

# 发展膜技术推动非常规水源的开发利用

侯立安<sup>1,2</sup>, 张雅琴<sup>1</sup>, 张 林<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 化学工程与生物工程学院, 杭州 310027;

2. 第二炮兵后勤科学技术研究所, 北京 100011)

**摘要:** 综述膜技术在污水回用、海水和苦咸水淡化、雨水利用、矿井水再用等典型非常规水源开发和资源化利用中的发展现状; 总结和展望膜技术推动非常规水资源开发的发展方向和前景.

**关键词:** 水资源短缺; 膜技术; 非常规水源; 开发利用

**中图分类号:** TV213.9    **文献标志码:** A

水是人类文明的基础,也是社会发展的重要战略资源。我国水资源人均占有量远低于世界平均水平,是世界上13个水资源贫乏的国家之一。随着国民经济持续快速的发展,对水资源的需求量也不断地增加,供需矛盾日益突出。在地表水和地下水等常规水源供给紧张的情况下,适时地开发利用非常规水源可以在一定程度上补充水源,缓解水资源供需紧张的现状。

非常规水源通常包括再生水、海水、雨水、苦咸水和矿井水等,因其中含有大量污染物或杂质,难以直接利用,或通过简单的处理后仍旧达不到可利用的标准。膜技术具有处理效率高、节能、适用范围广和工艺简单等优点,在水资源开发和利用中起着越来越重要的作用。近年来,材料和工程等相关科学的不断进步,推动了功能膜和新膜过程的快速发展,使其在非常规水源处理中得到了良好的应用,并发挥着越来越重要的作用。为此,本文对膜技术在几种典型的非常规水源处理中的研究和应用现状进行分析,并对未来的发展趋势进行了展望,以期对膜技术在非常规水源开发中进一步拓展指出方向。

## 1 膜技术在非常规水资源的开发与利用的应用

### 1.1 污水膜法回用

#### 1.1.1 生活污水和工业废水

最近几年我国的水环境污染状况虽有明显改善,但废水排放量仍旧很大,据统计,2013年废水中COD排放总量达到了2000多万t,相当部分的农村面源废水和少量工业废水未经处理,直接排入水域,污染了地表水和地下水,使城乡水安全问题更加严重<sup>[1]</sup>。因此,如能将城乡污水进行深度处理,开辟为新的稳定水源,既解决了环境污染问题,又可缓解供水紧张的状况。目前,膜分离已成为解决污水回用工艺的预处理和深度处理的首选技术之一。超滤、微滤等膜技术已成功应用于中水回用处理<sup>[2]</sup>,浸没式膜生物反应器也被广泛应用于生活污水处理<sup>[3-4]</sup>;在工业废水方面,电渗析法处理含有贵金属离子或其他高浓度酸碱的废水<sup>[5]</sup>,反渗透、纳滤法处理电镀废水、印染废水和造纸废水等均有相应的研究和工程实例<sup>[6-8]</sup>,并取得良好的社会和经济效益。

膜技术在废水深度处理与资源化回用领域表现

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21076176; L1422037); 教育部博士点基金资助项目(20130101110064); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07406006)

第一作者简介: 侯立安(1957-),男,江苏徐州市人,博士,教授,主要研究方向为环境工程, E-mail: houlian678@hotmail.com

出了独特的优势和巨大的应用潜力。然而,由于污水的多样性导致单一的膜技术并不能完全解决各种污水处理问题,因此在实际应用中需要将不同的膜技术或与其他处理工艺进行组合使用,发挥各自特点,取得更大的技术和经济效益,这也是未来膜技术在污水深度处理领域的重要发展方向之一。

### 1.1.2 含藻水源

近年来,全国部分湖泊、水库的富营养化情况有所恶化。根据2013年中国环境状况公报的公布,27.8%的国控重点湖泊出现不同程度的富营养化现象<sup>[1]</sup>。湖泊水库富营养化不仅破坏了水域生态环境,影响水质理化指标,同时藻类大量繁殖分泌的毒素还会影响水域环境,严重影响饮用水安全。传统的混凝-沉淀-过滤-消毒工艺对藻细胞及水中溶解性有机物的去除能力十分有限<sup>[9]</sup>。与此同时,混凝剂和加氯消毒使用不当,有时也会对水质产生二次污染,使得供水水质难以得到保障。超滤技术作为一种新型的含藻水源处理技术近年来受到业内重视。

发生富营养化的湖泊中藻类多数以蓝藻为主,其直径为3~7 μm,而超滤膜平均孔径在3~100 nm,理论上超滤膜能够完全去除藻细胞<sup>[10]</sup>。梁恒等<sup>[11]</sup>发现PVC超滤膜能够截留原水中的全部铜绿微囊藻细胞。Campinas<sup>[12]</sup>通过实验也证实了醋酸纤维素超滤膜对藻细胞的去除率为100%。

目前净水市场上常用的超滤膜多为有机膜,实践表明,藻细胞及其分泌物易粘附在有机膜表面而形成膜污染,影响膜产水效率和寿命<sup>[13]</sup>。为解决膜污染问题,保证膜通量,通常采用预氯化和高锰酸钾氧化等方法杀死藻类,减轻膜污染。但残留的氧化剂易对有机膜产生一定的破坏作用,从而影响膜寿命<sup>[13-15]</sup>。针对以上问题,有研究者采用机械性能好、耐氧化的新型无机陶瓷超滤膜替代有机膜,进行含藻水源处理和回用<sup>[16]</sup>,结果表明,适当投加次氯酸钠能够改善陶瓷膜通量,预氯化与陶瓷膜组合工艺能够有效净化含藻原水,效果稳定,具有良好的应用前景。

在含藻水源中,除了藻细胞本身,还存在大量藻细胞释放的分泌物,由于部分有机物的分子量较小,超滤膜不能完全去除这些有机物。通过将超滤技术与其他处理工艺(活性炭吸附、纳滤等)集成,发挥各自的特点,能够高效去除含藻水源中的藻细胞、天然有机物和氨氮等污染物。

随着超滤膜生产成本的不断降低,品种不断增

加,质量不断提高,其应用于含藻水源处理的成本将达到可承受范围,以超滤技术为核心的处理工艺将成为含藻水源水体净化和开发的一个重要发展方向。

### 1.1.3 非常规污染水源

非常规污染水源是指放射性、生化试剂及生活饮用水卫生标准规定之外物质所造成污染的水源。由于污染物的特殊性,为了保护环境和人类健康,非常规污染水必须要经过更为严格的处置,膜技术则被认为是最有效的处理方法之一。由于Donnan平衡的作用,纳滤可以有效去除高价离子,可应用于在核工业中含硼、钴废水的处理和燃料铀的回用<sup>[17]</sup>。反渗透则对所有离子都具有截留作用,因而在放射性废水的处理中应用更为成熟,美国的Pilgrim、Comanche Peak、Dresden等核电站都采用反渗透技术处理放射性废水。

本研究团队曾在膜法处理放射性废水方面开展了一系列的研究工作:采用膜分离技术对含有特定放射性元素污水进行处理,发现纳滤表现出更大的优势<sup>[18]</sup>;随后选用TS40型纳滤膜对放射性核素的截留机理进行研究<sup>[19]</sup>;建立了超滤-纳滤-离子交换工艺去除污水中的铯、钚、铀等放射性核素,处理后的水质满足相关标准的要求<sup>[20-21]</sup>。

与压力驱动膜过程相比,膜蒸馏对非挥发性的放射性核素具有100%的理论截留率,Zakrzewska<sup>[22]</sup>等论证了膜蒸馏技术处理废水的可行性:虽然膜长期使用的亲水化等问题对膜蒸馏的大规模使用造成了一定的影响,但其能利用低品位热的特点,为膜蒸馏与核反应冷却系统耦合利用废热提供了可能性,因而在放射性废水处理中仍具有非常大的应用前景。

生化试剂是放射性核素之外的另一类重要的非常规污染物,膜技术在去除水体中生化污染方面也有较好的效果。本团队自行研制了以超滤-纳滤为核心的净水装置去除饮用水中“三致”有机污染物和类炭疽杆菌,结果表明,该工艺对有机污染物的去除率超过了90%;“三合二消毒”与该工艺的联合过程对炭疽杆菌均有理想的去除效果,去除率接近100%<sup>[23]</sup>。

## 1.2 海水淡化

地球上97%以上的水资源以海水的形式存在,丰富的海水资源为海水淡化提供了稳定可靠的水源。因此高效的海水淡化技术可以缓解近海地区水

资源不足的问题。近年来,反渗透技术因投资适中、效率高、工艺成熟等优点,已迅速发展成为应用最为广泛的海水淡化技术。目前,全球约有 80% 的海水淡化工厂使用了反渗透技术。全球规模最大、最先进的以色列 Sorek 反渗透海水淡化厂,于 2013 年 10 月投入全面运营,产水规模达 62.4 万  $\text{m}^3/\text{d}$ ,其中约 54 万  $\text{m}^3$  的水直接进入供水系统,为 150 多万人提供纯净的饮用水,占以色列市政供水的 20%。预计到 2016 年,全球海水淡化产能将达到 1.3 亿  $\text{m}^3/\text{d}$ ,比 2008 年增加 1 倍<sup>[24]</sup>。

反渗透海水淡化规模大,因此单组件产水能力的微小提高就可能大幅度降低制水成本,而产水成本的进一步降低则需要综合考虑膜材料、能量回收、膜组件、新工艺过程等多方面的因素,其中,膜性能最为关键。近年来,除了研制具有高分离性能、高化学稳定性、耐污染等新型膜材料以外<sup>[25]</sup>,针对不同的水质开发出专用的、有选择性的膜材料,进而加强脱盐系统运行稳定性,降低运行费用是反渗透海水淡化技术的新研究点。

反渗透海水淡化过程存在结垢以及膜污染等问题,因此,良好的预处理对于反渗透海水淡化过程至关重要。采用合适的膜法预处理技术,特别是采用微滤、超滤和纳滤全膜法预处理不但仅产品水质好,更主要的是可以显著减少过程化学品的添加量和膜器本身的清洗次数,使过程环境更友好<sup>[26-27]</sup>。除反渗透外,膜蒸馏和正渗透被认为是新型海水淡化技术的重要补充<sup>[28]</sup>。膜蒸馏因其操作条件温和、截留率高(理论可达 100%)以及可利用低品位热源等特点,较适用于小岛屿和渔船的海水淡化。虽未实现大规模的工业化,但已有小规模工业应用的报道<sup>[29]</sup>。正渗透技术由于无需外加压力,节能优势十分明显,但该过程中淡水从原料液转移到驱动液之后,还需要对驱动液进行脱盐处理,也即正渗透技术需结合其它的脱盐技术才能达到海水淡化的目的,目前尚无海水淡化工业应用的报道<sup>[30]</sup>,规模化应用尚有一些技术瓶颈需要攻克。

### 1.3 苦咸水淡化

苦咸水是指含盐量为 1 000  $\text{mg}/\text{L}$  以上的水,我国西北地区赋存着大量苦咸水,因此苦咸水淡化是缓解我国内陆地区水资源危机的有效办法。

电渗析法是较早应用于苦咸水淡化的技术。19 世纪 50 年代,美国、英国就开始将电渗析用于苦咸水淡化。我国于 1987 年在山东长岛县建立了第一处

电渗析地下苦咸水除盐示范工程<sup>[31]</sup>,随后,山东、河北等多个地区的油田和煤矿均建立了电渗析淡化苦咸水装置。经过几十年的发展,电渗析已形成了较为成熟的技术产业,我国也成为世界上使用电渗析装置进行苦咸水淡化最多的国家。然而,电渗析去除水中有机物和细菌的效果差,且过程能耗大,脱盐率有限,使其在苦咸水淡化工程的应用中受到一定限制。因此,以反渗透和纳滤为代表的高截留率膜过程在苦咸水淡化中取得了迅速发展。

近年来,反渗透技术不断改进,已经逐渐成为苦咸水淡化的首选技术。我国自主建设的反渗透苦咸水淡化装置的一些经济技术指标已达到国际先进水平。例如,以反渗透技术为核心的沧州地区 18 000  $\text{t}/\text{d}$  苦咸水淡化装置,运行实测回收率为 77.0%,耗电量 2.75  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ ,能量回收率 29.8%,淡化水质量符合当时国家饮用水标准(GB 5749—1985),其中溶解性总固体小于 500  $\text{mg}/\text{L}$  优于国家饮用水标准。实践证明,反渗透为苦咸水的开发利用提供了更大的可行性<sup>[32]</sup>。

纳滤膜独特的分离特性使其在苦咸水淡化领域得到广泛应用。我国首套工业化大规模纳滤高硬度苦咸水淡化软化示范工程于 1997 年在山东长岛建成,经一级纳滤后的产水的溶解性总固体、总硬度等均达到当时的国家饮用水标准(GB 5749—1985),可直接供给饮用<sup>[33]</sup>。随后,我国崇明岛、甘肃庆阳等多地先后建立了以纳滤技术为核心的苦咸水淡化示范工程<sup>[34-35]</sup>。研究表明,在水质相同时,纳滤苦咸水淡化较反渗透的动力能耗降低 20% 左右,设备投资节省 12.5% 左右。

此外,膜蒸馏可与太阳能、地热等可再生能源相结合,因而在苦咸水淡化中也具有很强的竞争力<sup>[36]</sup>。

膜技术在苦咸水资源的开发利用中显示出巨大的潜力和优越性。在推广应用膜技术处理苦咸水的同时,还应重点加强膜抗污损力和延长膜组件使用寿命的研究,以及水质预处理技术与提高膜技术产水率的组合工艺技术研究,以降低运行成本,提高使用效率,使苦咸水淡化更经济、更方便。

### 1.4 雨水膜法利用

我国年平均降水量约 650  $\text{mm}$ ,其中南方许多地区年降水量超过 1 000  $\text{mm}$ ,大量的雨水给城市带来了丰富的水源。因此,合理利用雨水对非常规水源的开发以及城市应急供水系统具有非常重要的意

义。目前,国内外的雨水利用大部分限于雨水收集和预处理回用,通过将雨水储存在储水池内,再经过沉淀、混凝和过滤等方法处理后,作为中水用于城市小区的杂用水<sup>[37]</sup>。

与传统的处理技术相比,膜技术不仅能将雨水处理为生活用水,还可以将雨水处理达到饮用水标准,最大限度地发挥雨水的作用。早在本世纪初,悉尼奥运会期间就将膜技术应用于场区的雨水收集处理系统,采用聚丙烯中空纤维微滤膜作为预处理,去除水中的悬浮物和病原体,根据回用水质含盐量的要求,再采用反渗透除盐,产水加氯消毒后用于冲洗厕所,而反渗透浓水则用于绿地灌溉。新加坡是一个严重缺水的国家,但雨水较为丰富,降雨以暴雨为主,具有突然性,局域性,强度大,持续时间短的特征,为此新加坡公用事业管理局对城市雨水的储存进行了系统规划,陆续建成了17个蓄水池(库)和1个在下暴雨时防洪的雨水收集池系统,总库容量接近1亿 $m^3$ ,积蓄的雨水经过以反渗透为核心工艺处理后作为生活用水,所供给的水量占城市总供水量的30%<sup>[38]</sup>。国内,本课题组设计并建立了基于超滤和低压反渗透的双膜集成装置,该装置产水量达25 $m^3/d$ ,可在雨洪期间作应急供水使用<sup>[39]</sup>。

我国不同地区的雨水降水水量和水质差异性大,因此,根据不同地区的雨水情况选择合适的膜过程或者膜过程集成工艺,对雨水进行处理、利用,将有助于雨水的综合利用。

### 1.5 矿井水膜法再用

据统计,我国矿井水年排放量约为22亿t,而矿井水的资源利用率仅在20%左右<sup>[40]</sup>。大量未经处理的矿井水直接排放,不仅污染了环境,而且浪费了宝贵水资源。因此,对矿井水进行处理,使其资源化再用的意义重大。

目前,习惯将矿井水按水质类型特征分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化矿井水、酸性矿井水和含有有毒元素和放射性元素矿井水五类,不同的矿井水常采取不同的处理方法<sup>[41]</sup>。高矿化度矿井水中硫酸盐和碳酸盐为主要成分,含量大于1000 $mg/L$ 矿井水。这类矿井水中含有大量的无机离子,因而硬度较高。因此,处理高矿化度矿井水的关键就是除盐,常用的膜技术有电渗析、反渗透和纳滤,其过程与海水、苦咸水淡化过程十分相似。2002年以来,我国山西省已有十多个煤矿利用反渗透法,将矿井水处理用作生活饮用水。随后,山西大同市采用了

“超滤+反渗透”的工艺进行矿井水净化过程,处理后的矿井水不仅除去了各种污染物,而且各种指标均符合国家生活饮用水标准<sup>[42]</sup>。

此外,针对含悬浮物矿井水的净化,有研究者以纳滤膜技术为核心建立了净化工艺流程。稳定运行4周后的结果表明,该工艺对矿井水的处理效果明显,出水达到国家饮用水标准,水质稳定,是一种经济高效的处理工艺<sup>[43]</sup>。

## 2 结语

非常规水资源的开发和利用是保证国家经济和社会可持续发展的重要途径,面对日趋突出的水资源供需矛盾,膜技术的发展在推动非常规水资源开发中发挥了巨大的作用。

1) 充分开发多样性的非常规水源:单一膜技术或多膜集成技术能够满足不同水源、水质的处理与回用,为不同类型非常规水源的资源化利用提供了可能。

2) 提高了水的利用效率:膜技术的易集成和高效的特点,使其能够应用于不同领域,有助于实现废水的循环利用,减少了废水的排放。

3) 增强非常规水源开发的经济效益:膜技术节能的特点能有效降低非常规水源开发和利用的成本,尤其是反渗透技术在海水淡化、苦咸水淡化和污水资源化方面已经取得突破性进展。

随着社会经济的进一步发展,水资源的供需矛盾也会愈加突出,非常规水源开发与利用对社会发展的支撑作用会更加凸显,相应地,对非常规水源处理技术也提出更高的要求。因此,根据水源状况针对性地制备高性能的膜和设计多膜过程集成工艺或开发膜与其他技术耦合的工艺是未来该领域的重要研究方向。

### 参考文献:

- [1] 环境保护部发布《2013年中国环境状况公报》[J]. 中国环境科学, 2014, (6): 1379.
- [2] Li J, Xu Z. Y., An H G., *et al.* Study of using microfiltration and reverse osmosis membrane technologies for reclaiming cooling water in the power industry[J]. Water Environ Res, 2007, 79(7): 753—758.
- [3] Ozgun H, Dereli R K, Ersahin M E, *et al.* A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations

- and expectations[J]. *Sep Purif Technol*, 2013,118:89-104.
- [4] Dutta K, Lee M Y, Lai W W P, *et al*. Removal of pharmaceuticals and organic matter from municipal wastewater using two-stage anaerobic fluidized membrane bioreactor[J]. *Bioresource Technol*, 2014,165:42-49.
- [5] 周国平, 杨建男, 罗士平. 阴离子交换膜渗析法回收含硫酸钠的高浓度硫酸废水[J]. *膜科学与技术*, 2002, (6):24-27.
- [6] Altman S J, Jensen R P, Cappelle M A, *et al*. Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage[J]. *Desalination*, 2012, 285: 177-183.
- [7] Qin J X, Dai X G, Zhou Y, *et al*. Desalting and recovering naphthalene sulfonic acid from wastewater with concentrated bivalent salt by nano filtration process[J]. *J Membr Sci*, 2014,468:242-249.
- [8] Zhu X. Y, Zheng Y P, Chen Z, *et al*. Removal of reactive dye from textile effluent through submerged filtration using hollow fiber composite nano filtration membrane[J]. *Desal Water Treat*, 2013,51(31/33):6101-6109.
- [9] 张学礼, 季爱玲. 超滤膜在富营养化水处理中的应用前景[J]. *辽宁化工*, 2011,(2):148-150.
- [10] 梅洪, 赵先富, 郭斌, 等. 中国淡水藻类生物多样性研究进展[J]. *生态科学*, 2003,(4):356-359.
- [11] Liang H, Gong W J, Li G, B. Performance evaluation of water treatment ultrafiltration pilot plants treating algae-rich reservoir water[J]. *Desalination*, 2008, 221 (1/3):345-350.
- [12] Campinas M, Rosa M J. Evaluation of cyanobacterial cells removal and lysis by ultrafiltration[J]. *Sep Purif Technol*, 2010,70(3):345-353.
- [13] 瞿芳术, 梁恒, 雒安国, 等. 高锰酸盐复合药剂预氧化缓解超滤膜藻类污染的中试研究[J]. *环境科学学报*, 2010,(7):1366-13.
- [14] 田宝义, 何文杰, 黄廷林, 等. 预氯化对混凝/超滤工艺处理滦河高藻原水的影响[J]. *中国给水排水*, 2009,(21):56-58.
- [15] Qiu M. H, Fan Y Q, Xu N P. Preparation of supported zirconia ultrafiltration membranes with the aid of polymeric additives[J]. *J Membr Sci*, 2010,348(1/2): 252-259.
- [16] 吴启龙, 盛德洋, 张锡辉, 等. 新型陶瓷膜过滤去除水中藻类的研究[J]. *中国给水排水*, 2013,(11):47-50.
- [17] 侯立安. 核污染水处理技术及饮用水安全保障[J]. *给水排水*. 2011,(11):3-5.
- [18] 侯立安, 左莉, 郭珍珍. 反渗透和纳滤工艺对饮用水中致突变物去除的试验研究[J]. *净水技术*, 2001, (4):14-15.
- [19] 侯立安, 左莉, 刘晓敏. 纳滤膜对模拟放射性核素的截留机理研究. 2006中国科协年会第三分会场, 2006, 中国北京.
- [20] 侯立安, 左莉. 纳滤膜分离技术处理放射性污染废水的试验研究[J]. *给水排水*, 2004,(10):47-49.
- [21] 侯立安, 左莉, 刘晓敏, 等. 纳滤和离子交换组合工艺去除模拟核及生物毒剂废水的试验研究. 加速膜科技成果转化, 推动膜工业持续发展[A]. 第二届中国膜科学与技术报告会[C]. 2005, 中国北京.
- [22] Zakrzewska-Trznadel G, Harasimowicz M, Chmielewski A G. Concentration of radioactive components in liquid low-level radioactive waste by membrane distillation[J]. *J Membr Sci*, 1999,163(2):257-264.
- [23] 侯立安, 左莉. 膜分离法处理模拟毒剂废水的试验研究[J]. *膜科学与技术*, 2006,(2):52-55.
- [24] Elimelech M, Phillip W A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. *Science*, 2011,333(6043):712-717.
- [25] Zhao H Y, Qiu S, Wu L G, *et al*. Improving the performance of polyamide reverse osmosis membrane by incorporation of modified multi-walled carbon nanotubes[J]. *J Membr Sci*, 2014,450:249-256.
- [26] Wilf M, Schierach M K. Improved performance and cost reduction of RO seawater systems using UF pretreatment[J]. *Desalination*, 2001,135(1/3):61-68.
- [27] Hassan A M, Farooque A M, Jamaluddin A T M, *et al*. Ademonstration plant based on the new NF-SWRO process[J]. *Desalination*, 2000,131(1/3):157-171.
- [28] 王宏涛, 李保安, 刘兵. 海水淡化技术现状及新技术评述[J]. *盐业与化工*, 2014,(6):1-5.
- [29] Wang P, Chung T S. A conceptual demonstration of freeze desalination-membrane distillation(FD-MD) hybrid desalination process utilizing liquefied natural gas (LNG) coldenergy[J]. *Water Res*, 2012,46(13):4037-4052.
- [30] 余乾洪, 迟莉娜, 周伟丽, 等. 正渗透膜分离技术及其在水处理中的应用与研究[J]. *环境科学与技术*, 2010,(3):117-122.
- [31] 宋德政, 薛德明, 柳晓英, 等. 长岛县电渗析地下苦咸水淡化试验站[J]. *膜科学与技术*, 1989,(3):37-40.
- [32] 焦光联, 吕建国. 反渗透技术在西部地区苦咸水资源化中的应用[J]. *甘肃科技*, 2007,(5):104-106.

- [33] 张国亮, 陈益棠. 纳滤膜软化技术在海岛饮用水制备中的应用[J]. 水处理技术, 2000, (2): 67-70.
- [34] 赖特明, 方建慧, 邓英, 等. 纳滤膜处理崇明岛苦咸水中试研究[J]. 盐业与化工, 2009, (2): 17-20.
- [35] 吕建国, 王文正. 纳滤淡化高氟苦咸水示范工程[J]. 给水排水, 2009, (7): 25-27.
- [36] 陈明玉, 唐娜, 袁建军. 膜蒸馏海水及苦咸水淡化研究进展[J]. 盐业与化工, 2006, (6): 18-21.
- [37] 宫永伟, 李俊奇, 师洪洪, 等. 城市雨洪管理新技术中的几个关键问题讨论[J]. 中国给水排水, 2012, (22): 50-53.
- [38] 孟大勇. 借鉴国外经验提高我国城市雨水利用率[J]. 山西建筑, 2012, (6): 141-143.
- [39] 赵海洋, 周志军, 张林, 等. 双膜集成技术保障城市雨洪应急供水的可行性研究[A]. 2013 城市防洪国际论坛[C]. 2013, 中国上海.
- [40] 陈爱民, 丛晓东, 郑智勇. 采用双膜法处理矿井水回用过程中的问题[J]. 工业水处理, 2010, (8): 90-92.
- [41] 袁航, 石辉. 矿井水资源利用的研究进展与展望[J]. 水资源与水工程学报. 2008, (5): 50-57.
- [42] 崔玉川, 潘耀祖, 刘婷, 等. RO法在高矿化度矿井水处理回用中的应用[J]. 净水技术. 2006, (5): 4-6.
- [43] 聂锦旭, 肖贤明. 纳滤膜分离技术在矿井水处理中的研究[J]. 膜科学与技术. 2007, (2): 53-56.

## Promotion of unconventional water resource utilization via membrane technology

HOU Li'an<sup>1,2</sup>, ZHANG Yaqin<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>

- (1. College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China;  
2. Institute for Logistic Science and Technology of the Second Artillery, Beijing, 100011, China)

**Abstract:** A detailed review was drawn on the application of membrane technologies to develop several unconventional water resources, including sewage, seawater and brackish water, rainwater as well as mine water. Finally, the current development of membrane for unconventional water development and utilization was concluded, and the development direction and prospect in future were proposed.

**Key words:** water shortage; membrane technology; unconventional water resource; development and utilization