

抵御内涝灾害的水敏感城市设计及其启示 ——以新加坡为例

Water Sensitive Urban Design for Resisting Waterlogging Disasters and Its Insights: The Case of Singapore

何静娟 施益军 徐丽华 马淇蔚 陆张维 吴亚琪
HE Jingjuan, SHI Yijun, XU Lihua, MA Qiwei, LU Zhangwei, WU Yaqi

摘要：内涝灾害阻碍城市发展，水敏感城市设计可以缓解内涝并利于城市的可持续发展。本文总结新加坡应对内涝灾害的规划历程，发现其从纯工程措施抵御内涝到多元综合全过程规划应对，抵御内涝灾害的规划体系趋于完善；归纳分析新加坡水敏感城市设计在生产、生活、生态空间中的应用并举典型案例进行说明，解析其产生经济、社会、环境效益的核心做法。研究表明，基础设施建设完善化、生产空间设计自然化、生活空间节点公众化、生态空间规划整体化、规划设计结构系统化是新加坡抵御内涝的关键，可为我国走向可持续的城市发展道路提供更多思路。

Abstract: Waterlogging disaster impedes urban development, yet Water Sensitive Urban Design can lessen these calamities and help cities develop sustainably. This paper highlights the planning process for dealing with waterlogging, taking Singapore as an example, and finds that it has progressed from just engineering approaches to multiple holistic planning. It examines how Water Sensitive Urban Design is used in Singapore's productive, habitational, and ecological environments and offers illustrations of the fundamental procedures that have produced favorable effects on the economy, society, and the environment. It demonstrates that Singapore's resistance to waterlogging is due to the development of ideal infrastructure, the design of natural production space, the public participation of living space, the overall planning of ecological space, and the planning and design of structural systems, and offers more suggestions for China's urban construction towards a sustainable urban development path.

关键词：内涝灾害；水敏感城市设计；防灾减灾；防灾韧性；新加坡

Keywords: Waterlogging Disaster; Water Sensitive Urban Design; Disaster Prevention and Mitigation; Disaster Resilience; Singapore

浙江省社科规划项目重点课题 (23NDJC026Z), 浙江省软科学重点项目 (2021C25033), 北京大学深圳研究生院委托课题 (H20230586)

作者：何静娟，硕士，北京工业大学建筑与城市规划学院，博士研究生
施益军（通信作者），博士，浙江农林大学风景园林与建筑学院，副教授，硕士生导师；浙江农林大学浙江省乡村振兴研究院，研究员。
yijun_shi@zafu.edu.cn

徐丽华，博士，浙江农林大学风景园林与建筑学院，教授，博士生导师
马淇蔚，博士，浙江农林大学风景园林与建筑学院，副教授，硕士生导师
陆张维，博士，浙江农林大学风景园林与建筑学院，副教授，硕士生导师
吴亚琪，硕士，浙江农林大学风景园林与建筑学院，讲师

引言

在快速城市化和极端天气背景下，城市内涝形势愈发严峻，威胁人民生命健康和财产安全。城市的发展以土地为载体，城市建成区面积持续扩张是发展趋势。同时联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change）在第六次评估报告中指出，未来几十年里，全球的气候变化都将加剧，极端天气频发将成为现实。水环境是灾害环境之一，城市内涝灾害则是水环境引发的典型灾害形式。

在城市规划与设计领域，国际上已有相关理论与实践来抵御城市内涝灾害：美国采用低影响开发（LID: Low Impact Development）和最佳管理实践（BMPs: Best Management Practices）的理念，利用生物滞留池、植被浅沟、绿色屋顶等设施控制径流并减少水污染^[1-2]；英国提出可持续城市排水系统（SUDS: Sustainable Urban Drainage Systems）理念，采用小型和分散式的技术，缓解非点源污染对城市水体的不利影响，对城市景观产生积极影响^[3-4]；澳大利亚选择水敏感城市设计（WSUD: Water Sensitive Urban Design）理念，将整个城市水循环的管理融入城市发展，减少内涝发生的可能性，以实现缓解水资源短缺压力 and 提升水质等目标^[5]；新西兰实施低影响城市设计与开发（LIUDD: Low Impact Urban Design and Development）理念，对土地和水进行综合利用设计^[6]；中国则采用海绵城市的理念，实施渗、滞、蓄、净、用、排的海绵措施，缓解城市内涝问题^[7]。这些雨洪管理理念的目标都包含降低城市开发对水文环境的影响^[8-9]，而水敏感城市设计更重视城市设计在其中发挥的作用^[10-11]，提出涉水系统局部设计方法^[12]，关注适水环境并创造娱

乐机会,它并非一系列的解决方案或措施,而是一种过程和理念^[13]。国际水协会(IWA: International Water Association)对水敏感城市设计的定义为城市设计与城市水循环的管理、保护和保存的结合,从而确保城市水循环管理能够尊重自然水循环和生态过程。

本文关注的水敏感城市设计侧重于对雨水的处理,重视雨水处理元素与手段,以指导性原则为主,不同于我国传统的城市设计。在水敏感城市设计评价框架中,投资的多寡与内涝灾害严重程度成反比^[14],证明水敏感城市设计确能减轻内涝灾害。延续水敏感城市设计理念的新加坡 ABC 水计划(Active, Beautiful, Clean Waters Programme)于2006年提出,经模拟发现其通过增加绿化面积和建设滞留设施,可以使峰值流量减少22%~63%,峰值流量延迟达30分钟,与不进行处理的情况相比,采用ABC水计划的设计可以使十年一遇的暴雨峰值减少33%^[15-16]。总体上,水敏感城市设计能提高城市对雨水的吸收、下渗、净化能力,有效增强城市抵御内涝灾害的能力。

国内外对新加坡水敏感城市设计的研究已有相当积累,学者多聚焦于水资源战略、效果评估、规划设计等角度^[17-20],如陈天等从新加坡城市、片区、街区、建筑和场地不同尺度总结水环境技术手段^[21],张天洁和牛迎香侧重于ABC水计划的网络治理模式探讨^[22],沙永杰和纪雁关注ABC水计划的技术方法和项目特点^[23],丁一介绍ABC水计划的理念和实践情况^[24]。但是,以基础设施为支撑,从生产、生活、生态(三生)空间这一不同视角对新加坡水敏感城市设计进行研究尚不多见。

我国内涝灾害影响在世界范围内属于最为严重的国家之一,2013—2022年全国因洪涝受灾人口年均达7 009.82万人,死亡失踪人口年均达529人,直接经济损失占当年GDP年均0.27%,2023年全国30省(自治区、直辖市)的水利工程设施因洪涝遭受不同程度损坏^[25]。我国传统城市建设理念应对城市内涝灾害存在明显不足,应急式的治理思路进一步加剧了抵御内涝灾害的难度。除此之外,我国应对内涝的工程体系仍不完善,规划机制、应急能力等尚不完备,向发达国家学习先进雨水管理经验的需求更加迫切。基于此,本文以新加坡为例,在分析其应对内涝的规划历程的基础上,对其以基础设施为支撑的生产、生活、生态空间的具体做法进行介绍并总结经验,为我国抵御内涝提供参考。

1 新加坡应对内涝的规划历程

新加坡最初以工程性措施为主应对频发内涝,并未形成完整的规划体系。自1867年建设麦里芝水库储存雨水以来,

应对内涝的尝试历经百余年发展可分为三个特色鲜明的阶段:首先是纯工程措施抵御内涝阶段,工程仅具有单一防洪功能;其次是结合非工程措施减轻内涝阶段,使水这一要素从灾害化危机转为资源化利用;第三是多元综合全过程规划应对阶段,水资源从生存需要转向城市环境资产。回顾新加坡应对内涝的规划历程和主要做法并对其进行总结,对于推动研究新加坡防洪规划具有重大意义。

1.1 1867—1971年:纯工程措施抵御内涝

新加坡在这一时期主要依靠修建中央蓄水池、铺设排水沟管网、建立大型抽水站等工程措施对雨水进行储存、排放、输送,从而达到降低内涝风险的目的(图1、图2)。蓄水池的建设始于1867年^[27]——在新加坡地理中心地区河流下游建造堤坝或土堤,以满足日益增长的人口对淡水资源的需求。该地区为植被茂密、水系发达的丘陵地带,能有效汇集雨水,削减下泄流量,降低集中降水过程中水量超过河流承载力所导致的城市内涝风险。经过多次扩建,蓄水池集水区已覆盖新加坡2/3以上土地,主要承担雨水收集与储存功能。排水沟出于改善公共卫生的目的而铺设,最初的排水沟由土质或砖砌沟渠以及地下管道构成,兼顾排水与输水两大功能,加强污水处理能力的同时也有利于城市形成排水系统网络。大型抽水站能跨流域输水以确保区域间的持续供水,内涝时及时转移积水,增强排水能力,达到缓解城市内涝的目的。

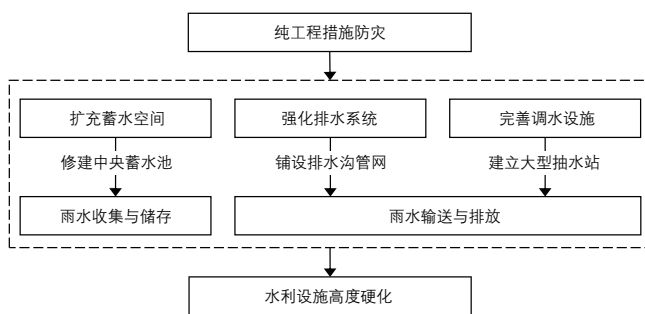


图1 纯工程措施抵御内涝的核心做法

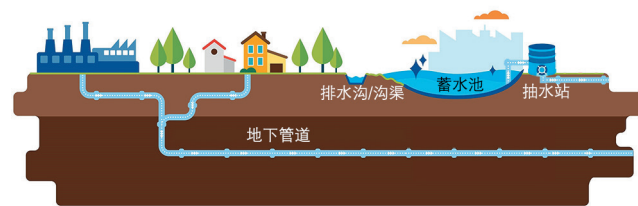


图2 工程措施示意图

资料来源:作者根据参考文献[26]绘制

纯工程措施的方式在城市发展早期的效果较为显著,是抵御内涝强有力的手段之一,能直接有效地将雨水贮存、排放、输送,但混凝土材料的广泛应用使各项水利设施高度硬化,此时处于改造自然的防灾阶段。随着城市持续开发,该方式不足以面对长时间高强度降水。工程措施功能单一,空间规划意识薄弱,纯工程措施的方式滞后于城市的快速发展,在内涝常态化的情况下还需拓展新的方式。

1.2 1971—2006年:结合非工程措施减轻内涝

以1971年新加坡提出的《排水系统总体规划》(Drainage Master Plan)为开端,多项与水体密切相关的规划、法规陆续出台,休闲美学对工程措施的改造受到关注,新加坡将目光转向工程措施与非工程措施相结合的方式减轻内涝风险(图3)。在规划方面,《排水系统总体规划》提出要预留用地以便于扩大排水沟的深度与宽度,在土地开发的同时考虑留白,应对未来城市排水规划的不确定性,实现城市弹性发展。在工程改造方面,水道美化运动、《绿化和水体规划》(Green and Blue Plan)、《公园和水体规划》(The Parks and Waterbodies Plan)等均提高了对渠化水道的景观方面要求,将景观与雨水管理措施融合——不再仅仅简单改造混凝土界面,而是尝试创造休闲娱乐空间(图4)。一系列的规划与行动使新加坡的水道景观有了较大提升,使之开始承担防涝之外的其他功能。在法律制度方面,主要对污水排放带来的水污染问题进行制约,如《水源污染管理及排水法》(Water Pollution Control and Drainage Act)和之后该法令被废除后简化的《污水和排水法》(Sewerage and Drainage Act)、《环境污染控制法》(Environmental Pollution Control Act)等^[28];同时通过推广节水税、调整水价等刚性约束提高公众的节水意识。

这一时期,在持续推进工程措施的同时融入非工程措施以深化雨水设施功能,使原先的工程措施产生新的价值,灾时蓄水、输水、排水以减轻内涝,平时则作为休闲娱乐空间。规划考虑未来城市开发需求,刚性指标控制污水排水并引导公众在生活中节水,与规模不断增加的排水系统、蓄水池、

抽水站等工程措施共同作用,减轻内涝影响。

1.3 2006年至今:多元综合全过程规划应对

进入21世纪,新加坡海平面上升^[29],且年降水总量和平均降水强度显著增加,极端降水发生的频率和强度也显著增加^[30]。强降雨可能会淹没排水系统并导致严重内涝,因此在工程措施与非工程措施结合的基础上,新加坡沿袭水敏感城市设计理念提出ABC水计划,采用“源头—路径—去向”的全过程技术路线,引领新加坡的雨洪管理从传统走向可持续,使排水基础设施从工程为主走向自然化。以多元主体治理和多样技术支撑促进水敏感城市设计落地,同时两者相互影响,在生产、生活、生态空间相应产生经济、社会、环境等多价值、多效益(图5)。采用民众、公共部门、私人团体的3P(people, public, private)合作方式,以社区为支撑,形成多元主体共同参与的治理模式,提高公众节水意识,助力开发与保护的协同发展^[31]。同时,相关技术不断更新完善,包括工程技术、数字监测、认证标准等,支撑水敏感城市设计的实施落地。工程技术包括雨水花园、沉淀池、湿地系统、土壤生物工程等;数字监测手段实时提供水位数据,提高监



图4 1991年蓝绿空间规划

资料来源:作者根据参考文献[27]绘制

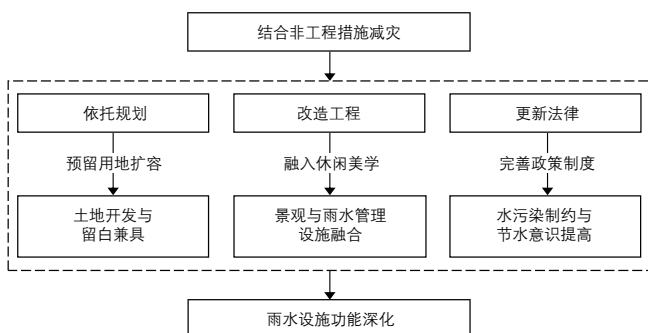


图3 结合非工程措施减轻内涝的规划实施

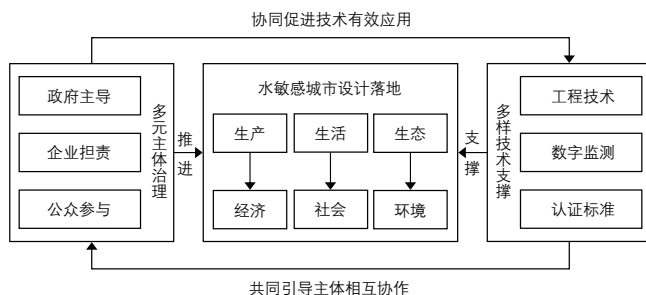


图5 新加坡综合防涝规划

测供水网络状况的能力,有利于调整规划设计,将内涝风险降到最低^[32];在认证标准方面,新加坡从活跃、美丽、清洁和创新四个方面对项目进行认证评估,为ABC水计划项目的实施效果提出要求。

新加坡通过多元主体的治理和多样技术的支撑保障水敏感城市设计落地,增强应对内涝的能力,以产出经济、社会、环境多方面的效益。现阶段,新加坡在防治内涝过程中更强调自然做功,融入智能技术,从改造自然向顺应自然转变。

2 综合全过程防涝规划的落地:新加坡水敏感城市设计

为应对频发内涝,新加坡ABC水计划融入水敏感城市设计理念,基础设施支撑三生空间,形成“源头—路径—去向”的技术路线,具有多维度、多效益的价值(图6)。笔者整理2010—2021年已认证的90项ABC水计划项目,以土地这一载体承担的主导功能为分类依据,将新加坡ABC水计划认证项目大致分为生产、生活、生态三类空间。从产生的效益来看,生产空间不仅可以降低内涝发生的可能性,也能带来直接或间接的经济效益;生活空间为居民提供休闲游憩场所、学习教育平台,利于提高居民的适灾意识;生态空间通过提升景观环境与水体质量来增强恢复力。水敏感城市设计的关键点在于保护天然水系,整合多功能用地并结合景观效果,增加透水地表比例,降低维护成本等^[33]。设计元素主要以基础设施为载体,可分为源头、路径、去向三部分:源头是产生雨水径流的区域,路径是雨水流经的排水沟

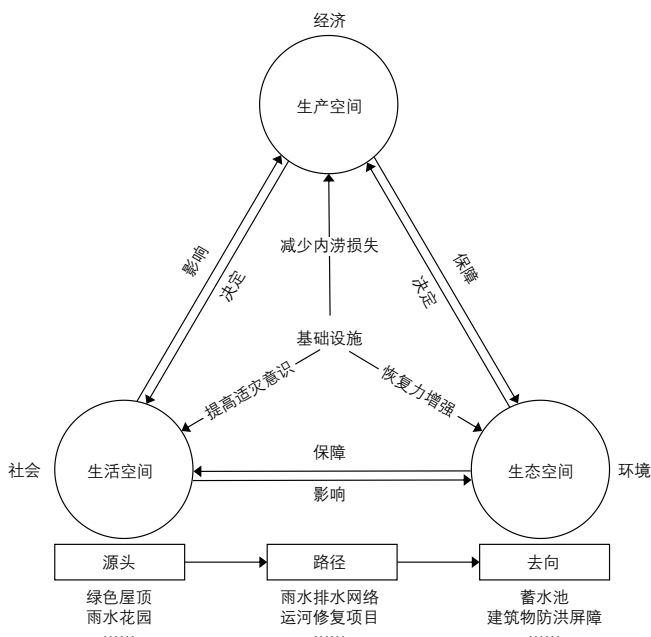


图6 综合全过程水敏感城市设计流程图

等,去向是可能发生内涝的地区^[34]。该方法不仅解决了径流输送中的排水沟(路径)内涝问题,也解决了产生径流的空间(源头)和可能发生内涝的空间(去向)的内涝问题^[35]。

2.1 生产空间

在生产空间,水敏感城市设计带来的经济效益包括直接和间接两方面。直接经济效益包括收集雨水进行利用所节省的相关工程费用;间接经济效益包括提升土地价值、带动上下游产业发展、减少能源消耗和内涝损失等。新加坡国土面积小,土地使用需求竞争强,其生产空间大致可分为集中的产业园区和零散的商业空间两大类。

通常而言,在源头和路径,会通过水敏感城市设计的基础设施建设如绿色屋顶、雨水花园等,对雨水进行初步净化与下渗,减少径流流量;在可能的去向采取措施,一是在新建建筑底层设置防洪屏障,二是将蓄水池扩容,同时在建筑之间建立生态走廊,不仅作为疏散通道,而且增加雨水消纳的空间。经过处理要素的净化,流入湖泊的水质得到提升,从而提高周边地块土地价值^[36],吸引商业活动,产生经济效益。新加坡有大量公司企业、商业综合体在建筑中融入水敏感城市设计理念,如利用垂直绿化这一自然要素打造宜人宜居环境,维持建筑内部温度,减轻对制冷制热设备的依赖^[37],一定程度上也减少了电力等能源的消耗。多主体协作的模式在应对内涝灾害时可打破彼此之间的壁垒,与传统各部门独立应对相比,所耗费的经济成本更低^[38]。总体上,一系列的设施在生产空间增强防涝能力,减少内涝损失。

新加坡西部的裕廊生态园作为第一个生态商业园区,早在2010年就通过了ABC水计划认证,实践历史久,是水敏感城市设计在生产空间中的典型应用(图7)。在源头部分,依靠雨水花园、生物净化群落等设施对雨水进行净化、收集。生



图7 裕廊生态园节点图

资料来源:作者根据参考文献[39-40]绘制

物净化群落应用范围广，微生物降解污染物，基质层过滤颗粒物，矿物复合材料去除磷酸盐，高密度的植物种植不仅有利于过滤沉淀物，还能吸收水中的营养物质（图8）。在路径部分，雨水经过排水渠道被引到中央绿地。在去向部分，最终进入裕廊湖蓄水池，一些可能成为径流终端的建筑物也相应地设置屏障。生态园中设置的瞭望台、凉亭、木板路等设施拉近了人们与水的距离，提升了商业园区的自然环境质量。一系列设施体现了该区域的绿色可持续发展理念，吸引了清洁技术研发企业的入驻。降水时，雨水径流能及时汇入河流并得到初步净化，降低内涝发生概率，减少灾害带来的经济损失。

2.2 生活空间

在生活空间，水敏感城市设计重视将休闲娱乐功能融入基础设施，提升居民生活的幸福感；同时，在节点周边放置ABC水计划相关标识，加强国民教育，培养青少年的适灾意识。新加坡的生活空间大多沿河分布，主要为承载居住、教育需求的居住区和学校以及其他生活空间。

在源头与路径部分通常设置雨水花园、透水路面、绿色屋顶、植被浅沟、垂直绿化等；在去向部分对新建建筑设置防洪屏障，对蓄水池进行扩容。除抵御内涝的水敏感城市设计基础设施外，ABC水计划重视在生活空间营造亲水环境，创造娱乐空间。设计包括划定蓄水池中的钓鱼点、皮划艇等水上运动区域，在滨水空间中建造亲水设施，吸引居民参与相关活动，提倡与水共生的生活体验，打造活力的社区。兼顾其他功能的特殊生活空间体现了平灾结合的思想：建筑的绿色屋顶既可以缓解内涝，也能提供大面积草坪作为休闲空间，如滨海堤坝已成为新加坡市中心放风筝的场所，建筑中设计的高植被覆盖率空中露台也是居民社交、锻炼的空间。在学校周围的水敏感城市设计则着重打造户外课堂空间：通过让学生在自然环境中观察ABC水计划设计的特点，学习植物对雨水径流进行滞留、净化等的原理与过程，进而向公众灌输对水的管理意识，加强公众参与。水敏感城市设计为居民打造宜居的生活环境，提供教育场所，创造了社会价值。

加冷河的波东巴西段周围为居住区和学校，较好体现

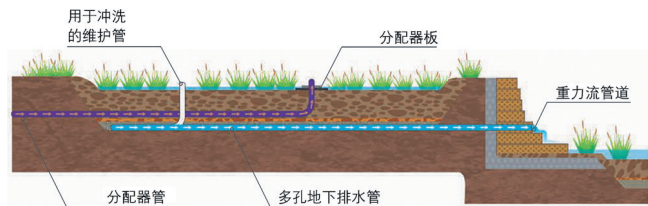


图8 生物净化群落典型剖面图

资料来源：作者根据参考文献[41]绘制

了生活空间中的水敏感城市设计。设置露天广场座位、带遮雨棚的座位、瞭望台、雨水花园、人行道以及植被浅沟，多样化的植物搭配可丰富生物多样性，提高加冷河的水质，多个观景台为居民提供了良好的滨水景观（图9）。在源头部分，采用植被浅沟和雨水花园的设置：植被浅沟适用于小型集水区的上游，保护下游免受侵蚀，是对粗颗粒的预处理（图10）；雨水花园不仅可以安装在各种类型的花盆盒中，还可以作为单独的土壤过滤系统，高密度的地表植被阻滞径流并对其净化。传统的雨水花园设置地下管道，但在条件不允许时，可以使用浸湿式雨水花园应用于小型的开发项目（图10）。在路径部分，经过植被浅沟的输送、滞留、沉淀，雨水径流汇入加冷河。在去向部分，最终进入滨海湾蓄水池。此外，规划设计者纳入利益相关方意见，最终设计了一个开放广场，不但可作为能让学生有参与感的有关水环境的自然教育空间，也兼顾了周边居民的游憩需求。

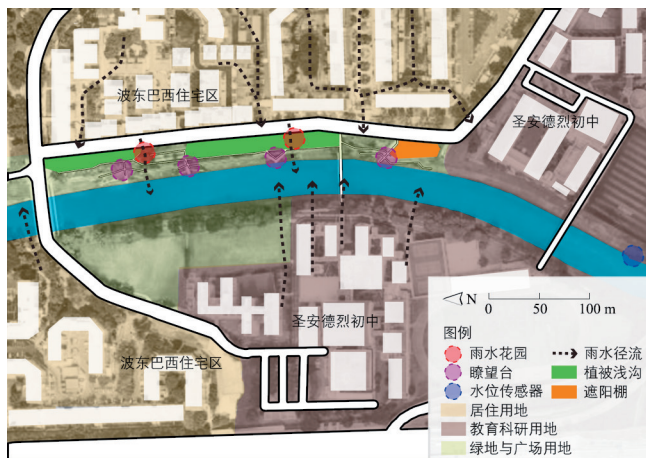


图9 加冷河波东巴西节点图

资料来源：作者根据参考文献[42]绘制

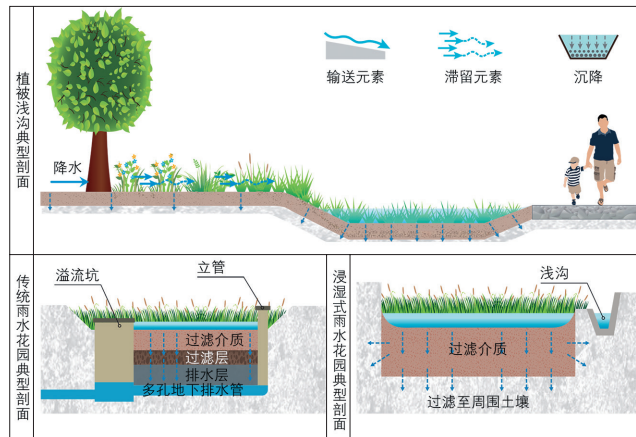


图10 植被浅沟与雨水花园典型剖面图

资料来源：作者根据参考文献[41]绘制

2.3 生态空间

在生态空间，水敏感城市设计体现为对景观环境的提升和对水质的净化，有利于恢复城市水文环境，带来显著的生态效益。新加坡的生态空间主要为自然保护区、城市公园等组成的绿色空间和纵横交织河网构成的蓝色空间。

新加坡一直以来都重视生态环境建设，绿化建设理念实现了从“花园城市”到“自然中的城市”的转变。在水敏感城市设计的实际案例中，对生态空间的改造主要为硬质河道自然化，做法为将平面形态以直线为主、截面为规整几何形态、材质为混凝土的河道平面形态曲化，使断面接近自然的非对称状态，用植物软化生硬的堤岸，以建立物质交换过程和营造动植物栖息地。通过雨水花园、生物滞留池、漂浮湿地等对雨水进行净化，进而提升水质；布置水位传感器进行监测，水位危险时能及时提醒游客。让城市与自然相结合，辅以非工程手段，提高城市应对内涝灾害的能力，能使之更快地恢复到灾前状态。

武吉知马第一导流渠建设于1970年代，最初是为了缓解武吉知马地区内涝问题。为改善导流渠建设引发的雨水流量增加的情况，进行了排水系统改善工程。考虑到周边为居住用地和绿地，融入水敏感城市设计将有望打造清洁美丽的生态空间。遮阳棚布置在水渠岸边，结合湿地系统、雨水花园、植被浅沟进行配置；沥青人行道靠近水渠，提供步行场所，加强人与环境的互动性和景观连接性（图11）。在源头部分，在水渠岸边设置多个雨水花园达到治理效果，湿地系统对雨水进行处理；在路径部分，径流进入武吉知马第一导流渠；在去向部分，径流最终汇入麦里芝蓄水池。石笼墙和渠壁绿化则更为自然和谐。雨水花园的设置是为了处理来自附近道路的雨水径流，周围的湿地建设选用了本土植物，不仅能处理雨水，而且为生物提供了栖息地（图12）。根据2019年总体规划，未来武吉知马第一导流渠周边将继续作为居住用

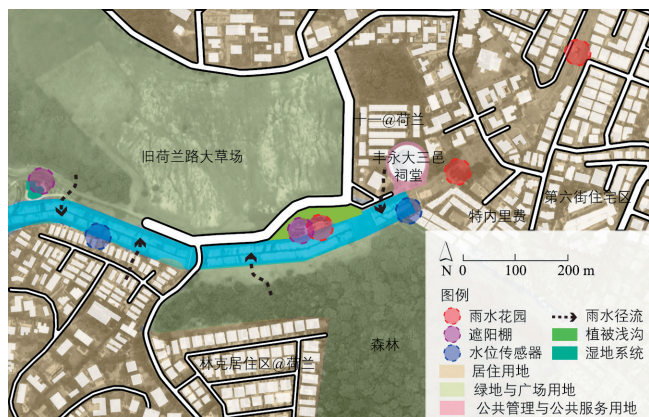


图11 武吉知马第一导流渠节点图
资料来源：作者根据参考文献[43]绘制

地开发，绿地将大面积缩减，径流更容易超出土地的承载力而引发内涝，故湿地系统、植被浅沟等在降水环境时发挥的作用将更为明显。

总而言之，新加坡的水敏感城市设计理念以各类基础设施为支撑，在生产、生活、生态空间发挥多种效益，源头—路径—去向的路线能全程有效应对内涝灾害。

3 经验与启示

我国应对内涝灾害的现存问题可概括为：灾前缺乏灾情预测与防灾措施，灾中落实应急管理预案不到位，灾后学习反思不充分，总体上城市内涝防治体系仍待完善。新加坡ABC水计划经过十多年的发展，对抵御城市内涝确有成效，能有效延缓径流峰值、减少峰值流量。对水敏感城市设计在新加坡的实践进行经验总结，有助于为我国抵御内涝的理论和实践带来启示。

3.1 基础设施建设完善化，提升防灾减灾能力

我国防涝基础设施相对薄弱，无论是宏观的排水系统还是微观的雨水处理设施都需要进一步优化。传统的灰色基础设施是排水的主力军，绿色基础设施起到辅助作用，灰绿结合的基础设施更有利于降低内涝风险。同时，在城市规划建设过程中，要注意避免过度工程化，天然的河流湖泊、绿地系统均为防涝的有利条件。我国国土面积广阔，自然环境复杂多样，应根据当地实际情况因地制宜制定相应的规划策略。对于东南沿海地区，由于其降水丰富，以降低径流峰值为主要目的，新加坡的水敏感城市设计在该类地区的适用性较高，三生空间与水环境的互动性强；而对于以流域为主的内陆地区，如西北地区，降水量少且集中于夏季，抵御内涝需要高要求的雨水管网来控制短时暴雨的径流，长时间来看更需要雨水存蓄与利用，高维护成本的蓄水池和净化设施实用性不强，更多应依靠降低不透水下垫面的比例来提高雨水的自然下渗，补充水系。绿色基础设施在我国的发展相对滞后，施工人员对新兴技术业务不熟练，缺乏相关的项目经验，故引

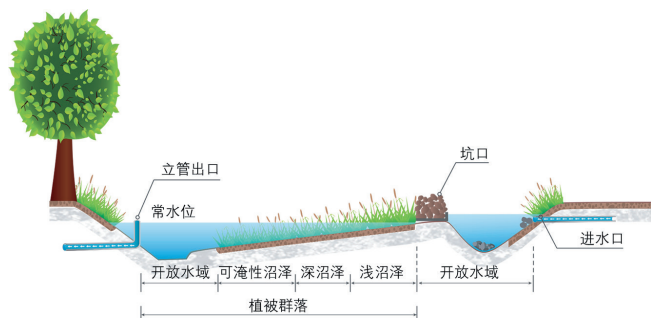


图12 地表湿地系统的典型剖面图
资料来源：作者根据参考文献[41]绘制

进国际先进建设技术，加强与发达国家的项目交流合作也显得尤为重要。灰绿结合的基础设施建设将大大削减内涝灾害产生的不利影响。

3.2 生产空间设计自然化，减少内涝损失

对于生产空间，即以商业、工业为主的空间，开发商往往追求空间开发带来的短期经济效益而牺牲绿色空间。实际上，生产空间融入自然化的设计要素，虽然前期投入成本较高，但具备可持续性，可减少内涝损失和降低维护成本。雨水花园、绿色屋顶、垂直绿化等应在生产空间的建筑中得到合理配置，发挥对雨水的吸纳、阻滞、净化等作用，逐渐形成雨水循环回用的体系。生产空间内公共绿地部分在保留自然因素的前提下，可引入雨水花园、生物净化群落等设施对雨水进行处理。与此同时，支持多元主体参与，包括企业、政府、公众、其他社会组织等，并让企业成为主体之一参与规划设计，增强生产空间中规划的可操作性与落地性。针对我国五种主要的气候类型，应有选择地吸收新加坡在生产空间中的水敏感城市设计的经验（表 1），提高不同气候类型地区的适水性。其中，雨水花园适用范围广；绿色屋顶适用于湿热气候；垂直绿化主要应用于热带地区高密度城市，在我国适用性有待进一步研究，在干旱少雨区域不适宜选用。

3.3 生活空间节点公众化，融入与水共存意识

在生活空间，一系列的亲水设施将拉近居民与水的距离，同时提供休闲娱乐场所（图 13）。自下而上的规划设计更具操作性，住宅区在规划前期可广泛征求公众建议，让居民参

与公共住宅区公园的再设计，融入水敏感城市设计理念，结合多利益主体的建议，增强公众对项目的理解。在住宅区内部，多类雨水处理设施可营造休闲的水环境，经过评估对有条件的道路进行透水处理，一部分雨水顺着地势流入河流，被设施储存的雨水则可灌溉植被或被用于社区跌水景观营造，提升美学价值。河流岸线成为居民日常休闲活动的空间，亲水平台、瞭望台和座椅等基础设施布局以及社区或相关组织举办皮划艇等水上运动将增强滨水空间的娱乐性。新加坡充分利用公共空间，较大面积的绿色屋顶成为附近居民日常游憩的场所；同时，往往在雨水处理设施节点周边设置介绍牌，拓展居民对水敏感城市的了解程度，提高公众对新技术的认知与认可，培养与水共存意识。总之，在生活空间的规划设计中重视平灾结合的思想（表 2）：一方面，水敏感城市设计可以提升景观效果，提高生活空间宜居性；另一方面，灾时能减小径流峰值，通过净化与储存雨水，在维持水量的同时提升水质，从而达到与水共存的和谐状态。我国针对生活空间对水环境的处理停留在工程措施层面，在结合水上活

表 1 生产空间主要基础设施配置推荐表

气候类型	雨水花园	绿色屋顶	垂直绿化
热带季风气候	●	●	●
亚热带季风气候	●	●	○
温带季风气候	●	○	○
温带大陆性气候	●	○	×
高原高山气候	●	×	×

注：●宜选用，○可选用，× 不宜选用



图 13 生活空间节点设计
资料来源：参考文献 [44]

表 2 生活空间主要平灾结合设计

基础设施	平时功能	灾时功能
雨水花园	提供户外学习机会，提升景观	净化、滞缓、下渗雨水
绿色屋顶	休闲游憩场所，提供户外学习机会	收集、净化、回用雨水
植被浅沟	提供户外学习机会，提升景观	净化、滞缓、输送雨水
蓄水池	举行皮划艇、钓鱼等活动	收集存储雨水

运动和休闲娱乐设施对水环境进行利用方面仍有很大空间，人民的幸福感和获得感有待提高。

3.4 生态空间规划整体化，增强恢复力

就生态空间而言，由于城市建设不可避免地侵占自然空间，河流、绿地等被建设用地割裂，逐渐破碎化，改变了雨水径流的方向和路径，增加了内涝发生的不确定性。建议在规划中加入内涝风险评估，划分地块开发的适宜程度，提高规划的科学性。内涝风险大的地区应尽量恢复生境，使其成为内涝来临时可淹没地区；其他生态空间则在基础设施的支撑下发挥净化、下渗等功能。我们的最终目的是打造一个整体的生态空间，各要素之间相互联通，应对内涝灾害时有较强的恢复力。规划中需考虑流域尺度的内涝治理，上、中、下游统筹谋划，全盘考虑。此外，需有效利用智能监测设备，传输动态水位数据，针对内涝频发的区域应绘制洪涝风险图，及时更新规划应对策略。在借鉴新加坡经验时，需要考虑我国不同地区的自然生态本底情况：中西部地区与东部地区相比，生态更为脆弱，降水量更少，地质地貌更为复杂，植被选择与水处理设施的配置不能照搬照抄，要积极探索不同条件区域的建设机制，以系统的观念对待生态空间中的规划设计。

3.5 规划设计结构系统化，提高衔接度

综合防洪规划以多元主体、多样技术为特色，依托完善的基础设施建设，打造低碳高效的生产空间、活力宜居的生活空间、清洁美丽的生态空间，三类空间在基础设施的支撑下能够增强抵御内涝灾害的能力。以新加坡为代表的水敏感城市设计经验与我国城市层面相对应，类似我国海绵城市建设设计，受海绵城市建设设计导则直接指导。我国大部分城市的市区面积大于新加坡的国土面积，规划设计的空间尺度仍有差异，在水环境设计和城市设计方面需要考虑更大范围的空间。规划主要体现在国土空间详细规划与国土空间相关专项规划中^[45-46]，各层级规划编制指南与实施实践虽提及了防灾相关内容，但传递指导不足^[47]。由于相关规划与设计导则编制时间的差异性、编制主体不同，两者需相互协调，进一步提高规划与设计的衔接度（图 14）。上位规划要关注流域层面防洪设施的空间布局，与海绵城市建设设计导则互相

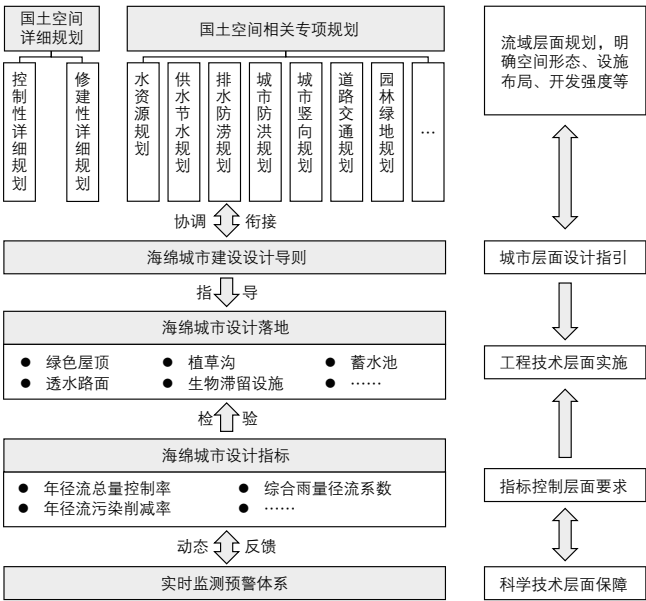


图 14 规划设计衔接框架

衔接，形成规划设计、施工落实、指标评价、监测预警相互影响的系统化框架。

4 结语

内涝灾害是城市发展面临的挑战。本文梳理了新加坡应对内涝的规划历程，总结新加坡水敏感城市设计以基础设施为支撑，在生产空间、生活空间、生态空间的理论与实践经验，对我国抵御内涝灾害有参考价值，但仍需结合我国实际情况进行应用。单纯依靠基础设施的完善并不能有效解决城市内涝问题，如何加强在内涝治理中的公众参与、细化标准面对风险等级不同的内涝、构建从规划到落地的内涝风险评估体系并加强模型模拟的内涝预警系统等，值得进一步研究与探讨。UPI

注：文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

[1] FLETCHER T D, SHUSTER W, HUNT W F, et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – the evolution and application of terminology surrounding urban drainage[J]. Urban water journal, 2015, 12(7): 525-542.
[2] United States Environmental Protection Agency. Low Impact Development (LID): a literature review[R]. Washington DC: USEPA, 2000.
[3] Construction Industry Research and Information Association. Sustainable urban drainage systems: design manual for Scotland and Northern Ireland[R]. London: CIRIA, 2000.
[4] ZHOU Q. A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts[J]. Water, 2014, 6(4): 976-992.
[5] LLOYD S D, WONG T H F, Chesterfield C J. Water sensitive urban design: a stormwater management perspective (industry report)[R]. Melbourne:

- Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 2002.
- [6] VAN ROON M. Water localisation and reclamation: steps towards low impact urban design and development[J]. *Journal of environmental management*, 2007, 83(4): 437-447.
 - [7] XIA J, ZHANG Y Y, XIONG L H, et al. Opportunities and challenges of the sponge city construction related to urban water issues in China[J]. *Science China earth sciences*, 2017, 60(4): 652-658.
 - [8] RENTACHINTALA L, REDDY M G M, MOHAPATRA P K. Urban stormwater management for sustainable and resilient measures and practices: a review[J]. *Water science and technology*, 2022, 85(4): 1120-1140.
 - [9] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development: a review[J]. *Science of the total environment*, 2017, 607: 413-432.
 - [10] WONG T H F, BROWN R R. The water sensitive city: principles for practice[J]. *Water science and technology*, 2009, 60(3): 673-682.
 - [11] KULLER M, BACH P M, RAMIREZ-LOVERING D, et al. Framing water sensitive urban design as part of the urban form: a critical review of tools for best planning practice[J]. *Environmental modelling & software*, 2017, 96: 265-282.
 - [12] ASHOK S, DAVID P, BADEN M, et al. Water sensitive urban design: an investigation of current systems, implementation drivers, community perceptions and potential to supplement urban water services[J]. *Water*, 2016, 8(7): 272.
 - [13] ABBOTT J, DAVIES P, SIMKINS P, et al. Creating water sensitive places: scoping the potential for water sensitive urban design in the UK[M]. London: CIRIA, 2013: 5-6.
 - [14] LU W, QIN X S, JUN C. A parsimonious framework of evaluating WSUD features in urban flood mitigation[J]. *Journal of environmental informatics*, 2019, 33(1): 17-27.
 - [15] GOH X P, RADHAKRISHNAN M, ZEVENBERGEN C, et al. Effectiveness of runoff control legislation and Active, Beautiful, Clean (ABC) waters design features in Singapore[J]. *Water*, 2017, 9(8): 627.
 - [16] YAU W K, RADHAKRISHNAN M, LIONG S Y, et al. Effectiveness of ABC waters design features for runoff quantity control in urban Singapore[J]. *Water*, 2017, 9(8): 577.
 - [17] SEAH H. Singapore's water strategy: diversified, robust, and sustainable[J]. *Journal American Water Works Association*, 2020, 112(6): 40-47.
 - [18] NG P J H, TEO C. Singapore's water challenges past to present[J]. *International journal of water resources development*, 2020, 36(2/3): 269-277.
 - [19] LIM H S, LU X X. Sustainable urban stormwater management in the tropics: an evaluation of Singapore's ABC Waters Program[J]. *Journal of hydrology*, 2016, 538: 842-862.
 - [20] TAN K M, SEOW W K, WANG C L, et al. Evaluation of performance of Active, Beautiful and Clean (ABC) on stormwater runoff management using MIKE URBAN: a case study in a residential estate in Singapore[J]. *Urban water journal*, 2019, 16(2): 156-162.
 - [21] 陈天, 石川森, 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. DOI: 10.19830/j.upi.2021.430.
 - [22] 张天洁, 牛迎春. 新加坡水生态空间更新的规划理念与实施模式研究——以ABC水计划为例[J]. *西部人居环境学刊*, 2021, 36(3): 19-26.
 - [23] 沙永杰, 纪雁. 新加坡ABC水计划——可持续的城市水资源管理策略[J]. *国际城市规划*, 2021, 36(4): 154-158. DOI: 10.19830/j.upi.2019.180.
 - [24] 丁一. 海绵城市规划国际经验研究与案例分析[J]. *城乡规划*, 2019(2): 33-40.
 - [25] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害防御公报 2023[EB/OL]. (2024-05-31)[2024-08-03]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgshzhgb/202405/t20240531_1712454.html.
 - [26] Public Utilities Board, Singapore. Source and network[EB/OL]. [2022-08-09]. <https://www.pub.gov.sg/usedwater/sourceandnetwork>.
 - [27] ROWE P, HEE L M. A city in blue and green[M]. Singapore: Springer Singapore, 2019: 23.
 - [28] WEN Y, YI K J, SIONG N B, et al. Water: from scarce resource to national asset[M]. Singapore: Centre for Liveable City and Public Utilities Board, 2020: 67.
 - [29] Ministry of the Environment and Water Resources, Ministry of National Development. Singapore's climate action plan: a climate-resilience Singapore, for a sustainable future[R]. Singapore: MEWR, MND, 2016.
 - [30] LI X, WANG X, BABOVIC V. Analysis of variability and trends of precipitation extremes in Singapore during 1980-2013[J]. *International journal of climatology*, 2018, 38(1): 125-141.
 - [31] THERESIA O, KUSUMA B M A. Water governance of Singapore in achieving sustainable water security[J]. *Indonesian journal of environment and sustainable development*, 2016, 1(7): 1-10.
 - [32] NG J H, SEAH H, PANG C M. Digitalising water: sharing Singapore's experience[M]. Singapore: IWA Publishing, 2020: 15-16.
 - [33] LLOYD S D. Water Sensitive Urban Design in the Australian context[R]. Australian: CRC for Catchment Hydrology, 2001.
 - [34] Public Utilities Board, Singapore. Managing stormwater for our future[EB/OL]. [2022-04-10]. <https://www.pub.gov.sg/drainage>.
 - [35] CHAN F K S, CHUAH C J, ZIEGLER A D, et al. Towards resilient flood risk management for Asian coastal cities: lessons learned from Hong Kong and Singapore[J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 187: 576-589.
 - [36] JOSHI Y K, TORTAJADA C, BISWAS A K. Cleaning of the Singapore River and Kallang Basin in Singapore: economic, social, and environmental dimensions[J]. *International journal of water resources development*, 2012, 28(4): 647-658.
 - [37] 薄凡, 庄贵阳. “低碳+”战略引领新时代绿色转型发展的方向和路径[J]. *企业经济*, 2018(1): 19-23.
 - [38] CUI M, FERREIRA F, FUNG T K, et al. Tale of two cities: how nature-based solutions help create adaptive and resilient urban water management practices in Singapore and Lisbon[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18): 10427.
 - [39] National Institute of Education, Singapore. Jurong Eco-Garden[EB/OL]. [2022-03-16]. http://sll.hsse.nie.edu.sg/Images/JEG_WaterCirculation.png.
 - [40] National Institute of Education, Singapore. Jurong Eco-Garden[EB/OL]. [2022-03-16]. <http://sll.hsse.nie.edu.sg/Home/JurongEco>.
 - [41] Public Utilities Board. ABC waters design guidelines[R]. 4th ed. Singapore: Public Utilities Board, 2018.
 - [42] Public Utilities Board, Singapore. Kallang-River-Potong-Pasir[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.pub.gov.sg/Documents/ABC-Waters-2021/Kallang-River-Potong-Pasir.pdf>.
 - [43] Public Utilities Board, Singapore. Holland-Plain-Bukit-Timah-Diversion-Canal[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://www.pub.gov.sg/Documents/ABC-Waters-2021/Holland-Plain-Bukit-Timah-Diversion-Canal.pdf>.
 - [44] Public Utilities Board, Singapore. Explore ABC waters sites[EB/OL]. [2022-08-18]. <https://www.pub.gov.sg/abcwaters/explore>.
 - [45] 赵万民, 朱猛, 束方勇. 生态水文学视角下的山地海绵城市规划方法研究——以重庆都市区为例[J]. *山地学报*, 2017, 35(1): 68-77.
 - [46] 陈智乾, 胡剑双, 王华伟. 韧性城市规划理念融入国土空间规划体系的思考[J]. *规划师*, 2021, 37(1): 72-76, 92.
 - [47] 吴宇彤, 彭翀, 舒建峰. 国土空间安全语境下的洪涝适应经验及规划响应[J]. *西部人居环境学刊*, 2022, 37(1): 15-21.

(本文编辑: 王枫)



本文更多增强内容扫码进入