

第一章 迈向净零循环水经济

Zhiyong Jason Ren^{1*}, Jerald L. Schnoor² and Krishna R. Pagilla³

¹Department of Civil and Environmental Engineering & Andlinger Center for Energy and the Environment, Princeton University, Princeton, NJ, USA

²Department of Civil and Environmental Engineering, University of Iowa, Iowa City, IA, USA

³Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada Reno, Reno, NV, USA

*Correspondence: zjren@princeton.edu

1.1 水务行业脱碳的挑战和机遇

水支撑着生活的方方面面，水行业是人类社会和环境用水需求的守护者。从古罗马的渡槽到现代供水网络，水务行业一直在文明中发挥着关键作用，并为通往更可持续和更具前瞻性的世界铺平了道路（Sedlak, 2014）。每个国家的关键水基础设施都依赖于不同规模的水和污水系统的顺利运行。自来水公司每天处理并向家庭和工业输送数十亿升的水，污水公司收集和处理产生的污水，以确保污水可以安全排放或再利用。新兴的“全水”（OneWater）框架认识到水管理的相互关联性质，提供了一种全面和综合的方法，将地表水、地下水、雨水、饮用水、污水和循环水等所有水资源视为一体，以构建可靠、可持续和有弹性的水系统（图 1.1）。

然而，水务行业正面临气候变化带来的更加严峻的挑战：极端天气事件、频繁的洪水或长期干旱、水质恶化以及基础设施老化和人口重新分配。该行业需要从专注于稀缺天然水资源的水处理和供应、污水收集和处理以满足排放许可，以及这些作业的残留物处理，转变为综合水管理，以实现低碳循环水经济“全水”（OneWater）概念。目标应该是整体可持续性，包括能源、温室气体（GHG）排放、资源回收、水资源弹性和水资源管理中的社会经济影响。

水工业在采购、生产和再生用水方面是能源和材料密集型的。国际能源署（IEA）估计，全球约 4% 的用电量用于输送和处理水和污水，预计水务行业的用电量尽管能源效率有所提高（图 1.2）（IEA, 2017），但未来 25 年仍将增长 80%。

为了寻找更多的水,低质量的水源,包括非传统水源,正被考虑用于取水和供水。这进一步增加了水处理和污水回收的能源强度。水、雨水、污水的收集、运输和处理使用了大量的混凝土、金属和塑料,所有这些都与不可再生材料和能源或密集的能源足迹有关。

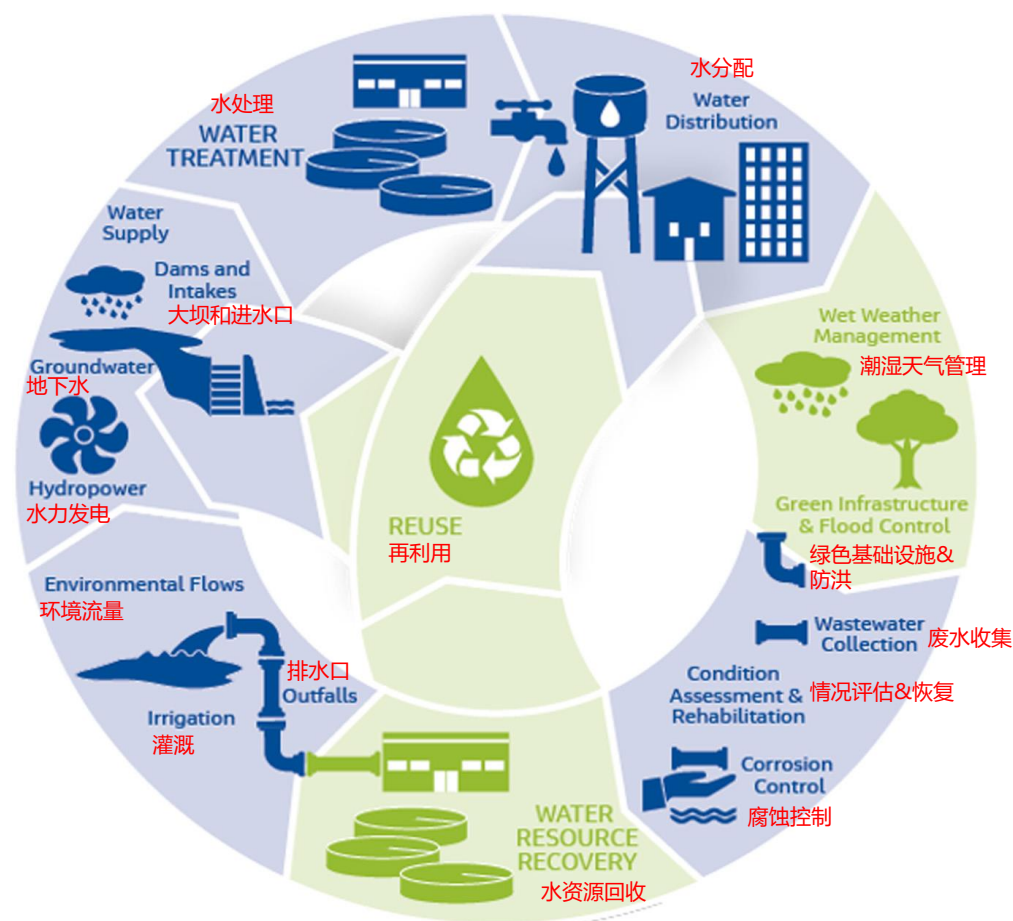


图 1.1 “全水”（OneWater）的城市水循环框架(图片来自 jacobs.com, 2020)

供水和污水处理设施通常将 10-35% 的运营成本用于能源,这些能源主要来自化石燃料 (IKI, 2020)。在一些城市,这可能占市政能源使用量的 40%,它反映了水务行业的温室气体排放量。在水处理设施和供应系统中,范围 2 和范围 3 排放都比范围 1 (直接) 排放更重要,而污水处理设施内的直接非生物温室气体排放是范围 1 排放。此外,排放包括与调入电能和热能(范围 2)相关的排放,以及与化学品和燃料的生产和运输、废物处理以及供水和污水处理设施中的第三方服务(范围 3)相关的其他间接排放(UNEP, 2017)。然而,与其他基础设施行业(如能源和交通)的主要温室气体来源于化石燃料燃烧不同,通过有机降解从

污水中直接释放的二氧化碳在很大程度上被认为是碳中性的, 因为它的生物性质, 尽管有证据表明一些碳是化石起源(Griffith et al., 2009)。相反, 来自收集系统和处理设施的非二氧化碳直接排放(主要是 CH₄ 和 N₂O)值得高度关注, 因为在 100 年内, 这些温室气体的全球变暖潜能值(GWP)比二氧化碳强许多倍(28-298 倍) ((范围 1)) (图 1.3) (Lu et al., 2018)。目前, 污水处理占全球非 CO₂ 温室气体排放总量的 5%, 但随着 CH₄ 排放控制成为未来十年的重中之重, 预计其影响会更大。在最初的 20 年里, 甲烷的升温能力是二氧化碳的 80 倍以上, 而且它在大气中只持续 12-15 年(Saunois et al., 2020), 减少甲烷排放是减缓全球变暖速度并在本世纪中叶实现净零排放的最快机会。

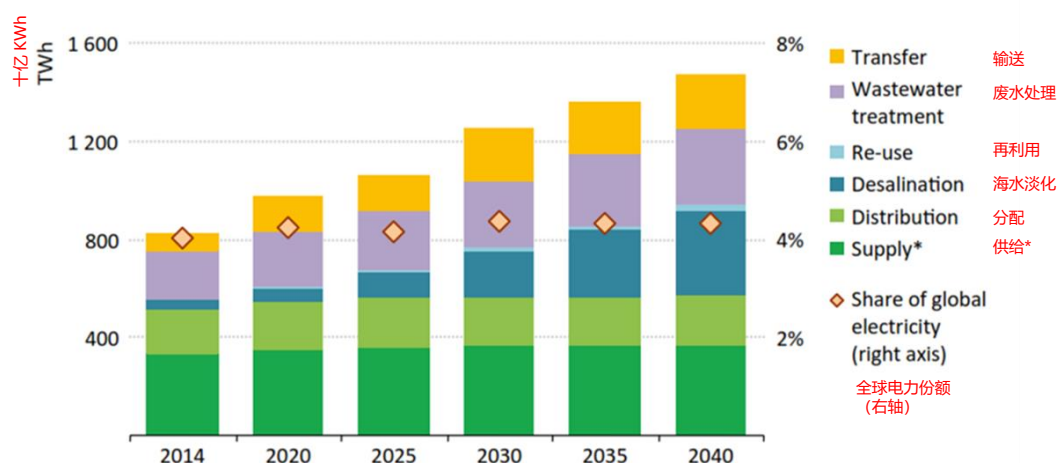


图 1.2 水相关的不同活动的全球能源消耗(IEA, 2017 年)

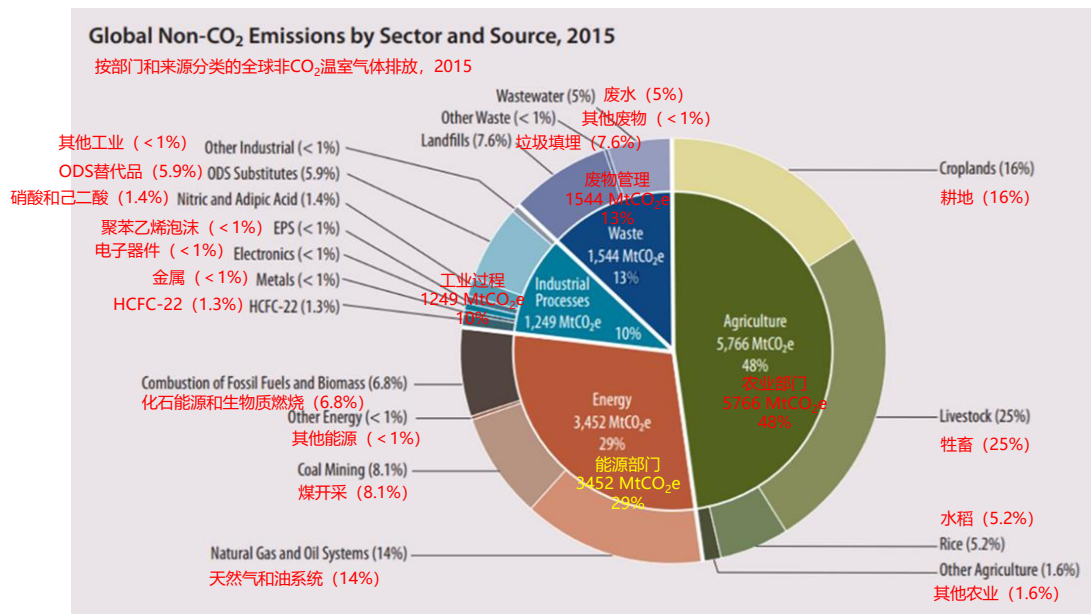


图 1.3 按行业和来源分类的全球非二氧化碳温室气体排放量(2015) (USEPA, 2019a, 2019b)

为了实现《巴黎协定》中 1.5°C 的全球变暖目标，许多国家、城市和行业已承诺到 2030-2060 年实现净零排放。这意味着温室气体排放必须大幅减少，任何净排放都需要通过从大气中吸收等量（负排放或抵消）温室气体来平衡。虽然能源、交通和建筑系统许多基础设施行业已就脱碳途径进行了广泛研究，但水务行业却相对落后。水务行业并未被视为碳密集型行业，而且由于大多数水和污水处理设施都是受到严格监管的公共实体，因此它们缺乏控制价格的权力，无法使投资合理化以获得长期利益。传统的公众看法是，供水和污水处理服务是一项“人权”，这意味着价格更多地是成本的函数，而不是其他行业的价值。由于世界不同地区日益严重的水资源短缺和环境污染，这种“水应该是免费的”观念正在受到挑战，并且出现了许多通过开发双赢解决方案来克服这些障碍的机会，例如，通过能源和资源回收创造“绿色”收入，制定新的碳信用政策，将经验实践转化为数据驱动的决策，从而提高效率并降低成本。

1.2 实现水和污水脱碳的途径

在许多经济行业，人们提出了将温室气体排放量降至零的途径，尽管一些行业更容易脱碳，而另一些行业则相对困难。例如，发电占美国排放量的 25%，可以通过生产太阳能、风能、水电和低碳核能等可再生能源来实现电力行业的完全

脱碳，而其他节能措施则包括加强输电基础设施、提高电网灵活性和能源使用效率等（USEPA, 2019a, 2019b）。另一方面，水的脱碳途径看起来会大不相同，因为水和污水不仅是能源、材料和化学品的主要消费者，污水也是非二氧化碳温室气体的主要直接排放者。因此，水务行业的脱碳途径，特别是污水收集和水回收，更加多样化和复杂。有一些机会可以向能源行业等其他行业学习，而另一些则必须通过仔细考虑水和污水回收目标以及包括净零排放在内的可持续性目标来开发。第 2 章探讨了能源行业遵循的脱碳途径，并确定了能源和水之间的协同作用以加速这一进程。它还讨论了节能照明、电动汽车、纤维素生物质以及风能和太阳能行业的几个脱碳实践示例，并评估了它们对于水务行业的适用性。

1.2.1 脱碳需要更好地了解排放基线

英国最近制定了一个雄心勃勃的气候目标，即到 2030 年将英国的排放量至少减少 68%，使该国到 2050 年实现净零排放。为了响应这一目标，英国水务公司发布了第一个 2030 年净零排放路线图，以支持该行业的转型(Water UK, 2020)。水务公司约占英国工业和废物管理过程产生的温室气体的三分之一，但在适当的支持下，该行业有可能成为最具成本效益的行业之一，以实现碳中和，甚至是负碳，这是全球许多水务专业人士的共同愿景。

图 1.4 描述了 2018-2019 年英国水务行业的参考基准排放量。该代表性数据显示，主要行业排放主要来自电网电力的 CO₂，以及来自污水和污泥处理过程的 CH₄ 和 N₂O 排放。这些排放可以通过购买绿色电力以及生产生物甲烷或热电联产等可再生能源来抵消。

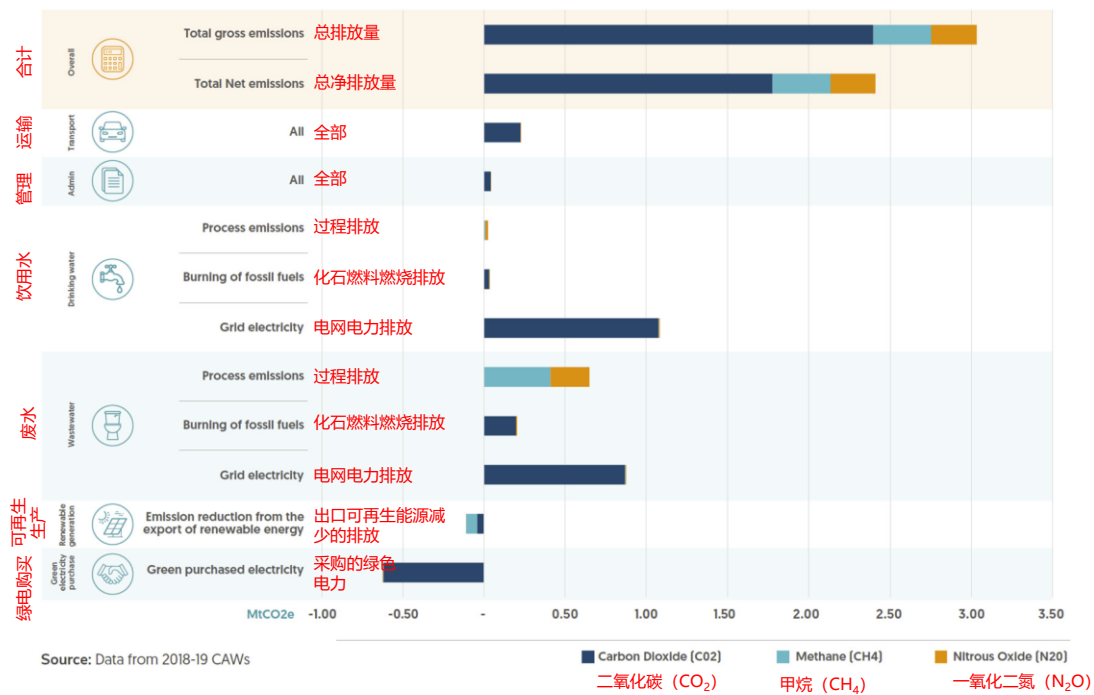


图 1.4 2018-2019 年英国水务行业参考的基准排放量(Water UK, 2020)

虽然与用于供水/污水处理和输送的电网相关的范围 2 排放相对简单，但在估算处理过程和输送系统的范围 1 直接排放时存在更大的不确定性。基于广义排放因子 (EF) 的估算过度简化了情况，并没有反映不同工厂和工艺之间实际排放差异的现实，而局部通量室方法产生显著差异，有时差异高达 3-4 个数量级 (Delre et al., 2017; Vasilaki et al., 2019)。需要进一步研究，为行业特定排放因子建立更好的科学基础。第 3 章讨论了与城市水循环相关的不同温室气体排放范围。它还为碳足迹评估提供了一个综合框架，并概述了评估水务行业温室气体排放的可用的相关协议和方法。

1.2.2 脱碳需要各种方法的结合以及利益相关者之间的合作

没有单一的解决方案或方法就可以实现净零排放，而是需要将不同利益相关者（包括来自学术界、公用事业、咨询公司、技术公司、政府机构、投资者和最终用户）的方法结合起来，并促进各方的合作。脱碳需要科学技术的进步，也需要新的政策、实践，甚至是实现可持续的生活和实践的行为改变。

许多公用事业公司已经启动了可以立即减少排放的计划。这些项目包括使轻型车辆电气化，使运营和维护车辆不再使用化石燃料，以及用可再生天然气等替

代燃料取代重型车辆的燃料。它还包括从太阳能和风能中购买绿色电力，替代能源集约型仪器，如鼓风机、泵和具有更节能设备的锅炉，以及可再生能源回收。例如，越来越普遍的做法是通过厌氧消化生产沼气，然后将沼气用于热能、电力或热电联产 (CHP)。事实上，水务行业正在扩大，以添加食物垃圾和其他有机废物等废物作为厌氧消化的原料，以生产沼气，使设施能够实现能源中和或能量正收益。从污水中回收能量、养分 (N 和 P) 和水方面的资源使得污水处理设施更名为水资源回收设施 (WRRFs)。这些回收资源的内在价值为碳排放提供了补偿，因此也有助于实现净零目标。此外，碳融资和实时能源和化学审计等新的创新解决方案也开始产生影响。

除了处理操作外，水和污水的输送和储存也需要注意减少材料消耗、能源需求和不必要的基础设施建设。安装智能水表以改善泄漏检测和减少用水量也将有助于可持续的水管理和生活方式的改变。污水收集系统需要通过设计和操作策略最大限度地减少因厌氧或化粪池条件导致的甲烷排放，并且该系统正处于萌芽和成长阶段。应结合集中式与分散式处理设施方案，对水和污水设施选址以尽量减少输送能源需求进行战略评估。当水被视为城市流域中的“全水”(OneWater)时，最好的脱碳途径是可能的，并将提供最大的收益。

水务行业在很大程度上受到各种政策的推动。这些政策不仅包括对水质和公众健康保护的监管要求，还包括来自不同政府机构的指令，以确保水的可负担性、社会公平、生态多样性和基础设施的弹性。大量的金融和人力资本投资已用于建设和管理这些系统。全球范围内没有强制要求水务行业脱碳的总体政策，但寻求与其他政策领域的共同利益，例如回收当地能源和资源、建设多功能设施和保护社区资产，将提供更可行的解决方案。持续的进展将需要从地方层面开始并发展为全球倡议的战略规划，脱碳尤其如此。否则，地方行动可能几乎只关注基础设施的抵御能力，而气候变化这一首要问题需地方层面的脱碳。在过去的几十年中，供水和污水处理事业公司越来越多地通过基于绩效的运营来接受费率支付人的角色和价值贡献。这些努力有助于降低资源利用率并回收具有当地价值的资源，这种价值主张为公用事业公司提供了更好的财务状况和社区支持，以做出有助于脱碳的决策。第 17 章讨论了影响水务行业脱碳努力的政策制定中的几个核心观点，并强调了尽可能寻求多种利益的必要性。

1.2.3 实现能源和资源回收的工艺与技术

污水含有大量的热能、化学能和水能，估计其总量是处理污水所需的数倍。因此，使 WRRFs 能源中和甚至正收益是绝对可行的。图 1.5 描绘了 WRRF 能量流的广义视图。技术使公用事业公司能够通过工艺强化、低能耗处理和减少化学品使用来最大限度地减少用于处理污水的资源。领先的公用事业公司还通过生物固体土地应用、养分回收、沼气利用和水回收利用处理过程最大限度地回收资源。已经开发了多种技术以使此类操作成为现实，这些技术包括但不限于厌氧消化、微生物电化学、光生物系统、先进的氮和磷管理、使用膜和其他技术的工艺改进以及热/压力回收和显著提高能源效率的工艺。

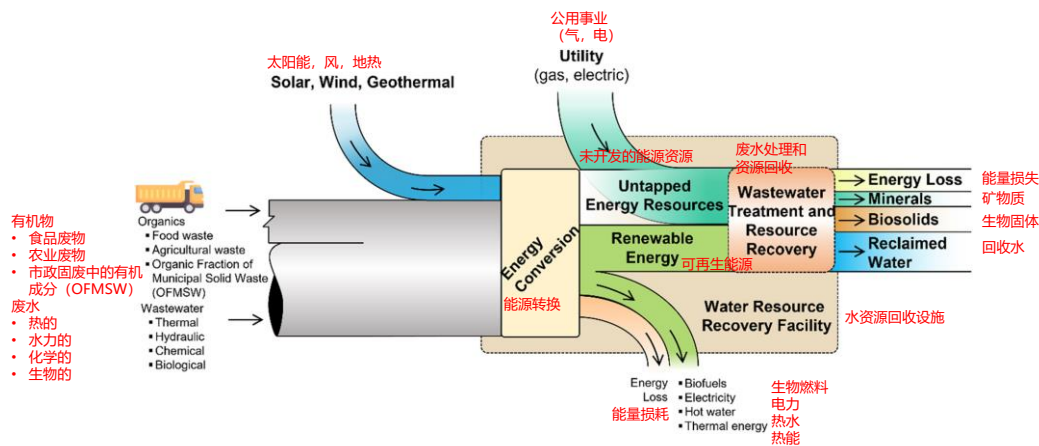


图 1.5 水资源回收厂(WRRF)能量流动的一般框架(修改自 WEF (2019))

公用事业脱碳中“唾手可得的果实”是运营优化。对于现有设施，碳足迹存在于运营活动中，因此也存在脱碳潜力。第 4 章讨论了 WRRF 内泵送、初步、初级、二级、高级和污泥处理环节的现有脱碳潜力。例如，污水泵送在减少能源使用方面具有巨大潜力，而使用模糊逻辑、数据挖掘和基准测试的数据驱动策略提供了减少比能量和提高节能效果的良好工具(Torregrossa et al., 2017)。同样，在大多数处理厂中，曝气是最大的单一能源使用来源，并且利用膜和在线传感的最新发展的替代扩散器和控制系统已被用于提高曝气能源效率。在整个处理厂级别，除了单个单元级别的优化之外，还可以采用不同的策略。例如，可以利用可比设施的工厂级基准来识别机会，或通过安排峰值流量和负载管理来优化处理厂产能利用率。由于化学品使用占 WRRF 碳足迹的很大一部分，因此通过运营优化减

少化学品使用对于脱碳非常可行，并且还可以降低运营成本。人员培训是另一个可以产生重大影响的关键环节。通过最佳实践清楚地展示成本节约和性能提升，运营商将为脱碳做出直接贡献。

厌氧消化 (AD)是 WRRF 中用于分解和稳定污水污泥并产生沼气和营养丰富的污水和生物固体的示范技术。AD 一直是污水处理行业能源和资源回收的核心工艺，并且已经开发了一套新工艺和技术来提高污泥转化率、提高沼气产量、将沼气升级为更高价值的产品，并提高生物固体的质量和适用性。第 5 章总结了 AD 平台用于能源和资源回收的现有知识，包括使用热、化学、机械和电气方法对污泥进行预处理以提高污泥降解性的新趋势，污泥、食物垃圾和其他有机物的共同消化能够提高沼气产量和生物固体质量。这一章还讨论了新开发的工艺，例如厌氧膜生物反应器 (AnMBR)、热水解和使用 AD 平台生产挥发性有机酸。第 10 章从更广泛的污泥管理角度进一步讨论了 AD，还讨论了其他实践，包括土地应用、堆肥、焚烧和填埋。还讨论了新的 AD 替代方案，例如水热液化 (HTL)，以探索污泥增值和资源回收的新途径。此外，本章还提供了有关当前管理实践如何帮助脱碳、生物固体管理策略在实现公用事业脱碳目标中的作用以及如何应对新出现的污染物、气味和公众监督等挑战以实现这些目标的见解。

营养物质 (N 和 P) 去除或回收的先进处理一直是增加 WRRF 中能源和化学品使用的主要驱动力，这也表明了脱碳的现有机会。第 7 章探讨了 WRRF 内脱氮潜力。它提供了碳成本和脱碳潜力的广泛概述，然后对侧流和主流背景下的技术和工艺配置进行了详细回顾和定量比较。详细讨论了亚硝酸盐分流、部分亚硝化/厌氧氨氧化 (PNA) 和部分反硝化/厌氧氨氧化 (PdNA) 等新型生物脱氮工艺，并评估了资本和产能影响等关键考虑因素。同样，第 8 章全面概述了磷管理及其在脱碳方面的潜力。它指出，可持续的磷管理需要多层次的方法，成本和环境后果可能会从提高利用效率的更高级别管理策略到更低级别的污染物处理和回收增加。直接脱碳可以通过使用增强的生物除磷减少碳输入，甚至通过同时实施碳封存的方法来实现。间接减排依赖于在特定工艺的整个生命周期内减少碳足迹的策略，例如通过减少化学品和能源需求或运输。这两章还提供了 WRRFs 实施这些策略的案例研究，并指出，为了实现该行业的脱碳，需要对整个工厂进行优化，以协调 C、N、P 的去除和回收。

膜工艺在水工程中发挥着关键作用，从生产高质量水产品，以提高污水处理效率并减少空间足迹。基于膜的工艺将反应与分离相结合，从而提供高水平的工艺改进。然而，膜分离操作通常消耗大量能量并且需要化学清洗，因此评估与膜操作相关的脱碳潜力很重要。第 11 章讨论了几种具有高脱碳潜力的新型膜技术，可降低能耗。这些技术包括好氧颗粒污泥膜生物反应器（AGMBRs）、藻类膜生物反应器（A-MBRs）、厌氧膜生物反应器（AnMBRs）、膜生物膜反应器（MBfRs）和正向渗透（FO）集成工艺。本章还包括用于可持续脱盐的膜技术，包括压力延迟渗透（PRO）、正向渗透-反渗透（FO-RO）混合方法和正向渗透-膜蒸馏混合（FO-MD）方法。总结了这些技术的好处和挑战，并为节能和低碳足迹的实际实施提供了研究方向。

虽然许多技术专注于将污水中的化学能转化为可用的形式，如 H_2 、 CH_4 或直流电，但更大的未开发领域是污水中的热能。从商业和工业建筑、住宅热水淋浴、洗碗、洗衣机和其他器具排出的高温水会导致大量热能排入污水中。因此，第 14 章讨论了这种很大程度上尚未开发的能源及其应用。它评估了从污水中回收热能的技术可行性，并设想了将污水热能回收与使用热泵的区域供热（DH）和区域能源系统（DES）相结合的可能性。本章还讨论了从污水中获取热能的机会和障碍，包括但不限于战略规划、需求和资源地图绘制、技术可行性以及监管和财务框架。

1.2.4 使碳捕获和利用以及流域管理获得额外收益的工艺和技术

通过提高能源效率和回收可再生能源的方法，在脱碳方面取得了巨大进展，但这些方法只能减少化石燃料消耗及其相关的碳排放。考虑到每年产生的大量污水（全球每年约 1000 km^3 ）及其与人口和工业活动、污水处理的正相关，污水处理中甚至可能通过捕获外部 CO_2 和 CH_4 源并将其转化为增值产品而变成负碳。由于这种做法可以在处理过程中发生在现有的污水基础设施中，因此不需要额外的土地或运输。

自然处理系统（NTS）利用和增强涉及植被、土壤和水以及相关微生物生态系统的自然过程，它们在深度处理、新污染物去除、雨水管理、生物质生产、娱乐和教育服务以及整体综合流域/下水道管理。NTS 几乎不需要机械或技术投入

即可运行，从而降低了化学或能源密集度。此外，这些基于植物和微生物的系统根据处理水平、季节变化和系统变化提供广泛的碳捕获曲线。第 12 章描述了自然处理系统技术的优点和缺点，以及它们在纳入流域综合管理时使水务行业脱碳的潜力。这种技术能够从污水中回收养分、能量和水，并减少温室气体排放。通过将水回收和再利用用于非饮用水用途，例如灌溉/施肥、含水层补给、灰水应用，甚至直接用于饮用水再利用，可以减少水源抽取量，补充含水层，实现水需求和供应之间的协调。本章还提供了两个工程案例研究，说明植物修复对碳封存和农业径流处理的好处，以及使用微藻进行联合电厂烟气和化肥污水处理的好处。

微藻或紫色光合细菌等光养微生物呈现出独特的脱碳潜力，因为它们在自养生长过程中固定 CO_2 ，同时吸收污水中的营养物质（N 和 P）。因此，光合处理系统与 AD 或微生物电化学等以碳为中心的处理过程是互补的。第 9 章描述了使用光生物处理系统的脱碳潜力。例如，微藻在二氧化碳捕获和利用方面得到了广泛研究，包括在大规模(5000 英亩)种植系统中使用微藻以生产生物燃料和生物制品的原料的广泛研究。当它们用于污水处理，与陆地植物相比，它们的运行速度更快，它们可以与 AD 集成以提供额外的基质和调节生物固体，捕获和利用 CO_2 并将沼气升级为生物甲烷，甚至使用 H_2S 作为电子供体。光生物反应器设计的最新进展提高了基于光生物的系统生物降解潜力，同时降低了它们的能源需求，本章将对此进行批判性讨论。

另一个用于同时处理污水、资源回收以及碳捕获和利用的有前景的技术平台是微生物电化学技术 (MET)。MET 为面向氧化和还原反应的过程提供了一个极其灵活的平台。MET 系统在阳极室中遵循一个共同的原理，即其中可生物降解的基材被氧化并产生电流。可以直接捕获电流用于发电（微生物燃料电池，MFC）或用于生产 H_2 和其他增值化学品（微生物电解池，MEC）。此外，这些来自有机废碳的电子也可用于阴极室减少二氧化碳并生成有机或无机化合物，实现碳捕获和增值的双重好处。第 6 章介绍了原理和流行的 MET 碳捕获工艺，并讨论了已开发的各种产品和系统。微生物电合成将 CO_2 转化为有机化合物，例如羧酸和 CH_4 ，而微生物电解碳捕获将 CO_2 矿化为碳酸盐产物。此外，电发酵 (EF) 使用电化学来影响微生物代谢和调节发酵途径将有机废碳转化为更高价值的产品，许多人认为它是一种电化学增强的 AD 系统。MET 的一个独特特征是与厌

氧发酵或消化的互补性，其中微生物之间可以发生协同的种间电子转移，以促进电产甲烷或电产乙酸。第 13 章重点介绍此类厌氧生物转化系统中的基本碳和电子流动，以捕获二氧化碳并将其转化为增值有机化学品。

虽然将污水处理转变为碳中和/负碳甚至正收益需要利益相关者的共同努力，但研究表明实施新工艺和技术的潜在好处。图 1.6 展示了微生物碳捕获池 (MECC) 和微藻反应器的假设工艺组合，以取代传统的厌氧/缺氧/好氧活性污泥工艺。MECC 专注于去除有机碳，而微藻可有效去除营养物质。此外，它们都表现出出色的碳捕获和利用 (CCU) 能力，MECC 将 CO_2 转化为碳酸盐矿物并伴随着高速产氢，而微藻捕获 CO_2 作为生物质，随后可以转化为生物燃料或生物炭 (Lu et al., 2018)。以美国和中国为例进行的初步定量分析表明，两国不是温室气体的净排放国，温室气体净排放量高达 112 (中位数；第 5-9 个百分位数范围为 84-145；美国) 和 75 (57-97；中国) MtCO_2e 可以被捕获并转化为增值产品。在这些负排放中，大约 41-56% 和 47-58% 分别归因于有机物和养分去除过程中的 CCU；-2~2% 归功于在 CCU 期间避免消耗化石能源 (避免曝气等；负值源于不确定性分析)。就经济效益而言，虽然所提议的系统的资本支出和运营成本可能比传统工艺更高，但回收的矿物和生物燃料产品可能每年分别为美国和中国创造 8.7(6.9 - 109)亿美元和 5.6(4.4 - 69)亿美元的价值。此外，两国的碳捕集信用也可以相应地为美国和中国的污水处理行业筹集 4.5(3.3-6.2)和 1.0(0.7-1.5) 亿美元。这些估计表明，污水处理行业可能成为负碳排放的重要贡献者，尽管还需要大量的技术开发和测试，因为这两种工艺都没有得到全面证明。

水务公司收集和存储大量数据以提供可靠和高效的服务。收集的数据不仅包括每个处理设施的水量和水质数据，还包括来自流量监视器的实时数据、流域内的雨水和流量测量仪，以及端点和水/下水道管道中的数据。数据已成为公用事业的重要资产，并将在未来的公用事业中发挥越来越重要的作用。因此，第 16 章介绍了现代数据驱动建模 (DDM)，包括统计和机器学习方法，并使用具体示例演示如何在更大的脱碳战略中使用这些工具。本章解释了数据准备、常见的 DDM 方法以及用于比较不同模型的指标。它还分析了单元流程以及数据驱动的流程优化如何成为众所周知的“低风险、高回报”降低碳和成本的方法。

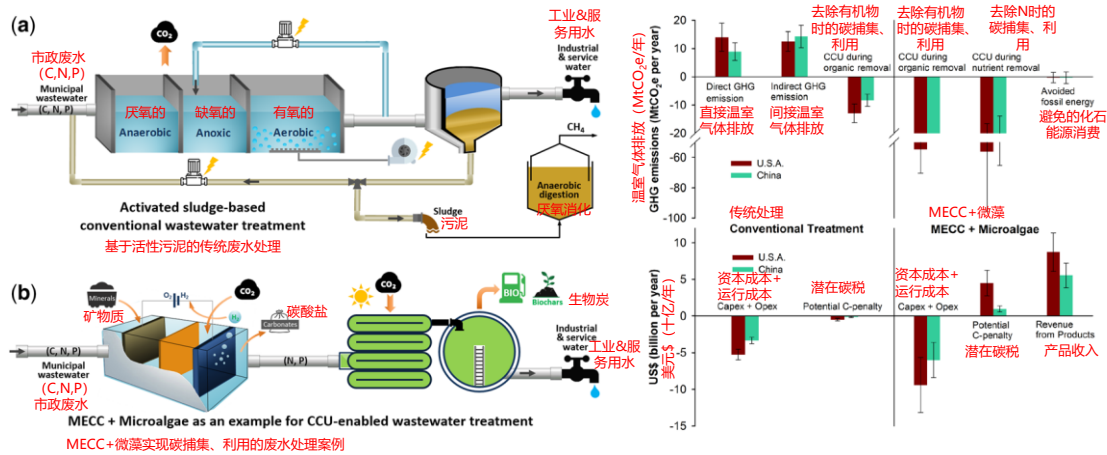


图 1.6 MECC + 微藻工艺与传统活性污泥工艺相比，碳捕获和利用效益的初步估算：(a) 同时进行脱碳和养分去除的传统厌氧/缺氧/好氧活性污泥工艺；(b) 将 MECC、微藻培养与资源回收和 CCU 结合起来进行碳和养分去除工艺；(c) 将传统工艺与 MECC + 藻类工艺进行比较，CCU 潜力和经济影响的初步估计

1.2.5 公用事业脱碳实践案例研究

许多领先的公用事业公司已经制定了在未来十年内实现能源和气候中和的计划，并且有许多案例研究和最佳实践可供遵循。例如，奥地利的 Strass im Zillertal 工厂一直是持续优化工艺的典范，它实现了发电量大于消耗量的目标。Strass 工厂提供两级生物处理（A/B 工厂）来处理从 60 000 到 250 000 人口当量（每周平均）不等的有机负荷，他们实施了 SBR 脱氮工艺，以进一步降低脱氮所需的能源和碳需求。它还通过热电联产提高了沼气的利用率，并将电效率提高了 20% 以上。他们为受过高等教育的劳动力、高度自动化、先进分析工具的使用以及量化收益的能力做出了成功贡献(Wett et al., 2007)。另一个例子是 VCS Denmark，它是丹麦最古老的水务公司，自 1907 年以来一直在欧登塞都会区管理和处理污水。自 2019 年以来，VCS Denmark 一直保持能源中和，这是通过最大限度地提高初级处理效率、工艺强化、先进的监测、控制和节能设备实现的。他们还与区域能源公司合作安装热泵站，以从污水中提取热能，用于当地区域供暖。

加利福尼亚州的东湾市政公用事业区(EBMUD) 是 2012 年北美第一个实现能量正收益的 WRRF。2020 年，它批准了一项雄心勃勃的计划，到 2030 年实现水务行业的碳中和。消化，将污水中的可生物降解废物、当地餐馆的食物残渣

和油脂，以及酿酒厂和家禽养殖场的废物流混合在一起进行厌氧消化。通过减少电力需求，增加的沼气产量每年为该地区节省约 300 万美元。多余的可再生能源被卖到电网，以减少化石燃料的使用和温室气体排放，并为纳税人节省开支。为实现碳中和目标，该地区还完成了几个新的千瓦光伏系统，将所有乘用车转换为混合动力或电动汽车，并将重型车辆转换为可再生柴油车。

中国拥有世界上最大且仍在增长的污水处理行业。从 2000 年到 2018 年，中国城市的污水处理厂总数增加了 10 倍，从 481 座增加到 5640 座 (Qu et al., 2019)。正如第 15 章所解释的那样，2014 年，中国成立了概念污水处理厂委员会 (CCWC)，该委员会收集了全球的见解，并与国内合作伙伴合作，启动了“概念工厂”项目，旨在建设实现“可持续水质、资源回收、能源中和及环境友好”综合目标的未来处理厂。第一个概念厂睢县第三污水处理厂于 2019 年开始运营，设计流量为 2 万立方米/天，服务人口 90 万。该厂包括一个液体处理区、一个有机废物处理区、一个人工湿地、农业和海绵城市示范区、办公楼和教育中心。2021 年，另一座最先进的宜兴概念处理厂投产 (图 1.7)。该厂由 2 万立方米/天的净水中心、以生产为导向的研发中心和有机协同处理中心组成，将污泥、厨余垃圾和农业废弃物转化为能源和肥料。CCWC 计划在未来 5-8 年内建造 100 座概念处理厂，其设计考虑到地理因素差异、能力、处理重点和综合运营目标。



图 1.7 江苏省宜兴概念污水资源厂的设计图和鸟瞰图(插入图) (Qu et al., 2022)。该工厂于 2021 年 10 月运营

1.3 净零循环水经济的范式变革

“水资源管理是一条路径，而不是目的地。”同样的理念也适用于水的脱碳。这就是我们追求脱碳、确定多种途径、尝试和改进它们并将其扩展到整个水务行业的方式，这将带来积极的结果。IWA 前主席 Glen Daigger 教授在最后的第 18 章总结了水务专业人士的核心使命。水务公司治理和基础设施的演变反映了投资的进展，以解决其社区最紧迫的需求。水资源管理的使命随着时间的推移而发展，从最初关注可靠供水和预防疾病传播到包括水资源恢复、水/下水道管理、公共卫生保护和可持续发展等多方面目标，不仅考虑到经济，还有环境和社会影响。随着我们从当前的线性经济过渡到循环经济，变革的势头正在加速，水务行业可以而且应该在提供基本公共服务方面发挥领导作用。

本书中的主题阐述了水务行业目前可用于脱碳和过渡到循环水经济的许多机会。许多创新者和早期采用者正在研究各种方案、进行试验和执行项目，以提高能源效率、减少碳足迹并从“全水”（OneWater）循环中回收资源。产品没有好坏之分，但对于特定的实用程序来说，产品可能有对错之分。资源需要回收，碳足迹需要减少，但我们也需要认识到，除非产品有足够的市场需求、有效的价值主张和脱碳对社会的切实利益，否则从长期来看所做的任何改变都将不可持续。

没有单一的解决方案就可以实现净零排放，因此所有利益相关者必须共同努力，共同改变水务行业的规划、投资和运营方式，同时考虑到平衡的近期和长期目标。以下章节中列出的路径是通过展望该行业以及个别公用事业可能的净零未来而制定的，它们为该行业迈向循环经济提供了重要见解，以确保子孙后代的可持续发展。

参考文献

- Delre A., Mønster J. and Scheutz C. (2017). Greenhouse gas emission quantification from wastewater treatment plants, using a tracer gas dispersion method. *Science of the Total Environment*, 605–606, 258–268, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.177>
- Griffith D. R., Barnes R. T. and Raymond P. A. (2009). Inputs of fossil carbon from wastewater treatment plants to US rivers and oceans. *Environmental Science & Technology*, 43(15), 5647–5651, <https://doi.org/10.1021/es9004043>
- IEA (2017). *Water-Energy Nexus*. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/water->

energy-nexus (accessed 18 November 2021).

IKI (2020). Water Companies on The Way to CO₂ Neutrality. Available at: https://www.international-climateinitiative.com/en/news/article/watercompanies_on_the_way_to_co2_neutrality (accessed 18 October 2021).

Jacobs (2020). One Water. Available at: <https://www.jacobs.com/solutions/water/one-water> (accessed 18 November 2021).

Lu L., Guest J. S., Peters C. A., Zhu X., Rau G. H. and Ren Z. J. (2018). Wastewater treatment for carbon capture and utilization. *Nature Sustainability*, 1(12), 750–758, <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0187-9>

Qu J., Wang H., Wang K., Yu G., Ke B., Yu H. Q. and Gong H. (2019). Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 13(6), 1–7.

Qu J., Ren H., Wang H., Wang K., Yu G., Ke B. and Li J. (2022). China launched the first wastewater resource recovery factory in Yixing. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16(1), 1–2, <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1429-z>

Saunio M., Stavert A. R., Poulter B., Bousquet P., Canadell J. G., Jackson R. B. and Zhuang Q. (2020). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623, <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>

Sedlak D. (2014). *Water 4.0*. Yale University Press, New Haven, CT, USA.

Torregrossa D., Hansen H., Hernandez-Sancho F., Cornelissen A., Schutz G. and Leopold U. (2017). A datadriven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in waste water treatment plants. *Applied Energy*, 208, 1430–1440, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.012>

UNEP (2017). *The Emissions Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report*. UN Environment, Kenya.

USEPA (2019a). *Global Non-CO₂ Greenhouse Gas Emission Projections & Mitigation 2015–2050*. USEPA, USA.

USEPA (2019b). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. Available at: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sourcesgreenhouse-gas-emissions> (accessed 18 October 2021).

Vasilaki V., Massara T. M., Stanchev P., Fatone F. and Katsou E. (2019). A decade of nitrous oxide (N₂O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: a critical review. *Water Research*, 161, 392–412, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.022>

Water Environment Federation (2019). *ReNEW water project: resource recovery to fuel and grow a circular economy*. WEF, USA.

Water UK (2020). *Net Zero 2030 Routemap*. Available at: <https://www.water.org.uk/routemap2030> (accessed 18 October 2021).

Wett B., Buchauer K. and Fimml C. (2007). Energy self-sufficiency as a feasible concept for wastewater treatment systems. 4th IWA Leading-edge Conference and Exhibition on Water and Wastewater Technologies, IWA, United Kingdom.