

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.16.008

中美双认证绿色建筑雨水控制指标探析

任 婕

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011)

摘 要: 中国和美国的绿色建筑评价标准中都包含有雨水控制方面的条款,但两国提出的雨水控制模式、指标概念及其计算方法却不尽相同。在中美双认证绿色建筑评价越来越普及的背景下,以实测降雨数据为基础,计算出我国 30 个代表城市两种控制模式下对应的设计降雨量,对我国不同类型的绿色建筑项目在中美绿色建筑评价标准中雨水控制条款的得分难度进行比较,进而给出雨水控制目标的推荐值,以期中美双认证绿色建筑雨水控制系统的设计提供参考。

关键词: 绿色建筑评价标准; LEED; 雨水控制; 年径流总量控制率; 年降雨场次控制率
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)16-0048-06

Analysis on Rainwater Control Indicator of Sino-U. S. Double-certified Green Building Projects

REN Jie

(East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200011, China)

Abstract: There are rainwater control standards in green building evaluation standards in China and the United States, respectively. The rainwater control modes, indicators and calculation methods proposed by the two countries are different. Considering the increasing popularity of Sino-U. S. double-certified green building evaluations, this paper calculates the design rainfall of 30 representative cities in China using two control modes based on measured rainfall data. Moreover, we compare the difficulty of the scoring on the rainwater control clauses in the two green building evaluation standards, and then give the recommended values of the design rainfall. This work provides a reference for the design of rainwater control system in Sino-U. S. double-certified green building projects.

Key words: green building evaluation standard; LEED; rainwater control; annual rainfall volume capture ratio; annual rainfall event capture ratio

1 研究背景

1992 年,“绿色建筑”的概念在里约热内卢“联合国环境与发展大会”上被明确提出,此后世界各国开始积极推广绿色建筑理念,并制定了一系列评价标准。我国首部《绿色建筑评价标准》(GB/T

50378—2006)(以下简称《绿标》)于 2006 年正式颁布,并于 2014 年和 2019 年进行了两次修订。在国家 and 地方政策引导下,绿色建筑在我国迅速发展。截至 2018 年底,我国绿色建筑面积累计超过 $25 \times 10^8 \text{ m}^2$,在城镇新建民用建筑中的占比达到 40% 以

上,共有 10 139 个项目获得绿色建筑评价标识。随着获得《绿标》标识的建筑数量日益增加,越来越多的业主希望同时获得国内、国际绿色建筑的双重甚至多重认证来进一步提高建筑产品的市场竞争力。纵观国际绿色建筑市场,美国绿色建筑委员会研发的 LEED 认证影响力最大,在我国建筑市场也备受青睐^[1]。截至 2018 年底,我国大陆地区获得 LEED 认证的项目已达 1 494 个,累计建筑面积为 $6\,883 \times 10^4 \text{ m}^2$,大型办公建筑、国际示范性建筑有向《绿标》和 LEED 双认证发展的趋势^[2]。《绿标》和 LEED 认证的标准框架和条款内容存在一定相似性,是建筑项目获得双认证的基础条件,但鉴于中美两国环境、经济和社会等方面存在的客观差异,两部标准的差异性在所难免,这也是双认证工作的难点所在。

在《绿标》和 LEED 认证中,绿色建筑项目均可通过实现一定的雨水控制目标来获得相应的得分,旨在鼓励项目设计时采用合理的措施来维持场地原有的渗透、滞留雨水的功能^[3]。在雨水控制效果评价方面,最新版的《绿标》和 LEED 认证分别以年径流总量控制率和年降雨场次控制率作为评价指标,这两个指标均可转化为一定的设计降雨量,进而用于确定雨水控制设施的规模^[4-5]。车伍等^[6]认为两个指标均能有效控制径流总量和径流污染物,一般而言,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,两者的精确关系取决于各地基于降雨资料统计分析所得的曲线关系。《绿标》条文说明中给出了我国主要城市年径流总量控制率分别为 55%、70% 和 85% 时对应的设计降雨量,可以直接作为雨水控制系统的设计依据。然而,由于缺少年降雨场次控制率与设计降雨量对应关系的参考资料,给我国双认证绿色建筑雨水系统的设计带来了诸多不便。与此同时,由于两个指标没有明确的对应关系,满足《绿标》雨水控制要求的设计是否能同时满足 LEED 认证对应条款的得分要求往往成为令设计人员困惑的问题所在。

基于上述背景,以我国 30 个城市 1989 年—2018 年的实测日降雨量数据为基础,计算不同年径流总量控制率和年降雨场次控制率对应的设计降雨量,对比探讨我国绿色建筑项目在中、美绿色建筑评价标准中雨水控制条款上的得分难度,进而在考虑经济合理性和生态适宜性的前提下,给出雨水控制目标的推荐值,以期中美双认证绿色建筑雨水控

制系统的设计提供技术参考。

2 研究方法

2.1 研究对象

① 评价标准版本说明。《绿标》和 LEED 认证自发布以来都经过了多次修订,为了使研究结论更好地指导双认证绿色建筑雨水系统的策划和设计,分析讨论均以中美最新版标准作为研究对象,即《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2019)(以下简称 2019 版《绿标》)和同样发布于 2019 年的 LEED v4.1。需要说明的是,LEED 认证中包含多个针对不同类型建筑的评估体系,在此研究的是在我国使用最广泛的 LEED BD+C 建筑设计施工。

② 研究城市。年径流总量控制率和年降雨场次控制率均与项目所在地的降雨气候规律密切相关,需要依据当地的历史降雨资料计算确定其对应的设计降雨量。为了尽可能覆盖全国不同的气候区,从我国 30 个省级行政单位(由于缺少监测数据,港澳台和西藏地区未纳入研究)中各选一个代表城市作为研究对象进行分析探讨。

2.2 数据来源

计算年径流总量控制率和年降雨场次控制率对应的设计降雨量均需要以当地的多年逐日降雨量作为基础数据。本研究中各代表城市的基础降雨数据取自中国气象数据网国际交换站 1989 年—2018 年(共 30 年)的 24 h(20:00—20:00)降雨量,并在计算前进行如下处理:①剔除有特殊标记或缺测的异常数据;②扣除不产生径流的降雨(小于或等于 2 mm)和降雪数据。

2.3 计算方法及符号定义

年径流总量控制率对应设计降雨量的计算步骤如下^[7]:①将简单处理后的日降雨数据由小到大依次排列;②分别统计出小于或等于设计降雨量的降雨量之和(其中,小于或等于对应降雨量值的按真实降雨量计算出降雨总量,大于降雨量的按降雨量等于设计降雨量计算出降雨总量,再将两者相加);③用计算上一步骤所得降雨量除以 30 年总降雨量并转化为百分数,即为设计降雨量对应的年径流总量控制率;④采用内插法计算不同年径流总量控制率(55%、70% 等)对应的设计降雨量。

计算年降雨场次控制率对应设计降雨量的方法相对简单,只需将处理后的基础数据在 Excel 表格中排成一列,直接利用 Excel 中内置的

PERCENTILE 函数计算即可^[8-9]。为了便于图表表达和分析讨论,采用 $H_{x\%}$ 表示年径流总量控制率 $X\%$ 对应的设计降雨量,用 $h_{x\%}$ 表示年降雨场次控制率 $x\%$ 对应的设计降雨量,特此说明。

3 分析与探讨

3.1 计算结果归纳分析

根据上述方法,计算出我国 30 个代表城市在两种雨水控制模式下的设计降雨量,结果见表 1。

表 1 我国 30 个代表城市两种控制模式下设计降雨量
计算结果

Tab.1 Design rainfall under two control modes of 30
cities in China mm

项目	年均 降雨量	设计降雨量					
		年径流总量控制率			年降雨场次控制率		
		55%	70%	85%	80%	85%	90%
哈密	44.9	3.2	4.8	8.4	6.5	7.9	10.2
银川	197.6	6.6	10.5	18.9	13.2	15.3	18.3
兰州	258.5	5.1	7.8	12.4	11.7	13.8	16.4
张家口	390.8	6.9	10.9	17.7	14.8	17.6	21.4
呼和浩特	410.7	8.3	13.4	22.8	16.0	19.8	25.3
西宁	417.1	5.3	8.0	12.9	11.7	13.5	16.2
榆林	425.6	8.8	14.3	25.5	15.8	19.6	25.0
太原	431.9	8.5	13.7	23.4	16.3	20.4	25.4
天津	512.2	12.3	20.1	36.7	21.0	25.2	32.7
哈尔滨	520.3	7.5	12.0	20.5	14.8	17.7	21.9
北京	531.8	11.8	19.2	33.1	22.1	25.9	33.3
长春	594.8	9.2	15.1	27.0	16.3	19.9	26.4
郑州	631.8	11.4	18.4	32.4	20.9	25.5	32.4
沈阳	669.6	10.7	17.4	30.7	18.4	22.5	30.4
济南	725.8	14.2	23.3	41.2	24.0	29.2	37.6
成都	897.2	11.8	20.9	40.2	16.7	21.5	28.7
昆明	986.7	10.1	16.0	27.3	19.5	23.4	29.0
合肥	1 044.8	10.8	16.7	29.1	20.7	25.4	32.9
贵阳	1 109.0	11.5	18.7	32.5	19.8	25.0	32.7
重庆	1 131.2	10.6	17.6	32.5	18.3	22.2	28.8
南京	1 150.1	13.2	21.9	40.1	22.2	27.5	35.7
上海	1 210.1	11.9	19.3	34.2	21.7	26.4	32.5
南宁	1 270.5	14.0	22.8	39.9	23.7	29.3	38.7
武汉	1 307.6	14.5	24.0	42.9	24.3	30.5	39.8
福州	1 466.0	13.4	21.7	38.4	23.7	28.9	36.6
长沙	1 466.9	11.9	18.9	32.8	22.1	27.0	33.9
杭州	1 485.9	11.4	17.7	30.5	22.0	26.2	33.2
南昌	1 676.7	14.2	22.9	39.6	25.6	31.4	39.2
海口	1 802.7	20.8	35.3	69.9	29.7	37.0	47.8
广州	1 897.9	16.5	26.3	45.0	29.8	35.7	45.6

由表 1 可以看出,虽然有一些例外,但在相同的控制目标下,设计降雨量的数值总体上均呈现出随年均降雨量增大而增大的规律。另一方面,不同城市的设计降雨量差距较大,其中,哈密和海口年径流总量控制率 70% 和年降雨场次控制率 85% 对应的设计降雨量差值分别达到了 30.5 mm 和 29.1 mm。因此,无论在中国还是美国的绿色建筑评价标准体系下,为了保证雨水系统设计的合理性,都应尽可能根据项目所在地实测降雨数据推求出的设计降雨量作为设计依据。

然而,由于缺少多年的逐日降雨数据,一些城市并不具备用实测数据推求设计降雨量的客观条件。此外,在前期策划阶段,往往只需要对方案的经济性进行大致把控,利用实测数据推求设计降雨量会大幅增加设计人员的工作量。为解决上述问题,运用统计学方法,提出设计降雨量 90% 分位数的概念,取一定控制目标下各城市设计降雨量从小到大排列后位于第 90% 位置的数,作为该目标下雨水系统设计降雨量的参考值。根据统计意义,以设计降雨量 90% 分位数作为控制标准时,可以保证 90% 以上的城市满足相应的雨水控制要求,因此以该指标作为雨水控制系统设计降雨量的参考值具有一定的合理性。考虑到即使在同一控制目标下,我国不同气候区的设计降雨量也存在较大差异,将 30 个代表城市按年均降雨量大小分为干旱地区、半干旱地区和湿润地区三种类型,分别计算各地区不同雨水控制目标对应的设计降雨量 90% 分位数,结果见表 2。该结果可为双认证绿色建筑项目雨水控制系统的规模估算提供参考。

表 2 两种控制模式下设计降雨量参考值

Tab.2 Reference values of design rainfall under two control
modes mm

项 目	年均 降雨量	设计降雨量					
		年径流总量控制率			年降雨场次控制率		
		55%	70%	85%	80%	85%	90%
干旱地区	≤500	8.6	13.9	24.0	16.1	20.0	25.3
半干旱地区	500 ~ 1 000	12.7	21.4	40.4	22.5	26.6	34.2
湿润地区	≥1 000	16.1	25.8	44.6	28.9	34.8	44.4

3.2 中美标准雨水控制条款得分难度分析

2019 版《绿标》中雨水控制系统达到年径流总量控制率 55% 即可在条文 8.2.2 中得分,达到 70% 可获得满分。对于 LEED v4.1,项目雨水管理项的

得分点分别是年降雨场次控制率 80%、85% 和 90%^[10]。2019 版《绿标》得分要求与 LEED v4.1 最低得分要求的对比如图 1 所示。可知,所有城市的 $H_{55\%}$ 均低于 $h_{80\%}$;除了海口和成都,其他 28 个城市的 $H_{70\%}$ 也低于该城市的 $h_{80\%}$ 。也就是说,按 2019 版《绿标》最低得分要求设计的雨水控制系统在 LEED v4.1 中无法得分;对于恰好满足 2019 版《绿标》满分要求设计的雨水控制系统,也仅有海口和成都的项目可以在 LEED v4.1 中获得对应条款的评价分值,说明我国绿色建筑项目在 LEED v4.1 雨水控制条款上的得分难度高于 2019 版《绿标》。

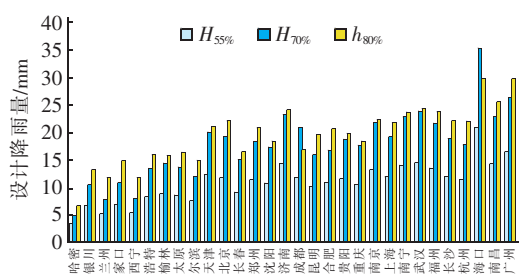


图 1 2019 版《绿标》得分要求与 LEED v4.1 最低得分要求的对比

Fig. 1 Comparison of score requirement between 2019

Chinese green building evaluation standard and LEED v4.1

近年来,海绵城市理念在我国发展迅速。对于有海绵城市设计要求的建筑项目,其雨水控制系统的设计不仅要考虑绿色建筑的得分要求,还要达到海绵城市的设计目标。海绵城市设计也以年径流总量控制率作为径流控制指标,但不同于绿色建筑评价的“全国统一标准”,《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》将我国大陆地区分成了五个区,并给出了各分区年径流总量控制率的最低和最高限值。本研究选取的 30 个代表城市在 5 个分区中均有分布,年径流总量控制率的最低限值在 60%~85% (除了海口,其他城市均在 70% 以上)。海绵城市要求与 LEED v4.1 得分要求的对比见图 2。

由图 2 可知,大部分城市海绵城市最低限值对应的设计降雨量与当地的 $h_{80\%}$ 接近。事实上,除了场地条件非常不利于海绵城市建设的项目,各地的新建建筑项目都会在最低年径流总量控制率要求的基础上提高 5%~10% 作为实际控制目标,因此,达到海绵城市建设要求的绿色建筑项目应至少能在 LEED v4.1 中得到 1 分。

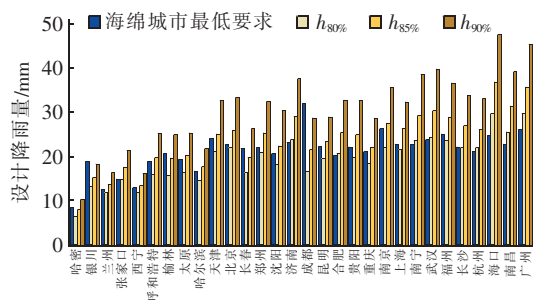


图 2 海绵城市要求与 LEED v4.1 得分要求的对比

Fig. 2 Comparison of requirement between sponge city and LEED v4.1

3.3 双认证雨水控制系统设计目标选取探讨

对于按 2019 版《绿标》满分控制目标设计的雨水系统,为了满足 LEED v4.1 的得分要求,其设计降雨量需要进一步增加。设计降雨量增量分析如图 3 所示。

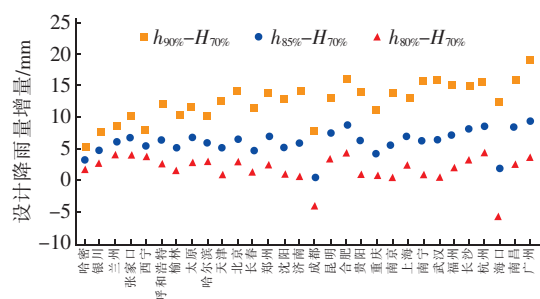
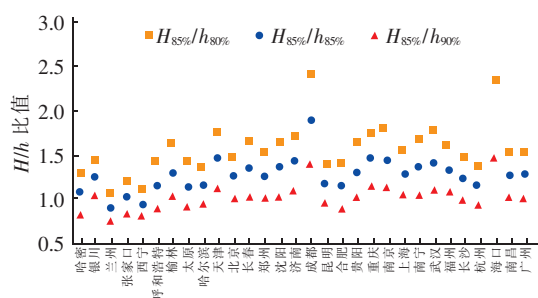


图 3 设计降雨量增量分析

Fig. 3 Analysis of design rainfall increment

由图 3 可知,30 个城市从年径流总量控制率 70% 提升到年降雨场次控制率 80% 的设计降雨量增量 ($h_{80\%} - H_{70\%}$) 均能控制在 5.0 mm 以内,大部分城市的设计降雨量增量 ($h_{85\%} - H_{70\%}$) 能控制在 7.0 mm 以内;然而,超过 2/3 的城市的设计降雨量增量 ($h_{90\%} - H_{70\%}$) 超过了 11.0 mm,最大的甚至达到 19.3 mm。因此,从经济性的角度来看,通过增加雨水控制系统设计规模,大部分城市绿色建筑项目在 LEED v4.1 雨水控制条文中获得 1~2 分是相对可行的,但要在 LEED v4.1 雨水控制条文中获得 3 分所带来的增量成本相对较高。

2019 版《绿标》条文说明中指出“出于维持生态、基流的需要,年径流总量控制率不宜超过 85%”,因而双认证绿色建筑项目不应为了提高 LEED 得分而一味地增加雨水控制系统的规模,以免影响正常的水文循环过程。 $H_{85\%}$ 与 LEED v4.1 的得分要求对比见图 4。

图4 $H_{85\%}$ 与 LEED v4.1 的得分要求对比Fig.4 Comparison of $H_{85\%}$ and LEED v4.1

由图4可知,所有城市的 $H_{85\%}/h_{80\%}$ 均大于1.0;除兰州 ($H_{85\%}/h_{85\%} = 0.90$) 和西宁 ($H_{85\%}/h_{85\%} = 0.96$) 外,大部分城市的 $H_{85\%}/h_{85\%}$ 也大于1.0,然而,接近一半的城市的 $H_{85\%}/h_{90\%} < 1.0$ 。因此,从维持场地生态循环的角度来看,我国大部分城市以年降雨场次控制率80%和85%设计是相对合理的,以年降雨场次控制率90%作为设计目标时,应充分考虑雨水系统与场地水文生态过程关系,避免过度控制带来的不良影响。

4 结论与建议

中、美绿色建筑评价体系分别以年径流量控制率和年降雨场次控制率作为雨水控制效果的评价指标,以实测降雨数据为基础,对中美双认证绿色建筑雨水控制指标进行对比研究,主要结论与建议如下:

① 对于缺少实测降雨数据,或处于前期设计阶段的双认证绿色建筑项目,可以参考本研究计算出的不同地区不同控制目标下的“设计降雨量90%分位数”估算雨水控制系统的规模。本研究以各省份典型城市为样本,后续研究中可运用我国更多雨量站的统计数据进行推求,进一步提升计算结果的参考价值。

② 我国绿色建筑项目在 LEED v4.1 雨水控制条款上的得分难度高于2019版《绿标》。按2019版《绿标》最低得分要求设计的雨水控制系统在 LEED v4.1 认证体系下无法得分,但满足海绵城市建设要求的绿色建筑项目则至少能在 LEED v4.1 中得到1分。

③ 无论从确保系统经济性还是维持场地水文生态循环的角度来看,按在 LEED v4.1 中获得1~2分的目标设计项目的雨水系统是相对合理的。为了增加 LEED 认证得分而一味地增加雨水控制系统的

设计规模,不仅会大大增加绿色设计的增量成本,还有可能对正常的水文循环过程造成影响,有悖于建设“绿色建筑”的初衷。

④ 中美绿色建筑体系下,均需将控制指标转化为设计降雨量后用于雨水控制系统的设计。设计降雨量的数值与降雨数据的选取息息相关,现有的研究成果可以作为雨水控制系统的设计依据,但在后续研究中也应关注未来气候变化对设计降雨量的影响,不断提升雨水系统在适应气候环境方面的“韧性”。

参考文献:

- [1] 杨云铠,何开远,熊海. 绿色建筑绿标与 LEED 双认证项目的实践探索[J]. 重庆建筑,2014,13(12): 26-28.
YANG Yunkai, HE Kaiyuan, XIONG Hai. Practical exploration on ESGB (Chongqing) & LEED certification project[J]. Chongqing Architecture, 2014, 13(12): 26-28 (in Chinese).
- [2] 韩浩. 绿色建筑双认证节能与舒适性措施选择方法及策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
HAN Hao. Method and Strategy Research of Energy Saving and Comfort Measures Selection for Dual Certifications of Green Building [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013 (in Chinese).
- [3] 刘聪,刘洪海,李明,等. 低影响开发雨水控制利用与绿色建筑关系评述[J]. 节能与环保,2017(2): 52-54.
LIU Cong, LIU Honghai, LI Ming, et al. A review on the relationship between low impact development and green building[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2017(2): 52-54 (in Chinese).
- [4] 杜晓亮,曾捷,李建琳,等. 2014版《绿色建筑评价标准》雨水控制利用评价指标介绍[J]. 给水排水, 2014, 40(12): 63-67.
DU Xiaoliang, ZENG Jie, LI Jianlin, et al. Introduction of the evaluation indicators of rainwater control and use in the 2014 edition of Evaluation Standard for Green Building[J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(12): 63-67 (in Chinese).
- [5] 李俊奇,王文亮,车伍,等. 海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 6-12.
LI Junqi, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Explanation of sponge city development technical guide: regional division for total rainfall runoff volume capture target

- [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(8): 6 - 12 (in Chinese).
- [6] 车伍, 张鹏, 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.
- 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 (in Chinese).
- [7] 刘绪为, 李成江, 徐洁, 等. 海绵城市年径流总量控制率计算方法及应用探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 130 - 133.
- LIU Xuwei, LI Chengjiang, XU Jie, *et al.* Calculation and discussion on volume capture ratios of annual rainfalls in sponge city[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 130 - 133 (in Chinese).
- [8] 李俊奇, 林翔. 极端降雨事件对雨水年径流总量控制率和 24 h 降雨场次控制率的影响规律探析[J]. 给水排水, 2018, 44(1): 21 - 26.
- LI Junqi, LIN Xiang. Analysis of influence of extreme rainfall event on annual total runoff volume capture ratio and 24 h rainfall event capture ratio [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1): 21 - 26 (in Chinese).
- [9] 李俊奇, 林翔, 王文亮, 等. 国内外雨水径流总量控制指标统计方法对比剖析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(8): 11 - 16.
- LI Junqi, LIN Xiang, WANG Wenliang, *et al.* Comparison of statistical methods of runoff volume control indexes at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(8): 11 - 16 (in Chinese).
- [10] U. S. Green Building Council. LEED v4. 1 Building Design and Construction[M]. Washington: U. S. Green Building Council, 2019.

作者简介: 任婕(1995 -), 女, 甘肃兰州人, 博士研究生, 主要从事雨洪管理、韧性城市相关研究工作。

E-mail: renjie_cathy@163.com

收稿日期: 2020 - 02 - 13

修回日期: 2020 - 03 - 03

(编辑: 丁彩娟)

(上接第 47 页)

- E, *et al.* The feasibility of automated online flow cytometry for in-situ monitoring of microbial dynamics in aquatic ecosystems [J]. Frontiers in Microbiology, 2014, 5: 265.
- [29] HOJRIS B, CHRISTENSEN S C B, ALBRECHTSEN H J, *et al.* A novel, optical, on-line bacteria sensor for monitoring drinking water quality [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 23935.
- [30] 赵洪宾. 给水管网系统理论与分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- ZHAO Hongbin. Water Network System Theories and Analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003 (in Chinese).
- [31] BURKHARDT J B, SZABO J, KLOSTERMAN S, *et al.* Modeling fate and transport of arsenic in a chlorinated distribution system [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 93: 322 - 331.
- [32] YU T C, SHAO Y, SHEN C. Mixing at cross joints with different pipe sizes in water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(5): 658 - 665.
- [33] ABOKIFA A A, YANG Y J, LO C S, *et al.* Water quality modeling in the dead end sections of drinking water distribution networks [J]. Water Research, 2016, 89: 107 - 117.
- [34] 赵元, 李霞, 庄宝玉, 等. 输配水系统水质脆弱性评估模型的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(21): 51 - 54.
- ZHAO Yuan, LI Xia, ZHUANG Baoyu, *et al.* Assessment model for water quality vulnerability of water distribution system [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(21): 51 - 54 (in Chinese).
- [35] GONELAS K, CHONDRONASIOS A, KANAKOUDIS V, *et al.* Forming DMAs in a water distribution network considering the operating pressure and the chlorine residual concentration as the design parameters [J]. Journal of Hydroinformatics, 2017, 19(6): 900 - 910.

作者简介: 林晓丹(1989 -), 女, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要研究方向为管网水质转化机理及模型。

E-mail: linxiaodan0223@163.com

收稿日期: 2019 - 08 - 08

修回日期: 2019 - 09 - 17

(编辑: 丁彩娟)