

中图分类号: TU986.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1530(2013)02-0032-06

收稿日期: 2013-03-15

修回日期: 2013-04-07

绿色雨水基础设施构建城市良性水文循环

Establish a Healthy Hydrological Cycle in Urban Area by Green Stormwater Infrastructure

闫攀 车伍 赵杨 李俊奇 王思思

YAN Pan CHE Wu ZHAO Yang Li Jun-qi WANG Si-si

摘要:我国城镇化转型正进入关键时期,城市化带来的一系列生态环境问题,高污染、高碳排放、缺乏生态功能的传统灰色雨水基础设施难以支撑城市生态建设。绿色雨水基础设施作为城市雨水系统的重要组成部分,对恢复与构建城市良性水循环、保护生态环境起着至关重要的作用。首先强调雨水、水循环与城市发展关系的重要意义,以此为基础,对绿色雨水基础设施的内涵、组成及基于绿色雨水基础设施构建城市良性水循环的水文学基本原理进行了简要阐述,提出以绿色雨水基础设施为基础构建可持续城市雨水系统,并结合实际案例说明绿色雨水基础设施规划设计的具体应用。

关键词:绿色基础设施;绿色雨水基础设施;景观;雨洪管理;水文循环;生态环境;城市化

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07320-002);“北京市城市雨水系统与水环境生态技术学术创新团队”项目(PHR201106124)

Abstract: A series of eco-environmental problems have generated with the urbanization, which lead the urbanization reform in China into a critical period. While the conventional Grey Stormwater Infrastructure, which is pollution intensive and ecological functions absent, fails to support the urban ecological construction, Green Stormwater Infrastructure, as the key part of urban drainage system, plays a vital role in restoring and establishing a healthy hydrological cycle and preserving the ecological environment. This paper states the significant relationship among rainwater, water cycle and urban development and gives a brief introduction on the concept and the composition of stormwater infrastructure, followed by an explanation of the hydrological principles of establishing a healthy urban hydrological cycle based on the Green Stormwater Infrastructure. It then puts forward the idea of establishing a Green Stormwater Infrastructure based sustainable urban stormwater system, and explains the applications of Green Stormwater Infrastructure Planning and Design with practical cases.

Key words: Green Infrastructure; Green Stormwater Infrastructure; Landscape; Stormwater Management; Hydrological Cycle; Ecological Environment; Urbanization

Fund: National Major Project for Water Pollution Control and Governance Technology (No. 2010ZX07320-002); Project for “Beijing Urban Stormwater System and Water Environment Ecological Technology Academic Innovation Group” (No. PHR201106124)

图01 城市开发前水文示意图

图02 城市开发后水文示意图

1 城市发展面临的机遇与挑战

1.1 城市发展中的机遇

2013年政府工作报告指出,我国城镇化率已达52.6%,但只相当于韩国1970年代的水平,而日本在1960年代即已达到60%左右^[1]。

城市具有很强的经济与社会资源集聚与辐射效应,但也造成对生态环境的剧烈干扰甚至破坏。随着生活水平和文明程度的提高,人们对城市环境安全及生态的关注与要求也在迅速提升。正因如此,过去那种以牺牲环境和生态为代价的高速发展已难以为继,生态文明成为城市发展必须兼顾的重要方面。党中央在“十八大”已将生态文明放在“五位一体”的突出地位,建设生态、自然的美丽中国已经成为国家重要战略目标。

因此,中国进入新型城镇化发展的关键阶段,未来不仅仍具有大幅提升空间,协调城市发展、基础设施建设与生态环境的关系也成为一项紧迫、长期而艰巨的任务。

1.2 城市水环境面临的挑战

城市化带来的“城市病”已成为城市可持续发展的主要阻碍之一,城市快速扩张和开发造成的环境污染、生态破坏、甚至城市安全危机等问题愈演愈烈,城市发展陷入环境与资源方面的恶性循环。

就城市水系统而言,近年来国内城市频发的复杂水环境危机已经对传统发展模式 and 基础设施提出了严峻的拷问。许多城市不断爆发的严重内涝事件,造成巨额财产损失,甚至付出生命的代价;北京等发达城市污水处理率超过90%,但雨水径流依然严重污染河湖水系,导致普遍的富营养化和大量鱼类死亡;城市严重缺水的同时,汛期雨水资源却大量流失,地下水过量开采及水位持续下降,生态环境更加脆弱;城市景观也受到极大影响。这些矛盾突出且互相关联,因此,构建可持续的绿色雨水系统已成为城市发展和建设的必然要求,是迫切需要解决的重大策略问题^[2-3]。

2 雨水、水循环与城市发展的关系

要综合解决城市雨水问题,必须重新审视城市发展和相关基础设施建设模式带来上述问题的根本原因或常识问题——水文循环的改变。城市发展前后的水文变化已被许多研究者所引用,然而,在解决城市雨洪和相

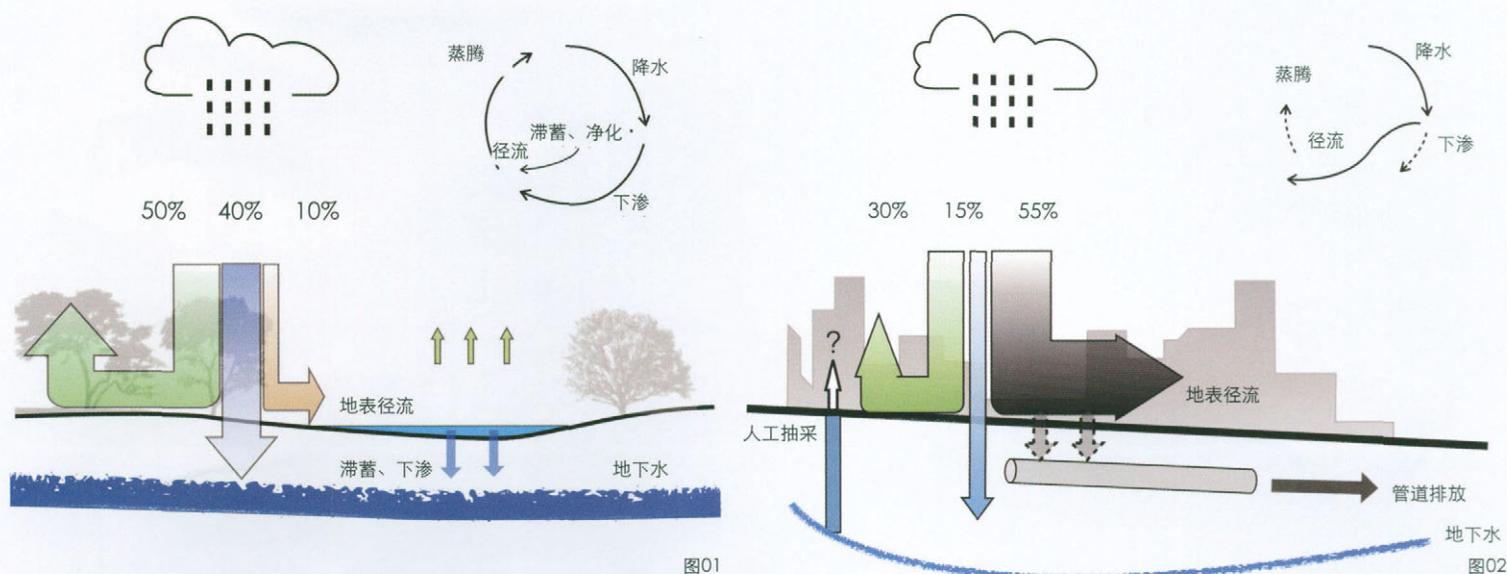


图01

图02

关水环境问题、推广应用新型雨洪管理体系的过程中，这一简单的常识却常常被忽视，甚至有来自不同方面（包括一些“专家”）的抵触，即，它并没有得到普遍、广泛的认知。“以排为先”和“头痛治头、脚痛治脚”的传统观念和方式在重大工程决策中先入为主的现象仍较普遍，缺乏从维护城市良性水文循环和生态系统的高度来分析问题和制定对策。另一方面，城市化高强度土地开发和掠夺式扩张对水循环的破坏仍在持续甚至触目惊心，沟渠、河流、湖泊、湿地、沼泽等天然排水和调蓄设施还在大量“消失”、地下水的严重超采、城市水体非点源污染等没有引起足够重视并得到有效遏制仍是不争的事实，已建城市积累的老问题尚未解决，新城市开发的新问题却在不断叠加。所以，重新认识和审视城市水文循环原理、变化过程及传统思路存在的问题，通过现代雨洪管理综合、科学的分析决策重建城市良性水文循环，显得尤为关键和必要。

自然状态下，植被覆盖率较高，地表具有良好的渗透性和滞蓄能力。降雨经过大地的吸收、渗透，及植物和水面的蒸发、蒸腾作用，形成少部分的地表产流量，由长年自然形成的洼地、坑塘、湿地、沟渠等滞蓄或输送排放，水质也在上述自然循环过程中保持良好，即构成完整而良性的水文循环（图01）。

随着城市的开发，硬化面积急剧增加，绿地大幅减少，地形地貌显著调整，自然沟渠、坑塘、湿地、水体大量消失，土壤渗

透、植物吸收量和地面调蓄能力降低，使径流量大幅增加，且形成的地表径流含有大量人类活动造成的污染物（图02）。为了解决地表径流排放的问题，人类发明了管道、泵站等排水技术，以快排为目标，将雨水径流转移至下游河道、水系。尽管这些措施在城市安全上发挥了重要作用，未来还会继续发挥作用，但它的弊端也显而易见：由于“降水 - 下渗 - 径流 - 滞蓄 - （净化） - 蒸腾”的循环链的平衡被打破，排水压力增大和洪涝风险增加，污染加重，再加上地下水被严重超采而得不到有效补充，“水多”、“水少”、“水脏”等问题就随之而来，而这正是城市发展过程中内涝、水系污染、水资源流失、地下水持续下降、生态环境恶化等现象和危机层出不穷的根本原因。

据水利部和国家统计局最近发布的统计数据，流域面积在100km²以上的河流比20世纪90年代的统计减少了约2.7万条；全国657个城市中有400多个以地下水为饮用水源，严重超采的城市有近60个，这从一个方面印证了上述问题。

由此，保护并重塑城市良性的水文循环应该作为综合解决城市雨水问题、保障城市生态系统的核心理念与最高目标，并成为各相关专业学术界和工程界、决策层和社会的共识。在此理念和目标下来制定长期和短期的对策和规划^[4]。

城市发展和建设需要最大程度减小场地开发对环境产生的冲击和负面影响，与上

述重塑水文循环相得益彰。但如果以排放为单一目标的传统雨水系统建设模式得不到改变，良性水文循环及真正可持续发展的生态城市则难以构建。

3 绿色雨水基础设施与城市水文循环

3.1 绿色雨水基础设施核心涵义与构成

（1）绿色雨水基础设施的核心涵义

发达国家在经历同样的城市发展之痛后，较早开始探索城市基础设施建设与生态系统之间的关系。20世纪末，一些发达国家已开始认识到自然系统即使不比管道、混凝土池等所谓的灰色基础设施更重要，但至少是等价的，通过保护、修复自然系统或规划设计模拟的自然系统或绿色基础设施能同样或更好地达到维持自然生态进程、保障空气和水资源、保证人类健康和生活质量等目标。在这一基础上，提出了生态基础设施、绿色基础设施、生态网络等名称、定义略有不同，但本质一致的新型基础设施构建理论。

在发达国家，通过结合或模拟自然生态系统并用于城市雨洪管理的技术体系有许多，如英国的可持续排水系统（SUDS），美国的低影响开发（LID）和绿色基础设施（GI），澳大利亚的水敏感性城市设计（WSUD）等等^[2-3]。这些体系虽在名称和内涵上有所差异，但均力求改变传统开发模式，以可持续的、与自然充分和谐的及多功能的手段解决城市雨洪问题，并以恢复与构建城市良性水文循环、保护生态环境为最高目标。



绿色基础设施利用自然服务于城市发展最重要的功能之一就是解决城市雨洪问题、改善水循环和生态环境。美国规划协会对绿色基础设施的定义为“由林荫街道、湿地、公园、林地、自然植被区等开放空间和自然区域组成的相互联系的网络，能够以自然的方式控制城市雨水径流、减少城市洪涝灾害、控制径流污染、保护水环境”^[5-6]。本文借用美国西雅图公共事业局（Seattle Public Utilities, SPU）提出的绿色雨水基础设施（Green Stormwater Infrastructure, GSI），泛指用于雨洪管理领域内的各种绿色生态措施^[7]。

（2）绿色雨水基础设施的主要构成

与传统雨水管道直接收集排放不同，GSI从雨水的产流、汇流、输送及排放链的各环节对雨水进行全过程的控制，在每一个环节尽可能减少径流的产生、降低径流的污染及提高雨水的综合利用效率，可依据这个过程对GSI进行分类。典型的GSI可分为源头分散控制措施（图03-04）、输送措施（图05-06）和末端集中控制措施（图07-08）3类，它们主要包括：源头措施：树池、绿色屋顶、雨水罐/桶、下凹式绿地、雨水花园、渗透铺装等；输送措施：植草沟、生态沟渠

等；末端集中措施：景观水体、雨水塘、雨水湿地、多功能调蓄设施^[8]等。

上述措施可依据设计规模的不同，应用在场内、社区、开放空间、城区、流域等不同尺度项目的规划设计中，并呈现出不同的组合形态，如绿色停车场、绿色道路、雨水景观公园、雨水控制利用综合模式及专项规划^[9-10]等等。

为了更为有效地实施和应用GSI，还需要雨洪管理工程师与相关专业设计人员进行有效沟通和合作，较早地介入城市开发和土地利用规划阶段，对有利的雨洪管理自然条件和环境因素进行识别，对原有场地中具有地形优势的透水地面、洼地、水系、滞洪区等自然条件进行必要的保护和利用，最大程度减少场地不透水面积、减少雨水汇入硬质铺装直接进入管道排放的可能性。

3.2 绿色雨水基础设施的水文学原理

如前所述，传统城市化扩张和开发给城市水文循环带来的破坏和冲击是多方面的，因此，良性水文循环的恢复应包括水安全、水生态、水资源、水环境等多方位的要求。GSI正是从这些要求出发，通过水质、水量、

峰值等控制设计要素综合地修复和构建城市良性水文循环。

GSI强调利用自然土壤或人工材料增加透水地面、强化雨水下渗、减少地表径流、过滤和截留污染物；利用植物和适当水面强化雨水蒸腾、蒸发；利用微生物、植物根系等丰富的生态净化系统吸收、净化污染物；利用自然洼地、水系和人为设计的具有滞蓄功能的绿地、景观水体、湿地等开放空间对雨水水量进行控制和削减，减少径流外排，同时净化水质和削减峰值；同时还改善生物多样性和营造多功能景观。

从单一场地看，传统开发模式将汇水面硬化，使雨水更快地产、汇流，同时利用管道、泵等措施使雨水快速排放，在达到一定的排水标准的同时却带来严重的环境和生态问题；而以GSI为基础的新型开发模式下，使汇水面有更大的透水性和滞蓄能力、并通过GSI的综合功能，使产流减少、汇流减缓，并进一步削减峰值流量和净化水质，在缓解雨水问题的同时，实现改善生态环境的多重目标（图09）。

从城市水循环来看，当使用GSI的场地累积的足够多时，通过GSI对自然水文进行的人

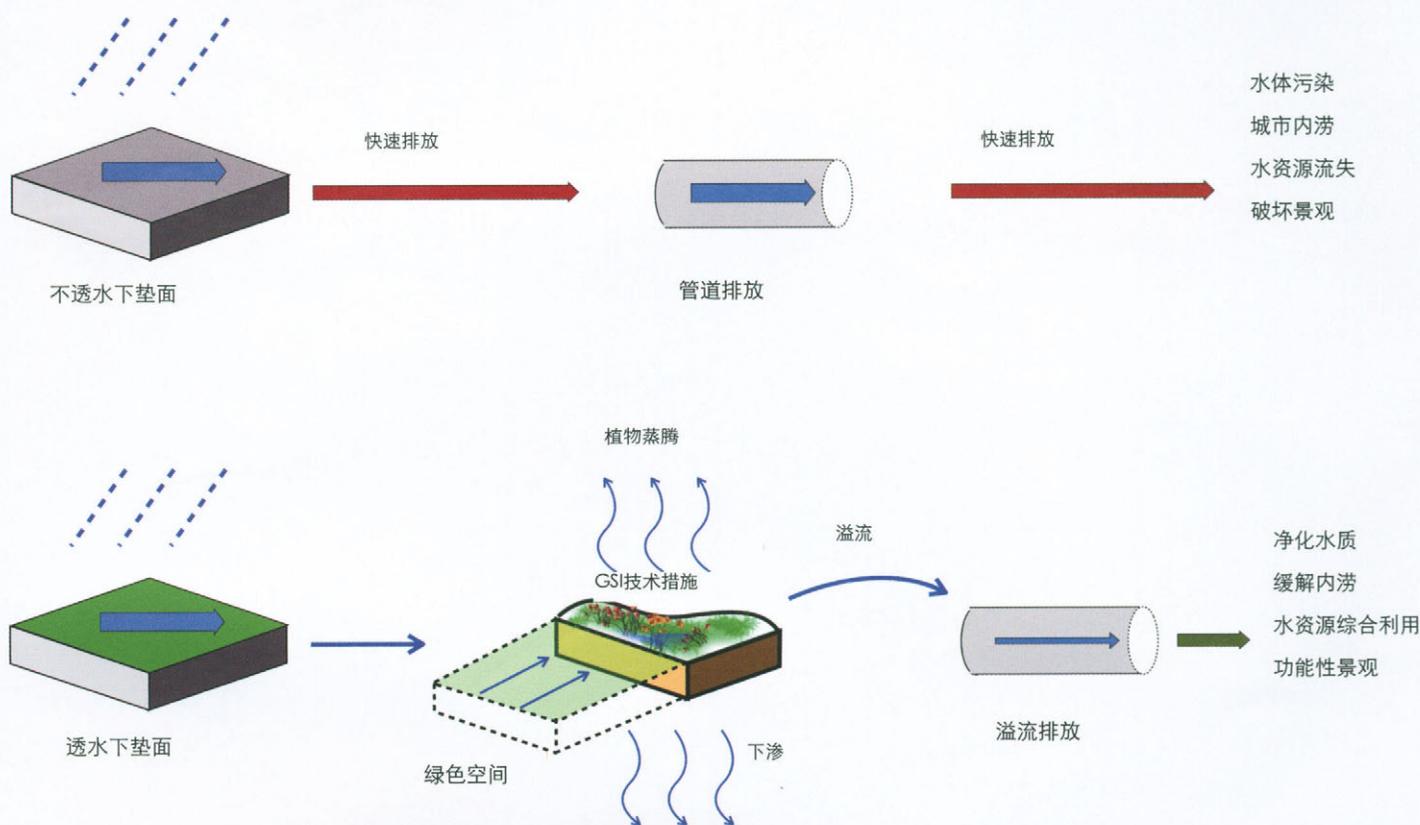


图09

工模拟，被传统开发模式打断的“降水 - 下渗 - 径流 - 滞蓄 - 蒸腾”循环链得到修复并恢复至接近自然的平衡状态，即城市水文循环中的蒸腾量、下渗量及径流量三者的比例接近或恢复至开发前的水平，水质得到有效控制，地下水位也得以恢复（图10），开发后的径流量曲线则与开发前接近（图11）。

可以看到，GSI为我们指出了一条避免传统扩张和开发模式带来的雨洪和生态问题的出路，提供了一种新的可行的选择：通过从场地、社区到城区等不同尺度，恢复和构建城市良性水循环，为实现城市的生态平衡和多功能景观提供有效的支持。

4 绿色雨水基础设施规划设计介绍

GSI在实际项目尤其较大尺度的项目中一般通过“雨洪控制利用专项规划”（简称雨洪专项规划）来落实，在国家 and 地方的一些标准规范里（如《建筑与小区雨水利用技术规范》、2011年修编的《室外排水规范》、目前正在修编的《绿色建筑评价标准》、《室外排水规划规范》、《公园设计规范》等），对雨洪控制利用及其规划设计都有明确的相关规定和要求。以GSI为主要内容的雨

- 图03 住宅区小型雨水湿地生态景观（澳大利亚）
- 图04 道路雨水花园（新西兰奥克兰）
- 图05 保护并修复后的生态沟渠（新西兰奥克兰）
- 图06 住宅区水景-生态沟渠（成都）
- 图07 城市湿地-生态修复（加拿大多伦多）
- 图08 新建的住宅区雨水景观水体-生态堤岸（成都）
- 图09 传统与绿色雨水控制途径的比较示意
- 图10 GSI保护或修复城市水文循环示意图

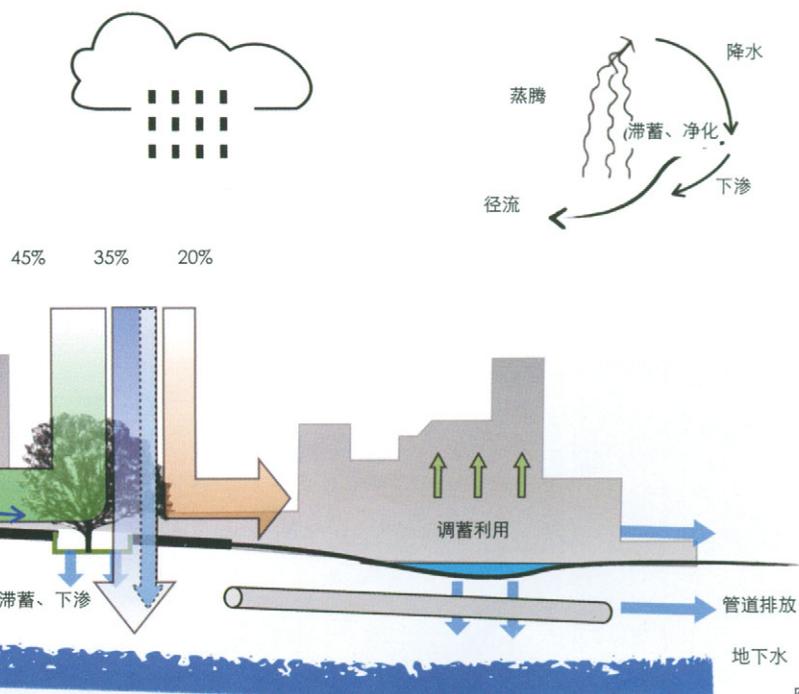


图10

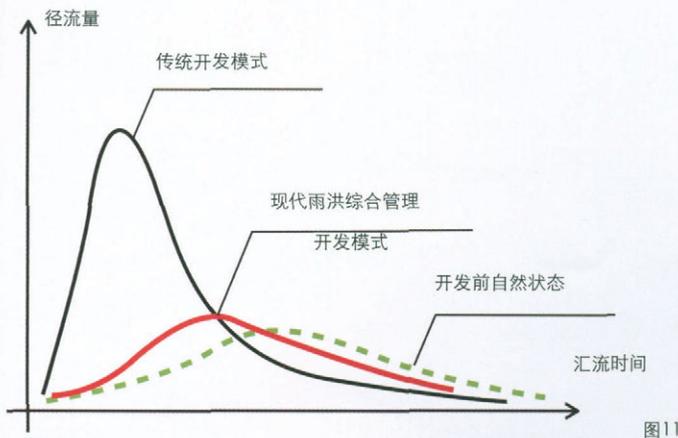


图11

图11 三种开发模式下的径流量-时间水文曲线

图12 滨湖区的植草沟及沉砂井（北京）

图13 绿色停车场-生物滞留设施（北京）

图14 雨水花园（北京）

图15 下凹式绿地（北京）

图16 中央景观调蓄湖体及生态堤岸（北京）

图17 大型砂石坑改造而成的雨洪多功能调蓄湿地景观公园（北京）

图18 多功能调蓄公园人工湿地（北京）

洪专项规划设计也已经在国内许多不同类型的工程项目中成功应用^[11]。雨洪专项规划涉及面广、是一项复杂的系统工程，其成功运用的关键就是需要得到建设方与当地主管部门的支持，并结合土地利用，与建筑、道路、景观、市政等多专业密切配合与协作，针对居住、商业、公建、道路、广场、水体、公园等不同性质用地的特点制定相应控制目标，对GSI进行合理组合、规划布局、规模设计及投资效益分析。

4.1 案例一——北京某大型住宅区的雨洪控制利用工程

北京某大型住宅区的雨洪控制利用工程是一个典型的GSI规划设计案例。该住宅区位于北京市东部潮白河的西岸，占地234hm²。场地开发初期，由于地势低洼、缺乏水环境整体规划，面临排水和内涝压力大、景观水体发臭、耗水量及费用高、景观差等多重问题。通过与开发商深入沟通达成对项目条件和预期目标的深刻理解，并与景观、市政等专业设计人员有效沟通和协调，对不同方案

进行技术经济比较，决定最终优化方案：以景观湖为核心，以截污截流、循环、生态修复、多功能调蓄、模拟“自然净化”和“自然排放”为关键技术手段，以雨污水资源利用、景观湖水水质保障、防洪排涝、景观效果为目标，构建“源头-中途-末端”综合性GSI处理链。主要采用的GSI包括：植草沟、雨水花园、人工湿地、生态堤岸、生物浮岛、景观水循环、多功能调蓄、下凹式绿地、渗透管渠、渗透铺装等，图12-16是部分设施实景。项目特点和效益如下：利用植草沟、雨水花园、下凹式绿地等源头GSI措施完全替代传统雨水管道系统，节省大量管道投资，总投资与传统开发模式持平，且获得了经济、环境和社会多方面效益；有效利用雨水资源，平均每年可利用雨水资源近70万吨，同时也大幅度增加地下水的补给量，缓解排水和内涝压力；雨水经植草沟、雨水花园、植被缓冲带等截污，入湖雨水径流水质大大改善，有效地控制人工湖的面源污染。同时构建水体生态净化系统，经过土壤渗滤和湿地系统净化，明显改善湖水水质；

经过近十年和多次特大暴雨的考验，有效抵御水涝风险；综合应用多种GSI措施，营造亲水环境并明显改善小区景观和人工湖景观效果。

4.2 案例二——北京城乡结合部砂石坑多功能调蓄改造案例

图17-18所示是在北京新开发区利用大型砂石坑进行生态化改造，建设成多功能调蓄公园，是一个很好的集中式GSI应用案例。该项目充分利用场地条件，通过合理规划设计和适度修整，将原有废弃的砂石坑建成一个大规模的雨水湿地公园（总占地面积21hm²），接纳周边约110hm²建设用地区域产生的大量雨水径流，进行调蓄、净化和利用。改造后的雨水湿地公园的最高调蓄能力可达百年一遇，有效缓解下游城区水涝压力，同时也可有效利用雨水资源，减少污染物的排放。此外，通过种植本土水生植物、设置前置塘和人工湿地等净化区、构建水体生态系统，还改善了周边生态环境品质，并为周围居民提供一个休闲活动、垂钓场所。



图12



图13



图14



5 结语

我国已进入城镇化发展转型和生态建设的关键时期,对我国未来的经济和社会发展具有十分重大的意义。自然环境一旦被破坏,治理成本往往数倍于保护的成本,且难以恢复。同样,在城市建设过程中,基础设施建设是百年大计,投资和影响巨大,一旦建成,修复和改造的难度和成本都会数倍于初始的投入。

快速的城市化和陈旧的建设模式对水文循环、生态环境的负面影响巨大。近年城市水安全、水污染等方面的突出问题,已经充分反映出了传统雨水系统的局限。通过组合应用各种GSI措施,不仅可实现削减径流总量、调蓄利用雨水资源、滞留调节径流峰值、净化水质、降低合流制管道的溢流量和溢流频率、保护水环境等目标,还有助于净化空气、节能减排、缓解城市热岛效应、增强固碳作用、土地增值、节约投资、降低设施运行费用、为市民提供具有美学和生态功能的自然景观和宜居环境等许多功能。因此,广泛应用GSI,构建城市良性水文循环刻不容缓且意义重大,它是城市可持续发展和生态建设要求下的一种基本理性,是城市基础设施多功能、生态化、集约型发展趋势的典型体现,应被城市规划、建筑、景观、市政、水利、环保等不同行业的专业人员认知并达成共识,并通过绿色建筑、既有建筑和城区改造、生态城市等不同载体来实践和广泛推广,由点及面地引导城市发展和基础设施建设走向可持续,为建设美丽中国提供有力的支持。

注释:

华商报. 20多年全国少了2.7万条河 第一次全国水利普查公报发布,首次摸清江河水系家底[EB/OL].(2013-03-27)[2013-03-28]. http://hsb.hsw.cn/2013-03/27/content_8490651.htm.

中国广播网. 监测显示我国400多城市地下水污染严重[EB/OL].(2012-04-23)[2013-03-01]. http://zt.cnr.cn/zt/504070292/ztyw/201204/t20120423_509492032.html.

图片来源:图01-02,09-11赵杨、车伍绘制,图03-04,06-08,18车伍拍摄,图05弗兰克(Frank)拍摄,图12闫攀拍摄,图13-16苏义敬拍摄,图17李俊奇拍摄。

参考文献:

- [1]中国科学院可持续发展战略研究组.2012中国新型城市化报告[M].北京:科学出版社,2012.
- [2]车伍,吕放放,李俊奇.发达国家典型雨洪管理体系及启示——构建我国城市现代雨洪控制利用体系[J].中国给水排水,2009,25(20):12-17.
- [3]车伍,张伟,王建龙,李俊奇.低影响开发与绿色雨水基础设施[J].建设科技,2010,21:28-51.
- [4]车伍, Frank Tian,李俊奇,张雅君.奥克兰现代雨洪管理介绍(一)——相关法规及规划[J].中国给水排水,2012,38(3):30-34.
- [5]车伍,赵杨,李俊奇.城市消极空间的生态化景观改造[M]//北京大学景观设计学研究院.景观设计学第24辑——废弃土地更新.北京:中国林业出版社,2012:48-52.
- [6]张伟,车伍,王建龙,王思思.利用绿色基础设施控制城市雨水径流[J].中国给水排水,2011,27(4):22-27.
- [7]Tracy Tackett Seattle. Seattle's Policy and Pilots to Support Green Stormwater Infrastructure [C]. 2008 International Low Impact Development Conference. Washington: Environmental

and Water Resources Institute of ASCE, 2008.

[8]车伍,张燕,李俊奇.城市雨水多功能调蓄技术[J].中国给水排水,2005,9:25-29.

[9]车伍,张伟,李俊奇.中国城市雨洪控制利用模式研究[J].中国给水排水,2010,26(16):51-57.

[10]车伍,马震,王思思.中国城市规划体系中的雨洪控制利用专项规划[J].中国给水排水,2013,29(2):8-12.

[11]Wu Che, W Zhang, J.Q. Li, etc. Outline of Some Stormwater Management and LID Projects in Chinese Urban Area[M]// Xiaodi Hao, Vladimir Novotny, Valerie Nelson. Water Infrastructure for Sustainable Communities: China and the World. London: IWA Publishing,2010,161-173.

作者简介:

闫攀/1989年生/北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室硕士生(北京 100044)

车伍/1955年生/硕士/北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室教授(北京 100044)

赵杨/1986年生/硕士/北京雨人润科生态技术有限责任公司总经理(北京 100044)

李俊奇/1967年生/博士/北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室主任/教授(北京 100044)

王思思/1983年生/博士/北京建筑工程学院城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室副教授(北京 100044)

