

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.20.014

# 道路植草沟进水口设置的计算方法

崔忠捷<sup>1</sup>, 卿晓霞<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 我国现行设计规范缺乏完整的道路植草沟进水口开口设计计算方法, 借鉴美国城市雨水排放标准手册, 给出了进水口开口宽度计算公式, 分析认为当截留率确定后, 计算得到的开口宽度还应受植草沟最大设计流量的制约; 采用雨水口设置间距计算方法, 给出了进水口开口设置间距计算公式, 明确了道路纵坡对公式中相关参数取值的影响; 基于水力计算方法, 提出了进水口开口角度的计算方法, 认为随着道路纵坡增大, 开口角度应逐渐减小。基于 Fluent 对进水口二维水力特征的模拟结果表明, 与传统直角开口相比, 按计算角度开口可改善进水口的水力条件, 其进水流速增大, 约为直角开口的流速的 1.4 倍, 显著提高了植草沟的收水能力; 内部水流速减小约 30%, 进水对植草沟内部植物及土壤的冲击减小。

**关键词:** 道路植草沟; 海绵城市; 植草沟进水口; 进水口开口角度

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)20-0076-06

## Calculation Method for Inlet Setting of Road Grass Swale

CUI Zhong-jie<sup>1</sup>, QING Xiao-xia<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** The current design code in China lacks a systematic design and calculation method for inlet setting of road grass swales. Calculation formula of inlet width was proposed by using the *Urban Drainage Standards Manual* of the United States for reference. When the rejection rate was determined, the calculated inlet width should be restricted by the maximum design flow of the grass swale. Based on the method of calculating the spacing of gutter inlet, the formula of calculating the spacing of inlet was proposed, and influence of road longitudinal slope on relevant parameter values in the formula was clarified. Based on hydraulic calculation method, a method for calculating the inlet angle of the road grass swale was put forward. The calculation results showed that the inlet angle would decrease gradually with the increase of the longitudinal slope of the road. Based on Fluent software, the two-dimensional hydraulic characteristics of the inlet were simulated. Compared with traditional rectangular openings, openings with the calculated angular could improve the hydraulic conditions at the inlet. The inlet flow velocity increased to about 1.4 times, which significantly improved the water collecting capacity of the grass swale. In addition, the internal flow velocity decreased by about 30%, which reduced the influence

基金项目: 山地城市面源污染控制和雨洪管理技术与示范项目(2017YFC0404704); 重庆海绵城市建设与运维技术研究示范项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0010)

通信作者: 卿晓霞 E-mail: 13983707801@126.com

of influent on scouring of plants and soil in the grass swale.

**Key words:** road grass swale; sponge cities; inlet of the grass swale; opening angle of the inlet

植草沟是一种海绵城市技术,在发达国家已被广泛用于道路雨水径流的处理<sup>[1]</sup>,目前国内关于植草沟的研究及应用主要侧重于确定植草沟的构造及设计参数,如傅大宝等<sup>[2]</sup>借鉴美国《城市排水设计手册》,采用基于径流体积的水文方法对植草沟进行设计,建立了植草沟规划目标与工程设计之间的关系。孟莹莹等<sup>[3]</sup>通过模拟径流实验,对植草沟设计参数如降雨重现期、滞蓄深度、边坡比、植被覆盖率、面积负荷比等进行了优化,表明在满足一定参数条件下,植草沟能更加有效地削减径流量和洪峰流量。国家建筑标准设计图集《城市道路与开放空间低影响开发雨水设施》(15MR105)虽然规定了植草沟类型及其断面形式、设计参数等要求,但缺乏对植草沟收水能力的定量计算,可能直接导致实际进水量远小于设计流量。国外学者的研究关注到了植草沟进水口设计的重要性,如Guo<sup>[4]</sup>通过模拟实验,提出基于堵塞因子的衰减函数,分析了堵塞情况下对路缘石开口设计的影响,并应用于多种结构的路缘石设计。Comport等<sup>[5]</sup>通过测试不同道路条件下路缘石开口大小对植草沟收水能力的影响,建立了进水口流量流动特征的经验方程。

植草沟进水口开口宽度、设置间距和开口角度是影响其收水能力的重要因素,但现有研究缺乏针对该问题完整的设计计算方法探讨与分析。梁小光<sup>[6]</sup>借鉴美国联邦公路管理局关于偏沟和立算式雨水口的计算方法,指出下凹式路缘石收水率更高,但没有明确进水口设置间距的计算方法,更没提及进水口开口角度的问题。植草沟进水口开口宽度偏大或设置间距过小可帮助减轻入水口堵塞概率,并在一定程度上减缓植草沟内的水流流速,增加污染物截除能力,但会导致建设成本增加,并对景观造成一定影响,而开口宽度偏小或设置间距过大可用于控制汇入植草沟的水流流速,使汇流在整个植草沟均匀分布,但同时也会导致收水率低,无法充分发挥植草沟的作用。尤其是开口角度会对植草沟进水口处水力特征产生影响,进而影响进水口流速及其收水能力。因此,有必要对植草沟进水口的开口宽度、设置间距和开口角度等的设计计算方法进行系统探

讨,达到对道路地表径流进行科学组织、提高植草沟收水能力、减少进水口水流流速的目的。这对于我国大力发展的海绵城市建设中充分发挥低影响开发设施的效益、降低面源污染具有重要意义。

## 1 植草沟进水口设计

为了全面探讨道路植草沟进水口设置的计算方法,首先采用立算式雨水口的计算方法对植草沟进水口开口宽度和设置间距进行计算;然后,为提高植草沟的收水能力,提出一种基于水力计算的植草沟进水口开口角度的计算方法,并采用Fluent软件对进水口的二维水力特征进行模拟,以分析开口角度对进水口以及内部的流速及流态的影响;最后以某城市道路为范例进行设计计算。

### 1.1 进水口开口宽度计算

植草沟进水口开口宽度设计类比于立算式雨水口,可借鉴文献<sup>[7]</sup>给出的道路偏沟流量计算方法和立算式雨水口设计计算公式进行计算。道路偏沟横截面如图1所示,其中 $T$ 为道路漫幅(m), $S_x$ 为道路横坡, $y$ 为堰前水深(m)。

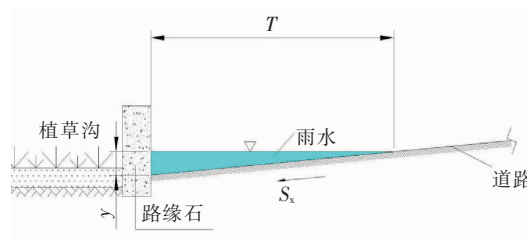


图1 道路偏沟横截面

Fig. 1 Cross section of road kerb

计算公式如下:

$$W = W_T [1 - (1 - E)^{\frac{1}{1.8}}] \quad (1)$$

式中: $W$ 为植草沟进水口开口宽度,m; $E$ 为植草沟截留率,即植草沟设计截留量占道路偏沟流量的比值 $Q_i/Q$ , $Q_i$ 、 $Q$ 分别为进入植草沟的降雨径流量和偏沟流量; $W_T$ 为截留全部偏沟流量所需开口宽度,m。

$$W_T = 0.38 Q^{0.51} S_L^{0.058} \left( \frac{1}{n S_e} \right)^{0.46} \quad (2)$$

式中: $S_L$ 为道路纵坡; $n$ 为粗糙系数; $S_e$ 为等效横坡。

道路偏沟流量主要由道路雨水及周边汇水区域汇流雨水组成,采用下式计算:

$$Q = \frac{0.56}{n} S_e^{\frac{5}{3}} S_L^{\frac{1}{2}} T^{\frac{8}{3}} \quad (3)$$

根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006, 2016年版)第4.7.2A条文以及文献[7],当采用下凹式进水口时,等效横坡计算公式如下:

$$S_e = S_x + \frac{a}{W_g} E_0 \quad (4)$$

式中: $a$ 为下凹深度,取0.05 m; $W_g$ 为下凹宽度,一般与平算宽度相同,取0.45 m; $E_0$ 为正面拦截比,%。

$$E_0 = \frac{1}{1 + \frac{S_w/S_x}{[1 + \frac{S_w/S_x}{T/W - 1}]^{\frac{8}{3}} - 1}} \quad (5)$$

$$S_w = S_x + \frac{a}{W} \quad (6)$$

由式(2)可知,植草沟进水口开口宽度与偏沟流量及截留率有关。当偏沟流量较大时,为减少道路雨水,可通过增大植草沟截留雨水量,设置较大的开口宽度,提高收水率。但对于一个具体工程而言,当植草沟的截留率确定后,植草沟的最大开口宽度其实还受到其最大设计径流量的制约。

## 1.2 进水口设置间距计算

植草沟进水口开口与立算式雨水口集水相似,可借鉴雨水口设置间距计算公式<sup>[8]</sup>,由下式计算确定:

$$L = \frac{\psi Q_Y}{EQ'} \quad (7)$$

式中: $L$ 为植草沟间距,m; $\psi$ 为折减系数,一般取值0.5~0.6<sup>[8]</sup>; $Q_Y$ 为植草沟进水口开口理论收水能力,L/s; $Q'$ 为纵坡方向上单位长度雨水设计流量,L/(s·m)。

$$Q_Y = KC_0 A_0 (2gy)^{0.5} \quad (8)$$

式中: $K$ 为孔口堵塞系数,取0.9; $C_0$ 为堰口流量系数,取0.6; $A_0$ 为理论进水孔口面积,m<sup>2</sup>。

根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006, 2016年版)第4.7.1A条文“立算式雨水口应考虑10%被堵塞”,故孔口堵塞系数 $K$ 取值为0.9。

纵坡方向上单位长度雨水设计流量 $Q'$ 计算如下:

$$Q' = \lambda qd \quad (9)$$

式中: $\lambda$ 为综合径流系数; $d$ 为汇水区道路宽度,m; $q$ 为暴雨强度,L/(s·hm<sup>2</sup>)。

对上述计算公式分析可知,当截留率确定后,植草沟的设置间距与其进水口开口宽度和道路纵坡相关。这是因为当植草沟进水口开口高度(一般为路缘石高度)一定时,其开口理论收水能力与开口宽度成正比。植草沟开口宽度越大,其收水能力就越强,同时上游开口未能收集的传输流量也越小。而植草沟收水量由本段偏沟流量和传输流量组成,故可增大植草沟的设置间距。另外,当纵坡较大时,偏沟雨水流速也较大,纵坡方向上单位长度雨水设计流量加大,不利于植草沟集水,故应减小植草沟的设置间距,反之亦然。因此,式(7)中的折减系数应根据道路纵坡的不同调整取值,道路纵坡越大时, $\psi$ 取值越小。

## 1.3 进水口开口角度计算

植草沟进水口开口角度,是指进水口开口边缘与道路水流方向间的夹角,如图2所示。采用水力计算方法,通过计算道路雨水理论流速方向,得到植草沟进水口开口角度 $\theta$ 的计算公式,并分析开口角度对植草沟收水能力的影响。

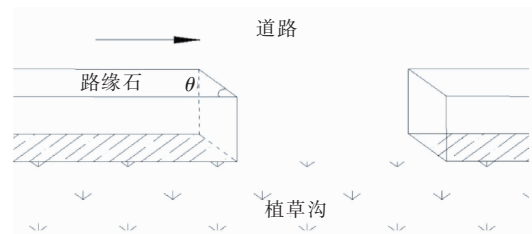


图2 植草沟进水口开口角度示意

Fig. 2 Design opening angle of the inlet of grass swale

根据理想流体元流能量方程,在流场中任取一段元流,对于元流上任意两点1、2,列伯努利方程:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w' \quad (10)$$

式中: $z_1, z_2$ 为位置水头,m; $p/\rho g$ 为压强水头,m; $\alpha v^2/2g$ 为流速水头,m; $\alpha_1, \alpha_2$ 为动能修正系数,一般取 $\alpha = 1.05 \sim 1.10$ ; $h_w'$ 为总流的水头损失,m。

为求解道路雨水流动方向,根据动量定理及静压强分布规律,得到 $x$ 方向上动量方程式:

$$\rho Q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) = \sum F_x \quad (11)$$

$y$ 方向上静水压力方程式:

$$\sum F_y = \frac{1}{2} \rho g y^2 \quad (12)$$

式中: $\rho$  为液体的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为动量修正系数,取  $1.02 \sim 1.05$ ;  $v_1$ 、 $v_2$  为  $x$  方向雨水流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $F_x$  为  $x$  方向受力,  $\text{N}$ ;  $F_y$  为  $y$  方向受力,  $\text{N}$ 。

其中,  $x$  平行于路缘石方向,  $y$  垂直于路缘石方向。

道路任一点流速值可采用平均流速计算公式作近似计算:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad (13)$$

式中: $\bar{v}$  为道路雨水平均流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

$$\tan \varphi = \frac{\sum F_x}{\sum F_y} \quad (14)$$

式中: $\varphi$  为植草沟进水口开口与道路垂直方向的夹角。

联立式(10)~(14),得:

$$\varphi = \arctan \frac{2Q \left\{ \beta_2 \left[ \frac{2g}{\alpha_1} \left( \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \Delta h - h_w' \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \beta_2 v_1 \right\}}{gy^2} \quad (15)$$

得:

$$\theta = 90^\circ - \varphi \quad (16)$$

由式(15)可知,植草沟进水口开口角度受多种因素影响,由于其大小与堰前水深的平方成反比,因此路缘石开口处的水深对开口角度影响最大。虽然一方面由于道路雨水沿横坡方向流入道路偏沟,当偏沟水深较大时,垂直于路缘石方向的静水压强增大,有利于提高收水效率;但另一方面,偏沟流量沿道路纵坡方向排出,与静水压强方向垂直,使水流方向发生倾斜,雨水在进入植草沟时的水力特征会发生改变。因此,对于纵坡较大的道路,尤其是山地城市道路更应重视植草沟进水口开口角度的设置,以提高其收水能力。

为此,对不同道路纵坡下植草沟进水口开口角度进行了计算。基本计算参数如下:道路漫幅  $7.5 \text{ m}$ ;道路横坡  $1.5\%$ ,纵坡  $3\%$ ;进水口开口宽度  $0.2 \text{ m}$ ,偏沟宽度  $0.5 \text{ m}$ ;堰前水深  $0.15 \text{ m}$ ;截留率  $100\%$ 。计算结果见表1。可见,为截留全部偏沟雨水,随着道路纵坡的增大,植草沟的开口角度应逐渐减小。

为进一步分析植草沟进水口开口角度变化时的水力学特征,针对该道路采用 Fluent17.0 软件对植

草沟进水口处的二维水力特征进行了模拟,模型采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,入水口初始流速设置为  $3 \text{ m}/\text{s}$ ,压强为一个标准大气压,设置残差的阈值为  $10^{-6}$ ,模型迭代运行  $1\,000$  次,模拟结果见图3。

表1 植草沟进水口开口角度计算结果

Tab.1 Calculation results of the opening angle of the inlet of grass swale

$S_L$	$y/\text{m}$	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$\theta/(\circ)$
0.01	0.15	1.580 9	2.107 9	69
0.02	0.15	2.235 8	2.981 1	50
0.03	0.15	2.738 3	3.651 0	37
0.05	0.15	3.535 1	4.713 5	23
0.10	0.15	4.999 4	6.665 8	13
0.12	0.15	5.476 5	7.302 1	11

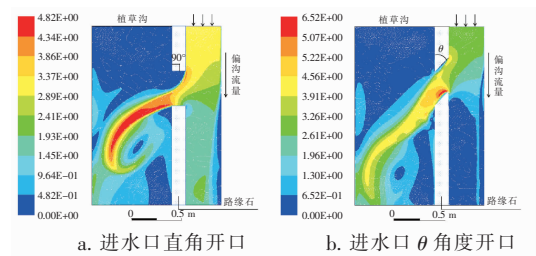


图3 植草沟进水口处水力特征模拟

Fig.3 Simulation of hydraulic characteristics at the inlet of grass swale

由图3可以看出,当植草沟采用传统直角开口时[见图3(a)],偏沟流量在进入植草沟时,由于受进水口上缘区域路缘石阻碍,其有效进水区域主要集中在进水口开口下缘,进水流速在  $2.9 \sim 3.9 \text{ m}/\text{s}$  之间,内部流速范围在  $3.4 \sim 4.8 \text{ m}/\text{s}$  之间,且水流出现涡漩现象,部分雨水发生回流,使得进入植草沟的流量减小,植草沟的收水效率较低,无法充分发挥其消纳道路雨水的作用;当开口角度减小至  $\theta$ [见图3(b)]时,偏沟流量进入植草沟时,进水口流速在  $3.9 \sim 5.9 \text{ m}/\text{s}$  之间,约是直角开口流速的  $1.4$  倍,且水流充满整个进水口,未形成明显涡漩,进入植草沟的水量显著增加,收水效率增大。此时,植草沟内部水流流速分布在  $2.0 \sim 3.9 \text{ m}/\text{s}$  之间,比直角开口减少约  $30\%$ ,因此水流对植草沟内部产生的冲击作用也较直角开口更小。观察偏沟处流速分布可以看出,当植草沟开口角度为  $37^\circ$  时,几乎可收集全部道路雨水。因此相同开口宽度条件下,通过改变植草沟进水口开口角度,不仅可以减少收水时间,显著提高植草沟收水效率,而且还可缓解进水对植草沟内



部的植物及土壤造成的冲刷影响。

## 2 案例计算

以重庆两江新区悦来滨江路为例进行道路植草沟进水口开口设计计算。

重庆两江新区悦来新城作为国家首批 16 个海绵城市试点区域之一,其城市道路雨水设计基于海绵城市理念,力求通过设置植草沟对道路雨水径流冲击及面源污染进行改善。如图 4 所示,悦来滨江路机动车道总宽度为 24 m,长度为 480 m,道路横坡为 1.5%、纵坡为 3.68%,路面粗糙系数为 0.015,综合径流系数为 0.7。滨江路现状道路两侧设置了开口为倒梯形的植草沟,梯形底宽为 0.2 m,顶宽为 0.5 m,设置间距为 5 m。

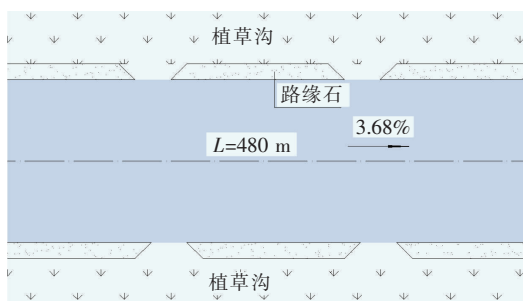


图 4 悦来滨江路示意

Fig. 4 Schematic diagram of Yuelai Binjiang Road

根据重庆市暴雨强度计算公式:

表 2 滨江路植草沟进水口开口宽度及设置间距计算结果

Tab. 2 Calculation results of opening width and setting spacing of the inlet of grass swale on Binjiang Road

$P/a$	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$S_e$	$y/m$	$T/m$	$Q_y/(m^3 \cdot s^{-1})$	$W/m$	$L/m$
1	0.001 807	0.125 9	0.009 3	0.617 5	0.007 7	0.23	18.7
3	0.002 622	0.125 5	0.010 7	0.710 0	0.010 0	0.27	16.8
5	0.003 000	0.125 3	0.011 2	0.746 9	0.011 0	0.29	16.1
10	0.003 514	0.124 9	0.011 9	0.795 2	0.012 4	0.32	15.4
50	0.004 708	0.124 0	0.013 3	0.884 3	0.015 2	0.37	14.1
100	0.005 222	0.123 5	0.013 8	0.914 9	0.016 4	0.39	13.7

## 3 讨论

通过对道路植草沟进水口设置计算方法的研究、分析以及实例计算,从以下三方面进行总结与讨论:

① 道路植草沟进水口开口宽度可借鉴美国城市雨水排放标准手册中道路偏沟流量和立算式雨水口设计计算公式进行计算。但对于一个具体工程,当截留率确定后,植草沟的开口宽度还应受到其最大设计径流量的制约。

② 道路植草沟进水口开口间距的设置可根据

$$q = \frac{1\ 111(1 + 0.945 \lg P)}{(t + 9.713)^{0.561}} \quad (17)$$

式中: $P$  为重现期,a; $t$  为降雨历时,min。

降雨历时:

$$t = t_1 + mt_2 \quad (18)$$

式中: $t_1$  为地面集水时间,min; $m$  为延缓系数,明渠取  $m = 1.2$ ; $t_2$  为管渠内雨水流行时间,min。

从图 4 可知,滨江路为双幅道路,植草沟收集道路单侧雨水。假设植草沟单个进水口开口汇水面积为相邻两个开口间道路的面积,截留率取 100%。根据式(16)计算结果,植草沟开口角度  $\theta = 31^\circ$ ,且不同降雨重现期下开口宽度和设置间距计算结果如表 2 所示。可见,当滨江路道路植草沟采用  $31^\circ$  的角度开口时,通过设置不同进水口开口宽度和间距,可在不同降雨重现期下收集全部道路雨水,不需要另外设置道路雨水口。将计算结果与滨江路现状植草沟设置情况比较,发现本计算得到的开口宽度与现状开口宽度相差约 0.2 m,设置间距比现状开口增大超过 8 m。因此所提出的设计计算方法,可使植草沟进水口收水能力显著提高,有效减小植草沟内的汇流流速,提高植草沟截留污染物的能力,并减少汇流冲走已截留的污染物的情况。在相同截留率的条件下,可使开口数量大大减少,缩短工期,更加美观。

雨水口设置间距的计算公式进行计算。分析认为,由于道路纵坡变化时,偏沟雨水流速变化,纵坡方向上单位长度雨水设计流量也发生变化,直接影响植草沟的集水,从而对植草沟的设置间距产生影响。因此,应根据道路纵坡的不同,调整计算公式中的折减系数取值,道路纵坡越大时,折减系数取值应越小。

③ 基于水力计算方法,可推演得到植草沟开口角度  $\theta$  的计算公式。对不同道路纵坡下植草沟进水口开口角度的计算结果表明,随着纵坡的增大,植

草沟的开口角度应逐渐减小;进水口水力模拟结果表明,当进水口采用 $\theta$ 角度开口时,进水口流速比直角开口的流速增大,且水流充满整个进水口,能显著提高植草沟的收水能力,与此同时,植草沟内部水流流速比直角开口减小,进水口水流对植草沟内部的植物及土壤造成的冲刷影响较直角开口减弱。

所提出的道路植草沟进水口设置计算方法,应用于海绵城市设计与建设能充分发挥道路植草沟的作用并提升效益。但由于植草沟进水口开口宽度及设置间距的计算方法借鉴了美国设计手册经验,公式中的堰口流量系数应注意视我国的具体工程条件进行取值。同时,由于道路纵坡对雨水进入植草沟时的水力特征影响较大,因此,对于纵坡较大的道路,尤其是山地城市道路更应重视植草沟进水口开口角度的设置,经计算后确定开口角度,既能减少路缘石的开口数量,又能提高植草沟的收水能力。

#### 4 结语

道路植草沟作为一种海绵城市技术,能够有效缓解城市道路面源污染。对城市道路植草沟进水口开口宽度、设置间距和开口角度进行了完整的设计计算与分析,确定了植草沟进水口的设置计算方法。在后续的研究中,建议对如何寻找适合工业预制的最佳路缘石开口角度与设计方法,以及如何防止道路垃圾堵塞导致收水能力下降、如何减少棱角以保证行人和行车安全等方面对路缘石开口问题作进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 戈鑫,杨云安,管运涛,等. 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究[J]. 中国给水排水,2018,34(19):134-138.  
GE Xin, YANG Yun'an, GUAN Yuntao, *et al.* A case study on control of non-point source pollution by grassed swales in south Jiangsu[J]. China Water & Wastewater, 2018,34(19):134-138(in Chinese).
- [2] 傅大宝,姜红. 海绵城市理念下植草沟的设计方法研究[J]. 中国给水排水,2017,33(20):70-75.  
FU Dabao, JIANG Hong. Research on design method of grassed swales in the view of the sponge cities[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20):70-75(in Chinese).
- [3] 孟莹莹,陈茂福,张书函. 植草沟滞蓄城市道路雨水的试验及模拟[J]. 水科学进展,2018,29(5):636-644.  
MENG Yingying, CHEN Maofu, ZHANG Shuhan. Experiment and simulation of the vegetative swale to control road stormwater[J]. Advances in Water Science, 2018,29(5):636-644(in Chinese).
- [4] GUO J. Design of street curb opening inlets using a decay-based clogging factor[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,132(11):1237-1241.
- [5] COMFORT B C, THORNTON C I. Hydraulic efficiency of grate and curb inlets for urban storm drainage[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,138(10):878-884.
- [6] 梁小光. 海绵城市建设中路沿石开口水力计算及设计优化[J]. 中国给水排水,2018,34(2):42-45.  
LIANG Xiaoguang. Hydraulic calculation and design optimization of curb opening in sponge city construction[J]. China Water & Wastewater,2018,34(2):42-45(in Chinese).
- [7] WAUGH P D, JONES J E, URBONAS B R, *et al.* Denver Urban Storm Drainage Criteria Manual[EB/OL]. (2012-04-26)[2020-07-03]. [https://doi.org/10.1061/40644\(2002\)56](https://doi.org/10.1061/40644(2002)56).
- [8] 余步存,蒋岚岚,梁汀. 城市市政道路雨水口设计探讨[J]. 给水排水,2016,42(1):65-68.  
SHE Bucun, JIANG Lanlan, LIANG Ting. Probe into the stormwater inlet of the urban municipal road[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(1):65-68(in Chinese).

**作者简介:**崔忠捷(1995-),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为数值模拟、海绵城市技术。

**E-mail:**17815382014@163.com

**收稿日期:**2020-09-03

**修回日期:**2020-10-17

(编辑:孔红春)