

李林, 张子曰, 范雪波, 等. 2018. 基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究 [J]. 气候与环境研究, 23 (3): 268–274. Li Lin, Zhang Ziyue, Fan Xuebo, et al. 2018. A study on the blue rainstorm warning index based on characteristics of short-period heavy rainfall in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (3): 268–274, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17089.

基于短时强降水特征的北京暴雨蓝色预警指标研究

李林^{1,2} 张子曰³ 范雪波² 张玮³ 韦涛² 张治国² 孙雪琪²

1 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

2 北京市气象探测中心, 北京 100089

3 北京市气象局, 北京 100089

摘要 选取北京 2013~2015 年 6~9 月共 362 个自动气象站的逐分钟降雨资料进行统计, 分析北京夏季短时强降水的特征, 并进行蓝色暴雨预警指标的选取。结果表明: 1) 蓝色暴雨预警降雨样本中的 5 min、10 min 最大降水量约为其它降雨样本的 5 倍, 而蓝色暴雨预警降雨样本中在达到预警标准后有 5 min、10 min 的最大雨强也有显著降低; 2) 资料中有 63.0% 的蓝色暴雨预警降雨样本达到预警的时间不超过 60 min, 18:00 (北京时间, 下同) 至 01:00 的蓝色预警降雨样本占全部蓝色预警降雨样本的 60%; 3) 分钟雨强统计在暴雨蓝色预警中可有较好的提前指示作用, 如当 5 min 降水量达到 7.7 mm 发出预警, 则有关提前时效为 16.7 min, HSS 评分可达 0.503。

关键词 强降水 自动气象站 暴雨 预警指标

文章编号 1006-9585 (2018) 03-0268-07

中图分类号 P456.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17089

A Study on the Blue Rainstorm Warning Index Based on Characteristics of Short-Period Heavy Rainfall in Beijing

LI Lin^{1,2}, ZHANG Ziyue³, FAN Xuebo², ZHANG Wei³, WEI Tao², ZHANG Zhiguo²,
and SUN Xueqi²

1 Institute of Urban Meteorology, Chinese Meteorological Administration, Beijing 100089

2 Beijing Municipal Meteorological Observation Center, Beijing 100089

3 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

Abstract Based on minute rainfall data collected at 362 automatic weather stations from June to September between 2013 and 2015 in Beijing, the authors analyze the characteristics of short-period heavy rainfall in summer, and propose a blue rainstorm warning (BRW) index. The analysis suggests that: 1) The maximum rainfall intensities in 5 minutes and 10 minutes in BRW events (events that meet the BRW criterion) are about five times that in other events, and the rainfall intensity decreases significantly after reaching the BRW criterion. 2) 63.0% of the total BRW events that meet the criterion last no more than 60 min after the rain begins, and the BRW events that start during 1800 LST to 0100 LST count for 60% of the total BRW events. 3) High minute-rainfall intensity can be a good index for BRW. If a BRW is issued when 5-minute rainfall reaches 7.7 mm, the lead time will be 16.7 min and the HSS score can be up to 0.503.

Keywords Severe rainfall, Automatic weather station, Rainstorm, Warning indicator

收稿日期 2017-06-17; 网络预出版日期 2017-10-10

作者简介 李林, 男, 1979 年出生, 高级工程师, 主要从事综合气象观测工作。E-mail: lilin@bjmb.gov.cn

资助项目 北京市自然科学基金 8172050, 中央级公益性科研院所专项 IUMKY201732, 北京市科技计划 Z161100004516018

Funded by Beijing Natural Science Foundation (Grant 8172050), Basic Research and Development Special Fund for Central Level Scientific Research Institutes (Grant IUMKY201732), Beijing Municipal Science and Technology Commission (Grant Z161100004516018)

1 引言

暴雨是北京夏季最主要的灾害性天气之一。随着人口数量及城市规模的不断增长,作为超大城市之一,北京的城市运行对强降水敏感性日益增强。更因其首都特性、复杂的地形环境、典型城市特征,针对北京暴雨的研究近年成为城市气象研究的聚焦点。在近40年间,北京市夏季降雨总量呈现减少趋势,但其中短历时强降雨产生的降雨总量逐步增多,而过程性降雨的总量却大幅减少(李建等,2008)。该变化趋势与气候背景变化相关(Yu and Zhou, 2007),也受到了城市化效应的显著影响(孙继松和舒文军,2007)。另外,由于城市不透水下垫面大幅扩展,导致地面径流增加,城市内涝积水现象时常发生。强降水对城市运行构成极大威胁,愈发受到社会各界的关注,也给气象预报预警和防灾减灾提出了许多问题和挑战。丁青兰等(2007)对北京地区暖季对流天气的气候特征进行了分析,孙继松(孙继松,2005;孙继松等,2006;孙继松和杨波,2008)等从地形、边界层急流等方面对北京暴雨产生的原因进行探讨,这类研究成果为北京地区暴雨预报能力提升提供了很有价值的参考。

实际业务中,相关人员在发布暴雨预警信息时主要依据对天气形势、数值预报和卫星云图、雷达、自动站等实况资料的预判及分析,决策过程主要基于实时数据及个人经验,尚缺少提前预判的客观参考依据及相关预警指标。对于持续时间长的系统性、稳定性降水,预警发布时能够做到有较长时间的提前量,而对于短时强对流降水,预报员往往在实况接近达标或已达标后才发布暴雨预警,对于防汛工作有效开展而言提前量不足。

短时强降水在不少北京夏季降水中占主要地位,而已有的对北京暴雨研究主要采用小时降雨量资料,这样的时间分辨率难以捕捉其精细化特征。随着气象现代化和信息化水平的提高,数据采集、传输、存储和显示等方面的时效性已得到明显增强,分钟资料实时应用时机已非常成熟。本文将利用北京高密度的逐分钟地面自动气象站观测资料,对其汛期强降水特征进行分析,进而提出一种基于汛期短时强降水统计特征的北京暴雨预警发布指标,并对效果进行评估,为实际业务中暴雨预警发布提供参考,进一步提高预警发布能力。

2 数据资料和方法定义

北京短时强降水多集中在汛期,本文选取资料为2013~2015年6~9月北京362个自动气象站(空间分布见图1)的降雨资料,时间分辨率为1 min,站点包括20个国家级站和342个区域站,本文资料时段内20个国家级站平均降雨量与1980~2010年的30年气候常年平均值比仅相差2%,与2007~2016年的近10年平均值也仅相差5%,表明本文的资料具有较好的代表性。

首先对选取的降雨资料按以下步骤开展数据质量控制:1)对分钟雨量和小时雨量分别进行累加,对于结果不一致的降雨数据进一步具体分析判断,根据分钟缺测、采集器重启等情况进行对应处理;2)对于出现分钟雨量超过5.0 mm的降雨数据,参照周边站点降雨情况进行对比确认,剔除异常降水数据;3)根据历史维护维修记录,对故障期间和受周边浇水影响的站点数据进行剔除。

本文按照如下步骤获取分析样本:当第一次出现分钟雨量 ≥ 0.1 mm的时刻,为降雨开始时间(T_s),逐一判断 T_s 后分钟雨量是否大于0,当某一时刻降水量 ≥ 0.1 mm且其后120 min降水总量为0,则该时刻即为该样本的降雨结束时间(T_e),降雨量即为 T_s 至 T_e 时段内各分钟降雨量之和。如果该样本的降雨过程中滑动计算的60 min降雨量达到蓝色预警标准,达到蓝色预警标准的时间为 T_b ,该样本为蓝色暴雨预警样本。参照以上定义,为了更加客观地考察降水的持续性和表征短时强降水特征,选取数据中剔除掉弱降雨样本(即过程总雨量小于1 mm的降雨样本)。同时,对于降雨时长小于10 min(即 $T_e-T_s < 10$ min)的降雨样本也进行剔除。

按照上述处理,共获得有效降雨样本73211站次,剔除弱降水37259站次和时长小于10 min的样本369站次,最终保留的降雨样本为本文分析对象。2016年3月发布的《北京市气象灾害预警信号与防御指南》,其中暴雨蓝色预警标准为:预计未来可能出现下列条件之一或实况已达到下列条件之一并可能持续:1)雨强(1 h降雨量)达30 mm以上;2)6 h降雨量达50 mm以上。实际业务中标准(1)使用频率显著高于标准(2),因而本文中采用标准(1)作为预警指标进行检验,并在后续分析中将降雨样本分为达到预警标准和未达到预警标准两类。

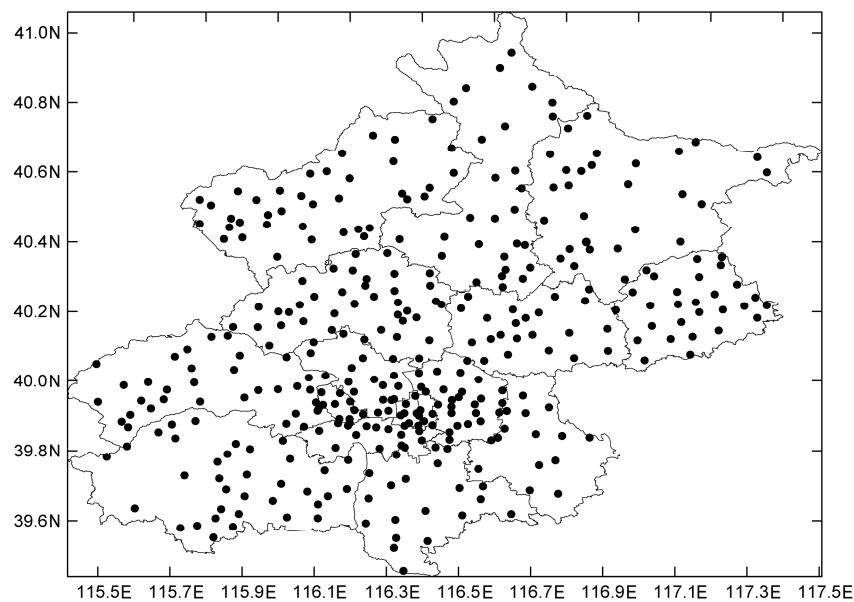


图 1 北京 362 个自动气象站的分布

Fig. 1 Distribution of 362 automatic weather stations in Beijing

3 强降水特征

3.1 短时强度特征

以下从不同时间长来分析降水特征,为更好地发掘预警指标,在2013~2015年筛选出的35593个降雨样本中,有1157个降水样本达到暴雨蓝色预警标准,出现在327个站中,平均单站出现3.5次,达到蓝色预警标准次数最多的站点次数为10次。

表1为降雨样本中的最大5 min、10 min、30 min、60 min降水量的平均值,分为达到预警标准、未达到预警标准和全部样本3类进行计算。数据表明5 min和10 min降雨量达到蓝色预警标准样本最大降水量平均值是未达到预警标准样本的5倍左右,而从30 min和60 min统计数据来看,达到蓝色预警标准样本最大降水量平均值是未达到样本的7倍左右。

表1 不同时长的最大降水量平均

Table 1 Average maximum precipitation during different time intervals

时长/min	降水量平均/mm		
	达预警样本	未达到样本	全部样本
5	9.7	2.0	2.2
10	16.6	3.0	3.5
30	32.2	4.8	5.7
60	41.4	5.9	7.0

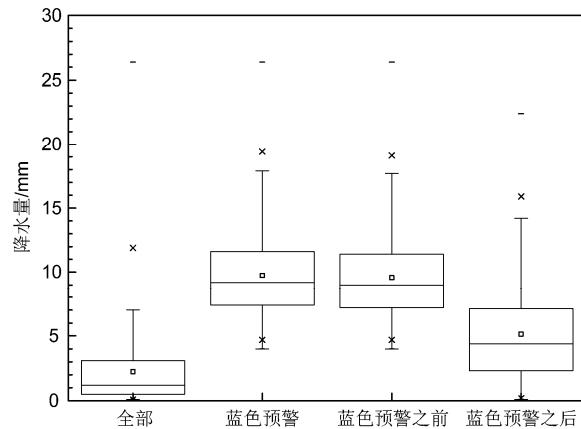


图 2 5 min 最大降水量分布

Fig. 2 Box plot for maximum precipitation in five minutes

以时长5 min为例继续分析。图2为5 min最大降水量统计分布情况,达到蓝色预警标准的降雨样本显著高于全部样本。达到蓝色预警降雨标准前的最大5 min降水量和整个蓝色预警降雨样本中的最大5 min降水量几乎一致,但是达到蓝色降雨标准后的最大5 min降水量明显是要小于达到蓝色降雨标准前。达到预警样本、达到预警前和预警后的最大降水量平均值分别为9.7 mm、9.2 mm和5.1 mm,中位数分别为9.2 mm、9.0 mm和4.4 mm,全部样本的5 min最大降水量的平均数和中位数分别为2.2 mm和1.2 mm。

3.2 时间特征

数据资料中达到暴雨蓝色预警的1157个降雨

样本，从降雨开始时间 T_S 到达蓝色预警标准满足条件的时间 T_B ，其时间差平均为 86.6 min，最短达到预警时间仅 9 min，最长 1157 min。达到预警时间（分布如图 3）明显呈单峰分布，峰值在 16~60 min 之间，即有 63.0% 的样本从降雨开始达到蓝色预警标准的时间不超过 60 min。仅有 53 个样本，达到蓝色预警标准的时间超过 300 min，而这其中有 41 个样本出现了连续 60 min 降雨量为 0，说明中间出现了短时降雨间歇。该分布也表明，在降雨开始后才发布预警，则预警时间的提前量将会非常有限，大概率受限于 60 min 内。

分别对达到暴雨蓝色预警标准降雨样本的 T_S 、 T_B 出现频次进行统计，结果（图 4 左侧纵轴）显示 T_S 、 T_B 均为单峰单谷分布，两者的峰值均出现在 20:00（北京时间，下同）至 21:00 之间。考虑到 T_B 与 T_S 差值

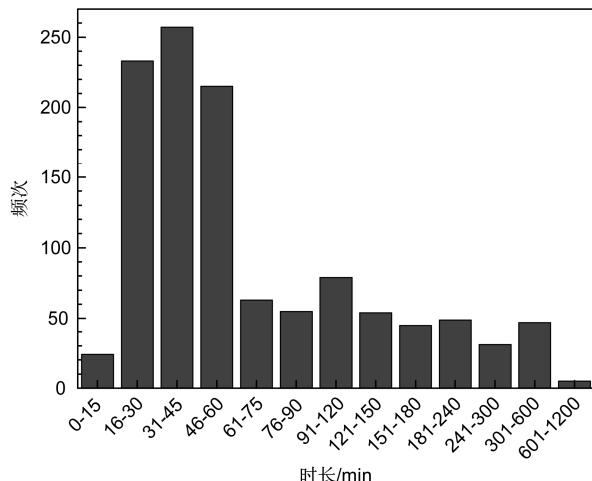


图 3 达到蓝色预警标准降雨的样本时间分布

Fig. 3 Time span between the starting time of rainfall (T_S) and the time of rainfall reaching the blue rainstorm warning (T_B)

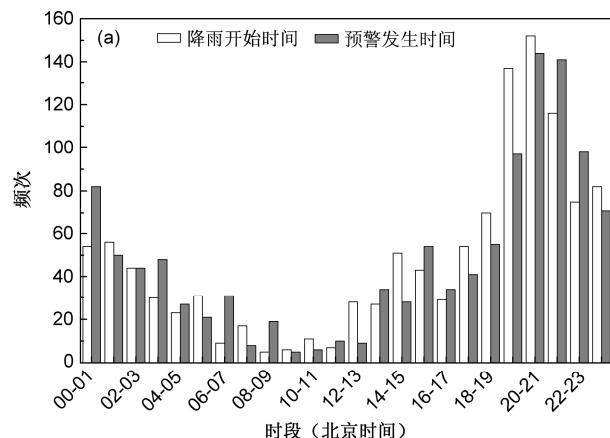


图 4 (a) 蓝色预警样本、(b) 全部降雨样本的降雨时间分布

Fig. 4 Starting time of rainfall events with (a) blue rainstorm warnings and (b) all rainfall events

大多在 60 min 以内，该结果合理且与前述信息一致。分析表明，近年来北京出现满足蓝色预警标准的降雨样本主要发生在夜间，18:00 至 01:00 的蓝色预警降雨样本占全部蓝色预警降雨样本的 60%，20:00 至 22:00 占比约为 25%，而日出至午间（即 06:00 至 12:00）占比不到 10%，和李建等（2008）、刘伟东等（2014）、郑祚芳等（2015）研究结果较为一致。

将全部降雨样本的 T_S 同样按上述方式进行统计（图 4 右侧纵轴），结果表明也呈单峰单谷分布，但是集中分布情况远小于蓝色预警降雨样本，全部样本的变异系数为 0.36，蓝色预警降雨样本的变异系数达到了 0.80，表明暴雨蓝色预警降雨样本的分布更不平均。

在本文资料中，全部降雨样本中共有 3.2% 的降雨样本达到了暴雨蓝色预警标准。对图 4 数据做对应时段的比较，图 5 给出了各时段中开始的降雨达到蓝色预警标准的占比，图中曲线未呈现简单的单峰单谷分布，但低值仍集中在上午时段 08:00 至 12:00。北京汛期上午出现降水概率较低，且出现降雨后达到蓝色预警标准的可能性与其它时段相比也是最低，郑祚芳等（2015）研究表明城市效应导致较强降水事件，特别是午后到前半夜发生的降水。

4 预警指标选取方法和效果评估

4.1 选取方法和检验指标

由以上分析可以看出，达到蓝色预警标准（时间尺度为小时）的样本，在更为精细化的时间尺度上其累计降水量与未达预警标准的样本有明显差异，且在预警标准达标前后差异较为显著。同时在

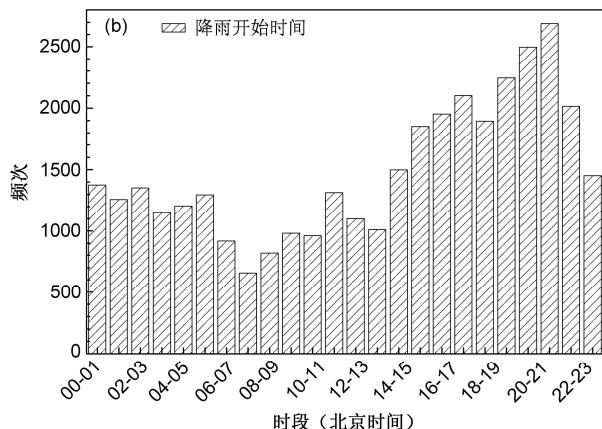


图 4 (a) 蓝色预警样本、(b) 全部降雨样本的降雨时间分布

Fig. 4 Starting time of rainfall events with (a) blue rainstorm warnings and (b) all rainfall events

达到暴雨蓝色预警的降雨样本，从降雨开始到达达到蓝色暴雨的时长平均有 86.6 min，因此可以考虑将更短时间尺度上的强降水统计情况作为暴雨蓝色预警的提前参考指标。

研究选取不同时长的降雨量作为单一的预警发布指标，参考现有预报评分中的方法（Finley, 1884），根据预警发布和实况观测情况对全部降水样本进行分类（见表 2）。

表 2 预警事件分类列联表

Table 2 Contingency table for dichotomous forecasts

预警	观测		
	有	无	
有	命中 (<i>a</i>)	空报 (<i>b</i>)	
无	漏报 (<i>c</i>)	正确拒绝 (<i>d</i>)	

注：*a*、*b*、*c*、*d* 分别对应相关的样本数。

举例说明表中内容含义：当以 5 min 降水量达到 8 mm 为预警指标时，如果对达到蓝色预警标准的降雨样本，在预警前出现 5 min 降水量达到 8 mm，则判断为命中；如果没有出现或者出现在达到蓝色预警后，则判断为漏报；如果在没有蓝色预警的降雨样本中出现则判断为空报。

下面介绍下文中所用的预警评价指标和技巧评分，HSS（Heidke, 1926）与 GSS（Gilbert, 1884）均是除去随机偶然事件后预警的准确率，不依赖于事件的气候频率（见表 3）。

表 3 预警评价指标和技巧评分

Table 3 Performance evaluation indexes and scores for dichotomous forecasts

名称	符号	表达式	区间
击中率	POD	$POD = a/(a+c)$	0~1
空报率	FAR	$FAR = b/(a+b)$	0~1
频率偏差指数	FBI	$FBI = (a+b)/(a+c)$	0~∞
Heidke 技巧评分	HSS	$HSS = 2(ad - bc)/[(a+c)(c+d) + (a+b)(b+d)]$	-1~1
Gibert 技巧评分	GSS	$GSS = (a-R)/(a+b+c-R)$ $R = (a+b)(a+c)/(a+b+c+d)$	-1/3 ~ 1

注：POD 数值越大，效果越好；FAR 数值越小，效果越好；FBI>1，表明预警范围大于实况范围，FBI<1，预警范围小于实况范围，FBI=1，预警范围与实况范围吻合；HSS 和 GSS 数值越接近 1，效果越好。

4.2 效果评估

根据达到暴雨蓝色预警降雨样本中 5 min 最大降雨强度的分布，即预警前和预警后的平均值分别为 9.2 mm 和 5.1 mm，选取 5 min 降水量 5~10 mm（相当于雨强 60~120 mm/h）作为指标，计算 5 min 内不同降水量在发布蓝色预警中的效果差异，在成功

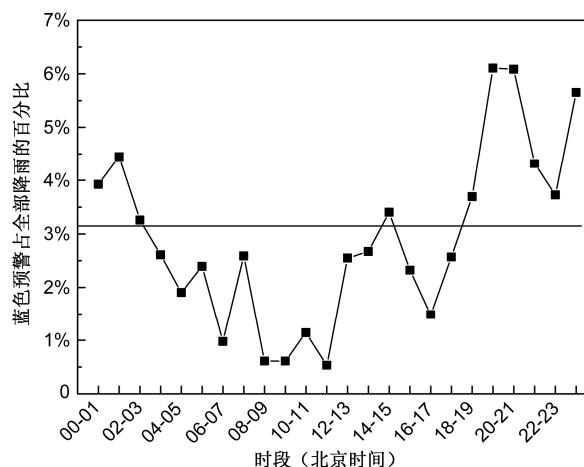


图 5 全部降雨中蓝色预警的各时段占比分布

Fig. 5 Hourly ratios of events with blue rainstorm warnings to all rainfall events

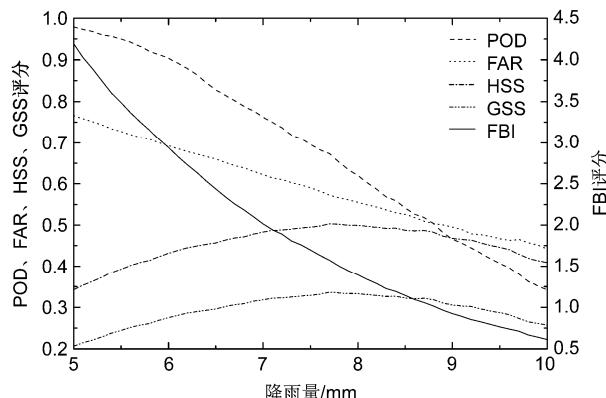


图 6 5 min 不同降雨量情况下的评分

Fig. 6 Grading for rainfall events with different 5-min amounts

预警样本中计算提前时间，使用 T_B 减去该降水量出现的时间。图 6 为 5 min 不同降雨量的指标评分情况，随着 5 min 降雨量上升，POD、FAR、FBI 均呈单调下降趋势，而 HSS 和 GSS 技巧评分在 5 min 降雨量为 7.7 mm 时达最大值，表明 5 min 降水量 7.7 mm 是一个较好的暴雨预警标准，提前时效达到 16.7 min，而在 5 min 降雨量为 5.0 mm 的情况下，提前时效可以达到 25.5 min。

按照雨强 60~120 mm/h 的标准，将指标时长扩展到 3~10 min。与 5 min 的情况类似，POD、FAR、FBI 均随着雨强标准的提高呈单调下降趋势，即击中率 POD 和空报率 FAR 下降，从频率偏差指数 FBI 来看，数值下降至更接近 1，意味着预警范围趋于合理。HSS 和 GSS（图 7d、7e）评分的分布基本一致，两者的最高评分分别为 0.561 和 0.390，均出现在 10 min 降雨量为 13.4 mm 的情况下。如果以上述

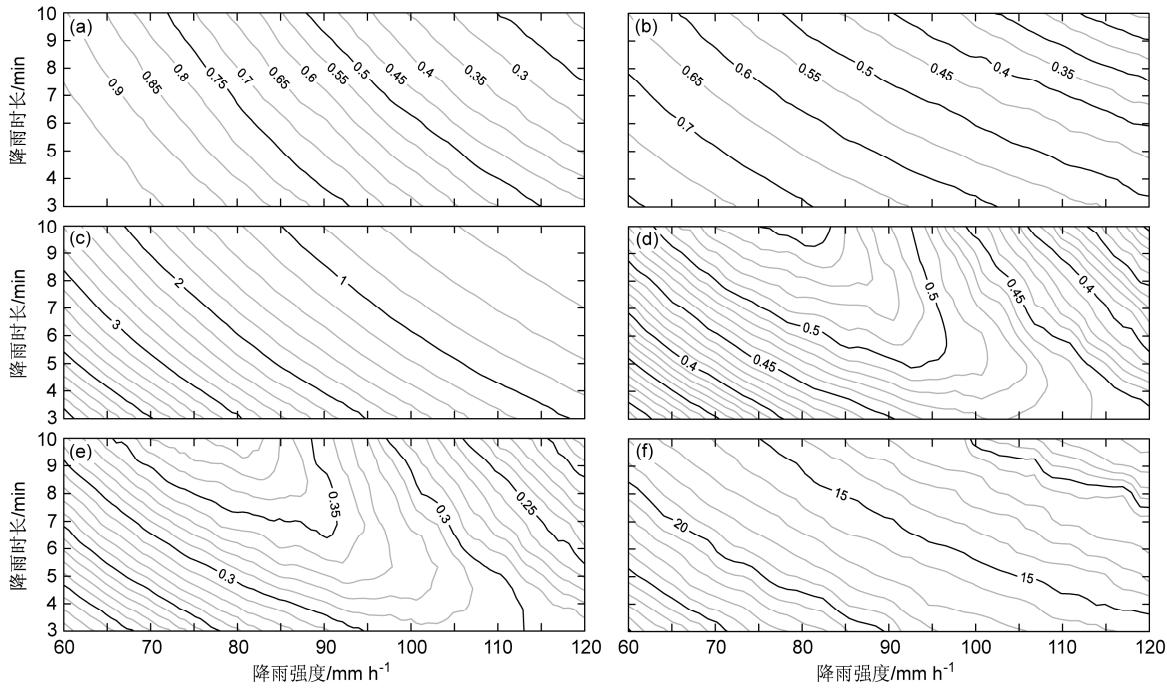


图 7 对应降雨不同强度及时长的预警效果评估: (a) POD、(b) FAR、(c) FBI、(d) HSS、(e) GSS 对应评价指标与技巧评分, (f) 对应提前时长(单位: min)

Fig. 7 Performance evaluation of rainstorm warnings for different intervals and rainfall intensities: (a) POD, (b) FAR, (c) FBI, (d) HSS, (e) GSS, (f) forecast lead time (units: min)

条件作为指标发布蓝色预警, 则有效预警的提前时间为 13.9 min, 低于 2015 年预警平均提前时间 18 min (2015 年蓝色预警标准为小时降水量达到 20 mm)。

对 3~10 min 不同时长下, HSS 评分最高的降雨量单独比较 (结果如表 4 所示), 击中率 POD 在 0.65 左右, 波动不大。随时长增大, HSS 评分逐渐提高, 提前时间从 17.3 min 降到 13.9 min, 说明对预警时效影响较小。

表 4 不同时长下最高 HSS 评分、POD 评分和预警提前时间

Table 4 Highest HSS for different intervals, corresponding POD and forecast lead time

降雨时长/min	降雨量/mm	POD 评分	HSS 评分	提前时间/min
3	5.1	0.647	0.470	17.3
4	6.7	0.613	0.485	16.6
5	7.7	0.673	0.503	16.7
6	9.0	0.660	0.515	16.0
7	10.5	0.610	0.523	15.1
8	11.2	0.646	0.533	15.0
9	12.4	0.638	0.549	14.4
10	13.4	0.635	0.561	13.9

北京地区夏季短时强降水还存在较明显空间分布特征, 高发区包括西山东侧的海淀石景山一带、平谷境内的燕山山麓及密云水库周边 (王国荣和王令, 2013)。按照前文方法, 以 5 min 时长对北京各区预警效果进行评估计算, 其中城区作为一个整体进行分析, 选取最高 HSS 评分对应的 5 min 降水量和预警提前时间进行统计 (见表 5)。HSS 评分中城区、门头沟、延庆 3 个地区低于 0.5; 各区最

表 5 各区最高 HSS 评分及对应 5 min 降水量和提前时间
Table 5 The best HSS scores and corresponding 5-min precipitation and lead time in different areas

地区	降雨样本数		5 min 降水 量/mm	HSS 评分	提前时间/ min
	全部降雨	蓝色暴雨预警			
城区	7209	254	7.9	0.491	14.2
昌平	3884	94	8.9	0.500	15.0
大兴	1848	64	8.7	0.545	24.8
房山	3509	111	7.8	0.555	14.1
怀柔	2667	75	8.8	0.509	13.7
门头沟	3481	58	6.9	0.478	20.7
密云	2780	116	7.7	0.552	15.2
平谷	2892	175	7.7	0.529	17.7
顺义	2067	104	7.2	0.548	14.5
通州	1199	51	6.1	0.555	17.7
延庆	4057	55	8.5	0.432	28.7

佳预警评分的 5 min 降水量存在一定差异，在 6~9 mm 之间；最长的分区预警提前时间 3 个区超过 20 min，延庆预警提前时间最长，达到 28.7 min。

5 结论

(1) 通过以上研究发现，在达到暴雨蓝色预警标准的降雨样本中，降雨开始和达到预警标准的时间都呈单峰单谷分布，峰值出现在 20:00 至 21:00。

(2) 降雨开始与预警达标的时间间隔集中在 16~60 min，所以可利用短时降雨阈值判断是否发布蓝色预警信号。经分析计算，10 min 降雨量达 13.4 mm 作为预警发布指标效果最好，3 min 降雨量达到 5.1 mm 也可作较好的提前预警指标。

(3) 研究发现，上午时段是降雨概率和降雨后达暴雨蓝色预警概率均最低的时段，说明以上参考指标可以更好地适用于下午和夜间强降水的预警当中。

致谢 感谢曲晓波研究员对本文的启发和精心指导。

参考文献 (References)

- 丁青兰, 王令, 陈明轩, 等. 2007. 北京地区暖季对流天气的气候特征 [J]. 气象, 33 (10): 37~44. Ding Qinglan, Wang Ling, Chen Mingxuan, et al. 2007. Climate character analysis of convective weather during warm season (May to September) in Beijing [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (10): 37~44, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2007.10.006.
- Finley J P. 1884. Tornado predictions [J]. American Meteorological Journal, 1: 85~88.
- Gilbert G K. 1884. Finley's tornado predictions [J]. American Meteorological Journal, 1: 166~172.
- Heidke P. 1926. Calculation of the success and goodness of strong wind forecasts in the storm warning service [J]. Geografiska Annaler, 8: 301~349.
- 李建, 宇如聪, 王建捷. 2008. 北京市夏季降水的日变化特征 [J]. 科学通报, 53 (7): 829~832. Li Jian, Yu Rucong, Wang Jianjie. 2008. Diurnal variations of summer precipitation in Beijing [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (12): 1933~1936, doi:10.1007/s11434-008-0195-7.
- 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 2014. 北京地区精细化的降水变化特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (1): 61~68. Liu Weidong, You Huanling, Ren Guoyu, et al. 2014. Subtle precipitation characteristics in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (1): 61~68, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12142.
- 孙继松. 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究 [J]. 大气科学, 29 (3): 445~452. Sun Jisong. 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 445~452, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.12.
- 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 [J]. 大气科学, 30 (2): 221~234. Sun Jisong, Wang Hua, Wang Ling, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (2): 221~234, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.05.
- 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 [J]. 大气科学, 31 (2): 311~320. Sun Jisong, Shu Wenjun. 2007. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 311~320, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.02.12.
- 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.
- 王国荣, 王令. 2013. 北京地区夏季短时强降水时空分布特征 [J]. 暴雨灾害, 32 (3): 276~279. Wang Guorong, Wang Ling. 2013. Temporal and spatial distribution of short-time heavy rain of Beijing in summer [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 32 (3): 276~279, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.012.
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. J. Climate, 20 (21): 5344~5355, doi:10.1175/2007JCLI1559.1.
- 郑祚芳, 祁文, 李青春, 等. 2015. 基于自动站观测的北京夏季降水特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 201~208. Zheng Zuofang, Qi Wen, Li Qingchun, et al. 2015. Statistical characteristics of precipitation in summer in Beijing area during 2007~2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 201~208, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14160.