

尤凤春,郭丽霞,史印山,等. 2013. 北京强降雨与道路积水统计分析及应用. 气象,39(8):1050-1056.

北京强降雨与道路积水统计分析及应用^{*1}

尤凤春¹ 郭丽霞² 史印山³ 吴宏议¹

1 北京市气象台,北京 100089
2 唐山市气象局,唐山 063000
3 河北省气候中心,石家庄 050021

提 要: 利用 2007—2011 年汛期(6—8 月)北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室每日发布的汛情通报、北京市 20 个气候站日降雨量和 200 多个自动气象站逐小时降雨量监测数据,对近 5 年北京强降雨及降雨强度与城区出现道路积水的关系进行统计分析,找出北京城区出现道路积水的降雨量特征、小时降雨强度和 2 h 降雨量道路积水临界指标。通过在 2011 年汛期(6—8 月)10 次道路积水中应用表明,该道路积水临界指标具有较好的参考价值,可为今后北京道路积水预报服务工作提供参考依据。

关键词: 道路积水, 降雨强度, 临界指标, 分析, 应用

中图分类号: P449 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.08.012

Correlation Analysis and Application of Heavy Rainfall and Road Waterlogging in Beijing

YOU Fengchun¹ GUO Lixia² SHI Yinshan³ WU Hongyi¹

1 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089
2 Tangshan Weather Bureau, Tangshan 063000
3 Hebei Province Climate Center, Shijiazhuang 050021

Abstract: The Flood Situation Reports released by Beijing Municipal Flood and Drought Control Headquarters Office from 2007 to 2011, daily rainfall data from 20 climate stations and hourly rainfall data from more than 200 automatic weather stations in Beijing are used to make statistical analyses of correlation between heavy rainfall intensity and road waterlogging in Beijing in the past five years, in order to find out the rainfall features, critical indicator of hourly rainfall intensity and road waterlogging caused by rainfall in two hours in Beijing urban area. After applied in road waterlogging 10 times during the flood season (June to August) in 2011, this critical indicator of road waterlogging is proved to have good reference values for road waterlogging forecasting service in the future.

Key words: road waterlogging, rainfall intensity, critical indicator, analysis, application

引 言

北京地处华北平原,北依燕山,西靠太行山,东邻渤海,三面环山,地形极为复杂;北京作为大城

市,城市热岛作用越来越显著,它使空气层结不稳定,城市上空的空气对流发展旺盛,城区和郊区湿度差也逐渐增大(Landsberg,1981),这均有利于形成对流云和对流性降雨天气,包括各种强度的强降雨和暴雨事件;同时受季风气候影响,降雨主要集中

^{*} 北京市科学技术委员会绿色通道项目(Z090506016609001)和国家“十一五”科技支撑计划重点项目课题(2008BAC37B05)共同资助
2012 年 6 月 28 日收稿; 2012 年 12 月 12 日收修定稿
第一作者:尤凤春,主要从事气象预报服务关键技术研究. Email:yfch@sina.com

在夏季,6—8月占全年降雨量的70%~76%。陈双等(2011)对复杂地形下雷暴增强个例进行了研究,指出雷暴第一阶段下山增强,地形强迫起着主要作用,具体表现在三个方面:(1)地形斜坡使得雷暴冷池流出下山加速与稳定维持的偏南气流形成了强的辐合区;(2)地形抬升使得偏南暖湿入流强烈地上升,从而加剧了对流的发展;(3)地形抬高了冷池出流高度,使得出流与近地面偏南气流构成随高度顺转的低层垂直风切变,低层暖空气之上有冷平流叠加,使得雷暴前方的动力和热力不稳定增强。郭英莲等(2012)对“7.15”宜昌大暴雨的地形影响特征进行了研究,表明地形对降水的触发主要有两方面的作用:一方面为地形迎风坡抬升触发作用,另一方面为地形对近地层流场的影响造成辐合触发。隋迎久等(2010)通过对高时空分辨率的模拟结果分析,揭示了两条雷暴带的形成与山地附近环流之间的相互作用关系。汪正林等(2006)研究了西昌发射场特殊地形及地形梯度对其暴雨天气的影响。吴庆梅等(2012)研究表明,北京地形的抬升作用对暴雨有明显增强作用。段丽等(2009)用SA雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析中指出,三次局地暴雨和大暴雨强降雨前,近地面平原东南风和边界层偏西风的垂直风廓线结构在地形作用下对暴雨落区形成的影响是一致的。吴庆梅等(2009)研究指出,北京特殊的箕簸型地形和超大城市热力环流对北京局地暴雨的落区和强度有重要影响。以上研究均表明,受地形、热岛及季节等因素的共同影响,极易产生局地暴雨天气,而这类暴雨往往具有明显的中尺度特征,其局地性、突发性强,时间短、强度大、分布不均都是这类暴雨的特点。廖晓农等(2011)利用北京地区人工观测站和自动站观测资料,分析了北京暴雨频次、落区、影响范围、持续时间及降雨强度等,得到了在连续少雨期,暴雨发生的平均频数减少,暴雨的局地性和短历时性明显增加。马京津等(2012)对北京市强降雨分区及重现期进行了研究,提出20世纪90年代之后北京的短历时强降雨呈现出局地性的特征,降水分布不均,强降水中心大致成东北—西南向带状分布。

随着城市发展及气候变暖导致局地强降雨事件增多,而城市防涝设施并没有得到同步改善,致使城市易积水程度和积水范围逐渐加大,内涝损失不断

加重。城市快速发展,增加了内涝灾害发生的频率,内涝灾害损失也以前所未有的速度增长。城市对内涝及其衍生灾害的脆弱性越来越明显,对气象预报服务工作提出了更高要求。

北京作为大城市和首都,夏季短时强降雨常常造成道路积水,对上下班高峰城市交通影响很大。2004年7月10日,北京出现了局地暴雨天气,这次暴雨落区主要集中在城区,由于降雨强度大、时间集中,一些交通干道上的立交桥下和部分路段的排水设备满足不了当时的排水需求,从而造成严重的城市积涝,导致部分路段交通瘫痪(化全利等,2005)。据北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室2011年6月24日发布的汛情通报报道,2011年6月23日局地大暴雨使全市有29处桥区或重点道路出现积滞水,造成交通中断的有22处;全市有3条地铁线路出现险情,这是近十几年来北京较强的降雨天气过程。

由此可见,对北京强降雨与道路积水的关系进行分析显得尤为重要。以前由于北京加密降雨量和道路积水数据欠缺等原因,有关这方面的分析工作较少。本文重点分析北京夏季强降雨与道路积水的统计关系,并找出道路积水时降雨强度临界指标,为预报服务提供参考依据。

1 资料及方法

所用资料为2007—2011年汛期(6—8月)北京市20个气候站20时至20时日降雨量数据,其中降雨量多年平均值选取1971—2000年;北京市200多个自动气象站逐小时降雨量数据;北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室每日发布的汛情通报,其中包括具体积水时间、地点、重点地区的积水深度及影响程度等。

采用北京市20个气候站日降雨量及自动气象站逐小时降雨量与道路积水进行统计分析的方法。为便于将自动站小时雨强等与道路积水进行相关分析,首先对每个积水个例分别统计出其特征值。包括:积水深度、影响程度、强降雨过程中积水区域内小时雨强最大值、2h累积降雨量最大值……6h累积降雨量最大值及不同等级小时降雨出现频次等。其次主要根据积水深度,同时也考虑积水影响程度,将所有积水个例分成3级:影响很大、影响较大、有

一定影响,并分别赋值 3、2、1。最后将道路积水影响程度(3、2、1)分别与所对应的强降雨特征值求相关,得到道路积水与不同小时降雨量等之间的相关系数。

2 近 5 年北京汛期降雨量与道路积水的关系

2007—2011 年汛期(6—8 月),根据北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室每日发布的汛情通报统计,北京市共出现了 29 次道路积水。

2.1 近 5 年汛期降雨量与同期道路积水的关系

2007—2011 年汛期,经统计可见(表 1),不同年份汛期降雨量不同,其同期道路积水出现的次数也不同。其中,2011 年汛期降雨量最多,为 450.7 mm,降雨距平百分率为 7.1%,与常年相比降雨量偏多,且近 5 年首次超过常年值,其同期道路积水出现次数也最多,有 10 次;2008 年汛期次之,降雨量为 416 mm,降雨距平百分率为-1.2%,接近常年,出现了 8 次道路积水。总体来看,汛期降雨量与同期道路积水关系较为密切。

表 2 2007—2011 年汛期各月北京道路积水与同期降雨量统计结果
Table 2 Monthly statistics of road waterlogging and rainfall in Beijing
in flood seasons from 2007 to 2011

时间	6 月		7 月		8 月	
	积水次数	降雨量/mm	积水次数	降雨量/mm	积水次数	降雨量/mm
2007 年	0	61.4	0	136.6	2	80.1
2008 年	3	111.6	3	147.1	2	157.3
2009 年	0	68.9	5	154.3	1	83.9
2010 年	2	66.9	1	70.5	0	118.9
2011 年	1	106.4	6	235	3	109.2
平均	1.2	83.04	3	148.7	1.6	109.88

期道路积水密切相关。

3 自动气象站小时雨量不同等级降雨出现频次分析

使用 2007—2010 年汛期北京市 200 多个自动气象站逐小时降雨量数据,并将其小时降雨量划分成不同等级,分别统计出小时降雨量 ≥ 10 mm、 ≥ 20 mm、 ≥ 30 mm、 ≥ 36 mm、 ≥ 40 mm、 ≥ 50 mm、 ≥ 60 mm 出现的频次。

表 1 2007—2011 年汛期北京道路
积水与同期降雨量统计结果
Table 1 Statistics of road waterlogging
and rainfall in Beijing in flood seasons
from 2007 to 2011

汛期	积水次数	汛期降雨量 /mm	降雨距平 百分率/%
2007 年	2	278.2	-33.9
2008 年	8	416	-1.2
2009 年	6	307.1	-27.0
2010 年	3	256.2	-39.1
2011 年	10	450.7	7.1

2.2 近 5 年汛期各月降雨量与同期道路积水的关系

2007—2011 年汛期,经统计可见(表 2),各月的降雨量不同,其道路积水出现的次数也不同。其中,7 月相对 8 和 6 月来说降雨量最大,平均为 148.7 mm,出现的积水次数最多,平均为 3 次;8 月降雨量次之,道路积水也处于第二位,平均为 1.6 次;6 月降雨量最少,道路积水也最少。另外,从 7 月的不同年份来看,2011 年 7 月降雨量最大,为 235 mm,其道路积水出现次数多达 6 次。可见各月降雨量与同

3.1 逐年汛期统计分析

由 2007—2010 年汛期自动气象站小时雨量不同等级降雨出现频次(图 1)可见,不同等级降雨在各年中出现频次不同,并存在明显差异。其中 2008 和 2009 年不同等级降雨出现频次明显比 2007 和 2010 年多,而 2008 和 2009 年明显比 2007 年和 2010 年出现的道路积水次数多(表 1),可见降雨强度与道路积水的关系较为密切。而 2008 与 2009 年的主要差别是前者降雨强度较弱时出现频次较多;

当降雨强度在 ≥ 36 mm 以上时后者出现频次明显偏多。2007 和 2010 年不同等级降雨出现频次均没有明显差异。北京汛期自动气象站小时降雨量 ≥ 10 mm 出现频次最多,其中最少的年份为 38 次,最多的年份高达 53 次,平均 45.8 次; ≥ 20 mm 各年汛

期出现频次均明显减少,平均 29.3 次; ≥ 30 mm 平均 20.3 次; ≥ 40 mm 平均 12.3 次; ≥ 50 mm 平均 6.3 次; ≥ 60 mm 平均 4.5 次。逐年汛期均是随着降雨强度的增加,其出现频次逐渐减少。

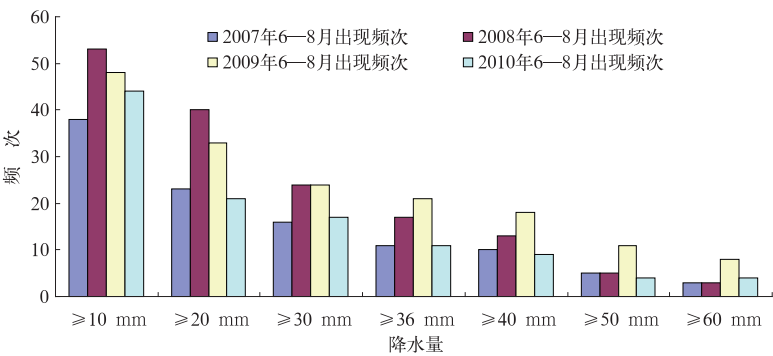


图 1 2007—2010 年汛期自动气象站小时雨量不同等级降雨出现频次
Fig.1 Frequency of rainfalls in different intensities in one hour observed by automatic weather station in flood seasons from 2007 to 2010

3.2 汛期逐月统计分析

由 2007—2010 年汛期逐月自动气象站小时雨量不同等级降雨出现频次(图略)可见,2007—2010 年汛期各月不同等级降雨出现频次不同。总趋势是 7 月不同等级降雨出现频次均最多,8 月次之,6 月最少。这与 7 月道路积水出现次数最多,6 月最少,8 月介于两月之间(表 2)一致。可见各月降雨强度与各月道路积水出现次数趋势非常一致,这说明在较强降雨过程中,降雨强度是造成道路积水的关键因子。北京汛期各月自动气象站小时降雨量 ≥ 10 mm 出现频次最多,其中最少的月份为 54 次,最多的月份高达 74 次,平均 61 次; ≥ 20 mm 各月出现频次均明显减少,平均 39 次; ≥ 30 mm 平均 27 次; ≥ 40 mm 平均 16 次; ≥ 50 mm 平均 8 次; ≥ 60 mm 平均 6 次。汛期各月均是随着降雨强度的增加,其出现频次逐渐减少。

4 降雨强度与道路积水相关分析

根据北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室每日发布的汛情通报统计,2007—2010 年汛期,北京市共出现了 19 次道路积水。其中有 17 次道路积水主要出现在城区。使用 2007—2010 年汛期北京市 200 多个自动气象站逐小时降雨量数据,统计降雨

强度与道路积水的关系。

4.1 降雨强度与道路积水相关分析

首先将 19 次道路积水按影响程度(积水深度和交通影响)划分为 3 个等级。当积水深度 <0.5 m,使部分道路出现短时积水,对交通有影响时定为 1 级(12 次);当积水深度 ≥ 1 m,使大范围交通中断,影响很大时定为 3 级(4 次);当 $0.5\text{ m}\leq$ 积水深度 <1 m,使部分路段交通中断,影响较大时定为 2 级(3 次)。

将不同等级道路积水分别与出现强降雨时段内积水区域自动气象站 1 h,2 h,⋯,6 h 最大累积降雨量及小时雨量 ≥ 36 mm 出现站数、持续出现站数和小时雨强 ≥ 40 、50、60 和 70 mm 出现站数求相关,得到表 3 相关分析结果。

因总样本数为 19,当相关系数 $r=0.55$ 时,就通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验;当相关系数 $r=0.67$ 时,就通过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。由表 3 可见,5 和 6 h 最大降雨量分别通过 $\alpha=0.01$ 的显著性水平检验;其余各项均通过 $\alpha=0.001$ 的显著性水平检验。

从不同小时最大累计降雨量来看,2 h 最大降雨量与不同等级道路积水的关系最为密切,其相关系数达到 0.81,其次是小时最大降雨量,而 3、4、5 和 6 h 最大降雨量的相关系数逐渐减小,说明其相

关程度依次降低。在小时降雨出现站数中,小时降雨量 ≥ 60 mm 出现站数与不同等级道路积水的关系最为密切,其相关系数达到 0.89。

由以上分析可知,在选择强降雨导致道路积水

临界指标时,不仅要考虑小时雨强,还要考虑 2 h 降雨量,最好再考虑小时雨强出现的站数,因为它代表着强降雨中心的范围。即强降雨中心极值越大、范围越大,导致道路积水的可能性就越大。

表 3 道路积水与不同小时降雨量和小时雨强及不同等级雨强出现站数相关分析结果
Table 3 Correlation analysis results of road waterlogging and rainfall in different hours, raininess in one hour, number of stations with different level raininess

	1 h 最大 降雨	2 h 最大 降雨	3 h 最大 降雨	4 h 最大 降雨	5 h 最大 降雨	6 h 最大 降雨	小时 ≥ 36 mm 出现站数	小时 ≥ 36 mm 持续出现 站数	小时 ≥ 40 mm 出现站数	小时 ≥ 50 mm 出现站数	小时 ≥ 60 mm 出现站数	小时 ≥ 70 mm 出现站数
相关系数	0.76	0.81	0.73	0.70	0.65	0.61	0.79	0.77	0.85	0.86	0.89	0.87

4.2 道路积水临界指标选取

由 2007—2010 年汛期 19 个道路积水个例自动气象站不同小时降雨量最大值可知,大部分个例的主要降雨均集中出现在 1~2 h 以内,一般情况下 3、4、5 和 6 h 累积降雨量并没有明显变化,多小时累积降雨量值基本重合(图略)。由此可见,北京汛期强降雨特点是:降雨持续时间短、降雨强度大,其中 1~2 h 降雨量与道路积水的关系最为密切,可以从

中找出道路积水临界指标。

北京城区目前大部分排水管道均按照 0.5、1 和

2 年一遇标准设计;城区市政设计路面排水能力为每小时 40 mm 的降雨量,设计标准为 2~5 年一遇。当小时降雨强度超过 40 mm 的排水设计能力时,就会出现道路积水(化全利等,2005)。此外,由于 2 h 降雨量与道路积水相关性也较好,相关系数达到 0.81,所以主要从小时雨强和 2 h 降雨量中选取道路积水临界指标。

为使所选取的道路积水临界指标针对性更强,对 2007—2010 年汛期出现的 19 次道路积水个例按以上划分的 3 个等级分别进行统计(表 4)。

表 4 不同等级道路积水临界指标统计结果
Table 4 Statistics of critical indicator of different level road waterlogging

有影响(1 级) /年月日	小时最大 降雨/mm	2 h 最大 降雨/mm	影响较大(2 级) /年月日	小时最大 降雨/mm	2 h 最大 降雨/mm	影响很大(3 级) /年月日	小时最大 降雨/mm	2 h 最大 降雨/mm
20080623	48.8	51.9	20070806	56.9	63.2	20070801	91.7	133.7
20080625	41.6	45.9	20090713	65.8	70.5	20080613	129.2	132.8
20080730	68.3	97.5	20090809	65.3	73.6	20080704	73.0	106.6
20080810	49.9	58.2				20090731	90.9	130.1
20080814	51.1	71.6						
20080715	22.0	39.7						
20090720	82.6	95.4						
20090723	59.7	63.1						
20090724	42.9	48.3						
20100601	41.1	46.5						
20100613	28.1	35.8						
20100709	46.9	67.2						
最小值	22.0	35.8	最小值	56.9	63.2	最小值	73.0	106.6
最大值	82.6	97.5	最大值	65.8	73.6	最大值	129.2	133.7
平均值	48.6	60.1	平均值	62.7	69.1	平均值	96.2	125.8

由表 4 可见,在 2007—2010 年汛期 19 个道路积水个例中,有 17 个道路积水个例小时雨强和 2 h 降雨量均 ≥ 40 mm,只有两次例外(20080715 和

20100613,即为 2008 年 7 月 15 日和 2010 年 6 月 13 日),小时雨强分别为 22.0 和 28.1 mm,2 h 降雨量分别为 39.7 和 35.8 mm。

由表 4 可以进一步归纳出北京道路积水临界指标,见表 5 所示。

(2005)的结论一致,即当小时雨强超过 40 mm 的排水设计能力时,就会出现道路积水。

表 5 总结的道路积水临界指标与化全利等

表 5 北京道路积水临界指标
Table 5 Cristical indicator of road waterlogging in Beijing

	有可能出现道路积水	出现道路积水， 并有一定影响	出现道路积水， 且影响较大	出现道路积水， 且影响很大
小时雨强最大值	≥20 mm	≥40 mm	≥50 mm	≥70 mm
2 h 降雨量最大值	≥35 mm	≥45 mm	≥60 mm	≥100 mm

5 道路积水临界指标在 2011 年汛期中的应用

根据北京市人民政府防汛抗旱指挥部办公室每日发布的汛情通报统计,2011 年汛期(6—8 月),北京共出现了 10 次道路积水。6 月出现 1 次,7 月出

现 6 次,8 月出现 3 次,其中 7 月出现次数最多,6 月 23 日最强。

针对 10 次道路积水,从北京市 231 个自动气象站逐小时降雨监测数据中找出强降雨时积水区域内小时最大雨强和 2 h 降雨量,并与总结出的道路积水临界指标进行对比,其结果见表 6 所示。

表 6 2011 年汛期北京道路积水与小时雨强、2 h 降雨量及影响情况

Table 6 Road waterlogging, raininess in one hour and two hours, and the influence in Beijing in flood season of 2011

强降雨出现时间	积水区域小时 最大雨强/mm	积水区域 2 h 最大降雨量/mm	影响情况
2011 年 6 月 23 日傍晚,在下班晚高峰	128.9	173.2	有 29 处桥区或重点道路出现积滞水,造成交通中断有 22 处,影响很大。
2011 年 7 月 16 日 20 时以后	85.5	88.9	有 9 处道路瞬时滞水,但未造成交通中断,有一定影响。
2011 年 7 月 19 日 20 时以后	44.4	74.0	有 2 处桥区出现短时滞水,但未造成交通中断,有一定影响。
2011 年 7 月 20 日 17 时以后	59.8	104.9	有 3 处桥区或道路滞水,但未造成交通中断,有一定影响。
2011 年 7 月 24 日午后到夜间	83.7	119.2	有 24 处出现积滞水,造成交通中断有 14 处,影响很大。
2011 年 7 月 26 日 21 时以后	76.2	99.1	有 11 处道路出现短时滞水,造成部分道路交通中断,影响较大。
2011 年 7 月 29 日早晨,在上班早高峰	50.6	60.8	有 1 处桥区出现积滞水,造成交通中断,影响较大。
2011 年 8 月 9 日傍晚前后	58.1	76.7	有 3 处桥区或道路出现短时滞水,但未造成交通中断,有一定影响。
2011 年 8 月 14 日 0 时前后	80.2	93.0	有 2 处桥区出现短时滞水,但未造成交通中断,有一定影响。
2011 年 8 月 26 日早晨到上午,在上班早高峰	69.2	95.7	有 3 处桥区和多处道路出现积水,造成部分道路交通中断,影响较大。

由表 6 可见,2011 年汛期北京出现的 10 次道路积水中,积水区域内小时最大雨强和 2 h 最大降雨量均分别在 40 和 45 mm 以上,其最小值分别为 44.4 和 74.0 mm(2011 年 7 月 19 日)。其中有两次道路积水影响很大(2011 年 6 月 23 日和 2011 年 7 月 24 日),其小时雨强(128.9 和 83.7 mm)和 2 h

降雨量(173.2 和 119.2 mm)分别超过≥70 mm 和 ≥100 mm 临界指标值。2011 年汛期北京 10 次道路积水全部在临界指标范围内。

另外,2012 年 7 月 21 日中午前后到后半夜,北京出现了近 61 年来最强降雨过程,这次强降雨小时雨强最大值为 100.3 mm,2 h 累计降雨量最大值为

165.3 mm, 分别超过影响很大级别(70 和 100 mm) 的临界指标。这次强降雨造成北京城区有 95 处桥区或道路因积水中断, 积水深度达到两米以上的有三处(广渠门桥、双营铁路桥和莲花桥), 对城市交通影响很大。

道路积水临界指标通过在 2011 年汛期及 2012 年 7 月 21 日强降雨过程中应用表明, 所有道路积水个例的降雨强度均在临界指标范围内, 并且其影响程度也与分级结果一致, 这说明所选取的临界指标具有较好的参考价值。由于目前北京道路积水个例及数据相对较少, 其道路积水临界指标还需今后随着积水个例的不断增加, 对其进行订正。

6 主要结论

通过以上分析, 可以得出以下主要结论:

(1) 汛期及各月降雨量均与道路积水次数成正比相关。

(2) 汛期各月自动站降雨量均是随着降雨强度的增加, 其出现频次逐渐减少。

(3) 汛期强降雨特点是降雨持续时间短、降雨强度大, 其中 1~2 h 降雨量与道路积水关系最为密切。

(4) 小时雨强和 2 h 降雨量大小与出现道路积水可能性及影响成正比。当小时雨强和 2 h 降雨量分别 ≥ 40 mm 和 ≥ 45 mm 时, 就会出现道路积水,

并对城市交通造成一定影响。

(5) 2011 年汛期 10 次道路积水和 2012 年 7 月 21 日道路积水全部在临界指标范围内, 这说明所选取的临界指标具有较好的参考价值。但今后随着积水个例的增加, 还需对其进行订正。

参考文献

- 陈双, 王迎春, 张文龙, 等. 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究. 气象, 37(7): 802-813.
- 段丽, 卞素芬, 俞小鼎, 等. 2009. 用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析. 气象, 35(3): 21-28.
- 郭英莲, 吴翠红, 王继竹, 等. 2012. “7. 15”宜昌大暴雨的地形影响特征. 气象, 38(1): 81-89.
- 化全利, 吴海山, 白国营. 2005. 2004 年 7 月 10 日北京城区暴雨分析及减灾措施. 水文, 25(3): 63-64.
- 廖晓农, 魏东, 石增云, 等. 2011. 连续少雨背景下北京暴雨的若干特征. 高原气象, 30(3): 749-759.
- 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.
- 隋迎久, 蔡丽娜, 王昌双. 2010. 一次山地环流激发对流天气的数值模拟. 气象, 36(5): 75-84.
- 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. 气象, 35(12): 58-64.
- 汪正林, 党建涛. 2006. 特殊地形及地形梯度对西昌发射场暴雨的影响. 气象, 32(12): 36-42.
- 吴庆梅, 杨波, 王国荣, 等. 2012. 北京地形和热岛效应对一次 β 中尺度暴雨的作用. 气象, 38(2): 174-181.
- Landsberg H E. 1981. The Urban Climate. New York: Academic Press, 275.