#### DOI: 10.20103/j.stxb.202405111061

张凌暄, 焦胜, 卢洁, 牛彦合. 基于源汇景观格局的洞庭湖流域洪涝风险评估及雨洪径流过程响应. 生态学报, 2025, 45(1): 395-405. Zhang L X, Jiao S, Lu J, Niu Y H. Flood risk assessment and stormwater runoff process response in Dongting Lake Basin based on source-sink landscape pattern. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 395-405.

# 基于源汇景观格局的洞庭湖流域洪涝风险评估及雨洪 径流过程响应

张凌暄1,焦 胜<sup>1,2,\*</sup>,卢 洁<sup>1</sup>,牛彦合<sup>1</sup>

1 湖南大学建筑与规划学院,长沙 410082

2 丘陵地区城乡人居环境科学湖南省重点实验室,长沙 410082

摘要:源汇景观格局是影响流域雨洪径流过程与洪涝风险的重要因素,探索一种基于源汇景观格局的流域洪涝风险评估方法对 流域洪涝风险防治具有重要科学意义。以洞庭湖流域为研究对象,创新性地修正并运用源汇景观模型评估各年份流域洪涝风 险,揭示洪涝风险时空演变规律及成因;而后利用 SCS-CN 模型与局部等体积法模拟分析各年份雨洪径流过程特征,并基于斯 皮尔曼相关系数探究雨洪径流过程与源汇景观空间负荷对比指数的相关关系,以此验证新模型运用于洪涝风险评估的合理性。 结果表明:(1)40年间源景观建设用地的扩张最为显著,汇景观持续减少,以耕地向建设用地转移为主,源景观空间上集中于环 洞庭湖与湘江流域。(2)40年间源汇景观空间负荷对比指数均呈上升趋势,流域洪涝风险逐渐提高,呈现东高西低的分布格 局,其中湘江与环洞庭湖流域洪涝风险较高,资水流域洪涝风险次之,澧水与沅水流域洪涝风险较低。(3)40年间平均径流量、 淹没深度及各风险区占比整体呈缓慢波动上升趋势,雨洪径流过程加剧使得洪涝风险不断上升,传统模型模拟结果与源汇景观 模型评估结果相吻合。(4)源汇景观空间负荷对比指数与雨洪径流过程和剧使得洪涝风险不断上升,传统模型模拟结果与源汇景观 模型评估结果相吻合。(4)源汇景观空间负荷对比指数与雨洪径流过程各特征指标呈显著正相关关系,说明源汇景观在高程、 坡度及距离上的空间格局对于雨洪径流过程具有重要影响,运用源汇景观模型评估流域洪涝风险具有可行性。本研究可为流 域洪涝风险定量评估提供耦合格局与过程的新方法,为合理配置流域景观格局、保障雨洪安全提供新视角和理论依据。 **关键词**:源汇景观模型;洪涝风险评估;源汇景观格局;雨洪径流过程;洞庭湖流域

# Flood risk assessment and stormwater runoff process response in Dongting Lake Basin based on source-sink landscape pattern

ZHANG Lingxuan<sup>1</sup>, JIAO Sheng<sup>1,2,\*</sup>, LU Jie<sup>1</sup>, NIU Yanhe<sup>1</sup>

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

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

**Abstract**: Source-sink landscape pattern is an important factor affecting the stormwater runoff process and flood risk in the watershed. Exploring a flood risk assessment method based on the source-sink landscape pattern is of great scientific significance for watershed flood risk prevention and control. Taking Dongting Lake Basin as an example, this study innovatively revised and applied the source-sink landscape model to assess the flood risk of the watershed every year, revealed the spatial and temporal evolution patterns of flood risk and causes. It was followed by using the SCS-CN model and the local isovolumetric method to simulate and analyze the characteristics of the stormwater runoff process every year. Then the Spearman's correlation coefficient was used to explore the correlation between the stormwater runoff process and the Location-Weighted Landscape Index (LWLI), in order to verify the rationality of using the new model in flood risk

基金项目:国家自然科学基金 (52278059);湖南省自然科学基金部门联合项目(2024JJ8316)

收稿日期:2024-05-11; 网络出版日期:2024-09-23

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiaosheng2008@163.com

assessment. The results showed that (1) During a 40 years' timeframe, the expansion of construction land for source landscape was the most significant, while the sink landscape continued to decrease, with the main shift being from cultivated land to construction land. Source landscapes were spatially concentrated around Dongting Lake and the Xiangjiang River watershed. (2) The LWLI showed a rising trend during the 40-year period and a gradual increase of flood risk. This demonstrated a distribution pattern with high in the east and low in the west. Among them both the Xiangjiang River Basin and the Dongting Lake Zone showed a higher flood risk, followed by the Zi Basin. And the Li River and the Yuan River Basin had a lower flood risk. (3) The average runoff volume, the depth of inundation, and the percentage of each risk area during the 40-year period showed a slow fluctuating upward trend. The intensification of stormwater runoff process made the flood risk increase continuously. The results of the traditional model simulation coincided with the assessment results of the source-sink landscape model. (4) The LWLI and subindexes showed a significant positive correlation with each characteristic index of the stormwater runoff process, indicating that the pattern of the source-sink landscape in terms of elevation, slope and distance had an important influence on stormwater runoff process, and that it was feasible to assess the flood risk of the watershed by using the source-sink landscape model. This study could provide a new method of coupling pattern and process to quantify and analyze the flood risk in the watershed. It offered a new perspective and theoretical basis to rationally allocate the landscape pattern in the watershed and to protect the stormwater safety.

Key Words: source-sink landscape model; flood risk assessment; source-sink landscape pattern; stormwater runoff process; Dongting Lake Basin

快速城镇化背景下,建设用地大面积增加,削弱了自然下垫面对降雨的调蓄功能,加之气候变化和极端降 雨事件频发,城市洪涝风险大增<sup>[1]</sup>。据中国应急管理部公开数据显示,2023年洪涝灾害相关受灾人数达 5278.9万,因灾死亡失踪 309人,倒塌房屋 13万间,直接经济损失高达 2445.7亿元,洪涝灾害已成为我国发 生最频繁和造成人员财产损失最严重的自然灾害类型之一<sup>[2-3]</sup>。由于洪涝灾害不确定性强且危害性大,近年 来寻求适宜洪涝风险评估方法已成为地理、规划、水文等领域的研究重点之一<sup>[4]</sup>。

目前,洪涝风险评估主要围绕历史灾情评估、遥感影像评估、情景模拟评估以及指标体系评估四种方法展 开<sup>[1]</sup>,有限的数据资料、数据获取难度等客观因素一定程度上限制了前三种方法的使用<sup>[4]</sup>,而指标体系评估 主要围绕危险性、暴露性、脆弱性三方面构建<sup>[5]</sup>,评估结果受指标选取、权重赋予等主观因素影响大<sup>[6]</sup>,且缺 少对于景观格局与雨洪径流过程的综合考量。洪涝风险高低取决于雨洪径流聚集区域的承灾脆弱性,并且根 据水流特性与相关学者研究<sup>[7–9]</sup>,高程、坡度、距离是影响雨洪径流过程的关键因子;因此若根据脆弱性划分 源汇景观,则洪涝风险评估关键在于分析源汇景观在高程、坡度等方面空间格局的合理性。对于景观格局,景 观生态学中常常运用景观格局指数分析景观格局对特定生态过程的影响<sup>[10]</sup>。目前雨洪领域主要将景观格局 指数运用于研究蓝绿景观格局对雨洪调蓄能力影响<sup>[11–12]</sup>,缺少从源汇角度考虑各类土地利用的景观格局;且 研究所采用的景观格局指数多关注下垫面景观格局的二维几何特征<sup>[13]</sup>,忽略了三维地形、与水域距离等影响 洪涝风险的深层次驱动机制。而陈利顶等学者<sup>[14]</sup>提出的源汇景观模型不受空间尺度限制,从高程、坡度、距 离三方面分析源汇景观格局的空间配置对于特定过程的影响,弥补了传统的景观格局指数只关注几何特征而 忽略景观格局内涵的不足,被广泛运用于非点源污染<sup>[15–18]</sup>、热岛效应<sup>[19]</sup>、土壤侵蚀<sup>[20–21]</sup>等风险评估。该模型 可以将上述影响雨洪径流的关键因子与基于脆弱性划分的源汇景观相耦合,通过比较源汇景观在高程、坡度、距 离上的空间格局,分析其对雨洪径流的影响,从而推导流域洪涝风险的高低,契合洪涝风险评估的关键点,并且 该模型数据获取方便,因此可以尝试将其作为洪涝风险评估的新方法,弥补雨洪领域景观格局的研究不足。

综上,本文以洞庭湖流域为例,修正并运用源汇景观模型,从高程、坡度及距离三个方面刻画流域源汇景观格局的演变过程,尝试将其应用于流域洪涝风险评估与成因分析;并采用 SCS-CN 模型与斯皮尔曼相关系数探究源汇景观格局特征与流域雨洪径流过程的相关关系,以此验证景观格局洪涝风险评估模型的有效性。

本研究有助于推进洞庭湖流域土地利用格局的优化配置,通过合理的源汇景观空间布局,降低流域洪涝风险; 同时对其他流域洪涝风险的评估与防控具有借鉴意义,可为流域洪涝风险防控与国土空间规划编制提供科学 的参考依据。

#### 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

洞庭湖流域地处长江中游南部、南岭山脉北部,位于107°16′—114°15′E,24°38′—30°24′N,包括湖南省大部和贵州、湖北等省份的部分地区,总面积约26.28万km²(图1)。流域境内水系发达,分布着湘、资、澧、沅四大水系以及长江重要的蓄滞洪区洞庭湖,根据水系布局可划分为洞庭湖环湖区、澧水、湘江衡阳以上、湘江衡阳以下、资水冷水江以上、资水冷水江以下、沅江浦市镇以上、沅江浦市镇以下八大子流域;地貌复杂多样,东、西、南三面环山,中部为低矮丘陵,北部地势地平;受季风、副热带高压及西风带环流的综合影响,梅雨暴雨和台风暴雨等极端天气较多,不稳定的气候系统易引发各水洪峰齐集与长江高水位顶托,加之快速城镇化使洞庭湖流域成为我国洪涝灾害最严重的地区之—<sup>[22]</sup>,对当地农业生产、经济建设和生态环境造成了巨大的影响<sup>[23—24]</sup>。



图 1 研究区范围 Fig.1 The location of the study area

## 1.2 数据来源

主要基础数据包括:①DEM 高程数据,空间分辨率为 12.5m,由 ALOS 卫星获取,来源于美国国家航空航 天局地球科学数据网站(https://www.earthdata.nasa.gov);②土地利用数据,空间分辨率为 30m,来源于中国科 学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn),基于中科院一级土地利用分类标准,包括耕地、林地、 草地、水域、建设用地和未利用地 6 类;③土壤类型数据,空间分辨率为 1000m,来源于中国科学院资源环境科

#### 2 研究方法

2.1 基于源汇景观格局的洪涝风险评估模型

源汇景观模型(source-sink landscape model,SSLM)是中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家 重点实验室开发的空间分布式评价模型<sup>[25-26]</sup>,其通过源汇景观划分与赋权、集水区与水系提取、洛伦兹曲线 绘制、源汇负荷比指数计算等步骤,计算出源汇景观高程负荷比(LWLI.E)、坡度负荷比(LWLI.S)、距离负荷 比(LWLI.D)及源汇景观空间负荷对比指数(Location-Weighted Landscape Index,LWLI),以此评估不同景观格 局对生态过程的影响。

#### 2.1.1 源汇景观划分

由于洪涝灾损主要产生于建筑人口密集、开发程度较高的建设用地<sup>[27]</sup>,故洪涝风险评估关键在于分析建 设用地的空间格局相较于其余用地是否更有利于雨洪径流的外排。因此本研究将洪涝脆弱性较高、雨洪径流 需要外排以降低洪涝风险的建设用地划分为源景观,将脆弱性相对较低、雨洪径流需要内聚以分担洪涝风险 的耕地、林地、草地划分为汇景观。由于水域多为自然形成、存在于高程坡度较小的区域,一般承担着流景观 的作用,因此不适合被定义为源景观或汇景观;此外未利用地在流域中占比仅为 0.3%,因此本研究未考虑未 利用地景观格局的影响。

# 2.1.2 风险评估模型修正

由于洪涝风险分析框架下源汇景观占比悬殊,因此本研究将原模型中面积比例因子修正为子流域中某类 景观面积占整个流域该类景观总面积的比例,并增加时间因子将其定义为各年份各流域中某类景观面积占研 究基年此流域该类景观面积的比例。而原模型中的权重因子依据《资源环境承载能力和国土空间开发适宜 性评价技术指南(试行)》及相关文献<sup>[28]</sup>中各类景观对雨洪径流过程的贡献差异,确定耕地、林地、草地及建 设用地的权重分别为 0.5、0.25、0.25、0.9。基于源汇景观模型的洪涝风险评估修正公式如下:

$$LWLI.(E \setminus S \setminus D) = \frac{\sum_{i=1}^{M} (p_i \times q_i \times w_i \times \int_{x=0}^{D} A_i \times d_x)}{\sum_{i=1}^{M} (p_i \times q_i \times w_i \times \int_{x=0}^{D} A_i \times d_x) + \sum_{j=1}^{N} (p_j \times q_j \times w_j \times \int_{x=0}^{D} A_j \times d_x)}$$

式中,LWLI.E、LWLI.S 和 LWLI.D 分别指高程、坡度和距离负荷比指数;*i*,*j*分别指源汇景观;*M*、*N*为源汇景观的类型数;*p*为空间因子,指子流域源汇景观相对于整个流域对应景观的面积占比;*q*为时间因子,指各年份流域源汇景观相对研究基年对应景观的面积占比;*w* 指各景观的权重因子;*A* 指源汇景观基于洛伦兹曲线的累计面积比例;*x* 表示各景观的空间分布值;*D* 表示流域内各景观的最大高程、坡度或距离。

模型中各负荷比指数具备雨洪过程的生态学意义,能够反映流域景观格局对雨洪过程的影响。当 LWLI. E 与 LWLI.S 大于 0.5 时,表示源景观相较汇景观更集中于高程低、坡度小的地方,根据水流重力特性,雨洪径 流易向源景观聚集且不易外排,相应流域的洪涝风险较高;当 LWLI.D 大于 0.5 时,表示源景观相较汇景观更 集中于距离流域出水口近的地方,易受上游来水、水体溢流的影响,相应流域的洪涝风险较高。基于三个指数 得到景观空间负荷对比指数,计算公式如下:

$$LWLI = \frac{LWLI.E + LWLI.S + LWLI.D}{3}$$

2.2 雨洪径流过程模拟模型

#### 2.2.1 流域产流模拟

径流曲线数法(Curve Number Method, SCS-CN 模型)由美国农业部水土保持局开发,能够客观反映土地利用方式、土壤类型对极端强降雨下地表径流的影响<sup>[29]</sup>。模型计算基于水量平衡方程,主要参数确定如下:

CN 值参考美国工程手册<sup>[30]</sup>,并结合相关文献<sup>[31-34]</sup>对邻近类似区域的选值确定(表1);初损率确定为0.2<sup>[35]</sup>; 土壤类型参考 Kumar 等人的研究划分<sup>[36]</sup>;流域总降水量是《湖南省雨水控制与利用工程技术标准》中各市州 百年一遇的 24h 最大降水量。

Table 1 CN value of the study area					
土地利用类型 Type of land use	土壤水文类型 A Hydrologic soil group A	土壤水文类型 B Hydrologic soil group B	土壤水文类型 C Hydrologic soil group C	土壤水文类型 D Hydrologic soil group D	
耕地 Cropland	62	71	78	81	
林地 Woodland	36	60	73	79	
草地 Grassland	49	69	79	84	
水体 Water	98	98	98	98	
建设用地 Building land	77	85	90	92	
裸地 Bare land	77	86	91	94	

÷	表 1	研究	E CN	值		
	CDI					

CN:径流曲线数 Curve Number

#### 2.2.2 流域汇流模拟

由于研究区地形复杂,湖泊河网众多,因此本文选取局部等体积法模拟流域汇流过程。局部等体积法的 基本原理是根据水系分布将研究区域划分成若干集水区,相等时长下每个集水区内的径流总量等于淹没总 量<sup>[37]</sup>;径流根据重力特性和地形起伏情况在子集水区内汇流,分别填充各洼地,最终可反映流域的淹没 状况<sup>[38]</sup>。

本研究利用 ArcGIS 水文分析工具将洞庭湖流域划分为 9509 个子汇水区,借助等体积算法得到子流域淹 没水深。参考 Coto 对哥斯达黎加地区四种淹没水深下 33 种土地利用类型的脆弱性值<sup>[39]</sup>以及彭建等学者的 相关研究成果<sup>[40]</sup>,构建暴雨洪涝风险指数 R(表 2),表征不同淹没水深下各土地利用类型的暴雨洪涝风险。 其中,水体、裸地和林地由于脆弱性相对较小,风险指数也相对较低,而建设用地、耕地和草地由于脆弱性较 高,风险指数也相对较高。根据 R 值采用等间隔分级法划分高中低风险区,最终通过统计子流域各风险区占 比、平均淹没水深、平均径流量等指标反映汇流模拟结果。

	Table 2 Inde	ex of the storm flood r	isk for different land	use	
土地利用类型	淹没水深 Depth of inundation/m				
Type of land use	< 0.1	0.1-0.5	0.5-1.5	1.5—3.0	>3.0
耕地 Cropland	0.01	0.2	0.5	0.6	0.7
林地 Woodland	0	0.01	0.1	0.2	0.4
草地 Grassland	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
水体 Water	0	0.01	0.05	0.1	0.15
建设用地 Building land	0.05	0.4	0.7	0.8	0.9
裸地 Bare land	0	0.01	0.1	0.1	0.15

表 2 不同土地利用类型暴雨洪涝风险指数

# 2.3 相关性分析

借助 Origin 2024 进行斯皮尔曼相关系数分析,研究源汇景观空间负荷对比指数与雨洪径流过程平均径 流量、平均淹没深度、各等级洪涝风险区占比等特征量之间的关系,斯皮尔曼相关系数ρ取值范围为[-1,1], ρ>0表示正相关,ρ<0表示负相关,|ρ|越大相关程度越高。

#### 3 结果分析

## 3.1 源汇景观的时空演变特征

1980—2020年流域土地利用占比见图 2。整体上看,40年间源景观建设用地增加趋势最为显著,净增 3825km<sup>2</sup>,增长了 2.38 倍,速度先慢后快,2010—2020年增长最为显著;而汇景观中耕地与草地的面积占比下



降趋势较为显著,面积减少量分别为 3001km<sup>2</sup>与 1908km<sup>2</sup>,减少的幅度分别为 3.94%与 12.53%。

Fig.2 Land use proportion in different watersheds from 1980 to 2020

从阶段性变化来看,不同时期洞庭湖流域景观间的转换具有异质性:1980—1990 年景观间的转换相对缓 慢,源景观增加了 217km<sup>2</sup>,增幅仅为 7.82%,以环洞庭湖、湘江下游及沅水上游三个流域耕地转为建设用地为 主;1990—2000 年景观间的转换趋势增强,以汇景观中耕地和林地的变化最为显著,耕地减少了 567km<sup>2</sup>,林地 增加了 378km<sup>2</sup>,主要源于湘江流域的耕地转为林地,但源景观仅增加了 191km<sup>2</sup>,新增的源景观集中于湘江与 澧水流域;2000—2010 年景观转换趋势进一步增强,以源景观的变化最为显著,增加了 660km<sup>2</sup>,增幅为 20.74%,其主要来源于湘江下游与环洞庭湖流域的耕地和林地,资水上游和沅水下游的源景观也有较大幅度 的提升;2010—2020 年景观转换最为激烈,源景观增加了 2757km<sup>2</sup>,增幅为 71.76%,以湘江下游、湘江上游、环 洞庭湖以及沅水上游四个子流域的耕地和林地为主要的转入者,转入量占源景观转入总量的 81.71%,汇景观 中大面积耕地和草地转化为林地,分别减少了 1779km<sup>2</sup>和 1417km<sup>2</sup>,耕地转林地主要发生在湘江、环洞庭湖、沅 水上游以及资水上游流域,草地转林地主要发生在沅水流域。

流域各源汇景观的分布也具有较强的空间分异性,统计结果(图3)表明:源景观主要集中于环洞庭湖、湘 江、资水等流域的平原和丘陵地区;汇景观以林地和耕地为主,其中林地占比约为61%,主要集中于沅水、湘 江及澧水流域东西南三面高海拔陡坡区域,耕地占比接近30%,集中于环洞庭湖平原以及湘江与资水流域地 势较为平缓的地区,而草地占比较低,集中于沅水与湘江上游流域西部的山地地带。

3.2 基于源汇景观模型的洪涝风险时空演变特征与原因分析

1980—2020年洞庭湖流域源汇景观空间负荷对比指数见图 4。整体上看,40年间流域 LWLI 呈现上升趋势,由1980年的0.51升高至2020年的0.72,2010—2020年增长最为显著;LWLI.E、LWLI.D和LWLI.S同样表现出上升的趋势,增幅分别为41.97%、39.31%、44.03%,说明源汇景观在高程与坡度上的空间分布变化更为明显;但对于同一时期,LWLI.D略高于 LWLI.E、LWLI.S,表明源汇景观在距离上的空间分布是引发流域洪涝风险的关键原因。









Fig.4 Changes of Location-Weighted Landscape Index in different watersheds from 1980 to 2020

http://www.ecologica.cn

从时间上看,不同时期洞庭湖流域洪涝风险演变特征如下:1980—1990年,部分流域洪涝风险有小幅上升,以沅水上游与洞庭湖流域较为突出,增幅分别为11%与7%,资水下游由于新增的草地更集中于高程与坡度较大的区域,其洪涝风险也略有上升;1990—2000年大部分流域的洪涝风险未发生较大幅度的变化,唯独

澧水流域的洪涝风险出现了较大幅度的上升,增加幅度为26%,其原因在于澧水流域的源景观有较大幅度的 增长,且新增的源景观更趋向于高程较小、距离流域出口较近的区域;2000—2010年各流域洪涝风险均上升 且增幅加大,其中湘江下游、资水上游、沅水下游增幅较大,均位于11%附近;2010—2020年洪涝风险呈剧烈 上升趋势,洞庭湖流域洪涝风险的变化幅度约为2000—2010年的3倍,风险提升以沅水上游、湘江上游、资水 上游最为突出,增长幅度分别为74%、34%与26%,其原因在于这些流域的源景观大幅上升,草地耕地等汇景 观呈减少趋势,且源景观在空间上的分布更趋向于距离流域出口近的区域,而汇景观在空间上的分布趋向于 距离流域出口远且相对高程高的区域,最终导致流域的洪涝风险上升。

从空间上看,流域洪涝风险分布也具有明显的异质性。从多年的平均结果来看,各源汇景观空间负荷对 比指数高于 0.5 的流域以湘江下游、环洞庭湖、资水上游、湘江上游为主,其原因在于这些流域中源景观建设 用地占比相对较高,且主要分布于相对高程较低与坡度较缓的平原和丘陵地区,汇景观中耕地林地草地更集 中于距离流域出口较远的区域,故洪涝风险较高。总体上看,洞庭湖流域洪涝风险整体呈现出东高西低的分 布格局,源汇景观格局相似的流域洪涝风险评估结果也具有相似性;高风险区主要集中于湘江、环洞庭湖以及 资水流域,低风险区则以澧水与沅水流域为主。

3.3 基于产汇模拟模型的雨洪径流时空演变特征

1980—2020年洞庭湖流域雨洪径流特征见图 5。模拟结果表明,40年间平均径流量、淹没深度及高风险





Fig.5 Changes of flood runoff process characteristics in different watersheds from 1980 to 2020

区占比整体上呈逐期缓慢波动上升趋势,雨洪径流过程加剧使得洪涝风险不断上升,2010—2020年的增长态势最为显著。

分阶段来看,不同时期雨洪径流过程各指标的变化具有异质性:1980—2000年绝大多数流域雨洪径流过 程特征较为稳定,仅洞庭湖流域的平均径流量与淹没深度有小幅扩大,环洞庭湖、澧水及湘江流域的雨洪风险 区增长相对明显,变化面积为465.21hm<sup>2</sup>,占风险区变化总面积的83.72%,沅水上游高风险区增长最为明显; 2000—2010年环洞庭湖与湘江下游的平均径流量与淹没深度出现了较小幅度的增长,湘江下游高风险区有 较大幅度增长,增加了1692.18hm<sup>2</sup>,沅水下游、资水上游及环洞庭湖的低风险区有了一定幅度的扩大,该时期 流域洪涝风险上升;2010—2020年大部分流域的平均径流量与淹没深度均有上升,以湘江、资水上游、沅水上 游最为突出,湘江与环洞庭湖流域高风险区面积激增,增加了3219.75hm<sup>2</sup>,该时期流域洪涝风险进一步加剧。

洞庭湖流域雨洪径流过程的特征也呈现明显的空间异质性,从模拟结果来看:各子流域中环洞庭湖、湘江 及资水流域的平均径流量与淹没深度较高,环洞庭湖、湘江及资水流域的高风险区面积占比相对较大,环洞庭 湖、湘江及澧水流域的中低风险区面积占比相对较高,沅水流域各指标均相对较低。总的来看,流域洪涝风险 整体呈现出东高西低的特征,该洪涝风险模拟结果与上述源汇景观模型对洪涝风险的评估结果具有一致性。 3.4 雨洪径流过程对源汇景观格局的响应

由相关性统计分析可知(图6),LWLI、LWLI.E、LWLI.D及LWLI.S与径流量、淹没深、各风险区占比均呈显著的正相关关系,表明源汇景观在相对高程、坡度、距离上的空间分布格局对雨洪径流过程存在影响;雨洪径流过程指标与流域源景观占比呈显著正相关,除中风险区占比与草地间无显著相关关系外,雨洪径流过程 各指标与汇景观中林地与草地的占比均呈显著负相关,但与汇景观中耕地的占比呈正相关,这说明耕地在各流域内的空间分布较不合理,容易使流域的洪涝风险上升,引发洪涝灾害。综上雨洪径流过程对源汇景观组



**Fig.6** Correlation analysis between source-sink landscape patterns and stormwater runoff processes LWLI:源汇景观空间负荷对比指数;LWLI.E:高程负荷比;LWLI.D:距离负荷比;LWLI.S:坡度负荷比

http://www.ecologica.cn

成及其在高程、坡度、距离上的空间分布格局具有显著的响应,因此修正的源汇景观模型可运用于流域的洪涝 风险评价。

#### 4 结论与讨论

#### 4.1 讨论

本研究将源汇景观模型修正后运用于流域洪涝风险评价,借助传统的洪涝风险评估模型证明了新模型的 可行性,评估结果对于洪涝风险管控有指导意义。修正的源汇景观模型能够将影响雨洪径流的关键因子与基 于脆弱性划分的源汇景观格局相结合,通过比较分析源汇景观在相对高程、坡度及距离上的空间分布,来评估 解释流域的洪涝风险。该模型的优点在于不受空间尺度限制<sup>[14]</sup>,弥补传统研究评估数据资料难以获取、评价 指标体系主观性强的不足<sup>[4]</sup>;通过对比 LWLI.E、LWLI.S 及 LWLI.D 明确区域源汇景观空间配置的优化重点。 以本研究为例,洞庭湖流域 LWLI.D 相对较高,应调整传输距离较近的源景观空间布局,使汇景观尤其是耕地 合理地向流域出口趋近,充分发挥其消纳雨水的能力;LWLI.E 与 LWLI.S 随时间增长较快,应控制源景观的 扩张速率与方向,增强其外排雨水的能力。但该模型缺点在于必须基于子汇水区的划分来识别不同汇水区之 间的洪涝风险差异,无法判断同一汇水区内部洪涝风险差别<sup>[19]</sup>。

同时本研究存在以下不足需要进一步完善:首先,新模型主要考虑了地形、与水体距离、人类活动强度等 影响洪涝关键因子,忽略了气候不确定性<sup>[41]</sup>、水利设施空间布局<sup>[42]</sup>等其他因子的影响。其次,本研究将源景 观定义为脆弱性较高的建设用地,未考虑建设用地内人口密度、地区生产总值、人口年龄组成比例、防灾减灾 能力等指标差异<sup>[43]</sup>,后续可基于这些指标进一步提高模型评估的准确性。

#### 4.2 结论

本文创新性地将源汇景观模型修正后运用于洪涝风险评估,基于景观生态学格局与过程原理探究了洞庭 湖流域洪涝风险的时空演变特征及原因,揭示了源汇景观空间格局对雨洪径流过程的影响,为流域洪涝风险 评估提供新方法,对流域洪涝防治具有重要意义。研究结果表明:①40年间流域洪涝风险逐渐提高,主要原 因在于源景观大幅上升,汇景观持续下降,汇景观向源景观转变更集中于高程较低且距离流域出口较近的区 域;②洞庭湖流域洪涝风险整体呈现出东高西低的特征,湘江与环洞庭湖流域风险较高,资水流域次之,澧水 与沅水流域最低,风险水平相似的流域源汇景观格局也具有相似性;③新模型评估结果与传统模型模拟结果 相契合,LWLI、LWLI.E、LWLI.S、LWLI.D 与雨洪径流过程各特征指标均呈显著正相关关系,模型适用于流域 洪涝风险评价,可运用于源汇景观布局优化,进而有效降低流域的洪涝风险。

#### 参考文献(References):

- [1] 徐宗学,陈浩,任梅芳,程涛.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展.水科学进展,2020,31(5):713-724.
- [2] 陈娜, 向辉, 马伯, 黎璟玉. 基于韧性理念的中国城市雨洪管理研究热点与趋势. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3137-3145.
- [3] Najibi N, Devineni N. Recent trends in the frequency and duration of global floods. Earth System Dynamics, 2018, 9(2): 757-783.
- [4] Li C L, Sun N, Lu Y H, Guo B Y, Wang Y, Sun X K, Yao Y K. Review on urban flood risk assessment. Sustainability, 2022, 15(1): 765.
- [5] Lyu H M, Sun W J, Shen S L, Arulrajah A. Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach. The Science of the Total Environment, 2018, 626: 1012-1025.
- [6] 张会,李铖,程炯,吴志峰,吴艳艳. 基于"H-E-V"框架的城市洪涝风险评估研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(2): 175-190.
- [7] 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.
- [8] Choubin B, Moradi E, Golshan M, Adamowski J, Sajedi-Hosseini F, Mosavi A. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. The Science of the Total Environment, 2019, 651 (Pt 2): 2087-2096.
- [9] Darabi H, Choubin B, Rahmati O, Torabi Haghighi A, Pradhan B, Kløve B. Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: a comparative study of machine learning techniques. Journal of Hydrology, 2019, 569: 142-154.
- [10] 陈利顶,刘洋,吕一河,冯晓明,傅伯杰.景观生态学中的格局分析:现状、困境与未来.生态学报,2008,28(11):5521-5531.
- [11] 吕英烁,王瑶函,郑曦. 基于 SWAT 模型的北京平原区森林景观格局对雨洪减缓的影响研究. 生态学报, 2021, 41(10): 4036-4051.
- [12] Wu J S, Sha W, Zhang P H, Wang Z Y. The spatial non-stationary effect of urban landscape pattern on urban waterlogging: a case study of

Shenzhen City. Scientific Reports, 2020, 10(1): 7369.

- [13] 黎贝, 焦胜, 周敏, 周媛. "城市-街区"尺度下绿地景观格局对雨洪滞蓄效能的影响研究进展. 应用生态学报, 2024, 35(2): 533-542.
- [14] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,巩杰.基于"源-汇"生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数.生态学报,2003,23(11): 2406-2413.
- [15] 许芬,周小成,孟庆岩,张颖.基于"源-汇"景观的饮用水源地非点源污染风险遥感识别与评价. 生态学报, 2020, 40(8): 2609-2620.
- [16] Wang J L, Qiu C H, Qin S Y, Yao S W, Chen J, Lei S H, Tan S J, Zhou B J. Effects of "source-sink" landscape on spatiotemporal differentiation of phosphorus output in multiple watersheds in mountainous areas based on the modified location-weighted landscape index. Ecological Indicators, 2024, 158: 111397.
- [17] Ma B J, Wu C G, Ding F X, Zhou Z X. Predicting basin water quality using source-sink landscape distribution metrics in the Danjiangkou Reservoir of China. Ecological Indicators, 2021, 127: 107697.
- [18] 张亚娟,李崇巍,胡蓓蓓,谢慧君,宋爱云.城镇化流域"源-汇"景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为例.生态学报,2017,37(7):2437-2446.
- [19] Chen A L, Zhao X F, Yao L, Chen L D. Application of a new integrated landscape index to predict potential urban heat islands. Ecological Indicators, 2016, 69: 828-835.
- [20] 周添惠,杨磊,赵方凯,李旭春,邓居礼,李敏,黄勇,段兴武. 渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 58-66.
- [21] 王金亮,谢德体,倪九派,邵景安.基于源汇景观单元的流域土壤侵蚀风险格局识别.生态学报,2017,37(24):8216-8226.
- [22] Yu S Y, Kong X S, Wang Q, Yang Z W, Peng J. A new approach of Robustness-Resistance-Recovery (3Rs) to assessing flood resilience: a case study in Dongting Lake Basin. Landscape and Urban Planning, 2023, 230: 104605.
- [23] 李景刚,李纪人,黄诗峰,李小涛. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析. 资源科学,2010,32(6): 1103-1110.
- [24] 张晓艳, 刘梅先. 洞庭湖流域降雨和降雨极值时空分布及风险变化研究. 湖南师范大学自然科学学报, 2016, 39(2): 10-15.
- [25] 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊. 城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系. 环境科学, 2020, 41(5): 2264-2271.
- [26] Chen L D, Tian H Y, Fu B J, Zhao X F. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale. Chinese Geographical Science, 2009, 19(1): 37-45.
- [27] 倪丽丽,刘晔,李经纶,李云玉.基于生态水文调节服务的石家庄雨涝灾害供需匹配分析与街区规划干预.生态学报,2024,44(13): 1-14.
- [28] 喻丁一,冉静,许乙青.城市新区生态雨洪调蓄空间规划方法研究.城市发展研究,2022,29(4):78-86.
- [29] Liu J, Jiang W, Zhan W, Zhou Ji. Processes of SCS model for hydrological simulation: a review. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(2): 120-124.
- [30] Maidment D, Engineer E. Handbook of Hydrology. New York, USA: Mcgraw-Hill Book Company, 1992.
- [31] 王瑾杰,丁建丽,张成. 普适降雨-径流模型 SCS-CN 的研究进展. 中国农村水利水电, 2015(11): 43-47, 54.
- [32] 董文涛, 程先富, 张群, 赵阳, 韩平. SCS-CN 模型在巢湖流域地表产流估算中的应用. 水土保持通报, 2012, 32(3): 174-177, 187.
- [33] 焦胜,操婷婷,牛彦合,关惠嫦. 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. 水土保持通报, 2023, 43(5): 195-202.
- [34] 董宏杰, 董文杰, 曹迎春, 张艺凡. 基于 SCS-CN 模型的暴雨情景下河南省历史遗存淹没风险评价. 气候变化研究进展, 2023, 19(6): 738-748.
- [35] 冯憬, 卫伟, 冯青郁. 黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正. 生态学报, 2021, 41(10): 4170-4181.
- [36] Kumar A, Kanga S, Taloor A K, Singh S K, Đurin B. Surface runoff estimation of Sind River Basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. HydroResearch, 2021, 4: 61-74.
- [37] 黄清雨,董军刚,李梦雅,王军.暴雨内涝危险性情景模拟方法研究——以上海中心城区为例.地球信息科学学报,2016,18(4): 506-513.
- [38] 陈思,杨胜梅,马琨. 基于 SCS 和 GIS 的不同降雨情景城市内涝过程模拟方法. 长江科学院院报, 2019, 36(11): 16-20.
- [39] Badilla coto E. Flood hazard, vulnerability and risk assessment in the city of Turrialba, Costa Rica. The Netherlands: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation, 2002.
- [40] 彭建,魏海,武文欢,刘焱序,王仰麟. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例. 生态学报, 2018, 38(11): 3741-3755.
- [41] Salman A M, Li Y. Flood risk assessment, future trend modeling, and risk communication: a review of ongoing research. Natural Hazards Review, 2018, 19(3): 04018011.
- [42] Xu A N, Yang L E, Yang W B, Chen H. Water conservancy projects enhanced local resilience to floods and droughts over the past 300 years at the Erhai Lake Basin, Southwest China. Environmental Research Letters, 2020, 15(12): 125009.
- [43] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,杨聪辉,王峥,黄婷,马经广.城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述.水资源保护,2020,36(6):1-6,17.