

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.016

海绵城市年径流污染总量削减率定义及计算方式探讨

苏定江^{1,2}, 刘希^{1,2}, 董佳^{1,2}, 蔡岚^{1,2}, 毛绪昱^{1,2}, 刘杰^{1,2}

(1. 重庆市市政设计研究院有限公司, 重庆 400030; 2. 重庆市海绵城市建设工程技术研究中心, 重庆 400030)

摘要: 年径流污染总量削减率是我国海绵城市建设基本控制指标之一,从工程设计可行角度探讨了其存在的狭义和广义两种定义。狭义年径流污染总量削减率为雨水设施对已形成的径流中污染物去除比例,计算所需参数可通过现有标准取值,但采用“1-雨量径流系数”作为年径流总量控制率时不适用于该计算方式。广义年径流污染总量削减率为低影响开发模式下外排径流污染物减少比例,计算所需参数不能通过现有的标准取值,因此提出了近似计算方式。广义年径流污染总量削减率可以体现透水下垫面对径流污染的去除效果,现阶段工程设计中推荐采用广义年径流污染总量削减率定义及其近似计算方式。

关键词: 海绵城市; 年径流污染总量削减率; 计算方式; 低影响开发

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0093-07

Definition and Calculation Method of Total Annual Runoff Pollutant Reduction Rate in Sponge City

SU Ding-jiang^{1,2}, LIU Xi^{1,2}, DONG Jia^{1,2}, CAI Lan^{1,2}, MAO Xu-yu^{1,2}, LIU Jie^{1,2}

(1. Chongqing Municipal Research Institute of Design, Chongqing 400030, China; 2. Sponge City Engineering Technology Research Center of Chongqing, Chongqing 400030, China)

Abstract: Total annual runoff pollutant reduction rate is one of the basic control indicators of sponge city construction in China. This paper discussed the narrow and broad definitions of total annual runoff pollutant reduction rate from the perspective of engineering design feasibility. In the narrow sense, total annual runoff pollutant reduction rate is the proportion of pollutants removed from the formed runoff by rainwater facilities. The parameters required for calculation can be set according to the existing standards. However, it is not suitable to apply this calculation method when the total annual runoff control rate is selected from “1-rainfall runoff coefficient”. In the broad sense, total annual runoff pollutant reduction rate is the reduction ratio of runoff pollutants under low-impact development mode. The parameters required for calculation can not be calculated by existing standards. Therefore, an approximate calculation method was proposed. The generalized total annual runoff pollutant reduction rate can reflect the performance of permeable underlying surface for the removal of runoff pollutants. Therefore, it is recommended to adopt the definition of generalized total annual runoff pollutant reduction rate and its approximate calculation method in current engineering design.

Key words: sponge city; total annual runoff pollutant reduction rate; calculation method;

基金项目: 重庆市建设科技项目(城科学2021第7-14)

low-impact development

低影响开发雨水系统构建是我国海绵城市建设中实现源头减排的主要方式,在住房和城乡建设部发布的《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称《指南》)中,关于低影响开发有两个基本的控制指标:年径流总量控制率和年径流污染总量削减率(径流污染物以悬浮物计,以下同)。在实际工程设计中,年径流总量控制率在《指南》中定义较为明确,设计人员理解分歧较小,采用的计算方法也较为统一;年径流污染总量削减率在《指南》中定义较为模糊,设计人员理解分歧较大,特别是当采用透水铺装、绿色屋顶等低影响开发设施时,其计算方式多样。目前,我国已经进入全域化推进海绵城市建设阶段,有必要进一步明确年径流污染总量削减率的定义及计算方法,规范低影响开发设计工作,本研究主要从工程设计可行角度对年径流污染总量削减率定义及对应的计算方法进行了探讨。

1 定义探讨

1.1 前提条件

年径流污染总量削减率,顾名思义是雨水径流中的污染物去除量(或减少量)和总量的比值,笔者认为现阶段存在广义和狭义两种定义。在讨论其定义之前,基于设计人员人工计算(非软件建模方式)可行的角度,需做如下简化限定:

① 下垫面径流:下垫面径流为降雨形成的地表径流,非地表径流不在讨论范围内。例如降雨时,部分雨水在下垫面处就地入渗或截留,由于不产生地表径流,那么无论该部分雨水裹挟多少污染物、在入渗或截留过程中去除了多少污染物,均不属于本次讨论范畴。

② 下垫面径流污染物类型:下垫面径流污染物特指径流中的悬浮物(SS),年径流污染总量削减率即年SS总量去除率。雨水径流中的污染物主要包括SS、有机物、氮、磷等,由于径流中的污染物浓度与SS存在相关性,且径流中的SS直接影响人的视觉感受,因此《指南》中采用SS作为径流污染物代表性指标,本研究也沿用了将SS代表径流污染物的做法。

③ 下垫面径流污染物浓度:下垫面的径流污

染物浓度根据其应用场景差异巨大,同一应用场景下的下垫面径流污染物浓度在不同场次降雨下也有差异,同一场雨在降雨前段、中段和后段的径流污染物浓度也不尽相同。在工程设计中,为了便于计算,通常将同一下垫面的径流污染物浓度取为定值,径流污染物浓度采用该下垫面的年降雨事件平均浓度(EMC),本研究也沿用该种做法。

④ 下垫面雨量径流系数:下垫面的雨量径流系数与降雨前的晴天数量、下垫面的持水量密切相关,是一个取值范围。在工程设计中,为了便于计算,通常将同一下垫面的雨量径流系数取为定值,本研究也沿用该种做法。

⑤ 雨水设施对径流污染物的去除率:雨水设施对进入其中的径流污染物的去除率是一个取值范围,可通过多年的实际监测获取其平均去除率。在工程设计中,为了便于计算,通常将某一雨水设施对径流污染物的去除率取为定值,本研究也沿用该种做法。

1.2 狭义年径流污染总量削减率

狭义年径流污染总量削减率可以定义为某下垫面已经产生径流中的污染物通过配套雨水设施去除的比例。该定义基于1.1节中下垫面径流的限定前提下,强调配套雨水设施对下垫面已产生径流中污染物的去除,即下垫面对自身表面已经形成的径流中污染物并无再次去除效果,需要另外配套相关雨水设施(如雨水花园)来去除径流污染。例如在该定义下的年径流污染总量削减率为50%,即指某下垫面径流通过配套雨水设施去除的污染量与下垫面产生的径流污染物总量的比值为50%。下垫面设置雨水设施后其径流污染物外排方式如图1所示。

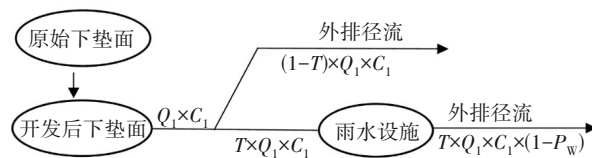


图1 设置雨水设施后径流污染物外排示意

Fig.1 Schematic diagram of runoff pollutant discharge after setting rainwater facilities

根据图1可知,狭义年径流污染总量削减率 P_1

计算如下:

$$P_1 = (T \times Q_1 \times C_1 \times P_w) / (Q_1 \times C_1) = T \times P_w \quad (1)$$

式中: Q_1 为开发后下垫面的年径流总量; C_1 为开发后下垫面的年径流污染物浓度(雨水设施入流污染物浓度); T 为通过雨水设施得到控制的径流比例; P_w 为雨水设施污染物去除率。

根据《指南》,年径流总量控制率 P_1 为通过雨水设施控制的那部分降雨与总降雨的比值,当其分子、分母同时乘以径流系数和汇水面积时,可得到 $P_1=T$,因此式(1)可转换如下:

$$P_1 = P_i \times P_w \quad (2)$$

需要特别指出的是,当下垫面组成中采用透水铺装、绿色屋顶等时,可以降低下垫面本身的径流系数,但根据狭义年径流污染总量削减率定义,其对自身表面形成的地表径流中的污染物并无去除效果,因此透水铺装、绿色屋顶的狭义年径流污染总量削减率为0,即狭义年径流污染总量削减率不能直接反映下垫面仅透水比例提升后对径流污染物的去除效果。只有当下垫面设有容积式的雨水设施时,将下垫面部分改造为透水铺装、绿色屋顶等,由于降低了下垫面的径流系数,可使原有的雨水设施实现更高的 P_i 。根据式(2),在 P_w 不变的前提下, P_i 增大可实现更高的狭义年径流污染总量削减率 P_1 ,从而间接体现透水铺装、绿色屋顶对径流污染的去除效果。

1.3 广义年径流污染总量削减率

广义年径流污染总量削减率可以定义为某下垫面采用低影响开发模式比采用普通开发模式减少向外界排放的径流污染物比例。该定义强调两种开发模式的对比,可以直观反映出低影响开发对下垫面径流污染物的总体削减效果,易为人们理解和接受。例如广义年径流污染总量削减率取值为50%,就是指当某下垫面采用低影响开发模式时,比普通开发模式向外排放的径流污染物总量减少了50%。不同开发模式下的径流污染物对外排放方式如图2所示。可知,广义年径流污染总量削减率 P_2 计算如下:

$$P_2 = 1 - (Q_2 \times C_2) / (Q_3 \times C_3) \quad (3)$$

式中: Q_2 、 C_2 分别为低影响开发模式下的年径流总量和年径流污染物浓度; Q_3 、 C_3 分别为普通开发模

式下的年径流总量和年径流污染物浓度。

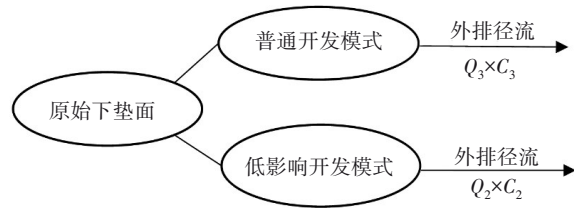


图2 不同开发模式下的径流污染物外排示意(一)

Fig.2 Schematic diagram of runoff pollutant discharge under different development modes(I)

设计过程中,当下垫面是由多种单一下垫面组成综合下垫面时,式(3)可采用综合下垫面的年径流总量和径流污染物浓度。同时,设计中下垫面的年径流总量 Q 可以用下式表示:

$$Q = A \times B \times \Psi \quad (4)$$

式中: A 为下垫面面积; B 为年平均降雨量; Ψ 为下垫面雨量径流系数。

因此普通开发模式下产生的年径流总量 $Q_3=A \times B \times \Psi_3$,低影响开发模式下产生的年径流总量 $Q_2=A \times B \times \Psi_2$,将 Q_3 和 Q_2 代入式(3),则下垫面的年径流污染总量削减率 P_2 如下:

$$P_2 = 1 - (\Psi_2 \times C_2) / (\Psi_3 \times C_3) \quad (5)$$

式中: Ψ_2 为低影响开发模式下的雨量径流系数; Ψ_3 为普通开发模式下的雨量径流系数。

由式(5)可知,只要在低影响开发中某下垫面的整体雨量径流系数与其径流污染浓度之积小于普通开发模式下两者之积,即可实现一定的广义年径流污染总量削减率(即 $P_2>0$)。

需要特别指出的是,若下垫面在低影响开发中仅采用透水铺装、绿色屋顶,下垫面本身的雨量径流系数下降,那么 Ψ_2/Ψ_3 必然小于1,在径流污染物浓度不发生较大变化($C_2/C_3 \approx 1$)的情况下,透水铺装或者绿色屋顶具有一定的广义年径流污染总量削减率。

1.4 两者关系

广义年径流污染总量削减率强调低影响开发模式与普通开发模式下垫面外排径流污染物的对比,狭义年径流污染总量削减率强调雨水设施削减径流污染物与下垫面产生径流污染物的对比,两者出发点不同。当某下垫面在低影响开发中配套独立雨水设施时,其径流污染物外排方式如图3所示。

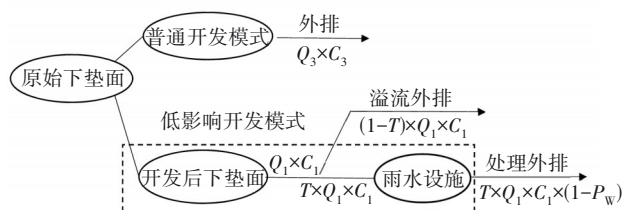


图3 不同开发模式下径流污染物外排示意(二)

Fig.3 Schematic diagram of runoff pollutant discharge under different development modes(II)

此时,低影响开发模式的外排污染物总量如下所示:

$$Q_2 \times C_2 = (1 - T) \times Q_1 \times C_1 + T \times Q_1 \times C_1 \times (1 - P_w) \quad (6)$$

则广义年径流污染总量削减率可以表示为:

$$P_2 = 1 - \Psi_1 \times C_1 \times (1 - P_w \times P_1) / (\Psi_3 \times C_3) \quad (7)$$

由式(7)可知,狭义年径流污染总量削减率是广义年径流污染总量削减率计算的组成部分。当 $\Psi_1 \times C_1 = \Psi_3 \times C_3$ 时,可得 $P_1 = P_2$,即狭义年径流污染总量削减率是广义年径流污染总量削减率在下垫面采用普通开发模式且只设雨水设施去除径流污染的特例。

2 狭义年径流污染总量削减率计算

2.1 与年径流总量控制率关系

年径流总量控制率本身即可作为径流污染控制指标^[1-3],可用于计算径流污染控制容积从而确定设施规模。为直观表示径流污染物去除比例,《指南》中又规定了“年径流污染总量削减率=年径流总量控制率×低影响开发设施对SS的平均去除率”,从该计算公式可以看出,《指南》中的年径流污染总量削减率为本研究中的狭义年径流污染总量削减率。

需要特别指出的是,在我国现有技术标准^[4]中允许采用“1-雨量径流系数”作为年径流总量控制率。“1-雨量径流系数”可以理解为原地截留不产生径流的降雨占总降雨的比例,该部分降雨未形成径流,与下垫面配套的雨水设施不发生关系,而本研究中的狭义年径流污染总量削减率计算公式中的年径流总量控制率是由雨水设施实现的,因此采用“1-雨量径流系数”作为年径流总量控制率时,不适用于本研究中狭义年径流污染总量削减率的计算方式。

2.2 计算参数取值

根据式(2),狭义年径流污染总量削减率 P_1 计算参数有两个:雨水设施污染物去除率 P_w 和年径流总量控制率 P_i 。 P_i 的取值在《指南》中规定得较为清晰,可根据 P_i 计算雨水设施控制容积,亦可根据雨水设施控制容积反算得出 P_i ,故取值不存在问题。对于 P_w 的取值,我国在该方面已开展了不少试验研究^[5-8],但总体来说尚无权威数据发布,目前一般按照《指南》中雨水设施对径流污染物的去除率取值(该数据来自美国流域保护中心的研究成果)。计算 P_1 所需参数取值均可根据《指南》获取,因此在工程设计中计算该值是可行的。

3 广义年径流污染总量削减率计算

3.1 存在问题

根据式(7),广义年径流污染总量削减率 P_2 的计算除需明确雨水设施污染物去除率 P_w 和年径流总量控制率 P_i 取值外,还需明确雨量径流系数和径流污染物浓度取值。下垫面的雨量径流系数可以查阅现有设计标准^[9-10]或者参考《指南》取得,但雨水径流污染物浓度取值、普通开发模式的界定等在《指南》或我国现有的设计标准中均无规定,计算该值存在问题。

3.1.1 普通开发模式界定问题

广义年径流污染总量削减率是低影响开发模式和普通开发模式的对比,因此普通开发模式的确定就显得非常重要,目前我国并无任何技术标准(含指南、导则等)对其进行界定,设计人员无据可依,可能会导致低影响开发后下垫面(含雨水设施)完全一样,而其广义年径流污染总量削减率不同的情况。例如某项目有情形1和情形2两种情况(如表1所示),进行低影响开发后的下垫面组成和雨水设施完全一致,但如果将低影响开发设计前的下垫面不加区别地作为普通开发模式,根据 P_2 的计算公式,情形1的 P_2 则较情形2高。

该计算结果与目前我国海绵城市指标管控方式不匹配。我国建设项目海绵指标由政府直接给定,无论是情形1还是情形2,其最终都要达到给定年径流污染总量削减率指标值,而两种情形低影响开发后的下垫面(含雨水设施)一致,其广义年径流污染总量削减率理应相同。为解决此矛盾,需规定一种标准的下垫面开发模式作为普通开发模式,该

模式能够被设计人员无差别识别,专门用于广义年径流污染总量削减率的计算。

表1 低影响开发前后下垫面对比(一)

Tab.1 Comparison of underlying surface before and after low-impact development(I)

项目	低影响开发设计前的下垫面组成	低影响开发设计后的下垫面组成
情形1	绿地占比30%,不透水铺装占比30%,普通屋面占比40%	绿地占比30%,不透水铺装占比30%,绿色屋面占比40%。
情形2	绿地占比30%,不透水铺装占比15%,透水铺装占比15%,普通屋面占比40%	不设置单独的雨水花园

3.1.2 径流污染物浓度取值问题

在广义年径流污染总量削减率计算中,径流污染物浓度必须要有确定的取值,而目前我国尚未有相关标准规范对下垫面的径流污染物浓度取值进行规定,且可以预见的是,各种下垫面的径流污染物浓度取值需要大量论证工作,故该规定短期内不会出台。同时,我国各地区在径流污染物浓度方面也开展过一些研究^[11-14],但所得结论中径流污染物浓度均为跨度较大的取值范围,无法用于确定工程设计参数取值。

3.2 解决方式

3.2.1 普通开发模式界定

针对普通开发模式界定的问题,建议将项目下垫面组成中除绿地、水体外,其他部分均为不透水下垫面且无任何雨水设施的开发模式视为普通开发模式,这样处理的好处是不含现有的各类低影响开发措施(如绿色屋顶、透水铺装等),因此采用任何低影响开发设施均可以实现一定的广义年径流污染总量削减率,低影响开发后的下垫面组成和雨水设施相同,则计算所得的广义年径流污染总量削减率也相同。

3.2.2 径流污染物浓度取值

针对径流污染物浓度取值问题,笔者认为有以下两种解决方式。

第一种解决方式是国家或者地方出台相关技术标准,直接明确几种典型下垫面的径流污染浓度取值(如透水车行道、不透水车行道、透水人行道、不透水人行道、广场、绿地、屋顶等),未涉及的下垫面参考执行;综合下垫面由单一下垫面的径流污染浓度加权得到,权重为每种下垫面对应的年径流量占比。

量占比。

第二种解决方式是假定同一应用场景下的下垫面径流污染物浓度为一个定值(例如某建筑小区采用透水铺装前后,其应用场景并未发生明显变化,人为活动对下垫面的污染也没有太大改变,虽然采用透水铺装后其雨量径流系数减小,但假设其整体的径流污染物浓度未发生变化),即式(7)中的 $C_1 \approx C_3$,则 P_2 的计算可以简化为:

$$P_2 = 1 - \Psi_1 \times (1 - P_w \times P_i) / \Psi_3 \quad (8)$$

式(8)中所有参数均可通过查阅《指南》及现有技术标准确定,从而计算得到 P_2 。

上述两种解决方式各有利弊,前者从原理上更为合理,但目前看来出台技术标准明确径流污染物浓度尚不成熟,不能解决现阶段的设计问题。后者建立在下垫面径流浓度 C_1 和 C_3 相差不大的假设下,但缺乏试验数据支撑,如后期有较多数据能够证明 C_1 和 C_3 的比例关系,也可以对本公式进行修正。

4 计算示例

以下举例说明说明狭义、广义年径流污染总量削减率计算的区别。根据《指南》,绿地、透水铺装、绿色屋顶、不透水铺装、普通屋面的雨量径流系数取值分别为0.15、0.15、0.25、0.85和0.85。

① 情形1:某下垫面原为不透水铺装,现改为透水铺装。由于无雨水设施, $P_i=0$,则 $P_1=P_w \times P_i=0$; $\Psi_1=0.15$, $\Psi_3=0.85$, 则 $P_2=1 - \Psi_1 \times (1 - P_w \times P_i) / \Psi_3=1 - \Psi_1 / \Psi_3=82\%$ 。

② 情形2:某下垫面原为普通屋面,现改为绿色屋顶。由于无雨水设施, $P_i=0$,则 $P_1=P_w \times P_i=0$; $\Psi_1=0.25$, $\Psi_3=0.85$, 则 $P_2=1 - \Psi_1 \times (1 - P_w \times P_i) / \Psi_3=1 - \Psi_1 / \Psi_3=70.6\%$ 。

③ 情形3:某下垫面的组成改变,未设置雨水花园。该情形下低影响开发前后下垫面对比如表2所示。

表2 低影响开发前后下垫面对比(二)

Tab.2 Comparison of underlying surface before and after low-impact development(II)

低影响开发设计前的下垫面组成	低影响开发设计后的下垫面组成
绿地占比30%,不透水铺装占比30%,普通屋面占比40%	绿地占比30%,不透水铺装占比10%,透水铺装占比20%,绿色屋面占比40%。未设置单独的雨水花园

由于无雨水设施, $P_i=0$, 则 $P_i=P_w \times P_i=0$; $\Psi_3=0.3 \times 0.15+0.3 \times 0.85+0.4 \times 0.85=0.64$, $\Psi_1=0.3 \times 0.15+0.1 \times 0.85+0.2 \times 0.15+0.4 \times 0.25=0.26$, $P_2=1-\Psi_1 \times (1-P_w \times P_i)/\Psi_3=1-\Psi_1/\Psi_3=1-0.26/0.64=59.4\%$ 。

④ 情形4: 某下垫面的组成改变, 同时设置雨水花园。该情形下低影响开发前后下垫面对比如表3所示。

表3 低影响开发前后下垫面对比(三)

Tab.3 Comparison of underlying surface before and after low-impact development(III)

低影响开发设计前的下垫面组成	低影响开发设计后的下垫面组成
绿地占比30%, 不透水铺装占比30%, 普通屋面占比40%	绿地占比30%, 不透水铺装占比10%, 透水铺装占比20%, 绿色屋面占比40%。设置单独的雨水花园, 雨水花园对应的年径流总量控制率 P_w 取值为70%, 雨水花园污染物去除率 P_i 取值为70%

由于 $P_i=70\%$ 、 $P_w=70\%$, 则 $P_i=P_w \times P_i=70\% \times 70\%=49\%$; $\Psi_3=0.3 \times 0.15+0.3 \times 0.85+0.4 \times 0.85=0.64$, $\Psi_1=0.3 \times 0.15+0.1 \times 0.85+0.2 \times 0.15+0.4 \times 0.25=0.26$, 则 $P_2=1-\Psi_1 \times (1-P_w \times P_i)/\Psi_3=1-0.26 \times (1-49\%)/0.64=79.3\%$ 。

由计算示例可知, 广义年径流污染总量削减率可以体现不透水下垫面改为透水下垫面对径流污染物的去除效果, 计算数值较狭义年径流污染总量削减率更大, 可以更为全面地反映低影响开发设施对径流污染的削减作用。

5 结论及建议

① 采用狭义年径流污染总量削减率能反映出容积式雨水设施对径流污染物的去除效果, 在工程设计中可根据《指南》及现有设计标准进行参数取值计算, 这种计算方式与《指南》中推荐的计算方式一致, 但不能反映出仅是下垫面自身径流系数下降带来的径流污染物减少效果。同时, 采用“1-雨量径流系数”作为年径流总量控制率时, 不适用于狭义年径流污染总量削减率计算方式。

② 采用广义年径流污染总量削减率更能反映低影响开发对径流污染物的削减作用, 目前在工程设计中不能根据《指南》及现有的技术标准进行参数取值计算, 主要原因是径流污染物浓度无法确定。本研究提出广义年径流污染总量削减率的近似计算方式, 可根据《指南》及现有技术标准进行参

数取值计算。

③ 年径流总量控制率本身可作为径流污染控制指标来计算雨水设施规模, 在此基础上进一步计算狭义年径流污染总量削减率的必要性不大。为了鼓励透水铺装、绿色屋顶等降低下垫面雨量径流系数的低影响开发设施使用, 在当前的工程设计中建议采用广义年径流污染总量削减率定义及其近似计算方式。

参考文献:

- [1] 任心欣, 汤伟真. 海绵城市年径流总量控制率等指标应用初探[J]. 中国给水排水, 2015, 31(13): 105-109. REN Xinxin, TANG Weizhen. Application of capture ratio of total annual runoff volume in spongy city [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(13): 105-109 (in Chinese).
- [2] 李俊奇, 李小静, 王文亮, 等. 美国雨水径流控制技术导则讨论及其借鉴[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 6-12. LI Junqi, LI Xiaojing, WANG Wenliang, et al. Technical guidance for stormwater runoff control in United States and its significance [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 6-12 (in Chinese).
- [3] 苏定江, 蒲贵兵, 刘杰, 等. 海绵城市年径流总量控制率与雨量径流系数关系探讨[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 38-42. SU Dingjiang, PU Guibing, LIU Jie, et al. Discussion on the relationship between volume capture ratio of annual rainfall and volumetric runoff coefficient in sponge cities [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 38-42 (in Chinese).
- [4] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设评价标准: GB/T 51345—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 11. Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Assessment Standard For Sponge City Construction Effect: GB/T 51345-2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 11 (in Chinese).
- [5] 魏成耀. 苏州海绵试点区典型地块径流污染控制研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2021: 17-35. WEI Chengyao. Study on Runoff Pollution of Typical Plots in Suzhou Sponge City Pilot Area [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021: 17-35 (in Chinese).
- [6] 张辰. 植草沟对雨水径流量及径流污染控制研究

- [D]. 武汉:华中科技大学, 2019: 39-56.
- ZHANG Chen. Control of Rainfall Runoff and Its Pollution by Typical Grassed Swale [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019: 39-56 (in Chinese).
- [7] 杨银川, 肖冰, 崔贺, 等. 海绵城市的发展沿革及其对径流污染控制的研究现状[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2018(6): 32-42.
- YANG Yinchuan, XIAO Bing, CUI He, *et al.* Development history of sponge cities and the state of research on runoff pollution control [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2018(6): 32-42 (in Chinese).
- [8] 姜登岭, 张丹荣, 何连生, 等. 生物滞留设施净化城市面源污染研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 96-102.
- JIANG Dengling, ZHANG Danrong, HE Liansheng, *et al.* Advance of research on urban non-point source pollution control by bioretention facilities [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(1): 96-102 (in Chinese).
- [9] 住房和城乡建设部. 建筑与小区雨水控制与利用工程技术规范: GB 50400—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 6-7.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical Code for Rainwater Management and Utilization of Building and Sub-district: GB 50400-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 6-7 (in Chinese).
- [10] 重庆市城乡建设委员会. 低影响开发雨水系统设计标准: DBJ 50/T—292—2018[S]. 重庆: 重庆市建设技术发展中心, 2018: 10-11.
- Chongqing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development. Standard for Design of Low Impact Development Stormwater System: DBJ 50/T—292—2018 [S]. Chongqing: Chongqing Construction Technology Development Center, 2018: 10-11 (in Chinese).
- [11] 汉京超. 城市雨水径流污染特征及排水系统模拟优化研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013: 82.
- HAN Jingchao. Characteristics of Urban Rainwater Runoff Pollution and Simulation & Optimization of Discharge Systems [D]. Shanghai: Fudan University, 2013: 82 (in Chinese).
- [12] 颜文涛, 韩易, 何强. 山地城市径流污染特征分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(3): 136-142.
- YAN Wentao, HAN Yi, HE Qiang. Characterization of stormwater runoff pollution in mountain city [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(3): 136-142 (in Chinese).
- [13] 蒋荣廷. 重庆市悦来新城典型下垫面雨水径流水质特性的初步研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 27-62.
- JIANG Rongting. Monitoring and Characteristics Analysis of Stormwater Runoff of Typical Land Surfaces in Yuelai New City, Chongqing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 27-62 (in Chinese).
- [14] 冯萃敏, 米楠, 王晓彤, 等. 基于雨型的南方城市道路雨水径流污染物分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 418-426.
- FENG Cuimin, MI Nan, WANG Xiaotong, *et al.* Analysis of road runoff pollutants in northern city based on the typical rainfall [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 418-426 (in Chinese).

作者简介: 苏定江(1979—), 男, 重庆人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事市政给排水、水环境整治、项目低影响开发等方面的设计及研究工作。

E-mail: 21105107@qq.com

收稿日期: 2022-06-27

修回日期: 2022-09-01

(编辑: 沈靖怡)