

doi:10.3969/j.issn.2097-3853.2025.06.014

# 基于SCS模型的区域尺度内涝风险格局构建及应用

## ——以山西运城为例

王敏

(泉州城市规划设计集团有限公司, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 全球气候变化使得极端天气增加,加剧了城市内涝风险。以山西运城为案例,基于“无源淹没”理论,将宏观尺度低数据需求的SCS-CN与ArcGIS模型融合,通过识别易涝区内建设用地和农业用地的分布与占比定义流域内涝风险指数,识别不同程度的雨洪灾害风险区。提出“识别内涝风险区域、疏通雨洪径流廊道、控制生态战略点”的规划策略,重构“面-线-点”城市防涝减灾格局,为提前规划布局相应的基础设施,增强抵御暴雨的能力奠定基础。

**关键词:** 无源淹没;SCS模型;运城市;“面-线-点”策略

中图分类号: TU984.11

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)06-0607-06

### Regional waterlogging risk pattern construction and application based on SCS model: a case study of Yuncheng, Shanxi

WANG Min

(Quanzhou Urban Planning &amp; Design Group Co., Ltd., Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Global climate change has increased extreme weather and exacerbated the risk of urban waterlogging. A case analysis is made of Yuncheng, Shanxi. Based on the “passive inundation” theory, the SCS-CN model with low data demand at the macro scale is integrated with the ArcGIS model. By analyzing land use in hydrologically vulnerable zones, a watershed risk index is developed to classify rainstorm-flood hazard zones. The proposed strategy comprises three interrelated components: (1) systematic identification of high-risk areas; (2) hydrological optimization of stormwater runoff corridors; (3) targeted management of ecological nodes. This forms a “plane-line-point” flood mitigation framework, thereby providing a scientific basis for strategic infrastructure planning to enhance urban resilience under extreme rainfalls.

**Keywords:** passive inundation; SCS model; Yuncheng City; “plane-line-point” strategy

全球气候变暖使得极端天气事件频发,极端降雨造成城市地表径流量突然增加,超出了城市防洪等级标准。城市化进程引起土地利用的变化、不透水面增加,河道硬化影响了地表河流、湖泊、湿地等蓄洪功能,中心城区管网老旧、防洪设计标准低,难以满足新增不透水地面对防洪的需求,加剧了城市内涝发生的可能<sup>[1]</sup>。因此,对城市雨洪进行管理具有重要的现实意义。

当前,较为有效的雨洪管理途径是针对城市

不同的降雨情景,构建雨洪管理模型,模拟城市雨洪淹没区,识别雨洪风险区,为城市规划与管理决策提供依据。其中,MIKE11、SWAT、SCS模型适用于宏观尺度的雨洪模拟,均为一维河流水文水质水动力模型。SWMM和HSPF模型适用于中微观尺度<sup>[2]</sup>。1954年由美国农业部水土保持局开发的SCS模型<sup>[3]</sup>适用于宏观尺度规划定量研究分析,可实现在多种气候及不同下垫面类型的条件下,通过对土壤类型、含水量及土地利用等多因

收稿日期:2025-04-17

第一作者简介:王敏(1971—),女,湖南桃源人,高级工程师,研究方向:国土空间规划、政策研究与发展策划、存量更新与低效率再利用等。

子分析,表达不同地区的降雨径流,结构简单、参数少,是一种较好的小型集水区径流计算方法,适用于农业或森林覆盖率较高的土地利用类型。

SCS 与 ArcGIS 模型的融合基于“无源淹没”理论,考虑自然地形而非人工排水管网设施的影响,建立淹没体积与径流量相等的关系,识别不同程度的雨洪灾害风险区,建立洪水调蓄安全格局。近年来,SCS 模型在雨洪径流模拟中常采用 ArcGIS 模型作为分析平台,通过处理高程数据,模拟地表径流,将研究区内降雨概化为均匀降水,依重力自由流动,从而确定淹没范围。Jiao<sup>[4]</sup>借助 ArcGIS 模型处理高程数据,结合 SCS 模型实现了内涝风险评估,并将结论应用到城市规划中。Quan<sup>[5]</sup>、Tang<sup>[6]</sup>等通过利用 SCS 与 ArcGIS 模型模拟分析,划定了上海中心城区建筑暴雨内涝风险区,并提出海绵城市建设建议。

本研究以山西运城市为例,属于宏观尺度,拟采用 SCS-CN 模型,结合 ArcGIS 平台,评估极端暴雨对于城市的影响,实现内涝风险预判,为城市内涝防治提供指导。

## 1 研究方法

### 1.1 径流路径模拟

利用 Arc GIS 空间分析模块,导入研究区的 DEM 数字高程数据进行水文分析<sup>[7]</sup>,通过“填洼-流向-流量”分析进行河网分级、栅格河网矢量化以及流域的划分,叠加现状水系,对雨水径流模拟分析,识别径流控制关键节点。通过控制这些关键区域,采取雨洪滞留、回补地下水等措施,实现雨洪水的有效利用。

### 1.2 SCS 模型模拟

模型的基本原理源于水质量守恒方程,计算如式(1)。

$$P=I_a+F+Q \quad (1)$$

式中, $P$ 表示某次降雨总降雨量,mm; $I_a$ 表示径流前降雨初损值,mm; $F$ 表示径流后降雨入渗量,mm; $Q$ 表示地表径流量,mm。

依据经验公式,地表径流量( $Q$ )与潜在最大径流量( $P-I_a$ )之比等于降水区入渗量( $F$ )与径流产生前潜在最大滞留量( $S$ )之比,即:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P-I_a} \quad (2)$$

结合上述公式,得到地表径流的基本公式:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-I_a)^2}{P+S-I_a}, & P \geq I_a \\ Q = 0, & P < I_a \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明,产生地表径流的条件为总降雨量( $P$ )大于降雨初损值( $I_a$ )。其中,初损值( $I_a$ )与径流产生前最大滞留量( $S$ )的关系为:

$$I_a = \lambda S \quad (4)$$

$\lambda$ 是由气候影响的区域参数,取值为 $0.1 \leq \lambda \leq 0.3$ ,本研究取 $0.2$ ,代入式(3)得出:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S}, & P \geq 0.2S \\ Q = 0, & P < 0.2S \end{cases} \quad (5)$$

经分析,考虑地表植被覆盖、土壤等因素对潜在最大滞留量( $S$ )的影响,计算 $S$ 过程引入CN参数进行修正,即:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

CN是一个无量纲参数,是综合反应土壤类型、土地利用现状、土壤前期湿度的指标值,理论取值范围为 $0 \sim 100$ 。CN值参照美国工程手册<sup>[8]</sup>,根据不同下垫面类型,结合相关文献中邻近类似区域选取。依据文献资料,按照土壤渗水率将土壤分为A、B、C、D共4类(如表1所示),参考相关研究及当地情况得到不同SCS土壤分组对应的CN值。

表 1 土壤水文划分标准

Tab.1 Soil hydrological classification standards

SCS 水文学土壤组类别	土壤性质	最小渗透率/ mm · h <sup>-1</sup>
A	砂土、壤质砂土、砂质壤土	7.26~11.43
B	壤土、粉砂壤土	3.81~7.26
C	砂粘壤土	1.27~3.81
D	粘壤土、粉砂粘壤土、砂黏土、粉砂粘土、粘土	0~1.27

结合式(5)得出不同土地利用情况下地表径流量 $Q$ 的大小,乘以流域面积得到不同水平年一次降雨总水量,为淹没区模拟提供依据。

运用 ArcGIS 中 3D 分析中的“表面体积”工具,将栅格数据高程转化为三维空间,当积水区域的水面高度大于地面高度,并经人工校准后,满足

积水体积与地表径流量  $Q$  体积相等时,确定洪水淹没高度。多次运算得到不同水平年,不同流域的淹没区范围,在 ArcGIS 中进行可视化分级。

## 2 应用实例

### 2.1 研究区域

运城市是山西省南大门,多平原,其次是山地及丘陵,有黄河、汾河过境。黄河主干流环绕西南边缘长达 395.5 km,是天然的分界线。中条山北侧有汾河、涑水河两条支流由东北向西南流入黄河,山南支流众多,由北向南或东南向直接流入黄河。运城市年降水量分配不均,夏秋降水约占全年的 80%。全市河川径流的补给均以降水补给为主,但地表径流暴涨暴落,流失严重,开发利用较为困难。

### 2.2 数据获取

本研究基于 SCS-CN 模型与 ArcGIS 空间模拟反映城市雨洪格局的空间分布,需要数据源信息如下。

表 2 数据源  
Tab.2 Data sources

名称	数据来源	类型	网格 间距/m	年份
ASTER GDEM V2 数字高程数据	中国科学院地理 空间数据云平台	栅格	30	2020
土壤数据	世界土壤数据库	栅格	1 000	2008
用地类型	政府三调数据	矢量	—	2020

### 2.3 雨水径流模拟

基于 Arc GIS 空间分析模块中的水文分析功能,利用栅格计算器,提取出大于累计阈值 10 000 的径流量;运用“栅格河网矢量化”工具,剔除平行的伪汇水通道;利用“河流链接”工具,提取汇水区域的出水点;运用“集水区”工具,通过径流连接点实现汇水区划分。

### 2.4 基于 SCS-CN 模型的产流与径流计算

#### 2.4.1 CN 值确定

研究区 SCS 模型 CN 值参照美国工程手册参考值,根据不同下垫面类型,依照 SCS 水文土壤划分标准结合相关文献<sup>[9]</sup>对其进行人工赋值,得出每个地块对应 CN 值如表 3 所示。

表 3 运城市 SCS 模型 CN 值

Tab.3 CN values for SCS model of Yuncheng City

土地 利用类型	CN			
	A(透水)	B(较透水)	C(较不透水)	D(不透水)
耕地	63	75	83	87
林地	36	60	73	79
草地	49	69	79	84
灌木	55	72	81	56
湿地	32	58	72	79
水域	98	98	98	98
建设用地	89	92	94	95
裸地	77	86	91	94

#### 2.4.2 降雨强度计算

降雨是内涝产生的直接因素。本研究降雨量  $P$  采用暴雨强度公式(太原工业大学修订版)计算,如式(7)所示。

$$q = \frac{993.7(1+1.04\lg T)}{(t+10.3)^{0.65}} \quad (7)$$

式中, $q$  表示设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$ ;以“mm/min”为单位,暴雨强度公式可转化为:

$$I = \frac{5.96(1+1.04\lg T)}{(t+10.3)^{0.65}} \quad (8)$$

式中, $t$  表示设计降雨历时, min,取值 120 min; $T$  表示重现期,a;极端日降雨量  $P=I \cdot t$ ,即 2 h 降雨量如表 4。

表 4 运城市极端日降雨量

Tab.4 Extreme daily rainfall in Yuncheng City

重现期/a	$P/\text{mm}$
10	61.56
20	70.98
100	92.95

#### 2.4.3 内涝区模拟

运用 SCS 模型结合运城市暴雨强度公式计算地表径流。依据式(5)和式(6),求出每个流域内地表径流量  $Q$ 。在不同降雨重现期情形下,采用流域内积水体积计算进行洪水淹没分析,即凡是高程低于一定值的区域均进行体积计算,考虑为内涝区。实际计算出的内涝量及淹没高程见表 5。

表 5 不同降雨重现期的淹没高程

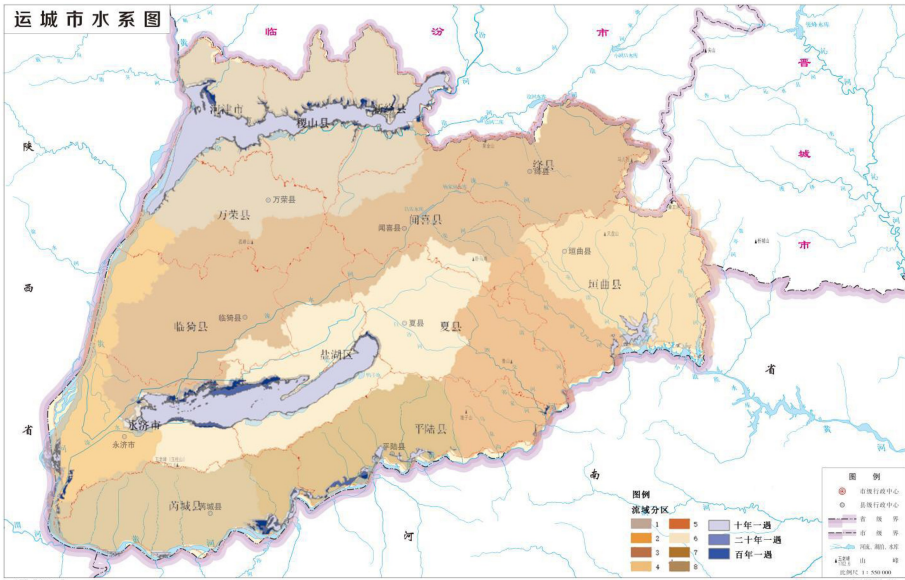
Tab.5 Submergence elevations for different rainfall recurrence intervals

重现期/a	淹没高程/m							
	流域 1	流域 2	流域 3	流域 4	流域 5	流域 6	流域 7	流域 8
10	405	328.5	351.0	266.8	276.0	350.0	319.0	319.0
20	410	330.5	351.5	267.3	278.0	351.5	319.5	319.5
100	423	332.5	352.5	268.5	282.5	352.5	320.0	320.5

通过径流路径模拟将运城市划分为 8 个流

域,分别模拟计算 8 个流域的积水体积,以 10、20、100 a 为雨洪设计重现期,模拟得到不同暴雨重现期下的流域内涝风险区结果如图 1 所示。

图 1 展示了不同降雨重现期的内涝淹没区的空间分异,对于不同降雨重现期的暴雨,内涝区范围随着降雨重现期增加范围扩大。十年一遇降雨内涝区主要分布于汾河流域和姚暹渠段。汾河流域新绛、稷山、河津三座县城均受洪水内涝威胁,是全市的重点防洪县城。同时盐湖、姚暹渠片区位于易涝区内,洪涝风险相对较高。



图注:底图来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”,审图号为晋 S(2025)027 号

图 1 运城市内涝风险区

Fig.1 Inundation risk areas in Yuncheng City

### 3 规划策略

根据内涝风险区模拟分析,从“面-线-点”策略重构城市防涝减灾格局:宏观尺度上根据流域雨洪风险格局,改变风险区内农用地和建设用土地利用方式,农用地适时调整种植结构,避免暴雨季节作物受灾;建设用地利用屋顶、地下空间建设蓄水池,防御暴雨风险;中观尺度上注重径流廊道两侧用地布局规划,疏导雨水径流路径,优化雨洪廊道利用方式,适当调整廊道周边土地利用适应雨水径流;微观格局上精确控制径流战略点,在现状建设较密集的中心城区,充分利用城市绿地、湿地湖泊等的蓄水能力,结合城市建设、排水管网设施等对内涝分布的影响,划分不同场景的城市内涝

风险,做出具体安排。

#### 3.1 面——识别内涝风险区

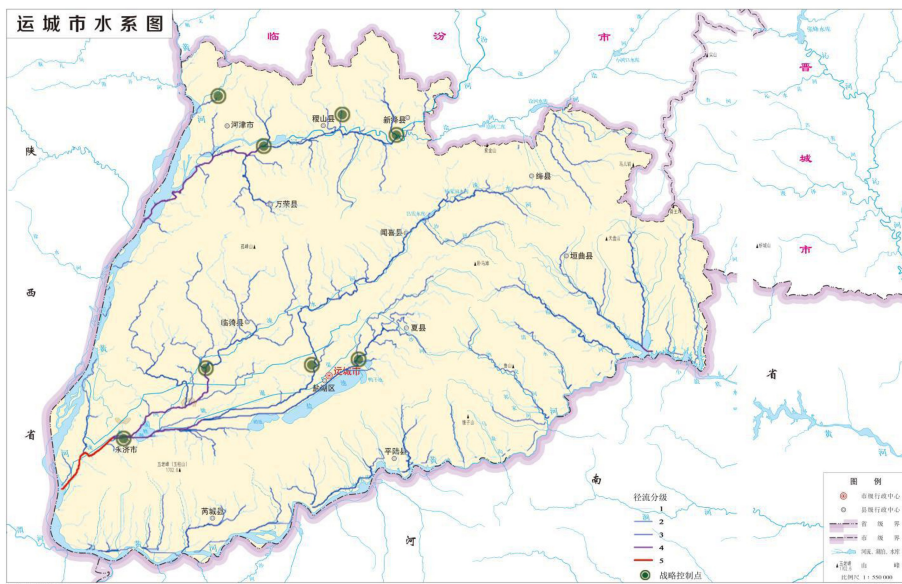
通过识别流域内涝风险区内的建设用地和农业用地,有针对性的对于风险区内敏感用地进行管控。农业用地受雨水影响显著,干旱或内涝都会影响植物对营养成分的吸收<sup>[10]</sup>,可通过调整内涝风险区范围内农业用地的种植结构,种植耐涝农作物品种。做好雨季农作物管理工作,暴雨后及时排除田间积水,减少农用地损失。调整内涝风险区内土地用地类型,将易于受灾的建设用地和重要农作物种植用地转变土地利用方式,保障人身安全,减少社会经济损失。

#### 3.2 线——疏通雨洪廊道

建构完整的水生态系统,疏通雨洪廊道,推进

河湖水系连通,留蓄更多的水体空间。本研究采用“Strahler 分级”<sup>[11]</sup>法对运城市雨水径流进行分

级,根据径流分析路径将廊道分成 5 级,分布情况及作用见表 6。



图注:底图来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”,审图号为晋 S(2025)027 号

图 2 雨洪控制战略点

Fig.2 Strategic points for rainfall and flood control

表 6 运城市雨洪廊道系统

Tab.6 Rainfall and flood corridor system in Yuncheng City

雨洪廊道	径流长度/m	分布情况	作用
一级廊道	5 221 527.91	数量多,分布广,树状径流网络源头	汇聚雨洪,就地滞蓄小型降水,控制大雨初级阶段
二级廊道	1 233 568.07	数量较多,跨越许多现状水域,连接上下游径流,分布较广	容纳一级溢流,进一步缓解雨洪问题,调节小型雨水
三级廊道	556 444.72	主要分布在汾河涑水河流域	容纳二级廊道溢流,加强各调蓄设施之间的联系,调节中型雨水
四级廊道	116 379.00	数量较少,分布于汾河入黄口以及涑水河与姚暹渠交汇处	容纳三级廊道溢流,超标径流向区域自然水体排放,调节控制大暴雨
五级廊道	22 122.64	主要分布于永济市入黄口	容纳四级廊道溢流,可作为雨洪调蓄区

当面临高强度短历时降雨时,城市道路是地表径流的主要运输通道,通过在雨洪廊道系统设置植草沟、植被缓冲带和雨水廊道等,可以在高强度降雨时通过植被拦截和土壤下渗作用减缓地面径流流速,同时减少径流产生的非点源污染<sup>[12]</sup>。通过工程疏导加强主次河道之间的连通程度,通过分洪工程将水流引至支流、河漫滩与湿地等,既可调节洪水,又能调节河流、湿地等生态系统。

### 3.3 点——控制径流战略点

通过雨洪淹没及潜在径流的模拟分析,结合

径流方向和建设用地的位置,布局雨水径流控制关键点。通常考虑布控生物滞留池、洼地、滞留池塘和蓄水池等措施;通过人工手段适当强化城市天然海绵体,能够在一定程度上缓解洪涝灾害、增加生物栖息地以及提供文化景观。

## 4 结束语

本研究将 ArcGIS 空间分析与 SCS-CN 模型相结合,模拟了无源淹没时的运城市内涝风险格局并将其可视化,并提出了整体-局部的规划策略。

1) 运城市域范围汾河流域和姚暹渠段的淹没风险较高,随着降雨重现期的增大,其淹没范围扩大,影响范围更广。

2) 运城市可划分 8 大流域,其中流域 1 及流域 6 风险指数较高,涉及北部 3 县市及盐湖区,需重点加强内涝防范。

3) 据宏观淹没区—中观雨水廊道—微观战略点的分析,提出“面—线—点”的规划策略。宏观上注重淹没区建设用地及农用地的风险控制,通过调整农作物种植结构、转变土地利用类型等方式减少暴雨灾害影响;中观上对雨水廊道进行植

被缓冲带设计,减缓径流流速,并对径流污染物进行过滤;微观上注重在径流战略点位置海绵体的设计,增加对雨水的吸纳能力。

除此之外,应注重灰色基础设施系统(如污水排水管网、水泵)的建设,灰绿系统结合才能真正解决城市雨水问题<sup>[13]</sup>。极端天气频发的大背景下,需要完善城市排水和气象灾害早期预警系统,确保关键基础设施在极端天气下的承受性。

通过评估暴雨对于城市的内涝风险范围,提前规划布局相应的基础设施,增强其抵御暴雨的能力,是防治城市内涝的重要举措。

## 参考文献:

- [1] LIU Q, YANG H M, LIU M, et al. An integrated flood risk assessment model for cities located in the transitional zone between Taihang Mountains and North China Plain: a case study in Shijiazhuang, Hebei, China [J]. *Atmosphere*, 2019, 10 (3): 104.
- [2] ZHANG C, LI R N, DAI L Y, et al. Restoration of urban water environment landscape system and SWMM technology integration in water-scarce cities [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, 46(1): 671-678.
- [3] USDA. *National Engineering Handbook: Hydrology Section 4, Chapters 4-10* [M]. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1972.
- [4] JIAO S, ZHANG X L, XU Y. A review of Chinese land suitability assessment from the rainfall-waterlogging perspective: evidence from the Su Yu Yuan area [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 144: 100-106.
- [5] QUAN R S. Risk assessment of flood disaster in Shanghai based on spatial-temporal characteristics analysis from 251 to 2000 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4627-4638.
- [6] 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.
- [7] 朱海玲, 杨晓晖, 张学培, 等. 基于 DEM 的密云水库上游流域特征提取与分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 66-72.
- [8] SHI Z H, CHEN L D, FANG N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China [J]. *Catena*, 2009, 77(1): 1-7.
- [9] ROZALIS S, MORIN E, YAIR Y, et al. Flash flood prediction using an uncalibrated hydrological model and radar rainfall data in a Mediterranean watershed under changing hydrological conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(1/2): 245-255.
- [10] KREUZWIESER J, GESSLER A. Global climate change and tree nutrition: influence of water availability [J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(9): 1221-1234.
- [11] VÖRÖSMARTY C J, FEKETE B M, MEYBECK M, et al. Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(1/2): 17-39.
- [12] GÜLBAS S, KAZEZYİLMAZ-ALHAN C M. Impact of LID implementation on water quality in alibeyköy watershed in Istanbul, Turkey [J]. *Environmental Processes*, 2018, 5(1): 201-212.
- [13] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(4): 652-658.

(责任编辑: 方素华)