

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231210002

文章编号: 1672-9331(2024)04-0140-09

引用格式: 李静, 郑浩通, 刘正乾. 海绵型建筑与小区年径流污染控制率计算方法探讨[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(4): 140-148.

Citation: LI Jing, ZHENG Haotong, LIU Zhengqian. Discussion on the calculation method of annual runoff pollutant control rate in sponge buildings and residential areas [J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(4): 140-148.

海绵型建筑与小区年径流污染控制率计算方法探讨

李静¹, 郑浩通², 刘正乾²

(1. 中南建筑设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430071; 2. 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:【目的】年径流污染控制率是海绵城市建设中的核心控制指标, 对指导海绵设施设计具有重要意义。但其设计计算过程中的计算方法与公式存在不统一或不合理的问题, 须探究更适用于实际工程的计算公式。【方法】梳理了国内外对于海绵设施污染物去除率的取值来源与计算方法, 分析了目前工程设计中单一海绵设施对污染物去除率的取值和地块污染平均去除率计算方法存在的问题, 并对比不同地区雨水管理径流控制指标, 从定义出发推导更适用于建筑与小区小尺度流域的计算方法。【结果】在建筑与小区等小尺度流域的设计中, 与其他三种地块海绵设施对悬浮物的平均去除率的算法相比, 采用海绵设施的有效汇水面积进行加权平均计算会更加合理; 而在年径流污染控制率的计算中, 引入累积污染物负荷率与累积径流体积率比例, 将其转化为年平均径流污染量控制率与污染物平均去除率的乘积进行计算会更加合理。【结论】对于年径流污染控制率的计算应该积极开展试验或数值模拟, 并形成适合国内实际情形的数据库。应该提高设计人员对源头海绵设施污染物去除过程的认知, 避免在建筑与小区等小尺度流域的设计计算中采用不合适的公式而引起的误差。

关键词: 海绵城市; 建筑与小区; 径流污染; 低影响开发; 年径流污染控制率; 年径流总量控制率; 悬浮物
中图分类号: U417.3; TU992 **文献标志码:** A

Discussion on the calculation method of annual runoff pollutant control rate in sponge buildings and residential areas

LI Jing¹, ZHENG Haotong², LIU Zhengqian²

(1. Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China, 2. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: [Purposes] The annual runoff pollutant control rate is the core control index in the construction of sponge city, which is of great significance for guiding the design of sponge facilities. However, there is a problem that the calculation method and formulas in the design and calculation process are not uniform or unreasonable, and it is necessary to explore the calculation formulas that are more suitable for the practical projects. [Methods] The sources and calculation methods of the pollutant removal rate by sponge facilities in China and abroad were sorted out, and the problems existing in the calculation method of the pollutant removal rate and the average pollutant removal rate of land plots by a single sponge facility in the current engineering design were

收稿日期: 2023-12-10; 修回日期: 2024-03-15; 接受日期: 2024-03-16

基金项目: 中南建筑设计院股份有限公司产品研发项目(CSADI-2020-11)

通信作者: 刘正乾(1979—)(ORCID:0000-0001-6454-6182), 男, 教授, 主要从事水和污水的深度处理以及固体废物资源化利用方面的研究。E-mail: zhengqianliu@hust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

analyzed. Through the comparison of rainwater management runoff control indicators in different regions, the calculation method more suitable for the small-scale watershed of buildings and residential areas was deduced from the perspective of definition. [Findings] In the design of small-scale watersheds such as buildings and residential areas, it is more reasonable to use the weighted average of the effective catchment area of sponge facilities for calculation compared with the other three calculation methods of the average removal rate of suspended solids in the land plots by sponge facilities. In the calculation of the annual runoff pollutant control rate, it would be more reasonable to calculate it as the product of the average annual runoff pollutant control rate and the average pollutant removal rate by introducing the ratio of cumulative pollutant load rate to cumulative runoff volume rate. [Conclusions] Experiments or simulations should be actively conducted to calculate the annual runoff pollutant control rate, so as to form a database suitable for the actual situation in China. It is necessary to improve the designer's understanding of the pollutant removal process from the source of sponge facilities and avoid the errors caused by the use of inappropriate formulas in the design and calculation of small-scale watersheds such as buildings and residential areas.

Key words: sponge city; building and residential area; runoff pollutant; low impact development; annual runoff pollutant control rate; total annual runoff control rate; suspended solid

Foundation item: Project (CSADI-2020-11) supported by Product research and development project of Central-South Architectural Design Institute Co., Ltd.

Corresponding author: LIU Zhengqian (1979—)(ORCID: 0000-0001-6454-6182), male, professor, research interest: advanced treatment of water and wastewater and resource utilization of solid waste.

E-mail: zhengqianliu@hust.edu.cn

0 引言

2014年10月,中华人民共和国住房和城乡建设部发布《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》(下文简称《指南》),文中提出径流总量控制和径流污染控制两大核心目标。2015年,随着全国首批海绵城市建设试点城市的建设,各地海绵城市建设相关的指南、标准及规范也纷纷出台。根据《指南》的建议,径流总量控制一般作为首要目标,是实现雨水资源化利用和污染控制的基础,对海绵城市合理规划建设具有重要意义;而径流污染控制目标决定了排水系统释放的污染物总量,与城市水环境保护息息相关。因此,对两大控制目标的设计计算方法进行统一与优化,有利于提高设计成果的可靠度,并进一步促进海绵设施在实际应用中发挥更稳定的作用,推动海绵城市建设更广泛以及更深入地进行。

自《指南》发布及各试点城市启动建设以来,

国内许多研究者对径流总量控制和径流污染控制两项核心控制目标及其指标进行了相关探讨,不断深化对指标的理解,提高其实地应用的可行性。任心欣等^[1]采用暴雨洪水管理模型(storm water management model, SWMM)分析探讨了雨量径流系数与年径流总量控制率之间的联系;许可等^[2]同样基于SWMM模型证实了海绵城市低影响设计对雨水径流控制的贡献。在年径流总量控制率计算方法方面,苏定江等^[3]分析了“1-雨量径流系数”方法的不合理性,并基于定义提出了雨量径流系数和年径流总量控制率的内在关系;李盛等^[4]以年径流总量控制率为标准对暴雨强度公式进行了评价。此外,近几年的一系列研究^[5-7]对优化年径流总量控制指标分解方法进行了探讨,目标是提高指标在实地应用中的可操作性,并陆续提出了“容积法”“模型计算法”和以排水分区作为计算单元的方法等。对于另一大控制目标——径流污染控制,陈星等^[8]在关于计算方法的探讨中将污染物去除率分为下垫面吸收、调蓄容积沉淀和初

期雨水弃流三部分,采用分别平均再加和的方式计算;苏定江等^[9]讨论了年径流污染控制率的广义和狭义定义,提出了依据雨水径流系数和污染物去除率的广义年径流污染控制率近似计算方法。一些报道也聚焦国内外导则的差异进行了评述,如李俊奇等^[10]对美国雨水径流控制技术导则进行了解读与讨论,分析了我国海绵城市建设中年径流总量控制指标能够借鉴和调整的方向。

在海绵城市建设的两大控制目标上,目前对于径流总量控制指标——年径流总量控制率,各地标准形成了较为统一的认识,且具有比较充分的相关计算研究。但是,年径流污染控制率的定义与计算在设计中仍然存在一定的争议,这在一定程度上影响了实际海绵设施的设计质量与使用效果。本文的工作是在各类现有标准和指南的基础上,开展文献调研,对海绵城市径流污染控制率相关参数的概念及其在建筑与小区项目中的设计计算方法进行了梳理和探讨。

1 参数取值的探讨

《指南》中提出的径流污染控制是低影响开发雨水系统的控制目标之一。在城市径流污染物中,悬浮物(suspended solids,SS)浓度往往与其他污染物指标具有一定的相关性,因此,一般可采用SS浓度作为径流污染物控制指标。在该前提下,年径流污染控制率可以定义如下:在多年平均降雨条件下,雨水经过海绵设施的预处理、物理沉淀和生物净化等过程后,建设场地内累积全年得到控制的雨水径流污染物总量占全年径流污染物总量的比例,其中污染物以SS浓度计。

在径流污染物控制率的计算中,单一海绵设施的污染物去除率是一个非常重要的指标。《指南》及大部分地区的海绵设计规范中,选取的相关数据均取自美国流域保护中心的研究数据,如表1所示。京津冀区域协同地方标准规范《海绵

表1 各地标准中海绵设施污染物去除率取值对比

Table 1 Comparison of pollutant removal rates by sponge facilities in local standards

单项设施	污染物去除率(污染物以SS浓度计)/%			
	《指南》	京津冀地标	湖南地标	新疆导则
透水砖铺装	80~90	80~90	80~90	80~90
透水水泥混凝土	80~90	(透水铺装)		80~90
透水沥青混凝土	80~90		80~90	80~90
绿色屋面	70~80	70~80	70~80	70~80
下沉式绿地				30~50
简易型生物滞留设施		70~95	70~95	40~80
复杂型生物滞留设施	70~95	(生物滞留设施)	(生物滞留设施)	70~95
渗透塘	70~80		70~80	70~80
湿塘	50~80		50~80	50~80
雨水湿地	50~80		50~80(表流)	50~80
			75~95(潜流)	
蓄水池	80~90	80~90	80~90	80~90
雨水罐	80~90		80~90	80~90
传输型植草沟	35~90	35~90	35~90	35~90
干式植草沟	35~90	(植被浅沟)	35~90	传输型植草沟
渗管/渠	35~70	35~70	35~70 (渗管/渠/沟)	35~70
蓄水池	80~90	80~90	80~90	80~90
雨水罐	80~90		80~90	80~90
传输型植草沟	35~90	35~90 (植被浅沟)	35~90	35~90
干式植草沟	35~90	35~90	35~90	雨水罐

注:在京津冀地标中:1、传输型植被浅沟取低值,传输兼入渗型植被浅沟取高值;2、打孔渗透管(沟)取低值,开孔率越高值越大,软式渗透管取高值。

城市雨水控制与利用工程设计规范》(DB13(J) 8457—2022)(下文简称“京津冀地标”)、湖南省地方标准《湖南省雨水控制与利用工程技术标准》(DBJ 43/T390—2022)(下文简称“湖南地标”)、新疆地方导则《新疆维吾尔自治区海绵城市建设技术导则(试行)》(XJ-HMCSJSJS—2020)(下文简称“新疆导则”)分别单独给出了海绵设施污染物去除率,见表 1。

将各地相关标准中的海绵设施污染物去除率进行对比发现,地方标准在参考《指南》的基础上,根据实践中的应用情况进行了优化。京津冀地标把同类海绵设施进行了合并归类,针对被设计人员所诟病的植被浅沟取值范围过大的问题,提出了对传输型取低值,对传输兼入渗型取高值的方案。湖南地标提出渗透井的污染物去除率指标,将雨水湿地区分为表流和潜流,并分别给出相应数据;对于植草沟,虽然将其分为了简易型和复杂型,但并没有对污染物去除率的取值进行区分,故不分别列出。新疆导则中给出了目前应用十分广泛的下沉式绿地的污染物去除率,区分了简易型和复杂型生物滞留设施,并增加了简易型取值范围的设定。然而上述地方标准或导则中对于新增数据来源没有进行详细说明。

目前,国外已经对单一海绵设施去除污染物进行了大量的研究^[11-13]。美国国家流域中心不断筛选汇总单一海绵设施污染物去除表现研究并进行统计分析,形成数据库,目前已更新至第三版数据(2007)^[13]。纳入数据库的研究都必须符合三项标准:(1)收集了 5 个或更多的降雨事件样本;(2)能够使用自动化设备进行连续采样和检测;(3)给出了计算去除效率的方法。同时,目前美国环境保护署和其他机构一直在研究可以利用现有数据确定长期或年污染物质量负荷去除效果的方法。在海绵设施的规划和设计过程中,长期或年污染物去除率更具有参考性^[14-15]。

2 海绵设施计算方法梳理与优化

2.1 地块海绵设施对悬浮物的平均去除率

海绵设施对悬浮物的平均去除率 ω 是年径流污染控制率计算中的重要因子^[16-20]。关于场地内海绵设施对悬浮物平均去除率 ω 的计算,大部分指南、标准和规范中没有给出详细算法,仅描述为加权平均算法,使得目前在实践应用中出现了几种常见的算法,如表 2 所示^[16-20]。

表 2 海绵设施对悬浮物平均去除率常见计算方法的对比

Table 2 Comparison of common calculation methods for average suspended solids removal rate by sponge facilities

项目	算法一	算法二	算法三	算法四
公式	$\omega = \sum(\omega_i F_i) / \sum F_i$	$\omega = \sum(\omega_i V_i) / \sum V_i$	$\omega = \sum(\omega_i F_i) / \sum F_i$	$\omega = \sum(\omega_i F_i \Psi_i) / F_z \Psi_z$
参数说明	ω_i 为单项海绵设施的污染物去除率,按表 1 取值; F_i 为海绵设施的面积, m^2 。	ω_i 为单项海绵设施的污染物去除率(按表 1 取值),非海绵设施下垫面取值为 0; V_i 为场地内海绵设施的有效调蓄容积, m^3 。	ω_i 为单项海绵设施的污染物去除率(按表 1 取值),非海绵设施下垫面取值为 0; F_i 为场地内海绵设施的有效汇水面积, m^2 ,包括汇水分区内海绵设施下垫面和非海绵设施下垫面的面积。	ω_i 为单项海绵设施的污染物去除率,按表 1 取值; F_z 为场地内海绵设施汇水面积之和, m^2 ; Ψ_i 为场地内单个地块综合雨量系数; Ψ_z 为场地内综合雨量径流系数。
特点	简单采用海绵设施面积进行加权平均,计算简便。	按照海绵设施调蓄容积进行平均,计算简便。	取海绵设施的有效汇水面积进行加权平均,较符合实际。	引入综合雨量径流系数进行平均,考虑了综合雨量径流系数较大时下垫面的悬浮物平均去除率较低的现象。
不足	实际工程中常存在非海绵设施下垫面的雨水汇入的情况,此时仅考虑海绵设施的作用则计算不合理。	忽略了无直接调蓄功能的海绵设施污染物削减作用,仅适用海绵设施均匀分配于各汇水分区的情况。		综合雨量径流系数须参考实测降雨资料得出,测定及参数计算过程误差较大,且计算较复杂。

2.2 年径流污染控制率的计算

关于场地内年径流污染控制率的计算,大部分省市都采用《指南》中给出的计算方法,如《上海市海绵城市建设技术规程(试行)》(下文简称“上海规程”)和《深圳市房屋建筑工程海绵设施设计规程》(SJG38—2017)(下文简称“深圳规程”),计算方法如式(1)所示:

$$M_w = M_j \omega \quad (1)$$

式中: M_w 为场地内年径流污染控制率; M_j 为场地内年径流总量控制率。

《武汉市建设工程规划方案(海绵城市部分)编制技术规定(试行)》(下文简称“武汉市规划方案”)[21]中未提出年径流污染控制,而是将径流污染控制指标定义为面源污染削减率。面源污染削减率的计算方法为,先以每个海绵设施的汇水分区为单元,计算单项海绵设施对污染物的去除率(同表1),然后采用加权平均的方法进行计算。但是文中并没有给出具体的计算公式。

将目前相对较为常用的《指南》和“武汉市规划方案”两种指标算法进行对比,可以发现两者相差了一个系数,即年径流总量控制率。对于式(1),场地内无论采用何种海绵设施,年径流污染

控制率总是小于年径流总量控制率。考虑极端情况,即使年径流总量控制率 M_j 等于1,年径流污染控制率 M_w 仍然小于1。对应到实际工程中,即使场地没有雨水径流流出,也会有污染物流出场地。这显然是不合理的。

由于源头海绵设施对径流污染物的去除受初期雨水面源污染的影响较大,径流污染的累积与径流量的累积成非线性相关[22]。在重庆进行的不同降雨场次下、不同下垫面的雨水径流量累积与径流污染累积的研究表明[23-24],同一降雨场次下径流污染物累积占径流总污染物的比例大于对应的累积径流量占降雨量的比例。车伍等[25]研究也发现,在初期冲刷效应明显时,年径流污染控制率可能会大于年径流总量控制率。吴海春等[26]研究认为,年径流污染控制率只是一个相对概念,其与年径流总量控制率之间并无比例关系。

为进一步探究年径流总量控制率与年径流污染控制率之间的关系,本文将国内外典型地区年径流总量控制率与年径流污染控制率的数据进行了对比分析,如表3所示。

除武汉市外,表3中的年径流污染控制率数据均采用式(1)计算。其中,上海市的年径流总量控

表3 国内外雨水管理径流控制指标对比

Table 3 Comparison of Chinese and foreign rainwater management runoff control indicators

地区	多年平均降雨量/mm	年径流总量控制率/%	对应的设计降雨量/mm	年径流污染控制率(以总悬浮物固体浓度计)/%
中国西宁 ^[27]	380.0	85~90	12.7~15.6	68~74
中国白城 ^[27]	399.8	80~85	17.8~24.6	50~70
中国天津 ^[28]	538.9	≥55~85	12.1~37.8	≥40
中国鹤壁 ^[27]	664.9	70~85	22.2~38.5	40~60
中国上海 ^[27]	1 123.7	75~85	22.2~33.0	75~85
中国重庆 ^[27]	1 133.0	75~85	14.1~43.5	≥50
中国三亚 ^[27]	1 263.0	60~85		≥45
中国武汉 ^[21]	1 269.0	60~85	17.6~43.3	50~70(面源污染控制率)
加拿大埃德蒙顿市 ^[29]	477.0	95(场次降雨)	25.5	85
美国密歇根州 ^[30]	838.0	90(场次降雨)	25.0	80
美国佛蒙特州 ^[30]	990.0	90(场次降雨)		80
美国宾夕法尼亚州 ^[31]	1 067.0		25.0	85
美国纽约州 ^[13]	1 050.0	90(场次降雨)	20.0~31.0	80
美国康涅狄格州 ^[30]	1 092.0		25.0	80
澳大利亚汤斯维尔市 ^[32]	1 099.0		≥10.0~15.0	80
新西兰奥克兰 ^[33]	1 351.0	80	35.4	75

制率与年径流污染控制率相当,与式(1)算法无法吻合。其他大部分城市的年径流总量控制率平均在75%左右(对应平均降雨量25 mm左右),年径流污染控制率平均在50%左右。国外年径流总量控制降雨量多在25 mm左右,大多采用年场次降雨控制。一般情况下,90%~95%的年降雨场次控制率大致对应80%~85%的年径流总量控制率,精确关系取决于基于降雨资料的统计分析^[25]。从计算数据上来看,在年径流总量控制率相当的情况下,我国的年径流污染控制率较国外的偏低。

2.3 现有计算方法的分析与修正

从控制目标的定义来看,年径流污染控制率为年平均径流污染去除量与年平均径流污染产生量的比值,其中年径流污染去除量为海绵设施截留在地块内的径流污染量与污染物平均去除率的乘积,即将年径流污染控制率的定义式转化为年平均径流污染截留率与污染物平均去除率的乘积。然而,式(1)采用年径流体积控制率与污染物平均去除率乘积的算法,是基于两个假设为前提的^[15]:①假设任何超过设计径流量的雨水都不会得到处理;②假设污染物的浓度在降雨事件中随时间均匀分布。对于假设①,因为所有的径流并不是同时到达海绵处理设施而使超过设计径流深度的雨水未经处理一次溢流,因此假设①与实际雨水径流过程相比较,对处理量的估计较为保守。对于假设②,当初始浓度高于后期溢流径流浓度时,式(1)的计算值也是保守的。而在小尺度流域,雨水径流污染物的累积主要取决于初期冲刷效应比较显著的湿沉降和雨水冲刷地表,管道冲刷效应不是非常显著,因此初期冲刷效应是显著的。

因此,在大尺度规划和设计中,年径流污染控制率采用式(1)会更加便于计算,也更符合我国国情。但在建筑与小区小尺度流域中,建议引入累积污染物负荷率与累积径流体积率比例,由于该比例与年径流总量控制率的乘积是年平均径流污染量控制率,则可以将年径流污染控制率转化为年平均径流污染量控制率与污染物平均去除率的乘积,如式(2)所示:

$$M_w = aM_j\omega \quad (2)$$

式中: a 为场地平均累积污染物负荷率与累积径流

体积率比例。

在单次不同下垫面不同重现期条件下,标准累积径流比例与标准累积污染物负荷比例的计算已有很多报道^[23, 24, 38]。针对长期的场地平均累积污染物负荷率与累积径流体积率比例,应结合各地长期降雨资料及径流雨水污染负荷,对不同重现期下的降雨事件进行统计分析和模拟计算^[34]。但该计算过程较为复杂,建议未来进一步研究 a 值简易算法,以便于其在工程中的应用。

3 讨论

在海绵设施的设计中,年径流污染控制率的确定与设施对污染物平均去除率有紧密的联系。本文对国内地区标准及部分国外研究中单一海绵设施污染去除率的取值来源进行了比较系统的梳理,可以看出国内主要依靠《指南》给定的范围结合实际情况对其优化后使用,而国外已经较早地建立了该方面的数据库。在实际应用中,由于单一设施的去除效果受到设施总体布局设计、设施规模和施工时的结构控制等多种因素的影响,因此仅仅针对海绵设施本身进出流表现的研究数据不能有效地用于预测海绵设施长期或每年的去除效率。

针对地块内海绵设施对SS平均去除率的计算方法,本文整理对比了目前设计中常用的四种加权平均计算公式。经对比分析发现,算法一和算法二只考虑按面积与容积平均,属于较理想情况下的简便算法,忽略了实际工程的特点;算法三是在算法一和二的基础上考虑了有效汇水面积,在提高合理性的同时保留了计算的简便可行性;而算法四考虑了污染物去除与雨量径流系数的内在联系,较为贴近实际工程,但计算较为复杂,并且由于径流总量控制率已经包含对径流控制与污染控制关系的考量,算法四在利用平均去除率计算年径流污染控制率时存在定义上的问题。设计应根据实际情况以及实测数据的分析,选择合适的方法计算场地内海绵设施对SS的平均去除率,在缺乏实测数据时,应结合具体工程的特点。当场

地汇水分区内海绵设施布置合理且雨水径流路径通畅时,建议选择算法三作为大多数海绵设施对SS的平均去除率计算公式。

对于年径流污染控制率的计算方法,本文在国内外指标数据对比的基础上,分析了目前使用最多的《指南》计算方法存在的不足,并从定义出发,引入累积污染物负荷率与累积径流体积率比例对当前公式进行了修正,使其更适合小尺度流域的设计计算。笔者认为这样的修正不仅能在一定程度上直接反映《指南》提出的控制目标,而且增强了设计人员对于源头海绵设施污染物去除过程的理解,避免“生搬硬套”在一些实际小规模项目中带来的误差。

4 结论

1) 目前,我国大部分海绵城市指南或者标准对单一海绵设施污染物去除率采用了美国流域保护中心的数据,我们应借鉴其经验,并加强研究,形成我国的数据库,供设计人员参考。

2) 地块海绵设施对SS的平均去除率的计算在实践应用中有四种加权平均算法,在建筑与小区等小尺度流域的设计中,推荐采用海绵设施的有效汇水面积进行加权平均的方法。

3) 关于年径流污染控制率的计算,目前《指南》给出的公式适用于大尺度的规划和设计,而在建筑与小区小尺度流域中,建议引入累积污染物负荷率与累积径流体积率比例,将年径流污染控制率转化为年平均径流污染量控制率与污染物平均去除率的乘积。

[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. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2015.13.026. 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. DOI: 10.19853/j.zgjsps. 1000-4602.2015.13.026.
- [2] 许可, 刘萌, 李盛, 等. 基于SWMM的岳阳市海绵城市低影响设计及效果评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(2): 77-87. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.02.008.
- XU Ke, LIU Meng, LI Sheng, et al. Low-impact design and effect evaluation of sponge city in Yueyang city based on SWMM [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(2): 77-87. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331. 2022.02.008.
- [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. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.007.
- 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. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602. 2021.06.007.
- [4] 李盛, 秦苗, 刘萌, 等. 岳阳市某海绵城市道路系统降雨径流分析与评价[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(2): 9-16. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.02.002.
- LI Sheng, QIN Miao, LIU Meng, et al. Analysis and evaluation of rainfall runoff of a sponge city road system in Yueyang City [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(2): 9-16. DOI: 10.3969/j.issn. 1672-9331. 2021.02.002.
- [5] 乔梦曦, 王晨, 常魁, 等. 海绵城市建设年径流总量控制率指标的分解优化[J]. 净水技术, 2020, 39(10): 173-180. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs. 2020.10.027.
- QIAO Mengxi, WANG Chen, CHANG Kui, et al. Decomposition and optimization of control rate indexes of total annual runoff for sponge city construction [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(10): 173-180. DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2020.10.027.
- [6] 阳焯, 沈敏, 何俊超, 等. 海绵城市年径流总量控制指标分解方法优化研究[J]. 中国园林, 2019, 35(6): 89-93. DOI: 10.19775/j.cla.2019.06.0089.
- YANG Ye, SHEN Min, HE Junchao, et al. Study on the optimization of the decomposition method for total runoff volume capture of annual rainfall in sponge city [J]. Chinese Landscape Architecture, 2019, 35(6): 89-93. DOI: 10.19775/j.cla.2019.06.0089.
- [7] 张高媛, 高斌, 王新亮. 海绵城市年径流总量控制率在控规中的深化与落实[J]. 中国给水排水, 2018, 34(6): 1-5. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2018.06.001.
- ZHANG Gaoyuan, GAO Bin, WANG Xinliang. Deepening and implementing of capture ratio of annual rainfall runoff volume of sponge city in regulatory detailed planning [J]. China Water & Wastewater,

- 2018, 34 (6) : 1-5. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602.2018.06.001.
- [8] 陈星,石永涛,徐强,等.雨水径流总量、径流峰值和径流污染控制计算探讨[C]//中国建筑学会建筑给水排水研究分会第四届第二次全体会员大会暨学术交流会论文集(上册).成都:中国建筑西南设计研究院有限公司,2023,9. DOI: 10.26914/c. cnkihy. 2023.040630.
- CHEN Xing, SHI Yongtao, XU Qiang, et al. Discussion on calculation of total rainwater runoff, peak runoff, and runoff pollution control[C]//Collected Papers of the Second Plenary Session and Academic Exchange Conference of the Fourth China Architecture Society Building Water Supply and Drainage Research Branch (Volume 1). Chengdu: China Architecture Society Building Water Supply and Drainage Research Branch, 2023, 9. DOI: 10.26914/c. cnkihy. 2023.040630.
- [9] 苏定江,刘希,董佳,等.海绵城市年径流污染总量削减率定义及计算方式探讨[J].中国给水排水,2023,39(24):93-99. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602.2023.24.016.
- SU Dingjiang, LIU Xi, DONG Jia, et al. Definition and calculation method of total annual runoff pollutant reduction rate in sponge City [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (24) : 93-99. DOI: 10.19853/ j. zgjsps.1000-4602.2023.24.016.
- [10] 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):6-12,62. DOI: 10.3880/j. issn. 1004-6933. 2017.02.002.
- 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, 62. DOI: 10.3880/j. issn.1004-6933.2017.02.002.
- [11] STRECKER E W, QUIGLEY M M, URBONAS B R, et al. Determining urban storm water BMP effectiveness [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(3): 144-149. DOI: 10.1061/(asce)0733-9496(2001)127: 3(144).
- [12] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development: a review [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 413-432. DOI: 10.1016/j. scitotenv. 2017.06.254.
- [13] Center for Watershed Protection. National pollutant removal performance database (version 3) [EB/OL]. (2007-09-01) [2023-12-10]. <https://wrrc.arizona.edu/publication/national-pollutant-removal-performance-database>.
- [14] YOUNG C H, PANDIT A. Estimation of average annual removal efficiencies of wet detention ponds using continuous simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17 (11) : 1230-1239. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000522.
- [15] WEISS P T, GULLIVER J S, ERICKSON A J. Cost and pollutant removal of storm-water treatment practices [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2007, 133(3): 218-229. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133: 3(218).
- [16] 张栋俊,杨楠,李国金,等.阜阳市阜颍河滨河广场海绵城市体系的构建与分析[J].给水排水,2020,56(增刊1):631-633. DOI: 10.13789/j. cnki. wwe1964.2020. S1.141.
- ZHANG Dongjun, YANG Nan, LI Guojin, et al. construction and analysis of sponge city system of Fuying Riverside Plaza in Fuyang city [J]. Water & Wastewater Engineering. 2020, 56 (sup 1) : 631-633. DOI: 10.13789/j. cnki. wwe1964.2020. S1.141.
- [17] 冯磊,徐得潜.建筑小区海绵城市建设中雨水系统设计方案的优化研究[J].水土保持通报,2021,41(3):193-199,217. DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 2021.03.027.
- FENG Lei, XU Deqian. Optimization of stormwater system design scheme in sponge city construction of residential areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41 (3) : 193-199, 217. DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 2021.03.027.
- [18] 韦峰,黄任,陈海,等.建筑小区年径流总量控制率和年SS总量去除率的计算分析[J].给水排水,2018,44(3):79-80,81. DOI: 10.13789/j. cnki. wwe1964. 2018.0073.
- WEI Feng, HUANG Ren, CHEN Hai, et al. Calculation and analysis of annual runoff total control rate and annual SS total removal rate in building communities [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (3) : 79-80, 81. DOI: 10.13789/j. cnki. wwe1964. 2018.0073.
- [19] 胡棚豪,王志高,金天,等.新建住宅小区海绵专项工程设计及施工管理[J].净水技术,2021,40(6):134-139. DOI: 10.15890/j. cnki. jsjs. 2021.06.022.
- HU Xuhao, WANG Zhigao, JIN Tian, et al. Specialized engineering design and construction management for sponge city facilities in new residential area [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6) : 134-139. DOI: 10.15890/j. cnki. jsjs. 2021.06.022.
- [20] 深圳市住房和建设局.深圳市房屋建筑工程海绵设施设计规程: SJG38—2017[S].深圳:中国建筑工业出版社,2017.
- Shenzhen Housing and Construction Bureau. Design code for building engineering sponge facility in Shenzhen city: SJG38—2017 [S]. Shenzhen: China Architecture Industry Press, 2017.

- [21] 武汉市规划研究院. 武汉市海绵城市规划设计导则(试行)[S]. 武汉, 2019.
Wuhan Municipal Planning Research Institute. Guidelines for planning and design of Wuhan sponge city(pilot draft)[S]. Wuhan, 2019.
- [22] 靳俊伟, 黄丽萍, 程巍. 重庆市海绵城市年径流总量控制指标解读[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6): 15-18.
JIN Junwei, HUANG Liping, CHENG Wei. Explanation of total annual runoff volume control indexes for sponge city development of Chongqing city [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 15-18.
- [23] 郝丽岭, 张千千, 王效科, 等. 重庆市不同材质路面径流污染特征分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1662-1669. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2012.07.031.
HAO Liling, ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, et al. Characteristics of runoff pollution on urban pavements with different materials in Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(7): 1662-1669. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2012.07.031.
- [24] 张千千, 王效科, 郝丽岭, 等. 重庆市不同材质屋面径流水质特性[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 579-586. DOI: 10.13198/j. res. 2012.05.101. zhangqq.019.
ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, HAO Liling, et al. Characteristics of runoff from different material roofs in Chongqing urban area [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(5): 579-586. DOI: 10.13198/j. res.2012.05.101.zhangqq.019.
- [25] 车伍, 张聘, 张伟, 等. 初期雨水与径流总量控制的关系及其应用分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32(6): 9-14. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2016.06.003.
CHE Wu, ZHANG Kun, ZHANG Wei, et al. Analysis of initial rainfall and total runoff volume control [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(6): 9-14. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2016.06.003.
- [26] 吴海春, 胡爱兵, 任欣欣. 基于SWMM模型的LID措施年SS总量去除率计算[J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 9-12, 49. DOI: 10.3880/j. issn. 1004-6933. 2018.05.02.
WU Haichun, HU Aibing, REN Xinxin. Calculation of total removal rate of SS by LID measures based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 9-12, 49. DOI: 10.3880/j. issn. 1004-6933. 2018.05.02.
- [27] 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. DOI: 10.3969/j. issn.1000-5641.2018.06.004.
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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5641.2018.06.004.
- [28] 天津市市政工程设计研究院, 天津城建设计院有限公司. 天津市海绵城市建设技术导则: TJ-HMCSJSJS—2016[S]. 天津, 2016.
Tianjin Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin Urban Construction Design Institute Co., Ltd.. Technical guidelines for the sponge city construction in Tiajin: TJ-HMCSJSJS—2016 [S]. Tianjin, 2016.
- [29] Financial Services & Utilities/Drainage Services. Low impact development-best management practices design guide: edition 1.1 [EB/OL]. (2014-12-19) [2023-12-10]. <https://coilink.org/20.500.12592/13tp91>.
- [30] US EPA. Summary of state post construction stormwater standards [EB/OL]. (2016-07) [2023-12-10]. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-08/documents/swstdsummary_7-13-16_508.pdf
- [31] Bureau of Watershed Management, Department of environmental protection. Pennsylvania stormwater best management practices manual[S]. Philadelphia, 2006.
- [32] Townsville City Council. Water sensitive urban design for the coastal dry tropics (townsville): design objectives for stormwater management[M]. Queensland: AECOM+McGarry&Eadie, 2011.
- [33] Auckland (N. Z. : Region). Regional Council. Stormwater management devices: design guidelines manual[M]. Auckland Regional Council, 2003.
- [34] 李海燕, 车伍, 黄延. 基于雨水水质的径流污染控制设计雨量计算方法[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 45-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4602. 2012.19.012.
LI Haiyan, CHE Wu, HUANG Yan. Design rainfall calculation method for runoff pollution control based on runoff quality [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 45-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-4602. 2012.19.012.

(责任编辑:毛娜;校对:刘平)