

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.23.009

不同进水条件下再生水多段反渗透工艺的运行效能

秦显祥¹, 李子浩¹, 王正晓², 唐晓虎², 宋海旺¹, 张燕^{3,4},
程丽华¹, 毕学军¹

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院 城镇污水处理与资源化国家地方联合工程中心, 山东 青岛 266033; 2. 青岛海湾中水有限公司, 山东 青岛 266071; 3. 青岛水务集团有限公司技术中心, 山东 青岛 266002; 4. 青岛水务集团环境能源有限公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 反渗透系统可提供高品质再生水,但是存在浓水处理难题。增加段数可减少浓水体积,降低浓水处理成本,是解决浓水处理问题的有效途径。然而,段数的增加对浓水产量的削减能力及对系统运行的影响尚不清晰。通过分析一级四段反渗透系统各段膜通量、产水水质和单位产水能耗的差异,探究了多段反渗透系统的运行效能。结果表明,若一级二段系统回收率为75%左右,当段数增加到三段时系统回收率可提高至85%左右,当段数增加到四段时系统回收率仅比一级三段增加3%左右。当系统进水总溶解性固体(TDS)为900~2 000 mg/L时,一~三段产水TDS均小于150 mg/L,一~四段的膜通量分别为20~27、11~17、1~15和7~10 L/(m²·h)。三、四段单位产水能耗仅为一、二段的47%。

关键词: 再生水; 多段反渗透; 膜通量; 回收率

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)23-0064-06

Operational Efficiency of Multi-stage Reverse Osmosis Process for Producing Reclaimed Water under Varying Influent Conditions

QIN Xian-xiang¹, LI Zi-hao¹, WANG Zheng-xiao², TANG Xiao-hu²,
SONG Hai-wang¹, ZHANG Yan^{3,4}, CHENG Li-hua¹, BI Xue-jun¹

(1. State and Local Joint Engineering Centre of Urban Sewage Treatment and Recycling, School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Qingdao Haiwan Reclaimed Water Co. Ltd., Qingdao 266071, China; 3. Technical Center of Qingdao Water Group Co. Ltd., Qingdao 266002, China; 4. Qingdao Water Group Environmental Energy Co. Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: The reverse osmosis (RO) system is capable of producing high-quality reclaimed water. However, it faces challenges related to the treatment of concentrated water. Increasing the number of operational stages can effectively minimize the volume of concentrated water and lower associated treatment costs, thereby providing a viable solution to the issues surrounding concentrated water management. Nevertheless, the effectiveness of the augmented number of stages in mitigating

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020ME223); 青岛西海岸新区2020年度科技攻关“揭榜”专项(2020-25)
通信作者: 程丽华 E-mail: chenglihua666@163.com

concentrated water production and its subsequent effects on system performance remains ambiguous. This study assessed the operational efficiency of the single four-stage reverse osmosis system by analyzing the variations in membrane flux, water quality, and energy consumption per unit of water produced. If the recovery rate of a two-stage system in the single system was approximately 75%, the recovery rate could be enhanced to around 85%, when the number of stages was increased to three. However, upon further increasing the stages to four, the recovery rate only showed an improvement of about 3% compared to that of the three-stage system. When the total dissolved solids (TDS) in influent ranged from 900 mg/L to 2 000 mg/L, the TDS in effluent from the first to third stages remained below 150 mg/L. The membrane fluxes for each stage were as follows: first stage at 20–27 L/(m²·h), second stage at 11–17 L/(m²·h), third stage at 1–15 L/(m²·h), and fourth stage at 7–10 L/(m²·h). The energy consumption per unit of water production in the third and fourth stages was 47% of that observed in the first and second stages.

Key words: reclaimed water; multi-stage reverse osmosis; membrane flux; recovery rate

我国淡水资源严重匮乏,污水资源化利用可以缓解水资源短缺问题。反渗透系统具有占地少、污染物去除高效、产水水质优良等优势,已逐渐应用于再生水处理领域^[1-4]。然而,反渗透系统在获得高品质再生水的同时,也伴随着大量反渗透浓缩物(ROC)的产生。由于ROC中不仅有高浓度的无机离子,还存在大量危害人类健康和生态环境的难生物降解有机物及高风险有毒有害物质^[5],因此若不经处理而直接排放会对生态环境构成巨大威胁^[6]。

目前,再生水厂常用的一级二段反渗透工艺的回收率仅为75%左右^[7],产生的ROC量可达进水量的25%,存在回收率不高、ROC产量大等问题,使得大量可回收的水资源未被有效提取及利用,同时增加了ROC的处理难度^[8]。提高反渗透系统的回收率,大幅削减ROC产量,进而在较低能耗下实现浓水结晶,是解决ROC处理问题的可行途径^[9-10]。

在一级二段反渗透基础上增加段数,可提高反渗透系统回收率,降低ROC产量^[10]。然而,段数的增加对浓水产量的削减作用及其对反渗透系统运行效果的影响尚不清晰。笔者采用一级四段中试系统,通过对比各段膜通量、产水水质和单位产水能耗的差异,分析进水TDS对处理效率的影响,探究多段反渗透系统在浓水削减方面的作用及其适用范围,旨在为解决ROC排放问题提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验原水

试验原水为青岛某城镇污水厂深度处理出水,经过超滤中试系统处理后进入反渗透系统。由于

该污水厂位于滨海区域,受海水倒灌的影响,污水厂深度处理出水的盐分呈周期性波动且幅度较大,进水总溶解性固体(TDS)为1 000~5 000 mg/L;其他水质指标较为稳定。反渗透系统进水的污泥密度指数(SDI)为1~3,浊度为0.1~2 NTU,温度为16~20℃,pH为7.2~7.6,总有机碳(TOC)为4.8~7.2 mg/L。

1.2 试验装置与运行工况

试验装置如图1所示。进水通过加压泵注入一段反渗透装置,经过一段反渗透处理后,产生的浓水利用余压进入二段反渗透装置,二段浓水经段间增压泵加压后进入三段反渗透处理装置,三段反渗透装置的浓水通过余压进入四段反渗透装置,四段反渗透装置产生的浓水即为本系统的最终浓水,各段膜的透过液作为产水收集。各段膜的产水管及浓水管上均设有取样点,各段反渗透膜的膜前及膜后均设置有压力表及流量计。

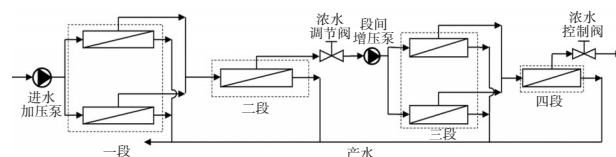


图1 反渗透中试系统示意

Fig.1 Schematic diagram of pilot-scale reverse osmosis system

本系统各段均采用陶氏LC-HR4040膜元件,一~四段膜元件数量分别为12、6、4和2支。试验过程中,系统进水压力恒定为1.00 MPa左右,三段进水压力介于1.05~1.25 MPa之间,保持浓水调节阀与浓水控制阀的开启度恒定。

1.3 试验方法

采用雷磁多参数分析仪测定TDS,以表征水中盐分含量;采用燃烧法测定水样的TOC,以表征水中有机物含量;流量、压力通过在线仪表测定。

平均膜通量计算方法:为评价不同段RO的产水能力,以平均膜通量反映RO单位膜面积上的产水流量,其计算方法见式(1)。

$$J = \frac{V}{T \times A} \quad (1)$$

式中: J 为膜通量, $L/(m^2 \cdot h)$; V 为产水体积, L ; T 为产水时间, h ; A 为反渗透膜的有效面积, m^2 ,本次试验采用的单支膜元件有效膜面积为 $8.7 m^2$ 。

单位产水能耗计算方法:为评价增加段数对反渗透系统运行经济性的影响,以单位产水能耗为指标来评价系统的运行成本,其计算方法见式(2)^[11]。

$$W = \frac{\rho g Q_{\text{进}} H}{Q_{\text{产}} \eta \times 1000 \times 3600} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{进}}$ 、 $Q_{\text{产}}$ 分别为系统进水流量和产水流量, m^3/h ; ρ 为进水密度,取 $1000 kg/m^3$; g 为重力加速度,取 $9.81 m/s^2$; H 为扬程, m ; η 代表泵的整体能量传递效率,取70%。

2 结果与讨论

2.1 各段反渗透膜通量分析

各段膜通量同本段进水TDS的关系如图2所示。可知,膜通量受本段进水TDS的影响显著,随着进水TDS的增加,各段膜通量均下降。当进水TDS为 $900 \sim 2000 mg/L$ 时,一~四段的膜通量分别为 $20 \sim 27$ 、 $11 \sim 17$ 、 $1 \sim 15$ 和 $7 \sim 10 L/(m^2 \cdot h)$ 。例如,当进水TDS为 $900 mg/L$ 时,二~四段进水的TDS分别可达 2200 、 3900 和 $6500 mg/L$,此时,一~四段的膜通量分别为 27.0 、 16.6 、 14.8 和 $9.6 L/(m^2 \cdot h)$ 。当进水TDS增加到 $1400 mg/L$ 时,一~四段的膜通量分别下降至 25.7 、 14.8 、 12.9 和 $8.1 L/(m^2 \cdot h)$,下降幅度分别为 4.8% 、 10.8% 、 12.8% 和 15.6% ,说明原水TDS的变化对三、四段膜通量的影响更大。这是由于在多段反渗透系统中,后段进水受到前段膜组件浓缩作用的影响,TDS增加的幅度更大,所以段数越高受进水TDS的影响越大。当进水TDS仅为 $600 mg/L$ 时,一~四段的膜通量分别可达 28.0 、 21.6 、 18.6 和 $13.5 L/(m^2 \cdot h)$ 。与进水TDS为 $900 mg/L$ 相比,一段膜通量变化不大,但二~四段的膜通量则分别增加了 30.1% 、 25.7% 和 40.6% 。

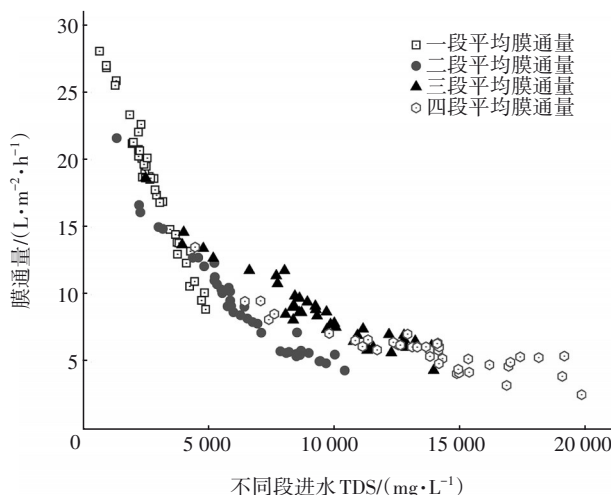
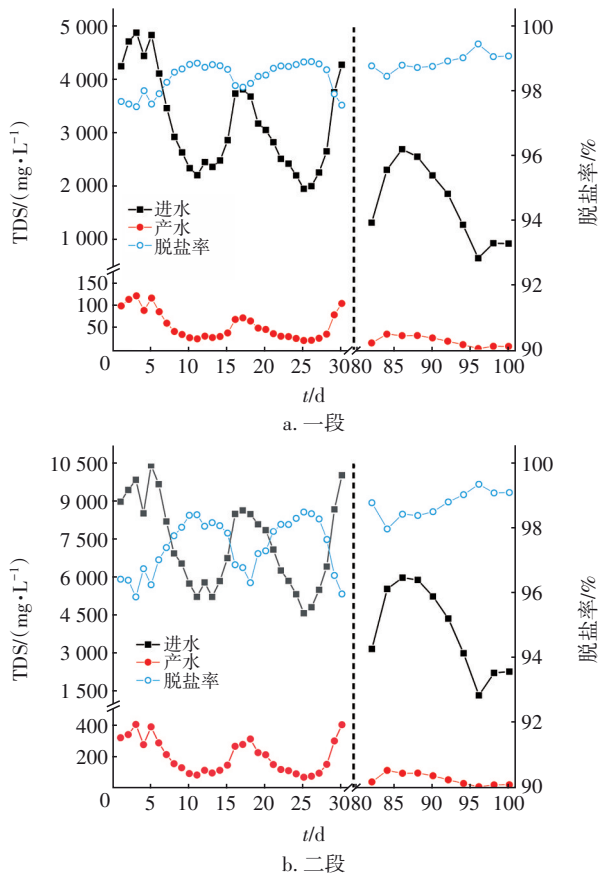


图2 各段膜通量同本段进水TDS的关系

Fig.2 Relationship between membrane flux and influent TDS of the same stage

2.2 各段产水水质分析

为了探究多段反渗透系统对产水水质的影响,分析了一级四段反渗透系统各段的脱盐效果及其对TOC的去除效果,明确不同段产水的水质和一级四段系统适用的场所。一级四段反渗透系统各段的脱盐效果如图3所示。



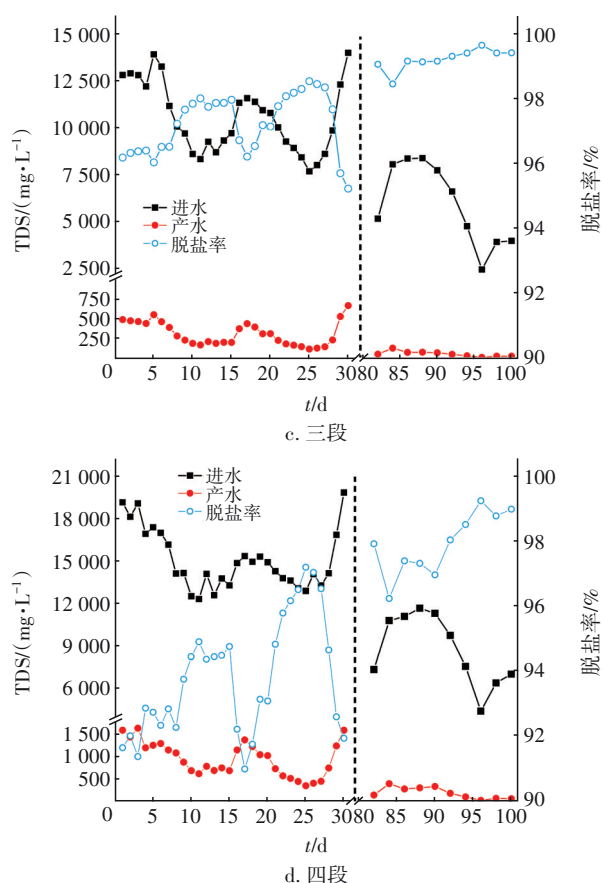


图3 一级四段反渗透系统各段的脱盐效果

Fig.3 Desalination effect of each stage of four-stage reverse osmosis system

进水TDS浓度对产水TDS的影响较大,当进水TDS<2 000 mg/L时,一~三段反渗透膜的产水TDS分别稳定小于30、100和120 mg/L。当进水TDS<1 300 mg/L时,四段产水的TDS小于120 mg/L。当进水TDS增加至2 000~5 000 mg/L时,一~四段产水的TDS分别为25~150、100~400、110~550、350~1 500 mg/L,一~四段膜的平均脱盐率分别为98.6%、97.8%、97.6%和94.7%,随段数增加系统的脱盐率略微下降。

一段的脱盐效果最好并且十分稳定,受系统进水盐分变化的影响较小;二段由于进水压力的降低及进水含盐量的增高,脱盐效果不如一段。虽然三段进水TDS高于二段,但由于三段进水经过增压,膜通量增大,水透过膜的增幅大于盐透过膜的增幅,因此三段的脱盐效果与二段相近。四段产水TDS波动大,当进水TDS较高时产水水质较差,而且由于四段进水中TDS浓度较高,可能加重四段的膜污染,增加运行管理的难度。

反渗透系统进水及各段产水TOC情况如图4所示。原水有机物含量较稳定,不受TDS变化的影响,系统进水TOC为4.8~7.2 mg/L。随着段数的增加,各段产水TOC浓度随之增高且波动幅度增大,一段反渗透膜的产水TOC平均值为0.44 mg/L,二段和三段产水TOC平均值分别增至0.70、1.44 mg/L,四段产水的TOC大幅增加至3.05 mg/L,约为一阶段产水TOC的7倍。综合分析,一级二段反渗透系统的产水TOC平均为0.51 mg/L,一级四段反渗透系统的产水TOC平均为0.71 mg/L,系统总产水TOC变化不大。

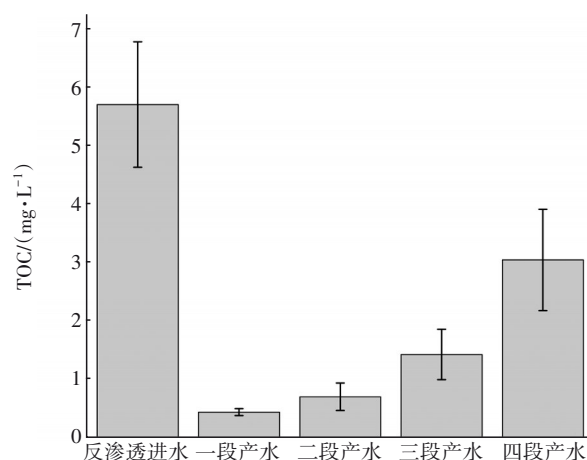


图4 反渗透系统进水及各段产水TOC情况

Fig.4 TOC of influent and effluent in each stage of reverse osmosis system

2.3 增加段数对回收率的影响

不同进水TDS条件下增加段数对系统回收率的影响如图5所示。可以看出,增加段数可以有效提高回收率。一段系统的回收率主要介于50%~60%之间;增加为二段以后,系统总回收率可以提高至65%~78%之间;当段数增加至三段以后,回收率可以提高至76%~88%之间;当系统段数进一步增加到四段以后,回收率的增加幅度大幅减小,一级四段系统的总回收率较一级三段系统仅增加2%~4%左右。以一级二段系统回收率为75%为例,当段数增加到三段时系统回收率可提高至85%左右,当段数增加到四段时系统回收率仅比一级三段增加3%左右。同时,进水TDS对回收率也有影响,当进水TDS为1 000 mg/L时,系统段数由一段增加至二段时,回收率可由58%增加至76%,增幅为18%;当进水TDS达到4 800 mg/L时,一级二段反渗透系

统的回收率由一级一段时的55%仅增加至65%,增幅仅为10%;但当系统段数由二段进一步增加至三段或四段时,进水TDS的增加对回收率的增幅则无明显影响。

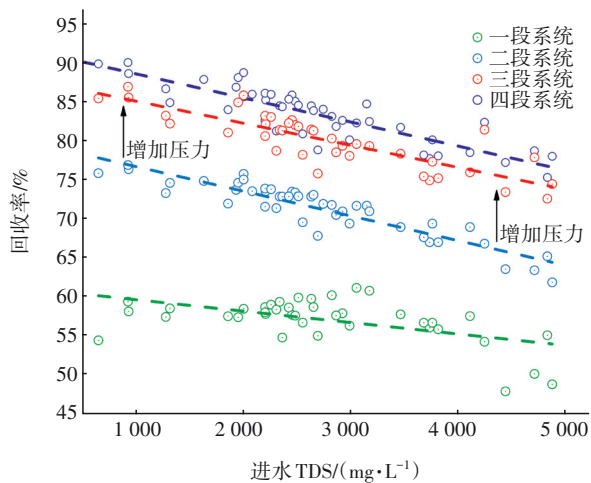


图5 段数增加对反渗透系统回收率的影响

Fig.5 Effect of increasing stages on recovery rate of reverse osmosis system

系统段数越高,回收率增加的幅度越小。原因有以下三点:首先,多段反渗透系统呈锥形排列,前段膜元件数量大于后段,故前段产水率高^[7];其次,随着流程的增加,压力降低,导致后续段产水率下降;最后,后续段进水为前段浓缩液,水质劣于前段,导致后续段的膜元件产水率下降^[12],因而即使通过增压使得三段的压力恢复到同一段相同的水平,三段的产水率依旧下降。

2.4 增加段数对单位产水能耗的影响

在一级二段的基础上继续增加段数,如果只利用二段的余压,后续段不仅进水渗透压远大于一段,而且进水压力也远小于一段进水压力,将导致后续段产水量大幅降低,因而需要设置段间加压泵,为后续段补足进水压力。单位产水能耗与系统进水TDS的关系如图6所示。可以看出,随着系统进水TDS的增加,单位产水能耗上升,原因是进水溶液渗透压升高,相同体积的溶剂透过反渗透膜需要的驱动压力升高。本系统进水压力不变,随着进水TDS的增加,产水率下降,因而单位产水能耗增加。当进水TDS从900 mg/L增加到5000 mg/L时,一、二段单位产水能耗增加40%,而三、四段单位产水能耗增加110%。分析原因,三段与四段进水经过前两段浓缩后,渗透压与前两段相比增加幅度更

高,因而进水TDS变化对于三、四段的单位产水能耗影响更大。

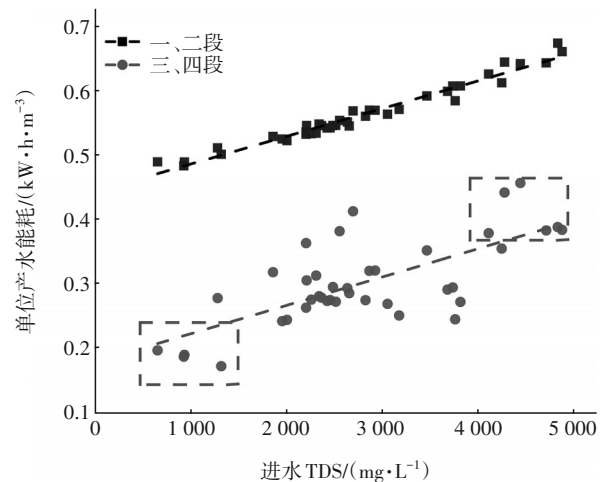


图6 单位产水能耗与系统进水TDS的关系

Fig.6 Relationship between energy consumption per unit of water production and influent TDS

反渗透系统一、二段与三、四段的单位产水能耗如图7所示。

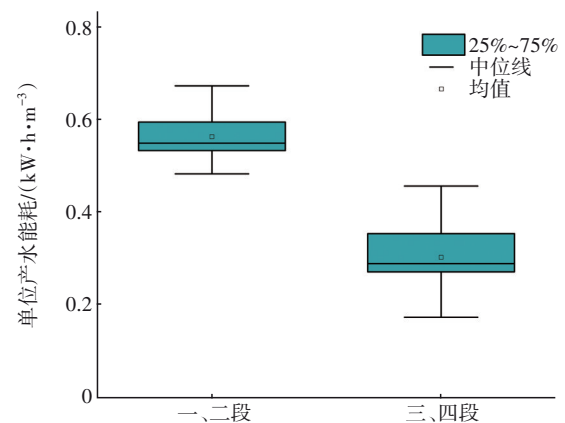


图7 反渗透系统一、二段与三、四段的单位产水能耗

Fig.7 Energy consumption per unit of water production in the first and second stages and the third and fourth stages

一级四段前两段平均单位产水能耗为0.57 kW·h/m³,后续三、四段的平均单位产水能耗为0.30 kW·h/m³,与一、二段相比,降低了47%。可见,在一级二段系统基础上增加段间加压泵后,后续段的单位产水能耗远小于一级二段单位产水能耗,因此反渗透系统整体产水能耗下降,主要原因是在一级四段反渗透系统中,二段浓水端仍有较高的剩余压力,段间加压泵仅需提供较低的压力即可达到三、四段产水所需压力,因而三、四段的单位产水能耗较一、二段有所降低。

3 结论

增加反渗透系统的段数可以有效减少浓水排放量。在多段反渗透系统中,一~四段的膜通量依次减小,产水水质也依次变差,并且受系统进水盐分波动影响。当进水TDS>2 000 mg/L时,不宜采用三段与四段反渗透系统。一级四段反渗透系统的后续段能够利用前一段余压,后段的单位产水能耗低于前段。

参考文献:

- [1] 黄南,王文龙,吴乾元,等. 城市污水再生处理反渗透产水的水质特征与超高标准处理技术[J]. 中国环境科学, 2022, 42(5): 2088-2094.
HUANG Nan, WANG Wenlong, WU Qianyan, *et al.* Composition characteristics and ultra-high standard treatment of reverse osmosis effluent produced during municipal wastewater reclamation process [J]. China Environmental Science, 2022, 42 (5) : 2088-2094 (in Chinese).
- [2] 李旭,李彩凤,巫寅虎,等. 再生水高标准处理与工业利用工程案例研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(2): 183-186.
LI Xu, LI Caifeng, WU Yinhu, *et al.* Project case study on high standard treatment and industrial utilization of reclaimed water[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(2): 183-186(in Chinese).
- [3] 姚吉,张稳妥,滕良方,等. “双膜工艺”在工业区污水处理厂再生水工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(20): 37-41.
YAO Ji, ZHANG Wentuo, TENG Liangfang, *et al.* Application of double membrane process in reuse water project of industrial wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (20) : 37-41 (in Chinese).
- [4] LIU H, GU J, WANG S Y, *et al.* Performance, membrane fouling control and cost analysis of an integrated anaerobic fixed-film MBR and reverse osmosis process for municipal wastewater reclamation to NEWater-like product water [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 593: 117442.
- [5] JOO S H, TANSEL B. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2015, 150: 322-335.
- [6] UMA M, RODDICK F, FAN L H. Recent advancements in the treatment of municipal wastewater reverse osmosis concentrate: an overview [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2015, 45(3): 193-248.
- [7] 靖大为,席燕林. 反渗透系统优化设计与运行[M]. 北京:化学工业出版社, 2016.
JING Dawei, XI Yanlin. Optimal Designing and Operation for the Reverse Osmosis System [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016 (in Chinese).
- [8] AROLA K, VAN DER BRUGGEN B, MÄNTTÄRI M, *et al.* Treatment options for nanofiltration and reverse osmosis concentrates from municipal wastewater treatment: a review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49(22): 2049-2116.
- [9] ZHANG X Y, LIU Y. Reverse osmosis concentrate: an essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 127773.
- [10] 卢睿卿,杨光,宫徽,等. 新加坡新生水工艺对我国生产高品质回用水的启示[J]. 中国给水排水, 2019, 35(14): 36-40.
LU Ruiqing, YANG Guang, GONG Hui, *et al.* Enlightenment of Singapore's NEWater technology to the production of high-quality reclaimed water in China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (14) : 36-40 (in Chinese).
- [11] SINGH R. Analysis of energy usage at membrane water treatment plants [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 29(1/3): 63-72.
- [12] AL-OBADI M A, RASN K H, ALADHWANISH, *et al.* Flexible design and operation of multi-stage reverse osmosis desalination process for producing different grades of water with maintenance and cleaning opportunity [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 182: 525-543.

作者简介:秦显祥(1997-),男,山东济宁人,硕士,助理工程师,主要研究方向为城镇水污染控制与污水资源化利用。

E-mail: 3318532560@qq.com

收稿日期: 2022-08-07

修回日期: 2023-01-27

(编辑:任莹莹)