

第十五章 中国污水处理概念厂

Jiuhui Qu^{1,2*}, Hongqiang Ren^{2,3}, Hongchen Wang^{2,4}, Kaijun Wang^{1,2}, Gang Yu^{1,2}, Bing Ke^{1,5}, Han-Qing Yu^{1,6}, Xingcan Zheng^{1,7} and Ji Li^{1,8}

¹School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Expert Committee for China's Concept WWTPs, Beijing 100044, China

³School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 212013, China

⁴School of Environment and Nature Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

⁵Administrative Centre for China's Agenda 21, Ministry of Science and Technology, Beijing 100038, China

⁶CAS Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

⁷North China Municipal Engineering Design & Research Institute, Tianjin 300074, China

⁸School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

*Correspondence: jhqu@rcees.ac.cn

15.1 引言

在过去的几十年里，中国见证了公共基础设施的快速增长。为了保持城市和工业的快速发展，政府和专家正在寻求解决经济发展遗留的环境问题的办法。从2000年到2018年，中国城市污水处理厂的总数增加了10倍，从481座增加到5640座。与此同时，政府计划在不久的将来新建数千个污水处理厂（WWTPs）。为探索适合中国的污水处理模式，2014年由多位学术带头人发起的中国污水处理概念厂委员会（CCWC）成立。委员会提出了实现21世纪中国污水管理目标的宏伟愿景。他们为这些未来的污水处理厂提出了一个新概念：集可持续水质、资源回收、能源中和与环境友好于一体的处理厂，他们称之为“概念厂”。中国的污水处理概念厂有望引领全国污水处理行业的范式转变。

水污染控制是当前中国面临的最紧迫的挑战之一(Lu et al., 2015; Yu et al., 2019)。在环境污染治理中，污水处理起着举足轻重的作用。中国虽然拥有世界上最大的污水处理能力和市场，但其污水处理行业的发展历史其实很短。直到40年前，几起公共环境事件使得水环境保护变得紧迫，在此之前中国的污水管理几乎是一片空白。20世纪80年代，国家环保部成立，天津第一座处理能力为26万

m³/天的大型污水处理厂建成。此后，伴随着经济的快速发展和城市化，城市污水量急剧增加，由于进入下水道的工业废水越来越多，污水成分变得越来越复杂。为了应对这些挑战，中国开始建设更加集中的污水处理厂和配套设施。到“十二五”末期，建设速度和污水处理厂规模逐年不断增加（图 15.1）。

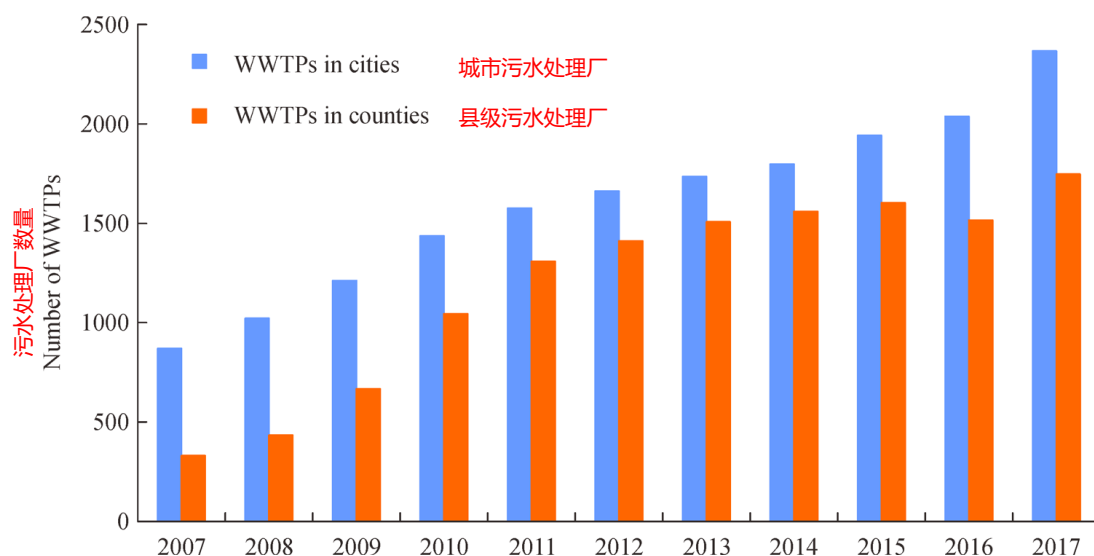


图 15.1 2007-2017 年中国城市污水处理厂数量增长情况(Qu et al., 2019)

中国的水环境污染也加剧了水资源的短缺，特别是在缺水情况更为严重的华北地区。为了克服这一限制，污水回收和再利用变为一条关键途径。北京在这方面一直走在前列，在水循环基础设施建设方面取得了很大进展。2016 年，处理能力为 100 万 m³/天的北京高碑店污水处理厂成功升级为再生水厂，这标志着中国污水管理从单纯的处理向再生利用的转变。但是，中国整体的中水回用率仍然很低，中水水质比较差，主要作为景观水回用。目前，再生水在价格上仍无法与传统供水竞争，中水回用基础设施和项目建设进展缓慢。

经过近 40 年的快速发展，中国污水处理行业已成长为世界第一。现有市政污水处理厂 5000 多个，日处理能力近 2 亿立方米（图 15.1）。相应地，污水处理率大幅提高，到 2018 年达到 90%。这些污水处理厂减少了污染物排放，在水环境保护中发挥着关键作用。污水管理模式也从单一的政府主导建设和运营转变为政府和企业共同参与的多元体系。这种转变不仅在一定程度上减轻了政府的财政负担，而且提高了污水处理设施的建设和运营效率。

15.2 中国城市污水处理设施目前面临的挑战

尽管取得了令人瞩目的进展，但中国污水行业以政府为主导、依附型的发展也留下了许多问题。特别是与发达国家相比，污水处理设施的设计和运行性能存在相当大的差距。例如，大多数处理厂的设计和运营没有考虑可持续发展的需求，而是过分强调污染物减排，以满足严格的国家 1A 级排放标准。因此，在大多数污水处理厂中，初级沉淀池被省略，而延迟曝气和增加额外的生物过滤被广泛采用，这导致过度处理并显著增加能源/化学品消耗（图 15.2）。下水道系统发展滞后，特别是在县一级，情况更加严重。因此，中国的污水管理一方面存在污水收集不足的问题，另一方面污水处理厂的运行率较低。城市污水收集不足，加上雨水的稀释，显著降低了污水的有机污染物浓度，这导致处理变得复杂（图 15.2）。

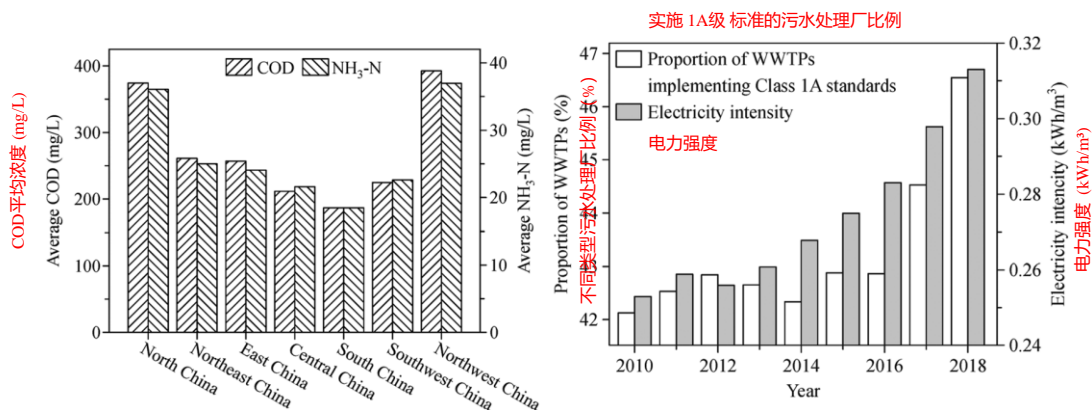


图 15.2 (左)中国污水处理厂进水 COD 和 NH₃-N 浓度的地理分布；(右)中国实施 1A 级污水排放标准的污水处理厂比例及污水处理厂能耗强度(Qu et al., 2019)

然而，污水中的有机物含量通常太低，这无法支持有效的反硝化。为了解决这个问题，必须使用外部电子供体，例如甲醇。此外，污水污泥的低有机物含量和高砂成分也阻碍了其厌氧消化，而厌氧消化是世界范围内回收生物能源的常见做法。据估计，中国只有不到 3% 的污水处理厂配备了厌氧消化模块，而且其中很大一部分运行不良(Jin et al., 2014; Zhang et al., 2016)。因此，目前中国的污水处理厂几乎没有能量回收，更谈不上对养分和资源的回收。如何提高中国污水处理的可持续性仍然是一个亟待解决的关键问题。

15.3 污水处理概念厂为未来的发展提供了远景和榜样

中国污水处理行业在基础设施建设和技术创新方面取得了显著进展。但是，随着未来持续的人口增长和城市化进程，水资源短缺将更加严重，城市生态可能会更加脆弱。因此，污水管理的目标正在从单纯的污染物减排转向中水回用、资源回收和水生态修复。中国最近的政策变化反映了这一点(Wang & Gong, 2018)。

多年来，中国一直在实施末端污染控制策略，即强调污水处理和水环境修复。然而，总体环境质量没有得到明显改善。2015年，中国政府发布了《水污染防治行动计划》(The State Council, 2016)，开启了水环境保护新时代，这一计划旨在改善整体水生态环境质量，而不是简单的水质控制(Hansen et al., 2018; Holdgate, 1987)。这意味着污染控制的范围将从污水处理厂延伸到上游污水管网及下游河流和湿地。

为了将污水处理厂从污染物去除场所变成能源、水和肥料生产工厂以及城市生态的组成部分，2014年多位来自中国顶尖研究机构、大学和政府的专家联合提出了建设污水处理厂的计划，提出全新的“概念厂”(Jin et al., 2014)。本届中国污水处理概念厂委员会(CCWC)设想，概念厂将在2030-2040年实施，践行低碳理念，集中应用和展示已经和将要设计的全球先进技术，以充分满足中国可持续发展的要求，并期望成为世界市政污水处理厂的标杆。几年来，CCWC汇聚了全球洞见，与国内多家机构建立了合作关系。开展了座谈交流、参观考察、合作研究、方案制定、工程实践、反馈收集等工作。2015年，CCWC发起并主办了以“概念厂-水未来-我的心”为主题的“城市污水处理概念厂”校园创意设计大赛。来自全国100多所高校的近千名学生参加了本次比赛，有效地启发了污水处理行业的思维，向社会尤其是年轻一代传递了新的理念(图15.3)。



图 15.3 校园创意设计国际竞赛“水的未来—我心目中的污水处理概念厂”

CCWC 成功地将污水处理概念厂付诸实践。在河南睢县完成首次实践，江苏宜兴正在建设另一家概念厂。在不久的将来，宜兴概念厂将成为最具指导意义的处理厂，引领污水处理厂升级为大型、可持续的处理厂。2018 年，第一个概念厂通过公私合作（PPP）模式在河南省睢县建成（图 15.4）。



图 15.4 睢县第三污水处理厂鸟瞰图和风貌

建成的睢县第三污水处理厂服务于约 900,000 人口，平均污水处理能力达 40,000 m³/天 (CMD)。在第一阶段，平均设计流量为 20,000 CMD。该工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、一个农业和海绵城市示范区、一个办公楼和教育中心。污水通过初级处理（筛网和曝气沉砂池）、初级净化和发酵后，再经过能够生物去除营养物的步进式活性污泥工艺进行处理。次级出水通过反硝化过滤器进行抛光并通过臭氧消毒，这对于破坏微量新污染物也是有效的。处理后的污水通过人工湿地，补充当地的地表水体。良好的出水质量使其有可能在工业中重复使用。

有机垃圾处理系统的设计处理量为 100 吨/天。污水处理产生的污泥与全县畜禽养殖场收集的粪便和农业经营的秸秆共同消化。处理厂使用了 DANAS（干式厌氧系统）工艺，这是一种由 CSDWS 改进而来的干式厌氧消化技术。一期工程设计处理量为 50 吨/天。有机废物处理中心的负荷率达 85%以上。共消化不仅缓解了全县面源污染问题，而且 2020 年还生产沼气 51 万立方米、发电 438765 千瓦时和化肥 4500 吨。人工湿地、农业示范区（利用现场生产的有机肥），与海绵城市示范区共同构成生态公园，实现污水处理与周边环境的协同保护。办公楼设有一个现代化的控制中心和一个展示工厂所采用的处理技术的展厅。它还作为一个教育中心，展示环境保护的重要性以及如何从污水中回收各种资源并进行有益的再利用。

睢县概念厂与当地有机肥厂相结合，采取“以物易物，中间留沼气”的方式，即有机肥厂负责畜禽粪便的收集、储存和运输，概念厂生产的有机肥原料供应给有机肥厂，生产的沼气用于发电。该方法维持了有机废物处理中心的健康运行，实现了污泥的资源化回收和无害化利用。产品符合《中国有机肥标准（NY525-2012）》（图 15.5）。

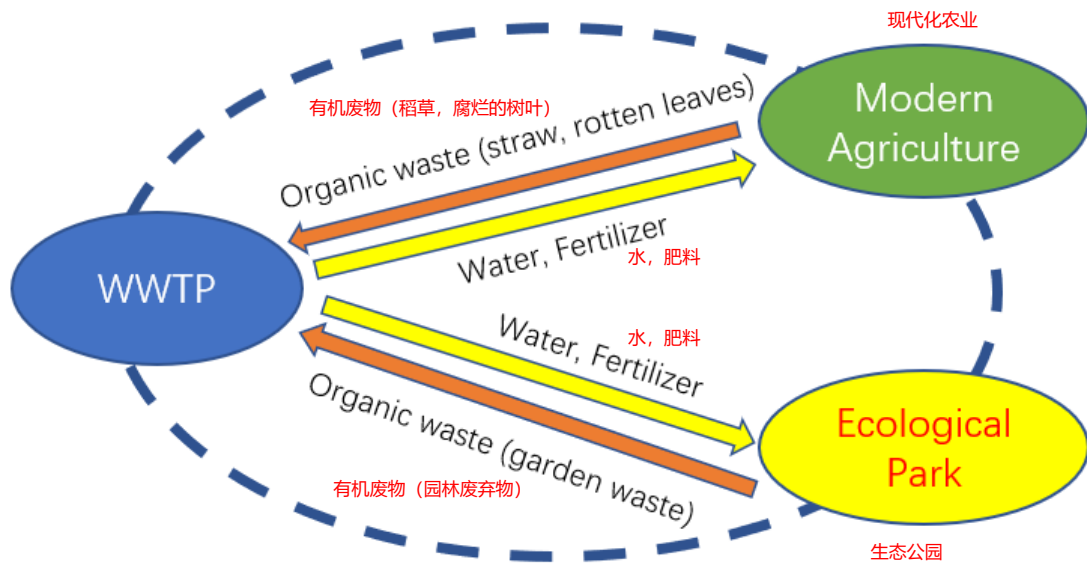


图 15.5 睢县第三污水处理厂中的物质循环

睢县 NO.3 污水处理厂项目实现了 CCWC 制定的目标，获得了国家认可。实现的成就包括 50% 的能源自给自足（图 15.6）。

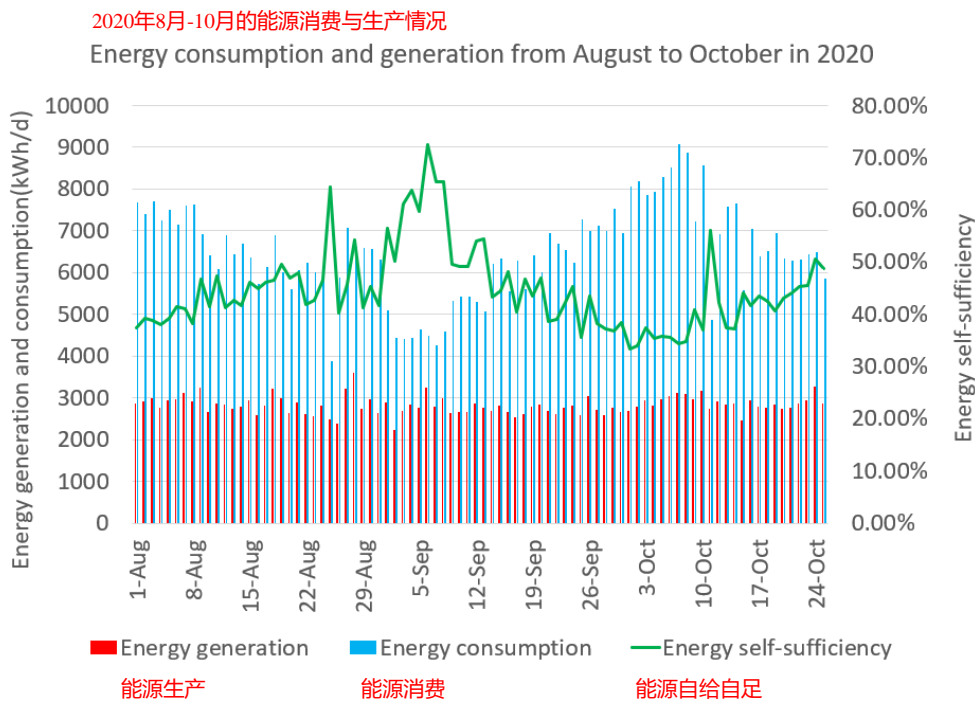


图 15.6 睢县第三污水处理厂中的能源自给情况

另一个例子是宜兴水资源回收设施概念厂（WRRF）。2017 年初至 2019 年底，经过 5 次草稿修改，该处理厂最终由北京市政院、SUP Atelier 和 THUPDI 建筑设计分院共同设计完成，处理厂于 2021 年建设完成。宜兴概念厂不仅将成为水资源回收设施，还将作为一个全面的研发中心，致力于对新兴技术进行全面的

研究和验证。此次全新示范，将污染物减排工厂与能源、水、化肥生产工厂融为一体，将成为与周边社区相结合的新型环境基础设施。希望通过宜兴概念厂，向全社会清晰传达“污水是资源，污水处理厂是资源工厂”的理念，改变公众对污水处理厂的固有认知。

在宜兴建设的城市污水资源概念厂进行“三位一体”建设，由处理能力达2万吨/天的净水中心、100吨/天的有机物协同处理中心，以及一个以生产为导向的研发中心共同组成。污水处理部分实现了卓越的脱氮除磷效率（TN<3mg/L，TP<0.1mg/L，表15.1），其性价比明显优于目前的生活污水厂。有机物协同处理中心可以处理污泥和蓝藻、餐厨垃圾和秸秆来生产能源（能源自给率>60%）和肥料，生产型研发中心由两个最先进的试验设施组成，实时展示全球最先进的污水处理技术（图15.7）。

表 15.1 宜兴市污水资源化概念厂参数

参数	BOD ₅	COD	SS	TN	NH ₃ -N	TP	pH
入水质量, mg/L	150-200	480	250	65	55	5-8	6-9
出水标准, mg/L	<5	<40	<10	<3	<1	<0.1	6-9



图 15.7 宜兴市污水资源化概念厂

在宜兴污水处理概念厂中，将设立一个创新中心，对具有巨大工程潜力的前沿技术进行示范和商业化。这些技术将在污水处理能力为~1000 t/d 的工厂中进

行应用和示范, 打造技术应用案例。宜兴污水处理概念厂将为这些创新技术在该行业的应用和推广提供一个良好的平台。未来几年还将设计和建造另外 4-5 个概念厂。

15.4 污水处理的下一个范式

回顾中国污水处理行业 40 年的快速发展历程, 既有骄人的成绩, 也有无数的失败。虽然中国污水处理基础设施基本建设完成, 但还存在很多问题, 包括下水道和污泥处置设施不发达、能耗高、运行效果不理想、污水处理厂出水排放标准与本国国情和环境保护需求衔接不力等问题, 以及人与自然之间缺乏协同规划。

中国已进入环境治理和生态文明建设时代。在此背景下, 污水处理概念厂的构思和建设, 对未来具有深远的意义。许多水务公司对建设概念厂表现出极大的兴趣和强烈的愿望。中国国家发展和改革委员会最近也发布了关于促进污水资源化利用的指导意见, 这将进一步推动污水处理概念厂的发展。

在全球一体化背景下, 中国面临新的挑战 and 机遇, 到本世纪中叶实现碳中和的承诺以及全球环境治理的大趋势, 正在推动概念厂的持续发展。针对这些新需求, 概念厂委员会需拓宽视野, 开展更广泛的合作, 继续“思-行-创新”, 优化建设模式。中国力争在未来 5-8 年内建成约 100 座概念厂, 这些概念厂因地制宜应用先进技术, 能力各异、特色鲜明、模式多样。这将推动产业建设形态、技术和标准发生重大变革和升级。这些概念厂有望重塑污水行业, 并引领中国和世界的范式转变。

参考文献

- Hansen M. H., Li H. and Svarverud R. (2018). Ecological civilization: interpreting the Chinese past, projecting the global future. *Global Environmental Change*, 53, 195–203, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.014>
- Holdgate M. W. (1987). *Our Common Future: The Report of the World Commission on Environment and Development*. Oxford University Press, Oxford & New York.
- Jin L., Zhang G. and Tian H. (2014). Current state of sewage treatment in China. *Water Research*, 66, 85–98, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.014>
- Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A. J. and Wang T. (2015). Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. *Environment International*, 77, 5–15, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.12.010>

- 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 and Engineering*, 13(6),1–7.
- The State Council. (2016). *The 13th Five-Year Plan for the Construction of Urban Sewage Treatment and Recycling Facilities*. The State Council of the People's Republic of China, Beijing (in Chinese).
- Wang M. and Gong H. (2018). Imbalanced development and economic burden for urban and rural wastewater treatment in China – discharge limit legislation. *Sustainability*, 10(8), 2597, <https://doi.org/10.3390/su10082597>
- Yu C., Huang X., Chen H., Godfray H. C. J., Wright J. S., Hall J. W. and Taylor J. (2019). Managing nitrogen to restore water quality in China. *Nature*, 567(7749), 516–520, <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1001-1>
- Zhang Q. H., Yang W. N., Ngo H. H., Guo W. S., Jin P. K., Dzakpasu M. and Ao D. (2016). Current status of urban wastewater treatment plants in China. *Environment International*, 92, 11–22, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.03.024>