

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.06.013

城市雨水资源化利用研究进展

路琪儿^{1,2}, 罗平平^{1,2}, 虞望琦¹, 张世鹏¹, 汪弋义¹, 朱 熙¹, 高 飞¹

(1. 长安大学水利与环境学院, 陕西 西安 710054;

2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室(长安大学), 陕西 西安 710054)

摘要:在列举分析城市雨水资源化利用不同场景和阶段研究进展基础上,从直接利用与间接利用两个方面分析了各种利用方法的优缺点和未来发展方向。基于对国内和以美国为代表的发达国家的雨水管理体系的比较分析,对我国雨水资源化利用的研究和发展现状进行评价和总结,分析了雨水资源化利用的挑战与前景,针对我国现阶段城市雨水资源化利用,提出合理规划城市布局、开发高效的雨水资源化利用材料和设施、加强宣传以及引入社会资本等建议。

关键词:雨水资源化利用;雨水收集;雨水管理体系;海绵城市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)06-0080-08

Research progresse of urban rainwater resources utilization // LU Qier^{1,2}, LUO Pingping^{1,2}, YU Wangqi¹, ZHANG Shipeng¹, WANG Geyi¹, ZHU Xi¹, GAO Fei¹ (1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region(Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on analysis of research progresses in different scenarios and development stages of urban rainwater resources utilization, this study investigated advantages and disadvantages of different utilization methods and future development direction from the aspects of the direct and indirect utilizations of rainwater resources. Through a comparative analysis of rainwater management systems in China and oversea developed countries represented by the United States, this study evaluated and summarized the current research and development status of rainwater resources utilization in China, and discussed challenges and prospects of rainwater resources utilization. Suggestions are also presented for urban rainwater resources utilization at the present stage in China, including rational urban planning and layout, development of efficient materials and facilities, strengthening the publicity, and introduction of social capital.

Key words: rainwater resources utilization; rainwater collection; rainwater management system; sponge city

随着我国城市化进程飞速发展,许多城市面临着水资源短缺、水环境污染严重、地下水过度开采等诸多水资源问题,城市内涝和“城市看海”现象频繁发生,迫切需要在城市建设中构建完善的雨水资源管理系统,缓解城市用水供需矛盾。

早在 20 世纪 90 年代,我国农村地区就实现了雨水的集蓄利用,此时雨水主要用于农业灌溉。21 世纪初,各主要城市开始重视雨水资源化利用,先后出台了多个相关规划方案。这些规划方案的发布虽然不能满足主要城市对雨水资源化利用快速发展的需求,但标志着我国城市雨水资源化利

用的开端^[1]。

近年来,海绵城市的概念进入人们的视线。海绵城市是以控制雨洪风险及雨水综合利用为核心,增加城市绿色雨水设施,减少不透水铺装等灰色/黑色设施,将雨水的径、集、渗、储、蓄、净合成一个整体,补充地表水及地下水,保证正常与健康水循环的人工雨水生态系统^[2-3]。随着厦门、西安、嘉兴等地海绵城市建设陆续进行,雨水资源化利用的研究有了许多突破,改变了我国原有的只注重排水而忽略再利用的雨水系统^[4]。建设完善海绵城市,充分资源化利用城市雨水资源,以提高城市对环境变化的

基金项目:国家重点研发计划(2018YFE0103800);长安大学大学生创新创业项目(S201910710254)

作者简介:路琪儿(1996—),女,硕士研究生,研究方向为城市水文。E-mail: 2018229052@chd.edu.cn

通信作者:罗平平(1981—),教授,博士,主要从事城市水文和洪涝灾害模拟研究。E-mail: lpprobort@126.com

适应性和对抗自然灾害风险的能力,将有助于改善我国水环境污染和生态恶化的现状。

本文在分析城市雨水利用不同场景和不同阶段的基础上,讨论和总结了各种利用方式的优缺点与发展前景,比较了我国和以美国为代表的发达国家的雨水管理制度,对雨水利用的研究前景与面临的挑战进行总结,给出建议,以期为海绵城市雨水利用的相关研究提供参考。

1 城市雨水利用的不同场景

1.1 屋面雨水

屋面雨水的收集利用可以追溯到古罗马时期^[5],现有的屋顶雨水利用系统一般包括4部分:屋顶汇流面,收集槽,连接管道和储水设施。屋面雨水利用可以通过屋面雨水回补地下水和建设屋顶花园来实现。

1.1.1 屋面雨水回补地下水

我国有一半左右的城市处于缺水状态,地下水的过量开采导致多地出现区域地下水降落漏斗^[6]。屋面雨水相较路面雨水重金属污染较低,水质较好,是理想的回补地下水水源,但并没有得到充分利用。使用屋面雨水回补地下水可减少城市内涝,增加地下水容量,有效防止地面塌陷。

在简单处理使水质达到标准要求的前提下,屋面雨水可以充分发挥高程优势,利用现有的较大水头直接补充地下水。利用屋面雨水不必借助外在能量,可以节省空间,提高雨水补充地下水的效率,且成本低。在地面沉降严重地区,如北方的天津、北京,南方的上海、苏州等城市,可将初期弃流后的屋面雨水有压回补地下水,减轻地面沉降带来的危害。各大城市地下水的开采基本包括潜水和承压水,但屋面雨水所具有的水头能量较低,只能回补地下水中的潜水含水层,如需补充承压水要额外增加能量,因此,承压水的回补有较大的研究空间。

1.1.2 屋顶花园

建设屋顶花园不仅可以改善生态环境、拓展绿化空间、弱化热岛效应、提高大气环境质量、提高屋顶隔热效果,还可以截留雨水,将经过屋顶花园净化后的雨水存入蓄水池循环利用。黄丽君等^[7]发现设计绿化后,由于植物吸热遮阳作用,绿色屋面传热量较无花园屋顶减少了24.7%,表面温差高达12.2℃。受屋顶荷载限制,屋顶花园土层不能过厚,同时,屋顶生长条件决定了植物必须喜光、耐高温或低温、抗风、易成活、对需水量要求不高,因此因地制宜,选择易生长成活的植物,合理设计屋顶花园尤为重要^[8]。

1.2 道路雨水

城市道路多为不透水路面,约占城市总规划面积的10%~40%,易形成强径流。道路雨水水质是城市3种主要下垫面中最差的,若能除去污染较严重的初期雨水,道路雨水可作为水源加以储存和利用。城市道路雨水的污染程度与区域环境、降雨条件和污染状况等有关。城市道路雨水中的总悬浮固体量远超雨水利用标准,有机物污染严重,N、P及重金属污染较轻,可以通过初期弃流对雨水水质进行改善^[9],但如何去除道路雨水中的重金属离子仍是处理的难点。有研究表明,可充分利用溶解性有机物(DOM)的协同作用,使生物滞留系统对雨水径流中的重金属起到较好的截留作用^[10]。

传统城市道路雨水排入合流制市政管道或分流制雨水管道,最终送入污水处理厂统一处理。在道路雨水利用工程中应贯彻低影响开发(low impact development, LID)理念,通过绿化的滞蓄作用减少雨水径流,用生态措施降低道路雨水中的污染物含量^[11]。利用生物滞留带是一种常见的方式,应用最广的是种植土-碎石绿化带,在减少雨水径流的同时收集雨水,但该方法存在收集的雨水污染较高,且改造工程量较大等缺点^[12]。除此之外,道路雨水还可由透水铺装直接下渗收集。王仲佳等^[13]发现当透水砖的孔隙率为15%~20%时,透水系数可达0.02 cm/s。因此,透水铺装可以有效减少道路雨水径流,同时收集雨水。但研究发现,透水铺装的透水性能随使用时间的延长而下降,部分地区的透水砖两年后透水性能下降了68%^[14]。后续研究一方面可针对改进透水铺装的配方来改良透水铺装的性能,延长透水铺装的使用时间,减少道路雨水中的污染物;另一方面可改进道路绿化带的形式和种植植物来控制雨水径流。

1.3 雨水景观

近年来城市雨洪问题引发愈来愈多的关注,雨洪管理措施被广泛应用于各个城市。不少海绵城市在建设过程中运用雨水景观,增加城市娱乐性和休闲性,丰富城市景观,同时雨水景观在防洪、蓄流等方面发挥了巨大的作用。

1.3.1 下凹式绿地

下凹式绿地是一种低于周围路面的绿地,常用于容纳不能从硬质路面渗流的雨水径流。下凹式绿地通过绿化根系的拦截吸附作用和土壤的过滤作用,去除一定的有机污染物和悬浮固体杂质,将排入其中的雨水净化后收集。

下凹式绿地可以有效削减洪峰径流流量,加大入渗量。下凹式绿地陶粒与土壤的配比是洪峰出现

时影响径流削减效果的主要因素^[15]。在高密度地区,采用适当的土壤入渗系数和下凹深度组合,可用较小尺度绿地解决较大地区径流问题^[16]。下凹式绿地的土壤渗透性能随降雨重现期的增加而增强;土壤孔隙率越大,土壤蓄水空间越大,透水效果越好^[17]。但是对于长历时降雨,枯枝落叶堆积会导致下渗率明显下降、下渗不及时等问题。下凹式绿地的研究应注重对长历时降雨洪峰的缓解,以及减小有效下渗面积时,保证高渗透率。可通过尝试不同材料获得与土壤的最佳配比来提高渗透率,推迟径流峰值出现时间。

1.3.2 雨水花园

雨水花园属于生物滞留系统,是种植多种植物的低势绿化区。在海绵城市中,雨水花园常用于收集屋面与道路的雨水,雨水经过植物根系的拦截及沙土的过滤作用而被净化,净化后的雨水可作为中水用于洗车、冲厕、浇洒道路,或直接补充地下水。

雨水花园对削减径流有显著效果,削减率平均高达99%。对历时较长、雨强较小的降雨过程,雨水花园对径流的削减率甚至达到100%^[18],效果显著。雨前干燥期的长短对径流削减量也有影响,雨前干燥期越长,则径流削减量越大,同时雨水花园对化学需氧量(COD)、悬浮物、氮和磷均有较好的去除效果^[19]。雨水花园对初期雨水污染物削减作用不受降雨重现期的影响^[20]。

对于高强度、长历时降水,雨水景观普遍存在后期径流削减较弱的现象。径流削减不及时极有可能导致景观内水位上涨,且经过雨水花园渗滤的雨水总氮和硝态氮的含量还会升高。现阶段针对雨水花园对径流的持续削弱作用和减少雨水中氮含量的研究较少,可作为后期研究的方向之一。

2 城市雨水径流和集流

2.1 雨水径流

城市雨水径流含有较多的污染物,其中含量最高的是DOM。不透水路面雨水径流中,DOM受人类活动影响较大,含有较多磺酸类物质和脂肪族物质,而绿地雨水径流中DOM则以天然有机物为主^[21]。重金属离子因受径流中DOM的络合机制的影响,对不同接触面的污染程度不同,污染程度由高到低分别为污染路面、屋顶、草地,径流中DOM对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的敏感性强于 Zn^{2+} ^[22]。雨水径流中含有有机氮,其中溶解性有机氮和颗粒性有机氮的总占比较高,控制雨水中总有机氮主要应控制流经景观的雨水中的溶解性有机氮和颗粒性有机氮^[23]。雨水径流中还存在氮、磷等无机污染物。熊家晴

等^[24]发现,对于径流中所挟带的磷酸根离子,可以用铁改性生物炭改良填料生物滞留池去除约90%的磷。徐宇婕等^[25]发现在中、小雨量时受人类活动影响较小区域中的氨氮有明显的初期冲刷效应,应加强绿地施肥以防止土壤氮元素流失过多而影响植物生长。后期研究可以针对如何减少雨水径流中的DOM。流经绿地的雨水易带走土壤中的氮,而雨水中的磷可被生物滞留池去除,因此可以考虑利用生物滤池等方法回收流经绿地雨水中的氮、磷元素。

雨水径流污染不仅有化学污染物,有时还因通过不透水路面吸收热量而产生热污染。雨水花园、透水铺装、绿色屋顶等源头渗蓄设施对热污染有较好的吸收效果^[26]。透水铺装还可以有效降低雨水径流峰值流量,控制径流量。不同构造的透水铺砖对于水量的控制效果也不同,内含蓄水空腔的透水砖比普通透水砖有更强的雨水径流滞蓄能力^[27]。在透水混凝土中加入对有机污染物有净化作用的材料,制成新型生态透水混凝土,可以增加透水性能和孔隙率。陶粒加入量越多,硅藻土加入量越少,混凝土透水性能和孔隙率越高^[28]。由于不同渗滤材料各有利弊,针对不同的雨水水质及处理要求,多种渗滤材料的配合使用以及对新材料的开发将有益于提高雨水渗滤填料层的处理效果^[29]。

径流可以被雨水花园直接利用,但存在有机污染物和重金属离子含量高的问题,后期发展方向主要为减少雨水径流中DOM和重金属含量,回收利用氮、磷元素。

2.2 雨水集流

雨水集流是雨水综合利用的重要组成部分,收集雨水不仅能缓解水资源短缺的问题,还可以减轻排水系统负担。收集到的雨水可以用于各种植被景观的浇洒用水,处理后可作为饮用水源,也可以设计不同的雨水综合利用系统,实现雨水更加合理利用,如将雨水导入路边植草沟,储存利用,恢复路域植被等^[30]。

由于初期雨水的污染程度较高,雨水集流应做相应的区分,对初期雨水进行弃流或其他处理。西北干旱地区,集流至水窖的雨水是重要的水资源,将初期雨水与后期雨水分散储存,在保证用水安全的同时,在一定程度上缓解了用水矛盾^[31]。水窖储存水时,由于水窖容积过大,储水时间过长,常导致水中COD含量过高,还可能产生亚硝酸盐,水窖消毒引起的副产物也会导致水中有机物含量增加,甚至破坏窖体^[32]。王亚军等^[33]研发的简易阳光消毒-生物砂滤池通过物理过滤、生物过滤和经典阳光消毒技术可以保证西北干旱地区水窖内雨水污染物指

标在标准值以内。根据 Wurthmann^[34] 的试验,应用住宅雨水收集系统,可以大量节省所需的能源和费用。有关雨水集流未来的研究方向是处理雨水中的污染物,延长收集雨水的贮存时间,改良雨水窖体,提高其密封性和耐腐蚀性。

3 城市雨水利用管理系统及收费制度

目前我国城市雨水的排放主要依赖市政管网,而管网设计时考虑的降雨重现期较短,硬质不透水铺装使雨水径流无法下渗,导致雨水丰沛的城市常出现“城市看海”的现象。为了营造舒适宜居的城市环境,需要对雨水进行系统的管理。2014 年,《海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)》面世,我国正式启动了对雨水资源化利用的系统管理,住建部联合多个部门先后发布的数十个相关规范及手册,在海绵城市的建设中发挥了重要作用,水利部、环保部、发改委也参与雨水资源化利用管理^[35]。2015 年住建部与国家开发银行联合发布《关于推进开发性金融支持海绵城市建设的通知》表明,中央将利用开发性金融对海绵城市雨水设施进行投资建设。我国雨水利用管理系统正在全面建成,基本特点为规范雨水排放,雨污分流,防止污水流入雨水系统而导致外部环境污染。在建设资金筹措方式上由政府单一渠道转向社会多渠道筹资,以完善我国雨水管理制度及收费制度。

《清洁水法》是美国在 1972 年修订的综合水管理法案,也是美国第一部对雨水进行管理的法案。在 LID 及最佳流域管理措施(best management practices, BMPs)的指导下,美国对雨水的管理主要分为两部分,分别为雨水排放许可和雨水排放收费。前者主要依据是排放场地特点、工业活动性质及容纳水体水质要求^[36];后者指向产生雨水径流的每一位业主收费,通过用户群体的比例和场地不透水面积来确定雨水费^[37]。BMPs 是控制暴雨径流、土壤侵蚀、面源污染的综合管理决策系统;LID 则主要针对保持自然水文过程的重要性,用分散且规模小的源头管理设施对暴雨无害化处理^[38]。BMPs 与 LID 的共同作用从源头上消解城市雨洪问题,大大减少了处理雨水问题的时间和经济成本。一些国家在此基础上进行优化,制定符合本国国情的方案,如英国的可持续的城市排水系统(sustainable urban drainage system, SUDS)、澳大利亚的水敏感性城市设计(water sensitive urban design, WSUD)及新西兰的低影响城市设计与开发(low impact urban design and development, LIUDD)^[39]。

我国海绵城市雨水系统建立在美、英等国对雨

水利用系统研究的基础上,海绵城市的理念比其他国家更为先进,特别是所要建立的多目标、多层次的雨水系统有更强的环境适应能力,更高的可持续发展能力。相对于发达国家,现阶段我国雨水利用的法律系统还不完善,主要是针对污水和工业废水的点源管理,忽略了雨水直接排放对生态的影响^[40]。目前雨水利用主要由住房和城乡建设部和生态环境部管理,还没有形成系统的管理体系。提高民众对海绵城市及雨水利用的认知度、接受度、参与度,并将雨水利用目标分摊至各住户,有利于加快海绵城市建设和推广,缓解政府相关资金不足的压力。

4 研究展望

目前水资源问题已成为制约我国经济社会发展的重要因素,加强城市雨水资源化利用,对促进城市水循环利用、节约水资源具有很好的示范和推动作用。海绵城市关于雨水问题的解决方法是综合性的,不是单一的防洪排涝或雨水集蓄回用,而是一种可持续的城市建设模式,不仅强调了城市对雨水净化与利用,而且增强了现代城市对气候变化或极端降水的应对能力^[41-43]。近 10 年来,我国有关雨水资源化的研究取得了重大进展,但还需要对以下几个方面进行深入探索。

4.1 合理规划布局

海绵城市中对于雨水利用的各种形式都非常重要,但只局限于某种场景或某个阶段的雨水利用是不够的,还应注重海绵城市的整体布局。仇保兴^[44]认为海绵城市可以通过修复与保护区域生态水系统、分层规划雨水系统、推广建筑雨水利用与中水回用来实现弹性应对极端天气与环境变化。这主要强调了海绵城市的总体目标,在实际操作中可以有多个方面的解读,也可以将整体目标细化,达到各部分之和大于整体的效果。厦门市海绵城市建设涵盖渗、滞、蓄、净、用、排 6 个方面的内容,在保证水资源安全的同时,建设城市排洪防涝体系,提升水生态环境质量^[45]。南宁市通过划分不同雨水管理区域和功能单元,将海绵城市目标进行细分,增加雨水设施,从而落实总体规划^[46]。上海桃浦科技智慧城也采用分解总目标的方法,将雨量指标划分至绿地、道路、建筑与小区、水系四大系统,分系统削减径流,同时要求建筑雨水利用率不少于 5%^[47]。除了多途径、多目标外,海绵城市建设与雨水资源化利用还应因地制宜。如陕西西咸新区属于西北半干旱区,应将雨水和再生水的资源化利用作为未来的发展方向,以缓解水资源不足的压力^[48]。对于北方地区,应适当规划城市低洼区作为蓄滞洪区,并降低城市

公园和绿地地区的地势,在极端降雨条件下也作为蓄滞洪区,既可缓解城市内涝,也可作为城市雨水资源化的来源。

综上所述,城市雨水利用应因地制宜,根据当地的水资源基本概况进行研究规划^[49],但现阶段不少城市基础资料欠缺,给城市雨水利用规划造成一定难度。城市雨水利用各子系统的选取和雨水利用各阶段的具体目标值得进一步研究。

4.2 设施 and 材料开发

我国大陆按雨水年径流总量控制率可分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ区,各区的取值范围分别为85%~90%、80%~85%、75%~85%、70%~85%、60%~85%,径流污染物的限值及各地雨水设施均需参照此标准进行规划。透水沥青路面和其他透水铺装材料的经济适用性不高,随着环境的变化和使用时间的延长,这些材料透水性能会大幅下降;下凹式绿地中土壤填料的配比和下凹式绿地的形状都会影响其对雨水径流的集蓄与净化;屋顶绿化受屋面荷载的限制,需要开发更轻质、吸水的材质。

透水铺装、土壤填料配比等涉及材料科学和环境科学,如何将二者结合,开发更高效和经济实用的透水材料,仍需要进一步研究。此外,精准模拟城市道路雨水和屋面雨水中污染物运移规律、明确下凹式绿地中各层对雨水径流中各种污染物的吸附或降解的机制、提高吸附降解过程的效率等这些关键科学问题也需要进行进一步探索。

4.3 立体绿化应用

立体绿化的应用可以很大程度上利用竖向空间优势扩展城市绿化,对热岛效应起到一定的缓解作用,降低建筑内部温度,实现建筑节能^[50]。但是立体绿化对局部气候要求较高,需水量较大,且维护管理费用较高^[51]。除已有关于立体绿化对房屋结构的影响研究外,立体绿化和有关建筑应对极端天气的能力,不同绿化对屋面雨水的吸附降解能力,以及绿化所需的运营维护费用等问题仍有待进一步研究。

4.4 认识提升和科研布局

建设海绵城市虽引起广泛关注,但现阶段我国针对海绵城市雨水利用阶段和方式的研究尚处于起步阶段,相关水资源管理面临挑战^[52]。城市居民对海绵城市雨水利用认识不足,应加大海绵城市有关政策的宣传力度,向全社会推广海绵城市的概念。

随着海绵城市建设进程的不断推进,除传统方法外,还应采用人工智能等方法识别关键影响因素,建立有关模型和指标体系,实现对雨水资源化利用程度的高精度评价,结合科研项目,提升城市雨水资

源化利用程度。

4.5 社会资本引入

我国海绵城市建设主要依靠政府管控,集中在尚未建成的新城区,对老城区雨水设施的改造关注较少。在海绵城市建设中有序引入社会资本、完善资本参与竞争制度,健全雨水资源利用管理体系和相关法律法规是未来海绵城市建设中面临的挑战。

5 结 语

近年来气候变化导致极端降雨事件频发,实施高效的雨水资源利用在一定程度上可降低城市内涝的风险,缓解城市缺水的现状。本文通过分析近几年雨水资源利用的研究进展,从规划布局、设施 and 材料开发、立体绿化应用、认识提升和科研布局以及社会资本引入等方面探讨了城市雨水资源利用的未来前景,可为未来海绵城市的建设提供参考。

参考文献:

- [1] 董蕾,车伍,李海燕,等.我国部分城市的雨水利用规划现状及存在问题[J].中国给水排水,2007(22):6-10. (DONG Lei, CHE Wu, LI Haiyan, et al. Present status and problems of rainwater utilization plan in some Chinese cities[J]. China Water & Wastewater, 2007(22):6-10. (in Chinese))
- [2] 张学弟,王宁.城市建成区海绵城市建设的几点思考[J].人民长江,2019,50(12):85-89. (ZHANG Xuedi, WANG Ning. Some thoughts on sponge city construction in urban built-up areas[J]. Yangtze River, 2019, 50(12):85-89. (in Chinese))
- [3] 徐振强.面向“十三五”培育中国特色海绵城市行业体系:基于对海绵城市企业总体现状调研的初探[J].城市住宅,2015(9):11-18. (XU Zhengqiang. Building sponge city system with Chinese characteristics in the “13th Five-Year Plan”:based on the general current state of corporations in sponge cities[J]. City & House, 2015(9):11-18. (in Chinese))
- [4] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics[J]. Chinese Soft Science, 2016(1):79-97. (in Chinese))
- [5] JOHN E G,牟海省,王慧林.国际雨水集流系统家庭应用的进展和展望[J].水文,1993(6):61-64. (JOHN E G, MOU Haisheng, WANG Huilin. Development and prospect of home application of international rain water collector system[J]. Hydrology, 1993(6):61-64. (in

- Chinese))
- [6] 张传雷,汪志荣,孙常磊.城市雨水补给地下水的相关问题研究[J].沈阳农业大学学报,2004(增刊1):531-533. (ZHANG Chuanlei, WANG Zhirong, SUN Changlei. Problems concerning groundwater recharge with urban rainwater [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004(Sup1):531-533. (in Chinese))
 - [7] 黄丽君,刘东,骆天庆,等.某绿化屋顶夏季热工性能模拟研究及验证[J].建筑科学,2018,34(8):44-50. (HUANG Lijun, LIU Dong, LUO Tianqing, et al. Study on heat transfer models of some green roof and its thermal performance in summer[J]. Architectural Science, 2018, 34(8):44-50. (in Chinese))
 - [8] 陈波.我国城市屋顶花园植物种植设计[J].安徽农业科学,2011,39(33):20611-20613. (CHEN Bo. Planting design of urban roof garden plants in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(33):20611-20613. (in Chinese))
 - [9] 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. (ZHANG Qionghua, WANG Qian, WANG Xiaochang, et al. Discussion on road runoff pollution and its utilization standard in typical cities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7):3451-3456. (in Chinese))
 - [10] 朱英杰,杜晓丽,于振亚,等.道路雨水径流溶解性有机物对生物滞留系统重金属截留过程的影响[J].环境化学,2019,38(1):51-58. (ZHU Yingjie, DU Xiaoli, YU Zhenya, et al. Influence of dissolved organic matter on heavy metals removal in road runoff in bioretention systems[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(1):51-58. (in Chinese))
 - [11] 李海燕,罗艳红,张悦. LID 措施在道路雨水利用工程中的应用[J].节水灌溉,2013(11):44-49. (LI Haiyan, LUO Yanhong, ZHANG Yue. Application of LID in road runoff utilization engineering[J]. Water Saving Irrigation, 2013(11):44-49. (in Chinese))
 - [12] 程树斌,关彤军,张春会,等.海绵城市道路种植土-碎石绿化带的雨水入渗[J].中外公路,2018,38(2):13-19. (CHENG Shubin, GUAN Tongjun, ZHANG Chunhui, et al. Rainfall infiltration of road planting soil-green vegetative macadam belt in sponge city[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2):13-19. (in Chinese))
 - [13] 王仲佳,杨策,翁大庆,等.目标孔隙率对再生透水砖性能的影响研究[J].新型建筑材料,2019,46(4):51-54. (WANG Zhongjia, YANG Ce, WENG Daqing, et al. Effect of target porosity on technical properties of recycled permeable bricks[J]. New Building Materials, 2019, 46(4):51-54. (in Chinese))
 - [14] 王俊岭,张智贤,秦全城,等.改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J].水资源保护,2019,35(3):63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of modified permeable pavement in weak permeable soil quality area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3):63-68. (in Chinese))
 - [15] 赵庆俊,丛海兵,汪智霞,等.高渗透下凹绿地对城市降雨径流的削减作用研究[J].水利水电技术,2018,49(9):41-48. (ZHAO Qingjun, CONG Haibing, WANG Zhixia, et al. Study on urban rainfall runoff reduction effect of high permeable concave-down green space[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(9):41-48. (in Chinese))
 - [16] 朱寒松,董增川,曲兆松,等.基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J].水资源保护,2019,35(2):32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):32-36. (in Chinese))
 - [17] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等.基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5):398-405. (in Chinese))
 - [18] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.雨水花园对暴雨径流的削减效果[J].水科学进展,2015,26(6):787-794. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effect of rain gardens on storm runoff reduction[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6):787-794. (in Chinese))
 - [19] 张彬鸿,邓朝显,马越,等.雨水花园对屋面雨水的滞留与净化效果[J].中国给水排水,2019,35(21):132-138. (ZHANG Binhong, DENG Chaoxian, MA Yue, et al. Retention and purification effect of roof rainwater by rain garden[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21):132-138. (in Chinese))
 - [20] 贺靖雄,李翠梅,程桂,等.海绵城市雨水花园水文水质过程模拟[J].水电能源科学,2019,37(4):15-18. (HE Jingxiong, LI Cuimei, CHENG Gui, et al. Simulation of hydrology and water quality in rainwater garden of sponge city[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(4):15-18. (in Chinese))
 - [21] 聂汉汉,陈浩,李磊,等.城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性[J].环境科学,2020,41(5):2272-

2280. (NIE Yunhan, CHEN Hao, LI Lei, et al. Molecular chemo-diversity of the dissolved organic matter occurring in urban stormwater runoff [J]. Environmental Science, 2020, 41 (5): 2272-2280. (in Chinese))
- [22] 袁冬海,王家元,王昊天. 径流雨水中溶解性有机质特征演化及其对典型污染物迁移和生物有效性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39 (22): 8404-8415. (YUAN Donghai, WANG Jiayuan, WANG Haotian. Study of characteristics of DOM in urban runoff and the effects on the typical pollutants and bioavailability [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (22): 8404-8415. (in Chinese))
- [23] MARY G L, GURPAL S T, PATRICK W I. Organic nitrogen in residential stormwater runoff: implications for stormwater management in urban watersheds [J]. Science of the Total Environment, 2020, 707: 135962.
- [24] 熊家晴,何一帆,白雪琛,等. 改良填料生物滞留池对雨水径流中磷的去除效果[J]. 环境工程学报, 2019, 13 (9): 2164-2172. (XIONG Jiaqing, HE Yifan, BAI Xuechen, et al. Removal effect of phosphorus in rain-runoff by the media-improved bioretention tank [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13 (9): 2164-2172. (in Chinese))
- [25] 徐宇婕,龚玥敏,毕军鹏,等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. 环境科学, 2020, 41 (7): 3275-3284. (XU Yujie, GONG Yuemin, BI Junpeng, et al. Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo [J]. Environmental Science, 2020, 41 (7): 3275-3284. (in Chinese))
- [26] 徐玮瞳,王建龙,武彦杰,等. 城市雨水径流热污染特征、负荷评估及其控制对策研究进展[J]. 环境工程, 2020 (4): 26-31. (XU Weitong, WANG Jianlong, WU Yanjie, et al. Advances in research on thermal pollution characteristics, load assessment and control measures of urban stormwater runoff [J]. Environmental Engineering, 2020 (4): 26-31. (in Chinese))
- [27] 赵远玲,王建龙,李璐菡,等. 不同类型透水砖对雨水径流水量的控制效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14 (3): 835-841. (ZHAO Yuanling, WANG Jianlong, LI Luhan, et al. Effect of different types of permeable brick on the stormwater runoff quantity control [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14 (3): 835-841. (in Chinese))
- [28] 董星海,康爱红,徐雪玲,等. 生态透水混凝土对路面径流污染阻滞效果[J]. 科学技术与工程, 2019 (19): 254-261. (DONG Xinghai, KANG Aihong, XU Xueling, et al. Blocking effect of ecological permeable concrete on the road runoff pollutants [J]. Science Technology and Engineering, 2019 (19): 254-261. (in Chinese))
- [29] 格屿,李海燕,张晓然. 城市径流雨水渗滤处理设施渗滤层改良研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (6): 96-104. (GE Yu, LI Haiyan, ZHANG Xiaoran. Improvement of infiltration media in rainwater infiltration facilities for urban runoff treatment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (6): 96-104. (in Chinese))
- [30] 张斌,胡晋茹. 干旱区路面雨水集流与综合利用技术研究[J]. 公路工程, 2019, 44 (5): 53-56. (ZHANG Bin, HU Jinru. Study of highway rainwater collection and utilization [J]. Highway Engineering, 2019, 44 (5): 53-56. (in Chinese))
- [31] 马虎迎,王长军,高波. 西北干旱地区新型水窖雨水集流控制与水质净化装置试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2015 (2): 89-92. (MA Huiying, WANG Zhangjun, GAO Bo. An Experimental study of new cellar rainwater harvested control and water quality purification device in northwest arid areas [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015 (2): 89-92. (in Chinese))
- [32] 王广周,高建恩. 雨水集蓄利用中的水质问题及对策[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27 (4): 119-121. (WANG Guangzhou, GAO Jianen. Water quality problems and countermeasures in rainwater harvesting and utilization [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27 (4): 119-121. (in Chinese))
- [33] 王亚军,常莺娜. 西北干旱地区农宅雨水转化为可饮水技术[J]. 环境工程学报, 2014, 8 (3): 1021-1024. (WANG Yajun, CHANG Yingna. Drinking water technology of rural housing rainwater treatment at arid regions of northwest China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8 (3): 1021-1024. (in Chinese))
- [34] WURTHMANN K. Assessing storage requirements, water and energy savings, and costs associated with a residential rainwater harvesting system deployed across two counties in Southeast Florida [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 252: 109673.
- [35] 赖娴,冯娴慧. 中美两国城市雨水管理机制对比研究[J]. 广东园林, 2019, 41 (3): 69-73. (LAI Han, FENG Xianhui. A comparative study of urban rainwater management mechanisms between China and the United States [J]. Guangdong Landscape Architecture, 2019, 41 (3): 69-73. (in Chinese))
- [36] 李俊奇,刘洋,车伍. 发达国家雨水管理机制及政策[J]. 城乡建设, 2011 (8): 75-76. (LI Junqi, LIU Yang, CHE Wu. Rainwater management mechanisms and policies in developed countries [J]. Urban and Rural Development, 2011 (8): 75-76. (in Chinese))

- [37] 涂楠楠,王建龙,席广朋,等.美国雨水收费制度设计及其启示[J].中国给水排水,2018,34(6):35-40. (TU Nannan, WANG Jianlong, XI Guangpeng, et al. Enlightments of American stormwater charge system design [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(6): 35-40. (in Chinese))
- [38] 李兴泰.国内外城市雨水管理体系发展比较[J].山东林业科技,2019,49(2):114-120. (LI Xingtai. Development comparison of urban rainwater management system at home and abroad[J]. Journal Shandong Forestry Science and Technology, 2019, 49(2): 114-120. (in Chinese))
- [39] 杨雪锋,郑欢欢.海绵城市背景下国内外雨洪管理政策与实践探索[J].中国名城,2019(4):45-49. (YANG Xuefeng, ZHENG Huanhuan. Policy and practical exploration of stormwater management at home and abroad under the background of sponge city[J]. China Ancient City, 2019(4): 45-49. (in Chinese))
- [40] 李俊奇,王文亮.基于多目标的城市雨水系统构建与展望[J].给水排水,2015,51(4):1-3. (LI Junqi, WANG Wenliang. Construction and prospect of urban rain water system based on multi-objective [J]. Water Supply and Drainage, 2015, 51(4): 1-3. (in Chinese))
- [41] 陈莎,陈晓宏.城市雨水径流污染及LID控制效果模拟[J].水资源保护,2018,34(5):13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 13-19. (in Chinese))
- [42] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等.基于InfoWorks_ICM模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J].水资源保护,2020,36(5):43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 43-49. (in Chinese))
- [43] 王兴超.地下水库在海绵城市建设中的应用[J].水利水电科技进展,2018,38(1):83-87. (WANG Xingchao. Application of underground reservoirs in construction of sponge cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 83-87. (in Chinese))
- [44] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].给水排水,2015,51(3):1-7. (QIU Baoxing. Connotation, approaches and prospect of LID [J]. Water Supply and Drainage, 2015, 51(3): 1-7. (in Chinese))
- [45] 刘家宏,王东,李泽锦,等.厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J].水资源保护,2019,35(6):9-13. (LIU Jiahong, WANG Dong, LI Zejin, et al. Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 9-13. (in Chinese).)
- [46] 张伟,王家卓,车晗,等.海绵城市总体规划经验探索:以南宁市为例[J].城市规划,2016,40(8):44-52. (ZHANG Wei, WANG Jiazhao, CHE Han, et al. Experience of sponge city master plan; a case study of Nanning City [J]. City Planning Review, 2016, 40(8): 44-52. (in Chinese))
- [47] 陈国生,马超,杨天翔.控规阶段的海绵城市地块指标分解研究:以上海桃浦科技智慧城为例[J].给水排水,2016,52(11):57-59. (CHEN Guosheng, MA Chao, YANG Tianxiang. A study on the index decomposition of sponge city plot in regulation stage; taking Shanghai Taopu science and technology wisdom city as an example [J]. Water Supply and Drainage, 2016, 52(11): 57-59. (in Chinese))
- [48] 张亮.西北地区海绵城市建设路径探索:以西咸新区为例[J].城市规划,2016,40(3):108-112. (ZHANG Liang. Path of sponge city construction in Northwestern China; an empirical study on Xixian new area [J]. City Planning Review, 2016, 40(3): 108-112. (in Chinese))
- [49] 陆利杰,李俊奇.城市雨水控制利用项目投融资模式探讨[J].水利经济,2013,31(4):10-14. (LU Lijie, LI Junqi. Investment and financing model of urban rainwater control and utilization project [J]. Water Conservancy Economy, 2013, 31(4): 10-14. (in Chinese))
- [50] 丁威,王鹏,黄威,等.考虑局域气候影响的海绵城市垂直绿化技术应用[J].中国给水排水,2019,35(12):85-87. (DING Wei, WANG Peng, HUANG Wei, et al. Application of vertical greening technology in sponge city with influence of local climate [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(12): 85-87. (in Chinese))
- [51] KATIA P, PAOLO R. Cost-benefit analysis for green faades and living wall systems [J]. Energy & Buildings, 2013, 43(12): 3419-3429.
- [52] LUO P P, SUN Y T, WANG S T, et al. , 2020, Historical assessment and future sustainability challenges of Egyptian water resources management [J]. Journal of Cleaner Production, 2020(8): 121154.

(收稿日期:2020-07-29 编辑:施业)

