

漯河市规划区雨洪格局空间分布特征综合量化研究

白天, 吴雅文, 金牧青, 郑琳琳, 田国行

(河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 探索城市雨洪格局空间分布规律, 为海绵城市建设提供参考。[方法] 建立 GIS 数据库, ArcGIS 空间模拟与 SCS-CN, SWMM 模型相结合, 定量分析 20 a 重现期和 2 h, 85.43 mm 降雨, 漯河规划区产流和积水分布特征。[结果] 研究区径流量和径流系数(相等)、径流体积、峰值流量、积水区域的自相关 Moran's I 系数分别为 0.338 ($p < 0.001$), 0.142 ($p < 0.001$), 0.101 ($p < 0.001$), 0.918 ($p < 0.001$), 表明产流与积水分布均呈现显著集聚性, 土地类型和管网分布对产流影响大于积水过程, 而地形影响则相反; 径流量和径流系数由中心向外递减趋势, 径流体积与峰值流量受汇水区面积和城市管网分布影响; 高产流风险区不透水面占该区域 82.73%, 径流系数 > 0.7 和不透水面 $> 70\%$ 的汇水区集中在城市中心; 积水区用地类型以农业用地、城市绿地、道路用地为主, 分别占总面积的 36.56%, 21.39%, 21.82%, 分布特征存在显著差异。[结论] 城市地表结构变化与城市产流和积水分布关系密切, 综合量化方法可以直观地反映城市雨洪格局特征与趋势。

关键词: GIS 数据库; SWMM 水文分析; SCS-CN 模型; 雨洪格局特征; 漯河规划区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0269-06

中图分类号: TP391, P426.616

文献参数: 白天, 吴雅文, 金牧青, 等. 漯河市规划区雨洪格局空间分布特征综合量化研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 269-274. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.043. Bai Tian, Wu Yawen, Jin Muqing, et al. A quantitative study on spatial distribution of rain flood pattern in Luohe planning area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 269-274.

A Quantitative Study on Spatial Distribution of Rain Flood Pattern in Luohe Planning Area

BAI Tian, WU Yawen, JIN Muqing, ZHENG Linlin, TIAN Guohang

(College of Forestry, He'nan Agricultural University, Zhengzhou, He'nan, 450002, China)

Abstract: [Objective] To explore the spatial distribution of rain flood pattern in order to provide references for the construction of sponge city. [Methods] A GIS database was established, combined with ArcGIS simulation, SCS-CN and SWMM models, the characteristics of runoff and flood distribution were quantitatively analyzed in Luohe planning area. [Results] Total runoff and runoff coefficient (equal), runoff volume, total peak, inundation area of Moran's I coefficient was 0.338 ($p < 0.001$), 0.142 ($p < 0.001$), 0.101 ($p < 0.001$) and 0.918 ($p < 0.001$), respectively, indicated that the distribution of runoff and inundation had a remarkable agglomeration. The impact of land type and pipe network distribution on runoff was greater than that of accumulated water process, but the influence of topography was opposite. Total runoff and runoff coefficient were decreased from center to outside. Total peak and runoff volume were affected by catchments area and pipe network distribution. The impermeable surface of the runoff high risked area accounted for 82.73% of the total area. The runoff risk decreased from center to outside. The catchment area of runoff coefficient > 0.7 and the inundation area $> 70\%$ were concentrated in the urban center. Agricultural land, urban green space and road land were the main types of land use in the inundation area, accounting for

收稿日期: 2018-04-12

修回日期: 2018-05-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“郑州市绿色空间布局对城市微气候的影响机制”(31470029); 河南省交通厅重点科技攻关项目(2015J02)

第一作者: 白天(1986—), 男(蒙古族), 云南省昆明市, 博士研究生, 从事城乡绿地资源资源建设与管控, 城市灾害等研究。E-mail: baitian159@hotmail.com。

通讯作者: 田国行(1964—), 男(汉族), 河南省封丘县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事城乡绿地资源资源建设与管控研究。E-mail: tgh0810@163.com。

36.56%, 21.39% and 21.82% of the total area, respectively, and there were significant difference in the distribution characteristics. [Conclusion] Urban surface change was closely related to the distribution of runoff and inundation. The comprehensive quantification method could directly reflect the characteristics and trends of urban flood pattern.

Keywords: GIS database; SWMM hydrologic analysis; SCS-CN model; flooding pattern characteristics; Luohe planning area

城镇化改变了城市下垫面水文特征。明河变为暗沟、不透水面比例增加,显著降低了城市下垫面雨水截留和入渗能力^[1],彻底改变了原有自然水文过程。城市地形改造,导致城市地表径流局部汇集,使城市区域易受到历时短、强降雨的侵袭而引起城市内涝,给城市带来灾难性的后果^[2]。城市空间格局变化,导致城市用地类型和性质的差异,也是引起城市局部及周围环境雨洪灾害发生的主要因素之一。据统计,城市内涝每年造成的经济损失约占国民经济总产值的 3.5%,并有大量人员伤亡^[3]。欧美发达国家从 20 世纪 60 年代起开始城市雨洪研究^[4],到 20 世纪 80,90 年代已逐步建立了系统的计算理论与技术模型,包括 SWMM, MIKE 11, HSPF, SWAT 模型^[5]等以满足城市排水、防洪、环境治理的需要。中国也有相关研究,尹占娥等^[6]对上海市浦东暴雨淹没区域研究,划分了不同的风险区域,汤鹏等^[7]对扬州江都区产流分布研究,丁锶媛等^[8]对厦门市雨洪安全格局分析提出了控制红线边界与保护利用,姚磊等^[9]分析了北京市产流空间集聚特征等。近年来,漯河地区雨洪灾害突显,但关于漯河雨洪格局研究尚未见报道。雨洪空间分布特征与趋势研究目前还处于初级阶段,本次研究拟借助 GIS 和 RS 方法综合分析暴雨产流、积水过程和地理空间分布特征与趋势,以期在城市土地利用规划和海绵城市建设提供依据。

1 研究区概况

漯河市地处黄淮海平原,属暖湿性季风气候,夏季高温多雨,据漯河气象站(1956—2008)降雨统计资

料,全年降雨量区间为 377.1~1455.6 mm,降水量平均值 804 mm \pm 0.25,其中夏季降水量占全年降水量的 54%,53 a 间夏季降水量平均增加 7.8 mm^[10]。1956—2008 年,漯河发生涝灾 56 次,平均 1.06 a/次^[11],夏季积状云和积层混合云雨日增多,加之局部地区雷暴和特殊天气常引发局部暴雨,层、积、混 3 类云雨日平均雨量分别为 30.9,32.0 和 46.6 mm,导致城市降水多集中在 5—9 月^[10]。城区地势,东北高,西部平坦,东南低,每逢暴雨因排泄不及时而造成水患,尤其是对城市东南的召陵,邓襄地区灾害严重。城市中心积水点由 2014 首次统计的 23 个,增加为 2016 重新划分后的 25 个,2010 年 7 月 17 日 12 时 30 分,漯河市降雨强度 2 h 达 187 mm,为近 10 a 来最大降雨^[12],2013 年 8 月 24 日 17 时 54 分,市区降雨量 1 h 内高达 90 mm,2017 年 8 月 18 日漯河市平均降水量达到 211 mm,最大降雨量达到 280 mm。城市暴雨造成大量积水,影响道路交通安全和居民正常活动,大量漂浮污染物扩散,引起水资源的二次污染。

2 城市规划区雨洪格局分布特征分析

2.1 建立 GIS 数据库

GIS 空间模拟需要城市原始数据支撑,本文研究数据来源:①漯河市园林管理局、规划局、气象局等部门提供数据;②参考文献数据;③运用 Trimble UX5 HP 固定翼无人机航拍获取的 0.09 m 高分辨率正射影像数据。根据研究需要对获取的数据进行必要的矢量化和属性化解译(表 1)。

表 1 漯河规划区的 GIS 数据库

资料名称	数据处理	数据来源
城市用地布局图	矢量化	漯河市城市总体规划(2012—2030),航拍影像目视解译
排水工程现状图	矢量化	漯河市城市总体规划(2012—2031)
道路分布图	矢量化	漯河市城市总体规划(2012—2030),航拍影像目视解译
数字地形图	矢量化	无人机影像生成数字点云数据,DSM 数字地表模型
土壤类型图	矢量化	中国土壤数据库,环刀试验数据
CN 系数	属性化	美国《国家工程手册》,土地覆盖/利用(LUCC)
降雨及蒸发数据	属性化	漯河市气象局,漯河市市政工程设计院
子汇水特征数据	属性化	无人机影像数字点云数据,SWMM 使用手册

2.2 降雨信息

根据《室外排水设计规范》和漯河市暴雨曲线、内涝防治设计重现期标准为 20 a,而降雨开始后的 2 h 为主要降雨时期,0~2 h 降雨强度下降率为 72%,后逐渐稳定,是观察降雨过程的最佳时期^[13]。故结合漯河市暴雨强度公式与芝加哥雨型生成器^[14],生成 20 a 重现期 2 h 降雨时间序列,计算降雨量为 85.43 mm,分析漯河市规划区 157.79 km² 的径流和积水分布特征。漯河市市政工程设计院,2014 年漯河市暴雨强度公式编制成果:

$$i = \frac{9.734(1+0.732\lg P)}{(t+8.7)^{0.677}} \quad (1)$$

式中: i ——降雨强度(mm/min); P ——降雨重现期(h); t ——降雨历时(min)。

2.3 提取城市下垫面参数

对无人机航拍影像进行融合拼接、地理配准、几何纠正处理,获得分辨率为 0.09 m 的漯河市规划区 157.79 km² 的正射影像,获取时间为 2016 年 3 月 13 日至 22 日,该时段影像清晰,可有效的判别城市各类用地边界和其他关键信息。

(1) 通过目视解译,将土地覆盖/利用(LUCC)类型^[15]划分为两大类,7 种类型($P_{1-4} - I_{1-3}$)。 P 为透水表面: P_1 城市绿地, P_2 水体, P_3 农业用地, P_4 未利用土地; I 为不透水表面: I_1 道路用地, I_2 建筑用地(屋顶), I_3 公共管理用地。

(2) 采用 ArcGIS 10.2 将航拍获取的地表点云数据转换为高程精度为 1 m 数字表面模型(DSM)^[16],与通常由卫星影像获取的精度为 30 m 的 DEM 影像相比提高了研究的精确性,同时,还能获取城市建筑高程竖向二维数据。

2.4 SCS-CN 水文模型分析

2.4.1 SCS-CN 水文模型 SCS-CN 模型由美国农业部开发,是用于计算小流域降雨—产流的地质水文经验模型,该模型在产流计算和模拟研究中得到广泛

的应用^[17]。降雨水平衡方程为:

$$P = I_a + F + Q \quad (2)$$

式中: P ——降雨量(mm); I_a ——雨水初损(mm),包括植被截留量、地表蒸发、土壤渗漏等; F ——后损值,即地表实际累积的入渗量(mm); Q ——地表实际径流量(mm)。下同。

SCS 模型降雨计算的径流公式为:

$$Q = \begin{cases} 0 & (P \leq 0.2S) \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & (P > 0.2S) \end{cases} \quad (3)$$

式中: S ——饱和储水量。下同。

由于 S 饱和储水量,受环境影响较大,因而引入一个无量纲径流曲线数(CN 系数),CN 系数是 SCS-CN 模型中反映降雨前下垫面和降雨特征的综合参数,为了提高城市流域的水文模拟的精确度,美国《国家工程手册》中提供了城市化区域各类型土地覆盖所对应的 CN 值表^[17]并不断更新,能反映城市区域的产流特性。CN 值和 S 之间有如下关系:

$$S = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: S ——土壤饱和储水量;CN 系数和研究区的土壤种类、土壤渗透性、植被类型等密切相关,其正常的取值在 0~100 之间,具体数值根据研究区的具体情况加以修正。以此为基础,国内外学者借助该模型从不同空间尺度开展城市区域的产流研究^[5],均得到可靠模拟结果。

2.4.2 CN 值的确定 由于与美国用地类型划分的差异,研究对应美国《国家工程手册》,结合漯河 LUCC 和城市总体规划(2012—2030 年)对 CN 系数进行调整。中国土壤数据库中漯河土壤为黄褐土、棕壤和石灰性沙姜黑土,土壤水文曲线 CN 值为 C 类。根据 SCS 模型计算公式,将 CN 系数代入 SCS 水文模型中以求得饱和储水量(S)、直接径流量(Q),具体数值见表 2。

表 2 漯河市土地覆盖/利用(LUCC)SCS 模型 CN 值

土地覆盖类型	描述	土壤水文曲线 CN 值			
		A	B	C	D
透水表面	城市绿地(P_1)	49	69	79	84
	水体(P_2)	0	0	0	0
	农业用地(P_3)	76	85	90	93
不透水表面	未利用土地(P_4)	77	86	91	94
	道路用地(I_1)	98	98	98	98
	建筑用地(I_2)	98	98	98	98
	公共管理用地(I_3)	89	92	94	95
	裸露土地/城市施工场地	77	86	91	94

注:引自 National Engineering Handbook sections 4,7,9 并做一定程度修正。

2.5 子汇水区的划分及排水网络分布

子汇水区是研究雨水径流量的基本单元^[18],根据研究区城市路网分布,划分出 166 个子汇水区,并根据上文数据库资料绘制城市排水管网现状布局,管网铺设总长度为 119.18 km 集中分布于城市中心区域如所示。

3 产流与积水分析

3.1 产流分析

利用 SWMM 模型进行模拟研究^[5],计算总径流量(mm)、径流体积(L $\times 10^6$)、峰值流量(m³/s)和径流系数等相关数据。结果显示:①总体上蒸发损失 0.28 mm,入渗损失 16.18 mm,地表径流 28.524 mm,地表蓄水 40.59 mm、连续性误差为 -0.174%在合理范围。子汇水区中最大径流量为 77.42 mm,最大径流

体积为 1.72×10^8 L;②总径流量与径流系数变化趋势基本一致(图 1a,1d),由城市中心向外逐步递减,与路网密度呈正相关、与汇水区面积呈负相关;径流体积与峰值流量变化趋势基本一致(图 1b,1c),受汇水区面积和城市管网分布的影响较大;③空间自相关分析可以识别地理现象之间潜在的聚集特征,通常用全局自相关系数(Moran's I)来描述,相关性表现为聚集、离散和不相关^[9]。对总径流量,径流系数,径流体积,峰值流量进行空间自相关分析,得出总径流量,径流系数的 Moran's I 系数一致为 0.338($p < 0.001$),径流体积为 0.142($p < 0.001$),峰值流量为 0.101($p < 0.001$),产流格局呈现显著的集聚性,其中总径流量和径流系数集聚性特征表现较强,说明土地利用类型对产流和积水有影响,且产流过程影响大于积水过程。

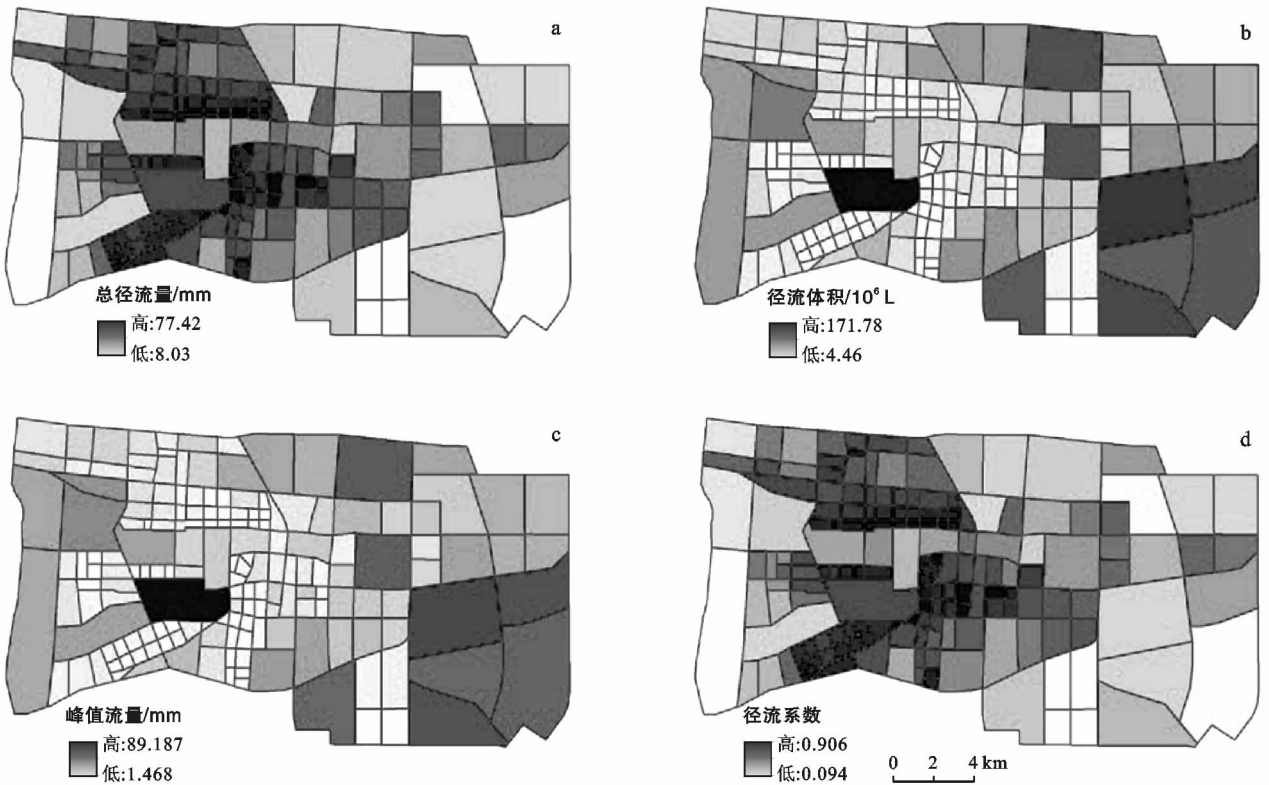


图 1 漯河市产流模拟分析

根据《室外排水设计规范》市区综合径流系数超 0.7,需要采取必要的渗透、调蓄措施^[23]。根据试验结果将研究区划分为 5 个等级^[6](表 3),统计分析可知,低产流风险区子汇水区数量较多、面积最大,主要分布在中心城区外围(图 1d),以农业用地为主,占总面积的 27.11%,其余是城市中心区零散分布的几个大型公园绿地,占总面积的 8.99%,其他的绿地主要分布在中低产流风险区和中产流风险区;而在高产流风险区中不透水景观面积占 82.73%,透水景观面积

仅占该区域 17.27%,其中绿地占该区域 13.78%,占总面积的 0.33%。

3.2 积水区分析

城市产流与积水是两个不同过程,城市产流的主要原因是下垫面的下渗能力/蓄水能力与降雨强度/降雨量的对比,而城市地形决定了城市积水的实际分布。传统汇水区积水深度计算有两种形式,一种是根据汇水区面积和积水量估算积水深度,这种方法精度低,不能自动化计算;另一种方法是采用二分法进行

计算,计算复杂,计算量大,计算速度慢^[19]。本研究采取“基于 DEM 的汇水区降雨积水深度的计算方法”^[20],基于 DSM 进行积水区域计算二维空间积水深度和范围。

表 3 漯河市产流风险区等级划分

等级	径流系数	子汇水区数/个	面积/ km ²
低产流风险区	$\Psi < 0.35$	38	98.89
较低产流风险区	$0.35 \leq \Psi < 0.5$	33	26.69
中产流风险区	$0.5 \leq \Psi < 0.6$	32	18.57
较高产流风险区	$0.6 \leq \Psi < 0.7$	39	10.00
高产流风险区	$0.7 \leq \Psi$	24	3.77
总计		166	157.94

汇水区高程点经过插值形成的三角网格包含高程栅格数据集和网格面积^[21]。汇水区的积水量在汇水区内进行积水分配,积水分配后的水位高程减去相应点地形高程为该点积水深度。由图 2 可知,漯河 20 a 重现期 2 h, 85.43 mm 降雨条件下,积水面积占总面积的 34.94%。通过地形分析,最大模拟积水深度高达 18 m (位于澧河河岸洼地、面积仅 2,691 m²),主要受局部高程差影响;积水斑块由城市中心向城市边缘呈逐级增加,城市中心积水斑块呈分散分布,而外围积水区域呈集中、片状分布;另外,中心城市以外缺乏市政基础设施,也是引起局部积水的重要原因。

对积水面积统计分析(表 4),积水分布与径流量体积分布相似,而与总径流量分布有显著差异。积水

区域格全局自相关 Moran's I 系数为 0.918 ($p < 0.001$),说明积水区格局呈现显著的集聚性,积水区域自相关 Moran's I 系数大于汇水区 RC, RV 说明地形要素对产流的影响小于积水过程。积水区域用地类型以农业用地、城市绿地、道路用地为主,分别占总面积的 36.56%, 21.39%, 21.82%, 都超过积水区域 20% 以上,而这 3 类用地积水分布又呈现出各自的特点,农业用地分布主要在城市中心以外、斑块数量最少、景观整体性最好、景观连接度最大、积水区域分布也相对集中,但由于地势较低,也是受灾影响最严重的区域;城市绿地主要分布于城市中心区域、斑块数量仅次于建筑用地、分布较散、景观连接度低,积水分布也呈现分散分布;城市道路是城市改造最多的区域,积水分布沿城市道路呈不规则带状分布,分布较散但与城市绿地相比,具有明确的方向性。

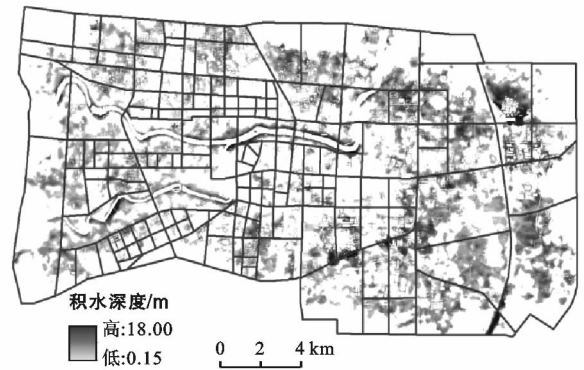


图 2 漯河市积水区域分布模拟

表 4 漯河市不同土地覆盖/利用积水状态分析

土地覆盖/ 利用(LUCC)	斑块面积/ km ²	积水斑块 数量/个	积水面积/ km ²	占积水面积 比例/%	占同类面积 比例/%	占总面积 比例/%
城市绿地(P ₁)	24.83	13 159	11.80	21.39	47.53	7.47
水体(P ₂)	4.53	7 215	0.01	0.02	0.23	0.01
农业用地(P ₃)	45.67	824	20.18	36.56	44.17	12.77
未利用土地(P ₄)	18.64	954	8.92	16.15	47.82	5.64
道路用地(I ₁)	26.80	2 711	12.04	21.82	44.94	7.62
建筑用地(I ₂)	33.24	53 122	0.15	0.27	0.45	0.09
公共管理用地(I ₃)	4.23	1 114	2.09	3.79	49.46	1.33
总计	157.94	79 099	55.19			34.94

4 结论与讨论

4.1 研究区分布和构成

(1) LUCC 呈现层次性特征,城市透水表面比例由城市中心向外逐步增加,与同心圆式的城镇化发展过程一致,但用地性质发生转变,由城市绿地过度为农业用地。

(2) 产流分布随城市扩张呈现由内向外逐渐减少的趋势,不透水面比率高于 70% 的子汇水区有 66 个集中分布在城市中心,说明城镇化导致的城市下垫面 LUCC 是引起城市地表径流增加的重要原因。

(3) 道路、建筑、广场密度由中心城市向外逐渐降低,与产流呈正相关,说明城市不透水面透密度对产流也有影响。

(4) 总径流量,径流系数,径流体积,峰值流量的 Moran's I 系数大于 0,呈显著集聚性,城市地表产流与城市扩张趋势一致,子汇水区之间空间依赖程度高,对径流的产生彼此影响。

4.2 研究区产流状况

(1) 平均产流量随着不透水面积的增加而增大,但径流体积与汇水区域面积有关,Moran's I 系数显示 LUCC 对产流过程影响大于积累过程。

(2) 产流风险区划分,发现各等级产流风险区分布数量平均,但面积差异较大,其中低产流风险区面积最大,说明现状 LUCC 对产流有积极作用,能有效控制一定程度的产流,但模拟周期内未排空径流,说明在 20 a 重现期降雨强度条件下,产流量大于排出量、渗透量和蒸发量之和,会导致子汇水区的积水。

(3) 城市绿地占规划区面积的 28.24%,积水绿地占绿地总面积的 75.74%说明城市绿地对径流吸收、存蓄能力有限,但绿地景观潜力巨大,已被证明通过提高降雨入渗和冠层截流蒸散发等方式能有效的削减降雨径流量^[22],城市绿地与城市灰色基础设施相结合的方法对减少雨洪灾害损失将起到积极作用,同时还可以产生巨大的生态效益。

4.3 研究区积水分析

城市产流与积水是 2 个不同过程,影响因素也有差异。

(1) 积水区域自相关 Moran's I 系数为 0.918($p < 0.001$),呈现显著集聚性,且大于产流分布,说明城市下垫面渗透性改变和城市局部地形改变,两者叠加加剧了城市内涝灾害的程度。

(2) 地形因素导致农业用地大量积水,而初期雨水冲刷,往往伴随大量污染物^[23]。由此可知,城市区域暴雨不仅对城市内部产生影响,同时也严重危及到城市周围农田的生产安全。

(3) 沙澧河河堤抬升,难以兼顾城市防洪与城市雨洪,而明渠变暗渠破坏了城市脉络,也加大了城市市政管网的排水压力。

4.4 研究优势与改进

近年来无人机技术的发展,在大比例尺测量任务(10~100 km²)中表现快速高效、精细准确、作业成本低等特点,并在形图测绘、应急救援、国土监测等方面得到广泛应用^[24]。本次选用无人机技术作为研究的资料获取手段,得到了 0.09 m 高分辨率的正摄影像和 DSM 二维栅格影像,为研究提供了可靠的数据基础;结合 SCS-CN 模型的产流计算和“基于 DEM 的汇水区降雨积水深度的计算”,分析了产流和积水分布的空间关系;计算产流和积水的全局自相关系数

(Moran's I),分析了两者的地理空间分布特征和趋势,更全面、直观地展示了漯河规划区雨洪格局特征。

本研究还处于利用综合方法分析雨洪安全格局的阶段,是分步骤对城市产流和城市积水过程特征进行梳理。研究团队将逐步改进研究方法,构建系统化耦合模型和应用系统并不断提高计算精确度,将研究成果运用到城市雨水资源实际管理中。

[参 考 文 献]

- [1] Zevenbergen, C. Challenges in urban flood management: Travelling across spatial and temporal scales[J]. Journal of Flood Risk Management, 2010,1(2):81-88.
- [2] Dettwiller J. Possible Urban Effects on Maximum Daily Rainfall at Paris, St. Louis and Chicago[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1976, 15(5): 518-519.
- [3] 石勇,许世远,石纯,等. 洪水灾害脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展,2009,28(1):41-46.
- [4] 朱钊. 国际雨洪管理体系发展研究[J]. 城乡建设,2015(11):84-85.
- [5] 胡伟贤,何文华,黄国如,等. 城市雨洪模拟技术研究进展[J]. 水科学进展,2010,21(1):137-144.
- [6] 尹占娥,暴雨杰,殷杰. 基于 GIS 的上海浦东暴雨内涝灾害脆弱性研究[J]. 自然灾害学报,2011,20(2):29-35.
- [7] 汤鹏,王玮,张展,等. 海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(1):15-20.
- [8] 丁锶媛,曾穗平,田健. 基于内涝灾害防控的厦门雨洪安全格局模拟与设计策略研究[J]. 城市建筑,2017(33): 118-122.
- [9] 姚磊,卫伟,于洋,等. 基于 GIS 和 RS 技术的北京市功能区产流风险分析[J]. 地理学报,2015,70(2):308-318.
- [10] 程锦霞,胡燕平,惠付梅,等. 漯河市降水量与降水云系的关系[J]. 气象与环境科学,2007,30(S1):59-60.
- [11] 江清霞,惠付梅,葛战旗,等. 漯河市近 53 a 气候变化特点分析及其应对措施[C]//河南省气象学会,河南省科协学术年会论文集,2011.
- [12] 单铁良,胡燕平,程锦霞,等. 漯河 2010 年 7 月 17 日暴雨总结[C]//河南省气象学会,河南省气象学会 2010 年年会论文集,2010.
- [13] 王倩,张琼华,王晓昌. 国内典型城市降雨径流初期累积特征分析[J]. 中国环境科学,2015,35(6):1719-1725.
- [14] 戴有学,王振华,戴临栋,等. 芝加哥雨型法在短历时暴雨雨型设计中的应用[J]. 干旱气象,2017,35(6):1061-1069.
- [15] 张新荣,刘林萍,方石,等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. 生态环境学报,2014,23(12):2013-2021.

[参 考 文 献]

- [1] 周欣,朱丹丹.国内外设计洪水研究进展与评价[J].黑龙江科技信息,2012,15(5):43-43.
- [2] 来全.三维可视化洪水淹没分析与灾情评估系统的实现[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2011.
- [3] Cui Lijian, Anna V P, Zhang Manyin. Applications of RS, GIS and GPS technologies in research, inventory and management of wetlands in China[J]. Journal of Forestry Research, 2005,16(4):317-322.
- [4] Brian L B, David P L, Qi Jianguo. A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,108(1):111-120.
- [5] 万新宇,王光谦.近 60 a 中国典型洪水灾害与防洪减灾对策[J].人民黄河,2011,33(8):1-4.
- [6] 黄立贤,沈志学.高光谱遥感图像的监督分类[J].地理空间信息,2011,9(5):81-83.
- [7] 陈西亮,张佳华.基于 TM 影像的喀什地区土地利用分类[J].湖北农业科学,2016,55(15):4001-4005.
- [8] 赵春霞,钱乐祥.遥感影像监督分类与非监督分类的比较[J].河南大学学报:自然科学版,2004,34(3):90-93.
- [9] 徐卫星.望江县防洪减灾的非工程措施[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2011,11(4):41-43.
- [10] 王元东.基于 GIS 的洪水淹没灾害评估方法研究[D].广州:中山大学,2007.
- [11] 张妞.干支流洪水遭遇下的黄河宁夏段溃漫堤洪水风险分析[D].天津:天津大学,2015.
- [12] 冉有华,李新,卢玲.基于多源数据融合方法的中国 1 km 土地覆盖分类制图[J].地球科学进展,2009,24(2):192-203.
- [13] 毕学进.望江县新农村建设研究[J].安徽农学通报,2011,17(17):16-18,32.
- [14] 黄巧盟.基于 GIS 数据—模型集成的洪水风险评估[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [15] 王培法,都金康,冯学智. DEM 不确定性影响评价中的填洼分析[J].地理与地理信息科学,2007(1):24-26.
- [16] 金哲,肖旒旒.基于 GIS 的洪水淹没区分析[J].吉林水利,2014(6):30-32,37.
- [17] 中华人民共和国水利部. SL579-2012 中华人民共和国水利行业标准[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [18] 王思懿.基于 GIS 的北部湾经济区洪灾风险评价及风险变化研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [19] 薛丰昌.一种基于 DEM 的汇水区降雨积水深度的计算方法, CN102902893 B[P]. 2015.
- [20] 薛丰昌,黄敏敏,唐步兴,等.三维 GIS 的城市暴雨积涝灾害模拟[J].测绘科学,2017,42(2):53-58.
- [21] Julia Bartens. Transpiration and Root Development of Urban Trees in Structural Soil Stormwater Reservoirs [J]. Environmental Management, 2009, 44(4): 646-657.
- [22] 车伍,张鹏,张伟,等.初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J].中国给水排水,2016,32(6):9-14.
- [23] 马刚. UX5 无人机不同航高的精度分析[J].北京测绘, 2015(3):18-20,37.

(上接第 274 页)

- [16] 周晓敏,薛争光.大区域数字表面模型快速生产关键技术研究[J].测绘技术装备,2016,18(4):26-29.
- [17] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. Soil Research, 1989,27(3):511-523.
- [18] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J].环境科学, 2008,29(6):1495-1501.
- [19] 张成才,黄河,朱祖乐,王金鑫.基于高精度 DEM 的城市道路积水淹没计算方法研究[J].水利水电技术, 2017,48(12):1-6.