

新加坡新生水工艺对我国生产高品质回用水的启示

卢睿卿¹, 杨光², 宫徽¹, 王凯军¹, 张宝林², 薛晓飞², 史彦伟²

(1. 清华大学环境学院 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100102)

摘要: 我国部分地区水资源匮乏限制了地区的发展, 将生活污水深度处理后作为高品质再生水补充饮用水源或地下水, 可以缓解水资源紧张的局面, 新加坡新生水的发展模式为我国发展高品质回用水提供了参考。分析了新加坡樟宜第二新生水厂运行的水质水量波动及新生水工艺的稳定性, 并调研了新加坡以双膜法为核心的新生水工艺有待改进的现状与发展趋势。结合我国污水处理基础设施建设的情况, 提出我国发展高品质新生水已有后发优势, 并且高品质新生水在我国有迫切的需求。针对双膜法产生浓水的问题, 参考新加坡经验分析了沿海城市与内陆城市的处理方案, 提出了高品质再生水在我国发展的策略。

关键词: 再生水; 新生水; 双膜法; 膜生物反应器

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)14-0036-05

Enlightenment of Singapore's NEWater Technology to the Production of High Quality Reclaimed Water in China

LU Rui-qing¹, YANG Guang², GONG Hui¹, WANG Kai-jun¹, ZHANG Bao-lin²,
XUE Xiao-fei², SHI Yan-wei²

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100102, China)

Abstract: The scarcity of water resources in some areas of China limits the development of the region. The advanced treatment of domestic sewage as high quality reclaimed water to supplement drinking water source or groundwater recharge can alleviate the shortage of water resources. Singapore's NEWater project provides a reference for the development of high quality reclaimed water in China. The fluctuation of water quality and quantity and the stability of fresh water process in Changi second NEWater plant in Singapore were analyzed. The status and development trend of NEWater in Singapore were investigated. Based on the wastewater treatment infrastructure construction in China, it was implied that China had the advantage of developing high quality reclaimed water, and the need for high quality reclaimed water in China was urgent. For the problem of concentrated water produced by double membrane method including ultrafiltration and reverse osmosis, the treatment strategies of coastal and inland cities were analyzed with reference to Singapore's practice. The strategies for the development of

high quality reclaimed water in China was discussed.

Key words: reclaimed water; NEWater; dual-membrane method; MBR

城市生活污水再生回用是增加可利用水资源总量的有效途径,在世界范围内已经得到了较大程度的应用,但大部分污水再生回用于饮用水之外的领域,如绿化、工业、农业用水等,将污水处理回用于饮用水供给的案例并不普遍。截至2014年底,我国再生水整体回用率约为10%,整体利用水平较低^[1]。在水资源需求较大的城市如北京,污水再生回用的比例较高,但用途也被限制在自来水供水水源之外的领域,如绿化和农业用水等^[2]。城市生活污水的再利用程度主要受制于人们对再生水回用安全性的担忧,若通过有效工艺保障再生水的安全,把再生水用于自来水水源补给,将显著降低我国缺水城市的水资源压力。在世界上水资源极度匮乏的地区,将城市污水处理后回用于饮用水供给已经有成熟的应用案例,并逐渐被越来越多的缺水城市接纳。在纳米比亚,生活污水厂的二级出水被直接引入污水再生回用处理厂,在处理完成后与其他水源所生产的自来水混合,传输给自来水用户,以确保污水再生回用的安全性。该项目从1968年开始运行至今,在水资源匮乏的季节,回用水占总供水量的比例可达50%,回用水的生化指标都受到系统性的监控以保证供水安全。再生水的毒理学测试也并未发现该再生水会引起疾病或其他不良健康后果。纳米比亚采用的处理工艺为了保证出水水质而设置了多级屏障,包括活性污泥、稳定塘、活性炭吸附、臭氧氧化、絮凝沉淀、气浮、砂滤、超滤、氯化等工艺,以保障污染物得到有效去除,因此流程长、能耗高。

相比之下,新加坡的NEWater(新生水)项目则兼备了安全保障与工艺的先进性。NEWater项目将新加坡的生活污水收集后,经过传统的活性污泥和二沉池处理进入新生水处理厂中,采用微滤(或超滤)、反渗透和紫外杀菌的工艺进行回用深度处理^[3]。相比于纳米比亚的生活污水再生回用工程,NEWater工艺流程较短,在经济性上具有明显优势。在安全性方面,NEWater的水质经过新加坡政府的长期监测,对190项污染物指标进行浓度测定,结果表明NEWater水质稳定可靠,优于世界卫生组织和美国环境保护署对饮用水水质的标准限值。除测定NEWater污染物浓度外,新加坡政府还开展了

NEWater的健康效应研究,以鱼和小鼠为模式生物,在长期检测中未发现NEWater具有致癌性或雌激素毒性。

1 新加坡NEWater(新生水)项目的发展

1.1 新加坡NEWater运营模式

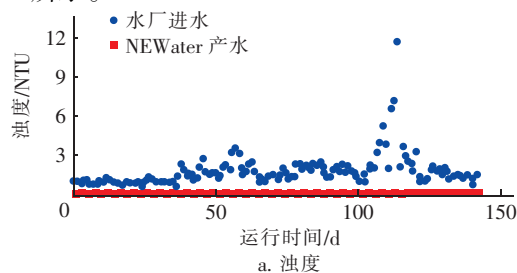
由于本地水源的匮乏,新加坡长期需要从马来西亚进口水资源来满足本国的需求。为了摆脱依靠进口水源的不利局面,新加坡政府采取的措施之一是发展高品质回用水。在经历了长期的研究和验证后,新加坡公共事业局于2003年正式将高品质回用水作为工业用水和间接饮用水源补给,并确定了“NEWater(新生水)”的专有名称。在城市供水方面,新加坡政府不直接将NEWater作为自来水水源使用,仅将NEWater直接作为工业用水,或者将NEWater输送到水库中,与自然水体混合后,经过自来水厂传统工艺的进一步净化再进入自来水管道路。

自NEWater项目开展以来,新加坡陆续建设了多座NEWater水厂,至今NEWater总产能已能满足40%的用水需求,计划在2060年产能上升至60%的用水需求。其中最新投产、产能最大的NEWater水厂为樟宜第二新生水厂。这座新生水厂由我国北控水务集团旗下的子公司于2014年通过设计-建设-拥有-运营(DBOO)的模式进行开发建设,并于2016年11月投产,设计产能为 $22.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

1.2 樟宜第二新生水厂运行效能分析

NEWater的产水流量主要受入水流量波动影响,在来水流量突然增加或降低时,NEWater产水流量随之变化;在来水水量较大时,水厂满负荷稳定运行10 h以上,说明该工艺抗水量波动的能力较强。

除水量外,樟宜第二新生水厂对浊度、电导率、TOC、氨氮等常规水质指标也进行了系统监测,数据如图1所示。



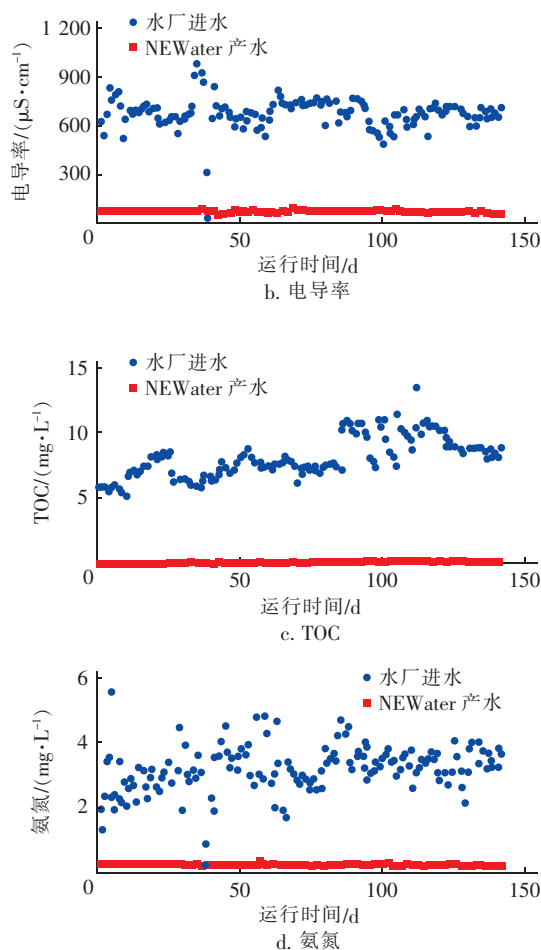


图1 樟宜第二新生水厂进、出水水质监测数据

Fig.1 Water quality of influent and NEWater in Changyi second NEWater plant

樟宜第二新生水厂进水浊度一般情况下小于4 NTU,但当污水处理厂的二沉池非正常运行时,来水浊度可高达11.8 NTU。樟宜新生水厂在超滤前端设置了自动过滤器,可以保障高浊度来水条件下双膜法工艺的稳定运行,经过超滤和一级两段的反渗透处理,NEWater产水浊度已低于检测限,且在整个监测时间段内保持稳定。电导率用以表征对盐类物质的去除,进水电导率主要为500~900 $\mu\text{S}/\text{cm}$,新生水厂中的一级两段反渗透处理工艺对水中的离子态物质去除率较高,反渗透膜产水电导率接近于零,而NEWater产水平均电导率为77 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。NEWater产水电导率的增加是水厂向反渗透膜产水中加入电解质物质造成的,而加入电解质的目的是保证NEWater产水中的盐类物质与新加坡其他的饮用水源中的盐类物质接近,避免造成供水管网的腐蚀和污染^[4]。在污染物去除方面,进水TOC为5~14

mg/L,平均为8.8 mg/L;NEWater产水TOC浓度保持稳定,平均为0.06 mg/L。进水氨氮为0.3~5.7 mg/L,平均为3.2 mg/L;NEWater产水氨氮浓度保持稳定,平均为0.29 mg/L。各项水质指标的监测数据表明,樟宜第二新生水厂生产新生水的工艺稳定可靠,可以有效去除水中的污染物。

研究中还对新水处理能耗进行了分析。结果表明,樟宜第二新生水厂NEWater平均耗电为0.75 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。其中,运行能耗最大的是反渗透膜工艺,为0.32 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;其次是NEWater的提升用电,为0.24 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$;而微滤工艺的电耗只有0.09 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 。由此可知,新生水工艺虽然采用了双膜技术,但通过工艺优化其能耗已降至较低水平^[5]。

1.3 樟宜第二新生水厂工艺优势分析

为了进一步提升处理效率,新加坡樟宜第二新生水厂从膜堆大型化、大功率泵和能量回收等方面对NEWater工艺进行了改进,并已投入生产应用。通过使用大型膜堆,以“膜中心”为理念,可以显著提升单位面积厂房的处理能力,减少管线和控制元件,降低建设成本,并实现污水集中处理,通过水厂的规模效应来进一步降低建设和运营成本。新加坡樟宜第二新生水厂的反渗透膜元件直径为8英寸(1英寸=2.54 cm),单一膜堆的处理能力超过 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。而直径为16英寸的反渗透膜已经应用成熟,如果用直径为16英寸的反渗透膜组件取代现有的8英寸膜组件,同等处理规模下可节省占地空间20%~30%,节省10%~27%的建设费用,压力容器管道及连接件减少80%。可以预期,膜组大型化将会是未来新生水工艺发展的必然方向。

在运营成本方面,NEWater现行的以“泵中心”为理念的能量节约型设计已被证明能够有效降低能耗,并将在未来的NEWater项目发展中进一步发挥其优势。“泵中心”理念的核心是采用大功率泵为反渗透系统提供稳定的流量和压力,相比小功率泵分散式的升压方式,大型泵的能量利用效率更高,长期运行中节电优势十分可观。例如,樟宜第二新生水厂采用4台大型水泵(3用1备)为反渗透单元提供压力,在RO单元实现了0.32 $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 的较低能耗,显著低于传统RO处理工艺。为了实现新生水集中处理,新加坡政府已经开始实施深隧工程,将城市污水集中收集到3座大型污水处理厂中,这样

的设计有利于实现“泵中心”的节能作用,降低运行费用。除了通过使用大功率泵用以降低运行能耗外,新加坡樟宜第二新生水厂还使用能量回收装置实现了10%的能量节约。具体的方式是通过涡轮装置,将一段反渗透浓水的压力转化为二段反渗透进水的压力来源,从而减少能耗。

新生水工艺发展的另一个主要方向是短流程工艺开发。现行双膜法工艺路线的设计基础是污水处理厂产水的水质特点,从而导致了新加坡污水厂与新生水厂分别独立运营的现状。在新生水工艺已趋于成熟的现状下,将污水厂与新生水厂进行整合,可以缩短从生活污水到新生水的生产流程,降低建设和运营成本,并有可能提升新生水的水质。新加坡公共事业局研究中主流的方案是采用膜生物反应器(MBR)取代污水处理厂的曝气池和二沉池,同时合并新生水厂的超滤(或微滤)单元。新加坡已经将该工艺路线在裕廊和樟宜的污水处理厂中实现了生产规模的实验,并持续对该工艺进行改进研发^[6]。在新加坡已发布的计划中,即将建成的Tuas新生水厂将完全使用MBR+RO的工艺路线,完成污水厂与新生水厂的整合。新加坡新生水工艺改进示意图2所示。

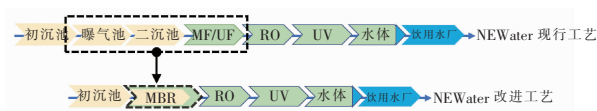


图2 新加坡新生水工艺改进示意

Fig. 2 Scheme of NEWater process development in Singapore

2 我国生产高品质再生水的潜力

2.1 我国生产高品质再生水的基础

我国虽然还没有将生活污水深度处理后作为饮用水源补给的工程案例,但我国已完成的大规模污水处理厂升级改造为我国实现高品质再生水提供了后发优势。在污水处理厂排放标准提升的管理要求之下,我国许多大型污水处理厂采用MBR工艺取代传统工艺,截至2017年底,我国MBR总处理能力已经超过 $1\,117 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,大型MBR污水处理厂超过192座,在全国各省都有不同程度的应用^[7],对我国MBR污水处理厂出水水质的长期监测表明^[8],在正常的运行条件下,MBR可以有效去除污水中的大部分污染物。MBR在我国的广泛使用为生产高品质再生水创造了有利条件,并且使我国具备了跨越新加坡传统NEWater路线的条件,可以直接采用

MBR+RO的优化流程路线,实现污水处理与生产高品质再生水的统一规划设计。

在我国推广MBR+RO的高品质再生水工艺路线需要解决RO浓缩液排放的问题,可参考新加坡的经验。新加坡为沿海国家,生产NEWater产生的RO浓缩液被直接排放到大海中。这样的模式可以在我国的沿海城市进行推广。根据我国近海海洋综合调查与评价专项的研究结果,我国52个沿海城市中,极度缺水城市18个,重度缺水城市10个,中度缺水9个,轻度缺水9个,近90%的城市存在不同程度缺水问题。因此,在沿海城市生产高品质再生水具有广泛的市场需求。而相比海水淡化等其他水源补充的模式,高品质再生水有明显的成本优势,并且可以直接采用新加坡现有的NEWater模式,作为沿海城市缓解现状水资源紧张的有效手段。

2.2 在我国应用双膜法需解决的问题

在非沿海城市,RO浓缩液的排放需要解决两个问题:一是RO膜进行盐分离导致的浓缩液中盐分过高的问题;另一个是MBR出水中的污染物经过RO过滤后被富集,导致RO浓水中其他污染物浓度过高。RO浓缩液的盐度可以根据生活污水的盐度进行估计,以北京市为例,根据从肖家河污水处理厂测量得到的离子浓度可计算得到北京市城市生活污水的盐浓度为 700 mg/L 。以双膜法工艺中RO的水回收率为50%计算,则浓缩液中的盐浓度为 $1\,400 \text{ mg/L}$ 。目前缺乏盐分指标对生态影响的深入研究,也未发现溶解性总固体、硫酸盐、氯化物等盐分指标环境基准值研究成果。我国污水处理厂相关排放标准中目前没有对盐浓度的排放限制,在《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343—2010)中要求总盐度(溶解性总固体)A级标准低于 $1\,400 \text{ mg/L}$,B级和C级标准为 $2\,000 \text{ mg/L}$,这仅仅考虑的是对污水处理厂生化处理单元的保护。目前仅在《山东省南水北调沿线水污染物综合排放标准》修改单(报批稿)中提出增加全盐量指标限值到2018年1月1日起执行 $2\,000 \text{ mg/L}$ 的排放限值。根据这些标准的限值,并考虑自然水体对RO浓水中盐分的稀释作用,建议将RO浓水的盐度控制在 $2\,000 \text{ mg/L}$ 是合理的。根据北京市污水含盐量的特点,RO水回收率在50%以下时,则RO浓水的盐度将低于 $1\,500 \text{ mg/L}$,因此RO浓水可以排放到自然水体中。对RO浓水的另一种可能的处理方式是提高

RO 的水回收率,这样做虽然会导致 RO 浓水的盐度升高,但 RO 浓水的总体积减少,便于后续采用工业高盐废水的处理方式进行脱盐处理。

对于非沿海城市,RO 浓缩液的另一个问题是碳、氮、磷等常规污染物浓度高于排放限值,需要对污染物进行去除后才能排放。目前的城市污水处理工艺中,经济性最高的是通过微生物作用去除水中的污染物。通过微生物工艺去除含盐量较高的生活污水中的污染物已经有应用案例,在香港,由于采用海水冲厕后的污水与其他生活污水混合,造成生活污水厂来水盐度在 5 000 ~ 6 000 mg/L 的水平。而在这样的高盐度条件下,香港城市污水处理厂通过活性污泥工艺仍然可以有效去除污水中的 COD、氮、磷等污染物^[9]。因此,可以推断,RO 浓缩液中常规污染物可以通过微生物工艺得到有效去除。

3 结语

我国水资源匮乏地区需要通过增加水源补给来保证长期发展,新加坡通过城市生活污水生产高品质再生水的 NEWater 项目为我国提供了可参考的解决方案。以双膜法为核心的 NEWater 工艺的产水量受来水水量的影响,抗水量变化冲击的能力较强,能够在较长时间内保持全负荷生产。在水质方面,NEWater 产水中的各项污染物均已得到有效去除,符合世界卫生组织和美国环保署对饮用水源水质的要求。将新生水工艺引进我国具有现实的可行性:一是在沿海城市,新加坡将反渗透浓水排入海洋的做法可以借鉴,而在内陆地区,反渗透浓水的处理需要结合实际情况进行分析,通过控制 RO 水回收率控制浓水中的盐分;二是我国大规模应用的 MBR 污水处理技术为我国远超新加坡传统新生水工艺路线提供了基础,可以直接发展 MBR + RO 的短流程新生水处理工艺。高品质回用水在我国具有广阔的市场需求,有机会发展成为解决我国水资源短缺的有效手段。

参考文献:

- [1] 柏蔚,高菲. 对再生水利用的分析及思考[J]. 环境科学与管理,2015,40(10):188-191.
Bai Wei, Gao Fei. Analysis and thoughts on water reuse [J]. Environmental Science and Management, 2015, 40(10):188-191 (in Chinese).
- [2] 刘乔木,纪玉琨,姜帅,等. 北京市再生水利用现状及问题分析[J]. 北京水务,2016(6):18-21.
Liu Qiaomu, Ji Yukun, Jiang Shuai, et al. Present situation and problems of recycled water utilization in Beijing [J]. Beijing Water, 2016(6):18-21 (in Chinese).
- [3] Lee H, Tan T P. Singapore's experience with reclaimed water: NEWater [J]. Int J Water Resour Dev, 2016, 32(4):611-621.
- [4] Shen Y, Monroy G L, Derlon N, et al. Role of biofilm roughness and hydrodynamic conditions in *Legionella pneumophila* adhesion to and detachment from simulated drinking water biofilms [J]. Environ Sci Technol, 2015, 49(7):4274-4282.
- [5] Guo W, Ngo H H, Li J. A mini-review on membrane fouling [J]. Bioresour Technol, 2012, 122:27-34.
- [6] Lay W C L, Lim C, Lee Y, et al. From R & D to application: Membrane bioreactor technology for water reclamation [J]. Water Pract Technol, 2017, 12(1):12-24.
- [7] Li P, Liu L, Wu J, et al. Identify driving forces of MBR applications in China [J]. Sci Total Environ, 2019, 647:627-638.
- [8] Xiao K, Liang S, Wang X, et al. Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review [J]. Bioresour Technol, 2019, 271:473-481.
- [9] Liu X, Dai J, Wu D, et al. Sustainable application of a novel water cycle using seawater for toilet flushing [J]. Engineering, 2016, 2(4):460-469.



作者简介:卢睿卿(1989-),男,河北深州人,博士研究生,主要研究领域为城市生活污水再生回用。

E-mail: luruisony@ qq. com

收稿日期:2019-04-04