

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.020

考虑地块汇水不确定性的管网排水可靠性研究

程玉林, 刘 硕, 姚玉健, 韩宏泉, 王 通, 方小月, 曹玉鑫
(北京市市政工程设计研究总院有限公司 水资源与环境院, 北京 100082)

摘 要: 地块实际汇水方向的不确定性和汇水单元划分方法的差异性,导致模型构建时汇水单元面积划分的不准确性,进而影响模型评估结果。通过考虑地块汇水的不确定性,以汇水单元面积为不确定性参数,基于SWMM求解函数库和Monte Carlo随机模拟方法计算了管网和检查井的可靠度。结果表明,相对于确定性工况,考虑地块汇水的不确定性能够识别出潜在的风险检查井,也能够识别出实际风险程度较小的检查井,对模型评价结果影响较大,建议进行模型评估时考虑地块汇水的不确定性。

关键词: 排水模型; 参数不确定性; 地块汇水; 可靠度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0131-06

Drainage Reliability of Pipe Network Considering Uncertainty of Plot Catchment

CHENG Yu-lin, LIU Shuo, YAO Yu-jian, HAN Hong-quan, WANG Tong,
FANG Xiao-yue, CAO Yu-xin

(Institute of Water Resources and Environment, Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: The ambiguity in determining the actual catchment direction of the plot, coupled with variations in the methodology for dividing catchment units, results in imprecise delineation of catchment unit areas during modeling. This, in turn, compromises the accuracy of the model evaluation outcomes. The SWMM solution library and the Monte Carlo stochastic simulation method were employed to evaluate the reliability of the pipe network and manholes by incorporating the uncertainty of plot catchment, with the unit area of catchment serving as the uncertainty parameter. Compared to deterministic conditions, incorporating the uncertainty of plot catchment allowed for the identification of manholes with potential risk, as well as those with lower actual risk. This consideration had a significant impact on model evaluation outcomes. Therefore, it is recommended that the uncertainty of plot catchment be taken into account in the model evaluation.

Key words: drainage model; parameter uncertainty; plot catchment; reliability

近年来城市积水现象愈发严重,暴露了现有排水管网应对降雨荷载的脆弱性。《室外排水设计标

准》(GB 50014—2021)也规定:当汇水面积大于2 km²时,应考虑区域降雨和地面渗透性能的时空分

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001403)

通信作者: 程玉林 E-mail: 1965319618@qq.com

布不均匀性和管网汇流过程等因素,采用数学模型法确定雨水设计流量。然而在实际建模过程中,由于数据量庞大,汇水单元往往依据检查井位置进行批量划分,无法准确反映地块雨水的实际汇水方向,受人力、物力限制,又无法逐一勘察核实。

Thorndahl等^[1]考虑了降雨时间、峰值、深度的不确定性;Gouri等^[2]考虑了管渠尺寸、坡度、粗糙系数的不确定性;Tung^[3]考虑了径流系数、降雨的不确定性;张子贤等^[4]考虑了管道直径、坡度、粗糙系数的不确定性;李芊等^[5]考虑了管径、铺设偏差、粗糙系数的不确定性;吴珊等^[6]考虑了降雨、产汇流、管网水动力全过程参数的不确定性。可见,模型参数的不确定性已经引起国内外学者的广泛关注,但对于地块汇水的不确定性仍然没有引起重视。

1 地块汇水不确定性分析

1.1 地块汇水的不确定性

在实际建模过程中,往往无法准确确定地块的汇水流向。如某地块A周围有8个检查井,而地块A中产生的雨水径流究竟如何分配到各检查井是建模面临的基本问题。泰森多边形划分法是目前排水模型构建常用的汇水单元划分方法,划分结果是8个检查井均收集地块A中的一部分雨水,而实际汇流过程中可能是汇入到8个检查井,也可能只汇入其中的1个或几个检查井,且汇入检查井的水量分配也存在不确定性。上述不确定性因素导致模型构建过程中汇水单元面积的不确定性,可以从该角度分析地块汇水的不确定性。在处理不确定性问题时,对于地面坡度较陡或汇水流向较为确定的地块,应根据实际调查情况,按照确定性参数考虑。

1.2 不确定性参数

汇水单元面积是本研究中的不确定性参数。对于模型不确定性参数的随机分布类型,Vezaro等^[7]和Korving等^[8]分别假定参数服从均匀分布和正态分布,Sun等^[9]假定参数服从均匀分布,赵子成等^[10]假定参数服从正态分布。本研究分别假定汇水单元面积参数服从均匀分布和正态分布。

2 可靠性模型计算原理与求解

2.1 可靠性模型计算原理

根据结构可靠度理论,设 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为影响系统状态的 n 个随机变量, $D(X)$ 为判定系统状态的功能函数, $I(X)$ 为系统的抵抗能力, $O(X)$ 为外部荷载下的系统反应,其关系见式(1)。

$$D(X) = I(X) - O(X) \quad (1)$$

当 $D(X)>0$ 时,系统为可靠状态;当 $D(X)=0$ 时,系统为临界状态;当 $D(X)<0$ 时,系统为失效状态。

设 $f(X)$ 为 X 的联合概率密度函数,则系统可靠度见式(2)。

$$P_r = \text{Prob} \{D \geq 0\} = \int_{D \geq 0} f(X) dX \quad (2)$$

本研究中,检查井冒水即产生积水现象,也意味着超过了管网系统的承受能力,存在安全风险。此时 $I(X)$ 为各检查井地面高程, $O(X)$ 为降雨条件下各检查井液位, $f(X)$ 为SWMM求解函数库。

2.2 模型求解

由于 $f(X)$ 为高度非线性函数,无法直接求解 P_r 值。根据伯努利大数定理,当试验次数足够大时,时间发生的频率与概率接近。本研究采用Monte Carlo模拟求解 P_r 的估计值,设 N 为抽样次数,第 k 次抽样二元取值的示性函数为 $I(f_{\text{node}}(x(k)) \geq 0)$,取值为0或1,当 $f_{\text{node}}(x(k)) \geq 0$ 时, $I=1$;否则, $I=0$,也即检查井冒水时 I 取0,反之取1。

$$\hat{P}_{r,\text{node}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [I(f_{\text{node}}(x(k)) \geq 0)] \quad (3)$$

具体模拟计算步骤如下:

Step1:建立排水管网水力模型,存储文件格式为.inp。

Step2:确定需进行不确定性分析的地块。根据现有资料和现场实际踏勘情况,对汇水流向较为确定的地块,按照确定性参数考虑;对其余地块汇水进行不确定性分析。

Step3:确定变量取值范围与服从的分布类型。

Step4:参数变换与存储文件更新。在服从变量随机分布类型条件下,产生随机数 $x(i)=(x_1, x_2, \dots, x_n)$,替换.inp中变量参数,形成新的.inp存储文件。本研究中变量为汇水单元面积,但汇水单元面积的变化又不能导致研究区域总面积的变化,且一个汇水单元面积的变化只能影响其相邻汇水单元面积的变化,导致该参数变化步骤较一般变量更为复杂。具体操作方式,首先设置汇水单元面积变化幅度 $\zeta \in [0, 1]$,然后在 ζ 服从的随机数分布类型条件下,产生与不确定性分析汇水单元相同个数的随机数 $\alpha \in [0, \zeta]$,按照顺序每个随机数对应一个汇水单元面积进行乘法运算,运算结果为汇水单元面积增量 $T(X)$,由于研究区域总面积为固定值,每个汇水

单元的面积增加(或减少),就意味着相邻汇水单元面积的减少(或增加),因此首先需要判断每个汇水单元的邻近汇水单元有哪些,拟定汇水单元面积的增量(或减少量)平均由相邻汇水单元减去(或增加),从而生成新的增量 $Q(X)$,将 $Q(X)$ 与原汇水单元面积进行加和,生成最终随机数 $x(i)$,即为变换后各汇水单元面积值,将 $x(i)$ 替换.inp中汇水单元面积变量参数,形成新的.inp存储文件。

Step5:模拟计算与结果统计。以Step2中新生成的.inp存储文件为输入文件,调用SWMM5.dll求解函数库,读取rpt报告中各检查井的液位 $O(X)$,根据式(1)~(3)统计各检查井的可靠度。

Step6:终止条件判断。根据式(4)计算各检查井可靠度估计值的变异系数,当满足最小精度 $[\delta]$ 要求时即停止运算,输出各检查井可靠度估计值。如果不满足,则重复Step3~Step5。也可以通过设置满足最小精度要求时的运算次数 k 值来终止计算。

$$\hat{\delta} = \frac{\sqrt{\hat{V}(\hat{E}[G(X)])}}{\hat{E}[G(X)]} = \frac{1}{\hat{E}[G(X)]} \sqrt{\frac{\hat{V}(E[G(X)])}{N}} \quad (4)$$

模拟流程如图1所示。

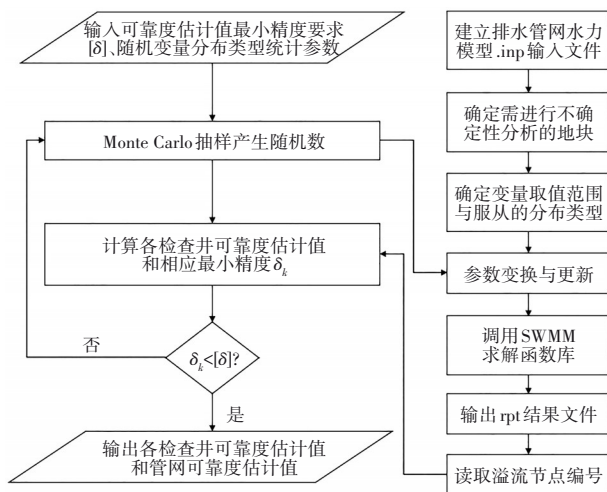


图1 模型求解流程

Fig.1 Flow chart of model solving

3 实例分析

以常年积水现象严重的某建成区排水管网为例,研究地块汇水不确定性对模拟结果的影响。区域总面积为49 hm²;按照最新暴雨强度公式核算,管

网设计重现期低于1年一遇;管网概化为27个检查井、27根管道,管道总长度为2.1 km;区域共有1个出水口,高程在河道20年一遇洪水位以上,排口为自由出流。降雨过程线根据当地暴雨强度公式和芝加哥雨型拟合生成。模型参数根据排水标准、模型手册取经验值。

3.1 模拟工况设置

本研究设置4种模拟工况。工况一:汇水单元面积按照泰森多边形划分结果输入,不进行变换,此工况代表一般性建模评估方法,为确定性工况。工况二:考虑地块汇水的不确定性,分别按照服从均匀分布和正态分布类型进行模拟计算管网和检查井的可靠性,分析不确定性参数分布类型导致可靠性模型计算结果的差异性。工况三:不确定性参数变化幅度 ζ 分别为5%、10%、15%、20%时,分别模拟计算检查井和管网的可靠性,分析 ζ 对可靠性模型模拟结果的影响。工况四:在1、3、5、10、20年一遇设计降雨条件下,分别模拟计算管网和检查井的可靠性,分析降雨重现期对可靠性模型模拟结果的影响。

3.2 模拟结果的收敛性

设定 Monte Carlo 模拟次数为5 000次,统计后发现各检查井可靠度变异系数均在0.05以下,收敛性较好。图2展示了3年一遇设计降雨条件下,当 ζ 取10%时,各检查井可靠度估计值收敛情况。

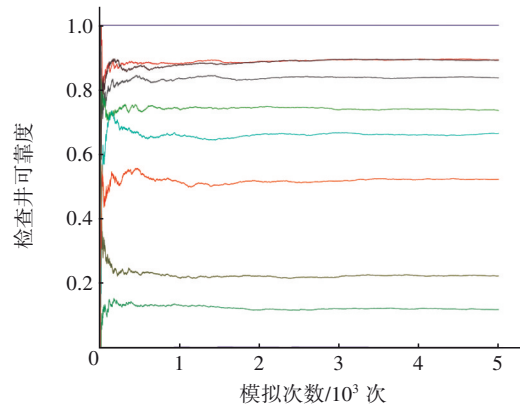


图2 检查井可靠度的收敛性

Fig.2 Convergence of manhole reliability

3.3 模拟结果统计与分析

① 工况一

模拟工况一的结果表明,在1、3、5、10、20年一遇设计降雨条件下,分别有14、20、20、21、22个检查井发生冒水。

② 工况二

以汇水单元面积为不确定性参数,分析参数不同分布类型对管网和检查井可靠度计算结果的影响,其中正态分布的均值参数和均匀分布的区间中值均取自工况一中确定性工况汇水单元面积参数,对于正态分布变量的标准差,假定该汇水单元面积参数取值范围为其 3σ 界限,即随机变量有99.74%的可能性落在参数取值范围内。当 ζ 分别为5%、10%、15%、20%时,采用均匀分布和正态分布模拟计算管网的可靠度,结果如图3(a)所示。可知,分布类型对管网可靠度的影响值最大为0.015,影响百分比为7.20%。

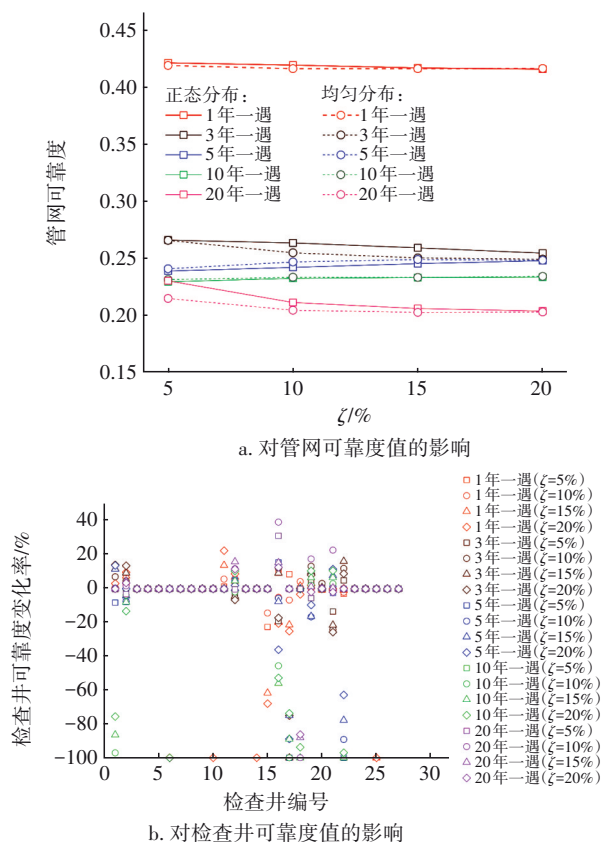


图3 汇水单元面积参数分布类型对管网和检查井可靠度的影响

Fig.3 Influence of parameter distribution type of catchment area on reliability of pipe network and manholes

参数分布类型对检查井可靠度的影响如图3(b)所示。相对于均匀分布,采用正态分布计算出的检查井可靠度变化率绝对值最大可达100%,且变化较大的多为负值,这意味着均匀分布更能识别出可靠度较低的风险检查井。综上所述,参数的分布类型对管网和检查井可靠度计算结果有重要影响,在进行参数不确定性分析时,建议考虑均匀分布类型,保守运算,确保可靠度较低的风险检查井被识别出来。

③ 工况三

采用工况二中的模拟设置,汇水单元面积参数抽样时选择均匀分布类型。分析汇水单元面积变化幅度 ζ 对管网可靠度的影响,结果如图4所示。可以看出,基本上 ζ 越大,管网可靠度越低,其中在5年一遇设计降雨条件下反而升高。分析5年一遇设计降雨条件下可靠度变化异常的检查井,结果如图5所示。可以发现,异常点均位于管网中部,容易受上下游拓扑关系的影响。 ζ 对检查井可靠度的影响如图6所示。可以发现,随着 ζ 值的增大,部分检查井可靠度呈上升趋势,但大多数检查井可靠度基本呈下降趋势。

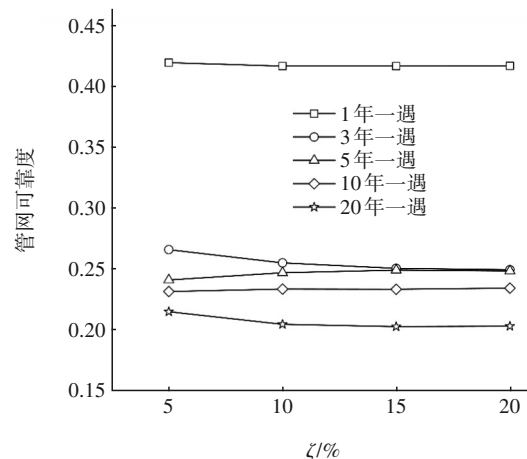


图4 ζ 对管网可靠度的影响

Fig.4 Influence of ζ on reliability of pipe network

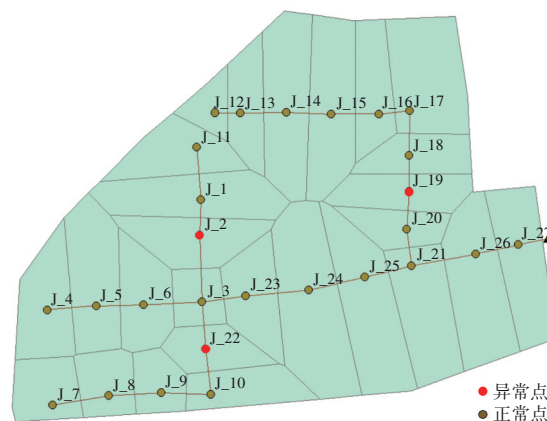


图5 检查井可靠度变化异常点

Fig.5 Abnormal change points of manhole reliability

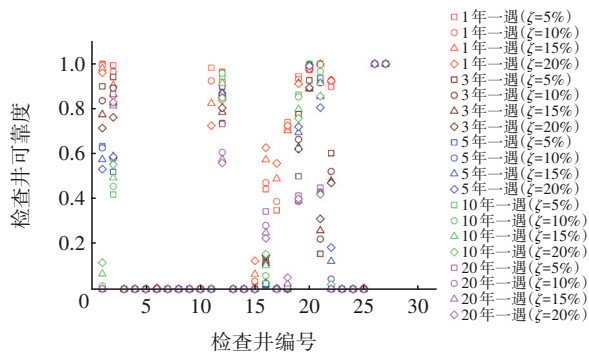


图6 ζ 对检查井可靠度的影响

Fig.6 Influence of ζ on manhole reliability

④ 工况四

采用工况二中的模拟设置,进行汇水单元面积参数抽样时选择均匀分布类型。分析重现期对管网和节点可靠度计算结果的影响。从图3(a)可以发现,随重现期提高,管网可靠度越低;从图5和图6可以发现,随重现期提高,检查井可靠度基本呈下降趋势,部分容易受上下游拓扑关系影响的节点可靠度可能出现升高现象。

为了比较参数确定性工况和不确定性工况对管网和节点可靠度评价的影响,比较了工况一和工况四的模拟结果。在1、3、5、10、20年一遇设计降雨

条件下,工况一分别有14、20、20、21、22个检查井发生冒水,而工况四可靠度小于1的个数统计结果见表1。可以看出,不确定性工况识别出的冒水检查井更多,这意味着考虑地块汇水的不确定性,能够识别出确定性工况条件下的潜在风险检查井。

表1 可靠度小于1的检查井个数统计结果

Tab.1 Statistics results of manholes number with reliability less than 1 个

项目	1年一遇	3年一遇	5年一遇	10年一遇	20年一遇
$\zeta=5\%$	24	25	25	25	25
$\zeta=10\%$	24	25	25	25	25
$\zeta=15\%$	24	25	25	25	25
$\zeta=20\%$	24	25	25	25	25

假设当工况四中检查井可靠度大于0.7时,认为检查井是可靠的;工况一中不发生冒水的检查井为可靠的。这样可以将检查井模拟结果分为4类进行比较,即:A类为工况一中可靠,且工况四中可靠度在0.7以上的;B类为工况一中可靠,但是工况四中可靠度在0.7以下的;C类为工况一中不可靠,且工况四中可靠度在0.7以下的;D类为工况一中不可靠,但是工况四中可靠度在0.7以上的。统计结果见表2。

表2 不同类别检查井个数和占比统计结果

Tab.2 Statistics results of number and proportion of manholes in different categories

项目		1年一遇		3年一遇		5年一遇		10年一遇		20年一遇	
		数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%	数量/个	比例/%
$\zeta=5\%$	A	11	85	6	86	5	62	5	83	5	100
	B	2	15	1	14	3	38	1	17	0	0
	C	14	100	19	95	19	100	20	95	22	100
	D	0	0	1	5	0	0	1	5	0	0
$\zeta=10\%$	A	11	85	6	86	5	62	5	83	5	100
	B	2	15	1	14	3	38	1	17	0	0
	C	14	100	20	100	19	100	20	95	22	100
	D	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0
$\zeta=15\%$	A	11	85	6	86	5	62	5	83	5	100
	B	2	15	1	14	3	38	1	17	0	0
	C	14	100	20	100	19	100	20	95	22	100
	D	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0
$\zeta=20\%$	A	11	85	6	86	6	75	5	83	5	100
	B	2	15	1	14	2	25	1	17	0	0
	C	14	100	20	100	19	100	20	95	22	100
	D	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0

从表2可以看出,工况一可靠检查井中,在工况四模拟结果内最高有38%的检查井是不可靠的;工

况一不可靠检查井中,在工况四模拟结果内最高有5%的检查井是可靠的。因此,有必要考虑地块汇

水的不确定性,识别真正的风险检查井和潜在的风险检查井。

4 结论

① 由于实际汇水方向的不确定性和汇水单元划分方法的差异性,导致模型中地块汇水存在一定的不确定性,可采用汇水单元面积作为不确定性参数进行管网和节点排水可靠度分析。同时,对于已掌握实际排水情况的地块应按确定性参数考虑,以提升模型分析的准确度。

② 在不确定汇水单元面积参数服从何种分布类型时,建议采用均匀分布保守计算,确保可靠度较低的风险点被识别出来。同时建议对可靠度较低风险点进行踏勘,调查地块排水情况,进一步精细划分汇水单元,提升模拟的精准度。

③ 相对于确定性工况,考虑地块汇水不确定性能够识别出潜在的风险检查井,也能够识别出实际风险程度较小的检查井。建议考虑地块汇水的不确定性,以提高对风险检查井的识别能力。

参考文献:

- [1] THORND AHL S, WILLEMS P. Probabilistic modelling of overflow, surcharge and flooding in urban drainage using the first-order reliability method and parameterization of local rain series [J]. *Water Research*, 2008, 42(1/2): 455-466.
- [2] GOURI R L, SRINIVAS V V. Reliability assessment of a storm water drain network [J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 772-779.
- [3] TUNG Y K. Effect of uncertainties on probabilistic-based design capacity of hydrosystems [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 851-867.
- [4] 张子贤,王瑞恩. 雨水管道水力设计的可靠性计算[J]. *给水排水*, 1999, 25(6): 27-30.
- ZHANG Zixian, WANG Rui'en. On the reliability of hydraulic calculation of storm sewer [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1999, 25 (6) : 27-30 (in Chinese).
- [5] 李芊,张明媛,袁永博. SWMM和蒙特卡罗法的雨水管网节点可靠性分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自*

然科学版), 2017, 36(11): 1172-1177.

- LI Qian, ZHANG Mingyuan, YUAN Yongbo. Reliability research of nodes in rainwater pipeline network based on SWMM and Monte-Carlo method [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2017, 36(11): 1172-1177 (in Chinese).
- [6] 吴珊,程玉林,侯本伟,等. 模型参数不确定性对排水管网功能状态评价的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(3): 280-292.
- WU Shan, CHENG Yulin, HOU Benwei, et al. Influence of model parameter uncertainty on the evaluation of function state of drainage network [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47 (3): 280-292 (in Chinese).
- [7] VEZZARO L, MIKKELSEN P S, DELETIC A, et al. Urban drainage models: simplifying uncertainty analysis for practitioners [J]. *Water Science & Technology*, 2013, 68(10): 2136-2143.
- [8] KORVING H, VAN GELDER P, VAN NOORTWIJK J V, et al. Influence of model parameter uncertainties on decision-making for sewer system management [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2002(7): 1361-1366.
- [9] SUN N, HONG B, HALL M. Assessment of the SWMM model uncertainties within the generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) framework for a high-resolution urban sewershed [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(6): 3018-3034.
- [10] 赵子成,禹华谦. 基于节点的既有雨水管网系统可靠度研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2012, 31(6): 1264-1268.
- ZHAO Zicheng, YU Huaqian. Reliability research based on node of existing sewer system [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2012, 31(6): 1264-1268 (in Chinese).

作者简介:程玉林(1994-),男,河南周口人,硕士,工程师,主要研究方向为城市排水、内涝防治、水环境治理等。

E-mail: 1965319618@qq.com

收稿日期: 2024-05-06

修回日期: 2024-09-18

(编辑:任莹莹)