

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.01.002

道路雨水口泄流效率关键影响因素研究

段园煜¹, 郭 帅², 王秋萍², 陈国芬³, 吴众华⁴, 陈 岚²

(1. 合肥学院城市建设与交通学院, 安徽 合肥 230601;
2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014;
4. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为了研究道路坡度(横坡 1%~2%、纵坡 0.3%~5.0%)和径流量(0~70 m³/h)对雨水口泄流效率的影响,搭建了比例为 1:1 的试验平台,分析不同工况下的泄流效率。试验结果表明:径流量越大,纵坡越大,泄流效率越低;横坡每提高 0.5%,雨水口的泄流效率约提高 10%。将孔口出流方程对数据进行拟合所得公式与其他文献提出的经验公式进行对比,结果显示:对标准型平篦式雨水口,前者的拟合效果更好。基于拟合公式,提出雨水口布置的设计思路,推导了布置间距的计算公式,并将其应用于雨水口布置间距的优化设计。

关键词: 雨水口;泄流效率;间距;道路工程

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2022)01-0007-06

Study on key influencing factors of drainage efficiency of street inlets

DUAN Yuanyu¹, GUO Shuai², WANG Qiuping², CHEN Guofen³, WU Zhonghua⁴, CHEN Lan²

(1. Department of Architectural Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China;
2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
3. Power-China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China;
4. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to study the influence of road slope (1%~2% in cross slope and 0.3%~5.0% in longitudinal slope) and runoff of 0~70 m³/h on the inlet efficiency, tests were carried out on a 1:1 platform. Experimental results show that the inlet efficiency decreases with the increasing of flow rate as well as the longitudinal slope. However, when the cross slope increases 0.5%, the efficiency increases about 10%. In addition, experimental data were fitted with the orifice equation. Comparison was conducted between the fitting formula and previous empirical formulas, and the results show that the proposed formula gives better results on the standard flat-grate street inlet. Based on the fitting formula, a new method for the street inlet design is proposed for the future urban road construction and formulas for determining the inlet spacing are deduced, which were adopted for the optimal design of inlet spacing.

Key words: street inlet; inlet efficiency; inlet spacing; road engineering

道路雨水口是雨水排水系统的组成部分,是路面径流进入地下管道的入口,雨水口的泄流效率直接影响城市路面的积水程度。国家建筑标准设计图集《雨水口(16S518)》^[1]指出,雨水口的泄水能力与道路坡度、雨水口形式、算前水深等因素有关,因此将雨水口的泄流量定为单一值不能满足设计需要。而 GB 50014—2006《室外排水设计规范》^[2]对雨水口设计的规定不够明确,如仅指出雨水口的布置间距适宜为 25~50 m。鉴于此,迫切需要相应的理论或经验公式指导雨水口的优化设计,以提高泄流效率,减少城市内涝的发生^[3-4]。

Wong^[5]给出了雨水口泄流效率与径流量、道路横纵坡之间的数学关系,但包含了多个未知参数。美国联邦公路局^[6]以规范的形式给出了雨水口泄流效率的预测方法,并将流经雨水篦盖周围的径流量分为前端

基金项目: 安徽省自然科学基金(1908085QE211);安徽高校自然科学基金项目(KJ2020A0664)
作者简介: 段园煜(1986—),女,高级工程师,博士,主要从事道路工程研究。E-mail:duanyy@hfu.edu.cn
通信作者: 郭帅(1984—),男,副研究员,博士,主要从事给排水管网研究。E-mail:guoshuai@hfut.edu.cn
引用本文: 段园煜,郭帅,王秋萍,等. 道路雨水口泄流效率关键影响因素研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):7-12.
DUAN Yuanyu, GUO Shuai, WANG Qiuping, et al. Study on key influencing factors of drainage efficiency of street inlets[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(1):7-12.

流量和侧边流量,其计算公式包含多个经验参量,计算方法相对烦琐。Spaliviero 等^[7]和 Gómez 等^[8]分别得出两个关于泄流效率 E 与径流量和算前水深比值 Q_a/h 的关系式。Kemper 等^[9]通过试验得出将偏沟式雨水口泄流效率与弗劳德数、雨水篦子的尺寸以及篦上水深相联系的计算式。除此之外,Li 等^[10-14]探究了雨水口形式、篦子栅条角度、开孔率等对泄流效率的影响。对于国外文献提出的经验公式,国内还没有进行验证及采纳,但也对雨水口进行了研究。如刘雷斌等^[15-16]先用试验方法探究了雨水口泄流效率与径流量及道路纵坡的关系,再用数值模拟方法探究了路面积水深度与雨水口布置间距的关系。梁小光等^[17]通过分析国内外道路坡度和雨水口布置的相关要求,结合案例计算,总结了道路横坡、纵坡、算前水深和雨水口布置间距之间的变化关系,并提出道路设计漫幅的推荐值。陈国芬等^[18]用数值模拟方法得出当降雨强度足够大时雨水口的泄流效率将达到饱和的结论。然而,目前国内尚缺乏可以精确计算雨水口泄流效率的经验公式。

本文以《雨水口(16S518)》中的标准型平算式雨水口为研究对象,探究道路坡度和径流量对泄流效率的影响。基于孔口出流理论,提出泄流效率的计算公式,同时与国外文献中的经验公式进行对比,分析其优劣性,。

1 模型试验概况

1.1 试验平台

雨水口泄流特性研究模型试验平台如图 1 所示。模拟道路按照 1 : 1 的比例设计,长 12 m、宽 3 m、侧边高 0.5 m,底部铺一层厚 10 mm 的水泥砂浆,雨水口算盖安装在距离道路起始端 10 m 处,模拟一段长 12 m、宽 6 m 水泥道路的一半。千斤顶能调节道路的纵坡范围为 0% ~ 5%,横坡范围为 0% ~ 10%。试验水由高于模拟道路 6 m 的水箱提供,由连接在引水箱上的水平导流板均匀地导流进入模拟道路,使进入模拟道路的水流均匀平缓,且能保证重复试验的初始条件一致。试验平台排出的水流入地下水库,用泵实现用水循环。雨水算盖形式见图 2,总开孔面积为 0.153 m²,开孔率为 54.2%。

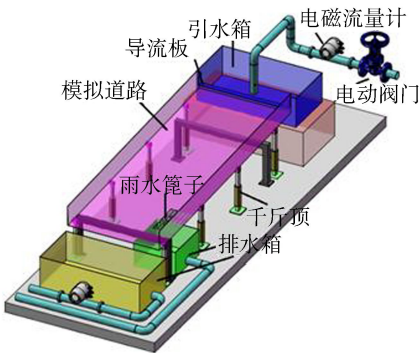


图 1 试验平台

Fig.1 Test platform

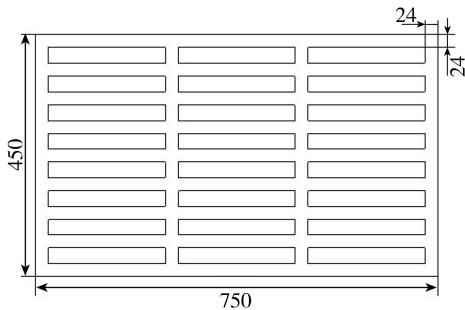


图 2 雨水口算盖(单位:mm)

Fig.2 Grate cover of street inlet (unit: mm)

1.2 试验计算

试验以道路纵坡 S_L 、道路横坡 S_C 和径流量 Q_a 为因变量,探究这 3 个因素对雨水口泄流效率的影响。道路纵、横坡度的取值参考 CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》^[19];根据合肥市的降雨情况,结合汇流面积计算得出径流量的取值范围为 0 ~ 70 m³/h。

$$q = \frac{4850(1 + 0.846\lg P)}{(t + 19.1)^{0.896}} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度,mm/min; P 为暴雨重现期,a; t 为降雨历时,min。

共进行 126 组不同工况的试验,见表 1。其中,序号 1、2 各 7 个工况,流量变化幅度为 10 m³/h;序号 3 ~ 10 各 14 个工况,流量变化幅度为 5 m³/h。

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

序号	工况数量/个	S_L /%	S_C /%	Q_a /(m ³ ·h ⁻¹)
1	7	0.3	1.5	10 ~ 60
2	7	0.7	1.5	10 ~ 60
3	14	1.0	1.5	5 ~ 70
4	14	2.0	1.5	5 ~ 70
5	14	3.0	1.5	5 ~ 70
6	14	4.0	1.5	5 ~ 70
7	14	5.0	1.5	5 ~ 70
8	14	1.0	1.0	5 ~ 70
9	14	2.0	1.0	5 ~ 70
10	14	2.0	2.0	5 ~ 70

2 泄流效率

2.1 试验结果分析

雨水口的泄流效率是指雨水口泄流流量与雨水口上游径流量的百分比：

E = \frac{Q_{int}}{Q_a} = \frac{Q_a - Q_p}{Q_a} \tag{2}

式中： Q_{int} 为雨水口泄流流量（可分为前缘泄水量和侧边泄水量）； Q_a 为雨水口上游的径流量， m^3/h ； Q_p 为未被雨水口泄流的流量。

在不同坡度条件下，雨水口的泄流效率随径流量的变化如图 3 所示。由图 3 可以看出，仅在径流量非常小的情况下（ $Q_a=5\text{ m}^3/h$ ），雨水口泄流效率能够达到 100%；径流量越大，泄流效率越低。当 $S_c=2.0\%$ 、 $S_L=2.0\%$ 、径流量从 $5\text{ m}^3/h$ 增加到 $70\text{ m}^3/h$ 时，泄流效率从 100% 逐步降低至 75%。图 3(a) 中的 3 条曲线仅横坡不同，横坡越大，侧向重力对雨水口的有效收水范围影响越大。当横坡从 1.0% 变为 2.0% 时，同一流量下的泄流效率约增大 20%，当横坡从 1.0% 增加到 1.5% 时，其效率的增长梯度大于从 1.5% 增加到 2.0% 的情况；在横坡为 1.5% 时，雨水口的泄流效率已达到较高值（70%~100%）。由图 3(b) 可知，同一流量下，纵坡在 0.3%~5.0% 变化时，泄流效率的相对变化约为 10%，总体呈现纵坡越大，泄流效率越低的规律。纵坡会改变径流流速的大小，不改变流速方向，其主要通过影响雨水口的前缘泄水量来影响泄流效率。

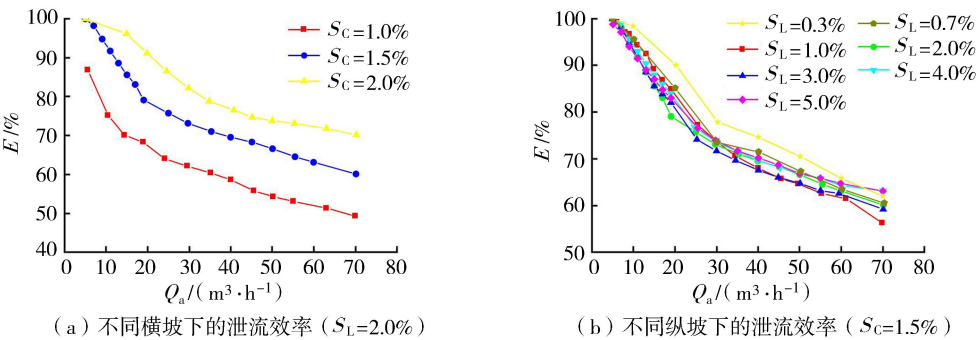


图 3 雨水口泄流效率随径流量的变化
Fig.3 Variations of inlet efficiencies with runoff

2.2 数据拟合

在道路横坡的影响下，雨水口算盖上游的径流横断面形式见图 4。雨水均匀流动时，图 4 中所标参数值保持不变，其中， h 为靠近路缘处的水流深度， W 为径流覆盖路面的宽度（ $W \gg h$ ， $W=h/S_c$ ）。各参数间的关系符合谢才公式，则 h 的表达式可化简为

h = \frac{(nQ_a)^{3/8} S_c^{3/8}}{0.65 S_L^{3/16}} \tag{3}

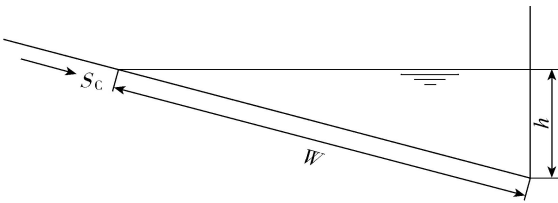


图 4 径流横断面
Fig.4 Gutter cross section

路面径流通过雨水口算盖的开孔泄流，符合孔口出流形式^[20-22]，故可用孔口出流方程计算雨水口泄流量（式(4)），进而可得泄流效率 E 的理论公式（式(5)），式(5)中唯一需要确定的是参数 C 。

Q_{int} = C_0 A_0 \sqrt{2gh} \tag{4}

E = \frac{C_1 A_0 \sqrt{2g} (nQ_a)^{3/16} S_c^{3/16} S_L^{-3/32}}{Q_a} = C Q_a^{-0.813} S_c^{0.1875} S_L^{-0.094} \tag{5}

式中： n 为道路粗糙系数； A_0 为出流孔口面积， m^2 ； C_0 、 C_1 、 C 为泄流系数。

将试验得出的 E 值代入式(5)计算 C ，发现 C 与 Q_a 相关，其关系见图 5。由图 5 可以看出 C 与 Q_a 具有很高的相关性。去掉实际工程中较少见的 4 组坡度组合（表 1 中序号 5、6、7、10），则 C 的差值在 10% 以内。相同径流量下，取其余 6 种坡度下 C 的均值，拟合其与 Q_a 的数学关系，结果见图 6，表达式为

C = 2.3 Q_a^{0.574} \tag{6}

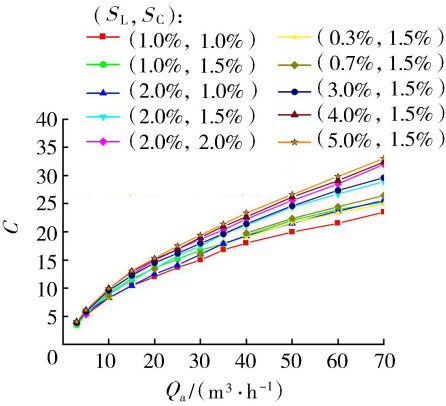


图5 实测C值与Q_a关系

Fig. 5 Relationship between measured C and Q_a

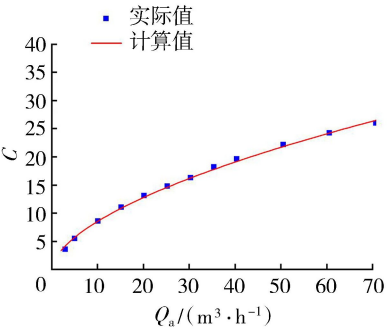


图6 C的实测值与预测值的对比

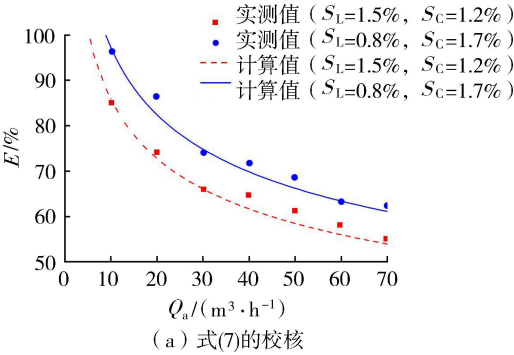
Fig. 6 Comparison of measured C and predicted C

则标准型平算式雨水口的E计算式为

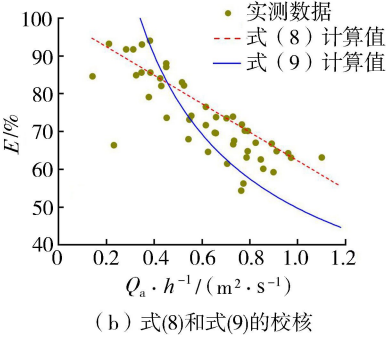
$$E = 2.3Q_a^{-0.239}S_C^{0.1875}S_L^{-0.094} \tag{7}$$

由式(7)可知,E 主要的影响因素有径流量、横坡和纵坡,且受径流量和横坡的影响程度大于纵坡。

为校验式(7)的准确性,取 $S_L=1.5\%$ 、 $S_C=1.2\%$ 和 $S_L=0.8\%$ 、 $S_C=1.7\%$ 进行验证,其结果见图7(a),可见E的计算值与实测值符合度较高。



(a) 式(7)的校核



(b) 式(8)和式(9)的校核

图7 试验与计算所得E的对比

Fig. 7 Comparison of E by formula calculation and experimental measurement

一些国外研究通过试验提出了雨水口泄流效率的经验公式,英国水力实验室提出的公式为^[7]

$$E = 102.7 - G \frac{Q_a}{h} \tag{8}$$

其中

$$G = \frac{69}{A_g^{0.75}\sqrt{p}}(n_t + 1)^{0.19}(n_l + 1)^{0.07}(n_d + 1)^{0.15}$$

式中:G为雨水算子综合几何参数; A_g 为算子面积, m^2 ;p为孔隙率; n_t 、 n_l 、 n_d 分别为横格条数、纵格条数和斜格条数。

Gómez等^[8]提出的公式见式(9)。用式(8)、式(9)试验数据校验,结果见图7(b)。

$$E = A \left(\frac{Q_a}{h} \right)^{-B} \tag{9}$$

其中

$$A = \frac{1.988A_g^{0.403}}{p^{0.19}(n_t + 1)^{0.088}(n_l + 1)^{0.07}(n_d + 1)^{0.082}} \quad B = 1.346 \frac{L^{0.179}}{W^{0.394}}$$

式中:L为雨水算子长度,m;W为雨水算子宽度,m。

由图7(b)可见,式(8)在 $Q_a/h < 0.5 m^2/s$ 时,计算的泄流效率与实测值较接近;当 $Q_a/h > 0.5 m^2/s$ 时,偏离越来越大。式(9)则更适用于计算 $Q_a/h > 0.3 m^2/s$ 的情况(当 $Q_a/h < 0.3 m^2/s$ 时,式(9)计算的E均大于100%)。式(8)的拟合相关指数 $R^2=0.853$,式(9)的 $R^2=0.881$,即式(9)比式(8)更符合实测数据的散点分布。对比图7(a)和图7(b),对于图2所示的雨水口,图7(a)的拟合效果($R^2=0.99$)远高于图7(b);但对

于其他平算式雨水口,在 C 未知的情况下,式(9)可用来大致估计 E 。

3 雨水口布置间距

综合上述分析,标准型平篦式雨水口宜优先采用式(7)进行优化设计;若为其他类型雨水口,在当前缺乏原始试验数据的情况下,推荐采用式(9)^[8]进行设计。

雨水口能有效排水的定义是在设计暴雨重现期下其泄流效率大于一定值(根据试验数据,可取 50% ~ 70%),则根据对雨水口泄流效率的分析,各雨水口设计间距的计算式为

$$L_i = \frac{10 \frac{\lg 2.3 + 0.1875 \lg S_C - 0.094 \lg S_L - \lg E_i}{0.239} - \sum q\varphi_{ij}A_{ij}}{q\varphi W_0}$$

(10)

其中

$$Q_i = q\varphi W_0 L_i + \sum q\varphi_{ij}A_{ij} + \sum_{k=1}^{i-1} (1 - E_k) Q_k$$
$$E_i = 2.3 Q_i^{-0.239} S_C^{0.1875} S_L^{-0.094}$$

式中: Q_i 为第 i 个雨水口上游的径流量, m^3/h ; E_i 为第 i 个雨水口的泄流效率; L_i 为第 i 个雨水口距离道路起始端的设计间距, m ; W_0 为道路总宽度的一半, m ; φ 为路面径流系数; φ_{ij} 、 A_{ij} 分别为第 i 个雨水口汇流区扣除上游道路面积 $W_0 L_i$ 后第 j 个汇流分区的径流系数和面积。

根据以上间距设计公式,越往下游雨水口设计间距应越小,为了道路美观及雨水口布置的简便,雨水口一般等间距设计,则:

$$L = (L_1 + L_2 + \cdots + L_n)/n$$

(11)

4 结 论

- a. 雨水口泄流效率受径流量、横坡、纵坡的影响,随纵坡和径流量的增大而减小,随横坡的增大而增大,其中受径流量和横坡的影响更显著。
- b. 结合曼宁公式与孔口出流公式,并根据标准雨水口的试验数据,给出泄流效率的拟合公式;公式中的泄流系数与雨水口上游的径流量相关,当道路纵坡为 0.3% ~ 3.0%、横坡为 1.0% ~ 2.0% 时,系数值几乎不随坡度变化。
- c. 根据研究所得泄流效率的计算公式,给出了雨水口布置间距的计算方法;在连续坡度道路上,越往下游,雨水口承担的泄流任务越大,故在下游宜将雨水口布置成双算、多算来提高下游排水效率。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 雨水口(16S518):GJBT—1404[S]. 北京:中国计划出版社,2016.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室外排水设计规范:GB 50014—2006[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[3] 李永坤,薛联青,邸苏闯,等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5):398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5):398-405. (in Chinese))

[4] 王加虎,梁菊平,李丽,等. 基于 DEM 的城市易涝点集水特征提取与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):390-394. (WANG Jiahu, LIANG Juping, LI Li, et al. Deriving and application of the catchment characteristics for urban flood point based on DEM[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(5):390-394. (in Chinese))

[5] WONG T S. Kinematic wave method for determination of road drainage inlet spacing[J]. Advances in Water Resources, 1994, 17(6):329-336.

[6] US Department of Transportation. Urban drainage design manual, hydraulic engineering circular No. 22[R]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1996.

[7] SPALIVIERO F, MAY R, ESCARAMEIA M. Spacing of road gullies hydraulic performance of BS EN 124 gully gratings and kerb inlets[R]. Oxfordshire, UK:HR Wallingford, 2000.

[8] GÓMEZ M, RUSSO B. Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets[J]. Water Management, 2011, 164(2):

81-90.

- [9] KEMPER S, SCHLENKHOFF A. Experimental study on the hydraulic capacity of grate inlets with supercritical surface flow conditions[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 79(9): 1717-1726.
- [10] LI W H, GEYER J C, BENTON G S. Hydraulic behavior of storm-water inlets[J]. *Sewage and Industrial Wastes*, 1951, 23(1): 34-46.
- [11] CASSIDY J J. Generalized hydraulic characteristics of grate inlets[J]. *Highway Research Record*, 1966, 123: 36-48.
- [12] ESKENAZI E. Laboratory study of absorbed runoff flow by different gutter grating systems[C]//*Proceedings of the third International Conference on Urban Storm Drainage*. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1984: 77-86.
- [13] TOWNSEND R D. Laboratory tests on the influence of grating pattern on street inlet hydraulics[C]//*Canadian Society of Civil Engineers Annual Conference*. Hamilton, Canada: Canadian Society of Civil Engineers, 1984: 685-693.
- [14] MUSTAFFA Z. An experimental investigation of the hydraulics of street inlets[D]. Edmonton, Canada: University of Alberta, 2003.
- [15] 刘雷斌, 黄鸥, 郭磊, 等. 城市道路雨水口收水量研究[J]. *给水排水*, 2016, 52(增刊1): 12-16. (LIU Leibin, HUANG Ou, GUO Lei, et al. Research on hydraulic performance of urban road gully[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(Sup1): 12-16. (in Chinese))
- [16] 郭磊, 刘森彦, 刘雷斌, 等. 城市道路雨水口设置研究[J]. *给水排水*, 2017, 53(5): 44-47. (GUO Lei, LIU Senyan, LIU Leibin, et al. Research on hydraulic performance of urban road gully[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(5): 44-47. (in Chinese))
- [17] 梁小光, 程松青. 道路坡度对路面排水的影响研究[J]. *给水排水*, 2018, 54(3): 9-15. (LIANG Xiaoguang, CHENG Songqing. Study on the influence of roadway slope on pavement drainage[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(3): 9-15. (in Chinese))
- [18] 陈国芬, 郭帅, 段园煜. 海绵城市道路雨水口截流率研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(11): 135-138. (CHEN Guofen, GUO Shuai, DUAN Yuanyu. Interception rate of road rainwater inlet in a sponge city[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(11): 135-138. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [20] MUSTAFFA Z, RAJARATNAM N, ZHU D Z. An experimental study of flow into orifices and grating inlets on streets[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(7): 837-845.
- [21] LEE S, NAKAGAWA H, KAWAIKE K, et al. Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 2012, 68(4): 31-36.
- [22] RUBINATO M, LEE S, MARTINS R, et al. Surface to sewer flow exchange through circular inlets during urban flood conditions[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2018, 20(3): 564-576.

(收稿日期: 2020-10-27 编辑: 胡新宇)