

# 台风“级联效应”灾害下城乡环境的响应机制与营建策略\*

## ——基于乐清市虹桥的研究

郭睿 王卿 张焕 王竹 黎冰

**提要** 台风“级联效应”，即灾害事件连锁、多要素相互作用并导致灾害损失累积放大，给受影响地区的城乡环境带来了严峻的挑战，通过适宜性营建减少风险、提高城乡韧性成为重要的人居环境发展目标。以“响应机制—灾变机理—营建策略”为技术路径，针对乐清市虹桥流域城镇组团的“台风—雨洪潮—内涝”级联过程进行实证研究，诠释了海陆基面、流域特征、城乡空间三级尺度驱动灾害级联过程，明确“过程控制”的治理导向，建立平灾结合目标下“水文—地貌—需求”相协同的城乡环境营建单元，揭示出台风“级联效应”灾害下城乡环境的响应机制，进而把握台风的非线性灾变机理，构建城乡环境营建单元的适宜性策略，以期台风频发区域城乡环境的灾害适应性营建提供策略路径与技术方法。

**关键词** 台风级联效应；城乡环境；响应机制；灾变机理；营建策略

中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.16361/j.upf.202402014

文章编号 1000-3363(2024)02-0110-09

### 作者简介

郭睿，浙江大学建筑设计研究院有限公司与浙江大学联合培养博士后，11812014@zju.edu.cn

王卿，中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江华东测绘与工程安全技术有限公司，博士后

张焕，浙江大学建筑工程学院副教授、硕士生导师，通信作者，0014979@zju.edu.cn

王竹，浙江大学建筑工程学院教授、博士生导师

黎冰，浙江大学建筑设计研究院有限公司研究员、博士生导师，浙江大学建筑设计研究院有限公司总建筑师

Urban-Rural Response Mechanism and Construction Strategies in the Face of Cascading Effects of Typhoon Disasters: Research Based on Hongqiao, Yueqing  
GUO Rui, WANG Qing, ZHANG Huan, WANG Zhu, LI Bing

**Abstract:** The "cascading effect" of typhoons, characterized by a chain of disaster events, multi-factor interactions, and the cumulative amplification of damage, poses significant challenges to urban and rural environments in affected regions, making risk-reduction and resilience-enhancing construction practices critical goals in human settlements development. Following a technical pathway of "Response Mechanism-Catastrophe Mechanism-Construction Strategy", the paper examines the cascading process of "Typhoon—Rain, Flood, Surge—Waterlogging" in Hongqiao Basin Township Cluster, Yueqing City. Based on an analysis of the cascading process driven by factors in three aspects: the marine-terrestrial interface, watershed characteristics, and urban-rural space, the paper points out the critical importance of process control in local governance. Consequently, it introduces the concept of the urban-rural environmental construction unit, a spatial unit suitable for development and disaster management with integrated hydrology, geomorphology, and demand considerations. The paper sheds light on the urban-rural response mechanism to the cascading effect of typhoon disasters. Furthermore, by comprehending the nonlinear catastrophe effects, it helps develop strategies for sustainable urban-rural development in typhoon-prone areas.

**Keywords:** typhoon cascading effect; urban-rural environment; response mechanism; catastrophe mechanism; construction strategy

## 1 引言：台风“级联效应”灾害下韧性安全建设的时代需求

### 1.1 背景：风、雨、洪、潮、涝的“级联效应”挑战

世界气象组织(WMO)的统计数据显示，1970年至2019年间，全球有38%的人口死亡和38%的经济损失与热带气旋有关，位列所有水文气象灾害中的第一位<sup>[1]</sup>。近年来，台风诱发的复合型极端灾害给我国受影响地区带来重大损失，浙江省首当其冲。2019年，1909号超强台风“利奇马”登陆前后，在椒江流域几乎所有河道、水库、水闸水位整体壅高的情况下，台州市仍普降暴雨，共计16座测站面雨量超过500 mm，95.5%的测站面雨量超过100 mm，位于椒江河口段的临海市所有测站平均雨量高达

\* 国家自然科学基金面上项目“‘资源-需求’扰动下滨海村镇人居可持续营建方法”(项目编号: 52378042); 中国博士后科学基金面上项目“全球暖化背景下的台风风场特性演化及海上风机结构安全风险研究”(项目编号: 2023M743311); 浙江大学平衡建筑研究中心项目“韧性导向下城市更新营建机制与策略”(项目编号: K横20240163)

337.2 mm, 成为特大暴雨中心, 导致全部城区被迫用来调蓄<sup>①</sup>; 2020年, 2004号台风“黑格比”于近海突然生成并迅速加强, 风、雨、潮三碰头正面袭击温州; 2021年, 2106号台风“烟花”在陆上滞留时间长达95小时破历史纪录; 2022年, 2212号强台风“梅花”造成宁波市多达70个乡镇(街道)过程雨量超300 mm, 行洪恰逢天文大潮顶托, 导致多地内涝<sup>②</sup>; 2023年, 2305号超强台风“杜苏芮”在造成闽浙地区广泛城市内涝和山洪灾害之余, 残余环流北上引发了更广范围的洪涝灾害<sup>③</sup>。伴随台风而来的风、雨、潮、洪、涝联合致灾情景表明, 在气候变化加剧与台风活动趋势变迁的背景下, 这种初始事件能触发后续连锁反应、多要素间存在强烈的相互作用, 导致风险在时间与空间上连续扩展而造成灾难损失累积放大的“级联效应(cascading effect)”<sup>[4-5]</sup>, 构成了今日台风侵扰城乡环境的真实写照。

面对当今城市规模化发展以及各种不确定性带来的挑战, 着力防范风险、维持动态安全成为重要的人居发展目标。2021年, 我国“十四五”规划纲要首次将“统筹发展和安全”纳入经济社会发展指导思想, 安全发展成为指导我国未来经济社会发展的核心要求之一<sup>[6]</sup>。2023年11月, 习近平总书记在上海考察时首次提出“全面推进韧性安全城市建设”, 强调了韧性安全在城市规划建设管理中的突出位置。因此, 积极响应新型城镇化战略, 建设韧性安全的国土空间, 主动缓解自然灾害风险增加, 是当前城乡环境营建的重中之重。

## 1.2 评述: 台风“级联效应”的研究动向

近年来, 随着人们对灾害事件之间相互关联和复杂影响的认识加深, 台风“级联效应”受到越来越多的关注, 相关研究针对级联场景分析、灾变工况计算、灾害风险和韧性量化、适应性规划方法等展开了工作。部分学者借助历史灾情或水文资料创新模型, 强化了对台风“级联效应”复杂性与跨尺度的解释, 旨在提高灾害风险管理相关决策的准确性<sup>[7,8]</sup>。部分学者从洪水—强风耦合模式、台风与洪涝的相关性、洪水—风暴潮遭

遇、台风—洪涝—地质灾害链、台风—暴雨—天文大潮多重威胁等视角切入, 通过推导堤塘、排水体系、桥梁、工业设备、生命线工程等城市基础设施在灾变耦合工况下的灾变机理与风险概率, 提出相应的工程优化方案<sup>[9-13]</sup>; 或根据统计数据, 量化研究区域内的灾害发生概率、风险分布、经济损失、韧性程度等, 受限于数据的可获取性, 评估结果多体现在全球、区域、流域、城市等较大尺度的空间之中<sup>[14-17]</sup>, 并倾向于从经济、社会、感知、基础设施等横向维度构建韧性评估体系, 而后提供宏观减灾策略。

在关注空间灾害适应性营建方法的规划建筑领域, 社会过程与自然过程的关联机制与良性互动越发得到重视<sup>[18]</sup>。例如, 围绕飓风“桑迪”后时代纽约纳苏郡的复兴计划, 荷兰H+N+S事务所提出了“与海湾共生”的营建愿景, 建构了基于沙洲、堰洲岛、沼泽、溪流、山地等5种海湾地貌类型的整体适应性格局, 以地貌形成动力作为空间干预机制, 提供了遵从水文地貌规律的城市设计策略<sup>[19]</sup>。我国亦有学者<sup>[20-21]</sup>提出了台风影响期间保证城市正常运行的动态洪涝适应性规划思路, 而非单纯依据横向韧性测度提供宏观减灾对策。同时, 有学者<sup>[22]</sup>指出需要关注韧性城市的跨尺度营建, 以回应台风“级联效应”的跨尺度难题, 响应了联合国减灾战略中建立多层次减灾机制的倡议。然而, 既有研究仍较少关注对台风“级联效应”关键驱动要素与发展过程的深入剖析, 始终难以为受影响地区的预防、适应、减缓等实践工作提供精准的指导。城乡环境的韧性安全并非单纯依赖于特定技术下的局部优化改造, 或止步于对风险识别的精益求精, 而应在厘清“级联效应”所展现的非线性关联之上, 把握精准的响应机制与营建方法, 以促进常态建设与减缓极端灾害风险的目标兼顾与空间兼容。

## 1.3 研究路径与意义

台风“级联效应”的发生与发展过程涉及不同空间尺度、不同生态系统与城乡营建系统及其相互作用关系, 城乡环境作为更大生态系统的一部分, 理应寻求人地协同适灾、减灾的整体性思路。基于此, 本研究从多尺度、多维度、

高关联的视野出发, 以温州乐清市虹桥组团为实证研究对象, 揭示空间营建减缓台风级联风险的响应机制, 剖析灾害级联过程的非线性机理, 探索在地实践的精准路径, 以期为长三角地区小尺度的防灾空间提供新的研究和实践思路, 同时能够启发规划、建筑、风景园林等相关学科与风险防控刚性需求如何兼容的思考, 抓住韧性安全建设的要求, 为各专业开拓新的发展路径。

## 2 研究区概况

### 2.1 研究对象: 乐清市虹桥流域城镇组团

乐清市, 浙江省温州市代管县级市, 位于温州市北翼, 是浙江省高质量发展建设共同富裕示范区第二批试点地区之一, 地区生产总值常年位居温州市第一。全市西靠雁荡山脉, 东临乐清湾。雁荡山脉将乐清市分割为多个独流入海小流域, 研究区位于虹桥流域, 流域面积236.28 km<sup>2</sup>。虹桥流域山体环抱中心平地, 主要源头有二, 一为淡溪, 二为梅溪, 两溪出谷后相汇, 水网密布, 滨海潮沟经人工蓄淡改造与河道相连, 形成了东干河与西干河两个河口, 双双倾泻入乐清湾。虹桥流域城镇组团以虹桥镇为核心, 在《乐清市国土空间总体规划2021—2035年》中, 虹桥组团与柳白组团、乐城组团共同规划为乐清中心城市三大组团。见图1。

### 2.2 灾害级联过程: 台风—雨洪潮—内涝

近40年来, 登陆温州与台州的台风占整个浙江省的75%<sup>②</sup>。位于温、台两市交界处的乐清市始终处于受影响的第一线。尽管由强风造成的死亡人口与房屋倒塌数量大幅减少, 但“逢台风必涝”仍是常态。

乐清市水安全保障“十四五”规划对水安全保障体系存在的问题进行了研判, 指出高潮位和大暴雨相遇易出现内涝, 虹桥组团中心平地排涝能力尚未达标<sup>[23]</sup>。《乐清市山洪灾害防御预案》强调, 乐清市历来是温州地区山洪灾害的重灾区, 山洪灾害基本以伴随台风带来的强降雨出现<sup>[24]</sup>。因此, 雨、洪、潮实



则是衔接台风和内涝的中间环节，“逢台风必涝”可进一步归纳为“台风—雨洪潮—内涝”灾害级联过程，即台风策动下的暴雨、山洪、风暴潮耦合成涝现象。在“淹不得、淹不起”的客观事实<sup>[23]</sup>面前，亟须梳理灾变动因，探究其中的关联。

### 3 台风“级联效应”灾害下城乡环境的响应机制

自“十三五”起，以乐清市为代表的县域区划开始对韧性安全、防台防汛提出了较高的要求，至“十四五”进一步趋于系统性与精细化，明确了平灾结合的基本思路（表1）。与此同时，当前的国土空间规划工作重点已逐步转向详细规划。因此，结合安全发展规划思路与国土空间规划重心加以确立应对台风“级联效应”的响应机制，是适宜性城乡环境营建方法提出的前提之一。

#### 3.1 “海陆基面—流域特征—城乡空间”三级尺度诠释灾害级联过程

不同的生态—社会过程具备不同的空间尺度，尺度转换是理解跨尺度过程的关键视角。“台风—雨洪潮—内涝”级联过程存在明显的空间尺度降级现象：在宏观尺度，台风登陆过程中的能量转换受到海洋和陆地相互作用物理基面的影响；在中观尺度，雨、洪、潮的水文耦合规律与流域特征息息相关；在微观尺度，内涝是城乡空间对水文耦合规律的反馈。当前，城镇、生态、农业、海洋等各类主体国土空间之间的相互关联越来越紧密<sup>[25]</sup>，各级国土空间规划越来越注重韧性安全<sup>[26]</sup>，因此，把握台风灾变机理、剖析驱动要素亟须整合海陆基面、流域特征、城乡空间的多维度与跨尺度视野。

#### 3.2 “过程控制”的级联风险治理导向

台风在与海陆基面相互作用之下，其能量转换不可抗拒，唯有防避，而雨、洪、潮的水文耦合规律和内涝的产生实则是一种“水进入进”过程的激烈碰撞。尽管水文耦合规律受制于流域特征而同样难以避免，但仍可以通过生态修复、水工程群建设与城乡环境营建体系的结

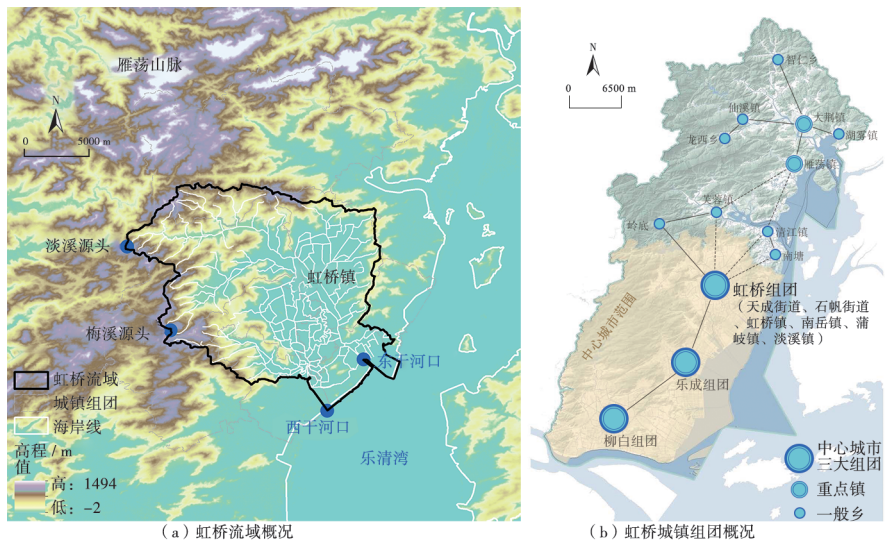


图1 虹桥流域城镇组团概况

Fig.1 Overview of the township cluster in Hongqiao Basin

资料来源：图1 (b) 乐清市自然资源和规划局. 乐清市国土空间总体规划2021—2035年, 2023

表1 乐清市针对韧性安全、防台防汛的规划内容

Tab.1 Resilience safety and typhoon-flood disaster planning of Yueqing

时期	规划类型	针对韧性安全、防台防汛的指导思想或主要任务
“十三五”期间	国民经济和社会发展规划纲要	①构筑生态安全屏障。加快推进生态公益林建设和山区低效林地改造利用；加强红树林滨海湿地系统的保护利用，提升湿地生态系统功能质量；建设综合沿海防护林体系，建立健全海洋环境监测体系，加强沿海滩涂、海域海岛的生态修复，提升生态自我调节能力； ②以“强库、固堤、扩排”为重点，完善流域防洪减灾体系
	气象事业发展规划	着力提升气象灾害监测预报预警能力
“十四五”期间	国民经济和社会发展规划纲要奋斗目标	①经济保持平稳健康发展，全文提及“安全”多达52次； ②生态环境承载力更具韧性； ③县域防灾减灾能力显著增强
	气象事业发展规划	筑牢气象防灾减灾“第一道防线”
	水安全保障规划平安水网总体格局	结合流域高质量发展要求，按照分区设防、重点保障原则，针对上游山区暴雨洪水、下游风暴潮的突出防洪问题，采取“上蓄、中疏、下排、外挡”综合施策，优化防洪排涝格局，合理安排洪涝水出路，增加强排能力，提升海塘堤防防洪御潮标准，进一步完善“二溪三平原”防灾减灾体系，构建“山城海”系统治理的防洪排涝御潮体系，建设高标准的平安水网
	应急管理规划灾害防治设施建设工程	实施防汛防台水利提升工程，强化城市防洪排涝治理，推进重大防洪（潮）工程建设，推进乐清市海塘安澜工程建设，一线海塘安全问题全面消除，生态海塘建设理念得以贯彻落实，“安全+”示范工程不断涌现，海塘沿线生态修复长度比例达到60%，“生命线”“风景线”“幸福线”初步形成，产权化、物业化、数字化的现代化海塘管理体系初步建立

资料来源：乐清市人民政府网

构性调整而产生部分缓解作用。因此，减缓台风级联风险的关键在于建立一个以“过程控制”为导向的治理体系，促进水文子过程水体动能的消耗与转移、延迟水文子过程的耦合遭遇，以有效指导城乡环境的规划建设。

#### 3.3 平灾结合目标下“水文—地貌—需

求”相协同的城乡环境营建单元

地貌肌理不同，水文条件也就不同，一部分地貌单元能够促进水文过程，而另一部分则能缓解，因此，有利于缓解水文子过程的地貌单元实则是在营建体系发挥“过程控制”作用的天然载体。可以将水文子过程的来向作为锚定地貌单元的依据，结合城乡建设发展需求<sup>[27]</sup>，

通过空间布局和功能的结构重组<sup>[28]</sup>, 强化地貌单元的肌理、疏解水文子过程的能量, 形成“水文—地貌—需求”相协同的城乡环境营建单元(图2), 进而在各个方位调控台风水文子过程的穿越性能, 延迟子过程的遭遇, 产生保护其内部和下游城乡环境的协作格局, 补充防灾减灾的空间治理层次。

#### 4 乐清市虹桥城乡环境营建的单元协作策略

##### 4.1 维系滨海潮滩减潮效能的“韧性港区”

###### 4.1.1 水下岸坡与乐清湾收口地形促进风暴潮增水

台风风暴潮是海上由于台风过境所伴随的强风和气压骤变而引起的局部海面震荡或非周期性异常升高现象<sup>[29]</sup>, 增水程度通常是风应力增水、低气压增水与天文潮增水的叠加。

然而, 近海与乐清湾的地形地貌特征同样对风暴潮增水产生了促进作用。浙江近海的水下堆积岸坡平均坡降仅为1‰<sup>[30]</sup>, 地形的倾斜非常微小, 温州附近的水下堆积岸坡水深在20 m以内, 但宽度达20—50 km<sup>[31]</sup>。近海水深的减少导致波浪前进速度变慢, 波高增加, 潮位上升。同时, 乐清湾具有典型的收口地形, 随着风暴潮推进到更狭窄的区域, 水流空间受限而潮位进一步上升。统计数据显示, 距离虹桥组团最近的沙港头站所测得的历史最高潮位达4.57 m, 为

2013年1312号台风“潭美”影响所致<sup>[29]</sup>。

###### 4.1.2 港区外扩加剧潮能集中

乐清湾最大潮差可达8.34 m<sup>[32]</sup>, 沙港头站实测最大潮差7.95 m<sup>[33]</sup>, 重力势能与动能转换剧烈, 水体能量大。2000年以来, 乐清湾滨海潮滩不断转移为港区建设用地, 潮沟被新塘与水闸所截断, 塘内水道渠化, 塘外潮沟因水动力减弱而发育渐缓, 原本丰富的支沟体系退化, 难以发挥对潮涌与波浪能量的疏解作用, 受风暴潮影响时海塘受力增大。同时, 风暴潮水体涨落会侵蚀、掏空塘身, 进一步削减海塘结构的稳定性。现阶段, 尽管海塘结构不断升级, 虹桥组团海塘的设计标高均已规划至6 m左右<sup>③</sup>, 但风暴潮能量集中加剧的根本性问题尚待缓解。

###### 4.1.3 “韧性港区”再生潮流通道

乐清湾港区一期拓展区现有控制性详细规划已推翻了对于滨海潮滩潮上带的全面围垦, 而规划有地表水网。因此, 可以为每个被水网分割的港区模块规划独立的环绕型标准海塘, 形成御潮模块, 打破传统挡潮范式, 将内部水网开放为潮流通道, 将空间还给潮涌与潮汐, 从而提供多条通路以分散压力。同时, 可借鉴美国加州奥兰治郡的Bolsa Chica低地生态恢复项目, 通过预填沙洲、疏浚潮池、人工岛屿、加固堤坝等综合策略, 为打通的潮流通道巩固了全潮汐的影响作用, 创造了有利于盐沼生长与沙丘稳定的条件<sup>[34]</sup>, 将生态空间与纳潮减灾空

间最大限度地结合了起来。未来, 乐清“韧性港区”的建设需要深度把握支沟体系与盐沼的再生机理, 预留潮池, 以空间置换策略弥补港区建设对潮滩资源的占用, 优化空间要素的组织方式, 促进灾时消能蓄水作用的产生, 维系平时乐清湾的淤涨平衡与生物多样性。见图3。

##### 4.2 重塑近海疏导功能的“港城生态隔舱”

###### 4.2.1 近海剖面秩序变迁改变汇流方向

在虹桥组团的近海区域中, 得益于低丘的存在, 传统时期的聚落依附于坡地, 围垦而成的农田高程位居中间, 而保留有潮滩与潮沟作为富有弹性的最低平面, 形成了疏导汇流的剖面秩序。现阶段, 随着虹桥组团港工业发展, 部分农田已转移为或规划为工商业区, 新规划的地块、道路与海塘的建设标准高、高程高, 不可避免地造成了新老地表之间的微小差。与此同时, 随着老旧海塘的御潮功能逐渐向圩堤与次路网的功能转变, 沉降与形变问题十分普遍, 甚至仍作为一线塘的胜利长胜塘与友谊塘已经沉降约80—100 cm<sup>③</sup>, 难以继续发挥阻挡外来洪水、保护内部农田的功能。在河口排水受高潮位顶托之时, 近海区域内的地表径流很容易汇集到被旧塘包围的农田或西北方向的中心平地之中。见图4。

###### 4.2.2 “港城生态隔舱” 汇流就地自消 随着港区一期拓展区建设的落实推

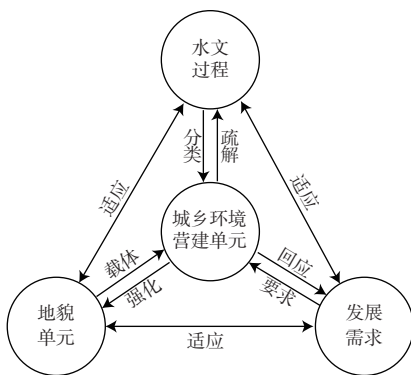


图2 “水文—地貌—需求”相协同的城乡环境营建单元

Fig.2 Urban-rural environmental construction unit that synergizes hydrology, geomorphology and demands

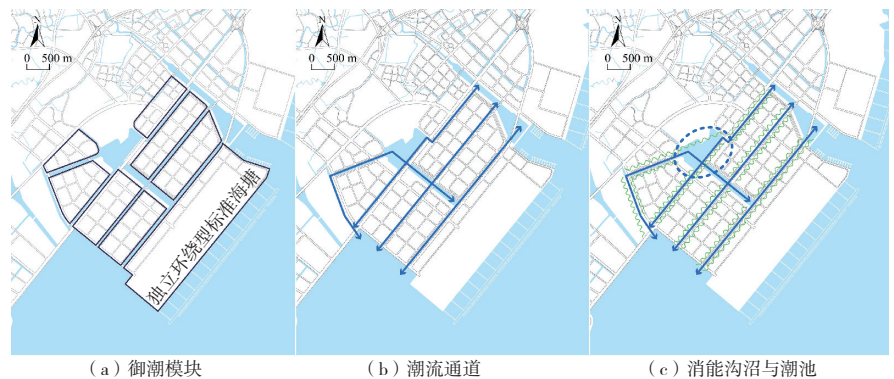


图3 韧性港区的结构重塑

Fig.3 Restructuring of resilient ports

资料来源: 乐清市城乡规划设计院. 乐清湾港区一期拓展区控制性详细规划, 2022



进,近海区域将内退为虹桥组团核心城镇与港区之间的夹心地带,成为港城融合下新型业态涌现与生活方式升级的重要区块,有必要重塑剖面秩序,打造疏导汇流就地自消的微地形,减缓内涝风险向农田与中心平地转移,形成区域隔舱(compartment)的意义。具体的营建策略如下:

(1) 多方剖面的高程重塑

尽管由陆至海的传统剖面秩序被打乱,但仍可以从其他剖面寻求高程重塑的机遇。例如,将短边旧塘拆除内移,释放空间作为水域或可淹没的生态湿地,使地块建设形成类似于圩田的营建模式,提高地块接壤外河的概率。新置换的水域或湿地需要连接既有水网,有针对性衔接断头河并配合清淤工作,增强水网的整体调蓄能力。

(2) 边界限定

作为后边界的沈海高速建设标准高,可以在沿线两侧空间植入雨洪路缘、植草沟、滞留池等小型低影响开发设施,而交通环岛作为较大规模的减灾绿地,成为联通排水管网与低影响开发设施的水文管理枢纽。此外,沈海高速沿线的雨洪管理体系还能成为联结东干河与西干河的通道,促进河流调蓄能力的升级。

(3) 灰空间赋能

在建成港工业区内,现有大量的闲置空地与城市草坪,由于人员性质与用地类型单一,这些灰空间尚不具备优化生态环境与提高城市品质的作用。可以将这些灰空间改造为平灾异用的下沉式场地,结合乐清湾休闲文旅带的核心定位打造港口文化节点,在平时为港区工作人员与游客提供休闲与驻留空间,在灾时及时转化为蓄水空间,并通过暗渠和下渗技术将其与地下空间的开发连接。

4.3 激发坡地协同滞洪的“环山拱卫屏障”

4.3.1 复杂地势加剧台风暴雨增幅,流域特征推动山洪暴泄

浙江山地高峻复杂,台风在逼近陆地的过程中,山体会对台风的近地层环流产生抬升和阻滞作用<sup>[35]</sup>,迫使水汽上升凝结,台风移速放缓,加剧降水。同时,山谷的气流辐合效应能促进中小尺度对流和局部涡旋产生,引起台风暴雨

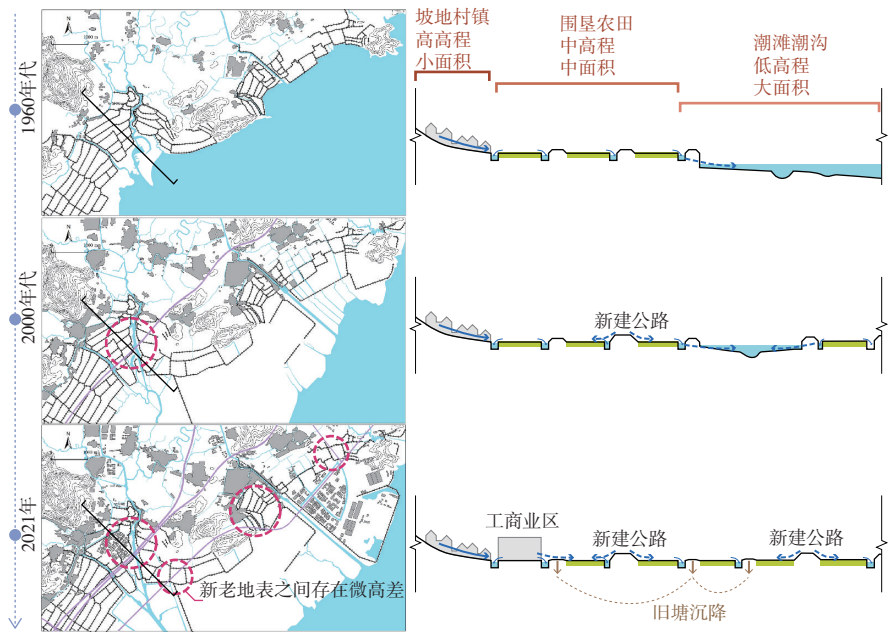


图4 近海剖面秩序变迁改变汇流方向

Fig.4 Changes in the order of nearshore profiles alter the direction of confluence

在复杂地势中的进一步增幅<sup>[36-37]</sup>。因此,浙江省的台风雨强形态多表现为登陆后急剧增强<sup>[38]</sup>。

虹桥组团周围山体呈现环抱式的空间布局,西部为高山,东部为高程200 m以上的低丘,环线坡地整体属于25%以上的陡坡地,仅在西部塑造了源短流急的山溪性河流,而在东部无常年性河流,汇流过程通常表现为坡面汇流,暴雨发生时,山洪将从四面八方倾泻进入中心平地。

径流系数是指某一时间内的径流深度R与相应时间段内的平均降水深度P的比值,用 $\alpha$ 表示,根据定义有:

$$\alpha = \frac{R}{P}$$

对于闭合流域,因为 $R < P$ ,因此 $\alpha < 1$ 。径流系数 $\alpha$ 越大,表明降水越不易被土壤吸收,在暴雨日越会增加排水系统的负荷。虹桥流域径流系数 $\alpha$ 为0.7,意味着大约有70%的降雨量将转化为地表径流,流域表面的渗透能力十分有限。例如,2019年1909号“利奇马”与2020年2004号“黑格比”影响期间,虹桥流域面雨量分别达341.1 mm和257.7 mm<sup>④</sup>,分别形成了大约565万m<sup>3</sup>与426万m<sup>3</sup>的径流总量,山洪暴发。

4.3.2 上游滞洪格局规划滞后

针对上游山洪的防范,虹桥组团主

要依托1968年建成的淡溪水库与沿途堰坝等水利工程。然而,梅溪上游地貌的复杂程度远高于淡溪,难以一概而论其山洪治理工作。梅溪上游整体属于一个小规模盆地单元,在其内部,四周分布有沟谷,西侧山麓表现为小型洪积扇,东部梅溪出谷之前河曲发育。地貌肌理不同,水文条件也就不同,仅依赖沿河水利工程的建设难以约束梅溪上游盆地中的山洪下泄。在此基础上,该地近年来大力发展文旅产业,河道渠化与排水管网建设加快落实,蓄、滞作用进一步减弱,而有针对性的滞洪格局规划鲜有探讨。

4.3.3 坡地不透水性凸显,环山河道水面不足

虹桥组团的用地类型由外及里呈现出林地、园地、坡地村镇、耕地、中心平地城镇的多层次嵌套结构,特别是位于环山沟谷中的林地、园地、村镇与耕地,伴随着平整土地运动与种植业升级<sup>[39]</sup>,组合形成了梯地肌理,能够产生对雨洪的消蓄作用。然而,在就地工业化与城镇化的推进下,道路硬化与工业园区的广泛建设提高了地表的不透水性,进一步弱化了本就薄弱的环山滞洪格局[图5(a)]。

目前,虹桥组团不断强化环山河道

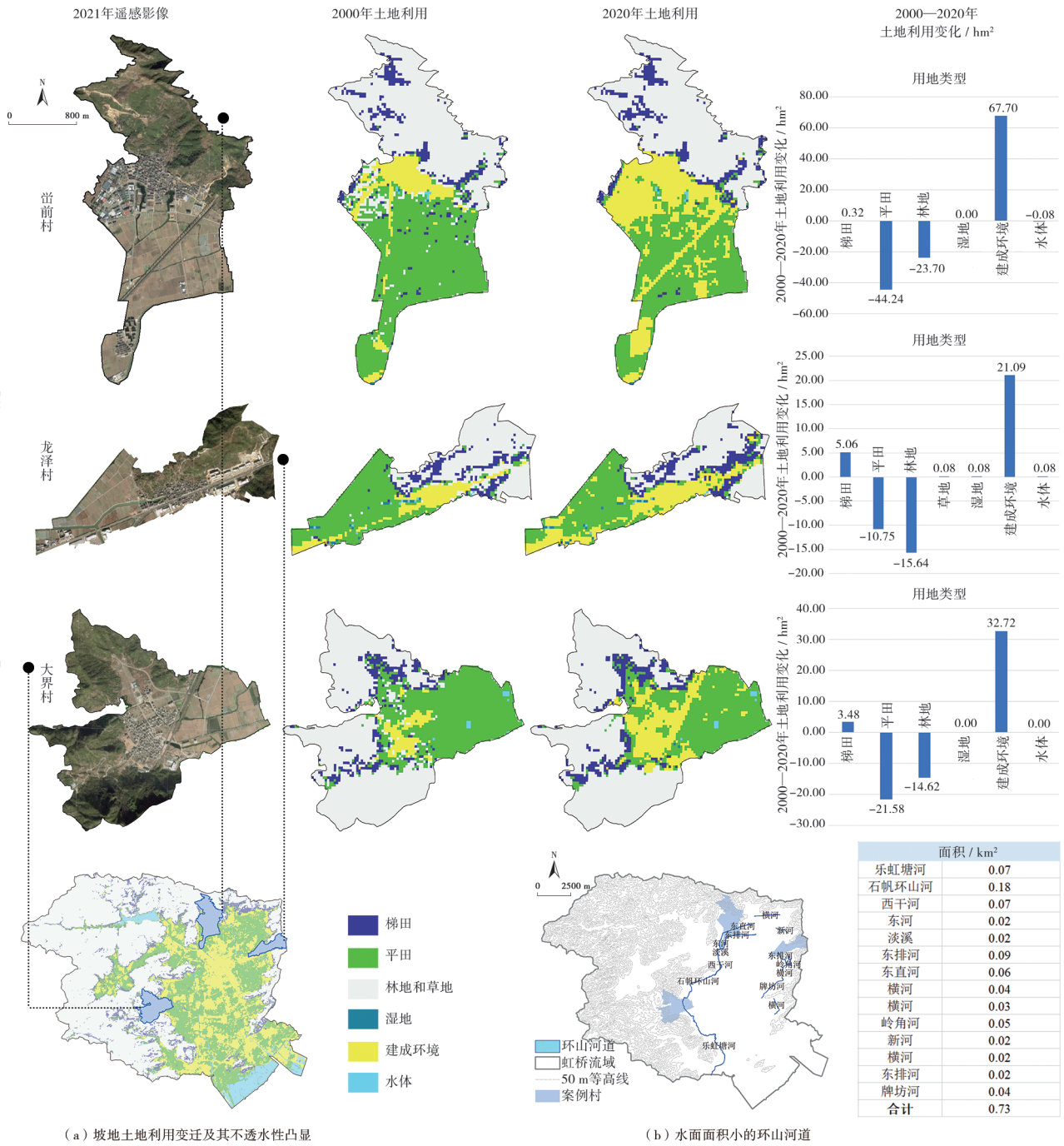


图5 坡地土地利用变迁与环山河道特征  
Fig.5 Land use changes in sloping areas and the characteristics of the surrounding mountain river channels

的贯通性，乐虹塘河、石帆环山河、横河与东排河等已将大大小小的径向水系串联，基本打通了环山河道体系，能够一定程度上修补环山滞洪格局。然而，环山河道整体等级低，总计水面面积仅为约0.73 km<sup>2</sup> [图5(b)]，仍欠缺能够有效缓解暴雨山洪的冗余能力。

#### 4.3.4 “环山拱卫屏障”双层双库多阶的空间共治

虹桥组团山地与中心平地之间的环山空间兼具多种地貌，需要以滞洪为导向，借助整体视角重新组织空间结构，形成“环山拱卫屏障”，相应的调整策略见图6。

在沟谷、洪积扇面小分散的条件下，争取效用空间的下延和上调。在下延方面，识别既有环山河道的单层次区域，盘活原有水网，将现有单层次为主的环山河道升级为双层体系，发挥双层河道对蓄水面积不足的补充。在上调方面，补充梅溪上游盆地的环山河道，激活盆



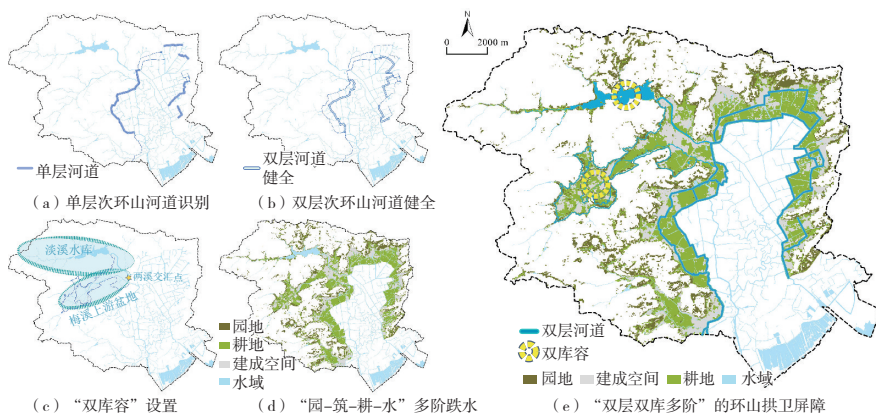


图6 环山拱卫屏障的结构重塑

Fig.6 Restructuring of the mountain-surrounded barrier

地的滞洪潜力，与淡溪水库形成“双库容”结构，在台汛期缓解淡溪与梅溪出谷后对下游的压力。基于此，继续构建环山空间中园地、建成环境、耕地、小微水域等四种土地利用类型的协同滞洪作用。以浙江省坡地村镇的“点状布局、垂直开发”建议为原则，建筑设计以建筑边界为限，顺应地形形成高低错落的布局，采用架空或半地下的接地方式，最大程度地保留周边园地与耕地的梯地肌理，而小微水域可以通过截直变弯、增加蓄水空间等策略延迟洪水下泄。

综上所述，尽管虹桥组团存在驱动暴雨增幅与山洪暴泄的多重因素，但仍可以通过调整空间结构与营造方式，形成“双层双库”的理水格局，以及“园—筑—耕—水”共同参与跌水过程的多阶肌理，协同削减暴雨山洪对下游的威胁。

#### 4.4 盘活灾害储备空间的“水敏网络”

##### 4.4.1 建设目标挤占中心平地的水岸空间

虹桥组团中心平地的水岸空间地势平坦、交通便捷，是空间城镇化扩张的主要地带。利用1985—2020年30 m精细地表覆被数据<sup>⑤</sup>，计算水岸各种土地利用类型的变化趋势，结果表现为城乡建成环境对低洼水田空间与生态资源的征用，水田自然滞、蓄功能丧失。近35年间，在10 m、30 m、50 m的水岸空间中，土地利用的变化模式呈现一致趋势，水田面积分别下降了4.35 km<sup>2</sup>、7.5 km<sup>2</sup>与10.5 km<sup>2</sup>，林地面积分别下降了0.4 km<sup>2</sup>、

1.06 km<sup>2</sup>与1.71 km<sup>2</sup>，建成环境则分别增长了2.79 km<sup>2</sup>、6.07 km<sup>2</sup>与9.28 km<sup>2</sup>。在50 m水岸内，建成环境的生长程度和分布方位与城镇化建设目标高度吻合：1995—2005年间，城市中心扩张全面依赖核心水岸；2005—2015年间，高速公路出入口、高铁站、港口等城市门户建设剧烈挤占局部水岸；2015—2020年间，伴随着纵向工业动脉虹南公路的规划建设，乡村就地工业化高潮进一步挤占边缘水岸。

##### 4.4.2 河流消蓄与拱卫能力薄弱

虹桥流域河道整体发育不成熟，中心平地多低等级塘河，能发挥消解水体动能的河道地形与微洼湿地先天不足，如缺乏深潭—浅滩序列、河曲、下凹河床，以及回水道、牛轭湖、滚坝凹槽等，导致雨、洪、涝水难以消纳。同时，河岸自然小高地稀缺，中心平地中的聚落难以形成自然的小包围，长期以来选址较为随意，人居空间极易积水内涝。

建成空间的挤占促使自然拱卫与消蓄能力本就不足的水岸进一步失去了调蓄能力，很难缓冲台风带来的极端灾害总量。例如，2020年2004号台风“黑格比”影响温州期间，虹桥流域中心平地所有水网灾害应急库容仅为250万m<sup>3</sup>，而3日降雨497万m<sup>3</sup><sup>④</sup>，4日5时测得1 h最大面雨量为虹桥组团内石帆站117.0 mm，其次为虹桥组团内蒲岐站101.0 mm<sup>⑥</sup>，仅此两镇就在1 h内形成了约507万m<sup>3</sup>的雨量。与此同时，5时恰逢乐清湾涨潮开始，雨、洪、潮正面遭遇，虹桥流域所有河道在4日6时20分开始全

面超警戒水位，10时测得沙港头站已经超正常潮位1.57 m，12时虹桥站最高洪水水位3.69 m<sup>④</sup>，高潮位持续58 h，在此期间，虹桥组团大面积排水不畅、受灾严重。

##### 4.4.3 “水敏网络”组合消蓄层次

未来，台风移速放缓将导致极端降水进一步增强<sup>[40-41]</sup>，台风最大强度点向海岸靠近将加剧风暴潮强度<sup>[42]</sup>，我国沿海地区的雨、洪、潮遭遇情景持续升级。虹桥组团在水岸自然消蓄与拱卫能力薄弱的条件下，有必要强化水敏基础设施网络的建构，为极端灾害总量最大限度地盘活储备空间，减少排水系统的压力。

结合虹桥组团的国土空间规划，“水敏网络”可由河道、G类绿地与开放空间、A/B/M类用地的非室内空间、微型S类交通运输用地、R类居住用地中的口袋空间等五个子系统叠合而成。在建成环境中，结合不同的空间类型形态与水文情景，有的放矢地调整空间结构、组织水利设施。在河道中，通过人工要素介入泥沙输移与水流偏转过程，增加河道地形动力的过程节点，恢复河道对洪涝的自适应调节能力。见图7。

“水敏网络”在空间上与韧性港区、港城生态隔舱、环山拱卫屏障重叠，但更聚焦于对场地尺度的修正，一定程度上能够巩固三者对水体动能的消耗与转移。同时，“水敏网络”的叠合范式具有尺度缩放的拓扑意义，其规划设计思路能够向上拓展至整个流域而向下深入到任意场所之中，任意一个社区、乡村、地块均可在此思路下展开详细的设计方案，促使局部空间与基础设施从“孤岛”转为网络中的节点，使其在灾时能够转化为水体容纳空间，在平时又能兼具生活、交通、游憩功能，成为具备韧性、可达性、吸引力、连通性的宜居场所。

## 5 结语

为应对台风“级联效应”对城乡环境带来的挑战，本研究以乐清市虹桥流域城镇组团为例，针对“台风—雨洪潮—内涝”级联过程，诠释出城乡环境的响应机制在于三点：其一，借助“海陆基面—流域特征—城乡空间”三级尺

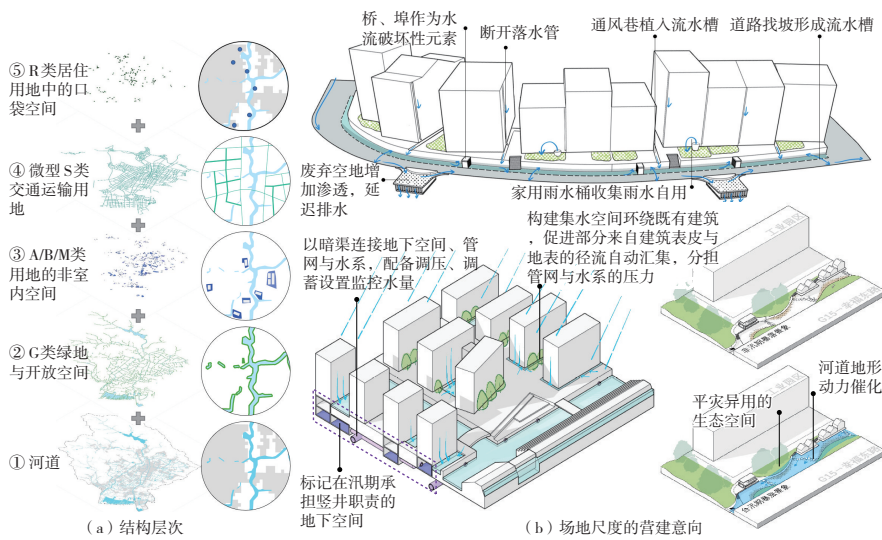


图7 水敏网络的结构层次与营建意向

Fig.7 Structural hierarchy of the water-sensitive network and construction intentions

度收集信息，把握海洋、陆地、流域、城乡等各个层级的系统特征与生态—社会过程，认识台风灾害与各系统的相互作用关系，加以强化对台风“级联效应”的解释；其二，明确“过程控制”的级联风险治理导向，旨在促进台风水文子过程水体动能的消耗与转移，延迟水文子过程的遭遇与耦合，减缓城乡营建对水文耦合规律的强化；其三，建构平灾结合目标下“水文—地貌—需求”相协同的城乡环境营建单元，以问题为导向进行精准实践，促进灾害风险治理与可持续发展的目标兼顾与空间兼容。在此基础上，综合定量计算与田野调查，厘清了虹桥组团台风的非线性灾变机理，剖析了影响滨海潮滩风暴潮增水积能、近海汇流无序、坡地山洪暴泄、中心平地储备空间缺失的跨尺度空间要素及其组织问题，相应地形成“韧性港区”“港城生态隔舱”“环山拱卫屏障”“水敏网络”等城乡环境营建单元及其适宜性策略，建构了单元之间缓解雨、洪、潮耦合成涝的协作格局，以期研究成果对台风频发区域城乡环境的灾害适应性营建活动起到一定的引导与参考作用。

注释

① 数据来源于台州水情发布中心。http://www.shui00.com/ZhswFloodWater/web/html/index.html?module=wssyq

- ② 数据来源于《中国气象灾害年鉴（2004—2021年）》、中国台风网与浙江省相关部门公示文件。
- ③ 数据来源于《乐清市海塘安澜工程建设规划方案（2020—2030年）》。http://www.yueqing.gov.cn/art/2020/12/7/art\_1229265762\_25141.html
- ④ 数据来源于乐清市水利局。
- ⑤ 数据来源于中国科学院空天信息创新研究院。https://doi.org/10.5281/zenodo.8239305
- ⑥ 数据来源于《温州市2020年8月上旬水雨情简报》。http://wzsl.wenzhou.gov.cn/art/2020/8/11/art\_1324820\_54270962.html

参考文献

[1] WMO. WMO atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970—2019) [EB/OL]. 2023-10-31. https://library.wmo.int/records/item/57564-wmo-atlas-of-mortality-and-economic-losses-from-weather-climate-and-water-extremes-1970-2019#.YS4KedP7TX0.

[2] 丁焯毅.“梅花”致灾强度等级为特重到严重[N]. 宁波日报, 2022-09-16(A2).

[3] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布2023年前三季度全国自然灾害情况[EB/OL]. 2023-11-02. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202310/t20231008\_465002.shtml.

[4] 魏政长. 风险耦合与级联: 社会新兴风险

演化态势的复杂性成因[J]. 学海, 2019(4): 125-134.

[5] UNDRR. Scoping study on compound, cascading and systemic risks in Asia-Pacific [EB/OL]. 2024-01-31. https://www.undrr.org/publication/scoping-study-compound-cascading-and-systemic-risks-asia-pacific.

[6] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. 2023-06-20. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\_5592681.htm.

[7] TANG P, ZHONG W, WEN J, et al. Developing and understanding cascading effects scenario of typhoons in coastal megacities from system perspectives for disaster risk reduction: a case study of Shenzhen, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023,92: 103691.

[8] ZHANG Z, LU Y, HU D, et al. A cross-scale modeling framework for simulating typhoon-induced compound floods and assessing the emergency response in urban regions[J]. Ocean and Coastal Management, 2023,245.

[9] 兰猛. 台风诱发多灾害下滨海工业集群事故灾变机制与风险量化[D]. 中国科学技术大学, 2022.

[10] 许伟, 刘培, 黄鹏飞, 等. 珠江流域感潮河段洪潮遭遇联合风险分析[J]. 水文, 2023, 43(2): 110-114.

[11] 杨海燕, 叶桂洪, 周广宇, 等. 分析及优化雨洪潮遭遇下城市水系排水防涝系统[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 271-277.

[12] SNAIKI R, WU T, WHITTAKER A S, et al. Hurricane wind and storm surge effects on coastal bridges under a changing climate[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(6): 23-32.

[13] 谢磊, 周鹏飞, 杨鸿艺, 等. 气候变化冲击下沿海地区生命线工程韧性范式探索: 以宁波市为例[J]. 城市规划学刊, 2022 (S2): 81-88.

[14] 王卿. 气候变化背景下的中国沿海区域台风模拟及风灾风险研究[D]. 浙江大学, 2022.

[15] 王婷, 吴绍洪, 高江波, 等. 区域台风—洪涝—地质灾害链减灾能力评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 193-200.

[16] 许红师, 练继建, 宾零陵, 等. 台风灾害多元致灾因子联合分布研究[J]. 地理科学,



- 2018, 38(12): 2118-2124.
- [17] 曾鹏, 苏朝晖, 方伟华, 等. 基于高精度房屋类型数据的海口市台风次生洪涝灾害损失评估[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 155-165.
- [18] 王倩雯, 赵广宇, 曾坚. 从“对立”到“统一”: 兼具社会经济发展与生态保护的城市用地开发路径探讨[J]. 城市规划, 2022, 46(12): 110-120.
- [19] Rebuild by Design. Living with the bay [EB/OL]. 2022-06-30. <https://rebuild-bydesign.org/work/funded-projects/living-with-the-bay/>.
- [20] 陈碧琳, 李颖龙. 洪涝韧性导向下高密度沿海城市适应性转型规划评估: 以深圳红树湾片区为例[J]. 城市规划学刊, 2023(4): 77-86.
- [21] 郭睿, 王竹, 裘知, 等. 台风—内涝灾变机制下人居营建的适应性策略: 基于浙江滨海平原的研究[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(6): 52-58.
- [22] 彭雄亮, 姜洪庆, 黄铎, 等. 粤港澳大湾区城市群适应台风气候的韧性空间策略[J]. 城市发展研究, 2019, 26(4): 55-62.
- [23] 乐清市人民政府. 乐清市水安全保障“十四五”规划[EB/OL]. 2023-10-25. [http://www.yueqing.gov.cn/art/2021/12/31/art\\_1229597093\\_4006343.html](http://www.yueqing.gov.cn/art/2021/12/31/art_1229597093_4006343.html).
- [24] 乐清市人民政府. 乐清市人民政府办公室关于印发《乐清市山洪灾害防御预案》的通知[EB/OL]. 2024-03-05. [https://www.yueqing.gov.cn/art/2022/6/9/art\\_1229145288\\_1999343.html](https://www.yueqing.gov.cn/art/2022/6/9/art_1229145288_1999343.html).
- [25] 潘海啸, 戴慎志, 赵燕菁, 等. “应对气候变化的城市韧性与空间规划”学术笔谈[J]. 城市规划学刊, 2021(5): 1-10.
- [26] 戴慎志, 刘婷婷, 高晓昱, 等. 国土空间防
- 灾减灾规划编制体系与实施机制[J]. 城市规划学刊, 2023(1): 48-53.
- [27] 郭睿, 王竹, 郑媛, 等. 嵌套视角下人居环境洪涝灾害适应的概念认知与营建策略[J]. 新建筑, 2022(6): 129-133.
- [28] 颜文涛, 任婕, 张尚武, 等. 上海韧性城市规划: 关键议题、总体框架和规划策略[J]. 城市规划学刊, 2022(3): 19-28.
- [29] 李尚鲁, 曾剑, 朱业, 等. 浙江台风风暴潮灾害: 1949-2020[M]. 北京: 海洋出版社, 2021.
- [30] 曹超, 蔡锋, 郑勇玲, 等. 中国近海海底地形特征及剖面类型分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 483-494.
- [31] 蔡锋. 中国近海海洋图集, 海底地形地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 2016.
- [32] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第6分册: 浙江省南部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [33] 夏若琪, 韩志远, 许婷. 乐清湾水动力及泥沙环境特征[J]. 水道港口, 2014(5): 503-508.
- [34] Wetlands Recovery Project. Bolsa Chica wetlands restoration[EB/OL]. 2023-12-06. <https://scwrp.org/projects/bolsa-chica-lowlands-restoration/>.
- [35] 陈联寿, 许映龙. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 3-10.
- [36] 娄小芬, 马昊, 黄旋旋, 等. 台风“利奇马”造成浙江极端降水的成因分析[J]. 气象科学, 2020, 40(1): 78-88.
- [37] 王凯, 李渊, 高丽, 等. 浙东地形对台风性质的影响: 以1909号台风“利奇马”为例[J]. 海洋预报, 2022, 39(1): 11-20.
- [38] 余贞寿, 冀春晓, 董美莹, 等. 浙江时间多尺度台风暴雨增幅特征的统计研究[J]. 气象, 2017, 43(12): 1496-1506.
- [39] 乐清市水利水电局. 乐清市水利志[M]. 南京: 河海大学出版社, 1994.
- [40] KNUTSON T R, MCBRIDE J L, CHAN J, et al. Tropical cyclones and climate change[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(3): 157-163.
- [41] PATRICOLA C M, WEHNER M F. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events[J]. Nature, 2018, 563(7731): 339-346.
- [42] WANG S, TOUMI R. Recent migration of tropical cyclones toward coasts[J]. Science (American Association for the Advancement of Science), 2021, 371(6528): 514-517.

修回: 2024-02