

述评与讨论

MBR 工艺全球应用现状及趋势分析

郝晓地, 陈 峤, 李 季, 曹达启

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中—荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 膜生物反应器(MBR)曾被认为是一项成熟并代表未来的污水处理技术,在 21 世纪初的十年中获得空前应用,并一度有取代传统活性污泥工艺(CAS)之趋势。然而,MBR 工程应用数量近年在全球市场骤降,与其在中国市场不断升温的“热像”形成鲜明对比。究其原因,高能耗和膜污染等诟病使其在技术、经济与管理等方面综合比较远不如 CAS,有悖可持续发展的全球理念。基于 MBR 发展历程,分析衰落原因,展望未来应用。MBR 工程应用在全球范围内已理性回归,对过热的中国市场应是一种启示,特别是对中国目前兴起的地下式 MBR。

关键词: 膜生物反应器(MBR); 传统活性污泥工艺(CAS); 膜污染; 地下式 MBR

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)20-0007-06

Status and Trend of MBR Process Application in the World

HAO Xiao-di, CHEN Qiao, LI Ji, CAO Da-qi

(Sino - Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Membrane bioreactors (MBR) were once recognized a mature and future wastewater treatment technology, which were extensively applied in the first decade of the century, and had a tendency to replace the conventional activated sludge process (CAS). However, MBR did not become the hot favorite technology as expected ten years ago; their engineering applications were in sharp contrast to the rising “overheated” phenomena in China. The reason for the decline is attributed to the drawbacks on energy consumption and membrane fouling, which makes MBR inferior to CAS in sustainability evaluated comprehensively by technology, economy and management. Based on the developed process of MBR, the reason of the decline is analyzed, and the further application of MBR is prospected. The rational return of MBR applications should be an inspiration to the MBR market in China, especially to underground MBR that are emerging at present in China.

Key words: membrane bioreactors (MBR); conventional activated sludge (CAS); membrane fouling; underground MBR

缺水已成为全球可持续发展限制性因素之一, 导致水污染控制和回用再生水成为历史的必然。各

国在颁布严格水资源保护法和水污染控制法的同时,亦加大了对新型污水处理工艺的研发力度,以达到控制水污染和回收再生水的目的。膜生物反应器(MBR)作为一种新型污水处理工艺,将膜分离与生物处理技术有机结合,取代传统活性污泥法(CAS)中的二沉池,以提高泥水分离效率。与CAS相比,MBR具有出水水质好、占地小、污泥产量少等优点,因此在21世纪初被世界各国追捧,一直被认为是污水处理技术的未来,大有取代CAS的主观愿望。

随着应用时间的持续,MBR工艺亦暴露出高成本、高能耗、膜污染等实际问题,使其不分场合的大规模应用备受质疑。其中,比较突出的是其高能耗、膜污染问题;对其经济、技术、管理三方面综合评价显示,MBR在可持续性方面表现不如CAS^[1,2]。正因如此,MBR在全球范围内的工程应用已回归理性。膜技术权威网^[3]统计表明,全球范围内新建MBR工程从2009年约100座/a的顶峰已回落至近年10座/a水平,且主要应用在中国。鉴于此,通过对世界MBR工艺发展历程、现状和遇到的问题进行分析,阐述世界各国对MBR工艺从狂热追捧到退烧的深层次原因,同时预测该工艺的未来发展趋势。

1 发展历程

MBR工艺概念最早源于美国。20世纪60年代,美国Dorr-Oliver公司首先将膜分离与生物处理工艺结合用于污水处理领域;尽管当初处理规模只有14 m³/d,但毕竟是MBR工艺的雏形。MBR工艺发展初期均为侧流式工艺,即膜过滤系统独立于生物反应池之外,污泥需要通过循环泵回流至生物反应池内。循环泵会加大MBR工艺运行能耗,加之当时膜分离技术发展缓慢、膜组件价格昂贵,致使当时的MBR多处于实验室小试或中试水平,并没有获得大规模实际应用^[4,5]。

20世纪70年代—80年代,MBR大体上仍处于研发阶段。在这期间,国土面积狭小、水资源短缺的日本政府启动了“水复兴90年规划”科研项目,在高层建筑中将MBR工艺用于污水回用系统使用,仅1983年—1987年间便有13家公司采用MBR工艺处理楼宇污水,直接推动了MBR技术发展。

1989年浸没式MBR工艺首次引入生物处理系统,将膜过滤系统置于生物反应池内部,取消侧流式循环泵,使处理装置变得更加紧凑,平均耗能也从早期的5 kW·h/m³降至2 kW·h/m³^[6]。内置式膜

组件的出现打开了MBR工程应用的大门,逐渐成为主流应用工艺向全球推广。

20世纪90年代之后,随着新型膜材料的出现,MBR工艺运行得到进一步稳定,能耗也进一步降低。加拿大Zenon公司先后推出超滤管式和浸入式中空纤维膜组件,日本Kubota公司研制出平板式浸没膜组件,北美、欧洲和日本纷纷建立了小型MBR项目用于市政污水和工业废水处理^[7]。20世纪90年代中期,日本已有39座采用MBR工艺的污水处理厂,最大处理规模可达500 m³/d,同时有100多处高层建筑采用MBR工艺进行污水处理后回用^[7]。1997年,英国在Porlock建立了当时世界上规模最大(2 000 m³/d)的MBR污水处理厂,随后于1999年又在Dorset建成了处理规模为13 000 m³/d的MBR污水处理厂。

进入21世纪后,随着膜分离技术、组装结构和设备制造的进步,以及各国对污水处理排放标准的收紧,MBR工艺迅速受到世界各国的青睐,特别是在中国得到了非常广泛的应用。

2 应用趋势

2.1 单体处理规模增大

MBR工艺初次应用于污水处理时因外置膜过滤系统能耗过高而不适用于大型市政污水处理项目,仅应用于小型工业或家庭污水处理(规模<500 m³/d)。随着低能耗内置浸没式MBR工艺的出现,MBR运行能耗降低,致其处理规模逐渐增大,超过1 000 m³/d的工程应用在1995年—2000年间已开始出现^[8]。10年前,膜分离技术发达的日本于2005年建成第一个大型MBR市政污水处理工程,处理规模达4 200 m³/d^[7];2008年西班牙建成当时欧洲规模最大的MBR工程(San Pedro del Pinatar)污水处理厂,规模为4.8×10⁴ m³/d;美国弗吉尼亚州Broad Run污水处理厂为北美最大MBR工程应用,规模达7.3×10⁴ m³/d;北京温榆河污水处理厂规模更高达10×10⁴ m³/d。

从2008年起,MBR工艺随长期运行优化、膜技术水平提高、膜组件成本降低,应用规模今非昔比,规模超过20×10⁴ m³/d的工程应用在世界范围内开始增多(见表1)。其中,位于瑞典斯德哥尔摩的Henriksdal污水处理厂将于2018年完成MBR升级改造并投入运行,其处理规模达到86.4×10⁴ m³/d,将成为世界MBR工程应用中的“巨无霸”。已运行

的北京槐房污水再生处理厂,处理规模也达 $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是当今世界 MBR 实际应用的“大哥大”。所有这一切主要归功于膜价格的大幅降低,目前膜市场均价已从 20 世纪 90 年代最高时的 400 美元/ m^2 降至目前的 50 美元/ m^2 以下^[9]。

表 1 世界范围大型 MBR 应用项目

Tab. 1 Large full-scale MBR applications in the world

项 目	地区	规模/ ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	投运 时间	建设 目的
Henriksdal 污水处理厂	瑞典斯德哥尔摩	86.4	2018 年	升级
Tuas 污水再生水厂	新加坡	80	2025 年	新建
武汉北湖污水厂	中国湖北	80	2019 年	新建
槐房污水再生处理厂	中国北京	60	2016 年	新建
深圳罗芳污水处理厂	中国广东	40	2018 年	升级
Seine Aval 污水处理厂	法国巴黎	35.7	2016 年	升级
Canton 污水处理厂	美国俄亥俄州	33.3	2017 年	升级
兴义污水处理厂	中国贵州	30.7	2017 年	新建
Euclid 污水处理厂	美国俄亥俄州	25	2018 年	升级
昆明第九/十污水处理厂	中国云南	25	2013 年	升级
顺义污水处理厂	中国北京	23.4	2016 年	升级
澳门污水处理厂	中国澳门	21	2017 年	升级
成都第三污水处理厂	中国四川	20	2016 年	升级
成都第五污水处理厂	中国四川	20	2016 年	升级
成都第八污水处理厂	中国四川	20	2016 年	升级
西安草滩污水处理厂	中国陕西	20	2016 年	新建
福州洋里污水处理厂	中国福建	20	2015 年	新建
武汉三金潭污水处理厂	中国湖北	20	2015 年	升级
辽阳市中心区污水处理厂	中国辽宁	20	2012 年	升级

2.2 应用增长速度骤减

国际权威 MBR 应用网对世界范围内近 20 年来 700 余座大型 MBR 污水处理厂的应用情况进行了逐年统计,并绘制了如图 1 所示的 MBR 工程应用趋势^[3]。

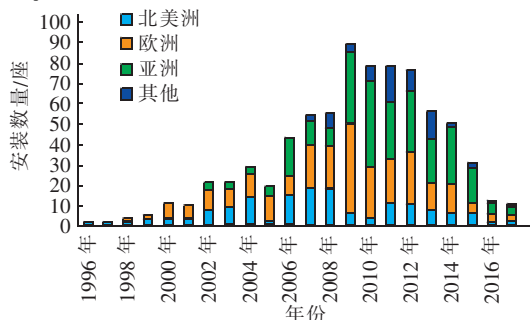


图 1 1996 年—2017 年世界范围 MBR 工程应用数量趋势

Fig. 1 Application trends of MBR installations in the world from 1996 to 2017

进入 21 世纪,MBR 技术首先在北美和欧洲获得青睐,新增项目也都集中在这两个区域。随后,亚洲和其他地区(主要为澳洲、北非)迅速跟进。MBR 工程应用在 2009 年—2012 年间达到鼎盛时期;随后便开始回落,直至近两年应用数量只有鼎盛时期的 10%。MBR 应用增长衰落是全球范围内的,欧洲和北美经历了 21 世纪最初十年“热恋”后突然“失恋”,新增项目数量锐减,以至于 2009 年后亚洲成为 MBR 技术应用的主力,2012 年后全球大型 MBR 项目主要集中在中国境内^[10]。

MBR 市场增长放缓亦可以从市场全球年复合增长率(CAGR)和市场总额看出,CAGR 可以体现某一产业增长的潜力和预期。2008 年 MBR 工艺处于鼎盛时期,全球水务市场分析师曾乐观地预测国际 MBR 市场到 2018 年 CAGR 为 22.4%,到 2018 年全球 MBR 市场价值总额达到 34.4 亿美元。但是,英国 BBC Research 最新报告显示,2014 年全球 MBR 市场总额为 4.257 亿美元,到 2019 年预计仅达到 7.777 亿美元,CAGR 仅为 12.8%,这与 2008 年预测相差甚远。BBC Research 同时也给出了全球各大洲 MBR 市场 CAGR 预测,如图 2 所示。图 2 显示,2014 年后亚太地区 MBR 市场 CAGR 高于欧洲和北美。结合图 1 数据可知,2014 年后世界 MBR 市场增长主要由亚太地区引导,其中中国的增长量对亚太地区总增长有着绝对的份额贡献。

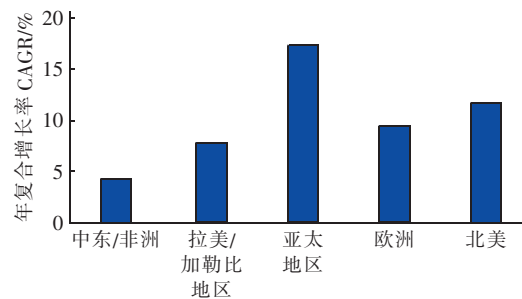


图 2 2014 年—2019 年世界 MBR 预计年复合增长率 (CAGR)

Fig. 2 Compound annual growth rate (CAGR) of MBR installations predicted by BBC Research from 2014 to 2019

3 衰落原因

3.1 运行成本高

MBR 工艺高运行成本主要限制了其广泛应用。高运行成本从投资伊始便开始体现;除膜组件依然昂贵(与 CAS 二沉池相比)外,较高的自动化运行水

平也限制其广泛应用。我国市政污水处理应用 MBR(规模 $>1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$) 技术经济数据显示, MBR 投资成本为 $2\,500 \sim 5\,000 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ (含土建、膜系统和其他设备投资), 均值为 $3\,800 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$, 远高于全国城镇污水处理厂平均为 $2\,200 \text{ 元}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$ 的投资水平^[11]。达到与 MBR 相同出水水质情况下, CAS 工艺需要增加三级过滤系统(如砂滤); 即使如此, MBR 投资依然比 CAS 高 $10\% \sim 30\%$ ^[6]。

自 MBR 概念诞生之日就一直伴随着高能耗之诟病, 主要有两方面原因^[1]: ①膜污染或堵塞导致通量下降, 维持设计通量就必须加压; ②曝气池因生物量高 ($\text{MLSS} > 8\,000 \text{ mg/L}$) 而需要维持较高的溶解氧浓度 (DO 为 $3 \sim 4 \text{ mg/L}$), 也需要为减缓膜污染

而增大曝气量。加压维持膜通量和曝气是 MBR 高能耗的主要原因, 占总能耗的 $40\% \sim 50\%$, 其中, 膜池内曝气能耗不可小觑, 约占总能耗的 $30\% \sim 40\%$ ^[11,12]。

经半个世纪发展, 通过改变曝气方式使曝气能耗显著降低, 致使 MBR 工艺能耗亦大为降低, 已从最初的 $5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 以上降到目前的 $2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ 水平^[6]。表 2 总结了一些国家应用 MBR 工艺能耗情况^[6,7,13~16]。与 CAS 工艺平均能耗 ($0.30 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[11]) 相比, MBR 工艺能耗要高出 $60\% \sim 900\%$ 。正因能耗问题让膜生产大国的日本停止了对大型市政 MBR 项目的审批。于是, 日本 2013 年后着手开始研发新的 MBR 处理技术, 旨在控制其能耗 $\leq 0.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ^[6]。

表 2 世界各国 MBR 项目平均能耗

Tab. 2 Average energy consumption of MBR installations in the world

$\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$

项目	荷兰	日本	中国	德国	法国	西班牙	新加坡
能耗	0.8 ~ 1.1	0.8 ~ 3.0	0.5 ~ 1.0	0.7 ~ 1.8	0.8 ~ 2.4	0.6 ~ 1.2	0.5 ~ 1.3

3.2 膜污染与通量下降

尽管膜污染及其控制和清洗已经从技术层面做了大量有益工作, 但并没有从根本上解决这一问题, 膜污染现象终归是会发生的^[17]。为维持正常过滤通量, 通过在线(维护性)清洗和离线(恢复性)化学清洗虽然会减轻膜污染问题, 但是膜清洗会缩短膜的使用寿命, 而时常更换膜组件又会增加运行成本。

此外, 膜通量问题也日益引起人们关注。在处理水量波动较大的情况下, 膜组件通量可靠性经不起时间考验。污水处理厂进水流量是一个动态变化过程, 随气候、季节等因素变化而变化, 流量变化对 MBR 工艺正常运行会产生较大影响。MBR 膜组件存在一个极限通量, 如果进水流量超过极限通量或者因为膜污染导致膜通量下降, 超出通量部分污水就无法通过膜过滤处理^[18]。常规处理办法是增加一个流量调节池或者使用备用膜, 或进行溢流处理, 但这会增加投资成本和运行费用。在实际运行中, 通常是 MBR 刚运行前几年膜通量不会超限, 但随时间推移膜污染的出现会导致通量下降。为此, 在水量波动较大地区, 选择 MBR 工艺时需要特别谨慎。

3.3 标准化的缺失

目前, 膜生产厂商众多, 膜产品种类亦繁多。各厂商均有自己数据库和设计规范, 但并没有形成一个统一的行业标准和规范, 导致不同生产厂规格型

号、外形尺寸各不相同, 互不兼容。设备缺乏标准化给设计和采购带来麻烦, 应用时一旦出现需要更换膜组件时, 标准化缺失带来的劣势更为突出; 更换品牌意味重新设计膜系统, 增加运行成本。即使同一品牌膜组件先后两种型号也常常不兼容; 2008 年德国 Rödinger 项目更换膜组件时就出现了这种情况, 不得不重新设计膜系统^[19]。此外, 缺乏一条龙标准化作业服务常常导致膜供应商与施工方脱节, 在安装过程中膜组件损坏现象比比皆是。

膜市场的标准化已受到重视, 日本早在 2012 年便成立专家委员会, 就 MBR 标准化问题进行讨论; 欧盟资助的“加速城市污水净化膜发展 (AMED-EUS)”项目中也包括了 MBR 标准化建设^[6,7]。市场标准化必将影响各大膜生产企业的经济利益, 所以膜标准化过程至今举步维艰, 严重影响 MBR 工艺推广应用。

4 展望未来

虽然 MBR 工艺具有出水水质和占地方面两大优势, 但是, 综合技术、经济、管理等因素, MBR 已被确认为不可持续工艺^[1,2,20]。只有在土地、空间受到严格限制的情况下, MBR 方能显示其独特优势。否则, CAS + 砂滤将比其具有综合竞争力。荷兰 Varsseveld 污水处理厂 MBR 示范性项目运行 8 年后已选择拆除, 代之以 CAS + 砂滤; 荷兰仅有的几座

MBR 也陆续被全部拆除。

然而,位于瑞典斯德哥尔摩的 MBR“巨无霸”Henriksdal 项目却吸引着人们的眼球,它将成为世界上规模最大的 MBR 污水处理厂。这一庞大工程即将运行并不意味着 MBR 将再次带动其应用的热潮。这一工程的选择重点放在应对北欧严寒冬季常出现的低温、积雪、结冰等严重问题,遂考虑将此工程放在斯德哥尔摩市中心一地下岩洞内实施^[21]。限于岩石结构空间狭小,同时为满足欧盟“波罗的海计划(BSAP)”出水水质和扩大处理规模需要,项目只是无奈选择了 MBR 工艺进行升级改造^[22]。

国土面积狭小的新加坡近年来大力发展“新生水(NEWater)”项目。因 MBR 可以提供持续稳定的优质出水,适合用作反渗透原水,且可以省去常规反渗透之前所需的微滤/超滤(MF/UF),综合能耗相比于 CAS 工艺再加三级处理还节省 $0.13 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,且可以降低土地使用成本^[23]。因此,在极度缺水 and 寸土寸金的新加坡,MBR 似乎比 CAS 具有应用优势。类似新加坡情况也出现在一些缺水的海湾国家再生水项目上,况且这些国家油比水“贱”,“以油换水”在这些国家具有明显优势。

与上述国家特殊应用情况相比,我国大规模应用 MBR 技术的理由似乎并不充分,特别是近年出现的地下式 MBR。无疑,土地、空间极度短缺、昂贵的一些大中城市,迫不得已应用 MBR 无可厚非。但是,将 MBR 作为未来污水处理技术发展方向,并用它来全面升级既有及新建未来污水处理设施(甚至扩展到农村污水处理设备)确实值得商榷。对于我国发展中的地下式 MBR 更要慎重,毕竟它不是一个可持续的工艺。

5 结语

除中国外,MBR 工艺在全球应用数量骤降并非偶然现象,高能耗与膜污染使其不可持续。如果 MBR 这两个突出弊端不能在未来得到根本性解决,其工程应用很难维系。只有在一些特定情况(土地极度匮乏、空间十分有限、严重缺水、水比油贵)下,应用 MBR 才可能具有被动选择优势。即使在这样一些特定情况下,MBR 也不是唯一选择,比如好氧颗粒污泥技术就比它具有明显优势。

参考文献:

[1] 郝晓地,李季,曹达啟. MBR 工艺可持续性能量化评

价[J]. 中国给水排水,2016,32(7):14-23.

Hao Xiaodi, Li Ji, Cao Daqi. Quantitative evaluation of the sustainability of MBRs processes[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(7): 14-23 (in Chinese).

[2] Hao X D, Li J, Loosdrecht M C M, et al. A sustainability-based evaluation of membrane bioreactors over conventional activated sludge processes[J]. J Environ Chem Eng, 2018, 6(2): 2597-2605.

[3] Skinner S. Interactive map: History of the largest municipal MBR installations[EB/OL]. <http://www.thembr-site.com/interactive-map-history-of-the-largest-municipal-mbr-installations>, 2017-11-04.

[4] Li J X, Zhang B G, Liu Y. Global research trends on membrane biological reactor (MBR) for wastewater treatment and reuse from 1982 to 2013: A bibliometric analysis[J]. Electron Lib, 2016, 34(6): 945-957.

[5] Meng F, Chae S R, Shin H S, et al. Recent advances in membrane bioreactors: Configuration development, pollutant elimination, and sludge reduction[J]. Environ Eng Sci, 2012, 29(3): 139-160.

[6] Krzeminski P, van der Graaf J H J M, van Lier J B. Specific energy consumption of membrane bioreactor (MBR) for sewage treatment[J]. Water Sci Technol, 2012, 65(2): 380-392.

[7] Itokawa H, Tsuji K, Yamashita K, et al. Design and operating experiences of full-scale municipal membrane bioreactors in Japan[J]. Water Sci Technol, 2014, 69(5): 1088-1093.

[8] Kraemer J T, Menniti A L, Erdal Z K, et al. A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment[J]. Bioresour Technol, 2012, 122: 2-10.

[9] Wozniak T. Comparison of a conventional municipal plant, and an MBR plant with and without MPE[J]. Desalin Water Treat, 2012, 47(1/3): 341-352.

[10] Zheng X, Zhou Y F, Chen S H, et al. Survey of MBR market: Trends and perspectives in China[J]. Desalination, 2010, 250(2): 609-612.

[11] Xiao K, Xu Y, Liang S, et al. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: Current state and future prospect[J]. Fron Environ Sci Eng, 2014, 8(6): 805-819.

[12] Sun J, Liang P, Yan X, et al. Reducing aeration energy consumption in a large-scale membrane bioreactor: Process simulation and engineering application[J]. Water Res, 2016, 93: 205-213.

- [13] 林爽. 城市污水处理厂 MBR 工艺综合评价研究 [D]. 北京:清华大学,2015.
Lin Shuang. A Comprehensive Evaluation for Municipal Sewage Plant based MBR Technology [D]. Beijing:Tsinghua University,2015 (in Chinese).
- [14] Barillon B, Martin R S, Langlais C, *et al.* Energy efficiency in membrane bioreactors [J]. *Water Sci Technol*, 2013, 67 (12): 2685 – 2691.
- [15] Iglesias R, Simón P, Moragas L, *et al.* Cost comparison of full-scale water reclamation technologies with an emphasis on membrane bioreactors [J]. *Water Sci Technol*, 2017, 75 (11): 2562 – 2570.
- [16] Lay W C L, Lim C, Lee Y, *et al.* From R & D to application: Membrane bioreactor technology for water reclamation [J]. *Water Practice Technol*, 2017, 12 (1): 12 – 24.
- [17] Huang X, Xiao K, Shen Y. Recent advances in membrane bioreactor technology for wastewater treatment in China [J]. *Front Environ Sci Eng China*, 2010, 4 (3): 245 – 271.
- [18] 陈珺, 杨琦. MBR 工艺应用于城市污水处理的技术风险 [J]. *中国给水排水*, 2012, 28 (10): 109 – 111.
Chen Jun, Yang Qi. Technical risks of MBR process for municipal wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28 (10): 109 – 111 (in Chinese).
- [19] Brepols C, Schafer H, Engelhardt N. Considerations on the design and financial feasibility of full-scale membrane bioreactors for municipal applications [J]. *Water Sci Technol*, 2010, 61 (10): 2461 – 2468.
- [20] Bertanza G, Canato M, Laera G, *et al.* A comparison between two full-scale MBR and CAS municipal wastewater treatment plants: Techno-economic-environmental assessment [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24 (2): 17383 – 17393.
- [21] Andersson S, Ek P, Berg M, *et al.* Extension of two large wastewater treatment plants in Stockholm using membrane technology [J]. *Water Pract Technol*, 2016, 11 (4): 744 – 753.
- [22] Judd S. Henriksdal wastewater treatment plant, Stockholm, will become the world's largest MBR facility [EB/OL]. <http://www.thembrsite.com/news/henriksdal-wastewater-treatment-plant-stockholm-will-become-worlds-largest-mbr-facility>, 2015-03-04.
- [23] 郝晓地, 孟祥挺, 付昆明. 新加坡再生水厂能耗目标及其技术发展方向 [J]. *中国给水排水*, 2014, 30 (24): 7 – 11.
Hao Xiaodi, Meng Xiangting, Fu Kunming. Targeted energy consumption and associated technologies developed in water reclamation plants in Singapore [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30 (24): 7 – 11 (in Chinese).



作者简介: 郝晓地 (1960 –), 男, 山西柳林人, 教授, 从事市政与环境工程专业教学与科研工作, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术、污水处理数学模拟技术、可持续环境生物技术, 现为国际水协期刊《Water Research》区域主编 (Editor)。

E-mail: haoxiaodi@bucea.edu.cn

收稿日期: 2018-05-08

加强水土保持, 打造绿水青山