

姚林塔,孙运凡,郑颖青,等. 2018. 利用最大降水量拟合福州城市内涝积水深度的误差分析[J]. 气象与减灾研究,41(2):148-153.

Yao Linta, Sun Yunfan, Zheng Yingqing, et al. 2018. Error analysis of waterlogging depth using maximum precipitation fitting in Fuzhou city[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,41(2):148-153.

利用最大降水量拟合福州城市内涝 积水深度的误差分析

姚林塔, 孙运凡, 郑颖青, 林 凌, 林金淦, 赖绍钧

福州市气象局, 福建 福州 350008

摘 要: 利用 2015—2016 年福州城区内涝和地面气象观测资料,分析内涝成因、最大降雨量与积水深度的关系,建立城市内涝积水深度拟合方程,并对拟合效果进行了检验。结果表明:1) 导致福州城市内涝的突发性原因占 26%,是城市管网等数据更新困难的主因,非突发性原因占 74%;2) 在 3 次不同天气系统的降雨量拟合结果中,雨季降水过程拟合平均绝对误差最小,午后雷雨天气降雨过程拟合平均绝对误差最大;3) 对内涝积水深度负拟合值进行归零处理和阈值限定后,其结果均与实况相符;4) 基于最新数据资料所得拟合值的误差更小。

关键词: 城市内涝, 积水深度, 最大降水量, 误差分析

中图分类号: P426.6

文献标识码: B

文章编号: 1007-9033(2018)02-0148-06

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-021

Error Analysis of Waterlogging Depth using Maximum Precipitation fitting in Fuzhou City

Yao Linta, Sun Yunfan, Zheng Yingqing, Lin Ling, Lin Jin'gan, Lai Shaojun

Fuzhou Meteorological Bureau, Fuzhou 350008, China

Abstract: Based on the 2015 - 2016 waterlogging data and meteorological data of Fuzhou city, the formation of waterlogging and the relationship between maximum precipitation and the waterlogging depth were discussed. The fitting effect of waterlogging depth was evaluated using liner equation and mean absolute error. The results showed that: 1) In Fuzhou, the sudden causes of waterlogging occupied 26%, which mainly resulted in the difficulty of urban pipeline network data updating, while the non-sudden causes accounted for 74%. 2) For three kinds of different weather systems, the average absolute error of fitting in the rainy season was the smallest, and for afternoon thunderstorm it was the largest. 3) After returning the negative fitting values of waterlogging depth to zero and setting the threshold, the fitting result was in good agreement with the real. 4) The fitting error was smaller based on the latest data.

Key words: urban waterlogging; the depth of waterlogging; the maximum precipitation; error analysis

0 引 言

近年来,由于城市快速发展和突发性强降雨频

次增多,加之一些城市的排涝和防涝能力建设相对滞后,强降水导致城市内涝的概率越来越大,降水越突然,量级越大,危害也越大(陈正洪和杨桂芳,

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2018-02-20.

基金项目: 福建省福州市气象局科研专项(编号:201712).

作者简介: 姚林塔,高级工程师,主要从事气象预报服务业务, E-mail: yaolinta1968@sina.com.

2012;徐雨晴和何吉成,2016)。福州是内涝多发的城市,分析内涝点成因,研究积水深度与最大降雨量关系,快速及时做出内涝点附近积水深度的预报预警服务,对及时疏导由内涝引发的交通拥堵和减少财产损失具有重要的作用(游娜和陈刚毅,2015)。

王伟武等(2015)对中国城市内涝研究进行了综述及展望。秦语涵等(2016)对4种主要城市雨洪径流模型研究进展和模型的优劣进行比较。国内研究较多的是利用已建立的模型与GIS结合,模拟出不同暴雨重现期的城市内涝情况,并与实际内涝点对比,进行内涝灾害风险区划,制作内涝点分布图(张瑛等,2014;贺法法等,2015;孙永尚等,2015;陈睿星等,2017)。尹志聪等(2015)利用北京城市内涝数值模型模拟了2012年北京“7·21”暴雨过程城市内涝的空间分布和积水深度,用不同重现期降雨量模拟排水管网直径变化对城市内涝空间分布和积水深度的影响。上述研究依赖于复杂的管网、河道、历史暴雨数据和城市建筑等数据,当数据出现大的变化时会影响其模拟的准确性。为了避开复杂的管网、河道、历史暴雨和城市建筑等数据变化,文中将历史和实时数据相结合,建立最新的福州城市内涝积水深度拟合方程,利用涝点附近测站的最大降水量对相应时段的内涝积水深度进行预报分析。

1 资料和方法

1.1 资料

文中使用的资料为福州市供排水管理中心提供的2015—2016年主要暴雨过程的内涝地点、成因、影响情况和积水深度,最大降水量为2015—2016年福州市区域自动站和国家气候站地面观测资料。

1.2 方法

在统计内涝点成因后,分析福州最大内涝点积水深度和最大降雨量的特点,利用统计法确立内涝点积水深度和不同时段降水量阈值,根据内涝点积水深度与最大降水量成正增长的关系,确立线性拟合方程,并用平均绝对误差评估拟合效果。

2 内涝点成因分析

统计2015—2016年福州城区238个(次)内涝点的成因,发现排水设施不完善和建设破坏所占的比例较高,分别为29.4%、28.6%。其次河水倒灌占15.5%,主要出现在2016年台风影响期间。出水口河道未到位占9.2%。缺少日常维护、管道淤积、违章排放、路面下沉和树叶堵塞所占比例都低于

5%,树叶堵塞也主要出现在台风影响期间。由于洪径流模型所使用的河道或涵洞宽度、深度和长度,排水管径和长度,水流的流向都是事先测量,如果突然改变,则要重新测量。因此,文中将成因分成需要重新测量的突发性原因和不需测量的非突发性原因,则河水倒灌、违章排放、路面下沉和树叶堵塞等属于突发性原因,建设破坏、排水设施不完善、出水口河道未到位、缺少日常维护、管道淤积等属于非突发性原因。统计结果表明,突发性原因占26%,非突发性原因占74%。

从内涝成因看,非突发性原因中的管道破坏、缺少日常维护和管道淤积等可以转换径流模型(管道模型转为河道模型或调整管径的大小)来重新演算,但需要及时测量和更新相应的参数,在出现内涝积水时,相应的参数难以及时更新,这会影响到内涝积水深度模拟的准确性。

3 拟合方程的确立

降水强度、持续时间和面雨量对城市内涝积水深度有十分重要的影响。为此,文中利用福州市供排水管理中心提供的2015—2016年共12次276个城市内涝样本,分别为2015年5月16、19、30日,6月4日(无积水点,不予统计)、10日,2016年4月10、24日,6月5日,7月9日,9月11、16、28日,统计降水过程内涝点积水深度与最大降水量的关系。积水深度多为5的整数倍,即5 cm、10 cm、15 cm、20 cm,可知应是估算值。将积水深度 H 分为5个等级: $0\text{ cm} < H < 5\text{ cm}$, $5\text{ cm} \leq H < 15\text{ cm}$, $15\text{ cm} \leq H < 50\text{ cm}$, $50\text{ cm} \leq H < 90\text{ cm}$, $H \geq 90\text{ cm}$ 。统计276次积水深度发现, $15\text{ cm} \leq H < 50\text{ cm}$ 出现的次数最多,为198次;其次是 $5\text{ cm} \leq H < 15\text{ cm}$,出现54次; $0\text{ cm} < H < 5\text{ cm}$ 出现的次数为0,这可能是积水深度为5 cm以下(不含)的不予统计或归零处理造成的。

2015—2016年12次天气过程中,积水点最多的是2016年9月11日,共有45个积水点;最少的是2015年6月4日,无积水点。内涝点积水深度最小的为5 cm,最大为2016年9月16日的350 cm,出现在福飞路的下穿通道内。2016年的积水资料有开始时间和结束时间。根据2015—2016年的276个城市内涝样本,利用统计学方法,选择2015年5月16日、2016年9月11日、16日和28日积水点较多的4次过程来统计内涝积水深度与主要时段最大降水量对应阈值(表1)。

表1 福州市内涝点积水深度 H (单位:cm) 和各时段最大降水量 R (单位:mm) 阈值

Table 1 The depth of waterlogging (unit:cm) and the maximum precipitation threshold (unit:mm) during each time period

积水深度 H	$0 \leq H < 5$	$5 \leq H < 15$	$15 \leq H < 50$	$50 \leq H < 90$	≥ 90
H_{24}	$0 \leq R_{24} < 90$	$90 \leq R_{24} < 120$	$120 \leq R_{24} < 170$	$170 \leq R_{24} < 250$	$R_{24} \geq 250$
H_{12}	$0 \leq R_{12} < 85$	$85 \leq R_{12} < 110$	$110 \leq R_{12} < 150$	$150 \leq R_{12} < 200$	$R_{12} \geq 200$
H_6	$0 \leq R_6 < 70$	$90 \leq R_6 < 120$	$120 \leq R_6 < 170$	$170 \leq R_6 < 250$	$R_6 \geq 250$
H_5	$0 \leq R_5 < 60$	$90 \leq R_5 < 120$	$120 \leq R_5 < 170$	$170 \leq R_5 < 250$	$R_5 \geq 250$
H_4	$0 \leq R_4 < 50$	$90 \leq R_4 < 120$	$120 \leq R_4 < 170$	$170 \leq R_4 < 250$	$R_4 \geq 250$
H_3	$0 \leq R_3 < 40$	$40 \leq R_3 < 70$	$70 \leq R_3 < 100$	$100 \leq R_3 < 120$	$R_3 \geq 120$
H_2	$0 \leq R_2 < 30$	$30 \leq R_2 < 5$	$50 \leq R_2 < 85$	$85 \leq R_2 < 100$	$R_2 \geq 100$
H_1	$0 \leq R_1 < 20$	$20 \leq R_1 < 35$	$35 \leq R_1 < 65$	$65 \leq R_1 < 80$	$R_1 \geq 80$

注: H_1 表示 1 h 积水深度, R_1 表示 1 h 降水量, 依次类推。

在统计过程中, 采用每次增加 5 mm 的步长, 分别计算 5 个档次的降水量分级与积水深度 5 个档次对应的所占比最接近时即确定为阈值(表略)。在统计过程中发现 H_1 、 H_2 和 H_3 的阈值档与积水深度档最为接近, H_4 到 H_{24} 的百分比接近程度相对依次变差, H_{12} 和 H_{24} 很难找到相接近的阈值。

在确定降水量阈值后, 再确定拟合方程。降水量要达到一定程度才会出现积水, 这从物理意义上确立的拟合方程也可以得到解释, 即积水面积 \times 积水深度 = 降水量 \times 汇流面积 - 单位时间排水量 \times 排水时间, 表达式为:

$$s_{\text{积}} H = s_{\text{汇}} R - dt \quad (1)$$

当 t 不为 0, R 不为 0, $H=0$, 且流入量与排水量相等, 则无积水, 这时 R 有个起始值 R_{H0} ; 当 $H < 0$ 时, 流入量小于排水量, 无积水, 所以, 当 R 小于某个阈值时, H 为负值; 当 $H > 0$ 时, 流入量大于排水量, 出现积水, 这时排水能力已达饱和, 即某段时间内的排水量(dt) 为固定值。

当出现积水后, 积水面积 $s_{\text{积}}$ 、汇流面积 $s_{\text{汇}}$ 和单位时间排水量 d 相对固定, 因此式(1)可以简化为:

$$H = aR - bt \quad (2)$$

式中, $a = s_{\text{汇}} / s_{\text{积}}$, $b = d / s_{\text{积}}$ 。当经过一定时间后, R 达到最大, 积水深度达最大时, 如果短时间内没有加入新的排水途径, bt 稳定下来, 可视为常数, 将式(2)简化为线性方程:

$$H_{\text{max}} = aR_{\text{max}} - C \quad (3)$$

式中, H_{max} 为最大积水深度; R_{max} 为对应的最大降水量; C 为常数。但实际过程最大积水深度与最大降水量一般不会同时出现, 所以用积水深度来表述更合理。

选取两次降水过程不同时段积水深度和相应时段最大降水量或同一次降水过程的两次积水深度和相应时段最大降水量, 就可以解出 a 和 C 。无降水量, 或 R_{max} 小于阈值, 或 H_{max} 为负值时, 不会出现积水, 需用表 1 的阈值进行修正。

4 结果分析

4.1 拟合误差

筛选 2015 年 5 月 16 日和 19 日 2 次降水天气过程中都出现明显积水的地段(表 2), 用式(3)进行拟合, 得到各时段各内涝点的积水深度拟合方程(表 2), 由于两次数据完全一样时, 会出现无法求解

表 2 基于 2015 年 5 月 16 日和 19 日资料的各内涝点各时段积水深度的拟合方程

Table 2 The fitting equation of the waterlogging points during each time period using the data of May 16 and May 19, 2015

内涝点	1 h	2 h	3 h	4 h
三环橡树湾	$H = 18.75R - 30.63$	$H = 20.69R - 257.24$	$H = 21.43R - 307.86$	$H = 20.41R - 300.00$
西洪路	$H = 4.26R + 28.94$	$H = 3.02R + 31.22$	$H = 2.60R + 31.25$	$H = 2.63R + 26.41$
兰花路	$H = 17.14R - 81.14$	$H = 8.26R + 9.92$	$H = 5.48R + 54.11$	$H = 5.63R + 42.40$
世欧广场周边	$H = 15.75R - 202.36$	$H = 8.13R - 112.20$	$H = 6.39R - 80.19$	$H = 6.60R - 94.06$
仓山万达停车场	$H = -0.02R + 301.28$	$H = -0.2R + 301.35$	$H = -0.1R + 301.35$	$H = -0.1R + 301.37$
三角井附近	$H = 5.22R + 104.44$	$H = 4.17R + 98.33$	$H = 3.09R + 115.3$	$H = 3.17R + 96.84$
内涝点	5 h	6 h	12 h	24 h
三环橡树湾	$H = 20.27R - 367.57$	$H = 14.15R - 218.87$	$H = 9.49R - 162.66$	$H = 9.90R - 194.06$
西洪路	$H = 2.54R + 22.14$	$H = 2.67R + 8.80$	$H = 2.16R + 2.70$	$H = 2.17R + 0.98$
兰花路	$H = 5.58R + 29.37$	$H = 5.96R - 3.98$	$H = 4.23R + 13.40$	$H = 4.27R + 8.39$
世欧广场周边	$H = 7.09R - 132.62$	$H = 7.27R - 153.82$	$H = 4.93R - 113.79$	$H = 5.03R - 123.12$
仓山万达停车场	$H = -0.1R + 301.37$	$H = -0.1R + 301.44$	$H = -0.1R + 301.45$	$H = -0.1R + 301.46$
三角井附近	$H = 3.16R + 96.84$	$H = 3.32R + 81.73$	$H = 2.54R + 83.72$	$H = 2.56R + 81.18$

的情况,因此,对其中一个数据加 1 mm 处理。

选取不同天气系统降水过程(2016 年 4 月 10 日

锋面降水、9 月 11 日午后雷雨、9 月 28 日台风“鲇鱼”)进行拟合,得到各过程拟合值的绝对误差(表 3)。

表 3 基于表 2 拟合方程的 2016 年 3 次降水过程各内涝点各时段积水深度的误差

Table 3 The fitting errors of the waterlogging depth during each time period of the three kinds of precipitation process in 2016 based on the equations in Table 2

过程	内涝点	实际积水深度/cm	积水深度误差/mm							
			1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	12 h	24 h
4 月 10 日	三环橡树湾	100	59	26	46	41	30	13	42	54
	西洪路	100	29	64	21	21	30	41	46	13
	兰花路	50	21	82	104	98	85	59	60	119
	世欧广场周边	50	117	54	1	6	33	50	46	20
	仓山万达停车场	200	101	101	101	101	101	101	101	101
	三角井附近	150	3	15	20	15	4	8	14	22
9 月 11 日	三环橡树湾	400	1827	2390	2714	2684	2727	1853	1161	1511
	西洪路	200	341	276	247	262	261	275	195	263
	兰花路	150	609	562	531	621	633	689	515	615
	世欧广场周边	300	13	38	33	91	121	141	13	134
	仓山万达停车场	300	0	0	0	0	0	0	0	0
	三角井附近	150	209	295	300	356	357	372	311	379
9 月 28 日	三环橡树湾	250	679	645	837	815	953	711	898	1355
	西洪路	400	210	212	180	135	109	57	26	177
	兰花路	300	94	127	165	234	282	428	542	810
	世欧广场周边	300	36	30	124	189	285	391	504	165
	仓山万达停车场	200	101	101	101	100	100	100	100	99
	三角井附近	350	97	15	27	81	121	201	289	466

分析表 3 可知,2016 年 4 月 10 日过程拟合的积水深度平均绝对误差最小,2016 年 9 月 11 日过程最大,误差最大为三环橡树湾,拟合效果最好的是仓山万达停车场。世欧广场周边的 1、2 和 6 h 积水深度的拟合值出现负数,这与实际情况不符,此处按 $H < 0$ 或 $R < R_{H_0}$ 情况处理。从降水天气系统看,雨季的降水过程拟合误差最小,午后雷雨的拟合平均误差最大。从各过程的拟合误差看,2016 年 4 月 10 日过程 6 h 积水深度的平均绝对误差最小,为 46 mm;2016 年 9 月 11 日过程 12 h 积水深度的平均绝对误差最小,为 366 mm;2016 年 9 月 28 日过程 2 h 积水深度的平均绝对误差最小,为 188 mm。3 次过程中,三环橡树湾的误差均较大。从各时段的误差看,除了 2016 年 4 月 10 日仓山万达停车场各时段的误差相等外,其余拟合点均存在某个时段的拟合误差最小值。

为了进一步检验拟合效果,使用 2016 年 4 月 10 日和 9 月 11 日资料解得的方程与用 2015 年 5 月 16 日和 19 日资料解得的方程进行拟合对比,所得方程如表 4 所示。

表 5 为基于表 4 拟合方程的 2016 年 9 月 28 日各内涝点各时段的积水深度误差。对比表 5 与表 3

可知,用最近日期资料解得的方程拟合的积水深度的平均误差更小。

4.2 拟合值为负值的处理方法

当降水量小于阈值 R_{H_0} 时,拟合过程中出现 1、2 h 的拟合积水深度为负值的情况(表 6)。修正方法有两种:一种是对出现负值的拟合点,全部用 0 mm 代替;另一种是以降水量大小根据表 1 积水深度和各时段的最大降水量阈值确定积水深度值。

表 7 给出了 2016 年 4 月 10 日各内涝点积水深度和各时段各关联测站的最大降水量。分析可知,世欧广场周边的 1、2 和 6 h 的降水量分别是 8.6、13.3 和 21.1 mm,按照表 1 的降水量阈值与对应积水深度区间,可查得对应于时段积水深度为 5 cm (上限),该范围与实际深度相符。

5 小 结

文中利用 2015—2016 年福州城区内涝和地面气象观测资料,分析内涝成因、最大降水量与积水深度的关系。使用线性方程和平均绝对误差评估内涝积水深度的拟合效果,得到:

1) 内涝点成因非突发性原因占较高的比例,突发性原因所占的比例较少。

表4 基于2016年4月10日和9月11日资料的各内涝点各时段积水深度的拟合方程

Table 4 The fitting equation of the waterlogging points during each time period based on the data of 10 April and 11 September, 2016

内涝点	1 h	2 h	3 h	4 h
三环橡树湾	$H = 2.72R + 7.53$	$H = 2.28R + 63.44$	$H = 2.17R + 54.08$	$H = 2.08R + 55.06$
西洪路	$H = 0.9R + 91.44$	$H = 0.69R + 98.97$	$H = 0.71R + 87.06$	$H = 0.69R + 86.13$
兰花路	$H = 2.49R + 27.81$	$H = 1.42R + 28.92$	$H = 1.04R + 30.94$	$H = 0.9R + 33.02$
世欧广场周边	$H = 10.37R - 39.21$	$H = 5.94R - 28.98$	$H = 5.65R - 65.96$	$H = 4.75R - 49.33$
仓山万达停车场	$H = 2.34R + 177.10$	$H = 1.32R + 180.76$	$H = 1.22R + 177.89$	$H = 1.03R + 180.82$
三角井附近	$H = 0.03R + 149.76$	$H = 0.01R + 149.76$	$H = 0.01R + 149.81$	$H = 0.01R + 149.83$
内涝点	5 h	6 h	12 h	24 h
三环橡树湾	$H = 1.99R + 57.03$	$H = 1.96R + 57.67$	$H = 1.89R + 56.06$	$H = 1.69R + 40.47$
西洪路	$H = 0.65R + 87.69$	$H = 0.64R + 87.87$	$H = 0.63R + 84.92$	$H = 0.58R + 76.97$
兰花路	$H = 0.86R + 33.65$	$H = 0.82R + 34.48$	$H = 0.76R + 32.62$	$H = 0.72R + 23.1$
世欧广场周边	$H = 4.39R - 42.71$	$H = 4.12R - 36.9$	$H = 3.99R - 45.3$	$H = 3.45R - 82.94$
仓山万达停车场	$H = 0.97R + 181.63$	$H = 0.92R + 182.64$	$H = 0.85R + 179.68$	$H = 0.85R + 166.27$
三角井附近	$H = 0.01R + 149.84$	$H = 0.01R + 149.84$	$H = 0.01R + 149.84$	$H = 0.01R + 149.75$

表5 基于表4拟合方程的2016年9月28日各内涝点各时段积水深度的误差

Table 5 The fitting error of the maximum waterlogging depth during each time period on September 28, 2016 using the equations in Table 4

内涝点	实际积水深度/mm	积水深度误差/mm							
		1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	12 h	24 h
三环橡树湾	250	38	59	55	56	39	29	68	98
西洪路	400	275	265	262	251	244	232	191	170
兰花路	300	203	199	191	188	181	165	118	92
世欧广场周边	300	32	6	80	70	102	142	398	206
仓山万达停车场	200	44	30	45	50	56	67	111	133
三角井附近	350	200	199	199	199	199	199	198	198

注: H_1 表示1 h积水深度, R_1 表示1 h降水量, 依次类推.

表6 基于表2拟合方程计算的2016年4月10日各内涝点各时段的积水深度

Table 6 The waterlogging depth of April 10, 2016 based on the equations in Table 2

内涝点	实际积水深度/mm	积水深度误差/mm							
		1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	12 h	24 h
三环橡树湾	100	159	734	146	141	70	87	58	155
西洪路	100	71	36	79	80	70	59	54	87
兰花路	50	71	132	155	148	135	109	110	169
世欧广场周边	50	-67	-4	51	44	17	0	4	70
仓山万达停车场	200	301	301	301	301	301	301	301	301
三角井附近	150	153	165	170	165	154	142	136	172

表7 2016年4月10日各内涝点积水深度和各时段各关联测站的最大降水量

Table 7 The waterlogging depth and the maximum precipitation at the corresponding stations during each time period on April 10, 2016

内涝点	实际积水深度/mm	积水深度误差/mm							
		1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	12 h	24 h
三环橡树湾	100	10.1	16.0	21.2	21.6	21.6	21.6	23.2	35.2
西洪路	100	9.8	15.0	18.3	20.2	18.9	18.9	23.8	39.8
兰花路	50	8.9	14.8	18.3	18.8	19.0	19.0	22.8	37.6
世欧广场周边	50	8.6	13.3	20.5	20.9	21.1	21.1	23.9	38.5
仓山万达停车场	200	9.8	14.6	18.2	18.7	18.9	18.9	23.8	39.8
三角井附近	150	9.3	15.9	17.6	18.0	18.1	18.1	20.5	35.3

2) 在3次降水过程拟合误差中,2016年4月10日雨季过程的平均绝对误差最小,2016年9月11日午后雷雨过程平均绝对误差最大。

3) 对福州城市内涝积水深度为负的拟合值做归零处理和阈值限定后,内涝积水深度拟合值均与实际值相符。

4) 对比基于2015年和2016年资料计算结果表明,使用最近日期的资料所得拟合值的平均绝对误差更小。

参考文献 (References)

- 陈睿星,李卫东,栾慕,等. 2017. SWMM模型在城市雨水管网改造中的应用[J]. 中国农村水利水电,1:58-62. Chen R X, Li W D, Luan M, et al. 2017. The optimization and modification of the urban drainage system based on SWMM model[J]. China Rural Water Hydropower, 1:58-62. (in Chinese)
- 陈正洪,杨桂芳. 2012. 城市气象灾害及其影响相关问题研究进展[J]. 气象与减灾研究,35(3):1-7. Chen Z H, Yang G F. 2012. Research on urban meteorological hazards and their impacts[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 35(3):1-7. (in Chinese)
- 贺法法,陈晓丽,张雅杰,等. 2015. GIS辅助的内涝灾害风险评估——以豹澥社区为例[J]. 测绘地理信息,40(2):35-39. He F F, Chen X L, Zhang Y J, et al. 2015. GIS-aided risk assessment of waterlogging disasters in Baoxie community[J]. J Geomatics, 40(2):35-39. (in Chinese)
- 秦语涵,王红武,张一龙. 2016. 城市雨洪径流模型研究进展[J]. 环境科学与技术,39(1):13-19. Qin Y H, Wang H W, Zhang Y L. 2016. Review of urban storm water run off models[J]. Environ Sci Technol, 39(1):13-19. (in Chinese)
- 孙永尚,刘扬,赵军合,等. 2015. 北京市内涝积水监测预警系统设计与实现[J]. 地理空间信息,13(4):117-119. Sun Y S, Liu Y, Zhao J H, et al. 2015. Design and implementation of Beijing stagnant water monitoring and alarm system[J]. Geospatial Information, 13(4):117-119. (in Chinese)
- 王伟武,汪琴,林晖,等. 2015. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题,34(10):24-28. Wang W W, Wang Q, Lin H, et al. 2015. Research review and prospect of waterlogging in Chinese cities[J]. Urban Problems, 34(10):24-28. (in Chinese)
- 王秀杰,王丽娜,田福昌,等. 2015. GIS及SWMM模型在防洪保护区内涝模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报,26(6):146-150. Wang X J, Wang L N, Tian F C, et al. 2015. Application of GIS and SWMM to rainstorm waterlogging simulation in flood protected zone[J]. J Water Resources Water Eng, 26(6):146-150. (in Chinese)
- 徐雨晴,何吉成. 2016. 气候变化对公路交通的影响研究进展[J]. 气象与减灾研究,2016,39(1):1-8. Xu Y Q, He J C. 2016. A review of studies on the impacts of climate change on road transportation[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 39(1):1-8. (in Chinese)
- 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. Yin Z C, Guo W L, Li N J, et al. 2015. Numerical simulation of urban ponding in Beijing[J]. Meteor Mon, 41(9):1111-1118. (in Chinese)
- 游娜,陈刚毅. 2015. 城乡暴雨灾害的非规则结构化预测技术探讨[J]. 气象与减灾研究,38(1):59-65. You N, Chen G Y. 2015. Discussion of the irregular structured prediction technique for urban-rural rainstorm disaster[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 38(1):59-65. (in Chinese)
- 张瑛,徐星生,刘波. 2014. 关键技术江西气象灾害风险预警业务中的应用与体会[J]. 气象与减灾研究,37(3):62-67. Zhang Y, Xu X S, Liu B. 2014. The application and experience of the key technology in meteorological disaster risk and warning service in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 37(3):62-67. (in Chinese)