

城市雨水管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 13. 019

基于区域特征的水质调蓄池运行规则优化

熊 园¹, 黄翔峰¹, 魏忠庆^{1,2}, 陆丽君¹

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘 要: 水质调蓄池削减城市径流污染的作用已被广泛关注,其设计及运行规则是优化控制效果的关键。为此,采用InfoWorks ICM排水模型建立区域概化水文模型、模拟径流污染特征,并重点设计了调蓄池运行规则。研究发现,采用时间、径流污染物浓度两种调蓄规则均优于传统遇雨则开的方式。基于时间运行规则时,单位池容污染负荷控制率呈现先上升再下降的趋势,最优参数是降雨后20 min开启调蓄;基于污染物浓度运行规则,调蓄池体积为5 800 m³时采用COD浓度控制,调蓄池体积为5 000 m³时采用TP浓度控制,均在池容未100%利用时达到了较好的污染物控制效果。最后,基于污染物变化特征和区域用地限制提出了适宜的调蓄池运行规则,可为调蓄池运行规则设计提供新思路,并为水质调蓄池智能运行提供技术支撑。

关键词: 径流污染; 水质调蓄池; 运行规则; 总量削减率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0126-07

Optimization of Water Quality Storage Tank Operation Rules Based on Regional Characteristics

XIONG Yuan¹, HUANG Xiang-feng¹, WEI Zhong-qing^{1,2}, LU Li-jun¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fuzhou Urban Construction Design and Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China)

Abstract: The effect of water quality storage tank on urban runoff pollution control has been widely concerned, and its design and operation rules are the key to optimize the control performance. In this paper, InfoWorks ICM drainage model was used to establish a regional generalized hydrological model, simulate the characteristics of runoff pollution, and design the operation rules of the storage tank. The two regulation rules based on time and runoff pollutants concentration were superior to the traditional opening mode in case of rainfall. When the operation rule based on time was employed, the pollution load control rate per unit tank volume increased first and then decreased, and the optimal start-up time was 20 min after rainfall. Based on the pollutants concentration operation rule, COD concentration control was adopted when the storage tank volume was 5 800 m³, and TP concentration control was employed when the storage tank volume was 5 000 m³, both of which achieved good pollutants control performance when the tank volume was not 100% utilized. The appropriate operation rules of the storage tank were proposed

基金项目: 上海市级科技重大专项(2021SHZDZX0100)

通信作者: 陆丽君 E-mail: lulijun@tongji.edu.cn

based on the characteristics of pollutants change and the restriction of regional land use, which provided a new idea for the design of the operation rules and technical support for the intelligent operation of the water quality storage tank.

Key words: runoff pollution; water quality storage tank; operating rule; total reduction rate

调蓄池可分为以调节径流量为主要目标的水量调蓄池和以控制径流污染物为主要目标的水质调蓄池两类。水质调蓄池兼具水量削减和水质控制两大功能,近年来已经成为城市径流污染的主要控制措施之一,其可以有效削弱雨水给城市排水管网及接纳水体造成的压力^[1-2]。

调蓄池的运行规则是影响其发挥控制效果的关键因素之一^[3-5]。有研究表明,以累积净雨量或进水节点水位变化速率为调蓄指标的水量调蓄效果均优于传统遇雨则开的运行方式^[6]。不同运行规则对径流水质的改善也有影响。王天舒^[7]在调蓄池进水节点水位上升速率达到 0.5 cm/min 时进行开闸调蓄,实测降雨径流污染负荷削减率可以达到 30% 以上;钟晔等^[8]发现基于滞留时长和水位上升速率设计的智能实时控制运行规则可以使调蓄池的 SS 削减率从 51.1% 提升至 58.6%。这些规则虽有一定效果,但其运行主要基于水位变化,未考虑区域径流污染负荷特征。在降雨特征变化较大时,水位运行规则不确定性也较大,调蓄池水质控制目标难以实现。因此,在常规径流量控制的基础上结合径流污染负荷变化特征制定适宜的调蓄池运行规则,对提高径流污染负荷削减率、避免调蓄池容积浪费尤为重要。

笔者以福州市某建成区域作为研究对象,利用 InfoWorks ICM 综合流域模型分析不同降雨条件下区域的径流污染特征,以及污染物在末端排口的累积特性,并利用模型中的 RTC(实时控制)模块评估区域末端调蓄池不同运行规则下的径流污染控制效果,以期调蓄池控制径流污染提供新方向。

1 研究区域概况及模型构建

1.1 研究区域概况

研究区域位于福州市某大型居住区,该区域属于新建社区,雨污分流系统相对完善,但仍存在雨污混流情况,旱天时末端梅亭渠中仍有污水流出。

1.2 暴雨强度公式确定

本研究的设计降雨事件采用福州当地的暴雨

强度公式,如式(1)所示。设计降雨历时为 120 min、模拟时长为 4 h。

$$i = \frac{14.715(1 + 0.633 \lg P)}{(t + 11.951)^{0.724}} \quad (1)$$

式中: i 为降雨强度,mm/min; P 为设计重现期, a ; t 为降雨历时,min。

1.3 区域排水模型建立

经前期实地调研和资料查阅,获取建模基础数据,建立研究区域的概化水文模型,如图 1 所示。该区域模型由 301 个子汇水区、313 根管道、313 个检查井组成,总集水面积为 215 hm²,其中建成区域为 89 hm²,区域末端有一个排口将雨水排入闽江。



图 1 研究区域的概化水文模型

Fig.1 Generalized hydrological model of study area

根据区域实际用地情况,将用地分为建筑用地、绿化用地、居住/公共用地、交通用地、体育用地、停车场用地、山体用地和城市水体 8 种类型,下垫面分为屋面、路面、绿地、山体 4 种类型。对于产流模型,路面及屋面采用固定径流模型,绿地及山体采用 Horton 渗透模型;对于汇流模型,所有下垫面均采用 SWMM 模型。经由实际降雨事件校核,建立了精度较高的水力模型,综合径流系数为 0.61,并在此基础上,采用参数自动率定方法,对水质模型进行了率定^[9]。

2 研究方案设计

2.1 污染控制评价指标确立

本研究的水质调蓄池主要用于控制降雨径流污染,考虑到未被调蓄池截留的降雨径流大部分会进入受纳水体,而被截留的降雨径流后续将排入城市污水处理厂进行处理,结合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)以及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002),本研究确定SS、COD、TN和TP这4种污染物指标的削减率作为调蓄池水质控制效果的评价指标,为后续的方案设计评估提供依据。

2.2 调蓄池尺寸设计

研究区域为新建区域,雨污分流管网建设相对完善,根据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)设计调蓄池规模,公式如下:

$$V=10D \cdot F \cdot \psi \cdot \beta \quad (2)$$

式中: V 为调蓄池有效容积, m^3 ; D 为调蓄量,按降雨量计,可取4~8 mm; F 为汇水面积, hm^2 ; ψ 为径流系数; β 为安全系数,可取1.1~1.5。

综合福州市的当地情况,调蓄量取6 mm,经测算主干渠最大汇水面积为104.7 hm^2 ,模型计算得到综合径流系数为0.61,考虑到规范所给出的调蓄池容积计算方法为经验公式,为了增加研究的合理性与价值,本研究确定0.9、1.1、1.3、1.5、1.7这5个安全系数梯度,计算得到调蓄池的有效容积分别为3 449、4 215、4 982、5 748、6 514 m^3 ,由此确定本研究的调蓄池容积分别为3 500、4 300、5 000、5 800、6 600 m^3 五种规格。

2.3 调蓄池运行规则的设计

本研究提出时间和径流污染物浓度两种运行规则,以末端排口的水质控制效果作为评价指标。其中,时间运行规则以降雨开始为计时起点,浓度运行规则以排口前一个节点的实时水位和浓度为判别标准。通过设置调蓄池前闸门、末端排放口(图1中的MTQ)前闸门启闭运行控制规则,来实现调蓄池的不同控制规则运行。

2.3.1 时间运行规则设计

该规则针对调蓄池前闸门进行设计,模拟降雨过程中调蓄池以5 min步长递增开启时的径流污染负荷控制效果;末端排放口前闸门启闭规则与其相反。在此控制规则中,调蓄池容积作为前提限制控

制规则,池满则关闭调蓄池进水闸门,开启排口前闸门。

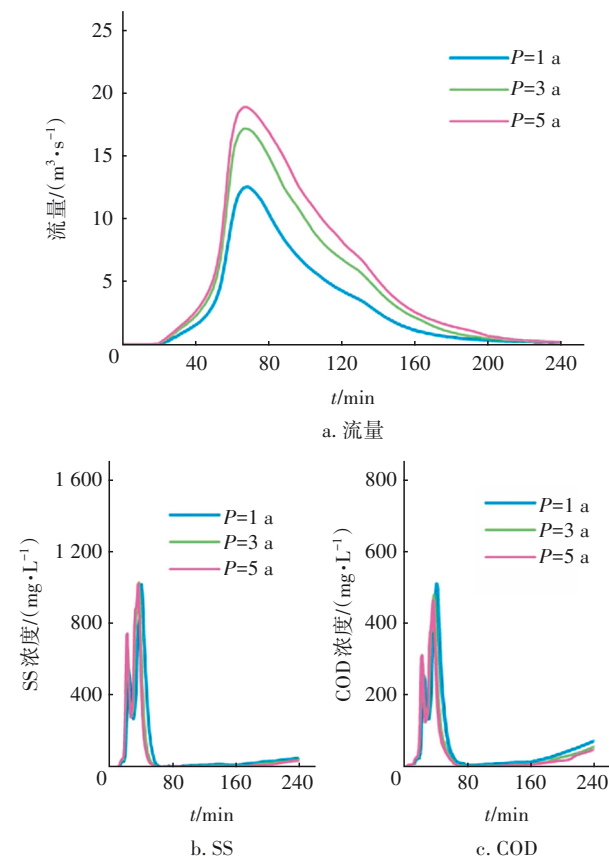
2.3.2 污染物浓度运行规则设计

本研究参考《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中规定的一级A标准即 $\text{SS} \leq 10 \text{ mg/L}$ 、 $\text{COD} \leq 50 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.5 \text{ mg/L}$,制定污染物浓度运行规则方案,超过此限值则开启调蓄池前闸门,低于此限值则关闭调蓄池闸门;末端排放口前闸门开闭规则与其相反。同样,在此控制规则中,调蓄池容积作为前提限制控制规则,池满则关闭调蓄池进水闸门,开启排口前闸门。

3 结果与讨论

3.1 末端排口水量及污染物浓度变化情况

不同降雨特征下,径流量及污染物产生情况差异显著。利用InfoWorks ICM模型对不同降雨重现期($P=1、3、5 \text{ a}$)条件下区域的水质水量情况进行模拟,结果如图2所示。由图2(a)可知,不同降雨重现期下,末端排口均在20 min左右开始有出流;随着降雨重现期的增大,末端排口流量增大,流量峰值明显增加,但流量峰现时间一致。



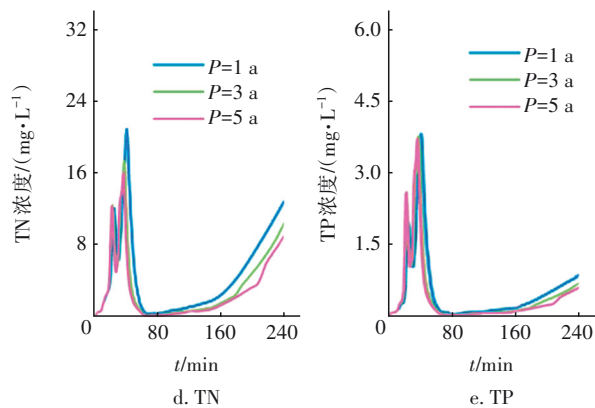


图2 不同降雨重现期下排口流量和污染物浓度变化曲线

Fig.2 Variation curves of discharge outlet flow and pollutants concentration at different rainfall return periods

由图2(b)~(d)可知,4种污染物的浓度变化范围不同,但其变化趋势相同,均出现了两个峰值。InfoWorks ICM模型对其他污染物的模拟均基于SS计算之上,使得4种污染物的整体变化趋势相同,这也与石少山、周邦磊等人在实际降雨监测过程中发现的情况相似,可能是因为同一场次降雨对这几种污染物的冲刷、携带能力相同^[10-11]。污染物峰值浓度出现时间均随着降雨重现期的增大而提前,COD、TN、TP峰值浓度随降雨重现期的增大而增大。

不同雨型下(前峰型、中峰型、后峰型),末端排口水量及污染物浓度的变化曲线如图3所示。可知,末端排口水量仍在降雨开始20 min左右有明显变化。不同雨型下污染物浓度也出现两个峰值,呈现先升后降、再升后降的趋势,最后趋于稳定。这是因为在降雨前期,降雨强度较小,径流污染物浓度快速增加而达到第1个峰值,此后随着降雨量的增加而减小;而后随着最大降雨强度的冲刷作用,径流污染浓度又增加而达到第2个峰值;此后,污染物浓度快速下降^[12]。而流量峰值出现时间随雨峰位置的提前而明显提前,峰值大小呈现前峰型<中峰型<后峰型。就污染物浓度变化来看,前峰型的污染物峰值浓度出现时间最早,中峰型和后峰型的污染物峰值浓度出现时间几乎一致,而污染物浓度峰值呈现出中峰型>后峰型>前峰型。

基于末端排口污染物变化在不同降雨特征下的变化趋势基本一致,考虑到本研究调蓄池以水质控制效果为主,结合福州当地暴雨强度公式,后续研究选择1年一遇中峰型降雨设计调蓄池在不同运行规则下的径流污染负荷控制效果。

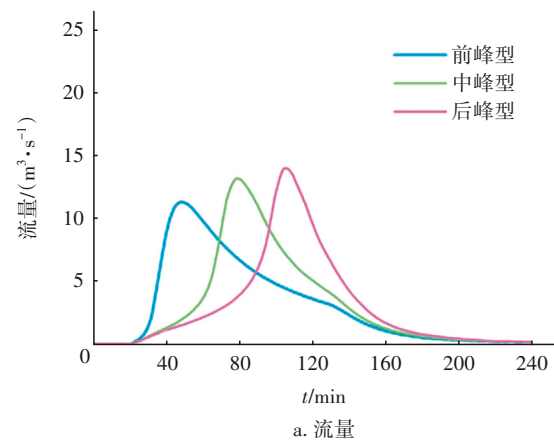


图3 不同雨型下排口流量和污染物浓度变化曲线

Fig.3 Variation curves of discharge outlet flow and pollutants concentration at different rainfall patterns

3.2 时间运行规则下的径流污染负荷控制效果

时间运行规则下的径流污染负荷控制效果如图4所示。可以看出,在一定时间范围内,5种规格的调蓄池均可有效控制径流污染负荷;在0~20 min内任一时间开启调蓄池,其径流污染负荷控制率基本没有差异。由3.1节可知,不同降雨情况下,本研究区域排口流量均在20 min左右开始明显增加,因此提前开启调蓄池的作用不大,这与李寰宇飞^[6]在研究以时间步长作为水量调蓄池运行规则时的结

果一致;在此时间段内开启调蓄池的截流效果均明显优于25 min及之后开启的效果,并且呈现开启时间越后延、径流污染负荷控制效果越差的现象。其主要原因是前期降雨量小,产生的径流量少,使得

降雨前期径流携带的污染物浓度大,因此开启调蓄池可有效截流高浓度的雨水径流;而后期调蓄池主要截流低浓度大流量的雨水径流,致使调蓄池对径流污染负荷削减率降低。

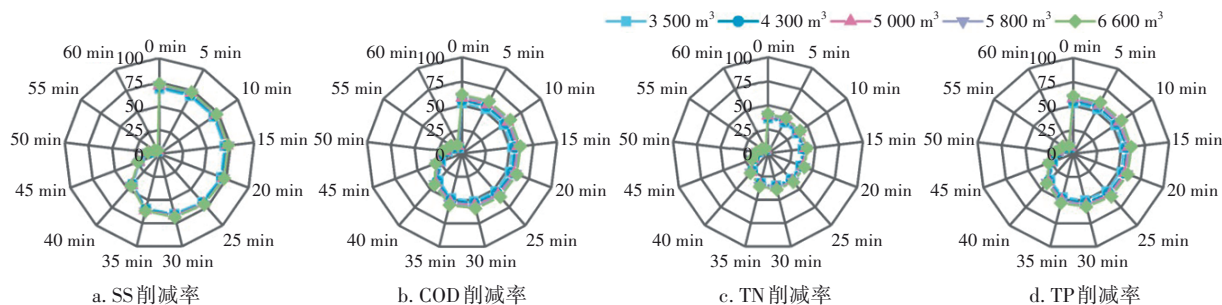


图4 时间运行规则下的径流污染负荷控制效果

Fig.4 Control effect of runoff pollution load under time operation rule

由图4可知,在时间运行规则下,随着调蓄池容积的增大,径流污染负荷削减率也相应增大;以0 min开启为例,调蓄池容积从3 500 m³提高至6 600 m³,池容提高88.6%,但径流污染负荷削减率仅提高4.7%~9.1%,单位池容污染负荷控制率由2.0%降至1.1%(以SS计)。时间运行规则下,调蓄池均能100%利用,但根据截流径流时间段的差异,对单位池容污染负荷控制率和污染负荷控制效果有显著影响。基于时间运行规则,可以适当延迟调蓄池阀门打开时间以提高其运行效率,并根据污染控制目标选择合适的调蓄池容积,从而保证径流污染负荷的有效控制。

3.3 浓度运行规则下的径流污染负荷控制效果

浓度运行规则下的径流污染负荷控制效果如图5所示。可知,5种调蓄池基于TN浓度运行规则下的径流量及污染负荷控制效果最差,主要原因在于其截流量小,仅为766.2 m³,远小于预设的调蓄池容积。研究区域的TN浓度较低,超出浓度运行规则限值15 mg/L的持续时间较短,总超标水量较少,使得基于TN浓度运行规则下的径流截流量较小,受之影响其他污染物的削减率较低。此类仅在降雨前期出现短时间超标且超标程度较轻的污染物不是研究区域需重点控制的污染物,不宜选作制定调蓄池运行规则的基准污染物指标。

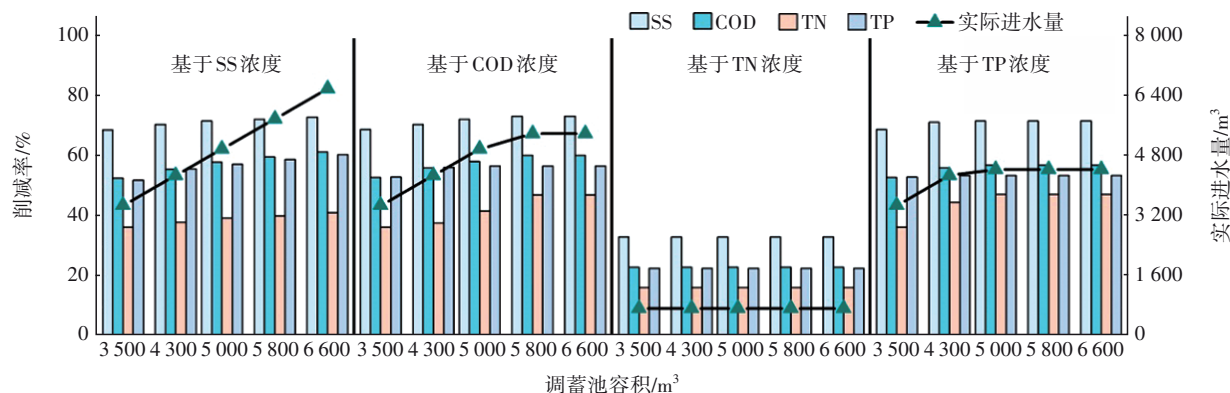


图5 污染物浓度运行规则下的径流污染负荷控制效果

Fig.5 Control effect of runoff pollution load under operating rule of pollutants concentration

而基于SS、COD、TP三种污染物浓度规则运行调蓄池时,5种规格调蓄池均能有效控制径流污染。基于SS浓度运行时,5种规格调蓄池的容积利用率均能达到100%,且调蓄池的污染负荷控制率随其容积的增大而增大;当调蓄池容积为6 600 m³时,污

染负荷控制率达到最高,对SS、COD、TN、TP的削减率分别为73.0%、61.5%、41.3%、60.6%。这是因为按照浓度规则的设定方式,以《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准来看,整个降雨过程SS均呈现超标情况,因此调蓄池

会持续截流径流污水,直至池满为止。基于COD浓度运行时,虽然调蓄池的池容利用率自 $3\,500\text{ m}^3$ 的100%降至 $5\,800\text{ m}^3$ 时的93.2%,但是此时径流污染负荷控制率达到最高,对SS、COD、TN、TP的削减率分别为73.4%、60.4%、47.3%、56.9%;而基于TP浓度运行时,调蓄池容积增至 $5\,000\text{ m}^3$ 时污染负荷控制率达到最高,此时容积利用率为89.2%。这主要是因为,本研究径流中COD、TP并非持续超标,当调蓄池容积增大至一定水平,所有超标径流污水均被调蓄池截流后,径流污染负荷削减率不再变化。由此可见,对于污染较严重的径流,需要根据污染物浓度变化特征确定合适的调蓄池容积。

对比基于SS、COD、TP三种污染物浓度运行的

结果,发现当调蓄池容积为 $3\,500\text{ m}^3$ 时,调蓄池径流污染负荷控制效果无明显差异;而当调蓄池容积增至 $4\,300\sim 5\,000\text{ m}^3$ 时,基于COD、TP浓度运行的整体控制效果优于基于SS浓度,继续增至 $5\,800\text{ m}^3$ 后,基于COD浓度运行的控制效果最优。这是因为,从整个研究区域的污染物超标情况分析,不同污染物浓度运行规则的截流区间有一定差异,基于COD、TP浓度运行时,调蓄池会二次进水(见图6),在二次进水时截流的超标污染物浓度明显高于基于SS浓度运行时后期截流的超标浓度。因此,当选择较大安全系数的调蓄池时,为了保证相对高浓度径流污染的有效截流,应选择容易出现二次或多次超标的污染物作为浓度运行规则的基准污染物。

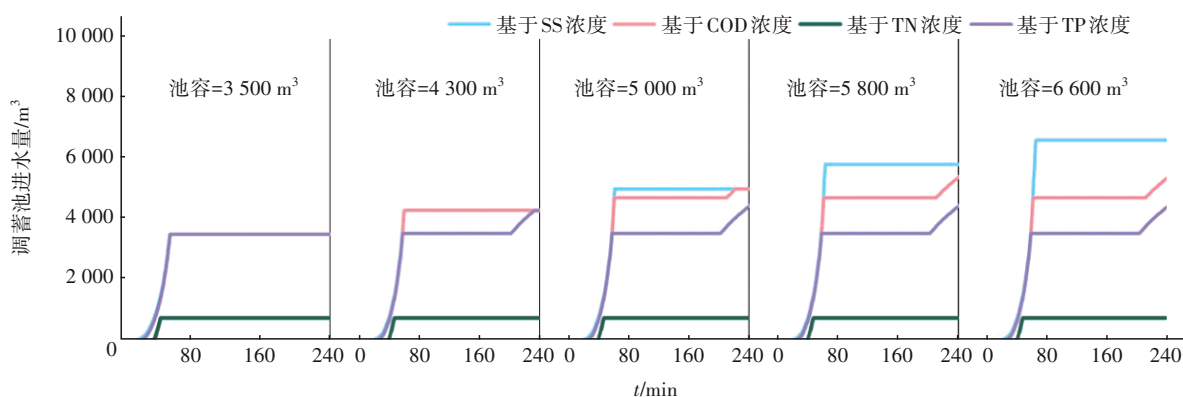


图6 不同浓度运行规则下调蓄池进水量变化曲线

Fig.6 Variation curves of storage tank inflow under different concentration operation rules

3.4 不同运行规则的适用条件分析

本研究提出了时间运行规则和浓度运行规则来控制水质型调蓄池。两种控制规则均能有效削减径流污染物,在场次降雨条件下,主要超标污染物SS、COD、TP的削减率均可达到50%以上。王天舒的研究中以TSS总量削减率反映水位控制规则下的调蓄池运行效率时,在 $P=1\text{ a}$ 的模拟场次降雨条件下,当调蓄池蓄水量为 $2\,444\text{ m}^3$ 时,最高TSS总量削减率仅为31%左右^[7],而本研究的调蓄池单位池容污染负荷控制率高出其1倍。同时,本研究发现,当调蓄池尺寸设计符合经验公式规定的安全系数范围1.1~1.5时,便可有效控制径流污染负荷,继续增大调蓄池容积并未显著提升径流污染负荷控制效果,验证了经验公式的合理性。

当研究区域对于调蓄池建设用地限制性不强时,设计调蓄池尺寸可以选择较大的安全系数范围,运行方式可采用时间运行规则,以充分利用调

蓄池容积,截流更多水量,保证区域径流污染负荷控制效果。且结合径流污染物特征分析,可以确定最佳开启时间,减少调蓄池的能耗和设备磨损。

当研究区域对调蓄池建设用地有明确限制时,在经验公式给定的安全系数范围内选择即可。而且为了保证调蓄池对于超标径流的有效截流,宜选择浓度运行规则,并且以超标量较大和容易出现多次超标的污染物作为浓度运行规则基准污染物。

4 结论

本研究提出的两种调蓄池运行规则均验证了调蓄池设计经验公式的合理性,径流污染负荷控制效果均优于传统遇雨则开的方式。根据径流污染物浓度变化特征和区域用地限制,调蓄池可以采取不同的运行规则。若区域对用地的限制性不强,可以选择较大的安全系数来确定调蓄池容积,此时宜采用时间运行规则;若区域用地有限制,可选择建设经验公式安全系数范围内的调蓄池,并采用浓度

运行规则以提高径流污染负荷控制效果。本研究可为调蓄池的优化运行控制规则提供新思路,未来可以结合不同运行规则进行成本-效益分析,综合评估调蓄池的最佳运行规则,为调蓄池的智能优化提供参考。

参考文献:

- [1] WANG M M, SUN Y X, SWEETAPPLE C. Optimization of storage tank locations in an urban stormwater drainage system using a two-stage approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 31-38.
- [2] WEISS J D, HONDZO M, SEMMENS M. Storm water detention ponds: modeling heavy metal removal by plant species and sediments [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(9): 1034-1042.
- [3] 刘洪波, 潘定, 高赛赛, 等. 典型初期雨水调蓄池的运行控制模式[J]. *净水技术*, 2015, 34(5): 96-99.
LIU Hongbo, PAN Ding, GAO Saisai, *et al.* Operation and control modes of typical cases for initial rainwater storage tanks [J]. *Water Purification Technology*, 2015, 34(5): 96-99 (in Chinese).
- [4] PAROLARI A J, PELRINE S, BARTLETT M S. Stochastic water balance dynamics of passive and controlled stormwater basins [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 122: 328-339.
- [5] ZHANG P P, CAI Y P, WANG J L. A simulation-based real-time control system for reducing urban runoff pollution through a stormwater storage tank [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 183: 641-652.
- [6] 李寰宇飞. 城市雨洪条件下调蓄池运行规则研究: 以西安小寨海绵城市项目为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
LI Huanyufei. Research on the Operation Rules of Storage Tank in Urban Rainfall Flood Condition—Taking Xi'an Xiaozhai Sponge City Project as an Example [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [7] 王天舒. 海绵城市背景下调蓄池水质调控规则研究: 以西安皂河排水分区为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
WANG Tianshu. Study on Water Quality Regulation Rules of Storage Tank under the Background of Sponge City—A Case Study about Drainage Zoning of Zaohe River in Xi'an City [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [8] 钟晔, 紫檀, 甄晓玥. 实时控制系统提升调蓄池处理能力的模拟研究[J]. *给水排水*, 2021, 47(4): 144-150.
ZHONG Ye, ZI Tan, ZHEN Xiaoyue. Modeling research on performance improvement of stormwater treatment detention basins by implementing real-time control systems [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(4): 144-150 (in Chinese).
- [9] WU W L, LU L J, HUANG X F, *et al.* An automatic calibration framework based on the InfoWorks ICM model: the effect of multiple objectives during multiple water pollutant modeling [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(24): 31814-31830.
- [10] 石少山. 深圳市某区降雨径流污染特征研究[J]. *广东水利水电*, 2021(5): 57-61.
SHI Shaoshan. Study on characteristics of rainfall runoff pollution in a district of Shenzhen [J]. *Guandong Water Resources and Hydropower*, 2021 (5): 57-61 (in Chinese).
- [11] 周邦磊, 赵白航, 李军, 等. 以受纳水体水质为目标的基于Mike Urban的初期雨水调蓄池容积确定[J]. *给水排水*, 2021, 47(S1): 482-489.
ZHOU Banglei, ZHAO Baihang, LI Jun, *et al.* Determination of the initial rainwater storage tank volume using Mike Urban model based the receiving water quality [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(S1): 482-489 (in Chinese).
- [12] 周志鹏, 陈铁, 杨松文, 等. 基于雨型的南方典型小流域城市降雨径流污染特征研究[J]. *天津科技*, 2020, 47(9): 86-92.
ZHOU Zhipeng, CHEN Tie, YANG Songwen, *et al.* Study on characteristic of urban rainfall runoff pollution in southern typical small watersheds based on rainfall patterns [J]. *Tianjin Science & Technology*, 2020, 47 (9): 86-92 (in Chinese).

作者简介:熊园(1997-),女,四川南充人,硕士,研究方向为城市雨洪管理、海绵城市。

E-mail:754315532@qq.com

收稿日期:2021-11-01

修回日期:2022-02-27

(编辑:刘贵春)