

• 水业导航 •

城镇污水处理的发展方向与技术需求

中国人民大学环境学院副院长 王洪臣

经过近十年的高速建设,我国已建成并投入运行了3 500多座城镇污水处理厂,日总处理能力达到了1.4亿 m^3 ,已与美国基本相当。随着水污染控制工作的不断深入和城镇化进程的加速,我国城镇污水处理设施建设还将处于高速发展期,并有可能在未来十年内完成城镇污水处理设施的基本建设任务。但是,基本建设的完成并不意味着发展停滞,这些设施离社会可持续发展的要求还存在较大差距,已建设设施的提升改造将是一项长期的任务。事实上,现有设施的提标改造几年前就已在重点流域展开。通过不断提升改造,新技术、新材料和新设备得以应用,城镇污水处理设施更加高效地满足人类社会发展要求。在大规模设施建设即将完毕、已建设设施改造即将全面展开之际,系统梳理我国城镇污水处理未来发展方向和技术需求,是一个有着重要现实意义的课题。

1 城镇污水处理的发展方向

目前,世界面临着水污染、缺水、气候变化、能源危机以及资源枯竭等许多危及人类社会可持续发展的重大问题,而城镇污水处理与这些人类社会重大问题密切相关,城镇污水处理的发展应对这些重大问题的解决有所贡献。

控制水污染是城镇污水处理设施的基本功能,这一功能未来需要继续得以强化。一方面,随着经济社会发展,污染强度不断增大、污染物种类日趋复杂;另一方面,随着公众环境意识的加强,水环境质量要求也必将不断提高。因此,城镇污水处理应进一步提高处理标准,降低出水中有机污染物和氮磷无机营养物的浓度,强化对内分泌干扰物等新兴污染物的去除,满足水环境要求。

高水平的城镇污水处理是实现水资源可持续利用的前提。中国水资源总量27 000亿 m^3 ,但可利用水资源量仅约8 000亿 m^3 ,目前用水量已超过6 000亿 m^3 ,缺水问题日益突出。虽然存在跨区域调水以及海水淡化等多种选择,但总体上,只有将城

镇污水进行深度或超深度处理,彻底恢复其使用功能,实现水资源可持续利用,才能从根本上应对水危机,解决中国的缺水问题。

日益明显的气候变化问题要求城镇污水实现低碳处理。城镇污水处理是重要的碳排放源,包括直接排放和间接排放。直接排放是指污水处理过程中有机物厌氧分解直接向大气排放的甲烷和氮素生物转化过程中向大气排放的一氧化二氮。间接排放是指污水处理电耗以及所耗化学品在生产过程中发生的碳排放。美国城镇污水处理耗电导致的间接碳排放约占全社会总排放当量的1%,污水处理直接碳排放约占总排放当量的0.42%,直接排放与间接排放总计约占总排放当量的1.42%。城镇污水处理行业虽小,但却是一个不容忽视的碳排放源,应实现低碳处理。

日益严重的能源危机要求城镇污水处理过程进行能源开发,提高能源自给率。城镇污水处理是高能耗行业,美国城镇污水处理(POWT)电耗占全社会总电耗的3%,中国城镇污水处理电耗已突破100亿 $kW \cdot h$,且将继续增大。另一方面,城镇污水中“蕴含”着巨大潜能,有待开发。据美国计算,污水潜能是处理污水耗能的10倍!全球每日产生的污水中潜能约相当于1亿t标准燃油,污水潜能开发可解决社会总电耗的10%。基于欧洲经验,仅采取以节能降耗为目标的提效改造措施和高效厌氧消化回收能量等传统技术,城镇污水处理能源自给率就可达到60%以上。

城镇污水处理是资源循环利用的重要载体。除水资源循环利用外,污水处理过程可实现有机质及磷等资源的循环利用。污水处理产生的污泥经稳定化处理可形成类腐殖质(like-humus),通过农业循环利用可增强土壤团聚性能,增加透气性和持水性能,提高地力。全球磷资源分布严重不均:摩洛哥占42%,美国7%,欧洲1%。总体上,全球磷资源行将枯竭,中国储量也只有20~50年,必须构建起磷素的持续循环体系,而城镇污水处理是磷循环的重要途径。日

本 2008 年进口磷肥或矿石折合磷素 26 万 t, 如将污水中的约 5 万 t 磷素回收利用, 可解决进口量 20%。

综合分析, 人类社会的可持续发展对城镇污水处理存在多目标要求: 提高出水水质, 满足水污染控制和水资源可持续循环利用的需要; 节能降耗、控制碳排放, 实现低碳污水处理; 开发污水潜能, 提高能源自给率, 并逐步实现清洁能源的净输出; 回收有机和无机资源, 实现资源的循环利用。因此, 城镇污水处理未来发展方向可归纳为: 提高水质、低碳处理、开发能源、回收资源。

2 城镇污水处理的技术需求

按照城镇污水处理发展方向, 未来存在以下技术需求: 污水深度和超深度处理技术, 具体包括营养物深度去除技术、新兴污染物去除技术和高品质再生水超深度集成处理技术; 低碳污水处理技术, 具体包括可持续新工艺、节能降耗运行优化与高效控制技术以及节能降耗新设备的应用; 污水处理能源开发技术, 具体包括污水能源开发技术和污泥能源开发技术; 污水处理资源回收技术, 具体包括 PHA 生物塑料回收技术和磷回收技术。

3 基于需求的城镇污水处理技术进展

基于城镇污水处理的以上技术需求, 世界各地开展了大量技术研究和应用实践。

3.1 污水深度和超深度处理技术

城镇污水处理的深度处理通常是指在传统生化处理基础上对有机污染物的深度去除, 技术总体上已经成熟。美国城镇污水深度处理率超过 50%, 北欧已经达到 90%。AAO 工艺是最基本的营养物去除技术 (BNR), Bardenpho、UCT、MUCT、MBBR、IFAS 和多级 A/O 等革新工艺使脱氮除磷效率得以提高, 属于营养物强化去除技术 (EBNR), 这些技术在美国五大湖、切萨匹克湾以及墨西哥湾等重点流域得以普遍应用。

目前, 出于严格控制封闭水体富营养化和治理近海海域缺氧区 (Hypoxia Zone) 的需要, 对无机营养物的深度处理技术成为研究热点。无机营养物的深度处理技术是指总氮出水低于 3 mg/L、总磷出水低于 0.05 mg/L 的处理技术, 也称之为 LOT (Limit of Technology) 技术。反硝化滤池出水总氮可低于 3 mg/L, 已有许多应用, 但碳源利用效率不高, 碳源消耗巨大。

美国研发的 Blue NITE 技术出水总氮可低于 1 mg/L, 且碳源消耗量大大降低。由于絮体在沉淀过程中存在磷的释放, 传统化学除磷技术难以实现出水总磷低于 0.05 mg/L。美国研发的改性砂滤 Blue PRO 和磁分离 CoMag 等技术可以达到相应水质要求。目前, 研究机构正在研究开发专性高效吸收材料, 对磷进行选择吸收, 进一步降低出水总磷浓度。

目前, 城镇污水中的越来越多的新兴污染物 (Emerging Contaminants) 是城镇污水处理面临的另一问题。这些污染物可分为两大类: 内分泌干扰物 (EDCs, endocrine disrupting chemicals) 和药物及人工护理品 (PPCPs, pharmaceutical and personal care products)。这些污染物浓度虽然为 ng 级, 属于微量或痕量, 但对人体健康影响巨大! 去除这些污染物是城镇污水处理的新任务。现在的主要技术路线是在传统处理流程特别是生物处理单元中与其他污染物实现共去除。目前为止, 主要的研究结论有: 长世代期慢速增长的微生物去除效率高; 自养微生物较异养微生物去除效率高很多; 大泥龄系统较短泥龄系统高。因此, 硝化细菌较异养细菌去除能力强; MBR 和生物膜系统较其他工艺去除效率高。对于传统的生物处理系统, 新兴有机污染物去除效率与污泥龄 (SRT) 高度相关。澳大利亚东南昆士兰 6 座污水处理厂检测发现, 当污泥龄大于 15 d 时, EDCs 的去除率为可超过 90%。但是, 对于微量或痕量污染物, 还需采取措施进一步提高去除效率。美国研究的 Blue CAT 等高级氧化砂技术可获得 99.9% 以上的去除效率, 并可同时将重金属去除到 ng 水平。

随着对再生水水质要求的不断提高, 各地对高品质再生水超深度集成处理技术也投入了较大的研究力度, 出现了许多高品质再生水的单元或集成技术。其中, 最突出的是澳大利亚的研究。昆士兰大学与多家水务公司及研究机构成立了专门研究联盟, 研究以饮用水水质为目标的高品质再生水超深度集成处理技术, 初步提出了包括 7 级屏障的工艺流程: 源头控制 (控制各类污染物尤其新兴污染物)、污水处理 (去除传统有机污染物和营养物)、微滤膜分离 (降低或去除浊度、颗粒、细菌、原生动物、病毒)、反渗透 (控制或去除浊度、颗粒、细菌、病毒、无机盐、痕量有机物)、高级氧化 (痕量有机物、病

毒)、自然环境(痕量有机物、病毒)和供水消毒。

3.2 低碳污水处理技术

基于有机污染物去除的可持续污水处理新工艺主要是厌氧处理技术,能耗低,且可回收能源。高浓度有机废水的厌氧技术已成熟,但城市污水有机物浓度低,厌氧处理存在投资大和占地大等障碍。目前,城镇污水厌氧处理方向研究的热点是厌氧膜生物反应器 *AnMBR*,与传统厌氧工艺相比,可大幅度减少占地,但技术成熟度离生产性应用尚存在差距。另一类可持续污水处理工艺是低能耗、低碳源消耗的脱氮工艺,有很多种类,但主要包括基于短程反硝化原理的 *SHARON* 工艺和基于厌氧氨氧化的 *AN-NAMOX/DEMON* 工艺。与传统的 *AAO* 工艺相比,*SHARON* 可节约 25% 的能耗、40% 的碳源消耗,而 *ANNAMOX* 工艺可节约 60% 的能耗、90% 的碳源消耗。目前,*SHARON* 和 *ANNAMOX* 在高浓度氨氮污水处理中已较成熟,在污泥回流液处理中已有一批成功案例。在典型城镇污水处理上虽有进展,但离实际应用仍有差距。

污水处理运行优化在节能降耗方面存在巨大潜力。在物料与能流平衡的前提下,依据各工艺参数的变化规律,合理调整并控制溶解氧和回流比,可取得明显节能降耗效果。加拿大、美国以及北欧近两年都在运行优化技术方面开展了大量研究,我国在水专项中也安排了相应研究。高效控制技术的研究进展为运行优化技术的应用提供了手段。其中,精确曝气控制技术可使曝气池的溶解氧按运行优化要求得以准确控制。另外,基于微波污泥含固量在线测定的污泥加药量控制技术也可使脱水药耗大大降低。

节能降耗新设备的应用对低碳污水处理也有较大的贡献。近两年,鼓风机曝气有向超微孔发展的趋势,超微孔曝气器在 6 m 的典型水深下氧转移效率可超过 40%;空气悬浮鼓风机和磁悬浮鼓风机的逐步普及使鼓风机的机械效率有所提高;线性水下搅拌器的使用提高了厌氧段和缺氧段的搅拌效率。另外,被誉为机械工业“第二次革命”的磁驱动技术也开始在污水处理设备中应用,整体可望获得 10% 左右机械效率的提高。

3.3 污水处理能源开发技术

厌氧膜生物反应器 *AnMBR* 既是可持续污水处

理新工艺,也是有前景的污水能源回收技术。生物电化学技术是近十年来的研究热点,包括微生物燃料电池(*MFC*) 产电技术和微生物电解电池(*MEC*) 产氢技术。理论上,微生物燃料电池可使污水的能源回收率超过 80%,但仍存在反应器放大的困难,离生产性应用还相距甚远。

污泥厌氧方向的能源化包括厌氧发酵产乙醇、厌氧发酵产氢和厌氧消化产甲烷三个技术路径。产乙醇技术虽然成熟,但能源转化率较低;产氢技术目前仍存在反应器放大的困难,制约生产性应用;实践中普遍采用的是厌氧消化技术。传统厌氧消化技术源转化率在 30% ~ 40%,而高级厌氧消化技术(*Advanced Anaerobic Digestion*) 可提高到 50% ~ 60%。高级厌氧消化技术包括高温厌氧消化、温度分级厌氧消化(*TPAD*) 和酸-气两相厌氧消化。污泥预处理技术近年来进展较快,具体包括超声细胞破碎技术、微波细胞破碎技术、生物酶水解技术、生物细胞破碎(*BIODIET*)、电絮凝技术、聚焦电脉冲技术、热水解技术和化学细胞破碎技术(微污泥 *Micro-Sludge*)。目前应用较多的是热水解技术,世界各地已有几十个成功案例。污泥热水解预处理是将脱水后污泥在高温高压水蒸汽下进行水解反应。污泥热水解后,降低了污泥的粘滞性,且生物细胞被破壁后细胞质释放出来,缩短了后续厌氧消化时间,提高了产气率,消化污泥的脱水性能也得以提高。

3.4 污水处理资源回收技术

通过稳定化污泥的农业循环利用,使污水中的各种资源回到土壤,实现碳、氮、磷的可持续资源循环利用,是资源回收的最重要途径。

将污水中的碳资源经生物转化合成 *PHA* 生物塑料也是研究热点之一,目前中试规模已经成功,但尚未实现产业化。

鸟粪石磷回收工艺已有多年的研究积累,目前荷兰已有生产性示范厂投入运行。日本研究从污泥焚烧灰中回收磷,并已在岐阜市污水处理厂建设了焚烧灰磷回收示范设施,主要原理为:将碱性溶液加入污泥焚烧灰,维持 50 ~ 90℃ 的反应温度,然后进行固液分离,分离后的溶液称为磷提取液,固体称为脱磷灰;将熟石灰加入磷提取液中,将磷以磷酸钙的形式沉淀下来,作为磷肥原料。