

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.004

基于综合水力性能指数的管道排水能力评估及应用研究

梁小光^{1,2}, 贺娟³, 温卫华³, 殷乐福³, 盛旺³

(1. 福州水字节科技有限公司, 福建 福州 350108; 2. 福州城建设计研究院有限公司, 福建 福州 350001; 3. 佛山市城市规划设计研究院, 广东 佛山 528000)

摘要: 排水能力评估是排水管网系统规划、设计、运行和维护的基础。现有的水力性能指数(HPI)主要用于顺坡流动、管顶平接、无泵闸设施等简单树状管网的计算,为适应实际排水管网系统的各种复杂形态和工况,对现有算法进行改进,提出采用综合水力性能指数(CHPI)评估管道排水能力。CHPI由最大全局水力性能指数(MGHPI)、最大自身水力性能指数(MSHPI)和累积水力性能指数(AHPI)加权计算,既能反映管道自身超载程度,又能反映对上游管道超载的影响,同时还能兼顾管道排水能力在时间和空间上的变化,并可应对管道高程的突变。佛山三龙湾某片区8 km²排水管网系统的CHPI评估结果显示,CHPI在实际管网系统排水能力评估中具有很好的应用潜力。

关键词: 排水管网; 超载; 排水能力评估; 综合水力性能指数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0022-06

Drainage Capacity Evaluation of Sewer Networks Based on Comprehensive Hydraulic Performance Index and Its Application

LIANG Xiao-guang^{1,2}, HE Juan³, WEN Wei-hua³, YIN Le-fu³, SHENG Wang³

(1. Fuzhou Waterbyte Technology Co. Ltd., Fuzhou 350108, China; 2. Fuzhou City Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 3. Foshan Urban Planning and Design Institute, Foshan 528000, China)

Abstract: Drainage capacity evaluation is the basis of planning, design, operation and maintenance of sewer networks. The current hydraulic performance index (HPI) is mainly used for the calculation of simple tree sewer network that water flows along the slope and pipes is connected at the same top elevation as well as without control facilities. The current algorithm was improved to adapt various complex forms and working conditions of the actual sewer network, and the comprehensive hydraulic performance index (CHPI) was proposed to evaluate the sewer drainage capacity. CHPI is weighted by the maximum global hydraulic performance index (MGHPI), the maximum self hydraulic performance index (MSHPI) and the accumulative hydraulic performance index (AHPI), which can not only reflect the surcharge degree of the pipe itself but also reflect the impact on the surcharge degree of upstream pipe. At the same time, it can also take into account the changes of drainage capacity in time and space, and cope with the sudden change of crown elevation. The application potential of CHPI in hydraulic performance evaluation of actual sewer network was shown by taking an 8 km² sewer network in Sanlongwan area of Foshan as an example.

Key words: sewer networks; surcharge; drainage capacity evaluation; comprehensive hydraulic performance index

排水能力评估是排水管网系统规划、设计、运行和维护的基础。对于规划和设计,传统上一般采用推理公式法计算有关的水力参数^[1],但由于该方法假定水流处于恒定均匀流状态,与实际的非恒定非均匀流状态差别较大,因此,数学模型法在排水管网系统规划和设计中的应用逐渐增多^[2]。

住房和城乡建设部于2013年6月发布的《城市排水(雨水)防涝综合规划编制大纲》要求:“推荐使用水力模型对城市现有雨水排水管网和泵站等设施进行评估,分析实际排水能力”,并统计不同重现期下的管道总长度,填入“表4 现状排水管网排水能力评估”,作为管网改造的依据。在实际规划编制过程中,排水能力评估方法取决于所使用的模型软件,最常用的方法是比较水面线坡度和管底坡度的大小,当水面线坡度大于管底坡度且管道满流时,则认为管道排水能力不足^[3]。但是,该方法没有考虑管道的埋设深度以及对上游管道的影响,因此存在一定的缺陷。

针对上述缺陷,Bennis等^[4]以伯努利方程为基础,提出采用水力性能指数来评估排水管网系统水力性能,并给出了管网呈树状(即每个检查井最多只有1根出水管道)且采用管顶平接时水力性能指数的计算方法。由于实际的排水管网常常不是树状网(即存在不止1根出水管道的检查井),且由于种种原因,全部管道均符合管顶平接要求的管网系统基本不存在,同时系统中还可能存在着流量调节设施(如泵站、闸门等),因此需要对该方法进行改进,以便适用于各种类型的排水管网。

1 超载程度

根据管内水深不同,排水管道可分为三种状态:①非满流。管道内部存在自由水面。②超载。管道处于满流状态,但地面没有积水。③积水。管道处于满流状态,且地面出现积水。

通常,非满流状态的管道具有充足的排水能力,而出现积水的管道就意味着排水能力明显不足,需要尽快进行改造。超载状态的管道则处于这两者之间,是否需要改造取决于超载状态(是否为设计状态),改造的迫切性则取决于可用资金的充裕程度。通常情况下,可用资金不足以对所有超载管道进行改造,因此需要对管道的超载程度和影响进行分级,以便有针对性地使用资金,实现投入产

出效益的最大化。

排水管道的超载程度可用下式计算^[4]:

$$N_i = \frac{H_i^{US}}{G_i} \quad (1)$$

式中: N_i 为管道*i*的超载程度; H_i^{US} 为管道*i*的起端超载深度,m; G_i 为管道*i*的起端覆土厚度,m。

当管道处于超载状态时,管道内部的水深已达最大值,可采用管道起端检查井水位减去起端管顶标高来计算起端超载深度 H_i^{US} 。同时,将管道起端覆土厚度 G_i 作为分母,可以反映管道埋深对超载程度的影响。当管道处于非满流状态时, $H_i^{US}=0, N_i=0$;当管道处于积水状态时, $H_i^{US}=G_i, N_i=1$;当管道处于超载状态时, N_i 在0~1之间。

假设 H_i^{US} 分别为0和 G_i 时, N_i 分别为 N_{min} 和 N_{max} ,同时考虑惩罚因子 n 以反映不同超载深度的超载程度(或潜在危险程度),则式(1)变为^[4]:

$$N_i = N_{min} + (N_{max} - N_{min}) \left[1 - \left(1 - \frac{H_i^{US}}{G_i} \right)^n \right] \quad (2)$$

当 $N_{min}=0, N_{max}=1, n=1$ 时,式(2)即为式(1)。当 $n=1$ 时,超载深度和超载程度呈线性关系。当 $n>1$ 时,两者呈非线性关系,超载水位越接近于地面,在惩罚因子的作用下,其超载程度迅速增大。为简化研究,全部基于式(1)进行计算。

式(1)能够反映管道的超载程度,但无法区分超载是由于自身原因造成的,还是由于下游管道壅水造成的。目前,常见排水模型软件通过以下方法处理该问题:对于已经发生超载的管道,当水面线坡度大于管底坡度时,则管道自身存在问题;当水面线坡度小于管底坡度时,则管道自身没有问题^[5-7]。

这种方法能够识别管道自身是否存在问题,但无法计算出自身问题的严重性,也无法计算下游管道应承担的责任,因此无法找到真正的瓶颈管道。水力性能指数^[4]正是为了解决下游管道以及管道自身的责任分配问题而提出来的,它能够帮助找到排水管网系统中的瓶颈管道。

2 综合水力性能指数

管道处于超载状态时,非恒定流的伯努利方程形式如下^[8]:

$$Z_1^{US} + D_1 + H_1^{US} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_1^{DS} + D_1 + H_1^{DS} +$$

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_{US}^{DS} \frac{\partial V}{\partial t} dl + h_f + \sum h_s \quad (3)$$

式中: Z_1^{US} 、 Z_1^{DS} 分别为管道1的起端和终端管底标高, m; D_1 为管道1的直径, m; H_1^{US} 、 H_1^{DS} 分别为管道1的起端和终端超载深度, m; V_1 、 V_2 分别为管道1的起端和终端流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; h_f 为管道1的沿程水头损失, m; h_s 为管道1的局部水头损失, m; $\frac{1}{g} \int_{US}^{DS} \frac{\partial V}{\partial t} dl$ 为惯性水头, m。

式(3)可改写为如下形式^[4]:

$$H_1^{US} = H_1^{DS} + h_f + \sum h_s + \frac{1}{g} \int_{US}^{DS} \frac{\partial V}{\partial t} dl - L \times \sin S_0 \quad (4)$$

式中: L 为管道1的长度, m; S_0 为管道1的底坡。

与文献[4]中的公式相比, 式(4)没有忽略惯性水头项, 原因是文献[4]中的算法仅考虑了管道中液位最高的时刻, 但对于整个模拟历时, 则不能忽略惯性水头。式(4)等号右侧第一项 H_1^{DS} 表示的是下游管道对管道1超载深度 H_1^{US} 的贡献, 等号右侧剩余项代表管道1自身对超载深度 H_1^{US} 的贡献。如果对以上两种贡献进行分割, 式(1)可改写为如下形式^[4]:

$$N_1^i = \frac{H_1^{US} - H_1^{DS}}{G_1} \quad (5)$$

$$N_1^{DS} = \frac{H_1^{DS}}{G_1} \quad (6)$$

式中: N_1^i 为自身造成的管道1的超载程度; N_1^{DS} 为下游管道造成的管道1的超载程度; G_1 为管道1的起端覆土厚度, m。

借鉴式(4)~(6)的责任分配方法, 管道1的下游管道 j 对管道1超载程度所应承担的责任为:

$$N_1^j = \frac{H_{j-1}^{DS} - H_j^{DS}}{G_1} \quad (7)$$

式中: N_1^j 为下游管道 j 造成的管道1的超载程度; $j-1$ 为管道 j 的直接上游管道编号; H_{j-1}^{DS} 为下游管道 $j-1$ 的终端超载深度, m; H_j^{DS} 为下游管道 j 的终端超载深度, m。

文献[4]在计算下游管道对管道1超载的责任分配时, 数学表述上存在歧义, 容易将式(7)中的 H_{j-1}^{DS} 误认为统一采用 H_1^{DS} , 即上游管道1的终端超载深度。为说明该问题, 可将下游管道对管道1超载所应承担的责任求和, 即:

$$\sum N_1^j = \frac{H_{j-1}^{DS} - H_j^{DS}}{G_1} + \frac{H_{j-2}^{DS} - H_{j-1}^{DS}}{G_1} + \dots + \frac{H_1^{DS} - H_2^{DS}}{G_1} = \frac{H_1^{DS} - H_j^{DS}}{G_1} \quad (8)$$

管道1的下游管道对管道1的超载程度所应承担责任的计算过程, 需要持续到第 j 根下游管道末端不再超载为止, 即 $H_j^{DS}=0$, 此时 $\sum N_1^j = \frac{H_1^{DS}}{G_1} = N_1^{DS}$ 。

可见, 采用式(7)计算超载责任分配时, 所有应对管道1超载承担责任的管道所分配到的超载程度, 总和恰好等于管道1的超载程度, 这证明了式(7)的正确性。

式(5)和式(7)可计算某根管道出现超载时, 该管道自身及其下游管道对其超载所应承担的责任, 以上计算过程是从上游往下游计算。反过来, 当从某根超载管道开始, 从下游往上游计算, 可以得到该管道对自身超载所承担的责任, 以及该管道对上游管道超载所承担的责任, 将所有责任相加, 即为该管道的全局水力性能指数(GHPI), 计算公式为:

$$GHPI_j = N_j^i + \sum N_k^j \quad (9)$$

式中: $GHPI_j$ 为管道 j 的全局水力性能指数; N_j^i 为管道 j 对自身超载所应承担的责任; N_k^j 为管道 j 对上游管道 k 超载所应承担的责任。

当管道 j 埋深增大时, 其终端超载深度 H_j^{DS} 也将增大, 根据式(7)可知, 其对上游管道 k 超载所应承担的责任 N_k^j 将减小, 这体现了管道埋深对管道排水能力的影响有其合理的一面。但是, 随着管道 j 埋深的不断增大, 最终可能导致 $N_k^j < 0$, 严重时将导致 $\sum N_k^j < 0$ (此时 $GHPI_j < N_j^i$), 极端时甚至可能导致 $GHPI_j < 0$, 这就有可能掩盖管道 j 自身的超载问题。因此, 引入自身水力性能指数(SHPI), 计算公式为:

$$SHPI_j = N_j^i \quad (10)$$

由于管道全局水力性能指数 GHPI 会随时间发生变化, 为全面反映管道持续超载的影响, 引入累积水力性能指数(AHPI), 计算公式为:

$$AHPI_j = \sum GHPI_j \quad (11)$$

式(11)的含义为, 所有时间步长的全局水力性能指数之和, 即为累积水力性能指数。

假设整个模拟历期内, 全局水力性能指数 GHPI 的最大值为 MGHPI, 自身水力性能指数 SHPI 的最大值为 MSHPI, 则综合水力性能指数(CHPI)的计算公式为:

$$\text{CHPI}_j = \omega_1 \times \text{MGHPI}_j + \omega_2 \times \text{MSHPI}_j + \omega_3 \times \text{AHPI}_j + C \quad (12)$$

式中:CHPI_j为管道j的综合水力性能指数;MGHPI_j为管道j的最大全局水力性能指数(或分类值);MSHPI_j为管道j的最大自身水力性能指数(或分类值);AHPI_j为管道j的累积水力性能指数(或分类值); ω_1 为MGHPI_j的权重,取0~1; ω_2 为MSHPI_j的权重,取0~1; ω_3 为AHPI_j的权重,取0~1;C为常数。

式(12)中权重 ω_1 、 ω_2 和 ω_3 之和等于1,常数C是为应对逆坡管道而加,因为不存在没有问题的逆坡管道(即使非满流)。分类值的含义见计算案例部分。

3 算法细节

仔细研究可以发现,文献[4]中的算法是建立在以下基础上:①排水管网是拓扑学意义上的树状网结构;②所有管道的最大超载深度发生在同一时刻,且该时刻的排水管网是水力学意义上的树状网结构,即在拓扑学意义上的树状网结构前提下,水流流向必须是顺坡;③排水管网中仅包含管道,而不存在水泵和闸门等控制设施。

实际排水管网在拓扑学意义上不一定是树状网结构,且即使是树状网结构,由于壅水现象的存在,水力学意义上也不一定是树状网结构。同时,在求解完整圣维南方程时,由于存在管道蓄水和壅水现象,不同管道的最大超载程度很少同时发生。由于污水管网一般都存在提升泵站,因此文献[4]中的算法不能直接用于实际工程,必须对其进行改进。

首先需要找到管道p在水力学意义上的上游受影响管道集合 S_p ,其过程如下:

① 确定管道p是否为瓶颈管道。当管道p的起端超载深度 $H_p^{\text{US}}=0$,即管道起端未发生超载时,管道p不是瓶颈管道。当管道p的起端超载深度 $H_p^{\text{US}}>0$,且 $H_p^{\text{DS}}>H_p^{\text{US}}$ 时, $N_p^{\text{US}}=0$ 则意味着管道p的超载全部由下游管道造成,管道p也不是瓶颈管道。只有当 $N_p^{\text{US}}>0$ 时,管道p才是瓶颈管道。对于非瓶颈管道,其水力性能指数为0。

② 对于瓶颈管道p的直接上游管道k,若 $H_k^{\text{US}}>0$,则管道k为上游受影响管道,将它加入直接上游连接集合 S_{pd} 和上游受影响管道集合 S_p 。对于上游的泵站连接,由于其为压力流,故不受管道p的影响,也不会将该影响继续上溯,因此泵站连接不加入 S_{pd} 和 S_p 。对于孔口连接和堰连接,可以采用类似

管道的方法分析其是否受影响,如果受影响则将它加入 S_{pd} ,以便将管道p的影响继续上溯,但不将它加入 S_p ,因为孔口连接和堰连接无法计算超载程度。对于出水口连接,由于无法确定其是压力流还是重力流,故参照泵站连接的处理方式,不加入 S_{pd} 和 S_p 。

③ 对 S_{pd} 中的直接上游连接重复步骤②,更新 S_p 和重新生成新的直接上游连接集合 S_{pd} 。当 S_{pd} 为空时, S_p 即为管道p在水力学意义上的上游受影响管道集合。

S_p 中可能会出现下游管道不止一根的情况,此时式(7)中 H_j^{DS} 的计算面临多个选择,比较好的做法是选择下游管道中最大的 H_j^{DS} 。为了解释该问题,可以考虑一种极端情况,即下游某根管道 H_j^{DS} 无限趋近于0,此时该管道终端“几乎”未超载,也就“几乎”不会继续影响上游管道,选择最大的 H_j^{DS} 可以排除该管道的影响。当然,对于下游管道不止一根的情况,如何计算 H_j^{DS} 是一个可以继续探讨的问题。

当管道出现逆坡流动时,如果采用式(5)和式(7)计算,由于此时管道水力学意义上的首末端和顺坡流动时的首末端发生对调,此时计算结果会发生突变,且由于计算基准不同,失去了和顺坡流动时比较的意义。但是,现实管网中又确实存在正常运行时水流就是逆坡流动的情况,因此逆坡流动时仍需采用式(5)和式(7)计算,但在进行分析时必须对顺坡和逆坡流动情况加以区分。

当对GHPI和AHPI进行排序时,由于可能存在负值,因此不能简单按照数值大小进行排列。首先应将所有的零值管道视为无问题管道,将它们排入序列的最后,再对剩余管道按数值大小进行排序。这么做的原因是:GHPI或AHPI为负值意味着管道存在问题,而零值意味着管道没有问题,因此负值管道要排在零值管道之前。

4 计算案例

佛山三龙湾某片区8 km²排水管网模型有1 357个节点和1 346根管道,总长度约30 km,建设时间为2000年左右,建设标准以1年一遇为主,而当前规划标准为5年一遇,因此需要进行排水能力评估,找到瓶颈管道加以改造。主要步骤如下:

① 采用提出的算法计算各管道的MGHPI、MSHPI和AHPI。

② 确定系统正常工作时,管道中是逆坡还是

顺坡流动(见图 1)。



图 1 正常工作时管道中水流流向

Fig.1 Flow direction in the pipe during working well

③ 将所有管道分为顺坡和逆坡两组,对每组管道的 MGHPI、MSHPI 和 AHPI 分别进行排序。值为 0 的管道归入 E 类,值非 0 的管道从大到小排序,前 25% 归入 A 类,25%~50% 归入 B 类,50%~75% 归入 C 类,最后 25% 归入 D 类。最终得到 6 组分类,分别是顺坡管道 MGHPI、顺坡管道 MSHPI、顺坡管道 AHPI、逆坡管道 MGHPI、逆坡管道 MSHPI、逆坡管道 AHPI。这样做的原因是顺坡和逆坡管道不具备直接可比性,只能在各自组内比较。

④ 根据类型对 6 组分类进行打分(即分类值),A、B、C、D、E 类型分别为 5、3、2、1、0。A 类打分为 5 的原因是为了突出 A 类问题的严重性。

⑤ 假设权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为 0.5、0.25、0.25,逆坡管道常数 C 为 1,顺坡管道常数 C 为 0,采用式(12)计算各管道 CHPI。

⑥ 根据计算得到的 CHPI 值进行系统水力性能评估,结果如图 2 所示。

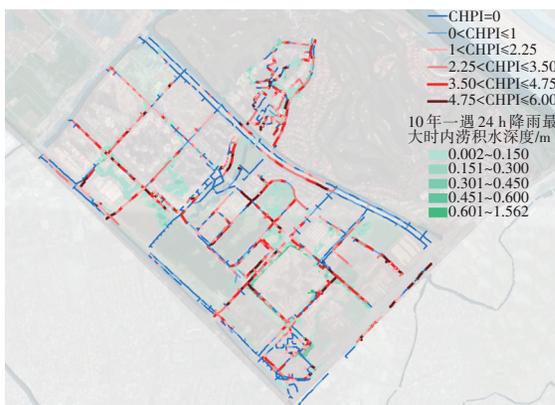


图 2 基于 CHPI 的排水能力评估

Fig.2 Drainage capacity evaluation based on CHPI

图 2 以 CHPI 值为基础,将管道分为 6 类。CHPI 值较大的管道与内涝积水点空间分布较为吻合。作为对比,采用当前主流商业软件得到如图 3 所示的排水能力评估结果,其中大部分管道现状排水能力大于等于 10 年一遇,显然与实际 1 年一遇的建设标准不符,也与降雨内涝积水情况不符。由此可证明基于 CHPI 的排水能力评估具有先进性和可靠性。

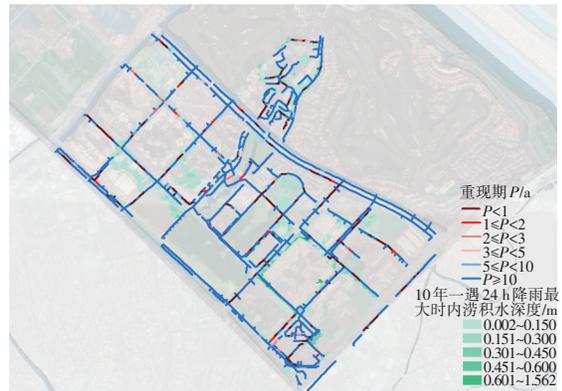


图 3 基于商业软件算法的排水能力评估

Fig.3 Drainage capacity evaluation based on commercial software

⑦ 根据图 2 所示的排水能力评估图,对 CHPI 值较大的排水管道进行改造,改造长度约 11 km,约占总管网长度的 36%,改造前、后应对 5 年一遇 24 h 降雨模拟最大内涝积水深度如图 4 所示,改造后内涝积水情况得到明显改善。

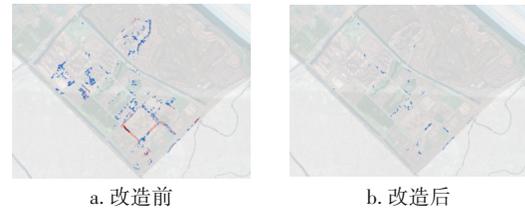
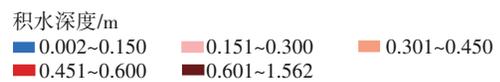


图 4 排水管网改造前、后最大内涝积水深度对比

Fig.4 Comparison of the maximum waterlogging depth of sewer network before and after reconstruction

5 应用展望

水力性能指数作为衡量管道排水能力的一个重要指标,具有较为广阔的应用前景,主要包括:

① 在排水管网系统规划和设计过程中,通过计算现状管道的 CHPI,可以确定系统中存在的瓶颈管道及其问题的严重程度,有针对性地进行规划和

设计,以改善系统的整体排水能力。

② 在日常维护过程中,不管是离线模型还是在线模型,都可以计算系统中全部管道的CHPI,CHPI可用于辅助制定管道维护计划,以提高日常维护资金的使用效率。

③ 在污水管网系统运行过程中,可将基于在线监测数据和在线模型计算得到的MGHPI和MSHPI绘制成曲线(每个时刻均有一个MGHPI和MSHPI,且MGHPI和MSHPI的灵敏性可能不同)。对于建成区的污水管网系统,由于系统基本趋于稳定,进入系统的污水流量具有明显的周期性,排水能力仅会因为系统老化等原因逐步下降,此时每根管道的MGHPI或MSHPI曲线会以一个较为平缓的趋势逐渐增大,即曲线的斜率较小。如果曲线斜率突变,说明该管道出现了特殊状况(如管道破裂造成管周土进入管道,导致管道淤积,进而造成排水能力大幅降低,或者有一股较大的集中流量接入),此时应尽快安排人员现场踏勘,寻找问题出现的原因。

6 结论和建议

排水管网系统的水力性能评估是一个长期存在的难点问题,使用综合水力性能指数CHPI来衡量管道的排水能力,有望解决这一难题。CHPI既可反映管道对自身超载所应承担的责任,又可反映对上游管道超载的影响,还可反映排水能力在时间尺度上的影响,因此是一个较为理想的水力性能评估指标,可用于规划设计方案和管道维护计划的制定。同时,最大全局水力性能指数MGHPI和最大自身水力性能指数MSHPI具有应用于在线污水管网系统模型并实时分析现状排水能力的潜力,有望解决诸多可能造成严重后果但又很难通过其他手段进行低成本监测的灾害性事件(如地面塌陷)。建议有关部门将各水力性能指数纳入日常监测和运维过程,通过数据的积累逐步进行优化,以更好地指导排水系统的运行和维护工作。

参考文献:

- [1] 张智. 排水工程(上册)[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
ZHANG Zhi. Wastewater Engineering System (Volume I) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building

Press, 2015 (in Chinese).

- [2] 住房和城乡建设部. 室外排水设计规范:GB 50014—2006 [S]. 2016年版. 北京: 中国计划出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Code for Design of Outdoor Wastewater Engineering: GB 50014—2006 [S]. 2016 ed. Beijing: China Planning Press, 2016(in Chinese).
- [3] ROSSMAN L A. Storm Water Management Model Reference Manual, Volume II—Hydraulics[M]. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2017.
- [4] BENNIS S, BENGASSEME J, LAMARRE P. Hydraulic performance index of a sewer network [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(7): 504–510.
- [5] 李建勇. Infoworks ICM在城市排水系统分析中的应用[J]. 中国给水排水, 2014, 30(8): 21–24.
LI Jianyong. Application of Infoworks ICM in analysis of urban drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(8): 21–24(in Chinese).
- [6] 胡坚, 赵宝康, 刘小梅, 等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2015, 31(1): 100–103, 108.
HU Jian, ZHAO Baokang, LIU Xiaomei, et al. Assessment of drainage capacity and waterlogging risk in central zone of Zhenjiang City [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 100–103, 108(in Chinese).
- [7] 陈翠珍, 蒋佳鑫, 李敏. 基于水力模型的青山海绵示范区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 105–108.
CHEN Cuizhen, JIANG Jiaxin, LI Min. Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Qingshan sponge demonstration area based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 105–108(in Chinese).
- [8] MIRONER A. Engineering Fluid Mechanics [M]. New York: McGraw-Hill, 1979.

作者简介:梁小光(1985—),男,江西抚州人,硕士,高级工程师,武汉大学海绵城市研究中心学术委员会委员,主要从事城市水系统规划设计和理论研究工作。

E-mail:liangxiaoguang07@163.com

收稿日期:2020-04-13

修回日期:2020-06-09

(编辑:丁彩娟)