

DOI: 10.20103/j.stxb.202301200128

张煜森, 段彦博, 吴哲元, 刘洋, 曹洋, 雷雅凯. 极端暴雨下山地丘陵区小流域洪水淹没强度对景观特征的响应——以河南“7·20”暴雨为例. 生态学报, 2023, 43(20): 8359–8374.

Zhang Y S, Duan Y B, Wu Z Y, Liu Y, Cao Y, Lei Y K. Response of flood inundation depth intensity to landscape characteristics in small watershed of hilly areas under extreme rainstorms: an example of “7-20” rainstorm in Henan Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8359–8374.

极端暴雨下山地丘陵区小流域洪水淹没强度对景观特征的响应

——以河南“7·20”暴雨为例

张煜森^{1,2}, 段彦博^{1,2}, 吴哲元^{1,2}, 刘 洋^{1,2}, 曹 洋^{1,2}, 雷雅凯^{1,2,*}

1 河南农业大学 风景园林与艺术学院, 郑州 450002

2 河南农业大学 河南省风景园林国际联合实验室, 郑州 450002

摘要:通过分析郑州 7·20 暴雨事件中贾峪河山地丘陵区小流域的洪水过程,探究景观特征对洪水淹没强度影响的时空分布规律,并提出增强流域洪水韧性的规划建议,以缓解河南省山区所面临的社会经济发展、生态环境改善等问题。基于高分 6 号遥感数据、先进陆地观测卫星 (ALOS, Advance Land Observing Satellite) 相控阵 L 频段合成孔径雷达 (PALSAR) 的地表高程数据和小时降雨量数据,利用 MIKE 21 水动力模型构建贾峪河流域二维水文模型,分析其 2021 年 7 月 20 日 0—24 时期上、中、下游的洪水淹没深度和面积,并结合双变量空间自相关模型方法,探究洪水淹没强度与各景观组成和地形因素在时间和空间上的相关性的差异以及其空间聚类类型。研究表明:(1) 贾峪河流域淹没面积在 0—6 时快速增长,于 18 时达到最大 9.59 km²,此时各区域淹没面积占比从大到小依次为下游 18.88%、上游 8.25%、中游 12.03%,淹没深度在 3 m 以上的面积占 36.11%。(2) 地形因素 (平均 Moran's $I=0.159$) 对洪水强度的影响大于土地类型 (平均 Moran's $I=0.096$),主要影响因子相对高程、地形湿度指数、矿坑面积百分比、水体面积百分比、建设用地面积百分比、耕地面积百分比以及林地和草地面积百分比与洪水淹没强度之间的相关性随时间变化呈增大趋势,均在暴雨中后期 18—24 时达到最强。(3) 交互探测结果表明,多因子叠加会增强各景观特征对洪水淹没强度的影响。上游影响洪水淹没强度的主要驱动力为矿坑和相对高程,中游和下游的主要影响为水体和地形湿度指数。(4) 洪水淹没强度 24 时的平均值与景观特征指数之间的“高-高”和“高-低”地区的面积占比约 0.47%—9.85%,主要分布在上游的中部山区和北部河道周围、中游的河道两侧和下游的河道以及常庄水库周边地区。研究结论建议在上游露天矿坑就地改造为蓄水池并恢复植被,中游和下游应提升河岸带绿地质量,增加下游城区绿色基础设施,减轻城市洪水风险。

关键词:洪水;景观特征;MIKE 21 模型;双变量空间自相关;山地丘陵

Response of flood inundation depth intensity to landscape characteristics in small watershed of hilly areas under extreme rainstorms: an example of “7-20” rainstorm in Henan Province

ZHANG Yusen^{1,2}, DUAN Yanbo^{1,2}, WU Zheyuan^{1,2}, LIU Yang^{1,2}, CAO Yang^{1,2}, LEI Yakai^{1,2,*}

1 College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

2 Henan Province International Joint Laboratory of Landscape Architecture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: This study delves into the flood dynamics of the Jiayu River's small watershed in Zhengzhou's mountainous region

基金项目:2023 河南省重点研发与推广专项 (软科学研究) 项目 (232400410293); 2020 河南省高等学校青年骨干教师资助项目 (2020GGJS049); 河南省国际合作研究项目 (HNGD2021035); 2021 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2021SJGLX162Y)

收稿日期:2023-01-20; **采用日期:**2023-07-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lykfjl@henau.edu.cn

during the July 20 rainstorm. It explores the spatiotemporal impacts of landscape features on flood inundation depth intensity, and offers strategic suggestions to bolster flood resilience in Henan province's mountainous area, thereby easing socio-economic and ecological issues. Utilizing Gaofen-6 remote sensing data, Advance Land Observing Satellite (ALOS)-PALSAR surface elevation data, and hourly rainfall figures, we constructed a two-dimensional hydrological model of the Jiayu River Basin via the MIKE 21 hydrodynamic model. This allowed us to analyze flood inundation depth and area across the river's upper, middle, and lower sections on July 20, 2021. With the aid of the bivariate spatial autocorrelation model, we examined the spatiotemporal correlation variations between flood inundation depth intensity and landscape composition and topographic factors. Our findings reveal that (1) the submerged area of the Jiayu River Basin swiftly expanded from 0:00 to 6:00, reaching its peak at 9.59 km² at 18:00. Here, the submerged area percentages were 18.88% in the lower reaches, 8.25% in the upper reaches, 12.03% in the middle reaches, and 36.11% in areas with over 3 m submersion depth. (2) Topographic elements (mean Moran's $I = 0.159$) exhibited a more significant influence on flood inundation depth intensity than land type (mean Moran's $I = 0.096$), with the main drivers being Relative Elevation (RE), Topographic Wetness Index (TWI), percentage of mining pits area, percentage area of water bodies, percentage area of construction land, percentage area of crop land, percentage area of forest land, and percentage area of grass land. Their correlation with flood inundation depth intensity peaked between 18:00 to 24:00. (3) Multiple factors' combination amplified the influence of landscape features on flood inundation depth intensity. In the upstream, mining pits and relative elevation were the dominant drivers, while water bodies and TWI were key in the midstream and downstream. (4) The "high-high" and "high-low" areas between the average flood intensity and the landscape characteristic index, comprising approximately 0.47% to 9.85%, were primarily located in the central mountainous area of the upper reaches and surrounding the northern river channel, along the river channel in the middle and lower reaches, and around the Changzhuang reservoir. We recommend transforming the upstream open mine into a reservoir, enhancing vegetation, improving the riparian green space in the middle and lower reaches, boosting the green infrastructure in downstream urban areas, and minimizing urban flood risk by improving connectivity to the river.

Key Words: flood; landscape characteristics; MIKE 21 model; bivariate spatial autocorrelation; hilly areas

近年来全球气候的变化和人类活动导致极端降雨的频率和强度增加^[1-2],为人类可持续发展带来巨大威胁^[3-4]。其中山洪灾害已经成为我国最主要的巨灾之一^[5-6],严重制约山地丘陵区经济社会发展。2021年7月河南省因特大暴雨导致山洪,其死亡失踪事件涉及44个乡镇和144个行政村共251人,占河南省总死亡失踪人口的63.1%^[7],导致了大量人员伤亡和财产损失。城市化是山地丘陵区洪水灾害的主要因素。随着人口增长,城市规模不断增大,逐渐向城市周边的山地丘陵区扩展。不断增加的不透水地表将大大减少绿地和湿地面积,破坏山地丘陵区下垫面的雨水调节能力,加剧山洪灾害的强度^[8]。城市周边的山地丘陵区多为城市河流的上游区域,其山洪灾害的频发将增加中下游城区的洪涝风险。因此对城市周边山地丘陵区小流域进行雨洪相关研究是当前山洪灾害治理和预防的迫切需求。

尽管我国山洪灾害防治已有了较为深入的研究,但对于山洪风险规避的策略方法仍有局限^[9]。非工程措施,如山洪预警、山洪灾害风险评估等^[10-11],侧重在防范上;工程措施,如修建提防、水库等灰色基础设施^[12-13],侧重于治理。目前关于山地丘陵区洪水防治措施的研究主要集中在非工程措施上,尽管其可在较低的成本下实现较高的防范收益^[9],但并未从根本上降低洪水灾害带来的影响,仅为临时性的规避措施,且由于山地丘陵地区雨洪监测数据较少,山洪预警的准确性远低于一般的洪水,仍有局限。山地丘陵区地形复杂多变,人口住区分散,常见的工程措施施工困难,人均管理成本较高,且对生态系统易造成破坏^[14-15]。土地利用管理措施强调提前规划,从根本上避免或消除风险点,被称为目前洪水防范治理的方向^[9]。在自然和模拟降雨的条件下,已有学者发现绿色基础设施(GI)在减少雨水径流和后续洪水风险方面发挥重要作用^[16-17]。

GI 是指自然区域(例如湿地、森林和绿地)和半自然区域(例如雨水箱、雨水花园和绿色屋顶)的相互关联的网络^[18]。GI 在减少雨水径流和后续洪水风险方面发挥重要作用,刘文等^[19]利用暴雨径流模型对社区尺度的绿地削减暴雨径流流量和峰值效果进行了分析,证明了绿色基础设施对一年一遇和五年一遇暴雨产生的径流具有显著的消减作用;Mei 等^[20]利用雨洪管理模型探究了城市绿地对城市雨洪灾害的影响,证明 GI 与灰色基础设施相结合可实现对极端降雨的最佳防洪效果。当前关于 GI 对城市或城市部分地区雨水缓解的益处的研究已经很多^[21–22],如 Zolch 等^[23]利用 MIKE 水文模拟模型研究了高密度城区内的树木和绿色屋顶对不同等级雨洪的影响能力;Li^[24]等利用 SWMM 模型和生命周期成本方法评估了城市生物保留、草洼和透水路面三种 GI 在不同降雨量下的防洪能力以及成本效益,相关研究主要集中于城市内人工绿地,缺少对不同用地类型 GI 的共同研究。在国家生态文明建设的背景下,“山水林田湖草”生命共同体强调生态系统的共同治理^[25],山地丘陵区小流域作为国家“山水林田湖草”系统治理的基本单元^[26],具有不同于城市的复杂地形地貌和山水生态格局,其不同类型的 GI 规划布局的研究和方法具有特殊性。因此,有必要构建有效的雨洪模型,精细化的研究山地丘陵区小流域各 GI 类型对洪水灾害的影响机制。

为探究极端暴雨下土地利用景观格局对洪水淹没强度的响应,利用 MIKE 21 水动力模型,对“7·20”受灾严重的贾峪河流域进行了详细模拟。通过分析研究区洪涝淹没强度与土地利用、地形因素的关系,确定 GI 规划的重点区域,以优化贾峪河流域土地利用类型的结构和功能。主要目标如下:(1)描述“2021 年 7 月 20 日大洪水事件”中贾峪河流域上、中、下游地区的洪水分布规律;(2)揭示贾峪河流域影响洪水淹没强度的景观特征,及其空间分布格局;(3)探究不同空间的景观特征指标对洪水淹没强度变化的相互作用机制;(4)针对贾峪河流域的不同空间景观特征组成,提出增强流域雨洪韧性的优化策略。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区概况

研究区贾峪河位于郑州市主城区西南部山丘地区,全长 25km,流域控制面积 81.89km²,是贾鲁河的一级支流,发源于新密市袁庄乡南弯长里沟,由西南向东北方向流经洞林湖和常庄水库,穿越南水北调中线干渠后汇入贾鲁河,是郑州市重要的水源涵养地之一,生态保护价值高。近年来,流域工业化、城镇化过程迅速,流域中部和北部地区人类活动频繁,经济较为发达(图 1)。研究区位于山地-平原过渡带,海拔范围 106—562m,属于温带大陆性季风气候,年平均气温约为 15.6℃,年降水量约为 542mm。

由于贾峪河流域坡降变化大,且各用地性质有较大差异,需要对整个流域分段研究,因此根据研究区高程区间、地貌类型、集水区单元和土地利用分布,将贾峪河流域划分为上游(UR)、中游(MR)、下游(LR)三个区域(表 1)。

表 1 贾峪河流域 3 个区域信息

Table 1 Information on the 3 areas of the Jiayu River Basin

子区域 Subregions	总面积 Total area/km ²	建设用地比例/% Construction land ratio	主要地貌 Major landform	海拔范围 Altitude range/m	平均海拔 Mean altitude/m
上游 Upper river	39.99	10.05	高丘陵和中起伏山地	173—562	291.81
中游 Middle river	15.54	40.22	中台地	147—255	196.92
下游 Lower river	23.36	34.20	倾斜平原	106—202	155.73

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据

河南“7·20”特大暴雨事件中,贾峪河流域的降雨主要集中在 20 日,2021 年 7 月 20 日 0 至 24 时的小时降雨数据来自于研究区周围最近的三个水文站:郑州站、荥阳站和新密站,并采用泰森多边形法分配在整个研究区上,作为模型的水动力参数。

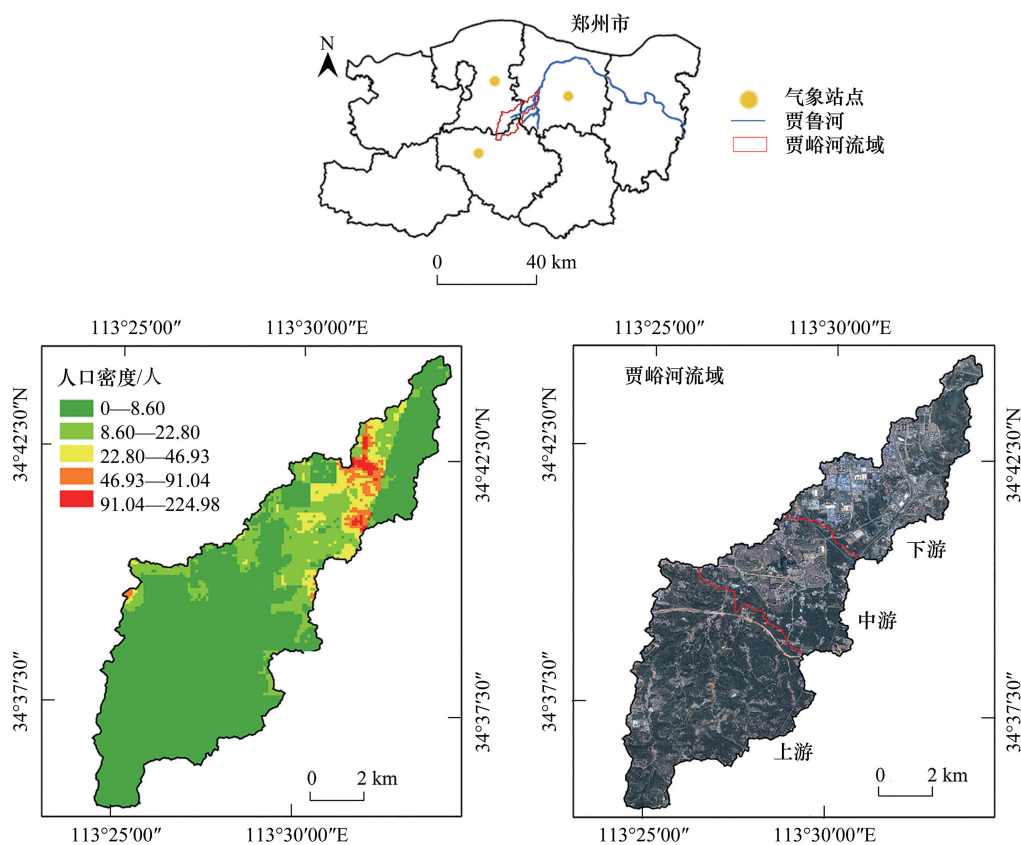


图1 研究区区位

Fig.1 Study area

1.2.2 景观特征数据

描述景观特征的数据来源是中国资源卫星应用中心 (CRESDA, <http://www.cresda.com/CN/>) 和美国国家航空航天局阿拉斯加卫星设备处 (ASF, <https://asf.alaska.edu/>, 2021 年 7 月 26 日访问)。2020 年 5 月 13 日, 通过中国资源卫星应用中心采集高分六号图像, 空间分辨率为 2m, 用于研究土地覆盖物构成对洪水淹没的影响。通过阿拉斯加卫星设备处获取的先进陆地观测卫星相控阵 L 频段合成孔径雷达获取数字高程模型 (DEM), 作为水文模型网格划分和研究地形对洪水淹没的影响的基础数据, 空间分辨率为 12.5m。

2 研究方法

2.1 MIKE 21 水动力学模型模拟

MIKE 21 是由丹麦水利研究所 (DHI) 开发的平面二维数值模拟软件, 可以模拟因各种作用力作用而产生的水位和水流变化及模拟任何忽略分层的二维自由表面流^[27]。计算原理依据的是描述水流运动的二维非恒定流方程组, 包括 3 个方程: 水流连续性方程、水流沿 x 方向的动量方程及水流沿 y 方向的动量方程, 形式如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 h} = v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases}$$

式中, h 为水深(m); $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别为 x 、 y 方向的流速(m/s); u 、 v 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向上的分量; z 为水位; g 为重力加速度; C 为谢才系数; v_t 为紊动黏性系数。

2.1.1 模型构建

平面二维水动力模型的主要建模流程为:网格划分、参数设置(包括干湿交换边界、糙率、时间步长)、结果输出。

(1) 网格划分

模型计算范围为贾峪河完整流域,流域控制面积约 81.89km²。采用 12.5m 分辨率的 DEM 数据进行提取河网,并根据《全国山洪灾害调查评价基础数据集》对区域河道干流和主要支流进行下沉处理,即通过 ArcGIS 10.2 对这些区域的 DEM 数据下降 3—5m,从而得到能反映完整河形态的高精度网格数据。这样可以避免构建一维河道模型,再与二维平面模型进行耦合时存在的工作量大、运行不稳定,以及连接点地形不匹配等问题,能较大幅度的提升模型的稳定性,另一方面也能更好的模拟洪水的自然汇流过程。基于数据精度和模型稳定性,选择矩形网格进行编辑,使之更加匹配数据精度和满足大幅度模拟步长的要求,模型运行更加稳定。

(2) 参数设置

本次洪水模拟的目的是计算流域内洪水在 2021 年 7 月 20 日 0 时至 24 时的演进过程,因此对于计算结果无明显影响的计算参数采取经验值,包括涡粘系数、波浪辐射、风力等,其余设置具体信息如表 2 所示。

表 2 MIKE 21 模型参数表
Table 2 MIKE 21 model parameters table

参数类型 Parameter types	数据类型 Data types	数据来源 Data source
网格大小 Grid size	20m	模型稳定性
时间步长 Time step	1s	模型稳定性
干湿动边界 Flood and dry	干水深 0.002m、湿水深 0.003m	模型稳定性
水动力参数 Hydrodynamic parameters	小时降雨量	水文站的降雨数据
糙率 Resistance	下垫面类型	《水力计算手册》

(3) 结果输出

将模拟的淹没水深按每三小时的时间间隔作为一次结果导出,得到共 8 个时段的淹没深度数据。这些数据用于计算洪水淹没强度,以及洪水淹没强度的 24 时平均值。

2.1.2 模型糙率的率定和验证

常庄水库 7 月 20 日的水位数据用于模型的率定(表 3),根据社交媒介所搜集到的积水情况数据,并利用现场特征地物、车辆等对被淹的深度估算和目击者的问询调查,可初步分析判断重点地区的计算积水深度基本与实际情况吻合(表 4)。

表 3 2021 年 7 月 20 日常庄水库水位
Table 3 Water level of Changzhuang Reservoir on July 20, 2021

时间 Time	实测水位 Measured water level/m	模拟水位 Simulated water level/m	绝对误差 Absolute error/m
8:00	126.63	126.58	0.05
10:00	127.87	127.81	0.06
19:00	131.31	131.41	0.10

鉴于采用实测降雨模拟以及现场查勘积水情况对比结果基本相符,故本文建立模型基本能满足暴雨洪涝的模拟要求。率定后最终确定的曼宁系数如下:建设用地 65m^{1/3}/s、林地 23m^{1/3}/s、水体 70m^{1/3}/s、耕地 26m^{1/3}/s、草地 29m^{1/3}/s、裸地 26m^{1/3}/s、矿坑 33m^{1/3}/s。

表 4 贾峪河 2021 年 7 月 20 日暴雨最大积水深度统计表

Table 4 Statistical table of maximum water depth of Jiayu River rainstorm on July 20, 2021

地点 Sites	实际水深 Actual water depth/m	模拟水深 Simulated water depth/m
洞林寺 Donglin temple	1.5—2.0	2.2
郑州科技学院 Zhengzhou university of science and technology	1.0—1.5	1.2
郑州恒大林溪郡 Zhengzhou hengda linxi apartment complex	0.8—1.4	1.3
郑州澍青医学中等专业学校 Zhengzhou shuqing medical college	0.5—0.8	0.6
新田城三期禧岸 Xintian city apartment complex III	2.0—2.5	2.2
郑州恒大山水城二期 Zhengzhou hengda apartment complex II	1.2—1.5	1.7

2.2 洪水淹没强度指数

淹没深度是度量洪涝灾害程度的一个重要指数^[28],为了识别洪水灾害严重区域,引入洪水淹没强度 (FID)指数,利用 ArcGIS 10.2 的分区统计工具,将模型输出的洪水淹没结果划分为 100m×100m 的网格。

$$FID = \frac{\sum_{i=1}^n H_n}{n}$$

式中,FID 表示单位网格内的平均淹没深度。 H 表示洪水淹没深度 (m), n 为单位网格内的淹没深度统计数目。

2.3 景观特征

景观特征包括景观组成、景观配置以及地形指标^[29],由于景观配置的变化对于洪水强度的影响较小^[30],因此本文重点探究土地利用类型对洪水灾害事件的影响,本研究的景观特征指数均基于 100m 网格尺度的进行计算^[31—32]。

2.3.1 土地类型组成

土地利用数据是基于多层感知 (MLP) 分类方法从高分 6 号光学遥感图像中分类而来^[33]。首先用 ENVI 5.3 软件对图像进行预处理,进行辐射度校准、大气校正、测距校正和正交校正。利用“Co-occurrence Measures”工具提取图像的纹理特征。四个光谱特征和八个纹理特征被归一化,得到一个用于土地覆盖分类的新融合图像。然后使用 ENVI 5.3 的 ROIS 工具提取了土地覆盖类型的分类样本。最后根据样本数据集,将融合后的图像作为 MLP 分类器的输入数据,随机将数据按照 8:2 的比例分别进行模型训练和结果验证,根据训练后的 MLP 模型对研究区的 GF-6 遥感图像在 RStudio 中进行用地分类。

本文根据中科院的土地利用分类标准,将研究区用地类型分为建设用地、林地、水体、耕地、草地、裸地和矿坑 7 类。对于分类后的数据,在 ArcGIS 10.2 中进行人工目视纠正,并使用 ENVI 5.3 的混淆矩阵验证工具对结果进行准确度评估。结果显示分类的总体精度和 Kappa 系数分别为 92% 和 0.88,分类精度满足要求。各土地类型准确度如表 5 所示。

表 5 土地类型分类准确度

Table 5 Accuracy of land type classification

土地类型 Land types	生产者精度/% Producer's accuracy	用户精度/% User's accuracy	土地类型 Land types	生产者精度/% Producer's accuracy	用户精度/% User's accuracy
建设用地 Construction	96.34	78.38	草地 Grass	81.37	78.58
林地 Forest	89.98	91.61	裸地 Bare	85.91	94.52
水体 Water	98.27	98.72	矿坑 Mine	98.62	97.34
耕地 Crop	74.31	93.87			

利用 ArcGIS 10.2 的面积制表工具,来计算每个网格内的建设用地 (CONSTRUCTION_p)、林地 (FOREST_p)、水体 (WATER_p)、耕地 (CROP_p)、草地 (GRASS_p)、裸地 (BARE_p)、矿坑 (MINE_p) 的面积百分比。

2.3.2 地形指数

相对高程 (RE) 表示每个格网单位的高程变化程度,当 RE 值较大时,表示格网中的高程波动很大。相反,网格中的高程保持相对平坦^[25]。RE 的计算方法如公式所示:

$$RE = E_{\max} - E_{\min}$$

式中, $E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 分别指示每个格网海拔的最大值和最小值 (m)。

地形湿度指数 (TWI) 通常用于量化地形对水文过程的影响,是地表径流生成的最重要因素之一^[34]。TWI 指数被广泛用于模拟水文流路径和识别洪水易发地区。TWI 的高值意味着径流产生的高潜力,而低值意味着径流产生的低潜力。TWI 的计算方法如公式所示:

$$TWI = \ln(\alpha / \tan \beta)$$

式中, α 为坡角, β 的某点向下排水的上游汇水总面积 (m²)。

利用 ArcGIS 10.2 的分区统计工具,来计算每个网格内的相对高程 (RE) 和地形湿度指数 (TWI) 的平均值。

2.4 空间自相关分析

双变量 Moran's I 统计量^[35]通常用于指示一个变量和另一个变量在附近区域的线性关联度。本研究采用全局双变量 Moran's I 和局部双变量 Moran's I ,分别计算上、中、下游的洪水淹没强度与景观特征的空间相关性。其方法如公式下所示:

$$I_{L,F} = \frac{N \sum_i \sum_{j \neq i}^N W_{ij} Z_i^L Z_j^F}{(N-1) \sum_i \sum_{j \neq i}^N W_{ij}}$$

$$I'_{L,F} = Z_i^L \sum_{j=1}^N W_{ij} Z_j^F$$

式中, $I_{L,F}$ 和 $I'_{L,F}$ 分别指全局和局部双变量 Moran's I , N 指网格方格总数, W_{ij} 是衡量网格方格 i 和 j 之间空间相关性的空间权重矩阵, Z_i^L 指景观特征指数的标准化值, Z_j^F 指网格方格内洪水淹没强度标准化值。

全局双变量 Moran's I 值的范围是 -1 到 1,其中 -1 表示最强的负空间自相关,0 意味着没有空间自相关,1 表示正空间自相关。局部双变量 Moran's I 的结果通过生成聚类图来可视化本地空间相关性,这有助于识别四种类型的空间相关性。高-高 (H-H),被高洪水淹没强度包围的土地景观特征指数的高值;低-低 (L-L),被低洪水淹没强度包围的景观特征指数的低值;高-低 (H-L),被高洪水淹没强度包围的景观特征指数的低值;低-高 (L-H),被低洪水淹没强度包围的景观特征指数的高值。H-H 或 L-H 类型被确定为潜在的 GI 地点,其依据是不同的景观特征指数与洪水淹没在网格单位尺度上的相关程度。本研究使用 GeoDa 1.14 计算了双变量 Moran's I 并绘制了局部空间关联图 (LISA),显著性水平设定为 0.01。

2.5 地理探测器模型

地理探测器模型^[36]主要从空间分异的角度分析地理对象之间的关系,包括风险探测、因子探测、生态探测和交互探测 4 个部分。本研究选用交互探测部分,检测各种景观特征因子组合的相互作用对洪水淹没强度变化的解释程度。首先分别计算两个景观特征因子 x_1 和 x_2 对因变量洪水淹没强度 y 的 q 值,记为 $q(x_1)$ 和 $q(x_2)$,并计算二者叠加后的因子 $x_1 \cap x_2$ 的 q 值并进行比较,即可判断两个景观特征因子对洪水淹没强度交互作用的类型。判定依据如表 6 所示。

$q(x_1)$ 和 $q(x_2)$ 表示由交互探测计算出的因子 x_1 和 x_2 的 q 值。符号 $\cap$ 表示因子 x_1 和 x_2 之间的相互作用。 $q(x_1 \cap x_2)$ 表示 $x_1 \cap x_2$ 的 q 值。每个因子通过 ArcGIS 10.2 中的自然断点分级法分为 5 个等级类型,通过地理探测器分别计算各景观特征因子组合对洪水淹没强度交互作用的类型。

表 6 双因子交互类型及判定依据
Table 6 Factor interaction type and basis for determination

交互类型 Interaction types	判断依据 Judgment basis
非线性的减弱 Reduction of nonlinearity	$q(x1 \cap x2) < \min(q(x1), q(x2))$
双因子增强 Two factor enhancement	$\max(q(x1), q(x2)) < q(x1 \cap x2) < q(x1) + q(x2)$
单因子非线性减弱 Nonlinear attenuation of single factor	$\min(q(x1), q(x2)) < q(x1 \cap x2) < \max(q(x1), q(x2))$
非线性的增强 Enhancement of nonlinearity	$q(x1 \cap x2) > q(x1) + q(x2)$
相互独立 Mutual independence of factors	$q(x1 \cap x2) = q(x1) + q(x2)$

3 结果

3.1 洪水过程分析

根据 MIKE 平台的模拟结果,比较了研究区在 8 个时刻的淹没深度和淹没范围大小(图 2)。为了进一步定量分析淹没水深与淹没面积之间的关系,将积水深度分为 0.2—0.5m、0.5—1.0m、1.0—1.5m、1.5—3.0m、大

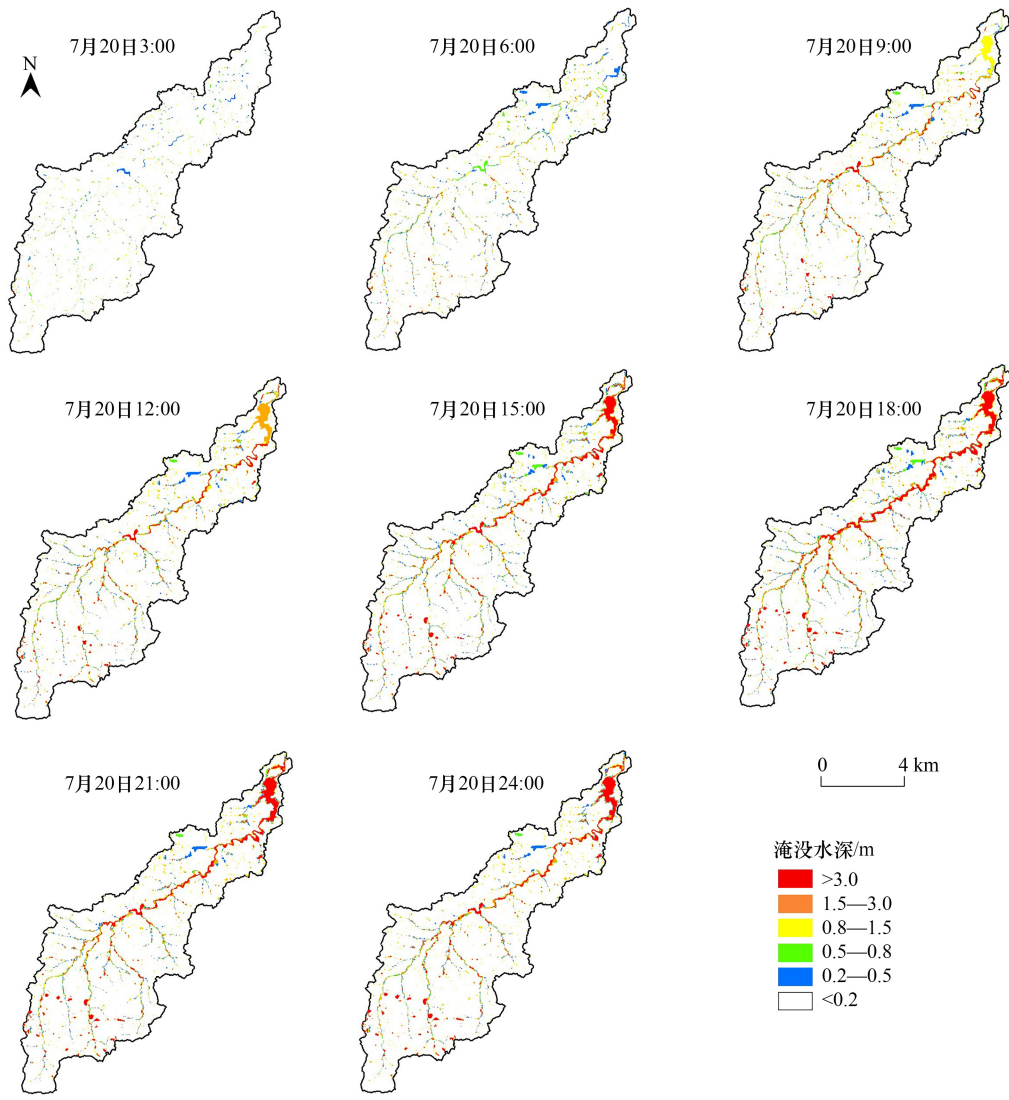


图 2 研究区各时段的洪水分布情况
Fig.2 Flood distribution at different time periods in the study area

于 3.0m 五个等级,统计了不同时刻水深分级的面积占比。

从图 3 可以看出,在暴雨初期的 3—6 时,0.2—0.5m、0.5—1.0m 和 1.0—1.5m 的洪水为研究区主要的洪水淹没深度类型,其淹没面积占总深度类型的 83.78%。在 9—12 时,1.0—1.5m 和 1.5—3.0m 深度类型的洪水面积占比逐渐增大,分别在 9 时和 12 时达到最大面积占比 35.16% 和 31.36%,成为此时研究区主要的洪水淹没深度类型(53.97%)。在暴雨中后期的 15—24 时,3.0m 以上的洪水深度类型逐渐占据主要地位(36.11%),在 18 时达到最大面积占比 38.40%。

从图 4 可以看出,UR、MR 和 LR 的淹没面积均在 18 时达到最大,此时的淹没面积从大到小依次为 LR (4.41km²)、UR (3.30km²)、MR (1.87km²)。在 3 时 UR 的淹没面积 (0.79km²) 大于 LR (0.61km²),此时 LR 的淹没面积快速增长,并在 9 时超过 UR 的淹没面积。贾峪河流域的洪水淹没面积从 9 时的 6.37km² 开始平稳增长至 18 时达到最大值 9.59km²,之后减小至 24 时的 7.73km²。

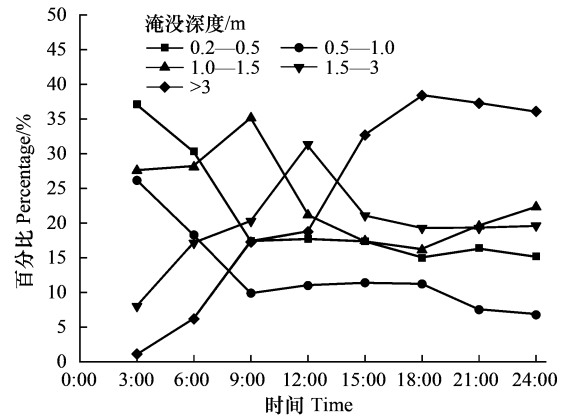


图3 研究区各深度类型面积占比

Fig.3 Area proportion of each depth type in the study area

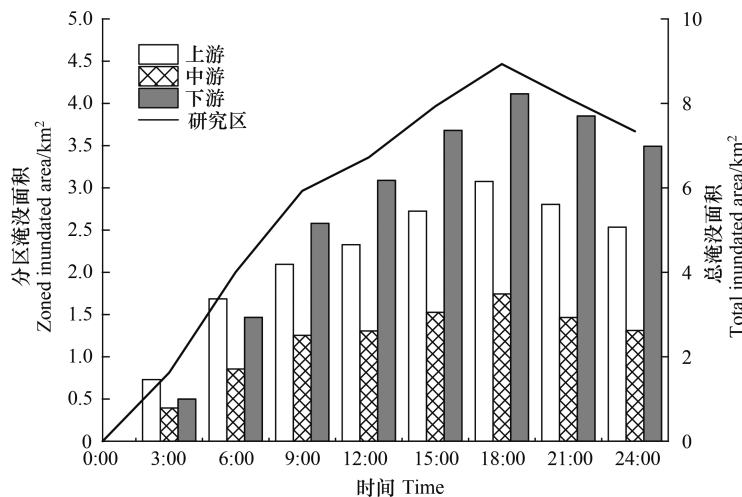


图4 研究区总淹没面积

Fig.4 Total inundated area of the study area

3.2 洪水淹没强度和景观特征指数的相关性

研究区洪水淹没强度与各景观特征指数的全局 Moran's I 值的变化表明(表 7),FID 与 CONSTRUCTION_p 和 CROP_p 之间均呈显著负相关性(Moran's $I < 0, P < 0.01$),与 MINE_p 和 RE 之间呈显著负相关性(Moran's $I > 0, P < 0.01$)。贾峪河三个区域主要影响 FID 的景观特征指数因子表现出不同的相关性变化。

在 UR,相关性相对较强的前 4 类因子依次为:MINE_p>RE>FOREST_p>CROP_p,其相关性系数在 24 时的平均值分别为 0.189、0.136、-0.083、-0.061。其中 FID 与 FOREST_p 和 CROP_p 呈显著负相关,与 MINE_p 和 RE 呈显著正相关,其相关性强度随时间变化逐渐增强,均在 24 时达到最强相关性,依次为 -0.105、-0.08、0.234、0.207。

在 MR,相关性相对较强的前 4 类因子依次为:WATER_p>TWI>RE>GRASS_p,相关性系数的平均值分别为

0.308、0.227、0.148、0.084。FID 与 WATER_p和 RE 呈显著正相关,相关性强度呈增强趋势,在 24 时达到最大值 0.374 和 0.160;FID 与 CROP_p呈显著负相关,与 GRASS_p和 TWI 呈显著正相关,相关性强度呈增强趋势,在 18 时达到最强相关性,依次为-0.068、0.122、0.297。

在 LR,相关性相对较强的前 4 类因子依次为:WATER_p>TWI>CONSTRUCTION_p>RE,相关性系数的平均值分别为 0.379、0.281、-0.179、0.143。FID 与 CONSTRUCTION_p、CROP_p、BARE_p呈显著负相关,与 WATER_p和 TWI 呈显著正相关,相关性强度呈增强趋势,均在 21 时达到最大值,依次为-0.246、-0.069、-0.136、0.546、0.380;FID 与 RE 呈显著正相关,相关性强度呈增强趋势,在 18 时达到最大值 0.177。

通过分析发现,FID 和地形因子之间具有更强的相关性,其相关性强度在 0—24 时的平均值 UR:Moran's $I=0.077$ 、MR:Moran's $I=0.188$ 、LR:Moran's $I=0.212$ 。其次是 FID 和土地类型组成因子之间的相关性,其相关性强度在 0—24 时的平均值 UR:Moran's $I=0.058$ 、MR:Moran's $I=0.080$ 、LR:Moran's $I=0.121$ 。

表 7 洪水淹没强度和景观特征指数的空间相关性统计表

Table7 Spatial correlation table of flood inundation depth intensity and landscape feature index

景观特征指数 Landscape characteristics indexes	区域 Region	Moran's I							
		3	6	9	12	15	18	21	24
建设用地面积百分比 CONSTRUCTION _p	UR	-0.037 *	-0.029 *	-0.030 *	-0.034 *	-0.029 *	-0.024 *	-0.031 *	-0.035 *
	MR	-0.041 *	-0.059 *	-0.038 *	-0.039 *	-0.037 *	-0.032 *	-0.033 *	-0.035 *
Percentage of construction land	LR	-0.013	-0.071 *	-0.176 *	-0.220 *	-0.227 *	-0.240 *	-0.246 *	-0.241 *
林地面积百分比 FOREST _p	UR	-0.042 *	-0.053 *	-0.089 *	-0.089 *	-0.089 *	-0.094 *	-0.100 *	-0.105 *
Percentage of forest land	MR	0.015 *	0.025 *	-0.052 *	-0.051 *	-0.062 *	-0.077 *	-0.068 *	-0.063 *
	LR	0.008	0.045 *	0.124 *	0.130 *	0.144 *	0.166 *	0.157 *	0.148 *
水体面积百分比 WATER _p	UR	-0.005	-0.002	-0.005	-0.004	0	0.001	-0.001	-0.003
Percentage of water land	MR	0.120 *	0.155 *	0.355 *	0.360 *	0.368 *	0.365 *	0.368 *	0.374 *
	LR	0.056 *	0.112 *	0.313 *	0.505 *	0.484 *	0.487 *	0.546 *	0.532 *
耕地面积百分比 CROP _p	UR	-0.037 *	-0.036 *	-0.055 *	-0.057 *	-0.066 *	-0.076 *	-0.077 *	-0.080 *
Percentage of crop land	MR	-0.015 *	-0.023 *	-0.059 *	-0.059 *	-0.062 *	-0.068 *	-0.064 *	-0.064 *
	LR	-0.027 *	-0.037 *	-0.057 *	-0.066 *	-0.066 *	-0.068 *	-0.069 *	-0.066 *
草地面积百分比 GRASS _p	UR	-0.003	-0.013 *	-0.004	-0.004	0.003	0.009	0.011	0.012
Percentage of grass land	MR	0.041 *	0.042 *	0.087 *	0.082 *	0.098 *	0.122 *	0.104 *	0.094 *
	LR	-0.005	0.028 *	0.023 *	-0.018 *	-0.012	-0.014 *	-0.031 *	-0.025 *
裸地面积百分比 BARE _p	UR	-0.005	0.012	0.044 *	0.046 *	0.051 *	0.049 *	0.044 *	0.039 *
Percentage of bare land	MR	-0.036 *	-0.032 *	-0.026 *	-0.026 *	-0.024 *	-0.021 *	-0.024 *	-0.025 *
	LR	-0.005	-0.031 *	-0.098 *	-0.123 *	-0.123 *	-0.133 *	-0.136 *	-0.129 *
矿坑面积百分比 MINE _p	UR	0.135 *	0.142 *	0.192 *	0.195 *	0.192 *	0.202 *	0.218 *	0.234 *
Percentage of mining pits area	MR	0	0	0	0	0	0	0	0
	LR	0	0	0	0	0	0	0	0
相对高程 RE	UR	0.074 *	0.065 *	0.099 *	0.122 *	0.152 *	0.180 *	0.191 *	0.207 *
Relative elevation	MR	0.112 *	0.129 *	0.156 *	0.157 *	0.156 *	0.158 *	0.156 *	0.160 *
	LR	0.081 *	0.143 *	0.200 *	0.127 *	0.159 *	0.177 *	0.126 *	0.130 *
地形湿度指数 TWI	UR	-0.022 *	0.018 *	0.015 *	0.003	-0.006	-0.012	-0.026 *	-0.037 *
Topographic wetness index	MR	0.079 *	0.113 *	0.255 *	0.251 *	0.274 *	0.297 *	0.280 *	0.268 *
	LR	0.073 *	0.121 *	0.242 *	0.356 *	0.350 *	0.352 *	0.380 *	0.371 *

* 表示显著水平为 $P<0.01$;UR:上游 Upper river;MR:中游 Middle river;LR:下游 Lower river

3.3 景观特征指数之间的相互作用对洪水淹没强度变化的影响

研究区各区域在不同时间的洪水淹没强度变化驱动力存在差异,多数交互因子(93.33%)对洪水淹没强度的影响力随时间变化呈增强趋势,并在暴雨中后期 18—24 时达到最强;但在 MR, FOREST_p ∩ CONSTRUCTION_p对洪水淹没强度变化的解释度不随时间而变化(图 5)。交互探测结果表明,各时期的因子交互作用对洪水淹没强度变化的解释力均大于单因子作用,且交互结果均表现为非线性增强和双因子增强,不存在非线性减弱和相互独立的情况,说明洪水淹没强度变化是各种因素相互作用而形成的结果,各类因子之间的交互相对于洪水淹没强度变化的单因子均有不同程度的增强。

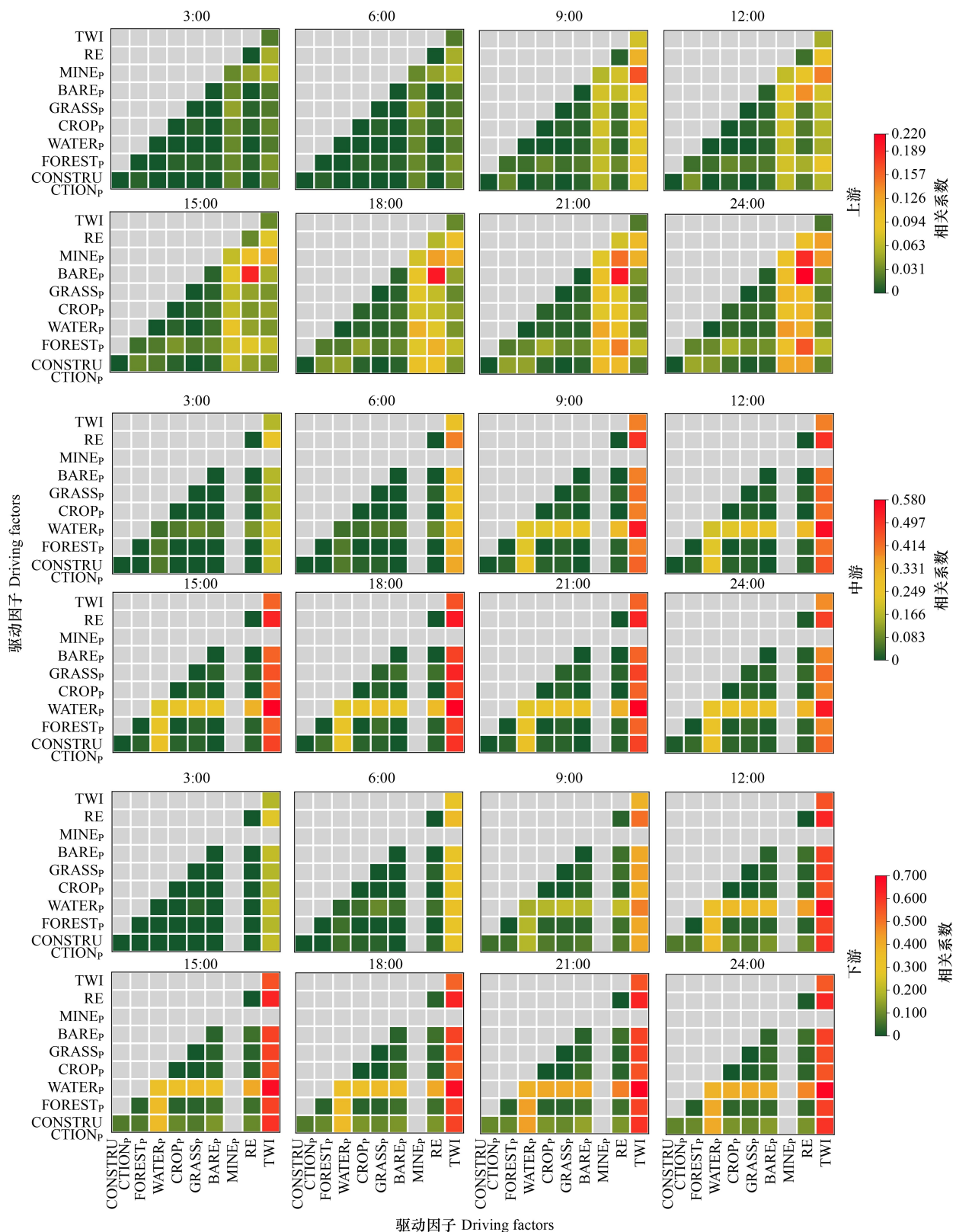


图5 9个景观特征指数对贾峪河流域洪水淹没强度的交互影响

Fig.5 Summary of interactive influences of the nine landscape characteristics indexes on flood inundation depth intensity along the Jiayu River

CONSTRUCTION_p: 建设用地面积百分比 Percentage of construction land; FOREST_p: 林地面积百分比 Percentage of forest land; WATER_p: 水体面积百分比 Percentage of water land; CROP_p: 耕地面积百分比 Percentage of crop land; GRASS_p: 草地面积百分比 Percentage of grass land; BARE_p: 裸地面积百分比 Percentage of bare land; MINE_p: 矿坑面积百分比 Percentage of mining pits area; RE: 相对高程 Relative elevation; TWI: 地形湿度指数 Topographic wetness index

在 UR, RE、TWI 和 MINE_p 在与其他因子的交互作用均表现出较强的解释度, 其中 TWI ∩ CONSTRUCTION_p、TWI ∩ FOREST_p、TWI ∩ WATER_p、TWI ∩ CROP_p、TWI ∩ GRASS_p、TWI ∩ BARE_p 共 6 对交互结果随时间变化呈减小趋势, 其他交互结果变化均呈增强趋势; TWI 与其他因子的交互结果平均值在 9 时达到最大值 0.105, RE 和 MINE_p 与其他因子的交互结果平均值在 24 时达到最大, 分别为 0.124 和 0.145。在 MR 和 LR, TWI 和 WATER_p 与其他因子的交互作用成为推动洪水淹没强度变化的主要因素, 其解释度随时间变化呈增强趋势; 在 MR, TWI 和 WATER_p 与其他因子的交互结果平均值在 18 时达到最大, 分别为 0.304 和 0.503, 而在 LR 其平均值在 21 时达到最大, 分别为 0.466 和 0.600。

3.4 洪水淹没强度和景观特征指数的局部空间相关性分析

双变量 LISA 图显示了洪水淹没强度指数在 0—24 时的平均值 (FID_{ave}) 与 9 个景观特征指数之间的五种不同类型的空间相关性, 其中“高-高”和“高-低”类型的区域比其他区域遭受了更严重的洪水破坏。如图 6 所示, UR、MR 和 LR 中, “高-高”和“高-低”区域的百分比分别为 0.88%—8.31% 和 0.47%—9.85%, “低-低”和“低-高”区域的百分比分别为 0—30.81% 和 1.52%—23.52%。

在 UR, FID_{ave} 与景观特征指数的“高-高”聚集的地区主要集中在 UR 中部 GRASS_p、MINE_p 和 RE 高值的丘陵地区, 以及北部 CONSTRUCTION_p、BARE_p 和 TWI 高值的河道周边地区。在 MR, “高-高”聚集地区主要分布在该区域的中部 CONSTRUCTION_p、WATER_p、GRASS_p、BARE_p、RE 和 TWI 高值的河道周边地区, 此外在东南部 FOREST_p 和 RE 高值的丘陵地区也有少量分布。在 LR, “高-高”聚集地区主要分布在 FOREST_p、WATER_p、GRASS_p、RE 和 TWI 高值的河道和常庄水库周边地区, 在西部 CONSTRUCTION_p 高值的城区也有零散分布。

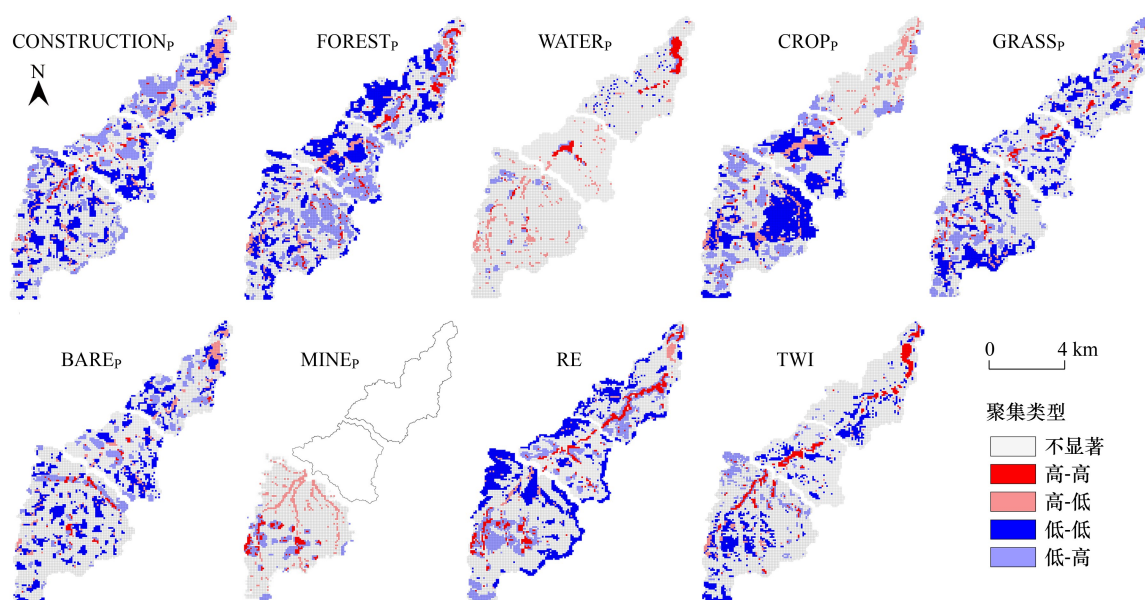


图 6 洪水淹没强度与景观特征指数局部空间相关性聚类图

Fig. 6 Clustering of local spatial correlations between flood inundation depth intensity and landscape character indices

4 讨论

4.1 贾峪河流域上中下游地区的缓解策略

本研究结果表明, 洪水淹没强度与地形指数之间的相关性比土地覆盖组成占着更主要的作用。这一发现与 Souissi 等^[37]的结果一致, 其研究选择了 8 个洪水影响因素来评估洪水灾害敏感性, 结果表明海拔是洪水发生的最突出因素。而 Hammami 等^[38]表明, 土地覆盖因素对突尼斯市洪水的贡献最大。Wu 等^[39]证明, 地形因素对鄱阳湖流域的洪水风险有限。Zhang 等^[32]表明土地覆盖因素在大分析尺度上对洪水灾害有较强的影

响,地形因素在小分析尺度上的影响力大于其他因素。这表明影响洪水灾害的主要因素在不同地区中存在差异。因此,应根据结果采取洪水风险应对措施。

一般来说,增加不透水表面,矿坑将累积地表雨水并加剧洪水灾害的发生,而林草地、农田和裸地的增加可能有利于水渗透并显著缓解洪水^[40]。研究结果表明,FID 与 CONSTRUCTION_p之间呈显著的负空间相关性,这与其他类似的研究相反^[41—42],可能是因为贾峪河地区建设用地海拔较高,不容易形成较深的积水。FID 与 FOREST_p之间在 UR、MR 呈现显著的负空间相关性,这些发现与其他类似研究一致^[16,43]。而在 LR 则呈现显著的正空间相关性,其原因是该地区的海拔较低和河道宽度狭窄,大部分林地处于河岸边。同样的,FID 与 GRASS_p在 MR 呈现显著的正空间相关性可能由于类似的原因所造成。FID 与 WATER_p之间在 UR 的相关性并不显著,是由于 UR 地区的水体面积较少所导致。FID 与 RE 之间呈现显著的正空间相关性,这与其他类似的研究相反^[32]。推测是由于贾峪河流域海拔高且地形变化大,RE 较大的地区多为沟谷或坑洼地,更易产生积水。FID 与 TWI 之间在 UR 呈现显著的负空间相关性,这与其他研究不一致^[32],这是由于 UR 许多的矿坑汇集了雨水而影响了结果。

在整个贾峪河流域中,水体面积覆盖对洪水淹没强度的贡献在 MR 和 LR 相对较大,相关性强度在 0—24 时的平均值 MR:Moran's $I=0.308$ 、LR:Moran's $I=0.379$,网格单元内水体占比越大,洪水淹没强度越严重。此次暴雨事件表明,贾峪河流域内的河道、湖泊、水库和沼泽可能没有足够的能力应对更严重的洪水^[44]。研究结果表明,通过拓宽和加深现有河道、修建堤坝和水库以及工程渠道来扩大河道的水流能力应始终是整体洪水缓解计划的一部分^[45—46]。

由于贾峪河流域三个区域的景观特征组成及其分布的差异,本文分别讨论了贾峪河上、中、下游地区的缓解策略。选择与 FID 相关性系数较强的景观特征因子(表 5),并根据双变量 LISA 图(图 6)确定位置,最终确定流域 GI 规划布局如图 7 所示。在 UR,建议优化的位置是 RE 较高的矿坑。露天采矿切断了地表水和地下水之间的水文联系,严重降低了土壤的持水能力^[47]。建议对这些地区重新造林并使用露天矿坑作为潜在的蓄水池,使其发挥延迟洪峰时间和降低河道行洪流量的作用。此外,图 6 结果表明,UR 北部地区临近河道的部分村庄具有较高的洪水淹没风险,因此也应考虑采用工程措施提升此段河道的行洪能力。

在 MR 中,建议优化的位置是 TWI 较高的水体和草地。该地区中部的河道洪泛区内的草地植被种类单一,生态服务价值较低。建议提升这些地区的植被种类,建设多段的植被缓冲带和植草沟等绿色基础设施来提升对雨洪径流的蓄调能力^[46,48]。图 6 的结果表明洞林湖出水口部分河段行洪能力不足,周边建筑具有较高的洪水淹没风险,应考虑采用工程措施提升此段河道的行洪标准。

在 LR 中,建议改进的位置是 TWI 较高的水体和林地,这些地区受地势因素影响,在暴雨时期具有较高的洪水淹没强度,应提高该区域的蓄洪、调节功能。在该地区中部的河道,建议建设雨水湿地和滞留塘等绿色基础设施,以提高区域的蓄水能力。北部地区的常庄水库,建议对其加固提升库容,划定严格的保护范围^[49]。西北部的建成区因其地势较为平坦,具有一定的内涝风险,可以考虑在建设用地内增加绿色屋顶、植草沟和透水铺装等绿色基础设施,在裸地上增加下沉式绿地、生物滞留设施等绿色基础设施,增加与河流水系的连接廊

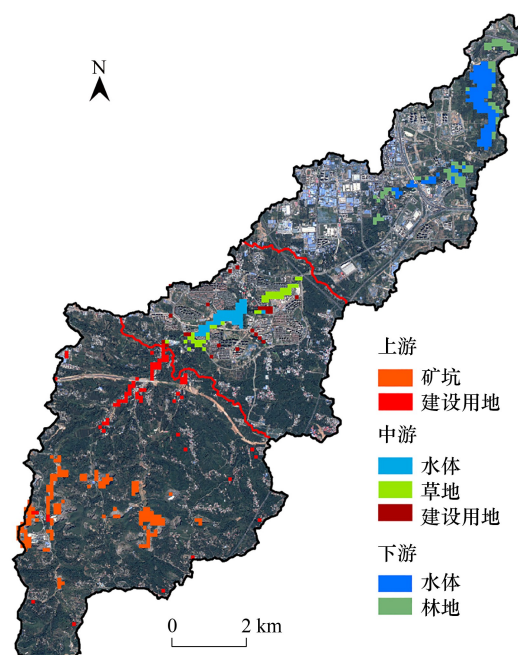


图7 绿色基础设施规划

Fig.7 Green infrastructure planning

道,以减轻城市洪水风险^[50]。

4.2 展望

本文基于 MIKE 模型模拟了贾峪河流域在 2021 年 7 月 20 日暴雨事件中的洪水演进过程,结合双变量空间自相关模型分析了洪水淹没强度和景观特征的相关性以及空间关系,并通过地理探测器模型探究了洪水淹没强度变化的驱动力因素,得到了一些结论,下一步的研究应增加景观空间格局因素,探究土地利用空间配置的优化对山地丘陵地区洪涝灾害的缓解作用。

此外,本研究模型气象数据来源于郑州、荥阳和新密气象站的小时降雨数据,尽管已经能代表研究区此次暴雨事件的降雨情况,但时间跨度更长、降雨量统计区间更紧密、以及更靠近研究区范围的雨量站的统计数据,其水文模拟结果更贴合真实情况。因此在今后的工作中是利用更高精度的三维地形数据和更精准的降雨数据进行模拟,并开展雨洪模型数据的不确定性研究,以得到更精确的模拟结果。

5 结论

(1) 此次暴雨事件中下游地区的洪水淹没最严重,最大淹没面积出现在 18 时为 4.41km²,约占该区域总面积的 18.88%。在暴雨初期的 0—6 时洪水淹没面积快速增长,此时主要洪水淹没深度在 0.2—1.5m,约占总面积的 83.78%;在暴雨中后期 9—18 时淹没面积平稳增长,之后开始减小。其中在 9—12 时和 15—24 时的主要淹没深度分别在 1.0—3.0m 和 3.0m 以上,约占总面积的 53.97%和 36.11%。

(2) 在本研究中地形因素是显著影响因素,其 Moran's *I* 平均值为 0.159。洪水淹没强度与上游的相对高程、以及矿坑、林地和耕地的面积百分比具有较强的相关性;与中游的水体面积百分比、地形湿度指数、相对高程、草地面积百分比具有较强的相关性;与下游的水体面积百分比、地形湿度指数、建设用地面积百分比、相对高程具有较强的相关性。强相关因子的相关性强度随时间变化呈现增强趋势,均在暴雨中后期 18—24 时达到最强相关性。

(3) 交互因子对洪水淹没强度变化的解释度强于单因子解释度。在上游区域,地形湿度指数和矿坑百分比与其他因子的组合在暴雨前期是洪水淹没强度变化主要的驱动因素,而在暴雨中后期相对高程和矿坑百分比与其他因子的组合是主要的驱动因素,水体百分比和地形湿度指数与其他因子的组合在中游地区和下游地区是主要的驱动因素。

(4) 在上游建议露天矿坑就地改造为蓄水池并恢复植被,增加区域蓄水能力。中游和下游应提升河岸带绿地质量,提升河道行洪能力。此外在下游的城区建议增加绿色基础设施,减轻城市洪水风险并提升与河道的连通性。

参考文献 (References):

- [1] Kundzewicz Z W, Kanae S, Seneviratne S I, Handmer J, Nicholls N, Peduzzi P, Mechler R, Bouwer L M, Arnell N, Mach K, Muir-Wood R, Brakenridge G R, Kron W, Benito G, Honda Y, Takahashi K, Sherstyukov B. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 2014, 59(1): 1-28.
- [2] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [3] The Human Cost of Disasters: An Overview of the Last 20 Years (2000-2019). [2022-12-02]. <https://reliefweb.int/report/world/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>.
- [4] U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. [2022-12-02]. <https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/>.
- [5] 张行南, 罗健, 陈雷, 李红. 中国洪水灾害危险程度区划. *水利学报*, 2000, 31(3): 1-7.
- [6] 赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究. *自然灾害学报*, 1996, 5(3): 93-99.
- [7] 国务院灾害调查组. 河南郑州"7.20"特大暴雨灾害调查报告. 2022.
- [8] 郑璟, 方伟华, 史培军, 卓莉. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究——以深圳市布吉河流域为例. *自然资源学报*, 2009, 24(9): 1560-1572.

- [9] 杜俊, 任洪玉, 林庆明, 徐金鑫. 山洪灾害防御研究进展. 灾害学, 2019, 34(2): 161-167.
- [10] 吉中会, 吴先华. 山洪灾害风险评估的研究进展. 灾害学, 2018, 33(1): 162-167, 174.
- [11] 胡健伟, 刘志雨. 中小河流山洪预警预报系统开发设计及应用. 水文, 2011, 31(3): 18-21.
- [12] 何秉顺, 黄先龙, 张双艳. 山洪沟治理工程设计要点探讨. 中国水利, 2012(23): 13-15, 36.
- [13] 国家发展与改革委员会.《全国中小河流治理和病险水库除险加固、山洪地质灾害防御和综合治理总体规划》. 中国防汛抗旱, 2011, 21(3): 4.
- [14] Menzie C A, Deardorff T, Booth P, Wickwire T. Refocusing on nature: holistic assessment of ecosystem services. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2012, 8(3): 401-411.
- [15] 肖建红, 施国庆, 毛春梅, 王敏, 邢贞相. 水坝对河流生态系统服务功能影响评价. 生态学报, 2007, 27(2): 526-537.
- [16] Li L Y, Van Eetvelde V, Cheng X, Uyttenhove P. Assessing stormwater runoff reduction capacity of existing green infrastructure in the city of Ghent. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(8): 749-761.
- [17] Schuch G, Serrao-Neumann S, Morgan E, Choy D L. Water in the city: green open spaces, land use planning and flood management-An Australian case study. *Land Use Policy*, 2017, 63: 539-550.
- [18] Wang J X, Banzhaf E. Towards a better understanding of Green Infrastructure: a critical review. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 758-772.
- [19] 刘文, 陈卫平, 彭驰. 社区尺度绿色基础设施暴雨径流消减模拟研究. 生态学报, 2016, 36(6): 1686-1697.
- [20] Mei C, Liu J H, Wang H, Yang Z Y, Ding X Y, Shao W W. Integrated assessments of green infrastructure for flood mitigation to support robust decision-making for sponge city construction in an urbanized watershed. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 1394-1407.
- [21] Liao K H. From flood control to flood adaptation: a case study on the Lower Green River Valley and the City of Kent in King County, Washington. *Natural Hazards*, 2014, 71(1): 723-750.
- [22] 周伟奇, 朱家蓓. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151.
- [23] Zölch T, Henze L S, Keilholz P, Pauleit S. Regulating urban surface runoff through nature-based solutions-An assessment at the micro-scale. *Environmental Research*, 2017, 157: 135-144.
- [24] Li Y, Huang J J, Hu M C, Yang H, Tanaka K. Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(3): e12625.
- [25] 张杨, 杨洋, 江平, 邓红蒂, 祁帆, 李强, 常献伟, 程鹏. 山水林田湖草生命共同体的科学认知、路径及制度体系保障. 自然资源学报, 2022, 37(11): 3005-3018.
- [26] 钟业喜, 邵海雁, 徐晨璐, 冯兴华. 基于文献计量分析的流域山水林田湖草生命共同体研究进展与展望. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2020, 44(1): 95-101.
- [27] 陈平, 傅长锋, 于京要, 及晓光. 基于 MIKE 21 数值模拟蓄滞洪区洪水演进研究. 中国农村水利水电, 2017(8): 113-116, 120.
- [28] Zhang Y, Wang Y, Chen Y, Liang F G, Liu H P. Assessment of future flash flood inundations in coastal regions under climate change scenarios—a case study of Hadahe River Basin in northeastern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133550.
- [29] Miller J D, Brewer T. Refining flood estimation in urbanized catchments using landscape metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 175: 34-49.
- [30] Peng Y, Wang Q H, Wang H T, Lin Y Y, Song J Y, Cui T T, Fan M. Does landscape pattern influence the intensity of drought and flood? *Ecological Indicators*, 2019, 103: 173-181.
- [31] Park K, Lee M H. The development and application of the urban flood risk assessment model for reflecting upon urban planning elements. *Water*, 2019, 11(5): 920.
- [32] Zhang Q F, Wu Z F, Zhang H, Dalla Fontana G, Tarolli P. Identifying dominant factors of waterlogging events in metropolitan coastal cities: the case study of Guangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 271: 110951.
- [33] Gatis N, Carless D, Luscombe D J, Brazier R E, Anderson K. An operational land cover and land cover change toolbox: processing open-source data with open-source software. *Ecological Solutions and Evidence*, 2022, 3(3): e12162.
- [34] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116-123.
- [35] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [36] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [37] Souissi D, Zouhri L, Hammami S, Msaddek M H, Zghibi A, Dlala M. GIS-based MCDM-AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, 2020, 35(9): 991-1017.
- [38] Hammami S, Zouhri L, Souissi D, Souei A L, Zghibi A, Marzougui A, Dlala M. Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(21): 653.

- [39] Wu J R, Chen X L, Lu J Z. Assessment of long and short-term flood risk using the multi-criteria analysis model with the AHP-Entropy method in Poyang Lake Basin. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 75: 102968.
- [40] Li C L, Liu M, Hu Y M, Zhou R, Wu W, Huang N. Evaluating the runoff storage supply-demand structure of green infrastructure for urban flood management. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124420.
- [41] Oudin L, Salavati B, Furusho-Percot C, Ribstein P, Saadi M. Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 774-786.
- [42] Xu T, Xie Z Q, Zhao F, Li Y, Yang S Q, Zhang Y B, Yin S Q, Chen S, Li X, Zhao S D, Hou Z Q. Permeability control and flood risk assessment of urban underlying surface: a case study of Runcheng south area, Kunming. *Natural Hazards*, 2022, 111(1): 661-686.
- [43] Sohn W, Bae J, Newman G. Green infrastructure for coastal flood protection: The longitudinal impacts of green infrastructure patterns on flood damage. *Applied geography (Sevenoaks, England)*, 2021, 135.
- [44] Deng X J, Xu Y P. Degrading flood regulation function of river systems in the urbanization process. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 1379-1390.
- [45] Grabs W. Benchmarking flood risk reduction in the Elbe River. *Journal of Flood Risk Management*, 2016, 9(4): 335-342.
- [46] Serra-Llobet A, Jaehnig S C, Geist J, Kondolf G M, Damm C. Restoring Rivers and Floodplains for Habitat and Flood Risk Reduction: Experiences in Multi-Benefit Floodplain Management From California and Germany. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 9: 778568.
- [47] McCullough C D, van Etten E J B. Ecological restoration of novel lake districts: new approaches for new landscapes. *Mine Water and the Environment*, 2011, 30(4): 312-319.
- [48] 姜芊孜, 李金煜, 梁雪原, 肖华斌. 基于文献计量的绿色基础设施水生态系统服务供需评价研究进展. *生态学报*, 2023, 43(4): 1738-1747.
- [49] Singh R, Tiwari A, Singh G. Managing riparian zones for river health improvement: an integrated approach. *Landscape and Ecological Engineering*, 2021, 17: 195-223.
- [50] Lee R J. Vacant land, flood exposure, and urbanization: examining land cover change in the Dallas-Fort Worth metro area. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 209: 104047.