

魏乾坤,梁冀雨,黄瑞晶.基于降雨量-内涝面积率模型的内涝防御韧性评价[J].人民珠江,DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

基于降雨量-内涝面积率模型的内涝防御韧性评价

魏乾坤^{1,2},梁冀雨¹,黄瑞晶¹

(1.珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611;2.水利部粤港澳大湾区水安全保障重点实验室,广东 广州 510611)

摘要:构建城市内涝防御韧性体系是应对洪涝灾害的有效措施,但韧性防御与脆性防御的定量判别标准难以支撑现状、规划防御体系的韧性评价。类比材料应力-应变本构,构建防御体系的降雨量-内涝面积率模型,提出三段完整性判据、特征荷载阈值、硬化判别指数 B 与屈强比 λ ;以广州市平原感潮河网区小流域A与丘陵区小流域B为例,采用三耦合模型对现状与规划4套体系施加18级降雨。结果显示流域A规划、流域B规划、流域A现状、流域B现状体系的硬化判别指数依次为0.15、0.60、0.80与1.26,对应判为强、中、弱韧性与脆性;流域B规划体系在170 mm破坏,屈强比0.78。曲线形态可定量判别防御体系的韧脆性质,特征荷载与屈强比可为规划设计及超标准设防提供定量依据。

关键词:城市内涝;韧性评价;降雨量-内涝面积率模型;应力-应变类比;感潮河网

中图分类号:TV87 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-16

全球气候变化与快速城镇化叠加,郑州“7·20”、北京“23·7”等特大暴雨造成重大人员伤亡和经济损失^[1-2],城市内涝损失集中、突发性强,已演变为威胁城市安全运行的重大风险。2021年国务院办公厅《关于加强城市内涝治理的实施意见》要求构建“源头减排、管网排放、蓄排并举、超标应急”的排水防涝工程体系,城市内涝治理正由单项设施达标转向防御体系整体韧性的提升。

当前韧性防御体系建设正处于起步阶段,大量防洪排涝工程处于规划、设计等前期环节,在此阶段对洪涝防御体系的韧性作出定量判别,可为韧性防御体系的构建提供科学依据。建立适用于工程前期的防御体系韧性定量评价方法,是本研究的出发点。

韧性(resilience)概念源于生态学^[3],指系统吸收扰动并维持自身结构与功能的能力;Bruneau等^[4]

在地震工程中提出“韧性三角形”与4R属性框架,奠定了韧性定量评价的经典范式。韧性已成为城市洪涝治理转型的核心理念^[5-8]。在城市洪涝领域,目前尚无针对洪涝韧性的规范性定义,一般理解为排水防涝系统对暴雨扰动的抵抗、吸收与快速恢复能力^[9-10],评价视角也正由设施是否达标转向体系在超标准荷载下的性能表现。但专门面向现状、规划洪涝工程体系,并且可定量、可操作的韧性评价方法仍较缺乏^[9-10]。

已有定量评价研究可归纳为3类技术路线,其技术要点、优势与局限见表1。具体到现状、规划洪涝工程体系的韧性评价,以往研究存在2个核心缺口:韧性防御与脆性防御缺乏明确的定义边界与量化判据,既有方法仅给出韧性水平的相对排序或空间分区;对完整加载路径刻画也不足,难以完整揭示防御体系的韧性与脆性特征。

基金项目:国家自然科学基金(42372319)

收稿日期:2026-07-23 **修回日期:**2026-09-21

作者简介:魏乾坤(1993—),男,硕士,主要从事洪涝灾害防御等工作。

表1 内涝韧性定量评价的3类技术路线

Tab. 1 Three technical routes of quantitative resilience evaluation for urban waterlogging

方法类别	技术路线	优势	局限
指标体系法 ^[2,11-15]	PSR、DPSIR等框架构建多维指标集,以熵权、TOPSIS、云模型等集成测度。	评价维度全面,可整合工程、社会、管理等多类因素,适用于区域尺度横向比较与短板识别。	指标对具体工程措施响应不敏感,该局限多见于早期统计赋权研究,近年来结合水动力模拟已有改进;结果属相对排序,缺乏韧脆判别的绝对依据。
性能曲线法 ^[16-20]	水动力模拟施加降雨荷载,以性能函数或栅格得分度量韧性。	评价建立在系统实际响应上,可反映内涝的强度与历时,适用于管网诊断与风险分区。	多以单一指数集成,曲线形态信息被压缩,难以区分渐进受淹与突然崩溃;降雨情景数量通常有限。
阈值与损失曲线法 ^[1,21-23]	标准复核确定能力阈值,或以历史资料拟合损失函数。	与现行设计标准衔接直接,资料需求低,便于能力对标、预警分级与损失评估。	能力阈值未反映超标准降雨下的实际响应过程;损失函数依赖历史资料,难以事前评估未建成方案。

弥合上述缺口需要既能划定韧脆边界、又能刻画完整加载路径的参照框架。材料力学的应力-应变本构恰具备这2项能力:其弹性、屈服、应变硬化、破坏的阶段序列与防御体系由正常排水到大面积受淹的渐进演化在结构上同构,韧脆判别已有成熟的形态判据与定量指标可直接移植,降雨荷载与内涝响应也满足单调加载下的单值对应。故本研究选取应力-应变本构作为类比框架。

本研究将闸、泵、河道、管网组成的防御体系视为整体受力对象,施加覆盖失效全过程的连续降雨加载,构建降雨量-内涝面积率模型,由曲线形态判别防御体系的韧性与脆性,以韧性指标和特征荷载为防御体系的规划设计与超标准设防提供定量依据。方法的适用性以广州市2个感潮小流域的现状与规划工程体系检验,以期为城市内涝防御体系的韧性定量评价与规划设计提供参考。

1 降雨量-内涝面积率模型的理论框架

1.1 材料的应力-应变本构与韧性判别

材料力学中^[24],材料承载行为由应力 σ 与应变 ε 的本构关系刻画。延性材料的拉伸曲线依次经历弹性、屈服、应变硬化与破坏4个阶段:弹性阶段应变可逆;越过屈服强度 σ_y 后产生不可逆塑性变形;应变硬化阶段斜率回升,应力可增至极限强度 σ_u ,其后颈缩断裂。脆性材料在弹性段后几乎不出现屈服与硬化,骤然断裂。经典力学以本构曲线下面

积即韧度度量材料吸收能量的能力,即

$$U_l = \int_0^{\varepsilon_l} \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

式中: U_l 为材料韧度; ε_l 为断裂应变。韧性材料韧度大,脆性材料韧度小(图1)。工程上判别韧脆主要看两点:本构曲线是否完整呈现弹性、屈服与应变硬化阶段,以及屈服强度相对极限强度是否留有储备,后者以屈强比 σ_y/σ_u 衡量。钢结构抗震设计即要求钢材屈强比不大于0.85,保证构件超载时先屈服、缓变形而非骤然断裂。

1.2 内涝防御系统的应力-应变映射

将上述本构关系映射至城市内涝防御系统:以降雨荷载为应力,以流域内涝响应为应变,降雨量与内涝响应的关系曲线即对应防御体系的本构曲线,其形态可用于判别防御的韧性与脆性。

1.2.1 应力变量:降雨量

城市小流域尺度上降雨空间分布差异可忽略,以设计降雨过程的最大1 h面雨量 $P(\text{mm})$ 表征全流域荷载强度,作为加载于防御系统的应力,贴近城市内涝短历时致灾的特性;各级荷载由同一设计雨型等比缩放生成。 P 由小到大连续增长,系统内涝响应随之发展, P 与 ε 的关系即对应材料的 σ 与 ε 本构关系;具体雨型与量级设置见第3节。

1.2.2 应变变量:弹性应变与塑性应变

与材料应变的弹性、塑性二分相对应,将流域地表的淹没响应区分为可恢复的积水与不可恢复

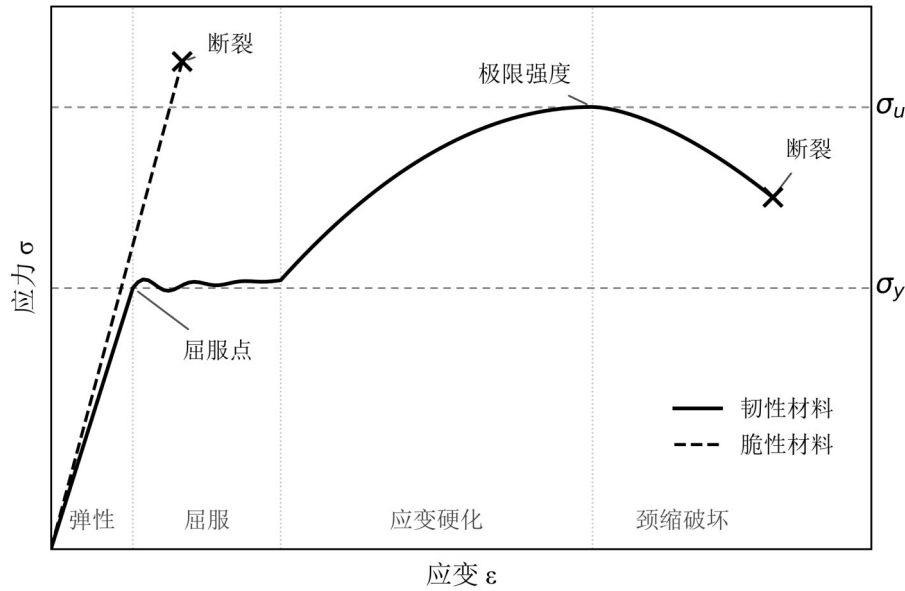


图1 材料的应力-应变本构曲线:韧性脆性对比(示意)

Fig. 1 Schematic stress-strain constitutive curves of ductile and brittle materials

的内涝两个层次,均以占评价域面积的比率表征,以便不同流域间直接比较。定义总应变 $\varepsilon_{\text{pond}}$ 为积水面积率、塑性应变 $\varepsilon_{\text{inund}}$ 为内涝面积率、弹性应变 ε_e 为二者之差:

$$\varepsilon_{\text{pond}} = \frac{A_{\text{pond}}}{A_{\text{total}}}, \quad \varepsilon_{\text{inund}} = \frac{A_{\text{inund}}}{A_{\text{total}}}, \quad \varepsilon_e = \varepsilon_{\text{pond}} - \varepsilon_{\text{inund}} \quad (2)$$

式中: A_{pond} 为发生积水的区域面积,按最大水深不小于0.05 m认定; A_{inund} 为达到内涝判据的区域面积,参照城镇内涝防治的一般认定^[25],按积水深度大于0.15 m且持续时间超过30 min判定; A_{total} 为扣除农田、水面等不参与评价区域后的有效评价域面积。

0.15 m、30 min双重阈值对应材料本构的比例极限:低于该阈值的浅层短时积水可自然消退,属可恢复的弹性应变;超过该阈值的淹没造成实质损失,对应不可逆塑性变形,故取塑性应变 $\varepsilon_{\text{inund}}(P)$ 为构建降雨量-内涝面积率曲线的主应变。

1.2.3 特征点与阶段的物理对应

材料本构各阶段与特征点在内涝防御体系中的对应关系见表2。其中,应变硬化段对应泵站与地形分带等剩余防御资源提供的屈服后缓冲;若屈服后斜率不降反升,硬化段缺失,则对应脆性形态。

表2 材料力学概念与内涝防御体系的物理对应

Tab. 2 Correspondence between concepts in material mechanics and the waterlogging defense system

材料力学概念	内涝防御体系对应	物理意义
弹性阶段	$\varepsilon_{\text{inund}} \approx 0$, 仅有可消退的弹性积水	排水系统设计能力以内, 积水可自然消退
起始点 P_l (比例极限)	内涝开始显著增长的荷载	体系排水能力被突破的临界点
屈服点 P_y (屈服强度)	曲线由陡转缓的拐点	防御体系进入饱和
应变硬化阶段	屈服后模量回落 ($E_p < E_e$)	剩余资源吸纳超载, 体系再稳定
破坏点 P_k (极限强度)	应变增速骤升、失控的荷载	体系丧失恢复能力
脆性形态	无应变硬化段 ($E_p \geq E_e$)	越过屈服即趋于失控, 无缓冲

1.3 韧性曲线的本构模型与定量指标

1.3.1 三段铰链本构模型

为从离散模拟点中提取上述特征点并量化曲线形态,采用过原点的三段线性铰链模型拟合塑性应变随降雨的变化 $\varepsilon_{\text{inund}}(P)$:

$$\varepsilon_{\text{inund}}(P) = b_1 P + b_2 \langle P - P_1 \rangle_+ + b_3 \langle P - P_y \rangle_+ \quad (3)$$

式中: $\langle x \rangle_+ = \max(x, 0)$ 为 Macaulay 括号,表征越过相应阈值后才被激活的分段贡献; P_1 、 P_y 为起响应点与屈服点; b_1 、 b_2 、 b_3 为待拟合系数。由分段斜率叠加可得三阶段切线模量,即防御刚度,单位 %/mm:

$$E_0 = b_1, \quad E_e = b_1 + b_2, \quad E_p = b_1 + b_2 + b_3 \quad (4)$$

式中: E_0 为前响应模量; E_e 为屈服段模量; E_p 为屈服后模量。模量由 E_0 跃升至 E_e , 刻画起响应后内涝的快速发展; 由 E_e 回落至 E_p , 刻画屈服后应变硬化的强弱。

式(3)含 b_1 、 b_2 、 b_3 与断点 P_1 、 P_y 共 5 个待拟合参数,采用两层策略联合识别:断点 P_1 、 P_y 在物理可行域内以 0.5~1 mm 步长网格穷举;给定断点后式(3)对 b_1 、 b_2 、 b_3 为线性,以塑性应变残差平方和最小为目标函数,由非负最小二乘求解,非负约束保证各段模量的物理意义;遍历全部断点组合,取残差平方和最小者为全局最优。网格穷举不依赖初值,不存在陷入局部最优的问题;拟合优度相近的次优断点集中分布在最优解附近数 mm 范围内,特征荷载识别稳定。

1.3.2 韧性判别准则与定量指标

材料韧度成立的前提是应变越大、断裂前吸收能量越多;而在内涝映射下,塑性应变直接对应受淹损失,曲线下面积类指标不宜沿用。为此回到延性判别的形态本源,从形态判据、特征荷载与形态比值 3 个层面建立判别体系。

a) 三阶段完整性判据。韧性体系的曲线应依次呈现弹性、屈服与应变硬化 3 个阶段,即 E_0 接近于零、 E_e 远大于 E_0 、 E_p 小于 E_e , 表明防御被突破后体系仍能动员剩余调蓄与排水资源实现再稳定;若屈服后模量不降反升, E_p 不小于 E_e , 硬化段缺失,则判为脆性形态。

b) 特征荷载阈值。以起响应点 P_1 、屈服点 P_y 与破坏点 P_f 对应材料的比例极限、屈服强度和极限强度,数值越大防御能力越强。 P_1 、 P_y 由式(3)拟合确定; P_f 由实测应变增率的骤升识别:相邻荷载级间应变增率超过硬化段模量 E_p 的 3 倍时判定进入破坏阶段,取该区间起点为 P_f ;量程内无骤升则记 $P_f > P_{\text{max}}$ 。

c) 硬化判别指数。仿照材料以屈服后切线模量相对屈服段模量的衰减程度判别硬化与软化,定义硬化判别指数 B 为屈服后模量与屈服段模量之比:

$$B = \frac{E_p}{E_e} = \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_1 + b_2} \quad (5)$$

$B < 1$ 表明存在应变硬化段,且越小硬化越强; $B \geq 1$ 表明硬化段缺失,呈脆性形态。据此将防御体系韧性划分为 4 级(表 3)。其中 $B=1$ 为硬化段缺失与否的韧脆分界,由式(5)的物理意义直接确定;1 以下按 0~1 区间三等分,划分强、中等、弱韧性 3 档。分档阈值仅影响韧性水平的档位表述:韧脆定性取决于 B 与 1 的比较,体系间排序由 B 的数值直接给出,均不随分档方式改变。

d) 屈强比与硬化储备。仿照钢结构抗震设计屈强比不大于 0.85 的成熟经验,定义屈强比 λ 与硬化储备 ΔP_h :

$$\lambda = \frac{P_y}{P_f}, \quad \Delta P_h = P_f - P_y \quad (6)$$

λ 越小、 ΔP_h 越大,屈服后至破坏前的再稳定荷载区间越宽,体系对超标准降雨的容错能力越强;量程内未观测到破坏时, λ 仅能给出上界。三层指标各有分工:三阶段完整性用于甄别韧脆形态,特征荷载度量防御被突破的迟早, B 与 λ 刻画屈服后再稳定的强弱与储备。

1.4 类比成立的前提与假设

类比成立需满足 3 个前提:统一雨型下降雨量与内涝响应单调单值对应;低于内涝判据的积水可自然消退,对应弹性变形的可恢复性;达到判据的淹没造成实质损失,对应塑性变形的不可逆性。框架适用于以降雨为主导驱动、排水分区相对独立的小流域,主要受外洪影响的区域不适用。就适用尺

表3 基于硬化判别指数的韧性等级划分
Tab. 3 Resilience grading based on the hardening discrimination index

等级	硬化判别指数 $B=E_p/E_e$	曲线特征
强韧性	$B < 1/3$	应变硬化显著, 屈服后增速大幅回落
中等韧性	$1/3 \leq B < 2/3$	存在明显应变硬化段
弱韧性	$2/3 \leq B < 1$	硬化微弱, 屈服后增速略降
脆性	$B \geq 1$	无硬化段, 屈服后应变持续加速

度而言, 流域面积以数十平方千米以内为宜, 此时降雨空间差异一般可忽略、面雨量可由设计点雨量代表, 本研究两个流域面积分别约 9.4 km² 与 15.2 km², 均在该尺度内; 更大的流域宜划分排水分区分别评价。

2 研究区概况与模型构建

2.1 研究区域概况

a) 流域 A: 平原感潮河网区泵排型小流域。流域 A 为广州市某平原感潮河网区泵排型小流域, 面积约 9.41 km², 地势低平、河网密布, 下垫面硬化率约 73%。内河涌经下游挡潮闸与排涝泵站连通外江, 外江水位受潮汐控制: 内河水位高于外江时开闸自排, 反之关闸启泵强排, 属典型工程调控型防御体系。扣除农田、水面后有效评价域约 8.18 km², 水位均以珠江基面计。现状体系有排涝泵站 5 座、挡潮闸 11 座, 泵站总设计流量 23.37 m³/s, 高程低于 2.0 m 的低地约占 32%; 规划将泵站增至 10 座, 总流量 40.2 m³/s, 并将低洼地填高至 2.0~2.5 m 平台, 低地占比降至 16%。两套体系河道格局与潮位边界一致, 差异集中于泵站强排能力与地面竖向高程, 构成工程调控强弱的对照。

b) 流域 B: 泵排与丘陵自排混合型感潮小流域。流域 B 为广州市某泵排与丘陵自排混合型感潮小流域, 面积约 15.24 km², 下垫面硬化率约 64%。其地形起伏明显: 高程中位数约 11.6 m, 周边丘陵达 70 m 以上, 北部平坦建成区仅约 2.0 m。占地过半的丘陵台地凭高程自然自排, 承载主要人口与内涝风险的北部低地则依赖 4 座挡潮闸与泵站排涝, 属泵排

与丘陵重力自排并存的混合型防御体系。扣除农田、绿地后有效评价域约 11.4 km²。现状体系泵站 3 座, 总流量 10.52 m³/s, 高程低于 2.0 m 的低地约占 12.7%; 规划泵站增至 4 座, 总流量 40.86 m³/s, 同时对北部 2.73 km² 低洼建成区填高, 低地占比降至 1.7%。流域 B 与流域 A 同为工程调控强弱的对照, 类型上补充了含丘陵地形分带的混合情形。两流域现状、规划体系的水系、闸泵布局与地面高程见图 2。

2.2 管网-河道-地面三耦合模型

本研究利用 MIKE 系列软件构建管网、一维河道与二维地面耦合的水文水动力模型^[26-27]。闸泵调度两流域一致: 内河水位高于外江时开闸自排, 反之关闸; 外江水位高于内河时启泵 (启泵水位 0.30 m, 停泵水位 -0.50 m)。流域 A 采用 3 m 栅格 (有效网格 104.6 万); 流域 B 面积为流域 A 的 1.6 倍, 3 m 与 5 m 栅格的内涝面积率差异仅 0.5%~1.0%, 采用 5 m 栅格 (64.4 万)。耦合时间步 5 s, 模拟时长 24 h。

管网保留 DN400 及以上管渠及历史内涝点周边管网, 河道按实测断面概化, 闸泵按 2.1 节规模与调度规则纳入, 二维地面采用高精度 DEM, 4 套模型概化规模见表 4。管渠糙率 0.013~0.02, 河道 0.025~0.030, 地面按土地利用类型取 0.03~0.05; 产汇流参数现状经 2.3 节率定确定, 规划按海绵、排水相关规划要求确定。

2.3 模型率定与验证

模型率定采用基于历史积水点的对比方法: 以实测场次降雨过程作为边界条件, 对比积水位置的模拟水深与实测水深, 逐点修正产汇流参数与管渠糙率, 直至吻合。率定采用 2023-06-14 和 2023-09-08 两场降雨, 1 h 雨量 56.9 mm、6 h 雨量 187.7 mm; 流域 B 另以 2024-05-27 场次作独立验证, 1 h 雨量 61 mm。各积水点对比结果见表 5。

模拟积水点位置均与台账历史易涝点吻合, 最大积水深度相对误差流域 A 为 5%~12%, 流域 B 为 4%~10%。率定场次以中小重现期降雨为主, 大于 120 mm 的大雨量端结果宜理解为参数经率定约束

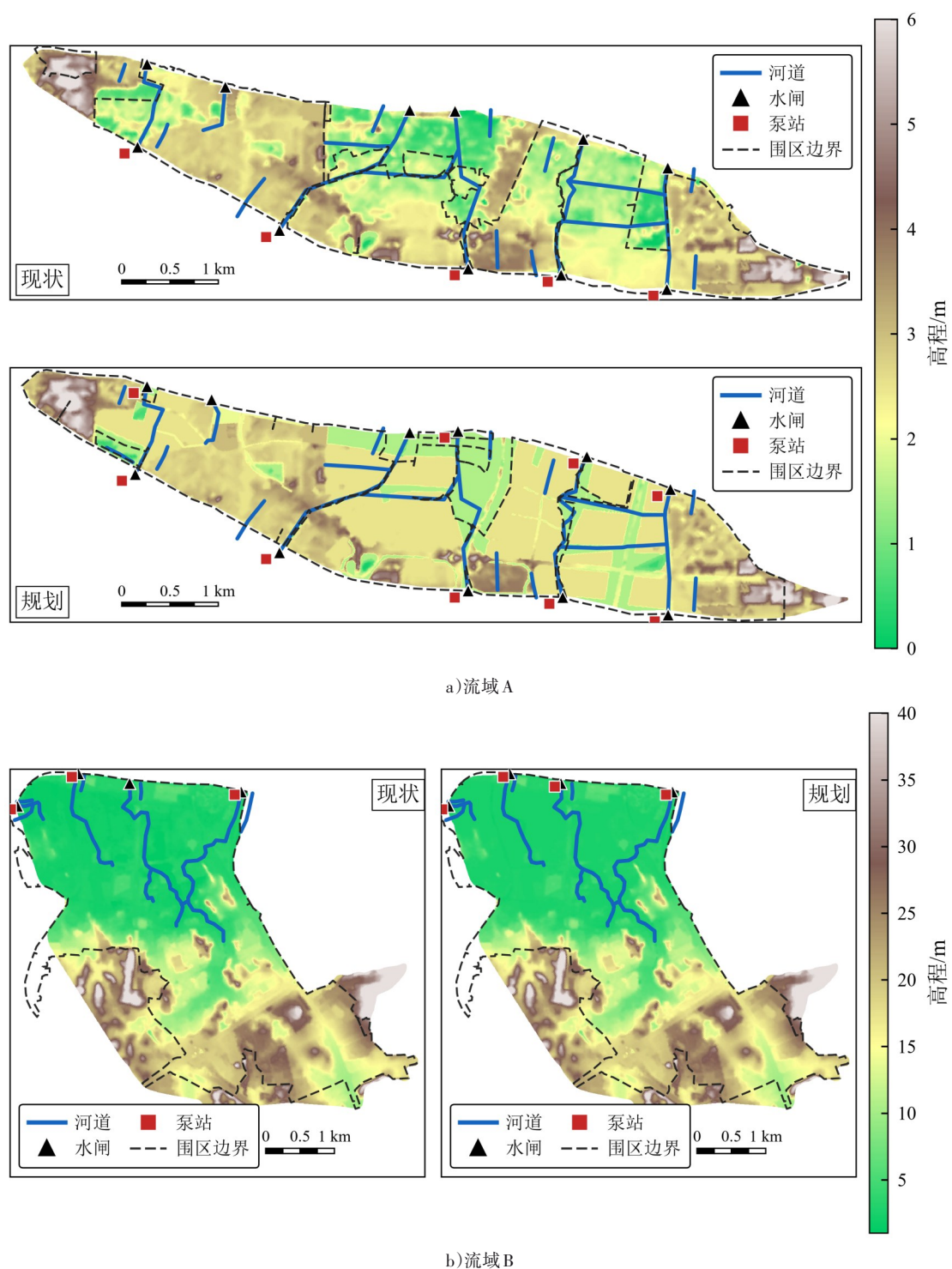


图2 两流域现状与规划防御体系示意

Fig. 2 Sketches of the existing and planned flood defense systems of the two watersheds

后的情景外推,主要用于曲线形态判别而非绝对水深预报。

3 情景设计与模拟方案

3.1 设计降雨情景

采用应用广泛、适用于高密度城市的24 h芝加

表4 两流域现状/规划耦合模型概化规模

Tab. 4 Generalized scales of the coupled models for the two watersheds

项目	子汇水区/ 个	管网节点/ 个	排水管渠/(条/km)	一维河道/(段/ km)	排放口/个	排涝泵站/ 座	挡潮闸/座	二维地面网格
流域A现状	1 129	824	761/53.1	104/11.5	52	5	11	3 m(2 847×851)
流域A规划	1 056	1 235	1 135/68.4	105/11.6	34	10	11	同左
流域B现状	1 479	1 181	1 118/79.3	84/8.8	47	3	4	5 m(1 173×972)
流域B规划	1 501	1 290	1 218/89.2	91/8.8	46	4	4	同左

表5 两流域历史积水点率定验证结果

Tab. 5 Calibration and validation results at historical waterlogging points

流域	历史积水点	实测积水深/cm	模拟积水深/cm	相对误差
流域A	迎宾路东海花园路段	25	22	12%
流域A	沙溪大道珊瑚湾畔	20	19	5%
流域B	富山北路片区	50	52	4%
流域B	大石桥南	30	27	10%
流域B	105国道—南大干线交汇处	30	32	6%

哥雨型,雨峰系数 $r=0.4$,雨峰约位于第9.5 h(图3)。以最大1 h面雨量 P 为连续应力变量,取10~180 mm共18级,步长10 mm,各级荷载由同一雨型等比缩放生成;研究区最大1h降雨的100年一遇设计值约120 mm。该量程从常遇降雨延伸至超标准极端降雨,可完整覆盖降雨量-内涝面积率曲线的弹性段、屈服段与屈服后段。

3.2 边界条件

外江潮位采用5年一遇设计潮位过程作为固定边界,潮峰约位于第8.8 h,与第9.5h的雨峰基本遭遇,构成最不利的雨潮组合(图3);河道上游入流按设计洪水给定;各情景初始条件统一:管网自无水状态起算,下垫面自初始干燥状态起渗,不设前期降雨与热启动,不考虑地下水;内河初始水位统一为-0.5 m,仅降雨量为变量。

3.3 模拟方案汇总

两流域现状、规划4套体系各施加10~180 mm共18级降雨,合计72次模拟;流域B以片区自身产汇流为主,无河道上游入流边界,其余降雨、潮位与统计口径与流域A一致。

3.4 内涝统计方法

内涝认定参照GB 51222—2017《城镇内涝防治技术规范》^[25]:积水深度大于0.15 m且持续超过30 min判为内涝,计入塑性应变;浅层或短时积水计为弹性积水。由耦合模型输出的地表水深统计 $\varepsilon_{\text{inund}}$ 、 $\varepsilon_{\text{pond}}$ 与 ε_e 。

4 结果与分析

4.1 降雨量-内涝面积率曲线与韧性判别

图4给出两流域现状与规划共4套体系的降雨量-内涝面积率曲线及三段铰链拟合,各体系拟合的 R^2 均不低于0.986。流域B规划体系拟合取10~170 mm,180 mm已属破坏阶段(见4.3.2节);其余体系取全部18级。各流域规划与现状的曲线形态差异明显。

两流域规划曲线均呈现典型的三段形态。弹性阶段内涝增长缓慢,流域A在雨量小于67 mm、流域B在小于79 mm时,前响应模量 E_0 分别仅为0.020 %/mm和0.023 %/mm;越过起响应点进入屈服段后,内涝面积率快速增大,屈服段模量 E_e 分别达0.62 %/mm与0.230 %/mm,约为 E_0 的30倍与10

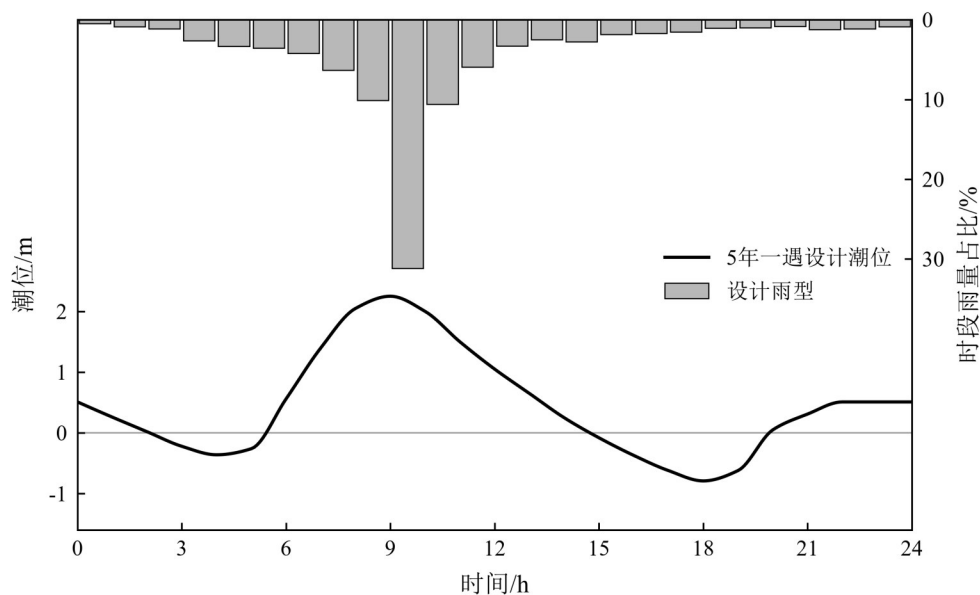


图3 24 h设计雨型与5年一遇设计潮位过程

Fig. 3 Design 24 h rainfall pattern and design tidal level process with a 5-year return period

倍;流域A越过屈服点84.5 mm、流域B越过133 mm后增速回落,屈服后模量 E_p 降至0.092 %/mm与0.138 %/mm,形成明显的应变硬化段。流域A的屈服后再稳定依托泵闸调控,流域B依托河道调蓄与高地自排。流域B规划体系还在约170 mm进入破坏阶段,弹性、屈服、应变硬化与破坏4个阶段在单一案例中得到完整呈现。

两流域的现状曲线均无有效的应变硬化段。流域A起响应阈值前移至47.5 mm,屈服段与屈服后段模量接近, E_e 为0.25 %/mm、 E_p 为0.20 %/mm,内涝面积率随雨量近乎匀速增长,硬化微弱;流域B更甚,起响应点前移至24 mm,越过54 mm屈服点后模量不降反升, B 达1.26,硬化段缺失,内涝持续加速增长,未通过三阶段完整性判据。

上述对照表明,同一流域因泵站能力与地形条件不同,韧性曲线形态可发生质的改变:规划体系响应阈值高、屈服后硬化强,现状体系响应早、内涝随雨量匀速累积。降雨越过响应点进入屈服段,即为启动应急响应的关键信号。

按三层判别体系,流域A规划 B 为0.15(强韧性)、现状为0.80(弱韧性),流域B规划为0.60(中等韧性)、现状为1.26(脆性),4套体系覆盖表3全

部韧性等级(表6);各体系 B 值与分档临界值的最小差距为0.06,排序由 B 值直接给出,判别结论稳健。流域A两套体系量程内未出现破坏点,屈服比仅能给出上界;流域B现状硬化段缺失, λ 与 ΔP_h 不适用,须由形态判据直接判别,说明形态甄别应先于指标计算。流域B规划 λ 约0.78,逼近钢结构抗震设计0.85的限值,屈服后仅余37 mm硬化储备即进入破坏,超标准应急预案宜以破坏点 P_i 而非屈服点 P_y 作为最不利工况的设防参照。

4.2 内涝空间格局对曲线判别的印证

曲线判别的可靠性可由内涝空间格局印证(图5)。弹性阶段仅有零星积水;进入屈服段后,现状体系的内涝在低洼地带呈面状弥散扩展,规划体系因低洼填高,内涝被压缩并集中于河道沿线。两类受淹形态的反差与硬化判别指数的差异一致,表明 B 值差异对应真实的受淹格局,并非拟合产物。

流域B还提供了破坏阶段的空间证据。丘陵与台地全程未受淹,内涝集中于北部平坦建成区,印证混合型流域的高程分带;150 mm时持续内涝面积由现状的277 ha降至规划的224 ha,但至180 mm,建成区积水历时延长、大面积形成内涝,破坏点在空间上表现为内涝面积骤升,与曲线的骤升段一致

(见 4.3.2 节)。

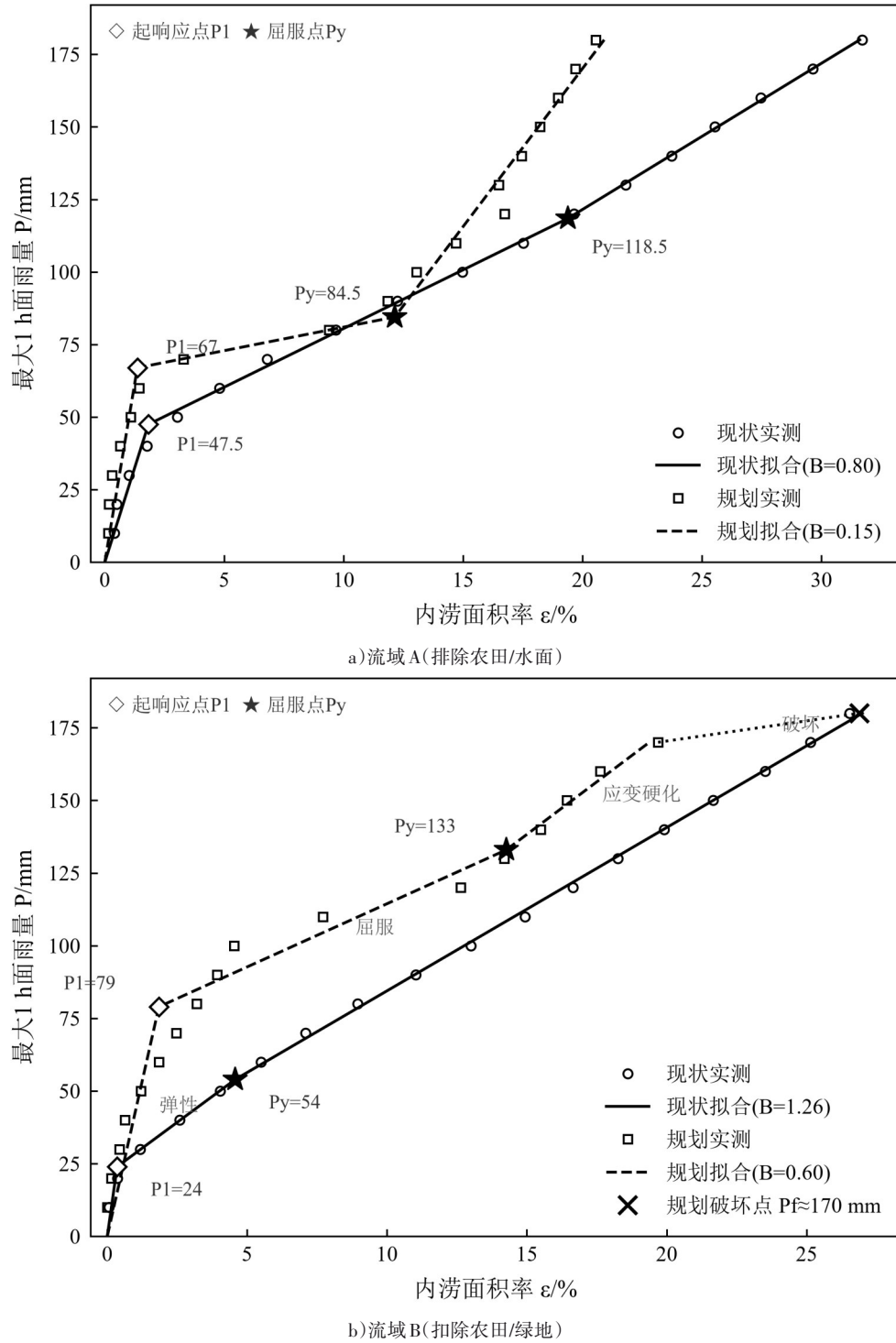


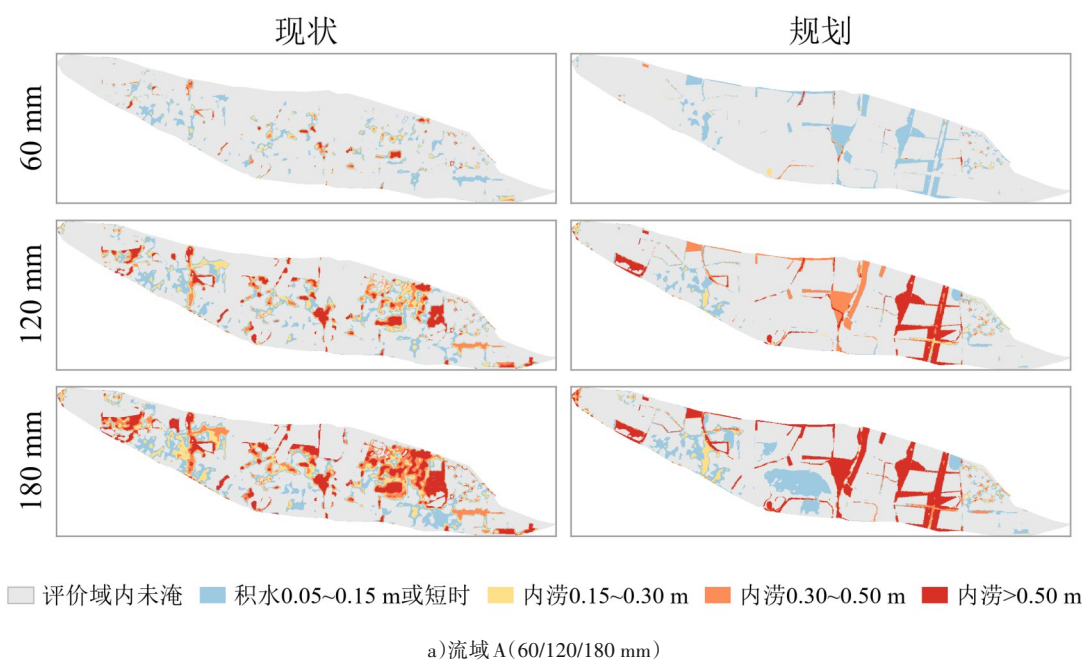
图 4 两流域现状与规划降雨量-内涝面积率曲线对比

Fig. 4 Rainfall-waterlogging area ratio curves for the existing and planned systems of the two watersheds

Tab. 6 Comparison of resilience indices for the existing and planned systems of the two watersheds

规划	三阶段完整性	起响应 P_I/mm	屈服点 P_y/mm	破坏点 P_d/mm	前响应模量 $E_0/(\% \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服段模量 $E_e/(\% \cdot \text{mm}^{-1})$	屈服后模量 $E_v/(\% \cdot \text{mm}^{-1})$	硬化判别指数 $B=E_v/E_e$	屈强比 $\lambda=P_y/P_f$	硬化储备 $\Delta P_h/\text{mm}$	拟合 R^2	韧性等级(表 2)
流域 A 现状	完整	47.5	118.5	>180	0.038	0.247	0.199	0.803	<0.66	—	0.9995	弱韧性
流域 A 规划	完整	67	84.5	>180	0.020	0.616	0.092	0.149	<0.47	—	0.9970	强韧性
流域 B 现状	硬化段缺失	24	54	>180	0.015	0.141	0.178	1.260	—	—	0.9990	脆性
流域 B 规划	完整(含破坏段)	79	133	≈170	0.023	0.230	0.138	0.600	≈0.78	≈37	0.9860	中等韧性

注:流域B规划三段拟合取10~170 mm;“—”表示不适用。



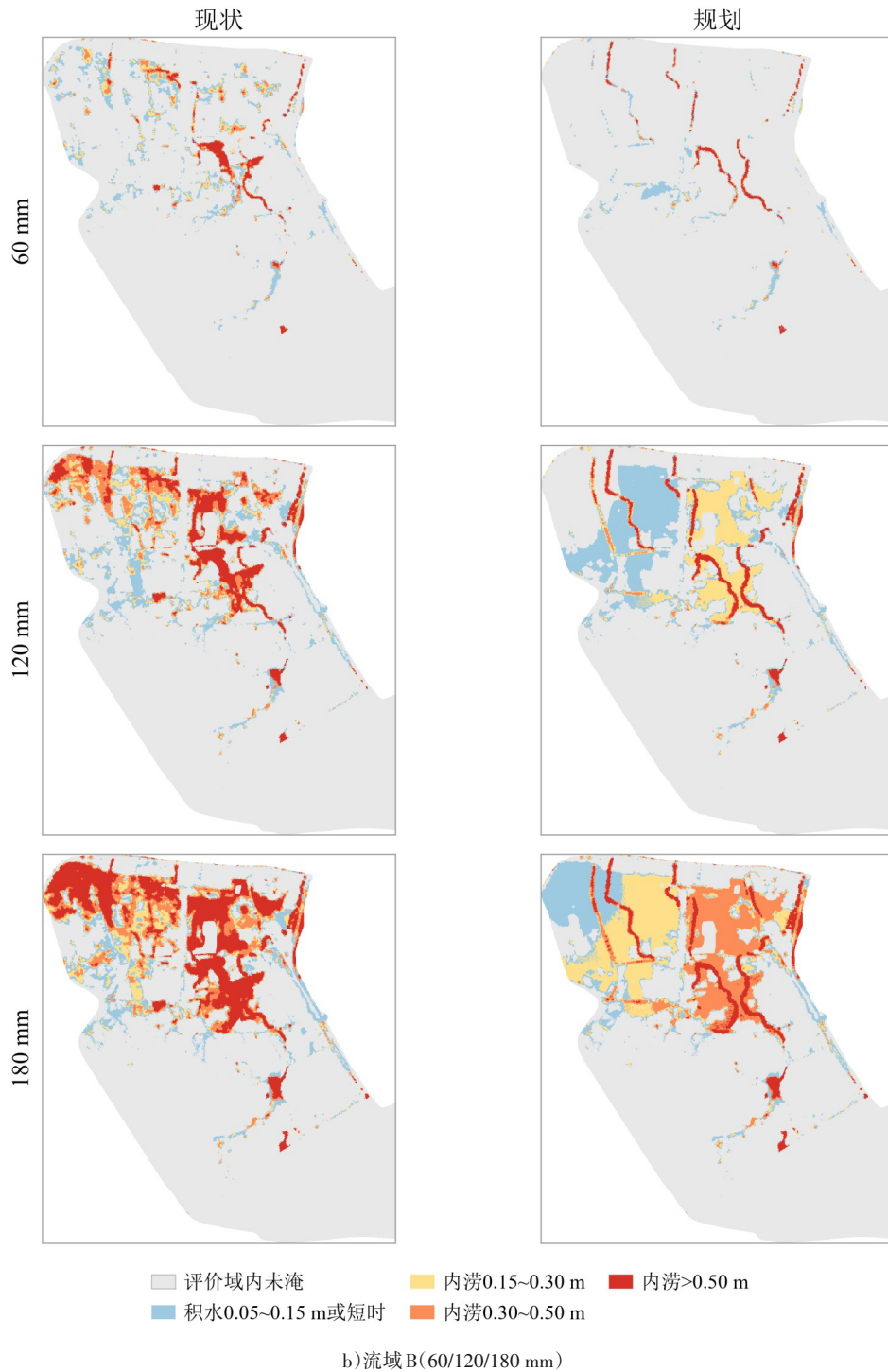


图5 两流域现状(左)与规划(右)内涝淹没分布

Fig. 5 Spatial distribution of waterlogging inundation for the existing (left) and planned (right) systems of the two watersheds

4.3 曲线形态的物理机制

4.3.1 应变硬化段的形成: 泵站、潮位窗口与地形分带

图6a为流域A屈服点成因诊断。规划体系中,

雨量小于67 mm时, 泵站峰值流量随雨量上升, 至约50 mm达到额定流量约40 m³/s后饱和, 排水能力尚能匹配来水, 内涝增长极缓。67~85 mm间, 雨峰来水超过管网与泵站合计能力, 溢出涝水转由挡潮闸

自排接力;泵排达到上限、闸排开始增长,这一转折正对应起响应点,内河水位被迅速顶托抬升,曲线进入陡峭的屈服段。雨量超过 85 mm 后,潮闸开启时刻已逼近外江潮峰,开闸时外江潮位维持在约 2.1 m,不再随雨量升高,而内河水位仍随雨量继续抬升,内外江自排水位差逐渐增大,闸排流量随之增大,内涝增幅减缓,曲线转入应变硬化段。屈服后的再稳定即来源于此。

流域 A 现状泵站总流量 23.37 m^3/s , 仅约为规划的 60% 且更早饱和;雨量超过约 47 mm 即满负荷,内河水位持续抬升,起响应点前移至 47.5 mm;其后开闸潮位与开闸滞后仅缓慢渐近饱和,叠加高程低于 2.0 m 的低地占比达 32%,内河水位缓慢抬

升即不断淹没更多低地,应变硬化微弱,见图 6a。

流域 B 的诊断见图 6b。丘陵台地以坡面重力自排为主,汇流快速进入北部低平建成区,相当于在建成区产流之上叠加额外荷载,曲线形态取决于丘陵汇流与低地泵排的能力对比。现状泵排仅 10.52 m^3/s , 约 30 mm 即满负荷,此后涝水仅靠闸排与河槽调蓄吸纳,内河水位持续抬升、低地连片受淹,硬化段缺失;规划泵排扩至 40.86 m^3/s ,起响应点右移至 79 mm,越过 133 mm 屈服点后由闸排与调蓄接力吸纳超额涝水,体系呈应变硬化,至约 170 mm 泵、闸与调蓄同时饱和而进入破坏阶段(见 4.3.2 节)。

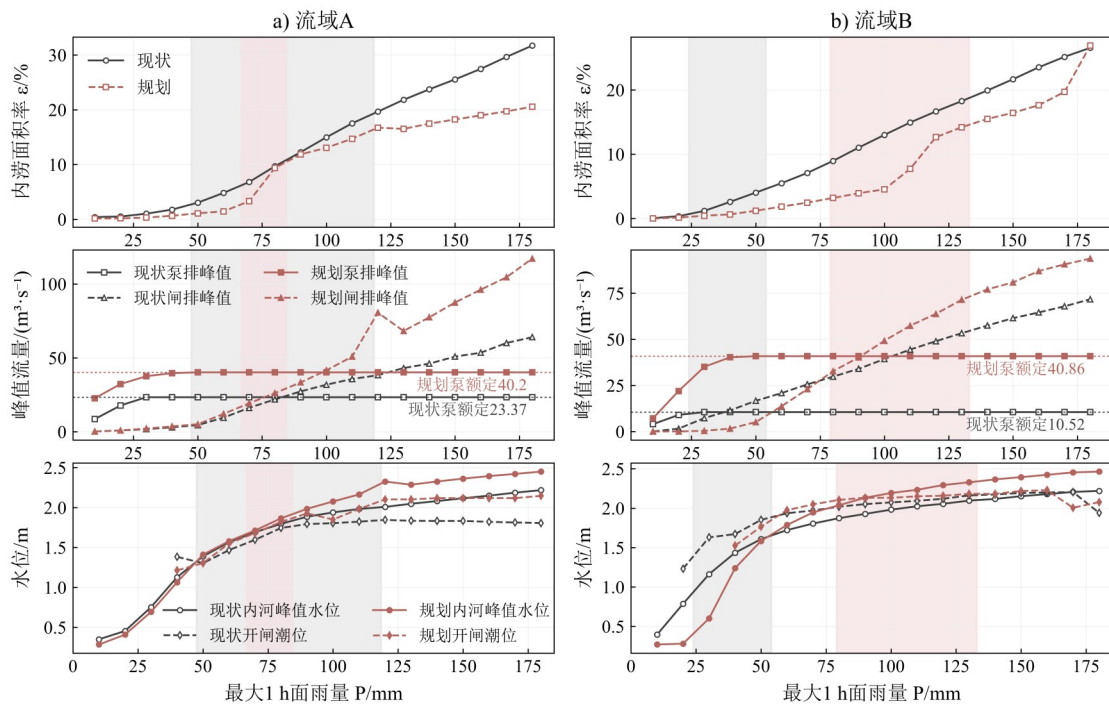


图6 两流域屈服点成因诊断(灰色带为现状 $P_1 \sim P_y$ 屈服区,粉色带为规划 $P_1 \sim P_y$ 屈服区)

Fig. 6 Diagnosis of yield-point formation for the existing and planned systems of the two watersheds (gray band: yielding zone from P_1 to P_y of the existing system; pink band: that of the planned system)

高程统计(表 7)显示,规划填高使流域 A 高于 2.0 m 的面积占比由 68% 升至 84%,流域 B 低地占比由 12.7% 降至 1.7%。屈服后内河水位涨幅已小,新增淹没取决于地面与内河的水位差:规划抬升防御基线,填筑平台与建成区得以保全;现状低地水位差小、自排不足,被持续淹没。但填高不提

供额外排涝能力,泵与调蓄饱和后体系仍进入破坏阶段,流域 B 即如此(见 4.3.2 节)。

4.3.2 破坏阶段的形成:超载下的涝水滞留

流域 B 规划在 170 mm 加载至 180 mm 间出现内涝面积率骤升,由 19.7% 升至 26.9%,实测应变增率 0.72 %/mm,约为硬化段模量的 5 倍,判定进入破

表7 两流域现状与规划地面高程累计超越比例

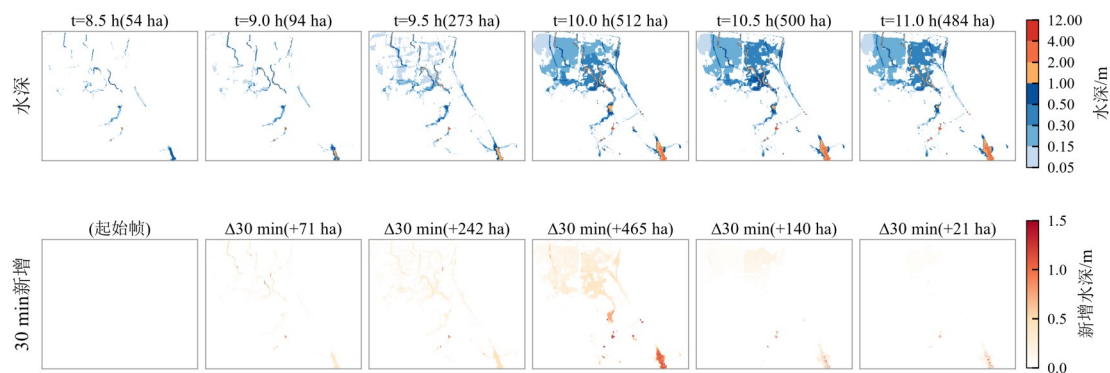
Tab. 7 Cumulative exceedance ratios of ground elevation in the two watersheds

高于Z	流域A现状	流域A规划	流域B现状	流域B规划
>1.0 m	—	—	99.5%	99.9%
>1.5 m	87.6%	88.8%	97.3%	99.5%
>2.0 m	68.0%	84.0%	87.3%	98.3%
>2.5 m	50.0%	44.3%	72.8%	75.5%
>3.0 m	23.9%	20.2%	61.9%	62.0%
<2.0 m(低洼)	32.0%	16.0%	12.7%	1.7%

注: 高程以珠江基面计; “—”表示未统计。

坏阶段, 取 P_t 约为170 mm。

120~160 mm间, 超出泵排的涝水由河槽与地面调蓄暂时吸纳, 应变增率降至0.10~0.12 %/mm, 形成应变硬化段。越过约170 mm后泵排、闸排与调蓄均已饱和, 雨峰后无剩余能力抽排滞留涝水: 30 min内现状可消退约27%的内涝面积, 规划仅约11%, 持续内涝面积不降反增(图7), 破坏的本质是涝水滞留而非漫流加快。致灾判据还放大了面积阶跃: 170 mm时约141 ha建成区处于0.10~0.15 m临界水深带, 180 mm时其中约82ha越过判据线, 改取0.20 m判据时该阶跃由36.5%降至5%~6%, 应用中需声明判据取值。



注: 上排为各时刻水深, 下排为相邻30 min新增淹没; 9:00—10:00一小时内湿面积由94 ha增至512 ha。

图7 流域B规划体系180 mm破坏阶段地表洪水漫延过程

Fig. 7 Surface flood propagation of the planned system in watershed B during the failure stage at 180 mm

5 结论与展望

a) 将可消退的积水对应可恢复的弹性应变, 将水深不低于0.15 m且历时超过30 min的持续性内涝对应不可恢复的塑性应变, 由三阶段完整性判据、特征荷载阈值 P_1 、 P_y 、 P_t 与硬化判别指数 B 、屈服比 λ 构成的三层判别体系, 可定量区分内涝防御体系的韧性与脆性。

b) 流域A对照表明, 韧性曲线形态可随工程条件发生质的改变: 规划体系起响应阈值达67 mm, 屈服后硬化强, B 为0.15, 判为强韧性; 现状体系47.5 mm即起响应, 硬化微弱, B 为0.80, 属弱韧性。泵站排涝能力与潮位自排窗口共同决定硬化段强弱, 地面高程分带支配屈服后行为, 工程调控与地形改造

是提升韧性的两条可量化路径。

c) 流域B检验了框架的可移植性: 现状体系硬化段缺失, B 达1.26, 判为脆性形态; 规划体系完整呈现弹性、屈服、应变硬化与破坏4个阶段, B 为0.60, 判为中等韧性, 并在量程内观测到约170 mm的破坏点, 其本质是泵、闸与河道调蓄同时饱和后涝水滞留、恢复能力丧失。两流域4套体系恰好覆盖强韧性、中等韧性、弱韧性与脆性全谱。

d) 对排水防涝规划而言, 目标不必追求完全不淹, 而应控制受淹的次序与速度, 塑造有序渐进受淹的韧性形态; 增设调蓄、扩建泵站与提升调度弹性可延伸硬化段、抬高屈服点, B 与 λ 可作为方案比选的量化目标。流域B规划屈服比约0.78, 已逼近抗震设计0.85的限值, 硬化储备仅约37 mm, 可见

韧性提升不等于消除失效,超标准应急预案应以破坏点 P_r 而非屈服点 P_y 作为设防参照。

本研究的局限性主要有三方面:一是受观测条件限制,率定基于历史积水点的人工测量水深,未直接引入内涝面积维度,流域B现状体系B值临近脆性与弱韧性分界,档位对判据取值相对敏感,收集到历史淹没面积资料后可对模型进行进一步率定;二是各级荷载由同一设计雨型等比缩放生成,未考虑雨型时程与降雨-潮位遭遇的变化;三是方法以降雨空间分布差异可忽略为前提,适用于数十平方千米尺度的小流域,更大流域宜考虑降雨空间分布差异。

后续可引入降雨与潮位的联合重现期,将降雨加载拓展为雨潮加载;将框架应用于纯重力自排型、山地型等更多流域,完善韧性形态谱系;并以经济损失替代淹没面积作为应变变量,探索基于韧性曲线的海绵措施优化选型。

参考文献:

- [1] 刘家宏,梅超,邵薇薇,等.城市排水防涝基础设施应对能力的三个阈值[J].水利学报,2022,53(7):789-797.
Liu Jiahong, Mei Chao, Shao Weiwei, et al. Three thresholds of urban drainage and waterlogging prevention infrastructure coping capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 789-797. (in Chinese)
- [2] 王银堂,苏鑫,王磊之,等.城市洪涝灾害应对韧性精细化评估[J].水科学进展,2025,36(6):933-948.
Wang Yintang, Su Xin, Wang Leizhi, et al. A refined assessment of urban flood resilience[J]. Advances in Water Science, 2025, 36(6): 933-948. (in Chinese)
- [3] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [4] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [5] 徐宗学,陈浩,任梅芳,等.中国城市洪涝致灾机理与风险评估研究进展[J].水科学进展,2020,31(5):713-724.
Xu Zongxue, Chen Hao, Ren Meifang, et al. Progress on disaster mechanism and risk assessment of urban flood/waterlogging disasters in China[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(5): 713-724. (in Chinese)
- [6] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等.变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J].水利学报,2022,53(7):757-768,778.
Cheng Xiaotao, Liu Changjun, Li Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategies for urban resilience improvement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768, 778. (in Chinese)
- [7] 宋晓猛,徐楠涛,张建云,等.中国城市洪涝问题:现状、成因与挑战[J].水科学进展,2024,35(3):357-373.
Song Xiaomeng, Xu Nantao, Zhang Jianyun, et al. Urban flooding in China: status, causes and challenges[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(3): 357-373. (in Chinese)
- [8] 马昱斐,张建云,刘翠善,等.我国城市极端暴雨洪涝新特征与韧性提升建议[J].中国工程科学,2026,28(2):260-274.
Ma Yufei, Zhang Jianyun, Liu Cuishan, et al. New characteristics of extreme rainstorm and flood in Chinese cities and suggestions for enhancing resilience[J]. Strategic Study of CAE, 2026, 28(2): 260-274. (in Chinese)
- [9] 俞茜,李娜,王艳艳.基于韧性理念的洪水管理研究进展[J].中国防汛抗旱,2021,31(8):19-25.
Yu Qian, Li Na, Wang Yanyan. Review of flood management based on the concept of resilience[J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(8): 19-25. (in Chinese)
- [10] 王凯丰,张洪斌,力刚,等.城市洪涝韧性的研究进展及关键支撑技术综述[J].水利水电技术(中英文),2023,54(11):77-88.
Wang Kaifeng, Zhang Hongbin, Li Gang, et al. Advances in urban flood resilience study and its key supporting technologies review[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(11): 77-88. (in Chinese)
- [11] 刘意,吴春熠,汪丽娜,等.广东省城市洪涝韧性评估与空间特征分析[J].华南地理学报,2025,3(2):110-123.
Liu Yi, Wu Chunyi, Wang Lina, et al. Assessment of urban flood resilience and spatial characteristics analysis in Guangdong Province[J]. South China Geographical Journal, 2025, 3(2): 110-123. (in Chinese)
- [12] 孙锐思,杨柳,冯畅,等.基于PSR-TOPSIS模型和水系演变的湘江流域洪涝韧性评价及障碍因子分析[J].人民珠江,2025,46(6):42-51.
Sun Ruishi, Yang Liu, Feng Chang, et al. Evaluation of flood resilience and analysis of obstacle factors in Xiangjiang River Basin based on PSR-TOPSIS models and river system evolution[J]. Pearl River, 2025, 46(6): 42-51. (in Chinese)
- [13] 李辰,段永辉,李保健.基于可拓云模型的上海市洪涝韧性评价研究[J].人民珠江,2025,46(11):75-84.

- Li Chen, Duan Yonghui, Li Baojian. Evaluation of flood resilience in Shanghai based on extension cloud model[J]. Pearl River, 2025, 46(11): 75–84. (in Chinese)
- [14] 韩义超,王永阳,李昱,等. 基于贝叶斯网络城市洪涝韧性关键因素识别[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(6): 1491–1500.
- Han Yichao, Wang Yongyang, Li Yu, et al. Bayesian network-based identification of critical factors influencing urban flood resilience[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(6): 1491–1500. (in Chinese)
- [15] 王佳,刘家宏,李欣哲,等. 城市洪涝韧性体检指标体系构建及提升策略[J]. 水利发展研究, 2026, 26(2): 12–18, 28.
- Wang Jia, Liu Jiahong, Li Xinzhe, et al. Urban flood resilience assessment indicator system and enhancement strategies [J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(2): 12–18, 28. (in Chinese)
- [16] Mugume S N, Gomez D E, Fu G, et al. A global analysis approach for investigating structural resilience in urban drainage systems[J]. Water Research, 2015, 81: 15–26.
- [17] Wang Yuntao, Meng Fanlin, Liu Haixing, et al. Assessing catchment scale flood resilience of urban areas using a grid cell based metric[J]. Water Research, 2019, 163(114852): 1–12.
- [18] Su Xin, Wang Leizhi, Li Lingjie, et al. Assessing watershed flood resilience based on a grid-scale system performance curve that considers double thresholds [J]. Sustainability, 2024, 16(20): 9101.
- [19] 李正兆,傅大放,王君娴,等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(2): 266–276.
- Li Zhengzhao, Fu Dafang, Wang Junxian, et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 266–276. (in Chinese)
- [20] 王好芳,张祎珂,陈怡馨,等. 栅格尺度的流域洪涝韧性与洪涝风险分区研究[J]. 水资源保护, 2026, 42(2): 59–67, 99.
- Wang Haofang, Zhang Yike, Chen Yixin, et al. Research on flood resilience and flood risk zoning of river basin at grid cell scale [J]. Water Resources Protection, 2026, 42(2): 59–67, 99. (in Chinese)
- [21] 李超超,程晓陶,王艳艳,等. 洪涝灾害三参数损失函数的构建 I: 基本原理[J]. 水利学报, 2020, 51(3): 349–357.
- Li Chaochao, Cheng Xiaotao, Wang Yanyan, et al. Construction of three-parameter loss function for flood disaster I: basic principle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(3): 349–357. (in Chinese)
- [22] 杨慧燕,王婷,高美谭,等. 广州暴雨内涝-雨量关系与阈值研究[J]. 广东气象, 2023, 45(6): 23–28.
- Yang Huiyan, Wang Ting, Gao Meitan, et al. Study on the relationship and thresholds between rainstorm waterlogging and rainfall in Guangzhou [J]. Guangdong Meteorology, 2023, 45(6): 23–28. (in Chinese)
- [23] 陈洋,杨文泰,李庆国,等. 基于损失函数的城市洪涝灾害弹性演化规律研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(4): 800–808.
- Chen Yang, Yang Wentai, Li Qingguo, et al. Research on evolution of urban flood resilience based on loss function [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(4): 800–808. (in Chinese)
- [24] 同济大学航空航天与力学学院基础力学教学研究部. 材料力学(第3版)[M]. 上海: 同济大学出版社, 2022: 14–19.
- Liu Hongwen. Mechanics of Materials I [M]. 6th ed. Beijing: Higher Education Press, 2017. (in Chinese)
- [25] GB 51222—2017 城镇内涝防治技术规范[S].
- GB 51222—2017 Technical code for urban flooding prevention and control[S]. (in Chinese)
- [26] DHI. MIKE URBAN TUTORIALS Step-by-Step Training Guide [R]. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute, 2014: 79–112.
- [27] DHI. MIKE FLOOD 1D-2D modelling: user manual [R]. Hørsholm: Danish Hydraulic Institute, 2014: 27–94.

Evaluation of Waterlogging Defense Resilience Based on a Rainfall-Waterlogging Area Ratio Model

WEI Qiankun^{1,2}, LIANG Jiyu¹, HUANG Ruijing¹

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. Key Laboratory of Water Security Guarantee in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611)

Abstract: Building a resilient urban flood defense system is an effective measure against waterlogging disasters, but quantitative criteria for distinguishing between resilient and brittle defense are insufficient to evaluate the resilience of current and planned defense

systems. Analogous to the stress-strain constitutive model of materials, a rainfall-inundation area ratio model for defense systems was developed, introducing a three-stage integrity criterion, characteristic load threshold, hardening discriminant index B , and yield-to-tensile strength ratio λ . Using small watersheds A (plain tidal river network area) and B (hilly area) in Guangzhou as case studies, a three-coupled model was employed to subject four sets of systems (current and planned) to 18 rainfall levels. The results showed hardening discriminant indices of 0.15, 0.60, 0.80, and 1.26 for the planned systems of watershed A and B, and the current systems of watershed A and B, respectively, corresponding to strong, moderate, weak, and brittle resilience. The planned system of watershed B failed at 170 mm with a yield-to-tensile strength ratio of 0.78. The curve morphology can quantitatively distinguish the resilient-brittle nature of defense systems, while the characteristic load and yield-to-tensile strength ratio provide a quantitative basis for planning, design, and super-standard defense measures.

Keywords: urban waterlogging; resilience evaluation; rainfall-waterlogging area ratio model; stress-strain analogy; tidal river network

(责任编辑:李燕珊)