

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 08. 001

城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法

刘然彬¹, 于文波¹, 张梦博¹, 郝晓地¹, 李爽²

(1. 北京建筑大学 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 100044; 2. 北京首创生态环保集团股份有限公司, 北京 100044)

摘 要: 随着我国《城乡建设领域碳达峰实施方案》的发布,城镇水务系统也将成为减碳/降碳的阵地之一。然而,城镇水务系统一方面面临扩容增量、支撑配套城镇化发展的重任,另一方面则面临减碳/降碳窗口期短、任务重的现状。因此,科学规划减碳/降碳措施以及先期步骤——碳足迹核算方法不仅是城镇水务走向良性发展的保障,也是实现绿色低碳转型的关键。通过对发达国家水务系统碳中和规划的梳理,尤其是对英国《水务净零排放路线图》(Net Zero 2030 Roadmap)进行分析,总结提炼出适合我国城镇水务系统制定碳中和规划的一般思路和方法,即“3C”流程(核算定线 Carbon accounting→技术确定 Cluster of technologies→方案实施 Carrying out)。在此基础上,讨论分析了碳核算的发展及其在规划制定中的作用和意义;总结归纳了不同减碳/降碳工艺技术比选原则和方法,形成我国首部《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》,以期在双碳目标框架下指导我国城镇水务行业减碳/降碳行动与实践。

关键词: 城镇水务; 碳中和规划; 碳足迹核算; 3C 流程; 减碳/降碳; 能源回收

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)08-0001-10

Carbon Accounting and Reduction Planning in Urban Water Sector

LIU Ran-bin¹, YU Wen-bo¹, ZHANG Meng-bo¹, HAO Xiao-di¹, LI Shuang²

(1. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Capital Eco-Pro Group Co. Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: With the release of the *Implementation Plan for Carbon Peaking in Urban and Rural Development*, the ignored urban water systems in China should proactively take action in carbon reduction. However, the urban water sectors are still facing continuous expansion to support ongoing urbanization, at the same time, the heavy mission of dual-carbon goal must be completed in a very short time. Therefore, scientific planning of carbon reduction and implementation of the preliminary carbon accounting are not only the guarantee for the healthy development of urban water sectors but also the key to realizing green and low-carbon transformation. The universal decarbonization planning method for the water sector was summarized by sorting out the carbon neutrality plans of other countries with an emphasis on the UK's *Net Zero 2030 Roadmap*. “3C” process (Carbon accounting, Cluster of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5210018); 北京建筑大学建大英才培养工程项目(JDYC20220814)

通信作者: 郝晓地 E-mail: haoxiaodi@bcuea.edu.cn

technologies, and Carrying out) is suitable for the general carbon reduction plan formation of urban water sectors in China. Besides, the advancement of carbon accounting guidelines and their role in formulating decarbonization planning were also discussed and analyzed. Moreover, the principles and methods for properly carbon reduction technologies selection were summarized. The principles and methods have been leveraged to compile the *Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector*, which is the first water sector-specific guideline in China. This paper is expected to provide references for the carbon reduction actions and applications in water sectors under the framework of the dual carbon goals of China.

Key words: urban water sector; carbon neutrality planning; carbon accounting; 3C process; carbon reduction; energy recovery

我国已经向世界承诺,在2030年实现碳达峰、2060年实现碳中和。“双碳”目标的国际承诺其实是对国内经济发展提出了新的要求与方向。为此,国家职能部门迅速行动,相继出台一系列指导性意见和实施方案,形成了“1+N”双碳目标政策体系,先立后破,在保证各行业持续增量扩容、满足社会发展的同时,及时融入低碳发展理念,有序衔接双碳目标时间节点。

住房和城乡建设部发布的《“十四五”全国城市基础设施建设规划》中提到,“十三五”期间,全国城市供水、排水设施覆盖率不断提高,用水普及率和城市污水处理率分别达到99%和97.5%,污水集中处理能力也提升至 $1.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,有效支撑了城市的健康发展。然而,城镇水务从水源地取水、净化、输送到污水收集及处理均会消耗大量电能,长期以来被冠以高能耗企业标签;与之伴随的是间接碳排放(燃煤发电产生),同时还有污水生物处理过程引起的直接碳排放(CH_4 和 N_2O)。所以,城镇水务系统确实是不容小觑的碳排放源,甚至可占城市基础设施运行总碳排的50%以上^[1]。

然而,城镇水务是否有必要纳入碳中和发展目标业内还存在疑虑。从社会总碳排放量来看,城镇水务行业碳排放占比十分有限(在我国约为1%^[2-3]),即使全面实现碳中和,似乎对全社会双碳目标的贡献率也微不足道,反而给城镇水务发展带来复杂性。事实上,无论是从行业自身还是从其在产业链中的角色来看,城镇水务系统碳减排对国家双碳目标都有重要意义;通过碳排放管理,可将协同减排降碳并入城镇水务运营,积极引导节能、降耗、减碳,促进水业绿色低碳转型。正因如此,国家两职

能部委最近发布了《城乡建设领域碳达峰实施方案》,对包括城镇供水排水在内的基础设施明确了2030年前碳达峰目标。这一方案先于钢铁等碳排大户发布,部分归因于污水实则为能源资源载体的属性,赋予城镇水务在减碳/降碳方面具备独特优势^[4]。为此,城镇水务企业应当把握机遇,积极实践减碳/降碳行动。

无形中,城镇水务企业已开始面临减碳/降碳巨大压力与挑战。从同期发布的《“十四五”全国城市基础设施建设规划》可知,城市供水排水设施仍将持续增加,总能耗及碳排放量会保持持续增长^[5]。另一方面,城镇水务面临碳达峰、碳中和任务窗口期短、时间紧迫。因此,如何制定高效、科学的碳达峰、碳中和规划方案,怎样比选应用低碳甚至负碳工艺至关重要。

2020年,英国发布了世界首部水务行业碳中和规划——《水务净零碳排放路线图》(*Net Zero 2030 Roadmap*),旨在2030年实现其全水业净零碳排放。该路线图基于当地水务行业碳排放数据,进行了碳减排分析并予以实践总结,科学阐明了支撑碳中和目标实现的一揽子工艺技术方案。通过对该路线图梳理分析,总结出指导水业碳中和规划的一般方法与关键内容,以期为我国水务行业制定减碳/降碳规划提供有价值的参考。

1 城镇水务碳中和进程

1.1 水务碳中和目标确立与指导文件

在城镇水务领域,碳中和并非新生事物。早在十多年前,国际上学术界乃至管理者已开始思考水务特别是污水处理厂的碳中和问题。例如,国内郝晓地教授早在2010年便开始发表和出版污水处理

厂碳中和运行方面的文章^[6]。在第26届联合国气候变化大会召开前后,随着人们对碳减排重视度的提升,水务行业碳中和也逐渐出现在部分国家的官方文件中。实际上,各国水务行业协会或主管部门在水务运行节能降耗、碳中和方面一直主动进取,

例如,荷兰STOWA在2010年曾发布《2030污水处理厂远景路线图》,尽管该文件没有明确提及碳中和的概念,但其对污水处理厂的重新定义实际上就是对碳中和路径的最佳探索。全球水务行业碳中和路线图汇总见表1。

表1 全球水务行业碳中和路线图汇总

Tab.1 Summary of the carbon neutrality roadmaps in water sectors globally

国家或地区	水务碳中和路线图	路线图要点	发布时间
英国(水行业协会)	《水务净零碳排放路线图》 (<i>Net Zero 2030 Roadmap</i>)	2030碳中和目标;首部水务行业碳中和路线图;边界限定在运行维护阶段;提供了水务行业碳减排规划编制一般思路,并详细分析了可用技术或工艺	2020年
丹麦(环境保护部)	《推动水务碳中和与能量中和的“巴黎模式”碳排放报告指南》 (<i>Guidelines for Reporting in Line with Paris Model for a Climate- and Energy-neutral Water Sector</i>)	2030碳中和目标;提供了碳排放核算边界和核算方法	2021年
新西兰(行业协会)	《净零碳排放指南:新西兰水务低碳发展之路》 (<i>Navigating to Net Zero: Aotearoa's Water Sector Low-carbon Journey</i>)	2050碳中和目标;边界包括运行维护与施工建设;提供了碳减排切入点和减排案例	2021年
欧盟(Water Europe)	《零污染行动计划》 (<i>Zero Pollution Action Plan</i>)	2050碳中和目标	2021年
澳大利亚(维多利亚州)	《水务碳减排计划书》 [<i>Statement of Obligations (Emission Reduction)</i>]	2035碳中和目标(所辖墨尔本则计划2030碳中和);提供了所辖水务企业的减排目标	2022年

由表1可以看出,英国和丹麦碳减排决心最大,定位于2030年便实现水务行业碳中和。作为活性污泥处理技术的诞生地,英国水务行业协会(Water UK)发布的路线图虽然不是政府的官方文件,但却是在凝聚行业最大共识基础上编撰完成并得到水务主管部门Ofwat的背书和支持。正如发布时所提及那样,该路线图是世界首部水务行业碳中和规划,引领意义明显。

丹麦水务行业2030碳中和目标的发布尽管稍晚于英国,但实际上其水务行业尤其是污水处理厂开始碳减排实践时间却很早且效果非常显著,其国内几个城市污水处理厂早已实现“能量自给”,尤其是奥尔胡斯市成为世界上首个实现区域水务运营能量中和的城市,为其2030碳中和目标奠定了良好基础。随后,新西兰和欧盟也分别制定了2050水务碳中和目标,澳大利亚维多利亚州则计划在2035年实现所辖区域内的水务碳中和目标,这些国家和地区同样也是很早就开展了水务行业碳减排实践活动。

但是,不同国家和地区碳中和目标除时间节点

不同外,其内容也存在较大差异。

首先,各国制定的碳中和规划所覆盖的水务边界存在差异,如图1所示。英国路线图包含与给水(取水、净化和输送)、污水和污泥处理过程相关的直接碳排放以及电力和运输等间接碳排放,且仅限于运行阶段。而丹麦和新西兰则包含了污水收集系统和污水(或出水)排入自然水体的碳排放,且丹麦的碳中和规划分类更加细致,例如,污水收集只考虑化粪池 CH_4 排放、污水处理则只考虑 N_2O 排放,污泥处理也只包含了厌氧消化的 CH_4 泄漏。与之相对,新西兰进行碳中和规划的碳排放活动更加全面,不仅仅停留于运行阶段,还考虑了设施建设所含碳排放以及雨水收集过程的碳排放。实际上,英国水务主管部门Ofwat也提及,水务企业在路线图基础上应将设施所隐含碳也予以包括。当然,碳中和规划所包含的碳排放活动广度不同决定了碳中和实现的难易程度,尤其是对于污水收集系统,其碳排放量不容小觑,是实现碳中和的关键因素之一,但也充满了不确定性。因此,碳中和规划采取分步实施也是良策。

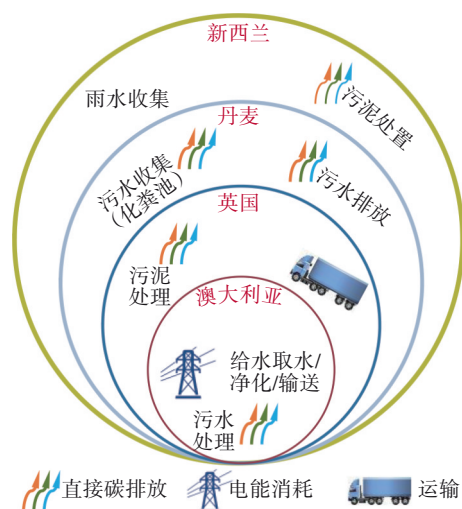


图1 不同国家水务碳中和规划边界

Fig.1 Boundaries of water sectors in different countries towards carbon neutrality

其次,不同碳中和目标所对应发布的支撑文件指导内容也并不相同。丹麦和澳大利亚只简单提供了碳中和边界或减排阶段目标,并没有提供进一步的指导内容,而新西兰碳中和规划文件则在此之外还提供了不同系统的减排措施和案例。而英国路线图则更加系统、详细,共分为6个篇章和一个附录,基于当地水务碳核算结果对减排任务量、影响因素、技术支撑潜力、减排不确定性等进行了量化分析讨论,其更大价值则在于据此可总结提炼一套适用于水务企业制定碳中和规划方案的一般方法。

1.2 城镇水务碳中和规划方法

根据英国水务协会发布的路线图内容和要点,将水务碳中和规划制定的方法总结为三步,即,核算定线(碳足迹核算,Carbon accounting)→技术确定(Cluster of technologies)→方案实施(Carrying out)(见图2),简称“3C”流程。核算定线指对城镇水务进行碳排放/足迹核算并厘清碳排放量的变化趋势线,尤其是预测未来一段时间碳排放量变化。核算是一切碳排放管理的基础,更是碳减排规划制定的起点。核算除了可提供城镇水务碳排放总量及构成并用以定位减排重点活动外,另一个目的即是定线,以确定未来可能影响城镇水务碳排放变化的因素及量化影响,如人口增长、用水量变化、水处理标准等。另外,城镇水务并不是孤立系统,由于电能、化学药剂等的输入和消耗,可形成与其他行业关联产业链,也会影响水务系统碳排放量,这均需通过碳核算定线加以明晰。目前,对城镇水务系统开展

碳排放核算并不困难,其核算流程、方法和内容均有标准方法可供参考,也已有软件工具方便使用。实际上,表1所列的碳中和规划均出自实践碳核算工作较早的国家和地区,所以,才有大量碳排放数据供参考来支撑碳中和目标科学制定。因此,核算定线是阐明“减多少、减什么”的基础环节。

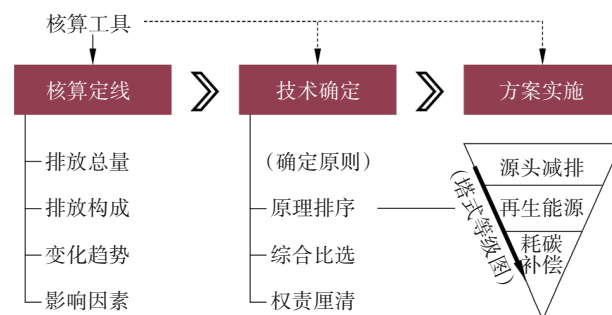


图2 水务碳中和规划流程与内容

Fig.2 Flow chart for carbon neutrality planning and the contents

在明确城镇水务所需减排量后,碳中和规划应开始思考“如何减”的路径问题,即,技术确定是碳中和规划关键环节,主要内容和目的就是科学确定有效支撑碳中和目标的工艺技术组合方案。在水务行业尤其是污水处理厂,已开发或应用了一系列的节能降耗或清洁能源回收工艺技术,包括污泥厌氧消化、光伏发电等技术^[7],这些均是与减碳/降碳相耦合的碳减排技术。而对于不同水务企业,如何科学比选和确定更加合理、高效的减碳/降碳工艺组合是必须要面对的问题。根据英国路线图内容,提炼出“原理排序、综合比选、权责厘清”的确定技术思路,以协助企业制定最优减碳工艺方案。其中,“原理排序”提供了工艺技术选择原则。根据减碳原理,不同工艺技术可分为源头减排、再生能源和耗碳补偿三类。其中,源头减排定位于从碳排放根本来源实现减碳降碳,如减少电耗或污水处理 N_2O 排放达到碳减排目的;再生能源则依赖于用清洁能源代替化石能源实现碳减排;耗碳补偿则主要指绿色植被碳汇过程。三类措施进行选择的优先度可用塔式等级图来表达(见图2),一般来说,源头减排技术应先于再生能源措施,而基于植树造林的碳补偿则只可作为兜底手段,无额外投资或投资较少的减排方案要优先于投资较大(依赖于产业链)的减排方案。在此选择原则基础上,路线图确立了三个维度“综合比选”方法,即,减排潜力、净现值和减排

不确定性,分别从年减排量、年收益额及应用不确定因素三方面量化分析了不同减碳工艺技术的可应用性和吸引力。而权责厘清,则是在选择工艺技术时充分考虑政府、产业链企业和水务企业所扮演的角色和作用,厘清可控和不可控因素,从而确定最适合自身企业特点的碳减排工艺技术组合方案。

第三步为方案实施和核算减排反馈,以动态分析调整碳中和规划方案。综合来看,图2所展示的碳中和规划方法适合于任一类型、任一规模水务企业;不仅适合于运维阶段碳中和规划方案制定,也适用于处于规划设计阶段的水务系统。在规划制定中,核算贯穿整个规划和实施全过程,且水务系统或工艺技术碳排放数据无疑是规划制定基础,也是目前我国水务企业所缺乏的,应予以重视和实践。

2 碳中和规划的关键——碳核算

2.1 城镇水务碳核算工具发展

城镇水务碳核算,就是对城镇水务行业碳排放量进行匡算的过程,或者将所提供的水服务作为产品,即,生产单位水产品所产生的碳排放量。如前所述,碳排放核算是进行减碳/降碳、制定碳中和规

划方案的基础。英国水务主管部门 Ofwat 早在 2007 年就要求各水务企业上报碳排放数据,路线图也是基于近 10 年的数据积累,清晰阐明了其水务企业的碳排放量、构成、变化趋势和影响因素,以及不同减碳降碳技术措施的碳减排潜力。可以说,英国能够发布世界首部水务行业碳中和规划方案与其较早的实践碳核算是分不开的,所以,碳核算的必要性不言而喻。城镇水务企业碳核算遵循一般碳排放核算原理和流程,包括核算边界确定、碳排放活动甄别以及碳排放计算公式选择。具体介绍可参考 *Greenhouse Gas Protocol* 和 *Greenhouse Gases——Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removal*(ISO 14064—1:2018),在此不作详细介绍。与电力等传统高碳排放企业核算相比,城镇水务碳排放核算特殊之处在于除了能耗、物耗之外,排水系统存在因生化反应产生的 N_2O 和 CH_4 释放,这也是城镇水务企业进行碳排放核算的重点和难点^[8]。

目前,世界范围内用于指导城镇水务企业进行碳核算的指南并不多,对其梳理总结见表2。

表2 城镇水务碳核算指南或方法

Tab.2 Carbon accounting guidelines or methods in urban water sector

指南或方法	发布者	发布时间	方法说明	备注
全生命周期分析(LCA) ^[9]			非专用碳排放核算工具,对于物质流有完整的特征化系数,但对于污水处理直接碳排放仍需手动构建	
IPCC《国家温室气体排放清单指南》(IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)	IPCC	2019 年	国际通用国家层面碳排放核算指南,第5卷提供了污水处理和污泥处理直接碳排放核算	污水/污泥处理处置、化粪池、出水排放,EF _{N₂O} = 0.016 kgN ₂ O-N/kgN
《水务系统运行温室气体排放核算手册 V15》(Workbook for Estimating Operational GHG Emissions-Version 15)	英国,UK Water Industry Research	2021 年	本地化专用城镇水务碳核算指南,包含给水和污水系统建设阶段(隐含碳)、运行阶段的碳排放核算	覆盖污水处理、污泥处理处置(贮存、厌氧消化、热解、焚烧)、臭氧,EF _{N₂O} = 0.002 kgN ₂ O-N/kgN
《污水处理CH ₄ 和N ₂ O排放核算指南》(Carbon Accounting Guidelines for Wastewater Treatment: CH ₄ and N ₂ O)	新西兰,Water New Zealand	2021 年	专用污水处理厂直接碳排放核算指南,本地化程度较低,核算公式引自 IPCC,包含污水处理厂碳排放核算	污水/污泥处理处置、出水排放、人工湿地单元、化粪池,EF _{N₂O} = 0.01 kgN ₂ O-N/kgN
《推动水务碳中和与能量中和的“巴黎模式”碳排放报告指南》(Guidelines for Reporting in Line with Paris Model for a Climate- and Energy-neutral Water Sector)	丹麦,Ministry of Environment of Denmark	2021 年	本地化专用城镇水务碳核算指南,包含给水和污水系统运行阶段的碳排放核算	污水处理、污泥厌氧消化、化粪池,EF _{N₂O} = 0.008 4 kgN ₂ O-N/kgN
《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》 ^[10]	中国城镇供水排水协会	2022 年	本地化专用城镇水务碳核算指南,提供了给水、污水、再生水及雨水系统全生命周期碳排放核算	化粪池、污水管渠、污水/污泥处理处置、出水排放,EF _{N₂O} = 0.010 6 kgN ₂ O-N/kgN

全生命周期分析(LCA)作为环境影响评价的最有力工具,其评价指标全球变暖潜能值(GWP)代表了温室气体排放量^[9]。而且,随着对环境保护系统性概念的认可,借助LCA评价水务企业或设施综合效能已成为一种应用较为普遍的技术手段,尤以对污水处理厂的评价居多。需要说明的是,在采用LCA对水务企业进行碳排放核算时,所需核算的碳排放活动、公式等需要额外手动整理输入。因此,LCA可以说是最早用于水务企业碳排放核算的一个工具而并非具有专用属性。国际上,首部指导水务行业进行碳排放核算的指南当属IPCC发布的《国家温室气体排放清单指南》(以下简称《指南》),最新版本为2019年修订版。其中,《指南》第5卷提供了污水处理和污泥处理处置单元产生、释放 CH_4 和 N_2O 的核算公式。作为国家层面温室气体排放总量核算的指南,为避免核算重复,《指南》只提供了行业直接碳排放量,并未提供行业层面城镇水务系统完整的碳排放核算。但是,《指南》对城镇水务碳排放核算意义重大。一方面,城镇水务除污水系统存在直接碳排放外,其他系统设施绝大部分属于间接排放,核算较为明确,即《指南》实际上提供了城镇水务碳排放核算框架,这也是其他国家制定专用指南的基础,如新西兰水务核算方法;另一方面,《指南》提供了国际通用且目前仍主要使用的污水处理碳排放因子。

随着对碳排放管理可持续引导价值的认同,个别国家城镇水务也开始制定行业碳排放核算指南。如表2所示,英国是最早制定行业核算指南的国家,早在2005年即发布了首版指南文件,现已更新至第15版。2021年,新西兰和丹麦相继发布专用于城镇水务的行业碳排放核算指南。其中,新西兰发布的指南尽管只提供了污水/污泥处理处置因生化过程而产生释放的 CH_4 和 N_2O ,但却涵盖了城镇水务碳排放核算的核心。也就是说,不同国家指南的区别主要在于污水处理过程碳排放核算不同。由表2可知,英国、新西兰、丹麦三个国家的指南对于污泥处理、处置类型以及化粪池核算略有差异,对是否包括污水处理厂出水排入水体的温室气体(GHG)排放也不相同。相对而言,新西兰发布的指南包含的碳排放活动更加全面,而英国明确将出水排放水体排除在外。这似乎给城镇水务碳排放核算造成了更大的差异化,由此引发对制定专用核算指南必要性的

疑问。不同国家城镇水务由于组成、管理、水环境基础的不同,必然造成碳排放核算重点差异,而这种差异的另一个最典型表现就是核算公式中排放因子的特异性。实际上,目前大多数国家对城镇水务进行碳排放核算均参考了IPCC指南,污水处理过程的 N_2O 排放因子通常采用 $0.016 \text{ kgN}_2\text{O-N/kgN}$ 。但是,英国和丹麦所使用的排放因子分别为0.002和 $0.0084 \text{ kgN}_2\text{O-N/kgN}$,均明显小于IPCC值。在两国每年提交的《国家温室气体清单报告》中,也采用了自己的排放因子,相对于采用IPCC值的核算结果,碳排放总量相应降低至1/8和1/2。因此,制定本国城镇水务系统专用碳排放核算指南,无论是国家层面温室气体清单计算还是行业层面核算均十分必要,是碳中和规划的关键工具。

长期以来,我国对城乡建设领域的碳排放管理关注度较小,也从未有指导城镇水务企业碳排放核算的指南或规范。部分关于污水处理厂碳排放核算的工作大多依据IPCC或其他指南文件提供的核算边界和核算公式,这就导致不同工作的核算结果出入较大^[11-12]。为更好地服务我国城乡建设领域双碳目标,中国城镇供水排水协会组织编写了《城镇水务系统碳排放核算与减排路径技术指南》,梳理总结了适用于给水、污水、再生水及雨水设施单元的碳排放核算公式,覆盖城镇水务建设、运行和拆除的全生命周期。对于最为关键的污水处理直接碳排放核算,指南基于国内污水处理厂监测数据整理提供了本地化 N_2O (见表2)和 CH_4 排放因子,而且还提供了已得到国际共识但还未包含进IPCC指南的化石碳排放核算方法^[13]。另外,指南分析讨论了不同系统进行减碳降碳的切入点和路径,以协助我国城镇水务制定碳达峰或碳中和规划方案。

需要强调的是,正如英国水务碳中和指南中所提供的碳中和规划方法及流程,只有在碳排放核算结果数据发挥作用时才能体现碳排放核算指南或工具的价值。因此,在水务部门统一指导规范下,水务企业应积极监测收集相关数据,将碳排放核算纳入日常管理,形成数据收集—结果反馈—政策指导的良性循环。实际上,碳排放核算实践并不会给水务行业带来过多额外负担或工作量,根据中国城镇供水排水协会发布的核算指南,所需数据大部分是日常水质监测数据或收支台账记录。另外,对于核算公式,不应过多关注公式的繁琐或复杂而忽略其准确性,因

为核算过程可依托广泛使用的电子表格即可轻松完成核算和结果汇总分析。英国发布的核算指南从第1版到最新的第15版,依然采用最简单的电子表格来完成核算和报送。中国城镇供水排水协会发布的核算指南也附带提供了电子计算表格,另外北京首创生态环保集团股份有限公司早在2020年就上线了污水处理厂碳核算软件平台。

2.2 碳核算指导意义

英国水务协会基于其水务企业8年碳排放核算结果确定了水务行业未来碳排放趋势线(即,定线),继而据此分析得以确定在2030年实现碳中和规划方案——减碳量及减碳工艺技术组合路径。实际上,碳核算结果的价值和意义远不止如此,其作为量化和评价工具贯穿水务行业整个减碳/降碳进程。首先,碳排放核算方法模块化后得以清晰厘清碳排放构成和属性(直接排放还是间接排放),即,不同碳排放活动贡献比例及来源。其中,贡献比例决定了减碳/降碳的重点,而属性则决定了减碳/降碳的方法。从英国水务历史碳核算数据可知,给水系统电能消耗、污水处理碳排放和污水电能消耗为前三大碳排放活动(不包括化学药剂),分别贡献29%、27%和22%,同时三者也被确定为实现碳中和方案的减排重点。但是,三者属性不同决定了减碳方法的区别。电能消耗属于间接排放活动,而电力部门自身存在减碳/降碳规划,这就是说,即使水务企业维持现在的电耗水平,也可以依赖电力部门减碳实现行业碳减排。为避免出现这种消极减排行为,英国水务针对碳中和规划方案提出了减碳工艺塔式等级图(见图2),即,对于电能消耗减碳,首先应采取技术措施降低电能消耗强度;对于污水处理单元直接碳排放,水务企业必须通过运行控制优化减少 CH_4 和 N_2O 逸散量,但难度较大;所以,规划方案将碳补偿减排措施作为兜底手段。

碳核算结果的另一个作用在于基准化管理并推动水务企业主动碳减排行动。自LCA广泛用于水务设施评价以来,尤其是污水处理评价,将环境影响纳入污水处理设施效能评价的观点得到普遍认可;随着对双碳目标实施及碳排放管理的重视,将碳排放强度评价引入水务企业也逐步获得认可。但是,目前我国仍然处于水环境保护攻坚期,水环境治理具有系统性复杂的特点,因此,在没有碳排放核算数据积累情况下,将水务企业进行碳排放强

度划线评价或考核并不具有可操作性。另外,不同污水处理厂进水水质、处理深度、设施构成等存在较大差异,进行划线评价很难做到公平、公正,虽然可通过分类评价来解决,但如何科学分类仍是问题,且无疑会增加评价的复杂性。实际上,对于实践碳核算和减排较早的英国,也未制定或发布“强制性”碳排放强度考核标准;相反,水务部门采取了软性碳排放评价手段,即,由水务企业自行制定下一年度碳减排目标(减碳百分比),并以自身目标达成度进行统一公开考核。这同样也是澳大利亚维多利亚州所采用的方案。因此,在我国以双碳目标为“强制性”碳减排节点的框架下,采用更加软性而非划线的碳减排评价倒逼水务企业进行减碳降碳实践或许更具可操作性。由英国路线图也可以看出,在英国水务部门要求水务企业每年提交碳排放水平和碳减排目标后,2011年—2019年水务企业总碳排放量下降了约45%(电力部门主动减碳贡献40%,清洁能源贡献35%,节水行动、用电效率提升联合贡献25%)。

另外,碳核算在碳减排背景下也是水务设施规划建设和工艺技术比选的得力工具。如英国水务碳中和规划方法在方案和实施环节的碳核算是明晰不同工艺技术减排潜力的必要步骤。需要说明的是,上述讨论仅限于行业碳中和规划中的作用和意义,若提升至国家温室气体清单层面,碳核算的意义更大。所以,在国务院发布的《2030年前碳达峰行动方案》中明确要求“建立统一规范的碳排放统计核算体系”。总之,碳核算作为量化基础手段,是城镇水务减碳/降碳行动的开端和标尺,依赖于所有水务企业的积极实践,以充实我国水务碳排放数据,继而服务于城乡建设领域的碳达峰与碳中和。

3 减碳/降碳工艺技术支持

由城镇水务碳中和规划流程可知,碳核算是基础,而支撑减碳/降碳路径的技术工艺则是完成碳中和目标的关键。尽管我国水务企业进行碳核算或碳排放管理几乎为零,但科研院所和企业也早已积极探索和实践节能降耗以及污水能源回收,包括传统污泥厌氧消化,以及近来逐渐得到青睐的厂区光伏和潜能巨大的余温热能^[14];虽然这些技术的整体应用还不广泛,但却提供了减碳/降碳可行的支撑技术。然而,对于水务企业碳中和规划来说,并不存

在一种大而全的普适性工艺方案,需结合自身现状,因地制宜、科学合理地选择减碳/降碳工艺技术。

如前所述,碳中和规划方法中对减碳/降碳工艺的技术评估共包含三个维度,即,减排潜力、净现值(NPV)和不确定性。其中,净现值表征投资收益分析,主要反映项目投资获利能力,作为评价维度之一不仅可顾及水务企业负担,还可体现尽量避免成本转移至用户的碳减排原则。在英国水务碳中和指南中,减排潜力和净现值又综合为边际减排成本(每年单位碳减排量投资大小)^[15],结合对其碳减排不确定性分析,可更直观地体现不同工艺技术的应

用潜力。尽管国内存在不同减碳/降碳工艺技术的应用和报道,但关于边际减排成本的数据却很少,这也是水务企业将来进行技术推荐所应注意统计和参照的评价数据。

在英国水务碳中和指南中,塔式等级图(见图2)提供了不同减碳工艺技术选择顺序,但未能考虑不同水务企业的特点和减碳现状。为此,指南又从减碳环节对工艺技术进行了归类(见表3),分为需求控制、技术提升、碳汇捕捉三类,分别对应着一揽子可选择的工艺技术,其边际减排成本如图3所示,其中柱宽度代表年减排量大小。

表3 城镇水务减碳降碳工艺技术

Tab.3 Carbon reduction technologies and strategies in urban water sectors

减碳原理分类	减碳技术分类		
	需求控制(Demand-led)	技术提升(Technology-led)	碳汇捕捉(Removal-led)
	通过减少城镇水务所需处理的水/污染物负荷完成减排	通过技术优化或革新完成减排	通过植树造林碳汇或收集捕捉完成减排
源头减排(Reduction)	用水计量/节约用水;水源地保护;管网漏损;设备升级;运输优化(短距离)	污水处理智慧化控制;污水厂工艺优化或新工艺	污水处理单元覆盖收集并处理GHG
再生能源(Renewable)	提升厂区CHP热电利用率;清洁能源运输工具	风力发电/光伏发电(厂区或购买);高效厌氧消化技术;沼气提纯并网	
耗碳补偿(Offset)			植树造林

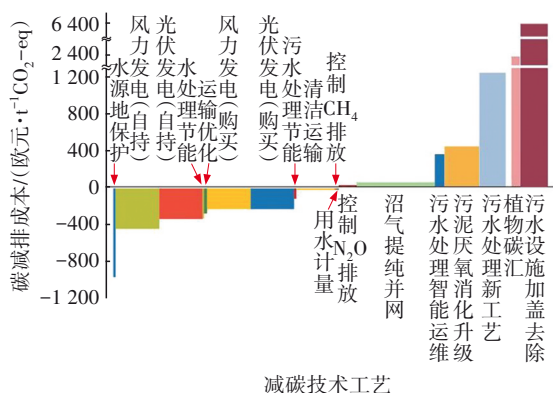


图3 城镇水务减碳工艺技术边际减排成本

Fig.3 Marginal abatement cost of carbon reduction technologies in urban water sectors

从需求控制技术来看,水源地保护、科学运行管理实现节能或对运输进行优化(缩短耗材距离和使用)等的边际减排成本均为负值,具有投资吸引力,但减排潜力相对而言非常有限,只有使用清洁能源运输工具一项减排潜力稍高。除此之外,强制用水计量和管网漏损控制^[16]也是典型的基于需求控制的减碳路径,通过减少城镇居民用水量以降低水厂

工作负荷,从而实现碳减排。然而,两种减碳方案均具有较大的不确定性。尽管强制用水计量所需设备等无需水务企业投资,但这也决定了该措施并不完全受控于水务企业。而对于漏损控制,基础投资额较大,却不一定会取得良好的漏损控制效果以及减碳效果。因此,尽管管网漏损控制意义重大,但仅从碳减排角度来看,该措施被认为是一种非常昂贵的减排技术。

技术升级方案中包含的工艺技术种类最多,均围绕如何减少污水处理CH₄和N₂O排放以及充分利用清洁能源两方面展开。污水收集处理过程,因微生物生化反应而导致CH₄和N₂O排放,且两者温室效应极高(分别为CO₂的28倍和265倍),所以,污水处理过程直接碳排放是温室气体的重要来源之一。从减碳角度来看,优化工艺过程控制(如控制曝气强度、有效补充碳源)或通过工艺升级来避免形成CH₄和N₂O气体的环境是最佳控制手段^[17]。一般来说,过程优化不涉及太大投资。

从图3可知,尽管CH₄控制减排潜力不大,但

N₂O控制对减排却有着明显贡献。而对于新工艺升级改造来说,尽管存在减排潜力,但投资相对巨大。对于清洁能源开发,最典型的当属污泥厌氧消化,对应的主要减碳工艺措施包括推广升级厌氧消化工艺、提高产气效率,以及沼气提纯并输入市政气网^[18]。由图3可知,两项措施组合减排潜力最为明显,但边际减排成本已转正,这归因于厌氧消化设施以及沼气提纯设施的基础投资大,回报期长,不具有投资吸引力。除非政府部门提供客观资金支持,否则该措施实施较为困难,在国内尤其如此。与之相对,风能和光伏发电则更具有吸引力,无论是在厂区自行利用还是绿电购买,边际减排成本均为负值。近年来,我国污水厂内光伏安装发电逐渐受到追捧,从已报道的二十多家应用案例来看,光伏发电碳减排率为2%~28%^[7],平均投资回报率<3.5%。实际上,污水余热热能回收应用潜力更加巨大,尽管英国路线图并没有提供相关数据,从Hao等^[14]的研究结果及水源热泵技术的成熟度来说,其边际减排成本具有较大优势,当然这也与余热的终端利用场景有关。

对于以温室气体去除为主的减碳措施,无论是污水设施加盖固定去除还是通过植树造林完成碳捕捉,其投资巨大,与取得的减排能力并不匹配,所以在塔式等级图中列为最后诉诸方案。

4 结语

《城乡建设领域碳达峰实施方案》的发布无疑将推动城镇水务行业碳减排进入快车道,但也面临着窗口期短、减排压力大的挑战和紧迫性。同时,污水作为资源与能源的载体,水务企业进行减碳降碳具有天然优势,而双碳目标不过是为水务企业节能减排、能源回收提供了具有明确时间节点框架。因此,水务企业应积极布局、科学制定适合自身发展的碳中和规划,将减碳/降碳压力转化为动力。

从水务行业碳中和规划流程分析可知,碳核算和减碳工艺技术是碳中和规划的基础和关键。其中,中国城镇供水排水协会已正式出版《城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南》;水务企业可采取的减碳工艺类型,尤其是节能降耗、能源回收有效途径在《指南》中也已厘清。目前,最重要的是水务企业积极实践、核算并积累数据,形成“排放

核算—数据反馈—技术评估—应用实施—减排反馈”的良性循环。

参考文献:

- [1] JOHNSON J, ZAKARIA F, NKURUNZIZA A G, *et al.* Whole-system analysis reveals high greenhouse-gas emissions from citywide sanitation in Kampala Uganda [J]. *Communications Earth & Environment*, 2020, 3: 80.
- [2] SMITH K, LIU S, CHANG T. Contribution of urban water supply to greenhouse gas emission in China [J]. *Research and Analysis*, 2015, 20(4): 792–802.
- [3] 郝晓地, 杨文字, 林甲. 不可小觑的化粪池甲烷碳排放量[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10): 28–33.
HAO Xiaodi, YANG Wenyu, LIN Jia. Non negligible carbon emission with methane from septic tanks [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(10): 28–33 (in Chinese).
- [4] 郝晓地, 李季, 吴远远, 等. 蓝色水工厂: 框架与技术[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(4): 1–11.
HAO Xiaodi, LI Ji, WU Yuanyuan, *et al.* Blue water factories (BWFs): framework and technologies [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(4): 1–11 (in Chinese).
- [5] CAO Y, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. The bottlenecks and causes, and potential solutions for municipal sewage treatment in China [J]. *Water Practice & Technology*, 2020, 15(1): 160–169.
- [6] 郝晓地, 涂明, 蔡正清, 等. 污水处理低碳运行策略与技术导向[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(24): 1–6.
HAO Xiaodi, TU Ming, CAI Zhengqing, *et al.* Strategies and technical orientation for low carbon operation in wastewater treatment plants [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(24): 1–6 (in Chinese).
- [7] 郝晓地, 黄鑫, 刘高杰, 等. 污水处理“碳中和”运行能耗赤字来源及潜能测算[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(20): 1–6.
HAO Xiaodi, HUANG Xin, LIU Gaojie, *et al.* Energy deficits and their potential replenishments of wastewater treatment operation towards carbon neutral [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(20): 1–6 (in Chinese).
- [8] DE HAAS D, ANDREWS J. Nitrous oxide emissions from wastewater treatment—revisiting the IPCC 2019 refinement guidelines [J]. *Environmental Challenges*, 2022, 8: 100557.
- [9] HAO X D, WANG X Y, LIU R B, *et al.* Environmental

- impacts of resource recovery from wastewater treatment plants[J]. *Water Research*, 2019, 160: 268–277.
- [10] 中国城镇供水排水协会. 城镇水务系统碳核算与减排路径技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- China Urban Water Association. Guidelines for Carbon Accounting and Emission Reduction in the Urban Water Sector [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022(in Chinese).
- [11] HUA H, JIANG S Y, YUAN Z W, *et al.* Advancing greenhouse gas emission factors for municipal wastewater treatment plants in China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 295: 118648.
- [12] WANG D, YE W L, WU G X, *et al.* Greenhouse gas emissions from municipal wastewater treatment facilities in China from 2006 to 2019[J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 317.
- [13] 郝晓地, 王向阳, 曹达启, 等. 污水有机物中化石碳排放 CO₂ 辨析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(2): 13–17.
- HAO Xiaodi, WANG Xiangyang, CAO Daqi, *et al.* Analysis of CO₂ emission from fossil carbon in organics from wastewater[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(2): 13–17(in Chinese).
- [14] HAO X D, LI J, VAN LOODRECHT M C M, *et al.* Energy recovery from wastewater: heat over organics [J]. *Water Research*, 2019, 161: 74–77.
- [15] SALA-GARRIDO R, MOCHOLI-ARCE M, MOLINOS-SENANTE M, *et al.* Marginal abatement cost of carbon dioxide emissions in the provision of urban drinking water [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2021, 25: 439–449.
- [16] XU Q, LIU R P, CHEN Q W, *et al.* Review on water leakage control in distribution networks and the associated environmental benefits [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(5): 955–961.
- [17] DUAN H, VAN DEN AKKER B, THWAITES B J, *et al.* Mitigating nitrous oxide emissions at a full-scale wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2020, 185: 116196.
- [18] NGUYEN L N, KUMAR J, VU M T, *et al.* Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: a critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 765: 142753.
- 作者简介: 郝晓地(1960—), 男, 山西柳林人, 博士, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术。现为国际水协期刊 *Water Research* 区域主编(Editor)。
- E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn
- 收稿日期: 2022-08-28
- 修回日期: 2022-09-15

(编辑: 丁彩娟)

大力推进水利薄弱环节建设,
提高防灾减灾能力