

应对雨洪挑战的城市滨水码头区蓝绿空间耦合设计研究

Green-Blue Spatial Coupling Design Research of Urban Docklands in Response to Flooding Challenge

汪洁琼^{1,2} 沈桐羽¹ 王 敏^{1,2*} 郭广钰¹
WANG Jieqiong^{1,2} SHEN Tongyu¹ WANG Min^{1,2*} GUO Guangyu¹

(1. 同济大学建筑与城市规划学院, 上海 200092; 2. 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室(同济大学) 水绿生态智能分实验中心, 上海 200092)

(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai, China, 200092; 2. ECO-SMART Lab Attached to Key Laboratory of Ecology and Energy-saving Study of Dense Habitat (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai, China, 200092)

文章编号: 1000-0283(2023)03-0047-08
DOI: 10. 12193 /j. laing. 2023. 03. 0047. 006
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-11-11
修回日期: 2023-01-26

摘 要

全球应对气候变化背景下, 雨洪挑战是城市韧性体系构建的核心议题。聚焦滨水码头区这类城市灰色基础设施, 提出蓝绿空间耦合优化对城市滨水码头区应对雨洪挑战起到积极作用。选取上海市黄浦江中北段典型滨水码头区开展实证研究, 构建适用于量化评价滨水码头区雨洪韧性水平的指标体系以及能表征场地尺度蓝绿空间耦合关系的指标, 旨在揭示影响滨水码头区雨洪韧性水平的蓝绿空间耦合关键指标。结果表明:(1) 上海黄浦江滨水码头区各典型样段现有雨洪韧性水平与蓝绿空间耦合程度分异较大;(2) 蓝绿耦合度(C)、蓝绿耦合发展协调度(D)是影响滨水码头区雨洪韧性水平的两项关键指标, 可综合考虑雨洪韧性与蓝绿耦合的协同提升。针对不同空间类型码头区, 总结归纳4种蓝绿耦合的空间优化模式, 为城市滨水码头区的雨洪韧性提升提供技术支撑, 从而实现城市滨水码头区从灰色基础设施向高品质蓝绿基础设施的转型。

关键词

滨水码头区; 雨洪韧性; 蓝绿耦合; 蓝绿基础设施; 灰色基础设施; 上海黄浦江

Abstract

In the context of the global response to climate change, stormwater is a critical issue that is challenging the construction of urban resilience systems. This paper focuses on the urban gray infrastructure of docklands and suggests that coupled blue-green spatial optimization can play a positive role in solving stormwater challenges in urban waterfront docklands. Several typical docklands located in the north-central section of the Huangpu River in Shanghai are selected as the case study. An index system is set up to quantitatively evaluate different levels of stormwater resilience of the docklands. The indicators that can characterize the relationships between the blue-green spatial coupling of different docklands at the site scale are also established. This paper aims to reveal key blue-green spatial coupling indicators that affect the level of stormwater resilience of the waterfront dock area. The results show that: (1) The existing stormwater resilience levels and the degrees of blue-green spatial coupling have spatial disparity in typical docklands along Huangpu River in Shanghai; (2) The blue-green coupling degree (C) and the blue-green coupling development coordination degree (D) are two key indicators affecting the stormwater resilience levels of the dock areas, and therefore the synergistic enhancement of stormwater resilience and blue-green coupling can be considered comprehensively. In terms of different spatial types of docklands, the paper summarizes four spatial optimization modes of blue-green coupling, which provide technical support for improving the stormwater resilience of urban waterfront wharf areas, and for realizing the transformation of urban docklands from gray infrastructure to high-quality blue-green infrastructure.

Keywords

docklands; flooding resilience; blue-green spatial coupling; blue-green infrastructure; grey infrastructure; Huangpu River in Shanghai

汪洁琼

1981年生/女/上海人/博士/副教授、博士生导师/同济大学建筑与城市规划学院建成环境技术中心副主任, 高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室(同济大学) 水绿生态智能分实验中心联合创始人/自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心成员/研究方向为水绿生态智能、景观生态规划与设计、水生态、城市生态修复工程技术与设计

沈桐羽

1998年生/女/吉林白山人/在读硕士研究生/研究方向为数字景观与工程技术

王 敏

1975年生/女/福建福州人/博士/景观学系副系主任、副教授、博士生导师/高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室(同济大学) 水绿生态智能分实验中心联合创始人/研究方向为水绿空间生态系统服务、城市绿地与生态规划设计、韧性景观与城市可持续

基金项目:

国家自然科学基金项目“基于多重价值协同的城市绿地空间格局优化机制: 以上海大都市圈为例”(编号: 52178053); 上海科委重点研发项目“基于生物多样性的城市困难立地高质量园林绿化智能技术及示范”(编号: 22dz1202200)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: wmin@tongji.edu.cn

当代中国的城市基础设施 (Urban Infrastructure) 在建设量与建造速度上居于世界领先地位，却亟需灰色基础设施向高品质、绿色低碳的转型，也亟需其与城市公共空间的兼容与共享。在气候变化全球应对的背景下，如何让城市灰色基础设施 (Urban Grey Infrastructure) 转型为更生态、绿色、高效的城市绿色基础设施 (Urban Green Infrastructure) 或城市蓝绿基础设施 (Urban Blue-green Infrastructure)，提升其与公共空间的融合效应，是实现城市绿色可持续发展、韧性水平提升、空间功能复合的有效途径，其中提升城市雨洪韧性水平是灰色基础设施转型最重要的目标之一。当前有越来越多的学者关注城市雨洪韧性^[1]：Balica^[2]、Mugume^[3]及Neumann^[4]等都结合城市韧性提出了雨洪预测模型；颜文涛等^[5]通过分析城市韧性的系统构成提出整合防灾减灾的韧性城市建设框架，并以上海为例构建出韧性城市规划的总体框架和指标体系；胡岳^[6]将韧性理论融入城市水系统规划，提出水利设施建设应与城市景观设施结合，将“灾害抵抗”转为“调合共生”；申佳可、王云才^[7]则提出构建城市社会生态系统内部各部分的韧性，是实现宏观尺度下城市韧性的微观途径。

自19世纪中叶，黄浦江沿岸曾是上海近现代工业生产和贸易的重要区域，改革开放后，黄浦江沿岸经历了一系列后工业改造和城市更新^[8]，但码头区一直承担着沟通两岸的交通运输功能，属于典型的灰色基础设施，是滨水区的重要组成部分^[9]。当前绝大多数的城市滨水码头区仅仅承担交通运输和人流集散功能，相关研究也集中于传统的工业生产、交通运输、配套设施等功能性问题，或是工业遗迹、城市记忆等议题。码头区在水陆空间之间的连接作用具有不可替代性，但其普遍存在蓝绿空间割裂、硬化化、滨岸带下渗

能力不足等一系列问题。保障码头区在雨洪全过程中的功能空间，发掘其应对城市雨洪挑战的潜力具有必要性和迫切性。伴随着城市更新过程中公共空间新一轮的重塑，滨水码头区也面临着功能、结构、空间形态的提升改造，研究提出从蓝绿空间耦合的角度提升城市滨水码头区的雨洪韧性水平，将其从以往单一的交通运输功能转变为绿色低碳、开放共享的滨水空间，从而实现滨水码头区灰色基础设施与绿色基础设施的协同共生^[10]。

蓝绿空间 (Blue-green Space) 即蓝色空间与绿色空间的合称，相较于传统的滨水景观概念，蓝绿空间的定义更强调复杂系统。滨水蓝绿空间由水体、绿地、驳岸、道路、建筑等存在内在耦合关系的多元系统所组成，对于其耦合效应及耦合协调发展度的评价研究十分必要。在蓝绿空间现有的研究中，多从国土空间规划的宏观视角或城市设计的中观层面切入，例如王世福等^[11]从自然、社会、城市三者互动的视角切入，提出全域蓝绿空间网络构建以及实施路径；黄铎等^[12]基于生态系统服务体系提出蓝绿空间耦合框架，并建立与国土空间规划体系相对应的多尺度蓝绿空间规划设计体系与空间模式。此外，也有学者将蓝绿空间与城市韧性结合进行研究：例如周天庆^[13]以成都市为例，探索基于蓝绿空间建设的城市雨洪安全系统构建；栗玉鸿等^[14]从海绵城市建设角度提出推进蓝绿灰基础设施结合，系统构建雨洪韧性城市体系框架；禹佳宁等^[15]探讨分析蓝绿景观格局与雨洪调蓄功能之间的响应关系；陈竞姝^[16]则从韧性河流的角度，构建以蓝绿空间为整体的河流廊道韧性框架。

鉴于此，研究从场地尺度的蓝绿空间耦合的角度，聚焦城市滨水码头区，重点瞄准提升雨洪韧性水平的蓝绿空间耦合关键指标

及其设计优化模式。选取上海市黄浦江中北段典型的滨水码头区进行实证研究，构建适用于量化评价滨水码头区雨洪韧性水平的指标体系，以及能表征场地尺度蓝绿空间耦合关系的指标，旨在揭示影响滨水码头区雨洪韧性水平的蓝绿空间耦合关键指标，归纳总结蓝绿耦合的空间优化模式，从而实现城市滨水码头区从灰色基础设施向高品质蓝绿基础设施的转型。

1 研究对象与数据采集

考虑到不同滨水码头区的规模和功能差异^[17]，研究选取位于上海市黄浦江中北段的临江路码头、嫩江路码头、定海桥码头、宁国路码头、丹东路码头、秦皇岛路码头共6个轮渡码头区作为研究对象。搜集研究范围的文献资料、高精度卫星遥感影像，结合实地调研观测所得数据进行整合。研究区域选取原则：(1) 以各个轮渡码头为中心，选取6处样段作为研究区域；(2) 设置各样段的岸线长度为1 km，根据码头的规模差异与同道路的距离不同，设置样段宽度为400 ~ 500 m不等，由此得到6个研究样段，总面积约3.0 km²，岸线总长度约6.0 km (图1)。其中嫩江路码头的整体蓝绿空间现状最优，码头两侧为共青森林公园，有较高的绿化率；宁国路、丹东路、秦皇岛路码头区与滨江公共空间相连，现状蓝绿空间良好；定海桥码头两侧的滨江空间较小，蓝绿空间面积占比有待提升；临江路码头位置偏僻，且周围以公用厂区为主，缺乏蓝绿空间。

2 研究方法

2.1 研究路径

研究路径与步骤：(1) 通过文献资料梳理与AHP法，构建适用于量化评价滨水码头

区雨洪韧性水平的指标体系；(2) 通过文献梳理选取能表征场地尺度蓝绿空间耦合关系的指标，结合实地调研与卫星遥感影像所获的数据量化样段；(3) 发现影响滨水码头区雨洪韧性水平的蓝绿空间耦合关键指标；(4) 归纳总结出提升滨江码头区雨洪韧性水平的蓝绿耦合优化模式。

2.2 城市滨水码头区雨洪韧性评价

在已有城市雨洪韧性相关文献爬梳的基础上，研究构建了能较为准确、完整反映滨水码头区雨洪韧性水平的评价指标体系（表1）。将整个指标体系分为4个层次：目标层A、准则层B、准则层C和指标层D。A是对滨水码头区雨洪韧性体系的高度概括；B分为三个维度：环境支撑B1、空间可变B2和风险管理B3^[7]。B1作为自然资源背景，是滨水码头区雨洪韧性存在的基础与先决条件；B2则是滨水码头区雨洪韧性实施的途径，码头区的空间结构与功能建设是相辅相成的，需要具备整体性、多样化的特质以更好地应对雨洪挑战；B3更多地强调建成后的人为保障因素，是社会生态系统雨洪韧性的绩效表现^[7]。在此基础上，研究构建了包含20个能够反映滨水码头区雨洪韧性的指标（D1-D20），确保指标体系整体结构清晰、意义明确^[18-19]。

目前对城市滨水码头区雨洪韧性的评价尚无统一标准，不同区域、不同类型、不同开发利用程度，都会影响其评价标准的统一，因此结合当前黄浦江各滨水码头区开发利用的实际情况，将码头区雨洪韧性分为优、良、中、差4个级别。对难以准确定量的指标，通过专家咨询、实地调查等方式进行评判。定量指标则借鉴有关历史资料、科研成果等对比分析确定，码头区雨洪韧性评价指标分级标准见表1。按照层次分析法

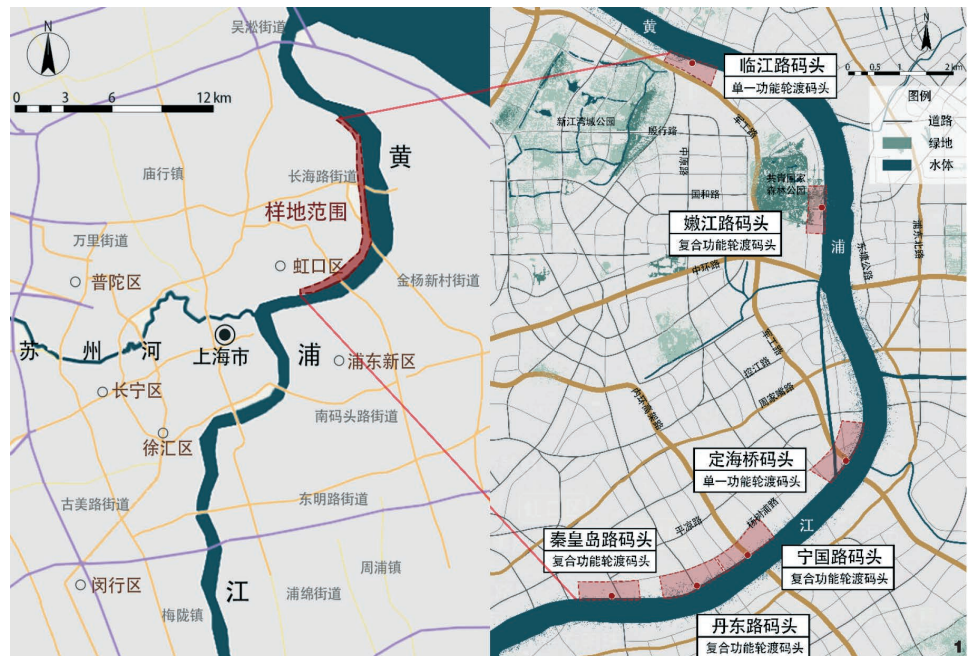


图1 研究对象区位及样段分布图
Fig. 1 Location of the study area and sample sections distribution

(AHP) 相关计算要求构造判断矩阵并验证，得出各评价指标的权重。B的权重比大致为6:3:1，即三个维度对雨洪韧性的影响程度为环境支撑(B1) > 空间可变(B2) > 风险管理(B3)。基于此，采用综合评价指数E得出雨洪韧性评价价值，计算见公式(1)。

$$E = \sum_{i=1}^m \lambda_i \sum_{j=1}^n \lambda_j M_{ij} \quad (1)$$

式中， λ_i 为第*i*个准则层的权重； λ_j 为某准则层选取的第*j*个指标在该准则层所占的权重； M_{ij} 为第*i*个准则层中选取的第*j*个指标评分值；*m*为准则层个数；*n*为指标个数。根据统计数据，对各样段进行定量评价，最终得到各样段雨洪韧性评价结果。

2.3 滨水码头区蓝绿空间关系与耦合的量化表征

在蓝绿空间与蓝绿耦合相关文献梳理的基础上，研究选取滨水绿地平均宽度、蓝绿

面积比、水生植物长度占比、蓝绿空间占比、蓝绿融合度、蓝绿耦合度及蓝绿耦合协调发展度共7个指标，量化表征各码头区样段的蓝绿空间关系及耦合关系（表2）。

2.4 数理统计分析

研究运用SPSS等数据分析软件平台，通过相关性分析滨水码头区蓝绿空间关系因子及耦合指标与雨洪韧性评价价值之间的关系，在此基础上提出滨水码头区蓝绿耦合优化模式，提升城市雨洪韧性。

3 研究结果

3.1 滨水码头区雨洪韧性总体评价结果

黄浦江滨水码头区各样段的雨洪韧性各维度及综合评价结果如表3。各滨水码头区的雨洪韧性综合评价指数整体分为三个梯度，其中临江路码头区综合评价指数最低

表1 上海市黄浦江滨水码头区韧性评价指标体系与分级标准
Tab. 1 Resilience evaluation and indicators' grading criteria of Huangpu River Docklands in Shanghai

目标层A Objective A	准则层B/权重 Indicator B/ weight	准则层C/权重 Indicator C/ weight	指标层D Indicator D	指标内涵与测算 Meaning and measurement of indicators	优 Excellent	良 Good	中 Medium	差 Poor
城市滨水 码头区雨 洪韧性评 价指标	环境支撑 B1/0.6	灰色基础设施 C1/0.83	护岸类型D1	选区内滨水带采取的主要护岸形式	近自然型	抛石、土坡低挡墙、混凝土栅格植被	堆石、浆砌石块、干砌石块	混凝土
			水岸梯度处理D2	选区内滨水带分级梯度层数	无挡土墙型	特殊结构型	两级挡墙型	单级挡墙型
			码头设施完善度D3	轮渡码头配套设施情况	完善	较完善	一般	较缺乏及以下
		绿色基础设施 C2/0.17	绿化覆盖率D4/%	选区内全部绿化覆盖面积与选区总面积比例	≥70	[40, 70)	(15, 40)	≤15
			海绵设施占比D5/%	绿地中海绵设施所占比例	≥60	[30, 60)	(10, 30)	≤10
			绿化形式类型占比D6	乔灌木复层结构复杂程度	>75%乔木覆盖	(50%~75%)乔木覆盖; 或>25%灌木+(25%~50%)乔木覆盖	<50%乔木覆盖; (10%~25%)灌木覆盖	<10%乔木或灌木覆盖
	空间可变 B2/0.3	多功能性 C3/0.72	活动设施类型D7/类	选区空间内活动设施类型	4	3	2	1
			平均停留时间D8/min	人进入选区到离开该地所度过的平均时间	>30	(20, 30]	(10, 20]	[0, 10]
			公共空间开放程度D9	开放给公众使用的公共活动区域规模大小	大	较大	中等	小
			空间冗余度D10	地块内不同梯级场地功能相似度	高	较高	一般	低
		空间可达性 C4/0.28	交通方式多样D11	滨水交通方式(步行、骑行、无障碍三种类型)的存在种类	3种	2种	1种	无
			道路环通度D12	反映道路网的通达性与结构合理性	高	较高	一般	低
	风险管理 B3/0.1	监测预警能力 C5/0.71	亲水度D13	滨水岸线可达程度	便于到达;视线通透	可以到达;视线通透	不可到达;视线通透	不可到达;视线阻碍
			水位监测能力D14	相关部门对于汛期预警反应能力	完善	较完善	一般	较缺乏及以下
			防洪工程抵御力D15	市政、防洪工程结构抵御雨洪能力	高	较高	一般	低
		抢险救灾能力 C6/0.18	物资保障能力D16	选区内相关部门应急储备能力	完善	较完善	一般	较缺乏及以下
			组织管理能力D17	堤防巡查管理人员存在度	出入口、滨水空间均有巡查管理人员	出入口处有管理人员	有管理设施(监控、广播等)	无组织管理
			洪水适应力D18	堤防设施完善度、疏水排水系统完善度	完善	较完善	一般	较缺乏及以下
		科普宣教能力 C7/0.11	安全标识设置D19	选区内对雨洪提醒的标识存在度	滨水空间、堤坝上均有较多安全标识	堤坝有明显安全标识	安全标识不明显	缺乏安全标识
			科普宣传建设D20	指示牌、宣传标语等警示设施存在度	有科普宣传设施或宣传人员	有明显相关指示牌	科普指示牌不明显	无科普宣传建设

注:(1) 优、良、中、差4个等级分别对应归一化赋分值区间9~10、8~8.9、6~7.9、0~5.9;
(2) 对于定性指标, 优、良、中、差4个等级对应的归一化赋分值分别为9.5、8.5、7.0、4.0。

表2 滨水蓝绿空间关系表征指标
Tab. 2 Indicators for the representation of Blue-Green spatial relationships along the waterfront

指标名称 Indicator name	指标含义 Indicator meaning	计算公式 Formula	计算说明 Calculation illustration	取值范围 Range	数据来源 Data source
蓝绿空间 关系	滨水绿地平均宽度 (AW)	$AW=A_{wg}/L_w$	A_{wg} 为研究单元 <i>i</i> 中与水体相邻的绿地面积 (m ²) ; L_w 为研究样方相邻水体长度 (m)	不限	遥感数据+现场观测
	蓝绿面积比 (AR)	$AR=a_g/A_w$	a_g 为空间单元 <i>i</i> 中绿地斑块的总面积 (m ²) ; A_w 为研究样方 <i>i</i> 相邻水体总面积 (m ²)	0~1	遥感数据
	水生植物长度占比 (L)	$L=L_{gw}/L_w$	L_{gw} 为研究单元 <i>i</i> 中沿岸水生植物的长度 (m) ; L_w 为研究样方相邻水体长度 (m)	0~1	遥感数据+现场观测
	蓝绿空间占比 (WG)	$WG=A_m/A$	A_m 为研究单元 <i>i</i> 中蓝绿空间总面积 (m ²) ; A 为研究样方 <i>i</i> 总面积 (m ²)	0~1	遥感数据
	蓝绿融合度 (ID)	$ID=A_{wg}/A$	A_w 为研究单元 <i>i</i> 中与水体相邻的绿地面积 (m ²) ; A 为研究样方 <i>i</i> 总面积 (m ²)	0~1	遥感数据
蓝绿耦合度 (C)	蓝绿空间之间的耦合情况	$C=2\sqrt{(U_1U_2)}/(U_1+U_2)$	U_1 、 U_2 分别为表征蓝绿空间子系统的值, 即蓝绿融合度与蓝绿空间占比	0~1	—
蓝绿耦合协调发展度 (D)	蓝绿空间两系统之间的耦合协调等级	$D=\sqrt{(C*T)}$	协调度 $T=\alpha*U_1+\beta*U_2$, 本研究采用蓝绿空间复合视角, 因此 $\alpha=\beta$ 取值0.5 ^[20]	0~1	—

表3 上海市黄浦江码头区雨洪韧性评价结果
Tab. 3 Stormwater resilience assessment results of Huangpu River Docklands in Shanghai

样段名称 Sample name	环境支撑B1 Environment support B1	空间可变B2 Space feasibility B2	风险管理B3 Risk management B3	综合评价指数 Comprehensive evaluation score
临江路码头区	3.02	1.57	0.92	5.51
嫩江路码头区	4.49	2.55	0.84	7.88
定海桥码头区	4.20	1.73	0.83	6.77
宁国路码头区	3.44	2.51	0.85	6.80
丹东路码头区	4.01	2.64	0.85	7.50
秦皇岛路码头区	3.77	2.61	0.85	7.22

为5.51分, 主要原因在于权重占比较大的环境支撑与空间可变的相关指标均得分较低; 其次为定海桥和宁国路码头区, 得分均在6.5~7.0之间, 该样段的滨水空间普遍为民用或工厂建筑, 蓝绿基础设施有待提升。综合评价指数在7.0以上的有三处, 其中得分最高的为嫩江路码头区, 该码头与共青森林公园相邻, 对提升该段的雨洪韧性有显著作用。另外两处码头则由于空间可变维度的得分较高, 对雨洪韧性的提升起到较大作用。

3.2 滨水码头区雨洪韧性三大维度分析

为了进一步研究各个指标对雨洪韧性评

价结果的影响, 从三大维度的角度切入, 将各指标的归一化得分比与叠加权重的综合指标值进行比较分析 (图2)^[21]。(1) 环境支撑维度整体权重值最高, 对评价结果的影响最大。从该维度指标得分来看, 临江路码头区的得分明显低于其他选段, 而与共青森林公园相邻的嫩江路码头得分最高。(2) 在空间可变维度上, 临江路与定海桥码头区的各指标得分分布较为相近。(3) 在风险管理维度上, 临江路码头区设有防汛台与物资仓库, 因而得分较高, 但由于该维度的权重占比最低, 即对雨洪韧性的整体评价结果影响最小, 指标评分差距较小。

3.3 滨水码头区蓝绿空间耦合关系结果

黄浦江滨水码头区各样段的蓝绿空间指标结果如表4。嫩江路码头区各项指标的得分均为最高, 蓝绿耦合度为0.93, 协调发展度为0.81, 根据协调等级及协调发展度的划分标准^[20], 嫩江路码头区的蓝绿耦合为良好协调。临江路码头区的蓝绿耦合协调发展度为0.34, 为轻度失调; 定海桥码头区的蓝绿耦合协调发展度为0.42, 为濒临失调; 宁国路、丹东路、秦皇岛路码头区的蓝绿耦合协调发展度分别为0.54、0.54和0.53, 为勉强协调。

3.4 影响雨洪韧性水平的蓝绿空间关键指标

运用SPSS进行数值分析, 将蓝绿空间关系表征指标、蓝绿耦合度及蓝绿耦合协调发展度与雨洪韧性综合评价值进行相关分析。结果表明: 蓝绿耦合度和雨洪韧性评价值之间的相关系数值为0.924, 并且呈现出0.01水平的显著性, 蓝绿耦合发展协调度和雨洪韧性评价值之间的相关系数值为0.853, 并且呈

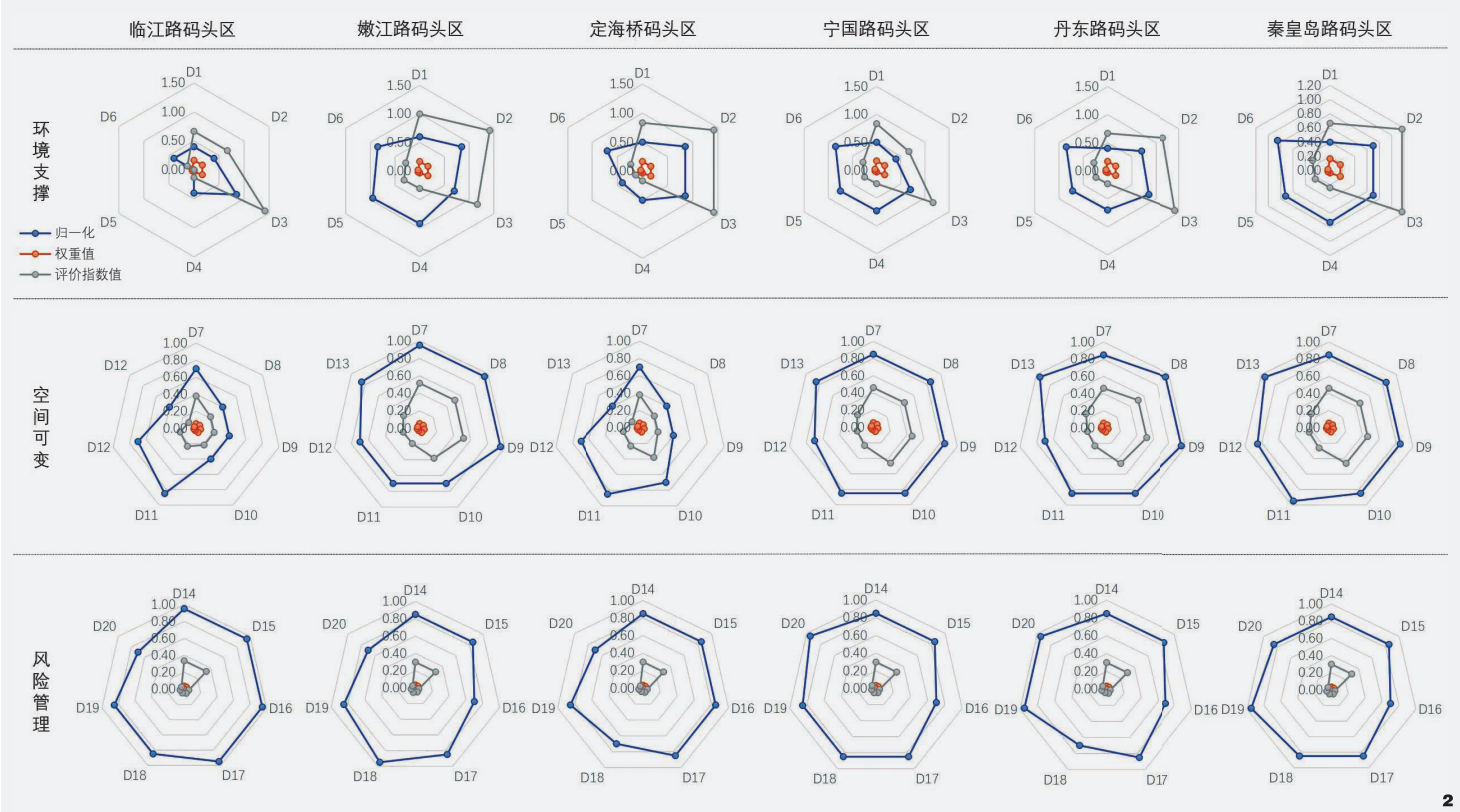


图2 上海市黄浦江各选段雨洪韧性三大维度指标归一化及综合评价结果
Fig. 2 Normalised and integrated evaluation results of the three dimensions of rainfall resilience for each section of Huangpu River Docklands in Shanghai

表4 上海市黄浦江滨江码头区蓝绿空间耦合关系结果
Tab. 4 Blue-Green spatial relationship indicator results of Huangpu River Docklands in Shanghai

样段名称 Sample name	滨水绿地平均宽度 (AW) Average width of waterfront green space	蓝绿面积比 (AR) Area ratio of green and blue space	水生植物长度占比 (L) Length percentage of riparian vegetation	蓝绿空间占比 (WG) Percentage of green and blue spaces	蓝绿融合度 (ID) Integration degree of green and blue spaces	蓝绿耦合度 (C) Coupling degree of green and blue spaces	蓝绿耦合协调发展度 (D) Coordination de- gree of green and blue spaces
临江路码头区	11.96	0.66	0	0.38	0.04	0.57	0.34
嫩江路码头区	173.40	2.84	0.50	0.95	0.45	0.93	0.81
定海桥码头区	37.13	1.71	0.15	0.48	0.06	0.64	0.42
宁国路码头区	68.22	3.01	0	0.60	0.14	0.78	0.54
丹东路码头区	88.28	2.77	0	0.54	0.16	0.84	0.54
秦皇岛路码头区	62.19	3.05	0	0.60	0.13	0.78	0.53

现出0.05水平的显著性，因而说明蓝绿耦合度、蓝绿耦合协调发展度和雨洪韧性评价价值之间均有着显著的正相关关系，表明在可以综合考虑雨洪韧性与蓝绿耦合的协同提升。根据以上综合数值分析，可以将蓝绿耦合与

雨洪韧性的协同提升划分为两种途径：一是通过增加滨水绿地平均宽度、水生植物长度占比、蓝绿空间占比等方式，提升环境支撑维度以实现雨洪韧性的协同优化，这种途径适用于现状蓝绿空间有待提升的区域，应用

范围较广，具体需要根据码头区的功能类型及周边环境设计具体措施；二是通过蓝绿面积比、蓝绿融合度等蓝绿耦合指标的控制与规划，从空间可变的维度协同提升码头区的雨洪韧性，适用于现状环境条件较好、自然

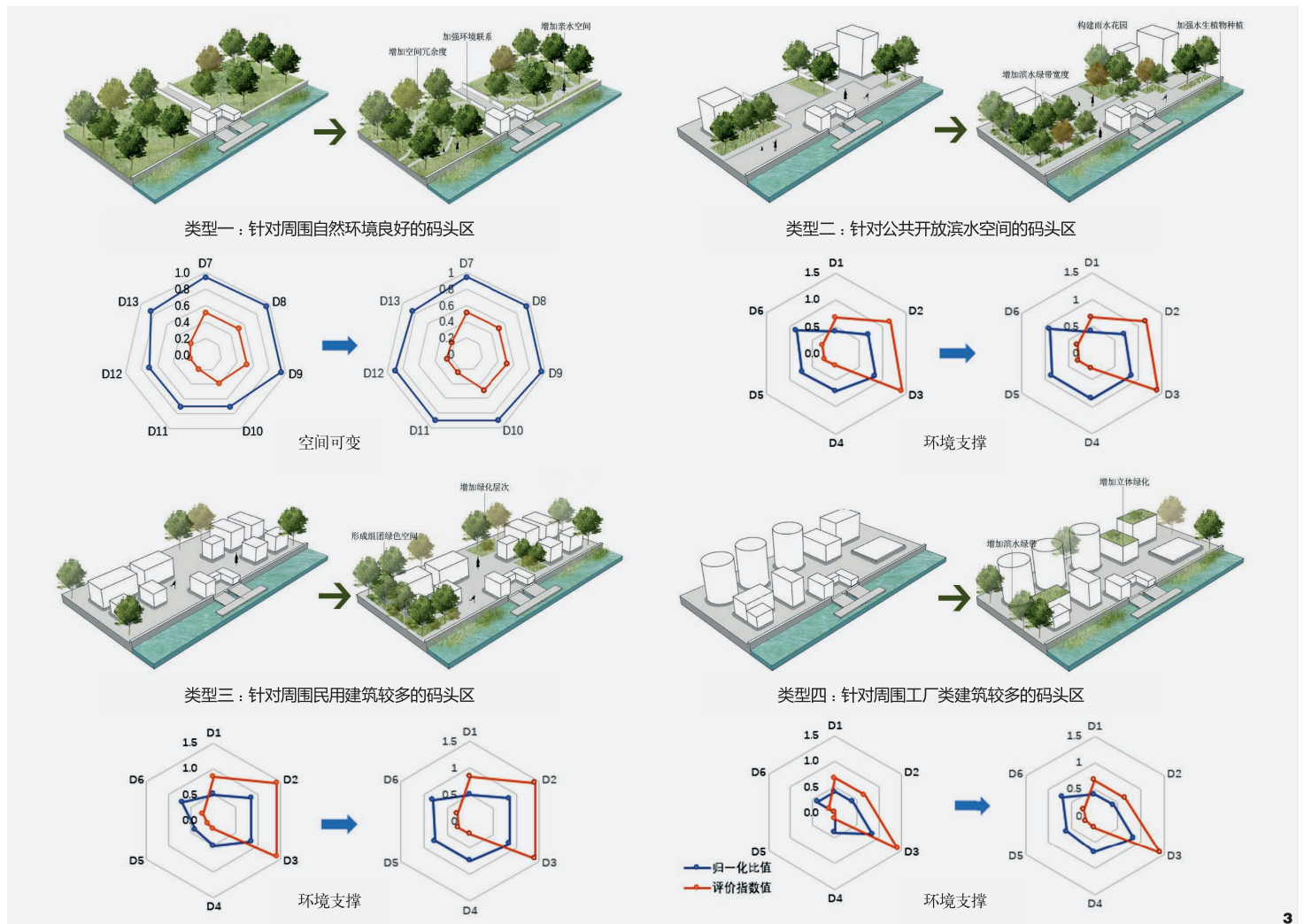


图3 不同类型码头区蓝绿耦合优化模式
Fig. 3 Optimization model for Blue-Green coupling in different types of docklands

资源丰富，但空间结构相对简单、空间多样性有待提升的码头区。

4 讨论

滨水码头区作为城市滨水空间的重要组成部分，将灰色基础设施与生态绿色基础设施协同整合，进而成为一体化的景观基础设施十分重要^[22]。上述分析结果表明，各码头区的雨洪韧性与蓝绿耦合评价价值相差较大，蓝绿耦合关系与雨洪韧性评价之间存在显著

的正相关关系，因而通过滨水码头区的蓝绿空间耦合设计以提升雨洪韧性是可能并且高效的。但鉴于不同位置、不同类型码头区的空间和功能需求，滨水空间景观提升优化的路径与方法不能一概而论。研究归纳了4种针对不同空间类型码头区的蓝绿耦合优化模式（图4），为城市滨水码头区的蓝绿耦合设计提供策略。

类型一：针对周围自然环境良好的码头区（如嫩江路码头区）。该类型多建于远郊，

总体蓝绿空间占比较大，绿色基础设施丰富或潜力巨大，码头客流量较小，雨洪韧性与蓝绿耦合评价均为优良。该类码头区主要考虑的是对现有自然生态环境的保护，尽可能降低码头作为灰色基础设施对自然环境的影响，但不能阻断码头与环境之间的联系，应当将码头的建设与环境进行适当融合，通过空间结构的规划设计控制码头区的蓝绿面积比及蓝绿融合度，同时增强交通功能，例如在码头附近增加森林公园出入口等，作为公

共区域，为游人提供滨水活动空间，侧重于从空间可变的维度提升雨洪韧性。

类型二：针对公共开放滨水空间的码头区（如宁国路、丹东路、秦皇岛路码头区）。该类型码头区与自然环境相比仍有较大差距和提升空间，特点在于流量大，具备除轮渡之外的观光游览功能。因此在环境支撑维度具有较大提升改造的可能性。首先在滨水活动空间部分可以增加绿化带宽度，为游人提供足够遮阴空间的同时增加滨水绿地平均宽度；部分区域可以建设较大规模的海绵绿地、雨水花园等绿色基础设施，增加码头区的蓝绿空间占比，在满足游憩需求的同时，实现滨水码头区雨洪韧性与蓝绿耦合的协同提升。

类型三：针对周围民用建筑较多的码头区（如定海桥码头区）。该类型位于市区内，雨洪韧性与蓝绿耦合评价有待提升。周边建筑数量大但多为民用，现有一定绿化基础可以作为半公共空间进行适当改造。因此在增加滨水绿地宽度、水生植物长度占比的同时可以结合乔灌木以丰富绿化层次，形成组团式绿色空间分布，从环境支撑的维度，如设施完善度、绿化覆盖率、海绵设施以及绿化形式等方面提高雨洪韧性。

类型四：针对周围工厂类建筑较多的码头区（如临江路码头区）。该类码头区的雨洪韧性及蓝绿耦合的得分往往最低，周边多是具有特定功能的空间，绿化薄弱。考虑到工业、企业场地的特定功能可能需要较大的硬质空间，可以结合屋顶花园、立体绿化并采用散点式种植的方法以增加码头区的绿色空间，同时将水生植物纳入考量，即增加蓝绿空间占比、水生植物长度以及滨水绿地平均宽度，从环境支撑的维度实现该类码头区雨洪韧性与蓝绿耦合的协同提升。

5 结论

研究聚焦城市滨水码头区这类城市灰色基础设施，提出通过蓝绿空间耦合优化能对码头区的雨洪韧性水平的提升起到积极作用，选取上海市黄浦江中北段典型的滨水码头区开展实证研究，构建了适用于量化评价黄浦江滨水码头区雨洪韧性水平的指标体系，选取了能表征场地尺度蓝绿空间耦合关系的指标，揭示了上海黄浦江滨水码头区各典型样段现有雨洪韧性水平与蓝绿空间耦合程度分异较大；发现了蓝绿耦合度、蓝绿耦合协调发展度是影响滨水码头区雨洪韧性水平的两项关键指标，因此提出可综合考虑雨洪韧性与蓝绿空间耦合进行协同提升，共同作用实现灰色基础设施向高品质蓝绿基础设施的转型，并归纳总结了4种针对不同空间类型码头区的蓝绿耦合优化模式。现场调研期间因受到新冠疫情防控等诸多因素的影响，研究未能在黄浦江全段以及不同城市的滨水码头区展开研究，需要在未来的研究中进一步补充完善，但本研究的结论为实现城市滨水码头区从灰色基础设施向高品质蓝绿基础设施的转型提供了一定的理论依据与技术支持。

注：文中图表均由作者自绘/自制。

参考文献

[1] SALINAS R C N A, ASHLEY R, GERSONIUS B, et al. Incorporation and Application of Resilience in the Context of Water: Sensitive Urban Design: Linking European and Australian perspectives[J]. WIREs Water, 2014, 1(2): 173-186.

[2] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN D M F. A Flood Vulnerability Index for Coastal Cities and Its Use in Assessing Climate Change Impacts[J]. Natural Hazards, 2012, 64(1): 73-105.

[3] MUGUME S N, GOMEZO 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.

[4] NEUMANN B, VAFEIDIS A T, ZIMMERMANN J, et al. Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding: A Global Assessment[J]. Plos One, 2015, 10(3): e0118571.

[5] 颜文涛, 任捷, 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(03): 19-28.

[6] 胡岳. 韧性城市视角下城市水系统规划应用与研究[C]//规划60年: 成就与挑战——2016中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划), 2016: 214-222.

[7] 申佳可, 王云才. 韧性城市社区规划设计的3个维度[J]. 风景园林, 2018, 25(12): 65-69.

[8] 章明, 鞠曦, 张姿. “八合一”理念下城市滨水空间营造的六个维度[J]. 中国园林, 2022, 38(5): 31-38.

[9] 汪洁琼, 陈俊廷, 王蓉蓉. 城市滨水空间秋叶植物多样性与景观偏好的相关性研究——以上海黄浦江为例[J]. 园林, 2022, 39(3): 104-112.

[10] 汪洁琼, 李心蕊, 王敏, 等. 基于水鸟栖息地保育的城市滨水生境网络构建与优化策略: 以昆山市为例[J]. 风景园林, 2021, 28(6): 76-81.

[11] 王世福, 刘联璧. 从廊道到全域——绿色城市设计引领下的城乡蓝绿空间网络构建[J]. 风景园林, 2021, 28(08): 45-50.

[12] 黄铎, 易芳蓉, 汪思哲, 等. 国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究[J]. 城市规划, 2022, 46(1): 18-31.

[13] 周天庆. 基于蓝绿空间建设的城市雨洪安全系统构建——以成都市东部新城为例[C]//面向高质量发展的空间治理——2020中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划), 2021: 659-668.

[14] 栗玉鸿, 邹亮, 李利, 等. 推动海绵城市建设系统提升城市雨洪韧性[J]. 西部人居环境学刊, 2022, 37(01): 22-26.

[15] 禹佳宁, 周燕, 王雪原, 等. 城市蓝绿景观格局对雨洪调蓄功能的影响[J]. 风景园林, 2021, 28(9): 63-67.

[16] 陈竞姝. 韧性城市理论下河流蓝绿空间融合策略研究[J]. 规划师, 2020, 36(14): 5-10.

[17] 陈可心. 黄浦江轮渡码头配套设施评估[J]. 交通与运输, 2020(S1 vo 33): 262-266.

[18] 余轩. 韧性城市理念下豫北地区雨洪适应性城市水系规划设计研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.

[19] 左俊杰, 蔡永立, 罗坤, 等. 上海地区河岸带结构: 类型、分布及改进[J]. 水资源保护, 2009, 25(06): 24-28.

[20] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(03): 793-810.

[21] 汪洁琼, 彭唤雨, 卓承学, 等. 海绵社区生态服务综合效能的雷达图表评价模型: 墨尔本斯坦福社区的实证研究[J]. 中国城市林业, 2016, 14(04): 28-33.

[22] 翟俊. 协同共生: 从市政的灰色基础设施、生态的绿色基础设施到一体化的景观基础设施[J]. 规划师, 2012, 28(09): 71-74.