

杨萍, 肖子牛, 石文静. 2017. 基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征 [J]. 大气科学, 41 (3): 475–489. Yang Ping, Xiao Ziniu, Shi Wenjing. 2017. Fine-scale characteristics of rainfall in Beijing urban area based on a high-density autonomous weather stations (AWS) dataset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 475–489, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16134.

基于小时降水资料研究北京地区降水的精细化特征

杨萍^{1,3} 肖子牛² 石文静²

1 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 根据北京全区 2007~2014 年 117 个自动气象站逐小时降水资料, 在揭示降水总体时空特征的基础上, 进一步研究了北京地区各季 (以春、夏、秋为主) 降水的精细化特征。研究发现: 北京全区年均降水量存在两个高值中心 (城区和下风方向的降水高值中心), 城市热岛效应可能是城区高值中心形成的重要影响因素之一; 北京全区降水的季节分布不均, 日分布也不均匀; 城市化对北京地区降水的影响具有季节差异, 夏季短历时和中历时降水在城区和东北部存在显著的大值区, 受到城市热岛效应的影响可能较为明显, 长历时降水在城区反而相对偏低, 而春季城区短、中历时降水并未偏多, 长历时降水却在城区出现明显的高值中心; 降水日变化季节差异明显, 春、秋两季呈现双峰型变化, 而夏季呈现单峰型变化, 该日变化的特征与全区降水的空间分布格局关系紧密。

关键词 降水 自动站资料 精细化特征 季节变化

文章编号 1006-9895(2017)03-0475-15

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16134

Fine-Scale Characteristics of Rainfall in Beijing Urban Area Based on a High-Density Autonomous Weather Stations (AWS) Dataset

YANG Ping^{1,3}, XIAO Ziniu², and SHI Wenjing²

1 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract On the basis of a quality controlled hourly rainfall dataset from autonomous weather stations (AWS) for the past 8 years (2007–2014), the general and fine-scale characteristics of rainfall in Beijing were analyzed. Results show that there are two high rainfall centers in all area of Beijing. The urban heat island has an important effect on rainfall events. The rainfall events distribute unevenly both on seasonal scale and on daily scale. The study also found that the influence of urban heat island on rainfall events is different among different seasons. Events with high values of rainfall and 1–3 h and 4–6 h durations in the summer largely occur over central and northeastern Beijing, where the urban heat island has significant influences. However, there are fewer events of low rainfall with 6 h and longer duration in urban area in the

收稿日期 2016-02-05; 网络预出版日期 2016-06-27

作者简介 杨萍, 女, 1981 年出生, 博士、副研究员, 主要从事极端事件、城市气候方面的研究。E-mail: zz96998@163.com

通讯作者 肖子牛, E-mail: xiaozn@lasg.iap.ac.cn

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划 2012CB957804, 国家自然科学基金项目 41375069、41505061、41675092, 中国气象局“青年英才培养计划”项目

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2012CB957804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41375069, 41505061, and 41675092), Youth Talent Program of China Meteorological Administration

summer. The features of rainfall distributions in the spring and autumn are opposite to that in the summer. Differences in diurnal variations of rainfall in different seasons are distinguished. The diurnal variation of precipitation displays a two-peak feature in the spring and autumn, while it only shows a single peak in the summer. These features are in accordance with the distributions of occurrence time of maximum rainfall amount over Beijing.

Keywords Rainfall events, Hourly rainfall dataset, Fine-scale characteristics, Seasonal change

1 引言

北京作为迅速发展的超大城市,地处华北平原的西北端,西部山地属于太行山山脉,北部山地属于燕山山脉,东南部为冲洪积物组成的平原地域,由于其地形复杂,全区降水呈现出明显的地域性特征。同时,北京的气候属于温带大陆性季风气候,四季分明,降水的季节分配很不均匀,夏季降水最为集中,冬季降水稀少(陆日宇, 1999; Li et al., 2002; 林大伟等, 2016)。由于强降水事件或持续性降水事件引发的各种次生灾害对中国尤其是特大城市会带来巨大的经济损失,因此,关于北京地区降水的发生和演变一直是科学家高度关注的研究方向,也取得不少成果(孙继松, 2005; Li et al., 2011; 周玉淑等, 2014; 肖现等, 2015)。但是,由于降水资料的限制,此前关于小时时间尺度的降水研究大多针对降水个例进行特征分析和数值模拟(Miao et al., 2011; Zhong et al., 2015),对降水过程的气候分析则主要集中在了日、月或更长时间尺度上(陆日宇, 2002; 徐宗学等, 2006; 于淑秋, 2007; 王秀荣等, 2008)。然而,由于城市中对降水精细化描述的要求越来越高,研究北京地区更高时间尺度和更高空间密度的降水资料将有助于更加精确地反映出降水信息和演变过程的特征。

近年来,随着北京自动观测网的全面布网和多年逐小时降水资料的出现,人们开始关注到小时时间尺度的降水特征,北京地区降水的细致特征也开始逐渐被揭示和认识(宇如聪等, 2014; 窦晶晶, 2014; 郑祚芳等, 2014)。例如,前人对北京地区夏季降水的日变化特征研究发现,北京夏季降水在近 40 年发生了结构性调整,短持续性降水逐步增多,长持续性降水大幅减少(Li et al., 2008);还有研究利用空间加密的小时降水资料,研究了北京夏季小时降水频次和降水量的空间分布和持续性特征(Yang et al., 2013b)。可以看到,越来越多的研究开始关注到北京地区降水的精细化特征。

由于夏季降水是北京地区降水的集中期,从已有研究看,目前关于北京小时降水特征(如日变化

特征、持续性特征)的描述多集中在夏季,对全年降水的分布情况关注度较少。本文将基于小时时间尺度的空间加密降水资料,较为系统地研究北京地区不同季节降水的精细化特征,这对于更好地理解北京地区降水的变化规律,评估区域气候特征,提高城市防灾减灾能力等方面,具有较为重要的意义。

2 数据和方法

北京地区自 1998 年开始建立自动气象观测网,经过 10 多年的建站和发展,已经形成了时间上和空间上都比较密集的自动气象观测网(Yang et al., 2013a)。杨萍和刘伟东(2013)针对北京全区的降水资料,构建了北京地区小时降水资料的质量评估流程,对北京地区逐小时观测资料的完整性、准确性和可靠性进行了定量化的评估,并通过气候极值检查、时间一致性检查、空间一致性检查等方法对降水资料进行诊断分析,最终形成了一套质量较高的降水小时资料数据集。本文所用资料将该数据集动态更新到 2014 年,利用 2007~2014 年北京地区 117 个自动气象站逐小时的八年降水资料开展研究(站点使用情况如图 1 所示)。

降水定义采用中国气象局的业务标准,即 1 h 降水量 ≥ 0.1 mm 记为有降水,各站某一时间段降水量为该时段总的降水累积量。为了研究不同季节降水的持续性问题,文中参考已有研究(杨萍和刘伟东, 2013),按照持续时间的长短,将不同持续性降水分为三类:短历时降水(持续时间为 1~3 h),中历时降水(持续时间为 4~6 h)和长历时降水(持续时间为 6 h 以上)。

本文在分析北京地区降水总体特征的基础上,对不同季节降水的基本特征进行统计分析,并重点研究了春、夏、秋三季降水的空间分布特征。以不同持续性降水的累积降水量在总降水量中的贡献率为研究重点,分析了不同季节降水的持续性特征,此外,在揭示北京地区全区降水量的日变化特征基础上,对各季降水量日峰值出现时间的空间分布进行了分析和研究。

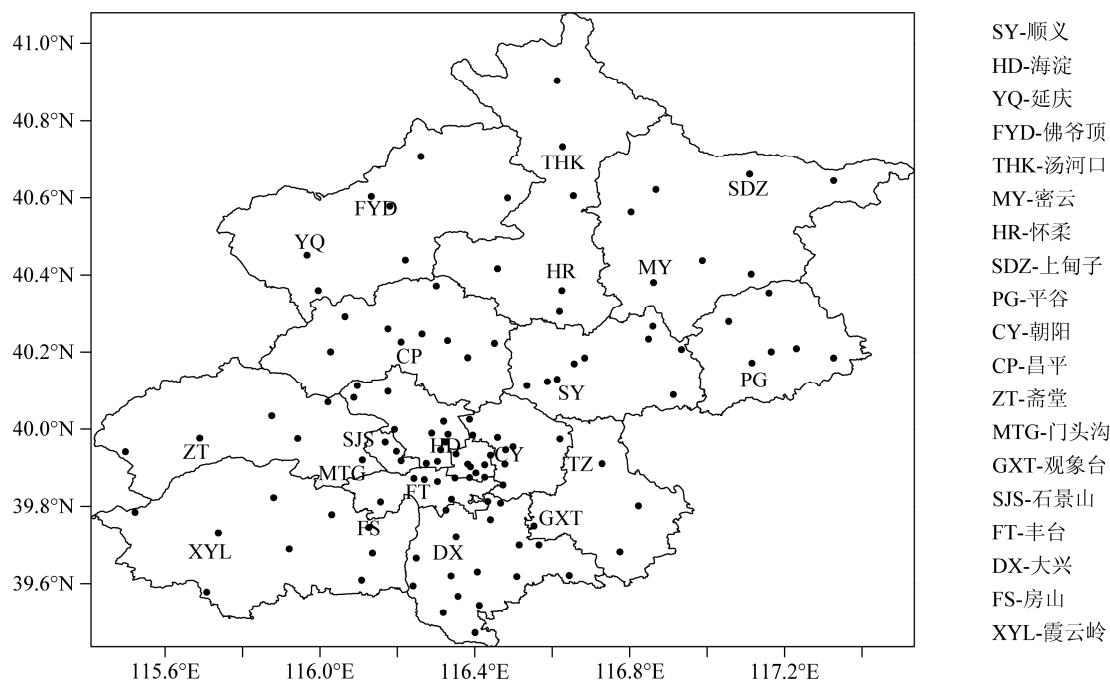


图1 北京地区全区站点使用情况分布。代表站点名称在图中用大写首字母表示，下同

Fig. 1 The distribution of stations with hourly precipitation observations in Beijing. SY, HD, YQ, FYD, THK, MY, HR, SDZ, PG, CY, CP, ZT, MTG, GXT, SJS, FT, DX, FS, and XYL represent Shunyi, Haidian, Yanqing, Foyeding, Tanghekou, Miyun, Huairou, Shangdianzi, Pinggu, Chaoyang, Changping, Zhaitang, Mentougou, Guanxiangtai, Shijingshan, Fengtai, Daxing, Fangshan, and Xiayunling, respectively, the same below

3 年平均降水量的总体特征

图2给出了北京地区2007~2014年多年平均降水量的空间分布(图2a)和全区平均降水量的日变化特征(图2b)。从多年平均降水量的气候学特征看,北京全区2007~2014年平均降水总量为539.3 mm,与过去几十年的年代际平均降水量相比,和20世纪80年代(年代平均降水量为533.6 mm)相当(徐宗学等,2006),在近五十年的年代际降水量中位于中等水平。从年均降水量的空间分布来看,全区整体呈现西北山区和山间盆地降水偏少、东南部山前地带和平原地区降水偏多、高降水中心由西南向东北带状分布的格局。该分布格局形成的重要原因是受到了地形和盛行风的影响(陈志昆和张书余,2010;郑祚芳等,2014)。地形的强迫抬升作用致使北京地区山前迎风坡更易形成降水,夏季盛行的低层东南风使地形的抬升作用进一步加强(Zhang et al., 2009; 原韦华等, 2014)。此外,夏季大气中低层的西南风水汽输送通道(周晓霞等, 2008)对这一分布态势也有明显影响,该水汽输送通道致使山前平原地区的大气可降水量一

般高于西北部山区和山间盆地,在有利的天气、气候条件下,更容易产生降水。

进一步分析降水的高值分布特点,发现大值中心主要集中于两个区域,其一位于北京东北部,覆盖了怀柔、密云、平谷等地,区域平均降水量为569.3 mm,高值中心站位于平谷的镇罗营站,年平均降水量达到659.9 mm,另一大值区域位于四环以内的城区及周边地域,并形成了以城区为高值中心,向周边发散性递减的分布格局,其中,海淀、朝阳等主城区区域平均降水量达到了581.9 mm,城区最高值站点为朝阳区的四惠桥站,达到了695.7 mm,为全区最高年降水量。东北部的高值区主要和西南气流与山地地形的相互作用有关,而城区的高值中心很可能与城市热岛效应及其热岛环流影响密切联系(陆日宇, 2001; 孙继松和杨波, 2008; Miao et al., 2011; Yang et al., 2013b)。于淑秋(2007)在研究1960~2000年北京地区降水特征时,发现了城区多雨区和怀柔多雨区两个多雨中心,对比其空间分布格局,近几年北京地区降水的分布格局总体不变的情况下,城区多雨中心的覆盖范围明显扩大,呈现出以主城区为中心向四周发散的分布格局。

Ren et al. (2007) 的研究发现, 北京站和密云站城市热岛强度在近几年中呈现明显增长态势, 其中, 城区附近观测的增长应该主要和最近 20 多年城区面积扩张有关。大量关于城市热岛强度对降水影响的研究表明, 城市热岛效应对城区及城区下风风向的降水有增多的影响(张立杰等, 2009; 郑祚芳等, 2014)。本文指出的北京地区 2007~2014 年平均降水量双高值中心(城区高值中心和东北高值中心)的空间分布格局进一步验证了上述结论。

图 2b 给出了 2007~2014 年北京全区年平均降水量的日变化特征, 可以看到, 北京全区降水的日演变呈现一峰一谷型, 中午为降水最少的时段, 谷

值出现在 13 时, 小时平均降水量为 14.2 mm, 夜间(22 时至次日 3 时, 北京时, 下同)降水量偏高, 峰值出现在 23 时, 小时平均降水量为 32.8 mm, 超过了谷值降水量的双倍。过去, 对夏季降水的日变化特征多有研究, 前人针对北京及周边区域夏季降水的研究表明, 降水量的日变化以夜间偏多、午间偏少(Li et al., 2011; 宇如聪等, 2014; 原韦华等, 2014), 与本文研究全年降水的日变化特征的结果一致, 这也体现了夏季降水在北京全年降水中占据着主要的贡献。

由于北京地区季节降水主要集中在夏季, 过去对北京地区夏季降水的诸多特征成果丰硕(Li et

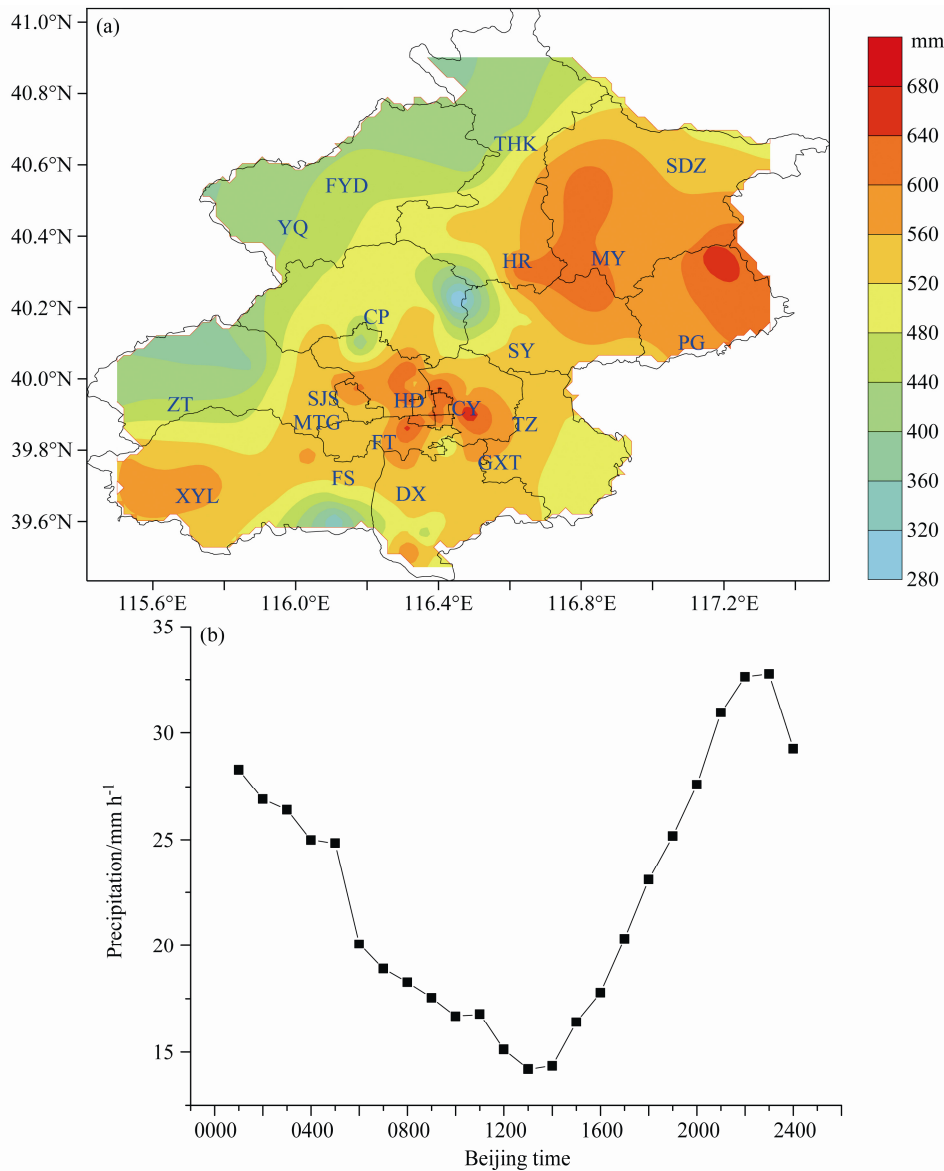


图 2 2007~2014 年 (a) 多年平均降水量的空间分布, (b) 年均小时累积降水量的日变化特征
Fig. 2 (a) Spatial distribution of multi-year average precipitation, (b) multi-year average diurnal variation of hourly precipitation during 2007~2004

al., 2008; 张立杰等, 2009, 周玉淑等, 2014), 而其他季节的降水特征的关注度尚不够充分。事实上, 北京地区不同季节的降水各有特点, 研究各季降水的特征有助于更全面地理解和分析北京地区降水的精细化特征, 表 1 给出不同季节降水的年平均值, 并统计了日尺度下各个时间段降水累积量的结果。

表 1 2007~2014 年北京地区季节降水量的总体特征

Table 1 General features of seasonal mean accumulated precipitation in Beijing during 2007–2014

	2007~2014 年平均累积降水量/mm				
	01~24 时	01~06 时	07~12 时	13~18 时	19~24 时
春季	67.1	15.2	15.1	16.5	20.3
夏季	356.5	99.2	58.6	72.5	126.2
秋季	111.2	36.4	28.0	16.1	30.7
冬季	4.5	0.7	1.6	1.1	1.2
全年	539.3	151.5	103.3	106.2	178.3

表 1 的结果显示, 2007~2014 年期间, 北京夏季降水最为集中, 累积降水量为 356.5 mm, 占据全年平均降水总量的三分之二。春秋季降水量次之, 但秋季降水量是春季的 1.7 倍, 明显高于春季, 冬季年均降水总量最少, 仅为 4.5 mm。鉴于冬季年均降水量极少, 对其进行细化分析的研究意义不足, 因此, 本文对降水季节特征的研究将集中在春、夏、秋三季。从全年降水的日分布看, 夜间降水偏多 (19 时至次日 06 时), 白天降水偏少 (07 时至 18 时), 与图 2b 显示出的日变化特征一致。从不同时期降水量日变化的分布情况可以看到, 不同季节降水日变化的分布格局既有一致性之处, 又相互存在差异。整体来说, 夏秋两季夜间降水偏多 (19 时至次日 06 时), 白天降水偏少 (07 时至 18 时), 春季为午后至上半夜 (13 时至 24 时) 降水偏多, 凌晨至上午 (01 时至 12 时) 降水偏少。进一步分析发现, 春夏两季的分时段累积降水量为晚间 (19 时至 24 时) 最多, 秋季为凌晨 (01 时至 06 时) 最多。对于降水最少的阶段也存在一定的季节差异, 春、夏季的上午时段 (07 时至 12 时) 为降水量最少, 秋季则为下午时段 (13 时至 18 时) 累积降水量最少。

以上结果显示北京地区降水既有明显的季节差异, 又存在显著的日变化特征。前人关于华北特别是北京地区季节降水影响因子的研究很多, 一般认为东亚地区大气环流是降水季节变化的最重要影响因素之一, 而大气环流的变化通常是对诸多外强迫因子发生变化的响应 (孙继松和杨波, 2008;

郝立生等, 2011)。水汽输送也是影响季节降水的关键因素, 春季影响北京降水的水汽通道主要是西南风的水汽输送, 夏季, 西南风水汽输送进一步加强, 同时东南风和偏西风水汽通道与其共同作用影响夏季降水, 而秋季影响该区降水的重要输送途径为东南风水汽通道, 可见, 不同季节水汽输送方式的不同也造成了降水的季节差异明显 (周晓霞等, 2008)。

降水的日变化特征反映了大气热力和动力过程对水汽循环的综合影响, 同时局地尺度环流对天气和气候的影响也很重要 (Dai, 1999; Sorooshian et al., 2002; 吴庆梅等, 2009; 刘树华等, 2009)。北京地区各季呈现的日变化规律普遍具有夜间和凌晨降水偏多的特征, 这与已有研究得到的中国北方区域降水的大值主要出现在午夜和凌晨的结论一致 (宇如聪等, 2014)。前人通过对持续性降水特征的研究发现了北方地区夜间降水偏多主要由持续性降水引起 (原韦华等, 2014), 而凌晨降水的偏多更可能与层状云及中尺度对流系统联系紧密 (Chen, 2010, Yuan et al., 2010)。此外, 山谷风环流和城市热岛环流的共同作用, 也有利于北京城区及其附近平原地带傍晚和夜间出现雨量峰值 (吴庆梅等, 2009; 刘树华等, 2009; Miao et al., 2011)。将来, 利用高密度观测资料和中尺度气候模式模拟技术, 进一步研究揭示北京地区降水日变化特征形成的机理非常必要。

4 不同季节降水的特征研究

已有研究表明, 短时降水和长持续时间的降水对应着不同的大气环流状况, 降水特性和时空的分布也不尽相同 (宇如聪等, 2014)。本部分将在研究北京地区不同季节年均降水量空间分布的基础上, 重点分析各季降水中在不同持续时间降水事件所占据的比重, 以探讨各季降水的主要类型和过程, 并在研究各季降水日变化特征的基础上, 重点分析日峰值降水出现时间的空间演变规律。

4.1 降水总量的空间分布特征

图 3 给出了北京地区春、夏、秋三季降水平均累积量的空间分布。图中可以看到, 各个季节平均降水量的空间差异明显。夏季降水的空间分布格局与全年的结果非常类似, 呈现城区和东北区双高值中心的格局, 这与夏季降水总量占据全年降水量的比例最大 (66.1%) 密不可分。这种空间分布格局

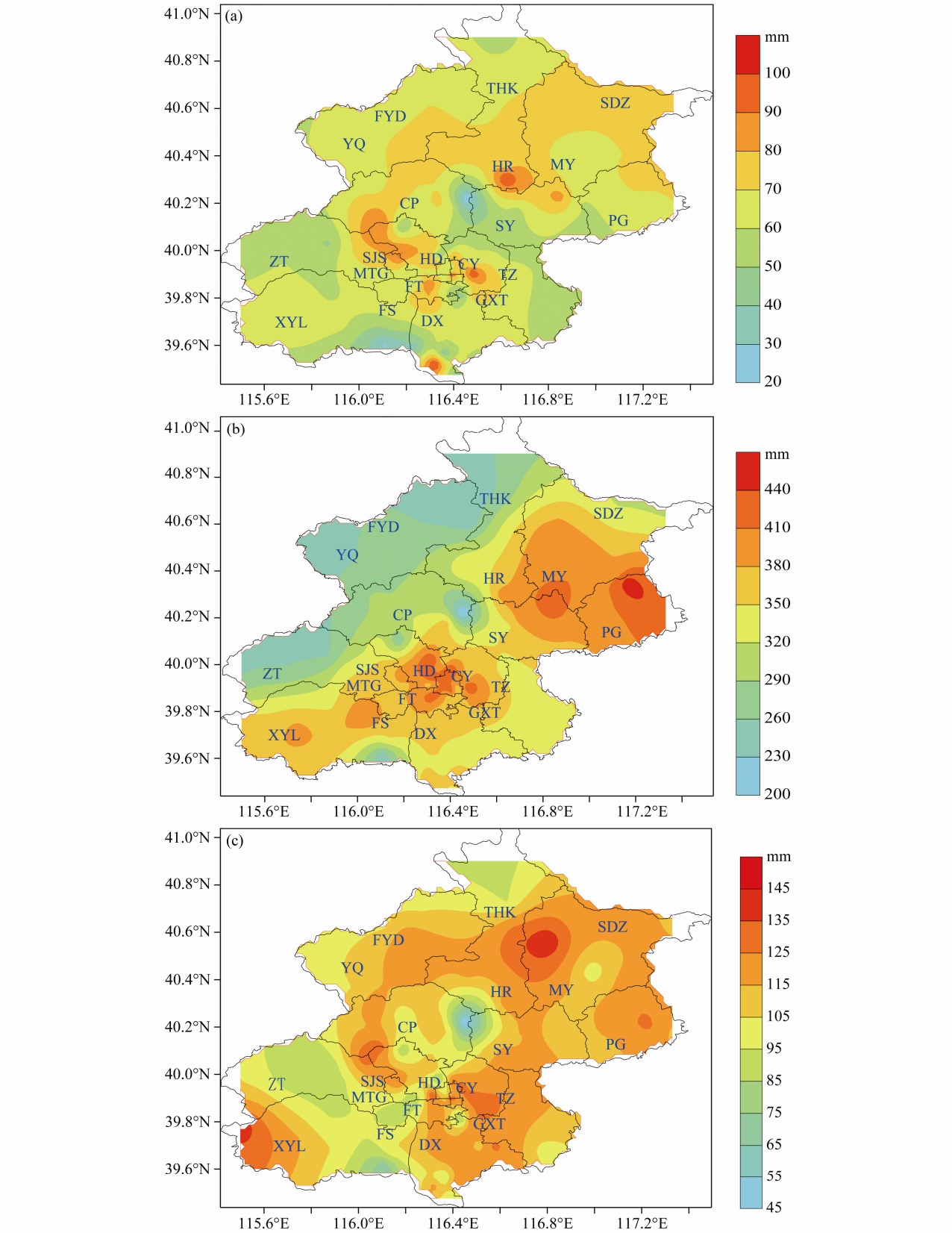


图 3 2007~2014 年北京地区 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季平均累积降水总量的空间分布
Fig. 3 Spatial distributions of accumulated seasonal precipitation in Beijing averaged during 2007–2014: (a) Spring, (b) summer, (c) autumn

反映出降水与地形、水汽通道及夏季盛行风等因子的密切联系。春季降水量在全区整体偏低的情况下，在怀柔、朝阳出现了较为明显的小范围高值中心，可能和自动站所处局地地形位置有关，城区的局地多雨区也在一定程度上和城市热岛效应影响有联系。秋季降水量的空间差异性非常明显，仍旧存在着与夏季降水格局相类似的双高值中心，但位置有所差别，城区的高值中心向东南方向偏移，集中于朝阳和通州区域内，东北区的高值中心向西北方向移动，集中在密云和怀柔的北部区域。郝立生等（2011）曾发现，秋季华北降水的水汽输送从夏季的西南风通道转变为东南风通道，秋季北京地区降水分布可能与水汽输送通道的转变有一定关联性。

4.2 季节降水量的持续性特征

表 2 给出了 2007~2014 年北京各季不同持续时间的降水累积量对平均降水总量中的贡献率。春、秋两季与夏季格局存在较大区别。夏季降水中，短历时降水的总量贡献率最大，这与前人研究结论一致（殷水清等，2012；Yang et al., 2013b），其次是长历时降水，其降水量贡献率次之，而夏季中历时降水的贡献率最低。春、秋两季与夏季降水格局的主要区别在于贡献率位居第一的为长历时降水，春季占 42.6%，秋季甚至超过 50%，而与夏季一致的是，中历时降水在春、秋季降水中的贡献率均较低。不同季节持续性降水的分布格局其累积到全年的效应在表 2 中也有反映，全年降水中，长历时降水量的贡献率与短历时降水总量基本持平且略高，中历时降水的贡献率最小。Li et al.（2008）在研究北京地区夏季持续性降水格局时，发现持续时间短的降水贡献率在变大，而大于 6 小时的长持续性降水贡献率在减小。随着城市化的加速，更易致灾的短历时长降水所在比重越来越大，而且强降水事件也不仅出现在夏季，在其他季节出现的几率也在增大（孙继松和杨波，2008；魏东等，2009；Yang et al., 2013b）。

从各季短历时降水累积降水量贡献率的空间分布可知（图 4），不同季节其短历时降水贡献的格局各不相同。春季的短历时降水量贡献率的大值中心主要集中在顺义、昌平以南的区域，从纬向分布来看，出现了“+ - +”的高低值交替格局，并呈现发散性分布，在顺义向西南方向出现了顺义、昌平、斋堂三个区域性大值中心，而其南部的城区及以西的大部则为低值区域，再向南的大兴又出现了高值中心；从夏季短历时降水空间分布的总体格局

看，其受地形的影响相对较大，贡献率较高的区域集中在北京的西部和山区的迎风坡，其中，昌平的太平庄站为全区最大，短历时降水量贡献率达到了 51.7%，而东南部平原和东北部的密云平谷等地的短历时降水贡献率偏低，在平原区域整体偏低的情况下，城区短历时降水量的贡献率仍旧较高，说明城市热岛效应对城区短历时降水存在一定的影响；秋季短历时降水量全区分布呈现纬向上的“- + -”格局，其中高值区域位于北京地区的中部，呈纬向带状分布，其中海淀区域的稻香湖站贡献率为 39.5%，为全区最大，秋季短时降水量贡献与春夏季相比，比重最小，即使最大站点的贡献率也仅比春季区域平均值多了 1.5%。

表 2 2007~2014 年北京地区各季不同持续时间的降水累积量对平均降水总量的贡献率

Table 2 The contribution of rainfall events with different durations to total precipitation in the different seasons in Beijing averaged during 2007–2014

	持续性降水贡献率		
	短历时（1~3 h）	中历时（4~6 h）	长历时（>6 h）
全年	37.2%	21.6%	41.2%
春季	38.0%	19.3%	42.6%
夏季	44.5%	21.8%	33.8%
秋季	30.1%	19.0%	50.9%

图 5 给出 2007~2014 年北京地区中历时降水量贡献率的空间分布。尽管中历时降水对降水总量的贡献率最低，但是其空间分布却较有特点。对比春、夏、秋三季的空间格局能够看到，在北京东北部尤其是密云区域，均出现了大值中心。密云区域在近年来降水持续偏多（郑祚芳等，2014），通过对各季降水格局的分析看，其降水偏多的重要因素是 4~6 小时的持续性降水量偏大，窦晶晶等（2014）研究表明，北京地区西南风导致的降水事件最多，占据 40%，结合图 5 可以看到，密云正处西南风向下风方向，其降水偏多可能与其所处的下风方向、密云水库造成的湖陆环流等相关。此外，春季中历时降水贡献率整体呈现南少北多的情况，夏季在城区和城区的下风方向（东北部）出现两个大值区，可能仍旧是反映了城市热岛效应和地形因素的影响；而秋季呈现出南多北少的格局，是否同北京大气污染空间分布呈现“南差北好”（董芬等，2013）的分布格局有关（Rosenfeld, 2000），值得进一步探讨。

与中历时降水量维持较小的贡献率相比，研究

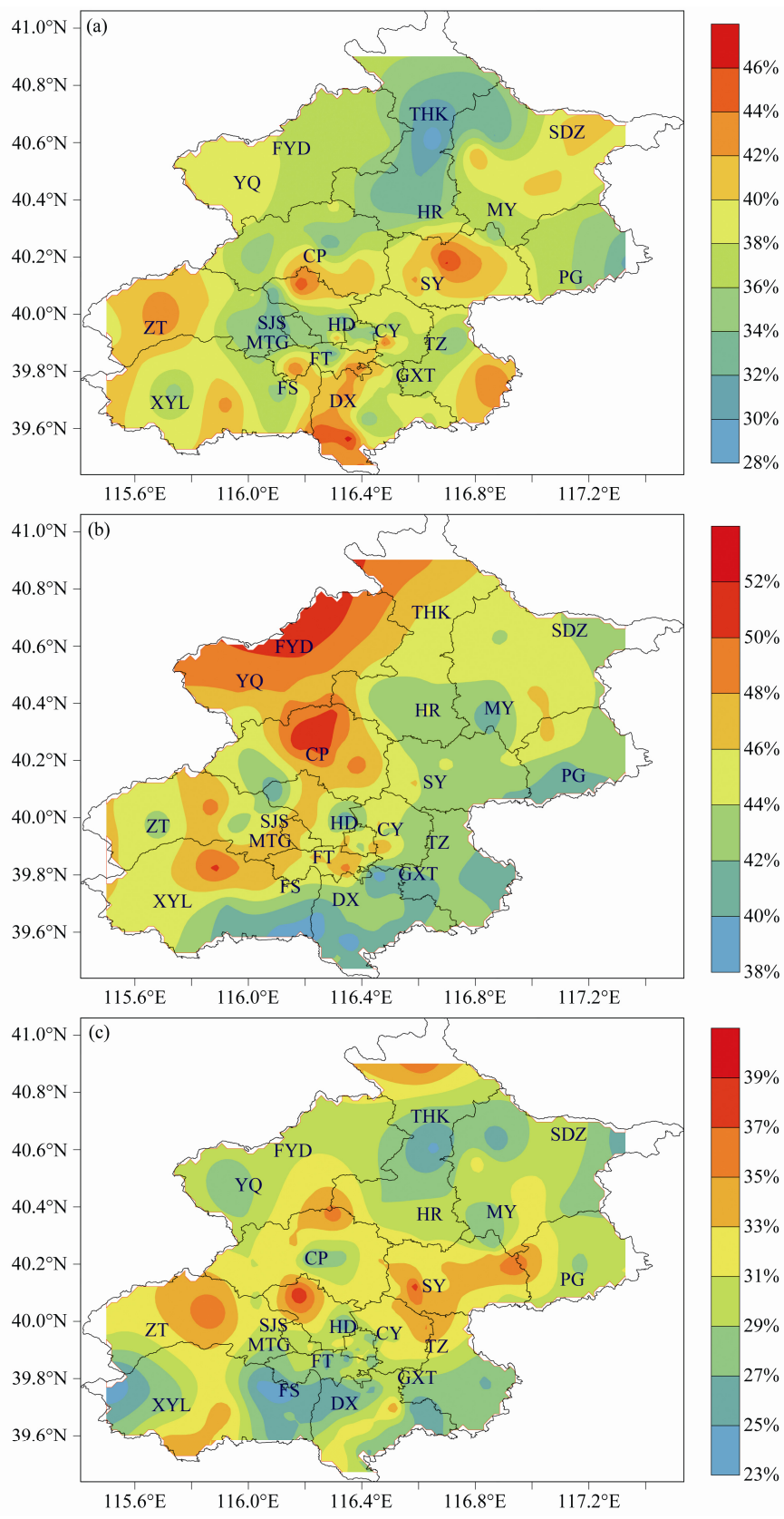


图 4 2007~2014 年北京地区平均各季短历时 (1~3 h) 降水对季节累积降水量贡献率的空间分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季
Fig. 4 The contribution of 1-3 h duration rainfall events to the accumulated seasonal precipitation over Beijing averaged during 2007-2014: (a) Spring, (b) summer, (c) autumn

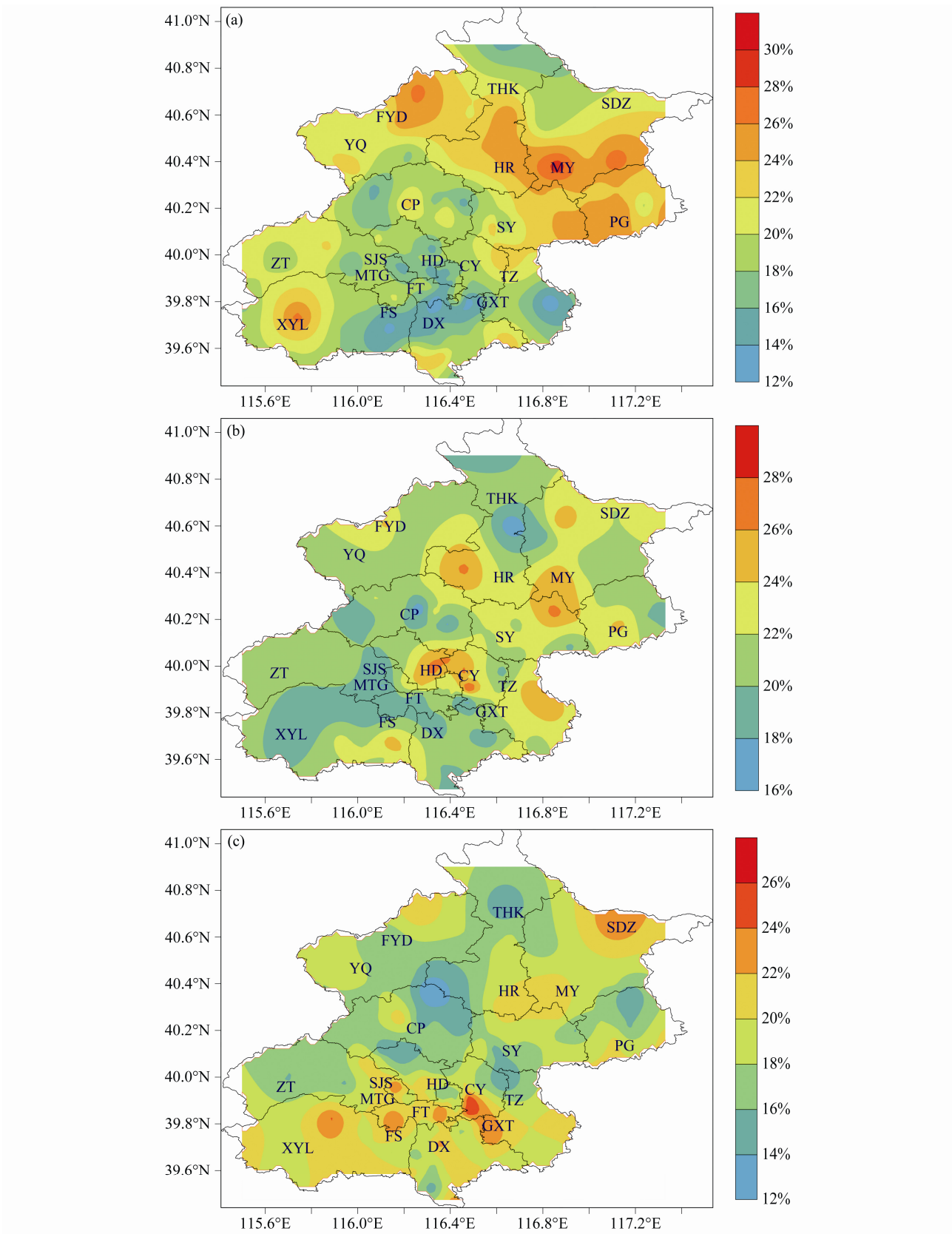


图 5 2007~2014 年北京地区平均各季 4~6 h 降水对季节累积降水量贡献率的空间分布：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季
Fig. 5 The contribution of 4~6 h duration rainfall events to the accumulated seasonal precipitation over Beijing averaged during 2007~2014: (a) Spring, (b) summer, (c) autumn

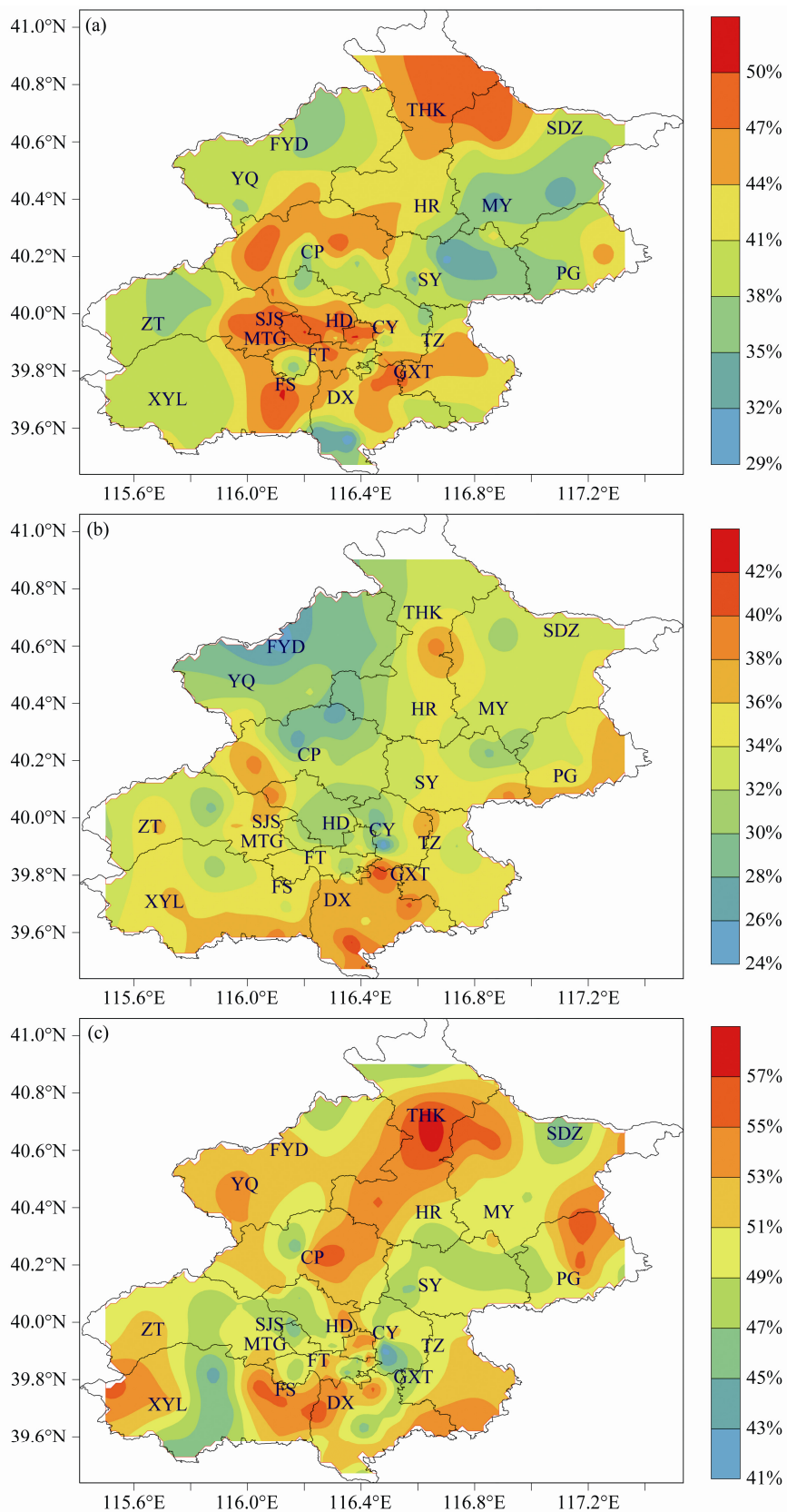


图 6 2007~2014 年北京地区平均各季 6 h 以上持续性降水对季节累积降水量贡献率的空间分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季
Fig. 6 The contribution of more than 6 h duration rainfall events to the accumulated seasonal precipitation over Beijing averaged during 2007–2014: (a) Spring, (b) summer, (c) autumn

时段内的长历时降水的贡献率明显增大。春季和夏季的长历时降水量的空间分布与中历时降水存在较好的反向对应关系。春季中历时降水量贡献率唯一的大值区域（东北部）在长历时降水中为显著的低值中心，而长历时降水量贡献率在春季最为明显的高值中心位于海淀区域及周边，这可能是由于海淀区位于山区和平原的交界处，春季常盛行东南风与东北风交替的复杂风场，加强了山前地形的抬升作用，为持续性强降水提供了充足的扰动源（吴庆梅等，2009；窦晶晶等，2014）；夏季长历时降水贡献率以城区的低值区域为中心向南北扩展为南高北低的格局，南部大兴区域的高值中心在中历时降水中为明显的偏低值区域；秋季全区的长历时降水量的贡献率均偏高，高值区域北起汤河口，南至房山，形成了从北向南的高值带。

对比长历时降水的空间分布（图 6），城区及周边区域出现贡献率的大值区域仅发生在春季，而夏季、秋季在城区长历时降水的贡献率均不高。通过对不同季节降水格局的分析能够看到，城市化对降水的影响尚不能一概而论。以秋季为例，不管何种类型的降水，在城区均没有看到明显大值区域，这可能说明秋季降水受城市热岛效应的影响相对较小。此外，北京地区夏季降水多以对流性短时强降水为主，从夏季短历时和中历时降水的空间分布也能够看到，上述两种雨型在城区及下风方向存在显著的大值区，受到城市热岛效应的影响较为明显，但北京夏季长历时强降水在城区贡献率偏低说明了城市热岛效应并非对夏季各种雨型都产生增强效应。

4.3 季节降水的日变化特征

图 7 表明 2007~2014 年北京全区不同季节降水年平均累积降水量的日变化特征，可以看到，不同季节降水量的日变化差异非常显著。从小时降水量的值域范围来看，夏季小时累计降水量最大，介于 8~24 mm 之间，春、秋两季累计降水量的数量级相当，春季小时累计降水量介于 1~4 mm 之间，秋季累积降水量日变化的振幅偏大，介于 2~7 mm 之间，但春、秋两季小时降水量的峰值未达到夏季降水量的日谷值，夏季降水量明显高于其他季节。从不同季节小时降水量日变化的特征看，日变化曲线差异较大。春、秋两季日变化类型相似，呈现双峰型变化特征，春季峰值出现时间分别为 12 时和 22 时，且峰值接近，分别为 3.6 mm 和 3.7 mm，春季降水量的谷值出现在 09 时，降水量仅为 1.8 mm；

秋季降水量峰值出现为 06 时，值为 6.9 mm，另外在 24 时存在一个次峰值点，为 6.1 mm，秋季降水量最少的时次为午后 14 时；与春、秋两季的日变化有所不同，夏季的降水量日变化呈现为单峰型变化，极值位置出现在晚间 23 时，降水量为 23.1 mm，午间 12 时为谷值点，降水量为 8.4 mm。

前人研究表明，华北平原地区日尺度降水以夜雨为主（原韦华等，2014）。结合图 1 北京全区的站点分布看，大多数站点隶属平原区域，从各季降水的日变化来看，北京全区各季降水基本都在夜间偏大。此外，中国季风区降水在季风环流和季风雨带径向移动的影响下，具有显著的季节内演变特征；有研究表明季风间断期降水的峰值易集中在午后，季风活跃期降水峰值会出现在清晨（宇如聪等，2014），北京各季降水日峰值的出现时间，或许与季风间断期和活跃期的相互作用有一定联系，也可能同城市热岛环流和山谷风环流共同影响有关。

图 8 给出了 2007~2014 年北京全区小时累计降水量日峰值出现时间的空间分布。各个季节降水

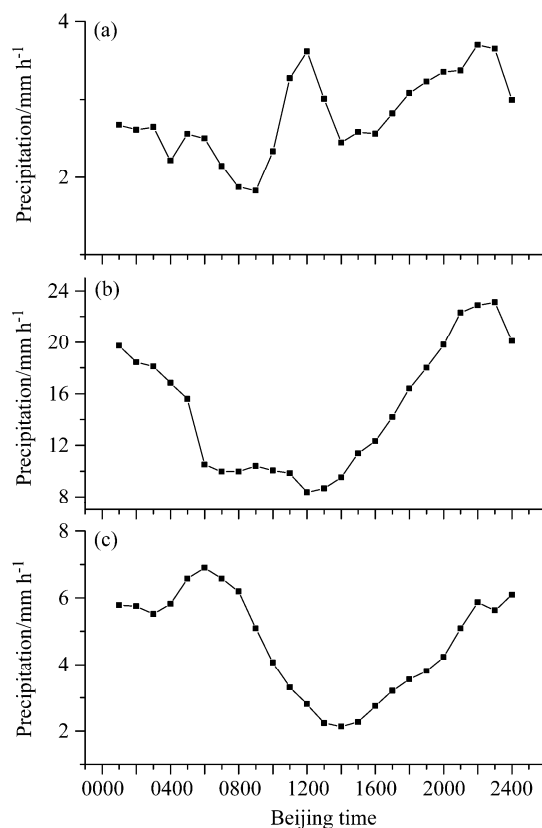


图 7 2007~2014 年北京全区不同季节平均的小时降水量的日变化特征：(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季

Fig. 7 Diurnal variations of mean hourly precipitation in (a) spring, (b) summer, (c) autumn over Beijing averaged during 2007–2014

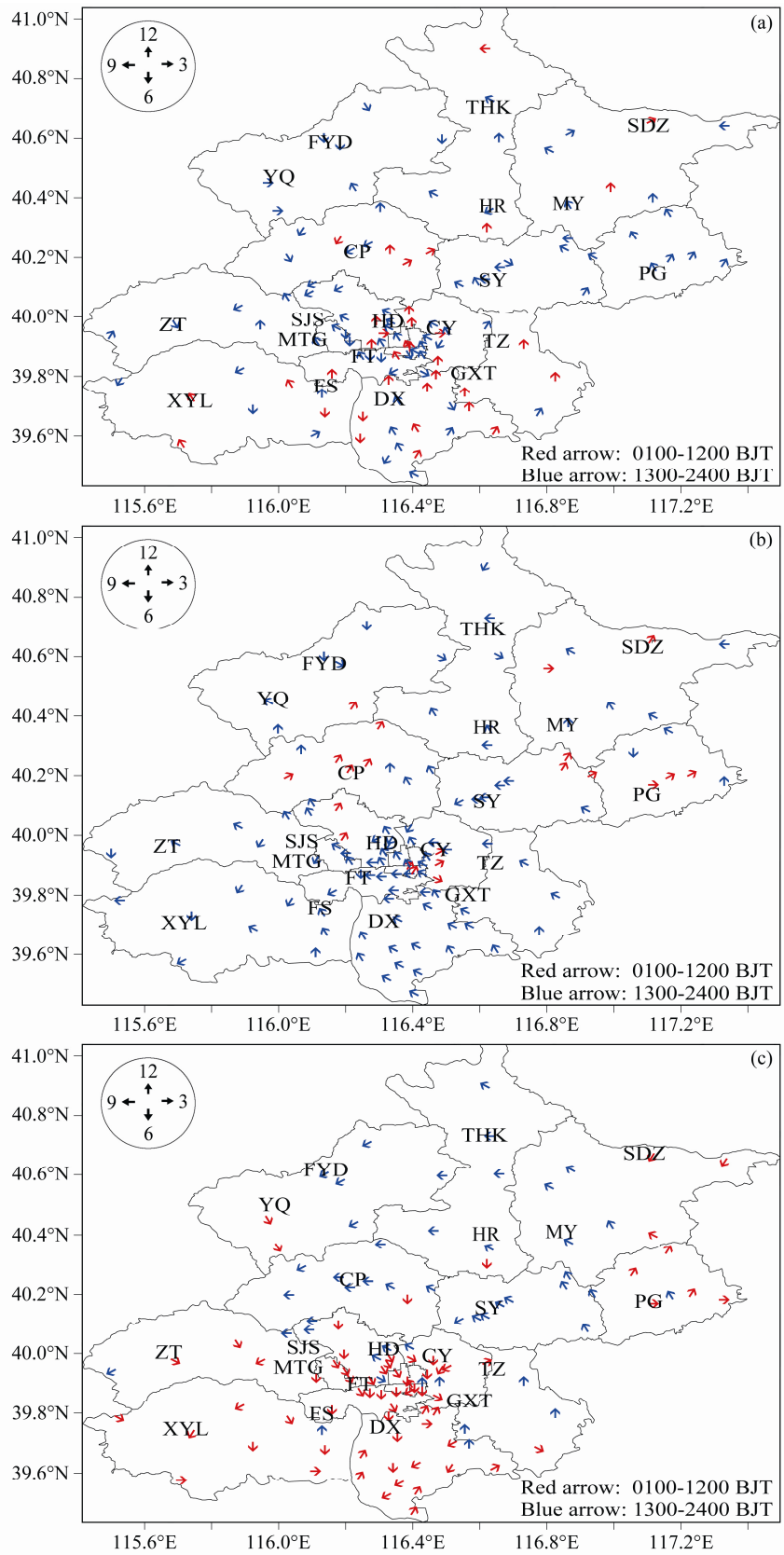


图 8 2007~2014 年北京全区 (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季平均的各个站点小时累计降水量日峰值的出现时刻。BJT 表示北京时间

Fig. 8 Occurrence time of daily maximum hourly precipitation in different seasons: (a) Spring, (b) summer, (c) autumn. BJT represents Beijing time

量极值出现时间的分布差异较大。春季峰值的出现时间可分为两类,一类是午夜前夕 22 时至 24 时,集中在北部及西部山区,二是在午间 12 时左右,以城区和通州为主,对比春季降水量的日变化特征,日变化的双峰曲线其峰值段也为午间和午夜,由此可见,日峰值出现时间的区域性差异特征是春季全区降水日变化呈现双峰结构的重要原因。夏季全区的一致性较强,以晚上 22 时至次日 02 时为主,与夏季全区日变化为单峰型结构较为一致。秋季降水极值分布具有明显的南北差异,主城区扩展到西南的大部分区域以凌晨 03 时至 07 时为主,主城区以北的大部地区以晚上 20 时至 24 时为主,这样的空间分布结构与秋季全区日变化变化呈现双峰型结构一致。

结合表 2 的结果,春秋两季长历时降水的贡献率最高,而夏季短历时降水占据重要地位。清晨、午后的降水的双峰值与降水的持续性密切相关,且华北地区最易在午夜至清晨发生持续性降水(Yu et al., 2009)。春秋季降水日峰值出现在午夜或清晨可能与这两个季节以持续性降水为主的特征密切相关。夏季的短时降水主要是由太阳辐射加热日变化导致的热力不稳定引起,从而使峰值时间呈现出较强的区域一致性,复杂地形导致的山谷风特征(Yu et al., 2009; 窦晶晶等, 2014),以及城区明显的城市热岛环流,也是造成北京夏季降水日峰值出现时间以午夜为主的重要因素。

5 结论

本文基于北京市加密自动站的降水观测资料,给出了北京地区降水的总体特征,并对比了不同季节下北京地区降水的空间差异、持续性特征和日变化特征,结论如下:

(1) 北京地区年平均降水量的空间分布特征显示,城区和东北部具有两个降水量明显高值中心;北京全年降水量的季节分布不均,日分布也不均。夏季降水最为集中,2007~2014 年的降水量为 356.5 mm,占该时段年降水总量的三分之二。春秋季降水量次之,但秋季降水量要明显高于春季,是春季的 1.7 倍,冬季年均降水总量极少。

(2) 不同季节降水量日变化的分析结果显示,春秋两季呈现双峰型变化,其主要原因是峰值出现时间在全区具有较为明显的区域性差异,夏季呈现单峰型变化,全区所有站点峰值出现时间也具有良

好的一致性。

(3) 城市化对北京地区降水的影响具有季节差异,夏季短历时和中历时降水在城区和东北部存在显著的大值区,受到城市热岛效应的影响可能较为明显,长历时降水在城区反而相对偏低而春季城区短、中历时降水并未偏多,长历时降水却在城区出现明显的高值中心。

开展北京地区降水的精细化特征研究,掌握降水的演变规律,对于改进区域数值模式和提高气象预测水平有较为重要的意义。但由于已有资料的限制,本文所用的资料仅局限于 2007~2014 年这 8 年,样本量不足所带来的分析结果的代表性问题有待后续资料的丰富做进一步考证和研究,同时,对于各个季节降水日变化和空间分布特征成因的研究也不够充分,仍有待进一步开展。

参考文献 (References)

- Chen H M, Yu R C, Li J, et al. 2010. Why nocturnal long-duration rainfall presents an eastward-delayed diurnal phase of rainfall down the Yangtze River valley [J]. *J. Climate*, 23 (4): 905–917, doi:10.1175/2009JCLI3187.1.
- 陈志昆, 张书余. 2010. 地形在降水天气系统中的作用研究回顾与展望 [J]. *干旱气象*, 28 (4): 460–466. Chen Zhikun, Zhang Shuyu. 2010. Review and outlook of landform influences on rainfall weather systems [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 28 (4): 460–466, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2010.04.015.
- Dai A G. 1999. Recent changes in the diurnal cycle of precipitation over the United States [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (3): 341–344, doi:10.1029/1998GL900318.
- 董芬, 王喜全, 王自发, 等. 2013. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象 [J]. *气候与环境研究*, 18 (1): 63–70. Dong Fen, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2013. A study of the north–south differences of the air quality in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (1): 63–70, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11035.
- 窦晶晶. 2014. 北京城区近地面气象要素精细化时空分布特征 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Dou Jingjing. Fine-scale characteristics of low-level meteorological elements in Beijing urban area [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 窦晶晶, 王迎春, 苗世光. 2014. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征 [J]. *应用气象学报*, 25 (5): 559–569. Dou Jingjing, Wang Yingchun, Miao Shiguang. 2014. Fine spatial and temporal characteristics of humidity and wind in Beijing urban area [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 25 (5): 559–569.
- 郝立生, 丁一汇, 闵锦忠, 等. 2011. 华北降水季节演变主要模态及影响因子 [J]. *大气科学*, 35 (2): 217–234. Hao Lisheng, Ding Yihui, Min Jinzhong, et al. 2011. Analysis on seasonally evolutive main modes of North China precipitation and their influence factors [J]. *Chinese Journal*

- of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 217–234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.02.03.
- Li J, Yu R C, Wang J J. 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (12): 1933–1936, doi:10.1007/s11434-008-0195-7.
- Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years [J]. J. Climate, 24 (21): 5683–5690, doi:10.1175/JCLI-D-11-00009.1.
- Li J P, Zeng Q. 2002. A unified monsoon index [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (8), 1274, doi:10.1029/2001GL013874.
- 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威. 2016. 夏季中国华北与印度降水之间的关联及其成因分析 [J]. 大气科学, 40 (1): 201–214. Lin Dawei, Bueh C, Xie Zuwei. 2016. Relationship between summer rainfall over North China and India and its genesis analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 201–214, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14339.
- 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 2009. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39 (1): 88–98. Liu Shuhua, Liu Zhenxin, Li Ju, et al. 2009. Numerical simulation for the coupling effect of local atmospheric circulations over the area of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52 (3): 382–392, doi:10.1007/s11430-009-0030-2.
- 陆日宇. 1999. 华北夏季不同月份降水的年代际变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 509–519. Lu Riyu. 1999. Interdecadal variations of precipitations in various months of summer in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 509–519, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.005.
- 陆日宇. 2001. 与华北地区春季降水量异常关联的大气环流异常 [J]. 气候与环境研究, 6 (4): 400–408. Lu Riyu. 2001. Atmospheric circulation anomaly associated with the spring rainfall anomaly in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (4): 400–408, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2001.04.04.
- 陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. 大气科学, 26 (5): 611–624. Lu Riyu. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 611–624, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03.
- 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]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50 (4): 806–825, doi:10.1175/2010JAMC2513.1.
- Ren G Y, Chu Z Y, Chen Z H, et al. 2007. Implications of temporal change in urban heat island intensity observed at Beijing and Wuhan stations [J]. Geophys. Res. Lett. 34 (5): L05711, doi:10.1029/2006GL027927.
- Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. Science, 287 (5459): 1793–1796, doi:10.1126/science.287.5459.1793.
- Sorooshian S, Gao X, Hsu K, et al. 2002. Diurnal variability of tropical rainfall retrieved from combined GOES and TRMM satellite information [J]. J. Climate, 15 (9): 983–1001, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0983:DVOTRR>2.0.CO;2.
- 孙继松. 2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响 [J]. 高原气象, 24 (1): 62–69. Sun Jisong. 2005. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (1): 62–69.
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨 [J]. 大气科学, 32 (6): 1352–1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1352–1364, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.10.
- 王秀荣, 王维国, 刘还珠, 等. 2008. 北京降水特征与西太副高关系的若干统计 [J]. 高原气象, 27 (4): 822–829. Wang Xiurong, Wang Weiguo, Liu Huanzhu, et al. 2008. Beijing region precipitation feature and some statistics of relationship between it and SHWP [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 822–829.
- 魏东, 杨波, 孙继松. 2009. 北京地区深秋季节一次对流性暴雨天气中尺度分析 [J]. 暴雨灾害, 28 (4): 289–294. Wei Dong, Yang Bo, Sun Jisong. 2009. Meso-scale analysis of heavy rainfall event occurred in the late autumn 2007 in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 28 (4): 289–294, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2009.04.001.
- 吴庆梅, 郭虎, 杨波, 等. 2009. 地形和城市热力环流对北京地区一次 β 中尺度暴雨的影响 [J]. 气象, 35 (12): 58–64. Wu Qingmei, Guo Hu, Yang Bo, et al. 2009. Effects of topography and urban heat circulation on a meso- β torrential rain in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 2009, 35 (12): 58–64.
- 肖现, 陈明轩, 高峰, 等. 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制 [J]. 大气科学, 39 (1): 100–124. Xiao Xian, Chen Mingxuan, Gao Feng, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 100–124, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13318.
- 徐宗学, 张玲, 阮本清. 2006. 北京地区降水量时空分布规律分析 [J]. 干旱区地理, 29 (2): 186–192. Xu Zongxue, Zhang Ling, Ruan Benqing. 2006. Analysis on the spatiotemporal distribution of precipitation in the Beijing region [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 29 (2): 186–192, doi:10.3321/j.issn:1000-6060.2006.02.004.
- 杨萍, 刘伟东. 2013. 北京地区加密自动气象站数据的质量分析 [J]. 气象科技进展, 3 (6): 27–34. Yang Ping, Liu Weidong. 2013. Evaluating the quality of meteorological data measured at automatic weather stations in Beijing during 1998–2010 [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 3 (6): 27–34, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.06.004.
- Yang P, Ren G Y, Liu W D. 2013a. Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52 (8): 1803–1816, doi:10.1175/JAMC-D-12-0125.1.
- Yang P, Ren G Y, Hou Wei, et al. 2013b. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing municipality based on a high-density AWS dataset [J]. International Journal of Climatology, 33 (13): 2769–2780, doi:10.1002/joc.3622.
- 殷水清, 高歌, 李维京, 等. 2012. 1961–2004 年海河流域夏季逐时降水变化趋势 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (2): 246–266. Yin Shuiqing, Gao Ge, Li Weijing, et al. 2011. Long-term precipitation change by hourly data in Haihe River basin during 1961–2004 [J]. Science China:

- Earth Sciences, 54 (10): 1576, doi:10.1007/s11430-011-4232-z.
- 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 2014. 中国大陆降水日变化研究进展 [J]. 气象学报, 72 (5): 948–968. Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. 2014. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72 (5): 948–968, doi:10.11676/qxxb2014.047.
- 于淑秋. 2007. 北京地区降水年际变化及其城市效应的研究 [J]. 自然科学进展, 17 (5): 632–638. Yu Shuqiu. 2007. The inter-annual variation and urban heat island in Beijing [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 17 (5): 632–638, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2007.05.011.
- Yu R C, Li J, Chen H M. 2009. Diurnal variation of surface wind over central eastern China [J]. Climate Dyn., 33 (7–8): 1089, doi:10.1007/s00382-008-0478-3.
- Yuan W H, Yu R C, Chen H M, et al. 2010. Subseasonal characteristics of diurnal variation in summer monsoon rainfall over central eastern China [J]. J. Climate, 23 (24): 6684–6695, doi:10.1175/2010JCLI3805.1.
- 原韦华, 宇如聪, 傅云飞. 2014. 中国东部夏季持续性降水日变化在淮河南北的差异分析 [J]. 地球物理学报, 57 (3): 752–759. Yuan W H, Yu R C, Fu Y F. 2014. Study of different diurnal variations of summer long-duration rainfall between the southern and northern parts of the Huaihe River [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 57 (3): 752–759, doi:10.6038/cjg20140306.
- Zhang Chaolin, Chen Fei, Miao Shiguang, et al. 2009. Impacts of urban expansion and future green planting on summer precipitation in the Beijing metropolitan area [J]. J. Geophys. Res., 114 (D2): D02116, doi:10.1029/2008JD010328.
- 张立杰, 胡天洁, 胡非, 等. 2009. 近 30 年北京夏季降水演变的城郊对比 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 63–68. Zhang Lijie, Hu Tianjie, Hu Fei, et al. 2009. Comparison of summer precipitation evolution over the last 30 years between urban and rural region of Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 63–68, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.07.
- 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 2014. 北京地区降水空间分布及城市效应分析 [J]. 高原气象, 33 (2): 522–529. Zheng Zuofang, Gao Hua, Wang Zaiwen, et al. 2014. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (2): 522–529, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00193.
- Zhong S, Yang X Q. 2015. Ensemble simulations of the urban effect on a summer rainfall event in the great Beijing metropolitan area [J]. Atmospheric Research, 153: 318–334, doi:10.1016/j.atmosres.2014.09.005.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盛兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. 大气科学, 32 (2): 345–357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July–August [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 345–357, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.13.
- 周玉淑, 刘璐, 朱科锋, 等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析 [J]. 大气科学, 38 (5): 885–896. Zhou Yushu, Liu Lu, Zhu Kefeng, et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 885–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13185.