

周传庭,王梦玉,幸韵欣,等.城市初期雨水污染及处理措施的研究进展[J].净水技术,2022,41(7):17-26.

ZHOU C T, WANG M Y, XING Y X, et al. Research progress of urban initial stormwater pollution and treatment measures[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(7):17-26.



扫我试试?

## 城市初期雨水污染及处理措施的研究进展

周传庭<sup>1,2</sup>,王梦玉<sup>3</sup>,幸韵欣<sup>3</sup>,朱峰<sup>4</sup>,安莹<sup>3,\*</sup>,周振<sup>3</sup>

(1.上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司,上海 200125;2.同济大学环境科学与工程学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092;3.上海电力大学环境与化学工程学院,上海 200090;4.上海城投污水处理有限公司,上海 201203)

**摘要** 初期雨水径流污染是整个降雨过程中径流污染的主要时段,若直接排入受纳水体会造成水环境质量恶化。因此,初期雨水的治理十分必要。文章从源头治理(绿色屋顶、透水铺装、下凹式绿地、截污雨水口)、过程治理(雨水调蓄池、植草沟、植被缓冲带)及末端治理(旋流分离器、人工湿地、生物滞留池)3个方面综述了初期雨水处理措施的应用现状。截污雨水口和旋流分离器对初期雨水中可溶性污染物处理效果较差,其余处理措施可以利用下渗缓冲机制削减雨水径流,同时截留降解污染物,但这些处理措施存在基质填料和植被类型对运行效果影响大、管理体系不完善等问题。针对以上问题提出4点展望:1)针对自身水质状况,完善雨水排放标准;2)雨水处理措施应因地制宜地选择参数(基质填料、植被类型等)并定期维护;3)侧重于技术创新化、设计标准化;4)可结合多种工艺以实现雨水高效快速处理。

**关键词** 径流污染 初期雨水 源头治理 过程治理 末端治理

中图分类号: TU992;X52 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)07-0017-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.07.003

## Research Progress of Urban Initial Stormwater Pollution and Treatment Measures

ZHOU Chuanting<sup>1,2</sup>, WANG Mengyu<sup>3</sup>, XING Yunxin<sup>3</sup>, ZHU Feng<sup>4</sup>, AN Ying<sup>3,\*</sup>, ZHOU Zhen<sup>3</sup>

(1. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200125, China;

2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

4. Shanghai Chengtou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract** The pollution of initial stormwater runoff is the main period of runoff pollution during the whole rainfall process. Water environment quality will be deteriorated if it is directly discharged into receiving water body. Therefore, it is important for the management of initial stormwater. This article summarized the application status of initial stormwater treatment measures from three aspects: source treatment (green roof, water-permeable paving, sunken green belt, sewage interception gutter), midpoint treatment (stormwater storage tank, grass ditch, vegetation buffer strip) and terminal treatment (hydrocyclone separation device, constructed wetland, bioretention). The sewage interception gutter and the hydrocyclone separation device have a poor treatment effect on the soluble contaminants in the initial rainwater. The other treatment measures could take advantage of the infiltration buffer mechanism to reduce the stormwater runoff while intercepting and degrading pollutants. However, these treatment measures have various issues that

[收稿日期] 2021-03-10

[基金项目] 国家自然科学基金(51878403);上海市科学技术委员会科技创新行动计划(19DZ1204904);中心城区初期雨水处理关键技术研究和生产性实证(18DZ1203905)

[作者简介] 周传庭(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事市政污水处理及初期雨水处理研究,E-mail:13482299753@139.com。

[通信作者] 安莹,博士,副教授,主要从事污水处理及资源化利用研究,E-mail:anying007@163.com。

operation effect is influenced by matrix fillers and vegetation types with imperfect management system and so on. In light of this issues, this article proposed four prospects: 1) Improve stormwater discharge standards according to its own water quality; 2) Parameters (substrates, vegetation types, etc.) of stormwater treatment measures should be selected according to local conditions and maintain stormwater treatment measures regularly; 3) Focus on technological innovation and design standardization; 4) Combine multiple processes to realize efficient and rapid treatment of stormwater.

**Keywords** runoff pollution initial stormwater source treatment process remediation terminal treatment

在城市点源污染得到有效控制的同时,由于城市化进程加快、不可渗透表面增多,雨水径流带来的城市面源污染问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。美国城市雨水径流造成 13.0% 的河流和 18.0% 的湖泊污染;北京市城区雨水径流污染约占水体污染负荷的 12.0% 以上,上海市占 20.0% 左右<sup>[3]</sup>。初期雨水是指雨水径流初始阶段的雨水,具有较强的冲击性,在此阶段,径流污染物浓度明显高于后期阶段,存在污染物浓度峰值,是造成接纳水体水环境质量下降的主要原因<sup>[4-6]</sup>。因此,有效处理初期雨水能控制雨水径流带来的面源污染。

20 世纪 70 年代的美国最先开始重视城市初期雨水径流污染,随后日本、欧洲、澳大利亚等发达国家或地区也根据自身雨水径流特点制定了完善的政策法规和管理体系;美国先后提出“最佳管理措施”和“低影响开发”;日本提出“雨水渗透计划”;英国提出“可持续城市排水系统”;澳大利亚提出“水敏感性城市设计”<sup>[7-11]</sup>。而我国对初期雨水径流污染的研究起步较晚,相应标准、评价指标与技术措施应用等还需进一步完善<sup>[12]</sup>。“十二五”期间,我国对污染物排放和水环境治理提出了更为严格的要求,还提出“海绵城市”的建设理念并推行“海绵城市”试点城市。本文重点对城市初期雨水的处理措施进行梳理总结,以期为我国城市初期雨水的污染控制及措施应用方面提供参考。

## 1 初期雨水水质

降雨初期,雨水溶解空气中的污染气体及污染颗粒物,待降落后又冲刷屋面、道路、雨污管渠等,使初期雨水携带大量的悬浮固体(SS)、有机物、病原体、重金属等污染物质。因此,初期雨水具有较高的污染负荷。据统计,美国雨水径流中 SS 的质量浓度为 0.41~370.00 mg/L,五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)为 0.50~4 800.00 mg/L<sup>[13]</sup>。Gromire-Mertz 等<sup>[14]</sup>研究发现,法国初期雨水中 SS、化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)、Pb、Zn 的浓度均高于污水处理厂的进水浓度。选取

北京、上海、天津等几个大、中城市的初期雨水与《地表水环境质量标准》V类水质相比较,结果如表 1 所示。由基本水质指标可知,初期雨水径流引发的面源污染会严重造成城市水生态环境破坏,引起水体富营养化,威胁人体健康。

表 1 初期雨水污染物浓度与《地表水环境质量标准》V类水质比较<sup>[15-16]</sup>

Tab. 1 Comparison of Pollutants Content between Initial Stormwater and Class V Criteria of *Environmental Quality Standards for Surface Water*<sup>[15-16]</sup>

污染物	大、中城市 初期雨水	《地表水环境质量 标准》V类水质
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	153.92~1 367.00	-
COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	182.88~835.00	40.00
TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	1.40~39.00	2.00
TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.13~4.85	0.40

按照城市下垫面的不同,雨水径流分为绿地雨水径流、屋面雨水径流、道路雨水径流 3 种,初期雨水的污染程度因下垫面不同而差别较大。道路雨水径流由于路面铺砌材料、城市垃圾、车辆尾气和轮胎磨损等原因,其污染程度高于其他下垫面的雨水径流,屋面雨水径流次之<sup>[16]</sup>。

## 2 初期雨水处理措施

雨水径流污染控制技术很多,目前研究比较成熟的措施主要包括雨水调蓄、人工湿地、绿色屋顶、旋流分离、渗透铺装、截污雨水口和生物滞留池等。本文将处理措施的发展历程做了汇总,如图 1 所示。

总结国内外经验,初期雨水治理可分为源头减量、过程控制和末端治理 3 大类。源头治理是改变径流条件,增加降雨渗透量,使雨水进入管道系统之前得到处理。过程治理是指在雨水径流传输过程中,实现雨水净化。末端治理是在初期雨水排放到环境之前,利用工艺对污染物质进行有效去除以减轻对水环境的污染。

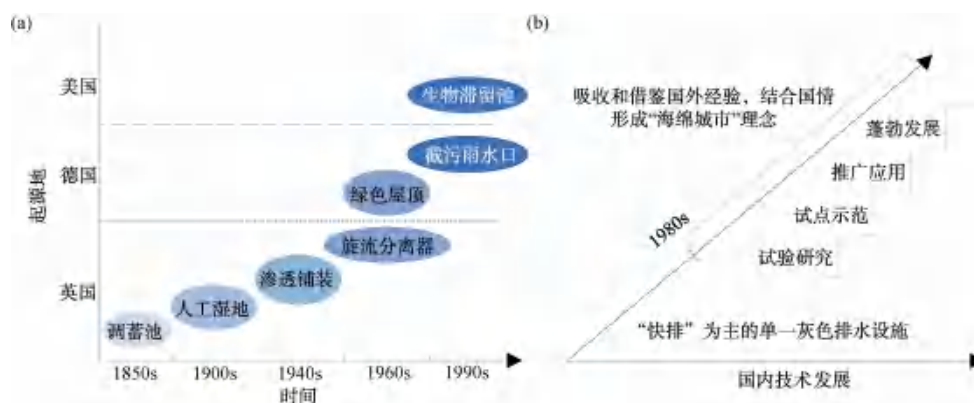


图1 雨水处理技术的发展历程

Fig. 1 Development Process of Stormwater Treatment

## 2.1 源头治理

### 2.1.1 绿色屋顶

传统的绿色屋顶如图2所示<sup>[17]</sup>,其主要具有以下功能:(1)绿色屋顶的缓冲机制可推迟屋顶径流的形成时间,涵养部分降雨、减少径流总量<sup>[18]</sup>; (2)绿色屋顶能够去除雨水中部分污染物<sup>[19]</sup>; (3)绿色植物的光合作用将固定大气中的二氧化碳,减缓温室效应和各种废气污染源造成的城市热岛效应<sup>[20]</sup>; (4)绿色植物能有效吸收热量、结合蒸发辐射和降低建筑温度,可以减缓热浪的影响<sup>[21]</sup>; (5)绿色植物可以美化城市,改善生态效果。

目前,国外已成熟应用绿色屋顶技术,同时国内也制定了相关政策推进绿色屋顶技术的实施,比如上海市要求新的住宅和商务楼在规划设计时将绿色屋顶考虑在内。但绿色屋顶对屋顶绿化荷载、坡度和防水性能的高要求使得建造成本较高。容器式屋顶绿化是一种新型屋顶绿化形式,解决了传统绿色屋顶在建筑负重、防水方面的难题,具有可任意拆卸、节能降耗的特点,在上海市卢湾区南园规划馆、黄浦区政协人大等项目的建筑屋顶中均应用了此绿化形式。

### 2.1.2 透水铺装

透水铺装是一项重要的源头控制技术,指应用透水性能较好的材料进行地面铺装以实现雨水自然下渗、自然净化,如图3所示<sup>[22]</sup>。铺装基质空隙率较高,雨水通过透水铺装直接下渗到土壤,既减轻了城市排水管网压力,又能够使地下水得到补充;且在雨水下渗过程中,土壤可以过滤掉部分污染物,缓解地表径流污染。北京奥运会场、上海世博会场地中

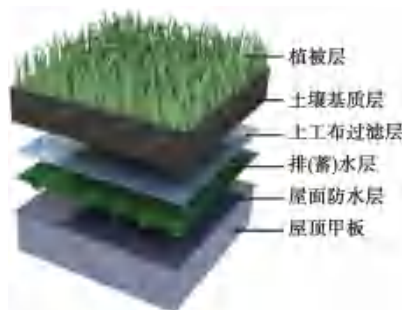


图2 传统绿色屋顶结构组成<sup>[17]</sup>

Fig. 2 Composition of Traditional Green Roof<sup>[17]</sup>

铺设生态砂基透水砖提高渗透率。透水铺装后期维护十分必要,空隙率较高使结构承载力下降、沉淀物堵塞孔隙结构都是制约透水铺装长期稳定运行的原因<sup>[23]</sup>。

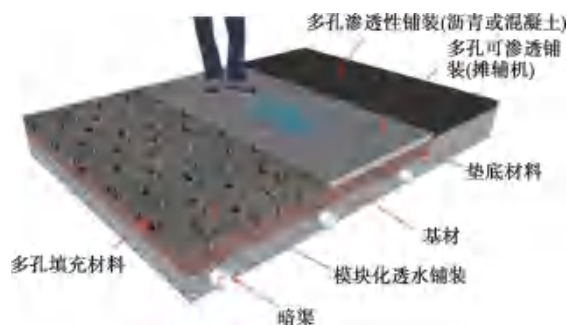


图3 透水铺装<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Water-Permeable Pavement<sup>[22]</sup>

对不同污染物来说,透水铺装的作用效果有较大差别。Selbig等<sup>[24]</sup>发现透水铺装对总悬浮固体(TSS)和重金属具有明显的去除效果。而张佳炜

等<sup>[25]</sup>发现水泥稳定碎石基质的透水铺装会释出硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ -N),致使TN的去除效果不佳。为提高TN的去除率,Ostrom等<sup>[26]</sup>将页岩骨料、铝基水处理残留物和黏合剂作为可渗透路面的基础层,有效增加了TN的去除率。

### 2.1.3 下凹式绿地

城市生态系统中的重要组成部分之一是城市绿地,下凹式绿地是其中的一部分,如图4所示<sup>[27]</sup>。由于其高程比周边地面或道路低20.0 cm左右,绿地中积蓄流动的雨水会分为两个部分,一部分在重力作用下渗入地下,另一部分则在将绿地空间蓄满后往雨水口流去。因此,其既可以削减洪峰流量,起防洪的作用,又可以拦截径流雨水以补充地下水。Yang等<sup>[28]</sup>发现宜兴市下凹式绿地能蓄积81.4%以上的降雨量。



图4 下凹式绿地<sup>[27]</sup>

Fig. 4 Concave-Down Green Belt<sup>[27]</sup>

在积蓄流动过程中,雨水携带的污染物通过草地截留、土壤过滤、植物吸收作用得以去除。田文龙等<sup>[29]</sup>研究发现下凹式绿地对各种污染物都有一定的去除率,并且当水力负荷小于 $1.15 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,其出水可以达到城市污水再生利用的标准。然而,降雨特征、绿地面积、下凹深度、植物类型和土壤基质等都会影响出水水质<sup>[30]</sup>。为方便日常管理,一般选择当地耐淹、抗旱且景观效应良好的植物在下凹式绿地进行种植,且可以往其土壤中添加改良剂来提高蓄渗和截污效果。

### 2.1.4 截污雨水口

雨水口不仅是汇集地面雨水径流的构筑物,经国内外研究,优化改造后的雨水口还具有截污净化的作用。1990年左右,德国将截污挂篮装在雨水口,拦截大尺寸颗粒杂物以减少径流中的SS,如图5所示<sup>[31]</sup>。美国对雨水口结构不断优化设计,公开了众多截污能力强、防护性能好的雨水口专利技术,如

2011年公开的百叶窗雨水算专利(图6)<sup>[32]</sup>。在国内,王宏杰等<sup>[33]</sup>设计的雨水口除污器应用于深圳龙岗国际低碳城中,实现污染物年削减量分别为7 000 kg SS、2 100 kg  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、210 kg 氨氮、210 kg 总磷(TP)、3.50 kg Zn、1.40 kg Cu、2.10 kg Pb。姚伟华等<sup>[34]</sup>采用粗滤网、熔喷聚丙烯纤维滤料和细滤网组成雨水自流过滤器,并应用于上海工程实践中,现场试验证明,进水SS质量浓度在40.0 mg/L以上时,过滤器对SS的去除率在60.0%以上。但我国雨水口截污技术在产业化程度上与国外还存在一定差距,需加大推广截污雨水口的应用。

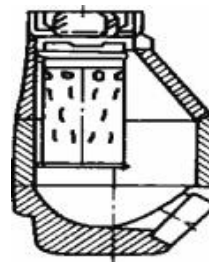


图5 德国雨水口挂篮<sup>[31]</sup>

Fig. 5 German Rain Inlet Hanging Basket<sup>[31]</sup>

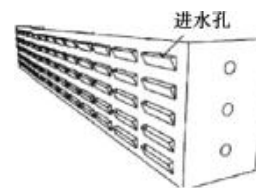


图6 美国百叶窗雨水算<sup>[32]</sup>

Fig. 6 American Rain Shutters Inlet<sup>[32]</sup>

## 2.2 过程治理

### 2.2.1 雨水调蓄池

对于污染负荷较大的初期雨水,可以采用雨水调蓄池。该池一般配置在雨水管渠尾端,能够降低面源污染。雨季时,雨水调蓄池收集储蓄初期雨水以削减最大雨水流量;降雨结束后,污水处理厂负荷降低,再将储存的雨水送入进行处理。我国最先使用调蓄池治理河道的城市是上海,其在苏州河二期工程中建设了5座调蓄池,使排入苏州河的污染负荷减少,取得了良好的环境效益<sup>[35]</sup>。周鹏程等<sup>[36]</sup>利用SWMM软件模拟研究了调蓄池的运行效果,模拟结果表明,调蓄容积为10 000  $\text{m}^3$ 时,在小重现期降雨中,调蓄池能拦蓄50%以上的雨水径流量,对TSS、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP的削减率可达60.0%以上。有些雨

水泵站不能直接建立独立调蓄池,对此,王斌等<sup>[37]</sup>提出在地下进行雨水泵站调蓄改造,如板材组装式调蓄池就更为便捷。周传庭<sup>[38]</sup>在现有的合流制排水系统下修建雨水调蓄池,实现溢流频率和溢流量的降低,一年多的运行证明了该工程的合理性和有效性。

### 2.2.2 植草沟

植草沟一般作为雨水径流流入下一个雨水处理设施的过渡性设施<sup>[39]</sup>,其结构如图 7 所示<sup>[40]</sup>。根据传输径流方式的不同,可以将植草沟分为标准传输型、干式渗透型和湿式植草沟<sup>[41]</sup>。植草沟对雨水的作用受到降雨强度的影响,降雨强度较大时以传输径流作用为主,降雨强度较小时以下渗作用为主,其下渗作用可以减小径流量<sup>[42]</sup>。

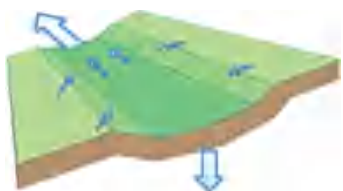


图 7 植草沟<sup>[40]</sup>

Fig. 7 Grass Ditch<sup>[40]</sup>

在对初期雨水污染物的去除方面,植草沟对 SS、N、P、有机物和重金属的去除机理和效果略有不同。研究表明,植草沟可通过截留、吸附和沉淀等方式去除 65.0%左右的 TSS<sup>[43]</sup>,通过基质的吸附、生物降解和植物吸收等方式去除 58.7%左右的 COD<sub>Cr</sub><sup>[44]</sup>。植草沟对 TN、氨氮和 TP 的去除效率分别为 22.7%~52.0%<sup>[45]</sup>、10.0%~20.0%<sup>[46]</sup>和 37.5%~83.0%<sup>[47]</sup>,且对 Pb、Cu、Cd、Zn 等重金属均有 70.0%以上的去除率<sup>[48]</sup>,但其去除方式取决于 N、P 及重金属的存在形式。NO<sub>3</sub>-N 在植草沟中主要通过离子交换作用被去除,氨氮则通过硝化作用被去除<sup>[49]</sup>。对重金属而言,颗粒态通过基质的过滤作用被去除,溶解态则通过某些介质或植物根系的吸收作用被去除<sup>[50]</sup>。

### 2.2.3 植被缓冲带

植被缓冲带是一个复合生态系统,由土壤、植物和微生物等组合而成<sup>[51]</sup>,其具体结构如图 8 所示<sup>[52]</sup>。其对污染物的去除机理与植草沟类似,主要受到植被类型、缓冲带宽度、缓冲带坡度和土壤理化性质等因素的影响。比如李萍萍等<sup>[53]</sup>研究发现,灌草类型的缓冲带截留污染物的作用明显高于其他类

型。Collins 等<sup>[54]</sup>发现较窄的缓冲带也能改善部分水质。

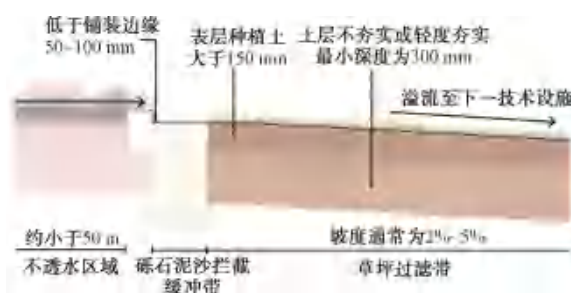


图 8 植被缓冲带<sup>[52]</sup>

Fig. 8 Vegetation Buffer Strip<sup>[52]</sup>

在城市中,植被缓冲带多建于河岸。程昌锦等<sup>[55]</sup>研究发现,在丹江口库区营造滨水植被缓冲带时,增加滨水植被缓冲带宽度并适度提高马尾松栓皮栎混交林的比例可提高其截留去污能力。闫钰等<sup>[56]</sup>在不同植物配置中优选出花苜蓿作为东新开河两岸缓冲带植物配置。张鸿龄等<sup>[57]</sup>在辽河两岸构建了 4 种植物缓冲带,试验发现紫穗槐+黑麦草(AL)组合带对 N 的去除效果均最好。

## 2.3 末端治理

### 2.3.1 旋流分离器

旋流分离器是依据离心沉降原理分离不同介质的一种设备,包括无压旋流和有压旋流两种。其主要处理对象是径流中的 SS,以及与 SS 相关性相对较高的 COD<sub>Cr</sub>、TP,而对于溶解态的氮类物质去除效果有限,常作为径流雨水的简单处理装置。为加强初期雨水的净化效果,旋流器可作为组合工艺的预处理单元。刘楠楠等<sup>[58]</sup>将旋流分离与接触氧化技术相结合,设计了高效旋流分离-生态砾间接触氧化联合装置,其中第一部分结构如图 9 所示。中试

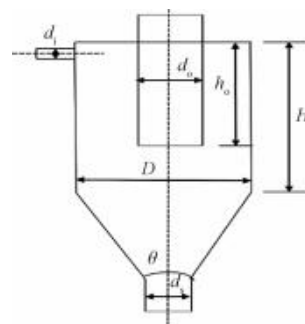


图 9 高效旋流分离器示意图<sup>[58]</sup>

Fig. 9 Schematic Diagram of Efficient Hydrocyclone Separation Device<sup>[58]</sup>

研究发现,系统能去除 91.80% 的 SS、84.6% 的  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、59.6% 的 TN、79.9% 的氨氮和 67.4% 的 TP,可有效缓解初期雨水带来的面源污染。此外,Motin 等<sup>[59]</sup> 研究发现旋流室的壁型结构对分离效率影响很大,相比于其他壁型旋流器,截锥改进的双曲涡流室制造更简单、分离效果更好。

### 2.3.2 人工湿地

人工湿地是模仿天然湿地系统,人为搭建的湿地生态系统。按照水流方式的不同,人工湿地可分为表面流、水平潜流和垂直潜流 3 种类型,结构形式如图 10 所示<sup>[60]</sup>。3 类湿地的区别在于进水和出水方式,这导致进水与湿地内基质的接触方式有所不同,出水的污染物去除效果也有所不同。初期雨水中部分污染物主要通过基质、植物和微生物的协同作用被去除。曹婷婷等<sup>[61]</sup> 研究发现,就污染物尤其是重金属的去除效果而言,复合流人工湿地系统更好。植物类型和径流水质状况同样影响人工湿地系统的处理效果,纪桂霞等<sup>[62]</sup> 研究发现湿地植物的净化性能因水质而异。填料是植物和微生物的载体,且自身具有吸附、过滤作用,所以人工湿地中基质的选择尤为重要。高旺等<sup>[63]</sup> 在深圳市中试研究中发现,砾石湿地系统对屋面雨水径流的处理效果较好,出水基本可达到景观用水水质标准。

### 2.3.3 生物滞留池

生物滞留池具有强大的水文功能,能够依靠植物的截留及吸收作用、填料的过滤、吸附、离子交换作用和微生物的降解作用有效去除初期雨水径流中的污染物,典型的生物滞留系统如图 11 所示<sup>[64]</sup>。Mahmoud 等<sup>[65]</sup> 研究发现,生物滞留池可削减 82.0% 的雨水径流量,去除 49.0% 的大肠杆菌,明显改善出

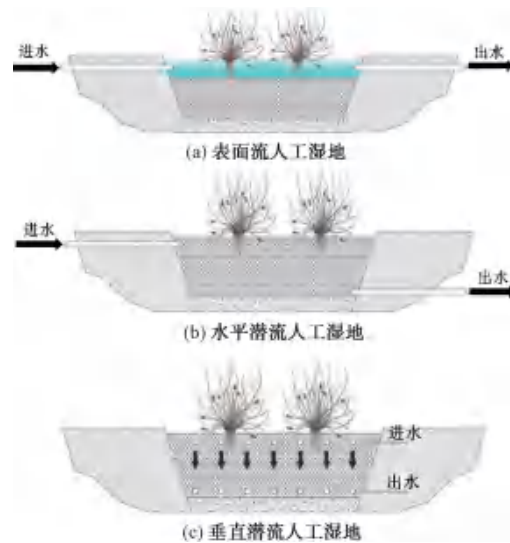


图 10 人工湿地类型<sup>[60]</sup>

Fig. 10 Types of Constructed Wetlands<sup>[60]</sup>

水水质。但是常规生物滞留系统较难形成缺氧环境,致使 N 的去除效果时好时坏。为提高 N 去除的稳定性,Luo 等<sup>[66]</sup> 设计了易形成缺氧区的双层介质生物滞留柱以促进反硝化过程,研究发现,改进的生物滞留系统对 TN、氨氮、 $\text{NO}_3^-$ -N 的去除率均在 76.8% 以上。生物滞留池的净化效果深受植物、填料和结构的影响。Zuo 等<sup>[67]</sup> 研究发现千屈菜能去除 88.1% 的氨氮,而美人蕉则对 TN、 $\text{NO}_3^-$ -N 的去除效果最好。在填料方面,Shrestha 等<sup>[68]</sup> 研究发现在土壤介质中添加铁和氧化铝颗粒,可以极大提高 P 的去除率。在结构方面,Lopez-Ponnada 等<sup>[69]</sup> 研究发现添加内部蓄水区可以促进反硝化作用,降低出水 TN 浓度。

初期雨水处理措施各自优缺点、适宜性及经济性如表 2 所示。根据主要功能不同,初期雨水处理

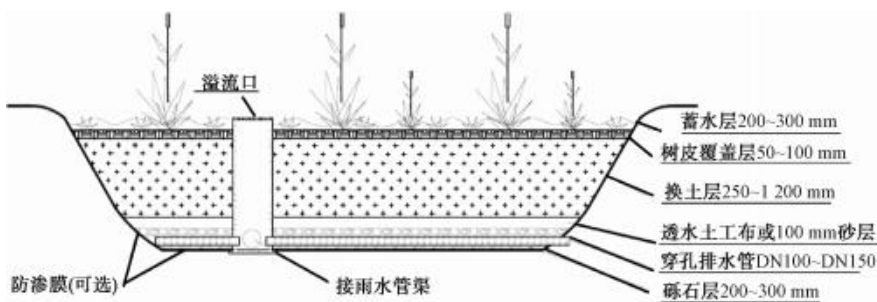


图 11 典型生物滞留池结构示意图<sup>[64]</sup>

Fig. 11 Schematic Diagram of a Typical Bioretention Pond<sup>[64]</sup>

措施又可分为输送型措施、滞留渗透型措施和调蓄型措施。输送型措施以植被浅沟、植被缓冲带为代表,以径流输送功能为主;滞留渗透型措施包括绿色屋顶、渗透铺装、下凹绿地、人工湿地、生物滞留池等,截留一定设计目标的径流量;调蓄型设施包括雨水调蓄池,以水量控制为主要目的。滞留渗透措施的规模受绿化率的影响,设计时采用容积法用于水质控制即水质控制容积。输送型措施规模的计算可从水量和水质两个角度确定设施规模;以水量控制

为目的的计算方法,是通过计算一定重现期的设计降雨事件的径流峰值来确定设施规模;以水质控制的计算方法,是计算控制出现频率较高的小降雨事件产生的峰流量来确定规模。调蓄型设施规模确定常利用暴雨流量推理公式绘制出大致设计重现期下一场降雨的径流过程曲线,利用曲线积分或图解的方法计算雨洪控制技术中的调蓄或调节设施的容积。工程设计及应用应根据汇水区的特点、措施的适用性和经济性选择相应的处理措施或组合系统。

表2 初期雨水处理措施的优缺点、适用性及经济性  
Tab. 2 Advantages and Disadvantages, Applicability and Economy of Initial Rainwater Treatment Measures

措施	优点	缺点	适用性	经济成本	
				建造成本	维护成本
绿色屋顶	有效削减径流污染物和径流总量;调节建筑内部温度、湿度	对与建筑物屋顶的相关技术指标要求严格	适合屋顶荷载和防水条件较好的平顶建筑	高	中
透水铺装	施工方便;削减径流和洪峰流量;维护地下水及土壤的生态平衡	易堵塞;可能引发次生灾害	广场、停车场及车流荷载较小的道路	低	低
下凹式绿地	截留净化雨水;补充地下水资源;防止水土流失	易受地形条件影响	城市花园、道路、小区	低	低
截污雨水口	从管网源头控制径流污染物,防止城市内涝	需要经常清污维护	建筑与小区、道路、绿地与广场	低	中
雨水调蓄池	削减洪峰	投资大;设计功能单一;利用效率较低	城市广场、绿地、停车场等公共区域的下方	高	低
植草沟	施工方便且造价低	大规模应用时对地形要求较高;小规模应用时对径流和污染物负荷的调控作用不明显	建筑与小区、非机动车道、广场等的绿化区域	低	低
植被缓冲带	建设与维护费用低;易与景观结合	对场地空间大小、坡度等要求较高	建筑与小区、道路、绿地与广场	低	低
旋流分离器	结构简单;运行维护简单;占地面积小	对较小粒径颗粒的去除效果不佳;设计结构及参数有待改进	城市道路雨水管道出口	低	低
人工湿地	有效控制径流总量、峰值流量和径流污染;易与景观结合	占地面积很大;处理效果受季节影响	空间范围较大的小区、城市绿地和滨水带等区	高	中
生物滞留池	造型各异;易与景观结合	土壤渗透性能要求高	建筑与小区、机动车道、非机动车道、广场、绿地的周边及内部区域	中	低

### 3 结语

初期雨水中含有较高的污染负荷,加强初期雨水的综合治理能有效缓解城市面源污染。随着海绵城市建设的推广,初期雨水处理措施受到越来越多的关注。虽然这些措施在改善初期雨水水质方面发挥了重要作用,但我国对雨水治理的研究较晚,措施净化效率的提高及工程化应用仍需深入研究。为更好地建设海绵城市,现提出如下展望。

(1)国外具有完善的雨水管理体系,对初期雨水处理设施的研究比较成熟,而我国对初期雨水污染治理尚处于起步阶段,相应的法规、标准不够全面。应借鉴国外经验,结合自身水质状况,制定雨水排放标准,加强雨水处理技术研究。

(2)基质填料、植被类型对治理措施的运行效果影响很大。传统的基质材料对径流中污染物的去除效果有限,且常面临堵塞问题。因此,需要对填料

进行改进优化,如填料合理配比、添加改良剂、挑选合适粒径等。植物选择不当,不仅达不到预想处理效果,还会造成植物死亡。城市径流水质不同,植物也需因地制宜。所以,应选择耐污能力强、景观效果好、适合城市雨水径流污染特点的植物。为保持长期有效的净化效果,基质与植物应定期维护管理。

(3)未来应侧重于技术创新化、设计标准化。例如:提高渗透铺装抗压性和耐磨性;探究组合工艺的净化效果等。处理措施应根据实地运行效果,制定合理设计参数,形成一套完善的雨水管理体系。

(4)当前雨水快速处理工艺仍在开发阶段,多为物化手段,未实现工程应用。可以考虑结合多种工艺,考虑生物技术,实现雨水高效快速处理,并尽可能提高水质,考虑其回用甚至作为饮用水的可能性。

### 参考文献

- [1] 车伍,刘燕,李俊奇.北京城区面源污染特征及其控制对策[J].北京建筑工程学院学报,2002,18(4):5-8.
- [2] 车伍,刘燕,李俊奇.国内外城市雨水水质及污染控制[J].给水排水,2003,39(10):38-42.
- [3] GAAFAR M, MAHMOUD S H, GAN T Y, et al. A practical GIS-based hazard assessment framework for water quality in stormwater systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 245: 118855. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118855.
- [4] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First flush analysis of urban storm runoff[J]. Science of the Total Environment, 2002, 293: 163-175. DOI: 10.1016/S0048-9697(02)00006-2.
- [5] 李涵,耿晓明. LID低影响开发理念在城区雨水径流控制管理中的运用[J].水资源开发与管理,2019(6):36-40.
- [6] 李林子.浅析海绵城市建设[J].中华建设,2017(9):110-111.
- [7] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development-A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 413-432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.254.
- [8] KANG J H, KAYHANIAN M, STENSTROM M K. Predicting the existence of stormwater first flush from the time of concentration[J]. Water Research, 2008, 42(1/2): 220-228. DOI: 10.1016/j.watres.2007.07.001.
- [9] GREENWAY M. Stormwater wetlands for the enhancement of environmental ecosystem services: Case studies for two retrofit wetlands in Brisbane, Australia [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 163: S91-S100. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.081.
- [10] GIMENEZ-MARANGES M, BREUSTE J, HOF A. Sustainable drainage systems for transitioning to sustainable urban flood management in the European Union: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120191. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120191.
- [11] 赵昱.各国雨洪管理理论体系对比研究[D].天津:天津大学,2017.
- [12] 张晓昕,马洪涛.美国城市雨水径流管理概况与借鉴[C].昆明:多元与包容——2012中国城市规划年会论文集,2012.
- [13] 邓志光,吴宗义,蒋卫列.城市初期雨水的处理技术路线初探[J].中国给水排水,2009,25(10):11-14.
- [14] GROMIRE-MERTZ M C, GARNAUD S, GONZALEZ A, et al. Characterisation of urban runoff pollution in Paris[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(2): 1-8.
- [15] 张志彬,孟庆宇,马征.城市面源污染的污染特征研究[J].给水排水,2016,52(s1):163-167.
- [16] 郭泓利,李鑫玮,任毅毅,等.全国典型城市污水处理厂进厂水质特征分析[J].给水排水,2018,54(6):12-15.
- [17] 高玉琴,王冬冬,ARTHUR S,等.绿色屋顶对城市流域径流的影响[J].水资源保护,2018,34(5):20-26,33.
- [18] 陈俊宇,李伟英,周文颖,等.浅议两种屋面雨水收集利用系统[J].净水技术,2019,38(2):114-120.
- [19] GREGOIRE B G, CLAUSEN J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 963-969.
- [20] SHAFIQUE M, XUE X, LUO X. An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 47(3): 126515. DOI: 10.1016/j.ufug.2019.126515.
- [21] FEITOSA R C, WILKINSON S J. Small-scale experiments of seasonal heat stress attenuation through a combination of green roof and green walls[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 250: 119443. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119443.
- [22] 季小益.下凹式绿地结构组成对雨水下渗和净化效果影响研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [23] 王兴桦,侯精明,李丙尧,等.多孔透水砖下渗衰减规律试验研究[J].给水排水,2019,55(s1):68-71.
- [24] SELBIG W R, BUER N, DANZ M E. Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 251: 109510. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109510.
- [25] 张佳炜,刘勇,金建荣,等.透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响[J].环境科学,2019,41(2):254-259.
- [26] OSTROM T K, DAVIS A P. Evaluation of an enhanced treatment media and permeable pavement base to remove stormwater nitrogen, phosphorus, and metals under simulated rainfall[J]. Water Research, 2019, 166: 115071. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115071.
- [27] 王彤.下凹式绿地等LID技术及城市雨水利用工程的应用研



- 究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [28] YANG L, ZHANG L, LI Y, et al. Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China)[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 136: 40-51. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.11.016.
- [29] 田文龙, 刘瑶环. 下凹式绿地处理城市初期雨水效能的试验研究[J]. *环境保护工程*, 2013, 31(5): 123-126.
- [30] 潘忠成, 袁溪, 李敏, 等. 下凹式绿地在降雨径流控制中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(10): 59-62.
- [31] 朱保罗. 国内外排水管道养护技术比较[J]. *给水排水*, 2007, 43(2): 94-99.
- [32] 刘超, 李俊奇, 王洪, 等. 国内外截污雨水口专利技术发展及其展望[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(4): 1-6.
- [33] 王宏杰, 董文艺, 李梓龙, 等. 基于低影响开发理念的雨水口除污器设计与应用研究[J]. *广东化工*, 2019, 46(18): 112-114.
- [34] 姚伟华, 夏泰, 高原, 等. 市政道路雨水自流过滤净化技术实施效果分析[J]. *中国市政工程*, 2015(4): 36-39, 99-100.
- [35] 程江. 苏二期雨水调蓄池整体设计后评估与优化建议[J]. *给水排水*, 2013, 49(8): 41-46.
- [36] 周鹏程, 石少山. 雨水调蓄池对径流水质控制效果的模拟研究[J]. *广东水利水电*, 2019(11): 56-58, 62.
- [37] 王斌, 陈祥瑞, 李铭洋, 等. 利用现有地下空间进行调蓄改造雨水泵站的设计探讨[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 64-67.
- [38] 周传庭. 合肥市老城区全地下水调蓄池工程设计[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(14): 63-66.
- [39] 魏鹏. 植被浅沟运行效果评价及改进设计研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- [40] 韩媛雯. 基于SWMM的铁路车站片区LID雨洪模拟及综合效益研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [41] 邵妙馨. 基于“海绵城市”理念下雨水可持续利用的高校校园景观营造研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [42] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟对道路径流的水文控制效果研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(3): 118-122.
- [43] STAGGE J H, DAVIS A P, JAMIL E, et al. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff[J]. *Water Research*, 2012, 46(20): 6731-6742.
- [44] 周开壹, 高伏良, 胡跃华, 等. 基于多孔混凝土的植草沟(GP水沟)降污能力研究[J]. *给水排水*, 2011, 47(s1): 269-274.
- [45] 刘钰钦. 径流雨水中典型污染物在LID设施中的迁移变化及其相互影响的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [46] 郭凤, 陈建刚, 杨军, 等. 植草沟对北京市道路地表径流的调控效应[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(3): 176-181.
- [47] 赵金辉, 陆毅, 赵晓莉. 植草沟-湿地滞留塘控制农田径流污染效能[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(10): 117-120, 125.
- [48] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2109-2115.
- [49] LI L, DAVIS A P. Urban stormwater runoff nitrogen composition and fate in bioretention systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(6): 3403-3410.
- [50] 刘燕, 尹澄清, 车伍. 植草沟在城市面源污染控制系统的应用[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(3): 334-339.
- [51] TANG Q, BAO Y, HE X, et al. Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 479/480: 258-266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.122.
- [52] 林辰松. 半湿润地区集雨型绿地设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [53] 李萍萍, 崔波, 付为国, 等. 河岸带不同植被类型及宽度对污染物去除效果的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(6): 47-52.
- [54] COLLINS K E, DOSCHER C, RENNIE H G, et al. The effectiveness of riparian ‘restoration’ on water quality-A case study of lowland streams in Canterbury, New Zealand[J]. *Restoration Ecology*. 2013, 21(1). DOI: 10.1111/j.1526-100X.2011.00859.x.
- [55] 程昌锦, 张建, 雷刚, 等. 湖北丹江口库区滨水植被缓冲带氮磷截留效应[J]. *林业科学*, 2020, 56(9): 12-20.
- [56] 闫钰, 董艳红, 汤洁, 等. 东新开河岸边植被缓冲带对雨水径流中典型污染物截留效果试验[J]. *环境工程*, 2020, 38(9): 139-144.
- [57] 张鸿龄, 李天娇, 赵志芳, 等. 辽河河岸植被缓冲带构建及其对固体颗粒物和氮阻控能力[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2185-2192.
- [58] 刘楠楠, 迟杰, 褚一威, 等. 高效旋流分离-生态砾间接触氧化联合装置处理初期雨水径流应用研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(9): 1043-1049.
- [59] MOTIN A, BÉNARD A. Design of liquid-liquid separation hydrocyclones using parabolic and hyperbolic swirl chambers for efficiency enhancement[J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2017, 122: 184 - 197. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.04.012.
- [60] 叶桂洪. 强化人工湿地中微生物对典型PPCPs的降解研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [61] 曹婷婷, 王欢元, 孙婴婴. 复合人工湿地系统对重金属的去除研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(s1): 230-236.
- [62] 纪桂霞, 蒙勇翔, 许春蕾, 等. 湿地植物对城市雨水径流污染的净化效能与适应性研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5): 203-206.
- [63] 高旺, 康威, 江强, 等. 砾石人工湿地处理小区雨水径流的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(7): 153-156.
- [64] 北京建筑大学. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [65] MAHMOUD A, ALAM T, RAHMAN M A, et al. Evaluation of

- field-scale stormwater bioretention structure flow and pollutant load reductions in a semi-arid coastal climate [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 142: 100007. DOI: 10.1016/j.ecoena.2019.100007.
- [66] LUO Y, YUE X, DUAN Y, et al. A bilayer media bioretention system for enhanced nitrogen removal from road runoff [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135893.
- [67] ZUO X, ZHANG H, YU J. Microbial diversity for the improvement of nitrogen removal in stormwater bioretention cells with three aquatic plants [J]. *Chemosphere*, 2020, 244: 125626. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.125626.
- [68] SHRESTHA P, HURLEY S E, WEMPLE B C. Effects of different soil media, vegetation, and hydrologic treatments on nutrient and sediment removal in roadside bioretention systems [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 112: 116-131. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.12.004.
- [69] LOPEZ-PONNADA E V, LYNN T J, ERGAS S J, et al. Long-term field performance of a conventional and modified bioretention system for removing dissolved nitrogen species in stormwater runoff [J]. *Water Research*, 2020, 170: 115336. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115336.

(上接第6页)

也较高,需要合理进行净水构筑物水力高程布置设计,具备多种运行模式,从而提高水厂运转灵活性,节约运行成本。上述介绍的很多全流程水厂均具备长流程、中流程、短流程等多种运行模式,包括:正常运行工况,全部单元运行的长流程运行模式;超越运行工况一,超越炭滤池的中流程运行模式;超越工况二,超越全部膜处理单元的中流程运行模式;超越工况三,超越部分膜处理单元的中流程运行模式;超越工况四,特殊情况下超越炭滤池和膜处理单元的常规处理短流程模式等。例如在原水水质较好的情况下,可采用中流程或短流程运行模式,在保证出水安全优质的情况下节约运行成本,提高膜的使用寿命。

全流程水厂常常需要设置两级中间提升泵房,即臭氧-活性炭之前、超滤膜前或膜后,这无疑增大了管理复杂性,有条件时应尽可能减少一级提升。可通过优化提升泵房的溢流方式(溢流堰),保证运行灵活和安全。另外,可通过优化压力式超滤膜的布置,充分利用膜的出水余压。

(6)按智慧型水厂进行设计建设,提升水厂运行管理水平

数字化转型是时代的要求。全流程水厂工艺相对复杂,对运行管理提出了更高要求,迫切需要利用数字技术进行运行管理赋能。全流程水厂宜按智慧型水厂进行设计建设,配置完善的自动检测系统、自动/智能控制系统、资产管理系统、生产信息管理系统等,以实现对水厂的全流程在线监测、对工艺单元的自动/智能化控制、对生产过程的预警预测及模拟分析、对水厂运行的整体优化和辅助决策,从而保证水厂运行安全、稳定、高效。

## 6 结语

全流程水厂设计建设是新时代我国城市供水系统高标准建设的最新实践,需要不断总结经验。提供安全、优质的饮用水是供水行业从业人员永恒的追求,期望通过全流程水厂的设计建设,打造供水基础设施高标准建设示范标杆,引领供水行业技术进步,为城市安全供水做出更大贡献。

## 参考文献

- [1] 林民利,秦建明,张全斌.“从源头到龙头”的饮用水安全保障技术体系及其应用[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(4): 362-367.
- [2] 王占生,孙文俊.我国给水行业深度处理发展趋势[C]. 太仓:中国土木工程学会水工业分会2019年给水深度处理研讨会论文集, 2019: 1-6.
- [3] 吕东明.饮用水多屏障消毒策略及紫外消毒技术的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(1): 1-6.
- [4] 韩艳梅.多屏障工艺设计保障供水水质安全——天津开发区水厂三期工程[C]. 乌海:2011年全国给水排水技术信息网年会暨技术交流会议论文集, 2011: 47-49.
- [5] 周大农.北京市第十水厂处理工艺的选择[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(6): 12-15, 21.
- [6] 饶磊.浅谈郭公庄水厂的工艺设计及优化[J]. *给水排水*, 2015, 41(4): 9-12.
- [7] 罗丁,杨力,方帷韬,等.风景区半地下净水厂工艺设计方案探讨[J]. *给水排水*, 2021, 47(4): 28-32.
- [8] 张东波,徐海燕,郭亦俊,等.新型现代化大型净水厂工程设计[J]. *给水排水*, 2017, 43(8): 9-13.
- [9] 张东波.关于全流程工艺净水厂高程布置的优化设计[J]. *节能技术与应用*, 2018, 43(7): 95-97.
- [10] 李丰庆.我国超大超滤水厂——广州北部水厂工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(10): 66-70.
- [11] 镇祥华,余琴芳,何晓梅,等.某多水源水厂不同组合工艺流程的试验研究[J]. *给水排水*, 2020, 46(6): 72-78.