

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.18.006

全生命周期评价在污水处理中的应用

李 爽¹, 王向阳², 郝晓地², 江 瀚¹

(1. 北京首创股份有限公司, 北京 100044; 2. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境
教育部重点实验室中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 污水处理在改善水环境的同时也会因污染物排放及能源、资源投入而产生其他负面环境影响。全生命周期评价(LCA)作为一种可以全面评估污水处理总环境影响及其影响减量方法的工具在国内外已得到相当应用。然而, 不尽完善与不尽合理的目标范围界定、评价参数选择会导致评价结果客观性有失公允, 阻碍 LCA 在污水处理领域的发展空间。此外, LCA 中缺失资源、能源回收模块会使得传统污水处理技术背负它对总环境影响是一种“污染源”之名。因此, 需要审视 LCA 评价理论与方法的发展历程, 剖析国内外污水处理 LCA 评价的应用现状, 指出我国现有 LCA 评价污水处理的局限, 概括污水处理 LCA 评价未来发展方向, 期望藉此推动 LCA 评价在我国的广泛应用, 实现污水处理“净-零”环境效益的远大目标。

关键词: 污水处理; 全生命周期评价; 环境影响评价

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)18-0032-06

Research and Application of Life Cycle Assessment in Wastewater Treatment

LI Shuang¹, WANG Xiang-yang², HAO Xiao-di², JIANG Han¹

(1. Beijing Capital Co. Ltd., Beijing 100044, China; 2. Sino-Dutch R & D Centre for Future
Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water
Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,
Beijing 100044, China)

Abstract: Wastewater treatment can definitely improve the water environment and also cause other negative environmental impacts due to pollutant discharge and energy/resource input. As a tool comprehensively assessing the total environmental impact and also potentially alleviating the impact, life cycle assessment (LCA) has been widely used in wastewater treatment at home and abroad. However, imperfect and unreasonable target scoping and selection of evaluation parameters could result in unfair evaluation results and hinder LCA development space in sewage treatment field. Moreover, the lack of resource/energy recovery module in LCA would always make traditional sewage treatment technology undertake the negative name of its total environmental impact as a “pollution source”. Therefore, it is necessary to review the LCA progress of assessment theories and methods, to analyze the application status of LCA at home and abroad, to point out the LCA questions applied in China, and to summary the future development direction of LCA in wastewater treatment. Based on the review, it is expected to promote the wide application of LCA in China to realize the goal of “net-zero” environmental impact of wastewater treatment.

Key words: wastewater treatment; life cycle assessment (LCA); environmental impact assessment

通过污水处理可削减污水中的污染物,从而改善水体环境。但污水处理同时也会带来新的环境污染和资源/能源消耗。传统经济成本评价污水处理的方式并不能反映污水处理的污染转嫁问题,这就需要对污水处理进行全生命周期评价(LCA)。LCA不仅可以某种方式定量评价污水处理的环境综合影响,亦可为寻求低影响处理手段和高附加值资源回收提供依据。目前,国际上有关污水处理 LCA 评价已经获得广泛应用和长足发展,但 LCA 在我国应用还存在一定局限或不足。总体来看,有关资源、能源回收介入 LCA 评价不够全面,所涉及的大多为传统意义上的资源和能源,以至于目前有限的资源、能源回收方式并不能完全有效地弥补污水处理对环境产生的不利影响。

1 污水处理全生命周期评价理论发展

全生命周期评价(LCA)是对某种产品、工艺过程或过程服务的全方位评价,即从原材料采集、加工到生产、运输、销售、使用、回收、循环利用和最终处置等整个生命周期内涉及的所有环境负荷进行综合评价。对于 LCA 的准确定义和概述,国际标准化组织(ISO)和国际环境毒理学与化学学会(SETAC)均分别给出过较为权威的概括^[1]。在 ISO 14040 标准中给出的定义是:LCA 是从生命周期角度,对某种产品、工艺体系或政府决策等因能量、材料的输入、输出所带来的环境影响进行整理、数据特征化分析和评价的一种系统方法。LCA 研究最早出现于 20 世纪 60 年代,美国可口可乐公司曾对不同饮料容器所消耗的资源与环境释放进行了影响分析,随后 ISO 和 SETAC 框架定义(见图 1)进一步推动了 LCA 研究与发展。

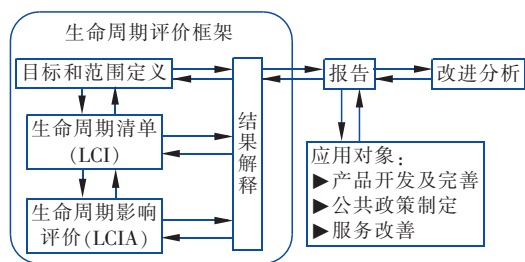


图 1 全生命周期评价(LCA)框架

Fig.1 Framework of life cycle assessment (LCA)

我国从 20 世纪 90 年代开始引入 LCA 评价方法,利用 LCA 对不同行业进行环境影响评价分析。早期对污水处理过程 LCA 评价主要包括污水厂生

命周期能耗分析、经济分析及影响评价,涉及建设、运行和拆除阶段的直接能耗输入和由物料投入引起的间接能耗,涵盖 9 种环境影响指标(如大气酸化、海洋生物毒性、温室效应和人体健康影响等)^[2]。

在 LCA 研究发展过程中,许多评价模型方法和软件工具得到开发利用,大大提高了评价的方便性和准确度^[3]。在评价模型方法方面,目前比较为人接受的 LCA 评价方法有:丹麦的 EDIP 方法、荷兰莱顿大学 CML2001 方法、生态指标法 Eco-indicator 99 和瑞典 EPS 方法等。而在评价软件工具方面,目前国外市场上认可度较高的通用 LCA 评价软件基本都来源于欧洲,如 Gabi(德国)、simaPro(荷兰)、TEAM(法国)等^[2]。其中,Gabi 和 simaPro 软件是目前 LCA 评价的主流软件,而 simaPro 由于容量小、易于操作等特点,在 LCA 实际应用中则颇受欢迎。此外,还有专门用于能源评价的 LCA 软件 GREET、开放性获取软件 openLCA,大大简化了 LCA 实际应用流程。随着国际上对 LCA 研究的迅速发展,我国也开始了相关软件开发研究,目前国内最为成熟的 LCA 应用软件为 e-Balance,其内置的大宗物质数据比国外软件更加贴近国情^[3]。在数据库使用方面,国外软件中常用的背景数据库为欧盟 ELCD(European Life Cycle Database)数据库和瑞士 Ecoinvent 数据库;国内软件根据国情亦开发出相应数据库 CLCD(Chinese Life Cycle Database),为我国 LCA 应用研究提供了较好的技术支持。

现今开发的 LCA 软件基本上都是基于不同行业的通用型静态模型,这就导致在某些涉及动态变化性强的领域预测效果显得不够准确。例如,污水处理中温室气体排放是一个动态变化过程,其动力学变化等过程难以在静态 LCA 软件中得到体现。为此,国外有研究尝试将污水处理动力学模型软件与传统 LCA 评价软件相结合,从而为污水处理提供更为准确的整合评价框架。例如,有人将污水处理温室气体排放动态模型 BSM2G(Benchmark Simulation Model No.2 GHG)与 Gabi 结合使用,在瑞典某污水处理厂获得应用,提升了校准效率并得出最终较为准确的评价结果^[4]。

2 污水处理资源、能源回收在 LCA 中的应用

国内外关于污水处理过程中资源、能源回收已有大量研究,它们对环境影响的减量作用也在 LCA 评价中得到相应体现。再生水利用一般为非饮用目

的,如用作工业冷却水、园林绿化灌溉、景观用水等,亦有补充地下水作为间接饮用水用途^[5]。有人设置3种不同出水回用率,通过LCA评价大连某污水厂,结果显示,当出水回用率达70%时,回用水通过抵消自来水生产获得的环境效益仅够抵消由于新增污水深度处理设施所带来的环境影响,远不足以抵消总的环境影响;即使当回用率为100%时也无济于事^[2]。也有人通过LCA评价了西班牙某污水处理厂污水处理及回用过程,结果表明在出水再利用方案情况下,淡水消耗指标为负,说明从自然界中节约了水资源,但其他环境影响指标依然为正值^[5]。这些应用案例表明,仅仅靠再生水进行环境影响减量并不能实现污水厂“净-零”环境影响效应。

在污泥资源化方面,一般采用厌氧消化或焚烧处理,在处理的同时还可以回收电能和热能,以弥补污水处理运行能耗。有人对污泥厌氧消化进行LCA评价,发现沼气利用可以抵消污水厂所需能源的47%,并不能达到碳中和运行目的^[6]。厌氧消化虽然可以进行污泥减量,但仍残留50%~70%的污泥有机物,在“无地自容”的情况下,最后不得不辅以焚烧加以处置。污泥焚烧前需要进行干化处理,这一过程将会消耗大量额外能源。焚烧虽然可以从污泥有机物中产生热能,但因前端厌氧消化已丧失近一半化学能,即使回收残余有机物焚烧热能也很难弥补包括污泥干化在内的碳中和运行需要。这就促使对潜在污水余热热能进行开发和评价。笔者的研究显示,污水中所含热能与化学能分别占污水总潜能的90%和10%^[7]。可见,包括污水热能回收在内的LCA评价可能会大大减少污水处理厂的环境综合影响,甚至出现“净-零”环境影响效应。

现有污水处理资源回收LCA评价中通常也忽视了对磷这一不可再生资源回收评价。尽管目前有关污水处理磷回收的研究很多,但还没有将磷回收纳入污水处理厂LCA评价体系之中,它在污水处理环境综合影响方面的减量作用也未能体现。就磷回收而言,从污泥焚烧灰分中回收磷似乎比在处理过程(二级出水、污泥上清液或混合液)回收可获得更高的回收率(可回收进水TP的70%~90%)^[8]。因此,磷回收可与污泥焚烧有机结合,发挥协同效应,磷回收后的灰分可用作建材生产,可以进一步抵消污水处理的环境综合影响。今后有关磷回收应着手这方面的LCA评价。

3 国内LCA应用水平

3.1 目标范围

目标和范围定义是整个LCA评估中的起始步骤,评价目标为污水处理厂时显得尤为重要。合理的物理边界范围应以进水为起点,出水为终点,包括污泥处理、处置过程在内;合理的时间边界范围应完整包括建设、运行和拆除3个阶段。国内在实际应用LCA评价污水处理厂时,少有考虑建设和拆除阶段所造成的环境影响,大部分LCA评价仅集中于运行阶段环境影响,这种影响评价主要基于这样的认识,运行阶段环境影响远远大于建设和拆除2个阶段^[9]。也有人在LCA评价中仅对污水处理厂施工建造、运行维护和交通运输阶段进行评估分析,因一时没有拆除阶段数据而忽略拆除阶段评价^[10]。LCA用于工艺比较时,仅讨论运行阶段本无可厚非,但当进行单一污水处理厂整体评估时,缺少建设和拆除阶段比较将会使评价结果准确性大大降低,特别是当污水处理工艺流程长或者建于地下时。

此外,国内部分LCA应用中并没有包括污泥处理、处置过程造成的环境影响。也有人仅对污泥运输和固体废弃物排放进行计算,而对处理、处置过程中造成的环境影响未进行有效评估^[11]。完整的污水处理系统理应包括污泥处理处置过程,这样才能使最终评价得到较为全面、可信的结果。

3.2 功能单位

功能单位(Functional Unit, FU)是用于识别评价目标的特征量,主要目的是为不同评价对象在不同输入、输出情况下提供客观的对比参考。因此,选取的功能单位需满足一定的可比性,以保证在不同研究系统(如集中式和分散式处理)中、不同处理工艺和水量规模情况下可以进行客观比较^[12]。

目前国内LCA评价应用几乎所有均以污水处理体积作为评价功能单位,如: m^3/d 、 m^3/a 或LCA内处理污水总量。然而,不同案例进水水质不尽相同,处理效率亦有差异;当满足相同出水排放标准时,不同污水处理系统处理单位体积污水所造成的环境影响在本质上显然具有系统差异。如果评价目的仅仅是单纯衡量单个污水处理厂或系统的单位环境影响,这种差异当然无法显现;但是,当进行不同污水处理系统比较时,以体积作为FU并不能反映出污水负荷和处理有何效果不同,导致比较评价结果出现误差。对此,人口当量(PE)在国外通常被用

作功能单位 FU,一般采用人均 BOD_5 日负荷(发达国家为 $60\text{ gBOD}_5/\text{d}$;中国及其他发展中国家取值 $40\text{ gBOD}_5/\text{d}$ 较为适宜^[12])作为体积当量和人口当量之间的转换系数。亦有研究根据人均日排水量作为 FU 的案例,但这种核算方法适合相对稳定的生活污水处理评价,因各国生活水平与习惯不同取值也不一样^[13]。此外,国外还有专注于表征进水中特征污染物去除的 FU,如 $COD\text{-eq}$ 或 $PO_4^{3-}\text{-eq}$ 等,这比利用体积当量能更好地排除由进水水质不同带来的系统差异,使得评价结果更好地反映出因不同处理系统工艺差异所导致的不同环境影响值^[12]。

3.3 数据清单

在数据清单分析方面,国内研究基本与国外一致,均包括污水和污泥处理过程中的直接排放(如 CO_2 、 CH_4 、 N_xO 、 SO_2 等)以及处理过程所投入的能源和物料消耗造成的间接环境排放。不足之处是目前国内有关能源和物料生产的间接排放数据库还不够详细和完善,特别是官方数据库与欧美 Ecoinvent 和 ELCD 等数据库相比差距不小^[14]。

其次,直接排放数据清单也存在缺陷,主要体现在温室气体统计上:一些研究忽略了运行阶段 CH_4 或 N_xO 等温室气体;即使一些涉及 CH_4 和 N_xO 计算的研究也基本没有列出详细计算过程,导致评价结果重现性大为降低;还有些研究计算过程直接采用国外经验排放因子,没有现场实测值,致使清单结果与实际情况存在出入。在 CO_2 排放计算方面,长期以来国内研究习惯认定从 COD 厌氧而转化来的 CO_2 是生源性的,并不需要计入碳排放核算清单。然而,随着检测水平不断提高,通过放射性碳元素(^{14}C)检测与元素质量守恒法则计算表明,污水有机物中化石碳(石油化工产品制造的洗涤剂、化妆品、药物等)成分所占比例可高达 TOC 成分的 28%,由此而产生的 CO_2 直接排放量(活性污泥法)可占到 TOC 总 CO_2 排放量的 13%,再加上污泥厌氧消化其 CO_2 排放量更是高达 23%^[15]。因此,化石碳 CO_2 直接排放量不容小觑,应该列入碳排放核算清单。目前在国内 LCA 评价中大都忽略这一部分环境排放数据清单,仅在少数文献中有所提及^[16]。

另外,在数据清单中目前国内还没有将新型污染物种类(如 PPCPs 等)纳入 LCA 评价。相比之下,国外对此已开展了相关 LCA 评价研究;有人通过对颗粒活性炭、纳滤、太阳能光电芬顿和臭氧氧化 4 种

先进工艺去除 PPCPs 的 LCA 评价进而比较了几种工艺的优劣性^[17]。因此,未来 LCA 清单分析中也需要纳入这些要素。

3.4 评价因子选择

在实际 LCA 评价应用中,大部分研究者采用商业 LCA 评估软件,同时,在评价流程中采用其内置的排放因子和能源物料因子等。从环境影响评价类别来看,温室效应影响(GWP)项目在所有 LCA 应用中均有考虑,属于通用影响类别;况且,GWP 产生量主要由污染物去除和能源消耗效率所决定,它对全球气候变化影响程度广泛一致,并不需要根据特定区域划定地区因子。但是,其他环境影响类别,如水体富营养化影响潜能(EP)、淡水生态毒性潜能(FAEP)、陆地生态毒性潜能(TEP)等,可能会因排放源位置、污染物在不同环境主体间运输过程和接受水体生态系统敏感性而有所不同,因此,需要根据特定位置进行分别判断。

3.4.1 特征化因子

特征化因子(CF)选取对环境影响特征化结果产生决定性作用,而目前国内大部分研究采用的都是国外特征化因子,采用最多的是英国 ICI 公司环境影响潜值因子^[18],其他较有影响力的评价体系为 CML2001、EPS(瑞典)以及 Ecoindicator(荷兰),在国内评价实践中亦有应用其中特征因子的评价案例。国内对于 LCA 评价中有关环境影响项目及因子区域化或地区化工作目前鲜有研究,而国外研究者早已开展这方面研究工作,主要工作集中于对 EP 进行区域化因子计算,如美国、芬兰、法国、西班牙等国家都已经分别计算出各自有关 EP 影响的区域化特征因子;国外其他评价体系,如 lime(日本)、TRACI(美国)和 LUCAS(加拿大)也将这部分区域化特征因子纳入了计算^[19-20]。

3.4.2 归一化因子与权重

由于当量单位不一,不同环境影响特征化结果之间不能相互比较,需要进行归一化(无量纲化)后才能进一步比较分析。归一化过程是利用各环境影响特征化结果与所选取的归一化因子之比得到的无量纲数;归一化因子通常定义为每人每年排放的相应影响物质当量 $[\text{kg 当量物质}/(\text{人} \cdot \text{a})]$ ^[12]。目前国内大部分研究均采用国外归一化因子进行计算,使得计算结果与我国实际情况有所出入^[11,21]。因此,不能简单套用国外归一化因子,这会导致最终计

算结果偏离我国实际。

在环境影响权重分配方面,因没有官方统一或广泛认可的权重因子,导致大部分研究均采用层次分析法(AHP)进行权重量化^[22]。但计算过程中对判断矩阵标度打分等过于依赖主观判断,不利于评价结论推广应用。国内有不少研究直接利用国外评价体系中的权重因子^[21],忽略了不同环境影响的区域化重要程度,使评价结果不能完全体现实际情况。

4 应用前景

我国当下污水处理 LCA 评价应关注环境影响特征化因子区域化(本土化)研究,通过对实际水体、土壤和大气污染现状进行相关模型校正,得到更能反映我国实际污染状况的特征化因子。其次,为各种环境影响归一化因子和权重因子提供统一参考,以便未来研究者进行更加客观的 LCA 评价。

近年来,国外研究将模拟仿真与动态静态数据相结合、成本效益分析与 LCA 相结合来评价污水处理过程,这也为我国对污水处理厂 LCA 评价提供了一个新的研究视角。因此,将动力学模型与现有 LCA 框架相结合,开发针对污水处理的专门评估软件将会大大方便未来研究者或评估人员进行污水处理 LCA 评价工作。与此同时,现有 LCA 框架中还未包含资源、能源回收模块,如若在未来开发软件中进行相关模块设定将有助于评估其对污水处理环境影响减量效果,从而推动资源、能源回收事业,促进污水处理行业碳交易市场发展。

5 结论

全生命周期理论框架和应用模型发展已较为成熟,在污水处理领域亦得到了一定的应用。通过 LCA 环境影响评价可以识别和评估污水处理厂对环境产生的综合影响,亦能够比较不同处理工艺与建设模式之间的彼此优劣,为工艺选择和基建方式提供科学依据。

LCA 在实际应用过程中应进行以下完善或改进:①应开始关注动态模型、静态模型与参数往往会导致评价结果与客观实际存在一定偏差;②需将资源(磷)、能源(热能)回收纳入 LCA 评价并在相应软件中形成模块;③国内 LCA 评价今后应在评价范围完整性、功能单位合理性、数据清单完善性,以及区域影响因子差别化等方面开展深入研究。

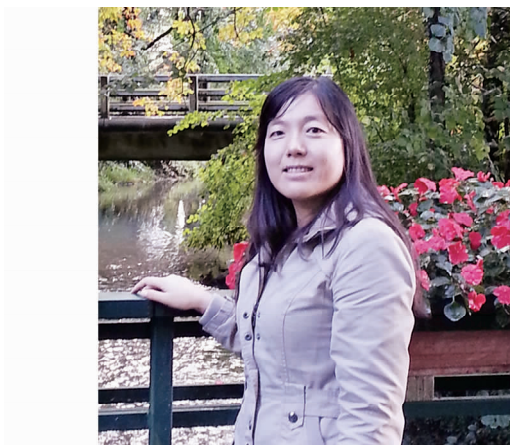
LCA 评价可以客观揭示污水处理的环境影响实质,将传统污水处理为“污染转嫁”过程的问题定

量展现,避免一味靠“提标”而仅达到单一改善水环境的目的,要充分认识“大气-水-土地”相互联动的生态事实,从而选择“折衷”方案来实现最小化总环境影响,甚至通过资源、能源回收达到“净-零”环境效益。

参考文献:

- [1] Zang Y W, Li Y, Wang C, *et al.* Towards more accurate life cycle assessment of biological wastewater treatment plants: A review [J]. *J Clean Prod*, 2015, 107: 676-692.
- [2] 赵晨晨. 污水处理工艺生命周期环境影响分析与比较[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
Zhao Chenchen. Analysis and Comparison on the Life Cycle Environmental Impacts of Wastewater Treatment Process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [3] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展[J]. *科技进步与对策*, 2013, 30(6): 155-160.
Zheng Xiujun, Hu Bin. Domestic literature review and the latest overseas research progress of life cycle assessment [J]. *Scientific & Technological Progress and Policy*, 2013, 30(6): 155-160 (in Chinese).
- [4] Arnell M, Rahmberg M, Oliveira F, *et al.* Multi-objective performance assessment of wastewater treatment plants combining plant-wide process models and life cycle assessment [J]. *J Water Clim Change*, 2017, 8(4): jwc2017179.
- [5] Pintilie L, Torres C M, Teodosiu C, *et al.* Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study [J]. *J Clean Prod*, 2016, 139: 1-14.
- [6] Blanco D, Collado S, Laca A, *et al.* Life cycle assessment of introducing an anaerobic digester in a municipal wastewater treatment plant in Spain [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 73(4): 835-842.
- [7] 郝晓地, 方晓敏, 李季, 等. 污水碳中和运行潜能分析 [J]. *中国给水排水*, 2018, 34(10): 11-16.
Hao Xiaodi, Fang Xiaomin, Li Ji, *et al.* Analysis of potential in carbon-neutral operation of WWTPs [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(10): 11-16 (in Chinese).
- [8] Egle L, Rechberger H, Zessner M. Overview and description of technologies for recovering phosphorus from municipal wastewater [J]. *Resour Conserv Recycl*,

- 2015,105:325-346.
- [9] 张倩芸. 基于LCA的污水处理系统的环境影响评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
- Zhang Qianyun. Research of Environmental Impacts Assessment of Wastewater Treatment System Based on LCA[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2016 (in Chinese).
- [10] 黄希望,罗小勇,李轶,等. 污水处理厂生命周期评价及不同工艺污水处理系统的环境影响比较分析[J]. 水资源保护,2014,30(1):90-94.
- Huang Xiwang, Luo Xiaoyong, Li Yi, *et al.* Life cycle assessment of a wastewater treatment plant and comparison analysis of environmental impacts of different wastewater[J]. Water Resources Protection, 2014, 30 (1):90-94 (in Chinese).
- [11] 刘志勇. 生命周期评价在污水处理方面的应用[J]. 中国资源综合利用,2010,28(3):54-57.
- Liu Zhiyong. Life cycle analysis in environmental impact assessment on wastewater treatment plant[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2010, 28 (3): 54-57 (in Chinese).
- [12] Schmid A G, Tarpani R R Z. Life cycle assessment of wastewater treatment in developing countries: A review [J]. Water Res, 2019, 153:63-79.
- [13] Lam L, Kurisu K, Hanaki K. Comparative environmental impacts of source-separation systems for domestic wastewater management in rural China [J]. J Clean Prod, 2015, 104:185-198.
- [14] Yoshida H, Clavreul J, Scheutz C, *et al.* Influence of data collection schemes on the life cycle assessment of a municipal wastewater treatment plant[J]. Water Res, 2014, 56:292-303.
- [15] Law Y, Jacobsen G E, Smith A M, *et al.* Fossil organic carbon in wastewater and its fate in treatment plants[J]. Water Res, 2013, 47(14):5270-5281.
- [16] 柴春燕. 城镇污水处理厂温室气体排放规律及热岛效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
- Chai Chunyan. Study on Greenhouse Gas Emission Law and Heat Island Effect of Urban Wastewater Treatment Plant[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [17] Tarpani Z R R, Azapagic A. Life cycle environmental impacts of advanced wastewater treatment techniques for removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) [J]. J Environ Manage, 2018, 215:258-272.
- [18] 罗小勇,黄希望,王大伟,等. 生命周期评价理论及其在污水处理领域的应用综述[J]. 环境工程,2013,31(4):118-122.
- Luo Xiaoyong, Huang Xiwang, Wang Dawei, *et al.* The theory of life cycle assessment and its application in wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(4):118-122 (in Chinese).
- [19] Gallego A, Rodríguez L, Hospido A, *et al.* Development of regional characterization factors for aquatic eutrophication[J]. Int J Life Cycle Assess, 2010, 15 (1):32-43.
- [20] Henryson K, Hansson P A, Sundberg C. Spatially differentiated midpoint indicator for marine eutrophication of waterborne emissions in Sweden [J]. Int J Life Cycle Assess, 2018, 23:70-81.
- [21] 王建国,汤露露,薛峰,等. 污水再生膜-复合处理工艺的生命周期评价[J]. 四川环境,2015,34(2):97-103.
- Wang Jianguo, Tang Lulu, Xue Feng, *et al.* Life cycle assessment of membrane complex treatment process in wastewater reuse [J]. Sichuan Environment, 2015, 34 (2):97-103 (in Chinese).
- [22] 吉倩倩. 生命周期评价在城市污水处理的环境效益分析中的应用[D]. 西安:西安建筑科技大学,2010.
- Ji Qianqian. A Study on Environmental Benefits of Urban Wastewater Treatment Applying Life Cycle Assessment [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2010 (in Chinese).



作者简介:李爽(1977-),女,辽宁建昌人,工学博士,高级工程师,研究方向主要涵盖水务绩效管理、管网管理及漏损控制、水厂工艺优化等领域。

E-mail:lishuang@capitalwater.cn

收稿日期:2019-10-23