

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.16.007

# 海绵城市规划中融合蓝绿灰设施的技术方法研究

唐磊, 芮文武, 张锦森, 徐丽丽, 赵亚君, 卢静  
(中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

**摘要:** 在推进海绵城市建设过程中,如何因地制宜地科学构建蓝绿灰设施相融合的海绵城市工程体系,提升海绵城市建设的系统性、科学性和建设成效,成为当前许多城市面临的关键问题。以玉树市海绵城市建设规划为例,介绍了蓝绿灰设施相融合的技术方法和实施路径,包括通过“适地宜种,增灌护坡”提升流域大海绵系统滞蓄净化雨水功能,完善“上蓄下排,蓝绿融合”的山洪防治体系,构建“优化竖向,蓄排结合”的排水防涝体系,建设“自然组织,彰显特色”的源头地块海绵设施体系,最后通过“方案比选,模拟评估”做好项目的科学统筹,以实现提升流域水源涵养能力、降低城区山洪内涝威胁、改善城市人居环境及彰显民族特色风貌等海绵城市建设目标。

**关键词:** 海绵城市; 防洪排涝; 蓝绿灰设施

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)16-0042-06

## Research on the Technological Methods of Integrating Blue, Green and Gray Facilities in Sponge City Planning

TANG Lei, RUI Wen-wu, ZHANG Jin-sen, XU Li-li, ZHAO Ya-jun, LU Jing  
(China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In the process of promoting the construction of sponge city, addressing the strategic challenge of how to scientifically create a sponge city engineering system that integrates blue, green, and gray facilities tailored to local conditions, to enhance the systematic, scientific, and construction efficiency of sponge city initiatives, has emerged as a significant issue for many cities in China. Using the construction planning of Yushu City's sponge city as a case study, this paper presents the technological methods and implementation strategies for integrating blue, green and gray facilities. These methods include enhancing the function of the large sponge system in the basin to store and purification through measures such as “strategic planning, increased irrigation, and slope protection”, improving the mountain torrent control system with “upstream regulation and downstream discharge, blue-green integration”, “optimizing vertical drainage system and combining storage and discharge” to prevent waterlogging, constructing source land sponge facilities with “natural organization and distinct attributes”, and concluding with comprehensive project planning through “comparing multiple schemes and model simulation evaluation”. The ultimate goals of sponge city construction, including enhancing river basin water conservation capacity, mitigating urban flash floods and waterlogging risks, improving urban living environments, showcasing national characteristics, are achieved through this approach.

**Key words:** sponge city; flood control and waterlogging prevention; blue, green, gray facilities

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001400)

根据海绵城市的内涵和特征,海绵设施可分为蓝色、绿色和灰色设施,蓝色设施指承担雨水行泄和调蓄功能的城市河湖水系等蓝色空间,绿色设施指城市自然生态空间和拟自然方式的生态措施,灰色设施包括城市排水管渠、泵站、调蓄池及深隧等工程设施。近年来,“绿色基础设施”理念被广泛用于美国城市雨洪管理领域,并且将绿色设施与灰色设施相结合的做法展现出更显著的综合效益,以纽约市合流制溢流控制规划为例,采用传统灰色设施的方案需要投入68亿美元,而采用必要的灰色设施加绿色设施的方案可节约15亿美元<sup>[1]</sup>。在国内,通过“灰绿结合”方式实现城市内涝防治和径流污染控制已成为共识;“蓝绿空间融合”也成为海绵城市建设的重要技术思路,并进行了大量研究实践,包括国土空间规划中蓝绿空间格局保护和网络体系构建,水系规划中蓝绿空间营建和滨水岸线设计管控,以及景观设计中将海绵设施的功能性和景观设计的美观性相结合<sup>[2]</sup>。

2022年4月住房和城乡建设部印发《关于进一步明确海绵城市建设工作有关要求的通知》,强调海绵城市建设应从“末端”治理向“源头减排、过程控制、系统治理”转变,从以工程措施为主向生态措施与工程措施相融合转变。在城市自然生态本底基础上科学选择和综合采取蓝色、绿色和灰色设施,成为系统化推进海绵城市建设的必然要求,但是如何科学落实仍需进一步研究和探索。以玉树市为例,介绍海绵城市建设中蓝绿灰设施融合的技术方法和实施路径。

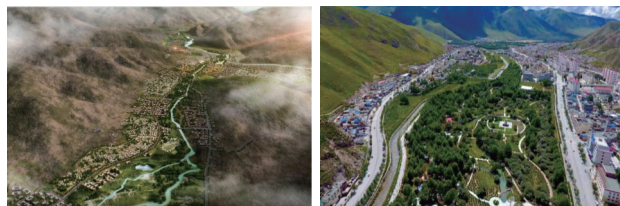
## 1 玉树城市本底特点及海绵城市建设目标

### 1.1 高原地域风貌浓郁的灾后重建新城

玉树市位于青藏高原腹地,素有“江河之源、中华水塔”美誉,其水源涵养功能对调节全球气候、筑牢国家生态安全屏障具有重要作用。全市多年平均降水量约500 mm,且近年来呈明显上升趋势,受对流天气及地形影响,城区在汛期易形成短时强降雨。

2010年玉树市发生地震,在全国人民援助下进行了迄今为止人类在高海拔、高寒地区实施的最大规模原址重建。玉树市灾后重建严格执行《灾后重建总体规划》,在城市功能定位及用地布局规划等方面处处体现尊重自然、保护生态的理念,滨河湿

地空间和自然水系冲沟在灾后重建中得到了较好的保留和修复,为建设蓝绿灰设施融合的海绵城市奠定了良好基础<sup>[3]</sup>。玉树城区在谷地中沿河而建,河流、冲沟、公园绿地、滨河湿地等蓝绿空间纵横交织,城市与自然山水有机融合(见图1)。



a. 规划

b. 实景

图1 玉树城区蓝绿空间融合规划及实景

Fig.1 Planning and actual picture of integration of blue and green space in Yushu City

### 1.2 建设生态韧性特色鲜明的海绵城市

根据玉树市地域特色,针对城市开发建设及防洪、排水防涝体系存在的问题,围绕高质量发展要求,以海绵城市建设为统领,聚焦防洪排涝安全,制定海绵城市建设目标。

① 提升水源涵养能力,缓解城周水土流失。玉树城区周边南北山为城区河流的水源涵养区,该区域以稀疏的灌丛和高寒草原植被为主,由于山体坡陡崖高且土层松散,受雨水冲刷和冻融侵蚀影响,水土流失问题突出,对区域内水系行洪安全和水生态环境造成了不利影响。因此,玉树市海绵城市建设拟重点提升城区的周边水源涵养能力,缓解水土流失,进而对城区山洪内涝防治发挥积极的作用。

② 健全防洪排涝体系,降低山洪内涝威胁。由于玉树城区南北山地形坡度陡、小流域面积较大,导致山洪汇流时间短且洪峰流量大,加之山洪防治体系不完善,易发生山洪灾害。城区市政排水管渠总体较完善,但部分区域由于局部地势低洼、排涝体系不健全等易产生内涝积水。完善山洪防治及排水防涝体系,有效应对设计标准内的降雨及洪水是玉树市海绵城市建设的核心目标。

③ 补齐社区建设短板,改善人居环境质量。玉树城区虽整体建设年代较新,但由于灾后重建过程时间紧、任务重,部分居住社区存在设施不完善和生活品质不高等问题。随着设施使用年限的增加,地下管线老化、排水不畅、绿化和公共空间不足等问题日益凸显。玉树市海绵城市建设拟优先解

决居住社区排水管网不完善及内涝积水问题,并充分利用场地空间增加源头海绵设施。

④ 弘扬人水和谐文化,彰显民族特色风貌。玉树是一个多民族融合的地区,各族群众习俗文化中蕴涵深厚的水生态保护理念。基于对自然的敬畏和对当地文化的尊重,灾后重建规划提出了“具有浓郁康巴民族特色和高原地域风貌”的城市意象总体定位<sup>[4]</sup>。玉树市海绵城市建设拟深入挖掘淳朴的“三江源”水文化内涵,并在海绵城市项目落地中彰显民族特色和地域风貌。

## 2 系统谋划蓝绿灰设施融合的技术要点

### 2.1 从流域到地块谋划蓝绿灰设施

海绵城市蓝绿灰设施建设应全域统筹,对区域流域山水林田湖体系的构建,城市防洪、排水、防涝设施体系的建设以及源头地块海绵建设进行综合统筹和合理组合。首先,着眼于流域区域,保护河流、湖泊、湿地、坑塘、沟渠等蓝绿空间,优先利用自然排水系统和自然场地,并对流经城市的河道进行系统梳理和达标整治。其次,以中心城区为主并考虑汇水区的完整性,按照排水分区构建完善的排水设施体系,通过地表、管渠和排口的串联,统筹好排水管渠、地表行泄通道和河湖水系等设施,并与防洪设施有效衔接。最后,在建筑、道路、公园绿地建设中,因地制宜地采用绿色屋顶、雨水花园、植草沟等源头绿色设施,实现对径流总量和峰值流量的削减。

### 2.2 从小雨到暴雨协调蓝绿灰设施

海绵城市以解决设防标准内的暴雨内涝问题为导向,其核心是构建完善的排水防涝体系。城市雨水管渠设计标准一般为2~5年一遇,若应对内涝防治标准内的降雨就必须综合利用和充分发挥源头绿色设施的减排功能以及蓝色和灰色设施的滞蓄功能。由小型分散式绿色设施组成的源头减排系统主要应对中小降雨;排水管渠、泵站等灰色设施主要应对雨水管渠设计标准内的大雨、暴雨;由水库、湖泊、内河水系等蓝色设施,山塘、湿地、多功能调蓄等绿色设施,以及行泄通道、调蓄池、深隧等灰色设施组成的排涝除险系统,用于应对超过雨水管渠设计标准的大暴雨;对于超过内涝防治标准的特大暴雨,则通过建立智慧预警和应急管理体系来应对。

### 2.3 充分利用地形衔接蓝绿灰设施

海绵城市建设应充分利用自然地形,在规划设计中理清竖向关系,科学组织雨水汇流路径,结合地形合理设置雨水滞蓄空间和径流排放通道,尽可能地利用自然力量排水和蓄水;应合理划分排水分区,顺应自然肌理和水系关系,优先按照有利于雨水排除的原则进行竖向控制,避免形成排水不利地区和路段,遵循“高水高排、低水低排”的原则,避免将地势较高、易于排水的区域与低洼区域划分在同一排水分区;应做好城市防涝系统与防洪设施的高程竖向衔接,统筹内河水系蓝色设施与排水管渠和调蓄池等灰色设施的竖向连接;城市公园绿地及地块内部的绿地应优先考虑蓄滞周边雨水径流,与周边道路、广场、停车场等硬化下垫面做好竖向高差控制。

### 2.4 结合本地特点甄选蓝绿灰设施

不同城市的自然地理条件、水文地质特点、降雨规律、水资源状况、城市建设形态和建设水平、洪涝情况及其原因等都有较大的差异,各城市的不同区域、不同阶段、不同设施发挥的效能及投资费用均不相同,在海绵城市建设中应因地制宜地选用和布局蓝绿灰设施。新建城区应高起点规划、高标准建设灰色设施,并与自然生态系统和绿色设施有效衔接,在新开发建设过程中因地制宜地布置源头绿色设施,以减轻城市内涝和雨水径流污染;老城区应重点针对内涝积水、排水设施不完善等问题,有针对性地加强排水管网、调蓄设施等灰色设施的改造和建设。此外,海绵城市建设还应与生态保护修复、城市更新、韧性城市建设、低碳城市建设等有机结合。

### 2.5 实现综合目标统筹蓝绿灰设施

缓解城市内涝是海绵城市建设最重要的目标之一,除此之外,海绵城市建设还有收集利用雨水资源、控制削减雨水径流和合流制溢流污染、改善水生态水环境等其他功能。系统化全域建设海绵城市应做到在以排水防涝安全为主的同时,统筹考虑水资源、水生态和水环境问题,衔接生态保护、河流水系、绿地系统和排水管渠设施,建立健康的城市水系统。为避免过度工程化对生态环境系统造成干扰和破坏,规划设计中宜适度控制灰色设施的建设规模,科学划定城市蓝线和绿线以充分保护、利用蓝绿设施,统筹考虑雨水径流从产生到排入水



体的全过程,对蓝绿灰设施组合进行优化和合理布局,并匹配设施规模能力与建设需求,使其协同发挥最优作用,提高投资效益。

### 3 蓝绿灰设施融合的海绵城市系统方案

### 3.1 “适地宜种,增灌护坡”提升流域滞蓄功能

从流域视角出发,遵循区域生态系统和雨水排放系统的完整性,以高精度地形数据为基础,对玉树城区及周边山体进行水文分析,明确自然汇水路径和汇水范围。

玉树城区周边小流域治理和水土流失治理是从源头上保障城市防洪安全、改善水生态环境的有效手段。根据研究,三江源地区常绿针叶林土壤侵蚀模数为 $5\sim 10\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ,远低于草原、草甸的土壤侵蚀模数 $[98\sim 192\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})]$ ,在适宜区域开展水源涵养林建设对提高区域水土保持功能具有重要作用<sup>[5]</sup>。规划在玉树城区及周边流域范围内构建雨水“自然积存、自然渗透、自然净化”生态大海绵系统(见图2),以玉树城区所在的巴塘河流域为重点,实施水源涵养功能提升工程,重点推进城区南北山水源涵养林建设工程,进一步营造山体植被与河流湿地相辅、蓝绿空间融合的良好山水城关系。主要工程措施包括选择本地特色树种开展植树造林,实施生态边沟改造和边坡修复,提升区域水源涵养能力,滞蓄净化雨水,减少泥土冲刷入城,增强城区防洪能力。

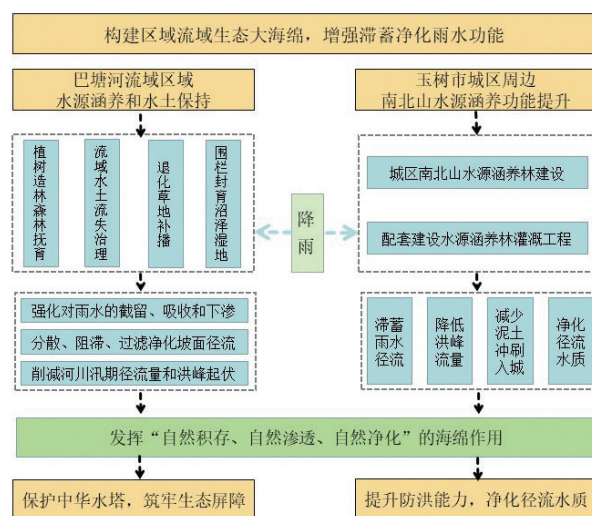


图2 玉树市区域流域大海绵系统构建示意

**Fig.2 Schematic diagram of large sponge system construction in regional watershed of Yushu City**

### 3.2 “上蓄下排,蓝绿融合”构建山洪防治体系

玉树城区排洪沟除承担山洪排放功能外,也是城区涝水行泄通道的重要组成部分。规划进一步优化完善自然水系冲沟脉络,疏通天然雨洪通道和增加滞蓄洪空间,提升城区山洪防治能力。

基于对城区现有 24 条排洪沟的汇水分析和排水能力计算校核,结合全方位的现场踏勘,对各条排洪沟存在的问题进行识别诊断,规划提出“上蓄下排、蓝绿融合”的山洪防治策略(见图 3),按照 30 年一遇防御标准对城区各排洪沟进行系统治理。



图3 玉树城区山洪防治体系示意

**Fig.3 Schematic diagram of the mountain torrent control system in Yushu City**

上游在提升水源涵养能力的基础上通过对拦沙坝、谷坊和沟道防护工程的加固和整修,最大程度地拦蓄洪水,同时利用山塘、洼地滞蓄洪水,削减洪峰;中游通过新建、改造、清淤疏浚排洪明渠或暗涵,与城区主河道通畅连接,为山洪水提供出路;下游通过完善城区主河道沿岸防洪设施及疏浚河道,保障河道过流断面,总体形成蓝绿灰设施融合的山洪防治体系。排洪沟治理和改造工程以防洪安全为核心,同时注重与保护修复水生态、建设宜居环境和融合水文化相结合,让公众更好地与水为伴。

### 3.3 “优化竖向,蓄排结合”完善排水防涝工程

玉树城区建于河流阶地之上,两侧山体坡度为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,城区地面高程为3 680~3 750 m,局部区域坡度较大。规划构建玉树城区“优化竖向,蓄排结合”的排水防涝体系(见图4),通过合理划定汇水分区,充分利用山体、道路、地块及水系的坡度和竖向关系,按照有利于雨水滞蓄和排除的原则进行竖向控制或改造,因地制宜地布置源头绿色设施,完善雨水管渠等灰色设施并实施易涝点综合整治,建设道路径流行泄通道和调蓄空间等排涝除险工程,统筹好蓝绿空间和灰色设施并协同作用,实现快速有效地排除雨水和防止内涝发生的目标。

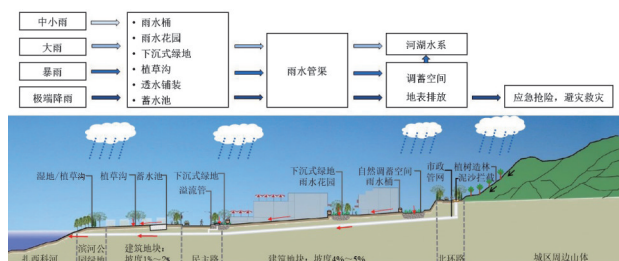


图4 玉树城区排水防涝体系示意

Fig.4 Schematic diagram of drainage and waterlogging system in Yushu City

玉树城区道路坡度较大且主要坡向河道,有利于通过地下雨水管渠和地表行泄通道排放径流,通过分析各片区涝水汇流路径,结合道路竖向、水系分布和内涝防治标准等确定城区涝水行泄通道,使超标地表径流自流排入河道或绿地,同时通过工程和非工程措施防止形成道路洪水。根据地形、用地、易涝点及排水分析,规划在城区上游和中游设置多处雨洪调蓄空间,在遭遇强降雨时调蓄径流。根据雨水管渠排口及滨河空间分析,将部分滨河湿地及河滩地设置为雨洪滞蓄净化空间,具体见图5。



图5 玉树城区道路雨水行泄通道及调蓄空间规划

Fig.5 Planning of urban road rainwater drainage channel and storage space in Yushu City

### 3.4 “自然组织,彰显特色”推广源头海绵设施

玉树城区土壤一般分为2层,上层为杂填土或素填土,厚度约0.5~4.5 m,下层为卵石层,土壤渗透性较强,适宜建设源头绿色设施。根据玉树市降水丰富、土壤易渗、地形坡度大、水环境质量要求高等特点,提出源头海绵建设采取“优先下渗、增加滞蓄、注重净化、适当利用、通畅排放、兼顾雪水”的总体原则,同时结合经济发展状况和风俗习惯,合理选择适宜本地且经济实用的技术、设施和植物以降低建设及运维成本,优先采用下沉式绿地、雨水花园等绿色设施进行下渗和滞蓄。

规划中,海绵城市建设与本地特色风貌相结合,遵循“具有浓郁康巴民族特色和高原地域风貌”的城市意象定位,紧抓高原、高寒、河谷带状城市的空间特征。公共建筑、居住社区、道路广场等源头海绵设施建设应依山就势、保土理水,尊重并合理利用自然环境,与建筑景观风貌匹配融合,充分展现康巴风情和地域特色。

### 3.5 “方案比选,模拟评估”落实项目科学统筹

玉树市海绵城市建设任务涵盖了从区域流域、城市设施到居住社区的系统化海绵体系,重点突出区域流域的水源涵养能力提升和山洪防治体系构建,城市层面的排水防涝能力提升和雨水“渗、滞、蓄、净、用、排”设施体系建设,以及居住社区的排水设施完善和人居环境提升。规划中采用GIS、Mike、SWMM等工具搭建了区域流域地面高程模型、城区源头地块绿色海绵设施模型、市政雨水管渠和山洪排洪沟渠等灰色设施模型,以及河流水系蓝色空间模型(见图6),并通过耦合模型综合分析现状及不同方案情景下城市排水和内涝积水情况,进行效果评估和方案比选。



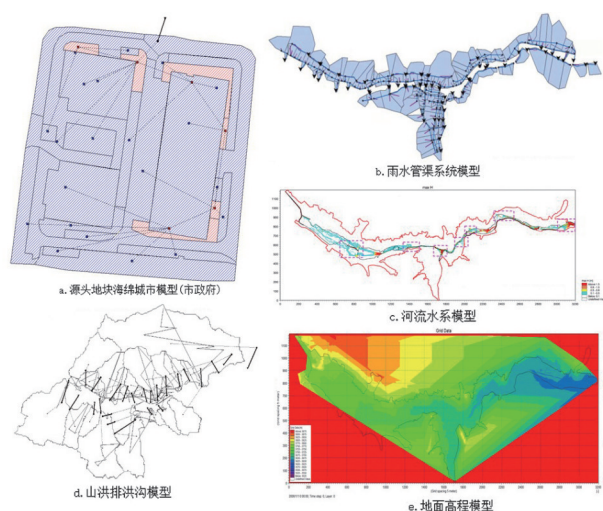


图6 玉树城区海绵城市蓝绿灰设施体系建模示意

Fig.6 Modeling diagram of blue, green and gray facility system in Yushu urban area

根据模拟结果,玉树城区在实施系统化海绵城市建设后雨水径流总量和径流峰值均有明显减少,现状内涝积水中高风险区及低洼地区防洪排涝水平得到明显提升。以某海绵城市改造项目为例,在不同重现期降雨条件下雨水径流总量可削减14%~40%,雨水径流峰值削减8%~52%。

#### 4 结语

玉树市地处三江源国家重要生态功能区,海绵城市建设首先应遵循尊重自然、顺应自然、保护自然的生态文明理念,通过系统保护和修复城区及周边河流、冲沟、湿地、坑塘、山体植被等蓝色和绿色空间,提升流域大海绵滞蓄净化雨水功能;其次坚持问题导向和目标导向相结合,建设完善的山洪防治体系、排水防涝体系及源头地块海绵设施体系,并通过合理的高程竖向设计保障雨水汇流、输送、排放等环节的合理衔接,有效融合蓝绿灰设施,以实现海绵城市建设目标。

#### 参考文献:

[1] MICHAEL R B, CAS H. NYC Green Infrastructure

Plan-A Sustainable Strategy for Clean Waterways [R]. US:EPA,2010.

[2] 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.

HUANG Duo, YI Fangrong, WANG Sizhe, et al. Blue-green space pattern and indicator system in territorial planning [J]. City Planning Review, 2022, 46(1): 18-31(in Chinese).

[3] 仇保兴. 生态城规划原则在玉树灾后重建中的应用[J]. 城市规划,2010,34(10):9-16.

QIU Baoxing. Application of eco-city planning policy in post-quake reconstruction of Yushu [J]. City Planning Review, 2010, 34(10): 9-16(in Chinese).

[4] 范嗣斌,周勇. “民族特色、地域风貌”在玉树灾后重建中的探索实践——玉树当代滨水商住区建筑设计[J]. 建筑知识,2015,35(9):112-113.

FAN Sibin, ZHOU Yong. The exploration and practice of “national characteristics and regional features” in Yushu’s post-disaster reconstruction—architectural design of contemporary waterfront commercial and residential areas in Yushu [J]. Architectural Knowledge, 2015, 35 (9): 112-113(in Chinese).

[5] 《三江源区生态资源资产核算与生态文明制度设计》课题组. 三江源区生态资源资产价值核算[M]. 北京: 科学出版社,2018.

Research Group of Ecological Resource Asset Accounting and Ecological Civilization System Design in Sanjiangyuan Region. Value Accounting of Ecological Resource Assets in Sanjiangyuan Region [M]. Beijing: Science Press,2018(in Chinese).

作者简介:唐磊(1987-),男,陕西渭南人,硕士,高级工程师,主要研究方向为城市水系统规划、市政基础设施规划及海绵城市和黑臭水体治理规划设计等。

E-mail:398501864@qq.com

收稿日期:2022-06-10

修回日期:2022-07-15

(编辑:丁彩娟)