

丁锬媛, 王宁, 倪丽丽, 等. 基于 SCS - CN 与 GIS 耦合模型的闽三角城市群承灾空间淹没风险研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 171 - 177. [DING Siyuan, WANG Ning, NI Lili, et al. Study on the Inundation Risk of Disaster Space in the Min Delta Urban Agglomeration based on SCS - CN and GIS Coupling Model[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 171 - 177. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.029.]

基于 SCS - CN 与 GIS 耦合模型的闽三角城市群 承灾空间淹没风险研究^{*}

丁锬媛¹, 王 宁^{1,2}, 倪丽丽³, 曾 坚¹

(1. 天津大学 建筑学院, 天津 300072; 2. 厦门市城市规划设计研究院, 福建 厦门 361012;
3. 河北工业大学 建筑与艺术设计学院, 天津 300401)

摘 要:以闽三角城市群为研究对象, 创新水文 SCS - CN 算法与 GIS 耦合技术, 计算出不同暴雨重现期(5 a, 10 a, 50 a 一遇)下的淹没范围, 构建闽三角城市群内涝淹没风险评估体系。通过地理探测器进一步探究淹没风险与社会生态系统空间分布规律, 为闽三角城镇群的生态安全保障与可持续发展提供技术支撑。研究表明: 闽三角城市群内涝淹没区空间上呈现沿河道向入海口与海岸线聚集的状态, 其风险性由海岸向内陆逐步递减。淹没区等级一类, 二类, 三类风险区占研究区面积的 10.2%, 14.6%, 27.4%。厦、漳、泉市的淹没面积分别为 135.67 km²、304.10 km²、572.09 km²。其中一类风险区占比分别为 84%, 78%, 62%, 进一步确定研究范围内高频发淹没地段的具体位置。最终通过分析八类主要的社会生态因子与淹没区的空间异质关系, 在区域层面提出兼顾城市开发强度的内涝防控分区。

关键词:内涝灾害; 淹没风险; SCS - CN 模型; GIS 模型; 闽三角城市群

中图分类号: X43; X915.5; TP274; P426.616 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2022)01 - 0171 - 07
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.029

我国滨海城市产业集中、人口众多, 其独特的地理和资源优势带动了经济文化的发展^[1], 空间上呈现出人口与建筑的高密度聚集现象。在全球气候变化的大环境下, 受海洋性气候影响的滨海城市更容易遭遇强暴雨事件, 对高速发展的城市造成了巨大的社会经济损失^[2]。据统计 2020 年全国自然灾害以洪涝为主, 平均降水量比常年偏多 11.2%, 直接经济损失较近 5 a 上升 59%。随着我国社会经济向可持续发展方向转型, 对生态环境与城市安全问题越发重视^[3-4]。因此, 如何有效缓解滨海城市的内涝灾害风险成为备受关注的重要议题。

防控内涝灾害的关键是研究灾害的形成原因。系统环境的脆弱导致内涝灾害的频发, 其主要成因归结于三个方面: ①硬质铺装的增加改变了原有土壤自身的产汇流能力。②城市排水系统无承受短时暴雨的洪峰流量^[5]。③城市建设用地的不断扩张, 往往会导致调蓄洪用地的减少。最根本的解决途径是根据地表高程来确定雨水汇流形成的内涝范围^[6], 从而有针对性的采取各类有效防

控措施降低灾害的风险。由于滨海地区地形复杂, 通常采用 SCS - CN(土水保持曲线)模型来计算降雨后的地表径流量^[7], 该模型根据经验数据的概化运算, 适用于不同地形环境且结果与实际较一致^[8]。另外需综合考虑基础设施以及调蓄设施的承载能力^[9], 做出合理的布局与有效的防涝设计。

目前国内的外学者根据灾害的发生过程, 已在内涝致灾因子的波动规律、受灾环境(泛指城市与自然环境)的空间预警响应、工程防范措施等方面取得一定的研究成果^[10-11]。关于内涝研究国际上常见的模型有一维的 SWAT、HEC - HMS 模型, 其二者均是基于 SCS - CN 水文模型来计算的^[12-13], 较好的反应产流的关键特征。随着算法的改进和增加了计算维度, 如 Mike21、FloodmMap 等多维模型得以应用^[14], 近些年还出现了借助于地理信息系统的内涝空间可视化分析研究。我国学者对内涝防控的相关研究主要围绕内涝灾害风险评价^[15]、市政管网及设施规划^[2]、多源数据建

* 收稿日期: 2021 - 08 - 06 修回日期: 2021 - 09 - 30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078330); 2020 年度河北省社会科学发展研究课题(20200403114); 天津大学自主创新基金资助项目(2021XSC - 0025)

第一作者简介: 丁锬媛(1992 -), 女, 汉族, 北京人, 博士研究生, 主要从事城市雨洪灾害防控研究. E-mail: dingsiyuan@tju.edu.cn

通讯作者: 倪丽丽(1986 -), 女, 汉族, 河北石家庄人, 讲师, 主要从事韧性城市、城市雨涝灾害防控研究。

E-mail: syeney@163.com

模^[16]等方面展开。车伍^[17]等指出内涝的产生与环境存在密切联系,尤其应注重源头雨水的产生与调蓄^[18]。俞孔坚^[19]将内涝的风险等级与淹没区范围作为综合水安全格局的组成部分,同时也是生态安全格局构建的支撑要素^[20]。国家自然资源部也在2018年确定了多规融合下的国土空间规划体系,其中特别增加了对于资源环境的灾害风险评价^[21]。我国内涝风险评价的研究方向较多,笔者认为当前应结合实际自然环境,在一维内涝模型的可靠性基础上,向多维度的内涝模型延展。同时结合王劲峰建立提出的地理探测器模型^[22],分析淹没风险与社会生态系统的空间异质特性,以便于评价结果与国土空间规划等导向性规划有效衔接。

综上,本文创新 SCS-CN 水文模型与地理空间系统(GIS)的耦合技术,计算出不同暴雨重现期下产流形成的淹没范围,评价闽三角城市群淹没区风险程度。并结合地理探测器对社会生态系统的多因子进行淹没风险空间识别,划分防控分区,为闽三角城镇群的生态安全保障与可持续发展提供了技术支撑。

1 研究区概况和数据收集

1.1 研究区概况

闽三角城市群是厦门、泉州和漳州市及所辖县区的统称(图1),在该区域内的金门位于海上,且相对地理位置较远,因此本研究暂不对其进行风险评价。闽三角城市群气候类型以亚热带气候为主,年雨量较大并呈现波动性变化。根据《福建省2020年统计年鉴》^[23]数据,2019年末闽三角城市群地区GDP占福建省48.79%。依据第七次人口普查结果,闽三角常住人口占福建省总量的45.74%,是福建是主要的经济发展与人口聚集地。然而在海洋性季风与热带气团的交互下,研究区呈现历时短雨量大的特征,产生的内涝灾害影响了城市的发展。

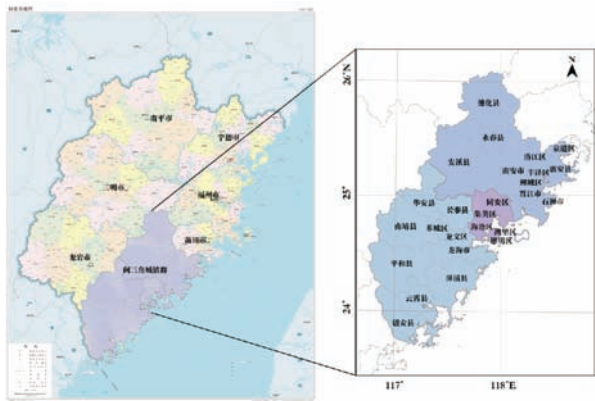


图1 闽三角城市群位置(审图号:闽S(2021)11号,下同)

1.2 数据来源

研究数据包括:①从中科院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)获得的闽三角城市

群高程数据(DEM)。②厦门,漳州,泉州三市各气象站点降雨数据,包括瞬时降雨量和重现期5 a, 10 a, 50 a一遇降雨量。③闽三角地区水系分布图及具体水系流量和水库储蓄量。④厦漳泉三市用地建设现状情况与土地利用规划。⑤厦漳泉三市统计年鉴,包括GDP、人口容量、城镇化水平等。

2 SCS 与 GIS 耦合模型构建

2.1 SCS-CN 与 GIS 空间耦合模型

本文根据自然地表的积水过程识别内涝灾害产流源头的风险。首先通过遥感识别技术提取选区水文要素。其次根据 SCS-CN 水文公式^[24]与土地利用类型计算不同降雨重现期下的淹没体积。欲将数理模型的淹没区结果与空间具体位置相关联,因此选用 ArcGIS 平台中的表面体积算法进行配比计算,其作用机理是在三维的地理空间中运算无源淹没体积,确定淹没高度并在二维空间上呈现具体位置^[25]。分别计算重现期为5 a、10 a、50 a一遇的三种情景下的厦,漳,泉三市淹没位置,并按严重程度从高到低对应一、二、三类风险等级,集成闽三角区域的内涝灾害评价(图2)。

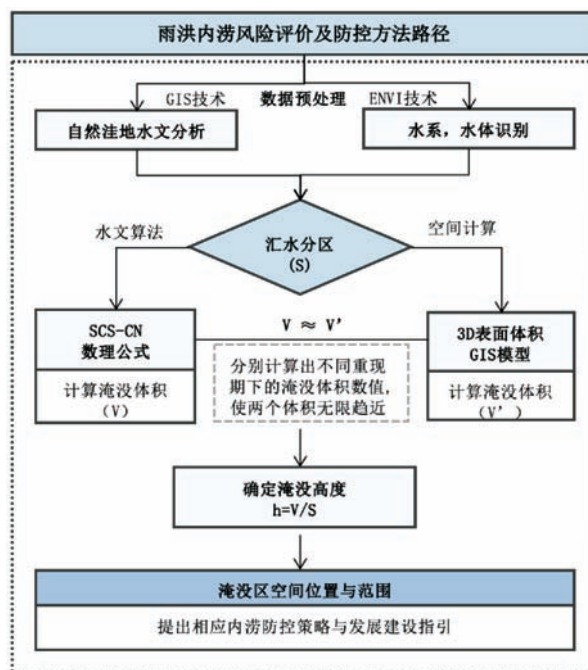


图2 内涝风险防控路径

所得结果需与当地区域调蓄设施承载能力校核。在产汇流过程形成积水的同时,满足城市调蓄洪设施和排水设施的承载能力及排查次生灾害的潜在干扰事件。在城市调蓄洪用地方面应关注是否存在溃坝与雨水外溢现象,即调蓄洪用地具有承载该区域产流的能力(存储淹没区体积),如满足承载能力则需要对淹没区结果进行修正。在排水设施方面应注重城市建成区内的淹没区分布,依据当地的城市规划中市政排水设施分布情况,

对内涝结果作出进一步的排查与防控。

2.2 水系提取与汇水区划分

运用 GIS 对填挖后的 DEM 数据做出水文流量和流向运算, 利用改进的水体指数法 (MNDWI) 对特征波段间的差值计算, 从而更精准的获得水体斑块。

$$MNDWI = \frac{(Green - MIR)}{(Green + MIR)} \quad (1)$$

式中: $Green$ 为绿光波段, MIR 为中红外波段, $MNDWI$ 水体指数阈值为 $[0, 1]$ 。

经过反复的人工解译对数据进行了修正, 计算闽三角水体的流向与水文信息并划定汇水分区 (图 3), 为了确保计算的精度, 将研究区汇水分区划分为 87 块。(厦门市 25 块, 漳州市 32 块, 泉州市 30 块), 根据各汇水分区的地质属性, 在下文设定对应的土壤相关参数。

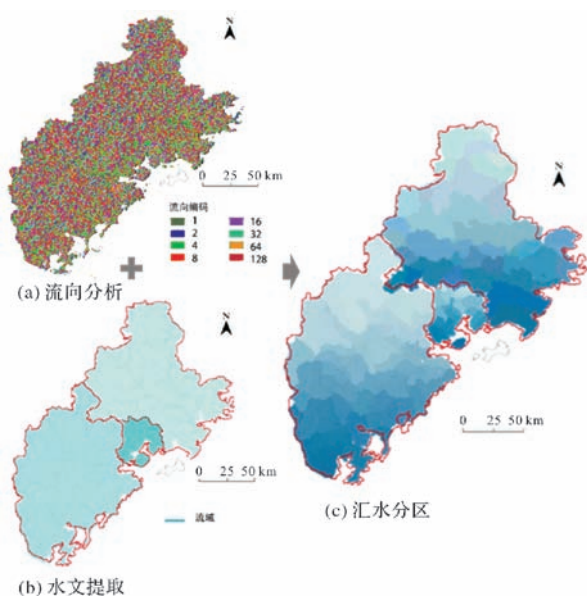


图 3 汇水区划分

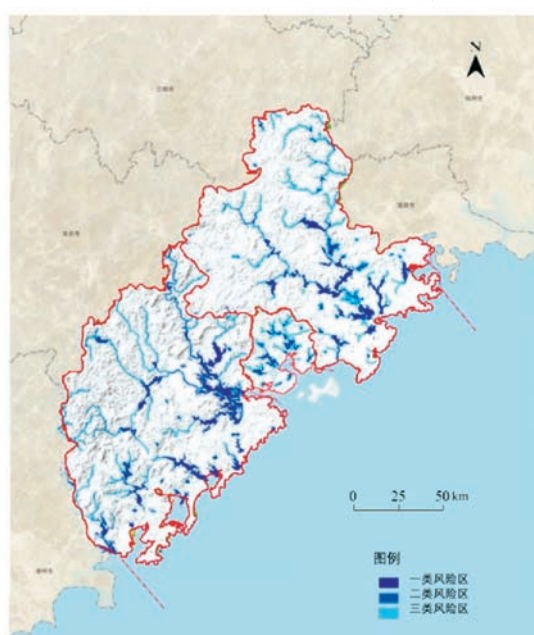
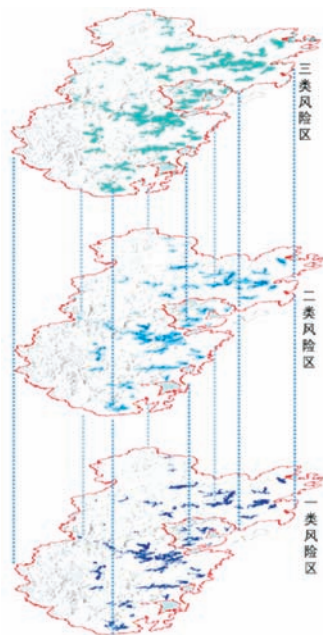


图 4 内涝淹没区风险评价图

2.3 SCS - CN 淹没体积计算

研究区流域资料较为缺乏且地势复杂, 雨水不宜流出, 内涝灾害风险隐患较大^[26]。鉴于此, 利用自然地形而非人工排水管网设施选择 SCS - CN 模型计算, 其中涉及到土壤相关参数 CN (Curve Number), 它是暴雨过程初期表现出的地块综合特征值, 与土地下垫面及土壤情况有关, 本研究 CN 参数来自于国际上认可且兼容性高的美国工程手册^[27]。

依据历年闽三角年降雨量与降雨频次的统计, 本研究选取闽三角地区降雨重现期为 5 a、10 a、50 a 一遇的三种情景。基于水文 SCS - CN 公式, 计算得到闽三角各汇水分区三种情景下的径流量, 所得结果与各汇水面积的乘积即为该区域无源淹没体积的理论值。

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S}, & P \geq \lambda S, \text{ 否则 } Q = 0; \\ S = \frac{25400}{CN} - 254. \end{cases} \quad (2)$$

式中: Q 为地表径流量 (mm); P 为降雨量 (mm); S 为最大可能储水量 (mm); λ 为初损率, 无量纲, 通常以 $\lambda = 0.2$ 计算。

2.4 数据归一化计算

本文涉及到多种因素的叠加计算, 选用 min - max 标准化法对不同因子的单位作出归一化处理 ($0 \leq X_i \leq 1$), 公式如下:

$$f(x) = \frac{x_i - \min_{0 \leq x \leq 1} \{x_i\}}{\max_{0 \leq x \leq 1} \{x_i\} - \min_{0 \leq x \leq 1} \{x_i\}} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为 x_i 的标准化值, x_i 为要素 i 的属性值。

2.5 地理探测器

通过地理探测器分析淹没风险分布 Y 的空间分异特性, 并探测相关因子 X 在 Y 中的解释程度。本文变量因子 X 为厦门市高程、坡度、水网密度、

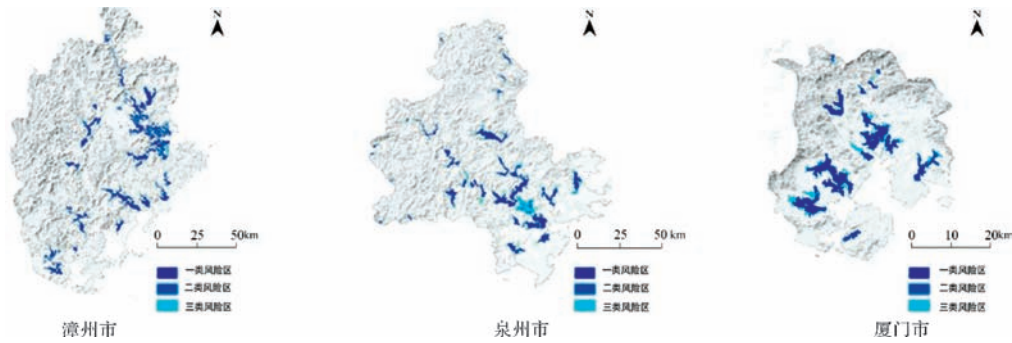


图5 具体的淹没区风险评价

地点	典型地块受灾情况	淹没位置	情况	地点	典型地块受灾情况	淹没位置	情况
厦门市同安区		东西溪流域 两侧建成区	官浔溪、埭头溪 东西向建设用地	漳州市云霄县		漳江流域, 建成区东部	集中建成区以 东的村落受灾 严重。建成区 排水能力弱
厦门市沧海区		过云溪-马 鸾湾南部	马銮湾南侧建成 区受灾较严重	漳州市南靖县		九龙江流 域,位建成 区东部	九龙江以东的 村落受灾严重
厦门市集美区		后溪-杏林 湾建成区	杏林湾东南两侧 建成区与支流两 侧农田	泉州市城区		沿海口为高 风险区	入海口两侧大 面积商业、居 住用地受灾
厦门市湖里区与思明区		筓筓湖-五 缘湾地区	海口潮汐引发两 侧建设用地灾害 多发	泉州市南安市		沿晋江的建 设用地	灾害高发地, 河流南北侧建 设用地受灾严 重
漳州市城区		沿海口为高 风险区	东北部的居住片 区和南部地区	泉州市惠安县		入海口为高 风险区	北部工业片区 和东部的居 住、工业用地
漳州市龙安区		南溪以西所 有集中建设 区	榜山、石码、海 澄三镇尤为严重	泉州市水头镇		沿河分布和 往东聚集	东部的居住 区、工业区受 灾
漳州市角美镇区		入海口为高 风险区	主要地区是西部 的工业片区和中 部的	泉州市永春县		中部九龙江 流域	因丘陵影响, 全县的淹没风 险极高
漳州市长泰镇区		入海口为高 风险区	大部本的生活区 域,北部的工业 区	泉州市安溪县		九龙江中部 流域,建成 区的东西部	城市西部城市 工程相对独 立,但具有一定 淹没风险
漳州市诏安县		东溪流域与 建成区的东 南部	集中建成区以东 和以南的农田受 灾严重	泉州市惠安县		东洛江流域 建成区的北	北部沿河现状 是大面积的农 田,发生洪 涝,后果严重
漳州市漳浦县		鹿溪流域, 建成区南部	南部村落处于易 被淹区内,西面 的大部分农田	泉州市德化县		九龙江流域 两侧	高风险区面积 较少,河岸两 侧加强防控

图6 内涝灾害高频发地区分布情况

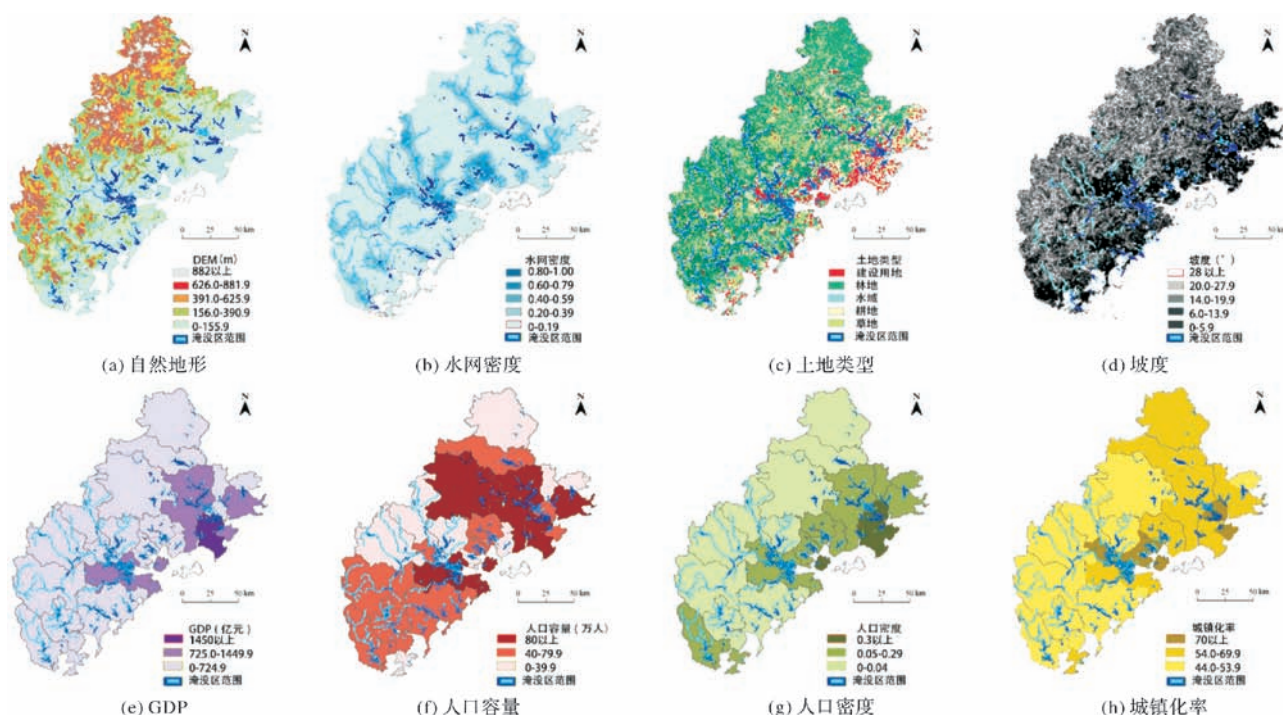


图7 淹没区在社会生态系统要素的空间分布

土地利用、人口容量、人口密度、GDP 和城镇化率^[28]。其优点在于在分析过程中能够免疫自变量之间的多重共线性。

$$q = 1 - \frac{\sum_{n=1}^t N_n \sigma_n^2}{N \sigma^2} \quad (4)$$

式中: q 为对 Y 空间分异的解释程度, t 为变量的分类, N 为模型的单元数, σ^2 是 Y 值的方差, 其中 q 值区间为 $[0, 1]$ 。

3 结果与分析

3.1 内涝淹没区全域空间识别

闽三角城市群内涝淹没区空间上呈现沿河道向入海口与海岸线聚集的状态, 主要集中在九龙江、晋江、西溪入海口处, 其风险性由海岸向内陆逐步递减, 并且河网密度高的汇流口出现部分积水现象。按重现期等级划分评价结果为三类等级, 重现期 5 a 一遇时为一类风险等级占研究区的 10.2%。重现期 10 a 一遇时为二类风险等级占研究区 14.6%。重现期 50 a 一遇时为三类风险等级占研究区 27.4% (图 4)。

各城市的淹没结果分别为厦门淹没面积图斑为 135.67 km², 漳州市淹没区的总面积约为 304.10 km², 泉州市淹没区的总面积约为 572.09 km²。厦、漳、泉三市的一类风险区占各市总面积分别为 84%, 78%, 62% (图 5)。经检验, 本文评价结果与厦门市同安区和集美区, 漳州市龙文区, 泉州市鲤城区内涝易发地段实际情况有较高一致性。

依据市政部门提供的统计数据筛选出 20 个闽

三角区域主要水库, 将评价结果与水库地理位置、承载能力进行校对, 发现水库的当年年末需水量均未超过正常水位库容, 在闽三角区域内水库区域尚无出现溃坝等积水外溢现象, 后根据承载量对评价结果修正。研究表明在整个区域内主要考虑自然下垫面产生的内涝问题, 并指出城乡建设用地 (重点地段) 范围内出现的高风险淹没区位置, 为空间规划与市政管网布局提供参考依据。

3.2 重点地段内涝淹没区识别

结合闽三角城市群土地利用布局情况与高频发区域的空间联系, 确定 20 处典型受损空间, 具体情况如下: 在厦门市中淹没区位于本岛入海口, 同安区与集美区九龙江与西溪交汇口, 东溪与汀溪交汇口。漳州集中分布在长泰县九龙江、陈巷溪与马洋溪交汇口、漳浦县龙岭溪下游及鹿溪、云霄县漳江入海口处和诏安县宫口港。中心城区南溪以建设区处于易被淹没范围, 其中榜山、石码、海澄三镇尤为严重。泉州主要分布在晋江流域及其支流 (包括中心城区、南安市区), 永春县和安溪县内东溪与晋江及其交汇处等。

3.3 淹没风险与社会生态系统的空间异质性识别

社会生态系统与环境本底情况, 城市发展强度两类密切相关^[29]。基于地理探测器对社会生态要素展开淹没区进行空间异质性分析 (图 7)。在自然环境层面选择高程、坡度、自然地形、水网密度、土地类型要素, 在城市开发强度层面选择 GDP、人口容量、人口密度、城镇化率为核心要素。在探测器的因子分析中, q 越大表示对淹没区的解释力越强, 以闽三角区域为单位, 水网密度 (0.210) > 高程 (0.152) > 城镇化率 (0.044) > 坡度 (0.039) > 人口容量 (0.032) > 人口密度 (0.026) >

表 1 淹没风险与社会生态系统多因子空间分异 q 、 p 值

	高程	水网密度	GDP 产值	人口容量	人口密度	城镇化率	坡度	土地利用
q 值	0.152	0.210	0.001 514	0.032	0.023	0.044	0.039	0.019
p 值	0.000	0.000	0.012 847	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表 2 闽三角内涝防控分区

防控类型	所属城市	具体城区县域	防控分区
高预警—高强度	厦门	思明区、湖里区、集美区、海沧区	保护与限制建设区
	漳州	龙文区、芗城区、龙海市	
	泉州	鲤城区、丰泽区、晋江市、南安市	
中预警—低强度	厦门	同安区、翔安区	韧性提升或环境改善区
	漳州	长泰县、诏安县、云霄县、平和县、漳浦县	
	泉州	安溪县、惠安县、永春县、德化县、石狮市	
低预警—低强度	漳州	华安县、南靖县、东山县	适度开发建设区
	泉州	泉港区、洛江区	

土地利用 (0.019) > GDP (0.005), 且 P 均小于 0.05 (表 1)。水网与高程因素对其他要素有明显差异性, 其中水网分布与高程共同作用下的分布呈现最为明显的双因子增强效果 (0.29)。特别是在城乡空间分布中, 淹没区多位于地势低洼或地形起伏较大的山体周边的乡村地区, 以及水网密度较大的城乡交错带地区。受到地形与发展要素制, 其承灾能力不足难以应对积水。因此在建设过程中应该注意地形与水网密集地段, 提升水网的连通度可有助于积水的排出。

将城市开发强度划分为高强度和低强度开发, 并与内涝淹没区的类风险等级相匹配, 依据开发强度与风险预警程度划分为三类, 提出有助于城市规划与雨洪防控的三角城镇群内涝风险防控分区^[30] (表 2), 即保护与限制建设区、韧性提升或环境改善区、适度开发建设区。以此增加国土空间规划与各相关专业在规划与实施过程中的应用参考。

4 结论与展望

4.1 结论

暴雨导致的城市内涝灾害是当前我国滨海城市频繁面临的灾害, 对城市经济和人民生活产生重大影响。本文分析了暴雨的产流过程, 通过耦合 SCS-CN 与 GIS 技术, 计算出不同暴雨重现期下的淹没范围, 评估闽三角城市群内涝淹没区风险, 结论如下:

(1) 闽三角城市群内涝淹没区空间上呈现沿河道向入海口与海岸线聚集的状态, 主要集中在九龙江、晋江、西溪入海口处, 风险等级根据重现期 (5 a, 10 a, 50 a) 分为三类, 一类、二类、三类风险等级占闽三角区域的 10.2%、14.6%、27.4%。

(2) 闽三角厦、漳、泉三市的淹没面积分别为 135.67 km²、304.10 km²、572.09 km²。厦、漳、泉三市的一类风险区占各市总面积分别为 84%、78%、62%。

(3) 内涝高频发地段 (一类风险区) 主要位于厦门同安区, 集美区与本岛地势低洼地和入海口; 漳州九龙江流域地带及主城区、漳浦县和云霄县。泉州的晋江流域地带及永安县和安溪县。

(4) 分析淹没风险分布与社会生态系统的因子间空间异质关系。闽三角地区水网密度 (0.210) > 高程 (0.152) > 城镇化率 (0.044) > 坡度 (0.039) > 人口容量 (0.032) > 人口密度 (0.026) > 土地利用 (0.019) > GDP (0.005), 规划建设中应注重水网与地形高程的关系。同时根据城市开发强度与淹没范围, 提出闽三角城市群内涝风险防控分区。

4.2 展望

在城市建设方面, 针对高风险地段通过后续的规划加强市政管网设施的等级, 特别是对于一类风险区淹没范围, 如厦门思明区、漳州龙文区, 泉州鲤城区等高风险—高强度开发的区域, 需确保管网等级至少满足 5 a 一遇标准, 中心城区建议提升至 10 a 一遇标准, 并在暴雨超标时有完备的应急预案。考虑到建设过程中可能受到空间约束限制的老城区如厦门本岛, 漳州芗城等, 宜增加屋顶花园与雨水池等绿色基础设施, 间接削减管道的径流雨水量, 避免洪峰外溢现象。在生态环境方面, 对于风险等级为第二、三级地区应加强水系与城市建设用地间的生态化的过渡区域 (包括湿地, 林地等生态空间) 的连续性。适当采用退耕换绿的方式, 在短历时暴雨过程中快速降低雨水径流量, 平衡城市水系的“泄”与“蓄”的关系。在后续的研究中, 评价结果可在风险控制点、疏散廊道、防灾分区等空间规划方面作出更全面的应用。

本研究尚存在不足之处, 在后续研究中增强高程数据的精度, 提升内涝淹没区识别的精准程度, 为市政管网规划提供更准确的依据。同时结合海绵城市管控平台的反馈信息进一步深化与完善内涝防控研究。

参考文献:

- [1] 王峰, 颜正惠, 黄伟乐, 等. 城市雨水内涝成因及对策[J].

- 中国给水排水, 2012, 28(12): 15 - 17, 20.
- [2] 谢映霞. 从城市内涝灾害频发看排水规划的发展趋势[J]. 城市规划, 2013, 37(2): 45 - 50.
 - [3] 于立. “生态文明”与新型城镇化的思考和理论探索[J]. 城市发展研究, 2016, 23(1): 19 - 26.
 - [4] 陈伟珂, 刘国义. 城市内涝灾害防治困境的突破——基于数据治理模式的研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 42 - 47.
 - [5] 王峰, 颜正惠, 黄伟乐, 等. 城市雨水内涝成因及对策[J]. 中国给水排水, 2012, 28(12): 15 - 17.
 - [6] 林伟斌, 孙一民. 基于自然解决方案对我国城市适应性转型发展的启示[J]. 国际城市规划, 2020, 35(2): 62 - 72.
 - [7] 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.
 - [8] 郑长统, 梁虹, 舒栋才, 等. 基于 ArcGIS 和 RS 的喀斯特流域 SCS 产流模型应用[J]. 地理研究, 2011, 30(1): 185 - 194.
 - [9] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26 - 36.
 - [10] 王伟武, 汪琴, 林晖, 等. 中国城市内涝研究综述及展望[J]. 城市问题, 2015(10): 24 - 28.
 - [11] 叶丽梅, 周月华, 周悦, 等. 暴雨洪涝灾害链实例分析及断链减灾框架构建[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 65 - 70.
 - [12] BROWN R R, KEATH N, WONG T H F. Urban water management in cities: historical, current and future regimes[J]. Water Science & Technology, 2009, 59(5): 847.
 - [13] MATTHIJS M D Roos, THOMAS T Hartmann, TEJO T J M Spit, et al. Constructing risks —— Internalisation of flood risks in the flood risk management plan[J]. Environmental Science & Policy, 2017, 74: 23 - 29.
 - [14] DISSE M, JOHNSON T G, Leandro J, et al. Exploring the relation between flood risk management and flood resilience[J]. Water Security, 2020(9): 100059 - 100067.
 - [15] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 基于韧性城市理论的危害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, 2016(1): 48 - 55.
 - [16] 徐向阳. 平原城市内涝过程模拟[J]. 水利学报, 1998, 29(3): 34 - 37.
 - [17] 车伍, 马震, 王思思, 等. 中国城市规划体系中的雨洪控制利用专项规划[J]. 中国给水排水, 2013, 29(2): 8 - 12.
 - [18] 袁玉, 方国华, 陆承璇, 等. 基于景观生态学的城市化背景下洪灾风险评估[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1921 - 1933.
 - [19] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5163 - 5175.
 - [20] 张九香, 王选仓, 侯仰慕, 等. 城市化进展对福州内涝的影响研究[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 146 - 151.
 - [21] 戴慎志, 冯浩, 赫磊, 等. 我国大城市总体规划修编中防灾规划编制模式探讨——以武汉市为例[J]. 城市规划学刊, 2019(1): 91 - 98.
 - [22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116 - 134.
 - [23] 福建省统计局. 福建统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
 - [24] MUSGRAVE G W. “How much of the rain enters the soil?” Yearbook of agriculture[M]. Washington, 1955.
 - [25] 丁锬媛, 曾坚, 王宁, 等. 智慧化海绵体系下的内涝防控策略研究——以厦门市为例[J]. 给水排水, 2019, 55(11): 67 - 73.
 - [26] 焦胜, 韩静艳, 周敏, 等. 基于内涝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.
 - [27] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. National Engineering Handbook. Washington DC: Natural Resources Conservation Service[M/OL]. (2015 - 11) [2020 - 10 - 01]. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>.
 - [28] 韩钦梅, 吕建军, 史培军. 湖北省暴雨人口暴露时空特征与贡献率研究[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 191 - 196.
 - [29] AROCA J E, BODOQUE J M, GARCIA J A. A quantitative methodology for the assessment of the regional economic vulnerability to flash floods [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 386 - 399.
 - [30] KIYONG PARK, JEONG HUN WON. Analysis on distribution characteristics of building use with risk zone classification based on urban flood risk assessment[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 38: 101192 - 101201.

Study on the Inundation Risk of Disaster Space in the Min Delta Urban Agglomeration based on SCS - CN and GIS Coupling Model

DING Siyuan¹, WANG Ning^{1,2}, NI Lili³ and ZENG Jian¹

(1. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Xiamen Institute of Urban Planning and Design, Xiamen 361012, China;

3. School of Architecture and Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: In order to ensure the security of cities, it is urgent to improve the preventing control capabilities of waterlogging disasters. Taking the Min Delta urban agglomeration as the research object, we analyzed the characteristics and occurrence rules of the heavy rain disaster in this area. The inundation range under different rainstorm return periods (once in 5 years, once in 10 years, and once in 50 years) was calculated based on the innovative technology of hydrological SCS - CN algorithm and GIS model. Besides, the risk assessment system for the inundated area in the Min Delta urban agglomeration was constructed. The inundation risk and the spatial distribution of social ecosystem were analyzed through geo - detectors, which provides a technical support for the preventing control of flood disasters. The results indicate that the inundation area of Min Delta urban agglomeration spatially presents a state of aggregation along the river channel to the sea inlet and coastline, and its risk gradually decreases from coast to inland. Moreover, Type I, Type II, and Type III area inundation accounts for 10.2%, 14.6%, and 27.4% of the study area. The inundated areas of Xia, Zhang and Quan cities are 135.67 km², 304.10 km² and 572.09 km². The proportion of Type I risk areas is 84%, 78% and 62% respectively. The specific location of the high - frequency waterlogging section in Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou were further determined. Based on the analysis of the spatial heterogeneity between 8 main socio - ecological factors and inundated areas, the waterlogging prevention and control zoning considering urban development was proposed at the regional level.

Key words: waterlogging disaster; inundation risk; SCS - CN model; The GIS model; Min Delta urban agglomeration