

DOI: 10.20103/j.stxb.202308181787

吴军,徐建刚,尹海伟,沈舟,明昊霖,曾俊.基于雨洪过程模拟与海绵体建设适宜性评价的城市适应性规划方法——以长汀县汀江上游流域为例.生态学报,2024,44(16):7051-7062.

Wu J, Xu J G, Yin H W, Shen Z, Ming H L, Zeng J. Urban adaptive planning methods based on simulation of stormwater process and evaluation of sponge construction suitability in the upper Ting River basin in Changting county. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7051-7062.

基于雨洪过程模拟与海绵体建设适宜性评价的城市适应性规划方法

——以长汀县汀江上游流域为例

吴 军,徐建刚*,尹海伟,沈 舟,明昊霖,曾 俊

南京大学建筑与城市规划学院,南京 210093

摘要:统筹考虑流域海绵体的空间布局及其与雨洪过程的功能耦合关系是解决城市雨洪灾害问题的重要途径。以长汀县汀江上游流域为例,分别使用 SWAT 和 SCS 模型模拟雨洪径流和淹没过程,利用 InVSET 模型评价海绵体建设适宜性,进而对二者的相互关系进行深入研究,提出基于雨洪过程模拟和海绵体建设适宜性评价的城市适应性规划方法。结果表明:(1)构建的汀江上游流域 SWAT 和 SCS 模型可以准确识别出研究区的雨洪产流区、汇流廊道、汇流节点和淹没区域,并反映其空间分布特征;基于 InVEST 模型结合雨洪调蓄、水源涵养、土壤保持和水质净化等指标实现了定量刻画海绵体建设适宜性的目标,集成雨洪过程模拟与海绵体建设适宜性评价为重构流域海绵系统空间格局提供了一种新的方法。(2)长汀县中心城区低雨洪安全格局面积占其安全格局总面积的 37.51%,呈现出沿河道集中分布的特点,使中心城区面临较大的雨洪风险;海绵体建设适宜区域呈现出不均匀分布的特征,高适宜区域占流域总面积的 7.91%,集中分布在中心城区北面的大片农田中。通过优化研究区海绵空间格局,并依据地块使用性质设定差异化的管控目标,实现减缓研究区雨洪风险的目标,为海绵城市规划实践提供参考依据。

关键词:雨洪过程模拟;海绵体建设适宜性;海绵系统空间格局;适应性规划方法

Urban adaptive planning methods based on simulation of stormwater process and evaluation of sponge construction suitability in the upper Ting River basin in Changting county

WU Jun, XU Jiangang*, YIN Haiwei, SHEN Zhou, MING Haolin, ZENG Jun

School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Rapid urbanization has a tremendous impact on the water cycle, causing hydrological perturbations that are now a major contributor to induced urban stormwater disasters and posing significant planning and management difficulties for sustainable cities. Integrated consideration of the spatial layout of watershed sponges and their functional coupling relationship with the stormwater process is an inevitable solution to the problem of urban stormwater disasters. This paper takes the upper Ting River basin in Changting County as the study area, The SWAT and SCS models were utilized to simulate the rainfall-runoff and stormwater inundation processes, and used the InVSET model to evaluate the suitability of sponge construction. An in-depth study of the coupling relationship between them was conducted to propose an adaptive planning method for sponge cities. The results show that: (1) The SWAT and SCS models constructed in the upper Ting

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52178043, 51778278, 51478217)

收稿日期:2023-08-18; 网络出版日期:2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjg129@sina.com

River basin can accurately identify the water yield areas, stormwater catchment corridors and stormwater catchment nodes, and reflect their spatial distribution characteristics. Based on the InVEST model combined with the indicators of stormwater storage, water conservation, soil retention, and water yield to realize the goal of quantitatively portraying the suitability of sponge construction, the integration of stormwater process simulation and the evaluation of the suitability of sponge construction provides a new method for reconstructing the sponge system spatial pattern of the basin. The area of low safety pattern in the central city of Changting county accounts for 37.51% of the total, showing a concentrated distribution along the river, which exposes the central city to a greater risk of stormwater disasters; The suitable area for sponge construction shows an uneven distribution, with the highly suitable area accounting for 7.91% of the total area of the basin, concentrating in the large area of farmland to the north of the central city. In this work, the stormwater process simulation was used to extract the stormwater suitability construction area, which allowed for the reconstruction and optimization of the upper Ting River basin's sponge system's spatial pattern. The spatial overlap of the stormwater security pattern area and sponge construction suitable area only accounts for 18.15% of the study area. In order to effectively mitigate stormwater risks, the sponge ecological area and sponge functional area are also re-demarcated. Differentiated control objectives are set based on the type of land use, and an adaptive planning methodology for sponge cities with structural and functional nesting is developed, serving as a basis for reference for sponge city planning practice.

Key Words: simulation of rainfall-runoff processes; sponge construction suitability; spatial pattern of sponge systems; adaptive planning methods

2010年以来,我国受城市洪涝影响,已造成经济损失2657.14亿美元,占有所有灾害损失的54.99%,仅2022年就有5585.3万人次遭受雨洪灾害^[1-2]。为此,我国提出海绵城市建设理念,其核心是利用各种低影响开发设施控制年径流总量,为规划应对雨洪灾害,建设自然和谐的新型城市提供研究框架^[3]。然而,快速城市化引起的水文扰动深刻地改变了流域水循环过程,传统的规划减灾方法日益失效^[4-6],亟需协调流域、城市和场地等空间尺度,优化流域海绵系统,综合、可持续地解决雨洪问题的海绵城市适应性规划方法。

已有研究中,开展雨洪模拟、海绵体建设适宜性评价、空间识别与可视化表达等已成为实现流域尺度雨洪管理的重要基础^[7]。其中,基于水文模型的雨洪过程模拟是学界最常用的方法^[8],例如,Liu等、宋晓猛等利用SWAT、MIKE-SHE等在模拟流域雨洪过程的复杂机理中,评价了自然资源要素对水循环的影响^[9-10],焦胜等、丁锶溪等基于SCS-CN水文模型和GIS空间耦合方法得到雨洪淹没区和雨洪廊道^[11-12]。在海绵体建设适宜性方面,开发指标综合评估与概念模型并结合熵权法、主成分分析法和层次分析法等运用较为广泛^[13-15]。此外,尽管近年来InVEST模型在海绵体建设适宜性评估方面的应用不断增多^[16],并在统筹流域山水林田湖草等海绵体要素,综合分析流域雨洪调蓄、土壤保持等能力,以空间显化的方式指导流域海绵体资源优化配置上具有优势。但是,由于流域空间和形态结构复杂多变^[17],单一的雨洪过程模拟或海绵体建设适宜性分析方法,无法全面有效地辨识对关键性水文过程有重要意义的位置空间^[18-19]。因此,通过多模型耦合的技术框架,研究分析雨洪过程可持续性和海绵体建设合理性的关系,进而重构流域海绵空间格局,以指导并优化现有城市适应性规划方法是一种创新思路,有待深入研究^[20-23]。

鉴于此,本文构建了基于SWAT、SCS和InVEST模型的集成技术框架,旨在应用于研究汀江上游流域水系、植被、土壤等海绵空间资源要素对雨洪过程的影响机制;从水安全、水资源、水生态和水环境4个方面定量评价海绵体建设适宜性及制约因素;进而建立起适应流域雨洪过程的海绵空间格局规划优化路径。研究成果有利于指导雨洪管控分区划分和海绵体基础设施选址,弥补不同海绵调蓄系统之间的结构与功能差异性,设定管控目标以减缓和适应流域雨洪风险,为系统化全域推进长汀县海绵城市建设提供规划路径参考^[24]。

1 研究区概况

汀江上游流域总面积为472.62km²,由汀江河流域、铁长河流域、郑坊河流域、七里河流域和涂坊河流域

组成(图 1);流域内地形以陡峭的低山、丘陵为主,35°以上的陡坡占流域总面积的 74.55%;森林覆盖率达 83.47%,年平均降水量 1711mm。然而,作为著名的国家历史文化名城,长汀县中心城区因位于流域下游的盆地中、地势平坦,在极端暴雨情景下极易受到洪涝灾害的影响。该县于 2018 年启动了海绵城市专项规划的编制工作,以期建立具有长汀特色的城市防洪排涝体系,保障城市安全发展。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文采用的数据主要包括土地利用、数字高程模型、土壤类型和土壤属性数据、气象和气候数据、水文数据等,数据来源及预处理见表 1。

2.2 研究思路与方法

首先,通过模拟不同降雨重现期下汀江上游流域的雨洪径流和淹没过程,构建基于雨洪过程的安全格局;然后,从保障水安全、涵养水资源、保护水生态、净化水环境等角度,分别计算雨洪滞留、水源涵养、土壤保持、水质净化等四个集成评价指标,开展海绵体建设适宜性评价;最后,在流域尺度综合视角下,建立符合水自然过程的海绵空间格局,连通流域河湖水系、湿地水库以及一些低洼地和城市 LID 设施共同形成梯级雨洪径流管控体系。整体研究框架如图 2 所示。

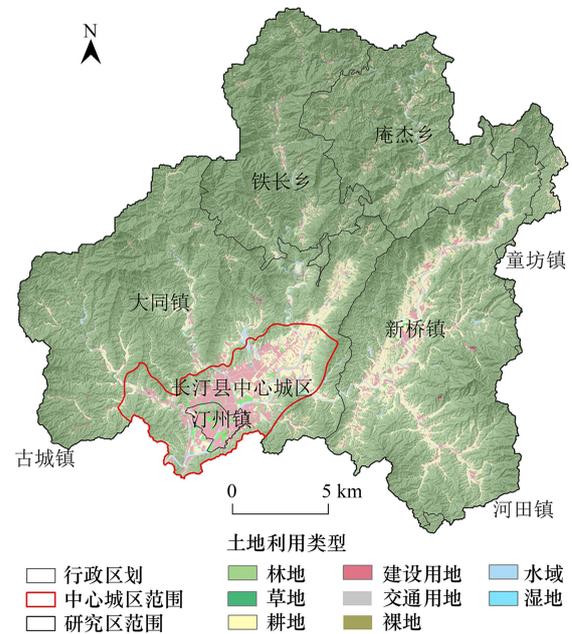


图 1 汀江上游流域和长汀中心城区

Fig.1 Map showing the study area (upper Ting River basin and Changting Center City)

表 1 研究数据来源

Table 1 Data sources

数据类型 Data types	数据来源 Data sources	数据预处理 Data preprocessing
土地利用 Land use	第三次全国国土调查成果矢量数据	根据研究区实际情况,结合模型建模需要,将三调数据中的地类图斑重分类并转换为栅格数据。获取林地、草地、耕地、建设用地、交通用地、裸地、水域和湿地 8 种土地利用类型。
数字高程模型 Digital elevation model	福建省测绘地理信息局 1:5 万地形数据	利用 ArcGIS 对其进行裁剪、投影、转换、重采样等操作,生成模型所需 DEM 数据。
土壤类型 Soil type	长汀县第二次土壤调查矢量数据	研究区内土壤类型分为 8 种,其中红壤、黄壤、水稻土合计占 90% 以上,土壤质地多为黏土和沙壤土。利用通用土壤流失方程 (USLE) 方程和 SPAW (Soil Plant Air Water) 土壤水特性软件计算土壤湿密度 (SOL_BD)、有效持水量 (SOL_AWC) 和饱和导水率 (SOL_K) 并建立土壤属性表。
气象数据 Meteorological data	国家气象科学数据中心/中国地面气候资料日值数据集 (V3.0)	2008—2020 年长汀 (58911) 气象站逐日降水、温度、风速、相对湿度和太阳辐射等构建气候属性数据库。其中,根据 Penman-Monteith 公式计算出 2020 年的年均潜在蒸散,再利用 Anusplin 气象插值工具将 2020 年的年平均降水及年平均潜在蒸散插值为空间栅格数据。
水文数据 Hydrological data	长汀县观音桥水文站实测数据	观音桥水文站 2008—2020 年实测日径流数据。

2.2.1 汀江上游流域雨洪过程模拟

汀江上游流域降雨和下垫面空间分布不均匀,流域对径流具有明显的调蓄和滞留作用,因此采用分布式水文模型 SWAT 描述流域水文循环的物理过程。研究使用 DEM 数据与实测水系数据对子流域进行划分,共生成 172 个子流域,并划分为 1353 个水文响应单元 (HRUs)。研究区每年 6 月的降水量最大,雨洪发生频次

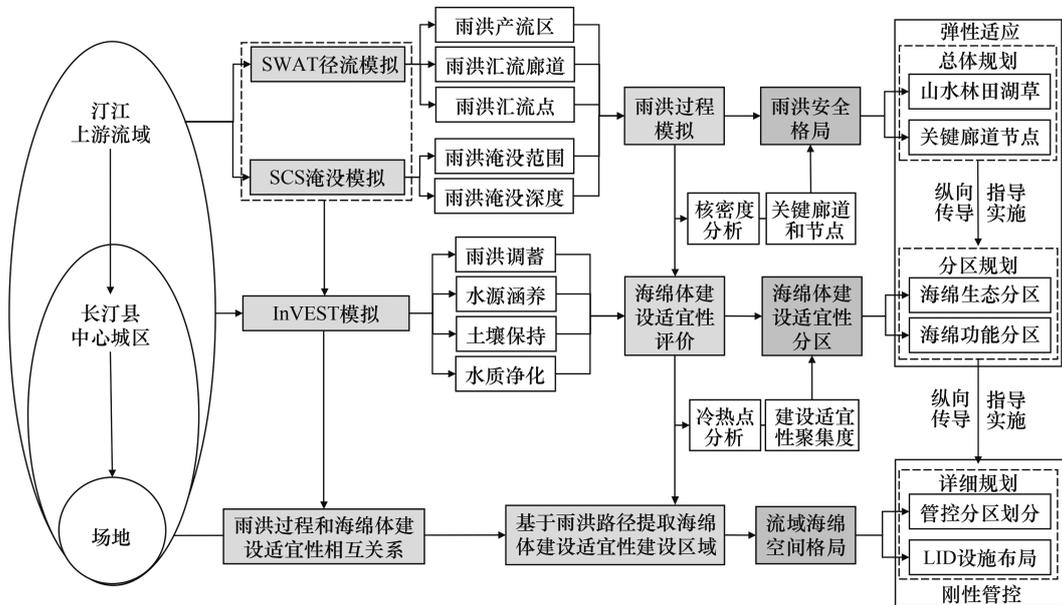


图2 研究思路与技术框架

Fig.2 Research framework

SWAT:流域分布式水文模型;SCS:径流曲线数模型;InVEST:生态系统服务功能综合估价和权衡得失评估模型

高,且 SWAT 模型在月尺度上的模拟精度最高,因此选择 2020 年 6 月的 HRUs 输出参量进行雨洪径流过程模拟与分析,进行 SWAT 分析前,对模型进行了参数率定与验证。

运用水量平衡法计算流域总产水量,选择 Penman-Monteith 法计算潜在蒸散发^[25],采用马斯京根法演算各个子流域的河道汇流量,最后求得流域总出口的汇流量^[26],即:

$$WYLD = \sum_{i=1}^n SURD_i + LATQ_i + GWQ_i \quad (1)$$

式中,WYLD 为流域总产水量(mm);SURD_i 为第 i 个 HRU 的地表净流量(mm);LATQ_i 为第 i 个 HRU 产生的壤中流(mm);GWQ_i 为第 i 个 HRU 产生的基流(mm)。

汀江流域降雨一般为单峰,历时 6—24 小时。利用长汀县暴雨强度公式,采用芝加哥雨型生成长汀县降雨过程,降雨历时设置为 12h,时间步长为 10min,雨峰相对位置为 0.375。构建基于 SCS 模型的分布式水文模型用于估算不同重现期下的汀江流域雨洪流量^[27]。SCS 模型以水量平衡方程为基础,模型原理和参数设置见参考文献^[28],本研究在构建 SWAT 模型基础上提取不同 HRUs 的无量纲参数径流曲线数值(CN),以子流域为单元加权平均,同时参照相关研究步骤优化各子流域的 CN 取值^[29]。在此基础上,利用体积法概念和 8 邻域种子蔓延算法,基于 GIS 平台模拟流域雨洪淹没过程,选取雨洪溢流点为种子点,考虑栅格之间的物理连通性,循环读取其周围 8 个栅格单元高程值,直到淹没范围内的洪水总量 V_i 与入侵洪水水量差值满足误差要求时停止运算,即得到当前洪水水位高程下的洪水淹没范围和淹没水深^[30—32],具体计算过程如下:

$$V_i = \sum_{i=1}^m \text{pixel.area} \times (H_0 + x - H_i) \quad (2)$$

式中, V_i 为当前淹没范围内的洪水总量(m^3);pixel.area 为栅格像元的面积(m^2); H_0 为种子点的高程值(m); x 为洪水水位变量,本研究中每次增加 0.01m; H_i 为淹没栅格像元的高程(m); m 为淹没栅格的数量。

2.2.2 汀江上游流域海绵体建设适宜性评价

本文采用 InVEST 模型定量估算汀江上游流域雨洪滞留、水源涵养、土壤保持和水质净化能力。利用 InVEST 城市雨洪滞留模块评估不同土地利用类型的雨水滞留量和滞留效率,并且考虑栅格附近的不透水表

面(道路等)对其排水连通性的影响,对模型计算结果进行修正,参考 InVEST 模型用户手册确定模型的各项参数^[33];水源涵养使用 InVEST 的产水量模块计算得到,计算过程见参考文献^[34],在此基础上,根据 DEM 计算径流路径地形指数,利用土壤饱和导水率和流速系数计算径流在栅格上的停留时间,对产水量进行修正获得水源涵养量^[35]。其中降水量和蒸散量数据为利用 Anusplin 气象插值工具生成的 2020 年的年平均降水及年平均潜在蒸散空间栅格数据^[36],土壤深度数据与植被根系深度数据通过参考文献获取^[37]。植被可利用含水量数据采用周文佐^[38]提出的方法计算得出。水源涵养量计算过程如下:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{Velpcity}\right) \times \min\left(1, \frac{0.9 \times TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{soil}}{300}\right) \times Y_{ji} \quad (3)$$

式中,WR 为水源涵养量(mm);Velpcity 为流速系数,无量纲,参考傅斌^[39]的研究结果; K_{soil} 为土壤饱和导水率(cm/d),根据土壤理化性质,利用美国农业部开发的 SPAW 土壤水特性软件计算得到。TI 为地形指数,可由 DEM 计算得到:

$$TI = \log_{10}\left(\frac{\text{Drainage_Area}}{\text{Soil_Depth} \times \text{Percent_Slope}}\right) \quad (4)$$

式中,Drainage_Area 为集水区栅格数量,无量纲;Soil_Depth 为土壤深度(mm);Percent_Slope 为坡度百分比。

土壤保持能力由 InVSET 的泥沙保留模块计算获取,各参数根据相关参考文献设置^[40]。其中,降水侵蚀力因子采用 Wischmeier^[41]等经验公式计算获得;土壤可蚀性因子通过 Williams 等^[42]方法计算;坡度坡长因子通过 DEM 分析获取;植被覆盖与水土保持因子根据模型说明获得^[43-46];水质净化能力利用 InVEST 的水质净化模块计算,模型采用质量平衡法^[47]。由于研究区尚无 N 和 P 输出系数的数据,依据自然环境的相似性原则,参照文献确定研究区 N、P 输出系数和植被滞留效率^[48-50]。

基于 InVEST 模型计算得出研究区雨洪调蓄、水源涵养、土壤保持、水质净化指标值,利用 GIS 空间分析工具进行归一化处理;然后通过加权平均,得到研究区海绵城市建设适宜性评价分值,并按自然间断点分级法重分类为高、中、低三种适宜性等级^[51]。由于 InVEST 模型四个模块的输入数据和计算指标存在相互嵌套关系,因此,采用相同权重计算。海绵城市建设适宜性评价模型为:

$$f_{CSI} = \frac{USR_n + WY_n + SDR_n + NDR_n}{4} \quad (5)$$

式中, f_{CSI} 为海绵城市建设适宜指数;USR_n 为归一化雨洪调蓄量;WY_n 为归一化水源涵养量;SDR_n 为归一化土壤保持量;NDR_n 为归一化水质净化量。

基于以上分析,探索雨洪过程路径与海绵体建设适宜性区域的空间分布特征,使用核密度分析法判断流域雨洪淹没高风险区,利用 G_i^* 统计方法探查流域雨洪适宜区域的高值或低值在空间上的聚集情况,进一步指导划定流域海绵功能区与海绵生态区,重构流域海绵系统空间格局,提升流域应对雨洪的弹性适应能力。

3 结果分析

3.1 汀江上游流域雨洪过程模拟结果分析

如图 3 所示,汀江上游流域的雨洪高风险区域沿河道蔓延分布,低水平安全格局区域在长汀县中心城区和新桥镇镇区两个城镇化较高的地区呈现集中分布,由此可知,城市化地区的雨洪风险显著高于其他周边区域。从产流和汇流两个阶段定量刻画雨洪径流过程,其中产流部分包括重点产水区域,汇流部分包括主要汇流廊道和汇流节点等。从雨洪产流区、汇流廊道和汇流节点的五个分类等级看,产水量最高的区域位于流域北部的山谷中,降雨时雨水汇聚于此,将产生严重的洪涝风险,威胁下游安全;汇流廊道方面,汀江上游流域汇流廊道总长度为 345.13km,整个流域中一级和二级汇流廊道较多,揭示出现有水系的河道断面较窄,河道行洪能力差;汇流节点方面,汀江河小流域中三级以上汇流节点的数量占整个研究区三级以上汇流节点的 81%,其中长汀县主城区汀江河小流域和铁长河小流域交界处分布有流域唯一的五级汇流节点,给城区安全

带来了较大的水安全隐患。

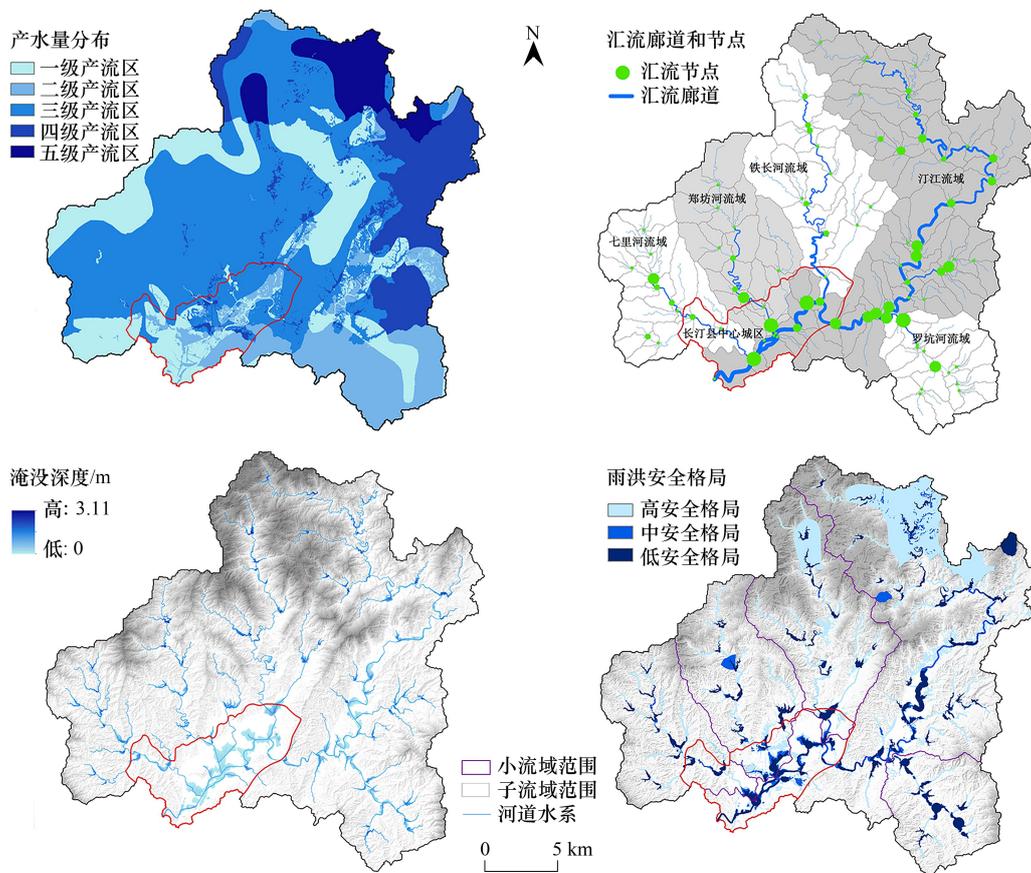


图3 汀江上游流域雨洪径流和淹没过程分析

Fig.3 Analysis of rainfall-runoff and stormwater inundation processes in the upper Ting River basin

在汀江上游流域洪水淹没图中(图3)以长汀县主城区观音桥水文站所在位置为例,统计降雨量、雨峰、淹没体积、淹没面积和淹没高程等计算结果如表2所示,在重现期为20年一遇以下时,随着降雨量的增加,洪水淹没面积明显变大,重现期为20年一遇以上时,洪水淹没面积变化不明显。

表2 不同重现期下的淹没过程模拟结果

Table 2 Simulation results of inundation process under different return periods

重现期 Return period/a	降雨量 Precipitation/mm	雨峰 Rainy peak/ (mm/h)	径流量 Runoff volume/ (10^6 m^3)	淹没面积 Inundation area/ km^2	淹没高程 Inundation elevation/m
10	219.92	34.52	103.28	20.89	309.16
20	242.91	38.13	114.14	22.11	309.61
30	256.36	40.24	120.50	22.78	309.85
50	273.30	42.90	128.50	23.59	310.10
100	296.29	46.51	139.37	24.66	310.37

结合坑塘水库、水源地等指标(表3),构建汀江上游流域的雨洪安全格局(图3)。其中高安全格局区域面积为 57.43 km^2 ,中安全格局区域面积为 8.74 km^2 ,低安全格局区域面积为 19.88 km^2 。长汀县中心城区低安全格局区域的面积为 4.88 km^2 ,占其安全格局总面积的 37.51%,说明中心城区面临着较大的水安全风险。另外,城市化程度越高的地区,其安全格局水平越低。

表 3 汀江上游流域雨洪安全格局构建指标

Table 3 Indicators for constructing stormwater security patterns in the upper Ting River basin

安全格局等级 Security pattern levels	高安全格局 High security pattern	中安全格局 Medium security pattern	低安全格局 Low security pattern
雨洪汇流廊道 Stormwater catchment corridor	河道断面流量 0—5.70m ³ /s	河道断面流量 5.70—16.29m ³ /s	河道断面流量 16.29—32.70m ³ /s
雨洪汇流节点 Stormwater catchment node	子流域汇流量 0—161.05mm	子流域汇流量 161.05—205.92mm	子流域汇流量 205.92—259.33mm
雨洪淹没区 Stormwater inundation area	淹没深度 0—0.3m	淹没深度 0.3—0.6m	淹没深度 0.6m 以上
主要产流区 Main water yield area	径流系数 0.85—0.9	径流系数 0.9—0.95	径流系数 0.95 以上
坑塘湿地 Pothole wetland	调蓄面积 1.20—3.48hm ²	调蓄面积 0.41—1.20hm ²	调蓄面积 0.04—0.41hm ²
水库 Reservoir	最大库容量 377.55—1040m ³	库容量 111.3—377.55m ³	库容量 10.0—111.3m ³
水源地 Water source	涵养面积 71.23—99.50hm ²	涵养面积 29.69—71.23hm ²	涵养面积 13.19—29.69hm ²

3.2 汀江上游流域海绵体建设适宜性评价与分析

分析得到汀江上游流域的海绵体建设适宜性评价结果如图 4 所示,数值越高的区域雨洪适应能力越高,越适合布置海绵体设施。结果显示高适宜性区域呈现出沿河湖水系分布的基本空间特征,低适宜性区域集中分布在城市建成区范围内。其中高适宜性区域面积为 37.31km²,中适宜性区域面积为 400.23km²,低适宜性区域面积为 34.12km²,分别占汀江上游流域总面积的 7.91%,84.86%,7.23%。本文得出的雨洪调蓄、水源涵养、土壤保持和水质净化等指标的计算结果如表 4 所示,通过统计发现,受土壤类型、植被结构、高程和坡度等的影响,各指标空间分布具有差异性。

表 4 汀江上游流域适宜性评价指标

Table 4 Indicators for evaluating the suitability of the Upper Ting River Basin

指标名称 Indicators	雨洪调蓄 Stormwater storage/mm			水源涵养 Water conservation/mm			水质净化 Water purification/kg			土壤保持 Soil conservation/t			
	流域名称	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
汀江小流域 Ting river sub-watershed		46.53	0	39.16	17.27	0.23	3.38	0.0213	0	0.0024	460.65	0	6.56
铁长河小流域 Tiechang river sub-watershed		45.47	0	41.67	13.17	0.26	3.67	0.0212	0	0.0019	509.55	0	8.09
郑坊河小流域 Zhengfang river sub-watershed		43.97	0	38.63	12.18	0.26	3.37	0.0205	0	0.0021	290.01	0	6.03
七里河小流域 Qili river sub-watershed		43.74	0	39.21	12.22	0.23	3.30	0.0199	0	0.0019	308.02	0	6.51
涂坊河小流域 Tufang river sub-watershed		43.08	0	39.88	12.01	0.25	3.19	0.0201	0	0.0022	204.12	0	5.78

流域整体雨洪调蓄能力一般,平均栅格雨洪调蓄量为 39.61mm,由于城市化地区不透水面的增加,导致雨水的滞留能力大幅降低,因此流域雨洪调蓄能力呈现出城市建成区偏低,森林和耕地较高的趋势。汀江上游流域丰富的植被覆盖对水源涵养和土壤保持起到了重要的作用,同时,水源涵养和土壤保持能力还受到坡度的影响,随坡度的增加呈增加趋势。因此,流域水源涵养和土壤保持呈现出了北部森林覆盖区域高,南部城市建成区低的特征,需加强城市化地区周边的水土流失治理。在水质净化方面,平均栅格单元 N、P 保持量为 0.0024kg,水质净化功能差,水质差,城市建成区和不透水面的 N、P 保持量接近 0,对城市化区域河道的水质造成了较大的污染。

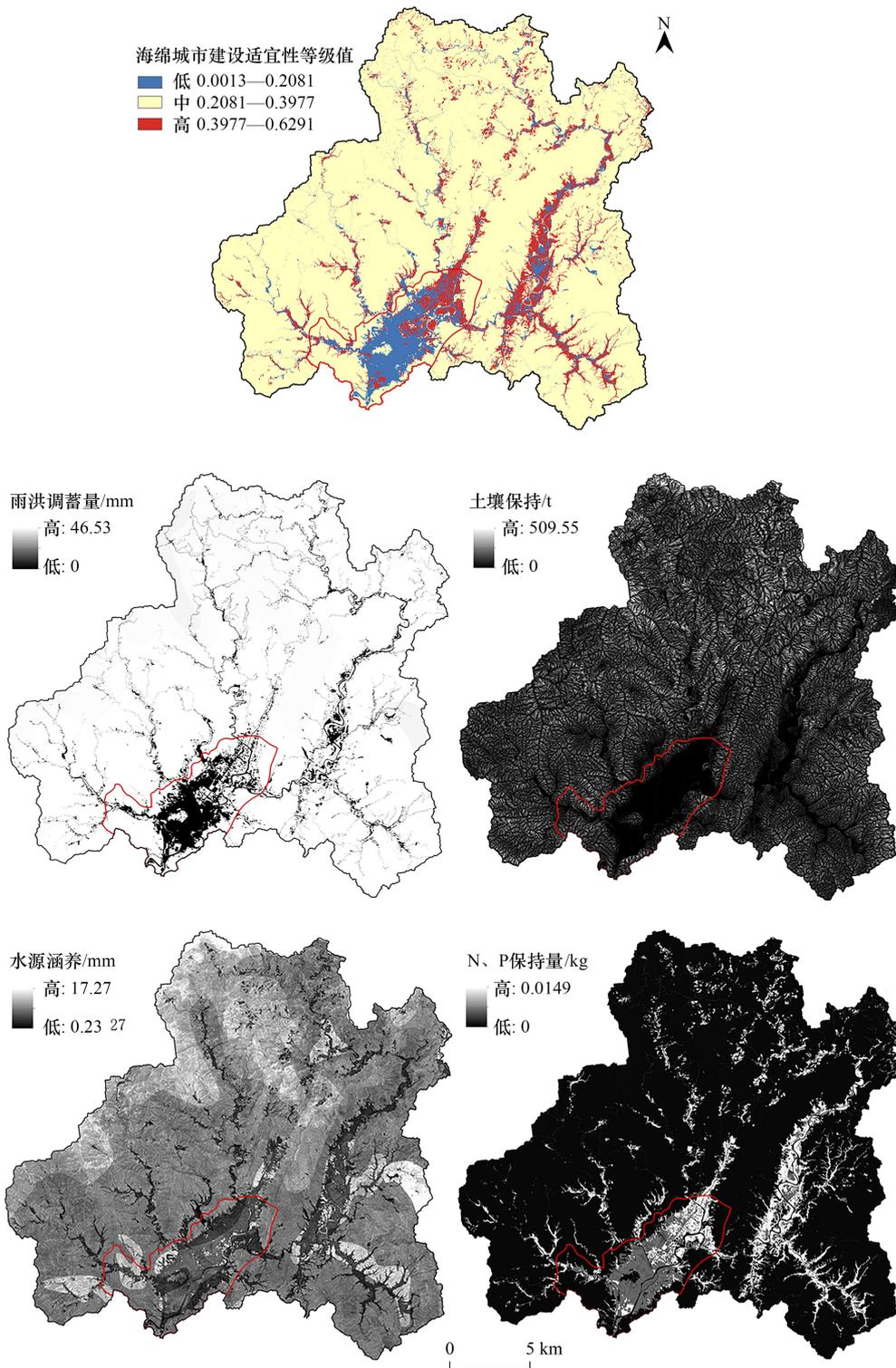


图 4 汀江上游流域海绵体建设适宜性分析

Fig.4 Analysis of the suitability of sponge construction in the upper Ting River basin

3.3 汀江上游流域雨洪过程和海绵体建设适宜区域空间分布特征分析

研究发现雨洪淹没风险最高的区域分布在流域山谷地区(图 5)。汀江上游流域山谷地区形成了很多“口袋型”的洼地和小盆地,遇暴雨时洪水会积聚于河道束窄地段。城市层面上,100 年一遇情景下,中心城区的

洪水淹没面积为 8.44km², 占其总面积的 18.53%, 中心城区沿河道多处发生洪涝灾害, 平均淹没深度为 0.99m, 最大淹没深度为 1.69m。核密度分析的结果显示, 雨洪灾害在中心城区的分布更为连续和集中, 这与城市化建设改变了自然水系廊道和下垫面性质有一定的关系, 强度较高的地区分布于郑坊河与汀江河交汇处以及北部铁长河与汀江河交汇处, 与雨洪径流过程模拟中划分的四级和五级汇流节点重合, 说明汇流量较大的节点更容易发生雨洪灾害。

流域海绵体建设适宜性等级的高值或低值在空间上的聚集情况如图 5 所示, 汀江上游流域海绵体建设适宜性冷热点区域占该区总面积的比例分别为: 极显著热点 9.25%、显著热点 8.43%、热点 5.13%、非显著点 55.73%、冷点 6.07%、显著冷点 20.12%、极显著冷点 1.33%。非显著点占总面积的一半以上, 冷点区面积略高于热点区面积。极显著热点区域主要沿汀江河、铁长河和涂坊河分布, 同时在中心城区和新桥镇等地区呈现出明显的连续性和集中分布特征, 这些地区适宜结合其周边用地情况布置流域型大海绵体设施。

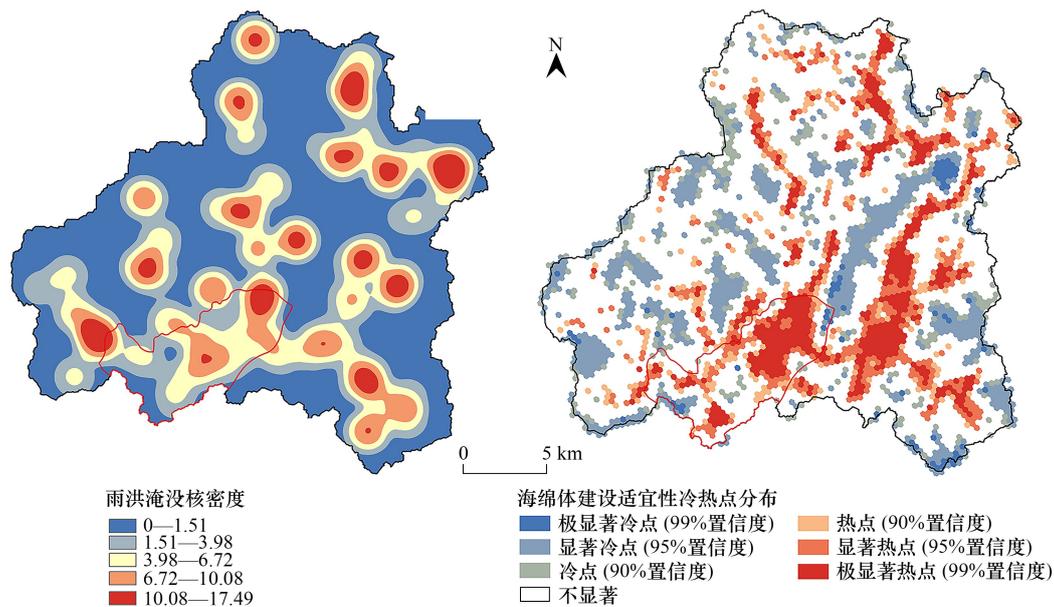


图 5 汀江上游流域雨洪淹没核密度和海绵体建设适宜性冷热点分析

Fig.5 Kernel density of stormwater inundation and analysis of cold hotspots for sponge construction suitability in the upper Ting River basin

3.4 基于雨洪过程模拟和海绵体建设适宜性分析的汀江流域海绵空间格局重构

将高、中、低三种安全格局与海绵体建设适宜性评价结果进行叠加分析结果如图 6 所示, 二者在空间上重合的面积占研究区总面积的 18.15%, 其中低安全格局-高适宜性、低安全格局-中适宜性和低安全格局-低适宜性区域在城区分布较为密集, 说明应在中心城区布置更多的海绵设施, 降低雨洪风险。将研究区划分为海绵功能区与海绵生态区两种性质不同的海绵化区域, 寻找雨洪调控的关键点和区域, 重构研究区的海绵系统空间格局(图 6)。其中海绵功能维持区为高安全格局-高适宜性区域, 分布在城市边缘处于半开发状态, 具备一定的雨洪调蓄能力; 海绵功能调整区为高安全格局-中适宜性区域, 主要为城市建成区, 开发强度大, 因用地条件限制, 规划中需在其现状基础上进行海绵设施改造; 海绵功能优化区为中安全格局-高适宜性区域, 是城市内涝风险防治的重点区域, 需提出针对性的优化措施; 海绵生态保育区为中安全格局-中适宜性区域, 该区域主要为森林植被覆盖; 海绵生态调蓄区为低安全格局-高适宜性区域, 主要分布在城市周边的农田, 具备改造为大海绵体设施的建设条件; 海绵生态涵养区为低安全格局-中适宜区域, 该部分地区位于流域上游, 现状水土保持能力较差。

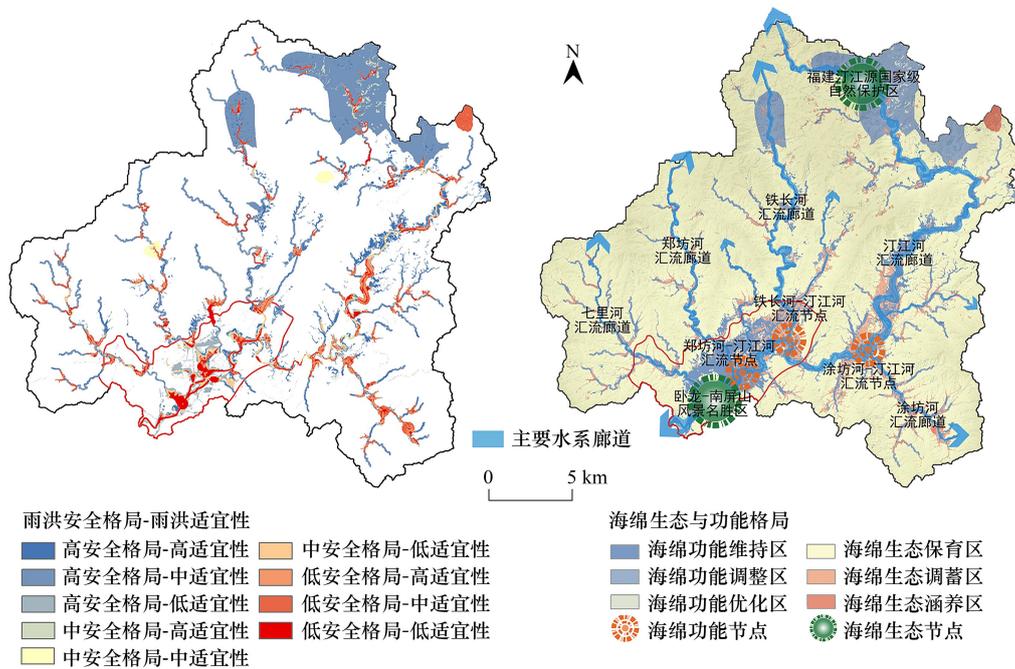


图 6 基于雨洪安全格局-海绵体建设适宜性分析的长汀海绵空间格局

Fig.6 Changting sponge spatial pattern based on stormwater security patterns-sponge construction suitability analysis

4 讨论与结论

4.1 讨论

雨洪过程模拟是修复自然水文过程和城市良性水文循环的关键措施,是海绵城市建设的核心功能,海绵体建设适宜性分析和评价则是海绵城市建设分区的基础。本研究创新性地提出了一种集成使用 SWAT、SCS 和 InVEST 模型模拟和分析雨洪过程及海绵体建设适宜性耦合关系的技术方法框架,重构了流域海绵系统,指导长汀县海绵城市专项规划实践。与以往研究相比,综合 SWAT 和 SCS 模型的雨洪过程模拟方法,提高了雨洪径流路径提取的准确性和雨洪淹没模拟的效率^[52-53];同时基于 InVSET 模型的分析方法相较于单因子评价方法更多考虑了流域海绵体资源要素的相互作用关系,为流域海绵体建设适宜性评价提供了新的思路^[54-55]。

海绵体设施的尺度大小、数量关系和功能连接方式是目目前海绵城市规划与建设中的重点内容。根据研究结果,基于雨洪过程路径提取海绵体建设适宜性区域能够统筹流域环境中的山、水、林、田、湖、草等自然资源要素,保障各级海绵体系统的自然、完整和连通,细化海绵体设施的空间布局与配置方式,强化了流域雨洪安全要素与系统化全域推进海绵城市建设理念的协同关系。总体上,针对海绵功能维持区和海绵生态保育区,建议围绕水库、池塘等湿地系统,打造流域尺度的雨洪蓄滞系统,在极端降雨情景下,通过各级系统的联动消减洪水、滞后洪峰,缓解下游城区的洪水压力。针对海绵功能调整区、优化区和海绵生态调蓄区,可以根据雨洪安全格局和海绵体建设适宜性的叠加分析结果来划定规划区的径流控制单元,并确定管控分区内海绵体公园和 LID 设施等的功能设置。然而,在实际工作中,依据海绵城市建设技术指南,仍需结合地块使用性质和开发模式,进一步分解地块的径流管控指标,为海绵体和 LID 设施的需求总量和空间落位提供支持。针对海绵生态涵养区,应加强周边森林、湖泊等生态系统的保护,降低水土流失,增加雨洪调蓄能力。综上所述,研究区的规划首先要完成由面(整个流域范围)到线(汀江)的跨尺度规划,重构汀江流域的海绵格局;再由线到点,划定管控分区,设置海绵调蓄公园和 LID 设施等。研究采用流域梯级径流控制体系,实现对雨洪径流从流域-

城市-河道-控制单元-LID 设施的逐级消减和管控,达到刚弹结合提高中心城区防洪标准的目标。

需要指出的是,长汀县中心城区地处流域下游平坦的盆地中,极端降雨情景下河道水位迅速上涨造成顶托,中心城区的管网作用有限。因此,本研究中着重考虑流域层面蓝绿海绵空间的雨洪调蓄作用,在其他地区的实际操作中应分析河道洪水和城市雨洪的相互影响,在规划中考虑蓝绿灰基础设施的连接方式和耦合作用效果。另一方面,从雨洪风险管理的角度,社会经济系统和人居环境系统的变化对雨洪灾害的发生起到一定的作用,研究得到的基础设施空间布局 and 数量类型,应进一步考虑将社会、经济、人口等变化和雨洪灾害随时间演变的信息结合起来分析。因此,本研究提出的雨洪过程模拟与海绵体建设适宜性分析方法,尚需在更多的实证研究中进一步改进和完善。

4.2 结论

本文以长汀县汀江上游流域为例,开展了雨洪过程模拟和海绵体建设适宜性评价。结论如下:

(1) 集成多模型的技术方法框架在汀江上游流域研究中具有很好的适用性。通过雨洪过程模拟准确提取了流域雨洪关键产流区、汇流廊道和汇流节点,并构建汀江上游流域的雨洪安全格局;同时,基于 InVEST 的多指标评价方法能够统筹协调多种流域海绵资源要素分析流域海绵体的适宜性建设区域,为系统化全域推进海绵城市建设提供了一种新的方法工具。

(2) 长汀县中心城区雨洪风险较高,海绵体建设高适宜性区域集中在城区北面。汀江上游流域的雨洪安全格局整体呈现出沿主要河道分布的特征,其中低水平安全格局面积为 19.88km²,占安全格局总面积的 23.1%,汀江上游流域河道束窄地段和长汀中心城区是雨洪高风险区域;海绵体建设适宜性区域呈现出空间分布不均匀的特征,高适宜性区域面积为 37.31km²,占流域总面积的 7.91%,主要集中在中心城区北部和新桥镇的农田区域。

(3) 重构的海绵体空间格局促进了自然环境与水系网络的高度耦合并指导流域海绵城市规划。研究将流域海绵空间划分为不同生态区和功能区,为流域海绵资源要素的保护利用提供了参考;同时,为研究区内不同空间尺度海绵体基础设施的类型、数量、调蓄容积和空间布局等提供了依据,协调土地利用与雨洪过程和格局的关系,形成了刚弹结合、功能结构互补的基础设施布局体系。

参考文献(References):

- [1] IPCC. In: Core Writing Team, Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, 2014.
- [2] Brown R R, Keath N, Wong T H F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes. *Water Science and Technology*, 2009, 59(5): 847-855.
- [3] 袁再健, 梁晨, 李定强. 中国海绵城市研究进展与展望. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 896-901.
- [4] Fletcher T D, Shuster W, Hunt W F, Ashley R, Butler D, Arthur S, Trowsdale S, Barraud S, Semadeni-Davies A, Bertrand-Krajewski J L, Mikkelsen P S, Rivard G, Uhl M, Dagenais D, Viklander M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 2015, 12(7): 525-542.
- [5] Sandstrom U G. Green infrastructure planning in urban Sweden. *Planning Practice and Research*, 2002, 17(4): 373-385.
- [6] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Ka_zmierczak A, Niemela J, & James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [7] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 杜悦悦. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. *生态学报*, 2016, 36(11): 3137-3145.
- [8] 殷杰. 基于高精度地形表面模型的城市雨洪情景模拟与应急响应能力评价. *地理研究*, 2017, 36(6): 1138-1146.
- [9] Liu W, Zhang A, Wang L, Fu G, Chen D, Liu C, Cai T. Projecting streamflow in the Tangwang River Basin (China) using a rainfall generator and two hydrological models. *Climate Research*, 2015, 62(2): 79-97.
- [10] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——II. 城市雨洪模拟与管理. *水科学进展*, 2014, 25(5): 752-764.
- [11] 焦胜, 韩静艳, 周敏, 蔡勇, 韩宗伟, 黎贝. 基于雨洪安全格局的城市低影响开发模式研究. *地理研究*, 2018, 37(9): 1704-1713.
- [12] 丁懿媛. 基于数字技术的厦门雨涝易发地区灾害防控方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [13] 许涛, 王春连, 洪敏. 基于灰箱模型的中国城市内涝弹性评价. *城市问题*, 2015(4): 2-11.
- [14] Debruijn K. Resilience and flood risk management: A systems approach applied to lowland rivers. Delft: Delft University of Technology, 2005.
- [15] 张灵, 陈晓宏, 千怀遂. 北江下游防洪保护区恢复力诊断. *水利学报*, 2011, 42(9): 1129-1134.
- [16] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016,

- 35(4): 664-676.
- [17] 陈灵凤. 海绵城市理论下的山地城市水系规划路径探索. 城市规划, 2016, 40(3): 95-102.
- [18] 俞孔坚, 张蕾. 基于生态基础设施的禁建区及绿地系统——以山东菏泽为例. 城市规划, 2007, 31(12): 89-92.
- [19] 俞孔坚, 许涛, 李迪华, 王春连. 城市水系统弹性研究进展. 城市规划学刊, 2015(1): 75-83.
- [20] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [21] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 李艺博, 李金融. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216.
- [22] 宋云, 俞孔坚. 构建城市雨洪管理系统的景观规划途径——以威海市为例. 城市问题, 2007(8): 64-70.
- [23] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 乔青. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.
- [24] 中华人民共和国中央人民政府. 关于开展系统化全域推进海绵城市建设示范工作的通知.(2023-12-31). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/26/content_5602408.htm.
- [25] Lin B Q. Simulations and analysis of landscape pattern change impacts on catchment runoff at different temporal scales based on SWAT [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2014.
- [26] 林峰, 陈兴伟, 姚文艺, 方艺辉, 邓海军, 吴杰峰, 林炳青. 基于 SWAT 模型的森林分布不连续流域水源涵养量多时间尺度分析. 地理学报, 2020, 75(5): 1065-1078.
- [27] 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.
- [28] 吴艾璞, 王晓燕, 黄洁钰, 黄静宇, 王俊, 李泽琪. 基于前期雨量和降雨历时的 SCS-CN 模型改进. 农业工程学报, 2021, 37(22): 85-94.
- [29] 申红彬, 徐宗学, 曹兵, 王海周. 分布式 SCS-CN 有效降雨修正模型建立及应用. 水科学进展, 2023, 34(4): 553-561.
- [30] 蔡新, 李益, 吴威, 王炎灿. 基于体积法思想的洪水淹没元胞自动机模型. 水力发电学报, 2013, 32(5): 30-34, 40.
- [31] 宫清华, 黄光庆, 黄宁生, 张俊香. 基于 DEM 和 SCS 模型的华南小流域山洪灾害易发区预测//中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 风险分析和危机反应的创新理论和方法——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集. 风险分析和危机反应的创新理论和方法——中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集, 2012: 94-98.
- [32] 陈泓宇. 雨洪调控视角下的北京浅山区森林湿地公园规划设计研究——以密云森林湿地公园为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [33] Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Sharp R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Griffin R, Hamel P, Chaplin-Kramer R. InVEST 2.6. 0 User's Guide. Stanford: The Natural Capital Project, 2013: 24-49, 233-250.
- [34] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析. 生态学报, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [35] 张宏锋, 袁素芬. 东江流域森林水源涵养功能空间格局评价. 生态学报, 2016, 36(24): 8120-8127.
- [36] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, Jones L, Ziv G, Clarke D, Oliver T H, Bullock J M. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. The Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1418-1426.
- [37] Yan F P, Shanguan W, Zhang J, Hu B F. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100? meters. Scientific Data, 2020, 7: 2.
- [38] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 中国土壤有效含水量分布. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 5-14.
- [39] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. 生态学报, 2013, 33(3): 789-797.
- [40] 肖微. 基于 InVEST 模型的闽东南地区生态系统服务功能评估——以古雷石化基地水源地为例[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [41] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains; Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington: US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 1965: 282-282.
- [42] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion—sediment yield models. Soil Technology, 1997, 11(1): 43-55.
- [43] 胡胜, 曹明明, 刘琪, 张天琪, 邱海军, 刘闻, 宋进喜. 不同视角下 InVEST 模型的土壤保持功能对比. 地理研究, 2014, 33(12): 2393-2406.
- [44] 饶恩明, 肖焱, 欧阳志云, 郑华. 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素. 生态学报, 2013, 33(3): 746-755.
- [45] 李婷, 刘康, 胡胜, 包玉斌. 基于 InVEST 模型的秦岭山地土壤流失及土壤保持生态效益评价. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1242-1250.
- [46] Vigiak O, Borselli L, Newham L T H, McInnes J, Roberts A M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. Geomorphology, 2012, 138(1): 74-88.
- [47] 李威, 赵祖伦, 吕思思, 赵卫权. 基于 InVEST 模型的水质净化功能时空分异研究. 灌溉排水学报, 2022, 41(3): 105-113.
- [48] 韩会庆, 罗绪强, 游仁龙, 罗晓珊, 陈瑶. 基于 InVEST 模型的贵州省珠江流域水质净化功能分析. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 87-92.
- [49] 冯源嵩, 林陶, 杨庆媛. 百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征. 环境科学, 2014, 35(12): 4537-4543.
- [50] 张洋, 樊芳玲, 周川, 倪九派, 谢德体. 三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响. 土壤学报, 2016, 53(1): 189-201.
- [51] 陈哲夫, 莫操湖, 陈端吕, 彭保发. 常德市海绵城市建设示范区雨洪适应性评价与分区. 自然资源学报, 2022, 37(8): 2195-2208.
- [52] 徐建刚, 张翔, 林蔚, 等. 流域视角下的智慧型海绵城市规划减灾效应评估方法研究. 城市建筑, 2018, (15): 17-21.
- [53] 杨帆, 徐建刚, 林蔚. 基于元胞自动机的低影响开发对城市内涝削减效果模拟. 自然资源学报, 2017, 32(07): 1158-1169.
- [54] 宋晨怡, 杨天翔. 基于 GIS 的三峡库区海绵城市建设适宜性评价与分区划定研究. 给水排水, 2018, 54(12): 108-113.
- [55] 范峻恺, 徐建刚, 胡宏. 基于 BP 神经网络模型的海绵城市建设适宜性评价——以福建省长汀县为例. 生态经济, 2019, 35(11): 222-229.