

超大型城市洪涝演变规律与调度模式分析

赵小伟^{1,2}, 李永坤², 杨忠山¹, 臧敏¹, 付春梅³

(1.北京市水文总站, 北京 100089; 2.北京市水科学技术研究院, 北京 100048;
3.北京市北运河管理处, 北京 101100)

摘要:随着极端性强降雨的持续高发,超大型城市洪涝灾害防御难度不断增大,给流域防汛调度带来极大考验。以北京北运河流域为例,选取近10年中4场典型暴雨水文监测数据,应用数理统计、知识图谱方法,通过分析降雨移动路径,统计积水致灾阈值,核算降雨产流系数,演算洪水传播时间,对比分析洪涝演变规律与调度模式。分析结果表明,在北京城区各水文站控制流域内不透水比例~径流系数~洪峰模数、最大1 h雨强~洪峰呈现明显正相关关系,洪水速度~涨洪时间成反比例关系;当局地雨强超过30 mm/h,该区域将出现严重内涝。城区分洪和北运河干流洪峰错峰是北京防汛指挥调度的关键。研究成果可为超大型城市洪涝灾害系统化防御提供重要参考。

关键词:超大型城市;北京;洪涝演变;调度模式;北运河

中图分类号:TV122

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)03-0001-07

0 引言

超大型城市(城区常住人口1000万以上)是周边城市群发展核心,人口资源高度密集,社会经济高度发达,一旦遭遇洪水损失巨大^[1],例如印尼首都雅加达和孟加拉首都达卡因缺乏有效的洪水管理策略导致城市发展受阻^[2-3]。在国内,Faith Chan等^[4]研究表明洪水风险是珠三角沿海城市群面临的主要挑战。陈睿山等^[5]经过研究指出上海作为容易受洪水影响的城市,缺少城市洪涝事件灾后影响评估,洪水风险能力建设存在不足。与其他位于海洋和大江大河流域的超大型城市不同,北京市位于中国北方,入京的永定河、潮白河、大清河等流域总径流量在1980年后减少69%^[6],较为干旱,但是邹贤菊等^[7]和丁凯熙等^[8]研究表明近年来我国洪涝灾害的空间分布呈现“北增南减”的趋势,北京汛期降雨总量虽有下降,但城区比远郊更容易发生大暴雨,尤其是北京2012年“7·21”暴雨的惨痛教训,说明当前的洪涝灾害表现为极端暴雨、城市下垫面和人为

影响共同作用下短时产生的城市洪水和内涝积水^[9-11],但目前尚缺乏从极端降雨-城市洪涝-错峰调度角度逐层次分析北京洪涝规律和调度模式。本文通过分析北京北运河流域四场典型暴雨,探索北京城市洪涝演变规律,研究成果可为超大型城市洪涝灾害系统化防御提供参考。

1 流域及场次雨洪概况

1.1 北运河流域概况

北运河发源于北京境内的燕山南麓,为海河支流,北京境内河道长89 km,北京市中心城区和城市副中心都位于该流域,是北京市主要排水河道,连通京津冀三地,其洪涝调度事关京津冀三地防洪安全,意义重大。

1.2 场次雨洪概况

四场典型场次暴雨中,2012年“7·21”暴雨多站降雨量超过历史极值,通县水文站洪峰流量1580 m³/s,为1999年后最大洪峰流量,在此之后北京建立起洪水预

警制度。2016年“7·20”暴雨持续时间长,降雨总量大,通县水文站洪峰流量 1251 m³/s,北京市首次发布 4 个断面洪水预警信号。2018年“7·16”暴雨时空分布不均,局地雨强大,北京市发布白河张家坟断面洪水黄色预警。2020年“8·12”暴雨,强降雨集中在 1 h 内,北京市发布全市河道洪水蓝色预警和清河羊坊闸洪水橙色预警。

2 数据与方法

本文收集了研究流域内的土地利用类型、河道水系、气象水文数据(见表 1)。

暴雨中心并不能完全反映暴雨路径移动对产流的影响,而暴雨重心的移动可以描述降雨的空间迁移随时间的变化^[12],见式(1)~(2)。

$$Y_t = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{it} \times Y_i)}{\sum_{i=1}^n P_{it}} \quad (1)$$

$$X_t = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{it} \times X_i)}{\sum_{i=1}^n P_{it}} \quad (2)$$

式中: X_t 、 Y_t 为 t 时段暴雨重心坐标, X_i 、 Y_i 为流域内雨量站坐标, P_{it} (mm)为第 i 个雨量站 t 时段内降雨量值,

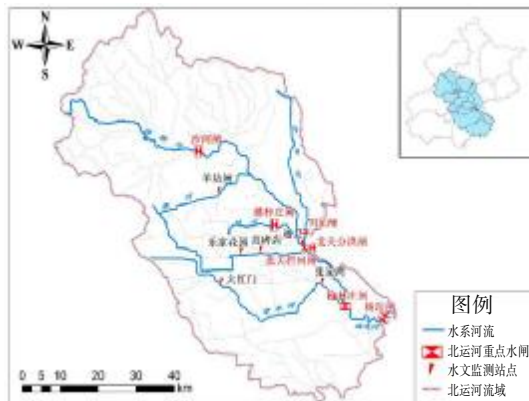


图1 北京北运河流域重点水文站和水闸布置

Fig.1 Layout of key hydrological stations and sluices in the North Canal Basin

n 为流域内雨量站个数。

事理图谱方法^[13]是以事件为节点,事件间的关系为边的图谱网络,事理图谱方法描述复杂过程往往更加简洁清晰。

3 暴雨特征分析

从暴雨强度对比可以看出,2012年“7·21”暴雨和2020年“8·12”暴雨属于降雨历时短,雨强较大降雨,2016年“7·20”暴雨和2018年“7·16”暴雨属于降雨历时长,总雨量大,雨强较缓的降雨。

从暴雨移动路径来看,2016年“7·20”暴雨和2018年“7·16”暴雨移动路径单一,2012年“7·21”暴雨和2020年“8·12”暴雨移动路径属于南北反复移动,危害也较大。从暴雨集中情况来看,暴雨中心主要在海淀温泉、香山和马连洼附近地区,集中于山前平原区。详细对比情况如表 2 所示,降雨分布图及重心移动路径见图 2 所示。

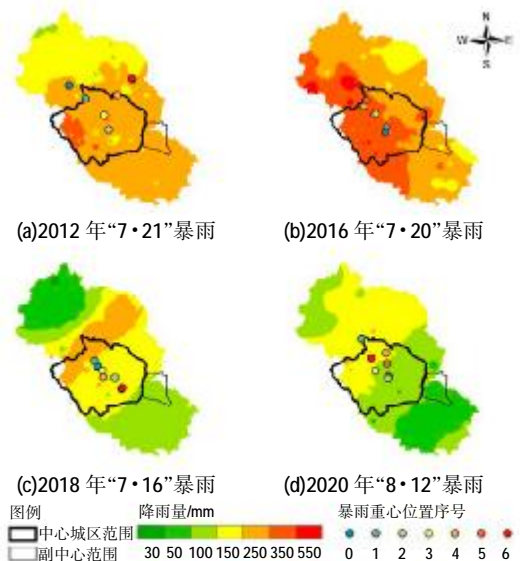


图2 北运河流域四场典型暴雨降雨分布图及重心移动路径

Fig.2 Rainfall distribution and center movement path of the four typical rainstorms in the North Canal Basin

表1 使用数据

Table1 Data instructions

分类名称	数据时效性	数据内容	数据精度
基础地理信息	2018	北京市土地覆盖数据	栅格数据,1:10000
	2011	北京市区划河流	矢量数据,1:2000
水文气象数据	2012、2016	气象降雨过程	2012.7.21、2016.7.20 场次降雨数据,记录步长为 1 h
	2018、2020	水文降雨过程	2018.7.16、2020.8.12 场次降雨数据,记录步长为 1 h
	2012~2020	流量摘录数据	2012.7.21、2016.7.20、2018.7.16 和 2020.8.12 场次通县、大红门、羊坊闸、乐家花园、杨洼闸等水文站流量摘录过程

4 洪水特征分析

4.1 产流系数分析

核算场次暴雨数据,暴雨径流系数、洪峰模数与流域不透水比例,相关关系见图 3,洪水特征数据详见表 3。

流域不透水比例由高到低依次为:大红门>乐家花园>羊坊闸>杨洼闸>北关闸。不透水面积比例与径流系数相关系数 0.85,不透水面积比例与洪峰模数相关系数

表2 场次暴雨情况对比
Table2 Comparison of field storm conditions

项目	2012.7.21 特大暴雨	2016.7.20 特大暴雨	2018.7.16 暴雨	2020.8.12 暴雨
降雨移动路径	由北往南移动,再由南往东北移动,暴雨集中于中心城区	由南往北移动,暴雨集中在中心城区	由北往南移动,暴雨集中于中心城区北部	由南往北移动,再往南停滞于中部,暴雨集中于中心城区西北部
流域平均雨量	187 mm	253 mm	94 mm	86 mm
暴雨强度	129.9 mm(玉泉营)	100.2 mm(菩萨鹿)	56 mm(马连洼)	72.5 mm(马连洼)
	历时短,强度大,1 h 雨强超过 70 mm 的达 5 站次,超过 30 mm 的达 199 站次。	历时长,强度小,1 h 雨强超过 70 mm 达 9 站,超过 30 mm 的达 119 站次。	历时长,强度较大,1 h 雨强超过 30 mm 有 35 站次,没有雨强超过 70 mm 的站次。	历时短,强度大,1 h 雨强大于 70 mm 站点有 1 站次,大于 30 mm 的达 54 站次。
暴雨中心	五棵松 263 mm	温泉 391 mm	马连洼 237 mm	香山 157 mm
降雨历时	降雨过程共 19 h,主要集中在 10 h	历时 55 h,主要集中在 43 h 内	历时 58 个小时,主要集中在 5 h 内	历时约 16 h,强降雨主要集中在 1 h

表3 北运河四场典型场次暴雨各水文站洪水特征
Table3 Flood characteristics of hydrological stations in the North Canal during four typical rainstorms

场次	站点	面积/km ²	最高水位/m	洪峰流量/(m ³ /s)	径流总量/万 m ³	峰现时间	径流系数	洪峰模数/(m ³ /s)·km ⁻²
2012.7.21	羊坊闸	131	36.30	343	1044	2012-7-21 20:00	0.33	2.62
	乐家花园	199	34.34	567	978	2012-7-21 20:30	0.22	2.85
	大红门	127	35.10	513	1276	2012-7-21 20:50	0.42	4.04
	通县拦河闸	2815	20.50	1210	4365	2012-7-22 1:15	0.26	0.56
	通县分洪闸		19.98	450	4230	2012-7-22 0:15		
	杨洼闸	3638	13.80	844	11954	2012-7-22 9:30	0.24	0.23
2016.7.20	羊坊闸	131	35.54	216	1449	2016-7-20 14:00	0.32	1.65
	乐家花园	199	32.56	224	889	2016-7-20 19:30	0.28	1.13
	大红门	127	35.10	513	2045	2016-7-20 13:00	0.41	4.04
	通县拦河闸	2815	21.18	711	4154	2016-7-20 20:45	0.25	0.44
	通县分洪闸		20.30	696	7693	2016-7-20 18:40		
	杨洼闸	3638	13.80	898	16682	2016-7-21 5:25	0.26	0.25
2018.7.16	羊坊闸	131	34.97	135	881	2018-7-16 10:00	0.49	1.03
	乐家花园	199	31.23	109	456	2018-7-17 8:36	0.24	0.55
	大红门	127	33.32	192	910	2018-7-17 12:00	0.50	1.51
	通县拦河闸	2815	19.87	260	990	2018-7-17 12:58	0.24	0.25
	通县分洪闸		19.14	444	4760	2018-7-17 12:22		
	杨洼闸	3638	12.15	378	8773	2018-7-17 20:40	0.27	0.10
2020.8.12	羊坊闸	131	33.42	370	617	2020-8-13 0:30	0.38	2.82
	乐家花园	199	32.15	202	331	2020-8-13 0:06	0.23	1.02
	大红门	127	34.36	367	774	2020-8-13 0:30	0.54	2.89
	通县拦河闸	2815	19.47	236	1314	2020-8-13 2:41	0.26	0.18
	通县分洪闸		18.71	328	556	2020-8-13 3:51		
	杨洼闸	3638	11.94	342	3812	2020-8-13 13:00	0.17	0.09

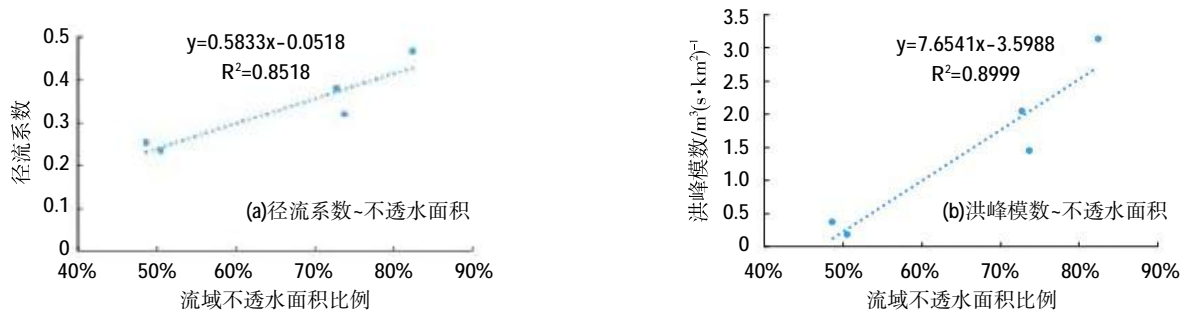


图3 径流系数、洪峰模数与流域不透水面积比例关系

Fig.3 Relationship among runoff coefficient, flood modulus and the proportion of impervious area in the watershed

达0.90,不透水面积比例越大,径流系数、洪峰模数均越大,结果表明不透水比例~径流系数~洪峰模数呈现明显正相关关系。

4.2 城区降雨产流分析

从表4可以看出,当1h雨量大于30mm时,降雨雨峰出现后城区各站流量在1~2.5h内起涨,尤其是2012年“7·21”暴雨和2016年“7·20”暴雨,洪峰随雨峰同时起涨。

从图4分析可知,城区各站最大1h雨强和洪峰存在显著的正相关关系。根据拟合关系线,可以推测凉水

河大红门站当流域最大1h雨量超过50mm时,洪峰流量将达到500m³/s;通惠河乐家花园站当流域最大1h雨量超过40mm时,洪峰流量将达到400m³/s;清河羊坊闸站当流域最大1h雨量超过60mm时,洪峰流量将达到400m³/s。

4.3 洪水传播时间分析

从图5洪水过程来看,为缓解中心城区排水压力,按照《北京市北运河洪水调度方案》北运河干流提前预泄,城区洪峰重现期往往要高于北运河干流洪峰重现期。

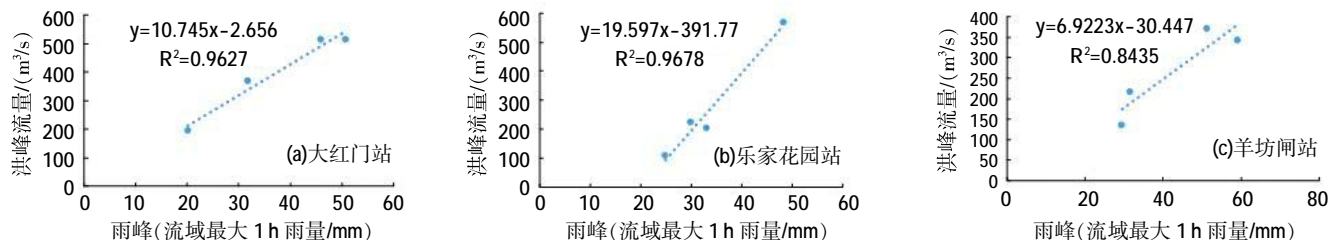


图4 中心城区水文站最大1h雨量与洪峰流量关系

Fig.4 The relationship between the maximum 1h rainfall and peak flood of hydrological stations in the central city

表4 降雨产流分析

Table4 Analysis of rainfall production

场次	小流域	雨峰时间	雨峰雨量/mm	洪峰时间	洪峰/(m³/s)	时间间隔/h
2012.7.21	大红门	2012-7-21 19:00	50.7	2012-7-21 20:50	513	1.8
	乐家花园	2012-7-21 19:00	48.3	2012-7-21 20:30	567	1.5
	羊坊闸	2012-7-21 19:00	59.1	2012-7-21 20:00	343	1.0
2016.7.20*	大红门	2016-7-20 13:00	46.0	2016-7-20 13:00	513	0.0
	乐家花园	2016-7-20 13:00	30.0	2016-7-20 13:00	224	0.0
	羊坊闸	2016-7-20 13:00	31.5	2016-7-20 14:00	216	1.0
2018.7.16*	大红门	2018-7-16 4:00	20.1	2018-7-16 8:00	107	4.0
	乐家花园	2018-7-16 4:00	24.9	2018-7-16 7:44	105	3.7
	羊坊闸	2018-7-16 4:00	29.5	2018-7-16 5:30	107	1.5
2020.8.12	大红门	2020-8-12 22:00	31.7	2020-8-13 0:30	367	2.5
	乐家花园	2020-8-12 22:00	33.0	2020-8-13 0:06	202	2.1
	羊坊闸	2020-8-12 22:00	51.2	2020-8-13 0:30	370	2.5

注:* 为多峰洪水选取离雨峰最近的洪峰。

从各站洪水传播时间(见表 5)来看,北关闸上游小流域洪峰到达北关闸前用时基本相同,从洪水传播速度来看,受北运河橡胶坝闸坝较多和下游河道疏浚不畅等多重因素影响,洪水传播速度差异较大,应实时监测通过各站流量相加估算来水情况,及时调整调度措施。

通过建立羊坊闸-沈家坟闸和大红门闸-张家湾闸的洪水传播速度与涨洪时间关系^[4](见图 6),可以明显看出洪水速度和涨洪时间成反比关系,即速度越快,涨洪时间越短,故上游出现高流速洪水时应迅速预警下游闸坝进行调度。

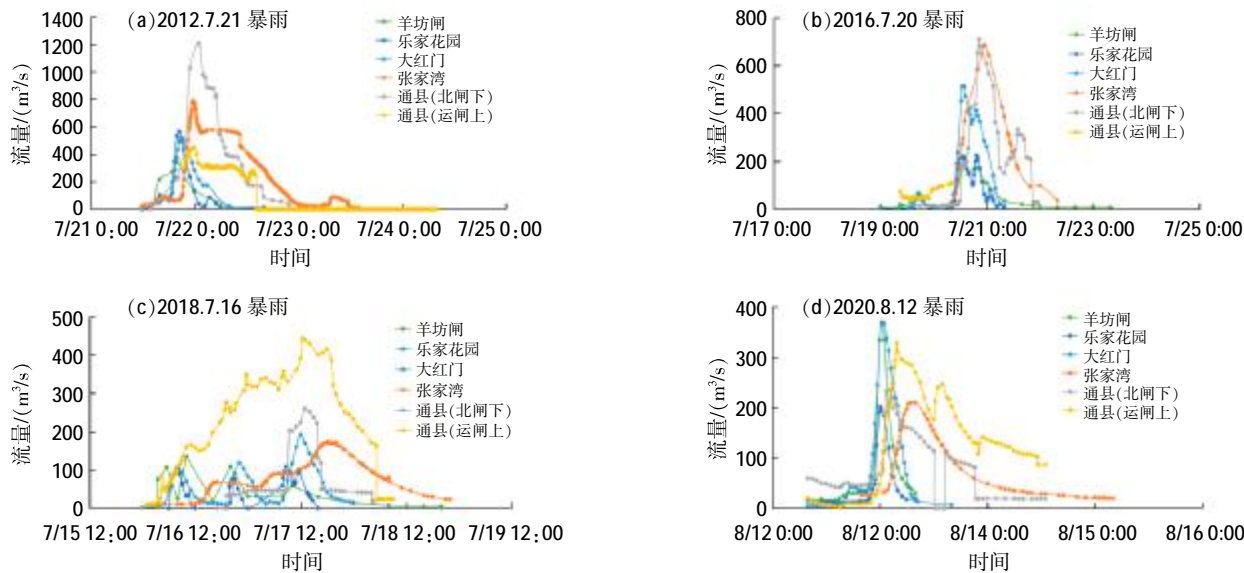


图 5 北运河流域四场典型暴雨各水文站流量过程
Fig.5 Flow process of hydrological stations in the North Canal during four typical rainstorms

表 5 洪水传播时间和传播速度
Table5 Flooding time and propagation speed

区间	间距/km	洪水传播时间(h)/洪水传播速度(m/s)			
		2012.7.21	2016.7.20	2018.7.16	2020.8.12
羊坊闸到沈家坟闸	5.7	1.20/1.36	2.00/0.79	0.80/1.98	0.50/3.17
大红门到张家湾	16.7	2.80/1.66	7.50/0.62	6.40/0.72	6.50/0.71
沙河闸到北关闸	26.5	3.00/2.45	1.70/4.33	5.00/1.47	-1.30/-
刘庄到北关闸	5.0	-	0.70/1.92	-	-
楼梓庄(沙窝)到北关闸	8.3	-	1.20/1.92	-	1.30/6.38
沈家坟闸到北关闸	30.0	3.75/2.22	4.67/1.79	26.00/0.32	1.68/4.95
北关闸到杨洼闸	37.3	8.50/1.22	8.70/1.19	7.70/1.35	10.30/1.01
张家湾到杨洼闸	24.6	9.80/0.70	6.20/1.10	2.70/2.53	6.00/1.14

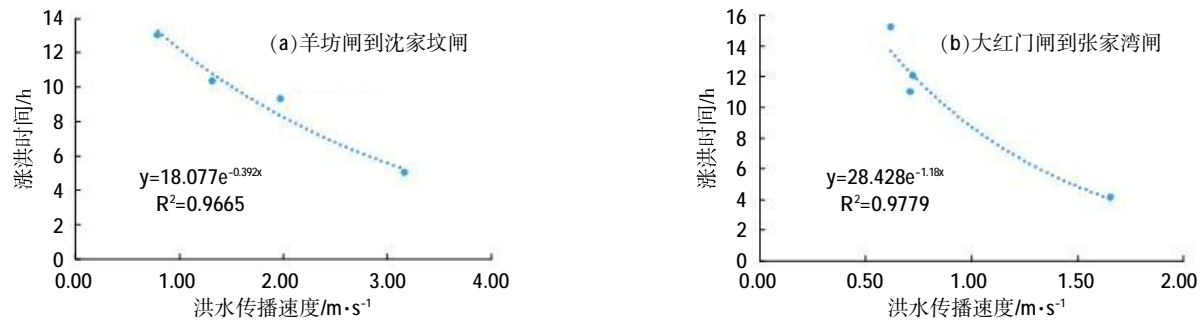


图 6 洪水传播速度和涨洪时间关系
Fig.6 Relationship between flood propagation speed and flooding time

(3)城区降雨机理复杂,但是网格越精细,水文水力学模型计算耗时越长,而城区洪水在雨峰后仅 1~2 h 就起涨,暴雨与洪涝时间间隔较短,对调度决策时效要求高,建议加强北关闸“五河交汇”小流域流量监测能力,实现“以测补报”。

最后,对于北京市这样的超大型城市洪涝防御,还应该采用大数据算法深入挖掘历史水文规律,构建深度学习人工智能预报模型,开展暴雨巨灾情景下城市洪水防御预演,并结合“通州堰”防洪体系和“上蓄、中疏、下排”的分洪体系,从外围分洪蓄滞,避免洪水穿城而过,整体加强北运河洪水防御能力,提升城市韧性,保障北京及京津冀超大型城市群的安全运行。

参考文献:

- [1] LEAL M, BOAVIDA -PORTUGAL I, FRAGOSO M, et al. How much does an extreme rainfall event cost? Material damage and relationships between insurance, rainfall, land cover and urban flooding [J]. Hydrological Sciences Journal, 2019,64(6):673-689.
- [2] BUDIYONO Y, AERTS J, Brinkman J J, et al. Flood risk assessment for delta mega -cities: a case study of Jakarta [J]. Natural hazards, 2015,75(1):389-413.
- [3] FATEMI M N, RAHMAN T, KITA M. Tracing the past: an insight on flood risk management strategies in the development instruments of Bangladesh and Dhaka city [J]. Water Policy, 2020,22(6):1142-1162.
- [4] CHAN F K S, YANG L E, SCHEFFRAN J, et al. Urban flood risks and emerging challenges in a Chinese delta: The case of the Pearl River Delta [J]. Environmental Science & Policy, 2021,122: 101-115.
- [5] CHEN R, ZHANG Y, XU D, et al. Climate change and coastal megacities: Disaster risk assessment and responses in shanghai city [J]. Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction, 2018:203-216.
- [6] MU X, WANG H, ZHAO Y, et al. Streamflow into Beijing and its response to climate change and human activities over the period 1956 - 2016 [J]. Water, 2020,12(3):622.
- [7] 邹贤菊, 张春桦, 宋晓猛. 2018 年我国城市暴雨洪涝事件调查及思考[J]. 水利发展研究, 2019,19(8):45-50,71. (ZOU Xianju, ZHANG Chunhua, SONG Xiaomeng. Investigation and thinking of urban rainstorm and flood events in China in 2018 [J]. Water conservancy development research, 2019,19(8):45-50,71. (in Chinese))
- [8] 丁凯熙,张利平,宋晓猛,等. 北京地区汛期降雨时空演变特征及城市化影响研究[J]. 地理科学进展, 2019,38(12):1917-1932. (DING Kaixi, ZHANG Liping, SONG Xiaomeng, et al. Temporal and spatial features of precipitation and impact of urbanization on precipitation characteristics in flood season in Beijing [J]. Progress in Geography, 2019,38(12):1917-1932. (in Chinese))
- [9] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲. 基于极值理论的北京市极端降水概率分布研究[J]. 中国科学:技术科学, 2018,48(6):61-72. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, KONG Fanzhe. Probability distribution of extreme precipitation in Beijing based on extreme value theory [J]. Scientia Sinica Technologica, 2018,48(6):61-72. (in Chinese))
- [10] 刘媛媛, 王毅, 刘洪伟, 等. 基于动态聚类分析和模糊模式识别法的北京城区汛期降雨时空分布规律研究[J]. 水文, 2019,39(1):74-77. (LIU Yuanyuan, WANG Yi, LIU Hongwei, et al. Study on temporal distribution of precipitation in Beijing City during flood period based on dynamic cluster analysis and Fuzzy pattern recognition [J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(1):74-77. (in Chinese))
- [11] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019,30(2):153-165. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing [J]. Advances in water science, 2019,30(2): 153-165. (in Chinese))
- [12] 娄宁. 基于时空数据挖掘技术的华东区域暴雨时空特征[J]. 应用生态学报, 2017,28(12):4043-4050. (LOU Ning. Spatial-temporal dynamics of rainstorm in East China based on spatial-temporal data mining technology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017,28(12):4043-4050. (in Chinese))
- [13] 冯钧,王云峰,鄢伟,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(6):479-487. (FENG Jun WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(6):479-487. (in Chinese))
- [14] 胡畔,陈波,史培军,等. 一种基于县城中心的汇流时间计算方法[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018,54(6):781-789. (HU Pan, CHEN Bo, SHI Peijun, et al. A method of calculating travel time based on county center [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018,54(6):781-789. (in Chinese))
- [15] 李永坤,房亚军,潘兴瑶,等. 北京城市典型流域市政排水与水利除涝衔接关系研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019,55(5): 603-608. (LI Yongkun, FANG Yajun, PAN Xingyao, et al. Cohesive relationship for return period between municipal drainage system and waterlogged drainage system [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019,55(5):603-608. (in Chinese))
- [16] 邸苏闯,潘兴瑶,刘洪伟,等. 北京城市暴雨内涝预警指标体系构建和致灾因子阈值量化研究[C]//北京市水科学技术研究院.北京水问题研究与实践(2018年). 北京: 中国水利水电出版社, 2019:11. (DI Suchuang, PAN Xingyao, LIU Hongwei, et al. Construction of early warning index system and quantification of disaster-causing factors in Beijing [C]//Beijing Institute of Water Science and Technology. Research and practice on water issues in Beijing (2018). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2019:11. (in Chinese))

(下转第 13 页)