

城区降雨源头减排技术思考与设计

常兴¹, 孙小玉², 姚建明³, 卫鹏飞⁴, 姜泰⁴

¹天水市水利工程建设质量服务中心, 甘肃 天水

²天水市水资源利用中心, 甘肃 天水

³天水市节水服务中心, 甘肃 天水

⁴韩城市水土保持工作站, 陕西 韩城

收稿日期: 2023年8月3日; 录用日期: 2023年8月22日; 发布日期: 2023年8月31日

摘要

雨水源头减排技术是系统建设城市排水防涝工程体系的关键, 具有缓解城市内涝、补充地下水资源、净化水质和改善水生态环境等重要功能, 对优化人居生活体验、助推经济发展意义重大。在尊重自然、顺应自然、与自然和谐共处的低影响发展模式下, 科学的进行降雨源头减排技术设计尤为重要。本文对降雨源头减排技术的主要典型结构、概念内涵、优势和不足等进行了总结和归纳, 剖析雨水源头减排设施设计的关键技术, 拟为今后城市化建设提供参考。

关键词

海绵城市, 透水路面, 绿色屋顶, 下凹式绿地, 生物滞留设施

Reflection and Design of Rainwater Source Control Technologies in Urban Areas

Xing Chang¹, Xiaoyu Sun², Jianming Yao³, Pengfei Wei⁴, Tai Jiang⁴

¹Water Engineering Construction Quality Service Center, Tianshui Gansu

²Water Resources Utilization Center, Tianshui Gansu

³Water Conservation Service Center, Tianshui Gansu

⁴Hancheng Soil and Water Conservation Workstation, Hancheng Shaanxi

Received: Aug. 3rd, 2023; accepted: Aug. 22nd, 2023; published: Aug. 31st, 2023

Abstract

Rainwater source control technology is a critical component in the systematic construction of urban

作者简介: 常兴, 正高级工程师, Email: 345338453@qq.com

文章引用: 常兴, 孙小玉, 姚建明, 卫鹏飞, 姜泰. 城区降雨源头减排技术思考与设计[J]. 水资源研究, 2023, 12(4): 432-440.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.124048

drainage and flood control engineering systems, with significant functions such as alleviating urban waterlogging, replenishing groundwater resources, purifying water quality, and improving aquatic ecological environments. It holds great significance in optimizing human habitation experiences and promoting economic development while adhering to a low-impact development model that respects and harmonizes with nature. This paper provides a comprehensive summary and analysis of the typical structures, conceptual implications, advantages, and limitations of rainwater source control technology. It delves into the key technical aspects of designing rainwater source control facilities, aiming to offer valuable insights for future urbanization endeavors.

Keywords

Sponge City, Permeable Pavement, Green Roof, Sunken Green Spaces, Bioretention Facilities

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

城市建设的迅速发展使天然土壤的多孔结构逐步被不透水地面取代,降低了土壤的水源涵养能力,改变了雨水径流的运移过程和导排方式,影响着天然状态下水循环系统的交换机制。地表径流的增加和地下水位降低是雨水径流运移过程改变的重要表现,同时是城镇化建设过程中需要平衡的关键矛盾。调查发现[1],近年来我国 500 多个城市中已发生过内涝的城市有 300 多个,且具有持续时间长、破坏能力强、辐射范围广等特点,对城市排水防涝建设具有重大考验。城市内涝的发生,表面上是落后的城市雨水管网建设与迅速的城市化建设之间矛盾,但究其根源是城市化建设中土地使用性质发生变化,即非建设用地转变为建设用地。建筑、道路、广场、管道等建设用地的大规模兴起,导致下垫面过度硬化,使地表降雨洪水径流量从 10%增加到 60%,加剧了强降雨事件中城市雨水管网的排水压力。

为应对突出的城市雨水输移问题,减轻内涝灾害对人民生命和财产安全带来的威胁,探索新型城市发展模式。近年来国家在城市建设和更新中,积极落实“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施,促进城市良性水文循环,助推海绵城市(Sponge city)建设。“海绵城市”是以“自然积存、自然渗透、自然净化”的生态基础设施来实现,发挥地形、地貌等原始生态本底对雨水的渗透作用、植被与湿地等对水质的净化作用,自然和人工相结合的手段使城市对雨水具有吸收和释放的作用,其中,降雨源头的减排技术是关键一环。在降雨事件中,雨水降落下垫面形成径流,在排入市政排水管渠的系统之前,通过渗透、净化和滞蓄等措施,可控制雨洪径流的产生、减排雨水径流污染、收集利用雨水和削减峰值流量,对缓解城市洪涝灾害具有重要意义。基于此,本文拟在总结降雨源头减排措施典型结构模式的基础上,归纳城市建设中采用的透水路面、绿色屋顶、下凹式绿地和生物滞留设施四种源头减排技术的优势和不足,为今后海绵城市建设提供决策参考。

2. 透水路面

透水路面(Permeable pavement)指采用透水材料或透水结构铺设的具有一定下渗能力的路面,一般包括面层、基层和垫层三部分(图 1)。通常采用的透水路面可将路面本身承接的雨洪径流,直接下排或通过设置横向和纵向排水渗沟引至雨水管涵内,但雨水量较大和汇水较多时,则可通过调整城市道路整体规划,使道路不仅能排除或储存自身的雨水,还能排除或储存周边区域汇集过来的雨水。

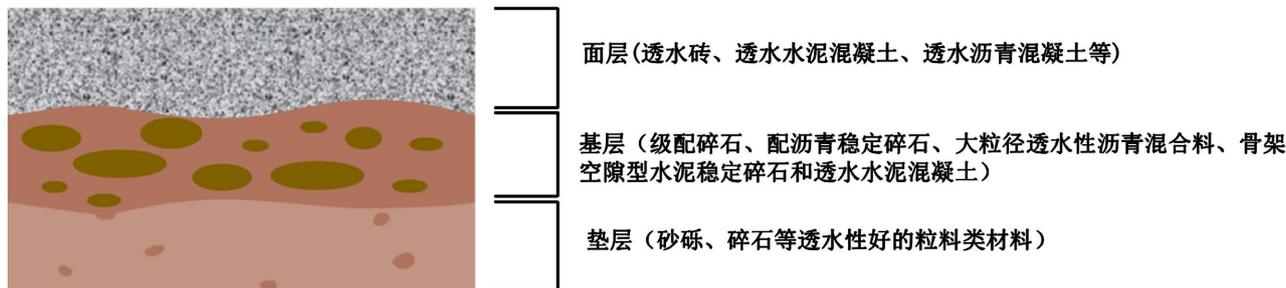


Figure 1. Typical structure of permeable pavement
图 1. 透水路面典型结构

降雨初期,雨水的来源是分散的,透水路面的分散式雨水收集模式可简化常规雨水管网雨水收集路径和单一收集过程,提高对早期降雨径流的控制效率;同时,透水路面技术从径流发生源头入手,极大程度延缓了次降雨过程中初始径流产生时间,推迟并缓冲洪峰流量,改善区域初始不透水路面下部土壤环境和生态条件。

2.1. 透水路面的优势

1) 削减地表径流。降雨是地表径流的关键来源,当降雨满足了植物截留、洼地蓄水和表层土壤储存后,后续降雨强度又超过下渗强度、其超过下渗强度的降雨到达地面以后,开始沿地表坡面运移,是产流的开始,因而在城市建设过程中,地表径流的大小主要是下垫面的渗透作用所带来的效果。由于透水路面特殊的“三层”结构模式,模拟了土壤疏松的孔隙结构,雨水通过透水路面面层、基层和垫层间上下连通的空隙,可顺利渗透到下层土壤;此外,透水路面的特殊结构形成了储水空间,可吸附、储存一定的水量,因此,在两方面的共同作用下,透水路面可削减地表径流。

2) 吸附地面雨水污染物,改善生态环境。透水路面可将雨水直接渗入地下,而不经城市管网排水系统排入河流、湖泊,雨水通过透水路面“三层结构”的过滤还可以得到净化,并且能明显补充恢复土壤中的水分,调节大气湿度,利于植物生长;同时,下渗雨水可以自然而然地补充地下水资源,维持地表水压的相对稳定,可以有效缓解城市不透水硬化地面对于城市水资源的负面影响。透水性路面以其本身良好的生态环境效益被称为“会呼吸的”地面铺装。雨水经路面直接渗透减少了地面径流,同时经过透水路面“三层结构”的截留、吸附、生物降解等作用后,使雨水中的可溶解性污染物和某些重金属离子被去除,成为水质相对较好的地下水补充水源。

3) 改善城市道路使用体验。采用城市管网疏导雨洪的排水模式,往往在不透水路面低洼处积水,在车辆行驶途途低洼处的过程中会给行人带来不便甚至不愉快的出行体验。此外,在冬季气温能达到冰点的区域,雨雪天气条件下低洼处的积水往往会造成路面结冰,易发生交通安全事故。相反,透水路面具有分散式收集雨水的特点,即使在路面低洼处雨水也无法汇集形成积水,在冬季,路面积雪融化后融化积雪可通过面层、基层和垫层下渗,极大程度降低了路面结冰的可能。

2.2. 透水路面的不足

1) “三层”结构空隙堵塞。透水路面优良的使用性能主要取决于其较大的空隙率。在交通和自然环境的共同作用下,其空隙率会逐年下降,甚至出现空隙堵塞,导致其优越性无法体现。当透水路面达到一定的使用年限后,其表层空隙完全发生堵塞,表层混合料由多孔结构转变为密集配,不仅透水性大幅度下降,且其降噪效果几乎全部丧失。

2) 路面荷载能力降低。透水路面的特殊分散式雨水收集模式必然导致了其自身结构中大的空隙率,伴随而

来是骨料与骨料之间的接触面积减少,引起材料强度的降低,与不透水路面相比,透水路面荷载能力下降。有研究表明[2],多孔沥青路面的结构荷载能力约为密实沥青路面的50%。因此,在透水路面设计过程中,设计人员需要加强对透水路面的面层、基层以及垫基进行良好的设计,从而提升透水路面的荷载能力,满足透水路面负担荷载的实际需要。

3) 装饰性不足。透水路面一般采用单一色调铺设,以黑色和灰色系居多。现有的所谓彩色透水混凝土路面一般都是后期染色,而且容易掉色,因而在生态文明建设大背景下,透水路面在海绵城市建设过程中美化、装饰、点缀环境领域局限性较大。

3. 绿色屋顶

绿色屋顶(Green roof)一般指在建筑物顶层铺设种植土层并栽种植物,收集利用雨水、减少雨水径流的源头减排设施,又称种植屋面或屋顶绿化,一般由植物层、基质层和蓄水层三部分组成(图2)。植物层作为绿色屋顶与周围环境的直接接触面,厚度一般在10~100 cm范围内,可选择各类适宜植物(如草坪、地被、小型灌木、攀援植物、大灌木和小乔木)以达到缓解热岛效应和净化空气的作用。基质层一般有简单式(2.5 cm)和复杂式(20~120 cm)两种,可选择各类适配种植土为植物提供水分及养分。蓄水层垫层厚度一般在1~6.5 cm间,由矿棉或聚合纤维组成,且层间可进行组合,主要用于保持基质层湿度,控制屋面径流。



Figure 2. Typical structure of green roof

图2. 绿色屋顶典型结构

3.1. 绿色屋顶的优势

目前,绿色屋顶已成为海绵城市建设过程中重要的雨水源头减排措施,是一种控制城市屋顶径流的经济可靠方式,与不透水下垫面相比,绿色屋顶具有很多生态功能和效益。生态效益方面,绿色屋顶可以调控城市雨洪,缓解排水压力,锐减热岛效应,净化空气,改善区域小气候等。经济效益方面,绿色屋顶在一定程度上可以提高土地利用效率,提升土地生产力,带动屋顶绿化相关服务形成产业等。社会效益方面,绿色屋顶可以促进雨水资源综合利用,缓解城市生活用水压力,增强生态景观体验,改善城市生活质量等。具体来看:

1) 削减屋顶径流量。绿色屋顶对径流量的显著调控能力是多种调节途径共同作用的结果。降水事件中,绿色屋顶中的植物层可以通过冠层截留、调蓄削减屋顶径流,基质层直接承接雨量。随着降水的持续发生,降水到达基质层,其可以被基质中空隙储蓄或者被基质本身吸纳。在水分运移过程中,水分进一步在蓄水层储存以供植物生长消耗,另外一些滞留在植物叶片表面的水分,在日照风吹等作用通过蒸发作用回到大气中。大量

研究表明[3],绿色屋顶对雨洪径流有很好的削减效果,最高可达60%,且与季节变化有较大关系。

2) 延迟产流时间和减小径流峰值。绿色屋顶通过基质和植被吸收以及拦截降雨量,可以延迟产流时间并减小径流峰值。在达到峰值以前,绿色屋顶的雨洪径流量小于裸露屋顶;当降雨量不大时,由于基质和植物对雨水的截流和阻挡作用,绿色屋顶几乎不会有径流发生。对于短历时的降水事件而言,达到屋面径流峰值所需时间受绿色屋顶的滞留能力影响差异极大,且绿色屋顶的总径流量一般低于普通屋顶,只有当发生强降雨事件时,绿色屋顶的滞留能力和延缓能力受到极大限制。

3) 改善屋顶径流水质。绿色屋顶具有良好的水质酸性调节能力,渗过绿色屋顶后偏酸性($\text{pH} < 7.0$)雨洪径流 pH 可得到一定程度的提高,且 pH 提高效果受介质层厚度的影响,这对于减缓建筑物侵蚀、缓解自然水体酸化、有效缓解酸雨问题以及钝化有毒物质有重要意义。随着近些年关于绿色屋顶径流水质的研究的逐步深入,对绿色屋顶的工作机理有了更加深入的了解,由于基质组成的差异和缺乏相关的绿色屋顶水质标准,绿色屋顶对径流水质的影响尚具有很多争议,关于绿色屋顶是城市水污染的污染源或汇,没有一致结论。

3.2. 绿色屋顶的不足

1) 排水形式单一,且效率低下。降水过程中降雨量满足植物层、基质层和蓄水层吸附和蓄积后需经由排水口排除。目前,国内的绿色屋顶排水层的材料参差不齐,大多采用排水绿化板,若排水绿化板的孔径和尺寸选取不当,将会导致排水孔无法将一次降雨过程中多余承接雨量及时排出,可能会破坏绿色屋顶的结构,进而影响绿色屋顶的使用年限。此外,排水路径与排水沟设计不合理,就会影响雨水的运移路径,形成积水。同时,在排水材料符合设计要求的前提下忽视了对绿色屋顶结构的维修和养护,部分雨水管网材料在降雨、日照等的作用下发生老化,危及建筑物安全。

2) 屋顶雨水利用率低下。针对我国华北、东北、华东、中南、西南、西北等地365座城市的研究中发现,研究城市总缺水63.5亿 m^3 ,缺水率达9.6%。从缺水类型来看,城市生活用水、工业用水、生态与环境用水等的需水量超过当地水资源承受力所造成的缺水,属典型的资源型缺水,是我国城市缺水的最主要的因素。绿色屋顶通过对雨水的“蓄”、“渗”等可直接增加城市居民用水量,缓和城市的供水供需矛盾。目前,部分绿色屋顶只是将雨洪资源与屋顶植物灌溉联系到一起,鲜有设计模式综合布局雨水资源的合理利用,如日常生活厕所用、消防用水和景观用水,因而雨水资源综合利用应该成为绿色屋顶建设中需要重点考虑的问题之一。

3) 强降雨时屋顶蓄存能力不足。强降雨天气是雨水资源的重要补充途径,若将强降雨过程中的水量全部蓄存,蓄存的水量可极大程度缓解资源型缺水的供需矛盾。然而,在大力发展绿色屋顶的同时,不仅没有充分利用绿色屋顶调蓄、储存雨水较强的能力,而且大量雨水通过溢流口或溢流管道,排导地面或地下,给城市形成巨大的雨洪疏导压力,形成城市内涝以及威胁居民的人身财产安全。

4. 下凹式绿地

下凹式绿地(Sunken greenbelt)指低于周边汇水路面或道路,且可用于渗透、调蓄和净化雨水径流的绿地,是低影响开发模式在雨水利用方面的一种最简便的运用技术。在降雨过程中,下凹式绿地可替代传统的雨水管网系统,使地面径流汇入其中,并通过下渗、滞留、吸附等作用达到削减径流雨水、推迟洪峰、补充地下水的目的。

在城市绿地建设过程中,绿地两侧硬化道路一般按照1%坡比设计,硬化路面设计高程高于绿地高程0.15~0.30 m,在下凹式绿地中布设雨水溢流口,雨水溢流口高程高于绿地高程(0.05~0.15 m)且低于地面高程,绿地结构形式和布局旨在将两侧道路雨水径流汇入下凹式绿地,并经下凹式绿地调蓄、储存后经由连接城市雨水管网中的雨水溢流口和下端雨水管渠排除(图3)。

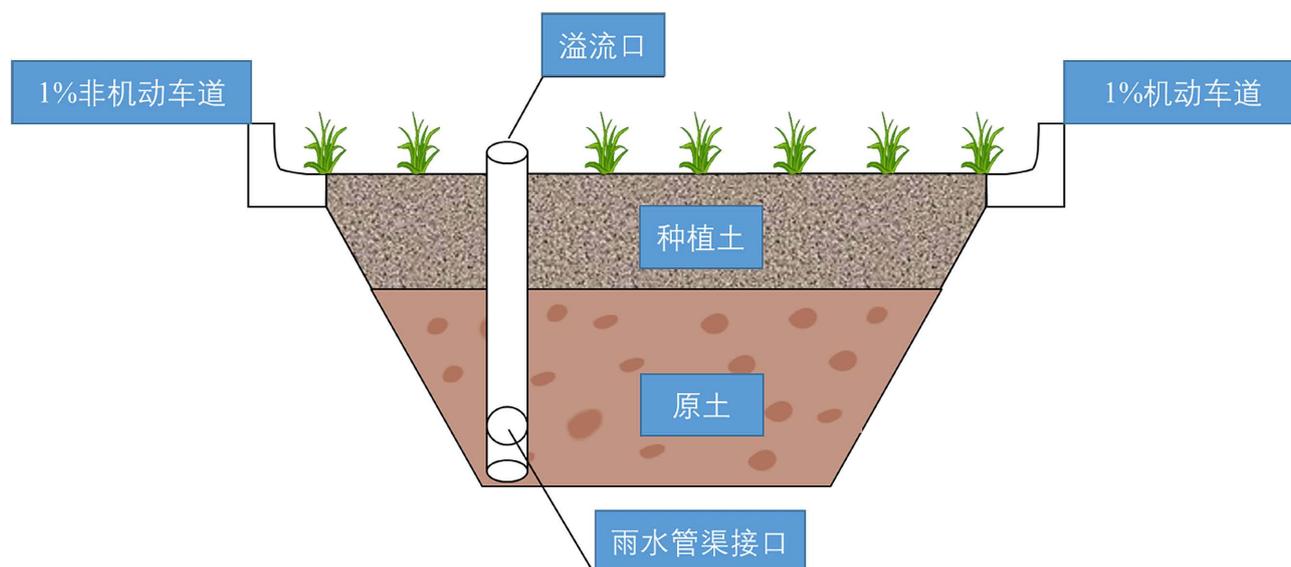


Figure 3. Typical structure of concave green space

图 3. 下凹式绿地典型结构

4.1. 下凹式绿地的优势

1) 对雨水的净化作用。下凹式绿地对径流雨水的净化作用主要受雨水调蓄系统中植物、集料和微生物等多方面的影响。植物在下凹式绿地雨水净化过程中起到关键作用，植物可以直接通过根系同化吸收去除径流中的氮、磷等营养物质。研究表明[4]，种植高羊茅后下凹式绿地对污染物的去除率明显提升，对 COD、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率分别达到 66.78%、96.92% 和 89.98%，配置植物的下凹式绿地对 Cu、Pb、Zn 三种重金属均有较好的削减效果，达到 95% 以上[5]。集料主要通过过滤和吸附作用去除污染物，因此，下凹式绿地设计中集料的种类、配比、集料层的高度均需结合区域水质情况和净化目标具体选择。Kanaly 等[6]对 20、40 和 60 cm 土壤集料污染物削减效果研究发现污染物的去除效果随着土壤基质层厚度的增加而提升。微生物降解主要针对雨水径流中常规污染物以外的特殊污染物，如芳香烃、三氯苯烷等，而在细菌和真菌的共同作用下可高效降解 5 环以上的多环芳香烃。

2) 增加地下水资源。在城市化建设过程中，地下水资源出现了一定程度的供需矛盾，大规模的城市硬化，使得地下水难以得到有效的补充，使得城市地下水位不断下降，而下凹式绿地的建设，将绿地两侧道路承接雨量收集蓄存，通过雨水下渗对地下水不断补充。通过对深圳市 2 年一遇暴雨分析发现，区域年降雨量的 80% 以上可通过下凹式绿地入渗，补充地下水资源，且每年预计可将 11 亿 m^3 的雨水径流转化为地下水[7]。这一措施对于旱半干旱地区缺水型城市效果尤其明显。

3) 缓冲洪涝灾害。近几年，随着城市化进程不断加快，城市基础设施不断开发建设，建筑物、道路硬化等不透水区域面积不断增加，人为阻断了雨水入渗到地下的途径。由于城市不透水区域不断增加，只有 45% 左右的降雨量能下渗到土壤，而 55% 左右的降雨量形成了城市径流，远大于自然状态下的 15% [8]，导致了城市洪涝灾害频发。在下凹式绿地建设标准中明确指出，在 2 年一遇设计暴雨下，下凹式绿地建设调蓄、储存能力需满足绿地区域承接雨量的 80%，而对于 10 年一遇设计暴雨，下凹式绿地建设后也需将一次降雨过程降雨量的 70% 以上调蓄、储存。在这一规范的要求下，配置布设下凹式绿地可极大减小城市防洪、疏导压力和洪涝灾害。

4) 调节区域小气候。下凹式绿地的布设可将雨水径流大幅度下渗土壤，在日照、风力和植物蒸腾等的共同作用下蒸发，形成较强的上升气流，在城市上空和郊区形成气压差，提高了城市空气的流动性，达到削减温室气体、调节区域小气候、改善城市热岛效应的目标。

4.2. 下凹式绿地的不足

1) 易造成雨水浪费。下凹式绿地的多层结构彼此依赖，植被层是与大气连通的关键，当植被层形成物理结皮和生物结皮，甚至发生表土板结，将在一定范围内堵塞下凹式绿地填充物空隙，使得绿地多层结构发生破坏，大量雨洪、径流经由雨水溢流口排除，使其蓄水、排水能力将大幅下降，造成严重的雨水资源浪费。在超渗产流地区，浪费较大。

2) 结构易受破坏。结构决定功能，下凹式绿地结构的破坏将直接影响其效益的发挥。绿地结构的破坏主要有两种，一是绿地两侧污染物在径流等介质的输移下汇集到植被层，造成填充物空隙堵塞，发生结构破坏；二是雨季来临时，暴雨条件下区域承接雨量过大，当承接雨量超过下凹式绿地的荷载能力，过剩的径流难以通过溢流口经由城市管网及时排除，使得绿地无法完全发挥蓄水、排水的作用，导致下凹式绿地生态系统功能受到破坏。

5. 生物滞留设施

生物滞留设施(Bioretention facility)就是浅水洼地或景观区利用工程土壤和植被来存储和治理径流的一种形式，是在模拟自然土壤渗透过程的基础上发展而来的雨水径流原位调控技术。通常，生物滞留设施由蓄水层(200~300 mm)、覆盖层(树皮、枯落物等 50~100 mm)、种植土(250~1200 mm)、砂层(100 mm 或透水土工布)、防渗层(防渗膜)、排水层和砾石层(250~300 mm)组成(图 4)。生物滞留设施的分类形式多样，根据土壤渗透能力强弱可分为简易型生物滞留设施和复杂型生物滞留设施。根据离建筑物的距离、地下水位高低、土壤渗透能力和环境条件，可分为渗透型、半渗透型和非渗透型生物滞留设施三种。根据设施大小、外观、建造位置和适用范围，可分为雨水花园、滞留带(也称生物沟、生态滤沟)、滞留花坛和生态树池四种。

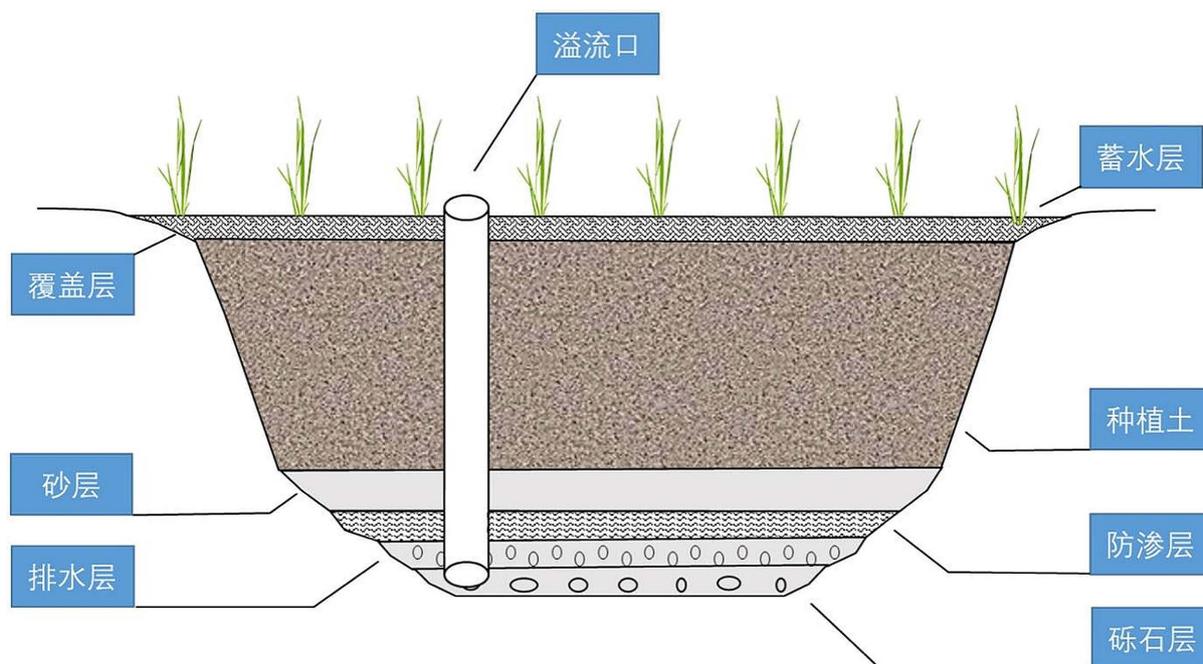


Figure 4. Typical structure of a bioretention facility

图 4. 生物滞留设施典型结构

5.1. 生物滞留设施的优势

1) 削减径流总量和洪峰流量。研究发现[9] [10]，生物滞留设施可显著推迟洪峰出现时间，对洪峰流量的削减率 49%~59%。降雨过程中，生物滞留设施容纳区域承接降雨量及设施周边汇水区过剩的雨水径流，生物滞留

技术首先通过“蓄-渗-排”模式将汇入的雨水径流蓄存,在蓄存的过程中雨水随之下渗,不断达到下层结构的荷载能力,此后,过剩的径流通过溢流口经由城市管网排出,达到削减径流总量的总目标。生物滞留设施对径流的调蓄能力与基质材料密切相关,刘海荣等[11]采用人工模拟生物滞留设施的方法比较了不同基质生物滞留设施调蓄能力,发现蛭石滞留率为32.08%,陶粒滞留率为21.90%,砂滞留率为44.90%,珍珠岩滞留率为27.30%,园土滞留率为33.10%,沸石滞留率为29.85%,腐叶土滞留率为21.65%,椰糠滞留率为25.83%,表明生物滞留设施对雨水径流及峰值流量的削减效果较明显。此外,对于生物滞留设施,其对径流的调蓄能力基本趋于恒定,而区域降雨量与季节变化联系密切,存在不同形式的降雨类型,因此,生物滞留设施结构应结合区域降雨特征设计。例如,田妍等[12]选取田宁市某生物滞留设施为例,依次选择小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨5场次实际降雨类型考察该生物滞留设施对径流的调蓄效果,结果表明该生物滞留设施对36.1 mm以下降雨可完全消纳,当降雨量达到暴雨水平时,径流控制率接近79%,24 h降雨量达到150 mm附近时,调蓄效果迅速下降至53%,这表示生物滞留带对控制区域内大雨及以下水平的降雨径流的调蓄能力强。

2) 净化水质。生物滞留设施对水质的净化主要体现在控制径流雨水污染物方面,包括去除悬浮物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、金属污染物、有机污染物等。径流中的悬浮固体主要通过集料的过滤、沉淀和吸附等作用被滞留,目前,关于生物滞留设施对悬浮物的去除效果没有一致结论,理想状态下生物滞留设施对悬浮物的去除效果在90%以上,而Hsieh等[13]基于试验表明生物滞留设施对悬浮物的去除效果在29%~96%区间变化。氮、磷元素在环境中存在形式多样,因而不同生物滞留设施由于其结构和集料的差异导致其对氮、磷的处理效果不稳定。Li等[14]通过对6次降雨的监测发现生物滞留设施对总氮的去除率仅为41%,而当集料发生改变时(如添加外部碳源),可以提高生物滞留设施对总氮的吸附和去除效果,可以发现生物滞留设施去除氮的效果主要受其内部环境影响。微生物和植物的吸收固定作用是去除环境中固态磷和液态磷的重要途径,但在厌氧情况下,微生物会释放体内储存的磷,从而造成去除效果被影响。研究表明,生物滞留设施对径流中重金属的去除效果较好,主要通过设施内部滞留介质(集料吸附、砂石滤层等)对重金属的吸附、设施表面颗粒物的拦截以及植物的吸附作用使净化后的雨水中重金属含量降低,如Davis等[15]发现,生物滞留设施对Cu、Pb、Zn等重金属的去除率均高达97%以上,其中覆盖层对重金属的吸收发挥关键作用。关于生物滞留设施去除有机污染物的研究主要针对多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs),对于多氯联苯(Polychlorinated biphenyls, PCBs)、有机氯农药(Organochlorine pesticides, OCPs)等的研究较少,对径流中产生的新型污染物(Emerging contaminants, ECs)的研究更少,仅有部分学者开展了对雨洪径流过程中的甲苯、萘、油脂类等有机污染物的研究,结果表明生物滞留设施对油脂类物质的去除率达96%以上。

5.2. 生物滞留设施的不足

1) 植物功能性和景观性兼容差。生物滞留设施设计植物种选择时多关注植被的适应能力,如耐寒、耐旱、耐贫瘠、耐淹能力和水质净化效果,保证植物成活。在这一目标的驱使下,生物滞留设施往往为了达到预期效果实现功能需求而弱化景观需求,植物观赏价值较低,甚至在一定程度上不能照顾周围环境。

2) 作物生长困难。生物滞留设施设计中种植土可选择回填土或客土,回填土常伴随含砂量低、土壤黏粒含量低、有机质含量不足等问题,这些土壤特性在生物滞留设施运营期间会诱发土壤板结的发生,甚至在强降雨天气下导致生物滞留设施受到破坏。土壤板结后,滞留设施空隙发生堵塞,土壤水分运移过程受到限制,极大的降低生物滞留设施的水分蓄存和吸附净化污染物的能力,同时导致植物生长所需的土壤水分、空气、适宜温度条件受到制约,进而威胁植物生长。

3) 雨水调蓄能力不足。在海绵城市的建设中,生物滞留设施能有效控制小范围降雨事件以及处理暴雨初期径流,但对于大面积汇水区域雨水和地表污染严重的区域,无法到达削减径流量的目标。这主要因为在强降雨过程中,在雨水径流的冲刷能力加剧,大量杂质、泥沙不断在生物滞留设施中累积,导致污染物富集或堵塞生物滞留设施。因此,在生物滞留设施设计时应充分计算区域汇水面积,密切结合区域降雨特点,协调滞留设施与周围环境关系。

6. 结语

城市化是经济高速发展的重要趋势,传统城市建设模式下城市复合生态系统中城市发展与自然生态进程往往在快速城镇化过程中被打破。当今城市化发展正面临着城市内涝、水资源短缺、地下水位下降、水资源污染等一系列生态环境问题,在建设用地进一步扩增下,破坏了天然水循环系统,导致“逢雨必涝”、“城里看海”等频发,几乎在我国南北方城市出现“有水皆污”、“有河皆枯”的景象。在此背景下,基于“渗、滞、蓄、净、用、排”等措施的雨水源头减排技术,适宜城市发展新理念和新模式,为缓解城市化进程带来的生态环境问题指明了新方向。此外,我国在城市雨水减排设施设计和布局中需综合透水路面、绿色屋顶、下凹式绿地和生物滞留设施等关键技术的特点,使多种设施交叉和融合,实现海绵城市建设的多目标需求。

参考文献

- [1] 邓芳,李登波,张晓萍.中国城市内涝中的主要水力学问题[J].水科学与工程技术,2020(3):68-72.
DENG Fang, LI Dengbo and ZHANG Xiaoping. Major hydraulic problems in urban waterlogging in China. *Water Science and Engineering Technology*, 2020(3): 68-72. (in Chinese)
- [2] 付培江.透水混凝土强度相关性试验研究[D]:[硕士学位论文].北京:北方工业大学,2009.
FU Peijiang. Experimental study on strength correlation of pervious concrete. Master's Thesis, Beijing: Northern University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [3] STOVIN, V., VESUVIANO, G. and KASMIN, H. The hydrological performance of a green roof testbed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 2012, 414(11): 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.022>
- [4] 王国庆,王洪.下凹式绿地对降雨径流及其污染物削减作用[J].黑龙江农业科学,2019(8):101-106.
WANG Guoqing, WANG Hong. Reduction effect of concave green space on rainfall runoff and its pollutants. *Heilongjiang Agricultural Science*. 2019(8): 101-106. (in Chinese)
- [5] 李畅,王思思,等.下沉式绿地对雨水径流污染物的削减效果及影响因素分析[J].科学技术与工程,2018,18(11):215-224.
LI Chang, WANG Sisi, et al. Analysis of the reduction effect and influencing factors of sunken green space on rainwater runoff pollutants. *Science, Technology and Engineering*. 2018, 18(11): 215-224. (in Chinese)
- [6] KANAL, R. A., HARAYAMA, S. Advances in the field of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation by bacteria. *Microbial Biotechnology*, 2010, 3(2): 136-164. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00130.x>
- [7] 俞绍武,丁年,任心欣,等.城市下凹式绿地雨水蓄渗利用技术的探讨[J].给水排水,2010,46(S1):116-118.
YU Shaowu, DING Nian, REN Xinxin, et al. Discussion on rainwater storage and infiltration utilization technology of urban concave green space. *Water Supply and Drainage*, 2010, 46(S1): 116-118. (in Chinese)
- [8] 缪勤荣.下凹式绿化带优化市政道路排水探究[J].重庆建筑,2015,14(4):25-27.
MIAO Qinrong. Study on the optimization of municipal road drainage by concave green belt. *Chongqing Building*, 2015, 14(4): 25-27. (in Chinese)
- [9] 车伍,闫攀,赵杨,等.国际现代雨洪管理体系的发展及剖析[J].中国给水排水,2014,30(18):45-51.
CHE Wu, YAN Pan, ZHAO Yang, et al. International modern stormwater management system development and analysis. *China Water Supply and Drainage*, 2014, 30(18): 45-51. (in Chinese)
- [10] CHE, W., ZHAO, Y., YANG, Z., et al. Integral stormwater management master plan and design in an ecological community. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2014, 26(9): 1818-1823.
- [11] 刘海荣,史瀚灏,齐立海,等.不同基质对生物滞留设施性能的影响研究[J].天津农林科技,2022(5):9-14.
LIU Hairong, SHI Yanyou, QI Lihai, et al. Effects of different substrates on the performance of bio-retention facilities. *Tianjin Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2022(5): 9-14. (in Chinese)
- [12] 田妍,张倩文,李达,等.基于模型评估的生物滞留带效能及参数评价[J].环境工程,2019,37(7):52-56.
TIAN Yan, ZHANG Qianwen, LI Da, et al. Bioretention efficiency and parameter evaluation based on model evaluation. *Environmental Engineering*, 2019, 37(7): 52-56. (in Chinese)
- [13] HSIEH, C, DAVIS, A. P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(11): 1521-1531. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(1521\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1521))
- [14] LI, L., DAVIS, A. P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(6): 3403-3410. <https://doi.org/10.1021/es4055302>
- [15] DAVI, A. P., SHOKOUHIAN, M., SHARMA, H., et al. Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. *Water Environment Research*, 2001, 73(1): 5-14. <https://doi.org/10.2175/106143001X138624>