

基于多尺度的重庆中心城区内涝点空间分布及其驱动力分析

李俊奇^{1,2}, 陈东东^{1,2}, 刘迪^{1,2}

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044)

摘要:针对城市内涝研究中对尺度效应及多因子交互作用关注不足,尤其在空间异质性强的山地城市中存在显著局限的问题,以重庆中心城区为研究区,基于 2015—2021 年的内涝点数据,利用空间分析方法识别不同尺度下的内涝点空间分布,并结合统计分析方法探究了不同尺度下各因子与内涝点空间分布之间的相关关系以及各因子对内涝点空间分布独立和交互作用机制的变化趋势。结果表明:重庆中心城区内涝点空间分布在各尺度下均保持稳定状态,在 5 km 尺度下,空间聚集特征最明显;同一因子的作用效果和机制在不同尺度及城市特征中呈现出明显差异。

关键词:内涝点空间分布;多尺度分析方法;驱动因子;山地城市;重庆市

中图分类号:TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0055-10

Analysis of spatial distribution and driving force of waterlogging sites in central urban area of Chongqing City based on multi-scale//LI Junqi^{1,2}, CHEN Dongdong^{1,2}, LIU Di^{1,2} (1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing 100044, China)

Abstract: In view of insufficient attention paid to scale effects and the interaction of multiple factors in urban waterlogging research, especially the significant limitations in mountainous cities with strong spatial heterogeneity, taking the central urban area of Chongqing City as the study area, the spatial analysis method was used to identify the spatial distribution of waterlogging sites at different scales based on the waterlogging site data from 2015 to 2021. Combined with the statistical analysis method, correlations between each factor and the spatial distribution of waterlogging sites at different scales, as well as the changing trends of the independent and interactive effects of each factor on the spatial distribution of waterlogging sites were explored. The results show that spatial distribution of waterlogging sites in the central urban area of Chongqing City remains stable at all scales. The spatial aggregation feature is most obvious at 5 km scale, while the effect and mechanism of the same factor show obvious differences at different scales for different urban characteristics.

Key words: spatial distribution of waterlogging sites; multi-scale analysis method; driving factor; mountainous city; Chongqing City

在全球气候变化、城市下垫面变化和社会发
展不确定因素交互影响下,近年来我国许多城市相继
发生了严重的内涝灾害事件,如郑州“7·20”特大
暴雨^[1]、北京“23·7”极端暴雨^[2]、广东“5·22”龙
舟水暴雨^[3]及重庆“7·4”局地强降雨^[4]等。自
2013 年国务院发布《关于做好城市排水防涝设施建
设工作的通知》以及中央城镇化工作会议提出的海
绵城市理念以来,城市内涝治理取得了一定成
效^[5-6],总体情况有所改善。但某些地区由于排水系

统建设滞后及标准不合理等导致内涝问题依然严
重。因此,明确城市内涝点空间分布变化和发生机
理,是当前研究亟须解决的问题。

近年来,不同学者分别从城市建设因子^[7-8]、地
表环境因子^[9]、人口经济^[10-12]等角度,研究了不同
城市内涝事件的空间分布^[13-14]、形成机理^[15-16]、风
险分析^[17-18]及灾害防控^[19-20]。这些研究表明,大多
数城市内涝问题都是自然与人为因素共同作用的结
果,尤其在山地城市,由于其独特的自然环境和社会

经济条件,平原城市的治理经验在应用时存在一定的局限性。因此,未来山地城市排水防涝的研究应更加关注其特有的地形特征和空间结构变化,以提升城市内涝治理的有效性。另一方面,当前城市内涝机理研究已相对较为成熟,但大多研究只关注单一因子的独立影响,未能考虑多因子间的相互作用,这种局限性使得城市内涝问题的复杂性未能充分体现。特别是在山地城市,由于其空间异质性显著,相同因子在不同尺度下可能会存在不同的作用力度和方向,因此,仅采用单一分析尺度,往往会导致治理方案失效^[13],无法有效应对山地城市特有的内涝挑战。

重庆市作为典型的山地城市,近年来城市化进程加快,空间结构愈发复杂,内涝灾害频发。本文将其中心城区作为研究对象,基于重庆市住房和城乡建设委员会发布的 2015—2021 年城市内涝点数据,分析该区域城市内涝点空间分布变化,并采用多尺度分析方法,综合考虑山地城市的独特环境,探讨各因子与内涝点空间分布的相关性、相对贡献以及因子间交互作用,以期为重​​庆中心城区的排水防涝减灾提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

重庆中心城区(28°10'N~32°13'N,105°11'E~110°11'E)位于我国西南地区的长江上游,是成渝双城经济圈的重要组成部分,下辖 9 个行政区,截至 2021 年城镇化率达 93.13%。地形方面,条状山脉和丘陵谷地交错分布(图 1),丘陵和低山占比接近

80%,其中坡度大于 8°的坡地占 85.51%。气候方面,属亚热带湿润气候,年均降水量约 1 100 mm,降水主要集中在 5—9 月,占全年总量的 70%~85%。重庆作为山地型高密度城市的典型代表,与平原城市不同,受自然要素影响,其中心城区形成了典型的“多中心、组团式”的城市形态,内部空间结构具有高度异质性,也使得内涝点空间分布具有显著的空间差异性,对其内涝点空间分布及其影响因素的研究可为山地城市内涝治理提供科学依据。

1.2 数据来源

重庆中心城区内涝点数据来源于《重庆中心城区排水防涝专项规划(2022 修编)》,该专项规划仅记载了内涝点的地理位置,如下穿道、道路交叉口等,未提供确切坐标。本文利用高德和百度地图获取内涝点坐标信息,并建立内涝点矢量数据。气象环境因子中,降水量数据来源于 Google Earth Engine 平台,降雨日数来源于美国国家海洋和大气管理局。地表环境因子中,高程数据来自地理空间数据云,其余数据则通过 ArcGIS 提取。人口密度通过 World Pop 获取,GDP 来自中国科学院资源与环境数据中心。不透水面积来源于全球不透水地表面积数据集,土地利用类型来源于全国地理信息资源目录服务系统(GlobeLand 30),道路密度从开放街道地图获取。研究数据详见表 1。

表 1 研究数据

Table 1 Details of research data			
数据类别	数据名称	数据格式	数据说明
内涝点	内涝点地理位置	文本	2015—2021 年
	年均降水量	矢量数据	2015—2021 年
	大雨日数(R25)	文本	日降水量大于 25 mm 的天数
	暴雨日数(R50)	文本	日降水量大于 50 mm 的天数
气象环境	极端暴雨日数(R100)	文本	日降水量大于 100 mm 的天数
	高程	矢量数据	分辨率 30 m
	相对高程	矢量数据	高程数据生成
	坡度	矢量数据	高程数据生成
地表环境	地形起伏度	矢量数据	高程数据生成
	地形曲率	矢量数据	高程数据生成
	地表粗糙度	矢量数据	高程数据生成
	地形湿度指数	矢量数据	高程数据生成
人口经济	人口密度	矢量数据	分辨率 30 m
	GDP	矢量数据	分辨率为 1 km
城市建设	不透水面积占比	矢量数据	分辨率 30 m
	土地利用类型	矢量数据	分辨率 30 m
	道路密度	矢量数据	2021 年

2 研究方法

2.1 标准差椭圆

标准差椭圆是一种常用的空间分析方法,用于揭示地理数据的中心趋势、离散程度和方向性^[21]。通过统计重庆中心城区各行政区内的内涝点数量,

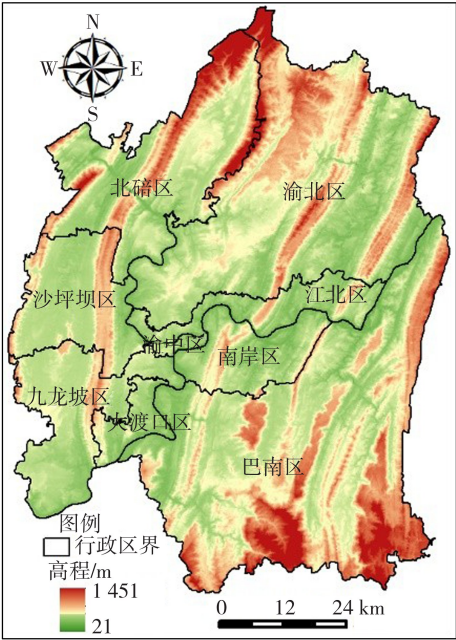


图 1 研究区地形

Fig. 1 Topography of study area

利用 ArcGIS 软件绘制标准差椭圆,计算其重心、长短轴、旋转角及椭圆大小等参数。这些参数分别描述研究区域内涝点空间分布的重心趋势、分布范围、方向性和聚集程度变化情况。

2.2 空间自相关

空间自相关用于分析地理空间数据中同一属性值在地理空间上的分布模式,揭示相似性或差异性^[22]。通过局部莫兰指数探究重庆中心城区不同尺度网格与其相邻网格之间的空间差异性,以进一步分析区域内两单元之间的异质性,利用 ArcGIS 软件绘制出局部莫兰指数图,揭示不同分析尺度下中心城区内涝点的空间聚集特征。

2.3 核密度分析

核密度分析是一种基于研究对象分布特点的空间分析方法,用来描述研究对象在一定地理空间内出现的概率分布情况,侧重反映研究对象在地理空间内部差异化分布的聚集程度及其对周边要素的影响程度^[23]。本文运用核密度分析探究重庆中心城区内涝点空间分布特征及其聚集情况。核密度值越高,表示内涝点空间分布越密集,聚集特征越显著,其计算公式为

$$F_x = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \tag{1}$$

式中: F_x 为目标点的核密度值; n 为样本内涝点数量; h 为带宽; $k(\cdot)$ 为核密度函数,决定数据点对密度的加权方式; x 为目标点位置; x_i 为第 i 个内涝点位置。

2.4 皮尔逊相关系数

皮尔逊相关系数是表达两变量线性相关程度及方向的统计指标^[24]。相关系数 r 取值范围为 $-1 \sim 1$, $0 < r \leq 1$ 为正相关, $r = 0$ 为不相关, $-1 \leq r < 0$ 为负相关。

2.5 地理探测器模型

地理探测器模型可用于探测某一因子是否影响被解释变量的空间分异^[25-26]。借助皮尔逊相关系数筛选出与山地城市内涝点空间分布显著相关的驱动因子,并运用地理探测器的因子探测器模块计算因子独立作用值 q 。 q 值是衡量自变量(驱动因子)与因变量(内涝点空间分布)之间关联强度的一个关键指标,能够定量表征各驱动因子对重庆中心城区不同尺度下内涝点空间分布差异的解释程度。 q 值越大,表示驱动因子对内涝点空间分布的解释力越强。通过交互探测,进一步识别不同尺度下驱动因子间的交互作用结果。基于交互作用值 Q 与独立作用值 q 的关系,将交互作用类型分为 5 类:双因子非线性减弱 ($Q < q_{\min}$)、单因子非线性减弱 ($q_{\min} < Q < q_{\max}$)、双因子增强 ($Q > q_{\max}$)、双因子独立 ($Q = q_{\text{sum}}$) 及双因子非

线性增强 ($Q > q_{\text{sum}}$),其中 $q_{\min}$ 、 $q_{\max}$ 、 q_{sum} 分别为两因子独立作用值 q 的最小值、最大值及总和。

3 结果与分析

3.1 内涝点变化特征

2015—2021 年,重庆中心城区内涝点数量发生了明显变化,2015—2020 年前统计的历史内涝点总数为 119 个,2021 年现状内涝点数量下降至 74 个,其中仅有一个为历史遗留内涝点,其余均为新增内涝点。整体上内涝点数量呈减少趋势,但不同城区内涝点数量变化趋势各异(表 2)。本文采用内涝点削减率评价城区内涝点数量变化趋势,其计算公式为

$$R = (n_A - n_B) / n_A \tag{2}$$

式中: R 为内涝点削减率; n_A 为历史内涝点个数; n_B 为现状内涝点个数。

表 2 重庆中心城区内涝点数量及削减率

Table 2 Number and reduction rate of waterlogging sites in central urban area of Chongqing City

区域	历史内涝点个数	现状内涝点个数	削减率/%
渝中区	4	1	75.0
大渡口区	5	1	80.0
江北区	15	21	-40.0
九龙坡区	8	10	-25.0
沙坪坝区	22	9	59.1
渝北区	18	22	-22.2
巴南区	12	6	50.0
北碚区	9	0	100.0
南岸区	26	4	84.6

从表 2 可以看出,北碚区、南岸区和大渡口区内涝点削减率分别为 100.0%、84.6%和 80.0%,内涝点治理效果明显;江北区、九龙坡区和渝北区内涝点削减率分别为-40.0%、-25.0%和-22.2%,内涝点增加趋势明显。

3.2 内涝点空间分布特征

3.2.1 重心演变及离散趋势

利用重心统计和标准差椭圆分析重庆中心城区内涝点空间分布及重心演变,结果如表 3 和图 2 所示。重庆中心城区内涝点空间分布及重心发生了显著变化,重心向西北方向偏移。历史内涝点标准差椭圆面积较大,说明历史内涝点分布范围更广;短半轴较长,表明内涝点分布较离散;扁率较大,方向性突出,呈明显的西北-东南分布。现状内涝点标准差椭圆面积较历史变小,说明重庆中心城区内涝点分布呈收缩趋势;短半轴较历史变小,意味着内涝点分布较为集中,聚集程度增强,分布相对集中,主要集中在江北区、渝北区、九龙坡区和渝中区;扁率降低,方向性减弱,整体从西北-东南转向东北-西南分布。

表 3 重庆中心城区内涝点标准差椭圆分析结果

Table 3 Analysis results of standard deviation ellipse of waterlogging sites in central urban area of Chongqing City

时期	重心坐标	长半轴/km	短半轴/km	方位角/(°)	面积/km ²	扁率
历史	29°34'22.10"N 106°31'1.10"E	15.60	10.32	170.72	505.94	0.34
现状	29°34'37.38"N 106°30'17.18"E	13.09	10.18	64.77	418.34	0.22

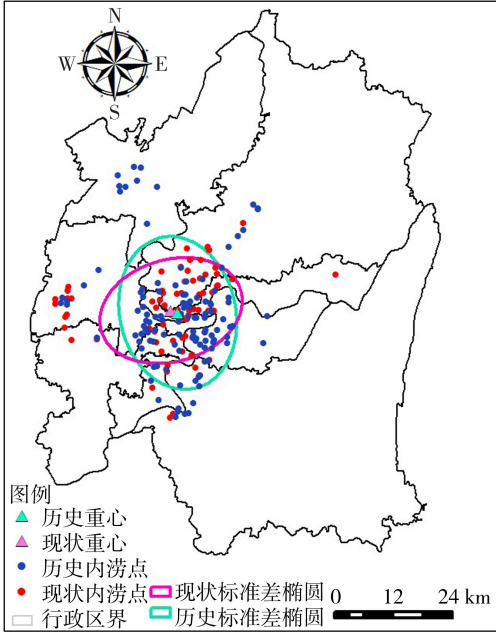


图 2 2015—2021 年重庆中心城区内涝点空间分布与重心演变轨迹

Fig. 2 Spatial distribution and center of gravity evolution trajectory of waterlogging sites in central urban area of Chongqing City during 2015-2021

重庆中心城区内涝点空间分布重心演变、方向性变化及内涝点空间聚集可能受地形、土地利用、社会经济、排水设施、路网布局和气候变化等多维因素共同影响。具体表现为:复杂地形使低洼处更易积水且水流不易排出;高不透水面积抑制雨水下渗,叠加高道路密度的径流加速效应,促使地表径流量激增,形成强产流区;人口密度与 GDP 的空间异质性导致排水设施建设相对滞后,特别是在经济发达区域,极端暴雨事件下基础设施更易显现承载力不足;年均降水量增加和极端暴雨事件频发,会影响城市调蓄和排水能力。这些因素共同作用导致内涝点空间分布重心向西北方向演变,内涝风险向西北区域聚集。

3.2.2 内涝点空间分布尺度效应

核密度分析结果显示重庆中心城区内涝事件具有显著的空间聚集效应(图 3)。现状内涝点空间分布高密度区(红色区域)主要集中在江北区、渝北区、九龙坡区和渝中区,相比之下,内涝点空间分布低密度区主要集中在北碚区和巴南区等。

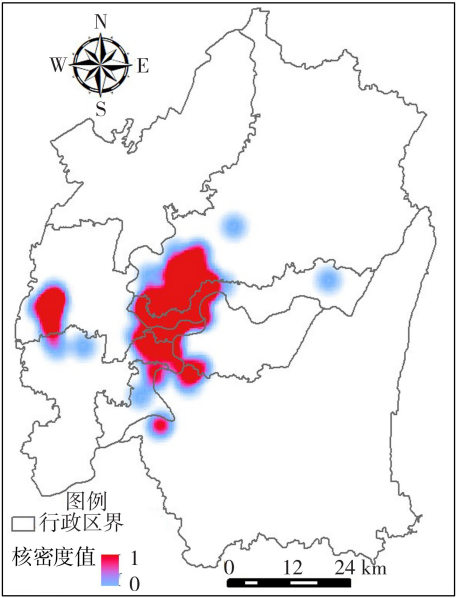


图 3 内涝点核密度分析结果

Fig. 3 Kernel density analysis results of waterlogging sites

在山地城市地理学研究中,研究对象的空间分布及其特性均依赖于分析尺度,由于山地城市空间异质性强、地形起伏较大等特点,考虑尺度效应能够更全面地理解自然与人为因素对山地城市内涝的影响机制。通过选择适当的空间尺度,可以揭示内涝点空间分布与各影响因子之间的复杂关系^[27]。在尺度确定上,计算了各内涝点间的平均最近距离为 596 m,意味着分析尺度的最小值应大于此值,以确保数据有效覆盖。当分析尺度扩大至 7 km 时,仅有 18 个网格单元内包含内涝点数据,这表明如果进一步扩大分析尺度,可能会导致有效数据集不足,影响研究结果的准确性。基于此,本文选择了多个分析尺度的网格单元,并统计不同网格单元内城市内涝点数量,以反映内涝事件可能发生的频率,从而更全面地理解山地城市内涝点空间分布。

图 4 为不同分析尺度下内涝点空间聚集结果。从图 4 可以看出,内涝点空间聚集特征受到尺度效应影响,不同分析尺度下的结果有所不同。通过计算不同分析尺度下的局部莫兰指数(表 4),可以识别内涝点空间分布情况。如表 4 所示,在所有分析尺度下,Z 值均大于 1.96,P 值均为 0 且小于 0.05,表明各分析尺度下的莫兰指数均通过了显著性检验,空间自相关显著。此外,所有分析尺度下的莫兰指数值均大于 0,表明内涝点在空间分布上表现出正向自相关,即内涝点空间分布呈现聚集特征。由图 4 可见,高-高聚集区主要集中在江北区、渝中区和渝北区,低-高聚集区主要分布在高-高聚集区周边。尽管各尺度下内涝点空间分布均显示出明显的聚集效应,但各分析尺度下的局部莫兰指数结果却

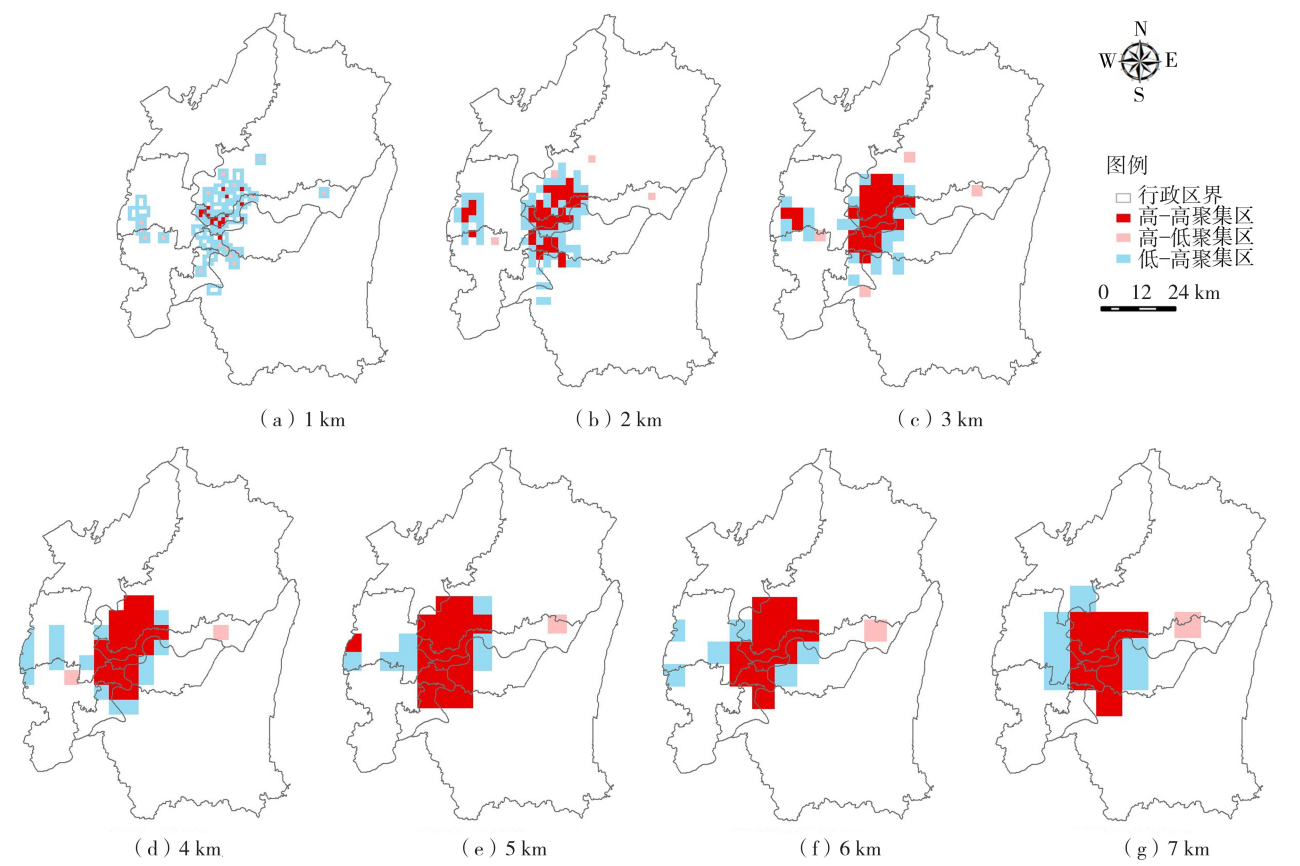


图4 不同分析尺度内涝点空间聚集结果

Fig. 4 Spatial aggregation results of waterlogging sites at different analysis scales

存在差异(表4),在5 km分析尺度下,局部莫兰指数达到最大值,显示出最强的聚集趋势。而6、7 km分析尺度因过度平滑导致聚集特征弱化,且可能超出内涝点空间分布的实际范围。因此,后续研究关注于1~5 km分析尺度。

表4 不同分析尺度下内涝点空间分布局部莫兰指数

Table 4 Local Moran's *I* of spatial distribution of waterlogging sites at different analysis scales

分析尺度/km	局部莫兰指数	Z 值
1	0.1233	17.7230
2	0.3754	26.8155
3	0.4840	23.4487
4	0.5535	20.1994
5	0.5545	16.5094
6	0.4392	12.0747
7	0.3881	8.9604

3.3 多尺度下影响因子与内涝点空间分布相关性

不同分析尺度下内涝点空间分布存在显著差异,可以从地表环境、城市建设、人口经济、排水能力和气象特征5个方面分析其影响因素^[28]。山地城市地表环境复杂、城市空间结构差异大,使得内涝成因更加多样化,尤其在强降雨或短历时暴雨过程中,由于地形坡度陡、地表径流汇流速度快,加之城市建设过程中不透水面积占比提高,更容易引发内涝,其

形成机制亟待深入研究。因此,相关性分析侧重于地表环境、城市建设和人口经济3个方面,而暂不考虑城市排水能力和气象条件的直接影响,选取了16项因子进行分析。

3.3.1 地表环境因子

表5为不同分析尺度下地表环境因子的相关性分析结果。从整体趋势角度来看,高程、坡度、地形粗糙度、地形曲率、地形起伏度和相对高程均与内涝点空间分布呈显著负相关关系,说明单元网格内高程、坡度波动越大,区域内涝风险越低。但地形湿度指数与内涝点空间分布呈显著正相关关系,说明单元网格内地形湿度指数越高,区域地表径流累积潜力越大,越容易发生城市内涝事件。

表5 不同分析尺度下地表环境因子的相关性分析结果

Table 5 Results of correlation analysis of surface environmental factors at different analysis scales

地表环境因子	不同分析尺度下的皮尔逊相关系数				
	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
高程	-0.199	-0.214	-0.228	-0.237	-0.274
坡度	-0.233	-0.282	-0.298	-0.333	-0.391
地表粗糙度	-0.202	-0.253	-0.279	-0.314	-0.375
地形曲率	-0.239	-0.290	-0.303	-0.339	-0.385
地形起伏度	-0.222	-0.267	-0.284	-0.318	-0.376
相对高程	-0.199	-0.214	-0.228	-0.237	-0.274
地形湿度指数	0.145	0.183	0.195	0.217	0.304

从分析尺度递增角度来看,山地城市高程和地形湿度指数与内涝点空间分布相关性变化趋势与平原城市有所不同,这说明对于不同特征城市,某些因子与内涝点空间分布相关性强弱随分析尺度(1~5 km)具有不同的变化趋势。在山地城市中,较大的分析尺度(5 km)情况下,坡度与内涝点空间分布具有最强负相关性,而随着分析尺度的减小,相关性逐渐降低。这是由于随着分析尺度的减小,网格单元内其他影响因子(如土地利用类型等)减涝能力增强,削弱了坡度对城市减涝的主导性。

3.3.2 城市建设因子

表6为不同分析尺度下城市建设因子相关性分析结果。从表6可以看出,城市绿地(耕地、林地、灌木、草地)面积占比与内涝点空间分布呈显著负相关关系,而不透水面积占比、道路密度均与内涝点空间分布呈显著正相关关系。这表明,网格单元内不透水面积占比和道路密度越高,城市内涝风险越高,随着绿地面积的增加,城市内涝的发生率有所降低。此外,在所有分析尺度下,道路密度以及不透水、耕地、林地面积占比与内涝点空间分布的皮尔逊相关系数绝对值均大于其他城市建设因子。这表明,重庆中心城区可以通过适当调控不透水面积占比或增加耕地、林地面积占比,有效降低城市内涝风险。

表 6 不同分析尺度下城市建设因子的相关性分析结果

城市建设因子	不同分析尺度下的皮尔逊相关系数				
	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
不透水面积占比	0.543	0.590	0.624	0.670	0.702
道路密度	0.502	0.575	0.618	0.676	0.700
耕地面积占比	-0.358	-0.419	-0.459	-0.503	-0.548
林地面积占比	-0.162	-0.191	-0.204	-0.245	-0.286
草地面积占比	-0.118	-0.142	-0.173	-0.177	-0.207
灌木面积占比	-0.134	-0.155	-0.166	-0.194	-0.209
水体面积占比	0.130	0.171	0.217	0.235	0.259

山地城市中,随着分析尺度的增大,城市建设因子与内涝点空间分布的相关性均显著增强。其中,水体面积占比与内涝点空间分布呈显著正相关关系,与平原城市结果^[27]不同。这是由于:①重庆中心城区水体周边区域过度开发,不透水面积占比较高,增加了水体周边区域内涝风险;②山地城市中由于坡度的影响,水体大多处于周围区域的最低处,雨水汇流至水体,水体承载能力较易达到极限值,导致城市内涝风险增加。在正相关性方面,城市建设因子中不透水面积占比和道路密度与内涝点空间分布的相关性比地表环境因子中地形湿度指数的相关性更强;在负相关性方面,城市建设因子中只有耕地面积占比与内涝点空间分布的相关性比地表环境因子

的相关性强,其他因子均弱于地表环境因子。

3.3.3 人口经济因子

表7为不同分析尺度下人口经济因子的相关性分析结果。从表7可以看出,山地城市中,人口密度和GDP均与内涝点空间分布呈显著正相关关系,说明人口密度大、经济发展好的区域,更容易出现城市内涝风险。这是由于:①在高人口密度和经济发达地区,不透水面积不断增加,加剧了城市内涝问题;②出于保护居民生命财产安全的考虑,内涝点往往设置在人口和经济活动相对密集的区域。人口经济因子与内涝点空间分布相关性强度与不透水面积占比比较接近,说明人口密度大、经济发展好的区域不透水面积占比高,也侧面证实了分析方法及结果的可靠性。当分析尺度从1 km增加到5 km时,人口经济因子中人口密度与内涝点空间分布相关性逐步增强,但分析尺度为4 km时,GDP与内涝点空间分布的正相关性减弱,这是由城区之间发展不平衡导致。

表 7 不同分析尺度下人口经济因子的相关性分析结果
Table 7 Results of correlation analysis of demographic-economic factors at different analysis scales

人口经济因子	不同分析尺度下的皮尔逊相关系数				
	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
人口密度	0.529	0.560	0.565	0.587	0.648
GDP	0.406	0.493	0.539	0.477	0.585

3.4 内涝点空间分布驱动力及交互探测分析

在相关性分析中,只选取了地表环境、城市建设及人口经济3个方面开展研究,为了更全面地研究内涝点空间分布驱动力,以现状排水能力为前提,引入气象环境因子^[29]。选定的气象环境因子包括:极端暴雨日数(R100)、暴雨日数(R50)、大雨日数(R25)和2015—2021年年均降水量。驱动力分析的核心在于将内涝点核密度值作为因变量,运用地理探测器模型识别4类正相关因子在不同分析尺度下对内涝点空间分布的影响,从而有效地识别影响内涝点空间分布的主导因子,并探索这些因子在不同分析尺度下的作用强度和交互影响,提供对内涝现象更为全面的理解。

3.4.1 驱动力分析

利用地理探测器模型计算各因子对内涝点空间分布的独立作用值 q ,结果如表8所示。从表8可以看出,不同分析尺度下各因子对内涝点空间分布的驱动力存在差异。1 km尺度下,人口密度对内涝点空间分布的独立驱动力最强, q 值为0.292,其次为不透水面积占比, q 值为0.281。2~5 km尺度下,驱动力最强的为道路密度, q 值为0.329~0.475,该因子驱动力随分析尺度增大而增强,有较明显的变化趋势;其次为人口密度, q 值为0.268~0.367,其

表 8 不同分析尺度下各因子对内涝点空间分布的独立作用值

驱动因子	不同分析尺度下的 q 值				
	1 km	2 km	3 km	4 km	5 km
人口密度	0.292	0.299	0.268	0.337	0.367
GDP	0.221	0.232	0.190	0.211	0.280
道路密度	0.254	0.329	0.337	0.429	0.475
不透水面积占比	0.281	0.277	0.257	0.360	0.235
R100	0.154	0.161	0.129	0.197	0.120
R50	0.085	0.108	0.056	0.094	0.066
R25	0.064	0.056	0.049	0.071	0.056
年均降水量	0.108	0.109	0.111	0.115	0.146
水体面积占比	0.021	0.022	0.017	0.009	0.143
地形湿度指数	0.005	0.017	0.009	0.033	0.035

驱动力变化趋势整体上随分析尺度增大而增强;而不透水面积占比的 q 值为 0.235~0.360,整体变化趋势随分析尺度增大而减弱。气象环境因子中,仅年均降水量尺度效应明显,其驱动力随分析尺度增大而增强,其他气象因子尺度效应均不明显。在 1~4 km 尺度下,气象环境因子驱动力由强到弱依次为

R100、年均降水量、R50、R25,说明降雨强度越大,其对内涝点空间分布驱动作用越强,证明了模型结果的可靠性。地表环境因子中,大尺度下水体面积占比驱动力更强。

3.4.2 交互探测分析

利用地理探测器模型计算不同分析尺度下因子交互作用值 Q ,结果如图 5 所示。

不同分析尺度下驱动因子的交互探测结果显示,整体趋势略有不同。1 km 尺度下,不透水面积占比与 R100 的交互作用对内涝点空间分布影响最为显著, Q 值为 0.447,表明这两个因子交互作用可以解释 44.7%的内涝点空间分布;其次为 R100 与人口密度的交互作用, Q 值为 0.435;而水体面积占比与地形湿度指数的交互作用则相对较弱, Q 值仅为 0.036,因子间作用类型均为双因子非线性增强。2 km 尺度下,人口密度和 R100 的交互作用最强, Q 值为 0.465;其次为不透水面积占比与 R100 的交互作用, Q 值为 0.462,因子间作用类型均为双因子非线性增强。3、4 km 尺度下,道路密度与 R100 的交互作用最强, Q 值分别为 0.477 和 0.593,作用类型

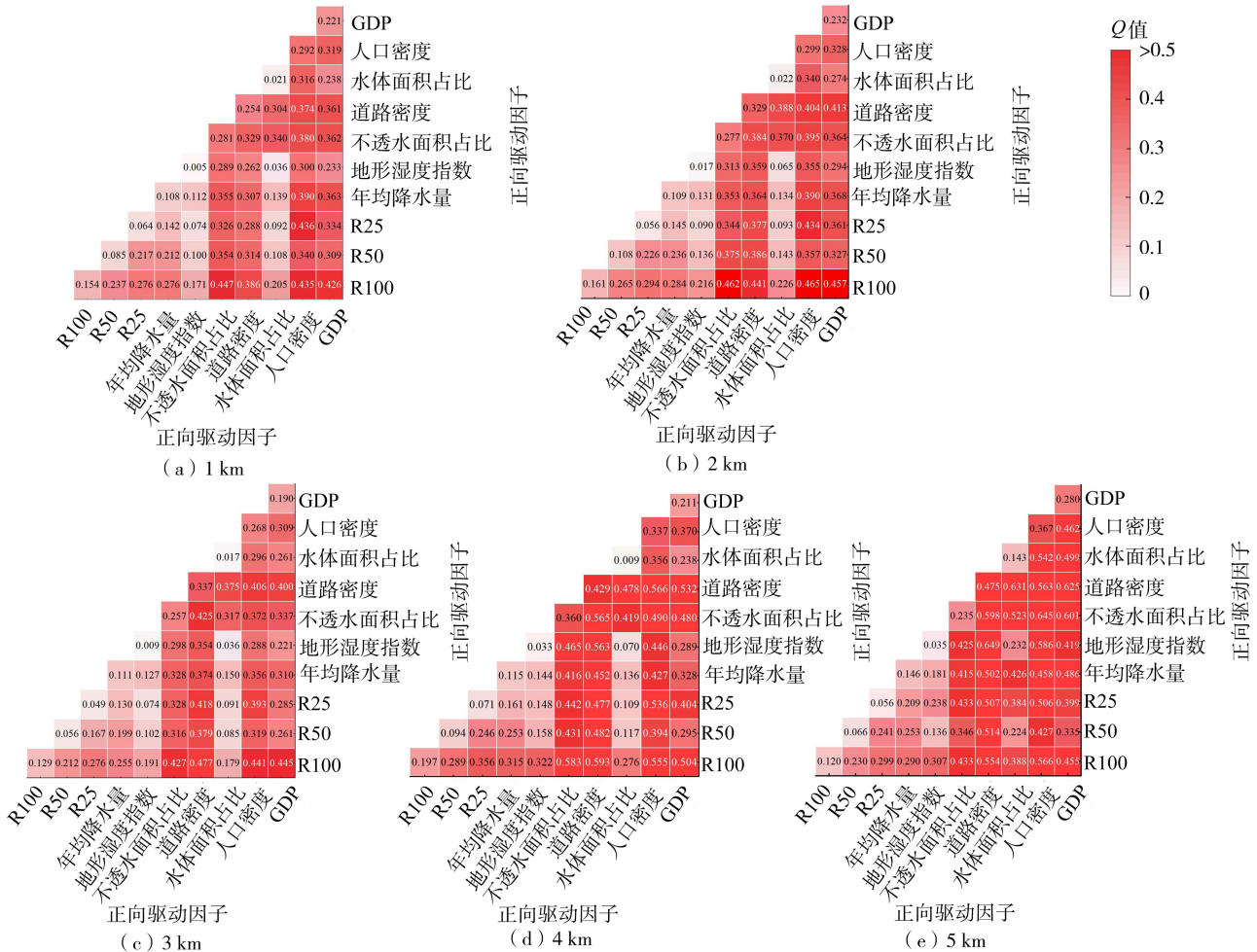


图 5 不同分析尺度下正向驱动因子交互探测分析结果

Fig. 5 Results of interaction detection analysis of positive driving factors at different analysis scales

分别为双因子非线性增强和双因子增强;其次为 GDP、不透水面积占比与 R100 的交互作用,3 km 尺度下的 Q 值分别为 0.445 和 0.427,4 km 尺度下的 Q 值分别为 0.504 和 0.583,作用类型均为双因子非线性增强。5 km 尺度下,道路密度与地形湿度指数的交互作用最强, Q 值为 0.649;其次为人口密度与不透水面积占比的交互作用, Q 值为 0.645,因子间作用类型均为双因子非线性增强。

综上,小尺度范围内,由于城区不透水地表增加,降低了雨水渗透性,导致雨水无法充分下渗,从而增加了地表径流量,使得小范围内内涝事件频发;中尺度范围内,山地城市因其道路纵坡大、地形立体,汇流速度快且方向不确定性,造成雨水难以滞留,迅速流失,使得道路密度高的区域更易产生局部内涝;大尺度范围内,汇流的雨水沿道路迅速汇聚到地势低洼处,导致道路密度、地形湿度指数较大的区域更易发生大规模内涝事件。此外,小、中尺度范围的内涝的发生与极端降雨事件关系密切。未来研究可加大对极端气候变化的预测及预警,以有效减缓内涝频发的趋势。

4 结 论

a. 对比分析历史(2015—2020 年)和现状(2021 年)重庆中心城区内涝点数据表明,内涝点数量整体呈减少趋势,反映了内涝治理的有效性,尤其是北碚区、南岸区和大渡口区治理成效显著;而江北区、九龙坡区和渝北区的内涝点显著增加,未来需要重点关注这些区域,进一步加强排水系统能力。

b. 通过标准差椭圆和重心统计分析得出,重庆中心城区内涝点空间分布由西北-东南向东北-西南格局转化,呈现由分散向集中转变,现状内涝点主要集中在江北区、九龙坡区、渝北区和渝中区。核密度和空间自相关分析表明,所有分析尺度均显现出显著的空间聚集效应,尤其在 5 km 尺度下,聚集效果最为明显。

c. 多尺度相关性分析结果表明,内涝点空间分布与多个影响因子之间存在显著相关性。具体而言,坡度和绿地面积占比与内涝点空间分布呈负相关关系,即坡度越大,雨水自然排放能力越强;绿地面积占比越高,雨水滞留能力越强,从而降低内涝风险。相反,不透水面积占比和道路密度均与内涝点空间分布呈正相关关系,较高的建设密度会阻碍雨水渗透和排放,加剧内涝风险。值得注意的是,水体面积占比对内涝风险的作用具有地域差异。在平原城市,水体通常有助于缓解内涝,但在山地城市,水体多位于低洼地带,较高的坡度会加速雨水汇聚,可能

增加内涝风险。此外,水体周围区域的过度开发会提高不透水面积占比,进一步加剧内涝风险。在人口经济方面,人口密度和 GDP 与内涝点空间分布呈正相关关系,人口聚集和经济活动增加会提高建设密度,从而加大雨水排放压力,增加内涝发生的可能性。

d. 地理探测器驱动力及交互探测分析表明,不同尺度下同一驱动因子的解释力存在显著差异,山地城市内涝风险主要预测因子包括道路密度、人口密度、不透水面积占比、GDP、R100 和年均降水量;随着分析尺度的增大,山地城市建设因子、人口经济因子与自然地表环境因子、气象环境因子的复杂交互作用显著影响内涝点空间分布。

参考文献:

[1] 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 Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, 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))

[2] 麦合木提·图达吉,童瑞,徐宝宁,等. 北京“23·7”特大洪水复盘分析[J]. 水力发电学报, 2024, 43(4): 12-22. (MAHMUT Tudaji, TONG Rui, XU Baoning, et al. Hindcasting on “July 2023” flood event in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2024, 43(4): 12-22. (in Chinese))

[3] 陈文龙,夏军. 广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J]. 中国水利, 2020(13): 4-7. (CHEN Wenlong, XIA Jun. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou [J]. China Water Resources, 2020(13): 4-7. (in Chinese))

[4] 中华人民共和国应急管理部. 国家防灾减灾救灾委员会办公室应急管理部发布 2023 年全国十大自然灾害 [EB/OL]. (2024-01-20) [2024-10-26]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475696.shtml.

[5] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2024, 42(4): 23-29. (LIU Dingrong, YANG Kai, SUN Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(4): 23-29. (in Chinese))

[6] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于 MIKE FLOOD 模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(6): 41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and

- Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 41-47. (in Chinese))
- [7] 王加虎,梁菊平,李丽,等. 基于 DEM 的城市易涝点集水特征提取与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 390-394. (WANG Jiahu, LIANG Juping, LI Li, et al. Deriving and application of the catchment characteristics for urban flood point based on DEM[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018, 46 (5): 390-394. (in Chinese))
- [8] 周宏,刘俊,丁华凯,等. 城市有效不透水下垫面及其识别研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38 (6): 39-48. (ZHOU Hong, LIU Jun, DING Huakai, et al. Research progress on urban effective impervious surface and its identification[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (6): 39-48. (in Chinese))
- [9] 史书汇,王晓云,李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 117-126. (SHI Shuhui, WANG Xiaoyun, LI Fawen. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 117-126. (in Chinese))
- [10] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 1-8. (ZHENG Defeng, GAO Min, LI Yu, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50 (3): 1-8. (in Chinese))
- [11] 邹家祥,段存存,陈彬,等. 气候变化下基于经济损失量化的北京市内涝韧性评估[J]. 水资源保护, 2024, 40 (6): 85-94. (ZOU Jiaxiang, DUAN Cuncun, CHEN Bin, et al. Assessment of waterlogging resilience in Beijing based on quantification of economic losses under climate change [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 85-94. (in Chinese))
- [12] 乔贤玲,侯精明,张文晴,等. 社区尺度居民楼内涝淹没过程精细化模拟及室内财产损失评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43 (5): 73-81. (QIAO Xianling, HOU Jingming, ZHANG Wenqing, et al. Community scale refined simulation of inundation process of houses and indoor property loss assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 73-81. (in Chinese))
- [13] 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(中英文), 2023, 54 (2): 33-46. (ZHENG Jiawei, YIN Changying, DAI Li, 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 Hydropower Engineering, 2023, 54(2): 33-46. (in Chinese))
- [14] 李彬烨,赵耀龙,付迎春. 广州城市暴雨内涝时空演变及建设用地扩张的影响[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17 (4): 445-450. (LI Binye, ZHAO Yaolong, FU Yingchun. Spatio-temporal characteristics of urban storm waterlogging in Guangzhou and the impact of urban growth [J]. Journal of Geo-Information Science, 2015, 17 (4): 445-450. (in Chinese))
- [15] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (3): 101-108. (in Chinese))
- [16] 梅超,石虹远,李瑞栋,等. 基于数值试验的降雨径流过程对不透水面空间分布的响应分析[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 86-92. (MEI Chao, SHI Hongyuan, LI Ruidong, et al. Response analysis of rainfall runoff process to spatial distribution of impervious area based on numerical experiments [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 86-92. (in Chinese))
- [17] 赵丰昌,王晨,李俊奇,等. 我国城市内涝风险图编制方法探索[J]. 给水排水, 2023, 49 (5): 17-24. (ZHAO Fengchang, WANG Chen, LI Junqi, et al. Exploration on the compilation method of urban flood risk map in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49 (5): 17-24. (in Chinese))
- [18] 高玉琴,王慧,刘钺,等. 基于空间信息格网的南京市洪水风险评估[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (6): 6-12. (GAO Yuqin, WANG Hui, LIU Yue, et al. Flood disaster risk assessment in Nanjing City based on spatial information grids [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (6): 6-12. (in Chinese))
- [19] 夏军,贾海峰,张翔,等. 长江中下游城市内涝与雨季污染协同治理对策[J]. 水资源保护, 2024, 40 (1): 1-5. (XIA Jun, JIA Haifeng, ZHANG Xiang, et al. Coordination strategies for urban waterlogging and rainy season pollution control in middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1): 1-5. (in Chinese))
- [20] 袁竹,高亮,张文生,等. 风暴潮与极端暴雨叠加作用下九龙半岛内涝防控方法[J]. 水资源保护, 2024, 40 (4): 56-64. (YUAN Zhu, GAO Liang, ZHANG Wensheng, et al. Waterlogging prevention and control methods in Kowloon Peninsula under superimposed effect of storm surge and extreme rainstorm[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 56-64. (in Chinese))
- [21] 徐丽丽,束龙仓,李伟,等. 2000—2020 年中国地下水开采时空演变特征[J]. 水资源保护, 2023, 39 (4): 79-85. (XU Lili, SHU Longcang, LI Wei, et al. Spatial and

- temporal evolution characteristics of groundwater mining in China from 2000 to 2020 [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(4): 79-85. (in Chinese))
- [22] 何伟军,孟旭,孔阳,等.时空异质性视角下长江经济带水环境承载力评估及其驱动因子探究[J]. *水资源保护*, 2023, 39(2): 215-223. (HE Weijun, MENG Xu, KONG Yang, et al. Evaluation of water environmental carrying capacity of Yangtze River Economic Belt and its driving factors exploration from perspective of spatial-temporal heterogeneity [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(2): 215-223. (in Chinese))
- [23] 王秀伟,李晓军.中国乡村旅游重点村的空间特征与影响因素[J]. *地理学报*, 2022, 77(4): 900-917. (WANG Xiuwei, LI Xiaojun. Characteristics and influencing factors of the key villages of rural tourism in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(4): 900-917. (in Chinese))
- [24] 陈述云.论经济变量相关分析的统计方法[J]. *上海统计*, 1994(6): 15-17. (CHEN Shuyun. On statistical methods of correlation analysis of economic variables [J]. *Shanghai Statistics*, 1994(6): 15-17. (in Chinese))
- [25] 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 Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [26] 胡文翰,张质明,赵鑫,等.基于 VSD 模型和地理探测器的北京城市内涝脆弱性评估及驱动机制分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 86-100. (HU Wenhan, ZHANG Zhiming, ZHAO Xin, et al. VSD model and geodetector-based assessment on urban waterlogging vulnerability in Beijing and analysis of its driving mechanism [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(10): 86-100. (in Chinese))
- [27] ZHANG Qifei, WU Zhifeng, ZHANG Hui, et al. Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: the case study of Guangzhou, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110951.
- [28] 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 Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, 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))
- [29] 李海宏,吴吉东.2007—2016 年上海市暴雨特征及其与内涝灾情关系分析[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2136-2148. (LI Haihong, WU Jidong. Rainstorm characteristics and its relationship with waterlogging disaster in Shanghai during 2007-2016 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2136-2148. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-10-26 编辑:施业)
- +++++
- (上接第 38 页)
- [22] 孙文宇,姚成,刘志雨,等.秦淮河水文水动力模型及实时校正[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 26-33. (SUN Wenyu, YAO Cheng, LIU Zhiyu, et al. Hydrological and hydrodynamic model of Qinhuai River and real-time correction [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(4): 26-33. (in Chinese))
- [23] 高学平,胡泽,闫晨丹,等.考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. *水资源保护*, 2022, 38(2): 41-47. (GAO Xueping, HU Ze, YAN Chendan, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(2): 41-47. (in Chinese))
- [24] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等.上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(4): 329-334. (YAN Yu, YUAN Sai, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan river network in Shanghai City [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(4): 329-334. (in Chinese))
- [25] CARRARO L, ALTERMATT F. Optimal Channel Networks accurately model ecologically-relevant geomorphological features of branching river networks[J]. *Communications Earth & Environment*, 2022, 3(1): 125.
- [26] 张兴源,李发文,赵勇.基于小世界网络的海河流域河网结构及功能响应[J]. *水科学进展*, 2023, 34(4): 541-552. (ZHANG Xingyuan, LI Fawen, ZHAO Yong. Structural characteristics of the river network and its functional responses in the Haihe River Basin based on small-world networks [J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(4): 541-552. (in Chinese))
- [27] 李发文,赵宇瑶.基于点-面两层结构的复杂网络方法评估海河流域水网连通性[J]. *水资源与水工程学报*, 2023, 34(6): 16-26. (LI Fawen, ZHAO Yuyao. Evaluation of water network connectivity using complex network method based on node-subbasin double layer structure [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(6): 16-26. (in Chinese))
- [28] 吴学文,瞿永钢,李玲.基于复杂网络理论的河流网络建模与分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 177-182. (WU Xuewen, QU Yonggang, LI Ling. River network modeling and analysis based on complex network theory [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2014, 42(2): 177-182. (in Chinese))
- (收稿日期:2024-12-15 编辑:施业)