

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.011

高度城镇化背景下珠三角地区降雨结构时空演变特征分析

黄国如^{1,2,3}, 陈易偲¹

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 广东省水利工程安全与绿色水利工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要:针对全球气候变化和城镇化快速发展的背景下, 极端气候事件频发, 高度城镇化地区的洪涝灾害问题, 考虑频繁的人类活动对区域水循环产生重要影响, 人口、财富的高度集中使得承灾体的易损性日益凸显, 以城镇化发展快、经济要素集中度高的珠三角地区为研究区域, 梳理了区域城镇化发展进程和特点, 分析了降雨结构时空变化特征及其与城镇化发展的关系。结果表明, 从降雨历时角度来看, 降雨事件主要以6 h以内的短历时降雨为主, 但降水量的贡献主体是6 h以上的长历时降雨, 降雨结构并未发生显著变化; 从降雨等级角度来看, 降雨事件主要以弱降雨为主, 但降水量的主要贡献则取决于发生次数较少的强降雨事件, 降雨结构发生了显著变化, 中、大雨发生率显著增加, 小雨发生率显著减少; 高度城镇化地区的降雨结构变化最为明显, 中、大、暴雨发生率显著增加, 小雨发生率明显下降。

关键词:高度城镇化; 极端气候; 洪涝灾害; 降雨结构; 时空演变特征; 珠三角地区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0082-09

Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure in the Pearl River Delta area under background of high urbanization//HUANG Guoru^{1,2,3}, CHEN Yisi¹ (1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Water Conservancy Engineering Safety and Green Water Conservancy Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Under the background of global climate change and rapid urbanization, extreme climate events occur frequently and flood disasters occur in highly urbanized areas. Considering that frequent human activities have an important impact on regional water cycle and the high concentration of population and wealth makes the vulnerability of disaster bearing bodies increasingly prominent. Taking the Pearl River Delta with rapid urbanization and high concentration of economic factors as the research area, this paper combed the development process and characteristics of regional urbanization, and analyzed the temporal and spatial evolution characteristics of rainfall structure and its relationship with urbanization development. The results show that from the perspective of rainfall duration, the rainfall events are mainly short duration rainfall within 6 h, but the main contribution of precipitation is long duration rainfall more than 6 h, and the rainfall structure has not changed significantly. From the perspective of rainfall grade, rainfall events are mainly weak rainfall, but the main contribution of precipitation depends on the less frequent heavy rainfall events. The rainfall structure has changed significantly, the incidence of medium and heavy rain has increased significantly, and the incidence of light rain has decreased significantly. The change of rainfall structure in highly urbanized areas is the most obvious, the incidence of medium, heavy rain and storm increases significantly, and the incidence of light rain decreases significantly.

Key words: high urbanization; extreme climate; flood disaster; rainfall structure; temporal and spatial evolution characteristics; the Pearl River Delta area

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508201);国家自然科学基金(51879108);广东省自然科学基金(2019A1515010744)

作者简介:黄国如(1969—),男,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: huanggr@scut.edu.cn

不同的研究视角对于城镇化的定义不尽相同,但大多从土地利用、人口和经济等方面进行评估,大致可分为土地城镇化和人口城镇化两大类。土地城镇化是人类活动对于自然环境的人工干预,主要体现在土地利用类型的转变,从以耕地、林地为主的农村形态逐渐向以建设用地为主的城镇形态发生转变,导致径流量加大、洪涝风险增加^[1-5]。截至2020年末,我国人口城镇化率已超过了60%,城市的建设和强烈的人类活动对当地气候产生影响,其中最为明显的体现是热岛效应,大量研究表明,热岛效应会对城镇降水造成影响,进而增大洪涝灾害风险^[6-8]。

在全球气候变化和人类活动的大背景下,各空间尺度下的降水结构特征发生了变化,众多专家学者采用多种方法研究大尺度降水结构变化特征^[9-15]。同时也特别关注中小尺度的降水结构变化,特别是强人类活动的城市群地区^[16-20],大量研究表明城镇化对降雨机制的影响主要体现在热岛效应和雨岛效应。宋晓猛等^[19]利用北京地区长序列小时降雨数据,从降雨历时和降雨等级两个角度分析北京市降雨结构的时空演变规律,指出北京市的降雨结构有一定的空间异质性;王建鹏等^[20]统计分析了西安市热岛效应的年代际变化以及对区域降水的影响,指出西安城区与邻近区域相比出现了明显的温差,降水在不同季节出现区域性差异,主要受热岛效应和季节性风向场影响。

在气候变化和强人类活动的双重影响下,区域乃至全球水循环都发生了改变,降雨是水循环过程的主要驱动因素之一,降雨特征的改变通常体现在降雨结构和总降水量变化两方面。其中降雨结构可从降雨历时和降雨等级两个角度进行分析,目前对于珠三角地区降雨结构的演变规律研究相对较少,深入了解降雨结构的变化特征有利于探究区域水循环变异规律。本文基于土地利用类型、人口密度、GDP空间分布等数据,将珠三角地区划分为高度城镇化地区和非高度城镇化地区,基于降雨发生率和降雨贡献率两个指标,从降雨历时和降雨等级角度进行分析,采用Mann-Kendall趋势检验、空间分析等方法,探究珠三角地区降雨结构在时间上的演变规律和空间上的分布特征,比较珠三角高度城镇化地区与非高度城镇化地区的降雨结构差异。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

珠三角地区是由珠江水系及其支流带来的泥

沙在珠江河口湾内堆积而成的复合型三角洲,中部、南部地势较为平坦,西部、北部和东部则是丘陵山地环绕。为了减少地形对降雨的影响,同时也为了全方位地比较高度城镇化地区与非高度城镇化地区的降雨特征差异,选取的研究区域如图1所示,海拔多为200 m以下,地势平坦,其范围内的城市包括广州、深圳、东莞、佛山、珠海、中山、江门、惠州以及肇庆和清远的部分地区,面积约为4.42万km²。

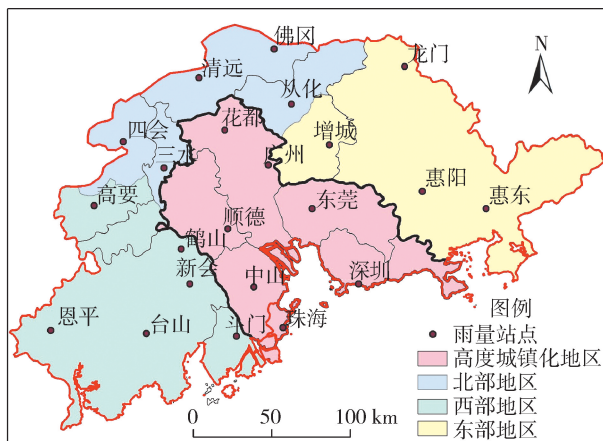


图1 研究区域及雨量站点分布

Fig.1 Study area and rainfall station distribution

根据土地利用类型、人口密度、GDP空间分布、城镇化率等因素,将珠三角地区划分为高度城镇化地区和非高度城镇化地区;根据相对位置将非高度城镇化地区细分为北部地区、西部地区和东部地区3个子研究区,具体分区如图1所示^[8]。其中,高度城镇化地区的面积约为1.17万km²,代表站点为广州、深圳、东莞、顺德、花都、中山和珠海;北部地区的面积约为0.72万km²,代表站点为佛冈、清远、四会、三水和从化;西部地区的面积约为1.23万km²,代表站点为高要、鹤山、新会、斗门、台山和恩平;东部地区的面积约为1.30万km²,代表站点为龙门、增城、惠阳和惠东。

1.2 数据来源

为更好地分析珠三角地区降雨结构的变化特征,并考虑到资料序列的长度及可用性,选择珠三角地区范围内数据完整性较高的22个雨量站小时降雨数据(数据来源于国家气象局),雨量站点分布如图1所示。根据各站点的资料序列长度,选取1973—2012年为研究时段,经时段筛选后所有站点资料的完整性和有效性均满足气象水文研究中对于数据质量的控制要求,其数据缺失时数均在1%以内,并采用一定方法对缺失数据进行补充。具体方法为:在汛期(4—10月)的缺失数据采用前后2个数据进行插值获取,在非汛期(11月至次年3月)的

缺失数据记为 0 mm。

1.3 指标定义

利用小时尺度的降雨数据划分降雨场次,从场次降雨的降雨历时和降雨等级两个方面分析珠三角地区的降雨结构以及城镇化进程中高度城镇化地区与非高度城镇化地区降雨结构的变化差异。通常认为小时降水量大于等于 0.1 mm 时有降雨发生,当降雨时间间隔超过 2 h,则认定为是两次降雨过程。根据该定义,从各雨量站小时降雨数据中提取并整理出所有降雨过程。降雨历时是指一次降雨过程从开始到结束的小时数,在此降雨过程内的雨量之和定义为该场次的总雨量。

将降雨历时划分为 1~3 h、3~6 h、6~12 h、大于 12 h 共 4 类。中国气象局采用日(24 h)为度量将降雨划分了 6 个等级:小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨,其中,日降水量小于 10 mm 为小雨,日降水量 10~25 mm 为中雨,日降水量 25~50 mm 为大雨,日降水量 50~100 mm 为暴雨,日降水量 100~250 mm 为大暴雨,日降水量在 250 mm 以上为特大暴雨。本文研究对象为场次降雨,参考中国气象局对日降水量等级的划分并结合珠三角地区的降雨特征,将一次降雨过程的降雨等级划分为以下 4 类:小雨(0~10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)、暴雨(50 mm 以上)。为定量分析降雨历时和降雨等级的分布及变化,定义降雨发生率为各降雨指标在某一分类中发生的次数占总次数的比值,降雨贡献率则为某一分类的降水量占总降水量的比值。

2 城镇化进程

2.1 土地城镇化

土地城镇化的内涵主要是区域从以耕地、林地、草地等用地类型为主的农业用地形态向以城镇建设用地为主的城镇形态转化的过程,城镇用地的扩张和占比的增加可以从一定程度上反映出区域城镇化发展过程。1980—2015 年珠三角地区土地利用类型分布如图 2 所示,从中可以看出,林地和耕地是珠三角地区的主要用地类型,其中林地主要分布于珠三角东部地区和西部地区,耕地零散分布于珠三角各市,建设用地主要集中在珠三角中部,以广州市辖区为中心逐渐向外辐射扩张,2000 年后建设用地面积扩张明显且呈区域化、集中化态势。

统计图 2 各种土地利用类型结果可知,1980—2015 年,建设用地面积呈现大幅增长趋势,从 1980 年的 2 834 km² 增长至 7 143 km²,增长率高达 152.05%。另外,建设用地周边的耕地和林地是其转化扩张的主要对象,建设用地的扩张方向和增长速度可以从一定程度上反映出该地区的城镇化发展情况,城镇化意味着人口的集中和增多,促使建设用地的扩张,导致其他用地类型被侵占。

2.2 人口城镇化

珠三角地区作为我国最早开放的沿海地区,改革开放以来经济发展迅速,人口数量及空间格局也发生了很大改变。从珠三角地区人口密度分布变化(图 3)可以看出,1990 年,广州是珠三角地区唯一的人口聚集中心,且广州市内的人口空间分布也存

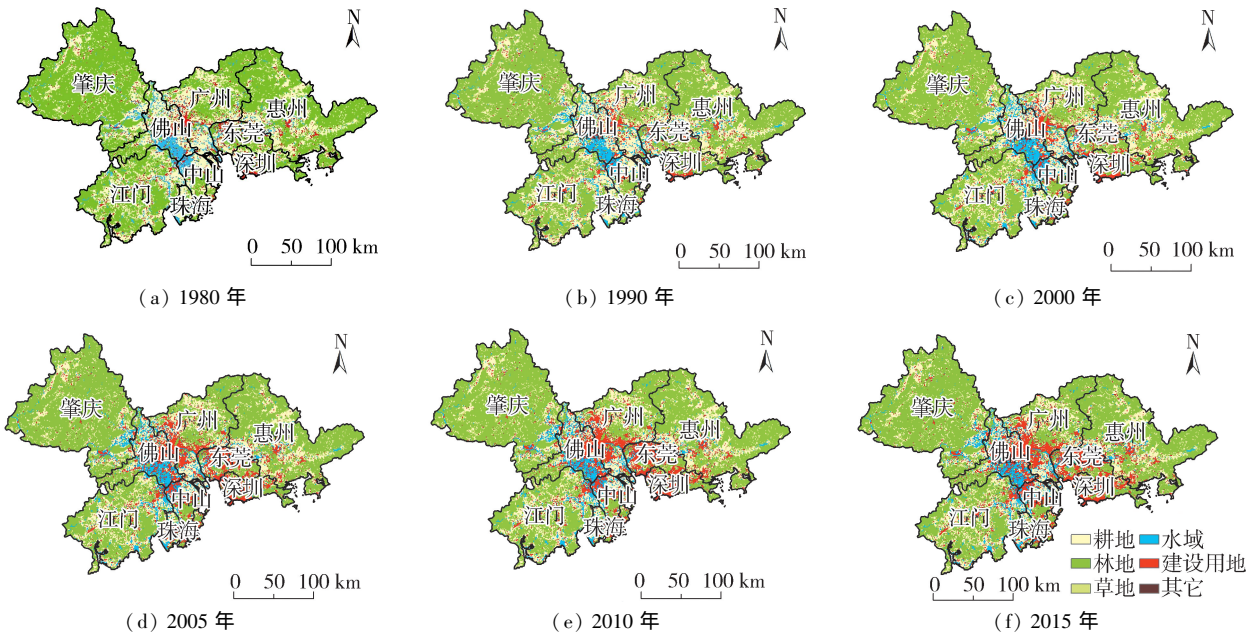


图 2 1980—2015 年珠三角地区土地利用类型空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land use types in the Pearl River Delta area from 1980 to 2015

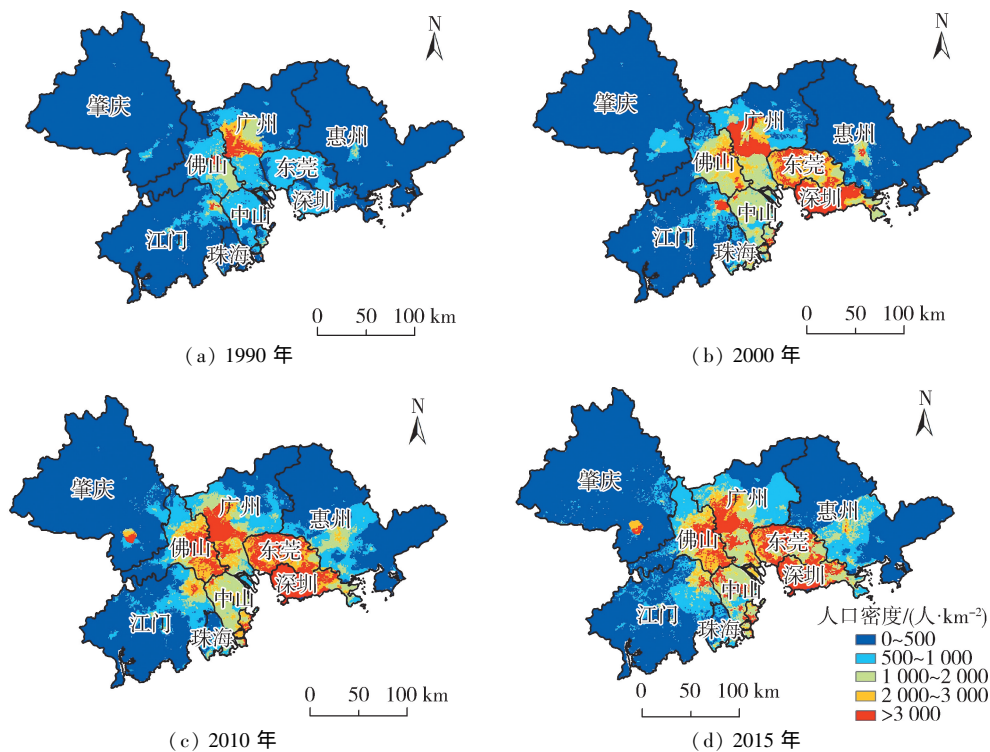


图3 珠三角地区人口密度分布变化

Fig.3 Distribution change of population concentration in the Pearl River Delta area

在明显差异,广州市辖区人口密度极高,但广州增城区、从化区人口集中度较低。2000年后,珠三角地区的人口集聚中心位置发生了改变,深圳和东莞成为了新的人口密集区。总体来看,1990—2015年,珠三角中部地区出现了大规模的人口增量,人口空间聚集效应明显,但东、西部地区经过25年的变化,人口增量相对有限。这是由于20世纪90年代初期,随着改革开放愈发深入,大量农村剩余劳动力涌入珠三角地区使得人口数量迅速增加,城市规模等级升高。由于当时资本投资的主力军是香港,因此人口聚集程度和迁移方向与香港的距离有密切的相关关系,最终以珠江口为核心形成人口聚集结构。

定量化衡量一个国家或地区的社会经济发展程度通常选用城镇化率为指标进行评估,可以体现区域内常住人口从农村向城市转移的过程,从一定程度上反映出区域产业结构、生产生活方式的转变。城镇化率通常用城镇常住人口占全部人口的百分比来计算,珠三角各个城市主要年份的城镇化率如表1所示。从表1可以看出,截至2015年,珠三角地区的城镇化发展仍存在较大的区域差异,城镇化水平市际差异较大,深圳、广州、东莞、佛山、珠海、中山的城镇化率超过85%,其他地区城镇化率均在70%以下,部分地区未超过50%。

GDP是衡量地区经济发展、区域规划和资源环境状况的重要指标,图4为珠三角地区GDP空间分布,可以看出,2000年珠三角地区的经济中心是广

表1 珠三角各市主要年份城镇化率 单位: %

Table 1 Urbanization rate in cities of the Pearl River

城市	Delta in main years					
	2000年	2005年	2008年	2010年	2012年	2015年
广州	83.7	81.5	82.2	83.8	85.0	85.4
深圳	92.5	100	100	100	100	100
东莞	60.0	73.0	86.4	88.5	88.7	88.8
佛山	75.1	78.4	91.8	94.1	94.9	94.9
中山	60.7	74.3	86.1	87.8	87.9	88.1
珠海	85.5	87.9	85.1	87.7	87.8	87.9
江门	47.1	56.8	49.5	62.3	63.2	64.2
惠州	51.7	55.0	61.3	61.8	63.9	67.0
肇庆	32.5	39.0	41.0	42.4	42.6	44.0

州和深圳,这是由外资导向型发展模式决定的,随着地区资本的积累、生产模式的成熟,珠三角经济发展的动力机制发生了转变,东莞、佛山、中山、珠海的经济相继崛起,广-深双经济中心模式逐渐向区域化、多中心化模式转变。

综合土地城镇化和人口城镇化的发展结果可以发现,从城镇用地、人口密度、城镇化率、GDP空间分布等多方面对珠三角地区城镇化发展进行评估,均表明组成珠三角城市群的9个地市的城镇化发展程度有明显差异,且城镇化发展程度较高的地区以珠江口为中心形成了圈层聚集,组成了高度城镇化城市群(图1)。高度城镇化城市群既是吸纳流动人口和集聚新增人口的主要区域,又是带动经济社会发展的巨大引擎,但同时也意味着更强烈的人类活动可能对区域气候造成影响,并且一旦发生自然灾

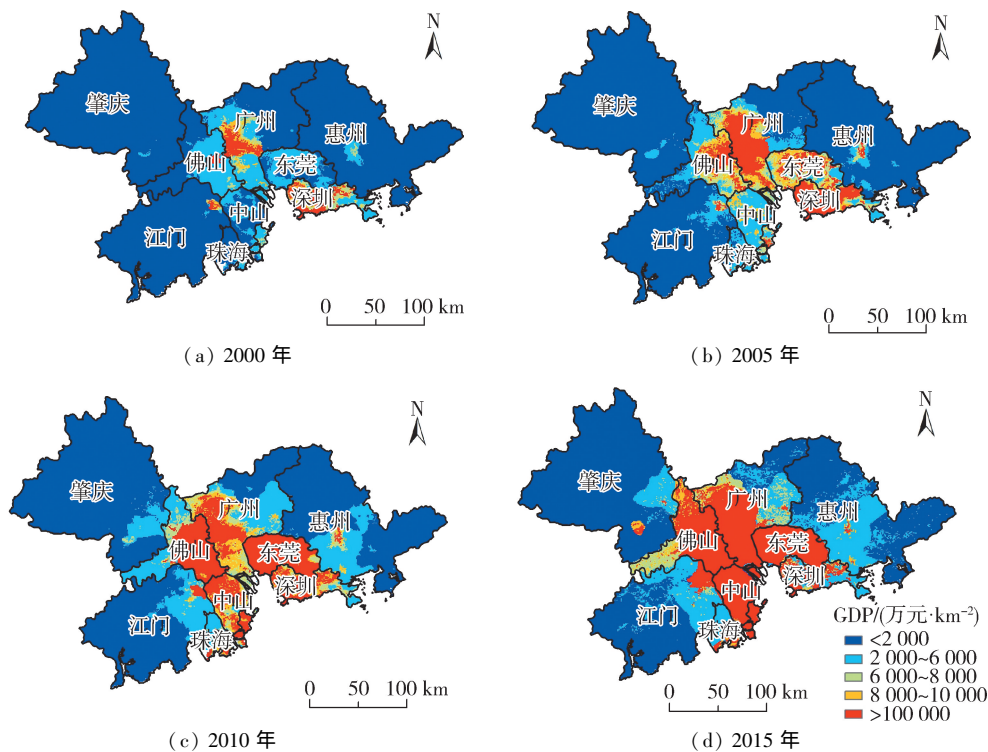


图 4 珠三角地区 GDP 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of GDP in the Pearl River Delta area

害,区域内高度集中的人口和经济财产极易受到影响从而导致巨大的损失。

3 降雨历时变化特征

3.1 不同历时降雨发生率和降雨贡献率分布

珠三角地区不同历时降雨发生率及降雨贡献率的统计结果如图 5 所示,可以看出,珠三角地区的降雨发生率随降雨历时增大而呈幂指数形式递减,而降雨贡献率随降雨历时增大呈线性增加。统计结果表明,降雨历时为 3 h 以内的降雨发生次数最多但总降水量最少,其降雨发生率达 64%,但降雨贡献率仅为 20%;降雨历时为 12 h 以上的降雨发生次数最少但总降水量最大,其降雨发生率仅为 6%,但降雨贡献率达到了 33%。若将 6 h 作为短历时降雨与

长历时降雨的分界线,可以发现珠三角地区降雨事件中虽然长历时降雨发生率占比仅为 18%,但其降雨贡献率却高达 59%。由此说明,珠三角地区的降雨事件主要以 6 h 以内的短历时降雨为主,但降水量贡献主体是 6 h 以上的长历时降雨。为进一步分析不同降雨历时下降雨发生率和降雨贡献率的空间分布,探究不同空间区位的降雨结构差异,基于雨量站点资料,采用克里金插值法绘制珠三角地区不同历时降雨发生率和降雨贡献率的空间分布(图 6)。

从降雨发生率的空间分布来看,1~3 h 的降雨发生率大致呈中部高、东西部低的分布,3~6 h 的降雨发生率呈西北部高、南部低的分布,6~12 h 的降雨发生率呈东西部高、中部低的分布,12 h 以上的降雨发生率呈中部低、东北高的分布。从区域分布来看,珠三角高度城镇化地区 1~3 h 短历时降雨发生率相对较高,6 h 以上的长历时降雨发生率相对较低;东部地区 6 h 以上的长历时降雨发生率相对较高。

从降雨贡献率的空间分布来看,1~3 h 的降雨贡献率大致呈中西部高、东南部低的分布,3~6 h 的降雨贡献率呈中西部高、南部低的分布,6~12 h 的降雨贡献率呈东北部高、西南部低的分布,12 h 以上的降雨贡献率呈中西部低、南部高的分布。珠三角地区降雨贡献率的空间分布结果与海陆位置存在一定的相关关系,1~3 h 和 3~6 h 的降雨贡献率空间

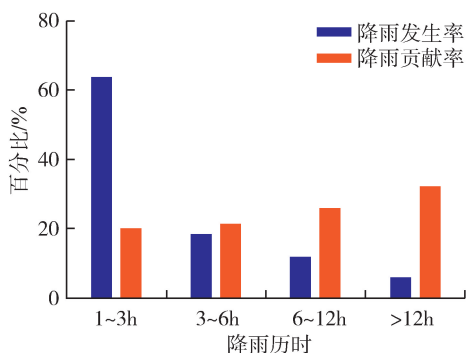


图 5 不同历时降雨发生率和降雨贡献率

Fig. 5 Rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different durations

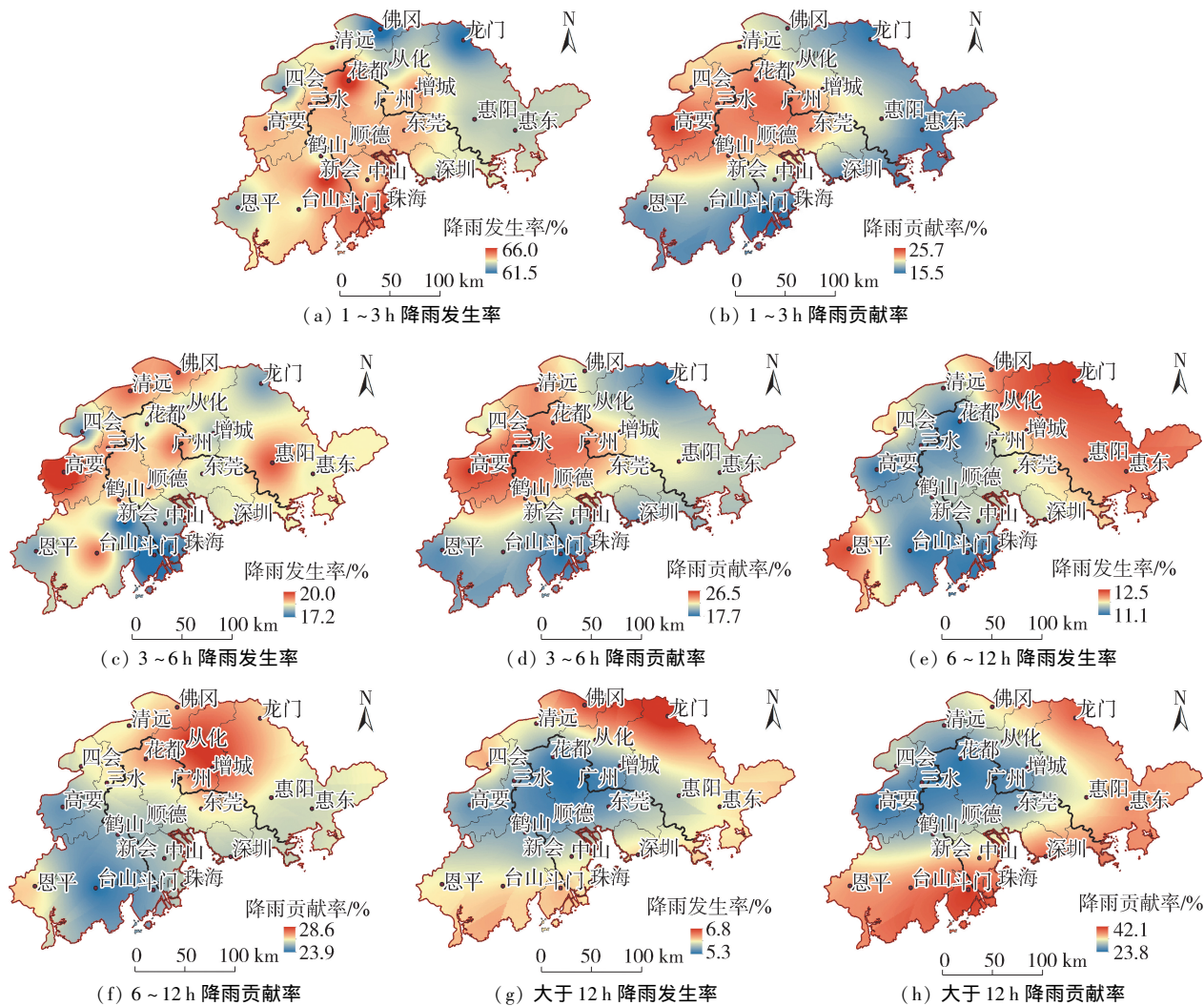


图 6 不同历时降雨发生率和降雨贡献率的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different durations

分布相似,沿海地区贡献率相对较低,从东南沿海向西北内陆逐渐增加,中、西部内陆地区为短历时降雨贡献率高值区域。降雨历时大于 12 h 的降雨贡献率空间分布特征与之相反,从东南向西北逐渐减少,沿海地区为高值区域。基于降雨贡献率空间分布还可以发现,中、西部内陆地区各历时的降雨贡献率较为均匀,约为 25%,而沿海地区各历时的降雨贡献率则明显呈现随降雨历时增加而增大的趋势,降雨贡献率范围为 15%~42%,说明沿海地区与内陆地区相比,降水量会更加集中在长历时降雨事件中。

表 2 不同历时降雨发生率和降雨贡献率的 M-K 值

Table 2 M-K values of rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different durations

地区	降雨发生率的 M-K 值				降雨贡献率的 M-K 值			
	1~3 h	3~6 h	6~12 h	>12 h	1~3 h	3~6 h	6~12 h	>12 h
珠三角地区	-0.13	0.48	-0.11	0.64	1.06	0.87	-0.13	-0.78
高度城镇化地区	-0.80	0.64	0.24	0.06	0.80	0.99	-0.27	-0.59
北部地区	0.15	-0.80	-0.78	0.92	-0.01	-0.04	0.62	-0.34
西部地区	-0.22	0.99	0.01	0	0.55	1.08	0.22	-0.04
东部地区	-1.48*	1.11	0.36	1.11	0.20	0.52	0.08	-0.85

注: * 表示达到 90% 置信度。

3.2 不同历时降雨发生率和降雨贡献率变化

为探究珠三角地区不同历时降雨发生率和降雨贡献率的演变趋势以及城镇化对其产生的影响,基于 1973—2012 年的降雨数据,采用 Mann-Kendall 检验方法进行统计分析,结果见表 2。从结果可以看出,珠三角地区各历时的降雨发生率和降雨贡献率并未发生显著变化。从各子研究区的统计结果来看,除东部地区 1~3 h 降雨发生率有显著降低趋势外,其他地区的指标均未发生明显变化。也就是说,珠三角地区的场次降雨历时并未发生显著变化。

布(图8)。

4 降雨等级变化特征

4.1 不同等级降雨发生率和降雨贡献率分布

珠三角地区不同等级降雨事件的发生率及贡献率的统计结果如图7所示,可以看出,随着降雨等级的增加,降雨发生率呈幂指数下降趋势,而降雨贡献率随降雨等级的增加而增加。统计结果表明,小雨的发生次数最多但总降水量最少,其降雨发生率以79%的比例占据绝对优势,但降雨贡献率仅为18%;暴雨的发生次数最少但总降水量最大,其降雨发生率仅为3%,但降雨贡献率达到了35%;中雨和大雨的降雨发生率分别为12%和6%,降雨发生率相差不小但降雨贡献率相近,分别占23%和24%。由此可见,珠三角地区的降雨事件主要以弱降雨为主,但降水量的主要贡献则取决于发生次数较少的强降雨事件。为进一步分析不同降雨等级降雨事件发生率和贡献率的空间分布,探究不同空间区位的降雨结构差异,利用 ArcGIS 的空间插值功能绘制珠三角地区各降雨等级降雨发生率和贡献率的空间分

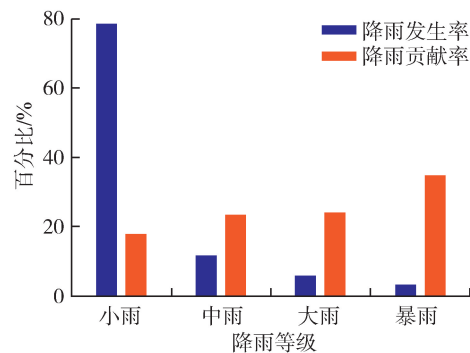


图7 不同等级降雨发生率和贡献率

Fig.7 Rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different rainfall levels

从降雨发生率的空间分布来看,小雨发生率大致呈中部高、东西部低的分布,中雨发生率呈东北部高、南部低的分布,大雨发生率呈西南部和东部高、中部低的分布,暴雨发生率呈中西部低、南部高的分布。从降雨贡献率的空间分布来看,小雨贡献率大致呈西北部高、南部低的分布,中雨贡献率呈西北部

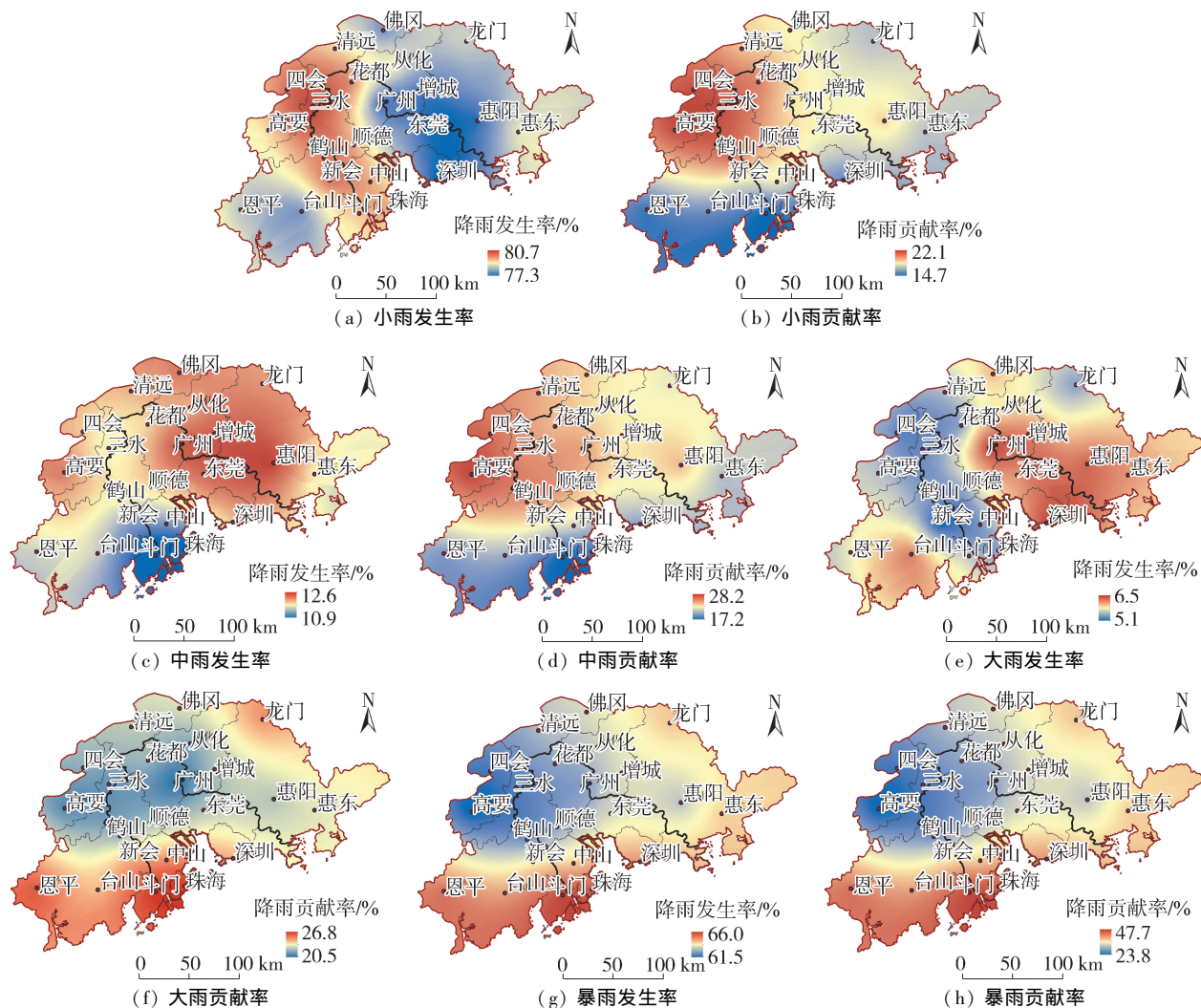


图8 不同等级降雨发生率和贡献率的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different rainfall levels

高、南部低的分布,大雨贡献率呈南部高、北部低的分布,暴雨贡献率呈南部高、西北部低的分布。珠三角地区降雨贡献率的空间分布与海陆位置存在明显相关关系,小雨和中雨的降雨贡献率空间分布相似,沿海地区降雨贡献率相对较低,从东南沿海向西北内陆逐渐增加,中、西部内陆地区为中、小雨降雨贡献率高值区域。大雨和暴雨的降雨贡献率空间分布特征与之相反,从东南向西北逐渐减少,沿海地区尤其是珠海、江门一带为高值区域。总体而言,各等级降雨发生率的空间分布较为均匀,相差幅度不超过4%。但降雨贡献率空间分布则出现明显的地区差异,其中暴雨降雨贡献率的空间差异性最强,最高值与最低值相差了24%。

4.2 不同等级降雨发生率和降雨贡献率变化

为探究珠三角地区不同等级降雨发生率和贡献率的演变趋势以及城镇化对其产生的影响,利用Mann-Kendall趋势检验方法进行统计分析,统计结果见表3。可以看出,珠三角地区不同等级降雨发生率和贡献率的变化趋势并不一致,从降雨发生率看,珠三角地区小雨发生率呈显著降低趋势,中雨、大雨发生率呈显著增加趋势,暴雨有增多趋势但并未通过显著性检验;从降雨贡献率看,仅小雨的贡献率呈显著下降趋势,中雨、大雨、暴雨的贡献率并无明显变化。也就是说,珠三角地区的场次降雨等级发生了显著变化。

表3 不同等级降雨发生率和降雨贡献率的M-K值
Table 3 M-K values of rainfall occurrence rate and rainfall contribution rate with different rainfall levels

地区	降雨发生率的M-K值			
	小雨	中雨	大雨	暴雨
珠三角地区	-2.23**	2.27**	1.83**	1.08
高度城镇化地区	-2.60***	1.41*	2.06**	1.43*
北部地区	-1.43*	1.78**	0.90	0.92
西部地区	-2.06**	2.30**	0.36	0.80
东部地区	-0.97	0.80	1.18	0.03

地区	降雨贡献率的M-K值			
	小雨	中雨	大雨	暴雨
珠三角地区	-1.32*	-0.25	0.15	0.38
高度城镇化地区	-1.78**	-1.15	0.57	0.71
北部地区	-1.74**	-0.69	0.34	1.34*
西部地区	-1.01	0.36	-0.70	0.03
东部地区	-0.01	0.50	0.34	-0.30

注: *表示达到90%置信度, **表示达到95%置信度, ***表示达到99%置信度。

根据表3中各子研究区的统计结果可以发现,高度城镇化地区中雨、大雨、暴雨发生率均显著增加,但贡献率无明显变化;小雨发生率和贡献率则显著降低。北部地区中雨发生率显著增加,小雨发生率和贡献率显著降低。西部地区中雨发生率

显著增加,小雨发生率显著降低。东部地区各降雨结构指标均无明显变化。也就是说,除东部地区以外,其他3个子研究区的场次降雨等级均发生了明显变化。

5 结 论

a. 从土地城镇化和人口城镇化两方面分析珠三角地区城镇化发展进程和特点,珠三角地区1980—2015年建设用地面积呈现大幅增长趋势,增长率达152.05%。到2000年后,逐渐形成以广州—深圳为核心,与佛山、东莞、中山、珠海共同组成高度城镇化城市群的格局特点,综合土地城镇化和人口城镇化的发展结果将研究区域划分为高度城镇化地区和非高度城镇化地区。

b. 根据降雨历时将降雨事件分为1~3h、3~6h、6~12h、大于12h 4类,结果表明,珠三角地区的降雨事件主要以6h以内的短历时降雨为主,但降水量的贡献主体是6h以上的长历时降雨。在空间上,珠三角沿海地区与内陆地区相比,雨量更加集中于长历时降雨事件中;在时间上,珠三角地区的场次降雨历时并未发生显著变化。

c. 根据降雨等级将降雨事件分为小雨、中雨、大雨、暴雨4类,结果表明,珠三角地区的降雨事件主要以弱降雨为主,但降水量的主要贡献则取决于发生次数较少的强降雨事件。在空间上,降雨贡献率的空间分布与海陆位置存在明显相关关系,中、小雨降雨贡献率高值区域为中、西部内陆地区,大、暴雨降雨贡献率高值区域为沿海地区;在时间上,珠三角地区场次降雨等级发生了显著变化,中、大雨发生率显著增加,小雨发生率显著减少,高度城镇化地区的场次降雨等级变化最为明显,中、大、暴雨发生率呈显著增加趋势,小雨发生率呈显著下降趋势。

参考文献:

[1] 张建业,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[2] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J]. 水利学报,2019,50(1):53-61. (XU Zongxue,CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):53-61. (in Chinese))

[3] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等. 中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J]. 水科学进展,2020,31(5):713-

724. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- [4] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 10-14. (XU Zongxue, REN Meifang, CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 10-14. (in Chinese))
- [5] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))
- [6] 王磊之,云兆得,胡庆芳,等. 国内外城市雨洪管理指标体系对比及启示[J/OL]. 水资源保护, <https://ie.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=SZYB20210112000&dbcode>. (WANG Leizhi, YUN Zhaode, HU Qingfang, et al. Comparison and enlightenment of urban stormwater management index system at home and abroad[J/OL]. Water Resources Protection, <https://ie.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?filename=SZYB20210112000&dbcode>. (in Chinese))
- [7] 黄国如,罗海婉,陈文杰,等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))
- [8] 黄国如,陈易偲,姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 161-170. (HUANG Guoru, CHEN Yisi, YAO Zhijun. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 161-170. (in Chinese))
- [9] GU Y F, LI D. A modeling study of the sensitivity of urban heat islands to precipitation at climate scales[J]. Urban Climate, 2017, 24: 982-993.
- [10] GANESHAN M, MURTUGUDDE R, IMHOFF M. A multi-city analysis of the UHI-influence on warm season rainfall[J]. Urban Climate, 2013, 6: 1-23.
- [11] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 779-790. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 779-790. (in Chinese))
- [12] 孔锋,薛澜,郭君. 气候工程对中国不同等级降雨结构的可能影响[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1397-1410. (KONG Feng, XUE Lan, GUO Jun. Possible impact of climate engineering on rainfall structure of different grades in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(6): 1397-1410. (in Chinese))
- [13] ZHANG Q, XU C Y, CHEN X, et al. Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960-2005[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(11): 1665-1678.
- [14] LI J, ZHANG Q, CHEN Y D, et al. Changing spatiotemporal patterns of precipitation extremes in China during 2071-2100 based on earth system models[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(22): 12537-12555.
- [15] 张建云,宋晓猛,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment; I: hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [16] 孙继松,舒文军. 北京城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 311-320. (SUN Jisong, SHU Wenjun. The effect of urban heat island on winter and summer precipitation in Beijing region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(2): 311-320. (in Chinese))
- [17] 张赟程,王晓峰,张蕾,等. 海风与热岛耦合对上海强对流天气影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2017, 36(3): 705-717. (ZHANG Yuncheng, WANG Xiaofeng, ZHANG Lei, et al. Numerical simulation of the impacts of the sea-breeze and the urban heat island on the severe convective event in Shanghai[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(3): 705-717. (in Chinese))
- [18] PATHIRANA A, DENEKEW H B, VEERBEEK W, et al. Impact of urban growth-driven landuse change on microclimate and extreme precipitation: a sensitivity study[J]. Atmospheric Research, 2014, 138(1): 59-72.
- [19] 宋晓猛,张建云,刘九夫,等. 北京地区降水结构时空演变特征[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 525-535. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. Spatial-temporal variation characteristics of precipitation pattern in Beijing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(5): 525-535. (in Chinese))
- [20] 王建鹏,孙继松,王式功,等. 盆地地形下西安城市热岛效应对周边降水的影响[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 168-173. (WANG Jianpeng, SUN Jisong, WANG Shigong, et al. Impact of basin terrain urban heat island effect on precipitation in surrounding region of Xi'an[J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(2): 168-173. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-08 编辑:王芳)