、输电线路等设施,使交通瘫痪,影响城市正常运转和市民正常生活,对城市安全构成威胁。这种影响预计在未来数年内将越来越显著,从2011年北京城市暴雨灾害的影响和社会反应可窥一斑。梁灵君等<sup>[13]</sup>在分析城市化进程对北京城区降水影响时指出,城区降雨具有强度大、历时短的特点,主要集中在60 min左右,城区暴雨中心大致分布在右安门到东直门一带城市化发展完全区。因此,对城市暴雨与灾害特点、暴雨预警系统及其防灾减灾的研究,应引起相关城市管理部门和科研单位的高度重视。

#### 4 结论与讨论

本文利用北京地区2011年加密自动气象观测站降水资料,结合北京站1951—2011年气候资料和NCEP再分析资料,对2011年6月1日—8月11日期间北京暴雨过程、暴雨灾害特点、极端降水特征及成因等进行了初步分析,获得以下结果和结论:

(1) 2011年6月和7月北京市降水量分布不均,呈城区向郊区递减的特点,最大降水中心位于北京城区。此期间北京共出现8次较强的降水过程,造成灾害较大的有3次,其分别发生在6月23日、7月24—26日、8月9日,且3次暴雨主要发生在城市交通高峰期。

(2) 2011年北京降水量比常年同期偏多近54.8 mm,降水距平是自1999年连续12年呈负距平后首次转为正距平。

(3) 2011年北京极端降水次数达3次之多,是自

1998年之后又一个极端降水频发年份;极端降水强度达80.7 mm,是自1987年以来近25年最强的;极端降水量占总降水量比例突破50%,达到61.4%。

(4) 2011年北京降水频次变化不大并略有下降,但暴雨频次显著上升,比前10年同期多2~3次,暴雨占总降水量的比例达到60%以上。2011年北京总降水量增加,主要是由暴雨增多所致。

(5) 2011年汛期北京多暴雨的原因有二,一是北京处于北支低槽区域和副高控制下西南暖湿气流的冷暖空气交汇处,有利于降水频繁发生;二是北京城市化产生的城市热岛、建筑物对天气系统移动减速及更多凝结核对暴雨起增幅作用。

2011年北京暴雨预报实践表明,我国目前暴雨预报特别是突发性暴雨预报,在时间、地点、量值上很难达到政府部门和社会公众的需求。现有的数值预报模式对城市尺度天气系统降水预报能力较差,需要大力发展针对城市特征的数值预报技术。

国家气象中心陈法敬、四川省气象台陈朝平、成都信息工程学院吴智鹏为本文提供了相关资料,在此一并致谢。

#### 参考文献:

- [1] 匡文慧,邵全琴,刘纪远,等.1932年以来北京主城区土地利用空间扩张特征与机制分析[J].地球信息科学学报,2009,11(4):428-435.
- [2] 季崇萍,刘伟东,轩春怡.北京城市化进程对城市热岛的影响研究[J].地球物理学报,2006,49(1):69-77.
- [3] 徐祥德,汤绪,徐大海,等.城市化环境气象学引论[M].北京:气象出版社,2002.
- [4] 孙激.北京地区暴雨气候特征及其变化分析[J].气候与环境变化,2010,15(5):672-676.
- [5] 李建,宇如聪,王建捷.北京市夏季降水的日变化特征[J].科学通报,2008,53(7):829-832.
- [6] Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A, et al. Characteristic of daily and extreme temperature over Canada [J]. J Climate, 2001, 14(14): 1959-1976.
- [7] 郑思轶,刘树华.北京城市化发展对温度、相对湿度和降水的影响[J].气候与环境研究,2008,13(2):123-133.
- [8] 刘熙明,胡非,李磊,等.北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究[J].地球物理学报,2006,49(3):689-697.
- [9] 杨士弘,廖重斌,郑宗清.城市生态环境学[M].北京:科学出版社,1997.
- [10] 黎伟标,杜尧东,王国栋,等.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,2009,33(6):1259-1266.
- [11] 殷健,梁珊珊.城市化对上海市区域降水的影响[J].水文,2010,30(2):66-72.
- [12] 周淑贞,郑景春,邵建民.上海城市气候中的混浊岛效应[J].地理科学,1988(4):305-312,395.
- [13] 梁灵君,杨忠山,白国营.城市化进程对北京城区降水影响探讨[J].北京水务,2011(3):15-18.