

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20250478

郑州市城市内涝多尺度时空分布特征及其驱动力分析

郑 婕^a, 王雪妮^{a,b}, 晋 华^a, 赵忠峰^a

(太原理工大学 a. 水利科学与工程学院; b. 流域水资源协同利用山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 近年来频发的暴雨令郑州市饱受城市内涝危害, 明确内涝时空分布特征及驱动力有助于改善郑州市当前易涝现状。基于郑州市2020~2024年内涝数据, 采用标准差椭圆法、自相关法、核密度估计法和参数最优地理探测器, 从多尺度出发系统分析了郑州市内涝点的时空分布特征及其驱动力。研究结果表明, 郑州市内涝点年际分布不均; 空间上内涝重心位于老城区, 不同尺度内涝点均存在显著的聚集性, 且3 km尺度下空间聚集性最强; 驱动因子解释力存在显著尺度效应, 不同尺度下社会经济类和城市建设类驱动因子解释力均最强, 因子协同作用的解释力显著超越单因子的独立作用。

关键词: 城市内涝; 时空分布特征; 驱动力分析; 郑州市; 多尺度; 参数最优地理探测器

中图分类号: TV122; TU998.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2026)01-0006-05

Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Forces of Urban Waterlogging in Zhengzhou City

ZHENG Jie^a, WANG Xue-ni^{a,b}, JIN Hua^a, ZHAO Zhong-feng^a

(a. College of Water Resources Science and Engineering; b. Shanxi Key Laboratory of Collaborative Utilization of River Basin Water Resources, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In recent years, frequent heavy rains have made Zhengzhou city suffer from the hazards of urban waterlogging. Identifying the spatiotemporal distribution characteristics and driving forces of waterlogging can help improve the current flood-prone situation in Zhengzhou city. Based on the waterlogging data of Zhengzhou from 2020 to 2024, the standard deviation ellipse method, autocorrelation method, kernel density estimation method, and optimal parameter geographic detector were used to systematically analyze the spatiotemporal distribution characteristics of waterlogging points and their driving forces from multiple scales. The results show that the annual distribution of waterlogging points in Zhengzhou is uneven; Spatially, the the focus of waterlogging is located in the old urban area, with significant clustering of waterlogging points at different scales, especially with the strongest spatial clustering within a 3km scale; There is a significant scale effect in the explanatory power of driving factors, with socioeconomic and urban construction driving factors having the greatest explanatory power at different scales, and the combined effect of factors significantly surpasses the independent effects of single factors.

Key words: urban waterlogging; spatiotemporal distribution characteristics; driving factor analysis; Zhengzhou city; multi-scale; optimal parameter geographical detector

1 引言

受全球气候变化和快速城市化叠加影响, 郑

州市面临日趋严峻的城市内涝问题。作为国家中心城市和中原城市群核心枢纽, 郑州市内涝已演变为复合型灾害, 这种灾害不仅造成多种形式的本地化危害, 还通过交通中断、产业链断裂等次生

收稿日期: 2025-03-17, 修回日期: 2025-04-06, 接受日期: 2025-04-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379018); 山西省科技厅基础研究计划项目(202203021222112); 华北水利水电大学河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室开放研究基金(HAKF202104)

作者简介: 郑婕(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为海绵城市建设及城市内涝模拟, E-mail: zhengjie324@163.com

通讯作者: 王雪妮(1986-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水文模拟、水资源高效利用与节水, E-mail: wangxueni@tyut.edu.cn

灾害对全国经济系统产生链式冲击。因此,系统解析郑州市内涝的时空分异规律及其驱动因子,已成为提升特大城市韧性、完善国家灾害防控体系的迫切需求。城市内涝形成机制研究已形成多维度研究框架,现有成果在郑州市灾害特征解析、风险评估体系构建、内涝过程模拟等^[1-3]方面取得重要进展。然而针对郑州市内涝问题的研究仍存在显著不足,一方面时空分布特征量化分析呈现碎片化特征,缺乏系统性空间异质性解析;另一方面传统地理探测器在参数设置环节存在主观性偏差,导致内涝驱动力识别结果存在离散效果不佳的问题^[4]。在此背景下,发现参数最优地理探测器通过自适应参数优选机制可显著提升分析效果。如张晨钰等^[5]在深圳市 1 km 尺度上开展的示范性研究证实了该方法的有效性,为多城市比较研究提供了方法论参考。然而,需要指出的是,地理现象的空间异质性具有显著尺度依赖特征^[6],必须从多尺度开展才能够更深入地理解空间异质性下的驱动特征^[7]。当前基于参数最优地理探测器的多尺度协同分析框架在郑州市内涝研究中的缺失,直接制约了对城市复杂内涝驱动机制的深入认知。对此,本文首先采用标准差椭圆法、空间自相关法和核密度估计法系统量化分析了郑州市多尺度下的内涝时空分布特征,其次选取参数最优地理探测器定量评价了不同尺度下郑州市内涝驱动力作用机制。研究成果可为郑州市内涝预防和管理提供科学依据与技术支持。

2 研究数据与方法

2.1 数据及说明

研究数据包括以下几类:①郑州市 2020~2024 年内涝点数据;②气象特征;③地表环境;④社会经济;⑤城市建设。郑州市区域概况及内涝点分布见图 1,各数据说明见表 1。

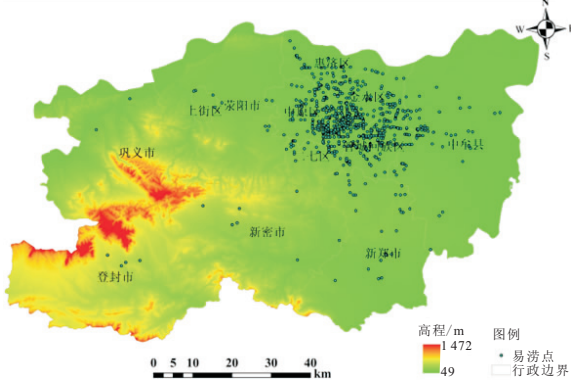


Fig. 1 Overview of the distribution map of waterlogging points

表 1 研究数据
Tab. 1 Research data

数据类别	数据名称	符号	时间范围	分辨率	数据来源
历史易涝点	郑州市易涝点	wl	2020~2024		郑州交通等官方媒体
	气象特征	rf	2001~2023		根据国家青藏高原科学数据中心相关数据计算
	平均汛期降水量	xrf	2001~2023		根据国家青藏高原科学数据中心相关数据计算
地表环境	高程	dem		30 m×30 m	地理空间数据云
	地形起伏度	re			高程数据生成
	坡度	slop			高程数据生成
	植被覆盖	ndvi	2021	30 m×30 m	中国科学院资源与环境数据中心
社会经济	人口	pop	2020	1 km×1 km	中国科学院资源与环境数据中心
	GDP	gdp	2020	1 km×1 km	中国科学院资源与环境数据中心
城市建设	建筑密度	build	2021		Open street map
	道路密度	road	2021		Open street map
	土地利用	lu	2021	30 m×30 m	ZENODO

2.2 分析尺度的确定

科学确定研究尺度范围是多尺度分析的关键前提。基于郑州市内涝分布的统计结果发现,郑州市内涝点平均距离为 428.06 m。根据最小尺度应大于平均距离原则^[8],选取 500 m 作为最小尺度。此外,通过 ArcGIS 对郑州市进行栅格分析可知,当栅格尺度扩大至 5 km 时,郑州市内涝机理研究仅能使用 300 个栅格。为确保栅格分析结果的可靠性和代表性,以 5 km 作为研究区的最大尺度,并分别采用 500 m 和 1、2、3、5 km 栅格开展郑州市内涝点的时空分布特征及其驱动力分析。

2.3 研究方法

为系统分析研究区内涝时空分布特征,采用标准差椭圆法判断内涝点的离散程度和方向趋势;其次,基于全局空间自相关分析内涝点之间的关联情况,局部空间自相关判断各区域或格网内涝点与邻区或格网的空间关联及差异程度;再次,应用核密度估计法研究内涝点的内涝易发度;最后,选取参数最优地理探测器,实现对研究区内涝驱动力的分析。各方法原理详见文献[5,9,10]。

3 结果与分析

3.1 内涝点时间分布特征

郑州市 2020~2024 年监控到的内涝点共 931 处,郑州市内涝点年际分布不均,其中,2021 年内涝点最多,达 502 个;2024 年次之为 266 个;2022 年则最少,仅 38 个。分析出现该现象的原因在于“720”特大暴雨和 2024 年 7 月连续极端降雨导致 2021、2024 年内涝点数较多,而 2022 年为

枯水年,年降雨量仅 449.7 mm,为研究时段内降雨量最小年份,相应地该年份内涝点数量最少。

3.2 内涝点空间分布特征

3.2.1 内涝点重心迁移、离散程度及方向趋势

采用标准差椭圆法分析郑州市 2020~2024 年内涝情况,结果见图 2、表 2。由图 2 可看出,2020~2024 年郑州市内涝重心形成“二七—金水—二七—管城”的迁移轨迹。由表 2 可看出,2020~2024 年郑州市内涝点空间分布呈现显著变化,2020 年内涝点高度集聚于以中原区、金水区、二七区和管城回族区为代表的老城区,表现为标准差椭圆扁率最高、方向性最明显、面积最小;至 2024 年,其标准差椭圆的短轴逐渐变大,扁率变小,方向性减弱,面积增大,内涝点由中心集聚转向全域离散分布。推测其原因,一方面 2021 年“720”特大洪水之后,郑州市政府和相关部门高度重视内涝隐患并积极整改,城市中心区域内涝问题得到明显改善,另一方面 2020~2024 年周边县市排水系统建设未能跟上城市扩张步伐,同时扩大的内涝监控范围,使得周边县市内涝隐患逐渐暴露。在这两方面共同作用下郑州市内涝点的集聚性呈减弱趋势。

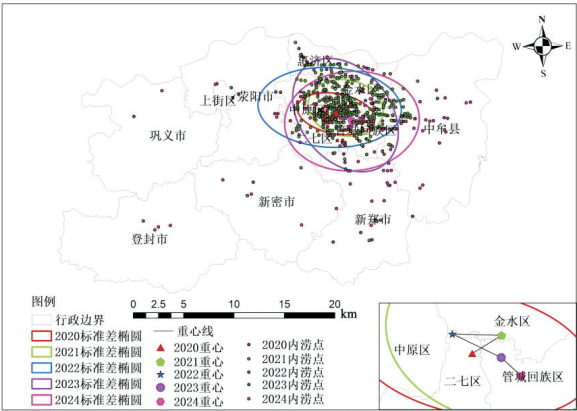


图 2 郑州市内涝重心迁移及标准差椭圆

Fig. 2 Migration of waterlogging center of gravity and standard deviation ellipse in Zhengzhou city

表 2 郑州市内涝点空间分布标准差椭圆参数

Tab. 2 Standard deviation ellipse parameters of spatial distribution of waterlogging points in Zhengzhou city

年份	重心位置	长轴 /km	短轴 /km	扁率	方向角 度/(°)	面积 /km ²
2020	二七区	11.99	6.11	0.49	100.58	230.40
2021	金水区	11.58	8.54	0.26	100.77	310.63
2022	二七区	21.93	12.15	0.45	93.35	836.64
2023	管城回族区	19.17	13.84	0.28	141.23	833.25
2024	管城回族区	20.60	15.17	0.26	86.11	981.67

3.2.2 基于空间自相关法的空间分布特征

表 3 为基于全局空间自相关法计算的不同尺度空间自相关系数。由表 3 可看出,各尺度的全

局莫兰指数均显著偏离 0 值,说明研究区数据点在空间上并非随机分布。 Z 得分衡量空间模式与随机分布的偏离程度,而 P 值用于判断该模式的统计显著性,当 $P < 0.05$ 、 $Z > 1.96$ 时,存在显著的正相关。各尺度空间相关性排序为 $3\text{ km} > 2\text{ km} > 5\text{ km} > 1\text{ km} > 500\text{ m}$ 。当研究尺度 $\leq 3\text{ km}$ 时,随着尺度的增大,郑州市内涝点的空间集聚性越来越强,3 km 尺度时最强,而当尺度超过 3 km 时,空间集聚性则再次减弱,这表明一方面郑州市地形汇流单元与排水系统分区在 3 km 时高度吻合,导致降雨径流快速汇聚。另一方面郑州市排水管网设计容量不足、老化或布局不合理在此尺度集中暴露。

表 3 不同尺度空间自相关系数

Tab. 3 Spatial autocorrelation coefficients at different scales

尺度/m	莫兰指数	Z	P
500	0.210	51.644	0.000
1 000	0.389	67.454	0.000
2 000	0.642	55.984	0.000
3 000	0.709	41.243	0.000
5 000	0.634	23.599	0.000

为分析研究区内各区域与相邻区域内涝点的空间关联及差异程度,开展局部自相关分析,得到图 3 所示的局部自相关分析集聚图。由图 3 可知,金水区、管城回族区和二七区内涝点呈高一高集聚,该区域地势低平且发展较早,建筑密集、管网老化,容易产生内涝问题。惠济区和中原区为低—高集聚,原因是该区域发展较周边区滞后且人口分散,无严重内涝问题。巩义市属低—低集聚,因其海拔高、城市化水平低,不易产生内涝问题。其余区域则无显著集聚特征。

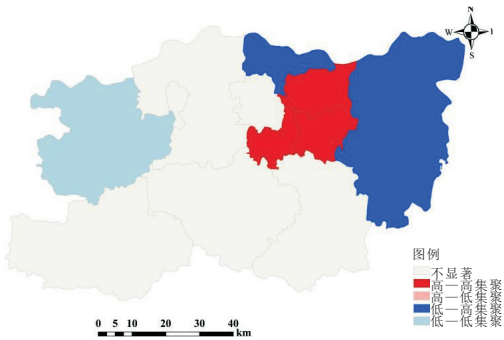


图 3 区域局部自相关分析图

Fig. 3 Regional local autocorrelation analysis plot

3.2.3 基于核密度的空间分布特征

2020~2024 年郑州市内涝点核密度分析结果见图 4。由图 4 可知,核密度的年内分布呈现显著的不均匀性和集聚效应。2020~2024 年,中原区、金水区、二七区和管城回族区作为老城区是核密度高值的主要集中区域,且每年均存在一个

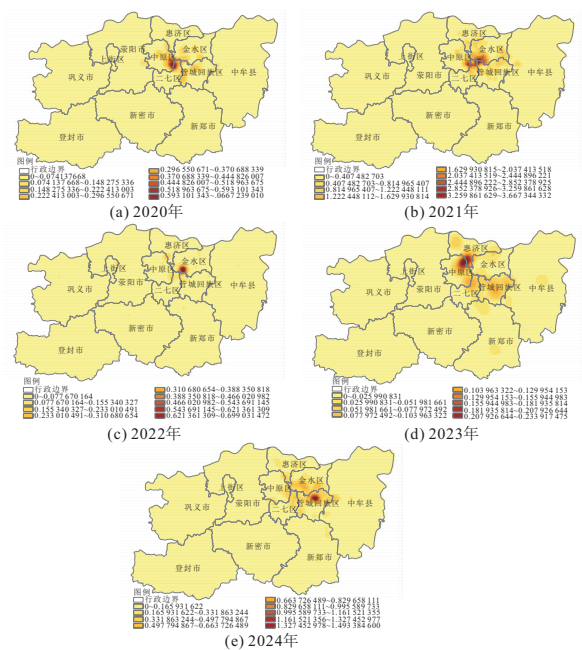


图 4 2020~2024 年内涝点核密度

Fig. 4 Kernel density at waterlogging points from 2020 to 2024

绝对高密度核心。其主要原因为老城区建设年

限早基础设施老化、硬化率高渗透性差、建筑密度大排水压力大,叠加标高不足导致排水不畅,使得老城区成为内涝风险的高发区域。

3.3 基于不同尺度的内涝驱动力分析

从气象特征、地表环境、城市建设和社会经济 4 个维度选取 11 个驱动因子^[5,9,10],具体因子选取及对应符号见表 1。以核密度估计值作为目标变量,使用地理探测器模型的因子探测器和交互作用探测器分析各因子对内涝分布的影响。

3.3.1 连续型因子最优参数离散化

选取 11 个内涝驱动因子均为连续型变量,选取等距、分位数、自然断点、几何间隔和标准差共 5 种方法对其进行离散化处理,并设置分类数量为 5~10 类,以平衡统计效能与模型复杂度。在参数优化过程中,通过穷举不同离散化方法与分类数的组合,筛选出各驱动因子解释力强度 q 值最大化的最优参数组合,见表 4。

3.3.2 因子探测分析

基于因子探测器的多尺度因子分析结果见图 5。

表 4 不同尺度下驱动因子的最优离散化参数组合

Tab. 4 Optimal discretization parameter combination of driving factors at different scales

符号	500 m		1 km		2 km		3 km		5 km	
	离散化方式	分类	离散化方式	分类	离散化方式	分类	离散化方式	分类	离散化方式	分类
rf	分位数	8	分位数	8	分位数	10	分位数	9	分位数	10
xrf	分位数	10	分位数	10	自然断点法	10	自然断点	9	分位数	8
dem	分位数	10	分位数	8	分位数	10	分位数	9	分位数	7
re	分位数	10	分位数	9	分位数	10	分位数	10	几何间隔	10
slop	分位数	8	几何间隔	6	分位数	10	分位数	10	分位数	9
ndvi	几何间隔	10	几何间隔	10	标准差	10	几何间隔	8	等距	9
pop	标准差	10	标准差	10	标准差	10	等距	9	分位数	8
gdp	等距	9	等距	9	等距	9	等距	9	自然断点法	10
build	等距	10	等距	10	标准差	10	等距	7	几何间隔	7
road	自然断点法	6	自然断点法	6	等距	8	等距	9	几何间隔	6

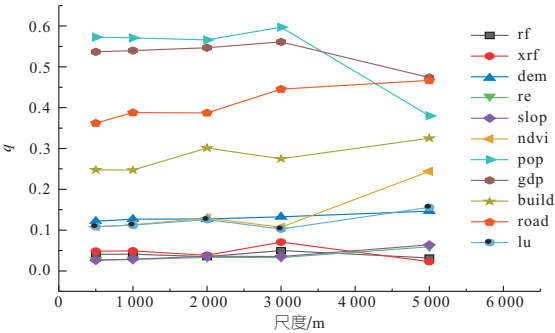


图 5 不同尺度下因子探测器分析结果

Fig. 5 Analysis results of factor detectors at different scales

由图 5 可知,郑州市内涝影响因子的解释力呈现显著的尺度效应特征。在 500~3 000 m 网格尺度范围内,人口密度、GDP、道路密度和建筑密度持续占据解释力前四位,且具有“人口>GDP>道路密度>建筑密度”的稳定排序。当尺度扩展

至 5 km 时,主导因子构成虽未改变,但排序发生显著变化(GDP>道路密度>人口>建筑密度),显示经济要素在大尺度分析中的重要性提升。

从解释力动态变化来看,道路密度与建筑密度在 500~3 000 m 尺度区间呈现整体上升趋势,波幅达 15.1%~21.9%。这种现象可归因于空间聚合效应,随着尺度增大,网格内包含完整道路和建筑要素的概率提升,促使解释力增强。然而受城市规划密度阈值限制,当网格尺度超过 3 km 后,道路和建筑密度的解释力增长趋于平缓并出现波动。值得注意的是,5 km 尺度下出现典型指标异动,即 GDP、人口密度的 q 值分别下降 15.5%、36.4%,而建筑密度、植被覆盖度的解释力则相应提升 18.3%、128.1%。前者源于空间平均效应对核心区集聚特征的弱化;后者则因尺度扩展突破城市规划密度阈值,同时纳入周边较

高植被覆盖区域,形成复合影响机制。

从因子类型维度分析,社会经济类和城市建设类因子的累计解释力贡献达 76.0%~83.1%,构成内涝形成的主导因素;地表环境类贡献度为 12.8%~21.7%;气候特征类因子解释力贡献最低为 2.3%~5.0%。这一分布规律印证了人类活动强度与城市内涝风险的显著正相关性,建议在防灾规划中重点控制土地开发强度和基础设施布局。

3.3.3 交互探测分析

采用交互探测器探究驱动因子之间的协同作用,结果见图 6。由图 6 可看出,驱动因子间的解释力呈现鲜明的尺度依赖性特征。500 m 和 1、2 km 的精细尺度下,人口和年降雨量协同作用解释力最强,其次是 GDP 和年降雨量的组合。而在 3、5 km 的中宏观尺度下,GDP 与年降雨量的协同作用跃居首位,人口密度与降雨量的组合次之。表明内涝驱动机制具有尺度依赖性,即微观尺度受人口密度主导,宏观尺度则更依赖经济水平。因此,微观管理层面需重点管控高密度区雨水径流,中宏观规划应提升发达区域的韧性基础设施建设。GDP-降雨量和人口-降雨量这两组协同作用是郑州市内涝形成的主要驱动机制。

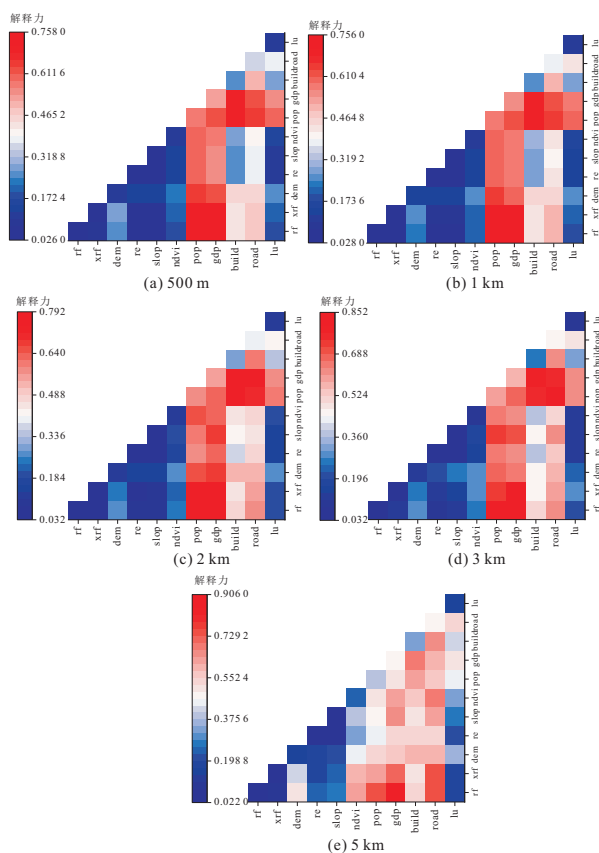


图 6 不同尺度交互探测结果

Fig. 6 Interactive detection results at different scales

对比图 5、6 可发现,因子的协同解释力显著高于单因子,特别当降雨与社会经济因子交互时,解释力呈现非线性增强,证实内涝是自然—人文要素非线性耦合结果,很好地印证了“自然因子奠定灾害本底,人文因子放大灾害效应”的经典灾害学理论。

4 结论

a. 基于 2020~2024 年郑州市内涝点数据,本文综合运用标准差椭圆法、空间自相关分析、核密度估计及参数最优地理探测器等多尺度空间分析方法,系统揭示了郑州市内涝时空分异规律及其驱动机制。

b. 内涝点年际分布呈现明显非均衡特征,极端降雨事件是内涝年际波动的重要诱因。

c. 郑州市内涝点空间分布处于动态变化中,但重心一直在老城区内。未来应加强老城区的排水系统改造,提升防洪排涝能力,以减少内涝灾害的发生频率和影响范围。

d. 单个驱动因子和驱动因子间的解释力均呈现显著的尺度依赖性特征。与单因子对内涝的解释力强度相比较,多因子协同作用呈现非线性增强效应。

参考文献:

- [1] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1618-1626. (ZHANG J Y, SHU Z K, WANG H J, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou [J]. Acta geographica sinica, 2023, 78(7): 1618-1626. (in Chinese))
- [2] 王振亚,姚成,董俊玲,等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Z Y, YAO C, DONG J L, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of hohai university (natural sciences), 2022, 50(3): 17-22. (in Chinese))
- [3] 张金萍,张朝阳,左其亭. 基于 InfoWorks ICM 的城市内涝模拟与城市应急响应能力评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 77-81. (ZHANG J P, ZHANG Z Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and urban emergency response capability evaluation based on InfoWorks ICM [J]. Water resources and power, 2022, 40(11): 77-81. (in Chinese))

(下转第 37 页)

由图 6(a)、(b)可看出,未来情景下具有较短持续时间和较弱干旱强度的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(c)、(d)可看出,未来情景下具有更广影响范围的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(e)可看出,未来情景下的时空连续性气象干旱事件,其概率密度曲线相对于历史时期整体向左偏移,表明极端事件的平均移动距离减少,而具有较小影响范围的时空连续性气象干旱事件发生的概率有上升趋势。由图 6(f)可看出,未来情景与历史情景的概率分布基本相似,但未来情景下的概率密度曲线具有较大的尾部,意味着一些干旱事件会有更快的移动速度。

4 结论

a. 1961~2021 年中国的时空连续性气象干旱事件可被分为 3 种传播模式,类型 1 事件主要起源于中国东南地区,向西北传播;类型 2 事件主要起源于中国西北并向西传播;这两类气象干旱事件持续时间长、影响范围广,但发生频率较低。类型 3 发生频率高、持续时间短、影响范围较小。

b. 未来的两种排放情景下,时空连续性气象干旱的数量和特征差异不明显。但与历史情景相比,事件总数量呈上升趋势,持续时间和强度有所减弱,最大面积和总面积均呈增加趋势。

c. 本文利用时空连续性事件的识别方法,采用 CC3D 算法,识别在时间和空间上均连续的气象

(上接第 10 页)

- [4] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta geographica sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [5] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 35-45. (ZHANG C Y, WANG W, HUANG L, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background[J]. Water resources protection, 2024, 40(2): 35-45. (in Chinese))
- [6] FU G, WANG W, LI J S, et al. Prediction and selection of appropriate landscape metrics and optimal scale ranges based on multi-scale interaction analysis[J]. Land, 2021, 10(11): 1192.
- [7] WU J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: Scaling relations[J]. Landscape ecology, 2004, 19(2): 125-138.
- [8] HUANG Y Q, LIN J Y, HE X Y, et al. Assessing the scale effect of urban vertical patterns on urban waterlogging: An empirical study in Shenzhen[J]. Environmental impact assessment review, 2024, 106: 107486.
- [9] 郑佳薇,尹昌应,戴丽,等. 多尺度下西南喀斯特山地城市内涝空间分布特征与驱动力分析:以贵阳市为例[J]. 水利水电技术, 2023(2): 33-46. (ZHENG J W, YIN C Y, DAI L, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of inundation in karst mountains, Southwest China at multi-scales: Taking Guiyang City as an example[J]. Water resources and hydro-power engineering, 2023(2): 33-46. (in Chinese))
- [10] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下粤港澳大湾区易涝点驱动力分析:以深圳市为例[J/OL]. 水资源保护, 2023: 1-19. (2023-08-01). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20230728001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (ZHANG C Y, WANG W, HUANG L, et al. Driving forces of waterlogging sites in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in the context of high urbanization: Taking Shenzhen City as an example[J/OL]. Water resources protection, 2023: 1-19. (2023-08-01). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20230728001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese))

参考文献:

- [1] DILLEY M, CHEN R S, DEICHMANN U, et al. Natural disaster hotspots: A global risk analysis [M]. Washington DC: World Bank, 2005.
- [2] 程亮,金菊良,郦建强,等. 干旱频率分析研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 296-302. (CHENG L, JIN J L, LI J Q, et al. Advance in the study of drought frequency analysis[J]. Advances in water science, 2013, 24(2): 296-302. (in Chinese))
- [3] HASLINGER K, BLÖSCHL G. Space-time patterns of meteorological drought events in the European greater alpine region over the past 210 years [J]. Water resources research, 2017, 53(11): 9807-9823.
- [4] HERRERA-ESTRADA J E, SATOH Y, SHEPHERD J. Spatiotemporal dynamics of global drought[J]. Geophysical research letters, 2017, 44(5): 2254-2263.
- [5] WU J, GAO X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese journal of geophysics, 2013, 56(4): 1102-1111.
- [6] SEILER R A, HAYES M, BRESSAN L. Using the standardized precipitation index for flood risk monitoring[J]. International journal of climatology, 2002, 22(11): 1365-1376.
- [7] SILVERSMITH W. cc3d: Connected components on multilabel 3D & 2D images[EB/OL]. <https://github.com/seung-lab/connected-components-3d>, 2021.
- [8] DASGUPTA S, LONG P M. Performance guarantees for hierarchical clustering[J]. Journal of computer and system sciences, 2005, 70(4): 555-569.
- [9] 郑佳薇,尹昌应,戴丽,等. 多尺度下西南喀斯特山地城市内涝空间分布特征与驱动力分析:以贵阳市为例[J]. 水利水电技术, 2023(2): 33-46. (ZHENG J W, YIN C Y, DAI L, et al. Analysis of spatial and temporal distribution characteristics and driving factors of inundation in karst mountains, Southwest China at multi-scales: Taking Guiyang City as an example[J]. Water resources and hydro-power engineering, 2023(2): 33-46. (in Chinese))
- [10] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下粤港澳大湾区易涝点驱动力分析:以深圳市为例[J/OL]. 水资源保护, 2023: 1-19. (2023-08-01). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=SZYB20230728001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese))