

城市雨洪韧性评价及应对策略研究——以上海市静安区为例¹

苟爱萍¹, 吕慧如¹, 王旭阳², 王江波³

(1. 上海应用技术大学 生态技术与工程学院, 上海 201418; 2. 上海市奉贤区机关事务管理中心, 上海 201499; 3. 南京工业大学 建筑学院, 江苏 南京, 211816)

【摘要】：全球气候变化加剧，同时城市快速发展建设，不透水下垫面增加，导致城市内涝灾害严重，对城市发展造成了严重影响。以上海市静安区为例，基于气象数据、水文数据、地形数据，运用 SCS 模型和 ArcGIS 空间分析工具，从雨洪廊道的分析与模拟、雨洪淹没区的范围定位和积水深度确定以及河流水域的安全缓冲区分析 3 个方面构建上海市静安区雨洪韧性体系，研究雨洪灾害对上海市静安区的影响，选取 4 个典型积水点，利用 AHP-FCE 综合评价模型进行雨洪韧性评价。在微观层次的积水点方面，针对性地提出具体空间类型的雨洪韧性设计策略，将静安区城市公共空间建设更新与城市内涝的可持续应对措施有效结合，为应对城市内涝问题提供研究基础。

【关键词】：雨洪韧性；雨洪韧性评价；积水点提升策略

【中图分类号】：TU984.11+3

【文献标志码】：A

【文章编号】：1005-8141(2023)11-1458

-12

0 引言

城市是人和自然共生的场所[1]。近年来，气候极端变化正在成为全球性的问题，在过去一个世纪以来，以温暖化为特征的全球气候变化已是公认的事实，是人类可持续发展面临的重大挑战。气候变化通过对水文循环和自然生态系统的直接影响，以及对地形地貌的间接影响增加雨洪灾害发生的概率。温度升高，影响水文循环的稳定性，导致冰川消融[2]、海平面上升、水循环加剧，使降雨量增加[3]，水文极值事件发生概率提高，打破区域水资源分布格局和区域水量[4]，城市的内涝灾害发生概率上升。城市化进程加快，数量众多的自然植被和水域被硬质地面替代，改变了城市下垫面，影响城市自身的调蓄系统，使城市积水区域增加，城市内涝更加严重。对环境造成破坏，对居民出行造成极大不便，严重时可发生城市人口伤亡，产生经济损失[5]，导致化通过对水文循环和自然生态系统的直接影响，以及对地形地貌的间接影响增加雨洪灾害发生的概率。温度升高，影响水文循环的稳定性，导致冰川消融[2]、海平面上升、水循环加剧，使降雨量增加[3]，水文极值事件发生概率提高，打破区域水资源分布格局和区域水量[4]，城市的内涝灾害发生概率上升。城市化进程加快，数量众多的自然植被和水域被硬质地面替代，改变了城市下垫面，影响城市自身的调蓄系统，使城市积水区域增加，城市内涝更加严重。对环境造成破坏，对居民出行造成极大不便，严重时可发生城市人口伤亡，产生经济损失[5]，导致城市更加脆弱。《“十四五”生态保护监测规划》提出要重视运用基于自然的解决方案适应气候变化，从而提出适应和减缓气候变化影响的对策建议。城市是一个不断变化的复杂系统，当遇到长期的高

¹ 收稿日期：2023-06-12；修订日期：2023-09-04

基金项目：国家自然科学基金项目（编号：51778364、51978329）。

第一作者简介：苟爱萍(1971-)，女，重庆市人，博士，教授，硕士生导师，上海应用技术大学美丽中国与生态文明研究院（上海高校智库）高级研究员，主要从事韧性城市和城市公共空间研究。

通讯作者简介：王江波(1976-)，男，河南省鹤壁人，博士，教授，硕士生导师，主要从事城市规划与土地利用研究。

压力的冲击时,城市及有可能崩溃停滞[6]。韧性的概念最早运用于工程领域,来表示系统在受到外界压力后恢复到原来状态的能力[7],后来生态领域也借用此概念[8],来描述主体在扰动消失后,可以在不同状态下存续的能力[9]。韧性经历了工程韧性、生态韧性和社会韧性发展,21 世纪初学者们将其运用在自然灾害领域[10],用韧性的概念表示城市受到气候变化的影响后,恢复到原来系统平衡和稳定状态的能力[8]。

已有学者用“承洪能力”来表示城市在遭受极端降水侵害后的承受能力以及复原能力[11],是韧性理念在雨洪管理方面的创新应用,近年来较多的应用于雨洪的可持续管理方面。雨洪韧性关注于城市遭受极端降水后的承受能力以及恢复能力,承袭韧性的概念,雨洪韧性同样包含工程韧性、生态韧性和社会韧性。工程雨洪韧性是防洪工程等物理性的结构对雨洪的抵抗性[12],生态雨洪韧性是生态系统对雨洪的适应与调节,社会韧性主要指社会政策及公共方面的对雨洪的反映力。Bertilsson 等考虑了 3 个主要的驱动因素来评价雨洪韧性,即排水系统抵抗和持续提供服务的能力、城市从雨洪灾害中恢复的能力以及城市系统疏散洪水并恢复正常运作的能力;并用空间化城市防洪弹性指数(SFRESI)的多标准指数对防洪弹性进行建模和空间化,对雨洪韧性进行评价[13]。Schelfaut 等提出机构间相互作用、洪水风险的联系和洪水建模工具 3 个层面,将所有利益攸关方的参与和自下而上的参与视为雨洪韧性提升与管理的重要因素[14]。国内学者也对雨洪韧性的理论进行了解释与分析,并且构建了雨洪韧性评价方法。许涛等以中国超过 200 个城市为研究对象,利用相关性分析得出,内涝的弹性强弱分布呈现空间集群状态,长三角地区城市内涝弹性较强[15]。通过分析雨洪韧性在城市设计的微观、中观、宏观 3 个尺度上的作用,并且以案例介绍了空间布局、场地设计中韧性理念的运用[16]。静安区路网、管网非常复杂,城镇化程度极高,雨水管网数据难以获取,对于此类情况,许多学者对管网难以获取的地区雨洪过程,采取多种办法进行模拟。杨东等将管网的排水能力等效下渗考虑,对陕西省西咸新区内涝积水过程进行计算机模拟,并且对雨水井等效排水法(RIA)、仅在道路上等效排水法(CIR)、在所有区域等效排水和降雨率折现方法 4 种等效排水法进行模拟[17]。杜佳锴等对广州市城镇化较高的猎德涌流域的城市雨洪进行模拟比较,模拟发现降雨减少法、增加下渗法以及管网概化法与有管网情况模拟的结果相关程度较高,其中增加下渗法相关性最高[18]。综上,目前学者针对无管网资料地区比较多采用的方法可以概括为管网概化法、削减降水法以及增加下渗法。

本文采用增加下渗法,通过对城市雨洪淹没区进行模拟分析,评价城市雨洪韧性,并依据不同的韧性程度,对城市应对水安全规划设计提出策略,以城市的自我调蓄能力为基础,从生态雨洪韧性方面出发,通过提出针对性的生态策略,使城市通过自身系统的调蓄能力,提升城市对雨洪的抵御、吸收和再利用,对雨洪进行弹性适应,从而减小城市内涝对城市造成的破坏。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况及数据来源

上海市静安区的总面积约为 36.82km²,处于上海中心城区,城市化水平高,下垫面情况复杂,横跨苏州河两岸。据统计,近百年来,上海有超过 300 条河流消失,减少的水域面积约 10.46km²,水面率下降 3.61%[19]。由于河流的水系结构被破坏,致使河网对雨水的调蓄能力减弱,并且静安区是上海的中心城区,建筑与人口都比较密集,由于是老城区,地势坑洼处较多,且由于城市建设下垫面不透水性增加,阻碍雨水下渗,同时具有典型的热岛效应和雨岛效应[20,21]。这些因素之间相互作用,导致静安区的部分区域尤其是道路雨洪期间积水严重,影响居民生活。

本文的数字高程模型数据来源于 NASA 地球科学数据网站(<https://nasadaacs.eos.nasa.gov>),分辨率 12.5m;降雨数据来源于 DB31_T-1043-2017_暴雨强度公式与设计雨型标准(上海市地方标准)计算所得;土地分类使用数据来源于地球大数据科学工程(<https://data.casearth.cn>),数据精度为 2m[22],土壤类型数据来源于地理科学数据网(<http://www.csdn.store>),数据精度为 30m;其他相关统计资料主要来源于《上海市水利志》《上海市气象志》《上海统计年鉴》《中国气象灾害大典》以及上海市水务局、上海市气象局官网。

1.2 研究方法

1.2.1 SCS 模型

本文采用对管网数据依赖较少的 SCS (Soil Conservation Service)模型,在宏观尺度上对静安区的雨洪淹没情况、雨洪廊道情况、以及河流水域的安 全缓冲区进行分析。SCS 模型是 1954 年美国农业部水土保持局为了估算水土保持中径流[23]情况,而 开发的适用小流域的水文模型[24]。随着后来研究的深入,学者们进行了改良,可以用来研究雨水径 流、土壤的侵蚀、研究土地利用情况等。SCS 模型将 下垫面的土地利用方式、土壤类型及湿润程度考虑 进来,具有操作简单、结构明确的特点,所需数据量 少的同时模拟精度较高,适合于资料缺乏的地区。本文中 SCS 模型以 GIS 的空间处理工具为辅助,进 行空间径流的可视化分析与拓展[25],计算公式为:

水平衡方程:

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

假设一:

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

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

式(1)-(3)中: P 为降水总量(mm);F 为降水 事件中降水实际入渗量(mm);Q 为实际发生的地 表径流量(mm);I_a 为降水的初损量(mm);S 为流域 当时的潜在最大入渗量(mm)。

假设二:

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

式中: λ 是一个区域系数,取决于下垫面情况和气候因素的影响。原模型开发部门根据当地实际情况推荐使用 I_a=0.2S,由于经验公式中的 λ 是一个变量,具有不确定性。上海地区的平均下渗量比美国的少一半,因此本研究的初损 I_a 应当根据上海地区的实际降雨下渗情况进行修正。贺宝根等以上海郊区农田作为研究对象,利用 SCS 模型进行模拟,认为 λ 值取 0.05 时误差较小[26]。刘兰岚对上海中心城区的 λ 取值进行多次试算,得出结论: AMCI 时, λ =0.03;AMCII 时, λ =0.08;AMCIII 时, λ =0.2[27]。高习伟采用 2000 年上海地区的降雨资料、径流数据以及土地利用情况等三项要素进行测算,认为 λ 值在 0.07 时具有较高的模拟精度[23]。由于静安区处于上海中心城区,土壤为中等湿润,本文认为 I_a=0.08S 比较合理,可以使产流误差的标准差相对较小。将 λ =0.08 代入可得:

$$\begin{cases} P \geq 0.08S, Q = \frac{(P - 0.08S)^2}{P + 0.92S} \dots\dots\dots (5) \\ P < 0.08S, Q = 0 \end{cases}$$

通过无量纲参数 CN 推导 S 可得：

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

式中：CN 是描述降雨径流关系的参数，其理论取值范围在 0 — 100 之间。一般来说，同一降雨条件下，某流域下垫面径流产生量越大，CN 值也越大。CN 值的影响因素为前期土壤湿润程度、水文土壤组 和土地利用类型三大要素。

根据文献叙述以及研究区域的降水条件和气候 状况，得到上海市静安区土壤为中等湿润程度。上 海的土壤类型地表为人工土，其余以黏土类为主。根据地理科学数据网中国科学院南京土壤研究所周 慧珍经数字化编辑成 ARC/INFO COVERAGE 格式 的数字化产品，得出上海静安区以城市硬化地面和 石灰性冲积土等土壤类型构成为主，渗透性较弱，水 分可以自然下渗的地表面积有限，因此本研究区域 的水文土壤组为 D 组。根据实际情况结合土地利 用类型，将研究区划分为植被覆盖区、水域、不透水 面和未利用地[28] 。并利用纳什系数进行率定，确定 研究区的 CN 值（表 1）。

表 1 研究区的 CN 值

土地 利用类型	A	B	C	D
植被覆盖区	65	74	83	86
水域	98	98	98	98
不透水面	85	90	94	98
未利用地	78	87	82	95

1.2.1 雨洪韧性分析

首先，根据区域现状地形特征，提取一级主要廊 道、二级次要廊道以及极端降水时出现的三级毛细 廊道，三大不同级别的潜在雨洪廊道，对雨洪廊道进 行分析与模拟；结合河流现状及其他湖泊等各种水 系，结合防洪标准，对河流水域的安全缓冲 区进行分析；运用 SCS 模型进行降雨径流转化，基于 ArcGIS 工具建立雨洪淹没模型，进行雨洪淹没区的范围定 位和积水深度确定，对现状雨洪韧性进行分析。

雨洪廊道的分析与模拟：以地面高程数据、填注 分析数据、流向栅格数据为基础，将提取的雨水廊道 进行划分，通过 GIS 平台的要素折点转点工具捕捉 河流线段的终点，确定雨洪径流战略点的位置，得到雨洪廊道控制网络图。

雨洪淹没区的范围定位和积水深度确定：本研究将研究区域划分为 55 个子汇水区，利用 DB31_T-1043 - 2017_暴雨强度公 式与设计雨型标准（上海 市地方标准），计算静安区每小时降雨强度（表 2），公式如下：

$$q = \frac{1600(1 + 0.846lg^p)}{(t + 7.0)^{0.656}} \dots\dots\dots (7)$$

式中：q 为设计降雨强度(L/(s · hm2));p 为设计重现期(a);t 为降雨历时(min)。

表 2 上海市不同雨水重现期下的暴雨强度

重现期(a)	1	5	10	20	50	100
暴雨强度(mm/h)	38.2	58	67.3	76.6	88.8	98.1

静安区属于上海中心城区，中心城区目前管网规划设计标准为 5 年一遇，但根据《静安区海绵城市规划》(2018—2035)中表述，现状雨水管网建设较早，大部分排水系统采用 1 年一遇标准，与总体规划要求中心城区达到 5 年一遇标准，存在明显差距。并且静安区位于上海市市的盆底位置，该区域的绝大部分地面高程均低于苏州河的正常水位（约 3m),所以该区的径流排入苏州河较为困难[29]。本文利用增加下渗法，将管网及区域内其他河网储水等纳入排水系统，将其等效于 1 年一遇的径流量，在计算 3 个重现期径流量后，减去 1 年一遇的 SCS 计算出的径流量，通过 SCS 模型计算与 ArcGIS 模拟，得到 5 年、20 年、100 年 3 种重现期下的淹没分布图。

河流水域安全缓冲区分析：本文参考相关文献和规范，对缓冲区范围取 6m、30m、60m3 个数据级别，利用邻域分析对河流水域数据进行多环缓冲分析。并通过镶嵌、重分类、叠加后得到最终的河流水域安全缓冲区分析图。

1.2.3 雨洪韧性评价指标体系构建

层次分析法(AHP)是在面对复杂的决策问题时，将问题分解成不同的组成因素，然后按照因素间的相互隶属和影响关系进行分层，定性与定量结合，对难以完全定量的系统进行分析评价[28]。模糊综合评价(PCE)是将模糊的现象进行量化，建立模糊集合进行运算评价。本研究通过构建 AHP-FCE 综合评价模型，对影响雨洪韧性的因子进行量化，构建指标体系（表 3),使用 AHP 对指标的权重进行确定，最后采用模糊综合评价方法，对相关的因子进行综合性评价[28]。以雨洪韧性评价作为目标层(R)以及 5 个准则层(A)、15 个指标层(B)共同构成 3 个层级的指标体系（表 3),用以评价场地雨洪风险程度。

表 3 雨洪韧性评价指标体系层次结构模型

目标层(R)	准则层(A)	指标层(B)	指标解释
雨洪韧性评价	水体设计(A1)	水系格局(B11)	水体成体系或单一
		水系形态(B12)	水体形态规则或自然
		水体驳岸(B13)	驳岸有无、自然或人工
	竖向设计(A2)	道路竖向(B21)	竖向坡度设计是否合理，道路积水程度
		广场坡度(B22)	广场坡度设计是否合理，地面积水程度
		滨水竖向(B23)	靠近水体的场地排水合理与否
	地面铺装(A3)	铺装材质选取(B31)	材质美观与整体和谐度
		铺装平整程度(B32)	铺装有无破损
		铺装透水性能(B33)	材质吸水性
	植物种植(A4)	植物防灾特征(B41)	植物防风性、植物附近空气清新度及噪音程度
		植物生长状况(B42)	植物长势健康程度
		植物配置优劣(B43)	植物配置美观度
	雨洪管理设施(A5)	雨洪管理设施布局(B51)	雨洪设施的系统性
		雨洪管理设施规模(B52)	雨洪设施的规模大小
		雨洪管理设施衔接关系(B53)	雨洪设施间衔接及其与灰色排水设施衔接

2 结果及分析

2.1 雨洪韧性格局

上海市静安区雨洪韧性格局包括雨洪廊道的分析与模拟、雨洪淹没区范围定位和积水深度确定以及河流水域的安全缓冲区分析 3 个方面，构建多层次、连续完整的网络。

雨洪廊道分析与模拟。根据雨洪廊道控制网络图（图 1），通过模拟数值的调整从研究区域中提取出 55 条雨洪径流廊道，其中一级主要廊道 2 条、二级次要廊道 13 条、三级毛细廊道 40 条（表 4）。由图 1 可知，雨洪一级廊道分布在共和新路街道沪太路到老沪太路。二级廊道分布较广，容纳三级廊道的溢流，主要调节中小型雨水，北部的二级雨洪廊道分布在彭浦镇北部；中部廊道分布在共和新路到大宁路、芷江西路、普善路、恒丰北路附近；南部的二级廊道经过江宁路街道、天目西路西路街道和石门二路街道，塘沽路、天潼路附近。三级廊道分布较广，呈树状径流网络，主要用来汇聚雨洪。由图 2 可知，雨洪主要战略区有两个，一个位于彭浦镇北部，另一个位于彭浦镇南部、大宁路街道南部以及共和新路街道的西北部；雨洪战略区有 7 个，静安区南部分散有 5 个次要战略区，彭浦镇北部有一个次要战略区，大宁路街道北部分散有一个次要战略区；多个雨洪控制战略点，战略点分布较广，主要分布在幸福创智园、康宁路一场中路、锦江都城附近，走马塘三泉路、大宁路、运城路道路上，以及大宁路 883 弄、共和新路 1725 弄居住区公共空间和闸北公园、大宁公园绿地空间，要重点对战略点所在部分加强雨洪管理。

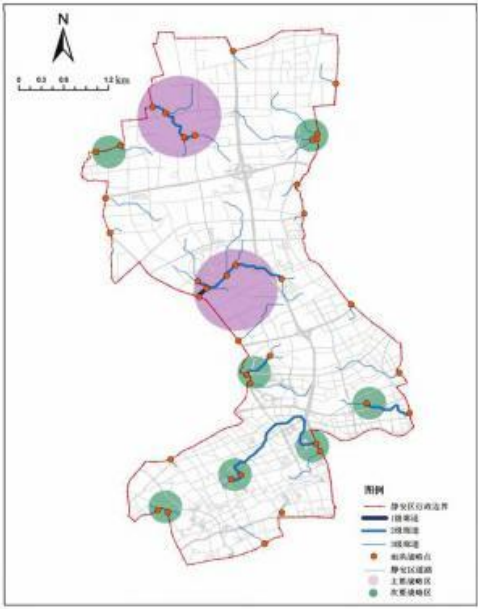


图 1 雨洪廊道控制网络

表 4 雨洪廊道网络构建

雨洪廊道等级	径流长度(m)	分布情况	作用
一级廊道	3 601	数量 2 条，分布范围广，径流网络源头	容纳二三级廊道溢流，主要调控暴雨径流
二级廊道	11 078	数量较少，分布分散	容纳三级廊道的溢流，调节中小雨水
三级廊道	28 282	数量较多，蔓延范围广，径流网络尽头	聚集雨水，对雨水进行初步控制

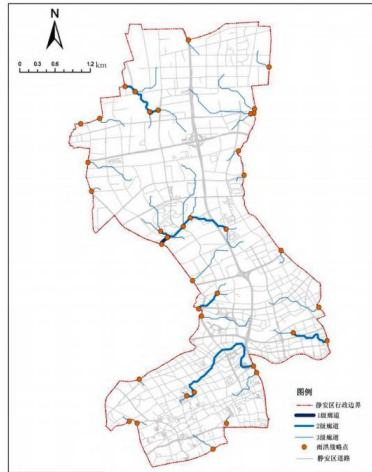


图 2 雨洪战略区分析

雨洪淹没区的范围定位和确定。通过 GIS 模拟分析,得到 5 年、20 年、100 年 3 个重现期下的淹没分布图 (图 3—5)。路缘高度一般为 0.1—0.15m,超过 0.1m 对行人出行造成困难;积水深度在 0.25-0.35m 时汽车可能熄火,积水深度在 0.45m 左右时,积水达到成人膝盖处,行人难以行走,且对儿童生命安全造成威胁。根据对居民生活的影响程度将淹没等级分为 0—0.1m、0.1—0.25m、0.25—0.45m、大于 0.45m 共 4 个等级。积水深度大的区域风险高,并根据其与卫星地图等判断雨洪风险集中区域。在 5 年重现期下便出现淹没斑块的,该些区域内涝风险较大。5 年重现期下,积水点散布在彭浦镇、大宁路街道、静安寺街道、曹家渡街道。20 年重现期与 5 年重现期相比,原有积水面积扩大,深度加深。出现新的积水点,与 5 年重现期下相比,新增了沪太支路与江场西路交叉口位置、岭南小区一号楼东边、华发华润静安府南府及祥腾财富广场、709 媒体园区内部、大宁八一坊内部、石门二路辅路丽都新贵人行道、上海市第六十中学内部。相比于 20 年重现期,100 年重现期新增普善路与中兴路交叉路口积水点、铁路附近番瓜弄小区少量积水点、叶文汉校徽陈列馆后大片硬质场地上有少量小于 10mm 积水点、柳营新路 319 小路 5 号楼 8 号楼沿柳营路有大面积但小于 10mm 的积水。

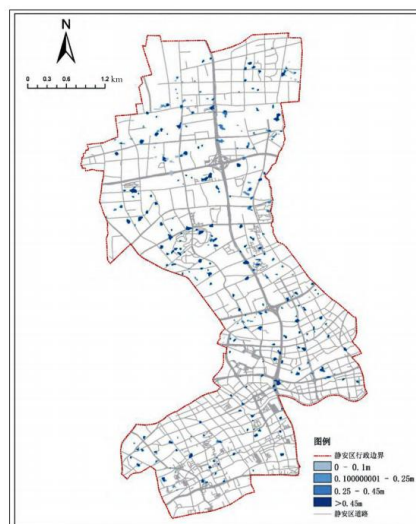


图 3 5 年重现期雨洪淹没分析

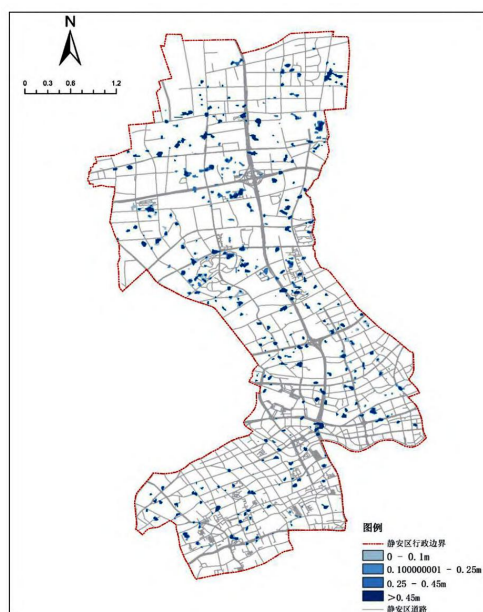


图 4 20 年重现期雨洪淹没分析

综合 3 个重现期下淹没分布图可以看出，彭浦 镇和大宁路街道积水点较多且面积较大，集中于北 部和西南部，居住区公共空间如平陆路 99 号、原平 路 383 弄、大宁路 883 弄等；商业公共空间如永和路 118 弄、大宁国际商业广场等；滨水公共空间如走马 塘、彭越浦河周边；场中路、汶水路等道路；货运火车 站广场有少量积水点；绿地空间如大宁郁金香公园 等积水情况较为严重。整体来说，静安区积水点散 布较广，基本集中在公共活动空间；相比来说，江宁 路街道内涝风险相对较低。



图 5 100 年重现期雨洪淹没分析

对人群活动、场地建设情况等因素进行衡量，并结合模拟结果，实地对具有代表性的雨洪淹没区进行调查，对乐业公寓、苏州河光复路—长安西路区段滨水空间、天目中路—共和新路交叉口桥下道路、中铁·中环时代广场进行调查（表 5）。乐业公寓存在问题有：地面铺装硬质铺装为主，路面存在凹凸不平现象；绿化种植品种较少，未能选取雨洪针对性强的植物进行合理配置；无景观水体。苏州河光复路—长安西路区段滨水空间存在问题有：地面铺装以硬质铺装为主，两侧空地都被机动车占据；植物种植情况方面，植物缓冲带宽度窄，植物配置杂乱无序，未形成良好的滨水植物景观；活动场地方面没有与公园和苏州河景观形成应对雨洪的空间布局；驳岸缺乏生态景观效益与空间活力。天目中路—共和新路交叉口桥下道路存在问题有：地面铺装以道路沥青硬质铺装为主，不透水性极强，易造成雨涝现象；植物种植方面，缺乏绿化景观设计，场地给人生硬冰冷的感受；活动场地方面，道路多有积水；道路空间紧邻苏州河驳岸，安全性有待提高。中铁·中环时代广场存在问题有：地面铺装以硬质铺装为主，极易蓄积雨水，造成地面湿滑；植物种植方面，广场绿化布置简单，美观性不足，植物种类单一，不能消解拦截雨水；活动场地未能提供相应的休息服务设施；水景空间设置较多，未能发挥其景观作用与雨洪适应性作用。并且经过对比验证静安区降雨积水表现与模拟结果比较，具有较高的相似性。

表 5 典型积水点现状分析

点位名称	乐业公寓居住区	苏州河光复路-长安西路区段滨水空间	天目中路-共和新路交叉口桥下道路	中铁·中环时代广场
区域分布				
现状问题	地面铺装  硬质铺装为主，路面存在凹凸不平现象	地面铺装  硬质铺装为主，主要作为停车场使用，两侧空地都被机动车占据	地面铺装  道路沥青硬质铺装为主，不透水性极强，易造成雨涝现象	地面铺装  硬质铺装为主，极易蓄积雨水，造成地面湿滑
	植物种植  绿化植物品种较少，未能选取雨洪针对性强的植物进行合理配置	植物种植  植物缓冲带宽度窄，植物配置杂乱无序，未形成良好的滨水植物景观	植物种植  缺乏绿化景观设计，场地给人生硬冰冷的感受	植物种植  广场绿化布置简单，美观性不足，植物种类单一，不能消解拦截雨水
	活动场地  停车场内，雨水易积蓄，无法快速排出	活动场地  没有与公园和苏州河景观形成应对雨洪的空间布局	活动场地  道路有积水	活动场地  划分出明确空间范围，未能提供相应的休息服务设施
	景观水体 小区内未涉及景观水体	景观水体  驳岸部分安全性强，美观度不足，缺乏生态景观效益与空间活力	景观水体 道路空间紧邻苏州河驳岸，安全性有待提高	景观水体  水景空间设置较多，未能发挥其景观作用与雨洪适应性作用

河流水域安全缓冲区分析。静安区共计有河道 10 条、大型湖泊 1 个，水域总面积约为 56 万 m²。由图 6 可知，静安区水域的安全缓冲范围沿河流和湖泊分布。基于 GIS 空间分析处理得到静安区雨洪韧性空间格局分析图（图 7—9）。由图 7—9 可知，静安区区域内涝风险高，遭受雨水侵扰的情况严重，其恢复到扰动前的状态更困难，故其雨洪韧性较低。

淹没深度较高的，对居民生活造成较大困扰，对场地造成较大损害，其雨洪韧性亦较低。静安区雨洪韧性由雨洪廊道、河流水域安全缓冲区及雨洪淹没区综合构成。雨洪空间风险区域总体位于河流水系附近以及静安区中北部，容易形成城市内涝，雨洪安全性较低；中部及南部风险区域面积较小且相对分散。

2.2 雨洪韧性评价

为了使权重系数的确定更加科学合理，邀请具有专业知识背景的 15 名高校专家进行评分并且全部收回，将评价因子权重导入 YAAHP 软件中，输出模型准则层次的判断矩阵（表 6—10）以及最终的目标层权重计算结果（表 11）。通过计算之后，对评价指标进行排序，得出最终结果。权重系数分别为水体设计(0.2376)、竖向设计(0.2114)、地面铺装(0.1376)、植物种植(0.1257)、雨洪管理设施(0.2878)。从准则层次来看，雨洪管理设施权重最高，其次为水体设计，植物种植权重则最小。从指标层看，水体设计中水系格局和水系形态相较水体驳岸权重更高；竖向设计中，滨水竖向权重比道路竖向与广场竖向高；地面铺装中铺装透水性能权重远高于铺装材质选取及平整程度；植物防灾特性、植物生长状况、植物配置优劣三者权重相差不大；雨洪管理设施中，雨洪管理设施布局权重高于雨水管理设施规模和衔接关系。



图 6 河流水域安全缓冲区分析

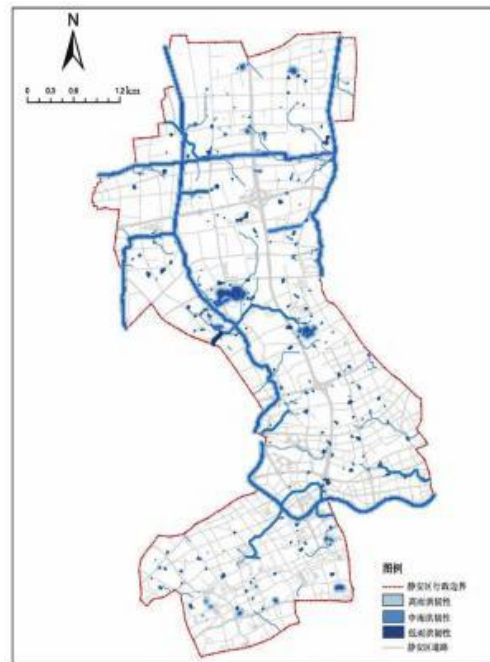


图 7 5 年重现期雨洪韧性格局

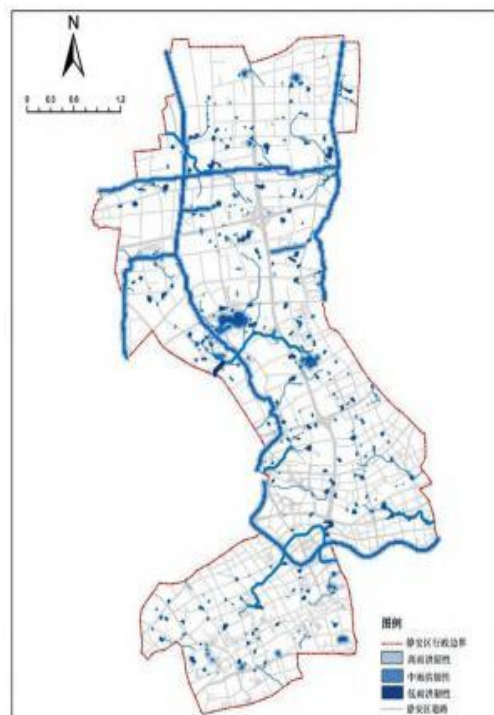


图 8 20 年重现期雨洪韧性格局

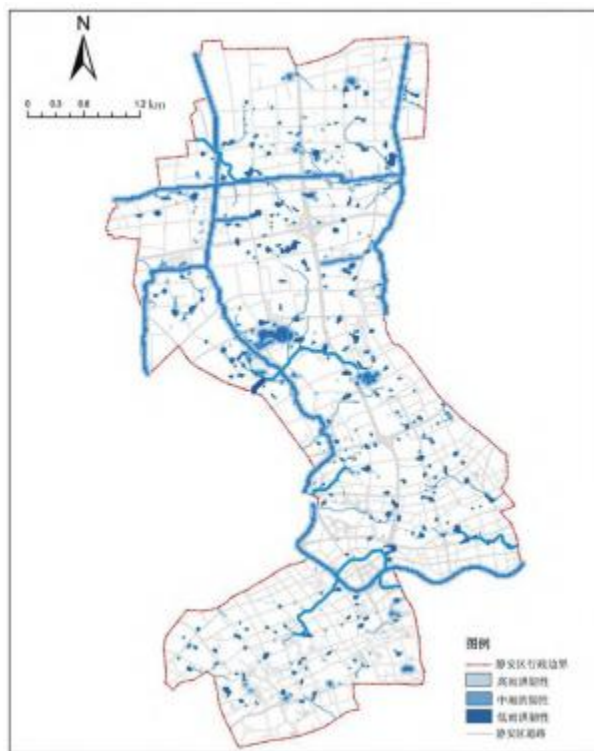


图 9 100 年重现期雨洪韧性格局

对雨洪韧性空间格局图进行分析，选取积水点应依据人们对空间的使用情况以及该区域的内涝风险程度，本文从居住空间、滨水空间、道路、广场空间各选出有代表性的具体场所，乐业公寓 20 世纪末建成，建成时间较早，现居住人口密集，小区道路坑洼问题比较严重；苏州河光复路—长安西路区段滨水空间，历史悠久，是居民休闲的主要活动场所；天目中路与共和新路交叉口桥下空间，车行流量大，下雨积水点较多，有蚊虫滋生现象；中铁·中环时代广场，商业繁华，广场为不透水铺装，下雨时有积水问题。选取乐业公寓、苏州河光复路—长安西路区段滨水空间、天目中路与共和新路交叉口桥下空间以及中铁·中环时代广场 4 个公共空间进行雨洪韧性评价。之后按照李克特量表对现场实际情况打分，得出雨洪韧性空间格局视角下城市公共空间规划设计评级结果（表 12）。

表 6 水体设计判断矩阵

水体设计	水系格局	水系形态	水体驳岸	W_i
水系格局	1	3.1265	0.8322	0.2908
水系形态	1.2339	1	1.0155	0.2242
水体驳岸	3.091	4.2076	1	0.4850

通过对 4 个公共空间的雨洪韧性评价得到最终分数：乐业公寓整体上雨洪安全性较差(0.3874)、光复西路—长安西路滨水空间为中等(0.4194)、天目中路—共和新路桥下道路空间为中等(0.4367)、中铁·中环时代广场为中等(0.4757)。该评价结果印证了 SCS 模型模拟的雨洪韧性格局所得到的结果是基本准确的，属于韧性程度较低的场所，需要对该公共空间构建进行更新改造设计，从而增强对极端降水的应对能力。

表 7 竖向设计判断矩阵

竖向设计	滨水竖向	广场竖向	道路竖向	W_i
滨水竖向	1	3.517 1	3.312 7	0.448 7
广场竖向	1.187 4	1	1.777 4	0.253 7
道路竖向	1.508 2	2.240 7	1	0.297 6

表 8 植物种植判断矩阵

植物种植	植物配置优劣	植物生长状况	植物防灾特性	W_i
植物配置优劣	1	1.754 6	1.066 7	0.259 2
植物生长状况	1.388 5	1	1.540 8	0.281 4
植物防灾特性	3.620 8	2.861 4	1	0.459 4

表 9 地面铺装判断矩阵

地面铺装	铺装透水性能	铺装平整程度	铺装材质选取	W_i
铺装透水性能	1	4.11	3.297 2	0.512 6
铺装平整程度	0.737 2	1	2.152 8	0.251
铺装材质选取	0.520 4	2.266 2	1	0.236 4

表 10 雨洪管理设施判断矩阵

雨洪管理设施	雨洪管理设施衔接关系	雨洪管理设施规模	雨洪管理设施布局	W_i
雨洪管理设施衔接关系	1	1.918	0.490 2	0.223 7
雨洪管理设施规模	1.731	1	1.276 7	0.286 7
雨洪管理设施布局	3.380 7	3.394 3	1	0.489 7

表 11 雨洪韧性规划设计评价判断矩阵

雨洪韧性空间规划设计评价	水体设计	竖向设计	植物种植	地面铺装	雨洪管理设施	W_i
水体设计	1	2.27 1	5.042 5	2.64 4	1.601 3	0.237 6
竖向设计	1.869 1	1	3.573 2	3.006 4	1.453 3	0.211 4
植物种植	0.944 8	0.942 5	1	2.097 5	1.090 0	0.125 7
地面铺装	1.602 2	1.074 5	2.685 4	1	0.616 1	0.137 6
雨洪管理设施	2.524 7	3.358 0	4.353 0	3.571 2	1	0.287 8

表 12 雨洪韧性评价等级表

评价对象	乐业公寓居住区		光复路—长安西路区 段滨水空间		天目中路—共和 新路桥下道路		中铁·中环 时代广场	
	得分	权重得分	得分	权重得分	得分	权重得分	得分	权重得分
水体设计 A1(0.237 6)	4.447 4	1.056 7	5.207 5	1.237 3	4.722 5	1.112 1	5.517 5	1.310 9
水系格局 B1(0.069 1)	5.4	0.373 1	5.8	0.400 8	5.8	0.400 8	6.2	0.428 4
水系形态 B1(0.053 3)	3.8	0.202 5	5.8	0.309 1	5.4	0.202 5	5.8	0.309 1
水体驳岸 B1(0.115 2)	4.2	0.483 8	4.6	0.529 9	3.8	0.437 8	5	0.576 0
竖向设计 A2(0.211 4)	4.907 4	1.037 4	5.532 1	1.169 5	3.619 6	0.765 2	5.780 2	1.221 9
道路路向 B2(0.062 9)	4.6	0.289 3	5	0.314 5	3.8	0.239 0	6.2	0.389 9
广场路向 B2(0.053 6)	5.4	0.289 4	5.8	0.310 9	2.6	0.139 4	5.4	0.289 4
滨水竖向 B2(0.094 9)	5	0.474 5	6.2	0.588 4	4.2	0.398 6	5.4	0.512 5
地面铺装 A3(0.137 6)	4.214 0	0.579 8	3.906 1	0.537 5	4.007 8	0.551 5	4.718 8	0.649 3
铺装材料选取 B31(0.032 5)	5.8	0.188 5	3.8	0.123 5	3.4	0.110 5	3.8	0.123 5
铺装平整度 B32(0.034 5)	3.8	0.131 1	3.4	0.117 3	4.2	0.144 9	4.2	0.144 9
铺装透水性 B33(0.070 5)	6.2	0.437 1	4.2	0.296 1	4.2	0.296 1	5.4	0.380 7
植物种植 A4(0.125 7)	5.510 4	0.962 7	5.592 1	0.702 9	3.463 1	0.435 3	4.152 2	0.521 9
植物防灾特性 B41(0.057 8)	4.2	0.242 8	5	0.289 0	3	0.176 1	3.4	0.196 5
植物生长状况 B42(0.035 4)	4.6	0.162 8	7	0.247 8	3.8	0.134 5	5	0.177 0
植物配置优劣 B43(0.032 6)	3.8	0.123 9	5.4	0.176 0	4.2	0.136 9	5	0.163 0
雨洪管理设施 A5(0.287 8)	4.414 4	1.270 5	3.276 9	0.943 1	2.005 3	0.577 1	4.353 3	1.252 5
雨洪管理设施布局 B51(0.140 9)	4.6	0.648 1	3.8	0.535 4	1.8	0.253 6	3.4	0.479 1
雨洪管理设施规模 B52(0.082 5)	5.4	0.445 5	3.4	0.280 5	1.8	0.148 5	4.6	0.379 5
雨洪管理设施衔接情况 B53 (0.064 4)	3.8	0.244 7	3	0.193 2	2.2	0.141 7	4.6	0.296 2
综合得分	0.387 4	较差	0.419 4	中	0.436 7	中	0.475 7	中

3 雨洪韧性提升策略

3.1 源头削减措施

静安区目前海绵城市建设集中在道路改造，静 安区海绵城市建设主要对城市道路进行了海绵化改 造，道路包括：汾西路、闻喜路（阳曲—平顺）、高平 路（永和—晋城）、襄阳北路（长乐— 巨鹿）、铜仁路 （南京—北京）、共和新路和平顺路[30] 。根据雨洪韧 性格局，构建利用“渗、滞、蓄”设施减少地表径流 量，根据《上海市海绵城市专项规划》，内涝防治设 计重现期为 100 年，根据 100 年重现期雨洪韧性布 局图，建设绿色基础设施（图 10）。

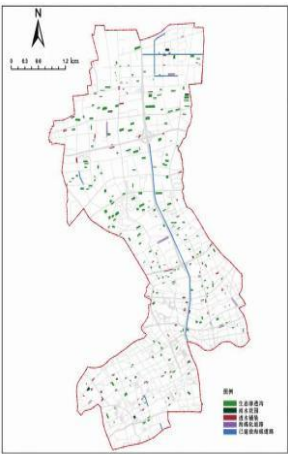


图 10 绿色基础设施布置结构

提升积水点雨洪韧性。城市建成区雨洪空间格局已经确定，站在雨洪韧性的视角下，通过低影响的方式提升城市应对雨洪的能力，重点对城市积水点进行雨洪韧性优化，使城市系统对径流的吸收、再利用过程接近扰动前的原始状态，通过调节系统自身的应对能力，减少外排，将雨洪生态保持在相对稳定 的状态。根据雨洪淹没区各自不同的淹没特点，将 积水点分为道路、广场、公共空间、停车场，针对不同 积水点空间的使用需求，进行下垫面改造、植物种 植、空间重构等低冲击、低成本、可造性强的长效 措施（表 13），通过生物滞留措施、透水铺装等源头 削减措施对地表径流进行削减，实现雨洪韧性的提 升与环境品质的改善。

表 13 积水点提升策略

居住区积水点改造策略：乐业公寓居住区	滨水区积水点改造策略：苏州河光复路—长安西路区段滨水区公共空间	桥下空间积水点改造策略：天目中路与共和新路交叉口桥下道路空间	广场积水点改造策略：中银·中环时代广场空间
雨水收集回用系统设计	生态护岸优化设计	绿地空间优化设计	广场铺装优化设计
			
在小区内设计雨水收集回用系统，主要用于内部的生活用水、灌溉、消防用水等	在保证驳岸安全的情况下，进行生态化雨洪管理，满足亲水性及趣味性	设置雨水流入入口，降低绿化带标高，以便能够收集雨水流入绿地	对透水铺装和不透水铺装的比例进行合理分配，平衡生态与经济的关系
宅间绿地优化设计	滨水绿带优化设计	道路断面优化设计	现状水景优化设计
			
对绿地进行竖向设计，为宅间绿地赋予雨水的收集和储蓄功能，将渗透沟、雨水花园等低影响开发措施相结合	在进行滨水景观设计中，要留有绿化缓冲带，设置块状低影响设施，打破滨水空间大片不透水硬质铺装，更好吸收径流	道路竖向设计应充分考虑到横坡纵坡，绿化带应留有雨水口，保证迅速有效的收集道路雨水	进行总体场地排水布局设计，暴雨时能引导水池溢流流入绿地，并通过下沉式绿地对雨水进行，进行收集与净化利用
雨水种植池设计	生态树池优化设计	活动场地优化设计	生物滞留池优化设计
			
补给下渗，种植吸附及净化类植物，过滤污染物质	对树池进行生态化设计，对道路积水进行有效吸收	合理规划与布置公共空间，丰富桥下活动场地类型，建设分散式调蓄设施，以便雨水汇入	设置生态滞留池，利用填料和植物根系的过滤吸附，控制场地的雨水
宅间道路优化设计	道路竖向优化设计	生态停车场优化设计	活动空间优化设计
			
在居住区道路设置透水铺装使雨水尽可能下渗，并设计雨水口，使雨水流入宅边绿地，减少因为积水引起的蚊虫滋生，改善小区环境	考虑受纳水体的高程，对滨水道路间进行合理的空间设计，设置要严格遵守内涝防治规划和水系的高程控制	桥下空间对停车场进行透水铺装优化，增加场地对雨水的下渗，减少积水点及积水面积，有力改善桥下积水，蚊虫滋生问题	对广场进行合理的功能分区，融入雨水花园等生态雨洪管理设施，增强场所生态性、互动性与教育性

3.2 过程传输措施

构建雨洪廊道网络体系，构建生态绿色雨水廊道将各空间单元连接起来，引导雨水流入雨洪调蓄功能区处理，城市建成区适宜在场地中布置小规模分散式的雨洪管理设施，增加雨洪毛细廊道，通过竖向设计，构建完善的具有高度自适应能力、自我调节能力的韧性廊道[28]。加强各廊道之间的自然生态沟通联系，建立和不断完善该廊道区域的雨洪系统，将零碎的雨洪设施和口袋绿地，河流湖泊和污水处理设施、给排水设施等人工设施体系与雨洪廊道整合相连，对静安区内水流不畅的河网进行清淤，种植功能性植物，净化水质，使其充分发挥传导径流的作用。通过构建人工雨水基础设施形成雨水处理序列，增强其雨水处理能力。

3.3 末端治理措施

建立河流水域安全缓冲区，对静安区的水域体系进行合理规划利用规划，城市建设严格遵守河流水域的缓冲区要求，保证滨水空间的防灾功能。在进行城市更新改造的过程中，对河道两岸的景观设计应留有植被缓冲带，以便发挥其对径流的减缓作用；塑造复式驳岸，能同时提高排涝能力和增加绿廊空间，滨水空间的设置应当增加透水铺装、植草沟等生态调蓄设施。做好灰绿设施衔接，加强对河道水量和水质的监测，保障河流的蓄水功能，同时完善雨水管网等的管理，使灰绿设施协同发挥作用。

4 结语

本文以上海市静安区为例，从宏观分析与微观防控两个方面研究城市建成区的雨洪韧性。宏观层面，从雨洪廊道的分析与模拟、雨洪淹没区的范围定位和积水深度确定以及河流水域的安全缓冲区分析3个方面进行雨洪韧性的构建，并结合实地调查与分析，对具有代表性的雨洪积水点进行调研，对积水位置进行实地验证并进行现状分析；针对静安区当前的雨洪韧性格局，进行雨洪弹性公共空间规划专项设计研究。微观层面，对4个典型积水点场所进行雨洪韧性评价，并根据评价结果提出相应的低影响公共空间生态设计建议。

本文利用SCS模型和ArcGIS空间分析与水文分析工具交叉结合进行模拟，可视化方法使结果更加清晰直观，可以更加准确了解城市积水情况，进行生态韧性建设，提高城市应对内涝的弹性。由于城市建成区的空间已经确定，对城市系统雨洪空间格局韧性进行重构的难度较大，所以本文着重于对积水点进行雨洪韧性设施的考虑，更好地管理雨洪易发生地，制定更适宜的雨洪韧性措施。

参考文献：

- [1]王静，朱光鑫，黄献明. 基于雨洪韧性的荷兰城市水系统设计实践[J]. 科技导报，2020,38(8)：66-76.
- [2]董新宇，张静慧，袁鹏，等. 基于多目标优化的低影响开发设施布局方法[J]. 环境科学学报，2021,41(7)：2933-2941.
- [3]胡环，胡伟. 浅谈气候变化对洪涝灾害形成的影响[J]. 内蒙古水利，2015,(3)：139-140.
- [4]刘焕君，刘志生，张小雨，等. 基于雨洪控制的给排水科学与工程专业课程体系修订与优化[J]. 中国给水排水，2021,37(24)：6-10.
- [5]陈天，石川淼，王高远. 气候变化背景下的城市水环境韧性规划研究—以新加坡为例[J]. 国际城市规划，2021,36(5)：52-60.
- [6]李可欣，李超. 多维度视角下城市形态与气候韧性的关联[J]. 城乡规划，2021,(3)：20-27.

-
- [7]J Wu ,T Wu . Ecological resilience as a foundation for urban design and sustainability[M] . Pickett S T A,Cadenasso M L,Mcgrath B . Resilience in Ecology and Urban Design. Dordrecht :Springer Netherlands , 2013 : 211 - 229 .
- [8]Adger W N,Brown K,Nelson D R, et al. Resilience implications of policy responses to climate change :Resilience implications of policy responses to climate change [J] . Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change ,2011,2(5) : 757 - 766 .
- [9] Smit B,Wandel J. Adaptation ,adaptive capacity and vulnerability [J] . Global Environmental Change ,2006,16(3) : 282 - 292 .
- [10] Berkes F. Understanding uncertainty and reducing vulnerability:Lessons from resilience thinking[J] . Natural Hazards ,2007,41(2) : 283 - 295 .
- [11] K H Liao , H Lin , W Yang. A theory on urban resilience to floods—A basis for alternative planning practices [J] . Ecology and Society,2012,17(4) : 48 .
- [12]陈娜, 向辉, 马伯, 等. 基于韧性理念的中国城市雨洪管理研究热点与趋势[J]. 应用生态学报, 2022,33(11) : 3137 - 3145 .
- [13]Bertilsson L , Wiklund K , De Moura Tebaldi I , et al. Urban flood resilience—A multi - criteria index to integrate flood resilience into urban planning[J] . Journal of Hydrology, 2019 , 573 : 970 - 982 .
- [14]Schelfaut K,Pannemans B, Van Der Craats I, et al. Bringing flood resilience into practice :The FREEMAN project [J] . Environmental Science & Policy,2011,14(7) : 825 - 833 .
- [15]许涛, 王春连, 洪敏. 基于灰箱模型的中国城市内涝弹性评价[J]. 城市问题, 2015,(4) : 2 - 11 .
- [16]杨正光, 张旭超, 董芳. 雨洪韧性导向的生态城市空间塑造—以中法武汉生态示范城为例[J]. 上海城市规划, 2022,(3) : 68 - 74 .
- [17]杨东, 侯精明, 李丙尧, 等. 无资料城区管网排水过程概化模拟研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(3) : 139 - 144 .
- [18]杜佳锴, 徐梦华, 陈昱宏, 等. 无管网资料地区城市雨洪过程模拟研究[J]. 水力发电学报, 2023,42(2) : 87 - 96 .
- [19]程江, 杨凯, 赵军, 等. 上海中心城区河流水系百年变化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2007,(1) : 85 - 91 .
- [20]尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010,65(5) : 553 - 562 .
- [21]刘晓涛. 上海水旱灾害防御工作的实践与探索[J]. 中国水利, 2020,(17) : 40 - 42 .
- [22]2015 年中国长三角地区 GF1 - 2 m 土地利用分类数据集[M]. 中国科学院空天信息创新研究院, 2020 .

-
- [23]高习伟. 上海市应对气候和土地利用变化的城市雨洪安全策略研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2016.
- [24]张鑫, 张青峰, 周阳阳, 等. 不同坡度黄土微地形条件下 SCS - CN 模型参数研究[J]. 水土保持研究, 2019,26(2) : 74 - 77.
- [25]R Quan. Risk assessment of flood disaster in Shanghai based on spa- tial - temporal characteristics analysis from 251 to 2000 [J]. Envi- ronmental Earth Sciences ,2014,72(11) : 4627 - 4638.
- [26]贺宝根, 周乃晟, 高效江, 等. 农田非点源污染研究中的降雨径 流关系— SCS 法的修正[C]. 中国科学院地理科学与资源研 究所、华东师范大学, 2001 : 168.
- [27]刘兰岚. 上海市中心城区土地利用变化对径流的影响及其水环境效应研究[D]. 上海: 华东师范大学硕士学位论文, 2007.
- [28]王旭阳. 城市公共空间雨洪安全格局构建与规划设计策略研 究— 以上海市静安区为例[D]. 上海: 上海应用技术大学硕 士学位论文, 2021.
- [29]杨妍. 城市暴雨内涝模拟研究— 以上海市中心城区为例[D]. 上海: 上海师范大学硕士学位论文, 2018.
- [30]上海市 15 个海绵城市建设改造案例分享[EB/OL]. [2020 - 01 - 15]. [http://www. water8848. com/news/202001/15/122447 .html](http://www.water8848.com/news/202001/15/122447.html).