

Typical Control System and Technical Measures of Urban Stormwater

Yue Yao¹, Xiaoting Wang^{2*}, Siyu Zeng², Haifeng Jia²

¹China Academy of Urban Planning & Design, Beijing

²School of Environment, Tsinghua University, Beijing

Email: yaoyue.0901@163.com, *wxt_2011@126.com

Received: Nov. 24th, 2019; accepted: Dec. 11th, 2019; published: Dec. 18th, 2019

Abstract

Urban waterlogging draws people's attention to urban stormwater management. This article differentiated and analyzed several typical urban stormwater management systems, elaborated the changes of urban water cycles and water sensitive urban designs; discussed stormwater treatment performances of function, particle size removal and applicability. And the case study is about the Sino-German rainwater utilization project, analyzed current problems of this project with consideration of original design plans and field study results, and gave varied suggestions to the urban stormwater management.

Keywords

Urban Stormwater, Stormwater Management, LID, Stormwater Treatment

城市暴雨径流的典型控制体系和技术措施

姚越¹, 王小婷^{2*}, 曾思育², 贾海峰²

¹中国城市规划设计研究院, 北京

²清华大学环境学院, 北京

Email: yaoyue.0901@163.com, *wxt_2011@126.com

收稿日期: 2019年11月24日; 录用日期: 2019年12月11日; 发布日期: 2019年12月18日

摘要

城市内涝问题使人们关注城市雨洪控制。本文辨析了城市暴雨径流的典型控制体系, 举例阐述城市水循环开发思路和暴雨径流控制设计思路的改变; 论述了雨洪控制的技术措施, 从功能、去除颗粒物的粒径

*通讯作者。

和适用性三个角度分析技术措施的运行效果。以北京市中德合作雨水利用项目为案例，结合案例的设计意向和项目运行情况，分析工程设计存在的问题并对雨洪管理提出相应建议。

关键词

城市暴雨径流，暴雨管理，LID，雨洪控制技术措施

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市的不断发展，城市规模急剧扩张，人口快速增长，使得城市大大增加生活用水需求，水资源开发利用的形势面临巨大压力。同时随着城市化进程的推进，城市不透水地表面积显著增加，对蒸发、下渗等天然流域的水文循环过程产生了重要影响，从而导致城市地表径流量和峰值流量增加，峰值发生时间提前。城市水文循环的变化增大了城市内涝发生的风险，带来了严重的城市水体污染[1] [2]。

在一场降雨中，暴雨所形成的径流通过地上、地下的管道及沟渠等排水系统迅速收集、运送、转移，再通过城市排水干线排泄到自然水道中。随着城市化程度日益提高，暴雨造成的地表径流汇流时间缩短，其流量、径流峰值和峰值频率提高，超出城市原有排水设施的排水能力。同时，暴雨雨水流经街道、停车场、工业和居住区等城市区域的时候，收集和携带油脂、沉积物、来自于化肥和杀虫剂的化学制品、有机垃圾等污染物，这些污染物随着暴雨径流而转移，其中一部分渗入土壤及地下水源，成为城市地下水主要污染源之一，而大部分随着地表径流从建筑场地直接排入沟渠及排水管道，最终流入溪流、河道，造成接纳水体环境水质污染，导致城市及其周边水生态系统的整体退化[2]。在水资源短缺加剧和排水能耗费用高的前提下，代价高的集中处理不是经济可行的方案，取而代之的是对暴雨径流的源头控制和雨水资源回用，暴雨径流管理应运而生。

同时，特大暴雨事件频发也从自然的角度的角度表明暴雨径流管理势在必行。2012年7月21日，北京及其周边地区遭遇61年来最强暴雨及内涝灾害。全市平均雨量为170毫米，城区平均为215毫米，最大房山河北镇460毫米。此次特大暴雨造成79人死亡，160.2万人受灾，经济损失116.4亿元[3] [4]。暴雨带来的内涝而受到影响的的城市不仅发生在北京，长春、南京、南昌、成都等中国从北到南的许多城市在近几年都曾经历过城区内涝[5] [6] [7] [8]。暴雨导致的内涝事件严重影响了城市的正常运转和居民的日常生活。此外，我国城市水资源总体形势十分严峻，生活用水量和工业用水量不断升高，而城市水源水质却不断恶化，很多城市资源型缺水和水质型缺水的问题日益突出[9]。因此，采取综合的城市暴雨径流控制体系和技术措施应对城市防洪、地表径流污染和雨水资源利用等问题，对于缓解我国城市内涝问题和水资源压力具有重大意义。

本文通过整理归纳已有研究资料，分析城市暴雨径流的典型控制体系和技术措施，将以北京市中德合作雨水利用项目作为案例，着重研究现有雨水利用工程设计和运行中的问题并提出相关建议。

2. 暴雨径流控制体系

由于城市化建设导致降雨形成的面源污染呈现出径流量大、冲击性强、涉及面广的特点，城市防洪、地表径流污染和雨水资源利用就需要综合的应对措施。在过去的几十年里，各国研究人员针对城市暴雨

径流控制技术开展了大量的研究和应用工作,积累了丰富的经验,并形成了相对系统的城市暴雨径流控制体系。该体系的典型之处在于利用适当的技术削减流量峰值、降低直排污染物浓度,因地制宜进行生态设计和工程或者非工程措施建设,从源到汇对径流和污染物进行全过程控制管理,实现城市开发前后其水文功能基本保持不变的状态。

暴雨径流控制体系,从最早美国的最佳管理实践 Best Management Practice (BMP)和低影响开发 Low Impact Development (LID),发展到英国的可持续城市排水系统 Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)和新西兰的低影响城市设计与开发 Low Impact Urban Design and Development (LIUDD) [10],再发展到二十一世纪的水敏性城市设计 Water Sensitive Urban Design (WSUD)和 Active, Beautiful Clean water 计划 (ABC)。

2.1. 控制体系的辨析

为了更加清晰的分别比较不同控制体系的特点,本文在已有研究[11]的基础上稍作修改,选取了 BMP、LID、WSUD 和 ABC 四种体系进行对比,详见表 1。

Table 1. Analysis on typical control system of urban stormwater

表 1. 城市暴雨径流控制体系辨析

类别	BMP Best Management Practice	LID Low Impact Development	WSUD Water Sensitivity Urban Design	ABC Active, Beautiful Clean Water
国家	美国	美加、欧洲	澳大利亚	新加坡
	流域尺度 水质控制	小尺度源头 控制	源头 水质水量控制	河道水库 改造
特点	从系统角度出发 在暴雨进入水体前进行 流域控制 主要关注水质	在微观区域 对源头采用保护 天然地表的措施 控制暴雨径流污染	将雨水在源头 进行收集控制 强调将暴雨径流和天然河道 作为资源进行利用	河道水库 清淤疏浚 美化环境 配套建立 休闲设施

BMP 的特点是在污染物进入水体前通过各种经济高效、满足生态环境要求的措施使得地表径流污染得到有效控制,概括起来则是对流域尺度的水质进行控制。美国环保署广泛使用 BMP 在城市非点源污染及与城市排水系统相关的污染管理上[12],实践证明 BMP 是一套较为有效的径流控制措施[13]。

随着工程中使用经验的积累和研究的深入,研究人员逐步发现:传统的控制措施如滞留塘等的成本太高,且难以达到水质目标。从 20 世纪 90 年代开始,美国马里兰州乔治王子郡的专家开始研究建立一种基于源头控制的多点微观暴雨控制策略[14],它就是低影响开发。LID 主要在小流域内采用或保护天然的水文控制措施,包括渗透、过滤、蓄存、挥发和滞留等,将径流控制在源头[11]。

借鉴了 BMP 和 LID 的经验,各国的研究和管理者综合本国特点先后形成了不同的暴雨管理控制体系。如澳大利亚的 WSUD,英国的 SUDS,新西兰的 LIUDD 和新加坡的 ABC 计划。WUSD 强调将暴雨径流和天然河道作为资源进行利用而不是在暴雨时尽快将雨水排出[15]。WSUD 的侧重是源头的水质水量控制。

新加坡从 2006 年起推出“活跃美丽和干净的水计划”,即 ABC 计划。ABC 计划除了改造国家的水体排放功能,供水到美丽和干净的河流和水库之外,还为市民提供了新的休闲娱乐空间。截止 2030 年,ABC 计划将有超过 100 多个项目被确立阶段性实施,拉近了人与水的距离。

2.2. 城市水循环开发思路的改变暴雨径流控制设计思路的改变

不同种类的暴雨径流控制体系协调的都是人类活动与城市自然的水文循环过程之间的关系。在这些控制体系的指导下,城市水循环也被赋予了新的内容。以水敏性城市设计 WSUD 为例,图 1 比较了城市水循环的不同开发思路。图中蓝色箭头代表自然过程,而黄色箭头则是人为过程。将水敏性城市设计水平衡与城市水平衡做一个比较,可以发现水敏性城市设计水平衡增加了蒸发、渗透、径流这三种自然过程,减少了饮用水的使用和污水的排放,回用了暴雨和污水。该设计思路总体上改善了自然径流过程,减少了人为径流。

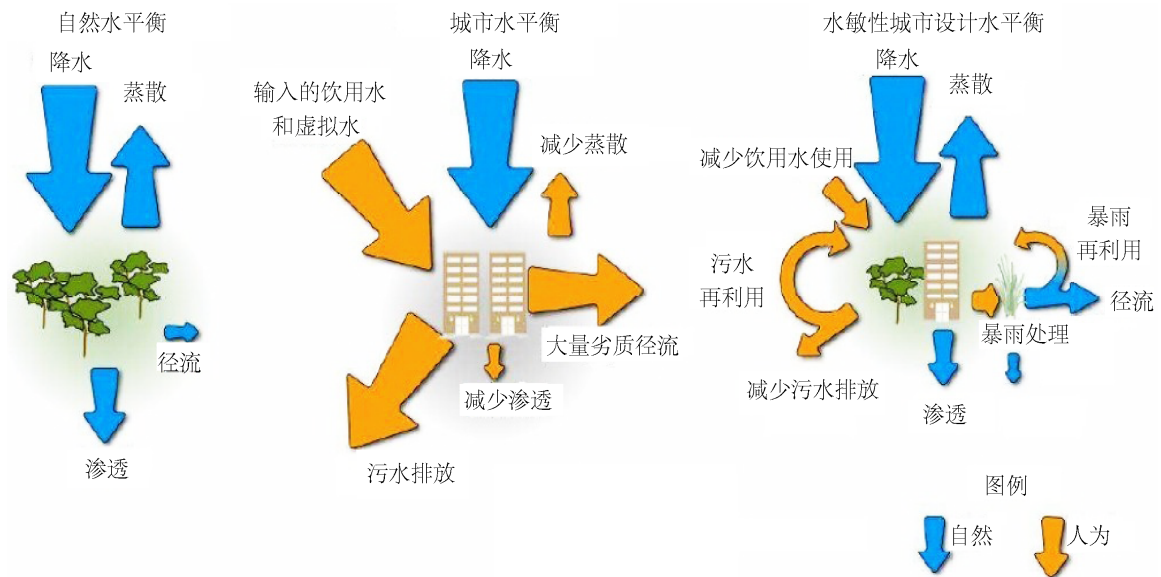


Figure 1. Comparison of different development ideas of urban water cycle
图 1. 城市水循环不同开发思路的比较

2.3. 暴雨径流控制设计思路的改变

新型城市水循环的开发思路给城市设计带来了改变。以公共开发空间为例,图 2 比较了暴雨控制设计与传统设计截然不同的设计思路。在传统设计中,建筑是工整地排列,雨水和污水是通过集中官网,收集处理。而在暴雨控制设计中,引入了与开放空间相整合的水池,邻里中心等多种景观,水系环流整个街区。据此可以总结出暴雨控制设计的五个特点[16]:保证接纳水体水质;减少径流和峰值流量,通过合理布置下渗池、透水铺装等措施降低下游流量峰值;保护天然水系,在城市发展过程中使其充分发挥作用;最小化排水设施的成本,在减少城市发展成本的同时增加效益,并使景观得到改善,从而提升区域价值;将暴雨处理手段整合进景观,将雨水作为一种景观要素。在暴雨控制设计中,水是关键,要综合考虑水质、水量、水系、水处理设计和亲水景观。

3. 暴雨径流的技术措施

尽管不同国家都发展出各具特色的暴雨径流控制体系,但其中的技术措施基本一致。本文具体以低影响开发 LID 来阐述暴雨径流的技术措施。LID 以不增加城市基础设施负担为原则,通过分散的、小规模源头控制,综合采用入渗、过滤、蒸发等方式减少径流排水量,减少下游排水管道的尺寸,恢复区域的自然水文功能,补充地下水[11],图 3 列出了常见的 LID 技术示范。

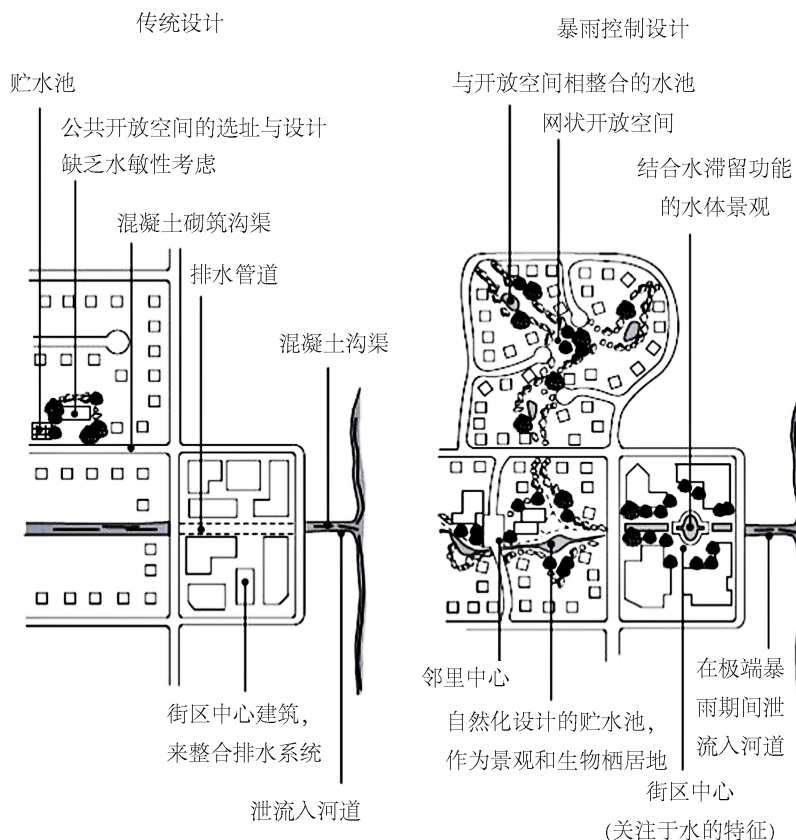


Figure 2. Public open space: comparison between traditional design and storm control design [16]

图 2. 公共开放空间：传统设计与暴雨控制设计的比较[16]

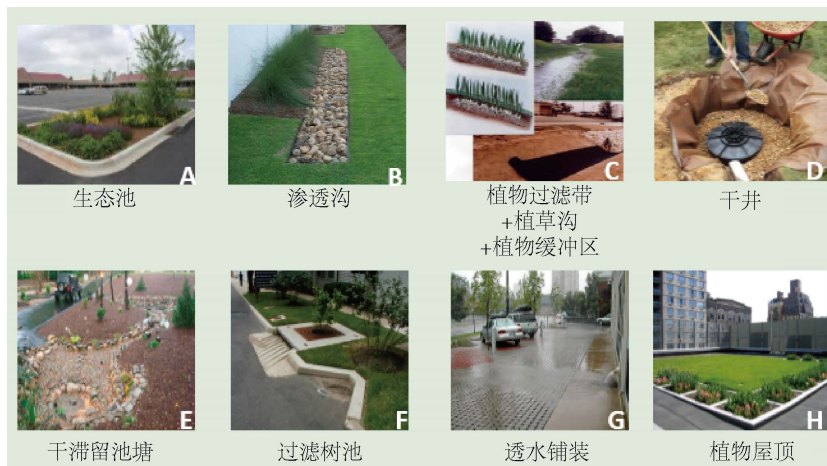


Figure 3. Treatment demonstration of LID (A-H)

图 3. LID 的技术示范(A-H)

不同的 LID 技术措施在其功能、去除颗粒物、适用条件和费用方面有很大的差异，因地制宜进行一种或多种措施的配置是可持续发展技术的核心之一。表 2 列出了八种主要的 LID 技术，并对其功能、去除颗粒物的粒径和适用性三个方面的表现进行了比较分析。

Table 2. Summary of treatment function, applicability and cost of eight LID techniques
表 2. 8 种 LID 技术功能、适用性和费用的总结比较

技术措施	生态滞留 草沟 Bioretention swales	生态滞留池 Bioretention basins/ raingardens	植被缓冲带 Vegetated swales/ buffer strips	砂滤池 Sand filters	沉淀池 Sedimentation basins	人工湿地 Constructed wetlands	池塘和浅湖 Ponds and shallow lakes	雨水罐 Rainwater tanks	
水质处理	√√√	√√√	√√√	√√√	√√√	√√√	√	√	
功能									
流量衰减	√√	√√	√√	√√	√√	√√√	√√√	√√√	
暴雨输送	√√√	√	√√√	√	√	√	√	√	
去除颗粒物的 粒径									
粗 - 中粒径 5000 μm~ 125 μm	√√	√√√	√√	√√√	√√√	√√			
细粒径 125 μm~ 10 μm	√√√	√√√	√√√	√√√	√√√	√√√			
极细/胶体 10 μm~ 0.45 μm	√√	√	√√	√		√√√			
溶解态 <0.45 μm									
主导附加功能		景观价值	美学价值 + 栖息地		景观价值	栖息地 + 娱乐功能	栖息地 + 娱乐功能	暴雨回用	
场合	中央种植隔 离带	街道	中央种植隔 离带/公园	街道	湿地的前处 理	公园/空地	美学价值/湿 地的后处理	个人拥有	
适用性	占地	大, 限制进入	有限空间	大, 限制进入	有限空间	大	大	大	有限空间
	斜度	平缓 <5%	平地	平缓 <5%	陡坡	平地	平地	陡坡	不限制
	流量控制水平	输送	排放	输送	排放	排放	排放	排放	水源
指导性 费用	安装费用	中	中	低	低/中	高	高	高	低
	维护费用	中	中	中/高	中	中/高	中	中	低

注：“√”说明：数量代表指标适用性强弱，数量越多代表该指标适用性越强。安装费用说明：低：小于 500 澳元/每公顷；中：500~1500 澳元/每公顷；高：大于 1500 澳元/每公顷。维护费用说明：低：小于 100 澳元/每年每公顷；中：100~250 澳元/每年每公顷；高：大于 250 澳元/每年每公顷。

3.1. 功能

从表 2 可以看出，前六种 LID 技术都拥有很好的水质处理效果，而池塘浅湖和雨水罐的表现不佳。池塘浅湖通常较少单独使用；雨水罐是一个相对密闭的系统，系统中没有生物进行水质的净化作用，水质处理效果一般。

流量衰减方面，人工湿地、池塘浅湖和雨水罐的效果最好。原因在于人工湿地面积大，抗冲击负荷能力强；池塘浅湖也拥有较大的面积，水流一进入，流量就被快速衰减。

暴雨输送方面，生态滞留草沟和植被缓冲带的效果最好。因为只有这两项技术的水流运动方式是输送，对应表格中“适用性”的“流量控制水平”。相比而言，生态滞留池、砂滤池、沉淀池、人工湿地、池塘和浅湖的径流运动方式是下渗，暴雨输送效果差。

3.2. 去除颗粒物的粒径

在文献数据支撑的前提下，表 2 中的前六种技术去除颗粒物的粒径范围得到了大致的量化[16]，不同

技术对于其可以去除颗粒物粒径的范围表现出不同的优势。

人工湿地去除颗粒物的粒径范围分布最广，从极细/胶体颗粒物到粗 - 中粒径颗粒物。人工湿地是一种低水位、高植被覆盖的水体系统，它主要通过强化沉淀、精细过滤、吸收等过程去除污染物。暴雨径流流入人工湿地系统后，流量衰减明显，流速降低的水流流过高密度植被区，在那里植物将吸收大量的营养物和其他污染物质，因此该技术对于不同粒径的颗粒物去除取得了明显效果[16]。

3.3. 适用性

在适用场合上，沉淀池和池塘浅湖分别作为湿地的前处理和后处理手段。这样沉淀池、湿地和池塘浅湖就形成了一个处理链。沉淀池沉积的是粗 - 中粒径的颗粒物，特别是粒径在 125 μm 以上的颗粒物。而人工湿地沉积物质较多，大颗粒物质经常阻塞系统，沉淀池可以缓解人工湿地的这一问题。人工湿地的水量较大，稳定的出流流出系统，易形成池塘和浅湖。

在占地方面，生态滞留草沟、植被缓冲带、沉淀池、人工湿地、池塘浅湖的面积较大。其中生态滞留草沟和植被缓冲带还被限制进入，这主要是出于两种技术的水深和流速经常超过安全限值，给路过的行人带来风险[16]。

在斜度方面，除了雨水罐之外，其它七种技术的斜度从大到小排序为砂滤池 > 池塘和浅湖 > 生态滞留草沟、植被缓冲带 > 生态滞留池、沉淀池、人工湿地。砂滤池在水处理中用作较大颗粒杂质的过滤，经过改造，可以作为合适的 LID 技术用作较大颗粒物的去除，大斜度的地形有利于去除效果的提高。

4. 案例研究

本文选取由国家科技部和德国联邦教研部(BMBF)的支持下的“北京城区雨洪控制与利用技术研究示范”项目作为案例来说明上述思想、原则和方法在实际情景中的具体应用及不足，旨在为我国其他城市可持续推广雨洪控制利用综合系统模式提供参考。

北京市建立雨洪控制技术体系主要是为了实现充分利用雨水，缓解水资源危机、削减洪峰流量，确保首都防洪安全[17]。建设的示范区包括老城区、新建城区、将建设区、公园绿地、校园的 5 种类型，本文就新建城区和公园绿地的实际运行情况进行探讨。

4.1. 新建城区

新建城区的示范工程位于双紫园小区内，其雨洪利用工艺流程如图 4，通过对屋顶雨水的引流和透水/不透水地面铺装，实现雨水的回收利用。

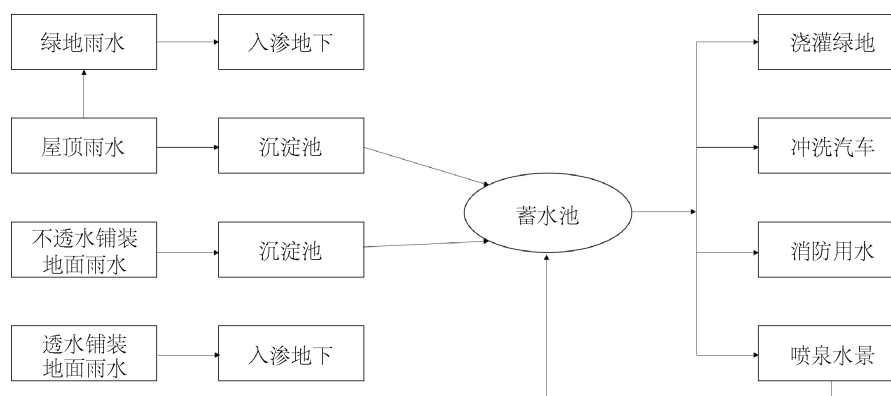


Figure 4. Process flow chart of the rainwater utilization in the new city
图 4. 新建城区雨洪利用工艺流程图

通过实地考察项目运行情况，双紫园小区雨洪控制技术应用存在以下主要问题：

1) 雨水排水管未全部连入滞蓄系统

双紫园小区的设计意向是示范区内的屋顶雨水，一部分直接通过管道收集、传输，经沉淀后，进入蓄水池备用；另外一部分屋顶雨水，先排入周边绿地，通过下凹式绿地，入渗地下。但在小区中的房屋雨水管并未接入蓄水池，并且没有设计中的下凹式绿地。雨水回收利用不仅需要收集，也需要滞蓄，这样才能更有效、更长效地利用雨水。该项目建造了房屋雨水管，却未将雨水管连入地下滞蓄系统，那么雨水依旧只能不均匀地流到邻近的绿地，不能实现相关控制技术目的。

2) 雨水未经过滤进入市政管网，造成二次污染

在双紫园小区内，初期雨水未经过滤进入市政管网。众所周知，降雨的初期径流携带大量污染物质。如果未经过滤直接进入管网，将会造成管网严重的污染。近几年的雨水利用试点项目通常采用初期弃流装置过滤掉初期径流。考虑到雨水利用领域近几年的快速发展，中德项目始于 2000 年，其未对雨水的初期径流问题考虑是一个警示，在未来的设计开发中，初期径流的处置将是关乎雨水水质问题的重中之重。

4.2. 公园绿地

公园绿地示范区位于海淀公园内，其雨洪利用内容包括：屋顶和道路的雨水收集后经处理、回灌地下，同时绿地内采用渗井、渗沟等设施增加入渗能力，雨洪利用工艺流程如图 5。

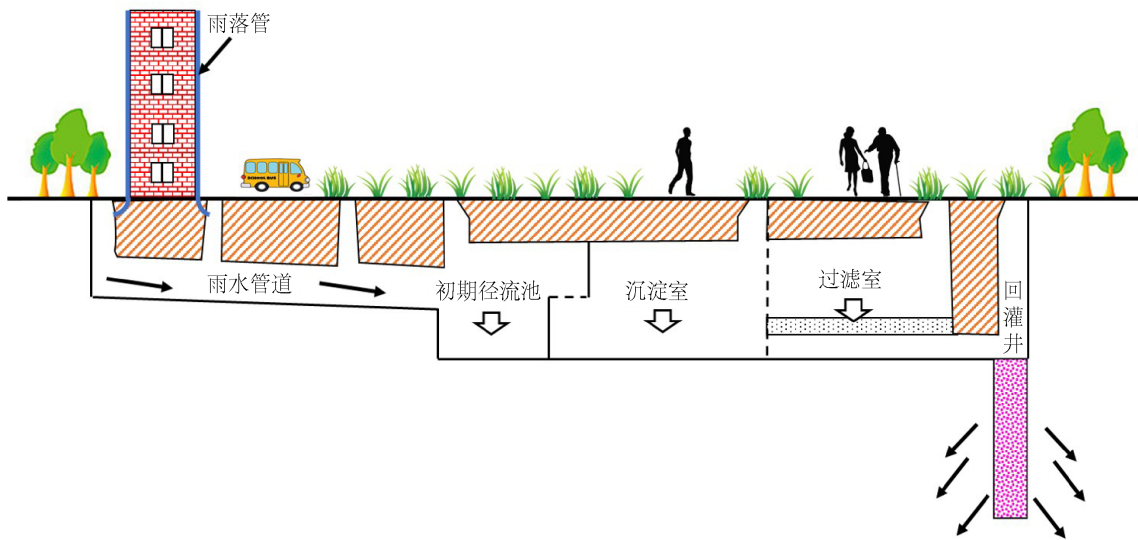


Figure 5. Process flow chart of the rainwater utilization in the park

图 5. 公园广场周边雨洪利用工艺流程图

同样对海淀公园雨洪利用技术应用情况进行评估，发现以下主要问题：

1) 土壤结构层未处理，蓄渗效果有限

海淀公园道路边都采用了透水铺装，由于土壤结构层施工太浅，土壤容纳雨水量少；而且北京气候干燥，土壤易板结，导致雨水很难下渗，降雨落到地面上仍然会发生淤堵。透水铺装作为一种 LID 技术，不仅仅要求是在地表的铺装，更重要的是要求地下土壤结构疏松，具备良好的下渗条件。

2) 绿地雨水向外排，未能将雨水资源化利用

海淀公园在绿地边设计了路缘石开口，但绿地比路面高，降雨发生时绿地雨水排向马路。在国内，规划师和设计者出于保护行人和绿地的目的，将人行道和绿地设计得要比马路高。在雨水利用的发展趋

势下, 设计师将绿地改为下凹式绿地, 将绿地边缘的路缘石做成开口, 使得绿地的低于马路, 雨水更容易流入绿地。LID 带来了城市规划理念的一次革新, 传统设计将不再利于开展雨水利用。

4.3. 现存问题

根据北京市中德雨水利用合作项目部分试点现在运行情况而言, 存在着 LID 设计不完善、施工监理不到位、后期管理程度不够等问题[18], 具体总结详见图 6。比如以设计方面为例, 在项目中只考虑景观的设计: 没有充分考虑结构层的透水铺装; 只考虑排水的设计: 绿地雨水向外排、雨水未经过滤、房屋排水管没有连入滞蓄系统; 只考虑环境的设计: 雨水口高差不对等。

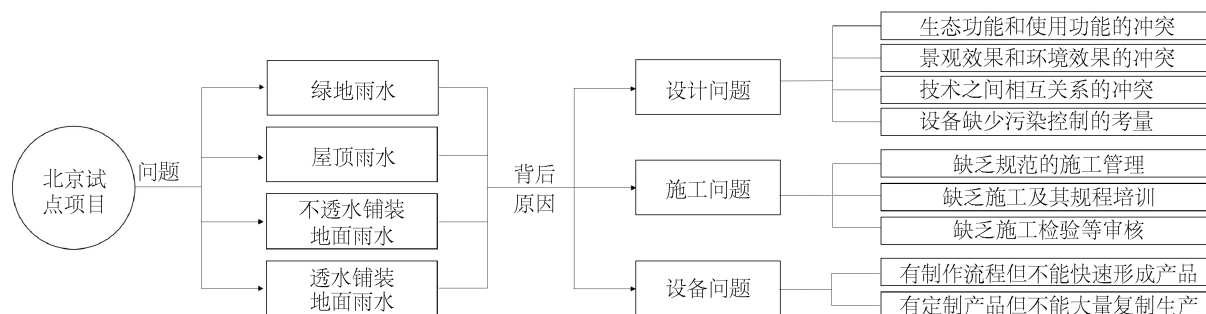


Figure 6. Problem roadmap of the project

图 6. 试点项目问题路线图

5. 小结

本文通过梳理国内外研究应对城市暴雨径流问题而提出的控制技术和管理措施, 辨析了不同技术体系的特点, 结合北京中德雨水利用项目的部分试点, 从其设计理念和运行工况方面进行比较和分析, 发现项目所表现的问题背后实质上有来自设计、施工、监理等方面的深层原因。统一管理机制、相关专业技术规范和法规的缺乏, 导致城市雨洪控制项目从设计到施工到监理运行全流程管理的各个环节出现理念与反馈的冲突, 现存管理体系对于解决国内城市内涝问题仍然任重而道远, 技术与管理并行, 是未来发挥雨洪控制技术体系价值的方向。

参考文献

- [1] Burton Jr., G.A. and Pitt, R. (2001) Stormwater Effects Handbook: A Toolbox for Watershed Managers, Scientists, and Engineers. CRC Press, Boca Raton. <https://doi.org/10.1201/9781420036244>
- [2] 蔡凯臻, 王建国. 城市设计与城市水文管理的整合——澳大利亚水敏性城市设计[J]. 建筑与文化, 2008(7): 96-99.
- [3] 闫雪静. “7·21”特大暴雨造成全市近百亿元经济损失[EB/OL]. <https://m.hexun.com/news/2012-07-23/143848986.html>, 2012-07-23.
- [4] 中国天气网. 北京 21 日至 22 日雨量[EB/OL]. <http://www.weather.com.cn/news/1678331.shtml>, 2012-07-22.
- [5] 张瑶. 长春暴雨引发城市内涝[EB/OL]. <http://www.chinanews.com/tp/hd2011/2013/08-16/236146.shtml>, 2013-08-16.
- [6] 柳一凡. 南京遭遇暴雨袭击城区内涝成河[EB/OL]. <http://news.163.com/photoview/00AN0001/16615.html>, 2011-07-19.
- [7] 李琳, 刘文君, 杨赞. 南昌遭暴雨夜袭内涝, 危难时又出英雄[EB/OL]. <http://www.donews.com/dzh/201208/1467603.html>, 2012-08-22.
- [8] 徐杨祎. 四川暴雨至少致 3 人遇难, 成都内涝严重交通瘫痪[EB/OL]. <https://news.qq.com/a/20110704/000011.htm>, 2011-07-13.

- [9] 赵冬泉, 邢薇, 佟庆远, 等. 基于数字排水技术的城市雨洪控制方案设计与评估[J]. 中国给水排水, 2010, 26(16): 74-77.
- [10] 陈吉宁. 城市排水管网数字化管理理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [11] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流控制技术综述与应用探讨[J]. 给水排水, 2009, 35(1): 25-29.
- [12] EPA (2004) Report to Congress Impacts and Control of CSOs and SSOs. EPA 883-R-04-001.
- [13] 赵剑强. 城市地表径流污染控制[M]. 北京: 中国科学出版社, 2001.
- [14] Prince George's County (1997) Low-Impact Development Design Manual.
- [15] Victorian Committee (2006) Urban Stormwater: Best-Practice Environmental Management Guidelines. CSIRO Publishing, Clayton.
- [16] Melbourne Water Corporation (2013) Water Sensitive Urban Design Guidelines.
- [17] 张书函, 丁跃元, 陈建刚, 等. 北京城市雨洪控制与利用技术研究示范[C]//中国水利学会. 中国水利学会第二届青年科技论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2005: 105-110.
- [18] 李楠, 秦成新, 杜鹏飞. LID 雨洪管理技术应用和中国相应设计规范问题探析[C]//中国环境科学学会. 城市雨水管理国际研讨会论文集. 天津: 《中国给水排水》杂志社, 2014: 1-11.