

王金鑫, 姜秀艳, 谢毅. 基于芝加哥雨型的初期雨水调蓄工程设计案例[J]. 净水技术, 2025, 44(4): 159–165.

WANG J X, JIANG X Y, XIE Y. Project design case of initial rainwater storage based on the Chicago hyetograph method[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(4): 159–165.

基于芝加哥雨型的初期雨水调蓄工程设计案例

王金鑫^{1,*}, 姜秀艳², 谢毅¹

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430010; 2. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东青岛 266000)

摘要 【目的】为了解决河道的初期雨水污染问题,【方法】以即墨区墨水河下游段初期雨水调蓄工程为研究对象,从初期雨水准确分离以及调蓄处理切入,选择了合适的初期雨水收集和处理模式,采用芝加哥雨型进行了设计暴雨时程分配雨型的分析,系统地进行了初始雨水截留量和截留流量的研究。文章介绍了初期雨水收集处理系统的工艺流程、初期雨水分离装置设计、调蓄池设计及运行模式状态等关键技术要点,以为类似工程提供可借鉴的经验和技术支持。【结果】项目实施后,初期雨水截留效果明显,收集到的初期雨水化学需氧量质量浓度达到 300~800 mg/L,总氮质量浓度达到 2~8 mg/L,悬浮固体质量浓度达到 200~500 mg/L。【结论】对墨水河水质由 V 类提高至 IV 类起到了重要作用。

关键词 初期雨水 芝加哥雨型 初期雨水分离装置 调蓄池 系统控制

中图分类号: TU992 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-0177(2025)04-0159-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.04.019

Project Design Case of Initial Rainwater Storage Based on the Chicago Hyetograph Method

WANG Jinxin^{1,*}, JIANG Xiuyan², XIE Yi¹

(1. Central & South China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010;

2. China Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000)

Abstract [Objective] It is in order to solve the non-point source pollution caused by initial rainwater to the rivers. [Methods] This paper takes the initial rainwater regulation and storage project of Moshui River in Jimo District as the research object, selected the appropriate collection and treatment mode starting from the initial rainwater's accurate separation and storage, analyzed the distribution rain pattern of the design storm course with the Chicago rain pattern, and systematically studied the initial rainwater's interception quantity and flow. The key technical points of the initial rainwater collection and treatment system, such as the process flow, initial rainwater separation device design, storage tank design and operation mode state, were introduced in order to provide reference experience and technical support for similar projects. [Results] The effect on the initial rainwater interception is obvious after the implementation of the project, chemical oxygen demand mass concentration reaches 300~800 mg/L, total nitrogen mass concentration reaches 2~8 mg/L, suspended solid mass concentration reaches 200~500 mg/L. [Conclusion] The project plays an important role in improving the water quality of the Moshui River from class V to class IV.

Keywords initial rainwater Chicago hyetograph method initial rainwater separation device rainwater storage system control

初期雨水主要是指降雨初期一定降雨深度或一定降雨时间产生的雨水径流,因在降落过程中溶解了气体污染物,冲刷了地面携带的有机物、悬浮固体等一系列物质,导致其污染物含量通常超过了普通

城市污水,成为城市水体的主要面污染源^[1-2]。据相关数据分析,北京、上海、天津、青岛等几个大、中城市的初期雨水污染污染物浓度甚至远高于城市污水浓度^[3]。在城市污水得到全面截污的情况下,初期

[收稿日期] 2023-01-31

[通信作者] 王金鑫(1988—),男,硕士研究生,高级工程师,主要从事给排水设计工作,E-mail:771565459@qq.com。

雨水的污染问题逐渐突显出来,对城市的水环境造成越来越严重的不利影响。为了保证和提升流域截污的成果,彻底根治河道污染,必须解决初期雨水的污染问题。我国上海、深圳等地的实践证明,将初期雨水截流、调蓄并输送至污水处理厂处理是减少初期雨水污染河道的有效方式,兴建初雨调蓄系统正逐渐成为面源污染控制的重要工程措施之一^[4-5]。鉴于此,结合青岛市即墨区降雨类型与河道特点,以墨水河下游段初雨调蓄系统的设计为例,介绍初期雨水收集处理系统的关键技术要点,以期类似工程提供可借鉴的经验和技术支持。

1 工程概况

墨水河为城市河道,其下游段沿岸现状多为建成区,车流、人流密度均较大,地面硬质铺装较多,径流系数大,排入墨水河的排出口多且分散,初期雨水污染程度较高。研究针对沿河雨水管的数量、流域范围进行分析,提出切实可行的初期雨水收集方案和工程措施。如图1所示,本河段工程范围内,雨水入河排放管道共26处,通过对墨水河两岸支流、城市建设、接入雨水管线及初期雨水可实施情况等方面进行分析,综合考虑将墨水河下游初期雨水收集系统分为6个子系统。

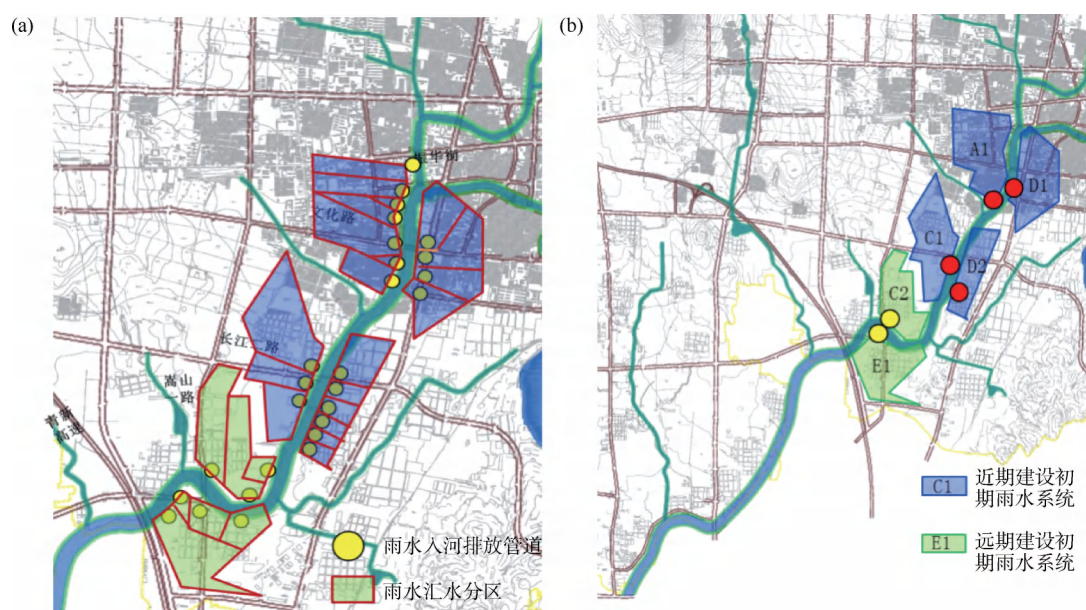


图1 墨水河下游雨水入河排放管道与初雨系统布置

Fig. 1 Layout of Rainwater Discharge Pipes and Initial Rainwater System in Lower Reaches of Moshui River

2 初期雨水收集方法选择

选择合适的初期雨水收集方案能够高效、低耗地实现工程目的,目前国内主要有3种收集方法。

(1)区域集中式收集系统:将一定范围内的入河雨水管道(或混流管道)内的初期雨水,通过初期雨水收集管,统一输送至一个较集中的区域初期雨水收集池。该方法需要新建较大的初期雨水收集管道,主要适用于片区较小,雨水管道集中的情况。其流程如图2所示。

(2)分散式收集系统:在每一个入河雨水管道(或混流管道)处设置水流切换闸门和初期雨水收集池,在降雨初期打开初期雨水收集池闸门同时关闭入河闸门,初期雨水进入收集池,等收集池水位达

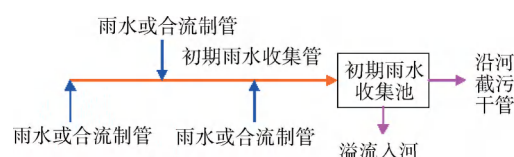


图2 区域集中收集系统流程

Fig. 2 Process Flow of Region-Centralized Collection System

到规定液位,关闭初期雨水收集池闸门同时打开入河闸门,清洁雨水排入河道。该方法需新建较多的初期雨水收集池,适用于有较多分散式小块建设用地的情况,其流程如图3所示。

(3)集中分散相结合收集系统:在每一个入河雨水管道(或混流管道)处设置初期雨水分离装置,在收集系统的末端设置初期雨水收集池,同时设置

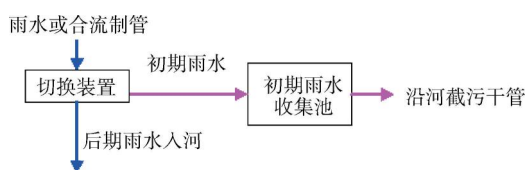


图3 分散收集系统流程

Fig. 3 Flow of Decentralized Collection System

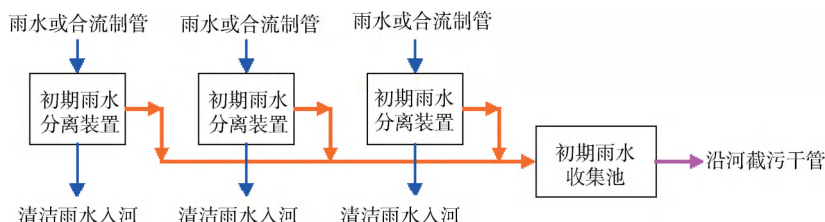


图4 分散集中相结合收集系统流程

Fig. 4 Flow of Decentralized and Centralized Collection System in Combination

中分散相结合收集系统作为本工程的工艺系统。

3 初期雨水截流量分析及设施计算

3.1 芝加哥降雨情景模拟

芝加哥雨型是由 Keifer 和 Chu 于 1957 年提出的一种非均匀的设计雨型,其作为典型雨型,能够有效反映区域降雨特征的降雨过程线,对于准确收集初期雨水十分重要。本工程采用芝加哥雨型设计方法,进行暴雨时程分配雨型的分析。

据国内外大量统计资料^[6]表明,雨峰系数(r)一般为 0.3~0.5。通过对青岛市即墨区近 30 年的降雨资料统计分析,根据每场降雨峰值出现的时刻 t 与降雨总时长 T 的比值确定雨峰位置系数 r ,即式(1)。青岛市即墨区暴雨强度公式如式(2), r 决定了降雨雨峰出现的时间,从而决定了降雨类型。相同历时的降雨样本的雨峰位置系数进行算术平均,再将各历时的雨峰位置系数按照各历时长度进行加权平均,求出综合雨峰位置系数为 $r=0.4$ 。

$$r = \frac{t}{T} \quad (1)$$

$$q = \frac{4\,336.99 + 3\,603.86 \lg P}{(t + 20.45)^{0.876}} \quad (2)$$

其中: q ——设计暴雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$, $1 \text{ hm}^2 = 1 \times 10^4 \text{ m}^2$;
 P ——设计重现期,a;
 t ——设计降雨历时,min。

本工程设计重现期 3 年,设计降雨历时取

初期雨水收集管,将每个初期雨水分离装置分离出来的初期雨水输送至初期雨水收集池,而经过分选后的清洁雨水就近排河。其系统流程如图 4 所示。

综合分析,集中分散相结合收集系统技术系统设置合理,实施难度适中,维护管理方便,较符合本工程节约投资、简约管理的实际情况。因此,选择集

60 min,基于暴雨强度公式,应用芝加哥降雨过程线模型生成典型降雨过程曲线,并求出降雨历时各时段(间隔 1 min)的平均降雨量和累积降雨量,如图 5、图 6 所示。在历时 60 min 的降雨过程中,降雨强度的分布呈单峰型,雨强先逐渐增大,在 24 min 达到峰值,雨峰过后降雨雨强逐渐减小,瞬时雨强峰值为 2.58 mm/min。

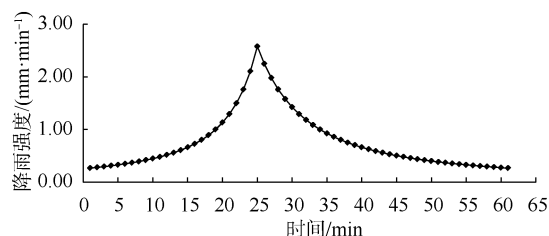


图5 降雨强度随时间变化

Fig. 5 Rainfall Intensity with Time

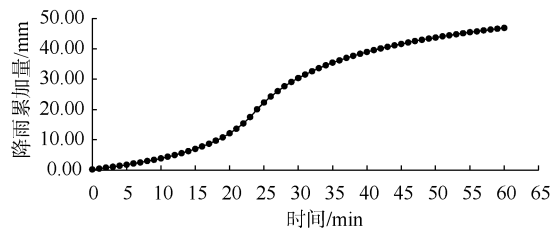


图6 降雨累积量随时间变化

Fig. 6 Rainfall Accumulation Varies with Time

3.2 初期雨水管管径确定

目前,初期雨水截留量控制主要有 2 种方式:一是按照降雨时间;二是按照降雨量。相对于降雨时间,降雨量更容易定量计算,更能被顺利应用于工程实践。我国对于初期雨水截留量做了较多研究,杨

丰恺等^[7]通过研究武汉市城区典型片区得出结论:武汉市最佳控制初雨径流深度为 6.8 mm,初雨径流中污染物占整场降雨冲刷污染物总量比例的均值为 56.8%。陈民东等^[8]得出邯郸市路面初期径流为产流后 6 mm 降雨,携带了化学需氧量(COD_{Cr})总量的 77.9%。《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)中规定,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可取 4~8 mm。即墨区为典型的北方较为发达的县区,地势有一定坡度,城区下垫面硬化比例较大,形成径流快,初期雨水污染物冲刷效应明显,初步拟选取 6 mm 降雨量作为截流量进行研究。如何将初雨截流量转化为最大截留流量是工程实现的关键,其决定了初期雨水分离装置及初期雨水管道的尺寸。本工程结合芝加哥雨型确定的降雨过程线,推求出当累积降雨量为 6 mm 时对应的降雨雨强为 0.69 mm/min,而雨峰强

度为 2.58 mm/min,两者的比值为 0.27,该值将用作修正系数来推求初雨雨水管管径及分离装置的计算流量。

以 A₁ 调蓄系统初始管段 Y₁~Y₂ 段为例,其初雨流量 Q_{Y1~Y2} 按照式(3)计算,相关计算结果如式(4)和表 1 所示。以此类推,可计算出各个管段的初雨流量及管径。

$$Q = 0.27(\Psi F q_1) \quad (3)$$

其中: Ψ ——径流系数。

F ——汇水面积, hm²;

q_1 ——管段 Y₁~Y₂ 的设计暴雨强度,即降雨 6 mm 时对应的暴雨强度, L/(s·hm)。

$$Q_{Y1 \sim Y2} = 0.27 \Psi F q_1 = 0.27 \times 0.65 \times 59.32 \times 236.03 = 2\,457.21 \text{ (L/s)} \quad (4)$$

表 1 初期雨水工程计算

Tab. 1 Calculation of Initial Rainwater Project

管段编号	F/hm ²		径流系数	q/ [L·(s·hm) ⁻¹]	修正系数	设计流量/ (L·s ⁻¹)	过流能力/ (L·s ⁻¹)	管径/m
	增加	累计						
Y ₁ ~Y ₂	0	59.32	0.65	236.03	0.27	2 457.21	2 643.59	1.50

3.3 初雨调蓄池容积计算

结合《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017),初期雨水调蓄池的有效容积 V 按式(5)计算。

$$V = 10 \times D \times (F \Psi \beta) \quad (5)$$

其中:V——收集池有效容积, m³;

D——调蓄量, mm, 取 6 mm;

F——汇水面积, ha;

Ψ ——径流系数, 取 0.65;

β ——安全系数, 取 1.2。

经计算,各子系统调蓄池设计有效容积、管道规格等参数如表 2 所示。

4 初雨收集系统组成及设计

4.1 初雨分离装置设计

目前,国内应用的初期雨水分离装置控制方式可分为自控型、电控型。自控型一般结构简单,但分离效果无法控制,精确度差;电控型分离装置弃流控制更准确,但结构复杂、电器设备容易损坏^[9]。为做到精确分离初期雨水,本工程选用电控型分离装置,但设计结构相对简单,选材耐用不易损坏,其工

艺原理流程如图 7 所示。

表 2 墨水河下游初期雨水系统方案设计参数

Tab. 2 Design Parameters of Initial Rainwater System in Lower Reaches of Moshui River

编号	服务面积/hm ²	初雨分离装置数量	管道规格	初期雨水收集池容积/m ³
A1	142	6	DN1500~DN1800	6 000
C1	118	2	DN1500~DN1650	6 000
D1	130	3	DN1200~DN1500	6 000
D2	82	5	DN1200~DN1500	4 000
C2	82	2	DN1200~DN1350	4 000
E1	116	6	DN1200~DN1500	6 000

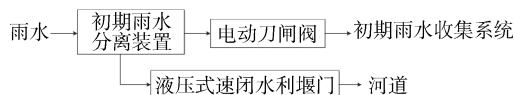
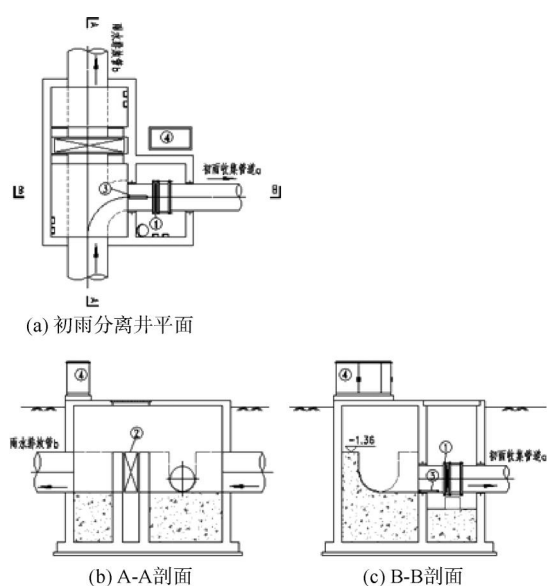


图 7 初期雨水分离装置工作原理工艺流程

Fig. 7 Process Flow of the Principle of Initial Rainwater Separation Device

初期雨水分离装置主要由下开式液压速闭堰门、电动刀闸阀、非满流式流量计、控制系统、分离管道和混凝土分离井组成,如图 8 所示,其工作原理:(1)下开式液压速闭堰门、电动刀闸阀和控制系统相结合,快速启闭下开式堰门和刀闸阀,实现



注: ①—电动刀闸阀; ②—液压式下开式速闭堰门; ③—非满流式流量计; ④—电控系统; a—初雨收集管道; b—雨水排放管道。

图 8 初期雨水分离装置

Fig. 8 Initial Rainwater Separation Device

雨水快速准确流向切换,解决了传统分离井的被动接受、无法控制的问题,同时没有固定堰影响排涝功能的问题; (2) 非满流式流量计精确计量初雨累计流量,

解决初期污染雨水的准确分离和计量问题^[10]。

4.2 调蓄池设计

调蓄池集约化设计,采用全地下式结构,前端设置格栅间和沉砂池,拦漂浮物和悬浮物,辅助用房与调蓄池合建,池体顶部绿化为河道驳岸景观节点,工艺流程如图 9 所示。调蓄池主要包含进水闸门、格栅、沉砂池、调蓄池主体、排放泵、液位计、自控系统和真空反冲洗系统,如图 10 所示,其工作原理: (1) 通过水力格栅和沉砂池,去除初期雨水中的大颗粒漂浮物和悬浮物,避免调蓄池的淤积; (2) 调蓄池的排放泵定时定量排放初期雨水至污水处理厂处理,避免大量初期雨水短时间内进入污水处理厂,对污水处理厂造成的冲击。 (3) 调蓄池冲洗方式采用真空反冲洗,降雨时储存水量作为反冲洗水源,不需要额外水源; (4) 设置自动控制系统,实现调蓄池与初期雨水分离装置联动,做到精确控制^[11]。

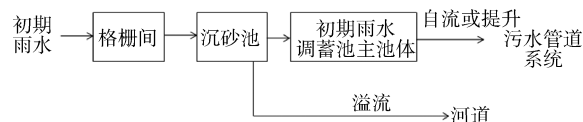
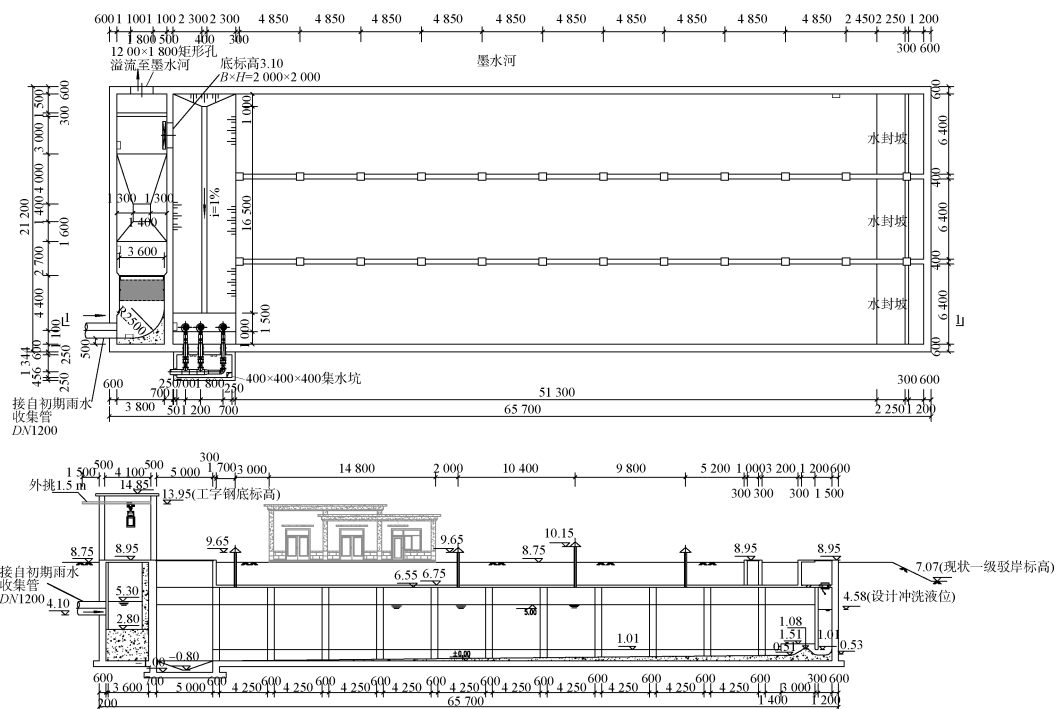


图 9 初期雨水调蓄池工艺流程

Fig. 9 Process Flow of Initial Rainwater Storage



注: 图中单位为 mm。

图 10 初期雨水收集池平面、剖面

Fig. 10 Plane and Section of the Initial Rainwater Collection Tank

5 系统运行模式

5.1 初期雨水分离装置运行模式

初期雨水分离装置由调蓄池综合控制系统统一控制,采用以下2种模式状态运行。

模式状态一:未降雨时,电动刀闸阀为开启状态,下开式液压速闭堰门为关闭状态,非满流式流量计为归零状态。

模式状态二:降雨初始阶段,装置按模式一运行,雨水通过初雨收集管道a,进入雨水收集系统,非满流式流量计接收雨水流量信号开始计量,待累计流量达到初期雨水收集标准时,将信号反馈给电控系统,电控系统作用于电动刀闸阀,将其关闭,同时开启下开式液压速闭堰门,雨水通过雨水排放管道b排入水体,初期雨水分离完毕。

降雨结束后,初期雨水分离装置恢复至模式一状态。

5.2 初期雨水收集系统运行模式

初期雨水收集系统通过以下3种模式状态的控制切换,实现整体自动化运行。

模式状态一:未降雨时,初期雨水分离装置处于开启状态,调蓄池进水闸门处于关闭状态,排放泵真空反冲洗系统处于关闭状态。

模式状态二:降雨初始阶段,初期雨水分离装置处于开启状态,调蓄池进水闸门开启,初期雨水通过初期雨水收集管道进入调蓄池,液位计开始计量,真空反冲洗系统开始储存反冲洗雨水(储存完成后关闭),待调蓄池达到满容水位或初期雨水分离装置

达到设定累积流量后,分离装置关闭,调蓄池进水闸门关闭。

模式状态三:降雨结束后,初期雨水分离装置恢复开启状态,其流量计累积流量数清零,调蓄池进水闸门保持关闭状态,排放泵开启,开始排放调蓄池内初期雨水进入污水系统,待排放完毕后,排放泵关闭。

6 运行效果

2021年A₁、D₂2套初期雨水截留系统投入使用,2年间已发挥较好的应用效果。检测数据显示,初期雨水分离装置处测量的雨水COD_{Cr}在降雨3~4mm时浓度达到最高,降雨6~8mm后下降明显,降至100mg/L以下,如图11所示,上述数据表明初期雨水截流量初步拟订值6mm较为合理。调蓄池收集到的初期雨水COD_{Cr}在300~800mg/L,总氮(TN)质量浓度为2~8mg/L,悬浮固体(SS)质量浓度为200~500mg/L,表明初雨系统污染控制效应明显(图11、图12)。

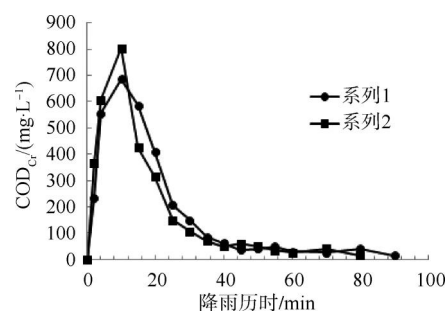


图 11 A₁-1 分离装置雨水浓度统计

Fig. 11 Concentration Statistics of the Separation Device A₁-1

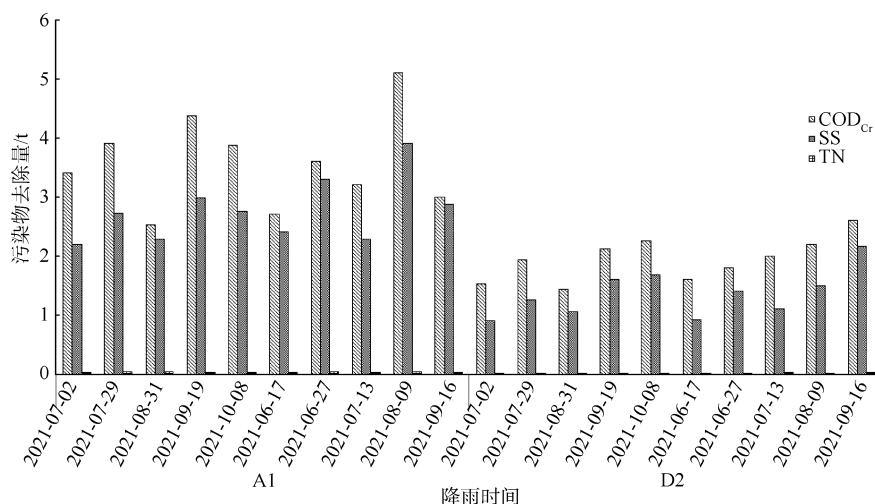


图 12 A₁、D₂ 初期雨水收集系统污染物削减量

Fig. 12 Pollutants Reduction in the Initial Rainwater System of A₁ and D₂

如图 12 所示,2021 年—2022 年,2 套系统共计减少墨水河污染物排放量 COD_{Cr} 、TN、SS 分别为 55.164、0.485、41.272 t,为墨水河河道水质改善起到了较大的作用。

7 结语

初期雨水收集处理是解决城市面源污染的重要途径,墨水河下游段初雨系统采用了有效的“分流—调蓄—处理”方案,针对分离、收集、处理等方面,提出了行之有效的手段。通过集中分散相结合的收集方式,采用新型初期雨水分离装置,实现了初期雨水准确收集;通过控制系统将调蓄池与分离装置联动,实现了工程上的精确控制;通过设置真空反冲洗系统,实现调蓄池的定期冲洗,解决了传统初雨调蓄池需要额外水源的问题。新型初期雨水收集系统的构建,为国内河道综合整治工程中初期雨水的收集处理提供了较为典型的治理方案。

参考文献

- [1] 刘楠楠,迟杰,褚一威,等. 高效旋流分离—生态砾间接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.
- LIU N N, CHI J, CHU Y W, et al. Study on application of efficient hydrocyclone separation combined with ecological gravel contact oxidation device to treat initial rainwater runoff[J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1043-1049.
- [2] 齐明. 城市初期雨水调蓄池布局优化和功能强化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- QI M. Study on optimal layout and function enhancement of storage tanks for initial rainwater[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [3] 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.
- [4] 吕炎,黄更. 北方某城市雨水调蓄池设计案例分析[J]. 净

水技术, 2022, 41(s1): 300-304.

LÜ Y, HUANG G. Case study on the design of rainwater detention tank in a northern city[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 300-304.

- [5] 程江. 苏州河储存式雨水调蓄池水环境质量改善效应分析[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 104-108.

CHENG J. Analysis of water quality improvement in Suzhou Creek by stormwater detention tanks[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 104-108.

- [6] 陈滨,邵丹娜. 镇江城市暴雨强度公式修订分析方法探讨[J]. 中国给水排水, 2014, 30(15): 147-149, 154.

CHEN B, SHAO D N. Discussion on method of amendment and analysis on urban storm intensity formula[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(15): 147-149, 154.

- [7] 杨丰恺,姜应和,许天会. 基于 SWMM 的武汉市城区雨水管网初雨特性分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 22-25.

YANG F K, JIANG Y H, XU T H. Analysis of characteristics of initial rainfall in Wuhan urban analysis of characteristics of initial rainfall in Wuhan urban area rainwater pipe network based on SWMM[J]. Water Resources and Power 2019, 37(8): 22-25.

- [8] 陈民东,张胜,李思敏. 邯郸市雨水初期径流控制量的确定[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(4): 435-438.

CHEN M D, ZHANG S, LI S M. The determination on controlled quantity of rainwater initial runoff in Handan City[J]. Resource Environment & Engineering, 2007, 21(4): 435-438.

- [9] 侯文硕,周国华,葛铜岗,等. 道路初期雨水界定及弃流装置研究进展[J]. 给水排水, 2022, 48(2): 133-142.

HOU W S, ZHOU G H, GE T G, et al. Definition of initial road rainwater and disposal device[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(2): 133-142.

- [10] 谢毅,王金鑫,王雄,等. 一种初期污染雨水分离井系统: 202020869171.9[P]. 2020-05-21.

XIE Y, WANG J X, WANG X, et al. The utility model relates to an initial polluted rainwater separation well system: 202020869171.9[P]. 2020-05-21.

- [11] 谢毅,王金鑫,王雄,等. 初期雨水截留系统: 202021262828.1[P]. 2021-05-25.

XIE Y, WANG J X, WANG X, et al. Initial rainwater interception system: 202021262828.1[P]. 2021-05-25.

(上接第 118 页)

- LUO X W, ZHANG Y M, JIANG H D. Exploration on evaluation index system of all factor operation of intelligent WWTP[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(s1): 138-143.
- [19] 刘丽娅,刘丹丹,莫华荣,等. 城镇污水生物脱氮除磷研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 49-59.
- LIU L Y, LIU D D, MO H R, et al. Research progress of biological nitrogen and phosphorus removal in municipal

wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(3): 49-59.

- [20] 吴娇. 上海某污水处理厂碳排放分析及减碳路径探索[J]. 净水技术, 2023, 42(s1): 135-140.

WU J. Carbon emission analysis and carbon reduction exploration of a WWTP in Shanghai[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(s1): 135-140.