

雨水的资源化利用研究进展

冯伟杰

华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月15日; 录用日期: 2025年4月8日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

介绍河南省首个海绵城市试点城市鹤壁在建设过程中所采用的雨水资源化技术方法, 包括新建城市绿地、新建住宅小区、改建的城市道路和住宅小区等几个方面来阐述雨水资源化利用技术的研究进展, 对各个技术方法进行分析讨论。结合雨水资源化利用的各个技术方法实施的效果, 对各个相似地区的雨水资源化利用予以参考, 同时对我国雨水资源化利用提出建议。

关键词

雨水资源化利用, 雨水收集, 海绵城市, 低影响雨水开发

Research Progress in Rainwater Resource Utilization Technology

Weijie Feng

College of Environment and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Hydropower, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 15th, 2025; accepted: Apr. 8th, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Introduce the rainwater resource utilization technology and methods used in the construction process of Hebei, the first sponge city pilot city in Henan Province, including the construction of new urban green spaces, new residential communities, renovated urban roads, and residential communities, to elaborate on the research progress of rainwater resource utilization technology, and analyze and discuss various technical methods. Based on the implementation results of various technical methods for rainwater resource utilization, this paper provides reference for rainwater resource utilization in similar regions, and puts forward suggestions for rainwater resource utilization in China.

Keywords

Rainwater Resource Utilization, Rainwater Collection, Sponge City, Low Impact Rainwater Development

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

随着我国国民经济的快速发展,城镇化率的不断提高,城市用水量急剧上升,此外,建设“美丽乡村”的目标要求,越来越多的老百姓告别了吃井水的历史。在今后相当长的一段时间内,我国居民用水量是上升的。与此同时,我国的水资源量日益减少,我国的水资源总量居世界第四位,但是人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4,这给我国的经济的发展带来相当大的压力,我国虽然有总体量较大的雨水资源,但是大部分都没有得到有效的利用,雨水资源的利用率不到 1% [1][2]。此外,由于长期依赖地下水资源,而城市的表面阻碍了大部分的雨水下渗,地下水得不到补充,地下水超采带来一系列问题非常严重因此,在雨水资源的开发利用过程中,应充分考虑经济资源和生态资源的价值[3]。

关于最早的人工雨水资源利用设施,笔者在童年时代曾经见到并使用过。所在地位河南省鹤壁市西北部的丘陵地区,属于暖温带半湿润型季风气候,春冬干燥少雨,夏秋炎热多雨,气温降水量等要素年际变化显著[4]。不同于东南丘陵,这里年平均降雨量 664.9 mm,且分布极不均匀。也不同于平原地区,修建灌溉渠取水方便,也可大面积灌溉。因此诞生了适用于本地区的雨水资源利用设施——半埋式集水池:土砖修建,表面涂上水泥,顶部留有 1 m² 的池口,池壁地表以上留有栅栏。这种池大多建在路边,下雨时可收集顺流而下的雨水。春天雨水少时,可以用来灌溉农田。但相比于用水量更为紧张的城市,雨水资源化利用的设施甚为稀少。

自 2015 年国务院发布《关于推进海绵城市建设的指导意见》发布以来,越来越多的雨水资源化利用项目如雨后春笋般开展,鹤壁市作为我省首个海绵城市试点之一,在雨水资源化利用上积攒了宝贵的经验,取得了丰硕的成绩。本研究数据源自鹤壁市海绵城市试点官方报告、市政公开数据及实地调研,涵盖地下水位、雨水调蓄量等指标。地下水位通过监测井均值计算,雨水利用量由流量计统计,污染物去除率参照《地表水标准》检测。采用描述性分析验证技术效果,结果显示地下水年均回升 0.5~1 米,自来水替代率达 1.23%。下文将结合技术案例,解析雨水资源化实践路径与成效。

2. 低影响雨水开发工程概述

低影响开发是指在城市的建设过程中,通过采用生态化的措施,尽可能从源头上维持城市及其周边水文特性在建设前后不变,在减轻径流总量、径流峰值和径流污染增加对生态环境造成的不利影响等方面起到重要作用。欧洲也有国家已推出可持续城市排水系统,旨在维持该地区原有的水文条件,并尽量减少可持续城市排水系统对下游径流数量和质量的影响[5]。中国有大量的城市社区不适合直接改造或重建,所以,按照低影响开发的理念,在场所源头分散建设用以缩减径流总量、峰值流量及减少径流污染的设施以一定方式组合成的总体即为低影响雨水开发系统[6]。其中,低影响雨水开发设施主要有透水铺装、绿化屋面、下沉式绿地、生物滞留设施、植草沟、模块调蓄池、高位花坛、旱溪、雨水罐、湿塘、雨水湿地等通用措施,以及限流式削峰雨水斗、雨水收集组合装置、道路雨水口初期雨水多级净化装置等特色设施[7]。

3. 雨水的收集与处理

城市雨水收集主要包括屋面雨水收集、绿化雨水收集、道路雨水收集三个方面。建设时应充分考虑雨水不同时段污染情况、雨水污染途径，利用城市雨水水质的特点，结合相应处理技术，在提高回收雨水的质量和效率方面起到关键作用[8]。

3.1. 屋面雨水的收集与处理

城市雨水径流量的主要组成部分之一为屋面雨水，可占其总量的 65% [9]。对比道路雨水，重金属污染较小，水质稍好，是理想的资源化雨水来源。但是，由于初期屋面雨水仍然有一定的污染，则需要有处理初期屋面雨水的设施。

3.1.1. 绿色屋面

绿色屋面是指高出地面以上，与自然土层不连接的各类建筑物、构筑物的顶部设置具有绿化体系各类下垫面。绿色屋面的主要功能是减少外排水量，其次还具有延缓峰现时间，降低峰值流量，消减径流污染的作用。绿色屋面位于低影响雨水开发系统的源头，宜建在平层或坡度较低的屋顶。田甜等[10]研究发现了草坪式绿色屋面对雨水重污染物的净化效果有一定作用，其中 COD 去除率可达 40%，氨氮大约 55%，总氮、总磷分别为 42%、49%。并且草坪型屋顶绿化的净化效果优于灌木型屋顶绿化。此外，具有使用成本低，屋面荷载小的优点。

3.1.2. 高位花坛

高位花坛是指人们基于土壤渗透原理，建造的可收集并净化雨水的花坛，其出水口距离集水面有一定的垂直高度，下落雨水在重力作用下流经填充滤料，在滤料的吸附作用下去除雨水中的污染物。在一些老旧小区，考虑到屋顶的承载负荷不足，不能建造绿色屋顶，则可以在建筑物或构筑物四周用高位花坛代替，雨水经雨水排水立管流入高位花坛，经过填充基质的吸附作用，最终流入花坛底部的雨水收集管道[11]。不同基质对雨水的净化作用不同，混合基质的净水效果要好于单种基质，刘雅慧等[12]使用蛭石: 沸石: 陶粒 = 3:3:4 的基质净水效果最好，对实际雨水径流中的 SS、COD、NH₃-N、TP 的去除率分别为：95%、90%、83%、95%。此外，高位花坛可承受超过自身面积的 6 倍的区域雨水渗透，在暴雨情况下，可运行 200 多个小时。

3.1.3. 对比分析

绿色屋顶与高位花坛是海绵城市雨水资源化的重要技术，二者对比如表 1 所示。绿色屋顶建设成本较高，但能高效去除 COD 和氨氮，兼具降温节能效果，适用于承重达标的新建建筑；高位花坛成本相对较低、灵活性强，通过混合基质可去除 SS 和 TP，适配老旧小区改造，但需定期维护且暴雨易溢流。鹤壁案例中，绿色屋顶使新建社区年集水量提升 12%，高位花坛助力老旧社区集水量增长 15%。二者需因地制宜选择，兼顾经济性、生态效益与工程可行性。

Table 1. Comparison of different roof rainwater collection systems
表 1. 不同屋面雨水收集系统的对比

	绿色屋顶	高位花坛
初期建设成本	200~300 元/m ²	80~120 元/m ²
维护需求	需定期修剪植物，更换基质	定期清理滤料，更换基质
污染物净化效率	COD 去除率约 40%、氨氮去除率约 55%	SS 去除率约 95%、TP 去除率约 95%
适用场景	新建小区、承重达标屋顶	老旧小区改造、屋顶荷载不足区域

3.2. 绿地雨水收集与处理

绿地雨水收集即利用植物自身吸收、储存和净化雨水渗透和径流的能力,提供了一种更全面、更有弹性的方法来管理城市环境中的径流、污染和水资源[12]。绿地雨水收集一般以下渗为主要的利用形式,尽管绿地集流率较低,但是集流面积大,也可收集到大量雨水。在城市公园中,绿地主要有大面积草坪为主的绿地和搭配有不同植物组成的绿地。一般来说,前者适合建造为下沉式绿地,后者可以建造为雨水花园,保留其景观绿化作用的同时,达到净化雨水的效果。

3.2.1. 下沉式绿地

下沉式绿地是海绵城市低影响开发(LID)体系中的核心设施之一,其核心设计理念是通过地形改造,将绿地标高降低至低于周边路面 5~30 厘米,形成天然的雨水滞蓄空间,实现“渗、滞、蓄”三位一体的水文调控功能[13]。其典型结构包括下沉区域、溢流口、渗透性土壤层、植被覆盖层及底部排水层。通过重力作用,下沉式绿地可将周边道路、屋顶等硬化地面的雨水径流自然导引至绿地内部,利用土壤孔隙(渗透系数通常为 10^{-5} ~ 10^{-4} m/s)和植物根系的疏导作用增强雨水下渗能力,同时延缓径流峰值出现时间。研究表明,下沉式绿地对中小降雨事件(重现期 ≤ 2 年)的雨水滞留效率可达 30%~50%,较普通绿地提升 2~3 倍,但其净化能力较弱,因未设置专用滤料和耐寒植物,对污染物的去除率通常低于 20%,且对暴雨峰值流量(重现期 ≥ 10 年)的削减能力有限,通常仅能降低 15%~25%。

3.2.2. 雨水花园

雨水花园是一种生物滞留设施,是在下沉式绿地的基础上种植有景观和净水效果兼具的植物,利用土壤和植物的孔隙结构,来消减雨水径流,吸附水中污染物的设施。雨水花园一般由植被,种植土层,滤料层,覆盖层组成,考虑到雨水回用的功能,也可保留蓄水空间。其中,覆盖物可促进微生物系统活性,种植土层和滤料层起到渗透和过滤作用,植被和微生物通过生物降解来去除污染物。蒋春博等[14]通过对使用成本低廉的原状土为填料的雨水花园研究,发现其降水消减率为 11.2%~100%,中位值为 69.14%。在水质方面,通过与原水比较,主要四种污染物总氮磷、氨氮、COD 达到《地表水质量标准》IV 类水的比率大幅增高,最高为 50%。目前对于高强度的降水,尤其入秋之后,掉落的枯枝败叶覆盖花园表层,严重影响雨水花园削减雨水径流的功能,植物残留物的腐败可能会造成污染[15]。

3.2.3. 对比分析

下沉式绿地与雨水花园均为海绵城市中重要的低影响开发设施,但二者在功能定位与技术特性上存在显著差异,二者对比如表 2 所示。下沉式绿地以水文调控为核心,通过地形下沉增强雨水滞留与下渗,结构简单、成本低廉,适用于道路隔离带等土地紧张区域,但其净化能力较弱,且暴雨时易溢流。相比之下,雨水花园在下沉式绿地基础上增设滤料层与覆盖层,结合植物与微生物协同作用,显著提升水质净化效能,兼具景观价值,但建设成本与维护需求更高,需定期清理枯叶、更换滤料。实际应用中,下沉式绿地适合以水文调控为主的场景(如鹤壁市主干道改造),而雨水花园更适配需兼顾水质净化与生态美观的区域。未来可通过材料改良(如抗堵塞透水基质)与植物筛选(耐寒耐淹品种)优化二者性能,并探索其串联应用模式,以实现经济性与生态效益的平衡。

3.3. 道路雨水的收集与处理

过去的城市建设过程中并没有考虑雨水资源化利用,城市道路一般为不透水路面,约占城市规划 10%~40% [16]。我国的市政设施尤其是排水设施的管理一直不到位,所以每逢下雨,城市道路容易形成较强径流。并且,由于空气中汽车尾气的沉淀以及路边垃圾的污染,道路雨水的水质较差,污染较为严重,主要为总悬浮固体量超标,有机污染严重,N、P 污染相对较轻[17]。城市道路雨水回收应充分考虑

初期雨水的处理。由于城市道路的大规模改造影响范围较大，鹤壁市在建设 LID 的过程中，针对道路雨水口，开发了初期雨水多级净化装置，初期雨水截污挂篮多级净化装置。基于改造干扰最小化的原则，实现初期雨水的径流污染控制问题。

Table 2. Comparison of rainwater collection systems in different green spaces
表 2. 不同绿地雨水收集系统的对比

	下沉式绿地	雨水花园
建设成本	较低(约 100~200 元/m ²)	较高(约 300~500 元/m ²)
维护需求	需定期清理沉积物(年均 2~3 次)，渗透性能易下降	需定期更换滤料、修剪植物、清理枯叶，防止堵塞和二次污染
污染物净化效率	COD、TP 去除率<20%	COD 去除率 50%~90%；TN、TP 去除率 60%~95%
适用场景	道路隔离带、公共绿地、土地紧张区域	需兼顾净化与景观的区域，如小区绿地、公园

3.3.1. 初期雨水多级净化装置

道路初期雨水由于其流量较小，一般沿道路两侧以小股细流的方式流入雨水口，在雨水口内沿着下水道墙壁垂直贴壁向下流。该多级净化装置将含有级配碎石的立体装过滤装置紧挨雨水口墙壁一侧设置，与雨水口宽度保持相同，长为雨水口的 1/4，填充颗粒物粒径从上到下直径依次减小，因此孔隙率由大到下，可防止净化装置上层堵塞。小股细流的初期雨水通过过滤装置，填充物起到吸附作用，大部分的径流污染得到去除。后期雨水因为水量大，一般以大股水流的姿态倾泻而下，不会对填充物内的颗粒造成冲击，从而避免被吸附的污染物再次污染雨水。经过净化装置后，雨水再流入雨水管道进行回收利用[7]。

3.3.2. 雨水截污挂篮装置

截污挂篮装置则采用四棱台状结构，悬挂于雨水篦子下方，分为上下两部分：上部为粗格栅(占体积 3/4)，拦截较大漂浮物并防止雨水口堵塞；下部为致密滤网，专门过滤初期雨水中的细颗粒污染物(如微塑料、油类)[18]。当雨水流量较大时，上层缝隙稍大的格栅除了阻拦体积稍大的悬浮物外，也可防止雨水在雨水口处的堵塞和淤积。对于改造空间大的雨水口，也可以上文提到的多级净化设备联用。通过截污挂篮和多级净化过程，可以去除雨水中的大部分污染物。能够有效降低雨水的化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)和重金属含量等，减少对受纳水体的污染，且截污挂篮方便拆卸和清理，定期清理挂篮中的固体垃圾即可。过滤和沉淀单元的维护也相对简单，如定期更换过滤介质、清理沉淀单元底部的沉淀物等操作都比较容易进行。

3.3.3. 透水铺装

根据道路的不同功能，可选择的透水铺装有三种：透水沥青铺装、透水砖、透水混凝土铺装[19]。对于初期雨水水质较好的路面比如城市花园人行道，小区人行道，以及改造影响小的路面，可考虑用透水性铺装代替传统铺装。根据赵丽华等[20]研究，全沥青透水铺装的渗水系数可高达：4899 mL/min。但是随着时间的延伸，透水铺装的渗水性能有所下降，SS 的去除率下降明显，秦余朝等[21]分别对比了使用 1 年、5 年、12 年的透水铺装的截污能力，发现对 SS 的去除率由 67%下降到 10%，相反的是对 COD、TN 的去除率分别上升了 27%、56%，对 TP 的去除率变化不明显。上述现象可能是因为渗透性能变差，倒置污染物被截留在透水铺装表面。未来可以朝着透水铺装的保养、延长使用年限的方向研究。

3.3.3. 对比分析

初期雨水多级净化装置、截污挂篮装置及透水铺装是海绵城市建设中三类重要的源头截污技术，二者对比如表 3 所示。多级净化装置通过级配碎石分层过滤，高效拦截悬浮物并吸附溶解性 COD、重金属，初期雨水去除率较高，但需定期更换滤料。截污挂篮装置采用四棱台结构，上部粗格栅拦截大颗粒污染物，下部滤网过滤微塑料等细颗粒，维护便捷，适合改造空间受限区域，但对溶解性污染物去除能力较弱。透水铺装通过材料渗透性促进雨水下渗，初期渗水性能优异(渗水系数达 4899 mL/min)，但随使用时间延长，SS 去除率显著下降，而 COD、TN 去除率因表面污染物降解反而呈上升趋势。三者中，多级净化装置与截污挂篮联用可兼顾拦截与深度净化(鹤壁案例显示雨水回用率提升 18%)，透水铺装则更适用于低污染、低交通负荷区域(如人行道)。未来需优化透水材料抗堵塞性，并探索多技术协同模式以平衡效能与成本。

Table 3. Comparison of different road rainwater collection systems
表 3. 不同道路雨水的收集系统的对比

	多级净化装置	截污挂篮装置	透水铺装
建设成本	中等(滤料费用较高)	较低(模块化设计)	中等(透水材料成本较高)
维护需求	1~2 年更换滤料	1~2 次/月清理垃圾	定期高压冲洗(防堵塞)
污染物净化效率	SS>90%; COD: 70%~85%; 重金属: 60%~75%	SS: 80%~90%; 微塑料: 60%~70%	SS 初期 67%→12 年后 10%; COD/TN 随年限上升
适用场景	高污染道路雨水口	改造受限的雨水口	人行道、小区等低污染区域

4. 雨水的资源化利用

目前对于雨水收集的技术日渐增多，除了补充超采地下水，恢复生态等功能，雨水的利用也日益成为人们关注的对象，利用途径也较为广泛。既可用于冲厕、洗衣、道路清洗等生活用水、消防用水，也可用于灌溉园林和农田，作为生态景观的补充水。对于污染较小的回收雨水，可单设一体化设备蓄水使用。对于污染较重的雨水可采用人工湿地经过净化后再进行使用[22]。

4.1. PP 模块化蓄水池雨水资源化中的综合应用

PP 模块化蓄水池采用聚丙烯(PP)塑料模块拼装而成，外层以“两布一膜”(HDPE 膜 + 双层土工布)防渗结构为核心，具备高强度(承载力 ≥ 50 吨/m²)与生态安全性，可灵活构建 10~5000 m³ 的储水系统，实现雨水高效收集、储存与多元化回用[23]。在市政与生活用水领域，其处理后的雨水可替代绿化灌溉、道路清洗及公厕冲洗用水，如鹤壁市某社区通过 800 m³ 蓄水池年收集雨水 1.8 万 m³，替代 40% 市政绿化用水，年节约水费 12 万元；郑州市某工业园则将其作为消防应急水源，提升安全保障能力。在生态修复方面，济南市某生态公园通过串联 PP 蓄水池与人工湿地，雨季蓄存 5 万 m³ 雨水用于旱季河道生态补水，促使周边地下水位回升 0.8 米，缓解水资源短缺。技术层面，模块化设计使施工周期缩短 60%，成本较传统混凝土池降低 35%~50%，且封闭结构杜绝藻类滋生，避免二次污染。智能联动技术的引入进一步优化效能，如深圳市某商业综合体集成水位传感器与光伏驱动泵站，雨水利用率达 70%，能耗降低显著。然而，该技术仍需攻克紫外线老化与冬季防冻问题，未来可通过纳米涂层、保温模块研发提升耐久性，并探索“PP 蓄水池 + 透水铺装 + 智慧管理”协同模式，推动城市雨水从“被动排放”向“主动利用”转型，为海绵城市可持续发展提供关键技术支撑[24]。

4.2. 人工湿地在雨水资源化中的综合应用

如图 1 所示,人工湿地作为雨水资源化利用的生态化技术,通过基质(陶粒、砂石)的物理吸附、微生物的氧化分解(如硝化反硝化脱氮)及植物根系(芦苇、香蒲等)对营养盐($\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP)的吸收富集,形成“物理-化学-生物”协同净化体系。根据水流路径,其可分为表面流、水平潜流和垂直潜流湿地,而多级串联模式(如“垂直流+水平流”)可显著提升净化效能[25]。研究表明,多级湿地对雨水中的 SS、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 去除率分别达 92%、81%、83%、88% [26],出水水质稳定达到景观回用标准(GB/T 18921-2019)。在应用层面,鹤壁市通过日均处理 5000 m^3 雨水的多级湿地系统,将净化水用于道路清洗、绿化灌溉及工业冷却,年替代市政供水 18%,减少地下水开采超 100 万 m^3 ;上海市某滨河公园将表面流湿地与景观水系融合,雨季补水、旱季自净,生物多样性提升 30%;荷兰代尔夫特市则利用水平潜流湿地处理农田径流,实现 TP 去除率 85%以上,净化水回灌农田,达成“控污-循环”双目标。技术优势上,人工湿地兼具低能耗(为传统工艺的 20%~30%)、景观融合度高及运维成本低等特点,但面临占地面积大(5~10 m^2/m^3)、冬季效率下降(脱氮率降低 40%)等挑战。未来可通过模块化设计(如集装箱式湿地)、耐寒植物筛选(水葱、菖蒲)及智能调控系统(实时监测 pH、溶解氧)优化性能,并探索与透水铺装、蓄水池的协同模式,构建“集水-净化-回用”全链条体系,推动城市雨水从“末端治理”向“资源循环”转型,助力绿色可持续发展。

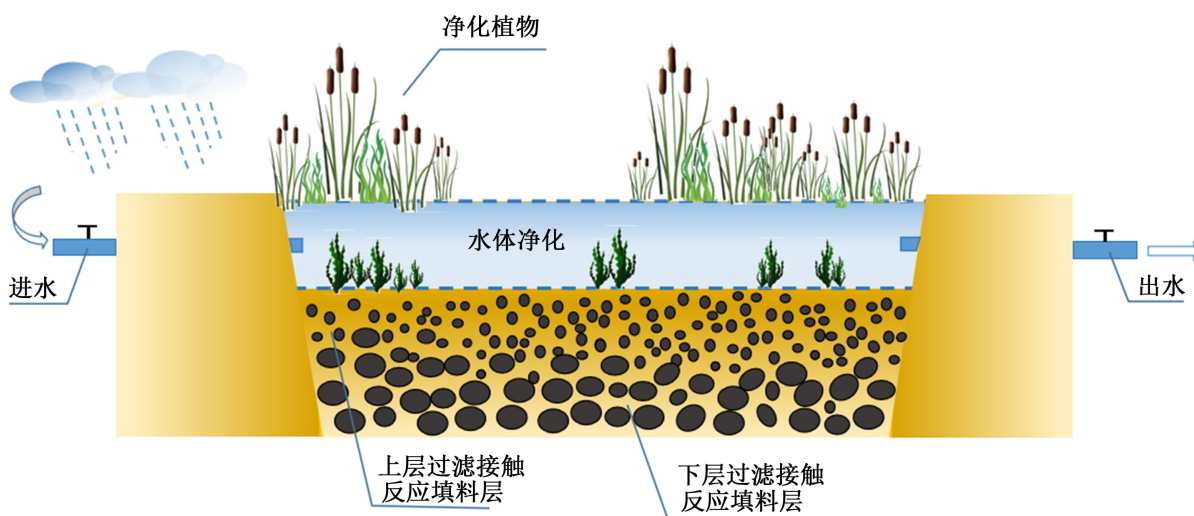


Figure 1. Artificial wetland map
图 1. 人工湿地图

5. 总结与展望

1) 本文通过鹤壁市海绵城市试点实践,系统验证了雨水资源化技术的综合效益:PP 模块化蓄水池与人工湿地联用使雨水回用率提升 18%,地下水年均回升 0.5~1 米;透水铺装与截污挂篮协同降低受纳水体污染负荷 40%。然而,技术瓶颈仍存——透水铺装渗水性能随年限衰退(SS 去除率 12 年内下降 57%)、人工湿地冬季脱氮效率降低 40%、PP 模块抗老化能力不足。未来需聚焦抗堵塞透水材料(如生物炭改性混凝土)、耐寒湿地植物(水葱、菖蒲)及智能监测系统的研发,并构建“渗-蓄-净-用”全链条管理体系。政策层面应完善雨水资源化标准体系,推行“以奖代补”机制,鼓励社区参与。通过技术迭代与制度创新,雨水资源化可成为缓解城市水危机、推动碳中和的关键路径,为全球缺水城市提供中国方案。

2) 雨水资源化技术在海绵城市建设中展现出多维价值：鹤壁市通过低影响开发设施，年替代市政供水 1.23%，节约成本 375~450 万元，同时促进生物多样性提升 30%。但技术推广面临空间约束(人工湿地占地 5~10 m²/m³)、运维复杂性(透水铺装需高频冲洗)及公众认知不足等挑战。未来研究应探索垂直化、模块化技术(如地下叠层湿地、集装箱式净化单元)，开发低维护长效材料(自清洁透水铺装、抗紫外线 PP 模块)，并构建智慧管理平台，实现雨水系统“监测-预警-调控”一体化。社会层面需加强公众教育，推广“雨水银行”等激励机制，引导社区自发参与。长远来看，雨水资源化需与城市规划、气候适应战略深度融合，通过跨学科协作(水文-生态-信息技术)推动城市从“灰色基建依赖”向“蓝绿共生”转型，为全球气候变化背景下的水资源管理贡献创新范式[27]。

参考文献

- [1] 孟玉. 城市雨水的综合利用[J]. 中国资源综合利用, 2006, 24(6): 23-25.
- [2] Ma, Y., Jiang, Y. and Swallow, S. (2020) China's Sponge City Development for Urban Water Resilience and Sustainability: A Policy Discussion. *Science of the Total Environment*, **729**, Article 139078. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139078>
- [3] Shah, A., Garg, A. and Mishra, V. (2021) Quantifying the Local Cooling Effects of Urban Green Spaces: Evidence from Bengaluru, India. *Landscape and Urban Planning*, **209**, Article 104043. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104043>
- [4] 周艳青, 贾梓良, 魏桐, 等. 海绵城市建设的水质水量控制效果实证研究: 以鹤壁试点区为例[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 134-140.
- [5] Oladunjoye, O., Proverbs, D. and Xiao, H. (2022) Retrofitting Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS): A Cost-Benefit Analysis Appraisal. *Water*, **14**, Article 2521. <https://doi.org/10.3390/w14162521>
- [6] 常文君, 刘尚海. 鹤壁市: 海绵城市建设与内涝治理[J]. 城乡建设, 2021(24): 90-97.
- [7] Yang, L., Wang, Y., Wang, Y., Wang, S., Yue, J., Guan, G., et al. (2023) Water Quality Improvement Project for Initial Rainwater Pollution and Its Performance Evaluation. *Environmental Research*, **237**, Article 116987. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116987>
- [8] Hiratsuka, A. and Wakae, K. (2019) Study on Sustainable Rainwater Resource Utilization—Towards Deepening of Homo Environmentics. *Journal of Water Resource and Protection*, **11**, 491-528. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.115029>
- [9] 付丹. 城市雨水资源化利用概述[J]. 绿色科技, 2020(14): 178-80.
- [10] 田甜. 屋顶绿化配置以及蓄水和雨水, 中水净化能力研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [11] 周斌. 雨水收集与利用系统在城市给排水设计中的应用探索[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(28): 196-198.
- [12] 刘雅慧. 城市高位花坛径流削减与污染净化技术研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
- [13] Feng, S.-S., Chang, J., Yang, B. and Dong, Z.-S. (2009) Re-Use Strategy of Subsidized Land Based on Urban Space Ecological Compensation: Case Study for Xuzhou Mining Area for Example. *Procedia Earth and Planetary Science*, **1**, 982-988. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.152>
- [14] 蒋春博, 李家科, 马越, 等. 雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 122-127.
- [15] Wang, M., Zhuang, J., Sun, C., Wang, L., Zhang, M., Fan, C., et al. (2024) The Application of Rain Gardens in Urban Environments: A Bibliometric Review. *Land*, **13**, Article 1702. <https://doi.org/10.3390/land13101702>
- [16] 路琪儿, 罗平平, 虞望琦, 等. 城市雨水资源化利用研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 80-87.
- [17] 张琼华, 王倩, 王晓昌, 等. 典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3451-3456.
- [18] He, S., Zhu, Q., Huang, Z. and Jia, B. (2023) Research and Practice on High Impact Pollution Control of Urban Lakes—A Case Study of Yanjia Lake in Wuhan. *Proceedings of 2022 7th International Conference on Environmental Engineering and Sustainable Development (CEESD 2022)*, Nanjing, 28-30 October 2022, 131-139. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28193-8_14
- [19] Ahn, J., Lee, D., Han, S., Jung, Y., Park, S. and Choi, H. (2017) Experimental Study on Performance of Sand Filter Layer to Remove Non-Point Source Pollutants in Rainwater. *Water Supply*, **17**, 1748-1763. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.056>

-
- [20] 吕达和. 基于透水性能的全透水沥青路面结构设计[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(18): 104-106.
- [21] 秦余朝. 城市典型透水铺装地面径流减控与污染物削减效果研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [22] Hu, X. and Gu, F. (2025) Urban Rainwater Resource Utilization: A Sustainable Environmental Impact Assessment Using Life Cycle Assessment (LCA) and Water Balance Model. *Desalination and Water Treatment*, **322**, Article 101094. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101094>
- [23] 陈闰节, 向光伟. PP 模块蓄水池在小区雨水回用系统中的应用[J]. 建设科技, 2020(12): 100-103.
- [24] D'Ambrosio, R., Longobardi, A., Balbo, A. and Rizzo, A. (2021) Hybrid Approach for Excess Stormwater Management: Combining Decentralized and Centralized Strategies for the Enhancement of Urban Flooding Resilience. *Water*, **13**, Article 3635. <https://doi.org/10.3390/w13243635>
- [25] 杨晶涵, 余凯锋. 人工湿地组合技术用于污水处理的研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(3): 769-773.
- [26] 马榕徽. 多级串联人工湿地处理径流雨水效能研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [27] Lu, B., Zhang, C. and Lin, H. (2018) Study on the Development Trend and Practice of Sponge Cities with Chinese Characteristics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **128**, Article 012134. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/128/1/012134>