

基于耦合 PLUS-SCS 模型的城市用地 内涝风险预测及优化管控

——以湖南省长沙市为例

焦胜^{1,2,3}, 操婷婷¹, 牛彦合¹, 关惠嫦¹

(1.湖南大学 建筑与规划学院, 湖南 长沙 410082; 2.丘陵地区城乡人居环境

科学湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3.湖南省国土空间规划发展研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要: [目的] 预测城市未来土地利用情况及内涝风险强度, 并探讨未来城市内涝风险的优化管控措施及实施效果, 为提升城市内涝防控水平, 优化城市用地布局提供参考依据。[方法] 以湖南省长沙市为例, 借助 PLUS 和 SCS 模型, 预测基准情景下城市用地布局及其内涝风险情况, 将内涝高风险区域作为 PLUS 模型中的限制转化因子, 耦合 PLUS 和 SCS 模型, 模拟内涝管控情景下城市用地布局及其内涝风险情况。通过对比两种情景下的内涝风险差异来验证优化管控措施实施的效益。[结果] 预测基准情景下 2035 年长沙市建设用地上内涝高风险区面积为 96.47 km², 在不减少建设用地面积的前提下, 内涝管控情景下城市建设用地的内涝风险总面积相比基准情景减少了 36.94 km², 其中新增建设用地中的高风险区全部被规避。[结论] 未来城市用地内涝风险呈现出显著增加的趋势, 耦合 PLUS-SCS 模型的优化管控方法能够帮助城市规避内涝风险。

关键词: 内涝风险预测; 风险优化管控; PLUS 模型; SCS 模型; 未来情景模拟; 湖南省长沙市

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2023)05-0195-08 **中图分类号:** F301.2, P333.2, X43

文献参数: 焦胜, 操婷婷, 牛彦合, 等. 基于耦合 PLUS-SCS 模型的城市用地内涝风险预测及优化管控[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 195-202. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.023; Jiao Sheng, Cao Tingting, Niu Yanhe, et al. Risk prediction and optimal control of waterlogging in urban land based on PLUS-SCS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 195-202.

Risk Prediction and Optimal Control of Waterlogging in Urban Land Based on PLUS-SCS Model —A Case Study in Changsha City, Hunan Province

Jiao Sheng^{1,2,3}, Cao Tingting¹, Niu Yanhe¹, Guan Huichang¹

(1. School of Architecture and Planning, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Key Laboratory of Sciences of Urban and Rural Human Settlements in Hilly Areas, Changsha, Hunan 410082,

China; 3. Hunan Provincial Land Spatial Planning and Development Research Center, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: [Objective] The urban land use in the future and corresponding waterlogging risk intensity was predicted, and the optimal control of the waterlogging risk and its implementation effects was explored in order to provide references for improving the prevention and control level of urban waterlogging and optimizing the layout of urban land use. [Methods] The study was conducted in Changsha City, Hunan Province. Urban land use layout and its waterlogging risk under a baseline scenario were predicted using the PLUS and SCS models. High-risk waterlogging areas were used as limiting conversion factors in the PLUS model to simulate the urban land layout and its waterlogging risk under a waterlogging control scenario by coupling the PLUS and SCS models. The implementation of the optimal management and control measures was verified by

收稿日期: 2022-12-14

修回日期: 2023-02-15

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“基于内涝风险影响机制的中部地区超大城市雨洪安全格局研究”(52278059); 湖南省研究生科研创新项目(QL20220109)

第一作者: 焦胜(1973—), 男(汉族), 湖南省长沙市人, 博士, 教授, 主要从事生态城市规划及城乡人居环境可持续发展研究。Email: jiaosheng2008@163.com。

通信作者: 操婷婷(1997—), 女(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 研究方向为城市综合防灾规划及雨洪管理。Email: ctt1030625@163.com。

comparing the waterlogging risk differences under the two scenarios. [Results] The high-risk waterlogging area of construction land was predicted to be 96.47 km² in 2035 under the baseline scenario, and the total waterlogging risk area of the urban construction land under the waterlogging control scenario would be reduced by 36.94 km² compared with the baseline scenario without reducing construction land area. Furthermore, all high-risk areas in the new construction land would be avoided. [Conclusion] The waterlogging risk in urban land will increase significantly in the future. An optimization control method based on the PLUS-SCS model will help cities avoid waterlogging risk.

Keywords: waterlogging risk prediction; optimal control of risk; PLUS model; SCS model; future scenario simulation; Changsha City, Hunan Province

全球气候变暖导致特大暴雨事件频发,城市内涝问题已经成为中国乃至全球可持续发展面临的重大挑战之一^[1-2]。随着城市经济的快速发展,一直以来城市建设呈显著扩张态势,建设用地不断侵占原本作为汇流空间的调蓄用地,是导致建设用地内涝风险增加的重要原因^[3]。针对城市内涝问题,越来越多的学者开始关注和强调源头控制在防洪排涝上所发挥的重要作用^[4],即将雨水进行分解、就地消纳,通过引导超重现期雨水在较低尺度上有序释放,从而避免更大尺度的系统崩溃。在国土空间规划背景下,合理的内涝风险预测和空间管控是破解该问题的有力手段。因此,针对愈发突出的城市内涝问题,探究一种科学合理的识别未来城市用地内涝风险及空间管控方法,是当前国土空间规划编制工作面临的重要课题。

近年来,CLUE-S,FLUS,PLUS等以元胞自动机为基础的衍生模型在土地利用演变模拟方面得到了广泛发展和应用^[5],由于优化了土地转化策略和土地利用斑块演化能力,有研究表明,PLUS预测模型模拟的精度更高且更接近真实的景观格局指标^[6-8]。目前相关研究大多为不同情景下的土地利用模拟^[9-10]或与生态系统服务的耦合分析^[11-12],模型通过驱动因子以及限制因子的选择影响未来用地功能布局,对驱动因子的考虑主要涉及自然、社会经济以及空间距离等方面,影响土地扩张的限制因子多为水域、永久基本农田和生态红线等底线控制区^[12-13],对于自然灾害对未来用地功能布局的影响研究还有待深入。城市建设用地侵占内涝高风险区可能会导致人民生命财产和社会经济的损失,为帮助未来城市规避内涝风险和实现可持续发展,在模拟城市未来用地布局的限制因子设置上有必要考虑内涝风险这一重要因素。另外,对于内涝风险评估及风险管控,目前有很多学者借助水文模型^[14-15]开展内涝风险评估;也有学者提出依据风险评估结果划定风险管控区域^[3,16],国内外开发的水文模型有很多,其中SCS模型因具有诸多优点而得到广泛应用^[17]。但是这些研究多基于历史或现状数据,对未来风险的预测以及

风险管控实施后内涝削减效果的对比验证研究还有待丰富。针对以上问题,耦合土地预测模型和风险评估模型能弥补以上不足。借助模型预测城市未来各类用地的需求总量,探讨不同情景下的用地空间布局及其内涝风险,有利于了解风险管控手段对于内涝风险控制的作用,为合理布局城市用地提供参考依据。

综上所述,内涝风险是影响未来城市土地利用布局的关键因素,通过土地预测模型和风险评估模型的耦合,构建一套实现未来用地内涝风险预测和优化管控的方法,是实现城市用地内涝灾害风险降低的重要途径,也是提升当前国土空间防涝韧性的关键探索。本文以长沙市为例,耦合PLUS和SCS模型并借助PLUS模型中的限制转化功能(conversion constraint)来实现未来用地内涝风险的预测和空间管控。设置基准和内涝管控两种情景,分别对比两种情景下的未来用地内涝风险的差异,提出城市应对极端降雨的空间优化管控手段并验证其对于内涝防治的价值和意义,推进现有研究在内涝风险视角下未来用地模拟方面的进展,为科学编制国土空间规划提供依据,并服务于城镇开发边界的划定以及土地利用布局的优化调整。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

长沙市位于湖南省东部偏北,湘江下游,市辖天心区、芙蓉区、岳麓区、雨花区、开福区、望城区及浏阳市、宁乡市、长沙县,共6区2市1县,总面积11 816.06 km²。属于典型的亚热带季风气候,雨热同期且降水充沛;土壤属南方红壤地带,土壤渗透率低;地形多为平原盆地和丘陵,部分地势低洼。长沙市历史洪涝灾害频繁。新中国成立以来至2017年,长沙市除15 a基本无灾外,共有53 a发生了洪涝灾害,其中2017年的特大暴雨为历年同期强度最大,历时最长的降雨,长沙市平均累计降雨量达到435 mm,各

区县(市)均不同程度受灾,全市受灾人口达 1.45×10^6 人,直接经济总损失约 1.24×10^8 元^[18]。因此,选取长沙市作为研究区代表性较强。

1.2 数据来源及处理

PLUS 模型模拟未来土地利用时使用的数据包括土地利用数据、行政区划以及各项驱动因子和限制因子数据,综合考虑自然和社会经济因素对土地利用

的影响,选取 DEM、坡度、坡向、人口密度、GDP 等 10 项驱动因子数据,以及生态红线、永久基本农田、大型河流 3 项限制因子数据,其中考虑到数据的精度及可获取性,采用夜间灯光数据代替 GDP 数据;SCS 模型模拟内涝风险时使用的数据包括土地利用数据、DEM 和土壤类型数据,数据来源及处理方式见表 1。

表 1 研究数据类型及其来源
Table 1 Types and sources of research data

数据类型	数据名称	数据来源
土地利用	2010,2020 年土地利用数据	中国科学院资源环境科学与数据中心
行政区划	长沙市区级行政边界	
自然驱动因子	DEM	地理空间数据云
	坡度	基于 DEM 提取
	坡向	
社会经济驱动因子	人口密度	World pop 网站
	GDP	美国国家海洋大气管理局 NOAA 下属的 NCEI 国家环境信息中心
空间距离驱动因子	距铁路、国道、省道距离	全国地理信息资源目录服务系统、高德地图 POI 数据、中国科学院资源环境科学与数据中心等获取,再通过 ArcGIS 距离分析得到
	距政府距离	
	距河流距离	
限制因子数据	生态红线	《湖南省生态保护研究》
	永久基本农田	《长沙市城市总体规划(2017—2035)》
	大型河流	《长沙市城市总体规划(2017—2035)》,结合手动筛选
土壤	土壤类型数据	中国科学院资源环境科学与数据中心

1.3 研究方法

本文的研究方法主要有 3 部分,即基于 PLUS 模型的未来土地利用模拟、基于 SCS 模型的未

来用地风险预测、耦合 PLUS-SCS 模型的未来自来用地内涝风险优化管控及风险验证。具体的技术路线见图 1。

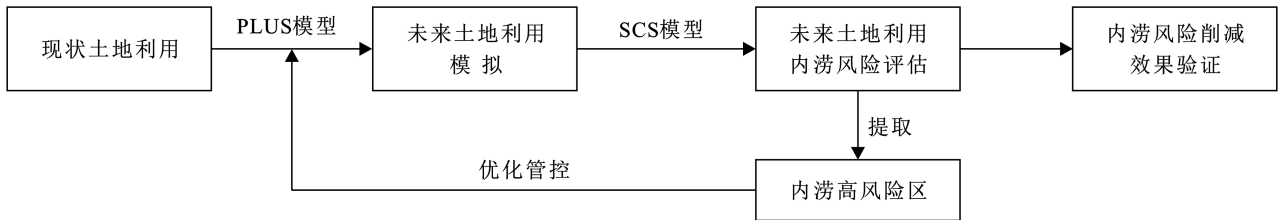


图 1 内涝风险优化管控技术路线

Fig.1 Technical roadmap of study on risk prediction and optimal control of water logging

1.3.1 基于 PLUS 模型的未来土地利用模拟 斑块生成土地利用变化模拟模型(patch-generating land use simulation model, PLUS 模型)是以元胞自动机为基础构建的新模型^[19]。模型包括基于土地扩张分析策略的转化规则挖掘框架(LEAS)和基于多类型随机斑块种子机制的 CA 模型(CARS)两个模块。首先提取两期土地利用数据中各类用地的扩张部分并采样,获取各类用地发展概率,然后通过随机斑块生成、

阈值递减机制以及过渡转移矩阵等方式实现斑块的自动生成,最后得到模拟的用地情况^[20]。

首先通过模拟 2018 年及 2020 年土地利用情况并计算 kappa 系数来验证模型模拟的精度,以 2010 年土地利用数据为基准,选取自然、社会经济和空间距离 3 种驱动因子共 10 项,包括 DEM、坡度、坡向、人口密度、GDP、距铁路的距离、距国道的距离、距省道的距离、距政府的距离以及距河流的距离,输入

PLUS 模型得到研究区各种土地利用类型的适宜性概率。再依据目前规划政策要求,选择生态红线、永久基本农田和大型河流作为限制因子,设定成本矩阵、邻域权重之后得到研究区 2018 年及 2020 年土地利用模拟图,在 PLUS 模型中的精度验证模块输入模拟的与真实的土地利用数据,设定 10% 的随机采样水平,输出得到 2018 年模拟结果的 kappa 系数为 0.873,总体精度达到 93.0%;2020 年的 kappa 系数为 0.896,总体精度达到 94.3%,这说明模型模拟精度较高,可以用于 2035 年的土地利用模拟。

在此基础上,使用马尔科夫链预测得到 2035 年的土地利用需求,不改变模型参数,以 2020 年的土地利用数据为基准,运用 PLUS 模型模拟得到 2035 年土地利用情况。该情景为自然发展模式,为了对比验证内涝优化管控措施实施的效益,将该情景作为基准情景,后续在对内涝风险优化管控时再设置内涝管控情景并与之对比分析。

1.3.2 基于 SCS 模型的未来用地内涝风险预测

SCS 模型由美国农业部水土保持局研制^[21],它能够客观反映不同的土地利用方式对降雨径流和淹没情况的影响^[22]。由于本研究建立在极端降雨情景的前提下,该情况下排水管网满蓄且河流易出现顶托现象。例如 2017 年长沙市遭遇突破历史极值的长历时降雨,由于湘江干流上游来水比重大,并受到下游洞庭湖高水位顶托,使得湘江长沙段洪水难以排出^[18]。因此该降雨情景可以假设为零外排,可以使用 SCS 模型计算径流量,研究采用城市面临极端降雨时产生的淹没深度来表征内涝风险强度。

径流模型的关键是确定下垫面的 CN 值,参照美国工程手册提供的参考值得到研究区 CN 值的初始值,有学者结合实测值对长沙部分地区的 CN 值进行了校验和率定^[23-24],因此结合相关文献中邻近区域的研究成果确定研究区最终的 CN 值(表 2)。根据城市内涝防治标准可知,长沙市内涝防治设计重现期应达到 50 a,故本研究设计的降雨情景为 50 a 一遇。基于研究区 2020 年土地利用和土壤类型数据,将土地使用情况分为耕地、林地、草地、水域、裸地、建设用地 6 类,将研究区一共划分为 437 个子汇水区,使用 SCS 模型结合 ArcGIS 软件空间分析模块计算得到各汇水区的淹没深度。

在对研究区划分内涝风险等级时,从人或物在洪水中的受力物理机制出发^[25],考虑人群失稳风险进行分级^[26-27],通过查阅文献可知,在淹没水深为 0.15 m 时,建筑物的底层会进水,机动车也可能会面临熄火的情况,被定义为轻微积水;在水深为 0.4 m 时,除了

建筑物和交通设施,行人失稳跌倒风险急剧加大,因而定义为较重洪涝^[25,27-28],因此设定淹没水深 0~0.15 m 为低风险,0.15~0.4 m 为中风险,0.4 m 以上为高风险,从而将研究区的内涝风险强度划分为高、中、低 3 级。

表 2 研究区 CN 值

Table 2 Values of curve number (CN) value in study area

土地利用类型	A	B	C	D
耕地	62	71	78	81
林地	30	58	71	78
草地	39	61	74	80
水域	100	100	100	100
建设用地	77	85	90	92
裸地	77	86	91	94

注:由于土壤的质地与疏密程度会影响土壤对雨水的下渗率,因此所对应的 CN 值不同,根据蓄水能力将土壤分为 A、B、C、D 4 类。其中 A 类土壤为潜在径流量很低、渗透性很强的壤土; B 类土壤为渗透性较强的壤土; C 类土壤为中等渗透性壤土; D 类土壤为透水性很弱的壤土。

1.3.3 耦合 PLUS-SCS 模型的未来用地内涝风险优化

管控及风险验证 为了验证内涝管控措施实施的效益,本文设置基准和内涝管控两种情景并进行对比分析,通过上文得到基准情景下未来城市用地的内涝风险情况,基准情景延续 2010—2020 年的土地利用变化趋势,内涝管控情景则借助 PLUS 模型中的限制转化功能来实现对内涝高风险区的管控。通过耦合 PLUS 模型和 SCS 模型,添加 SCS 模型所得的未来用地内涝高风险区作为 PLUS 模型中的限制转化区域,模拟对内涝高风险区进行管控情况下的未来土地利用布局情况。内涝管控情景的具体实现方式为:将前文得到的内涝高风险区提取出来,与生态红线、永久基本农田、大型河流一起,共同作为限制转化区域输入 PLUS 模型中的 CARS 模块,其他参数不变,不改变土地的数量需求,而是改变土地在空间上的分配方式,模拟得到内涝管控情景下 2035 年的土地利用分布情况。

对模拟得到的内涝管控情景下 2035 年土地利用结果开展内涝风险评估,并与基准情景下的内涝风险进行对比。考虑到 DEM 数据、土壤数据等短期内难以发生较大变化,因此可以保持 SCS 模型中除土地利用数据以外的参数不变,将评估结果划分为高中低 3 级,对比研究区全域以及建设用地的风险大小,提取出 2035 年建设用地的变化范围,分析两种情景下新增建设用地的风险差异,从而可以得到实施内涝风险优化管控措施的实际效益大小并验证其可行性。

2 结果与分析

2.1 未来土地利用模拟结果

未来土地利用模拟以 2010, 2020 年土地利用数据为基础(图 2), 2010 年长沙市用地类型以林地、耕地和建设用地为主, 耕地、林地、草地、水域、裸地、建设用地 6 类用地的面积分别为 3 460.96, 7 174.87, 138.01, 255.41, 3.87, 782.94 km², 分别占市域总面积约 29.29%, 60.72%, 1.17%, 2.16%, 0.33%, 6.63%。2020 年相比于 2010 年, 耕地、林地、草地、裸地的面积均在减少, 其中耕地和林地面积的降幅最大, 分别为 4.3% 和 1.5%, 建设用地出现大幅度增长, 相比于 2010 年增长了 38.6%, 说明近 10 a 城市在显著扩张, 主要向湘江东西两侧发展, 其中岳麓区东北部、望城区东南部以及长沙县中部扩张最为明显。

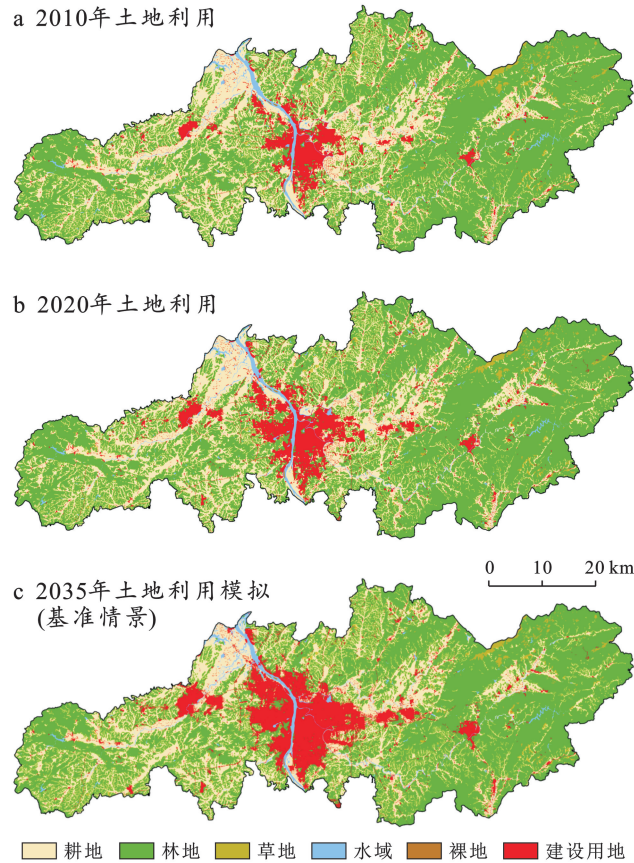


图 2 长沙市土地利用模拟结果

Fig.2 Simulation results of land use in Changsha City

从模拟得到的基准情景下 2035 年土地利用情况可以看出(图 2), 相比于现状(2020 年), 耕地、林地、草地、裸地的面积均在减少, 其中耕地和林地面积的降幅最大, 分别为 220.75, 208.46 km², 草地和裸地也分别减少了 8.80, 2.45 km²; 建设用地和水域的面积有所增加, 其中建设用地面积增量最大, 增长了

426.58 km², 水域面积增长了 13.79 km²。建设用地沿湘江两侧向外扩张明显, 河东发展潜力大于河西, 河东主要向开福区东北部、雨花区东南部、天心区南部以及长沙县中部扩张, 河西发展受西侧地势影响, 以岳麓区和望城区向西部缓慢扩张为主。对 2020—2035 年的土地利用转移矩阵进行分析发现, 建设用地在扩张过程中对周围的耕地、林地和水域侵占最多, 分别侵占了 284.44, 136.03, 9.35 km², 说明城市发展过程中有大量的生态调蓄用地被建设用地侵占。

2.2 未来城市用地内涝风险预测结果

运用 SCS 模型对 2035 年基准情景下的用地内涝风险进行分析, 得到研究区的淹没深度并将其分为高、中、低 3 级, 并与现状用地内涝风险(2020 年)进行对比(表 3, 图 3)。结果表明, 2035 年的研究区总淹没面积为 689.16 km², 与 2020 年相比增加了 4.65 km²。由于建设用地面积大量增加并侵占了自然调蓄用地, 且基准情景尚未考虑避开内涝风险区, 因此该情景下 2035 年建设用地的风险呈现大幅增加, 由 2020 年的 63.47 km² 增加至 107.39 km², 增加了 43.92 km²。在 50 a 一遇的降雨情景下, 研究区 2035 年的淹没范围中高风险、中风险、低风险面积为 628.69, 35.50, 24.97 km², 分别占研究区总面积的 5.32%, 0.30% 和 0.21%(表 3), 高风险区大多集中于湘江、浏阳河、捞刀河等市内大型河流水系及其周边, 同时也有 96.47 km² 的建设用地处于高风险区之中, 其中新增建设用地中的高风险区面积为 41.73 km², 主要原因为城市开发侵占了部分地势较低的区域, 这些区域本身风险较高, 导致新增建设用地中存在较多高风险区。例如长沙市有一种特殊的土地资源“围垸”, 即以堤防隔开外水, 封闭围堤形成的一个个保护圈状的低洼区, 通过空间叠加对比发现, 大多数的围垸均位于风险区内, 围垸地势较低, 具有较强的调蓄削峰的功能, 然而近年来随着城镇化的进程, 多数围垸被开发, 使得城市防洪排涝能力降低, 被开发区域也面临较大风险, 这说明了在城市开发之前开展风险预测以及实行空间管控的重要性。

表 3 长沙市现状和未来基准情景用地风险面积对比

Table 3 Comparison of land use risk area between current and future baseline scenarios in Changsha City km²

风险等级	2020 年(现状)面积		2035 年基准情景面积		
	全域	建设用地	全域	建设用地	新增建设用地
高风险	621.72	56.78	628.69	96.47	41.73
中风险	41.55	5.29	35.50	5.91	2.61
低风险	21.24	1.40	24.97	5.01	2.27
风险总量	684.51	63.47	689.16	107.39	46.61

2.3 未来用地内涝风险优化管控及对比较证

通过增加未来高风险区作为限制转化区域模拟得到内涝管控情景下的 2035 年土地利用情况(图 4)。该情景与基准情景各类用地数量相同,即建设用地的增量相同,且建设用地的扩张趋势与基准情景基本一致,但是建设用地对其他各类用地的侵占面积有所变

化。该情景下水域和林地被建设用地侵占的面积有所减少,分别从 136.03 km^2 下降到 127.01 km^2 ,从 9.35 km^2 下降到 8.74 km^2 ,在所有用地类型中林地具有较强的下渗能力,水域具有较强的调蓄能力,减少建设用地对这些用地的侵占能减缓城市防涝韧性的降低。

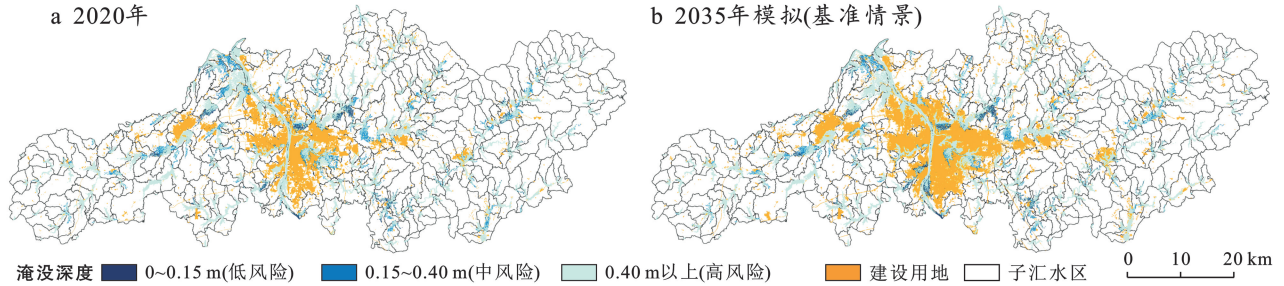


图 3 长沙市内涝淹没风险空间分布

Fig.3 Spatial distribution of waterlogging risk in Changsha City

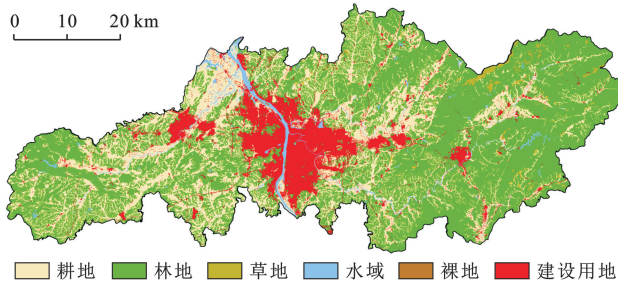


图 4 2035 年长沙市土地利用模拟结果(内涝管控情景)

Fig.4 Land use simulation results in 2035 of Changsha City (waterlogging control scenario)

对内涝管控情景下模拟的 2035 年土地利用结果开展内涝风险预测,并与基准情景下的内涝风险进行对比分析(图 3,图 5)。结果(表 4)表明,两种情景下全域的风险总面积大致相同,但是内涝管控情景下建设用地的内涝风险总面积显著减少,由 107.39 km^2 降低至 70.45 km^2 ,其中高风险面积减少了 39.34% 。与 2020 年的建设用地风险大小相比,即使是在内涝管控情景下 2035 年的内涝风险也仍会有少量增加(6.98 km^2)。这是由于大量不透水地面取代渗透性较强的下垫面,使得在同样降雨条件下土壤下渗量减少、总径流量增加,导致淹没面积增加。以上结论表明,目前采用现状高风险区作为风险管控范围不够全面,因为内涝危险性会随建设用地的增加而增加,因此,依据未来的内涝风险预测结果制定内涝防控措施将更加科学,在有条件的情况下,城市规划编制时应当对未来土地利用规划情景开展内涝风险预测,再根据预测结果的反馈校正规划方案,将能够更科学合理地引导城市规避风险。

将 2035 年的新增建设用地提取出来,比较两种土地利用情景下的内涝风险大小(图 6,表 4)。在基准情景下,新增建设用地内涝风险总面积为 46.61 km^2 ,其中高风险区面积共 41.73 km^2 ,最高淹没深度达到了 14.95 m ,高风险区域主要集中于开福区、望城区、雨花区、长沙县的西南部以及宁乡县的东北部。内涝管控情景下新增建设用地内涝风险总面积仅为 5.19 km^2 ,其中高风险区已被全部规避,最高淹没深度仅为 0.39 m ,大大降低了建成区内涝风险的峰值,该情景下仅有开福区以及长沙县西南部有少数中风险区,开福区、岳麓区、天心区南部以及周围县城等少数区域存在低风险区。这表明在不减少建设用地面积的前提下,采取优化管控手段能够显著降低未来城市用地的内涝风险。

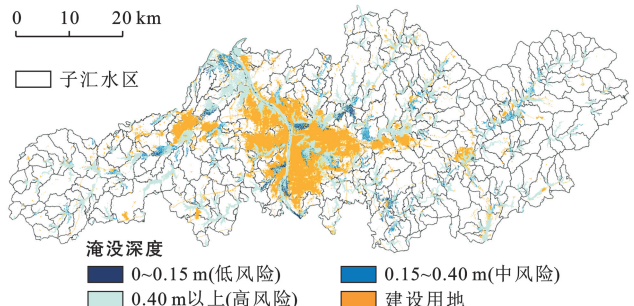


图 5 2035 年长沙市内涝淹没风险空间分布(内涝管控情景)

Fig.5 Spatial distribution of waterlogging risk of Changsha City in 2035 (waterlogging control scenario)

根据以上对研究区现状和未来不同土地利用情景的内涝风险评估结果,城市规划建设之前应考虑内

涝风险对土地利用布局的影响,在国土空间规划编制过程中补充对内涝风险的考量,坚持底线思维,强化空间安全管控,积极开展内涝风险评估并划分风险区^[29]。一方面,针对高风险区要严格管控,并将其与

资源环境承载力评价、土地适宜性评价的结果相协调,指导“三区三线”的划定,科学布局城市建设空间;另一方面,针对中低风险区,应合理分配用地功能,通过布局低影响设施等方式提升城市排涝能力。

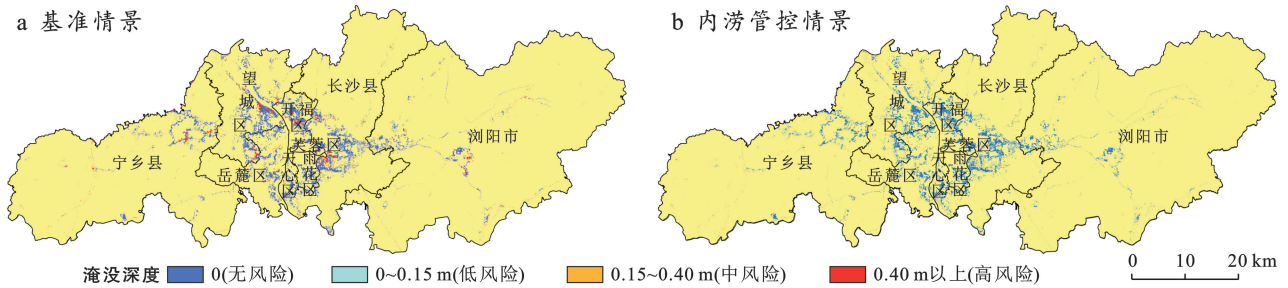


图 6 两种情景下 2035 年长沙市新增建设用地内涝风险分布

Fig.6 Flood risk distribution of new construction land of Changsha City in 2035 under two scenarios

表 4 2035 年长沙市两种情景下用地风险面积对比

Table 4 Comparison of land use risk areas under different scenarios of Changsha City in 2035

km²

风险类型	2035 年基准情景			2035 年内涝管控情景		
	全域	建设用地	新增建设用地	全域	建设用地	新增建设用地
高风险	628.69	96.47	41.73	629.01	58.52	0
中风险	35.50	5.91	2.61	35.16	6.37	2.66
低风险	24.97	5.01	2.27	25.22	5.56	2.53
风险总量	689.16	107.39	46.61	689.40	70.45	5.19

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文从内涝风险防控的角度优化未来城市用地布局,并降低未来城市用地风险。但是仍然存在一些不足,首先,风险评估模型模拟的精度有待提升,本研究探讨的是极端降雨的情景,因此建立在河水顶托造成零外排的理想条件下,而且,受数据获取的限制,采用数据要求较低的 SCS 模型进行内涝风险评估,忽略了内涝的水平流动性;采用研究区的淹没深度来表征内涝危险性强度,没有考虑淹没时间等因素。其次,尚未考虑土地开发的经济效益,由于直接提取出的内涝高风险区斑块破碎化严重,不利于后续土地的整体开发,因此,后续若能进一步探讨结合雨水的汇流途径来实现管控区域的整合,将能更加科学地划定内涝风险管控范围,更加合理地指导国土空间规划方案的制定。

3.2 结论

本文耦合 PLUS 和 SCS 模型,通过对比分析基准和內涝管控两种情景下长沙市未来用地的内涝风险强度,验证实施内涝风险优化管控手段对于降低城市内涝风险的实际效果,从而优化未来城市用地布局。

(1) 在基准情景下,2035 年长沙市内涝风险总面积与 2020 年相比增加了 4.65 km²,建设用地内涝风险面积更是呈现大幅增加(43.92 km²),其中新增建设用地中的高风险区占 10.9%,说明如果在城市建设之前缺乏对内涝风险的预测和管控,将会导致建设用地存在大量潜在风险。

(2) 内涝管控情景与基准情景相比,在同样的建设用地需求下,2035 年长沙市建设用地的内涝风险面积减少了 36.94 km²,其中新增建设用地规避了全部的内涝高风险区,说明耦合 PLUS 和 SCS 模型的内涝风险优化管控手段能够显著降低城市内涝风险。

[参 考 文 献]

[1] Quan Ruisong. Impact of future land use change on pluvial flood risk based on scenario simulation: a case study in Shanghai, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021,14(11):943.

[2] Willner S N, Levermann A, Zhao Fang, et al. Adaptation required to preserve future high-end river flood risk at present levels [J]. Science Advances, 2018, 4(1): eaao1914.

[3] 焦胜,韩静艳,周敏,等.基于雨洪安全格局的城市低影响开发模式研究[J].地理研究,2018,37(9):1704-1713.

[4] 吴江华,刘康,张红娟,等.西安市主城区景观格局演变对

- 地表径流的影响[J].水土保持通报,2021,41(4):83-92.
- [5] 赵胤程,覃盟琳,庞雅月,等.基于 FLUS-InVEST 模型的北部湾城市群生态空间碳汇演变模拟及驱动因素研究[J].水土保持通报,2022,42(3):345-355.
- [6] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021,85:101569.
- [7] Xie Ling, Wang Hongwei, Liu Suhong. The ecosystem service values simulation and driving force analysis based on land use/land cover: a case study in inland rivers in arid areas of the Aksu River Basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,138:108828.
- [8] 蒋小芳,段翰晨,廖杰,等.基于 PLUS-SD 耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J].干旱区研究,2022,39(4):1246-1258.
- [9] 谢凌凌,许进龙,臧俊梅,等.基于 Markov-FLUS 模型的广西土地利用变化模拟预测[J].水土保持研究,2022,29(2):249-254.
- [10] 陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.
- [11] Gao Lina, Tao Fei, Liu Runrui, et al. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: a case study of Nanjing [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,85:104055.
- [12] 王子尧,黄楚梨,李惊,等.耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2022,42(14):5789-5798.
- [13] 伍丹,朱康文,张晟,等.基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析[J].三峡生态环境监测,2022,7(2):85-96.
- [14] 黄国如,黄维,张灵敏,等.基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):1-6.
- [15] Cai Zhiming, Li Daming, Deng Lianbing. Risk evaluation of urban rainwater system waterlogging based on neural network and dynamic hydraulic model [J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020,39(4):5661-5671.
- [16] 张青萍,李晓策,陈逸帆,等.海绵城市背景下的城市雨洪景观安全格局研究[J].现代城市研究,2016,31(7):6-11.
- [17] 马丽君,王传涛,王雯军,等.基于 SCS-CN 模型的郑州市区域产流特征研究[J].水土保持通报,2022,42(4):203-209.
- [18] 周杨军.长沙市 2017 年特大洪涝灾害评估研究报告[R].中国城市规划设计研究院,长江勘测规划设计研究有限责任公司,长沙市规划勘测设计研究院.湖南长沙,2018.
- [19] 胡丰,张艳,郭宇,等.基于 PLUS 和 InVEST 模型的渭河流域土地利用与生境质量时空变化及预测[J].干旱区地理,2022,45(4):1125-1136.
- [20] 李琛,高彬娉,吴映梅,等.基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022,39(1):84-94.
- [21] Maidment D R. *Handbook of Hydrology*[M]. New York, USA: Mcgraw-Hill Book Company, 1992.
- [22] 徐康,吴绍华,陈东湘,等.基于水文效应的城市增长边界的确定:以镇江新民洲为例[J].地理科学,2013,33(8):979-985.
- [23] 韩静艳.基于雨洪安全格局的城市低影响开发模式研究[D].湖南长沙:湖南大学,2018.
- [24] 杨娜.基于雨洪安全的长沙市苏托垅小流域地区土地适宜性评价研究[D].湖南长沙:湖南大学,2015.
- [25] 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.
- [26] 宋英华,张哲,方丹辉.城市洪涝下承灾体暴露性及行人失稳风险分析[J].中国安全科学学报,2020,30(10):105-111.
- [27] 张洪云,王永强,王大胜等.基于降雨情景模拟的长江中下游流域淹没风险研究[J].长江科学院院报,2023,40(11):71-78.
- [28] 焦胜,戴妍娇,贺颖鑫.绿色雨水基础设施规划方法及应用[J].规划师,2017,33(12):49-55.
- [29] 吴宇彤,彭翀,舒建峰.国土空间安全语境下的洪涝适应经验及规划响应[J].西部人居环境学刊,2022,37(1):15-21.