

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.015

初期雨水径流管控现状与展望

陆敏博¹, 朱伟锋², 刘畅², 杨卓¹, 沈昊¹, 杨小雨²

(1. 悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215123; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:在总结分析初期雨水的界定方式及其水质水量变化特征的基础上,比较分析了国内外初期雨水径流管控的规范标准,指出国内关于初期雨水径流管控相关的规范标准体系尚不健全,现有的初期雨水弃流设备、收集转输设备还不成体系,缺乏对初期雨水污染特征差异、初期雨水径流管控规范要求以及雨洪管理体系的系统性研究;通过对目前初期雨水收集转输设备的调研,分析其性能及优缺点;今后应针对初期雨水径流管控出台专项政策,编制综合雨水利用、环境保护和排水防涝等方面的雨水管控技术规范,从宏观水文角度关注初期雨水并建立相应评价体系。

关键词:初期雨水;径流污染;雨水管控;雨水规范;弃流设备

中图分类号:TU992.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0102-08

Current situation and prospect of initial rainwater runoff control//LU Minbo¹, ZHU Weifeng², LIU Chang², YANG Zhuo¹, SHEN Hao¹, YANG Xiaoli² (1. CCDI (Suzhou) Exploration & Design Consultant Co., Ltd., Suzhou 215123, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: On the basis of summarizing and analyzing the definition methods of initial rainwater and the change characteristics of its water quality and quantity, this paper compares and analyzes the norms and standards of initial rainwater runoff management and control in China and abroad. It is pointed out that the domestic specification and standard system related to initial rainwater runoff management and control is unsound, the existing initial rainwater split-flow equipment, collection and transfer facilities are not systematic, and there is a lack of systematic research on the differences in initial rainwater pollution characteristics, initial rainwater runoff management and control specification requirements, and rainwater and flood management system. Through the investigation of the current initial rainwater collection and transfer equipment, its performance, advantages and disadvantages are analyzed. In the future, special policies should be issued for the management and control of initial rainwater runoff. Technical specifications for rainwater management and control in the aspects of comprehensive rainwater utilization, environmental protection, drainage and waterlogging prevention should be prepared. Initial rainwater should be concerned from the perspective of macro hydrology and the corresponding evaluation system should be established.

Key words: initial rainwater; runoff pollution; rainwater management and control; rainwater standard; split-flow equipment

降雨初期产生一定深度的降雨径流称为初期雨水径流。2015年先后颁布的《水污染防治行动计划》和《国务院办公厅关于推进海绵城市建设的指导意见》明确提出控制初期雨水径流污染,推进初期雨水收集、处理和资源化利用。目前,国内外对初期雨水冲刷效应开展了较为广泛的研究。国外,美国、澳大利亚、日本等国家均形成相应的雨洪管理体

系,国内学者在此基础上研究了不同功能区的初期雨水污染特性,但对初期雨水污染特征差异分析、初雨径流管控规范要求以及雨洪管理体系的系统性研究比较缺乏。本文通过对初期雨水的水质水量特性进行分析,比较国内外初期雨水径流管控的相关规范和要求,总结归纳现有初期雨水收集、弃流设备及运行效果,对今后初雨径流污染控制、相关规范编制

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1100205)

作者简介:陆敏博(1982—),男,高级工程师,硕士,主要从事海绵城市与雨洪控制利用研究。E-mail:lu.minbo@ccdi.com.cn

通信作者:杨小雨(1977—),女,教授,博士,主要从事水环境与生态修复研究。E-mail:yangxiaoli@seu.edu.cn

1 初期雨水特性

1.1 初期雨水的界定

目前对初期雨水尚无统一的明确定义,国内外许多规范和学者都提出了不同的界定方式^[14],如表1所示。由表1可见,初期雨水的界定通常有2种方法:①采用降水量界定,且屋面初期雨水量低于道路初期雨水量;②采用降雨历时界定,如降雨初期前15~30 min的雨水。此外,Sansalone等^[3]通过研究整个降雨过程的径流总量污染负荷分布,确定总径流量中的20%为初期雨水。分析可知,不同强度的降雨在相同时间内的径流量和冲刷特性差异较大,以时间来界定初期雨水误差较大;而降雨径流总量在降雨初期也无法确定,故以降雨径流总量来控制初期雨水在实际工程中操作难度较大。相比较而言,根据某地区降雨过程曲线和以往的降雨水质监测数据,可得出符合该地区情况的初期雨水界定值。因此以降水量界定初期雨水方便易操作,但不同地域、不同下垫面条件下应采取不同的降水量。

表1 不同规范和学者对初期雨水的界定

Table 1 Definition of initial rainwater by different specifications and scholars

初期雨水界定	规范和学者
用于分流制排水系统径流污染控制时,雨水调蓄池的调蓄量按降水量计,可取4~8 mm	GB 50014—2006《室外排水设计规范》(2016年版)
当无资料时,初期雨水屋面弃流量可为2~3 mm,地面弃流量可为4~8 mm	GB 51174—2017《城镇雨水调蓄工程技术规范》
降雨初期15~30 min内的雨水及其形成的径流	DB 53/T 950—2019《高原湖泊城市河道初期雨水拦截技术规范》(云南省地方标准)
下凹桥区初期雨水收集池,有效容积按立体交叉道路汇水区域内7~15 mm降水量确定	DB 11/T 1743—2020《海绵城市建设设计标准》(北京市地方标准)
初期雨水为降雨前0.02~0.06英寸(5.08~15.24 mm)的径流	《哥伦比亚特区雨水管理手册》(2020年1月修订版) ^[1]
初期雨水弃流量:屋面为1~3 mm,小区路面或小区内的管道系统为4~5 mm,市区路面为6~8 mm	Millar ^[2]
占径流总量20%的初期雨水污染负荷占污染总负荷的80%	Sansalone等 ^[3]
控制初期雨水(降雨总量的前20%)可以削减污染物总量的40%~60%	冯伟等 ^[4]

1.2 初期雨水径流污染特征

初期雨水径流控制包括水质控制和水量控制^[5],了解初期雨水的水质水量特征及其变化规律,是初期雨水径流控制利用的前提。

1.2.1 水质变化特征

由于不同功能分区本底情况不同,导致初期雨水径流污染存在较大差异^[6]。国内常将研究区域划分为城市道路、商业区、住宅区、绿地等不同功能分区,表2列出了国内外不同城市不同功能区的初期雨水径流污染情况。由表2可见,不同城市功能区的初期雨水径流污染相差较大,仅在少数功能区存在一定规律:①城市道路径流污染中SS质量浓度普遍较高,为323~597 mg/L,COD质量浓度变化较大,为74.42~408 mg/L;②由于大量餐饮、娱乐等人类活动影响,商业区径流污染中TN和氨氮质量浓度处于较高水平。其他功能区则未呈现明显共性。分析认为:①现有文献调研时未严格区分住宅区类别,各地住宅区性质差异较大,住宅区已知径流污染中氨氮质量浓度较高,其他污染物有待进一步明确;②由于地区、调研时间和工业类别不同,工业区径流污染物没有明显规律;③由于植物或落叶腐烂的影响,可能导致绿地径流污染中COD和TN质量浓度较高。此外,从时间角度看,随着年代的推移,污染物浓度总体呈下降趋势,推测可能与城市排水体制完善程度和清扫方式有关。由于各城市采样时间不同,气候、土壤本底情况以及城市管理情况(道路清扫方式等)不同,不同功能区初雨径流污染差异较大,没有明显的规律性。

1.2.2 径流量变化特性

初期雨水水质污染严重,其径流量控制直接影响进入地表水环境的污染负荷^[15]。由于下垫面特性、土壤本底条件、排水设施完善程度的不同,不同城市不同功能区的初期雨水径流量存在明显差异^[16]。目前,初期雨水径流量多以降水量或降雨历时来确定,对不同城市不同功能区初期雨水径流量的变化规律研究较少。

2 国内外初期雨水径流管控要求与规范

由于初期雨水直接排放会导致面源污染,恶化水环境,因此国内外均对初期雨水径流管控提出了相关要求^[17]。

2.1 国内初期雨水径流管控

GB 50014—2006《室外排水设计规范》是我国室外排水工程设计的总领性规范,在排水体制、排水管渠、雨水综合利用、雨水口、雨水调蓄池、雨水渗透设施等方面均有涉及初期雨水径流管控的相关规定。在初期雨水界定方面,该规范规定用于分流制排水系统径流污染控制时,雨水调蓄池的调蓄量按降水量计,可取4~8 mm。另外,根据调蓄目的、排水体制等不同因素,分别提出用于合流制排水系统

表 2 国内外不同城市不同功能分区初期雨水径流污染情况

单位:mg/L

Table 2 Mass concentration of initial rainwater runoff pollutants in different functional zones in some cities in China and abroad

		unit:mg/L					
城市	功能区	SS	COD	TN	TP	氨氮	数据说明
宁波 ^[7]	道路	323.40	74.42	8.04	0.50	0.88	2009—2019 年平均污染物质量浓度
	住宅区	226.66	110.33	4.67	0.30	1.50	
	商业区	180.63	99.64	8.71	0.48	1.54	
	绿地	232.99	73.10	4.83	0.43	0.49	
苏州 ^[8]	道路	388.91	308.70	2.76	1.05	1.38	2018 年污染物质量浓度
	商业区	253.26	111.69	2.12	3.07	2.53	
	老旧住宅区	142.45	140.67	4.65	0.75	1.43	
	现代住宅区	54.44	84.93	1.53	0.36	1.29	
	园林	106.07	89.22	3.21	0.79	1.25	
重庆 ^[9]	道路	597	408	8.6	1.00	4.5	2013 年污染物质量浓度
	住宅区	89	89	7.1	0.20	4.5	
	商业区	140	172	8.2	0.47	4.3	
	屋面	65	77	5.6	0.20	1.2	
常州 ^[10]	住宅区		17.67	1.36	0.06	0.46	2017 年污染物质量浓度
	商业区		52.70	1.68	0.38	0.57	
	工业区		42.70	1.66	0.12	1.09	
无锡 ^[11]	商住私房混合	62.84	43.23	15.73	1.34	13.69	不同类型小区 2014 年污染物质量浓度
	商业住宅	56.70	31.78	8.11	0.69	5.56	
	商住餐饮	70.99	31.61	7.11	0.58	5.20	
扬州 ^[12]	公园绿地	215	189	4.368	0.245		不同类型绿地 2017 年污染物质量浓度
	小区绿地	266	256	1.887	0.193		
	工业区绿地	194	385	7.014	0.185		
	文教区绿地	252	85	1.971	0.079		
	道路绿地	394	281	5.116	0.434		
华盛顿特区 ^[13]	住宅区	101	73	1.90	0.38		2015 年污染物质量浓度
	商业区	69	57	1.18	0.20		
	混合区	67	65	1.29	0.26		
大田市 ^[14]	混合区	208	239	13.8	7.10		2004 年污染物质量浓度

径流污染控制、分流制排水系统径流污染控制、削减排水管道洪峰流量 3 种情形下的雨水调蓄池的有效容积计算公式。前 2 种针对水质控制,第 3 种主要针对水量控制,但在削减流量的同时也考虑削减污染物总量。现有的调蓄相关规范,如 GB 51174—2017《城镇雨水调蓄工程技术规范》和 CECS 416—2015《城镇径流污染控制调蓄池技术规程》,均对雨水调蓄池提出了相应的容积计算公式,且分流制排水系统均按降水量 4~8 mm 作为初期雨水量,与 GB 50014—2006《室外排水设计规范》的规定一致。

海绵城市通过加强城市规划建设管理,充分发挥建筑、道路、绿地、水系等生态系统对雨水的吸纳、蓄渗和缓释作用,有效控制雨水径流,实现自然积存、自然渗透、自然净化的城市发展。《海绵城市建设技术指南——低影响开发(low impact development, LID)雨水系统构建(试行)》在初期雨水管控方面要求通过一定方法或装置将存在初期冲刷效应、污染物浓度较高的降雨初期径流予以弃除,以降低雨水的后续处理难度,并列举了常见的初期弃流方法和弃流形式。

此外,国内多个地方标准也涉及初期雨水管控。北京市地方标准 DB 11/T 1743—2020《海绵城市建设设计标准》从径流污染削减、雨水径流控制、雨水调蓄排放、水质保持等方面对初期雨水弃流设施提出了具体要求,并对各项海绵技术的适用性作了归纳总结。深圳市地方标准 DB 4403/T 24—2019《海绵城市设计图集》提出将渗透技术、储存技术、调节技术、转输技术、截污净化技术分别用于实现“渗、蓄、用、滞、排、净”的主要功能;在截污净化方面,该标准对初期雨水径流弃流量、截流的初期雨水径流排放去向、弃流装置及其设置、植草沟、初期雨水径流弃流池、渗透弃流井、绿色屋顶等均做了较为详细的规定。云南省地方标准 DB 53/T 950—2019《高原湖泊城市河道初期雨水拦截技术规范》对初期雨水径流污染控制量提出了明确的计算公式,列举了初期雨水截流技术,并给出了不同城市功能区的初期雨水径流污染浓度范围。

表 3 对比分析了国内关于初期雨水径流管控的规范要求,可以看出,国内初期雨水主要侧重于水质控制。从实现方式上看,有的是通过设置 LID 设施

表3 国内初期雨水径流管控规范对比

Table 3 Comparative analysis of initial rainwater management and control specifications in China

规范类别	规范名称	侧重点	雨水控制要求	控制实现方式
室外排水	GB 50014—2006《室外排水设计规范》	水量控制、水质控制	弃流排入污水管网	降雨初期的雨水弃流、雨水渗透设施,工程性和非工程性措施相结合
调蓄	GB 51174—2017《城镇雨水调蓄工程技术规范》	水质控制	径流污染控制和回收利用	通过调蓄初期雨水径流实现水质控制
	CECS 416—2015《城镇径流污染控制调蓄池技术规程》	水质控制	径流污染控制和回收利用	通过调蓄初期雨水径流实现水质控制
海绵城市	《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》	水质控制	降低雨水的后续处理难度	设置预处理设施、初期雨水弃流设施
	DB 11/T 1743—2020《海绵城市建设设计标准》(北京)	水质控制	防止初期雨水径流污染对植被造成的污染冲击影响	雨水调蓄排放、水质保持、海绵城市设施选择优化和系统组合
	DB 4403/T 24—2019《海绵城市设计图集》(深圳)	水质控制	按下垫面实测污染物浓度确定初期径流弃流量	绿色屋顶、植被缓冲带、初期雨水弃流设施、人工土壤渗滤
初期雨水	DB 53/T 950—2019《高原湖泊城市河道初期雨水拦截技术规范》(云南)	水质控制	实现雨水在城市区域的滞留、调蓄、渗透和净化	布置道路透水铺装、绿化(含下凹式绿地)和必要的雨水调蓄池

直接实现水质控制,但大多是通过设置初雨弃流设施或雨水调蓄池等来控制排入水体中的初期雨水水量,从而实现水质控制。此外,大部分规范要求初期雨水弃流排入污水管或者设施末端处理后排入受纳水体,缺乏对雨水回收利用的具体要求。

国内系统性、专门性对初期雨水径流污染控制提出相应具体要求的规范、技术指南、图集较少,目前仅有云南省地方标准 DB 53/T 950—2019《高原湖泊城市河道初期雨水拦截技术规范》是一部专门针对初期雨水的规范。针对其他特定区域的法规、标准、技术规程有待出台,以便更有针对性、权威性地指导各地初期雨水径流污染控制^[18]。

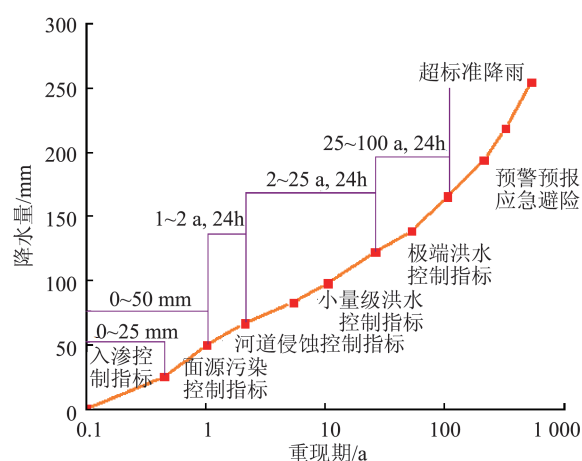


图1 美国城市雨洪管理水文控制指标体系

Fig.1 Hydrological control index system for urban storm flood management in the United States

2.2 国外初期雨水径流管控

目前发达国家的初期雨水径流管控主要集中于弃流调蓄和绿色设施源头控制^[19],其中,美国和澳大利亚形成了以绿色设施管控为主的雨洪管理体系。因此,本文分别分析美国和澳大利亚在初期雨水收集、调蓄、转输和处理过程中对于初期雨水径流管控的措施和技术手段。

2.2.1 美国雨水管理体系

美国的雨水管理经历了从非点源污染末端处理的最佳管理实践(best management practices, BMPs)到以分散式小规模措施对雨水径流进行源头控制的LID的转变,对我国构建完整雨洪管理体系以及明确初期雨水径流管控的定位具有借鉴意义。目前美国的雨洪管理将常用的水文控制指标大致分为6个量级,形成从入渗控制到预警机制的雨洪管理控制指标体系,以芝加哥市的降雨频率曲线为代表^[20],如图1所示。

图1为水文控制指标体系和降雨频率的关系,体系中入渗控制、面源污染控制和河道侵蚀控制3个指标旨在控制径流总量,侧重于水环境保护;小量级洪水控制和极端洪水控制2个指标旨在控制径流峰值,以减少城市及下游地区的洪涝灾害;预警预报应急避险指标属非工程措施范畴;河流侵蚀控制指标属于河道治理范畴。故研究初期雨水径流污染中,应着重考虑入渗控制和面源污染控制2个指标。其中,入渗控制目标在于保持开发前的天然雨水下渗状态,多采用简单的体积径流系数法计算入渗量体积。面源污染控制主要在于控制降雨产生的地表径流,多采用基于径流体积控制指标的美国城市雨水管理标准体系(stormwater sizing criteria),主要包括:①水质控制体积(water quality volume, WQV),通过控制高频率的中小降雨事件来有效控制径流污染,即控制一场降雨事件中降雨初期特定的降水量;

②地下水回补体积 (groundwater recharge volume, GRV); ③河道保护体积标准 (channel protection volume, CPV), 主要利用雨水调节设施如调节塘等末端设施进行峰值流量控制。

在初期雨水径流污染问题上, 美国主要通过控制水量的方式来实现对初期雨水的水质控制, 即以水质为主要指标构建完整的雨洪管理指标体系和水质控制体积标准。同时, 大部分雨洪管理指导性文件如《哥伦比亚特区雨水管理手册》(2020 年 1 月修订版) 以该体系为指导, 在雨水源头管控中明确了雨水滞留体积和雨水处理体积的计算方法, 并在雨水收集过程中对初期雨水的定义和处理方式, 以及弃流之后雨水的处理措施进行了详细规定。

2.2.2 澳大利亚雨水收集与回用

澳大利亚对雨水收集、回用和处理均提出了具体要求^[21]。雨水收集要求中, 水敏感城市设计 (water sensitive urban design, WSUD) 收集处理系统与快速收集雨水口都可以使用, 但部分州的雨水收集手册规定应使用快速收集雨水口; 回用水则需考虑减轻水量冲击、增补生活用水和灌溉用水的要求^[22]。澳大利亚还分别规定了雨水回用和雨水处理过程中, 污染物指标关注度的重要性排序。其中, 雨水回用主要关注公众健康, 各污染物指标的重要性从高到低依次为粪便病原体、微生物、重金属、烃类污染物、营养物质、固体沉积物、需氧量、污染物总量; 雨水处理则主要关注环境保护, 各污染物指标的重要性从高到低依次为营养物质、重金属、固体沉积物、需氧量、烃类污染物、微生物、污染物总量、粪便病原体。

同时, 澳大利亚还规定了径流产流量、流量指标、峰值流量、流量曲线和污染物负荷等方面各指标的评价分析频率, 主要用于指导各地区雨水收集回用和转输设施的设计, 以及指导雨水收集、处理或回用方式的选取、WSUD 设施与雨水快速收集转输设施的选用。澳大利亚雨水收集与回用指南中, 宏观上规定了雨水收集和回用目标、要点和各项指标^[23], 其中初期雨水水质和水量的控制并重, 比如雨水径流中污染负荷指标侧重于水质控制, 径流量分析频率等则侧重于水量控制。但该指南在雨水调蓄存储方面, 仅明确了雨水调蓄体积计算方法或雨水调蓄设施各部分组成, 在初期雨水界定及水质污染特征方面缺乏具体规定。

2.3 国内外初期雨水径流管控比较

从管控的侧重点和实施方式来看, 目前国内外初期雨水径流管控规范或标准均涉及初期雨水的水质控制。国内多通过规定水质指标或控制水量来实

现水质控制, 但针对性不强, 尤其是对初期雨水径流管控的聚焦不够, 且目前仍主要通过工程性措施来实现管控目标^[24]。国外 (以美国和澳大利亚为例) 则首先从宏观水文角度出发, 通过同步控制水质和水量来达到对初期雨水径流控制目的。因此, 国内规范标准应增加宏观水文控制方面和非工程性措施方面的相关规定内容。由于我国不同地区差异较大, 此项规定需结合实际情况, 可考虑划分不同类型区域, 并鼓励各地因地制宜出台地方标准^[25]。

从管控的目标和体系来看, 雨水径流管控的目标主要包括雨水利用、环境保护和排水防涝 3 个方面。美国雨水管理体系综合了以上 3 个方面, 系统性较强, 而国内尚未建立或出台能够较好兼顾 3 个方面的雨水管理体系、技术规范或标准。国内目前已颁布实施的雨水径流管控方面的规范和标准侧重点各有不同, 其中关于初期雨水径流管控的具体规定也有一定差异, 导致实际实施系统性不强、落地困难。这可能是由于我国以上 3 个方面的行业监管职责分别由建设、生态环境和水利行政主管部门承担, 存在“多头管理”的现象^[26]。建议针对雨水径流管控出台专项政策, 并组织不同专业的专家编写系统性强、适用性广的雨水管控技术规范^[27]。

3 初期雨水收集弃流设施设备现状

初期雨水的控制利用主要从源头控制、中端控制和末端控制 3 方面入手。在中端控制和末端控制环节, 主要有中端调蓄弃流、生态沟渠和传统管道的合理布局、末端集中式或分散式处理以及回用等。源头管控是前提, 且管控成本相对较低, 因此本文主要对初期雨水源头控制的收集弃流设备进行调研分析。

初期雨水弃流指通过一定方法或装置将存在冲刷效应、污染物浓度较高的降雨初期径流予以弃除, 以降低雨水的后续处理难度。弃流雨水应进行处理, 如排入市政污水管网 (或雨污合流管网) 由污水处理厂进行集中处理。弃流设备的运行效果不仅影响弃流雨水的后续处理, 还直接影响进入地表水环境的面源污染负荷。为此, 本文调研分析了现有初期雨水收集弃流专利设备和市售典型初期雨水收集弃流设备, 为初期雨水收集弃流设备的研发和应用提供参考。

3.1 现有初期雨水收集弃流专利设备

表 4 为根据 30 多项初期雨水弃流型雨水口专利设备^[28-58]情况, 并从雨水口类型、初雨弃流方式、侧重的初雨指标等方面进行了对比。由表 4 可知, 水力弃流型雨水口多结构简单、成本低, 但初期雨水

表 4 初期雨水弃流雨水口专利设备比较

Table 4 Comparison of patented equipment for split-flow of initial rainwater at discarding inlet

弃流类型	实现方式	初雨界定标准	安装位置	是否需要人工操控	优点	不足
水力弃流	雨污管道安装高差	雨水径流量	检查井内	人工清理杂质	结构简单	弃流精度不足;拦渣笼易堵塞
	旋流分离	初雨污染物含量	雨水口或雨污水口下方	不需要	能一定程度缓冲流量变化	弃流精度不足;旋流分离效果与进水量变化之的关系尚不明确
	初雨储蓄与溢流	雨水径流量	道路绿地旁	不需要	具有调蓄功能,能削减洪峰流量;可以与生物滞留设施结合应用	运用浮球阀控制初雨弃流,弃流精度不足;占用空间大,运用到水泵使设备更复杂
	溢流堰与控制阀	初雨径流量	独立地下收集池	需要	结构简单;可自由设置液位计的阈值	操作阀门时对初期雨水弃流标准的影响尚不明确;弃流精度不足
机械弃流	浮筒、滑轮和水塞	初雨径流量	地下检查井内	不需要	有一定弃流精度;结构简单,可自动化运行	浮筒比重无法改变,无法根据地区差异设置初雨弃流的降雨量
	浮球阀	初雨径流量	地下检查井内	不需要	结构简单,安装方便	弃流精度不足;后期雨水需要人工开启泄水阀排出
电控弃流	传感器与分流泵	初雨浊度与径流量	地下雨水收集筒体	不需要	弃流精度高;运用灵活	弃流过程需要提升泵,耗能和成本较高;结构复杂,安装难度较大
	雨量传感器与弃流翻板	初雨径流量	屋面下独立收集与弃流箱	不需要	弃流精度高;可通过多种方式界定初期雨水	适用范围较小;竖直方向雨水流量的变化对弃流精度的影响有待实验探究
	截流管和潜污泵	初雨径流量	地下截污井	人工清理杂质	占用空间较小	对初期雨水分流运用情况尚不明确;弃流精度不足;装置维护不便
	传感器和电磁阀	初雨径流量、降雨历时和水质	分流井内	不需要	弃流精度高;可靠性较高	需独立设置分流井、截流井和弃流井,成本较高;适用范围较小
	蓄水箱和控制阀	初雨径流量、降雨历时	地上独立系统	需要	能削减洪峰流量	装置结构复杂,占用空间较大;装置采用阀门较多,可靠性尚不明确
	流量计和控制阀	初雨径流量	管道上	不需要	结构简单,占用空间小	设备适用范围较小;结构简单,对进水量变化的适应性不够
	调蓄池与控制阀	初雨径流量	地下独立系统	不需要	弃流精度高,能削减洪峰流量	可靠性尚不明确;占用空间较大

界定较为单一和固定,弃流精度不足;机械弃流型雨水口在弃流自动化方面较水力型有所提高,但初雨界定仍不够灵活,弃流精度仍然不足;电控弃流型雨水口在初雨界定和弃流精度均有了进一步提升,但大部分成本较高,且适用范围较小。

3.2 市售典型初期雨水收集弃流设备

4 款市售典型初期雨水收集弃流设备对比见表 5,4 款弃流设备均可实现自动控制,无须人工操作,

但存在占用空间大、弃流精度不足、建设成本较高、初期雨水界定方式单一等缺点,且设备可靠性和运行效果缺乏统一的评价标准。

4 结 论

a. 明确初期雨水水质水量变化特征是进行初期雨水精确化、针对性控制的前提,不同城市不同功能区的初期雨水径流污染规律存在较大差异,进行

表 5 市售典型初期雨水收集弃流设备

Table 5 Typical initial rainwater collection and split-flow equipment on market

设备名称	实现方式	初雨界定标准	安装位置	优点	不足
智能柔性分流井	气动控制	初雨径流量、水质	地下分流井独立系统	不占用地面空间,智能化程度高,初雨界定条件多样	截流装置的封闭性和可靠性尚不明确;初雨界定时的标准尚不明确;土建成本高
初期雨水分离器	水位控制及浮筒的浮力作用	初雨径流量	地下独立空间	结构简单,能耗低,限流阀尺寸可改变	初雨界定精度不足;初期雨水无法自动接入污水管或回用水管;后期雨水能否通过管道传输尚不明确;封闭性尚不明确;土建成本高
一体式初期雨水弃流装置	浮筒阀的开闭	初雨径流量	地下独立系统	结构简单,能耗低,不占用地面空间	初期雨水弃流精度不足;界定初期雨水的降雨量难以改变
雨污分流系统	阀门的开闭	初雨径流量(水位)	地下独立空间	结构简单,能耗低,有两个截污设施共同工作	初雨界定精度不足;雨水管前的截流设施对污染物截流效果尚不明确;土建成本较高

不同地区初期雨水管控时,应实地调研所在地区的初期雨水水质水量特征,更好地指导实际工程。

b. 国内关于初期雨水管控相关的规范标准体系尚不健全,且多关注初雨径流污染,较少从宏观水文角度关注初期雨水并建立相应评价体系。国内规范标准的制定应结合地区差异性,分别从宏观水文控制和非工程性措施方面增加相应规定,并鼓励各地因地制宜出台相应地方标准。建议针对雨水径流管控出台专项政策,编制综合雨水利用、环境保护和排水防涝等方面的雨水管控技术规范。

c. 国内现有的初期雨水弃流设备、收集转输设备还不成体系,应从收集转输方式、设施分布及运行情况等方面,探究其在不同地区的适用性和径流控制效能。

参考文献:

- [1] District of Columbia, Department of Environment. Stormwater management guide book[EB/OL]. [2020-05-22]. http://green.dc.gov/sites/default/files/dc/sites/ddoe/publication/attachments/Introduction_0.pdf.
- [2] ROBERT G M. Analytical determination of pollutant wash-off parameters[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125(10): 989-992.
- [3] SANSALONE J J, BUCHBERGER S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water[J]. Journal of Environment Engineering, 1997, 123(2): 134-143.
- [4] 冯伟, 王建龙, 车伍. 不同地表雨水径流冲刷特性分析[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3): 817-822. (FENG Wei, WANG Jianlong, CHE Wu. Analysis on characteristics of stormwater runoff flush on different land surfaces[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(3): 817-822. (in Chinese))
- [5] 吴亚刚. 西安市文教区不同下垫面径流污染特征[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [6] LIU Yang, WANG Chunyi, YU Yang, et al. Effect of urban stormwater road runoff of different land use types on an urban river in Shenzhen, China[J]. Water, 2019, 11(12): 2545.
- [7] 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))
- [8] 苏州城区降雨径流污染特性及削减措施研究[R]. 苏州:苏州市海绵城市建设工作领导小组办公室, 2018.
- [9] WANG Shumin, HE Qiang, AI Hainan, et al. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different land uses in Chongqing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 502-510.
- [10] 赵玉坤, 梅生成. 太湖流域城市地表径流污染物浓度及污染特征分析[J]. 环境科技, 2019, 32(4): 52-59. (ZHAO Yukun, MEI Shengcheng. Analysis of urban surface runoff pollutant concentration and pollution characteristics in Taihu Lake Basin[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(4): 52-59. (in Chinese))
- [11] 高斌, 许有鹏, 陆苗, 等. 高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3657-3664. (GAO Bin, XU Youpeng, LU Miao, et al. Analysis on rainfall runoff pollution and pollution load estimation at urban communities in highly urbanized region[J]. Environmental Science, 2020, 41(8): 3657-3664. (in Chinese))
- [12] 祁妍娟, 康爱红, 卢志萍. 扬州市不同类型城市绿地径流污染特性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(35): 382-387. (QI Yanjuan, KANG Aihong, LU Zhiping. Runoff pollution characteristics of different types of urban green in Yangzhou[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(35): 382-387. (in Chinese))
- [13] Stormwater management manual for Western Washington[R]. Washington D. C.: Washington Department of Environment, 2014.
- [14] KIM Geonha, YUR Joonghyun, KIM Jeongkon. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon City, Korea[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85(1): 9-16.
- [15] 张湖川. 海绵城市建设初期雨水径流污染特征及削减率研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2019.
- [16] ABDULLAH A M, SHAHRIAR S, MD N. Review on uncertainty of the first-flush phenomenon in diffuse pollution control[J]. Applied Water Science, 2020, 10: 94-105.
- [17] 车伍, 桑斌, 刘宇, 等. 城市雨水控制利用标准体系及问题分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 22-28. (CHE Wu, SANG Bin, LIU Yu, et al. Analysis on standards for urban stormwater management and some problems[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 22-28. (in Chinese))
- [18] ZENG Jiajun, HUANG Guoru, LUO Haiwan, et al. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community[J]. Scientific Reports, 2019, 9(4): 1-10.
- [19] PISTOCCHI A. A preliminary pan-European assessment of pollution loads from urban runoff[J]. Environmental Research, 2020, 182(3): 1-10.
- [20] 王虹, 丁留谦, 程晓陶, 等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报, 2015, 46(11): 1261-1271. (WANG Hong, DING Liujian,

- CHENG Xiaotao, et al. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11): 1261-1271. (in Chinese)
- [21] Humes. Stormwater harvesting and reuse[EB/OL]. [2020-05-22]. <http://www.ephc.gov.au/taxonomy/term/39>.
- [22] HOYERJ Acqueline, DICKHAUT Wolfgang, KRONAWITTER Lukas. Water sensitive urban design [M]. Berlin: JOVIS Verlag, 2011.
- [23] 胡思前. 澳大利亚雨水回收与利用及对我国水生态修复与保护的借鉴意义[J]. 绿色科技, 2016(2): 4. (HU Siqian. Rainwater recovery and utilization in Australia and its significance for water ecological restoration and protection in China[J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(2): 4. (in Chinese))
- [24] 高成,顾春旭. 考虑初期雨水污染的平原河网地区活水效果分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 69-75. (GAO Cheng, GU Chunxu. Analysis of live water effect in plain river network area considering initial rainwater pollution [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 69-75. (in Chinese))
- [25] 黄国如,曾家俊,吴海春,等. 广州市典型社区单元面源污染初期冲刷效应[J]. 水资源保护, 2018, 34(1): 8-15. (HUANG Guoru, ZENG Jiajun, WU Haichun, et al. First flush effect of non-point source pollution in Guangzhou typical community unit[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(1): 8-15. (in Chinese))
- [26] 张翔,廖辰暘,韦芳良,等. 城市水系统关联模型研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 14-19. (ZHANG Xiang, LIAO Chenyang, WEI Fangliang, et al. Research on the nexus model of urban water system[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 14-19. (in Chinese))
- [27] 李俊奇,周金成,杨正,等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 124-131. (LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 124-131. (in Chinese))
- [28] 韩少鹏. 海绵城市市政雨水处理管路设计方法: CN108915062B [P]. 2020-08-11.
- [29] 许可. 一种初期雨水径流处理装置: CN210012688U [P]. 2020-02-04.
- [30] 王宏杰,董文艺,王茜. 一种城市道路雨水收集净化利用系统: CN209907525U [P]. 2020-01-07.
- [31] 邹玉莹. 一种城市地下管廊用雨水收集装置: CN209873930U [P]. 2019-12-31.
- [32] 李茹莹,王云浩,季民. 一种初期雨水高效旋流分离处理装置: CN209696468U [P]. 2019-11-29.
- [33] 贺卫宁,邓征宇,蓝翔,等. 初期雨水分级生物过滤滞留一体化装置: CN209226684U [P]. 2019-08-09.
- [34] 祝瑞麟,古励,陈永栋,等. 一种初期雨水智能分流系统: CN110093968A [P]. 2019-08-06.
- [35] 李玫,衡芮,余柄志. 一种初期雨水弃流装置: CN109555205A [P]. 2019-04-02.
- [36] 黄本胜,谭超,邱静,等. 一种初期雨水收集系统: CN108487369B [P]. 2019-03-29.
- [37] 李茹莹,王云浩,季民. 一种初期雨水高效旋流分离处理装置及其方法: CN109351050A [P]. 2019-02-19.
- [38] 周超,李习洪. 道路雨水气动分流处理系统及其控制方法: CN109339186A [P]. 2019-02-15.
- [39] 叶文华,陈亚松,刘荣华,等. 一种初期雨水分流处理系统: CN208430010U [P]. 2019-01-25.
- [40] 罗凌妍,丁道红. 初期雨水弃流装置: CN208379736U [P]. 2019-01-15.
- [41] 殷富新. 一种市政城市污水处理系统及其污水处理方法: CN110725383B [P]. 2020-11-24.
- [42] 王志鹏,张野,张高,等. 一种改进的道路排水系统: CN211395909U [P]. 2020-09-01.
- [43] 周超. 一种带有分流井的分流系统: CN210032023U [P]. 2020-02-07.
- [44] 张延年,郑君刚,汪青杰. 一种建筑物雨水收集与生态利用系统: CN209975895U [P]. 2020-01-21.
- [45] 易有海,苏媿. 一种海绵城市雨水回收系统: CN209873936U [P]. 2019-12-31.
- [46] 刘景文. 一种海绵城市建设用道路雨水回收系统: CN209873997U [P]. 2019-12-31.
- [47] 覃嘉怡. 一种具有初步过滤功能的雨水自动收集装置: CN209837152U [P]. 2019-12-24.
- [48] 李玫,甘磊,吴秀莉. 一种电控式初期雨水自动弃流装置: CN109594637A [P]. 2019-04-09.
- [49] 陈景玉,曹立坤. 一种初期雨水收集装置: CN208267068U [P]. 2018-12-21.
- [50] 应园艺. 一种市政雨水收集回收利用系统: CN108993022A [P]. 2018-12-14.
- [51] 庞会涛. 一种一体化截污井: CN209989914U [P]. 2020-01-24.
- [52] 杨涛,郑鑫,张琳雅,等. 一种自动曝气式雨水净水系统: CN209974524U [P]. 2020-01-21.
- [53] 徐雪松,彭海波. 一种雨水收集器: CN209907480U [P]. 2020-01-07.
- [54] 徐军,鲁朋. 智能化雨水收集处理设备: CN209873934U [P]. 2019-12-31.
- [55] 刘琦,买超,刘晓文,等. 一种智能初期雨水弃流装置: CN209585255U [P]. 2019-11-05.
- [56] 周奕. 基于雨污分流市政道路初期雨水收集装置: CN209227713U [P]. 2019-08-09.
- [57] 郑志宏,段晓涵. 一种无动力初期雨水分离收集装置: CN208486314U [P]. 2019-02-12.
- [58] 杨开. 自适应性初期雨水截流导流装置: CN208280262U [P]. 2018-12-25.

(收稿日期:2021-02-24 编辑:王芳)