

田华,王志,戴至修,等,2018.公路积水阻断与降雨关系的探讨[J].气象,44(5):684-691.

公路积水阻断与降雨关系的探讨*

田 华 王 志 戴至修 李宛育

中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

提 要: 利用 2011—2013 年全国公路积水阻断资料,分析了公路积水阻断的时空分布特征,并对公路积水阻断与不同时效降雨的关系进行了探讨。结果表明,公路积水阻断事件发生时间主要集中在 5—9 月,其中 7 月最为频繁,公路积水阻断事件以 07:00—14:00 为第一多发时段,16:00—20:00 为次多发时段。公路积水阻断与前 24 h 内的降水关系更为密切。区域不同,公路积水阻断随各强度降水变化的特点也不尽相同。经过开立方根处理后的降水因子与公路积水阻断发生的频次服从于高斯分布。其中,区域 1 公路积水阻断与处理后的 1 h 最大降水因子关系密切,相关系数大于 0.91;区域 2 和 3 公路积水阻断与处理后的 6 h 最大降水因子关系密切,相关系数均在 0.8 以上;区域 4 公路积水阻断则与处理后的 24 h 最大降水因子关系密切,相关系数在 0.75 左右。对于任何一个区域,诱发公路积水阻断的不同时效降水都处于一个较大的空间。对于给定的降水量只能判断公路积水阻断发生的可能性大小。

关键词: 公路,积水阻断,降水

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.009

Research on Relationship Between Highway Traffic Blocking Induced by Waterlogging and Precipitation

TIAN Hua WANG Zhi DAI Zhixiu LI Wanyu

CMA Public Weather Service Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on the 2011—2013 official records of nationwide highway traffic blocking induced by surface water, this study analyzes the spatio-temporal characteristics of highway traffic blocking induced by waterlogging, and investigates the correlation between highway waterlogging and precipitation in different durations. From the aspect of time, the yearly blocking is mainly recorded from May to September, especially in July; the daily blocking mainly occurs in 07:00—14:00, and next in 16:00—20:00. The highway waterlogging blocking is highly related to the precipitation in the latest 24 h, and the correlation between the highway traffic blocking by waterlogging and rainfall with different intensities varies among the regions. The correlation between the precipitation factor after dealing with cube root and the frequency of highway traffic blocking by waterlogging accords with the Gaussian distribution. From the aspect of space, the concerned blocking in Region 1 is closely related to hourly maximum precipitation factor with correlation coefficient over 0.91; the ones in Region 2 and Region 3 are closely related to 6 h maximum precipitation factor with correlation coefficient over 0.8; and the ones in Region 4 are closely related to 24 h maximum precipitation factor with correlation coefficient about 0.75. However, no matter in which region the highway traffic blocking induced by waterlogging occurs, the characteristics of precipitation are greatly different, so we can only estimate the risk probability of highway traffic blocking induced by waterlogging from the specific precipitation forecast.

Key words: highway, blocking by waterlogging, precipitation

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306043 和 GYHY201406029)共同资助

2016 年 8 月 30 日收稿; 2017 年 7 月 20 日收修定稿

第一作者:田华,主要从事应用气象预报服务工作. Email:tianh1@cma.gov.cn

引言

公路作为现代交通运输的主要工具,在国民经济增长和日常生活中发挥着越来越重要的作用。现代公路运输体系所追求的快速、高效和安全,在很大程度上受气象因素的影响和制约。雨、雪、雾等不利气象条件会导致公路设施损毁、交通延误、交通事故、环境污染等,增加了出行与物流成本。近年来在气候变化的影响下,极端强降水事件发生的频率呈增多态势(秦大河等,2012),由此给交通运输造成了严重的影响。如2012年“7·21”特大暴雨使得北京市城市道路积水95处,郊区12个乡镇道路中断;地面60多条公交受阻;台风苏拉(2012年第9号强台风)、“达维”(2012年第10号台风)和“海葵”(2012年第12号强台风)对东部沿海各省(市)公路、铁路和航空等造成了很大的影响,导致多地交通一度瘫痪。

北欧、美国、加拿大、日本等经济发达的国家和地区在道路交通安全与气象条件的关系研究起步较早,研究也较深入,已经建立了完善的高速公路气象监测及预报业务系统,并基于能量辐射平衡方法开展了路面积水、结冰等专业交通气象预报和服务(Jacobs and Raatz, 1996; Shao and Lister, 1996; Crevier and Delage, 2001; Sass, 1992)。另外,还开展了降水、雪等气象灾害对交通事故、交通流量、运行管理等影响研究。如20世纪70年代,美国学者Sherretz and Farhar(1978)基于简单的线性回归等方法,统计研究了降水与交通事故之间的联系。还有一些学者(Cools et al, 2010; Andreescu and Frost, 1998)对气象条件与行车速度、车流量以及交通事故的发生概率的关系进行了细致的评估。国内交通管理部门针对公路积水影响行车安全问题,在积水条件影响行车安全的机理试验(张弛等,2014)、公路积水处治方法(张铭,2014;杨旭光,2014)、不同地形条件下公路积水对路基影响(景宏君,2004)以及公路积水监测预警方法(张星刚等,2015;董玉波,2013)等方面都开展了研究。气象部门针对高速公路和城市道路服务的需求,开展了一些关于能见度(贺皓等,2003;吴兑等,2006;吴和红等,2010)、路面温度(朱承瑛等,2009;曲晓黎等,2010;刘熙明等,

2004;田华等,2009;吴晟等,2006)、公路损毁(狄靖月等,2015)、城市内涝积水(尹志聪等,2015)等方面的监测、预报技术方法研究及应用系统开发,在实际工作中取得了很好的服务效果。此外,在气象灾害对公路交通安全的影响机理、气象条件与交通事故关系分析以及防范对策等方面的研究工作也取得了可喜的进展(刘熙明等,2003;罗慧等,2007;凌良新等,2008;陈方等,2013;李迅等,2014)。但是,有关道路积水与降雨关系方面的分析工作比较少,都是针对单个城市或者某个地区,如尤凤春等(2013)分析了北京强降雨与道路积水的关系,找出北京城区出现道路积水的降雨量特征和临界指标,为北京道路积水预报服务工作提供了参考依据。全国范围的此类研究并不多见。在全球气候变化的大背景下,研究探讨公路积水阻断与降雨的关系,建立科学有效的预警方法,对于预防和减轻公路交通阻断或事故风险具有非常重要的指导意义。本文利用近年来公路积水阻断资料,探讨不同强度降水与公路积水阻断的关系,分析公路积水阻断的关键气象影响因素,为进一步做好夏季公路交通气象预报服务提供科学参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文使用的公路积水阻断资料来源于交通运输部路网中心提供的2011—2013年公路降雨(积水)阻断信息资料,包括阻断发生时间、受阻路段、阻断原因和通行提示等信息;样本数为428个,共27个省(区、市)。气象资料为国家气象信息中心提供的同期逐小时降水观测资料。

1.2 公路阻断位置与气象站点资料匹配方法

由于交通管理部门记录公路积水阻断点位置,通常使用的是道路桩号信息,为了便于分析公路积水阻断路段与降雨的关系,本文利用ArcGIS路径分析工具创建高速公路、国道等基础道路数据的路径文件,将道路阻断信息处理生成与路径文件相匹配的事件表,利用生成路径事件层工具将阻断信息定位到道路路径上,从而获取阻断点的地理经纬度信息,最后,利用ArcGIS选取出积水阻断点最邻近的气象站点。

2 公路积水阻断的空间和时间特征

分析 2011—2013 年 27 个省(区、市)公路积水阻断样本和地点分布(图 1)。从图上可知,降雨导致的公路积水阻断事件分布范围广泛,主要集中在我国东北、华北北部、西北、西南以及江南和华南地区,其中,以山西省最为多发,累计 100 余次;重庆市次之,累计 60 余次。燕科和董雷宏(2009)对 2006—2007 年为期 1 年的全国公路交通阻断信息数据进行统计与分析时指出,阻断信息的地区分布与当地信息报送工作开展的积极性及当地公路网密度和通行环境有密切关系。图 2 为 2011—2013 年全国范围内发生公路积水阻断事件的时间分布。从图上可以看出,公路积水阻断事件月变化特征与我国汛期降雨的季节分布特征一致,公路积水阻断事件主要集中在 5—9 月,以 7 月最为频繁,6 和 8 月次之。另外,公路积水阻断事件发生的日时间变化呈双峰曲线型特征,07:00—13:00 为第一多发时段,

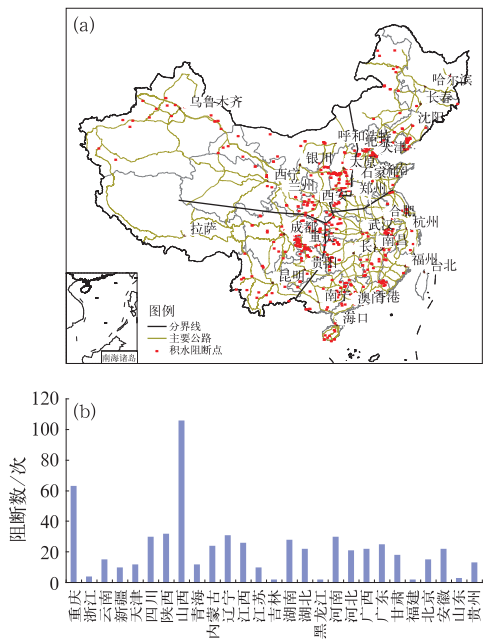


图 1 2011—2013 年公路积水阻断事件的(a)积水阻断点分布和分区,及(b)各省公路积水阻断样本数
Fig. 1 Spatial distribution of (a) scatter and region plot, and (b) provincial record counts histogram of highway traffic blocking induced by waterlogging in 2011—2013

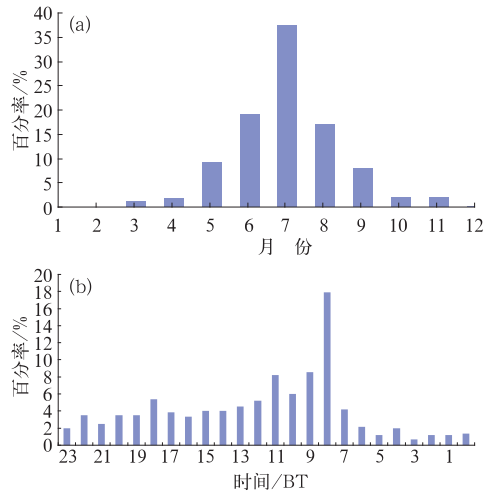


图 2 2011—2013 年公路积水阻断事件(a)月变化, (b)日变化分布
Fig. 2 Temporal distribution of highway traffic blocking induced by waterlogging in 2011—2013
(a) monthly occurrence rate, (b) hourly occurrence rate

17:00—18:00 为次多发时段。其中,08:00 最易发,占总样本的 18% 左右。这可能是由于上述时间段为公众出行的高峰时段,车流量较大,加之受降雨积水的影响,更容易导致道路阻断。

3 公路积水阻断与不同降水的关系分析

道路积水与降雨强度关系密切(尤凤春等, 2013)。持续性降水和短时强降水都容易造成公路排水不畅形成积水。由于我国降水分布的地域性差异,同时,受公路积水阻断样本限制,本文综合考虑地形和行政区划特点划分 4 个区(图 1a),分区域探讨公路积水阻断的发生与不同强度降水的变化特征。

从各区域公路积水阻断样本前 24 h 和前 48 h 降水出现情况(表 1)看,4 个区域公路积水阻断前 24 h 有降水的样本均达 80% 以上,其中区域 1 和 4 达 93% 以上。4 个区域公路积水阻断发生前 24 h 和前 48 h 有降水的样本均达 53% 以上,其中区域 1、3、4 达 70% 左右。可见公路积水阻断的发生与阻断发生前 24 h 降水和前 48 h 降水有关。另外,分

析 4 个区域公路积水阻断发生前 24 h 无降水且前 48 h 有降水的样本,仅占总样本的 5%左右。由此可以判断公路积水阻断与前 24 h 的降水关系更为密切。故本文选取积水阻断发生前 24 h 降水量、前

24 h 内小时最大雨强、前 24 h 内 6 h 最大雨量、前 24 h 内 12 h 最大雨量,进一步分析公路积水阻断与降水关系特征。

表 1 各区域公路积水阻断前 24 h 和前 48 h 降水出现统计表
Table 1 Statistics of precipitation occurrence in the latest 24 and 48 h before highway by blocking waterlogging in the four surveyed regions

	总样本数/个	前 24 h 无降水比例/%	前 24 h 无降水且前 48 h 有降水比例/%	前 24 h 有降水且 48 h 无降水比例/%	前 24 h 有降水且前 48 h 降水小于 10 mm 比例/%	前 24 h 有降水且前 48 h 降水大于 10 mm 比例/%
区域 1	83	7.23	2.41	27.71	22.89	48.19
区域 2	101	16.83	4.95	29.70	23.76	24.75
区域 3	97	12.37	8.25	26.80	26.80	34.02
区域 4	147	6.12	4.76	27.89	19.73	46.26

3.1 公路积水阻断与小时最大雨强关系

图 3 为 4 个区域公路积水阻断与前 24 h 内小时最大雨强关系图。从图上可以看出,在 1 区的 83 次积水阻断样本中,有 3%左右的积水阻断发生在小时最大雨强仅为 1 mm 以下;15%左右的发生在小时最大雨强为 1~5 mm 时;17%左右的发生在小时最大雨强 5~10 mm 时;13%左右的发生在小时最大雨强为 10~15 mm 时,8%左右的发生在小时最大雨强为 15~20 mm 时,20%左右的发生在小时最大雨强为 20~30 mm 时,1%左右的发生在小时最大雨强为 30~40 mm 时,23%发生在小时最大雨强 >40 mm 时。尤凤春等(2013)在分析北京区域强降水与道路积水关系中得出小时雨强 ≥ 40 mm 时就会出现道路积水,并对城市交通造成一定的影响。区域 2 公路积水阻断发生次数在小时最大雨强为 5~10 mm 时最多,占总样本数的 30%左右,在小时最大雨强 <10 mm 的范围内公路积水阻断总体发生次数占总样本数的 65%左右。区域 3 公路积水阻断发生次数在小时最大雨强为 1~5 mm 时最多,占总样本数的 29%左右;公路积水阻断发生次数在小时雨强 >40 mm 时次多,占总样本数的 15%左右。而区域 4 公路积水阻断发生次数在小时雨强 20~30 mm 最多,占总样本数的 21%左右,小时雨强 10~15 mm 为次多,占总样本数的 16%左右。总体来看,公路积水阻断事件发生次数与小时最大雨强的强度关系具有明显的地域特征,区域不同最易发公路积水阻断的小时最大雨强强度也不同,其中区域 1 和 4 易发阻断的小时最大雨强强度

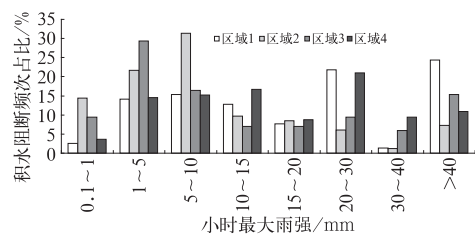


图 3 公路积水阻断与小时最大雨强关系

Fig. 3 Correlation between highway traffic blocking induced by waterlogging and hourly maximum rainfall intensity

较区域 2 和 3 的强度明显增强。这可能与上述地区的地形和地质条件等因素有关。区域 2 和 3 多高原、山地,地势起伏比较大,地形环境复杂多变,地质条件脆弱,较小的小时雨强就可以在地势低洼处形成积水或降雨通过入渗、冲刷等作用破坏路基、边坡稳定性,导致路面塌陷等造成阻断;而区域 1 和 4 多丘陵和平原,地势起伏平缓,则需较大的小时雨强才能形成积水,造成阻断。

3.2 公路积水阻断与 6 和 12 h 最大雨量关系

图 4 为 4 个区域公路积水阻断发生前 24 h 内的 6 h 最大雨量与积水阻断频次关系图。从图上可以看出,区域 1、3、4 的公路积水阻断次数在 6 h 最大雨量 <40 mm 以下时变化幅度较小,且均在总样本数的 18%以下,而在最大雨量 >40 mm 以上时,阻断次数明显增加,其中区域 1 可占总样本数的 48%左右,区域 3 占总样本数的 31%左右,区域 4 占总样本数的 45%左右。对区域 2 而言,公路积水

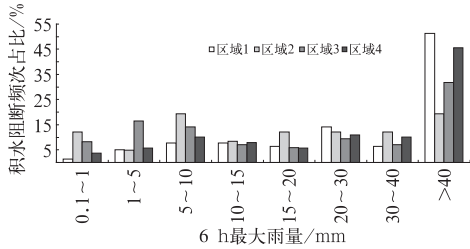


图 4 公路积水阻断与 6 h 最大雨量关系

Fig. 4 Correlation between highway traffic blocking induced by waterlogging and 6 h maximum rainfall

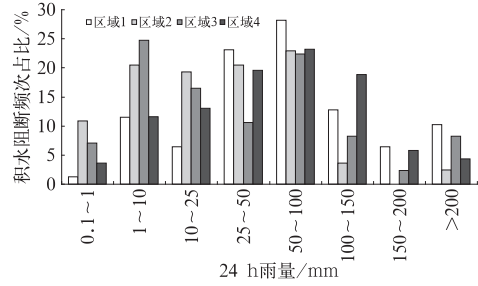


图 5 公路积水阻断与 24 h 累积雨量关系

Fig. 5 Correlation between highway traffic blocking induced by waterlogging and the 24 h accumulated rainfall

阻断次数在 6 h 最大雨量的不同区间范围内变化幅度较小,在 5~10 mm 和 >40 mm 以上时阻断次数较多,占总样本数的 18%左右。公路积水阻断发生前 24 h 内的 12 h 最大雨量与积水阻断频次关系(图略),与 6 h 最大雨量的变化趋势相同。

3.3 公路积水阻断与 24 h 累积雨量关系

图 5 为 4 个区域公路积水阻断发生前 24 h 内的累积雨量与积水阻断频次关系图。从图上可以看出,区域 1、2、4 公路积水阻断次数随前 24 h 累积雨量的变化趋势接近,均在累积雨量为 50~100 mm 时阻断次数最多。而区域 3 公路积水阻断次数则在累积雨量为 1~10 mm 范围时最多;在 50~100 mm 范围时为次多。

3.4 公路积水阻断发生前各区域不同时效降水的百分位分布

图 6 为各区域公路积水阻断发生前不同时效降水量的百分位变化图。从图中可以看出,区域 1 和 4 的前 24 h 累积雨量、6 h 最大雨量和 1 h 最大雨强在分位数 <50% 的情况下两者变化趋于一致,且量值接近;同样区域 2 和 3 的 24 h 累积雨量、6 h 最大雨量和 1 h 最大雨强也在分位数 <50% 的情况下两者变化趋于一致,量值接近且小于区域 1 和 4 的降水量。随着分位数的增大,不同时效降雨量在区域 1 和 4 间的差值逐渐增大,且除在 70%~80% 分位数范围内 24 h 降水量表现为区域 4 大于区域 1 外,

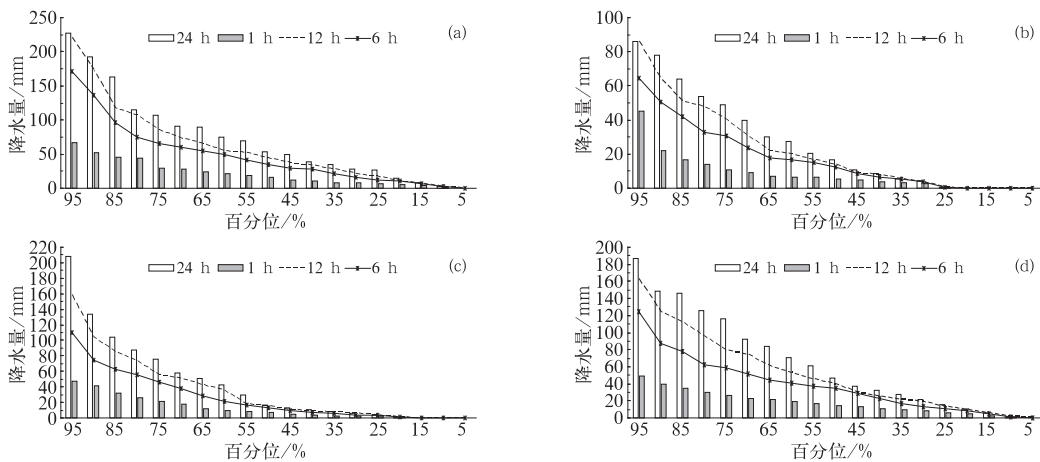


图 6 各区域公路积水阻断不同时效降水量的百分位变化

(a) 区域 1, (b) 区域 2, (c) 区域 3, (d) 区域 4

Fig. 6 Percentile change of rainfall in different periods after highway traffic blocking induced by waterlogging

(a) Region 1, (b) Region 2, (c) Region 3, (d) Region 4

其他时效降水量均表现为区域4小于区域1;不同时效降雨量在区域2和3间的差值也随分位数的增大而逐渐增大。此外,24 h降水量在区域1和3间的差值随分位数的增大而增大,而1 h最大雨强和6 h最大雨量在区域1和3间的差值则随分位数的增大先增大后减小。

综上所述可以看出,不同区域的公路积水阻断发生频率随不同时效雨量(1 h最大雨强、6 h最大雨量以及24 h雨量)的变化而变化,且变化的特点也不尽相同。此外,公路积水阻断发生时对应的不同时效降水量都处于较大的变化区间范围。

4 公路积水阻断与降水关系拟合

4.1 雨量的处理方法

在分析降水与公路积水阻断关系时,实际的降水因子值一般介于0~300 mm,容易导致降水的不连续性,需要对其进行连续性处理。相关研究(王纪军等,2010)表明对降水量序列进行开平方或开立方

处理后,降水序列的正态性得到明显改善。本文选择开立方根的方式对24 h、1 h最大和6 h最大降水因子进行连续性处理:

$$P_{Xi} = \sqrt[3]{P_{Ai}} \quad (1)$$

式中, P_{Ai} 为第*i*时效的实际降水, P_{Xi} 为经过处理后的降水因子。

4.2 雨量与积水阻断的高斯关系估计方法

降水处理后,针对图1中的4个分区,利用直方图分类统计法,将每一个分区内的灾害点对应的不同时效降水因子,平分为10个区间,统计每个区间内降水因子为 P_{Xi} 时积水灾害发生的频次 Y_i 和样本的均值 μ 及方差 σ 。利用式(2)估计出降水因子为 P_{Xi} 时公路积水阻断发生频率估计值 $f(p_{Xi})$ 。对实况统计值 Y_i 和估计值 $f(p_{Xi})$ 进行相关系数计算,评价估计的结果。表2显示了每个区域不同时效降水因子与公路积水阻断高斯分布的相关系数。图7中的曲线为估计的 $f(p_{Xi})$ 分布。

$$f(p_{Xi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(p_{Xi}-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

表2 各区域不同时效降水因子与公路积水阻断高斯分布关系

Table 2 Relationship between precipitation factors in various time scales subject to Gaussian distribution and the highway traffic blocking induced by waterlogging in the four surveyed regions

区域	24 h降水因子				1 h最大降水因子				6 h最大降水因子			
	降水因子均值	有效降水值/mm	方差	相关系数	降水因子均值	有效降水值/mm	方差	相关系数	降水因子均值	有效降水值/mm	方差	相关系数
1	3.44	40.71	3.22	0.48	2.54	16.39	1.76	0.91	3.18	32.16	2.75	0.70
2	3.31	36.26	2.98	0.25	2.17	10.22	1.28	0.70	3.22	33.39	2.83	0.81
3	3.52	43.61	3.38	0.25	2.18	10.36	1.30	0.67	3.01	27.27	2.47	0.86
4	3.61	47.05	3.54	0.75	2.19	10.50	1.31	0.63	2.95	25.67	2.36	0.65

4.3 雨量与积水阻断的高斯关系分析

4个区域公路积水阻断与不同时效降水因子的相关关系表现不同。区域1公路积水阻断与1 h最大降水因子关系密切,相关系数>0.91;区域2和3公路积水阻断与6 h最大降水因子关系密切,相关系数均在0.8以上;区域4公路积水阻断则与24 h最大降水因子关系密切,相关系数在0.75左右。

图7为4区域最大相关系数的降水因子与公路积水阻断频次分布。从图上可以看出,利用式(2)估计的公路阻断发生频率估计值与通过公路阻断样本统计的结果有较好的一致性,降水因子与公路积水阻断发生的频次服从于高斯分布。此外,对于任何

一个区域,诱发公路积水阻断的不同时效降水都处于一个较大的空间。这说明,公路积水阻断除了受降水的影响外,与地形、地理位置、排水状况等因素相关。用确切的降水量无法判断公路积水阻断是否发生,只能判断公路积水阻断发生的可能性大小。

5 结论与讨论

本文通过分析公路积水阻断的时空分布特征以及分区探讨不同时效降水与公路积水阻断的关系,得出如下结论:

(1) 公路积水阻断事件主要集中在我国东北、华北北部、西北、西南以及江南和华南地区。公路积

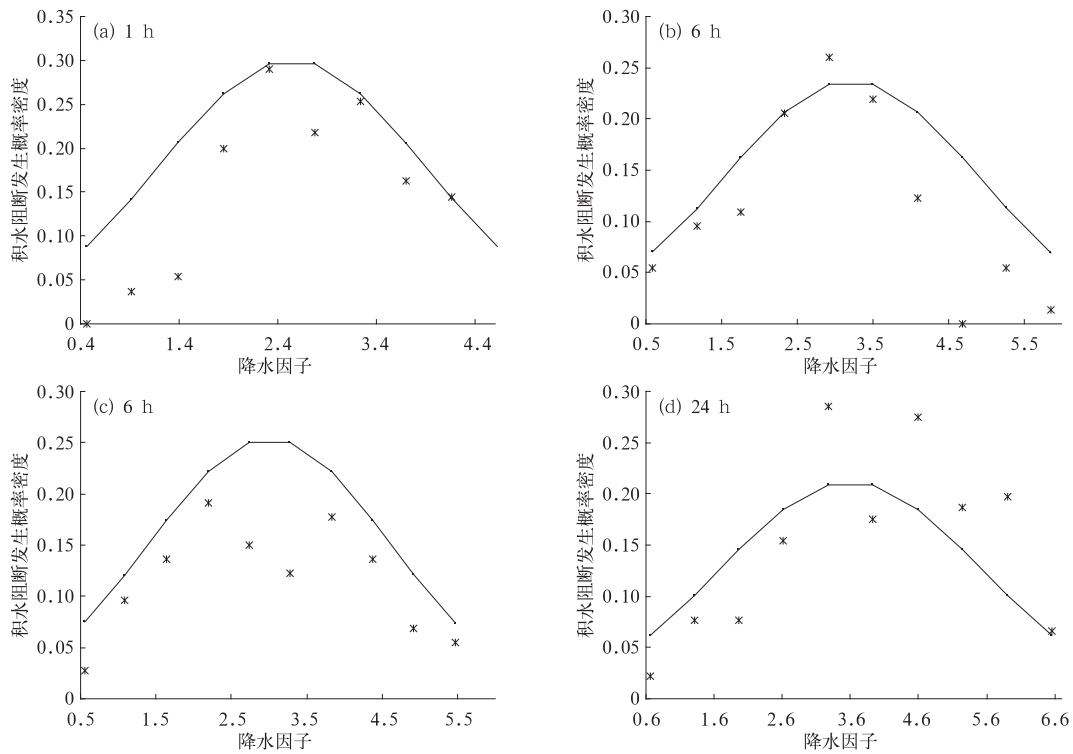


图 7 各区域不同时效最大相关系数的降水因子与公路积水阻断频次分布

(a)区域 1,(b)区域 2,(c)区域 3,(d)区域 4

(散点为统计的积水阻断频次,曲线为估计的积水阻断频率)

Fig. 7 Distribution of probability density in different time scales of highway traffic blocking induced by waterlogging over the closest related precipitation factor

(a) Region 1, (b) Region 2, (c) Region 3, (d) Region 4

(Scatter means the statistical frequency, curve means the evaluated frequency)

水阻断事件发生时间主要集中在 5—9 月,其中 7 月最为频繁,6 和 8 月次之,与我国的降水季节分布特征一致。公路积水阻断事件以 07:00—14:00 为第一多发时段,16:00—20:00 为次多发时段。

(2) 公路积水阻断与前 24 h 内的降水关系更为密切。区域不同,公路积水阻断随各强度降水变化的特点也不尽相同。经过开立方根处理后的降水因子与公路积水阻断发生的频次服从于高斯分布。其中,区域 1 公路积水阻断与处理后的 1 h 最大降水因子关系密切,相关系数 >0.91 ;区域 2 和 3 公路积水阻断与处理后的 6 h 最大降水因子关系密切,相关系数均在 0.8 以上;区域 4 公路积水阻断则与处理后的 24 h 最大降水因子关系密切,相关系数在 0.75 左右。

(3) 对于任何一个区域,诱发公路积水阻断的不同时效降水都处于一个较大的空间。对于给定的降水量只能判断公路积水阻断发生的可能性大小。

公路积水阻断除受降雨影响外,也受公路的地

形地质条件、排水状况以及道路本身(如道路材质、道路线性、表面状况)等因素影响。本文只初步探讨了公路积水阻断与降雨强度的关系,在以后的工作中还应结合公路的地理环境、道路本身等情况进行更深入的研究分析。

参考文献

- 陈方,耿晓峰,吉选,等,2013.降雨对城市交通系统的影响与预警对策[J].武汉理工大学学报(社会科学版),26(4):506-509.
- 狄靖月,王志,田华,等,2015.降水引发的西南地区公路损毁风险预报方法[J].应用气象学报,26(3):268-279.
- 董玉波,2013.降雨遥感图像中道路积水深度报警测量方法研究[J].科学技术与工程,13(21):6360-6364.
- 贺皓,刘子臣,徐虹,等,2003.陕西省高等级公路大雾的预报方法研究[J].陕西气象,(1):7-10.
- 景宏君,2004.黄土路基积水入渗规律研究[J].公路交通科技,21(4):40-42.
- 李迅,甘璐,丁德平,等,2014.G2 京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究[J].气象,40(4):466-472.
- 凌良新,潘燕莲,叶化军,等,2008.潮州市交通事故气象预警模型

- [J]. 广东气象, 30(4):45-47.
- 刘熙明, 田敬生, 雷桂莲, 等, 2003. 江西省交通事故与气象条件关系的初步分析[J]. 江西气象科技, 26(增刊):138-141.
- 刘熙明, 喻迎春, 雷桂莲, 等, 2004. 应用辐射平衡原理计算夏季水泥路面温度[J]. 应用气象学报, 15(5):623-628.
- 罗慧, 李良序, 胡胜, 等, 2007. 公路交通事故与气象条件关系及其气象预警模型[J]. 应用气象学报, 18(3):350-357.
- 秦大河, 董文杰, 罗勇, 2012. 中国气候与环境演变:2012:第一卷:科学基础[M]. 北京:气象出版社:432.
- 曲晓黎, 武辉芹, 张彦恒, 等, 2010. 京石高速路面温度特征及预报模型[J]. 干旱气象, 28(3):352-357.
- 田华, 吴昊, 赵琳娜, 等, 2009. 沪宁高速公路路面温度变化特征及统计模型[J]. 应用气象学报, 20(6):737-744.
- 王纪军, 任国玉, 匡晓燕, 等, 2010. 河南省月和年降水量正态性分析[J]. 气候与环境研究, 15(4):522-528.
- 吴兑, 邓雪娇, 游积平, 等, 2006. 南岭山地高速公路雾区能见度预报系统[J]. 热带气象学报, 22(5):417-422.
- 吴和红, 严明良, 繆启龙, 等, 2010. 沪宁高速公路大雾及气象要素特征分析[J]. 气象与减灾研究, 33(4):31-37.
- 吴晟, 吴兑, 邓雪娇, 等, 2006. 南岭山地高速公路路面温度变化特征分析[J]. 气象科技, 34(6):783-787.
- 燕科, 董雷宏, 2009. 全国公路交通阻断信息数据统计与分析[J]. 公路交通科技, 26(3):121-124, 134.
- 杨旭光, 2014. 平原区高速公路通道积水处治方法浅析[J]. 黑龙江交通科技, (5):10, 12.
- 尹志聪, 郭文利, 李乃杰, 等, 2015. 北京城市内涝积水的数值模拟[J]. 气象, 41(9):1111-1118.
- 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[J]. 气象, 39(8):1050-1056.
- 张弛, 郭鑫鑫, 崔卜心, 2014. 不均匀积水条件对路面行车安全的影响[J]. 公路交通科技, 31(10):104-111.
- 张铭, 2014. 探析高速公路路面积水问题的诊断和解决对策[J]. 建材与装饰, (15):192-193.
- 张星刚, 宁朝辉, 李东, 2015. 一套实用的公路积水监测预警联动系统[J]. 中国交通信息化, (增刊1):134-136.
- 朱承瑛, 谢志清, 严明良, 等, 2009. 高速公路路面温度极值预报模型研究[J]. 气象科学, 29(5):645-650.
- Andreescu M P, Frost D B, 1998. Weather and traffic accidents in Montreal, Canada[J]. Climate Res, 9(3):225-230.
- Cools M, Moons E, Wets G, 2010. Assessing the impact of weather on traffic intensity[J]. Wea Climate Soc, 2(1):60-68.
- Crevier L P, Delage Y, 2001. METRO: a new model for road-condition forecasting in Canada[J]. J Appl Meteor, 40(11):2026-2037.
- Jacobs W, Raatz W E, 1996. Forecasting road-surface temperatures for different site characteristics[J]. Meteor Appl, 3(3):243-256.
- Sass B H, 1992. A numerical model for prediction of road temperature and ice[J]. J Appl Meteor, 31(12):1499-1506.
- Shao J, Lister P J, 1996. An automated nowcasting model of road surface temperature and state for winter road maintenance[J]. J Appl Meteor, 35(8):1352-1361.
- Sherretz L A, Farhar B C, 1978. An analysis of the relationship between rainfall and the occurrence of traffic accidents[J]. J Appl Meteor, 17(5):711-715.