

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.17.018

道路雨水口泄流量试验研究

王秋萍¹, 郭 帅¹, 陈国芬², 段园煜³, 吴众华⁴

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 3. 合肥学院 建筑工程系, 安徽 合肥 230601; 4. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 雨水口是路面径流进入地下排水管道的入口,是市政排水系统的关键组成部分。针对雨水口的泄流性能,搭建了比例为1:1的模型装置(长12 m、宽3 m),开展连续坡度道路上的国标偏沟式雨水口泄流试验,分析了道路的横纵坡度(纵坡坡度为0.5%~5%、横坡坡度为1%~2%)和径流量(0~70 m³/h)对径流流态和雨水口泄流量的影响。结果表明,道路横坡坡度增大时,能同时增加雨水口的前缘泄流量和侧边泄流量,雨水口泄流量随之增大,但当横坡坡度>1.5%时,泄流量的增大幅度变小;而道路纵坡坡度只改变径流流速大小,不改变径流方向,对径流宽度和泄流量的影响相比道路横坡坡度要小;各工况下雨水口的实测泄流量均小于设计泄流量,仅当降雨量较小、路面径流量<10 m³/h时,雨水口的实际泄流量曲线才符合理想泄流直线关系。

关键词: 路面径流; 雨水口; 水力模型; 道路坡度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)17-0115-06

Experiment on Intercepted Flow Rate of Street Storm Sewer Inlets

WANG Qiu-ping¹, GUO Shuai¹, CHEN Guo-fen², DUAN Yuan-yu³, WU Zhong-hua⁴

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

Abstract: The street storm sewer inlet is the entrance of the road runoff into the underground drainage pipe and is a key component of the municipal drainage system. A 1:1 model device (length of 12 m and width of 3 m) was constructed to investigate the performance of the street storm sewer inlet. The effects of cross slope (1%~2%), longitudinal slope (0.5%~5%), and runoff flow rate (0~70 m³/h) on the flow patterns and intercepted flow rate were analyzed by the national standard deviated gully drainage test in a road with a continuous slope. The increase of the cross slope increased both the side and front intercepted flow rates of the storm sewer inlet, so the discharge flow rate of the storm sewer inlet increased accordingly. However, when the cross slope was larger than 1.5%, the increase of the intercepted flow rate became smaller. The longitudinal slope of the road only changed the velocity of the runoff without altering the direction of the runoff, and its influence on the width of the runoff and discharge flow rate was smaller than that of the cross slope of the road. The actual measured intercepted

flow rate was less than the designed discharge flow rate. The actual intercepted flow rate curve of the storm sewer inlet was in line with the ideal intercepted flow rate line only when the rainfall was small and the road runoff was less than $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Key words: road runoff; street storm sewer inlet; hydraulic model; road slope

市政排水系统在保护城市免受内涝灾害方面起着关键作用。然而,由于对道路雨水口泄流机制研究不足,导致许多城市出现地上内涝时地下雨水排水管才充满一半的现象^[1-5]。《国家建筑标准设计图集 05S518:雨水口》指出偏沟式雨水口的泄流量为 20 L/s ,但没有探讨道路坡度和径流量等因素对雨水口泄流量的影响,不能为工程设计提供精确的指导。

在国外,霍普金斯大学早在 1951 年对不同的雨水口进行了试验研究,不仅定义了平箅式雨水口、立孔式雨水口和联合式雨水口,而且提出进行雨水口试验的可靠模型尺寸比例应小于 3:1(原型:模型)^[6];Mustaffa 等^[7]认为雨水口泄流量可以用孔口出流方程拟合,并分析了孔口出流系数与雷诺数和弗劳德数的关系;Martins 等^[8]用试验和数值模拟的方法探讨了圆形雨水箅子的泄流量与路面水深的关系。在国内,安智敏等^[9]首次采用水力模型试验的方法来研究雨水口的泄流量,将雨水口的泄流量分为前缘泄流和侧向泄流,前缘泄流量采用修正的连续性方程拟合,侧向泄流量采用孔口泄流方程拟合;吴鹏等^[10]则以不同箅形的雨水口为试验对象,探究其外形对孔口泄流方程中泄流系数的影响;郭磊等^[11]通过试验方法得出雨水箅子的泄水量与箅前水深为一次函数关系。但是,目前针对我国常使用的国家标准型雨水口的研究较缺乏,对其泄流量的定量研究更少。

鉴于此,笔者以《国家建筑标准设计图集 05S518:雨水口》中给出的标准型偏沟式雨水口为研究对象,搭建了比例为 1:1 的模型试验平台,以径流量、道路纵坡坡度(S_L)和横坡坡度(S_C)为因变量,探究各因素对泄流量的影响,并找出关键的影响因素。

1 试验装置

试验装置如图 1 所示,主要包括模拟道路、前端的矩形引水箱、尾部和雨水口下方的两个排水箱、调节模拟道路坡度的 8 个液压千斤顶、两个电磁流量计以及 1 个电动控制阀门和部分管道。模拟道路是

由铸铁打造的无盖矩形渠道,采用 10 mm 厚的水泥砂浆对渠道底部进行铺筑。模拟道路长 12 m、宽 3 m,对应一段单向单车道的实际道路。

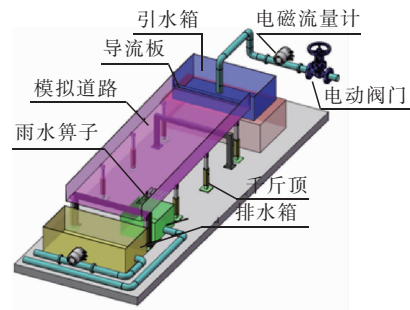


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematics of test platform

国家标准型的雨水箅子放置在距离道路最前端的下游 10 m 处,其几何参数如下:箅宽为 450 mm、箅长为 750 mm、总面积为 $337\,500 \text{ mm}^2$ 、总孔隙面积为 $153\,036 \text{ mm}^2$ 、孔隙率为 54.2%。在模拟道路上,雨水口的箅面高程低于模拟路面,使箅面四周形成利于径流汇入的坡度,这符合雨水口设计的规范要求。模拟道路前端的引水箱由伸入引水箱底部的进水管供水,进水管上连接着电动控制阀门和电磁流量计,使得进入引水箱内的水流流量可以控制,引水箱通过自身的溢流板将水均匀地导流到模拟道路上。水流进入模拟道路后形成路面径流,一部分路面径流在下游被雨水口泄流,而未被雨水口泄流的部分将进入模拟道路末端的排水箱,并通过连接在排水管上的电磁流量计测定其流量大小。根据液压千斤顶的性能,本装置可以调节模拟道路的纵坡坡度范围为 0~5%、横坡坡度范围为 0~10%。

试验用水来自于合肥工业大学水工模型大厅的地下水库,由泵将水抽至屋顶的水塔,再由水塔通过进水管给试验平台供水,水流过模拟路面后最终被排泄到地下水库,实现试验用水的循环。

2 试验内容

2.1 试验参数的确定

根据《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012)对道路坡度的规定,道路横坡坡度宜采用 1% ~

2%,而道路纵坡的设计需考虑机动车的设计速度,当设计速度为60 km/h时,最大道路纵坡坡度的一般值为5%。为探究道路坡度对市政雨水口排水的影响,本试验模拟道路的纵坡坡度范围取0.3%~5%,横坡坡度范围取1%~2%,既满足工程设计的规范要求,又满足试验的可调节范围要求。

为确定合理的试验径流量,采用合肥市暴雨强度公式[见式(1)和式(2)]计算道路在不同降雨重现期与降雨历时下的径流量,结果见表1。结合表1的径流量值,考虑连续坡度道路上未被前一个雨水

口泄流的水汇流到下一个雨水口的情况,同时考虑到单个雨水口的设计泄流能力,试验中的径流量取0~70 m³/h。

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

$$Q = \Psi q F \quad (2)$$

式中: q 为降雨强度,L/(s·hm²); P 为暴雨重现期,年; t 为降雨历时,min; Q 为径流量,L/s; Ψ 为渗透系数,这里是水泥路面,取0.95; F 为道路汇流区域的面积,hm²。

表1 不同重现期和降雨历时下的径流量

Tab.1 Runoff under different return periods and rainfall durations

m³·h⁻¹

项 目	$P=1$ 年	$P=2$ 年	$P=5$ 年	$P=10$ 年	$P=20$ 年	$P=50$ 年	$P=100$ 年
$t=5$ min	14.4	18.0	22.9	26.5	30.2	35.0	38.7
$t=10$ min	12.1	15.2	19.3	22.4	25.5	29.6	32.7
$t=15$ min	10.5	13.2	16.8	19.4	22.1	25.7	28.4

本研究针对国标型雨水算子共进行了126组试验,试验工况见表2。其中,试验1和2对应的径流量 Q_a 为10~70 m³/h,不同工况下流量的变化幅度为10 m³/h;试验3~10对应的 Q_a 为5~70 m³/h,不同工况下流量的变化幅度为5 m³/h。试验1~7用以对比分析道路纵坡坡度对雨水口泄流的影响,试验4、9和10用以对比分析道路横坡坡度对雨水口泄流的影响。

表2 试验工况设计

Tab.2 Design of test condition

试验序号	试验数量	$S_L/\%$	$S_C/\%$	$Q_a/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
1	7	0.3	1.5	10~70
2	7	0.7	1.5	10~70
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

2.2 试验方法

每组试验条件下,待路面径流达到稳定状态以后,分别测量路面上不同断面处的径流宽度、靠近道路边缘的水流深度以及未被雨水口泄流的水流流量。为了方便测量径流宽度和水流深度,试验前,在道路段沿纵向与横向每隔1 m标记一条测线,将道路表面网格化。径流宽度的测量采用精度为1

mm的钢卷尺,水流深度的测量采用精度为0.01 mm的数显游标卡尺,未被雨水口泄流的水流流量采用精度为0.1 m³/h的电磁流量计测量。为了使测量操作对试验结果造成的影响最小,每次的测量顺序均为先读取流量计示数,再测量水流深度,最后测量径流宽度。

3 试验结果与分析

3.1 雨水口设计泄流能力

《国家建筑标准设计图集 05S518:雨水口》中给出的各类雨水口的设计泄流能力如表3所示。

表3 国标雨水口泄流能力

Tab.3 Capacities of standard street inlets L·s⁻¹

项 目	泄流能力	
平算式雨水口/偏沟式雨水口/立算式雨水口	单算	20
	双算	35
	多算	15(每算)
联合式雨水口	单算	30
	双算	50
	多算	20(每算)

雨水口的实际泄流量应根据道路坡度、算前水深、雨水口型式及尺寸等参数进行具体的计算来确定,以便科学合理地确定雨水口的布置,而当前国家规范中尚没有相关设计公式。在道路坡度的影响下,道路径流流至雨水算子上游时其断面形式见图2,其中, h 为靠近边石处的水流深度, n 为粗糙度, W 为径流宽度($W \gg h$, $W = h/S_C$)。根据明渠均匀流的谢才公式可以得出恒定流条件下流量与各参数之

间的关系,如式(3)所示。可知,在相同流量下,纵坡坡度越大,水深越小,径流宽度会相应减小;横坡坡度越大,水深越大,径流宽度就越小。但是,该公式不能用于计算与预测雨水口的泄流量。

$$Q_a = \frac{0.315h^{8/3}S_L^{1/2}}{nS_C^{5/3}} \quad (3)$$

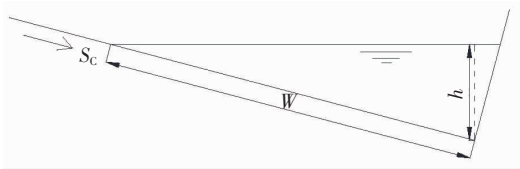


图2 径流横断面

Fig. 2 Gutter cross section

3.2 雨水口的泄流量

雨水口的泄流量(Q_{int})是指路面径流穿过雨水算子进入雨水口的流量,即雨水口上游的总径流量减去未被雨水口截流的流量(Q_p),如式(4)所示,试验测定的泄流量与总径流量的相关关系如图3所示。图3(a)显示的是在横坡坡度为1.5%、纵坡坡度为0.3%~5%的条件下,泄流量随总径流量的变化曲线;图3(b)显示的是在纵坡坡度为2%,横坡坡度分别为1%、1.5%、2%的条件下,泄流量随总径流量的变化曲线。

$$Q_{int} = Q_a - Q_p \quad (4)$$

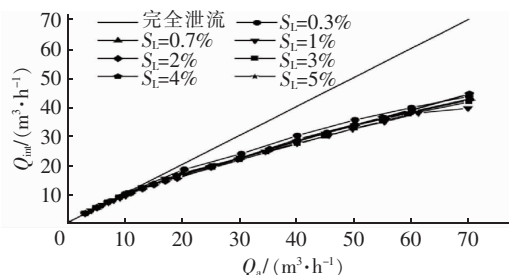
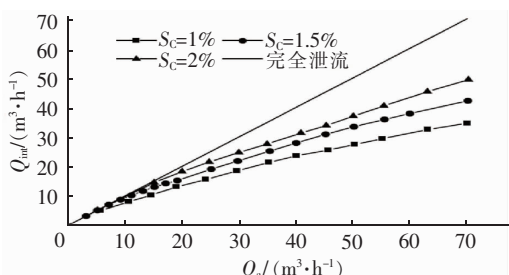
a. 不同纵坡时泄流量随径流量的变化($S_C=1.5\%$)b. 不同横坡时泄流量随径流量的变化($S_L=2\%$)

图3 雨水口泄流量随径流量的变化

Fig. 3 Variation of intercepted flow rate under different conditions

由图3(a)可知,泄流量随着总径流量的增大而增大,未被泄流的径流量(继续流向下一个雨水口的径流量)也在增大^[12],而且随着总径流量的增大,图中曲线的斜率在减小,说明雨水口的泄流效率在降低。当纵坡坡度为0.3%~5%时,泄流量的差距在5 m³/h以内,所以纵坡对连续坡度道路上雨水口泄流量的影响不显著,但是大纵坡会提高径流的流速,若在道路交叉口或者纵坡突然变缓段,会加速径流的汇集。

从图3(b)可知,横坡坡度对泄流量的影响显著,横坡坡度越大,泄流量就越大;其中,最大的泄流量出现在纵坡坡度为2%、横坡坡度为2%、总径流量为70 m³/h的工况下,达到了49 m³/h,未被截流的径流量为21 m³/h;而最大的未被截流径流量出现在纵坡坡度为2%、横坡坡度为1%、总径流量为70 m³/h的工况下,达到了35.5 m³/h。此外,在同一纵坡坡度下,当横坡坡度从1%增大到2%时,泄流量的变化幅度呈现减小的趋势。

试验发现,在所有试验工况下,雨水口的实际泄流量均未达到国标偏沟式雨水口的设计泄流量20 L/s(72 m³/h),而且由图3可知,仅当径流量<10 m³/h时,雨水口实际泄流量曲线才符合理想泄流直线关系(泄流量=总径流量,斜率为1),而随着总径流量的增大,各试验泄流曲线与理想泄流直线之间的差距越来越大。

3.3 道路径流宽度

径流宽度数据可以用来分析和描绘道路径流的流线形态。图4为一些典型工况下(包括不同径流量、横坡坡度和纵坡坡度)沿程径流宽度的变化。图4(a)显示,在纵坡坡度为2%、横坡坡度为1.5%时,不同径流量下的径流边界线几乎是平行的,且在距离道路起始端5 m之后的径流边界线几乎与路缘平行,即在5 m以后水流达到了均匀流状态;在径流量 Q_a 为15~70 m³/h条件下,均匀流段中,径流宽度为90~170 cm。图4(b)显示,在横坡坡度为1.5%、径流量为50 m³/h、纵坡坡度为0.3%~5%时,径流达到均匀流需要的路径长度随纵坡坡度的不同而不同,但都能在算前达到,达到均匀流后的径流宽度为140~190 cm。图4(c)显示的是纵坡坡度为2%、径流量为50 m³/h、横坡坡度为1%~2%条件下径流宽度的变化,三种工况都在流程8~9 m之间达到均匀流态。

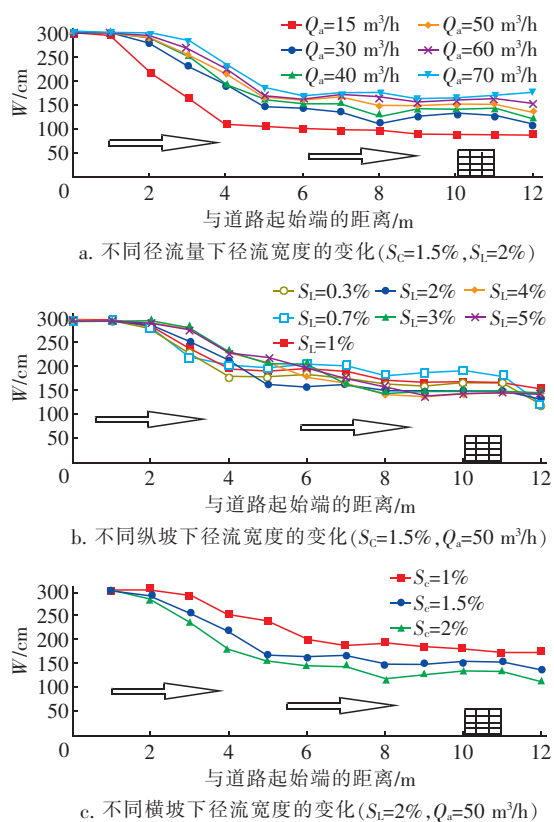


图4 不同条件下径流宽度的沿程变化

Fig. 4 Variation of runoff width under different conditions

3.4 道路径流沿路缘的水流深度

水流深度是评估与定义内涝的重要参数,我国《室外排水设计规范》中规定“道路中一条车道的积水深度不超过15 cm”。图5给出了不同径流量和纵坡坡度下同一纵断面的沿程水深变化。

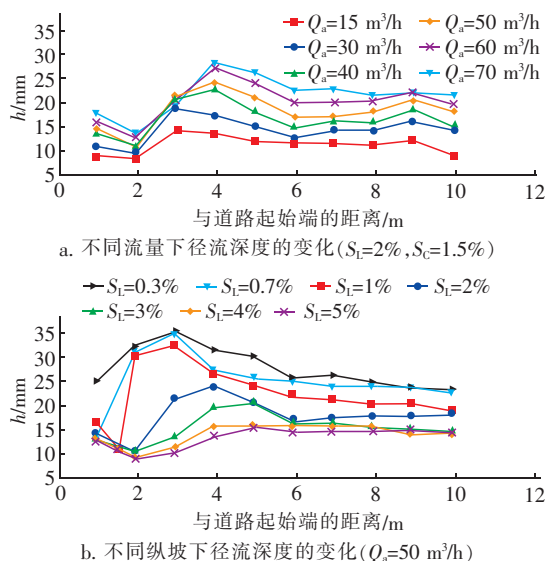


图5 靠近路缘处径流的沿程水深变化

Fig. 5 Variation of water depth under different conditions

图5(a)是在纵坡坡度为2%、横坡坡度为1.5%、不同径流量条件下的水流深度变化,可以看出,在模拟道路上大约4 m处水流的深度会达到一次峰值,这是由于水流被均匀导流到道路上时同时受到横坡和纵坡的影响,使水流方向改变而造成壅水现象。在4 m之后,几条曲线几乎是平行状态,且在7~10 m之间水深几乎是恒定值,水流达到均匀流状态。图5(b)是在不同纵坡坡度、径流量为50 m³/h的典型工况下水流深度的变化曲线,同样反映出径流达到均匀流之前有一段非均匀流,且在上游0~4 m之间水流深度会达到一次峰值。在达到均匀流状态后,道路上的径流横断面与图2一致,其规律也符合式(1),即纵坡坡度越大,水流深度越小。

4 结论

① 在纵坡坡度为0.3%~5%、横坡坡度为1%~2%、径流量为0~70 m³/h的试验工况下,仅当降雨量较小、路面径流量<10 m³/h时,雨水口实际泄流量等于路面径流量,试验各工况实测泄流量均小于设计泄流量(20 L/s);泄流量随各影响因素发生改变,单一的泄流能力值不足以给各种工程设计提供确切参考。

② 试验发现,横坡坡度对径流宽度的影响显著,增大横坡坡度,能同时增加雨水口的前缘泄流量和侧边泄流量,因此能显著提高雨水口的泄流量;但当横坡坡度>1.5%时,泄流量的增加幅度变小。

③ 道路纵坡坡度从0.3%增加到5%时,雨水口泄流量的变化范围仅为5 m³/h左右,这是由于纵坡只改变径流流速大小,不改变径流方向,所以对径流宽度和泄流量的影响相比于道路横坡要小。

④ 用试验装置进行雨水口泄流模拟试验时,雨水口上游需要有足够的模拟道路长度来保证径流达到恒定均匀流。在相同的道路坡度下,径流量越大,径流覆盖的区域越大,但是不会影响径流流线的形态。横坡坡度越大,径流面越窄,而纵坡坡度越大,径流达到均匀流前需要的路径越长。从试验测量的水深数据可知,最大深度为35 mm,积水深度远小于15 cm,试验条件是非内涝情况,且雨水算子的泄流为无压流。

参考文献:

- [1] 朱呈浩,夏军强,周美蓉,等. 雨水口泄流计算对城市洪涝模拟结果影响研究[J]. 水力发电学报,2019,38

- (8):75-86.
ZHU Chenghao, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, *et al.* Effects of calculation methods of stormwater outlet discharges on simulations of urban flooding[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(8):75-86 (in Chinese).
- [2] SMITH M B. Comment on 'Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems' [J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(3/4):355-363.
- [3] SCHALLA F E, ASHRAF M, BARRETT M E, *et al.* Limitations of traditional capacity equations for long curb inlets[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2638(1):97-103.
- [4] GÓMEZ M, RECASENS J, RUSSO B, *et al.* Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: numerical and experimental comparison [J]. Water Science & Technology, 2016, 74(8):1926-1935.
- [5] 汉京超, 俞士静, 陈秀成. 沿海平原河网城市排水防涝典型问题及对策分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(4):30-35.
HAN Jingchao, YU Shijing, CHEN Xiucheng. Analysis of typical problems and countermeasures of drainage and waterlogging prevention in coastal plain river network city [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(4):30-35 (in Chinese).
- [6] LI W H, GEYER J C, BENTON G S. Hydraulic behavior of storm-water inlets: I. Flow into gutter inlets in a straight gutter without depression [J]. Sewage and Industrial Wastes, 1951, 23(1):34-46.
- [7] 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.
- [8] MARTINS R, RUBINATO M, KESSERWANI G, *et al.* On the characteristics of velocities fields in the vicinity of manhole inlet grates during flood events[J]. Water Resources Research, 2018, 54(9):6408-6422.
- [9] 安智敏, 岑国平, 吴彰春. 雨水口泄流量的试验研究[J]. 中国给水排水, 1995, 11(1):21-24.
AN Zhimin, CEN Guoping, WU Zhangchun. Experimental study on the discharge flow into street inlet [J]. China Water & Wastewater, 1995, 11(1):21-24 (in Chinese).
- [10] 吴鹏, 杨敏, 何京莲, 等. 雨水口算子的孔口流量系数试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(6):65-68.
WU Peng, YANG Min, HE Jinglian, *et al.* Experiment on discharge coefficients for orifices of gutter grates [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(6):65-68 (in Chinese).
- [11] 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, 43(5):44-47.
GUO Lei, LIU Senyan, LIU Leibin, *et al.* Study on the setting of urban road gullies [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(5):44-47 (in Chinese).
- [12] 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).

作者简介:王秋萍(1994-),女,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为市政道路雨水口优化设计。

E-mail:wangqiuping1004@163.com

收稿日期:2020-03-17

修回日期:2020-06-02

(编辑:刘贵春)