

述评与讨论

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 10. 007

丹麦水务标杆管理的碳减排机制与启示

刘然彬¹, 吕茂坤¹, 马彦¹, 郝晓地¹, 李爽²

(1. 北京建筑大学 中-荷未来污水处理技术研发中心 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: 城镇水务行业碳减排已成为共识,但依然面临协同减污降碳的压力,且尚未建立有效的管理机制以激发主动碳减排的内在动力。丹麦水务行业因其高效管理和低碳转型,是世界公认的水务标杆。这归因于其实施的标杆管理体系,包含经济标杆管理、性能标杆管理以及自愿标杆管理机制。该体系快速推动丹麦水务行业实现40%~50%的碳减排,近1/2大型污水处理厂实现能量中和。该标杆管理体系通过绩效指标将碳排放活动进行细化,并进行先进值(即标杆)识别、与标杆公司的差距量化,继而推动运行效率的提升及碳排放量的持续下降。该管理体系与我国城镇水务系统所要求的协同减污降碳高度契合,通过梳理其内容及减碳降碳原理,可借鉴其经验推动我国水务行业稳步实现低碳转型。

关键词: 水务行业; 标杆管理; 能源中和; 碳中和; 数据包络分析; 丹麦经验

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0046-09

Carbon Reduction Mechanism and Insights from Benchmarking Management in Danish Water Sector

LIU Ranbin¹, LÜ Maokun¹, MA Yan¹, HAO Xiaodi¹, LI Shuang²

(1. Sino-Dutch R&D Center for Future Wastewater Treatment Technologies, 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: In China, carbon reduction in the urban water sector has become a widely recognized goal. However, challenges remain, including the pressure to achieve synergistic pollution and carbon reduction, and the lack of an effective management mechanism to stimulate intrinsic motivation for proactive carbon reduction. Danish water sector, known globally as a benchmark for water management, is recognized for its efficient management and low-carbon transformation. This success is attributed to its implementation of a benchmark management system comprising economic benchmarking, performance benchmarking, and voluntary benchmarking protocols. This system has accelerated Danish water sector to

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3804700); 国家自然科学基金项目(52170018); 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

achieve a 40%–50% reduction in carbon emissions, with nearly half of its large-scale wastewater treatment plants achieving energy neutrality. The benchmarking system refines carbon emission activities through performance indicators, identifies advanced benchmarks, quantifies the gaps with leading companies, and subsequently drives operational efficiency improvements and continuous carbon emission reductions. This approach aligns closely with the requirements of synergistic pollution and carbon reduction in China's urban water sector. By analyzing its structure and carbon reduction principles, this system offers valuable insights for facilitating a steady low-carbon transition in China's water sector.

Keywords: water sector; benchmarking management; energy neutrality; carbon neutrality; data envelopment analysis; Danish practices

随着《关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见》的发布^[1],城镇水务尤其是排水设施,减碳降碳成为社会减排推进的重要行业领域。由于污水具有资源能源特性,因此水务行业具备减碳降碳的天然优势。例如,丹麦部分污水处理厂基于此已实现能源中和或80%的碳减排^[2];而英国也在2020年发布了碳中和规划路线图,计划于2030年实现水务行业净零碳排放,是较早确定碳中和目标的行业^[3]。相比之下,我国城镇水务行业的减碳降碳进程明显落后,低碳化转型的自主动力略显不足。一方面,我国城镇水务发展不平衡,尤其是城镇污水收集率仅为70%^[4],供排水设施仍需持续增量扩容,这给水务行业碳排放基线的确定、减碳降碳的规划实施带来了压力和挑战;另一方面,我国城镇水务碳排放管理尚不成熟,仍未形成推动主动减碳降碳的管理机制^[5]。在此方面,这些先行国家水务行业的低碳转型经验或许可为我国城镇水务提供借鉴。

丹麦水务经过长期的探索 and 改革,在低碳转型方面取得显著成效。由于水务行业的“垄断”属性,过去很长一段时间,丹麦水务公司因缺乏竞争环境而运营效率低下。随着2009年标杆管理机制的引入实施^[6]以及2018年性能标杆管理机制的实施^[7],丹麦水务形成了一套标杆管理体系,极大推动了水务企业的低碳化转型进程。2020年丹麦水务的污水处理能耗强度相比于2010年下降25%,近1/2的大型污水处理厂实现能量中和^[2]。更重要的是,标杆管理体系同时很好地推动了供排水设施的发展以及运营效率的提升,使其成为全球水务运营管理的标杆。从该角度看,这套标杆管理体系似乎与我国城镇水务所要求的减污降碳协同非常契合。为

此,本文将介绍丹麦水务行业的标杆管理体系,总结梳理其工作模式和推动减碳降碳的原理,并分析探讨用于我国水务行业协同减污降碳的价值和意义。

1 丹麦水务标杆管理机制

1.1 标杆管理的发展

标杆管理又称为基准化分析,是将自己企业的表现指标与业界最佳指标作比较,识别自身存在的不足或提升潜力,并根据结果进行调整优化和改进^[8]。标杆管理是一种“对标”的概念,具有比较和竞争的属性,以同期行业里公认的领跑者为参照,可识别企业自身的差距并给企业以持续提升的压力。同时,标杆管理也是一种合作和借鉴模式,标杆企业是当前技术水平下的最佳,确保了企业持续提升目标的可实现性,避免给企业带来过大的压力和挑战。由此可知,标杆管理的核心内容包括关键绩效指标(KPIs)的确定、标杆的识别、指标差距的量化。英国、美国和荷兰等均是较早将标杆管理机制引入水务行业的国家^[9–11],其初衷是维护居民用水安全及支付能力,同时促进水务企业运行效率的不断提升。19世纪中期,荷兰供水行业协会推出标杆管理机制,水务公司可自愿参与,每3年进行一次标杆评价^[12]。该机制推动了供水行业的信息透明化和经济效益的提升,2008年后,随着该机制的不断成熟和优势显现,目前荷兰全部供水公司均已被强制要求实行标杆管理机制。另外,标杆管理在荷兰排水处理公司的推动也较早,相比于实施标杆管理前效率整体提升35%^[13]。1989年,英格兰和威尔士的供水与污水处理实现私有化,之后也开始实施水价管控及标杆管理,从实施效果来看,供水和污水公司的效率得到了极大提高,相应地,用户水费也

明显降低。

目前,丹麦城镇水务年供水量约为3.1亿 m^3 ,供水管道约6万km,实现了100%的供水覆盖率^[2]。地下约8.5万km的污水管线将污水输送至701座污水处理厂进行净化处理,实现年污水收集处理量6.83亿 m^3 ^[2]。由此可知,丹麦水务行业的供排水量总规模并不大。然而,丹麦的供水水源主要为地下水,其给水净化厂规模小而分散,共有2600余座,这给政府对水务公司的监管带来了困难^[14]。另外,丹麦水务公司在很长一段时间均是市营单位(municipally-owned entities),行业内部缺少竞争环境及必要的持续优化改进动力,导致运行效率较低、运行成本虚高。为此,丹麦水务在过去较长一段时间里一直在探索革新水务管理机制,尤其是在水务行业引入竞争环境,借助市场力量推动水务运营效率的持续提升,这也是丹麦水务实行标杆管理机制的初衷和动力。

丹麦水务标杆管理的时间进程如图1所示。

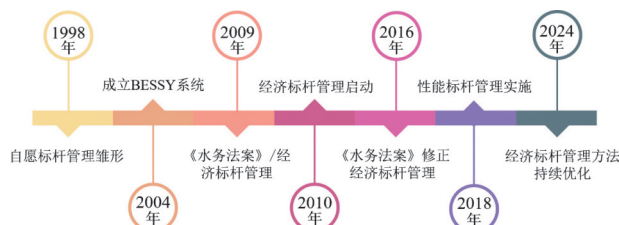


图1 丹麦水务标杆管理的时间进程

Fig.1 Timeline of benchmarking development in water sector of Denmark

20世纪末,丹麦国内电力、能源等基础设施行业逐步进行私有化改革,并引进标杆管理机制以推动效率提升。在此影响下,丹麦供水与排水协会(DANVA)借鉴其他国家经验,计划借助标杆管理机制的优势推动水务公司的效率持续提升^[15]。因此,1998年DANVA组织8家会员水务公司联合发起了标杆管理机制,也就是自愿标杆管理机制的雏形。最初,该标杆管理机制包含的关键绩效指标清单较少,主要包括运行费用、供水管网漏损、污水处理出水水质等关键指标^[2]。也正因如此,该机制数据的填报可以通过电子表格来完成。随着该机制的不断实践和完善,加入的水务公司也越来越多,关键绩效指标清单也逐步扩展,如供水水质、能耗、污泥处置等指标均被纳入其中。继而,DANVA在2004年推出数据填报、标杆分析与结果分享平

台——基准制定与节能系统(BESSY)^[16],推动标杆管理机制的电子化与网络化,不仅提升了该机制运行的方便性与流畅度,也增强了数据和结果的透明性。

丹麦水务标杆管理机制类型如表1所示。DANVA主导的标杆管理机制对所有水务公司开放,水务公司可自愿加入,因此被称为自愿标杆管理机制,并一直沿用至今。截至目前,共有76家供水公司和91家污水公司加入该标杆管理机制体系,参与公司分别承担了丹麦60%供水和80%的排水服务^[2]。但是,该标杆机制并不具有强制性,仍寄希望于水务公司的主动。

表1 丹麦水务标杆管理机制类型

Tab.1 Benchmarking types in the Danish water sector

标杆机制	经济标杆管理	性能标杆管理	自愿标杆管理
主管部门	竞争与消费者权威组织(DCCA)	环保局(EPA)	DANVA
启动年份	2010	2018	2004
是否强制	是	是	自愿
加入条件	规模 ≥ 20 万 m^3/a	规模 ≥ 20 万 m^3/a	向全部水务公司开放(缴费)
当前规模	334家水务公司, 78%的水量	226家饮用水公司和109家污水处理公司	60%的供水量和80%的污水处理量

为了强制推动水务公司的效率提升,2009年丹麦对水务行业进行改革,通过了《水务法案》^[6],其中一项内容是对水务公司进行私有化改革,将水务公司分为市营与私营两种类型。目前,市营水务公司承担了丹麦70%的供水以及全国98%的污水处理。该项法案的另一项亮点则是对水务公司运营成本进行监管和标杆管理,引导水务公司逐步降低运营成本,即经济标杆管理机制。如表1所示,该标杆管理覆盖处理规模超过20万 m^3/a 的所有水务公司,并具有强制性。2010年,该机制在水务行业正式实施,由DCCA负责组织统筹^[17]。该标杆管理最大的优势是将“竞争”引入水务行业内部,并通过公司间的对比强制推动运营成本较高的水务公司提高效率、降低成本。自此,丹麦水务的效率提升进入快车道,其中最突出的表现是低碳化转型。2016年《水务法案》进一步修正,将投资费用纳入标杆管理,以确保公用事业公司进行有效和长期的投

资^[18],如在技术迭代和基础设施更新方面。2018年,主管机构发布报告称,经济标杆管理机制由于绩效指标是成本,可能出现为了降本而降效的不利后果,亟待提出弥补方案^[17]。

实际上,丹麦水务主管部门早已开始酝酿在经济标杆管理之外,实施一项强制性的性能标杆管理,以弥补经济标杆管理的不足。2015年,丹麦政府通过一项新的决议,计划对水务公司的运营服务质量、环境影响、能耗等性能绩效指标展开评价^[19]。2018年,丹麦开始实施性能标杆管理,由EPA负责。性能标杆管理作为强制性标杆管理机制^[7],能够弥补单独经济标杆管理可能导致的对性能指标的反噬。至此,丹麦水务行业形成了由经济标杆、性能标杆和自愿标杆构成的管理机制。其中,前两者具有强制性,但并不覆盖小规模水务公司(规模<20万m³/a)。而DANVA主导的自愿标杆管理实施最早,兼具经济标杆和性能标杆内容,但不具有强制性。由于其采用自愿加入的原则,可覆盖更广泛的水务公司,是经济标杆和性能标杆的有效补充。同时,为保证不同标杆管理的统一,3个标杆管理机制共享基础数据,水务公司将数据信息提交至DANVA的BESSY平台,经过初步整理和筛选后,供给其他两个主管部门使用。该数据的填报均基于诚实互信,并无额外核查或监管措施。

1.2 经济标杆管理

经济标杆管理的实施是丹麦水务效率快速提升、广泛低碳化的开始,其机制符合标杆管理的一般原理,但也有其自身的特点。其工作内容与原理如图2所示,绩效指标、标杆识别、效率要求、收入上限、奖惩办法构成了该机制的基本要素和内容^[20]。绩效指标主要指各参与水务公司提供等额供排水服务的成本投入,是经济标杆管理机制的唯一目标参数。其中,成本投入包括水务公司的运行成本与投资成本,各公司每年均需向主管部门提供该数据。标杆识别则是确定上述绩效指标最低的公司为标杆,即考虑各水务公司的客观因素差异并修正至可比较后成本投入最小的水务公司。各公司与标杆的差距即是该公司对应的效率要求,也就是为使自身的成本降至标杆公司水平所需要提高的效率。促使水务公司采取切实行动以降低成本的关键则是收入上限,即水务公司每年的收入(水费)总额均会在前一年的基础上参考效率要求被下调。

如前所述,丹麦水务公司一般为收支相抵,无多余利润^[21],收入降低后,只能通过提高效率、降低成本投入来实现收支平衡。其中,收入上限的首次设定是基于2013年—2015年水务公司的实际成本,之后按照标杆管理逐渐降低成本、向标杆公司效率水平靠拢。除此之外,经济标杆管理机制仍设计有惩罚机制,如果水务公司在评价期内未完成效率要求,则面临进一步降低收入上限的惩罚。

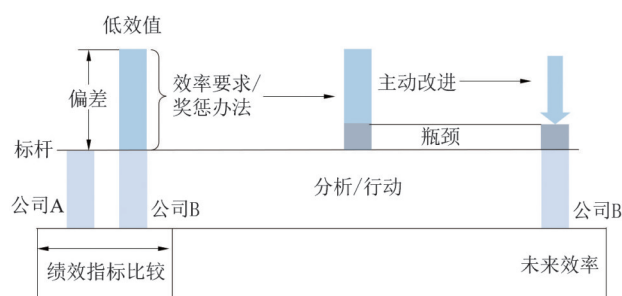


图2 标杆管理机制工作原理

Fig.2 Working mechanism of benchmarking protocol

由图2可知,标杆识别是确定每个公司效率要求的依据,准确识别则是整个经济标杆管理公信力的基石。然而,由于各公司之间客观存在一些差异,如何实现科学公平的比较一直是标杆管理的挑战。丹麦水务的经济标杆管理依然采用修正法对绩效指标(成本)进行“平差处理”,以消除客观差异^[20]。对于供水公司,修正的因素包括规模、处理工艺深度、加压泵站数量、管网密度、服务人口、设施老化程度;对于排水公司,则主要对管网类型、提升泵站、汇水面积、污水处理厂规模、污泥处理处置、服务人口、设施老化程度进行修正。在标杆识别的具体方法上,丹麦经济标杆管理采用数据包络分析(DEA)模型来进行^[20]。DEA模型是直接使用输入、输出数据建立非参数的经济数学模型,具体原理不再赘述。实际上,DEA模型对运行效率最佳公司的识别并不是某一个公司,而是一组。也就是说,DEA模型可充分突出不同公司的优势和专长(如部分公司运营成本较低,而部分公司的基础投资则较低),从而构建一个前沿效率面,即代表了标杆值。当然,DEA模型的公平性一直有争议,因此,DCCA并未停止对标杆识别方法的优化。例如,2025年的标杆识别方法由DEA模型优化为DEA-Order M模型^[22],即,最佳公司不再是前沿面,而是前沿面一定范围内的平均值,结果更加透明。经济

标杆管理通过以上两种方式和设计保证了标杆识别的准确与公平。

在经济标杆管理中,效率要求决定了水务公司的优化潜力与提升空间,效率要求过高则可能给水务公司运营带来压力,而效率要求过低则会弱化标杆管理的价值。为此,经济标杆管理将效率要求区分为一般效率要求与个别效率要求^[17]。前者针对所有参与的水务公司,而后者则主要是针对大型水务公司(规模>80万m³/a)制定的额外效率要求。一般效率要求综合考虑技术进步、生产力的提升来设定,并不通过标杆识别确定,而上述DEA标杆识别主要得到个别效率要求。这更好地保障了小型水务公司健康持续优化改进,而且对于小型水务公司的效率要求提升周期一般为4年,可进一步减轻小型水务公司的压力。由于大型水务公司有个别效率的要求,为避免叠加带来的多重压力,经济标杆管理机制规定个别效率要求不超过16%(即,收入上限的下调量不超过前一年的16%)^[23],而且个别效率要求分8年完成,也就是说每年的个别效率要求不超过2%^[23],有效保障了科学有序、持续合理的效率提升。另外,对于大型水务公司的标杆管理,供水和排水公司均每两年进行一次,奇偶数年交替进行^[23]。

1.3 性能标杆管理

性能标杆管理与经济标杆管理相互关联、互为补充,符合一般标杆管理的工作原理,但在绩效指标、标杆识别、奖惩措施等方面也有其自身的特点^[7]。对于水务公司的运营性能,评价内容多样且复杂,既包含定量评价内容也包含一系列定性评价内容。例如,欧洲标杆合作基金会的标杆管理体系共包含6类供水绩效指标,覆盖供水可得性、水质、供水可靠性、服务质量、可持续性及财务与效率,细分的指标数量则多达上百个^[24]。一般来说,绩效指标覆盖运营环节越全面,评价越准确,但过于复杂的指标体系不仅增加数据收集的工作量、标杆管理的复杂度,也不利于标杆管理的解读和传播。基于此,同时考虑评价结果的透明度,丹麦水务尽可能简化其性能标杆管理涉及的绩效指标。丹麦2023年的性能标杆管理绩效指标与先进值见表2。

如表2所示,丹麦水务性能标杆管理的绩效指标共包含5大类,分别为健康、供应安全、能源、气候与环境^[7],每一类又细分多个二级指标。对于供水

公司的评价,健康指供水水质,主要为微生物学指标超标次数。而供应安全的二级指标主要为管道破裂次数及用户平均断水时间。能源与气候则分别指水务公司的总能耗与净能耗,其中总能耗指水务公司运营的总能耗,包括外源及自产自消的电能、热能,而净能耗则是总能耗减去自产能量(自用或外输)的差,以更好地表征对气候的影响。供水公司的环境绩效指标主要是管网漏损率或漏损强度。

表2 性能标杆管理绩效指标与先进值(2023年)

Tab.2 Performance indicators and advanced values for performance benchmarking in 2023

绩效指标	供水公司		排水公司	
	指标	先进值	指标	先进值
健康	微生物污染次数/(次/百万m ³)	0.31	合流制管网溢流量/[m ³ /(hm ² ·a)]	1 185
	水质检测达标率/%	99.4		
供应安全	断水时长/(min/户)	20	管网故障频次/(次/10 km)	0.5
能源	总能耗/(kW·h/m ³)	0.54	管网平均能耗/(kW·h/m ³)	0.58
			处理平均能耗/(kW·h/m ³)	1.46
气候	净能耗/(kW·h/m ³)	0.52	管网净能耗/(kW·h/m ³)	0.58
			处理净能耗/(kW·h/m ³)	0.92
环境	管网漏损率/%	6.46	出厂水氮、磷浓度/(mg/L)	氮:4.43; 磷:0.44
			出厂水氮、磷总量	NA

注: NA为当年无数据。

由表2还可知,排水公司的各项二级指标均是日常运行的常规数据指标。例如,健康在排水公司的标杆管理中主要指合流制污水管网的溢流量。类似于供水公司,供应安全则主要对污水收集管网的故障次数进行评价,任何导致污水收集不畅并存在用户接触污水风险的故障均会计入。能源与气候绩效指标体系与供水公司类似。排水公司环境指标主要用于评价污水处理厂的出水有机物、氮及磷的浓度,即对受纳水体的环境影响大小。考虑到不同公司间的客观差异(如规模等),对上述绩效指标进行归一化处理,以保证标杆识别的代表性、对标的公平性。其中,涉及管网的指标均归一化至每10 km故障次数,而其他指标均通过单位处理水量进行归一化处理(见表2)。丹麦DANVA主管的自

愿标杆管理与性能标杆管理类似,但所包含的绩效指标更加广泛和全面,包括员工病假、水损失、配水管网爆裂、能源消耗、投资计划和预算、地下水保护,以及污水处理厂出水排放对水生环境的影响等^[25]。作为协会主管的标杆管理机制,自愿标杆管理所包含的绩效指标类型更加灵活且一直处于动态更新中,以更好地适应水务公司可持续和低碳发展要求^[2]。

性能标杆管理不同于经济标杆管理的另一方面体现在标杆的识别方法,即先进值的确定。由于绩效指标较多且表征意义均不相同,性能标杆管理通过取均值作为标杆参考值,同时分析公开绩效指标的最小值与最大值,以使各公司更加明晰与标杆公司的差距。性能标杆管理每年进行一次,也就是说,每年都会发布各绩效指标的先进值,连同各公司的相关绩效指标数据公布在丹麦EPA网站^[7],供各水务公司参考并开展性能优化与提高。同时,均值作为标杆值,还意味着性能标杆管理并不具备推动性能提升的强制力,这是其与经济标杆管理的又一不同之处,也是性能标杆管理绩效指标只是进行初步归一化、未进行复杂修正的原因。性能标杆管理推动性能提升的机制更类似于“桥梁”或“镜子”,将不同水务公司连接起来,使其对自身的性能效率有更清晰的定位,继而识别自身存在的不足,而优化提升则依赖于积极主动。

性能标杆管理的工作机制看似会削弱其价值,但事实并非如此。从性能标杆及自愿标杆管理每年发布的结果(Water in Figure 报告^[21])看,水务公司的运营性能明显提升。对于供水公司,水质微生物污染的发生频率明显下降,由2017年的0.47次/ m^3 降至2023年的0.31次/ m^3 ^[2]。此外,其他绩效指标变化并不明显。对于排水公司,每一项绩效指标性能均有明显提升。例如,合流制污水管道的溢流量由2017年的1 607 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 降至1 185 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[2],污水管道的故障率下降23%。更为典型的是,污水处理平均能耗由1.52 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至1.46 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;最高能耗则由10.1 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 降至3.52 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[2],污水处理厂的出水污染物浓度和总量也明显降低。也就是说,性能标杆管理有效推动了排水公司整体性能的提升,尤其是低性能公司的优化改善更加明显。实际上,性能标杆管理对水务公司的推动力来自与经济标杆管理的内在联系。性能标杆管理与

经济标杆管理作为丹麦《水务法案》中管理体系的重要内容,两者是有机的统一体。经济标杆管理体系运行与投资成本支出的有效性,而有效性则主要与公司的运营水平(性能)息息相关。为实现效率要求、缩小与标杆公司的差距,优化和改善的切入点则依赖于性能标杆管理识别出的低性能领域。也就是说,性能标杆管理为经济标杆管理的实施提供细分抓手,而经济标杆管理机制具有的优化提升强制力则同步赋能于性能标杆管理。

2 标杆管理与碳减排

由标杆管理的原理梳理可知,经济标杆管理与性能标杆管理包含的绩效指标中并未明确提及碳排放,但在推动丹麦水务的减碳降碳过程中发挥了重要作用。从丹麦水务的减碳降碳进程来看,丹麦推动和规划节能减排可追溯至20世纪90年代,当时水务企业已开始通过改善污水处理运行效率及更换设备等方式,提升能源利用效率、降低能耗,助力减碳降碳。21世纪初,减碳重点转移到可再生能源的回收和利用,包括风能、太阳能的利用,以及污水中能源的回收(污泥厌氧消化)。尽管这一阶段已有DANVA的自愿标杆管理机制,但由于不具强制性,丹麦水务的碳减排进展较为缓慢。以丹麦排水公司为例,2009年前后的平均能耗强度约为1.50 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ (包括收集与处理能耗),只有25家公司建设了电能回收设施,且未有实现能量中和的污水处理厂^[2]。而在水务改革后,即经济标杆管理体系被引入和实施后,不断有水务公司尤其是污水处理厂实现能量中和甚至能量盈余,如Marselisborg污水处理厂^[26]与Ejby Mølle污水处理厂^[27]。前者在2014年左右通过开源节流(工艺优化以及厌氧消化-CHP)已接近能源自给自足,目前产生的电能是消耗量的1.5倍;而后者同样在2013年前后实现了能量中和,而到2018年则实现了高达188%的能源回收率^[26-27]。也就是说,强制性标杆管理机制的引入和施行极大推动了水务公司节能降碳技术的推广,保障了行动的成效。到2023年,丹麦排水公司的平均能耗强度降至1.37 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[2],此时54家公司建有产电设施并反哺电耗需求,包括实现能量中和的9家公司,污水处理厂的净能耗强度则降至0.38 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[2]。与1990年相比,丹麦水务总碳排放量减少40%~50%^[28]。

丹麦水务标杆管理体系有效推动减碳降碳的机制如图3所示。

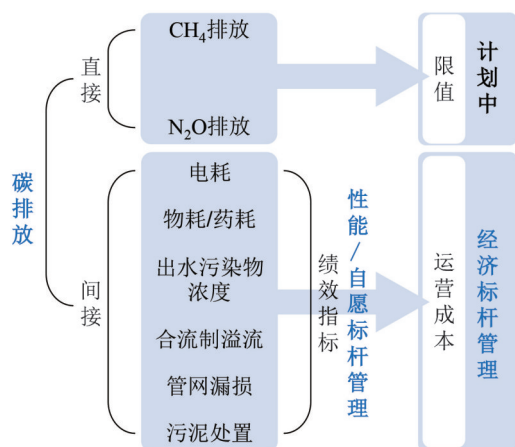


图3 碳减排与标杆管理体系的耦合关系原理

Fig.3 Schematic diagram of the synergy between carbon emission reductions and benchmarking system

水务碳减排可细化为降低间接排放与减少直接排放两个方面。其中,间接排放活动所包含的电耗、物耗、污泥处置等均为性能标杆管理所覆盖的绩效指标^[7]。如表2所示,性能标杆管理中的能源与气候指标体现公司的电耗水平,即,性能标杆管理对各个绩效指标的先进性评价也是对间接碳排放的量化和评价。而且,性能标杆管理中更细化的分类与对比可以更科学、透明地识别碳排放的主要驱动因素,从而保证精准的碳减排。

从经济标杆管理与性能标杆管理的关系可知,经济标杆管理的效率要求即是性能标杆管理的各项绩效指标提升要求,即碳排放活动的优化。继而,经济标杆管理的强制属性保证了碳减排的持续性,因此,碳减排与标杆管理体系的本质是统一的,标杆管理体系作为工具将碳减排任务分解细化,效率提升必然伴随碳排放量的降低。例如,为减少运行投入成本,优化能耗、物耗往往是水务公司的首选,包括对泵等设备的更新改造、充分开发再生能源回收以减少外部电力的输入。另外,经济标杆机制提出的效率要求也极大推动了水务公司的创新及应用低碳、高效技术的前瞻性。由此可知,经济标杆管理虽然未直接提及运行技术,但对水务公司减碳降碳的推动更加系统。

标杆管理体系也涉及水务直接碳排放活动,如性能标杆管理与自愿标杆管理所含的污泥处置、管网溢流污染、污水处理厂出水排入接纳水体污染物

等绩效指标^[2,7]。实际上,丹麦水务主管部门早已关注到水务行业的直接碳排放问题。2020年丹麦政府调整了国家应对气候变化的政策,各行业均发布新的行动计划或方案。在废物绿色管理和循环经济领域,丹麦政府发布了《绿色废弃物行业与循环经济气候计划协议》(Agreement on Climate Plan for a Green Waste Sector and Circular Economy)^[29],其中一项内容是在2025年前引入针对污水处理厂N₂O排放的限值,作为标杆管理体系的补充和完善。该计划将对规模为3万人口当量及以上的污水处理厂进行约束,其处理规模约占丹麦总处理污水量的65%,预计将实现75%的N₂O减排量。目前,该计划仍在研究论证阶段,尤其是针对N₂O设定限值的科学合理性仍需足够的数据支撑,但确定的是,丹麦水务很快就会实施“碳标”(N₂O)考核。另外,该协议还专门提及重视标杆管理模式并及时更新以强化资源能源回收,以适应新时期水务碳减排要求。这再次体现了标杆管理在丹麦水务减碳降碳和提质增效方面的重要角色和作用。

3 结语

水务行业认为减碳降碳过于复杂无从下手,实际上,碳减排最大的价值与优势在于为水务行业提供了优化“多合一”的抓手,碳排放管理综合了水质、能耗、技术先进性与污泥处置等多项评价内容。反之,水务行业只要在这些具体指标内容上进行优化提升,就是碳减排的具体行动。为了协助水务行业识别碳排放驱动因素,推动持续碳减排,丹麦水务的标杆管理体系为我国提供了启示。首先,建立系统化的数据采集机制,为性能提升、运营优化提供科学依据。在此方面,北京首创生态环保集团股份有限公司开发的UCarbon[®]就是一次很好的尝试。其次,构建我国城镇水务行业标杆管理机制,通过关键绩效指标对比,如能耗、漏损率等对标,水务企业可精确找到改进空间,继而服务于减碳降碳目标。同时,标杆管理机制所具有的“阶段性”与“持续性”属性,可以很好地平衡发展与碳减排的关系,实现减污降碳协同。实际上,水务行业每年均会产生大量水务运营数据,具有较好的数据基础。在此基础上,通过引入标杆管理机制可更好地发挥数据驱动决策在水务行业的价值,也可推动低碳标杆厂的评价更加量化、透明,对其他水务公司的运营指

导性更具象化。

参考文献:

- [1] 国家发展和改革委员会,住房和城乡建设部,生态环境部. 关于推进污水处理减污降碳协同增效的实施意见[EB/OL]. (2023-12-12) [2025-01-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm.
National Development and Reform Commission, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Ministry of Ecology and Environment. Implementation suggestions for promoting synergy and efficiency of wastewater treatment in pollution and carbon emission reduction [EB/OL]. (2023-12-12) [2025-01-03]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923468.htm (in Chinese).
- [2] DANVA. Vand i tal 2024[EB/OL]. (2024-10) [2025-01-03]. <https://www.e-pages.dk/danva/280/>.
- [3] WATER UK. Net zero 2030 routemap[EB/OL]. (2020-11-01) [2025-01-03]. <https://www.water.org.uk/news-views-publications/publications/net-zero-2030-routemap>.
- [4] 住房和城乡建设部. 2023年中国城市建设状况公报[EB/OL]. (2024-10-29) [2025-01-03]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Bulletin on the status of urban construction in China (2023) [EB/OL]. (2024-10-29) [2025-01-03]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html> (in Chinese).
- [5] 刘然彬,于文波,张梦博,等. 城镇水务系统碳核算与减碳/降碳规划方法[J]. 中国给水排水, 2023, 39(8): 1-10.
LIU R B, YU W B, ZHANG M B, et al. Carbon accounting and reduction planning in urban water sector [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(8): 1-10 (in Chinese).
- [6] KLIMA-ENERGI-OG FORSYNINGSMINISTERIET. Lov om vandsektorens organisering og økonomiske forhold [EB/OL]. (2009-06-12) [2025-01-03]. <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2009/469>.
- [7] MILJØSTYRELSEN. Vandsektoren og vandteknologi [EB/OL]. [2025-01-03]. <https://mst.dk/erhverv/rent-miljoe-og-sikker-forsyning/drikkevand-og-grundvand/vandsektoren-og-vandteknologi>.
- [8] 李爽. 基于标杆管理的供水运行绩效评估研究与实践[J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 128-132.
LI S. Operation performance evaluation of water supply based on benchmarking management: research and practice[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 128-132 (in Chinese).
- [9] KUHLMANN S, BOGUMIL J. Performance measurement and benchmarking as “reflexive institutions” for local governments: Germany, Sweden and England compared [J]. International Journal of Public Sector Management, 2018, 31(4): 543-562.
- [10] HAIDER H, SADIQ R, TEFAMARIAM S. Performance indicators for small- and medium-sized water supply systems: a review [J]. Environmental Reviews, 2014, 22(1): 1-40.
- [11] ESPINOSA A B, LAVRIJSEN S. Exploring the regulatory challenges of a possible rollout of smart water meters in the Netherlands [J]. Journal of Network Industries, 2018, 19(3/4): 159-179.
- [12] VEWIN. Meer transparantie en efficiency door prestatievergelijking [EB/OL]. (2024-01-03) [2025-01-03]. <https://www.vewin.nl/nieuws/meer-transparantie-en-efficiency-door-prestatievergelijking/>.
- [13] VILANOVA M R N, MAGALHÃES F P, BALESTIERI J A P. Performance measurement and indicators for water supply management: review and international cases [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43(6): 1-12.
- [14] The Danish Environmental Protection Agency. Drinking water [EB/OL]. [2025-01-03]. <https://eng.mst.dk/water/drinking-water>.
- [15] THOMAS S. Om DANVA benchmarking [EB/OL]. (2024-01-01) [2025-01-03]. <https://www.danva.dk/viden/bm/om-benchmarking/>.
- [16] DANVA. Velkommen til BESSY [EB/OL]. [2025-01-03]. <https://bessy.danva.dk/Production/Home/Index>.
- [17] Danish Competition and Consumer Authority. Revenue caps [EB/OL]. [2025-01-03]. <https://en.kfst.dk/water-regulation/revenue-caps>.
- [18] KLIMA-ENERGI-OG FORSYNINGSMINISTERIET. Lov om ændring af lov om vandsektorens organisering og økonomiske forhold, lov om vandforsyning m. v., lov om betalingsregler for spildevandsforsyningsselskaber m. v. og forskellige andre love [EB/OL]. (2016-02-16) [2025-01-03]. <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2016/16>.

- 2016/132.
- [19] DAMSØ T, KJÆR T, CHRISTENSEN T B. Local climate action plans in climate change mitigation—examining the case of Denmark [J]. *Energy Policy*, 2016, 89(7): 74–83.
- [20] AUGUSTINO M B, JØRGENSEN R L. An Analysis of the Benchmarking Model in the Danish Water Sector [D]. Copenhagen: Copenhagen Business School, 2013: 225–253.
- [21] FISCHER L. Regulation of water companies [EB/OL]. (2022–09–08) [2025–01–03]. <https://www.danva.dk/om-danva/the-danish-water-sector/regulation-of-water-companies/>.
- [22] PEDERSEN O M. Stor usikkerhed præger nye effektiviseringskrav for drikkevandsselskaber [EB/OL]. (2024–08–22) [2025–01–03]. <https://www.danva.dk/nyheder/2024/stor-usikkerhed-praeger-nye-effektiviseringskrav-for-drikkevandsselskaber/>.
- [23] Danish Competition and Consumer Authority. Benchmarking [EB/OL]. [2025–01–03]. <https://en.kfst.dk/water-regulation/benchmarking>.
- [24] The European Benchmarking Co-operation. Public summary report IB2022 [EB/OL]. [2025–01–03]. https://www.waterbenchmark.org/content/the-programme-explained_public-report.
- [25] MADSEN M. Benchmarking as a tool to optimize operations and lower GHG emissions [EB/OL]. (2023–01–11) [2025–01–03]. <https://www.wateronline.com/doc/benchmarking-as-a-tool-to-optimize-operations-and-lower-ghg-emissions-0001>.
- [26] NORDREGIO. Marselisborg wastewater treatment plant [EB/OL]. (2018–06–29) [2025–01–03]. https://nordregio.org/sustainable_cities/marselisborg-wastewater-treatment-plant/.
- [27] HAYWARD K. The case of VCS denmark—progress beyond net energy production [EB/OL]. (2021–01–12) [2025–01–03]. <https://thesourcemagazine.org/the-case-of-vcs-denmark-progress-beyond-net-energy-production/>.
- [28] ENERGISTYRELSEN. Denmark's climate status and outlook [EB/OL]. (2024–12–02) [2025–01–03]. <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/denmarks-climate-status-and-outlook>.
- [29] ENVIDAN. The state of knowledge on GHG emissions in the wastewater sector [EB/OL]. (2022–06–02) [2025–01–03]. <https://stateofgreen.com/en/news/the-state-of-knowledge-on-ghg-emissions-in-the-wastewater-sector/>.

作者简介:刘然彬(1988—),男,山东莱芜人,博士,副教授,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优化、全生命周期分析、微藻资源回收。

E-mail:liuranbin@bucea.edu.cn

收稿日期:2025–01–05

修回日期:2025–01–07

(编辑:丁彩娟)

复苏河湖生态,建设人水和谐美丽中国