

刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 2014. 北京地区自动站降水特征的聚类分析. 气象, 40(7): 844-851.

北京地区自动站降水特征的聚类分析^{* 1}

刘伟东¹ 尤焕苓² 任国玉³ 杨 萍⁴ 张本志¹

- 1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089
- 2 北京市气象服务中心, 北京 100089
- 3 国家气候中心, 北京 100081
- 4 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 利用 2007—2010 年北京 123 个自动气象站逐时降水观测资料, 采用聚类分析方法, 对北京的主城区、西部和北部区、东北区、东南区共分为 4 个区域的逐时降水时空分布特征进行了分析。结果表明: 通过与实际地形和下垫面类型比较, 自动站分类较为合理, 避免了在区域划分方面的主观因素影响。主城区降水集中时段最为突出, 集中出现在 7 月逐日 20—00 时, 且降水强度最强, 降水量较大, 降水小时数不多。西部和北部区降水集中出现在 6 月逐日 18—20 时、7 月逐日 23 时至次日 03 时, 降水小时数最多, 降水强度不大, 降水量不大。东北区降水主要集中出现在 7 月逐日 00—08 时和 17—23 时, 降水小时数较多, 降水强度不大, 降水量最大; 东南区降水主要集中出现在 7 月的逐日 02—04 时, 降水小时数少, 降水强度较大, 降水量较大。

关键词: 自动站, 降水特征, 自动站分类, 聚类分析, 城市雨岛效应

中图分类号: P463, P468 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 07. 008

AWS Precipitation Characteristics Based on K-Means Clustering Method in Beijing Area

LIU Weidong¹ YOU Huanling² REN Guoyu³ YANG Ping⁴ ZHANG Benzhi⁵

- 1 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089
- 2 Beijing Meteorological Service Centre, Beijing 100089
- 3 Laboratory for Climate Studies, CMA, National Climate Centre, Beijing 100081
- 4 CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: By using K-means clustering method, hourly precipitation data from 123 automatic weather stations (AWS) in Beijing Area during the period of 2007—2010, the precipitation distribution characteristics of the four areas including North and West area, Northeast area stations, Urban area stations and South-east area stations are analyzed. Compared with the actual topography and underlying surface types, the classification of automatic stations is more reasonable and can avoid the influence of subjective factors in the regional classification. In Urban areas the precipitation concentration period is the most prominent, mainly in 20:00—00:00 BT daily July with strongest intensity, greater amount and in fewer hours. In the North and West area precipitation mainly appears in 18:00—20:00 BT daily June and 23:00—03:00 BT the next day daily July, with weaker intensity, and less amount and in more hours. In the Northeast area precipitation mainly appears in 00:00—08:00 BT and 17:00—23:00 BT daily July, with the weakest rainfall intensity and the maximum precipitation amount and in more precipitation hours. In the Southeast area precipitation mainly appears in 02:00—04:00 BT daily July, with stronger intensity and greater amount,

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090202)和国家自然科学基金项目(40975066 和 41375069)共同资助
2013 年 5 月 15 日收稿; 2013 年 9 月 16 日收修定稿
第一作者: 刘伟东, 研究方向为城市气候、城市遥感等. Email: wdliu@ium. cn

and in fewer hours.

Key words: automatic weather station (AWS), precipitation characteristics AWS classification, clustering analysis, urban rain island effect

引 言

高时空分辨率的气象信息对于揭示城市气候规律具有重要作用。早在 20 世纪 70 年代,美国 METROMEX 试验(大城市气象观测试验计划)利用高时空分辨率的降水观测数据研究大城市对中尺度对流天气的影响(Changnon et al, 1971; 1978; 1986)。该试验研究发现,大城市下垫面影响对流天气出现的次数,影响城区及城市下风方向的降水量分布,并认为这主要是城市热岛和粗糙度的影响。Huff 等(1973)研究了美国 9 个城市的降水情况,发现其中有 7 个城市由于城市导致降水有明显增加,这些地区增加的降水主要位于城区和城市中心下风方向 80 km 范围。Bornstein 等(2000)在研究美国亚特兰大城市的降水时发现,1996 年 7、8 月的 9 天时间里,有 3 次降水过程是由城市热岛效应导致,降水区主要位于城区下风方向,且降水发生前有很明显的城市热岛现象,地面有弱辐合现象,这是由于城市热岛产生的温度梯度所致。另外,Shepherd 等(2002)研究发现,美国亚特兰大城市在 1998—2000 年的夏季,城区下风方向的降水比上风方向明显增加了 19.5%。

在我国,黎伟标等(2009)研究珠江三角洲城市群对降水的影响时发现,珠江三角洲城市化使城市群所处区域的降水频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。吴息等(2000)对北京城区和郊区的部分自动气象站的小时降水量资料进行了分析,发现中到大雨时城市效应对下风区的短历时降雨量增加影响最明显,而在市中心,短历时暴雨的发生概率和强度增加最显著。梁灵君等(2011)利用北京不同城区代表性较好的 1956—2007 年不同历时降水资料,发现受城市化的影响,城区降水具有强度大、历时短的特点,且局部短历时暴雨呈增强的趋势;城市化对特短历时降水影响较为显著,同一频率的特短历时降水,老城区明显大于城近郊区。李建等(2008)分析了北京地区夏季降水日变化特征,发现降水量与

降水频次表现出明显的一致性,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。孙继松等(2006; 2007; 2008)分析了北京地形、城市热岛效应和城市环流等对北京地区降水的影响,发现地形与城市热力过程相互作用造成的中尺度暴雨多发于傍晚前后或凌晨前后,影响北京地区降水的因素非常复杂。近两年,马京津等(2012)利用北京观象台 1841—2008 年年降水量资料及近 50 年北京市 20 个气象站和 82 个雨量站资料分析了北京地区降水量的时间和空间变化规律。湛芸等(2012)、孙军等(2012)、俞小鼎(2012)和方翀等(2012)针对北京地区 2012 年 7 月 21 日的特大暴雨从观测和极端性降水成因方面进行了探讨并对其特征和成因进行了分析。

由于观测资料所限,先前针对北京的研究多采用常规的降水观测资料分析城市区域的降水特征,对于城区和近郊区气象要素的细微差异,以及城市内部气象要素的日变化特征等,还缺乏系统分析。目前,北京地区已基本建成了在中心城区平均间距 3~5 km、郊区平均间距为 8~10 km、山区平均间距为 15~20 km 的自动气象站观测网,显著提高了气象监测的时空精度。Yang 等(2013)应用自动站资料分析了北京地区夏季小时降水气候特征,发现除东南部地区,各区最高小时降水频率和降水量均发生在北京时 19—23 时之间,东南部地区则发生在 03—05 时之间,平原地区城区小时降水量和降水强度比郊区大,这是应用自动站资料对北京地区降水所做的初步研究。

本文采用 K 均值聚类分析方法对北京 123 个自动气象站逐时降水进行分区,在此基础上进一步分析北京不同区域的降水精细特征。研究结果对于了解北京地区降水的变化规律以及降水的预报、预测等具有参考意义。

1 资料与方法

北京市地处中纬地带,具有明显的暖温带半湿润大陆性季风气候特点,全区地形由西北山地和东南平原两大地貌单元组成,地势西北高,东南低,北

京城区位于东南平原上。杨萍等(2011)对北京地区自动气象站数据质量状况做了系统的评估和分析,插补和构建了 187 个站点 2007—2010 年自动站逐时降水数据集。本文采用了其中记录连续性较好的 123 个自动站逐时降水数据,对 4—10 月夏半年降水进行分析。文中降水量为 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水量,降水小时数为有降水的小时数,降水强度为降水量与降水小时数的比值。根据每小时的降水量,将降水(P)分为 4 级,分别为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq P < 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq P < 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1} \leq P < 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, $P \geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

聚类分析通过把一个没有类别标记的样本集按某种相似性划分为若干类,将相似的样本尽可能地归为一类,不相似的样本尽量划分到不同的类中,类内样本距离尽量小,而不同类之间的距离尽可能大。该方法已广泛应用于气候区划、模式识别、数据分析和图像处理等方面。如秦爱民等(2005)采用分层聚类和相似分析方法,将中国按季平均气温分为春季的 24 区、夏季 28 区、秋季 26 区以及冬季的 28 区;刘吉峰等(2006)用聚类统计检验分析和旋转主分量分析确定中心站的方法将中国极端高温和极端低温年际变化分别划分为 12 和 11 个区域。本文采用 K 均值快速聚类方法对北京 123 个自动气象站 2007—2010 年夏半年逐小时降水量进行分区,并在分析不同时间尺度降水特征时均采用该分区标准。

K 均值聚类分析方法是聚类分析中常用的一种算法,其工作过程说明如下:首先从 n 个数据对象任意选择 k 个对象作为初始聚类中心,而对于所剩下的其他对象,则根据它们与这些聚类中心的相似度(距离),分别分配给与其最相似的(聚类中心所代表的)聚类。然后,再计算每个所获新聚类的聚类中心(该聚类中所有对象的均值),不断重复这一过程直到标准测度函数开始收敛为止。迭代使得选取的参照点越来越接近真实的分类质心,聚类效果越来越好。一般都采用均方差作为标准测度函数,具体定义如下:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i| \quad (1)$$

式中, E 为数据库中所有对象的均方差之和, p 为代表对象的空間中的一个点, m_i 为聚类 C_i 的均值(p 和 m_i 均是多维的)。式(1)所示的聚类标准,旨在使所获得的 k 个聚类具有各聚类本身尽可能的紧凑,而各聚类之间尽可能的分开的特点。

2 自动站逐时降水特征的聚类分析结果

2.1 北京降水分区

应用 K 均值聚类方法将北京地区 123 个站点分为 4 类(图 1)。经过与自动站所处实际地形和下垫面类型比较,发现 K 均值聚类方法能够清晰地将自动站进行分类,不仅区分出西部和北部区与山前平原之间的降水差异,而且可以识别平原地区城市化强烈发展地区、城区东北部夏季盛行风下风方向和城区东南部郊区的降水差异,分区结果较为合理。在各分区中,西部和北部区有 32 个站,东北区有 17 个站,主城区有 40 个站,东南区有 19 个站。通过对 4 种分区分析可以看出,在北京夏季降水多受偏南暖湿气流的主导风向控制下,主城区站基本代表了城区站点,西部和北部区站、东南区站分别为主城区的两侧站点,东北区站代表了主城区的下风方地区站点。分区为进一步分析降水精细特征及其城市的可能影响奠定了基础。

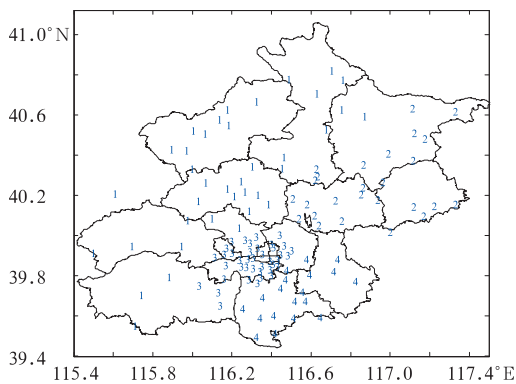


图 1 采用 K 均值聚类分析方法对 2007—2010 年 4—10 月北京自动站逐时降水分区

(1: 西部和北部区站, 2: 东北区站,
3: 主城区站, 4: 东南区站)

Fig. 1 AWS precipitation zones in Beijing Area by using K-means clusters methods from April to October during 2007—2010

(1: North and west area stations, 2: Northeast area stations, 3: Urban area stations, 4: Southeast area stations)

2.2 北京分区降水特征

从不同分区降水月份和日内分布看(图 2),各

分区的降水主要分布在 5—9 月,一般以 7 月最为显著,00—05 和 15—23 时降水较为集中。具体表现为:西部和北部区降水量多集中于 6 月 18—20 时、7 月 23 时至次日 03 时、8 月 08 和 14 时、9 月 03—05 时,降水中心点较为分散,降水量不大;东北区降水主要集中在 7 月 00—08 和 17—23 时、6 月 20 时、8 月 13—20 时、9 月 05 时,降水量大,分布集中;主城区在 7 月 20—24 时降水量最大,分布最集中,该时段降水量明显比其他分区大,呈现出明显的“城市雨岛”中心,7 月 00—04 和 16—18 时有弱的降水中心,6 月降水主要出现在中午和 20 时前后,9 月降水弱,在 05 时有弱中心;东南区 7 月降水集中在 00—05、17—19 和 20—00 时,8 月更明显地集中在 20—00 时,9 月降水弱、分布不集中。通过比较可知,降水最强中心出现在主城区 7 月的 20—00 时,降水量集中,降水强度大,其次是东北区 7 月的 17—20 时、

东南区 7 月的 02—04 时。东北区作为城市的下风方,总体而言,其降水量比主城区小,但比主城区主导风向两侧区域大。

降水小时数是衡量降水特征的重要指标。从北京分区各月逐时平均降水小时数分布(图 3)看,4 个分区降水小时数分布大致相同,均在 7—9 月的 00—10 时,5—8 月 15 时至 00 时较多,在 4—5 和 10 月降水小时数集中性不明显。西部和北部区降水小时数最多,6 和 9 月最集中,6 月主要集中在 16—23 时,9 月主要集中在 02 时至次日 10 时,东北区 6 月降水小时数明显较少,9 月 05—07 时相对较多,主城区、东南区相对更少。结合雨量分布可知,降水量的分布和降水小时的分布并不完全一致,如西部和北部区降水小时数多但降水量小,7—8 月降水小时数相对 6 和 9 月集中性差,这与北京地区 7—8 月降水量大,但多短时强降水的特点相一致。

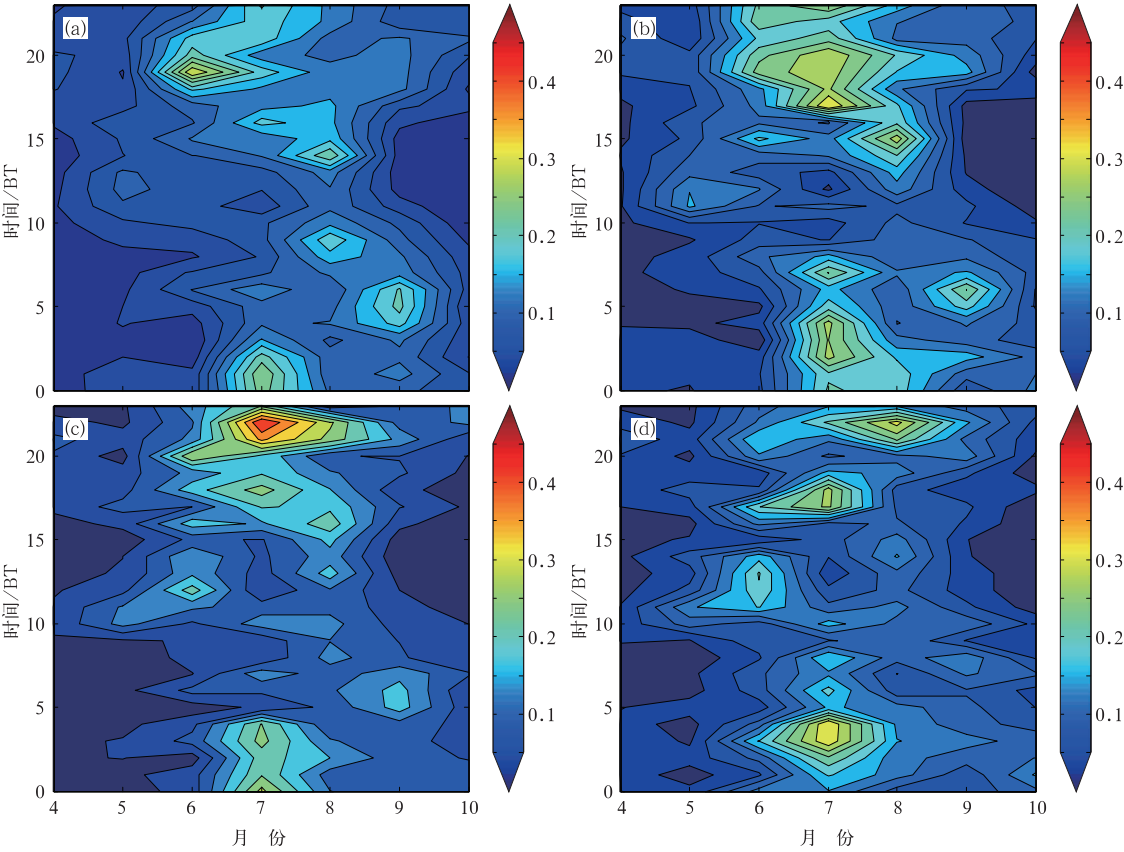


图 2 2007—2010 年北京分区 4—10 月逐时平均降水量(单位: mm)
(a) 西部和北部区站, (b) 东北区站, (c) 主城区站, (d) 东南区站
Fig. 2 Contour of averaged hourly precipitation in Beijing precipitation zones from April to October during 2007—2010 (unit: mm)
(a) North and west area stations, (b) Northeast area stations, (c) Urban area stations, (d) Southeast area stations

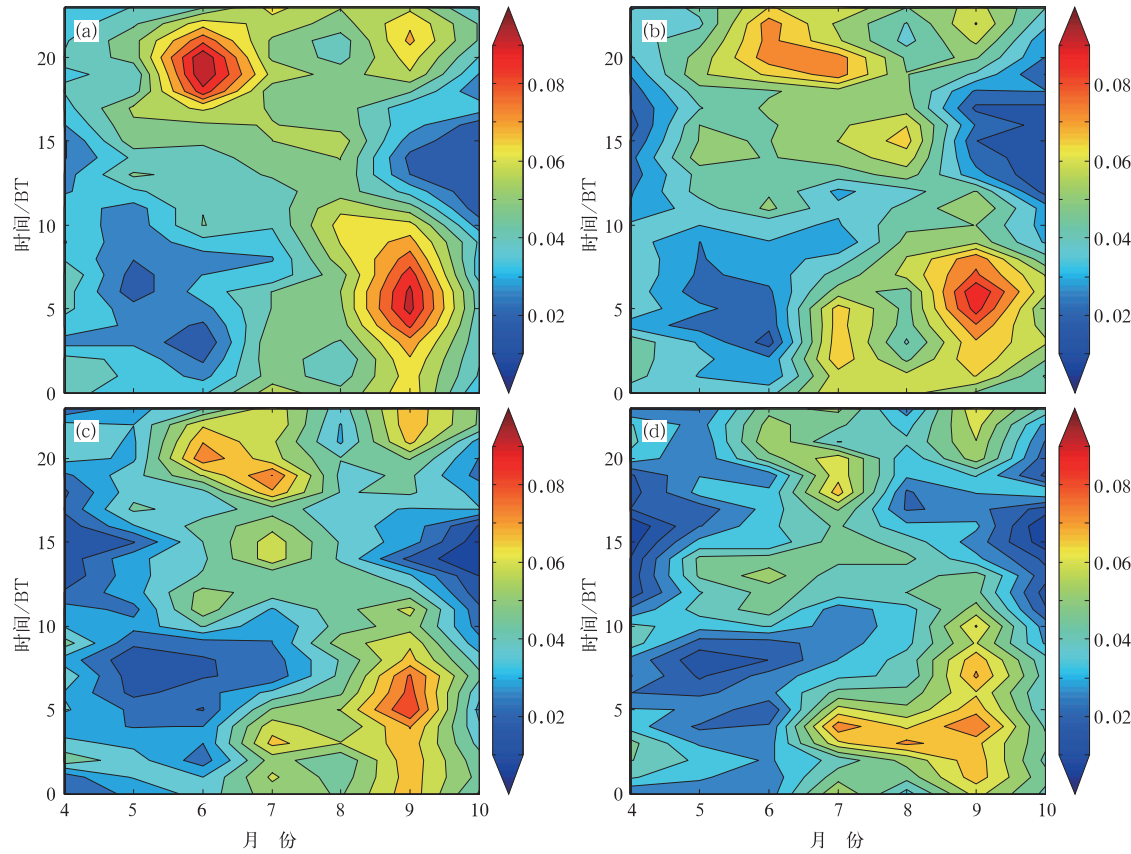


图 3 2007—2010 年 4—10 月北京分区各月逐时平均降水小时数(单位: h)
(a)西部和北部区站, (b)东北区站, (c)主城区站, (d)东南区站
Fig. 3 Contour of averaged precipitation hours in Beijing precipitation zones from April to October during 2007—2010 (unit: h)
(a) North and west area stations, (b) Northeast area stations,
(c) Urban area stations, (d) Southeast area stations

降水强度是指单位时间内的降水量,本文采用小时平均降水强度。从 4—10 月北京分区各月逐时平均降水强度分布(图 4)看,4 个区降水强度分布大体一致,降水主要集中在 6—9 月期间较强,其中 6—7 月,多 00—10 时的较强降水时段,在 7—9 月,20—23 时降水较强,午后也存在着较为明显的强降水时段。降水强度最集中的是主城区 7 和 8 月的 20—23 时,其次是东南区的 6、7 月的 02—04 时和 8 月的 20—23 时。从主城区与其他区降水分布比较看,主城区强降水集中性最强,突出表现在 7—8 月 20—23 时,6—8 月的午后至傍晚降水量大、降雨强度强,而降雨小时数却不多,说明城市化带来的“城市雨岛效应”主要体现在 7 月的夜间,而且主要是通过降雨强度的增大来实现的。这与 Yang 等(2013)的研究结果基本一致,即北京在平原地区城区小时降水量和降水强度比郊区大。

图 5 所示 4 个区 7 月的降水量均为该区的最高值,8 月降水量为次高值,6 和 9 月降水量相当,体现出北京汛期降水量分布的特征。在 7—8 月,东北区的降水量在 4 个区中为最高,主城区降水量次之,表现出北京地区主城区下风方的东北区降水量最大,具有较为明显的“城市雨岛效应”,这主要是因为夏季北京地区多处于北支低槽区域和副热带高压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,另外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于暴雨起增幅作用所引起的。9 月东北区的降水比西部和北部区略低,为次高值。西部和北部区总体降水最少,6、7 月雨量最少,却在 9 月降水量最大,这可能与 9 月系统性连续性降水多而强对流引起的强降水减少有关。4 个分区降水量在 7 月差异最大,随着降水量下降差异减小,4 和 10 月区域差异最小,说明北京地区

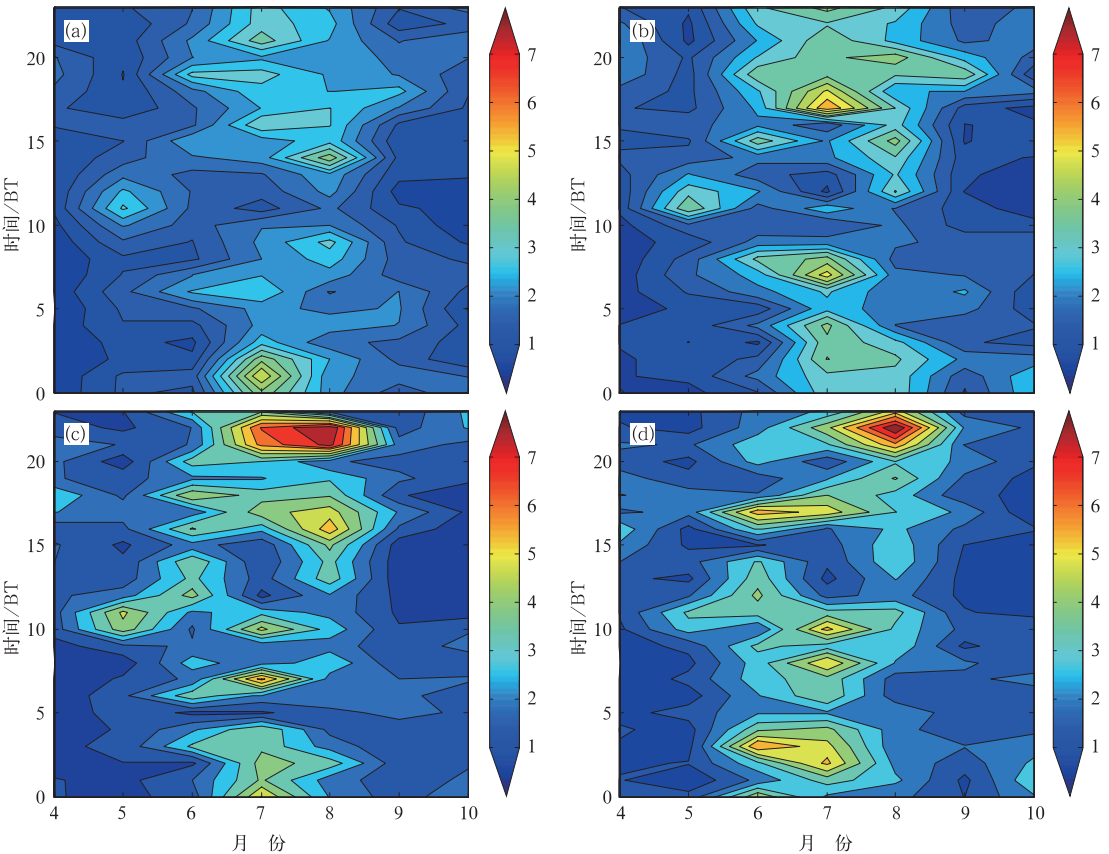


图 4 2007—2010 年 4—10 月北京分区各月逐时平均降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

(a)西部和北部区站, (b)东北区站, (c)主城区站, (d)东南区站

Fig. 4 Contour of averaged precipitation intensities in Beijing precipitation

zones from April to October during 2007—2010 (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

(a) North and west area stations, (b) Northeast area stations,

(c) Urban area stations, (d) Southeast area stations

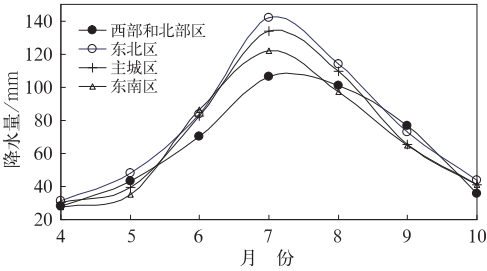


图 5 2007—2010 年 4—10 月北京分区降水量年平均分布

Fig. 5 Monthly precipitation variations with time in Beijing precipitation zones from April to October during 2007—2010

降水的地域性随着降雨量的增大而增强,尤其夏季 6—8 月,局地性降水特征更为明显。

图 6 所示 4 个分区总体上西部和北部区降水小时数最多,其次是东北区,主城区和东南区较少。在 4—10 月中西部和北部区 9 月降水小时数最多,结

合前面西部和北部区 9 月雨量最大分析结果可知,西部和北部区 9 月降水小时数和雨量最大相对应,其原因为进入 9 月后北京西部和北部山区受北方频发的冷空气影响,与来自北京东南的暖湿空气受燕山、太行山的抬升,在山前迎风坡形成多雨区,而背风坡则形成少雨区,形成系统性降水过程增多造成降雨频次多。结合雨量分布还可看出,主城区降水量大但降水小时数较少,说明城区降水多短时高强度降水。

图 7 所示北京 4 个分区均以 7 月小时降水强度最大,西部和北部区总体小时降雨强度最小。6 月降水强度的区域差异性最大,表现为东南区降水强度最大,主城区、东北区和西部和北部区依次减小。主城区 7 和 8 月降水强度最大,此时也是北京主城区降水较多的时期,结合降水小时数分析,主城区 7 和 8 月短历时的强降水影响很可能比其他区更为明显。

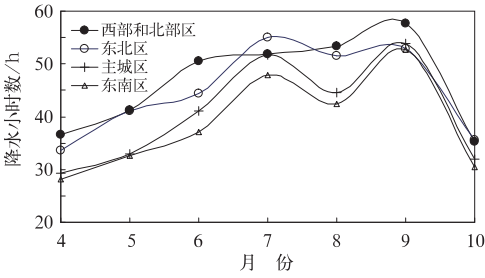


图 6 2007—2010 年 4—10 月北京
分区降水小时数年平均分布

Fig. 6 Monthly precipitation hours variations
with time in Beijing precipitation zones from
April to October during 2007–2010

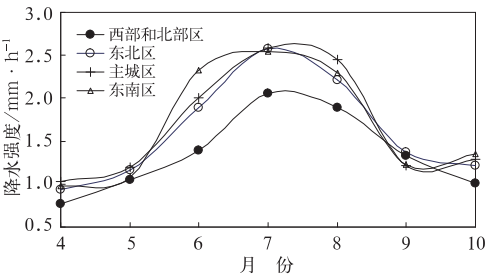


图 7 2007—2010 年 4—10 月北京
分区降水强度年平均分布

Fig. 7 Monthly precipitation intensity variations
with time in Beijing precipitation zones from
April to October during 2007–2010

从 2007—2010 年 4—10 月北京分区逐时降水量分布(图 8a)看,总体上 4 个分区均在 05—16 时降水量最少,17—23 时降水量最大,00—03 时次之。在降水的高值区,各分区间差异较大;而在降水的低值区,不同分区的差异较小。24 h 平均降水量由高到低顺序为:东北区 2.5 mm,主城区 2.3 mm,东南区 2.2 mm,西部和北部区 2.15 mm。在西部和北部区 18—22 时降水最多,11—13 时降水最少;东北区 19—23 时降水最多,08—14 时最少;主城区 17—22 时最多,尤其是 21—22 时降水为 4 个分区最高值,05—15 时降水量一般较低;东南区 02—04 和 21—22 时为降水峰值时段,12—16 时降雨量较少。总体来看,降水最高值出现在主城区的 21—22 时,这可能与北京城市化导致的热岛环流有一定关系。从 2007—2010 年 4—10 月的分区逐时降水小时数分布图(图 8b)看,总体上 4 个分区均在 11—15 时降水小时数最少,降水出现概率低,20—24 和 00—05 时降水小时数较长。西部和北部区、东北区降水

小时数明显高于主城区、东南区,西部和北部区降水小时数最多;05—12 时西部和北部区与东北区降水小时数变化相近,主城区和东南区变化相近,15—24 时 4 个分区降水小时数差别最大。2007—2010 年 4—10 月北京分区逐时降水强度分布(图 8c)表明,总体上 4 个分区均在 16—23 时降水强度较高,主城区、东南区降水强度最大,其次是东北区,西部和北部区最小,主城区 16—22 时在 4 个区中降水强度最大,这和前面分析的 17—22 时降水量最大相对应,说明降水强度大是主城区降水量大的主要因素。

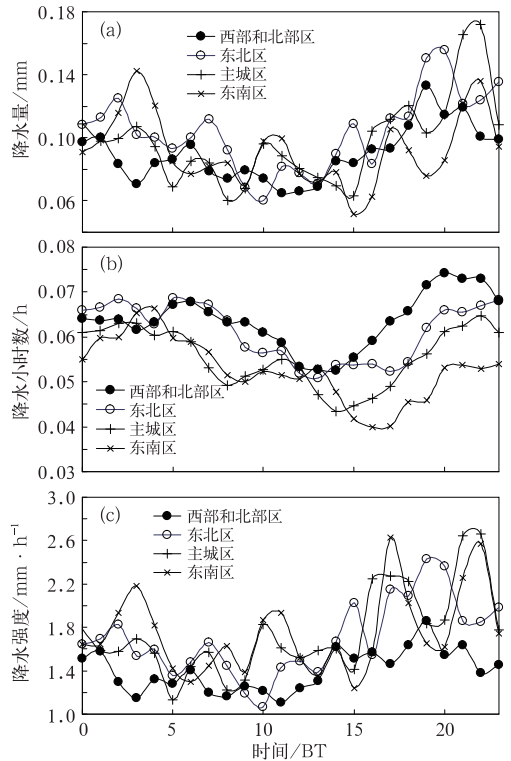


图 8 2007—2010 年 4—10 月北京
分区不同时间降水量(a)、降水
小时数(b)和降水强度(c)的变化

Fig. 8 Precipitation amount (a), precipitation
hours (b) and precipitation intensities (c) variation
with time in Beijing precipitation zones from
April to October during 2007–2010

3 结论与讨论

本文利用 123 个经质量控制的自动气象站 2007—2010 年逐时观测资料,对北京地区降水的精细时空分布特征进行了分析,得到如下结论:

(1) 利用 K 均值聚类方法,将北京地区 2007—

2010年夏半年小时降水分4个区,分别为西部和北部区、东北区、主城区和东南区,可识别出西部和北部山区与山前平原之间的降水差异,而且可以识别平原地区城市化强烈发展地区、城区东北部夏季盛行风下风方向和城区东南部郊区的降水差异,分类结果较为合理。

(2)从4—10月不同区降水分布特点来看,降水最强中心出现在主城区7月的20—23时,降水量集中,雨强大,其次是东北区7月的17—20时、东南区7月的02—04时。北京地区4个区降水小时数分布总体特点是:西部和北部区小时数最多,6、9月最集中;西部和北部区降水量小、小时数大,降水次数频繁但强降水少。7、8月降水小时数相对6、9月集中性少,与北京7、8月多短时强降水的特点相一致。主城区与东南区分布相比,主城区降水的集中性最强,突出表现在7月20—00时降水量最大、降雨强度最强、降雨小时数却不多,说明“城市雨岛效应”主要体现在7月的夜间,且主要是通过降雨强度的增大实现的。

(3)北京4个分区降水量在7月差异最大,4和10月区域差异较小,说明北京地区降水的地域性随着降雨量的增大而增强,夏季6—8月,局地性降水特征更为明显。综合分析降水量分布,主城区降水量较大但降水小时数较小,说明主城区多短时高强度降水。总体上4个分区均在11—15时降水小时数最少,降水出现概率低,20—00时和00—05时降水小时数较高。4个分区降水强度较强时间均出现在16—23时。主城区、东南区降水强度最大,其次是东北区,西部和北部区最小;主城区16—22时在4个区中降水强度最大,这和该区17—22时降水量最大相对应,说明降水强度大是主城区降水量大的主要因素。

本文分析了北京地区降水在时间和空间上分布的不均匀性,对于北京地区降水在时间、地点、量值的预报上有一定的参考作用。但由于北京地区降水形成的机理十分复杂,加上研究资料长度所限,若能根据天气系统、地形、城市热岛效应分析降水的时空分布将对于业务预报具有更好的参考意义,同时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,这些机制也有待于进一步的研究。

参考文献

湛芸,孙军,徐璐,等.2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考

- (一)观测分析及思考.气象,38(10):1255-1266.
- 方翀,毛冬艳,张小雯,等.2012.2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析.气象,38(10):1278-1287.
- 李建,宇如聪,王建捷.2008.北京市夏季降水的日变化特征.中国科学,53(7):829-832.
- 黎伟标,杜尧东,王国栋,等.2009.基于卫星探测资料的珠江三角洲城市群对降水影响的观测研究.大气科学,33(6):1259-1266.
- 梁灵君,杨忠山,白国营.2011.城市化进程对北京城区降水影响探讨.北京水务,3:15-18.
- 刘吉峰,李世杰,丁裕国,等.2006.近几十年我国极端气温变化特征分区方法探讨.山地学报,24(3):291-297.
- 马京津,李书严,王冀.2012.北京市强降雨分区及重现期研究.气象,38(5):569-576.
- 秦爱民,钱维宏,蔡亲波.2005.1960—2000年中国不同季节的气温分区及趋势.气象科学,25(4):338-345.
- 孙继松,舒文军.2007.北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究.大气科学,31(2):311-320.
- 孙继松,王华,王令,等.2006.城市边界层过程在北京2004年7月10日局地暴雨过程中的作用.大气科学,30(2):221-234.
- 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.大气科学,32(6):1352-1364.
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等.2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考.气象,38(10):1267-1277.
- 吴息,王晓云,曾宪宁,等.2000.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,23(1):68-72.
- 杨萍,刘伟东,仲路芹,等.2011.北京地区自动气象站气温观测资料的质量评估.应用气象学报,22(6):706-715.
- 俞小鼎.2012.2012年7月21日北京特大暴雨成因分析.气象,38(11):1313-1329.
- Bornstein Robert, Lin Qinglu. 2000. Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies. Atmos Environ,34(3):507-516.
- Changnon S A. 1978. Urban effects on severe local storms at St. Louis. J Appl Meteor,17(5):578-586.
- Changnon S A, Huff F A. 1986. The urban-related nocturnal rainfall anomaly at St. Louis. J Climate Appl Meteor,25(12):1985-1995.
- Changnon S A, Huff F A, Semonin R G. 1971. METROMEX: An investigation of the inadvertent weather modification. Bull Am Meteor Soc,52(10):958-968.
- Huff F A, Changnon S A. 1973. Precipitation modification of major urban areas. Bull Am Meteor Soc,54(12):1220-1232.
- Shepherd J M, Pierce H, J Negri A. 2002. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. J Appl Meteor,41(7):689-701.
- Yang P, Ren G, Hou W, et al. 2013. Spatial and diurnal characteristics of summer rainfall over Beijing Municipality based on a high-density AWS dataset. Int J Climatol,33(13):2769-2780. doi:10.1002/joc.3622.