

顾宇丹.上海城市人口密集区强降水积水阈值研究[J].暴雨灾害,2016,35(6):590-595

Gu yudan. Study on the waterlogging threshold of heavy rainfall in the densely populated areas of Shanghai [J]. Torrential Rain and Disasters, 2016,35(6):590-595

上海城市人口密集区强降水积水阈值研究

顾宇丹

(上海市气象灾害防御工程技术中心,上海 201615)

摘要:基于2012—2015年期间上海市多次明显强降水过程的逐时110积水报警数据(积水灾情)和气象站降水量数据,分析降水和积水灾情两者之间的关系和时空动态变化,建立了上海城市人口密集区强降水积水的阈值指标。结果表明:上海中心城区强降水积水的起始阈值为1 h降水量30 mm,当中心城区1 h降水量在70 mm以上时,积水会显著增多。上海区县人口密集居住区强降水的起始阈值为1 h降水量35 mm。降水积水的严重程度不仅与降水强度相关,也与累积降水量和降水持续时间的长短有关。当2 h累积降水达到40 mm以上时,也有积水灾情。积水灾情相对于降水有1—2 h左右的滞后期。

关键词:强降水;积水阈值;滞后期;上海

中图分类号: P458.1*21 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1004-9045.2016.06.012

Study on the waterlogging threshold of heavy precipitation in the densely populated areas of Shanghai

Gu Yudan

(Shanghai meteorological disaster prevention engineering technology center, Shanghai 201615)

Abstract: Based on hourly waterlogging disasters and hourly rain data from weather stations in dozens of obvious heavy rain events in Shanghai during 2012–2015, the temporal and spatial dynamic evolution relationships between precipitation and the number of waterlogging disasters were analyzed, and waterlogging threshold indicators were established in densely populated areas of Shanghai. Results indicate that the waterlogging threshold is 30 mm per hour in urban district of Shanghai. Waterlogging disasters will increase significantly when the rain intensity reaches 70 mm per hour or more. The waterlogging threshold is 35 mm per hour in other counties of Shanghai. The severity of waterlogging is not only related to the rain intensity, but also associated with the cumulated precipitation and the precipitation duration. When accumulated precipitation reached more than 40 mm in two hours, waterlogging disaster will occur. Waterlogging disaster has a lag of about 1–2 hours relative to the occurrence of heavy precipitation.

Key words: heavy precipitation; waterlogging threshold; lagging period; Shanghai

引言

随着全球变暖,极端天气气候事件发生的不确定性及造成的灾害受到各级政府的关注^[1]。我国气象部门规定,1 h内降水量为16 mm以上或者24 h内降水量为50 mm以上的雨都称为强降水。强降水具有突发性强、持续时间短、灾害来势凶猛等特征^[1],容易引起山洪、积水以及诱发山体滑坡、泥石流等地质灾害^[2],对

城市和人口密集地区特别是低洼地区而言,强降水往往会造成严重的交通阻塞、人员伤亡和财产损失^[1]。开展城市强降水研究,是城市防灾减灾与安全生产的需要,对保障国民经济的健康稳定发展也具有重要意义。

致灾阈值是指灾害发生时的临界天气气候条件,一旦达到这一临界值,天气气候灾害就造成生命伤亡或经济损失^[3]。国内已有一些学者开展了强降水及致

收稿日期:2015-12-25;定稿日期:2016-10-20

资助项目:上海市科委民生科技项目(15dz1207800);上海市气象局面上项目社区暴雨积涝灾害脆弱性研究项目(MS201408)

第一作者:顾宇丹,主要从事气象灾害风险管理及雷电灾害防御研究。E-mail: 67592651@qq.com

灾阈值研究,如李庆祥等^[4]采用排序法、插值法、正态变换法、平方根变换法和立方根变换法等方法对北京地区强降水气候事件阈值进行了研究;赵海军等^[11]、高留喜等^[5]则采用传统排序法、Z指数法、平方根变换法开展了山东省短时强降水研究;韩秀君等^[6]应用统计分析方法建立了辽宁暴雨致灾指标;卢燕宇等^[7]提出了淮河流域动态致灾临界降水量指标;郭广芬等^[8]通过研究湖北省暴雨洪涝致灾指标,指出了过程降水量能更好地反映持续性降水累积效应的致灾作用。

上海地处东亚季风气候区,每年汛期梅雨、台风、强对流等天气系统均会引起局地性、短时性的强降水,导致城市交通受阻和民居、厂库进水,影响生产和生活^[8]。近年来,上海强降水事件呈弱增加趋势^[9],短时强降水增加和海平面上升使得城镇防汛排涝面临新的挑战,如2013年台风“菲特”造成全市 12.1×10^4 人受灾,2人死亡,直接经济损失3.7亿元^[10]。以往研究多是针对上海暴雨变化特征、城市暴雨洪涝灾害暴露度、危险性等方面的评价研究^[10-12],但对城市强降水积水阈值的研究尚不多见。因此,本文利用上海2012—2015年期间强降水110积水报警数据(以下简称积水灾情)和气象站降水数据,分析积水灾情频次与降水的关系,从而给出造成上海城市积水的强降水阈值,以期开展城市影响预报服务提供参考阈值。

1 资料与方法

1.1 数据资料

所用资料有2012—2015年来自上海市应急联动中心的居民居住区房屋进水或其周围道路积水的110报警数据。2012—2015年上海市国家站(包括区域自动气象站,以下统称“自动站”)逐时降水量数据和上海市行政区划图。文中提及的人口密集区是指人员居住集中的区域,例如外环内各个街道,以及外环外各个乡镇居民集中居住的区域。

(1) 110积水报警数据。主要包括发生时间、详细地址、上海地理坐标、积水事件描述等字段^[13]。利用该数据库资源,获得2012—2015年上海市历次强降水积水灾情(包括道路积水、房屋进水、地下车库积水等)信息。2012—2015年期间,上海强降水引起的110积水灾情共12 061起,历年差异很大,最少的为2014年,仅有567次,最多为2013年,因遭受台风“菲特”和冷空气共同影响,10月7—8日就多达3 785次。图1给出2012—2015年上海积水灾情分布,从中可见,积水灾情全市分布不均,中心城区虽然面积不到全市的5%,但报警灾情点分布却最为密集,近4 a占全市30%以上的灾情数。这是由于积水灾情的产生一方面与降

水强度有关,另一方面也与区域人口密度,以及区域内人员受灾后报警意识强弱等有关。

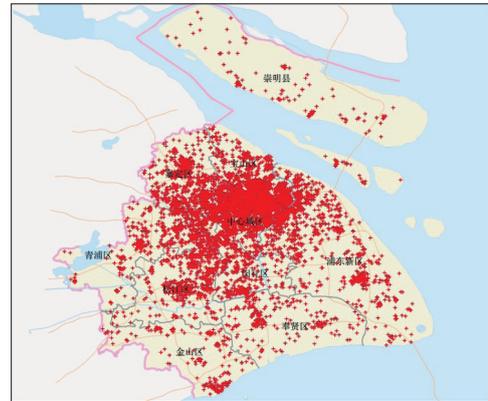


图1 2012—2015年上海市积水灾情(红点,单位:起)分布
Fig. 1 Spatial distribution of waterlogging disasters (red dot, unit: number) in Shanghai during 2012—2015.

(2) 降水观测资料。上海全市有11个国家站,还有近200个具有单要素或多要素观测功能的区域自动站,但有些区域自动站因管理没跟上而缺测较多。本文基于2012—2015年4 a间的所有自动站降水资料,挑选并整理出4 a间每年均具有完整的逐小时降水数据的上百个气象站资料,以确保降水数据能够较为准确地反映出上海夏季局地性强降水的空间分布和变化特征。

1.2 分析方法

基于积水灾情和气象站逐时降水数据,选取2012—2015年期间46次强降水过程,分析积水灾情频数与降水强度、累积降水量和降水持续时间之间的关系。首先,选取2012—2014年期间40次造成较大区域积水的强降水过程,综合分析中心城区和区县人口密集区强降水过程特征以及与积水的关系,确定不同降水强度、累积降水量和持续时间影响下的强降水积水阈值。然后,选取近年来几次影响较大的强降水过程,进一步分析并验证强降水积水灾情与降水强度、累积降水量和持续时间的时空动态关系。最后,利用2015年积水灾情和气象站逐时降水数据,对提出的强降水积水阈值指标进行对比验证。

文中积水灾情数、累积降水量、1 h最大降水量、2 h降水量、降水持续时间分别用 D_{Σ} , R_{Σ} , R_{\max} , R_2 , T_d 表示。

2 结果分析

2.1 积水与强降水关系的统计特征

2012—2015年,上海每年均有强降水造成积水的天气过程发生,其中以局地短时强降水天气居多。期间共发生强降水积水过程46次,2012年有12次,2013年有16次,2014年有12次,2015年有6次。绝大部分出现在汛期6—9月,也有强降水过程出现在10月。

2.1.1 上海积水与强降水的总体关系

2012—2014年期间,上海共发生40次强降水积水过程。积水灾情内容基本上以小区积水和马路积水为主,因此可认定为上述灾情均发生在人口密集区。2012年8月8日“海葵”台风影响期间,由于河道水位较高的客观因素,上海部分泵站临时关闭,造成了中心城区积水灾情达1900多起。2013年10月8日“菲特”台风残余环流与北方冷空气结合造成了上海持续12h的降水,累积降水量达300mm以上,加上上游来水的共同影响,导致了全市大部分地区都有积水发生,全市积水灾情数达3500起以上。2013年9月13日市区和浦东地区1h最大降水量 R_{\max} 超100mm,累积降水量 R_{Σ} 达140mm,造成了中心城区及浦东地区约达1000起的积水灾情。这3次过程降水较为极端,且存在外来因素(如高潮位、上游来水等)的影响,不在本文的统计分析中考虑。

表1给出积水灾情数与降水量、降水持续时间的相关性统计结果,从中可见,影响上海的40次强降水积水过程中,累积降水量 R_{Σ} 、1h最大降水量 R_{\max} 、2h降水量 R_2 、降水持续时间 T_d 与积水灾情数 D_{Σ} 之间相关性显著,其中 R_{Σ} 、 R_2 与 D_{Σ} 为中等强度相关,而1h最大降水量 R_{\max} 与 D_{Σ} 也具有一定的相关性。下面针对强降水积水过程分别分析中心城区和其他区县人口密集区的上述参数的相关性。

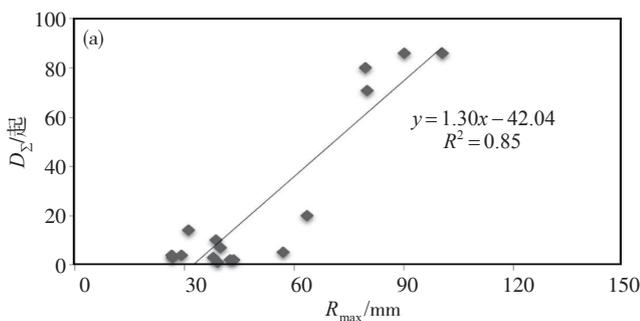


表1 积水灾情数与降水量、降水持续时间的相关系数统计结果

Table 1 The correlation between waterlogging disasters, precipitation and precipitation duration.

灾情及降水参量	D_{Σ} /起	R_{Σ} /mm	R_{\max} /mm	R_2 /mm	T_d /h
D_{Σ} /起	1				
R_{Σ} /mm	0.687*	1			
R_{\max} /mm	0.390*	0.519*	1		
R_2 /mm	0.553*	0.784*	0.753*	1	
T_d /h	0.420*	0.672*	-0.105	0.251	1

注:*表示相关性通过0.01的显著性检验

2.1.2 中心城区积水灾情与强降水关系

2012—2014年造成中心城区积水的强降水过程有17次(台风过程除外),大部分个例的 T_d 主要集中在1—2h以内,只有2个个例 T_d 超过3h。而积水灾情基本在降水发生后1—2h内就会出现。图2给出2012—2014年中心城区强降水积水灾情数 D_{Σ} 和小时最大降水量 R_{\max} 、累积降水量 R_{Σ} 关系,从中可见, D_{Σ} 与 R_{\max} 、 R_{Σ} 呈正线性回归相关。 D_{Σ} 随着 R_{\max} 和 R_{Σ} 的增加而增加。对 R_{\max} 而言,达到30mm,开始有积水灾情(图2a中 R_{\max} 小于30mm的个例的 T_d 超过2h及以上)。另外, D_{Σ} 与 T_d 相关。平均小时降水量在20—30mm的降水持续2h及以上,也会有积水灾情。当 R_{\max} 达到70mm或者1—3h的 R_{Σ} 达100mm以上,灾情显著增多,且灾情报警滞后性明显。

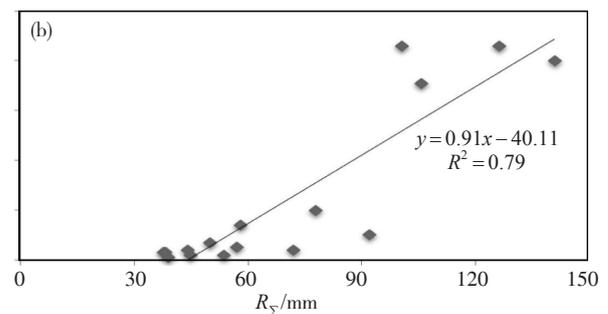


图2 2012—2014年中心城区积水灾情数 D_{Σ} (单位:起)和小时最大降水量 R_{\max} (a,单位:mm)、累积降水量 R_{Σ} (b,单位:mm)关系图

Fig.2 The relationship between waterlogging disasters D_{Σ} (unit: number) and (a) hourly maximum precipitation R_{\max} (unit: mm) and (b) cumulative precipitation R_{Σ} (unit: mm) in urban district during 2012—2014.

2.1.3 区县人口密集区积水与强降水关系

2012—2014年期间导致其他区县人口密集区积水的强降水过程有37次,过程基本上持续时间为1—4h。图3给出2012—2014年除中心城区外其他区县强降水积水灾情数 D_{Σ} 和小时最大降水量 R_{\max} 、2h降水量 R_2 、累积降水量 R_{Σ} 统计关系,其中图3b中过程统计去除降水持续时间 T_d 为1h的过程。从中可见,区县 D_{Σ} 与 R_{\max} 、 R_2 、 R_{Σ} 几者之间呈现正线性

回归相关。积水灾情数 D_{Σ} 随着降水强度和累积降水量 R_{Σ} 的增加而增加。从这些过程看,小时降水量达到35mm以上,开始有积水灾情。同样区县积水灾情也与累积降水量有密切关系,平均小时降水在20—30mm之间且降水持续2h以上,即2h累积降水 R_2 达到40mm以上,也会有积水灾情。相比中心城区 R_{\max} 达70mm以上或 R_{Σ} 达100mm以上 D_{Σ} 会明显增加的情况,青浦、金山、崇明等区县(较偏远区

县)在 R_{max} 超 50 mm、 R_{Σ} 超 100 mm 的情况下,会出现零星灾情报警的情况。

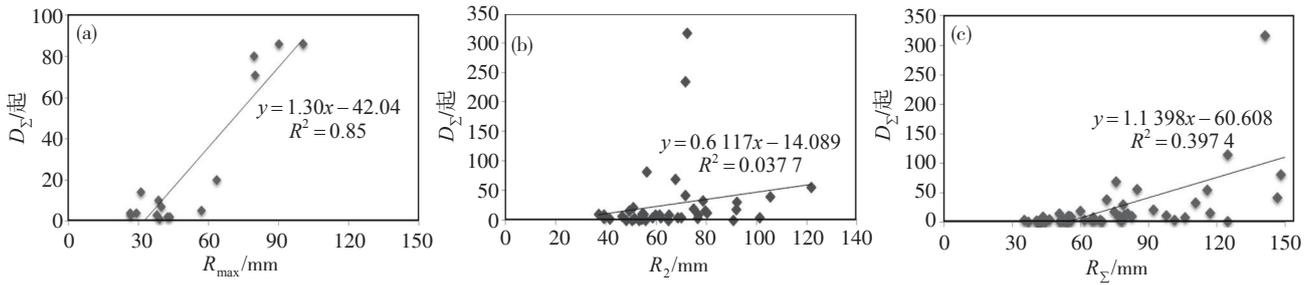


图3 2012—2014年除中心城区外其他区县积水灾情数 D_{Σ} (单位:起)和小时最大降水量 R_{max} (a, 单位: mm)、2 h降水量 R_2 (b, 单位: mm)、累积降水量 R_{Σ} (c, 单位: mm)关系图

Fig.3 The relationship between waterlogging disasters D_{Σ} (unit: number) and (a) hourly maximum precipitation R_{max} (unit: mm), (b) 2 h precipitation R_2 (unit: mm) and (c) accumulative precipitation R_{Σ} (unit: mm) in other counties except urban district during 2012–2014.

2.2 积水与强降水关系的动态过程特征

从近4 a强降水过程中挑选出典型个例,包括2014年9月1日短时强降水过程和2015年8月24日倒槽降水过程,进一步分析验证积水灾情数与小时最大降水量、累积降水量和降水持续时间关系。

2.2.1 2014年9月1日短时强降水过程

受低涡切变线影响,2014年9月1日凌晨,上海崇明、宝山、中心城区等地区出现了短时强降水。图4给出9月1日当日04—08时(北京时,下同)逐时降水量和积水灾情 D_{Σ} 的空间分布,从中可见,此次降水过程主要集中在北部地区。04时降水发生区域为嘉定中心区域(图4a),区域内 R_{max} 为33 mm,最强降水区域内无灾情;05时强降水移至中心城区的闸北、杨浦和宝山交界

地区以及崇明局部地区(图4b),区域内 R_{max} 超过100 mm,在同1时次内除崇明以外的强降水区域内出现了37起积水灾情;06时强降水发生在崇明中部地区(图4c),区域内 R_{max} 达到50 mm,该区域内有积水灾情,而中心城区在本时次虽无降水,但区域内积水灾情仍在持续并有所增加,一共有74起。07—08时除了崇明和浦东南部地区外,其他地区基本无降水,但仍有23起的积水灾情,且灾情点位置与05时强降水区域较为吻合。说明当强降水发生时,汇水速度加快,短时形成局地积水,即使后续无明显降水,退水时间仍有1—3 h延时。本次过程也说明发生在凌晨的强降水,接近或达到小时降水量阈值标准,但过程持续在1 h左右的,局地虽形成积水,但未必会有积水灾情接报(如嘉定区)。

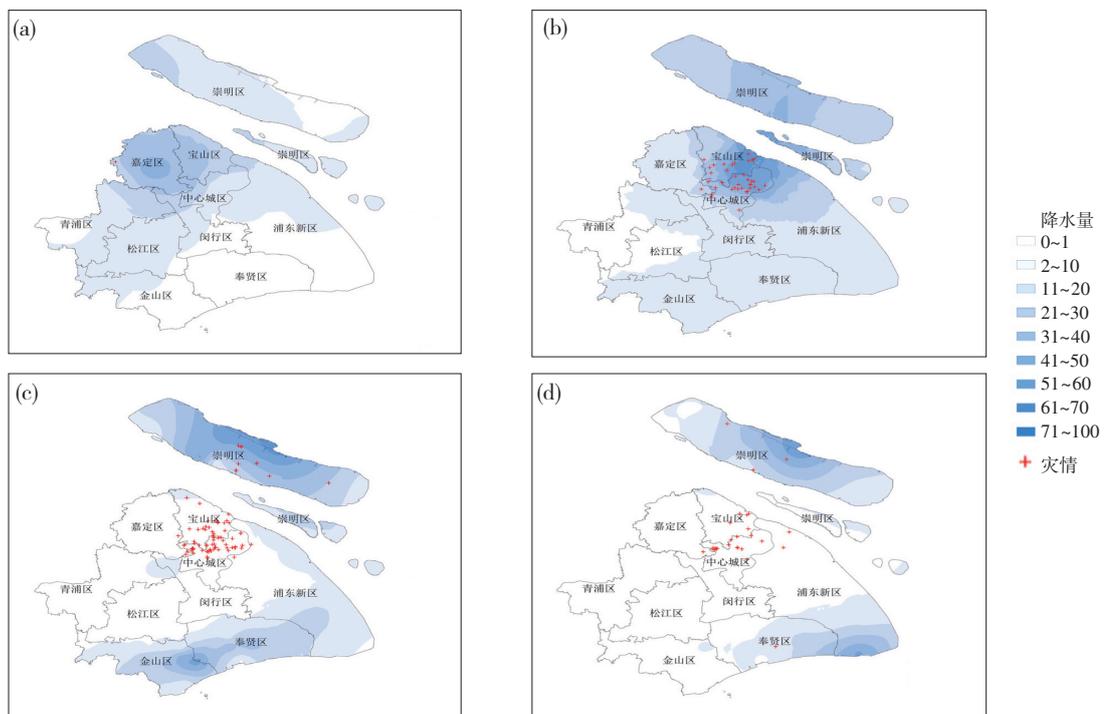


图4 上海2014年9月1日逐时降水量(阴影,单位: mm)与积水灾情数 D_{Σ} (红点,单位:起)空间分布 (a) 04—05时; (b) 05—06时; (c) 06—07时; (d) 07—08时

Fig. 4 Spatial distribution of hourly precipitation (shaded, unit: mm) and waterlogging disaster D_{Σ} (red dot, unit: number) on September 1, 2014 in Shanghai during (a) 04:00–05:00, (b) 05:00–06:00, (c) 06:00–07:00 and (d) 07:00–08:00.

图5给出2014年9月1日短时强降水过程上海部分地区自动站小时最大降水量 R_{max} (降水时段为05—07时)和积水灾情数 D_{Σ} 逐小时分布(积水灾情时段为05—08时)。从中可见,降水过程持续时间不长,中心城区、宝山区和崇明县的降水时间分别持续1 h、2 h和3 h,但短时降水强度大,尤其是中心城区,自动站降水测得的 R_{max} 达100.5 mm。中心城区出现的强降水导致在同1 h内有23起灾情,并导致后续3 h内仍有灾

情,中心城区过程总灾情数超过80起。宝山地区05时 R_{max} 达到45.8 mm,同1 h内有13起灾情。崇明地区在05时 R_{max} 达到41.7 mm,06时起有积水灾情。3个区域内,虽然崇明累积降水量 R_{Σ} 最大,达117.1 mm,但灾情数不足20起,明显低于其余两区。该降水过程表明,短时强降水达到一定量级以上,局地积水明显,且退水有延迟,但中心城区和其他区域下垫面不同,因此积水报警量有差别。

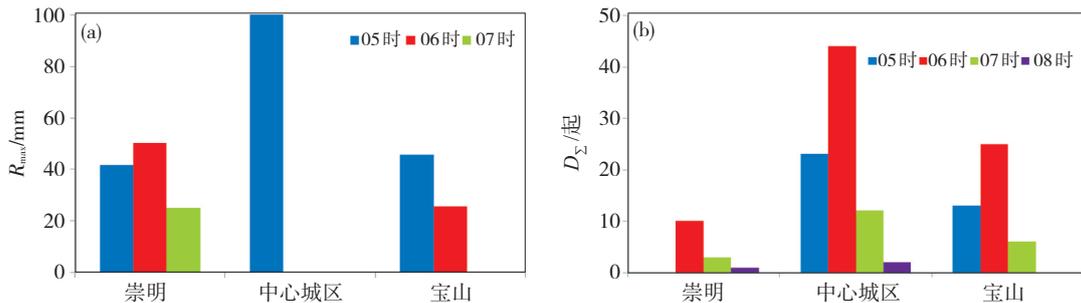


图5 2014年9月1日05—07时不同区域自动站小时最大降水量 R_{max} (a, 单位: mm)和05—08时积水灾情 D_{Σ} (b, 单位: 起)逐时分布

Fig. 5 (a) Hourly variations of R_{max} (unit: mm) from 05:00 BT to 07:00 BT and (b) waterlogging disasters D_{Σ} (unit: number) from 05:00 BT to 08:00 BT in different region on September 1, 2014 in Shanghai.

2.2.2 2015年8月24日倒槽降水过程

2015年8月24日受倒槽影响,上海嘉定、闵行等地区出现了强降水,局部地区达到大暴雨,1 h最大降水量达63.9 mm。降水导致全市69条道路积水,最大积水深度100 cm,142户居民家进水,灾情主要发生在嘉定区和闵行区。图6给出8月24日07—10时3 h累积降水量 R_{Σ} 和积水灾情07—13时 D_{Σ} 的分布,从中可见,上海西北角的嘉定以及和嘉定接壤的青浦、闵行和中心城区3 h累积降水量最大,达70 mm以上,局部区域达100 mm以上,灾情点相对密集。上述区域中人口和道路密度高的居住区受强降水影响最大,加重了强降水灾害的损失。

图7给出该过程07—10时青浦、闵行和嘉定最大小时降水量与积水灾情 D_{Σ} 的关系,从中可见,第1个时次当嘉定和青浦小时降水量接近20 mm时,没有积水灾情出现,闵行区1 h最大降水量达到63 mm,这个时次内就有少量的积水灾情。当各区07—08时内累积降水量达到60—100 mm时,区域积水灾情已显著增长,达上百个,且累积降水量越大,灾情接报持续时间越长。灾情峰值出现时间滞后于降水峰值出现时间。从几个时刻灾情分布看,90%以上的灾情点位于

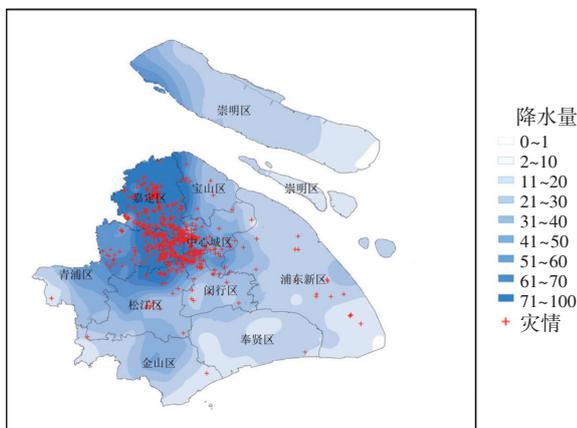


图6 上海市2015年8月24日07—10时3 h累积降水量 R_{Σ} (单位: mm)与07—13时积水灾情 D_{Σ} (红点, 单位:起)分布

Fig. 6 Spatial distribution of 3 h accumulative precipitation R_{Σ} (unit: mm) from 07:00 BT to 10:00 BT and waterlogging disasters D_{Σ} (red dot, unit: number) on August 24, 2015 in Shanghai.

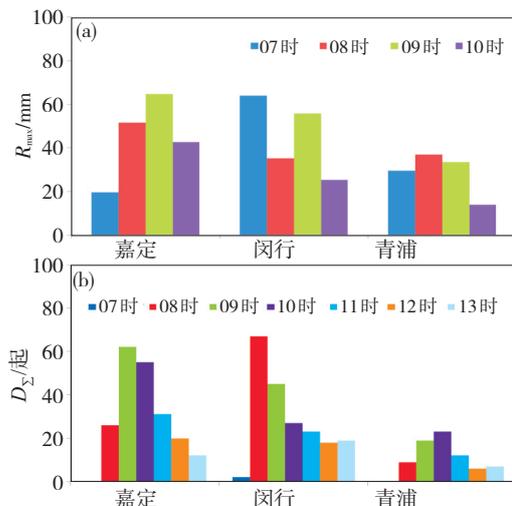


图7 上海2015年8月24日07—10时不同区域小时最大降水量(单位: mm)和07—13时积水灾情数 D_{Σ} (单位: 起)逐时分布

Fig. 7 Hourly variations of the largest precipitation (unit:mm) from 07:00 BT to 10:00 BT and the number of waterlogging disasters D_{Σ} (unit: number) from 07:00 BT to 13:00 BT in different region on August 24, 2015 in Shanghai.

1 h降水量30 mm以上或累积降水量超100 mm区域,且灾情有明显的滞后性。强降水区域面越大,积水灾情数越多。

2.3 积水阈值指标的建立及业务应用检验

2.3.1 上海城市人口密集区积水阈值指标

综上可知,1 h最大降水量 R_{\max} 、2 h降水量 R_2 与积水灾情 D_{Σ} 相关性较好,所以从 R_{\max} 和 R_2 中选取上海市中心城区积水临界阈值指标:中心城区 R_{\max} 达到30 mm,或 R_2 超过40 mm;其他区域 R_{\max} 达到35 mm,或 R_2 超过40 mm,则会出现明显积水灾情。

2.3.2 积水阈值指标的业务应用检验

根据2015年强降水积水个例的降水过程及积水灾情数据,对积水阈值指标开展业务检验。表2给出2015年强降水过程积水灾情数 D_{Σ} 与降水量、降水持续时间的统计结果,从中可见,中心城区2次降水过程, R_{\max} 接近或超过30 mm, R_2 均超过40 mm, R_{Σ} 超80 mm,积水灾情较多。其他区县降水过程均持续2 h以上,大部分过程 R_{\max} 超过35 mm, R_2 超过40 mm,也都有不同程度的积水灾情。2015年过程中也出现了影响崇明、南汇等地的降水过程, R_{\max} 超过50 mm,但积水灾情数较少。

表2 2015年强降水过程积水灾情数与降水量、降水持续时间的统计结果

Fig. 2 The statistical results of waterlogging disasters, precipitation and precipitation duration in 2015

日期	区县	R_{\max} / mm	R_2 / mm	R_{Σ} / mm	D_{Σ} /起
6月17日	中心城区	38.3	49.7	81.8	603
8月24日	中心城区	29.5	66.3	138.6	94
6月3日	崇明	35.0	88.5	88.5	2
6月27日	崇明	53.0	62.4	78.3	3
6月17日	浦东	22.1	56.8	95.5	192
7月26日	浦东南汇	53.3	/	53.3	5
8月23日	浦东南汇	63.9	85.3	176.4	202
7月25日	闵行	35.6	43.6	43.6	1
8月24日	闵行	63.9	99.2	208.3	231
8月24日	嘉定	51.5	71.2	198.5	261

综上可知,无论对于中心城区还是其他区县的人口密集区, R_{\max} 为30—40 mm作为积水临界阈值指标具有较好的参考价值。当台风过程中,降水强度高、持续时间长,累积降水达到138 mm以上时,积水灾情数均超过90起。梅雨强降水过程中,在小时降水量和累积降水量接近时,中心城区的积水灾情数远大于崇明地区。

3 结论与讨论

(1) 降水初始阶段的强度对积水阈值的确定至关重要。中心城区1 h降水量达到30 mm时,就可能出现积水,当中心城区1 h降水量达到70 mm时,积水灾情显著增多。对于区县人员密集区来说,1 h降水量达35 mm时,也可能出现积水。

(2) 积水灾情与降水强度、降水持续过程的长短、降水区域面有关。20 mm的降水持续2 h以上,积水灾情也会增多,且报警滞后性明显,因此对局地短历时强降水,2 h累积降水量达40 mm也可成为积水阈值。

(3) 积水灾情发生的时间较强降水发生时间具有明显的滞后性,一般在降水发生后1—2 h开始有报警,而对于累积强降水量,有可能滞后4—5 h。

当然,110积水报警频次的多寡与人口密度、地表状况以及人们的日常活动程度密切相关,同样强度的降水,人口集中区域的积水灾情报警数远远多于人口稀少区域。人口集中区域,尤其是旧屋和筒屋比例较大的人口集中区域,地下雨水管道陈旧,当有短时强降水发生时,积水灾情数多于其它区域。另一方面,当降水区域面大、且降水持续时间长时,一旦城市地下管网、河道和水系水容量超极限值时,则无论是上海城区还是郊区都会受到积水的影响。

参考文献:

- [1] 赵海军,王庆华.山东极端强降水天气环境参数特征[J].中国农学通报,2015,31(5):189-194
- [2] 王昊宇.暴雨及其衍生灾害的三维影视模拟技术初探[J].气象与环境学报,2014,30(6):169-172
- [3] 卢燕宇,田红.基于HBV模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J].气象,2015,41(6):755-760
- [4] 李庆祥,黄嘉佑.北京地区强降水极端气候事件阈值[J].水科学进展,2010,21(5):660-665
- [5] 高留喜,李静,刘畅,等.山东省短时极端强降水研究[J].气象科技,2014,42(3):482-487
- [6] 韩秀君,孙晓巍,李爽,等.辽宁暴雨致灾指标及灾害影响预评估[J].气象与环境学报,2014,30(6):80-84
- [7] 卢燕宇,田红.基于HBV模型的淮河流域洪水致灾临界雨量研究[J].气象,2015,41(6):755-760
- [8] 郭广芬,周月华,史瑞琴,等.湖北省暴雨洪涝致灾指标研究[J].暴雨灾害,2009,28(4):357-361
- [9] 温克刚,徐一鸣.中国气象灾害大典(上海卷)[M].北京:气象出版社,2006:1-222
- [10] 中国气象局.中国气象灾害年鉴(2014)[M].北京:气象出版社,2014:1-222
- [11] 史军,崔林丽,杨涵涌,等.上海气候空间格局和时间变化研究[J].地球信息科学学报,2015,17(11):1348-1354
- [12] Jun Shi, Linli Cui. Characteristics of high impact weather and meteorological disaster in Shanghai, China [J]. Natural Hazards, 2012, 60: 951-969
- [13] Yong Shi, Chun Shi, Shiyuan Xu, et al. Exposure assessment of rain-storm waterlogging on old-style residences in Shanghai based on scenario simulation [J]. Natural Hazards, 2010, 53: 259-272
- [14] 张振国,温家洪.基于情景模拟的城市社区暴雨积水灾害危险性评价[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):478-482
- [15] 史军,顾宇丹,穆海振,等.上海城市暴雨和大风灾害链的研制[C]//2014年国家综合防灾减灾与可持续发展论坛文集.北京:中国社会科学出版社,2014:82-89

(责任编辑:唐永兰)