

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.18.001

述评与讨论

《再生水利用效益评价指南》标准解读

陈卓^{1,2,3}, 郝姝然^{1,2,3}, 高强⁴, 毛宇^{1,2,3}, 黄南^{1,2,3}, 巫寅虎^{1,2,3},
胡洪营^{1,2,3}

(1. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 清华大学环境学院 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 北京 100084; 3. 环境前沿技术北京实验室, 北京 100084; 4. 中国环境科学学会, 北京 100082)

摘要: 面对国内外日益增长的再生水利用研究、实践和发展需求, 中国环境科学学会于2019年首次发布了团体标准《再生水利用效益评价指南》(T/CSSES 01—2019)。该标准是再生水利用领域的首个基础性团体标准。针对目前再生水利用实践中存在的效益不明晰、评价方法和指标不统一等问题, 该标准规定了再生水利用效益评价相关的术语和定义、评价指标及评价程序, 可为再生水利用规划、设计、运营、管理和评价时的再生水利用效益评价提供有益指导。该团体标准对规范和指导再生水利用效益评价工作, 促进再生水资源的合理高效的开发、利用与推广具有积极意义。

关键词: 再生水; 效益评价; 评价指标; 评价程序; 安全高效利用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)18-0001-07

Interpretation of an Association Standard of *Guideline for Benefit Evaluation of Reclaimed Water Use*

CHEN Zhuo^{1,2,3}, HAO Shu-ran^{1,2,3}, GAO Qiang⁴, MAO Yu^{1,2,3}, HUANG Nan^{1,2,3},
WU Yin-hu^{1,2,3}, HU Hong-ying^{1,2,3}

(1. *Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 2. *State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control <SMARC>, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China*; 3. *Beijing Laboratory for Environmental Frontier Technologies, Beijing 100084, China*; 4. *Chinese Society for Environmental Sciences, Beijing 100082, China*)

Abstract: Faced with the worldwide growing demand for research, practice and development of water reuse, the *Guideline for Benefit Evaluation of Reclaimed Water Use*(T/CSSES 01 - 2019) was first published by the Chinese Society for Environmental Sciences as an association standard in 2019. This standard was considered as the first fundamental association standard of water reuse in urban areas. To solve the problems existing in the utilization practice of reclaimed water such as ambiguous benefits,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406303); 国家自然科学基金资助项目(51908317); 佛山-清华产学研合作协同创新专项资金资助项目(2019THFS04)

通信作者: 巫寅虎 E-mail:wuyinhu@mail.tsinghua.edu.cn; 胡洪营 E-mail:hyhu@tsinghua.edu.cn

inconsistent evaluation methods and indicators, the standard intended to standardize the terms, definitions, evaluation indexes, and evaluation procedures of reclaimed water. In addition, it would also provide references for the planning, designing, operating, managing and evaluation of water reuse benefits. The association standard has a positive significance in standardizing and guiding the benefit evaluation for reclaimed water use, which could promote the rational and efficient development, utilization, and promotion of reclaimed water resources.

Key words: reclaimed water; benefit evaluation; evaluation indexes; evaluation procedures; safe and efficient use

水资源短缺和水环境污染是全球面临的重大水安全问题。与雨水和海水相比,污水水量大且稳定、就地可取、水质可控,可成为“城镇第二水源”,其再生利用经济可行,是解决缺水和水污染问题的双赢途径。再生水利用涉及生产生活和生态环境用水等各个方面,具有显著的资源效益、环境效益、社会效益和经济效益,对实现联合国可持续发展目标具有重要保障作用^[1-2]。2019年,我国城镇再生水利用量不足 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,污水再生利用率仅约为15%^[3]。根据2021年国家发展改革委联合九部委出台的《关于推进污水资源化利用的指导意见》,到2025年,我国缺水城市污水再生利用率将达到25%以上,京津冀地区将达到35%以上;“十四五”期间和未来15年,污水再生利用将会得到更快发展。随着再生水利用行业的快速崛起和相关新技术的快速发展,再生水利用途径日益广泛,涉及行业领域范围大、应用前景广。为适应再生水利用领域标准化工作需要,针对再生水安全高效利用需求,中国环境科学学会组织编制了团体标准《再生水利用效益评价指南》(T/CSES 01—2019),于2019年正式发布。

1 标准制定的重要意义

城市污水水量稳定、水质变化幅度小,其再生处理技术和工艺日趋成熟。城市污水经二级处理,再加上适当的深度处理措施,通过科学的工艺设计和系统运行管理,能满足不同再生水用途的水质要求,具有良好的推广前景和产业化应用价值。目前,世界各国已开展了卓有成效的再生水利用实践^[3-4]。从全球范围来看,预计到2022年,再生水利用量将超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

再生水可用作生态用水(景观环境、湿地等)、市政用水(城市绿化、冲厕、道路清扫、消防、车辆冲洗、建筑施工等)、工业用水(冷却、洗涤、锅炉、工业和产品用水等)、农林牧渔业用水(农业灌溉、造林

育苗、畜牧养殖、水产养殖等)、补充水源水(地表水、地下水等)等,涉及的行业领域十分广阔。例如,美国再生水利用量约为 $66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要利用途径包括农业灌溉、城市杂用、工业利用等,其中再生水间接补给饮用水水源水已占再生水总利用量的15%^[5-6]。我国城镇地区再生水主要应用于工业和景观环境等途径,其利用量占再生水总利用量的80%以上^[7]。2019年,我国城镇污水排放量约为 $750 \times 10^8 \text{ m}^3$,城镇污水处理厂数量约3 919座^[8]。但是,我国污水再生利用率仍然较低,约为15%,再生水厂的建设、运营和维护具有巨大的发展潜力和市场空间^[9-11]。

标准规范是再生水行业健康发展的重要保障,我国在再生水利用水质标准、处理工艺设计规范等方面较为完善,制订了《城市污水再生利用 分类》(GB/T 18919—2002)、《城市污水再生利用 城市杂用水水质》(GB/T 18920—2020)、《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921—2019)、《城市污水再生利用 工业用水水质》(GB/T 19923—2005)、《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772—2005)、《城市污水再生利用 绿地灌溉水质》(GB/T 25499—2010)等标准。但是,不同水质的再生水适用范围及用户使用需求差异较大,目前仍然存在再生水利用效益不明晰、评价方法和指标不统一等问题,难以科学全面地评价再生水利用效益。我国现有标准规范中尚缺乏再生水利用效益方面的标准。为促进再生水安全高效利用,有必要结合国内外再生水利用经验,充分考虑现有的和未来可能实施的污水再生利用理念、发展模式和技术创新,并结合再生水利用情况和经济社会发展状况,构建科学、合理的利用效益评价体系,基于再生水利用产品属性、资源性、技术性、经济性、环境友好性等特征,提出符合不同再生水利用途径特点、可操

作性强、针对性强的评价指标和方法,科学评价再生水利用效益,以推动我国再生水行业规范化和高效可持续发展。

2 再生水利用的效益

大量的科研成果和工程实践证明,再生水利用技术可行,具有诸多方面的效益。

2.1 资源效益

再生水的水源靠近主要的人口中心,其水量基本不受天气、气候等因素的影响,且水质变化幅度小。再生水经过适当的深度处理和科学的运行管理保障,是量大质稳的可靠水资源。再生水可以作为替代水源减少对新鲜水资源的开采和取用,增加可利用水资源的量,缓解区域水资源供需矛盾。同时,再生水中的有机物及氮、磷等营养盐,可为农作物等提供营养补给,促进作物增产。

2.2 环境效益

再生水深度处理过程相比于城镇污水处理厂污水达标排放处理过程,可进一步强化无机离子、微量有毒有害污染物、一般溶解性有机污染物、微生物等污染物的去除。因此,相比于污水达标排放,再生水的利用可以有效减少进入环境水体的污染量。此外,城镇污水处理厂处理出水一般直接排放进入环境水体。再生水的利用可有效减少污水处理厂处理出水的排放量。例如,加利福尼亚圣何塞的南海岸的再生水利用项目为该地区130万居民提供再生水用于城市杂用等利用途径,有效减少了污水处理厂处理出水直接排放到旧金山海岸的水量^[12]。

再生水厂大多建在城市附近,与外环境调水、远距离输水相比,大大减少了输水管线的基建和电耗等费用;与海水淡化相比,大大减少了处理过程的电耗等运行费用。据估算,再生水项目(MBR工艺)的电耗约为 $0.4 \sim 0.6 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,而采用反渗透脱盐工艺的海水淡化项目电耗约为 $4 \sim 5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,采用多效蒸馏工艺的海水淡化项目电耗约为 $6 \sim 10 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。再生水项目(MBR工艺)的碳排放量约为 $0.9 \sim 1 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$,而采用反渗透脱盐工艺的海水淡化项目碳排放量约为 $0.08 \sim 4.3 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$,采用多效蒸馏工艺的海水淡化项目碳排放量约为 $0.3 \sim 26.9 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ ^[13-14]。

2.3 社会效益

再生水资源的开发利用过程中,可在相关规划、设计、建设、运营、管理和评价等领域提供和扩大就

业机会,促进产业链的形成。此外,再生水用于城市杂用和景观环境利用等用途,对改善城市生态环境,提升城市美学效果,提高公众生活品质有重要意义。

2.4 经济效益

再生水具备产品的属性,再生水使用者需缴纳一定的再生水费。同时,为鼓励再生水的推广利用,政府也出台了相应的财政补贴或者税收减免等政策。因此,再生水具备供水收益。

再生水的成本和价格低于传统水源和其他可替代性水资源(例如外调水、海水淡化等)。以北京和天津为例,再生水平均到户成本(主要为处理、输配及运维成本)为 $1 \sim 5 \text{ 元}/\text{m}^3$;南水北调(中线)平均到户成本(主要为远距离调水、处理、输配及运维成本)为 $6 \sim 8 \text{ 元}/\text{m}^3$;海水淡化平均到户成本(主要为调水、处理、输配及运维成本)为 $7.5 \sim 8 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。北京市居民自来水用水价格为 $5 \text{ 元}/\text{m}^3$ (第一阶梯),非居民自来水用水价格为 $9.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ (城六区),再生水用水价格不超过 $3.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。因此,再生水利用可减少相应的水费开支。

对于进入环境水体的水污染物,《中华人民共和国环境保护税法》中规定了典型水污染物(BOD_5 、 COD 、 SS 、氨氮、总磷、色度、大肠菌群数等)和当量值以及应缴纳的相应环境税。相比于污水达标排放,再生水的利用可以有效减少进入环境水体的污染量,因此,可以有效节省需要缴纳的环境税开支。

再生水项目的建设运行和再生水利用涉及投资、固定资产投入、劳动力投入和销售等多个方面,对城市经济发展有重要贡献。水资源短缺是我国大部分地区面临的问题,北方地区尤其突出,已成为限制产业规模扩大、阻碍经济发展的重要因素。再生水用于工业生产和农业灌溉,可有效解决水资源短缺问题,并为工农业生产带来显著经济效益。例如,北京市经济开发区内再生水厂生产的高品质再生水水质稳定,部分水质指标优于自来水,且节省了一定的水费开支,得到了用水企业的广泛好评。通过对高品质再生水的大力推广,2018年开发区再生水用水量达 $1200 \times 10^4 \text{ m}^3$,占工业用水总量的55%以上,成为了工业“第一水源”。此外,再生水的利用在改善当地水环境的同时,还将推动当地旅游业的发展,带动城市第三产业的发展。

3 再生水利用效益评价内容及指标体系

根据文献资料和再生水利用实践调研分析,再

生水利用效益涉及资源、环境、社会和经济等多方面。针对再生水利用效益特点,《再生水利用效益评价指南》规定了评价的范围、总则、评价指标及评价程序等内容,在以下几个方面具有创新性:

① 提出了再生水利用效益评价的基本原则和指标体系,强调了评价应符合客观事实,评价指标的选取应具有可量化性、可考核性和可比较性。

② 提出了评价指标的结构和设立原则,一级指标应反映资源效益、环境效益、社会效益和经济效益等主要方面。

③ 提出了再生水资源效益、环境效益、社会效益和经济效益的定量和定性评价方法,有助于全面体现再生水利用效益,并对不同再生水项目进行分析、比较和优化。

④ 提出了再生水梯级利用等新的利用模式,能够进一步提高再生水利用效率、减少传统水资源取用量、扩增再生水利用途径,推动再生水行业产业升级和发展方式转变。

再生水利用效益评价指标体系如表1所示。

表1 再生水利用效益评价指标体系

Tab.1 Holistic indicator system for benefit evaluation of reclaimed water use

一级指标	二级指标
资源效益指标	水资源节约量等
环境效益指标	污染物削减量、排水减少量、电耗减少量、温室气体排放减少量等
社会效益指标	就业岗位数、人居环境改善等
经济效益指标	再生水供水收益、节省水费、节省环境税、再生水GDP贡献、GDP拉动效益等

4 再生水利用效益评价指标

再生水利用效益评价指标包括定量和定性两类指标。定量评价应选取科学、合理的可量化指标,充分考虑相关数据的可获取性和可靠性。定性评价主要采用描述性或相对比较方式进行评价,评价应符合客观事实、用词准确、具有可考核性和可比较性。定量和定性指标应定义明确、内涵和边界清晰。

4.1 资源效益指标

再生水利用资源效益主要为再生水利用所节省的水和营养物等资源。该一级指标下可设水资源节约量等二级指标。再生水的利用可减少新鲜水资源(地表水、地下水等)的开采和取用。再生水初次利用强调再生水满足某种使用功能要求,初次利用于生产、生活、环境等的行为。再生水梯级利用指再生

水经过初次利用后,直接或经适当处理后用于其他利用途径,实现再生水的再次或多次重复利用。

例如,以工业园区为依托,可加强企业间再生水的梯级利用,将园区内某一企业多余再生水应用于另外企业或其他利用途径,实现再生水的多样化用水形式。具体来讲,可将再生水优先利用于工业企业生产和冷却等过程,根据工业园区实际状况,将富余的再生水用于园区绿化、道路冲洗和景观环境利用等途径。

水资源节约量等于再生水利用总量,即再生水替代或减少水资源取用量,可通过不同利用途径的再生水初次利用量与再生水梯级利用量之和进行定量计算。例如,冲厕是居民生活用水的重要利用途径,据统计,卫生间冲洗用水量占室内住宅用水水量的45%。再生水在国内外许多城市和地区用于居民小区、机关事业单位、宾馆酒店等的冲厕,大大节省了居民区饮用水使用量。在美国Irvine Ranch,给水管理部门将再生水用于高层建筑卫生间冲洗,这使得饮用水的消耗量减少了约75%。

对于农林、绿地灌溉等利用途径,可增设植物营养盐供给量、提供肥料价值等二级指标。研究表明,再生水中含有作物所需的氮、磷、钾、锌、硼、硫等营养物质,其可使西红柿等许多作物的年产量显著增加或无显著影响。

4.2 环境效益指标

再生水利用环境效益主要为再生水利用对改善环境质量所起的积极作用或产生的有益效果。该一级指标下可设污染物削减量、排水减少量、电耗减少量、温室气体排放减少量等二级指标。

污水中的主要污染物为微生物(病原微生物、一般微生物)和化学污染物(无机污染物、有机污染物),可通过测定化学需氧量(COD)、总氮、总磷、粪大肠菌群等常规水质指标的浓度(取平均浓度值、月均值或年均值)来反映水体污染状况。污染物削减量为再生水的利用量比污水达标排放减少的污染物质,可通过污水达标排放进入环境水体的污染物质与经再生水利用后实际进入环境水体的污染物质的差值进行定量计算。

排水减少量为由于再生水利用减少的直接排入环境水体的污水处理厂出水量,等于再生水初次利用量。例如,造纸、纺织、印染等高耗水高排污行业,由于水资源短缺以及相关标准对最高允许排水量限

额的加严,许多企业广泛开展企业内部的再生水循环利用或使用城镇再生水厂供应的再生水,很大程度上减少了直接排入环境水体的污水处理厂出水量。

电耗减少量为由于再生水利用减少的新增水资源开发利用耗电量,即其他可替代性水资源(例如外调水、海水淡化等)生产的电耗与再生水生产的电耗之差。

温室气体排放减少量为由于再生水利用减少的新增水资源开发利用耗电量带来的温室气体排放减少量,可通过再生水利用带来的电耗减少量与转换系数的乘积进行定量计算。不同地区因为电力类型、电网划分、热力与电力之间分配等不同,转换系数可能存在一定的差异。根据世界资源研究所文献资料,转换系数为0.67~1.14。

4.3 社会效益指标

再生水利用社会效益主要为再生水利用对社会发展所起的积极作用或产生的有益效果。该一级指标下可设就业岗位数、人居环境改善等二级指标。

就业岗位数为再生水利用带来的就业人数的增加量,主要包括再生水项目建设和运行所提供的就业岗位数。

人居环境改善为再生水利用带来的水环境改善对人居条件提升的效果。人居环境改善为定性评价指标,可通过满意度调查确定。满意度调查的内容可包括感官愉悦度提升、景观环境营造、湿地生态系统修复和营造、水体娱乐功能提升、地表水水质改善和地面沉降恢复等。

4.4 经济效益指标

再生水利用经济效益主要为再生水利用对经济发展所起的积极作用或产生的有益效果。该一级指标下可设再生水供水收益、节省水费、节省环境税、再生水GDP贡献、GDP拉动效益等二级指标。

再生水供水收益为再生水销售收入,包括再生水初次利用的供水收益、再生水梯级利用(按重复次数累计)的供水收益和政府财政补贴等。

节省水费为用户由于再生水利用减少的水费开支,即利用传统供水的水费与再生水水费之差,可通过再生水初次利用节省的水费和再生水梯级利用(按重复次数累计)节省的水费之和进行定量计算。

节省环境税为由于再生水利用节省的环境税,适用于企事业单位等需单独缴纳环境税的情形。节省的环境税可通过污水达标排放需缴纳的环境税与

再生水利用后需缴纳的环境税之差进行定量计算。

再生水GDP贡献为再生水设施的建设运行和再生水使用所贡献的GDP总量,可通过再生水设施建设总投资额、再生水设施运行总投资额与再生水销售额(不含政府补贴)之和进行定量计算。

GDP拉动效益为再生水利用于工农业生产所带来的经济效益,可通过企业所利用的再生水用量占企业总用水量的比例与企业所贡献的GDP的乘积进行定量计算。

5 再生水利用效益评价程序

再生水利用效益评价程序包括确定评价对象、边界条件及评价需求和原则、分析调查利用现状、明确利用途径、利用情景和利用量、选取评价指标、定量指标计算、定性指标评价、再生水利用效益综合评价与分析、结果汇总等步骤,如图1所示。

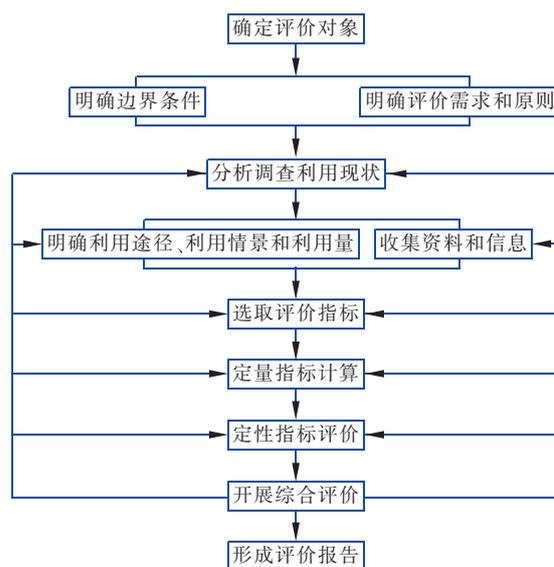


图1 再生水利用效益评价程序

Fig. 1 Procedures of benefit evaluation of reclaimed water use

评价指标的选取是评价程序中关键的步骤。针对再生水不同利用途径,可根据评价需要及再生水水源、处理、储存、输配、利用等系统关键环节特征,地区水资源、地理、社会和经济实际状况等,确定二级指标,进而进行再生水利用效益综合评价与分析。

评价指标选取应坚持科学性、全面性、独立性、可比性的原则。评价指标由一级指标和二级指标组成,一级指标为分类指标,二级指标用于定量或定性比较,也可根据评价需求和再生水利用特征设立三级或更多级指标。

一级指标可包括资源效益、环境效益、社会效益和经济效益。二级指标及其他级指标可根据评价需要和再生水利用特征合理选择,指标数量可进行适当增减。为使再生水利用效益得以充分评价,每个

一级指标下应设置二级指标,以定量指标为主,定性指标为辅。以尽可能少的指标,充分反映上一级指标的不同侧面,尽量不重复、不交叉^[15-16]。不同再生水利用途径推荐性效益评价指标见表2。

表2 再生水不同利用途径推荐性效益评价指标

Tab.2 Selection of evaluation indicators for different reclaimed water applications

项目	评价指标	城市杂用	景观环境利用	工业利用	农林、绿地灌溉	地下水回灌
资源效益指标(定量)	水资源节约量	√	√	√	√	√
环境效益指标(定量)	污染物削减量		√			
	排水减少量	√	√	√	√	√
	电耗减少量	√	√	√	√	√
	温室气体排放减少量	√	√	√	√	√
社会效益指标(定量或定性)	就业岗位数	√	√	√	√	√
	人居环境改善	√	√	√		√
经济效益指标(定量)	再生水供水收益	√	√	√	√	√
	节省水费	√	√	√	√	√
	节省环境税		√			
	再生水GDP贡献	√	√	√	√	√
	GDP拉动效益	√	√	√	√	√

注:对于农林、绿地灌溉等利用途径,可增设植物营养盐供给量、提供肥料价值等二级指标。

再生水利用效益综合评价与分析应从最低一级指标开始逐级计算,计算每一个上级指标所包含的全部下级指标。将资源效益、环境效益、社会效益和经济效益等一级指标评价结果汇总,分析或计算得到再生水利用效益综合评价指数。可根据再生水利用效益评价结果或综合评价指数,对不同再生水项目进行分析、比较和优化。

6 结语

再生水利用是解决水资源短缺和水环境污染的重要途径之一,是推进水资源循环利用和可持续发展的重要措施。《再生水利用效益评价指南》是我国首部再生水利用领域团体标准,规定了再生水利用效益评价的相关术语定义、评价指标及定量评价方法和程序,适用于再生水利用规划、设计、运营、管理和评价时的再生水利用效益评价。该团体标准的制定、颁布和实施,对规范再生水利用效益评价工作,指导再生水利用规划、设计、运营、管理、评价,提高再生水利用效益,促进再生水资源的合理、高效开发与利用具有积极意义。

目前,该标准已立项成为国家标准。在国家标准的编制过程中,将结合国内外再生水相关资料和利用实践,充分考虑我国再生水技术发展水平、不同再生水利用途径用水特点、再生水行业产业升级和发展需求。在此基础上,进一步完善利用效益评价

体系、评价方法和评价程序,从而更好地发挥国家标准的规范和引领作用。

参考文献:

- [1] 高旭阔. 城市再生水资源价值评价研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2011.
GAO Xukuo. Research on Value's Evaluation of Urban Reclaimed Water [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011 (in Chinese).
- [2] HEINZ I, SALGOT M, DAVILA J M S. Evaluating the costs and benefits of water reuse and exchange projects involving cities and farmers [J]. Water International, 2011, 36(4): 455-466.
- [3] 范育鹏, 陈卫平. 北京市再生水利用生态环境效益评估[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 4003-4008.
FAN Yupeng, CHEN Weiping. Assessment of ecological environmental benefits of reclaimed water reuse in Beijing [J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 4003-4008 (in Chinese).
- [4] 曲炜. 我国污水处理回用发展历程及特点[J]. 水资源管理, 2013(23): 50-52.
QU Wei. Development history and characteristic of polluted water reuse in China [J]. China Water Resources, 2013(23): 50-52 (in Chinese).
- [5] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). The United Nations World Water

- Development Report 2017[R]. Paris:UNESCO,2017.
- [6] National Research Council. Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply through Reuse of Municipal Wastewater [M]. Washington DC, USA: National Academics Press,2012.
- [7] 胡洪营,吴光学,吴乾元,等. 面向污水资源极尽利用的污水精炼技术与模式探讨[J]. 环境工程技术学报,2015,5(1):1-6.
HU Hongying, WU Guangxue, WU Qianyuan, *et al.* Wastewater refining technologies and modes toward ultimate utilization of wastewater resource[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2015,5(1):1-6(in Chinese).
- [8] 中国城镇供水排水协会. 中国城镇水务行业发展报告(2019)[R]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.
China Urban Water Association. Annual Report of Chinese Urban Water Utilities (2019) [R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020 (in Chinese).
- [9] 中国环境科学学会. 再生水利用效益评价指南:T/CSES 01—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
Chinese Society for Environmental Sciences. Guideline for Benefit Evaluation of Reclaimed Water Use;T/CSES 01-2019[S]. Beijing:China Standard Press,2019(in Chinese).
- [10] 田园馨,曲炜. 对我国再生水设施生产率的探讨与思考[J]. 干旱区研究,2015,32(3):448-452.
TIAN Yuanxin, QU Wei. Exploring and thinking over the productivity of reclaimed water facilities in China [J]. Arid Zone Research,2015,32(3):448-452(in Chinese).
- [11] 司渭滨. 中国北方城市污水再生利用系统建设管理模式研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
SI Weibin. Municipal Wastewater Recycling System Construction Management Mode Research in North China [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2013(in Chinese).
- [12] 陈卫平. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. 环境工程学报,2011,5(5):961-966.
CHEN Weiping. Reclaimed water reuse experience in California and hints to China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2011,5(5):961-966(in Chinese).
- [13] 吕立宏. 再生水利用经济效益和社会效益分析[J]. 科技创新导报,2011(11):135.
LÜ Lihong. Economical and social benefit evaluation of reclaimed water use [J]. Science and Technology Innovation Herald,2011(11):135(in Chinese).
- [14] 王天琪,杜攀,刘猛. 海水淡化水价格体系研究[J]. 盐业与化工,2013,42(9):7-12.
WANG Tianqi, DU Pan, LIU Meng. Research on the pricing structure of the seawater desalted water [J]. Journal of Salt and Chemical Industry,2013,42(9):7-12(in Chinese).
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 标准化效益评价 第1部分:经济效益评价通则:GB/T 3533.1—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Standardization Benefit Evaluation—Part 1: General Principles of Economic Benefit Evaluation;GB/T 3533.1-2017[S]. Beijing:China Standard Press,2017(in Chinese).
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 标准化效益评价 第2部分:社会效益评价通则:GB/T 3533.2—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the PRC. Standardization Benefit Evaluation—Part 2: General Principles of Social Benefit Evaluation;GB/T 3533.2-2017[S]. Beijing:China Standard Press,2017(in Chinese).

作者简介:陈卓(1988-),女,四川自贡人,博士,助理研究员,主要研究方向为再生水安全管理与评价、再生水病原微生物风险及控制。

E-mail:zhuochen@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2020-12-29

修回日期:2021-01-22

(编辑:丁彩娟)