

综述述评

小城镇无害化 资源化水处理技术研究与应用

张凯松, 周启星, 孙铁珩

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016)

[摘要] 针对我国水资源短缺和小城镇水环境污染的恶化趋势, 概述了适用于在小城镇实施的污水无害化、资源化处理技术及发展现状, 提倡对小城镇污水进行无害化处理后进行资源化利用, 因地制宜地发展小城镇污水处理技术, 还就无害化、资源化水处理技术在我国中小城镇应用前景进行了分析与展望

[关键词] 小城镇; 污水资源; 无害化; 资源化; 水处理技术

[中图分类号] X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)02-0088-05

引言

水不仅是人类生存的基本条件, 也是国民经济发展的生命线。水资源短缺和水环境污染已成为制约我国当前小城镇社会、经济和生态环境可持续发展的重要因素。随着小城镇和乡镇企业的快速发展, 水污染正从城市扩大到广大农村, 局部地区扩大范围更大, 从流域的一部分扩大到全流域, 从点源扩大到面源, 面源污染问题日益严重^[1~3]。入世后, 我国还将面临发达国家向我国转移耗水量高和污染严重工业企业的挑战。最近, 随着国家对大中城市污水排放控制的加强, 污染严重的产业有向小城镇和农村转移的趋势。我国沿海地区城镇化建设加快, 乡镇企业发展迅速, 工业布局不合理, 中小企业发展的多样化, 使污水成分复杂化, 加上重效益、轻环保的思想, 现有污水处理设施少, 污水处理率低, 无害化处理后的资源化利用几乎是空白, 水污染形势日益严重^[4~6]。由于长期不合理、过度开发带来的生态环境破坏, 水体自然净化能力持续下降, 形成水体恶性循环。西部大开发战略的实施, 还将大大加快西部的城市化进程。但是, 由于历史和客观原因, 存在进一步加剧我国西部地区

水资源短缺和水环境污染的潜在危险。

1 无害化 资源化水处理技术

城市污水是城市稳定的潜在淡水资源, 污水再生利用减轻了城市对天然淡水需求的胁迫, 削减了水体的污染负荷, 减少了对水自然循环的人为干扰, 是维系健康水循环不可缺少的措施。污水作为资源再利用的前提是提供适合于回用的水质, 因此, 城镇污水资源化的关键在于污水的无害化处理技术。即通过各种经济、有效的实用污水处理技术将污水中的有毒、有害物质分离或将其转化成无害的物质, 且在处理过程中不造成任何潜在的二次污染。国内外大量成功试验和运行结果表明: 工业污水或生活污水经过各种无害化技术处理后, 其出水水质能满足某些行业用水要求或重复利用, 出水可以作为再生水资源利用^[7~9]。

1.1 膜分离技术及集成

膜分离技术(如微粒、超滤等)由于在去除化学污染物和细菌污染方面有独到的优势, 在处理城市污水和工业废水用作回用水已部分进入商业化阶段^[9~11]。但是, 由于本身较高的设备投资、运行维护和管理费用, 严重制约了膜分离技术在城镇污

[收稿日期] 2002-07-15

[基金项目] 中科院“引进国外杰出人才”百人计划项目; 中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-SW-416)

[作者简介] 张凯松(1979-), 男, 安徽太湖县人, 中国科学院沈阳应用生态研究所博士研究生

水处理中的应用。工艺创新和技术集成成为有效的解决办法,膜技术与其它水处理技术的组合工艺正成为研究的热点。膜生物反应器是由膜分离技术与生物反应器结合的生物化学反应系统。由于它的高质量出水、反应器内能维持较高的活性污泥以及较高的硝化效率,越来越受到广泛重视,在处理特殊废水(如 N 浓度高废水)和废水回用情况下膜反应器是非常有效的^[12]。目前,在日本主要用于处理人粪尿和小区生活污水。浸没式膜生物反应器占地面积小,运行费用低。廉价的新型无机膜材料的成功研制将对膜分离技术产生重大影响^[13]。Ueda^[14]等将加压浸没式膜反应器与厌氧硝化池串联,在处理城市生活污水时的连续运行结果证实: BOD, TOC, SS, T_N 和 T_P 的平均去除率分别为 99%, 93%, 100%, 79%, 74%。Chiemchaisri^[15]等通过技术集成使膜生物反应器和中空纤维膜分离组件有机结合,该组合工艺的小试结果良好。

膜分离技术及其与其它工艺的组合系统对污染物的处理效果好,处理规模很适合于小城镇。随着高效、廉价、低能耗的新型膜材料和膜组合工艺的开发和应用,必将在小城镇污水无害化、资源化利用中占有一席之地。

1.2 强化一级处理技术

强化一级处理工艺可分为化学强化一级处理工艺(CEPT)和生物强化一级处理工艺。大量国内外试验和运行结果表明^[16~17]: CEPT 法可对城镇污水中的有毒、有害污染物如 SS, BOD, 细菌、 T_P 和重金属去除率分别可达 90%, 50%~70%, 80%~90%, 80%~90% 和 90% 以上,而常规一级处理去除率为: SS 50%~60%, BOD 25%~40%, T_P 10%。特别是在除磷方面,CEPT 的出水 T_P 可达 1.0 mg/L,这是生物除磷工艺很难达到的,如结合后续生物处理工艺,出水水质可达 0.5 mg/L。

CEPT 不易受气候条件的限制,在寒冷地区有生物处理工艺无法比拟的优势。生物强化一级处理工艺由于应用之微生物及其分泌物良好的絮凝性能,具有对环境无污染、生态安全性高等特点。有试验证明^[6]: 利用回流一级污泥的絮凝吸附作用强化一级沉淀处理生活污水,在适当条件下, COD 和 SS 去除率分别为 60%~70% 和 70% 左右。最为重要的是强化一级处理工艺的基建投资和运行费用较低,易于管理,特别适合小城镇的实际情况。

随着新型安全性能高、高效、廉价的絮凝剂的开发应用,新型强化絮凝工艺和絮凝设施的应用,工艺灵活、费用低廉的强化一级处理必将在小城镇污水处理中发挥更大作用。

1.3 深度处理技术

小城镇污水中 N, P 含量较高, N, P 等营养盐的去除效果仍然是制约城镇污水资源化利用的关键因素之一。Gupta^[18]在自制的曝气生物反应器(RBC)中引入细菌 *T. pantotropha* 同步处理有机物和脱 N,该系统在操作时无需分步处理有机物和 N,不必添加 C 源。Yuichi^[21]进行了活性污泥-微膜-生物反应器脱氮研究。Lee^[19]在膜生物反应器中加入铝盐或沸石使除 P 脱 N 率在 90% 以上。各种形式的组合工艺对 N, P 等污染物去除效果更佳,“强化生物除 N、除 P”系列工艺也在实际应用中取得较好效果^[20, 21]。

Huang 等应用催化氧化方法处理高浓度、高温工业废水,水溶性的 Pt/SDB 催化剂在三相床中能有效地去除废水中的 N^[22]。在日本最新的 N, P 去除技术中,采用三相流动层生物活性碳吸附处理污水中的 N, P,在韩国几家公司进行的试验中获得成功。近年来,大力普及推广的高度组合型净化槽工艺,结合流量调节厌氧流动床法使用,对 N 和 BOD 的去除率比组合处理净化槽提高了 200%, P 的去除率也提高 90% 左右^[3, 5]。

目前,纳米技术发展迅速,纳米材料也开始应用于水处理领域。纳米材料 TiO_2 由于具有抗化学和光腐蚀、性质稳定、无毒、催化活性高、价格低等优点而最受重视,具有广阔的应用前景。纳米材料 TiO_2 在紫外光照射下可使 PCBs 等难降解有机化合物降解,美国、英国、日本等已有将纳米 TiO_2 光催化技术实际应用于水处理的报道^[23],该方法对水中有机污染物浓度很高或其它方法很难降解时优势更明显。纳米材料的光电催化氧化技术和高效吸附被认为是很有发展前途的处理有机废水方法。

1.4 污水生态处理技术

污水生态处理技术以自然生态系统的净化作用为核心,在技术上通过对生态因子的优化与调控,强调在污水污染成分处理过程中植物-微生物共存体系与处理环境或介质的相互协调关系,特别注意污水处理与水资源利用相结合的特点,代表了 21 世纪小城镇污水处理发展的主要方向。

1.4.1 生态工程土地处理系统 完整的生态工程土地处理技术体系主要包括: 慢速渗滤处理系统、快速渗滤处理系统、地表漫流处理系统、湿地处理系统和地下渗滤处理系统等五大技术类型^[3, 24]。从表1可看出, 土地处理工艺的出水水质优于传统的二级处理。其中, 慢渗、快渗处理效果最佳, 大部分指标可达深度处理, 特别是对 N, P 等指标的

去除效果是传统二级处理所不及的, 其出水一般可直接用于农灌或景观用水等回用。研究表明^[25~28], 土地处理系统对食品加工工业污水和酿造工业有机污水的处理以及对农业面源污染的治理也是适用和有效的。这对以农产品加工为主体的小城镇工业废水也是有效的。

表1 生态工程土地处理技术污水处理效果

Table 1 The efficiency of various wastewater land-treatment methods

污水成分 /mg·L ⁻¹	慢渗		快渗		地表漫流		湿地处理系统		地下渗滤		二级
	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	出水
BOD	<2	<5	5	<10	10	<15	10~20	<30	<2	<5	30
SS	<1	<5	2	<5	10	<20	10	<20	<1	<5	30
T _N	3	<8	10	<20	5	<10	10	<20	3	<8	20
NH ₄ -N	<0.5	<2	0.5	<2	<4	<8	5~10	<15	<0.5	<2	15
T _P	<0.1	<0.3	1	<5	4	<6	4	<10	<0.1	<0.3	10
大肠菌群/个·L ⁻¹	0	<100	100	<2 000	2 000	20 000	400 000	4 000 000	0	100	-

1.4.2 稳定塘生态处理系统 稳定塘生态处理系统可以划分为兼性塘、厌氧塘、曝气塘、好氧塘、水生植物塘和生态系统塘等多种形式, 它们在不同的自然条件下在处理各种类型的污水中发挥了重要作用^[3, 29]。在小城镇生态环境综合治理中, 可以充分利用稳定塘生态处理系统的特点, 将污水无害化处理与利用有机结合起来, 以实现污水的资源化。出水可回用于农灌作进一步利用和处理, 或补充地下水, 以缓解中小城镇在经济发展初期对地下水的过度开发而造成的水资源短缺。

1.4.3 生态滤池工艺 生物-生态过滤工艺^[30]是由厌氧-生物过滤和生态滤池组合而成, 利用微生物和蚯蚓等共同组成的人工生态系统对城镇污水中的有机污染物进行降解。该工艺具有高效、低能耗处理城镇污水, 污泥量少, 建造和运行费用低, 污泥产量少等优点。小城市污水资源化利用的中心问题在于根据地区特点拟定适宜的再利用对策。小城镇生活污水处理工艺与技术的选择, 受到当地社会、经济发展水平或其他因素的约束。随着水处理技术的发展, 能满足污水资源化利用水质要求的水处理技术往往不在于技术上的可行性, 而在于经济和其它方面的可行性。因此, 投资和运行费用低、稳定可靠、管理方便、处理效果好的生态滤池工艺将与其它水处理技术相结合, 在小城镇污水处理和资源化利用中发挥重要作用。

2 应用前景分析

2.1 市场前景分析

我国今后10年内工业用水量、居民生活用水量和农业用水量均将有大幅度增加^[1]。其中, 以城镇生活用水量的增幅最大, 工业用水量的增长基本接近生活用水量的增长, 农业用水量增幅最小(表2)。这就意味着, 工业污水和生活污水的排放量在今后10年内将有大幅增加。而80%以上的工业用水和部分生活用水如厕所卫生用水对水质要求不高, 在开发新水源费用昂贵、短期内提高节水的效率又不现实的情况下, 中水回用、污水无害化后资源化利用就显得尤为重要, 污水资源化处理技术大有市场。

表2 21世纪上半叶用水量预测统计

Table 2 Forecast of the 1st half century water usage in the 21st century 10⁸m³

年份	工业用水量	农业用水量	生活用水量	全国总用水量
2000	665	4 848	189	5 702
2010	929	5 640	268	6 837
2030	1 899	4 530	456	6 885
2050	3 436	4 157	730	8 323

从世界范围来看, 21世纪初人类对水资源的需求也将大幅度增加。在今后20年内, 人类取用

的水资源数量增长幅度将超出 10.0%。其中, 农业取用水的增加幅度不大; 相反, 市政取用水的增加幅度最大, 分别将达到 39.5% 和 100.0%^[1, 2]。因此, 污水资源化处理技术前景乐观, 产业化势在必行。

2.2 应用难点分析

中水回用、污水资源化利用中的主要难点有: 小城镇污水排放不集中, 水质不稳定且质量差, 不宜应用常规的生物处理技术, 在经济性和处理效果上不具可行性。城市污水回用、循环用水的技术并不成熟, 现有城镇污水处理效果欠佳, 回用水用于农灌时残留的有机污染物和 N, P 等营养物质容易引起二次污染, 存在很高的生态不安全风险; 现有污水处理的成本较高; 小城镇的经济基础弱, 特别是在我国西部, 对建设和运行费用高的水处理系统经济承受能力小。污水资源化方式单一, 中水回用比率小, 适合于我国中小城镇可持续发展的污水资源化发展的水工业体系尚未建立。

在我国东部沿海地区和江浙一带中小城镇化建设加快, 内陆、近海水体富营养化严重, 污水无害化、资源化处理对削减水体的污染负荷, 维系区域水体的良性循环, 恢复和修复区域水体的物理、化学和生物的自然完整性将起到关键作用。在缺水的干旱和半干旱的我国中西部小城镇, 污水资源化更是解决水荒的上策。

2.3 发展对策

城市污水的资源化应建立在水的良性循环基础上^[1, 3]。在我国东部沿海降水量丰富、富营养化严重地区, 以恢复和修复区域水体的物理、化学和生物的自然完整性作为目标; 在西部干旱少雨地区加强污水无害化处理后的多途径利用。国家和地方政府在新型城镇化建设和旧城改造过程中, 大力提倡和鼓励开发非传统水源, 重视污水资源化利用, 加大对中水回用基础设施建设, 建立污水资源化示范城镇。就水处理技术而言, 采用常规污水处理工艺的强化、组合, 由单项技术转向技术集成, 简化并优化工艺, 因地制宜选用合适的水处理工艺, 使污水无害化处理和污水资源化利用有机结合。就资源化利用而言, 拓宽污水资源化对象和利用途径, 将处理回用水从农灌扩大到绿化用地灌溉、城市杂用、生态恢复和工业冷却等多方面, 提高回用水的比率。

参考文献

- [1] 周启星. 从第二届世界水资源论坛看辽宁的水资源危机及对策[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 36~39
- [2] 周启星, 黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [3] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [4] 张杰, 曹开朗. 城市污水深度处理与水资源可持续利用[J]. 中国给水排水, 2001, 17(3): 20~21
- [5] 籍国东. 我国污水回用的现状分析与对策探讨[J]. 环境科学进展, 1999, 7(5): 85~95
- [6] 师绍琪, 袁琳, 蒋展鹏. 生活污水生物絮凝吸附强化一级处理的研究[J]. 中国给水排水, 1998, 14(2): 5~7
- [7] Papaicovou I. Case study wastewater reuse in limassol as an alternative water source [J]. Desalination, 2001, 138(1~3): 55~59
- [8] Zhou Qixing, Dai Limei, Bell R W. An integrated plan for town-enterprise wastewater reuse and wetland strategy: A case study [J]. Desalination, 1996, 106(1~3): 439~442
- [9] Kyu-Hong A, Song K-G. Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater [J]. Desalination, 1999, 26(1~3): 7~14
- [10] Madaem S S, Fane A G, Grohmann G S. Virus removal from water and wastewater using membranes [J]. Journal of Membrane Science, 1995, 102: 65~75
- [11] Cabassud C, Ansemlme C, Bersillon J L, et al. Ultrafiltration as a nonpolluting alternative to traditional clarification in water treatment [J]. Filtration and Separation, 1991, 28(3): 194~198
- [12] Gander M, Jefferson B, Judd S. Aerobic MBRs for domestic wastewater treatment: a review with cost considerations. Separation and Purification Technology, 2000, 18(2): 119~130
- [13] Bilstad T. Nitrogen separation from domestic wastewater reverse osmosis [J]. Journal of Membrane Science, 1995, 102: 93~102
- [14] Ueda T, Hata K. Domestic wastewater treatment by a submerged membrane bioreactor with gravitational filtration [J]. Water Research, 1999, 33(12): 2888~2892
- [15] Chiemchaisri C, Wong Y K, Urase T, et al. Organic stabilization and nitrogen removal in a membrane separation bioreactor for domestic wastewater treatment [J]. Filtration & Separation, 1993, 30(3): 247~252
- [16] 邱慎初. 化学强化一级处理(CEPT)技术[J]. 中国给水排水, 2000, 16(1): 26~29

- [17] Parker D S. The future of chemically enhanced primary treatment: evolution or revolution [J]. *Water* 21, 2001, 21(6): 49~53
- [18] Gupta A B, Gupta S K. Simultaneous carbon and nitrogen removal from high strength domestic wastewater in an aerobic RBC biofilm [J]. *Water Research*, 2001, 35(7): 1714~1722
- [19] Lee J C, Kim J S, Kang I J, et al. Potential and limitations of alum or zeolite addition to improve the performance of a submerged membrane bioreactor [J]. *Water Sci Technol*, 2001, 43(11): 59~66
- [20] Moriyama K, Sato K, Harda Y, et al. Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus using oxic - anaerobic - oxic process [J]. *Water Sci Tech* 1990, 22(7~8): 61~66
- [21] Parker D, Jacobs T, Bower E, et al. Maximizing nitrification rates through biofilm control: research review and full - scale application [J]. *Water Sci Technol*, 1997, 36(1): 255
- [22] Huang T-L, Macinnes J M, Cliffe K R. Nitrogen removal from wastewater by a catalytic oxidation method [J]. *Water Research*, 2001, 35(9): 2113~2120
- [23] 李 孟. 纳米材料降解水中污染物的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(9): 26~28
- [24] Sun Tieheng, Zhou Qixing, Li Peijun. An innovative land treatment system for urban wastewater and practice in China [A]. *Local Government and Water Session. The Second World Water Forum, The Hague*[C]. 2000. 18~22
- [25] 贾宏宇, 孙铁珩, 李培军, 等. 污水土地处理技术研究的最新进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2001, 2(1): 62~65, 47
- [26] Shutes R B E. Artificial wetlands and water quality improvement [J]. *Environment International*, 2001, 26: 441~447
- [27] Kivaisi A K. The potential for constructed wetlands for wastewater treatment and reuse in developing countries: a review [J]. *Ecological Engineering*, 2001, 16: 545~560
- [28] Neralla S, Weaver R W, Lesikar B J, et al. Improvement of domestic wastewater quality by subsurface flow constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 75: 19~25
- [29] 杨鲁豫, 王 琳, 王宝贞. 适宜中小城镇的水污染控制技术[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(1): 23~25
- [30] 吴 敏, 杨 健, 马运才, 等. 生物 - 生态过滤工艺处理城镇污水[J]. *中国给水排水*, 2002, 18(4): 37~39

Advances and Applications of Treatment Technology for Sewage Harmlessness and Resourcefulness in Small Cities and Towns

Zhang Kaisong, Zhou Qixing, Sun Tieheng

(Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[Abstract] Harmless and resourceful techniques for sewage treatment that are applicable to the implementation in small cities and towns and their development were summarized in order to provide reference for solving the deficiency of water resources and aquatic environment deterioration in China. It emphasizes that the resourceful reuse of wastewater after a harmless treatment with adjusting wastewater treatment measures to local conditions is the direction of waste treatment in small cities and towns in the country. The foreground of the harmless and resourceful techniques to be applied to small cities and towns was analyzed and discussed.

[Key words] small city and town; sewage resources; harmlessness; resourcefulness; wastewater treatment technology