

基于城市环境特征的低影响开发技术规划策略研究 ——以海南国际旅游岛先行试验区为例

Planning Strategy of Low-impact Development Technology Based on Urban Characteristics: A Case Study of Hainan International Experimental Tourism Zone Resort

李功成 白涛 刘晓青 LI Gongcheng, BAI Tao, LIU Xiaoqing

摘要 低影响开发技术是在新型城镇化发展背景下实现雨水综合管理、建设海绵城市的重要途径。目前,低影响开发技术纳入城市规划体系时的针对性不强。通过分析气候、地形、下垫面结构、土壤等对低影响开发技术应用产生影响的主要因素,阐述了各类低影响开发技术在不同环境特征下的应用要点。借助海南国际旅游岛先行试验区的规划案例进行论证,探析如何通过技术措施的配置,发挥低影响开发技术在城市排水防涝和环境改善中的效用,以期为该技术措施的规划布局提供一定的参考。

Abstract Under the background of new urbanization, low-impact development technology is an important way to achieve comprehensive management of rainwater and transform into a sponge city. At present, low-impact development technology infrastructure is untargeted in urban planning. This paper analyzes main influential factors on low-impact development technology infrastructure, including climate, terrain, and underlying ground structures, and expounds key points on how various techniques have been used under different urban characteristics. Storm system of Hainan International Experimental Tourism Zone is used as a case study, to illustrate how low-impact development technology can work on urban drainage system and environment improvement by configuring technical measures, in order to provide references for the layout of low-impact development technology infrastructure.

关键词 低影响开发技术 | 城市特征 | 海南国际旅游岛先行试验区

Keywords Low-impact development technology | Urban characteristics | Hainan International Experimental Tourism Zone Resort

文章编号 1673-8985 (2018) 03-0105-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

作者简介

李功成

同济大学建筑与城市规划学院
博士研究生

白涛

上海同济城市规划设计研究院
规划师,硕士

刘晓青

上海同济城市规划设计研究院
总工程师

长期以来,城市化进程的推进不断改变着原有的自然环境,引起一系列重大的环境问题。其中,为了应对城市不透水面积增加对雨水自然循环的破坏,城市建设中主要选择传统的“灰色基础设施”导出雨水径流。然而近年来,暴雨引起的城市内涝灾害频发,径流污染引起的水环境恶化日益严重,加之水资源短缺问题突出,建立更加适宜、有效的雨水系统对城市发展意义重大。借鉴国外先进理念,我国城市排水防涝建设的思路逐渐拓宽,先后发布了《城市排水(雨水)防

涝综合规划编制大纲》和《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》等文件,要求将低影响开发(LID, Low Impact Development)技术纳入城市排水系统综合规划中,充分发挥城市绿地、道路、水系等对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,以缓解城市内涝、削减城市径流污染负荷、节约水资源、保护和改善城市生态环境。因此,探寻低影响开发技术的应用策略对于完善城市规划综合体系、有效解决城市的排水防涝问题具有重要的意义。

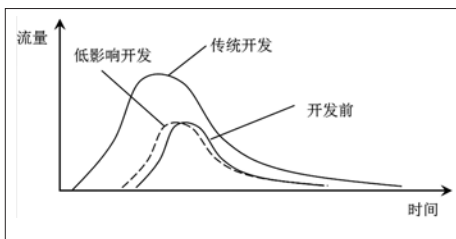


图1 低影响开发水文原理示意图
资料来源:《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》(试行)。

1 低影响开发概述

1.1 低影响开发的理念

1990年,美国马里兰州环境资源署首先提出了低影响开发的概念,其核心是通过分散、小规模源头综合性措施控制道路径流污染和总量,降低城市开发前后水文、生态条件的改变^[1](图1)。与传统的城市建设中迅速排除雨水的理念不同,低影响开发以综合控制为理念,重视对城市空间发展的再认知,将生态弹性与设施刚性合理结合,使得城市成为一个巨大的“海绵体”,达到收放自如的状态。

1.2 低影响开发技术的应用

按照低影响开发的理念,需要通过源头、中途、末端的综合性措施,如植草沟、下凹式绿地、生物滞留池、绿色屋顶、透水铺装等滞留措施和雨水塘、调蓄池等集蓄措施,尽可能地降低城市建设对原有自然条件的不利影响,达到调蓄、净化和回收利用雨水的目的。

目前,低影响开发措施在国外应用较为广泛。法国在水法中规定,新建道路必须在其周边区域建设雨水塘来处理道路径流以保护地下水及河流免受交通污染^[2];英国将植被过滤带、雨水花园、湿地等作为可持续排水系统的组成部分^[3];美国各地政府提出的“绿色街道”项目,河流保护计划、暴雨管理计划等也都应用了低影响开发的技术。

我国对雨水径流的控制尚处于起步阶段,低影响开发技术主要应用于部分雨洪利用的示范区,如深圳市光明新区作为全国最早的示范区之一,将下凹式绿地、生物滞留池、下渗井等措施体现在建设中^[4-6];北京经济技术开发区

采用生物滞留池技术,建成了全长1.7 km的低影响开发城市道路^[7]。

2 城市规划中利用低影响开发技术的误区

与管道系统不同,低影响开发技术以自然、生态的理念和方式为主体,在实际应用中具有一定的限制性,若不能因地制宜选择技术措施,将会极大地降低建设效益,甚至为后期运行维护带来严重的问题。特别是近年来,随着我国从规范标准到施工工艺各个层面对低影响开发技术的推广,各地在开展城市雨水系统规划时,往往存在以下几种误区。

第一,“本末倒置”。以低影响开发设施建设为核心,走“先破坏、后治理”的老路,一边对城市开发前的自然水系进行填埋,一边引入植草沟、调蓄池等工程设施。这种规划方式忽略了海绵城市以生态为先的基本理念,造成了严重的资源浪费。

第二,“万能理论”。以政策导向为规划核心,过分依赖低影响开发技术的能力,而忽略了雨水管渠系统和超标雨水排放系统的规划,造成暴雨季节仍然频繁出现涝灾。根据海绵城市规划的相关理论,通过低影响开发技术措施的组合,能够使一定设计降雨量以下的降雨事件得到控制,由于规划制定的设计降雨量与未来低影响开发设施的建设量息息相关,综合考量经济、技术因素,通常选择重点控制中小型降雨事件,理想状态下 $Q_{\text{降雨}}=Q_{\text{蒸发}}+Q_{\text{低影响}}$;当某场次的实际降雨量超过设计降雨量时,低影响开发设施难以负荷,仍需通过传统的管渠系统排除剩余的径流雨水,此时 $Q_{\text{降雨}}=Q_{\text{蒸发}}+Q_{\text{低影响}}+Q_{\text{管渠}}$ ($Q_{\text{降雨}}$ ——降雨量, $Q_{\text{蒸发}}$ ——蒸发量, $Q_{\text{低影响}}$ ——低影响开发设施的消纳量, $Q_{\text{管渠}}$ ——管渠系统的排水量)。因此,低影响开发技术并不能独立解决城市的内涝问题。

第三,“工程照搬”。以现有深圳、武汉等地的成功案例为借鉴,从控制指标到技术措施全面照搬,而忽略了低影响开发技术在不同环境条件下的适用性,导致不仅无法达到

恢复水文特征、提高城市防涝能力的目的,而且为城市的管理维护带来极大的困难。

以上应用误区的产生,归根结底是对低影响开发技术和当地的实际需求认知不足。因此,充分了解各项技术措施与城市环境特征的匹配关系,是促进低影响开发技术发挥效益、构建海绵城市的重要内容。

3 影响低影响开发技术应用的环境因素研究

3.1 气候条件

气候是影响低影响开发技术应用的首要因素。我国地域广阔,环境多样,主要包括温带季风气候、亚热带季风气候、热带季风气候、温带大陆性气候和高原高山气候5大气候带。

从降水的角度来说,季风气候区是内涝灾害发生频率最高的地区,这主要是由于该区域内随着季风的旋转,降水会呈现出明显的时空分布不均,绝大部分集中在夏季的2—4个月内。在此期间,暴雨形成的径流量急剧增加,现有的城市排水系统难以负荷,引起积水成灾。因此,广泛分布在我国东部的季风气候区往往是对排水防涝建设需求最高的地区,适于将低影响开发技术应用、雨水管渠升级与河道治理相结合,以改善城市积水问题。与之不同的是,我国西部地区蒸发强烈、降水稀少,在规划低影响开发技术措施时,需要慎重选择低影响开发设施,特别是绿色屋顶、透水铺装等应用条件较为苛刻的技术措施。

从气温的角度来说,不同的低影响开发技术措施都有其适宜的温度范围。例如,透水铺装寒冷地区有被冻融破坏的风险;雨水花园、生物滞留设施等选用的绿地植物一般不易于在较低温度下生长。

3.2 地形条件

城市引入低影响开发最重要的目的是避免降雨径流产生积水灾害,以保证城市的排水防涝安全,而区域地形对径流的路径和空间分布都具有重要的影响^[8-9]。在其他水文条件一定的情况下,地形坡度越大的地区,径流

模数越大,地表径流集中越快,最终趋向于向地势更低的河川汇集,难以在中途积存和下渗。因此,地形起伏明显、地面坡度较大的山区城市内涝问题并不突出,对低影响开发设施的需求也相对较小,即使设施建成后,受径流快速排放的影响,在雨水滞留、渗透、集蓄、净化方面的能力也会明显削弱。

与区域整体地形不同,城市微地形的变化对低影响开发技术的布局有着积极的作用。微地形的理论主要应用于景观设计中,用以创造丰富的空间层次,同时达到改善生态环境的目的,这与低影响开发技术减少城市水文特征改变的目标相辅相成。规划中,充分利用不同微地形的特点和景观营造需求,选择适宜的低影响开发措施,在增添环境体验的同时,还有助于雨水的蓄渗和净化,达到排水防涝安全、雨水资源利用和景观环境改善的统一。例如,结合滨水过渡区设置植被缓冲带,结合道路绿化设置植草沟,结合公共休闲区域设置下凹式雨水花园和生态树池,结合建筑与小区设置高位花坛和下沉式绿地等。

3.3 下垫面结构

雨水系统所研究的下垫面主要是指城市地表的覆盖情况,下垫面结构对径流的形成和流动具有直接影响。在自然地表中,岩石地表孔隙度小,降雨形成的径流较多;土壤地表组织疏松,降雨形成的径流较少;湿地、滩涂水网密布,地表径流则更少。但人类的生活在很大程度上改变了原有的地表特征,尤其在在我国,城市开发强度普遍较大,导致了下垫面结构的改变,硬质地面增加,透水性能下降,场地水文特征发生了很大变化。根据《室外排水设计规范》(GB50014—2006) 2016版的要求,我国目前针对不同用地所采用的地面种类规定了在0—1之间不同的径流系数,用以计算区域降雨所能形成的径流量。其中,绿地较为接近场地开发前的自然环境,雨水蓄渗的比例较高;而混凝土、沥青等硬质地面的径流系数较大,降雨易于在地面集中,产生积水。在城市规划中,一般通过用地性质、绿地

率、建筑密度等综合判断各地块的径流系数,从而计算得到不同排水分区的综合径流系数。综合径流系数越高,则排水压力越大。随着近年来极端天气频发、系统维护不足等问题凸显,加之对经济投资的考量,完全依赖水管渠设计标准的提高来改善排水问题不具现实性。因此,针对综合径流系数较高的排水分区,采用源头控制策略,通过渗、滞、蓄、净、用、排等不同尺度的低影响开发措施,能够在提高环境质量的同时,降低区域的综合径流系数,缓解管渠系统的压力。

3.3.1 建筑与小区

在满足适用条件的前提下,建筑物可以根据屋顶设计参数考虑引入绿色屋顶,通过植物和种植土壤滞留雨水,以削减径流总量和径流污染。研究表明,绿色屋顶在夏天可以滞留70%—90%的降雨,冬季可以滞留25%—40%的降雨^[10];同时,对雨水径流中氮、磷含量的去除率均能达到60%以上^[11]。

居住小区绿地与建筑联系密切,可以设置低于散水和周围地面的生物滞留池和雨水花园,种植耐淹的植物品种,并设置雨水口(顶面标高应高于绿地20—50 mm),引导屋面雨水进入绿地,起到缓冲径流的作用,即使在霜冻期仍然能够通过渗透和蒸发作用调蓄、净化降雨和屋面雨水径流^[12],而且能够提升区域的景观水平和娱乐功能。

学校与体育场具有集雨面积广、水质优良的特点,是建设雨水回用设施的最佳场所。在雨量充沛的季节进行雨水收集,可以作为道路绿地浇洒、环境补充,甚至周边生活杂用水的水源,在缓解水资源短缺矛盾的同时,还可以改善水环境,实现水资源利用的良性循环。

3.3.2 道路与停车场

传统的城市道路一般采用水泥、沥青等不透水材质,硬化程度较高,与建设前相比,水文条件的改变会造成降雨时的径流难以控制。

在道路的路面结构设计中,机动车道采用透水沥青路面,高达20%的孔隙度能够促进雨水下渗,提高路面的抗滑性,缓解城市的“热岛效应”,并且能降低路面噪音相当于交通车

辆减少一半^[13],极大地提高了驾驶的舒适性和安全性。

停车场采用透水砖铺装,促进雨水入渗,还可以利用周边绿地系统透水性好,在透水砖下部增设砂砾透水带,与周边绿地系统贯通,极大地提高透水砖的透水效果。

3.3.3 绿地与广场

城市中的公园绿地、生态绿地具有较大面积的可利用空间,是实施低影响开发技术的重要区域。以下凹式布置为主,较普通绿地而言,能够利用其与周边地面的高程差,有效蓄渗雨水、削减洪峰流量、减轻地表径流污染^[14]。此外,根据绿地不同的位置,可以在滨水区引入雨水湿地,在城市内部引入渗透塘和地下调蓄池。这不仅丰富了城市的景观空间,同时达到了综合管理雨水的目的。

广场在实施透水铺装的同时,可以设置分散式的生态树池、跌水花坛、雨水花园等生态设施,形成景观小品。

3.3.4 城市水系

水系是城市水循环的重要环节,也是城市雨水径流的末端。通过沿水系设置生态驳岸,在滨水区设置植被缓冲带、湿塘等低影响开发措施,能够降低流量、流速和污染负荷,改善水质与景观环境。

3.4 土壤条件

土壤条件与低影响开发设施的选择密切相关。根据土壤类型的不同,砂土孔隙度高,具备较好的渗透能力,渗透系数可达 6.0×10^{-5} 以上;壤土次之;粘土质地厚重,渗透能力较差,渗透系数一般在 4.0×10^{-6} 以下。因此,根据规划区域的土壤组成与分布情况,能够初步判断其渗透能力。针对土壤渗透能力好的地区,采用下沉式绿地、生物滞留设施、渗透塘等以渗透为主的低影响开发设施具有较好的实施效果;反之,在土壤渗透能力较差的地区,需要进一步考量渗透型低影响开发设施的适用性。

各项低影响开发技术只有与城市的实际特征相契合,才能实现城市的良性水文循环,

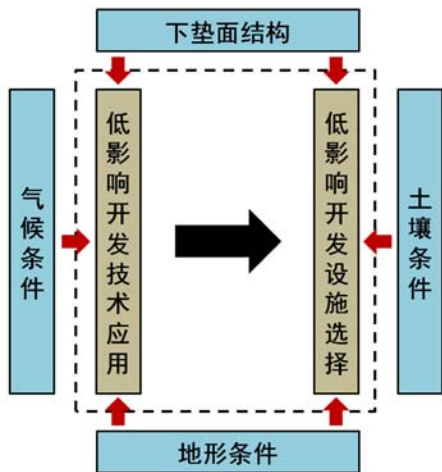


图2 低影响开发技术应用的主要环境因素
资料来源:笔者自绘。

改善城市开发密集区内涝灾害频发的局面(图2)。

4 海南国际旅游岛先行试验区低影响开发技术规划案例

海南国际旅游岛先行试验区(图3)位于海南省陵水县东南部,毗邻三亚,规划控制范围64.72 km²,人口18万。试验区的规划定位较高,作为国家旅游文化先行区,一方面可以更好地建立安全舒适的旅游居住环境,带动先行区的政治、经济和文化发展;另一方面也为排水系统带来巨大压力,尤其在现状排水设施匮乏、雨污水散排的情况下,不仅在低洼地区极易造成积水,而且环境品质难以提升。

试验区雨水系统的研究主要针对度假城市、活力山城、艺术复合水城及白鹭岛和热带海滩4大主要功能区。

4.1 试验区低影响开发技术的适用性分析

为约束和落实低影响开发技术在各片区的建设,研究分析了当地的气象、地形、下垫面结构、土壤类型等因素,考查了不同低影响开发措施在各片区的适用性。

从气候的角度,试验区属热带季风海洋性气候,降水充沛。在雨量集中的6—10月,暴雨常伴随台风、热带风暴等灾害性天气出现,

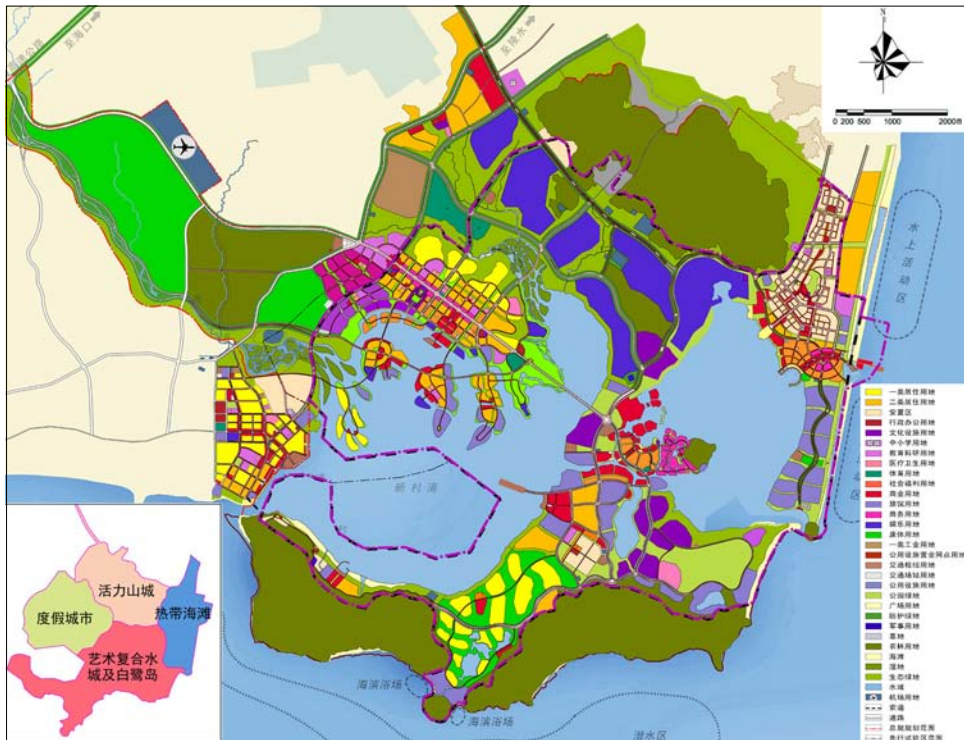


图3 规划区用地布局图
资料来源:《海南国际旅游岛先行试验区控制性详细规划(2012—2030)》。

对城市建成区的排水系统冲击较大。

从地形的角度,试验区为丘陵—岸坝—泻湖地貌(图4)。东北、西南分布有东高岭、长水岭、南湾自然保护区等山地,地势高、坡度大;东南、西北是城市开发的核心地区,地势低、坡度小,其中度假城市西南部、活力山城西北部,以及热带海滩西南部整体地势低洼,是排水防涝的重点地区。

从下垫面结构的分析:水占据了试验区大半视野,保护两大泻湖区的水生态系统,避免城市开发对水环境造成破坏,是规划的重要前提。活力山城和白鹭岛片区以生态休闲为景观特色,集中设置了大型的面状绿地,对原有的生态空间和自然水文特征的改变较小。艺术复合水城、度假城市和热带海滩以滨水娱乐、商务休闲为主导,因此在用地布局上主要考虑公共管理与公共服务设施用地和商业服务业设施用地,开发建设强度和人口密度相对较大,不透水地面的比例较高,排水压力也较大(图5)。

从土壤类型的角度分析:试验区位于沿海地带,以沙土、壤土为主,渗透能力好。

结合上述因素,以降雨、地形、地表覆盖特征等基础条件为框架,采用Infoworks ICM排水模型软件对试验区进行地表径流的模拟(图6),红色由浅至深表示地表积水深度由小到大。分析可知:试验区滨水区域作为陆地与水系的过渡地带,地势较低,具有引导径流进入受纳水体的作用,因此积水深度相对较大;除此之外,内陆洼地和径流泄通道主要分布在热带海滩中部、艺术复合水城及白鹭岛中部、活力山城片区。

综上所述,试验区对低影响开发技术的需求程度较高。针对活力山城北部东高岭、长水岭,两大泻湖以及白鹭岛南部南湾自然保护区,低影响开发的策略以生态保护为主,设施布置为辅。针对度假城市、热带海滩等城市开发核心区域,设置大型低影响开发设施的可行性较低,因此低影响开发的策略主要为源头分散控制,以降低片区的综合径流系数。

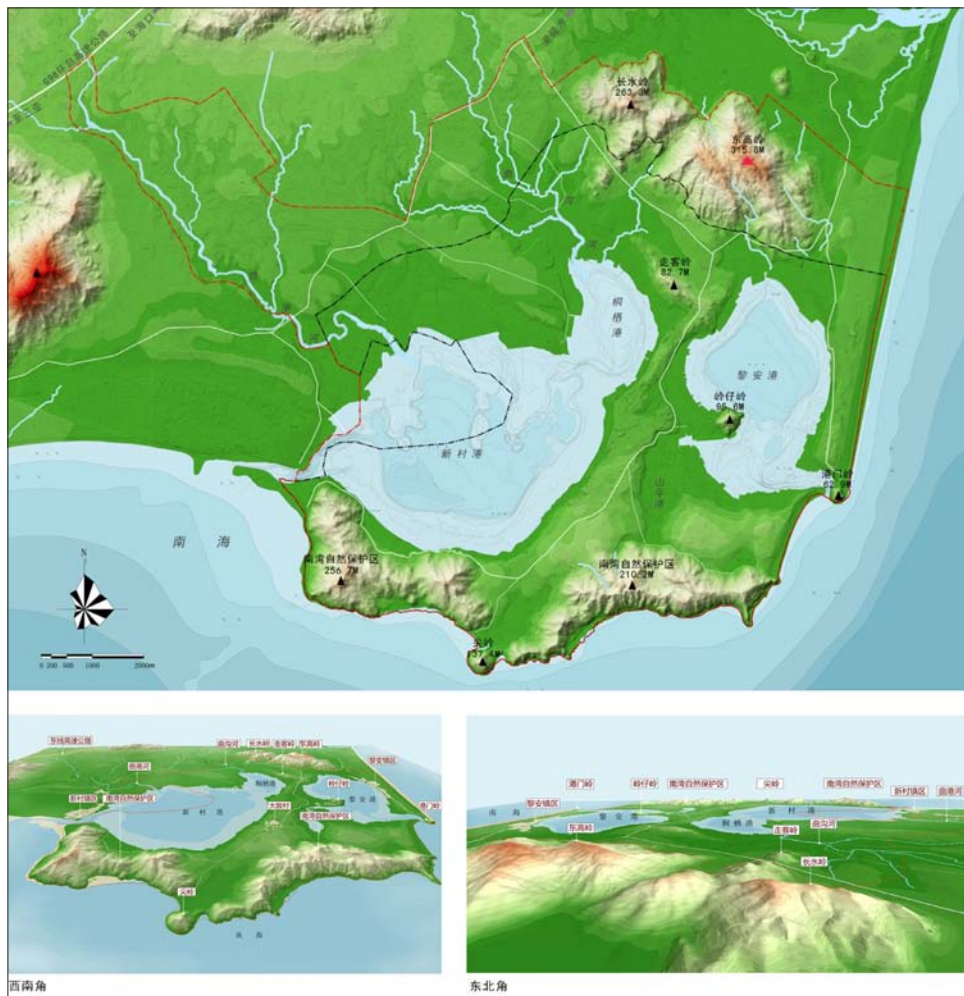


图4 规划区地形分析图
资料来源:笔者自绘。

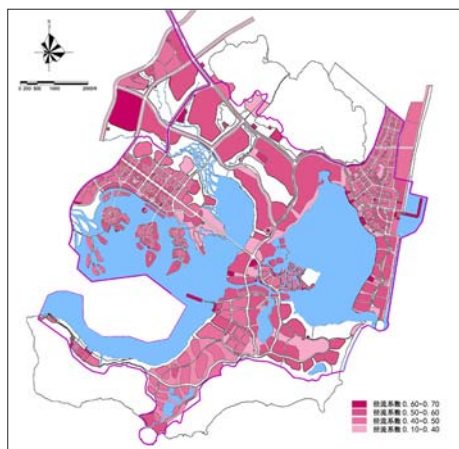


图5 径流系数分析图
资料来源:笔者自绘。

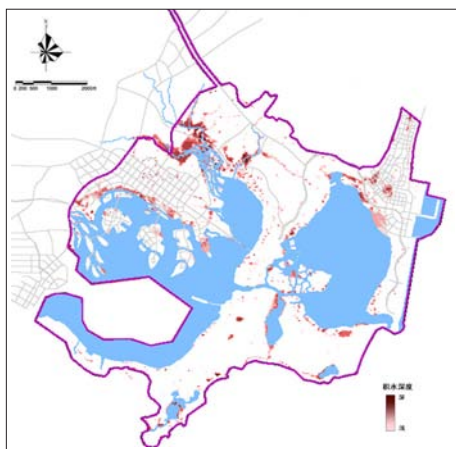


图6 地表径流分析图
资料来源:笔者自绘。

4.2 试验区低影响开发技术的应用

根据分析结果,将城市雨水管渠系统与低

影响开发雨水系统有机结合在一起,在度假城市、热带海滩、艺术复合水域及白鹭岛片区的

核心地区建立散点式和条带式低影响开发设施,同时辅以传统的雨水管渠系统,组织径流雨水排放;在活力山城片区,以及度假城市、热带海滩、艺术复合水域与白鹭岛片区的滨水区和绿地区,建立生态雨水系统,利用低影响开发措施的渗透、储存、调节、转输、净化等功能控制径流量和径流污染。

在此基础上,统筹分析低影响开发措施对区域雨水径流的影响,建立各分区低影响开发的控制指标系统(表1),各分区的控制目标通过不同用地的规划指标加权平均进行校核。

其中,下沉式绿地率=广义的下沉式绿地^①面积/绿地总面积。活力山城、艺术复合水域与白鹭岛开发与保护并行,绿地以维持生态化为主;度假城市与热带海滩在城市建设过程中,以大型的雨水湿地与小型的雨水花园、生物滞留池等设施相结合,增加雨水调蓄空间。

透水铺装率=透水铺装面积/硬化地面总面积。透水铺装重点结合公园、广场、停车场、人行道、建筑前空地、小区内部场地等区域建设,机动车道不采用透水铺装形式。

绿色屋顶率=绿色屋顶面积/建筑屋顶总面积。绿地屋顶主要结合平屋顶的多层建筑布置。

雨量径流系数指设定时间内降雨产生的径流总量与总雨量之比。雨量径流系数根据规范中各下垫面条件的参考取值,结合绿地率、建筑密度,以及本次研究确定的下沉式绿地率、透水铺装率、绿色屋顶率综合计算确定,用以核算低影响开发设施的雨水调蓄总容积。

根据上述指标要求,从集水区特点、经济性、景观性、维护及公众接受度等因素出发,结合国内外的研究与应用,试验区建立了由面状海绵体、点状海绵体和线状海绵体等组成的多层次、多要素的生态雨水系统(图7)。

面状海绵体主要依托规模较大的绿地设置。城市内部公共绿地尽量布置为下凹式,同时配合雨水收集措施建设回用系统;河口湿

注释 ① 广义的下沉式绿地泛指具有一定调蓄容积的可用于调蓄径流雨水的绿地,包括生物滞留设施、渗透塘、湿塘、雨水湿地等;下沉深度指下沉式绿地低于周边铺砌地面或道路的平均深度。



图7 生态雨水系统布局图
资料来源:笔者自绘。

平衡,在曲港河与曲沟河河口建设湿地缓冲区进行舒缓。

以试验区内广场、停车场、学校、体育场、建筑单体、居住小区及街区绿地为点状海绵体,通过蓄、渗、净、用等源头分散式的措施减小场地水文特征的改变。

线状海绵体主要指市政道路、步行道与水系,将试验区各个片区有机串连起来。市政道路引入透水铺装的基础上,由于活力山城、白鹭岛等地区的城市开发强度不大,雨水径流相对较少,综合分析道路的等级和断面形式,分别从中央分隔带、机非分隔带、道路红线外空间等角度入手,引入植草沟、树池、下凹式绿地、雨水花园等措施^[15-16],不再建设雨水管渠系统。例如,考虑到文黎大道延伸线侧分带宽度小、人行道下设置有综合管廊,在中央分隔带和环形交叉转盘内设置低影响开发系统,主要由植草沟、溢流井、集水井(检查井)、预制挡块、纵横向雨水管及路面侧缘防水铺装组成(图8),设置长度达13.58 km;南湾路外侧绿化带下设置滞留池,雨水沿机动车道横向排入滞留池,通过滞留池自然下渗,暴雨期间,超出滞留池接纳能力、无法及时入渗的雨水通过溢流井及集水井进入雨水管网(图9)。

在度假城市与热带海滩片区设置多条绿色廊道,降低城市核心区市政管网的雨水负

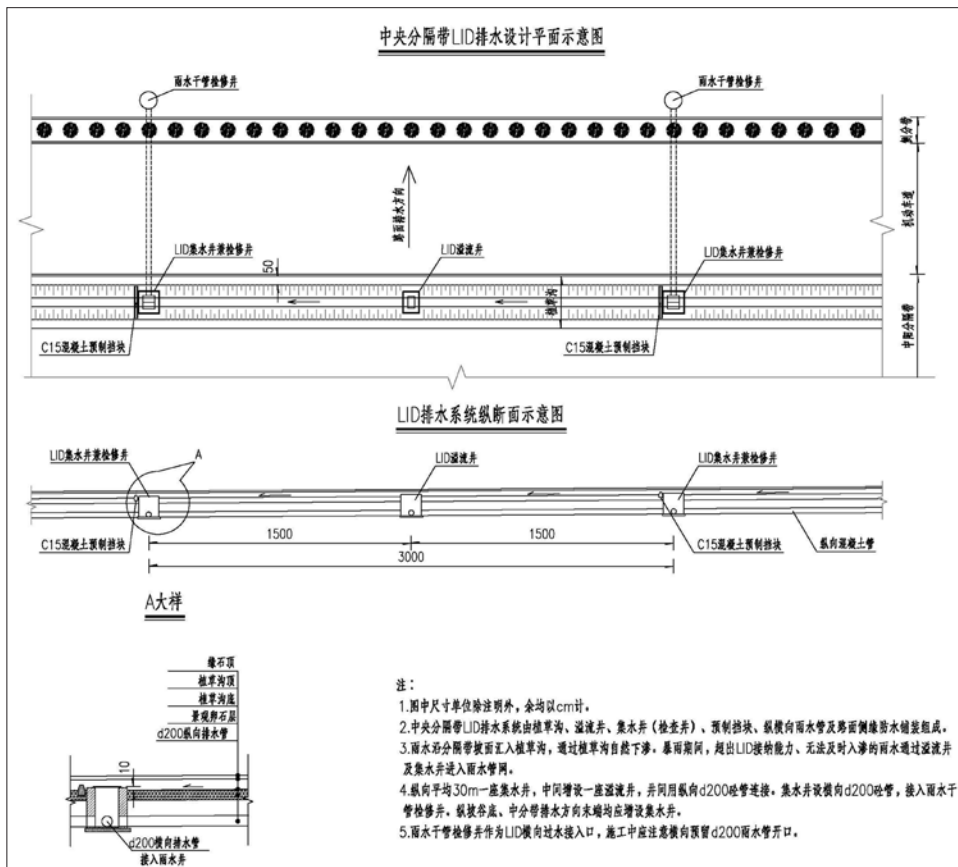


图8 中央分隔带LID系统设计图
资料来源:《海南国际旅游岛先行试验区文黎大道延伸线工程初步设计》。

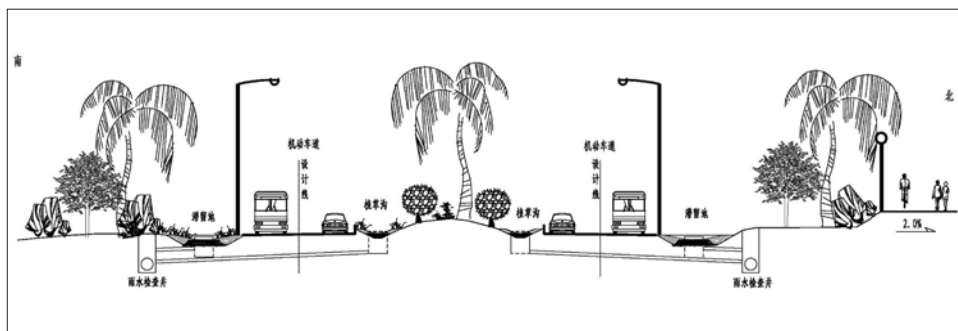


图9 道路LID系统典型断面示意图
资料来源:《海南国际旅游岛先行试验区南湾路工程初步设计》。

表1 试验区低影响开发的主要控制指标

控制指标	分区目标			
	度假城市	活力山城	热带海滩	艺术复合水城与白鹭岛
下沉式绿地率 (%)	40	20	45	35
透水铺装率 (%)	50	55	50	55
绿色屋顶率 (%)	10	10	5	10
综合雨量径流系数	≤0.45	≤0.4	≤0.45	≤0.4

资料来源:笔者自制。

荷,同时借鉴嘉兴等城市的经验,将各个景点、娱乐区有机地串联起来,实现城市分散景点在空间和功能上的整合^[17]。此外,试验区“两河、两泻湖”的水系布局为雨水提供了充足的调蓄空间,结合试验区防洪潮工程规划,建立河岸生态过渡带,使之成为联系自然景观资源和公共空间的桥梁。

5 结语

低影响开发对城市的生态和谐,乃至可持续发展具有重大的意义。其应用与城市的气候、地形、下垫面结构、土壤条件乃至各个地块的开发建设强度、周边环境等息息相关。笔者通过对海南国际旅游岛先行试验区低影响开发技术规划案例的解析,明确了:在规划设计过程中,只有立足实际,因地制宜分析城市需求以及不同低影响开发设施的适用性,采取相匹配的技术方案,才能使低影响开发技术发挥其应有的效用。

当然,在研究技术策略的基础上,实践还存在诸多难题。例如,受制于道路红线和施工体制影响,道路低影响开发技术措施只能在红线内进行考量,无法做到与周边地块内的雨水管渠系统和低影响开发系统的统筹协调,这就有赖于在政策法规、管理体制和系统实施机制上的进一步优化与完善。

参考文献 References

- [1] Low impact development manual for Michigan: A design guide for implementors and reviewers[S]. Southeast Michigan Council of Governments Information Center, 2008.
- [2] OLIVIER S, ALAIN T. Odonata, amphibia and environmental characteristics in motorway stormwater retention ponds (Southern France)[J]. *Hydrobiologia*, 2005(551): 237-251.
- [3] WOODS-BALLARD B, KELLAGHER R, MARTIN P, et al. The SUDS manual[Z]. CIRIA, 2007.
- [4] 胡爱兵,任心欣,俞绍武,等. 深圳市创建低影响开发雨水综合利用示范区[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(20): 69-72.
HU Aibing, REN Xinxin, YU Shaowu, et al. Exploration for creating low-impact development stormwater management demonstration area in Shenzhen[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(20): 69-72.
- [5] 丁年,胡爱兵,任心欣. 深圳市光明新区低影响开发市政道路解析[J]. *上海城市规划*, 2012(6): 96-101.
DING Nian, HU Aibing, REN Xinxin. Analysis of LID municipal roads in Guangming New District, Shenzhen[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2012(6): 96-101.
- [6] 丁年,李子富,胡爱兵,等. 深圳前海合作区低影响开发目标及实现途径[J]. *中国给水排水*, 2013(22): 7-10.
DING Nian, LI Zifu, HU Aibing, et al. LID goal and realization approach in Qianhai Cooperative District in Shenzhen[J]. *China Water & Wastewater*, 2013(22): 7-10.
- [7] 李俊奇,王文亮,边静,等. 城市道路雨水生态处置技术及其案例分析[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(16): 60-64.
LI Junqi, WANG Wenliang, BIAN Jing, et al. Eco-technologies and case study on disposal of urban road runoff[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(16): 60-64.
- [8] QUINN P, BEVEN K J, PLANCHON O. The prediction of hillslope flowpaths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrol. Process.*, 1991,5(1): 59-79.
- [9] QUINN P, BEVEN K J, LAMB R. The $\ln(a/\tan \beta)$ index: how to calculate it and how to use it in the TOPMODEL framework[J]. *Hydrological. Process.*, 1994(9): 161-185.
- [10] 刘保莉,曹文志. 可持续雨洪管理新策略:低影响开发雨洪管理[J]. *太原师范学院学报(自然科学版)*, 2009, 8(2): 111-115.
LIU Baoli, CAO Wenzhi. New strategies of sustainable stormwater management: low impact development in stormwater management[J]. *Journal of Taiyuan Normal University(natural science edition)*, 2009, 8(2): 111-115.
- [11] 段丙政,赵建伟,高勇,等. 绿色屋顶对屋面径流污染的控制效应[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(9): 57-59.
DUAN Bingzheng, ZHAO Jianwei, GAO Yong, et al. Control effect of green roofs on roof runoff pollutants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(9): 57-59.
- [12] DIETZ M E, CLAUSEN J C. Saturation to improve pollutant retention in a rain garden[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(4): 1335-1340.
- [13] 张红章,范卫琴. 透水性沥青路面性能分析[J]. *交通科技与经济*, 2009(1): 11-13.
ZHANG Hongzhang, FAN Weiqin. The analysis and study on the performance of the permeable asphalt pavement[J]. *Technology & Economy in Areas of Communications*, 2009(1): 11-13.
- [14] 程江,徐启新,杨凯,等. 下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J]. *给水排水*, 2007, 33(5): 45-49.
CHENG Jiang, XU Qixin, YANG Kai, et al. Rainfall penetration and storage effect and influencing factors of sunken green space[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 33(5): 45-49.
- [15] 陈宏亮. 基于低影响开发的道路雨水系统衔接关系研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2013.
CHEN Hongliang. Study on the cohesive relationship of urban stormwater system based on low impact development technologies[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.
- [16] 赵萌. 基于低影响开发的北京科技园雨水景观规划设计研究——以中关村生命科学园三期为例[C]//城乡治理与规划改革——2014中国城市规划年会论文集, 2014.
ZHAO Meng. Research on rainwater landscape planning and design in Beijing Science Park based on low impact development technologies: a case study of the second phase of Zhongguan Village Life Science Park[C]//Urban-rural governance and planning reform: proceedings of annual national planning conference 2014, 2014.
- [17] 林海,熊志远. 具有综合功能的生态绿道规划——以嘉兴生态绿道为例[J]. *园林*, 2011(7): 24-27.
LIN Hai, XIONG Zhiyuan. Plan of urban ecological greenway with integrated functions: a case study of ecological greenway in Jiaxing[J]. *Garden*, 2011(7): 24-27.