

城市雨水管理

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.15.017

# 雨水径流污染削减与源头体积控制之间的响应关系

李俊奇<sup>1,2</sup>, 姜昱丞<sup>1</sup>, 李小静<sup>2,3</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 3. 北京建筑大学 海绵城市研究院, 北京 100044)

**摘要:** 随着城市点源污染问题的逐步解决,城市雨水径流污染负荷在水环境中的占比正逐步增大。城市雨水径流在形成过程中,经历大气、下垫面和管道三阶段的污染物冲刷与积累,其中前两个阶段初期冲刷效应明显,理论上源头控制设施可以获得更好的污染物控制效果。以生物滞留池、透水铺装、雨水桶作为源头体积控制的典型设施,以耦合控制模块搭建的末端截流调蓄池作为末端体积控制的典型设施,进行了不同情景的场次与多年模型模拟,并使用MV控制比对比场次模拟结果进行处理。模拟结果显示,与雨水桶和调蓄池相比,具有下渗功能的生物滞留池和透水铺装的污染物控制效果更佳;对于雨水桶、调蓄池等调蓄类设施,其污染物控制效果主要由设施规模与排放规则共同决定。

**关键词:** 城市雨水径流污染; 源头体积控制; SWMM; MV控制比; 雨水管理

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)15-0102-08

## Response Relationship between Stormwater Runoff Pollution Reduction and Source Volume Control

LI Jun-qi<sup>1,2</sup>, JIANG Yu-cheng<sup>1</sup>, LI Xiao-jing<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China; 3. Sponge City Research Institute, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** With the gradual solution of urban point source pollution, the proportion of urban stormwater runoff pollution load in water environment is gradually increasing. In the formation of urban stormwater runoff, there are three stages of pollutant erosion and accumulation: atmosphere, underlying surface and pipeline. The first flush effect is obvious in the first two stages. Theoretically, source control facilities can obtain better pollutant control performance. Therefore, biological retention ponds, permeable pavements, rain barrels were used as typical facilities for source volume control, and the terminal interception and storage tank built with coupling control modules was used as typical facilities for terminal volume control. Various scenarios and multi-year model simulation were carried out, and the simulation results were processed by the MV control ratio. The simulation results showed that the biological retention pond with infiltration function and the permeable pavement had better pollutants

control performance than that of the rain barrel and storage tank. For storage facilities such as rain barrel and storage tank, the pollutants control performance was mainly determined by the facility scale and discharge rules.

**Key words:** urban stormwater runoff pollution; source volume control; SWMM; MV control ratio; stormwater management

通常情况下分流制排污口中雨水的污染物浓度要略低于合流制,但现实中雨水直排对受纳水体的影响也不可小觑。许多学者在区域和流域等不同尺度下对雨水径流污染进行了量化研究,例如,刘洋等<sup>[1-3]</sup>研究了不同城市区域的雨水径流污染负荷占比,认为城市区域雨水径流污染负荷可相当于同期区域污染总排放量的30%左右。由于城市雨水本身积累携带大量污染物质,单一进行合改分不能解决所有的污染问题,雨水径流污染问题的解决需要从源头、过程和末端共同入手。因此,研究海绵城市建设中源头体积控制、末端体积控制与城市雨水径流污染削减之间的响应关系,探讨合理高效的城市雨水径流污染控制措施,对于分流制排水系统的建设具有重要意义。

### 1 分流制城区雨水径流污染的三阶段积累

雨水径流中污染物的积累过程分为三个阶段。第一阶段为降雨与空气中的悬浮颗粒产生相互作用,即湿沉降效应,城市雨水从在大气云层形成到落地之前便开始携带并积累污染物。对北京市雨季降雨与空气中PM<sub>2.5</sub>颗粒的相互作用研究发现,雨水对PM<sub>2.5</sub>颗粒的冲刷强烈,仅5 mm的降雨即可将PM<sub>2.5</sub>从几百 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 降至几十 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,并使雨水中的硫、氮、磷等无机元素含量显著升高<sup>[4]</sup>。

第二阶段为雨水冲刷地表并形成地表径流,对城市下垫面进行强烈冲刷,持续积累污染物,此阶段的积累多发生在道路、屋顶与绿地等汇入管网前的小汇流区域,污染物冲刷现象明显,往往具有明显的初期冲刷效应。北京路面和屋面初期径流COD、SS通常达数千 $\text{mg}/\text{L}$ <sup>[5-6]</sup>,初期雨水的污染物浓度与整场降雨的污染物场次降雨径流平均浓度(EMC)往往不处于同一个数量级<sup>[7-10]</sup>。许多学者对不同城市小尺度不同功能的典型下垫面进行了监测,采用50/50的判定标准时大部分降雨事件都存在明显的初期效应<sup>[11-13]</sup>。

携带来自大气与地表污染物的雨水汇流至排水管道,冲刷管道并积累污染物,完成第三阶段的积

累,此阶段的污染物冲刷规律并不稳定,现有研究表明,其并没有第一和第二阶段那样明显的初期冲刷效应。对排水口窰井进行的雨水径流采样分析<sup>[14]</sup>和对分流制片区泵站中雨水进行的采样分析<sup>[15]</sup>均未发现明显的初期冲刷效应。车伍等<sup>[16-17]</sup>也多次强调污染物浓度较大的雨水到达干管排口的时间可能不是在降雨初期,雨水干管中的径流污染物浓度会出现起伏,且由于管道污染物冲刷的不规律性和汇流时间差异等诸多原因,导致大管渠排水系统或大汇水区的初期冲刷现象并不明显,甚至消失<sup>[18]</sup>。

各积累阶段的污染物浓度变化特征不同,第一与第二阶段的初期冲刷效应明显,前期较少的径流量便可携带较多的污染物;而第三阶段则会对初期冲刷效应产生弱化影响,将污染物浓度峰值滞后甚至削弱至无。因此理论上最佳的控制环节在第二与第三阶段之间,优先使用源头污染控制以减少进入管网的污染物,而对进入管网的污染物控制主要通过管网的清掏维护以及末端控制来实现。

### 2 模型设置及数据处理方法

#### 2.1 区域概况

为探讨源头体积控制与污染物控制间的响应关系,确保研究结论在不同地块的一致性,基于三阶段积累研究,建立大小两个尺度的区域模型,见图1。

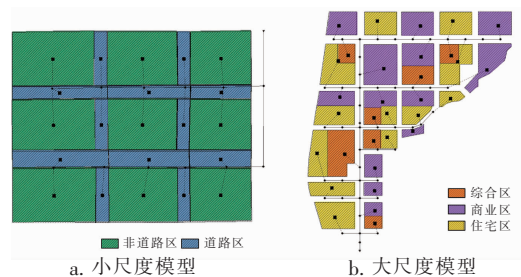


图1 不同尺度的研究区域模型概化

Fig. 1 Model generalization of study area at different scales

小尺度研究区域为小区概化地块,分为9个建筑排水区和12个道路排水区,总占地面积为25.3 $\text{hm}^2$ ,最小、最大和平均地块面积分别为0.4、2.6、1.2 $\text{hm}^2$ 。大尺度研究区域为北京某实际地块,分为

32 个汇水分区,其中住宅区域 12 个、商业区域 13 个、综合区域 7 个,总占地面积为 243.0 hm<sup>2</sup>,最小、最大和平均地块面积分别为 2.0、17.0、7.5 hm<sup>2</sup>。

区域下垫面类型主要包括绿地、道路、屋面三种。子汇水区包括的参数主要有面积、坡度、不透水性、汇水区宽度等,不透水性会根据区域绿地占比进行相应调整;渗透计算模型为霍顿模型,水力演算模型为动态波,模型水质参数见表 1。

表 1 模型水质参数(SS)

Tab. 1 Model water quality parameters (SS)

下垫面类型	EXP 冲刷系数	EXP 冲刷指数	SAT 最大累积量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	SAT 累积常数/d
绿地	0.014	0.3	80	10
道路	0.018	0.8	270	3
屋面	0.015	0.8	200	3

## 2.2 通过控制模块实现调蓄设施工作逻辑

### 2.2.1 在场次模拟中实现堰、孔节点的自动启闭

在场次模拟中,需要使用堰、孔口与蓄水池节点搭建末端截流调蓄池,但常规手段搭建的截流调蓄池不能实现堰与孔口的自动开启与关闭,通过模型中的 control 编辑器加入规则词条,可实现根据一些节点对象的工况状态变化来控制另一些节点对象进行相应的变化,如通过蓄水池的水深变化来控制堰、孔口或者泵的开启。末端调蓄池的搭建方法:使用孔口作为末端调蓄池的进水闸门,当蓄水池水深未达到最大深度时,孔口的开启程度为 1(即全开);当蓄水池水深达到设定值时,孔口的开启程度为 0(即全关)。使用堰作为截留手段,当蓄水池水深未达到最大深度时,堰口的开启程度为 0.75(即堰有 25% 的堰口高度);当蓄水池水深达到设定值时,堰口的开启程度为 1(即没有堰),具体操作见图 2。

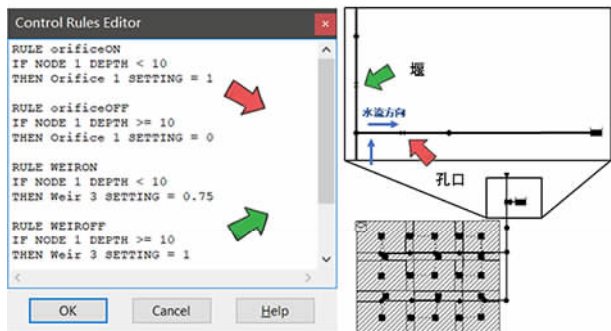


图 2 末端截流调蓄池的设置方法

Fig. 2 Setting method of terminal interception and storage tank

### 2.2.2 在多年模拟中实现调蓄设施自动排水

在 SWMM 中,生物滞留池和透水铺装等有下渗结构的低影响开发(LID)设施可以不进行任何附加设置直接进行多年模拟;但是诸如雨水桶、调蓄池等储水调蓄设施不会自行排水,需要手动加设排水规则。本研究对雨水桶和调蓄池的工作规则设置参考课题组已有的研究成果<sup>[19]</sup>,SWMM 设置方法见图 3,具体规则为:自开始降雨起 24 h 之后开始排水,24~48 h 内将雨水桶内收集的雨水进行排空,排出的雨水按照回用水资源进行利用,不再外排污染物,即桶内收集雨水按 100% 污染物去除计算。

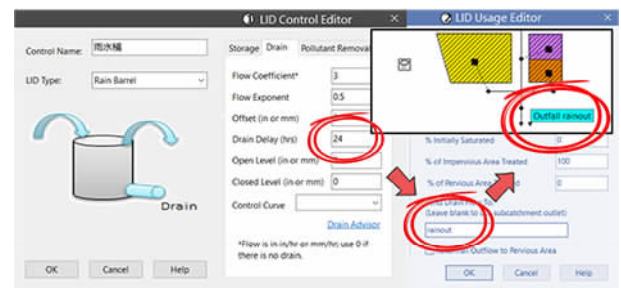


图 3 雨水桶工作规则设置方法

Fig. 3 Setting method of rain barrel working rules

调蓄池同样需要将雨水滞留 24 h 以上再进行排水,此时蓄水池内滞留的雨水中污染物的去除率可以达到 80%<sup>[20]</sup>。为了让调蓄池实现这种工作方式,需要在调蓄池后加设水泵,加设泵的 control 规则,并设置蓄水池雨水水质处理规则:当水力停留时间(HRT)不足 24 h 时,按 (HRT/24 h) × 80% 的去除率去除;当 HRT 超过 24 h 后,按 80% 去除率去除,设置方法见图 4。

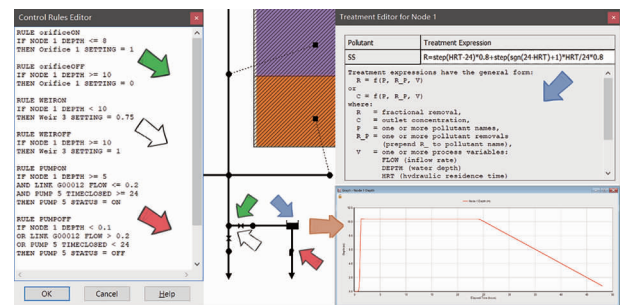


图 4 调蓄池工作规则设置方法

Fig. 4 Setting method of the working rules of storage tank

## 2.3 使用 MV 控制比处理场次模拟数据

通常情况下使用模型的年均污染物控制率来评估设施的污染物控制效果,单一场次模拟的污染物控制率并不能直接反映设施的实际控制效果,比如



由于结构和工作方式不同,雨水桶和蓄水池的场次水量控制效果要远好于同一设计规模的生物滞留池和透水铺装。而本研究为直观对比源头体积控制与末端控制的污染物去除效果,参考积累负荷-积累体积分数曲线[ $M(V)$ 曲线]提出了负荷控制率-体积控制率比值(MV控制比)的概念,MV控制比是场次模拟污染削减率 $\varphi_M$ 与该场次模拟径流体积削减率 $\varphi_V$ 的比值,该比值是一个无量纲数,其意义为:每当控制1%的径流体积可以相应控制1%的污染负荷时,MV控制比为1。

与 $M(V)$ 曲线不同,单独一场降雨的模拟结果只可得出一个MV控制比,通过改变设施设计规模进行多个场次模拟得到多个MV控制比,方可得到一条MV控制比曲线。将同一设施的多组MV控制

比数据进行标准差计算并绘制成误差棒曲线,填充处理后即可得到该设施控制比的误差区。

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 场次模拟探究降雨情景对控污效果的影响

##### 3.1.1 降雨重现期对污染物控制效果的影响

由雨水径流中污染物的三阶段积累相关研究可知,源头体积控制设施在第二阶段发挥作用,在小流域范围理论上在达到100%径流体积控制率之前源头设施的MV控制比可以较稳定高于末端控制设施。以生物滞留池、透水铺装、雨水桶、末端截流调蓄池这四种设施为例,使用0.5、1、3、5和10年重现期2h降雨数据进行模拟,绘制按不同年径流总量控制率设计的不同设施在不同重现期2h降雨条件下的MV控制比变化曲线,如图5所示。

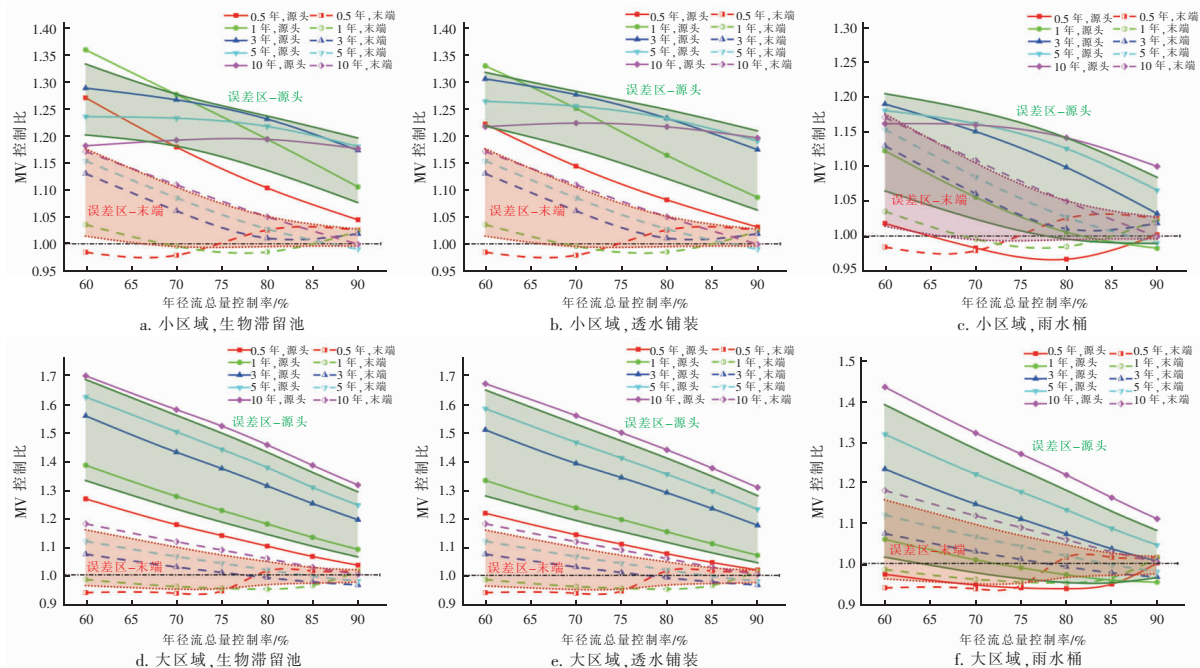


图5 不同重现期不同年径流总量控制率下不同设施的MV控制比变化曲线

Fig. 5 Variation curve of MV control ratio of different facilities under different return periods and different volume capture ratios of annual rainfall

模拟结果表明,不管是在小尺度区域还是在大规模区域,源头体积控制设施的MV控制比都要明显高于末端体积控制设施的MV控制比,这与第一、二积累阶段的雨水具有明显的初期冲刷效应,而第三积累阶段雨水中的污染物基本没有初期冲刷效应的三阶段积累研究相符。模拟结果还表明,区域尺度由小变大时,低降雨重现期下源头体积控制设施与高降雨重现期下末端体积控制设施的MV控制比基本保持不变,高降雨重现期下源头体积控制设施

的MV控制比有一定的提高,低降雨重现期下末端体积控制设施的MV控制比则有一定的下降。

图6中的横坐标为不同设计规模设施场次模拟中得到的雨水径流体积控制率,在降雨时间相同的情况下,随着降雨重现期的提高,大部分情况下源头体积控制设施和末端体积控制设施的控制比都有所增加,但雨水径流体积控制率下降。生物滞留池与透水铺装的MV控制比随重现期提高而增加的幅度与末端体积控制设施相比较小,雨水桶的MV控制

比随重现期提高而增加的幅度与末端体积控制设施基本相同。

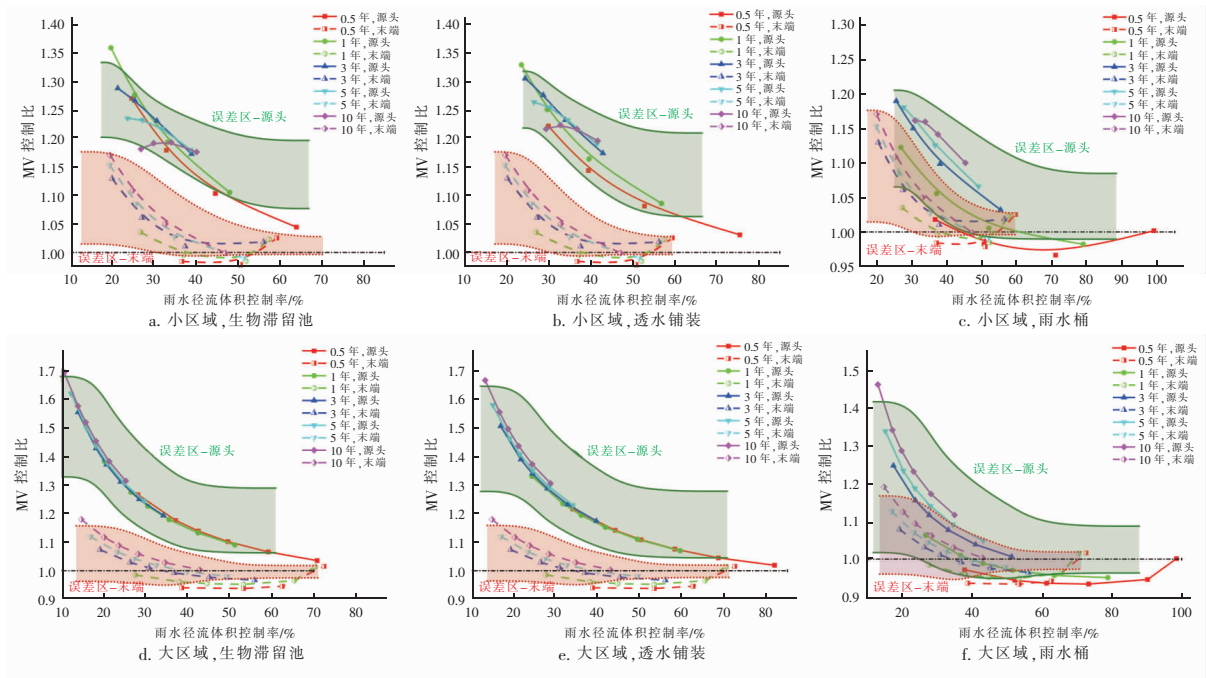


图6 不同重现期不同体积控制率下设施的MV控制比变化曲线

Fig. 6 Variation curve of facility MV control ratio under different return periods and different volume control rates

### 3.1.2 降雨时长对污染物控制效果的影响

为了研究场次降雨时长对设施污染物控制效果的影响,将不同重现期下2、4、6、12、24 h降雨数据代入大区域模型进行模拟;源头体积控制设施以生

物滞留池为例,末端体积控制设施以截流调蓄池为例,研究不同降雨时长对这两种设施污染物控制效果的影响,绘制横坐标为雨水径流体积控制率的MV控制比曲线,如图7所示。

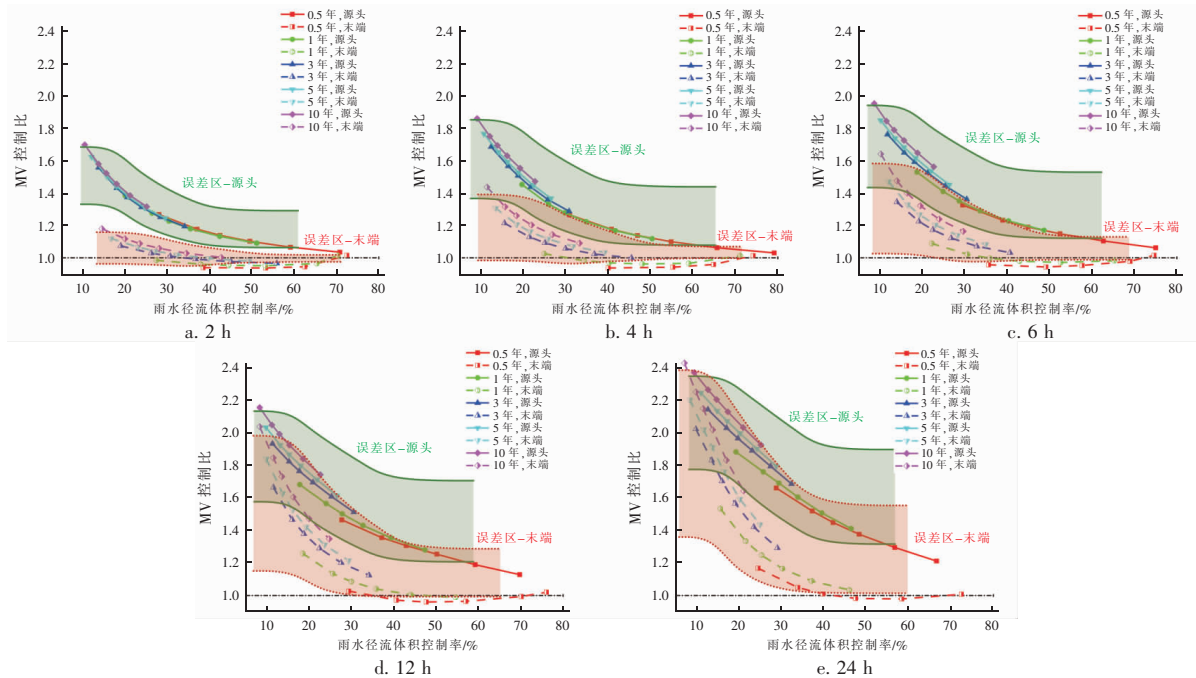


图7 不同重现期不同降雨时长情况下的MV控制比变化曲线

Fig. 7 Variation curve of MV control ratio under different return periods and different rainfall duration

不同降雨时长情况下,源头体积控制设施的MV控制比所在数值区间始终高于末端体积控制设施的MV控制比所在数值区间。随着降雨时长的增加,总降雨量增多,末端控制设施的体积控制区间在逐步缩小,MV控制比则逐步提高,且末端控制设施的MV控制比曲线随重现期升高而增加的幅度要明显大于源头控制设施。而生物滞留池由于拥有下渗结构,降雨时间的增长使设施获得了更长的下渗时间,没有随降雨时间的增多而显著缩小,其径流体积控制区间与末端控制设施的差距逐渐缩小。

### 3.2 多年模拟验证体积控制设施的控污效果

为了验证MV控制比概念的有效性,需要在场次模拟的基础上进行多年降雨模拟,在场次降雨模拟中MV控制比表现较好的设施,在多年降雨模拟中也应当拥有较好的年均雨水径流污染控制率。使用2010年—2015年共6年的降雨数据,分别模拟生物滞留池、透水铺装、雨水桶和末端截流调蓄池在不同设计规模下的污染物控制情况。由于调蓄池污染物控制效果会受其运行规则影响,不能提前给出最佳的排水规则,因此模拟中设定了4种不同的调蓄池排水规则:排水规则A,降雨24 h后开始排水,排水流量为 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ );排水规则B,降雨24 h后开始排水,排水流量为 $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $4.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ );排水规则C,降雨48 h后开始排水,排水流量为 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ );排水规则D,降雨48 h后开始排水,排水流量为 $0.50 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $4.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。

源头体积控制设施与末端截流调蓄池的多年模拟结果见图8。

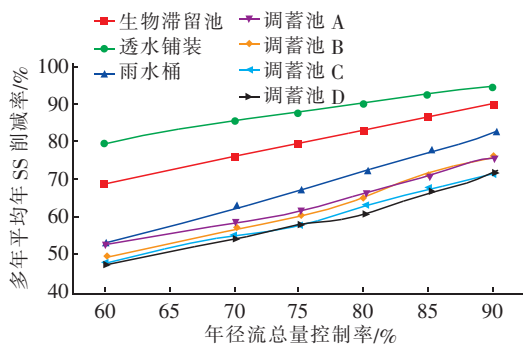


图8 源头体积控制设施与调蓄池的污染物控制率多年模拟结果

Fig.8 Annual simulation results of pollutants control rate of source volume control facilities and storage tank

相同年径流总量控制率下,4种设施的年SS削减率排序为:透水铺装>生物滞留池>雨水桶>末端截流调蓄池,其与通过MV控制比概念分析得到的源头控制设施的污染物控制效果好于末端控制设施的结论相一致,验证了MV控制比概念在场次模拟结果分析中应用的有效性。在不同年份4种调蓄规则的模拟曲线会出现不同的排序情况,综合多年的结果来看,排水规则A条件下的污染物控制效果最佳。此处特别说明,仅在本模型当前的参数设置下透水铺装可以实现更多的雨水径流控制体积从而获得更好的污染物控制效果,并不代表任何情况下透水铺装控制效果都要好于生物滞留池。

### 3.3 排放规则对调蓄设施污染物控制效果的影响

从以上模拟结果可以看出,如果每一个区块的雨水桶都严格遵守模拟规则,按照雨后24 h排水并于24~48 h内排完进行管理,那么分散在源头的雨水桶可以获得比集中在末端的调蓄池更好的污染物控制效果。但在实际工程中,雨水桶经常面临管理不善的窘境,许多雨水桶内收集的雨水不能及时排放和使用。因此结合之前多年模拟数据,分别模拟雨水桶于降雨开始24、72、168 h后开始排水的污染物控制效果,并与末端调蓄池的控制效果进行比较,结果如图9所示。

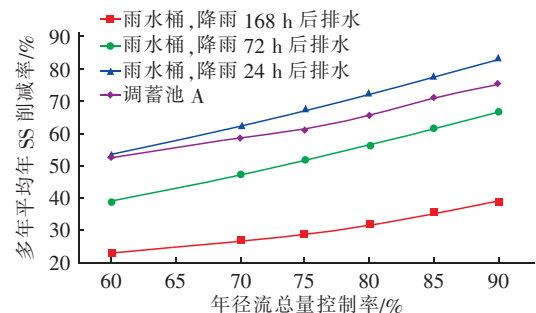


图9 管理不善情况下雨水桶的污染物控制效果

Fig.9 Pollutants control effect of rain barrel under poor management

从模拟结果可以明显看出,雨后相隔较长时间才开始排水的雨水桶,桶中未及时排出的雨水会致使雨水桶不能对下一场降雨进行有效控制,导致其污染物控制效果出现断层式下降,远低于末端调蓄池的控制效果。结合第3.2节的研究可以发现,对于没有下渗结构的调蓄类设施,不管是源头还是末端,从雨水径流污染物控制角度来说,其排放规则与管理好坏在很大程度上比设施规模更加重要。在相



同设计规模情况下,雨水桶的设置数量会远高于末端的调蓄池,其总体维护难度也相应提升,易发生长期无人维护与使用的情况;而末端调蓄池虽然控制效率不如源头的雨水桶,但易于集中管理和使用,若使用合理的动态管理规则来实现更多的雨水控制体积,可以获得更好的污染物控制效果。

#### 4 结论

① 单一场次模拟结果往往不能反映设施总体的污染物控制效果,例如雨水桶、调蓄池等设施在场次模拟中污染削减效果表现优秀,在多年模拟中却表现较差,因此本研究提出了MV控制比概念。经过模型模拟验证,MV控制比可以有效反映设施的污染物控制能力,相同设计规模情况下,在场次模拟中MV控制比表现较好的设施在多年模拟中可以实现较高的年均污染物削减率。

② 三阶段积累研究表明,在源头进行体积控制可以获得更好的污染物控制效果。场次模拟结果显示,源头控制设施的MV控制比所在区间均高于末端控制设施,排水区域尺度由小变大时会略微削弱末端体积控制设施在低降雨重现期下的污染物控制效果;源头控制设施对降雨重现期的变化更加敏感,而末端控制设施对降雨时长的变化更加敏感。多年模拟结果也表明,相同设计规模情况下,源头控制设施可以获得更好的年雨水径流体积及污染物控制效果。

③ 相同设计规模情况下,具有下渗功能的源头体积控制设施(生物滞留池、透水铺装)的污染物控制效果要好于雨水桶,而处于源头的雨水桶要好于末端体积控制设施(末端截流调蓄池)。但对于管理难度较大的雨水桶来说,如其不能按时排空桶内雨水,其年径流体积与年径流污染控制能力将出现断层式下跌。因此对于调蓄类设施来说,一味地增大其有效容积并不一定会获得更好的水量与污染物控制效果,使用末端截流调蓄池、雨水桶等调蓄类设施进行雨水径流污染控制时,则应结合当地降雨特点,将设施设计规模与及时排空的运维管理要求动态搭配,实现最佳的雨水径流与污染物控制效果。

#### 参考文献:

[1] 刘洋,李俊奇,车伍,等.北京市城区雨水径流污染控制与节能减排[J].环境污染与防治,2008,30(9):93-96.

LIU Yang, LI Junqi, CHE Wu, *et al.* Rainwater runoff pollution control and energy conservation and emission reduction in Beijing urban area [J]. Environmental Pollution & Control, 2008, 30(9): 93-96 (in Chinese).

[2] 张映鹏. 大连城区雨水径流规律及污染负荷分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.

ZHANG Yingpeng. Study of Runoff Rules and Pollution Load in Dalian Urban [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014 (in Chinese).

[3] 王宇翔, 杨小丽, 胡如幻, 等. 常州市湖塘纺织工业园降雨径流污染负荷分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 68-73.

WANG Yuxiang, YANG Xiaoli, HU Ruhuan, *et al.* Analysis of rainfall-runoff pollution load of Hutang textile industrial park in Changzhou City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 68-73 (in Chinese).

[4] OUYANG W, GUO B, CAI G, *et al.* The washing effect of precipitation on particulate matter and the pollution dynamics of rainwater in downtown Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 306-314.

[5] 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, 29(10): 38-42.

CHE Wu, LIU Yan, LI Junqi. Urban rainwater and its pollution control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(10): 38-42 (in Chinese).

[6] 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1): 33-37.

CHE Wu, OU Lan, WANG Huizhen, *et al.* The quality and major influential factors of runoff in Beijing urban area [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(1): 33-37 (in Chinese).

[7] 张伟, 罗乙兹, 钟兴, 等. 北京市中心城区某沥青屋面和金属屋面径流污染特征[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(23): 358-365.

ZHANG Wei, LUO Yizi, ZHONG Xing, *et al.* Characteristics of runoff pollution in asphalt roof and metal roof in downtown Beijing [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(23): 358-365 (in Chinese).

[8] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 373-378.

REN Yufen, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, *et al.* Analysis of first flush effect of typical underlying surface

- runoff in Beijing urban city[J]. Environmental Science, 2013,34(1):373-378(in Chinese).
- [9] 李俊奇,毛坤,向璐璐. 京承高速公路径流污染负荷及初期冲刷效应研究[J]. 中国给水排水,2010,26(18):59-63,87.
- LI Junqi, MAO Kun, XIANG Lulu. Research on runoff pollution load and first flush effect of Jingcheng highway [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18):59-63,87(in Chinese).
- [10] SHEN Z, LIU J, AINI G, *et al.* A comparative study of the grain-size distribution of surface dust and stormwater runoff quality on typical urban roads and roofs in Beijing, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23:2693-2704.
- [11] 曹宏宇,黄申斌,李娟英,等. 上海临港新城初期地表径流污染特性与初期效应研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):66-71.
- CAO Hongyu, HUANG Shenbin, LI Juanying, *et al.* Research on pollution characteristics and initial effect of surface runoff in Lingang new city of Shanghai [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(6):66-71(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 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):8-15,17.
- 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):8-15,17(in Chinese).
- [14] 田永静,李田,何绍明,等. 苏州市枫桥工业园区非点源污染特性研究[J]. 中国给水排水,2009,25(13):89-91,94.
- TIAN Yongjing, LI Tian, HE Shaoming, *et al.* Characteristics of non-point pollution of Fengqiao industrial park in Suzhou [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(13):89-91,94(in Chinese).
- [15] 谭琼,李田,高秋霞. 上海市排水系统雨天出流的初期效应分析[J]. 中国给水排水,2005,21(11):26-30.
- TAN Qiong, LI Tian, GAO Qiuxia. Analysis on the first flush effect of stormwater discharge from Shanghai drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(11):26-30(in Chinese).
- [16] 车伍,刘翠云,陈和平,等. 雨水干管污染物输送规律研究[J]. 给水排水,2004,30(8):30-35.
- CHE Wu, LIU Cuiyun, CHEN Heping, *et al.* Research on pollutant transportation of storm-water sewer [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004, 30(8):30-35(in Chinese).
- [17] 车伍,张伟,李俊奇. 城市初期雨水和初期冲刷问题剖析[J]. 中国给水排水,2011,27(14):9-14.
- CHE Wu, ZHANG Wei, LI Junqi. Analysis of urban initial rainwater and first flush [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(14):9-14(in Chinese).
- [18] 车伍,张鹏,张伟,等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水,2016,32(6):9-14.
- CHE Wu, ZHANG Kun, ZHANG Wei, *et al.* Analysis of initial rainfall and total runoff volume control[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6):9-14(in Chinese).
- [19] 李俊奇,秦伟,王亚婧,等. 雨水塘的多级出水口及其设计方法探析[J]. 中国给水排水,2014,30(12):34-40.
- LI Junqi, QIN Yi, WANG Yajing, *et al.* Research on multi-stage outlets of stormwater ponds and their design methods [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(12):34-40(in Chinese).
- [20] NEPIS. Use of best management practices (BMPs) in urban watersheds [EB/OL]. [2020-11-27]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P10000RJ.txt>.
- 作者简介:李俊奇(1967-),男,山西稷山人,博士,教授,长期从事城市雨水管理理论与技术、水环境生态技术、环境与资源政策等研究。  
E-mail:jqli6711@vip.163.com  
收稿日期:2021-04-26  
修回日期:2021-05-26

(编辑:刘贵春)