

开启废水资源的 潜力空间

将废水视为保护人类与生态系统的宝贵资源

白皮书主要内容

迈向能源中立型水循环

从废水中回收资源

最具成本效益的废水基设计

处理工业废水必须从源头抓起

目录

1. 出水排放规范作为创新驱动力	6
采用最高标准处理废水 保护人类与生态环境	
2. 废水作为清洁能源来源	10
建设能源生产型废水处理厂 迈向能源中立型水循环	
3. 从废水中回收资源	14
将废水处理厂作为资源回收设施	
4. 集中化废水处理	16
通过集中化确保更具效果和成本效益的废水处理	
5. 分散化废水处理解决方案	18
维护地区水资源的同时保护环境	
6. 工业废水处理	20
从源头处理工业废水通常更具效益	
7. 水资源的真正价值	23
从丹麦视角看如何塑造水资源未来	

1. 出水排放规范作为创新驱动力

采用最高标准处理废水 保护人类与生态环境

几十年来，许多国家 / 地区并未对废水排放进行严格管控，导致内陆与沿海水域都出现了严重的环境恶化。要扭转这一趋势，必须对处理效率与废水质量执行更严格的监管标准。

进行废水收集但未达标

据估计，全球范围内仅有 20% 的生活废水与工业废水得到了充分收集与处理。联合国的可持续发展目标 6 提出，到 2030 年，未经处理就排放的废水比例必须减半。在欧洲，大约有 97% 的废水进行了收集和二级处理，但只有 69% 的废水进行了三级处理。

监管促进发展

长期以来，环境都是丹麦的重点关注领域，在 100 多年前就建造了废水处理设施。如今，97% 的废水都经过了处理。首批采取重大措施的国家 / 地区就包括丹麦，这些措施可以最大程度降低城市废水排放对水生环境的不利影响。具体方式是通过新技术的应用，不仅要清除城市污染，而且还要达标经过处理的城市废水。这样一来，不但可以提升丹麦城市的宜居性，同时也增加了周边区域的吸引力。就地理条件而言，丹麦缺乏接收城市污染排放物的大规模水体，因此，环境因素长期以来都是重中之重。自 20 世纪 80 年代开始，丹麦实施了严厉监管。在 20 世纪 90 年代，丹麦又进一步加强了针对排放至敏感水域的实施标准。丹麦的许多立法几乎都被欧盟全文采用。如今，丹麦也遵循着《欧盟水框架指令》，但丹麦的法规在许多方面都比欧盟的一般要求更加严格。从一开始，立法要求与标准都是以受体的具体评估为基础，旨在大幅度改善周边水体水质。

“除了高标准废水中营养物质的提取，目前丹麦的处理厂也在逐渐转化为资源回收设施。利用先进的监控手段，可以降低设施的能源消耗，同时尽量减少甲烷和一氧化二氮 (N₂O) 的排放，从而减少设施整体碳足迹。这不仅改善了水质，而且可以从整体上促进未来可持续发展。”

Lars Schröder
奥胡斯水务首席执行官

污染者买单原则

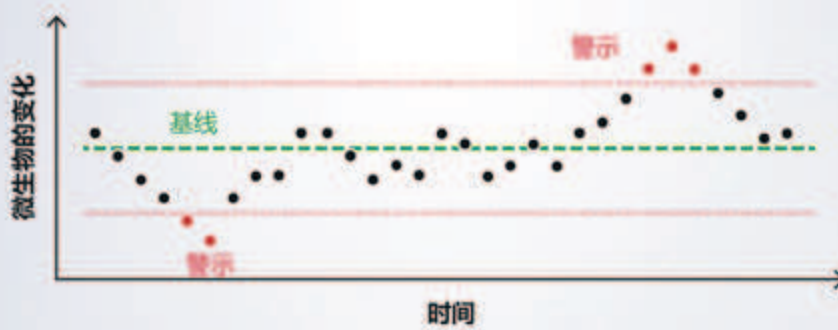
在许多国家 / 地区，供水与废水处理服务被视为由政府买单的公共事务。然而，在丹麦及其他欧盟成员国，“污染者买单”原则对生活用水与工业用水均适用，即收集和废水处理的成本必定会包含在水价之中。丹麦还推行了排放税来完善监管框架，这意味着污染源（在本白皮书中指废水处理设施）必须为其排放的每一千克排放物质缴税，而排放物质的三大关键参数是有机物质 (BOD)、总的磷含量 (P) 以及氮含量 (N)。这为丹麦的水务部门指定了一个非常具有创新和进步意义的优化策略。

运营情况高于排放要求

如今，丹麦各种规模的处理厂运营良好且符合排放要求，无论对废水处理公共事业还是对环境都能带来经济效益。这表明监管能够有效促进创新与绩效表现。回溯到 20 世纪 80 年代和 20 世纪 90 年代早期，丹麦推动整个国家进行了生物废水处理厂的建设，也包括了一些非常小型的处理厂。从那以后，这些处理厂不断得到优化和扩建，最终大幅改善了水生环境。水质的改善使得三文鱼得以在河流和小溪中繁殖，甚至是在人口稠密的地区，这样的情况也非常多。同时，丹麦水体的休闲价值也有所提升，如今许多城市内港都达到了可供游泳的清洁标准。

高成本效率的解决方案

废水的收集和处理成本通常是水源采集和供应成本的两倍，这就意味着高成本效率的解决方案必须确保水源使用者和造成污染者均能承担废水处理的成本。尽管丹麦有较高的能源回收率和较高的处理水准，但每个丹麦家庭承担的高质量饮用水和废水处理成本与其他国家 / 地区的成本相当。



在线 DNA 分析 - 了解废水处理厂中的微生物群落以优化流程

奥尔堡、奥胡斯、欧登塞、哥本哈根，丹麦

奥尔堡大学建立的 MIDAS 数据库能够提供丹麦废水处理厂活性污泥中大多数微生物的功能以及分布信息。自 2006 年以来，科研人员利用先进的 DNA 分析，对 50 家废水处理厂的微生物群落组成开展调查，进而建立了庞大的知识库。现在，每家废水处理厂都“了解自己的微生物群落”，可以利用关键物种参与的氮、磷去除和沉降特性的信息来优化操作，因为群落组成的变化通常会反映在处理厂的性能中。为了获取日常信息，奥尔堡大学对“在线 DNA 分析”进行了试验，即通过一部只有智能手

机大小的便携式 DNA 测序仪，在几个小时内直接在废水处理厂对微生物进行鉴定。实验结果非常有前景，日常或每周分析很快就会成为监测和控制许多丹麦废水处理厂微生物的现实。

(资料来源：微生物群落中心 - 奥尔堡大学、Aalborg Forsyning、奥胡斯水务、VCS Denmark、BIOFOS 和 Krüger)

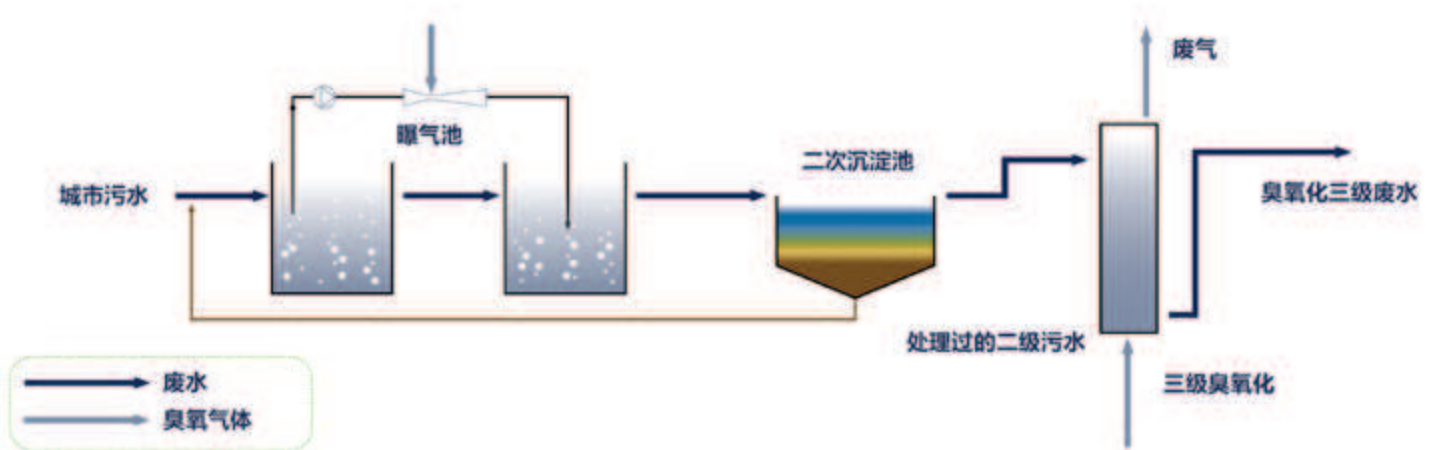


**迈向气候中立型废水处理
欧登塞、奥胡斯，丹麦**

在过去的十年中，通过节能和厌氧消化增加能源生产，强烈推动着降低废水处理的成本和气候影响。从气候的角度看，降低温室气体排放也很重要，包括最小化废水处理产生的 N₂O 排放，因为在废水处理产生的所有气候影响中，这类排放带来的气候影响占 20-50%。因此，丹麦各地的许多处理厂都安装了一种独特的 N₂O 感应技术。传感器可以在线检测废水处理过程中的 N₂O 浓度，通过排放模型实时计算 N₂O 的排放。

此外，降低 N₂O 排放的在线控制策略已经研发问世，并且也在治理行动中得到了实际验证。由于失衡的能源节约及增长的能源产出可能导致 N₂O 排放增加，这实际上会对气候产生净负面影响。有了这项新技术，废水处理厂能够从“能源中立”升级为“气候中立”。

(资料来源 :Unisense Environment, DHI, VCS Denmark, VTUF 和丹麦生态创新计划财政支持下的奥胡斯水务)



通过对已知技术的创新使用去除废水中的微污染物

布赖斯楚普，丹麦

欧洲和世界各地的许多国家 / 地区都越来越重视从废水中去除微污染物，从而保护饮用水和水生环境。在布赖斯楚普污水处理厂，一项开发项目正在以新的方式使用已知技术来去除污水中的微污染物，包括药物残留。对污水处理厂主要工艺中的臭氧化和三级处理（同样使用臭氧）进行了测试，结果表明，在完成微污染物去除后，所测的每一种微污染物的浓度都已降至预测的无影响浓度（PNEC）之下。通过进行生态毒理学测试，

观察到更低水平的致突变和激素影响，且未检测到负面影响。臭氧氧化还改善了污泥条件，增加了大肠杆菌和抗生素耐药菌的去除率以及抗生素耐药基因的去除。项目的最后一项测试将是在生物处理中直接施加活性炭剂量，这应该会导致活性炭吸附微污染物，从而使其能够与污泥一起被去除。该项目于 2020 年结束，并发布了一份最终报告。

（资料来源：SAMN Utility、奥尔堡大学、KD Maskinfabrik、SUEZ 和 COWI）



测量和减少雨水和废水中的微塑料，丹麦

近年来，丹麦技术研究所（DTI）一直是多个研发项目的主要合作伙伴，这些项目分别重点研究污水处理厂进水 / 出水、工业废水和雨水中微塑料和微橡胶的定值和去除。基于化学样品纯化和拉曼光谱，DTI 开发了一种从水样中对微塑料和微橡胶颗粒进行识别、定值和测定的方法。这一方法经过五年的实践，已逐渐完善，并有了进一步的发展。通过开发和成功展示各种废水处理技术，还重点研究了如何在不同水源中去除微塑料。与丹麦各大学、水务公司和水务技术提供商的密切合作，为我们

提供了测定和减少水环境中的微塑料污染方面的重要知识。该项目已经获得了丹麦生态创新计划（MUDP）和水务部门发展和示范计划（VUDP）的资金支持。

（资料来源：DTI、奥尔胡斯大学、奥尔堡大学、Berendsen、Aage Vestergaard Larsen、AL-2 Teknik、Grimstrup Maskiner ApS、Dankalk K/S、Techras Miljø ApS 和一些公用事业公司，包括 Mariagerfjord、Novafos、Ringkøbing-Skjern、Syddjurs、VCS Denmark、Lemvig 和 Hedensted）

2. 废水作为清洁能源来源

建设能源生产型废水处理厂 迈向能源中立型水循环

降低废水的收集与处理成本是全球水务公司面临的重要问题。为了实现这一目标，必须关注成本效益、改善污水处理厂的能源自给自足能力，和将多余的能源销售给电网的可能性。

降低能源消耗

国际能源署（IEA）估计，在全球范围内，水务部门占全球总用电量的 4%，其中污水处理占四分之一。因此，要实现联合国制定的到 2030 年将未经处理的废水比例减半的目标，可能会给能源需求带来巨大的上行压力，而在处理设施中应用能源效率和回收技术可能会对此有所帮助。在丹麦，越来越多的水务公司意识到，废水处理在节能和能源回收方面具有巨大潜力。目前，水务部门的用电量在丹麦总用电量中的占比已降至 1.9%。丹麦的大多数废水处理厂向评估减少能源消耗的不同方法投入了资金。其中包括使用在线监测与能源管理系统、用更节能的底部曝气器取代表面曝气设备，以及采用其他不同的操作方法。

将能源自给自足作为新重点

近年来，丹麦水务公司的关注点不再仅仅是降低能源消耗，同时还包括能源生产。首要目标是实现能源中立，第二大目标则是能够向当地的供电与供暖公司出售多余的电能与热能。几家最大型的水务公司都在朝着这个方向努力。在丹麦的第二大城市奥胡斯，Marselisborg 废水处理厂从 2015 年到 2019 年，平均每年产生的电能比其自身消耗的电能高出了 30%。同时，该处理厂产生的热能比起自身的消耗高出 75%，相当于 150% 的总净能源产量。在丹麦的第三大城市欧登塞，Ejby Mølle 废水处理厂也达到了相近的总净能源产出水平。未来，两个城市的水务公司也将着手在废水排放前回收其中的热能，与此同时还可以降低对接收水域的气温影响。

“通过能源回收和大幅减少废水处理能耗，丹麦的水务公司将对丹麦实现到 2030 年减少 70% 二氧化碳排放量的目标作出贡献。自 2008 年以来，我们已将温室气体排放量减少了近 80%。这表明，采用系统化的能源优化意义重大。”

*Lars Schrøder, 奥胡斯水务首席执行官
兼丹麦政府废物、
水和循环经济领域的气候伙伴关系副主席*

解决方案取决于处理厂的设计与所处环境

越来越多的丹麦废水处理厂将废水处理方法升级为“污泥厌氧消化”和/或“与有机废物产品共消化”，并利用沼气发电和供热。最佳方案取决于处理厂的具体设计，以及所产出电能的内消或外销可能性。厌氧消化的实施在经济上的可行性临界点取决于新技术的发展以及电能和热能购买与销售价格区间的变化。目前，哥本哈根正在推行一种技术，能够将沼气的质量提升至与天然气或车用燃气相近的水平。

朝着能源和气候中立型水循环迈进

通过引入新技术来降低能源消耗并提高能源产出，其目标是公用事业公司能够实现能源中立型水循环。这种情况下，水务公司处理厂产生的能源就能够抵消与地下水抽取、水处理、用水和废水运输，以及废水处理相关的能源消耗。2019 年，VCS Denmark 在服务区域内的整个水循环中展示了 100% 的净能源生产，涵盖了全部 8 家废水处理厂以及拥有 20 万人口的丹麦第三大城市欧登塞市的用水生产和分配。丹麦水务部制定了一项共同目标，即到 2030 年实现能源中立和气候中立。在 2020 年，该目标已纳入政府的国家气候计划。

标杆管理与创新降低了成本

丹麦的水务公司需要对运营参数进行强制性的标杆管理，并且实现整个供水行业的成本效益，这可以在很大程度上推动实现废水处理优化创新，以及提升基础设施建设与运营的成本效益。创新项目通常由政府机构、水务公司、咨询公司、技术供应商、大学以及科研机构协作完成。丹麦给排水协会（DANVA）也会每年自发开展标杆管理。

前往以下网址下载其最新报告：
www.danva.dk/waterinfigures



废水处理厂实现 150% 的能源自给率，丹麦奥胡斯

过去的五年中，奥胡斯水务公司专注于节能和能源生产。在 Marselisborg 废水处理厂，该公司采用了节能技术，其中包括先进的监测控制和数据采集（SCADA）系统、新的涡轮压缩机、基于厌氧氨氧化工艺的污泥脱水液处理，以及优化的微泡曝气系统等。如此一来，每年可以减少 1 千兆瓦时的能源消耗约，相当于减少总量的 25%。同时，通过采用新的高效沼气引擎（CHP）提高了能源产出，因而每年可以

增加约 1 千兆瓦时电能产出。此外，还安装了新的换热器，旨在将每年约 2 千兆瓦时的过剩热能出售给当地的供热管网。2015 年至 2019 年，Marselisborg 废水处理厂的平均总能源产出为每年 9.6 兆瓦时，能源消耗为每年 6.4 兆瓦时，相当于净能源产出为 150%。多数已装配技术可在 5 年内带来回报。

（资料来源：奥胡斯水务）



能源积极型和气候积极型废水处理，哥本哈根，丹麦

丹麦最大的废水处理公司 BIOFOS 有三家处理厂，降解池容量共计 60,000 立方米，2019 年绿色能源产出盈余达 173%。BIOFOS 通过提升能源盈余来增加哥本哈根的“城市供气”管网和天然气管网的绿色能源供应，以此减少传统产气方法产生的二氧化碳排放量。此外，焚烧降解污泥产生的余热能够供应哥本哈根大区的区域供热管网。随着绿色能

源产出不断增长，自 2014 年以来，BIOFOS 的能源平衡始终为正值。BIOFOS 的目标是到 2025 年转型为气候积极型的废水处理公司。除提高自身的绿色能源产出外，BIOFOS 还致力于减少公用电网的化石燃料能源购买量，以及废水处理过程中的温室气体排放量，尤其是强效一氧化二氮 (N_2O) 排放量。

(资料来源 :BIOFOS)



实现现有废水处理厂的废水价值最大化， 欧登塞，丹麦

欧登塞市地处内陆，当地的污水处理设施 VCS Denmark，由于存在敏感接收方，正在遵守严格的营养物还原要求。尽管如此，该公司的最大废水处理厂——容量为 410,000 人口当量（PE）——通过优化现有基础设施，实现了超过 125% 的电力自给率。通过采取

整体方法（重视每一次改进，不断追求创新并测试新概念），持续改进所有参数。通过与多家咨询公司合作，发现了更大的优化潜能，这将加强养分的重复利用并实现沼气产出最大化，从而进一步获取更多的热能与电能。

（资料来源：VCS Denmark）



废水处理厂的净零能耗与能源积极型运营模式 伊利诺伊州唐纳斯格罗夫，美国

伊利诺伊州的唐纳斯格罗夫卫生区为减少能源足迹投入了大量资源，包括工厂自动化、曝气系统改进、暖通空调和建筑管理系统升级及变频驱动器在内的方面提升流程效率，使其废水处理厂的耗电量减少了 30%。该设施使用的剩余电力通过利用生产现场产生的沼气驱动联合热电系统自行生产，而沼气通过现场产生的食物垃圾和污水污泥混合消化产生。

沼气可被用作发电机的驱动燃料。此外，以循环热水的形式进行的热回收用于回收工厂生产过程中产生的热量。热电联产电厂于 2017 年建立，投资回收期为 3.5 年。基础设施投资总额约为 500 万美元，预计投资回收期为 10 年。2021 年，该工厂产出的能源不仅能够实现自身运营，还可以将能源回馈至电网。

（资料来源：NISSEN energy Inc.、Landia 和唐纳斯格罗夫卫生区废水处理中心）

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/558067057067006100>