

## 土地利用变化对城区产汇流影响研究

王斌, 严小林, 鲍振鑫, 王婕, 吴厚发, 王泽君

### Study on the impact of land use change on runoff production and confluence in urban areas

WANG Bin, YAN Xiaolin, BAO Zhenxin, WANG Jie, WU Houfa, WANG Zejun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240523005>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 气候变化和人类活动对流域径流及其年内分配的影响

The effects of climate change and human actions on runoff and its seasonal variation

水利水运工程学报. 2024(2): 10 <https://doi.org/10.12170/20231001001>

#### 城市更新视角下面面向内涝防治的地表空间布局优化

Optimal design of surface layout for alleviating urban flood in urban renewal

水利水运工程学报. 2023(3): 19 <https://doi.org/10.12170/20220111003>

#### 基于CMIP6的气候变化对鄱阳湖流域径流影响研究

Study on the impact of climate change by CMIP6 on the rainfall-runoff process of Poyang Lake Basin

水利水运工程学报. 2023(4): 71 <https://doi.org/10.12170/20220224002>

#### 变化环境下的径流演变与影响研究: 回顾与展望

Studies on runoff evolution mechanism under changing environment: a state-of-the-art review

水利水运工程学报. 2022(1): 9 <https://doi.org/10.12170/20210105008>

#### 2000—2020年黄河源区水源涵养能力模拟与分析

Modeling and analysis of water conservation capacity in the source region of the Yellow River from 2000 to 2020

水利水运工程学报. 2023(6): 46 <https://doi.org/10.12170/20230509002>

#### 气候变化对清江未来径流及隔河岩电站发电的影响

Impact of future climate change scenarios on long-term runoff change and Geheyan Hydropower Station power generation in Qingjiang River

水利水运工程学报. 2023(4): 42 <https://doi.org/10.12170/20220106004>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240523005

王斌, 严小林, 鲍振鑫, 等. 土地利用变化对城区产汇流影响研究 [J]. 水利水运工程学报. (WANG Bin, YAN Xiaolin, BAO Zhenxin, et al. Study on the impact of land use change on runoff production and confluence in urban areas[J]. Hydro-Science and Engineering(in Chinese))

# 土地利用变化对城区产汇流影响研究

王斌<sup>1</sup>, 严小林<sup>2</sup>, 鲍振鑫<sup>1,3,4</sup>, 王婕<sup>1</sup>, 吴厚发<sup>5</sup>, 王泽君<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 中国人民解放军 31153 部队, 江苏 南京 210016; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4. 南昌工程学院, (学院?) 江西 南昌 330099; 5. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 城市土地利用变化改变了产汇流关系, 进而影响城市洪涝灾害的形成和发展。以杭州城西为研究对象, 利用 Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) 模型预测未来土地利用情景, 构建 Storm Water Management Model (SWMM) 模型, 分析区域产汇流变化情况。结果表明: (1) PLUS 模型可以预测研究区域未来土地利用情景, 预计到 2030 年, 建设用地相较 1980 年增加 248.43%, 耕地相较 1980 年减少 54.59%; (2) 构建的 SWMM 模型能较好地模拟研究区的产汇流过程, 误差小于 10%; (3) 1980—2030 年区域总体不透水率增加了 27.91%, 50 年一遇和 100 年一遇两种情景下的洪峰流量增加了 281.4 和 301.5 m<sup>3</sup>/s, 洪水总量增加了 696 万和 751 万 m<sup>3</sup>; (4) SWMM 模型模拟的洪峰流量、洪水总量与区域建设用地占比之间呈较好的线性关系。研究结果可加深城市化对产汇流过程的影响机理研究, 对城市洪涝灾害防治提供科技支撑。

**关键词:** 城市化; 产汇流; 土地利用变化; PLUS 模型; SWMM 模型

**中图分类号:** TV121.7

**文献标志码:** A

**文章编号:**

城市化是全世界各国发展的普遍趋势, 据联合国发布的《2022 年世界城市报告》<sup>[1]</sup>, 到 2021 年底, 全球人口中的 56% 居住在城市, 而到 2050 年预计将提高至 68%。中国是城市化速率较快的亚洲国家, 城市化率从 1978 年的 17.9% 提高到 2024 年的 66.2%。受季风气候影响, 中国暴雨洪水集中, 且在城市化过程中, 原有的农田、绿地等透水面逐渐被城市硬化地面所取代, 在同等降雨条件下, 更容易引发城市洪涝安全问题<sup>[2]</sup>。据不完全统计, 自 2000 年以来, 中国 70% 的城市发生过严重的内涝灾害<sup>[3-6]</sup>。近年来, 典型城市洪涝如 2021 年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害淹没主城区面积高达 37%<sup>[7-8]</sup>; 2023 年海河“23·7”极端暴雨事件中, 北京门头沟区遭遇山洪内涝叠加灾害<sup>[9]</sup>。城市内涝呈淹没范围广、积水深度大、滞水时间长的特点, 已然成为中国城市安全的突出问题, 严重影响了城市的正常运行和发展<sup>[10-11]</sup>。研究城市化对产汇流过程的影响机理具有重要的科学意义, 可为城市洪涝灾害防治提供科技支撑。

有关城市化对产汇流过程的影响机理的研究始于 20 世纪 60 年代, 欧美等发达国家因城市规模不断扩大, 逐步关注因城市化所引发的水问题<sup>[12]</sup>。计算机科学的迅速发展、地理信息系统的深入应用为城市水文水动力学模型的研究提供了技术支撑, 对城市区域产汇流变化的研究从最开始依赖于试验观测或者历史资料分析等技术手段<sup>[13]</sup>, 逐渐发展为利用城市水文水动力学模型进行数值模拟的方法<sup>[14-16]</sup>。关于城市化对产汇流的影响, 基本一致的结论是城市化快速发展导致城市下垫面发生改变, 对城市区域产汇流过程产生了巨大影响, 增大了城市洪涝灾害发生的概率<sup>[11]</sup>。即城市化使城市下垫面不透水特性增强, 不透水地表面积

收稿日期: 2024-05-23

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006); 南京水利科学研究院研究生学位论文发展基金(Yy524004)

作者简介: 王斌(1999—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事城市洪涝灾害防治研究(删除第二个基金?)。

E-mail: Wb19990510@163.com 通信作者: 鲍振鑫(E-mail: zxbao@nhri.cn)

增大,导致城市流域的径流量和洪峰流量增大,且径流系数与不透水面积呈正相关性<sup>[17-20]</sup>。以往学者利用各种模型与方法,针对不同历史时期的土地利用情况,分析了历史土地利用对城市水文效应的影响,而针对未来土地利用情景对城市水文效应影响的研究还比较少。本文以杭州市城西为例,利用长序列的土地利用数据,在分析历史土地利用情况的基础上,采用 Patch-Generating Land Use Simulation(PLUS)模型预测2030年土地利用情景;结合管网水系高程等数据,构建研究区域的 Storm Water Management Model(SWMM)模型;采用芝加哥雨型依据杭州市设计暴雨公式设计不同重现期的降雨情景,结合土地利用类型变化趋势和特征,分析城市下垫面变化下研究区产汇流的响应规律,以为杭州城西防洪减灾管理提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

研究区位于浙江省杭州市城西(图1),涉及3个行政区(余杭区、西湖区、拱墅区),研究范围东至京杭大运河,南至山区分水岭,西至东苕溪,北至云城板块、拱墅区边界线,在水系划分上属于运西片区,坐标为北纬 $30^{\circ}9'42''\sim 30^{\circ}21'27''$ ,东经 $119^{\circ}50'38''\sim 120^{\circ}9'25''$ ,总面积约为 $322.52\text{ km}^2$ 。研究区属季风气候区,梅汛期降水集中,易受台风和局地性暴雨共同影响;地势低洼,除西南部分山区地势较高外,其余总体以平原地貌为主,中部有面积宽广的天然湿地,高程为 $4.75\sim 521.97\text{ m}$ ,易受山洪和内涝共同作用;区域内河湖水系众多,分布有余杭塘河、东苕溪、京杭大运河等,河道流向基本为向北和向东;位于杭州城西板块,城市化水平高,下垫面硬化程度大。

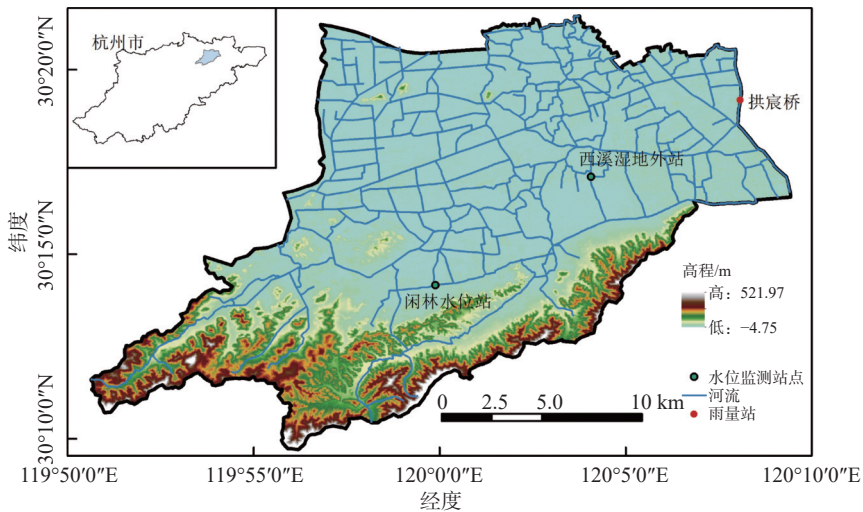


图1 研究区域概况及地理位置

Fig. 1 Overview and geographic location of the study area

本文采用的数据包括 PLUS 模型使用的数据,以及 SWMM 模型构建和率定使用的数据。土地利用数据为杭州市 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年、2020 年土地利用数据,分辨率为  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ ,来源于中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(<https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIID=54>),按中科院土地利用分类体系分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地等 6 类。土壤类型、年平均温度、年平均降水、人口、地区生产总值来源于资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。杭州市  $30\text{ m}\times 30\text{ m}$  数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)来源于哥白尼数字高程模型过去去除森林和建筑处理后得到的数字高程模型产品 FABDEM(Forest And Buildings removed Copernicus DEM)(<https://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7>),与其他全球 DEM 相比,该数据集能更好地解析精细尺度的泛洪区

特征<sup>[21]</sup>。路网数据来源于 OSM(OpenStreetMap)数据集 (<https://www.openstreetmap.org/>)。杭州市水系数据来源于 2015 年杭州市河道管理总站和杭州市勘测设计院编制的杭州市九城区水系图,河长、河道断面尺寸、河道中心线等资料由杭州市市区河道监管中心提供;管网数据根据物探获得。2013 年 10 月 6 日“菲特”台风及 2007 年 10 月 6 日“罗莎”台风期间的小时尺度降雨数据,来源于运河拱宸桥雨量站;2013 年 10 月 6 日“菲特”台风期间小时尺度实测水位数据和 2007 年 10 月 6 日“罗莎”台风期间日尺度最高水位监测数据,均来源于闲林水位站和西溪湿地外站。

## 2 研究方法

### 2.1 PLUS 模型

现有的土地利用预测模型研究主要侧重于改进技术建模程序,较少关注土地利用底层非线性关系的探索,同时在斑块尺度预测方面也有所不足。近期提出的 PLUS 模型在继承元胞自动机(Cellular Automata, CA)模型优点的基础上,更深入地揭示了土地利用与覆盖变化的内在逻辑,并优化了斑块生长模拟,从而提高了土地利用空间分布变化的预测精度。该模型能够基于栅格数据对斑块尺度的土地利用变化进行预测,并提出了土地扩张分析策略(Land Expansion Analysis Strategy, LEAS)的规则挖掘框架,以及基于多类型随机种子(CA - based on multiple random seeds, CARS)的元胞自动机模型。通过这些方法,可以识别土地扩张和景观变化的驱动因素,从而提高仿真精度,并使景观演变过程更为逼真<sup>[22-23]</sup>。

LEAS 模块主要分析土地利用从初始到最终状态的变化过程,运用随机森林算法分析不同土地利用类型变化原因和增长之间的关系,并计算各种土地利用变化的概率。计算公式为:

$$P_{i,k}^d(x) = \frac{\sum_{n=1}^M I[h_n(x) = d]}{M} \quad (1)$$

式中:  $P_{i,k}^d(x)$  为  $d=0$  或 1 情况下  $i$  空间单元中  $k$  类型土地利用增长的概率,  $d=1$  表示其他地类向  $k$  类土地转化,  $d=0$  表示不含  $k$  类土地转化;  $M$  为决策树的总数;  $I[]$  为决策树的指示函数;  $x$  为驱动因子构成的向量;  $h_n(x)$  为决策树为  $n$  时得到的各土地利用类型。

CARS 模块主要模拟地理现象空间格局的变化,并通过各种情景进行分析。该模块计算各种土地利用类型之间变化的概率,从而预测和模拟土地类型的分布情况。土地利用各类型之间转变的概率为:

$$P_{i,k}^{d=1,t} = P_{i,k}^{d=1} \Omega_{i,k}^t D_k^t \quad (2)$$

$$\Omega_{i,k}^t = \frac{C_{i,k}^{t-1}}{n \times n - 1} \times w_k \quad (3)$$

$$D_k^t = \begin{cases} D_k^{t-1} (|G_k^{t-1}| \leq |G_k^{t-2}|) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} (0 > G_k^{t-2} > G_k^{t-1}) \\ D_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-1}}{G_k^{t-2}} (G_k^{t-1} > G_k^{t-2} > 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{i,k}^{d=1,t}$  为第  $i$  斑块在  $t$  时刻转变为  $k$  地类的综合概率;  $P_{i,k}^{d=1}$  为第  $i$  斑块转变为  $k$  地类的适宜性概率;  $\Omega_{i,k}^t$  为  $k$  地类在下一个领域内的覆盖比例;  $D_k^t$  为未来需求对  $k$  地类的影响。  $C_{i,k}^{t-1}$  为最新一轮迭代中第  $n \times n$  窗口内第  $k$  种地类在最后一次迭代中所占用的网格单元总数;  $w_k$  为土地利用类型之间的权重,默认值为 1;  $G_k^{t-1}$  和  $G_k^{t-2}$  为第  $k$  种地类在前一次  $t-1$  和前两次  $t-2$  迭代中的需求差异(式子可否连着横写,删除乘号?)。

采用 Kappa 系数  $K$  检验模拟结果与现实数据的一致程度, 计算式为:

$$K = \frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \quad (5)$$

式中:  $P_0$  为正确模拟栅格比例;  $P_c$  为随机状况下的期望正确模拟栅格比例, 本文土地利用类型数据为 6 类, 因此  $P_c = 1/6$ ;  $P_p$  为理想状态下正确模拟栅格比例, 因此  $P_p = 1$ 。Kappa 系数  $K$  取值范围为  $[-1, 1]$ , 一般认为, 当 Kappa 系数  $K$  高于 0.75 时, 模型模拟的准确度高、有效性强<sup>[24]</sup>。

## 2.2 SWMM 模型

SWMM 模型在城市排水、防洪规划等方面具有广泛应用并取得了较好效果<sup>[25]</sup>。选用 SWMM 模型模拟研究区域产汇流情况, SWMM 模型的雨洪模拟计算主要分为以下 3 个部分。

在产流阶段, SWMM 模型可选择 Horton、Green-Ampt、SCS 等 3 种下渗计算方法, 根据不同下渗计算方法的原理并结合研究区域下垫面的特点, 本文选择适用于城市区域且参数较为简化的 Horton 下渗计算方法来计算地表产流, Horton 下渗方程为:

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c)\exp(-kt) \quad (6)$$

式中:  $f_p$  为土壤下渗率(mm/s);  $f_c$  为稳定下渗率(mm/s);  $f_0$  为初始下渗率(mm/s);  $k$  为下渗率衰减常数;  $t$  为时间(s)。

在地表汇流阶段, SWMM 模型先把该过程抽象为非线性水库, 再联立非线性水库水量平衡方程及曼宁公式进行求解<sup>[26]</sup>。非线性水库水量平衡方程可表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = i - e - f - q \quad (7)$$

式中:  $h$  为地表积水深度(mm);  $t$  为时间(s);  $i$  为降水强度(mm/s);  $e$  为地表蒸发率(mm/s);  $f$  为下渗率(mm/s);  $q$  为产生的地表径流率(mm/s)。

使用曼宁公式的前提假设是将每个子汇水区形成的地表径流看成流经一个矩形通道的均匀流, 计算公式为:

$$Q_s = \frac{1.49}{n} S^{1/2} R^{1/2} A \quad (8)$$

式中:  $Q_s$  为地表径流的流量( $m^3/s$ );  $n$  为地表糙率;  $S$  为子汇水区的平均坡度;  $R$  为水力半径(m);  $A$  为非线性水库的过水断面面积( $m^2$ )。

在进行河道及管道汇流计算时, SWMM 可以选择恒定流法、运动波法及动力波法等汇流计算方法。动力波法通过求解完整的圣维南方程组来模拟压力流、下游水位顶托、管道蓄水、进出口损失等实际复杂情况, 从而获得更加准确的模拟结果。因此, 本文采用动力波法进行汇流计算。动力波法的控制方程为完全圣维南方程组:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f = 0 \quad (10)$$

式中:  $Q$  为河道或管道流量( $m^3/s$ );  $t$  为时间(s);  $A$  为过水断面面积( $m^2$ );  $g$  为重力加速度( $m/s^2$ );  $H$  为管道或河道水深(m);  $S_f$  为摩阻比降。

SWMM 模型参数分为几何参数和率定参数, 几何参数包括子汇水区面积、平均地面坡度、特征宽度、不透水面积比例等, 通过在 GIS 软件中计算得到; 率定参数包括低洼蓄量、初始下渗能力、稳定下渗率、地

面糙率、曼宁系数等,根据参数物理意义或推荐经验值先设置初值,再通过实测资料进行率定<sup>[27-28]</sup>。为验证所构建模型的模拟精度,本文采用纳什效率系数 $R_{ns}$ 和最高水位相对误差 $R_{rmp}$ 来评估。

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 土地利用变化分析

杭州城西区域 1980—2020 年土地利用类型如图 2 所示。由图 2 可知,杭州城西区域主要土地利用类型为耕地、林地和建设用地。在研究区域城市化推进的背景下,发生显著改变的地类主要为分布在平原区域的耕地与建设用地,可将城市化的进程大致划分为 3 个阶段。1980—1990 年,各地类面积占比几乎保持不变,城市化进程缓慢;1990—2000 年,建设用地增加 1 010 ha,平均增速为 100 ha/a,耕地面积减少 1 294 ha,城市化进程开始加速;2000—2020 年,建设用地迅速增加,面积增加约 6 784 ha,占比增加 21.25%,耕地面积减少约 6 562 ha,占比减少 20.35%,城市化进程高速发展。林地主要位于南部山区,面积在 1980—1990 年保持平稳,经历 1990—2000 年的增加之后逐渐减少。草地主要位于平原地区,面积变化幅度不大。水域面积在 2000 年前有增加趋势,在 2000 年后逐渐减少。未利用地面积基本保持不变。

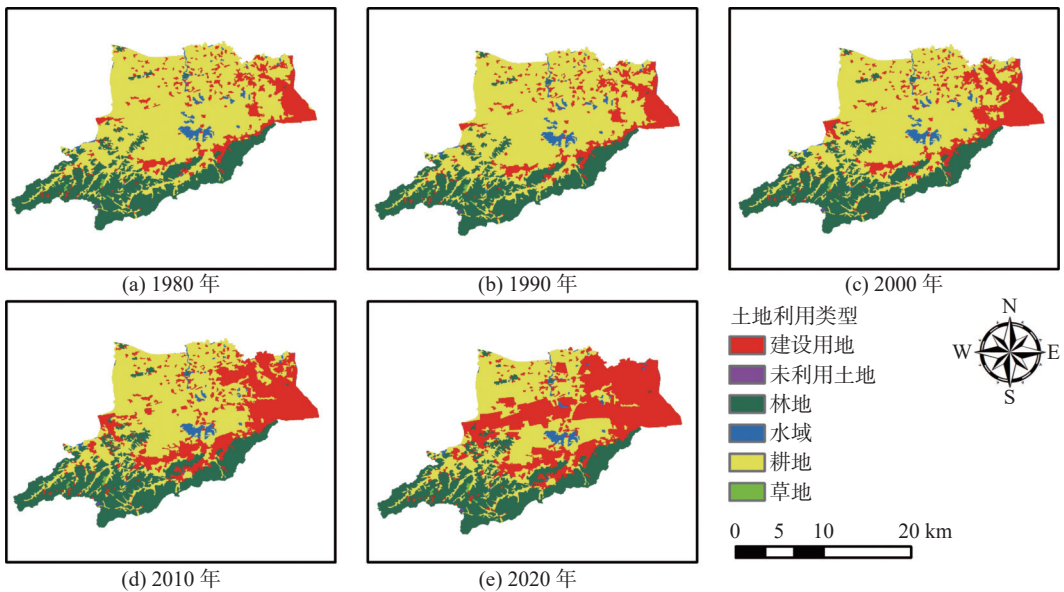


图 2 研究区域各时期土地利用类型

Fig. 2 Land use types in the study area at different time periods

选用 PLUS 模型作为土地利用预测模型,将 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年土地利用数据为基础数据,并选用高程、坡度、坡向、土壤类型、年平均温度、年平均降水、人口、地区生产总值、距主干道距离、距次干道距离、距高速路距离、距快速路距离、距内部路距离和距水系距离共 14 种驱动因子,将 2020 年土地利用情景作为模拟精度验证的情景,并对 2030 年土地利用情景进行预测,模拟预测结果如图 3 所示。计算得 2020 年土地利用场景  $rmKappa$  系数为 0.85,认为模拟精度较高,可以用于该区域得土地利用状况模拟。采用线性发展情景,借助 Markov 链推求 2030 年各地类的需求数量作为 PLUS 模型中的用地需求参数,预测得到 2030 年土地利用数据。根据 1980—2030 年 6 期土地利用情况,可以确定各土地利用类型面积及占比情况(表 1)。模拟 2030 年土地利用情景下,相较于 1980 年土地利用情景,耕地面积减少约 10 487 ha,占比减少 32.51%,建设用地增加约 10 521 ha,占比增加 32.63%。

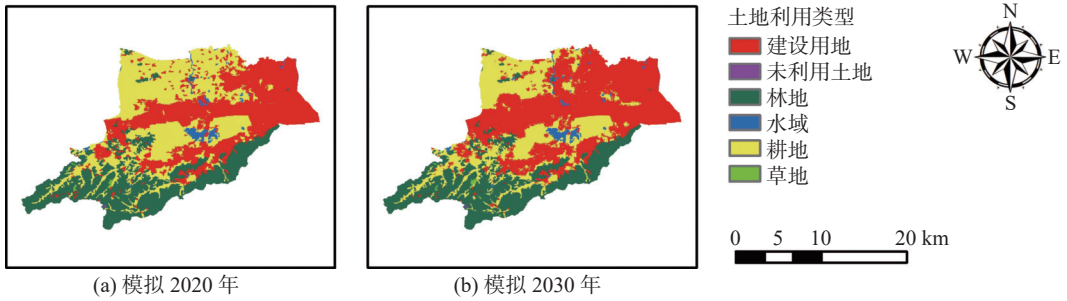


图3 2020年与2030年土地利用类型预测  
Fig. 3 Predicted land use types for 2020 and 2030

表1 各土地利用类型面积及占比  
Tab. 1 Area and proportion of different land use types

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1980	19 210/59.56	8 061/24.99	59/0.18	678/2.10	4 235/13.13	8/0.03
1990	19 135/59.33	8 080/25.05	58/0.18	681/2.11	4 289/13.30	8/0.03
2000	17 915/55.55	8 353/25.90	58/0.18	688/2.13	5 229/16.21	8/0.03
2010	15 003/46.52	8 244/25.56	59/0.18	560/1.74	8 378/25.98	8/0.03
2020	11 353/35.20	8 205/25.44	64/0.20	538/1.67	12 083/37.46	8/0.03
2030	8 723/27.05	8 155/25.29	60/0.19	548/1.70	14 756/45.75	8/0.02

注:表中“/”前后数值分别为面积(ha)及其占比(%)。

### 3.2 产汇流模型率定

本文对研究区的管网水系道路等数据进行了数字化处理并进行概化,概化处理包括人工排水系统概化、天然水系概化及汇水区概化等3个部分。根据实际排水管网数据及集水井分布对研究区管网进行简化;天然河道通过断面数据概化为梯形明渠。在道路交叉处及道路起始点设置节点,并且在与河道相连的排水管网排口处设置节点,使区域内的河道与雨水管网形成统一的系统。在划分子汇水区时,先基于研究区的节点分布,利用GIS的创建泰森多边形工具对研究区域进行粗略划分,再考虑研究区域坡度、地表建筑信息及管网河道流向的影响,对一部分子汇水区进行修正。研究区域概化得到子汇水区1 780个,节点1 783个,管网和河道共计2 894段,最终的概化结果如图4所示。模型外部入流流量边界条件包括研究区域东部京杭运河和老城区产流入流、研究区域西部的东苕溪及导流沿岸的分洪节制闸入流流量,以及研究区域南部西湖排水入流,根据实测资料进行设置。模型下游水位边界条件采用实测水位变化过程。

根据近年来资料统计,挑选研究区域实际发生的较大且资料较为完整的洪水进行率定和验证。2013年“菲特”台风期间,从2013年10月6日4时开始至2013年10月8日13时,拱宸桥雨量站测得累计57 h降雨量343.0 mm,闲林水位站最高水位达4.45 m,西溪湿地外站最高水位3.96 m。2007年“罗莎”台风期间,从2007年10月7日4时开始至2007年10月8日1时,拱宸桥雨量站测得累计45 h降雨量267.5 mm,闲林水位站最高水位4.30 m,西溪湿地外站最高水位达3.50 m。采用2013年“菲特”台风期间闲林水位站及西溪湿地外站的实测水位对模型进行率定,模拟开始时间为2013年10月4日0时,模拟结束时间为2013年10月10日0时,水位率定结果见图5。闲林水位站模拟水位与实测水位计算的纳什效率系数为0.96,西溪湿地外站模拟水位与实测水位计算的纳什效率系数为0.94。经率定后,模型部分参数取值如表2所示。



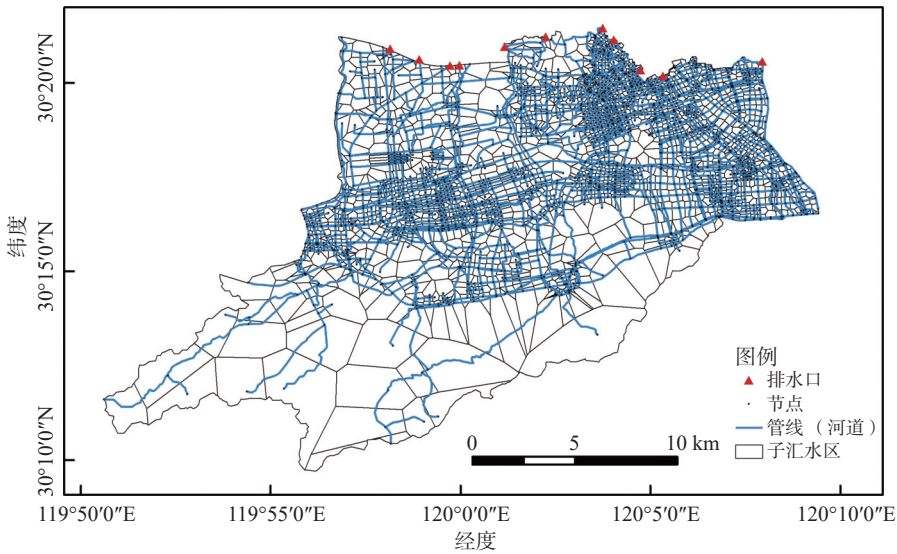


图 4 研究区域 SWMM 模型概化示意

Fig. 4 Schematic of the SWMM model for the study area

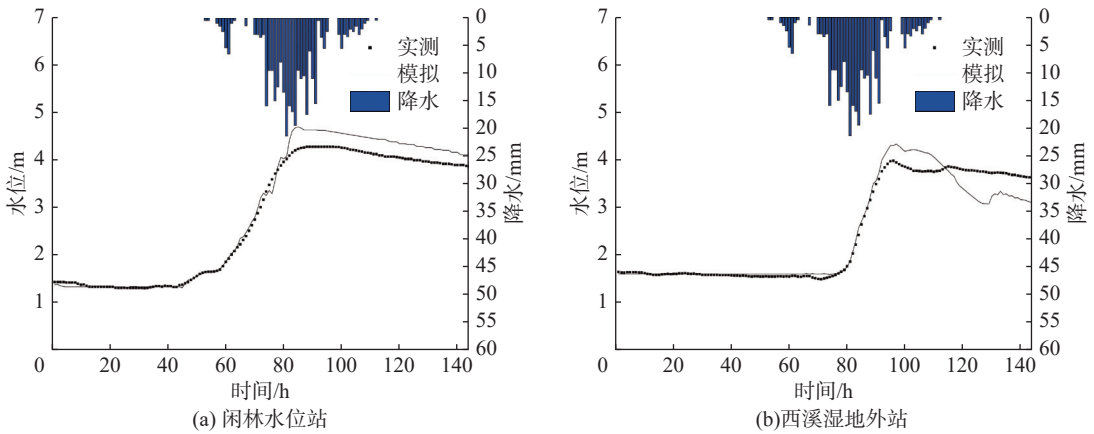


图 5 2013 年“菲特”台风期间水位率定

Fig. 5 Water level calibration during typhoon "Fitow" in 2013

表 2 SWMM 模型部分参数取值

Tab. 2 Parameter values for the SWMM model

参数名称	参数代号	单位	参数取值	参数名称	参数代号	单位	参数取值
不透水区曼宁系数	N-Imperv		0.015	最小下渗率	MinRate	mm/h	80
透水区曼宁系数	N-Perv		0.05	入渗衰减常数	Decay	h <sup>-1</sup>	4
不透水区洼地蓄水量	Dstore-Imperv	mm	7	干燥时间	DryTime	d	7
透水区洼地蓄水量	Dstore-perv	mm	8	管道曼宁糙率系数	RoughnessP		0.013
最大下渗率	MaxRate	mm/h	100	河道曼宁糙率系数	RoughnessR		0.04

2013 年 10 月 6 日“菲特”台风期间闲林水位站实测最高洪水位为 4.30 m, 模拟最高洪水位 4.70 m, 西溪湿地外站实测最高洪水位为 3.96 m, 模拟最高洪水位为 4.33 m; 2007 年 10 月 6 日“罗莎”台风期间闲林水位站实测最高洪水位为 4.45 m, 模拟最高洪水位 4.81 m, 西溪湿地外站实测最高洪水位为 3.50 m, 模拟最高洪水位为 3.83 m。计算得闲林水位站率定期、验证期的最高水位相对误差分别为 9.30% 和 8.09%; 西溪湿地外站率定期、验证期的最高水位相对误差分别为 9.62% 和 9.14%。这表明模拟精度较高, 可采用所构

建的模型进行后续研究。

### 3.3 土地利用变化对产汇流影响

为分析城市下垫面变化对研究区域产汇流的影响,设置了多组降雨情景作为模型输入条件。岑国平等<sup>[29]</sup>的研究表明,在中国城市地区进行暴雨模拟时采用芝加哥雨型效果较好,并且一般能够满足模拟精度的要求,因此本文采用此雨型作为设计雨型。设计暴雨强度公式采用浙江省《暴雨强度计算标准》(DB 33/T1191—2020)中的杭州市暴雨强度公式:

$$i = \frac{8.716 \times (1 + 0.958 \lg P)}{(\tau + 5.861)^{0.674}} \quad (11)$$

式中:  $i$  为设计暴雨强度(mm/min);  $P$  为设计重现期(a);  $\tau$  为降雨历时(min)。

本文取设计暴雨重现期分别为 50 年和 100 年,降雨历时为 120 min,结合研究区域历史降雨资料,雨峰系数取值 0.315<sup>[30]</sup>,时间步长选取 5 min,模拟不同时期土地利用格局下的产汇流情况,将模拟整个区域所有排水口出流的洪峰流量、洪水总量作为评价指标,并分析这些指标与不透水率之间的关系。

降雨重现期为 50 年和 100 年情景下,1980—2030 年 6 期不同土地利用格局时 24 h 内区域洪水的洪峰流量见图 6。由图 6 可知,1980—2030 年,降雨重现期为 50 年一遇情景下,洪峰流量分别为 249.8、250.9、280.0、362.3、476.7 和 531.2 m<sup>3</sup>/s,洪水总量分别为 1 125 万、1 128 万、1 191 万、1 394 万、1 640 万和 1 821 万 m<sup>3</sup>;降雨重现期为 100 年一遇情景下,洪峰流量分别为 314.5、315.6、347.0、435.4、568.3 和 616.0 m<sup>3</sup>/s,洪水总量分别为 1 332 万、1 335 万、1 403 万、1 623 万、1 888 万和 2 083 万 m<sup>3</sup>。1980—2030 年,土地利用类型中两种关键要素面积发生显著改变,建设用地从 4 235 ha 增加到 14 756 ha,耕地面积从 19 210 ha 减小到 8 723 ha,区域总体不透水率随之发生改变,1980—2030 年区域总体不透水率分别为 25.41%、25.54%、27.71%、34.71%、43.27%、53.32%。洪峰流量、洪水总量随总体不透水率的增加呈增大趋势。

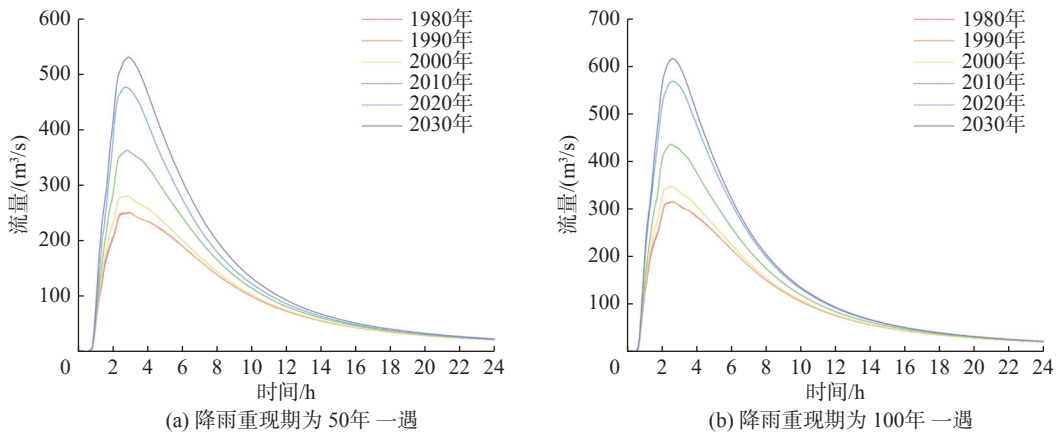


图 6 不同降雨重现期下流量与时间关系曲线

Fig. 6 Flow-time relationship curves under different rainfall recurrence intervals

城市化对重现期较短降雨情景下的产汇流影响更加显著。结合图 6(a)和图 6(b),对比 2030 年和 1980 年土地利用格局的降雨模拟结果可知,在 50 年一遇和 100 年一遇降雨情景下,洪峰流量、洪水总量两个指标对降雨变化的响应差异明显,2030 年洪峰流量在 50 年一遇情景和 100 年一遇情景下分别增大为 1980 年的 2.13 倍和 1.96 倍,2030 年洪水总量在 50 年一遇情景和 100 年一遇情景下分别增大为 1980 年的 1.62 倍和 1.56 倍。在重现期较短的降雨情景下,总体降雨量较小,不透水率对产汇流的影响较大,而在重现期较长的降雨情景下,总体降雨量大,不透水率的影响被削弱,致使高不透水率对产流的放大效果变弱;在重现期较短的降雨情景下,区域总产流量小,透水下垫面水分保有对洪峰的影响较强,而在重现期较长的降雨情景下,区域总产流量大,透水下垫面水分保有对洪峰的影响减弱。

为进一步探究区域产汇流过程变化中,洪峰流量、洪水总量与区域建设用地占比之间的定量关系,绘制

了3种指标与建设用地占比间的相关性(图7)。由图7可知,模拟的洪峰流量、洪水总量与区域建设用地占比间呈较好的线性关系,50年一遇情景下,区域建设用地占比增大1%,洪峰流量增大8.8 m<sup>3</sup>/s,洪水总量增大21万 m<sup>3</sup>;100年一遇情景下,区域建设用地占比增大1%,洪峰流量增大9.6 m<sup>3</sup>/s,洪水总量增大23万 m<sup>3</sup>。

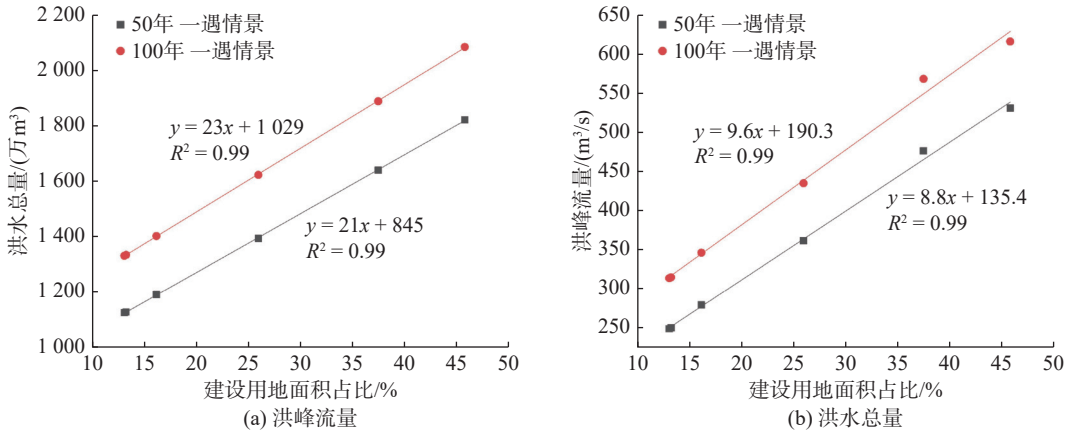


图7 不同重现期下洪水指标与建设用地占比相关性(图(a)中纵坐标标题名是洪水总量,小图名则是洪峰流量,二者不一致,图(b)亦是如此,请核对后修改???)

Fig. 7 Correlation between flood indicators and built-up land proportion under different recurrence intervals

总之,随着城市化推进的进程,在耕地转为建设用地的转化作用影响下,区域不透水率呈增大趋势,区域糙率呈减小趋势,并且区域透水下垫面对水分的保有能力不断减弱,洪峰流量、洪水总量随之增大,洪涝灾害易发。因此,建议采取修建排水隧洞等工程措施进行排涝,减小河道排涝压力,降低洪涝灾害风险。

## 4 结 语

本文以杭州城西区域作为研究对象,使用土地利用预测模型模拟了2030年的土地利用情景,构建了研究区域产汇流模型,分析了不同下垫面和不同降雨情景组合下的区域产汇流变化,主要结论如下:

(1) PLUS模型可以较好地预测研究区域未来土地利用情景,预计到2030年,建设用地将从1980年的4 235 ha增加到14 756 ha,耕地将从1980年的19 210 ha减小到8 723 ha。

(2) SWMM模型模拟结果显示洪峰流量、洪水总量随总体不透水率的增加呈增加趋势。从1980到2030年区域总体不透水率增加了27.91%,50年一遇和100年一遇两种情景下的洪峰流量增加了281.4和301.5 m<sup>3</sup>/s,洪水总量增加了696万和751万 m<sup>3</sup>。且城市化对重现期较短降雨情景下的产汇流影响更加显著。

(3) 模拟的洪峰流量、洪水总量与区域建设用地占比之间呈较好的线性关系,50年一遇情景下,建设用地占比增大1%,洪峰流量增大8.8 m<sup>3</sup>/s,洪水总量增大21万 m<sup>3</sup>;100年一遇情景下,建设用地占比增大1%,洪峰流量增大9.6 m<sup>3</sup>/s,洪水总量增大23万 m<sup>3</sup>。

研究揭示了区域城市化背景下土地利用变化对产汇流关系的影响,对区域洪涝灾害防治具有一定的指导意义。在进行未来土地利用预测时,本文仅考虑了区域线性发展的情景,忽视了区域发展政策和限制等的影响,会导致预测结果与实际情况不符。未来研究将基于本文不足之处进行改进提高,综合考虑研究区域发展方向,提高预测精度。

## 参 考 文 献:

- [1] OGINGA MARTINS J, SHARIFI A. World cities report 2022[M]. New York: United Nations, 2022.  
 [2] 徐卫红,李娜,王艳艳,等.基于城市洪涝仿真模型的天津中心城区内涝特征分析[J].水利水电技术(中英文),2022,

- 53(6): 20-33. (XU Weihong, LI Na, WANG Yanyan, et al. Urban flood-waterlogging simulation model-based analysis on waterlogging characteristics of central urban area of Tianjin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(6): 20-33. (in Chinese))
- [3] 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. (XU Zongxue, CHEN Hao, REN Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese))
- [4] 李娜, 张念强, 丁志雄. 我国城市内涝问题分析与对策建议[J]. *中国防汛抗旱*, 2017, 27(5): 77-79, 85. (LI Na, ZHANG Nianqiang, DING Zhixiong. Analysis and countermeasures for urban pluvial flood in China[J]. *China Flood & Drought Management*, 2017, 27(5): 77-79, 85. (in Chinese))
- [5] 陈明发, 马星, 赵耀龙, 等. 城市更新视角下面面向内涝防治的地表空间布局优化[J]. *水利水电工程学报*, 2023(3): 19-28. (CHEN Mingfa, MA Xing, ZHAO Yaolong, et al. Optimal design of surface layout for alleviating urban flood in urban renewal[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2023(3): 19-28. (in Chinese))
- [6] 张金良, 罗秋实, 王冰洁, 等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1): 6-15. (ZHANG Jinliang, LUO Qiushi, WANG Bingjie, et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1): 6-15. (in Chinese))
- [7] 张建云, 舒章康, 王鸿杰, 等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. *地理学报*, 2023, 78(7): 1618-1626. (ZHANG Jianyun, SHU Zhangkang, WANG Hongjie, et al. A discussion on several hydrological issues of “7·20” rainstorm and flood in Zhengzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(7): 1618-1626. (in Chinese))
- [8] 冯峰, 喻谦花, 罗福生, 等. 开封市7.20特大暴雨城市内涝风险评估[J]. *水利水电工程学报*, 2022(4): 11-21. (FENG Feng, YU Qianhua, LUO Fusheng, et al. Urban waterlogging risk assessment of 7.20 heavy rainfall in Kaifeng City[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(4): 11-21. (in Chinese))
- [9] 刘家宏, 梅超, 王佳, 等. 北京市门头沟流域“23·7”特大暴雨洪水过程分析[J]. *中国防汛抗旱*, 2023, 33(9): 50-55. (LIU Jiahong, MEI Chao, WANG Jia, et al. Flood survey of “23·7” heavy rain in Mentougou Watershed of Beijing[J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(9): 50-55. (in Chinese))
- [10] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: Case study for Liangshui River basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese))
- [11] EPPS T H, HATHAWAY J M. Using spatially-identified effective impervious area to target green infrastructure retrofits: a modeling study in Knoxville, TN[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 442-453.
- [12] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: Hydrological response to urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- [13] MCPHERSON M. Research on urban hydrology: State-of-the-art report from France, Federal Republic of Germany, India, Netherlands, Norway, Poland, Sweden[M]. Paris: UNESCO Press, 1978.
- [14] ZOPPOU C. Review of urban storm water models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3): 195-231.
- [15] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese))
- [16] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. *水利学报*, 2021, 52(4): 381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: Principle, models and prospects[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(4): 381-392. (in Chinese))
- [17] BRUN S E, BAND L E. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2000, 24(1): 5-22.
- [18] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. *水利水电工程学报*, 2012(1): 1-4. (ZHANG Jianyun. The vital problems for the urbanization and urban hydrology today[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(1): 1-4. (in Chinese))

- [19] 巨鑫慧,高肖,李伟峰,等.京津冀城市群土地利用变化对地表径流的影响[J].生态学报,2020,40(4):1413-1423. (JU Xinhui, GAO Xiao, LI Weifeng, et al. Effects of land use change on surface runoff in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1413-1423. (in Chinese))
- [20] 陈佩琪,王兆礼,曾照洋,等.城市化对流域水文过程的影响模拟与预测研究[J].水力发电学报,2020,39(9):67-77. (CHEN Peiqi, WANG Zhaoli, ZENG Zhaoyang, et al. Assessing influence of future urbanization on hydrological process in typical river basin[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(9): 67-77. (in Chinese))
- [21] HAWKER L, UHE P, PAULO L, et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(2): 024016.
- [22] LIANG X, GUAN Q F, 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.
- [23] LIANG X, LIU X P, LI D, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(11): 2294-2316.
- [24] 邓华,邵景安,王金亮,等.多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J].地理学报,2016,71(11):1979-1997. (DENG Hua, SHAO Jing'an, WANG Jinliang, et al. Land use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE-S model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1979-1997. (in Chinese))
- [25] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015(4):1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015(4): 1-5. (in Chinese))
- [26] DANDOULAKI M, LAZOGLOU M, PANGAS N, et al. Disaster risk management and spatial planning: evidence from the fire-stricken area of Mati, Greece[J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9776.
- [27] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(5): 33-42. (in Chinese))
- [28] 陈晓燕,张娜,吴芳芳,等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水,2013,29(4):4-7. (CHEN Xiaoyan, ZHANG Na, WU Fangfang, et al. Stormwater management model (SWMM): principles, parameters and applications[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 4-7. (in Chinese))
- [29] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展,1998,9(1):41-46. (CEN Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng. Research on rainfall pattern of urban design storm[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(1): 41-46. (in Chinese))
- [30] 刘樱,杨明,徐集云. 杭州市城市暴雨雨型分析研究[J]. 科技通报,2021,37(4):15-22. (LIU Ying, YANG Ming, XU Jiyun. Analysis and study of rainstorm pattern in Hangzhou[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2021, 37(4): 15-22. (in Chinese))

## Study on the impact of land use change on runoff production and confluence in urban areas

WANG Bin<sup>1</sup>, YAN Xiaolin<sup>2</sup>, BAO Zhenxin<sup>1,3,4</sup>, WANG Jie<sup>1</sup>, WU Houfa<sup>5</sup>, WANG Zejun<sup>1</sup>

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *Unit 31110 of Chinese People's Liberation Army, Nanjing 210016, China*; 3. *Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 4. *Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China*; 5. *Yangtze River Survey, Planning and Design Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China*)

**Abstract:** Urban land use changes alter the runoff production and confluence relationships, thereby affecting the occurrence and development of urban flood disasters. This study focuses on the western district of Hangzhou, utilizing the Patch-generating Land Use Simulation (PLUS) model to predict future land use scenarios, and constructs the Storm Water Management Model (SWMM) to analyze changes in runoff production and confluence in the region. The results indicate that: (1) The PLUS model can predict future land use scenarios in the study area, with built-up land increasing by 248.43% and arable land decreasing by 54.59% by 2030 compared to 1980; (2) The SWMM model effectively simulates the runoff production and confluence process in the study area, with an error margin of less than 10%; (3) From 1980 to 2030, the overall impervious surface area in the region increased by 27.91%, with peak discharge under 50-year and 100-year return periods increasing by 281.4 and 301.5 m<sup>3</sup>/s, respectively, and total flood volume rising by 6,964,594 and 7,507,033 m<sup>3</sup>; (4) The peak discharge and total flood volume simulated by the SWMM model show a good linear relationship with the proportion of built-up land in the region. The findings provide deeper insights into the mechanisms by which urbanization influences runoff production and confluence processes, offering scientific support for urban flood disaster prevention and control.

**Key words:** urbanization; runoff production and confluence; land use change; PLUS model; SWMM model