

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.019

基于质量冲刷曲线和多属性决策的分流制 控污调蓄设施的优化设计

薛鹏腾^{1,2}, 毛立波³, 张 峰^{1,2}, 崔建国^{1,2}

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600;
3. 山西省城乡规划设计研究院有限公司, 山西 太原 030001)

摘要:针对控制分流制系统径流污染的调蓄设施的设计, 尝试引入反映径流与污染负荷之间函数关系的质量冲刷曲线, 并利用 SWMM(storm water management model) 计算所需数据, 作为调蓄规模的确定依据; 同时辅以多属性决策模型, 综合多种因素, 对调蓄设施进行优化设计, 从而建立一种较为科学、简明的控制分流制径流污染调蓄设施的优化设计方法。以山西省某县为实例进行计算, 结果表明相比于传统的末端调蓄方案, 优化方案的总调蓄规模增加 6.3%, 节点平均调蓄规模减少了 47%, 径流污染控制效果提升了 5%, 且能削减高重现期下的系统溢流。优化方案在实现径流污染控制目标的同时降低内涝的风险, 表明了该方法的有效性和可行性。

关键词:质量冲刷曲线; SWMM; 调蓄设施; 分流制; 多属性决策模型

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)04-0127-06

Optimal design of regulation and storage facilities for pollution control in separate system based on mass flush curve and multi-attribute decision making // XUE Pengteng^{1,2}, MAO Libo³, ZHANG Feng^{1,2}, CUI Jianguo^{1,2} (1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China; 2. Shanxi Provincial Municipal Engineering Graduate Education Innovation Center, Jinzhong 030600, China; 3. Shanxi Urban & Rural Planning and Design Institute Co., Ltd., Taiyuan 030001, China)

Abstract: Aiming at the design of regulation and storage facilities for pollution control in the separate system, this paper attempts to introduce the mass flush curve reflecting the functional relationship between runoff and pollution load, and use the data calculated by SWMM(storm water management model) model to determine the regulation and storage scale. At the same time, the multi-attribute decision-making model is used to optimize the design of the regulation and storage facilities, so as to establish a more scientific and concise optimization design method to control regulation and storage facilities of runoff pollution in the separate system. Taking a county in Shanxi Province as an example, the results show that compared with the traditional terminal regulation and storage scheme, the total regulation and storage scale of the optimized scheme is increased by 6.3%, the average node regulation and storage scale is reduced by 47%, the runoff pollution control effect is improved by 5%, and the system overflow in the high return period can be reduced. The optimized scheme can achieve the goal of runoff pollution control and reduce the risk of waterlogging at the same time, which shows the effectiveness and feasibility of the optimized scheme.

Key words: mass flush curve; SWMM; storage device; separate system; multi-attribute decision making

近年来自然及城市水体环境发生剧烈变化^[1], 分流制排水系统径流污染对水体生态安全的威胁不可忽视, 通过设置雨水调蓄设施收集初期雨水可有效控制径流污染。分流制排水系统中控制径流污染的调蓄深度在德国和日本的工程标准中为 1.8 ~

6.0 mm, 在 GB 50014—2006《室外排水设计规范》中为 4 ~ 8 mm^[2]。虽然提供了调蓄深度区间, 但具体取值受区位、降雨、下垫面和管道等条件的影响较大, 如, Chow 等^[3]对马来西亚柔佛区多场次降雨进行调查, 发现大部分降雨的 30% 径流携带 50% 污染

作者简介: 薛鹏腾(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市水资源与水系统。E-mail: 772347349@qq.com

通信作者: 张峰(1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事城镇给排水系统优化研究。E-mail: zhangfeng@tyut.edu.cn

负荷,因此将设计降雨的 30% 径流作为调蓄量,对应的控制深度为 10 mm;李连文等^[4]通过 SWMM (storm water management model) 模型模拟发现控制深度为 7 mm 时进入水体的剩余径流的平均水质可满足地表 V 类水标准;张勤等^[5]通过降雨资料得到年径流总量控制率和降雨深度的关系,认为年径流总量控制率为 50% 对应的控制深度应为 9.7 mm。但上述方法对污染物在径流中的输送规律考虑不足。此外,调蓄设施的调蓄量大小还与调蓄设施在排水系统中的位置、管道系统的性能等因素有关,从而使得工程的科学决策较为复杂。

本文利用反映径流与污染负荷函数关系的质量冲刷曲线,通过分析并利用降雨事件中污染物负荷随径流的变化规律,从而确定调蓄规模;在此基础上辅以多属性决策模型探究调蓄设施的布局对径流污染控制效果等的影响,明晰不同调蓄方案的综合效益,并对调蓄设施的布局进行优化,以期在实际工程提供参考。

1 研究方法

1.1 质量冲刷曲线

质量冲刷曲线是描述一场降雨事件的径流持续过程中,污染物的累积输送比 L_T 随径流的累积输送比 F_T 变化规律的曲线^[6]。根据部分事件平均浓度 (part event mean concentration, PEMC) 的概念 (指径流持续时间内 T 时刻径流已输送的污染物总质量 M_T 与已输送的径流量 V_T 的比值), 径流持续过程中 T 时刻的 L_T 、 F_T 以及无量纲径流污染物浓度 H_T 可表示为

$$L_T = \frac{M_T}{M} = \frac{\int_0^T W_t Q_t dt}{M} \quad (1)$$

$$F_T = \frac{V_T}{V} = \frac{\int_0^T Q_t dt}{V} \quad (2)$$

$$H_T = \frac{\Delta L_T}{\Delta F_T} \quad (3)$$

式中: W_t 为 t 时刻径流中的污染物浓度; Q_t 为 t 时刻径流量; M 为径流持续时间内污染物的总量; V 为径流持续时间内总流量。

径流持续时间内有若干组 (L, F) 数对, 以 F 为横坐标、 L 为纵坐标作图即可得无量纲质量冲刷曲线, 简称 $M(V)$ 曲线。 H_T 也是曲线斜率, 若其大于 1 说明该点径流具有冲刷效应, 否则反之。排水系统节点的 $M(V)$ 曲线表现了径流持续时间内过流断面的污染物负荷基于径流量的分布特征, 利用它可确定某固定比例的污染物负荷所对应的径流量的比

例。以反映研究区域降水特征的设计降雨为基础, 得出相应径流事件的质量冲刷曲线并进行合理分析, 可确定调蓄设施的调蓄规模。

SWMM 是由美国环境保护署开发的分布式离散时间模拟的动态降雨-径流模型, 可以计算并记录当前时间步长的所有系统变量。提取模拟结果中每个时间步长的流量和污染浓度, 依据式 (1) (2) 进行积分得到若干组 (L, F) 数对, 从而可得 $M(V)$ 曲线。

1.2 调蓄模拟

SWMM 集成了污染物累积 (线性累积、幂累积、指数累积、饱和累积) 模型、径流冲刷 (指数冲刷、性能曲线冲刷、事件平均浓度冲刷) 模型及污染物在管渠系统中的迁移模型 (串联水箱模型), 近年来被广泛应用于雨污分流改造、海绵化方案的制订与评估、黑臭水体治理等领域^[7-11], 在我国适用性较好, 可作为本研究的模拟基础。

1.2.1 初始调蓄模拟

绘制研究区域排放口节点的 $M(V)$ 曲线, 挖掘和分析曲线的特征, 制定研究区域的径流污染控制策略, 确定调蓄设施的规模。本研究模拟地下截留式调蓄设施, 其设计水位线位于管道下方以保证径流顺畅流入; 其运行模式为截留前期污染水平高的径流, 满容后径流不再进入调蓄设施, 通过正常路径输送。在模型的相应位置添加蓄水模块进行模拟, 模拟完成后查验是否实现了预期的径流污染控制目标。

1.2.2 优化调蓄模拟

a. 优化目的。控制径流污染的调蓄工程的落地, 受限于工程规模和当地建设条件。分散式布置调蓄设施在实现径流污染控制目标的同时允许建设方灵活应对各地的建设条件; 合理的布局还能降低发生内涝的风险。在雨水管网系统中分散式布置调蓄设施, 布置方案必然不止 1 种。优化的目的是从多种方案中筛选出能体现以径流污染控制为主兼顾内涝削减的综合效益的方案。

b. 优化手段。多属性决策是指考虑多个属性, 通过已有的决策信息对多个备选方案进行择优, 主要步骤包括: 备选方案、属性集合、决策矩阵、属性权重、排序择优^[12]。多属性决策模型可指导决策者按多重价值、多种属性在相互对抗的方案中进行选择, 有利于数据化各方案的综合效益, 强化决策的科学合理。多属性决策模型贴近实际, 被广泛应用于工程设计、军事及招聘等领域。对于备选方案向量 $X^T = (X_1, X_2, \dots, X_{N_1})^T$ 中元素的若干类属性, 选择响应决策目标的类构成属性集合 $P = (P_1, P_2, \dots,$

P_{N_2})。各方案各类属性值的集合构成决策矩阵 $R = (r_{ij})_{N_1 \times N_2}$ 。决策矩阵中 i 行 j 列的元素代表方案 X_i 的 P_j 属性值 (N_1 为备选方案数, N_2 为属性个数)。属性权重向量 $W^T = (W_1, W_2, \dots, W_{N_2})^T$ 代表各类属性对决策目标的重要性, 可通过主观赋权法 (专家调查法、层次分析法等) 或客观赋权法 (熵值法、主成分分析法等) 确定。将决策矩阵和属性权重包含的信息进行集合, 得到 N_1 行 1 列的加权算术平均算子矩阵。矩阵中元素的计算公式为

$$S_{1j} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{iN_2}) W^T \quad (4)$$

将矩阵中元素按大小排序择优, 最大算子所对应的方案即为优选方案。

2 实例应用

2.1 研究区域建模

2.1.1 研究区域概况

选取山西省北部某县的一个独立的排水分区作为研究区域, 该县年均降水量为 463 mm, 研究区域总汇水面积为 180.8 hm², 区域内雨水管网设计重现期为 2 a, 主干管由东向西敷设排入河道。以排水分区、管网资料及用地规划为基础, 建立 SWMM 模型 (图 1)。概化情况为: 节点 29 个, 包括 1 个排放口; 管道 28 段; 子汇水分区 28 个, 面积为 2.88 ~ 13.57 hm²。

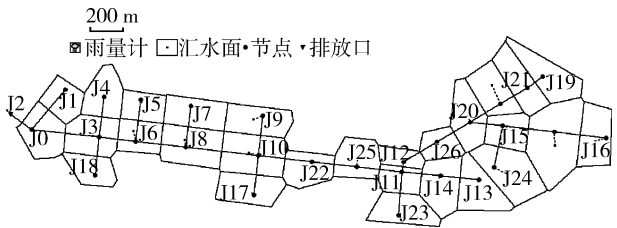


图 1 排水分区
Fig.1 Drainage zone

2.1.2 模型参数设置

雨水入渗采用霍顿入渗模型, 地表污染物的累积和冲刷分别选用饱和累积模型和指数冲刷模型。把与各种污染物均具有较强相关性的 TSS 作为目标污染物, 利用动态波选项和串联水箱模型计算节点及管道的水力水质情况。面积、坡度、节点高程等确定性参数通过当地规划资料获得, 其余参数根据实际情况参考用户手册取值。综合径流系数法^[13]是通过调整参数使径流系数模拟值与城市综合径流系数相等的模型校准方法, 在缺少校准数据的情况下满足了模型的使用要求。校准后透水地表曼宁系数为 0.01, 不透水地表曼宁系数为 0.1, 管道曼宁系数为 0.01, 土壤初始导水率为 50.8 mm/h, 土壤饱和导

水率为 3.81 mm/h, 透水地表洼地蓄水 1.6 mm, 不透水地表洼地蓄水 6.4 mm。根据国内外同类型研究和用户手册^[14-15], 确定 TSS 各项水质参数: 降雨中污染物质量浓度为 10 mg/L, 路面最大累积量为 200.1 kg/hm², 路面累积半饱和常数为 9 d⁻¹, 路面冲刷系数为 0.007, 路面冲刷指数为 1.77, 屋面最大累积量为 127.6 kg/hm², 屋面累积半饱和常数为 10 d⁻¹, 屋面冲刷系数为 0.008, 屋面冲刷指数为 1.73, 绿地最大累积量为 79.6 kg/hm², 绿地累积半饱和常数为 10 d⁻¹, 绿地冲刷系数为 0.005, 绿地冲刷指数为 1.37。

2.1.3 降雨过程数据

对山西省某县 2010—2017 年 732 场次降雨事件进行统计分析, 结果见表 1。由表 1 可见, 大雨到特大暴雨的发生频率、累积雨量及雨量占比均垫底, 以大雨到特大暴雨为标准考虑径流污染的控制是不经济的。该县以中小降雨为主, 中雨对地表的冲刷作用强, 累积雨量多, 因此本文以中雨造成的径流污染为研究对象。该县中雨事件以 10 ~ 13 mm 降水量为主, 将 13 mm 作为设计降水量, 利用芝加哥雨型, 结合该地的暴雨强度公式对其进行雨量分配, 经计算对应重现期为 0.33 a, 历时 120 min 的降雨事件, 进行雨量分配后的小时平均降水量为 6.5 mm/h, 降雨等级仍为中雨。为以合适的尺度表现调蓄设施暴雨情景下的性能, 使用的设计重现期不宜过大或过小, 本文选择的重现期为 10 a。

表 1 某县 2010—2017 年降雨统计结果

Table 1 Statistical results of rainfall in the county from 2010 to 2017

降雨等级	1 h 降水量/mm	24 h 降水量/mm	频数	频率	该型雨量	占比/%
小雨	≤2.5	≤10	620	0.85	1 369	37
中雨	(2.5, 8]	(10, 25)	94	0.13	1 548	42
大雨	(8, 16)	[25, 50)	15	0.02		21
暴雨	≥16	≥50	3	0	789	0
大暴雨		[100, 200)	1	0		0
特大暴雨		≥200	0	0	0	0
总计			733	1	3 706	100

注: 降水等级引自 GB/T 28592—2012《降水量等级》。

基于某县的暴雨强度公式与芝加哥降雨过程模型推求重现期为 0.33 a 与 10 a, 降雨历时 120 min 的降雨过程线, 雨峰系数取 0.4, 降雨过程线见图 2。

2.2 初始调蓄模拟

2.2.1 模拟结果

输入 0.33 年一遇及 10 年一遇的降雨过程数据, 得到降雨重现期为 0.33 a 的情况下, 入河流量、节点溢流总量、径流总量、入河 TSS 负荷、入河径流 TSS 平均质量浓度、入河径流 TSS 最高质量浓度分

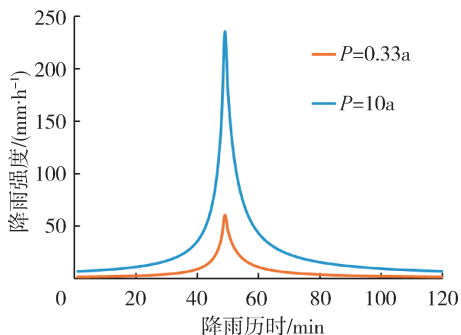


图2 某县重现期为0.33a及10a的降雨过程线
Fig.2 Rainfall hydrograph with return periods of 0.33 a and 10 a in the county

质有较大的影响,这与已有的研究结果^[16,24-25]一致。值得注意的是,虽然潭江上、中、下游有着影响水质166 mg/L和241 mg/L;重现期为10 a的情况下,入河流量、节点溢流总量、径流总量、入河TSS负荷、入河径流TSS平均质量浓度、入河径流TSS最高质量浓度分别为 $57 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $62.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9.7 \times 10^3 \text{ kg}$ 、169 mg/L和523 mg/L。模拟结果显示重现期为0.33 a时系统未发生溢流,重现期为10 a时系统发生溢流。可见,两种重现期情况下管网系统均输送了大量TSS负荷进入河道,重现期为10 a的降雨冲刷强度高,入河TSS总负荷、TSS平均浓度及浓度峰值均大于重现期为0.33 a的情况。

2.2.2 初始调蓄方案

重现期为0.33 a降雨代表某县的典型降雨,以其模拟数据为标准确定调蓄规模,选择系统末端节点J0作为研究对象,其 $M(V)$ 曲线及部分特征点坐标如图3所示。图中各点坐标: $a(0,0)$, $b(0.04,0.03)$, $c(0.09,0.09)$, $d(0.60,0.76)$, $e(1,1)$, $f(0.40,0.53)$, $g(0.20,0.24)$ 。

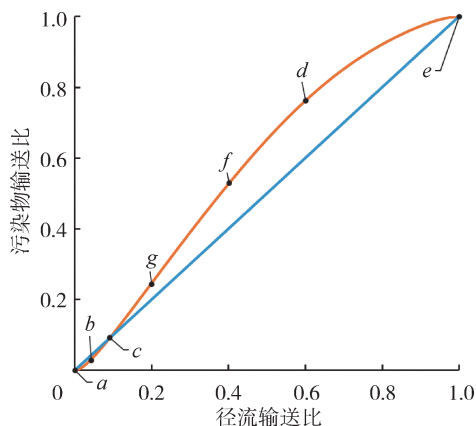


图3 J0节点 $M(V)$ 曲线及特征点坐标

Fig.3 $M(V)$ curve of J0 node and characteristic point coordinates

ab 段与 de 段分别位于 45° 线下方和上方,曲线

斜率均小于1,说明该时段径流TSS质量浓度均低于166 mg/L,冲刷效应弱; bc 段与 cd 段分别位于 45° 线下方与上方,曲线斜率均大于1,说明该时段径流TSS质量浓度均高于166 mg/L,冲刷效应强; f 点处 L/F 值最大,整体冲刷效应最大,说明该段径流PEMC最大,经计算为218 mg/L; g 点出现径流污染物质量浓度峰值,为241 mg/L,此时曲线斜率最大,达1.45,该点之前径流的污染物质量浓度持续升高,该点之后径流的污染物质量浓度持续降低。

综上, d 点之前的径流(ab 段可以忽略)冲刷效应强,对污染物的输送力强,这部分径流以较高的效率输送了大量污染负荷,因此拟对 ad 段60%的径流所对应的77%的污染物负荷进行控制,其对应的径流量和污染物负荷分别为 5780 m^3 、1.15 t。

在SWMM中添加容积等于 5780 m^3 的蓄水模块如图4所示。模拟结果显示重现期为0.33 a时排放口TSS总负荷由 $1.5 \times 10^3 \text{ kg}$ 降至350 kg,径流污染控制率达77%,符合预期的截留控制目标,其对应的调蓄深度 D 为5.32 mm。重现期为10 a时截留了TSS负荷2460 kg,控制了该重现期下10%的径流对应的25%的污染负荷;此外,重现期为10 a时的节点溢流总量比未设调蓄设施时增加了 400 m^3 ,可能是因为调蓄设施进水时对J0-J3管段的水位顶托使其提早进入过载状态,进一步影响了上游管道的径流输送进程,导致系统上游节点的溢流量增加。

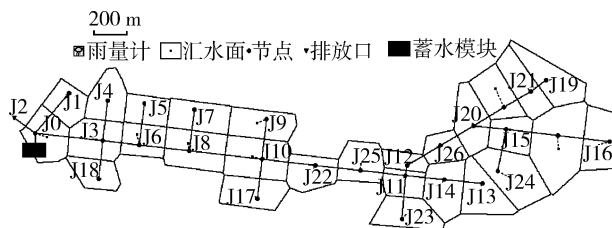


图4 雨水径流污染末端控制模块

Fig.4 Terminal control module of rainwater runoff pollution

2.3 优化调蓄模拟

2.3.1 备选方案

单个节点的调蓄设施容积过大使得用地压力激增,阻碍工程建设。因此尝试将调蓄设施分散式布置进行优化调蓄。分散式布置调蓄设施所选择的节点应对应城市中可利用的公共绿地空间,同时尽量选择容易发生溢流的节点,可使得调蓄设施在控制径流污染的同时提供防涝效益。

根据2.2.1的模拟结果,共有13个溢流节点分布在上游和中游。上游主要溢流节点为J20、J28、J27和J15;中游主要溢流节点为J10、J8、J9和J7。其中节点J20与J10在各自区域内溢流量最大,两

节点周围存在可利用的绿地。最终选择节点 J20、J10 及 J0,形成 5 种布局方案。各方案中各节点调蓄规模见表 2。

表 2 优化调蓄方案调蓄规模

Table 2 Regulation and storage scale of optimized scheme

单位:m³

方案	J0 调蓄规模	J10 调蓄规模	J20 调蓄规模	总规模
1	5 780			5 780
2	4 409		1 734	6 143
3	3 162	3 784		6 946
4	2 928	2 428	1 734	7 090
5		2 428	1 734	4 162

2.3.2 属性集合

令属性集合 $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6\} = \{ \text{重现期 } 0.33 \text{ a 下径流污染控制率, 调蓄总规模, 节点平均调蓄规模, 重现期 } 10 \text{ a 下溢流量, 重现期 } 10 \text{ a 下溢流节点数, 重现期 } 10 \text{ a 下径流污控制率} \}$ 。 P_1 反映径流污染控制效果; P_2 反映方案工程量及建设成本; P_3 反映各个节点的建设压力大小; P_4, P_5, P_6 反映各方案在高重现期降雨下的径流污染控制效益和溢流削减效益。

2.3.3 决策矩阵

基于 SWMM 模型的模拟结果得到决策信息见表 3。表 3 中各属性值的量纲和意义不同,对不同属性值进行比较和加权需去除量纲的限制。因此对表中各值进行量纲归一化处理,使其映射到 $[0, 1]$ 区间。

表 3 决策信息

Table 3 Decision information

方案	$P_1/\%$	P_2/m^3	P_3/m^3	P_4/m^3	$P_5/\text{个}$	$P_6/\%$
1	77	5 780	5 780	6 000	8	25
2	82	6 143	3 072	5 100	8	21
3	87	6 946	3 473	6 000	8	31
4	88	7 090	2 363	7 400	11	37
5	52	4 162	2 081	5 200	8	14

$P_1、P_6$ 为效益型属性,其值越大越好; $P_2、P_3、P_4、P_5$ 为成本型属性,其值越小越好。对其进行归一化处理,处理后的归一化决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.69 & 0.45 & 0 & 0.61 & 1 & 0.48 \\ 0.83 & 0.32 & 0.73 & 1 & 1 & 0.3 \\ 0.97 & 0.05 & 0.62 & 0.61 & 1 & 0.74 \\ 1 & 0 & 0.92 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0.96 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3.4 属性权重

记属性向量 $P = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ 的属性

权重矩阵为 $W^T = [W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6]^T$, 满足 $\sum_{i=1}^6 W_i = 1$ 。利用主观赋权法确定各属性权重,该过程由领域专家和具有丰富设计经验的工程师完成。结合多方意见并通过一致性检验得到的成对比较矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 4 & 7 & 7 & 7 \\ 0.25 & 1 & 3 & 5 & 5 & 5 \\ 0.25 & 0.33 & 1 & 5 & 5 & 5 \\ 0.14 & 0.2 & 0.2 & 1 & 2 & 5 \\ 0.14 & 0.2 & 0.2 & 0.5 & 1 & 0.33 \\ 0.14 & 0.2 & 0.2 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

注:第 i 行第 j 列元素表示 P_i 相对于 P_j 的重要性程度:1 为同等重要,3 为稍微重要,5 为明显重要,7 为强烈重要,9 为极端重要;2、4、6、8 为过渡性中值;元素 ij 表示元素 ji 的倒数。

求解矩阵 U 最大特征值对应的特征向量即可得到 P 对决策目标的权重矩阵 $W^T = (0.40, 0.08, 0.08, 0.20, 0.20, 0.05)^T$ 。

2.3.5 排序择优

依据式 (5) 计算得到加权算术平均算子矩阵 $S = (0.65, 0.83, 0.79, 0.52, 0.55)$ 。5 个方案算子大小顺序为:方案 2、方案 3、方案 1、方案 5、方案 4。故合理的调蓄设施布设方案为方案 2。方案 2 总调蓄规模 $6\,143\text{ m}^3$, 对应调蓄深度 D 为 5.66 mm ; 总规模相比传统的末端控制方案 (方案 1) 增加了 363 m^3 , 即增加了 6.3% ; 节点平均调蓄规模减少了 $2\,708\text{ m}^3$, 即减少了 47% ; 重现期为 0.33 a 时径流污染控制效果提升了 5% ; 重现期为 10 a 时, 除了对径流污染的控制外, 兼顾降低内涝风险的综合效益也格外重要, 从此角度出发, 虽然高重现期下方案 2 的径流污染控制率相比传统方案降低了 6% , 但其削减了 5.4% 节点溢流量, 而不是像方案 1、3、4 一样令系统的溢流分别增加了 8% 、 8% 和 32% 。

3 结 论

a. $M(V)$ 曲线反映了径流中污染物负荷基于径流量的分布特征, 可通过分析径流对污染物的输送效率, 合理确定污染控制目标及调蓄规模。对排水系统中不同节点处的 $M(V)$ 曲线进行研究, 可以确定不同排水区域对应的调蓄规模, 从而形成多种调蓄方案以供选择。

b. 径流污染控制设施的布置应尽量合理, 否则不仅会导致径流污染控制效益的降低, 还可能影响管网系统正常水力状态, 加剧高重现期降雨时的内涝。

c. 多属性决策模型可以糅合并量化决策者在

工程建设中多方面的考量,考虑到所有因素的群体效用的同时平衡了个别属性的劣势,使得最终的方案在综合效益上达到最佳。

d. 针对控污调蓄池的基于质量冲刷曲线和多属性决策模型的设计优化方法可用于各类模型;应用时进一步加强水文水质参数的率定可使优化设计效果更有效地传递到实际工程中。

参考文献:

[1] 周建军,张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):1-12. (in Chinese))

[2] 李光. 某县城中心城区初期雨水调蓄池设计及环境效益研究[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(8): 165-167. (LI Guang. Design and environmental benefits of initial rainwater storage pool in central city of a county [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(8): 165-167. (in Chinese))

[3] CHOW M F, YUSOP Z. Sizing first flush pollutant loading of stormwater runoff in tropical urban catchments [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(10): 4047-4058.

[4] 李连文,詹健,姜章泽君,等. 基于径流污染控制目标为目的的分流制初期雨水调蓄池容积确定[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 17-20. (LI Lianwen, ZHAN Jian, JIANG Zhangzejun, et al. Determination of volume of initial rainwater storage pool for the diversion system considering control objective of runoff pollution [J]. Water Resources and Power, 2020, 38(1): 17-20. (in Chinese))

[5] 张勤,刘阳. 滇池流域初期雨水的截流量确定方法研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13): 115-118. (ZHANG Qin, LIU Yang. Determination of interception capacity of initial rainwater in Dianchi lake basin [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(13): 115-118. (in Chinese))

[6] GEIGER W. Flushing effects in combined sewer systems [C]//Cembrowicz R G, Krauter G E. The 4th International Conference on Urban Drainage. Lausanne: IWA, 1987: 40-46.

[7] 王石,陈丽媛,孙翔,等. 从“大截排”到清源和低影响开发:基于水质目标约束的情景模拟与规划[J]. 中国环境科学, 2017(10): 383-392. (WANG Shi, CHEN Liyuan, SUN Xiang, et al. From rainwater and sewage interception to separation system combined with low impact development reconstruction in urban built-up area: a water quality constrained scenario stimulation and programming [J]. China Environmental Science, 2017(10): 383-392. (in Chinese))

[8] 吴海春,胡爱兵,任心欣. 基于 SWMM 模型的 LID 措施

年 SS 总量去除率计算[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 9-12. (WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 9-12. (in Chinese))

[9] 朱寒松,董增川,曲兆松,等. 基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))

[10] 詹志威,李孟,金溪. 基于 SWMM 模型的合流制管道溢流污染控制系统模拟[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 423-431. (ZHAN Zhiwei, LI Meng, JIN Xi. Simulation of combined sewer overflows pollution control system based on SWMM [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 423-431. (in Chinese))

[11] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等. 基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))

[12] 姜启源. 多属性决策中几种主要方法的比较[J]. 数学建模及其应用, 2012, 1(3): 16-28. (JIANG Qiyuan. The comparative study of several main methods in the applications for multiple attribute decision making [J]. Mathematical Modeling and Its Application, 2012, 1(3): 16-28. (in Chinese))

[13] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水, 2009, 45(11): 213-217. (LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoff model based on runoff coefficient [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 45(11): 213-217. (in Chinese))

[14] ROSSMAN L, HUBER W. Storm water management model reference manual volume III: water quality [M]. Washington, D. C.: Water Supply and Water Resources Division, 2016.

[15] 蔡甜,詹健,肖存艳,等. 基于 SWMM 模型的不同气象条件下城市雨水径流污染特性分析[J]. 中国农村水利水电, 2017, (11): 63-67. (CAI Tian, ZHAN Jian, XIAO Cunyan, et al. An analysis of the pollution characteristics of urban rainwater runoff based on SWMM model under different weather conditions [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (11): 63-67. (in Chinese))