

膜分离技术:开源减排保障水安全

侯立安^{1,2}, 张林²

(1. 第二炮兵后勤科学技术研究所, 北京 100011; 2. 浙江大学化学工程与生物工程学系, 杭州 310027)

[摘要] 针对水资源短缺和严峻的水污染现状, 寻找能有效保障水安全的策略是亟待解决的社会发展问题之一。膜分离技术的高效、操作简单等优点使其在水安全保障方面备受关注。本文介绍了我国水安全问题的内涵和现状, 对膜分离技术在新水源开发、废水减排和饮用水安全保障三个领域的应用和研究进展进行了综述, 分析了膜分离技术在保障水安全领域的作用, 提出了解决水安全问题的策略和方法。

[关键词] 水安全; 膜技术; 水源开发; 废水减排

[中图分类号] TQ028.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)12-0010-07

1 前言

水作为重要的自然资源和社会资源, 在整个个人类活动中起着举足轻重的作用。近年来, 一方面, 随着我国社会经济的迅速发展、城镇化进程的加快, 用水需求量持续增长与水资源短缺之间的矛盾日趋突出; 另一方面, 由于气候变化、社会活动加剧和环境污染等原因, 使得我国不同地区在同一时期需要面对水多、水少和水脏等问题。总而言之, 我国水资源总体形势不容乐观, 水安全问题对社会经济发展的约束作用在不断增强。

膜分离技术因其处理效率高、适用范围广、易与其他过程集成等特征, 在水处理领域得到广泛应用。材料和工程等相关科学的不断进步, 进一步推动了膜分离技术的快速发展, 应用领域也从常规的水处理扩展到特种或非常规污染水处理, 在保障水安全方面发挥了重要作用。为此, 本文从水安全的内涵出发, 对膜技术从不同角度保障水安全的进展进行综述, 对未来的发展趋势进行展望。

2 水安全的内涵与我国水安全问题现状

水安全问题的成因既有自然因素也有人为原

因。从表象来看, “水安全”是指“所有与水相关的要素未对人类社会的稳定与发展构成威胁, 或者说存在着某种威胁, 但属于可控范围之内”^[1]。

因此, 水安全问题既涉及社会和国家安全, 又与自然资源领域密切相关, 其内涵包括多个方面^[2]: a. 水量充裕和结构均衡的水资源安全; b. 能提供品质安全的饮用水源、具有容量内纳污能力和服务功能的水环境安全; c. 能保持生物多样性和实现自我净化与修复的水生态安全; d. 涉及水领域的各种水工程安全; e. 包括结构供水和城乡供水的供水安全。

目前, 我国水安全问题主要体现在以下几个方面: a. 水资源短缺, 人均水资源量为 2 200 m³, 仅为世界水平的 28%, 近 2/3 的城市不同程度存在缺水问题, 且水资源时空分布不均, 与生产力布局不匹配, 发展需求与水资源条件之间的矛盾突出; b. 水环境污染, 相当量的排污水处理不彻底, 使江河湖海和地下水受到不同程度的污染; c. 水生态破坏, 据中国科学院南京地理与湖泊研究所统计, 近 30 年来因围垦等人为因素而消失的湖泊有近百个, 湿地生态环境在一些地区持续恶化; d. 水灾害问题突出, 我国南方洪涝、北方干旱及水土流失等问题突出; e. 突发事件多, 近年来, 我国极端气候、突

[收稿日期] 2014-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金重点资助项目(51238006); 中国工程科技中长期发展战略研究项目(2014-zcq-10)

[作者简介] 侯立安, 1957 年出生, 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

发性水源污染事故、自然灾害频发,威胁城市供水安全,影响了正常的生产与生活秩序,造成了较严重的社会影响;f. 传统净水工艺应对新污染有局限性,我国90%以上的水厂修建于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)实施之前,所采用的传统水处理工艺对不断出现的新有机污染物去除能力有限^[3]。面对复杂和严峻的水安全问题,膜分离技术可以从源头和终端两个环节来应对和缓解水安全危机的进一步恶化,并取得了很多突破性的进展。

3 膜分离技术应对水安全危机的进展

3.1 膜法水处理技术在开发水资源方面的进展

3.1.1 海水淡化

地球上97%以上的水资源是以海水的形式存在,因此,高效的海水淡化技术可以有效缓解淡水资源不足导致的水安全问题。以反渗透为主的膜法海水淡化技术投资适中、效率高、工艺成熟。据统计,全球现有150多个国家和地区建有海水淡化工厂,已建成和在建海水淡化工厂超过15 000个,淡水产能达到 $7 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$,解决了2亿多人的生活用水问题,满足了一定量的工业生产用水需求^[4]。全球规模最大、技术最先进的以色列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 $6.24 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,其中约 $5.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ 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,全球海水淡化的水产能将达到 $1.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$,比2008年增加1倍^[5]。

反渗透海水淡化的大规模工业化应用主要得益于超薄反渗透膜制备、组件设计以及能量回收等技术的成熟。目前,基于芳香聚酰胺超薄复合膜的反渗透海水淡化过程的能量回收率超过了50%,能耗降至 $1.8 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,膜的水渗透系数达到 $3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$,盐截留率为99.6%~99.8%^[6,7],膜与膜过程的性能均达到了非常高的水平。

随着人们对淡水需求的日益增长,需要进一步提高反渗透膜的分离性能和使用寿命以降低反渗过程的产水能耗和成本。在水分子透过细胞膜机理的启示下,含水分子通道的反渗透膜被认为是未来高通量反渗透膜的重要发展方向之一^[8]。近年来,很多研究者分别通过分子模拟和实验验证了碳纳米管等多孔纳米介质能够提高反渗透膜通量^[9-12],还有部分研究者将含有水通道蛋白的囊泡引入反渗透膜中制备得到仿生膜^[13],这些具有水通道功能

反渗透膜的开发为今后制备新型的海水淡化膜提供了很好的参考。

3.1.2 雨水利用

近年来,由于气候变化引发的部分城市强降雨时有发生,一方面,强降雨给市政供水系统带来很大危害,影响城市饮用水安全供给;另一方面,大量雨水又给城市带来丰富的水源。因此,合理利用雨水不仅可以有效防止城市洪涝灾害,还可以开辟出新的水源。目前,国内很少有城市建有雨水利用工程,即使有也仅仅是简单地通过建筑屋面和道路面收集径流雨水,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水源^[14]。

相比于传统的处理方法,膜技术可以将雨水处理达到生活水标准,最大限度地发挥雨水的作用。早在21世纪初,悉尼在奥运会举办期间就将膜技术应用到场区的雨水收集处理系统,采用聚丙烯中空纤维微滤(MF)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,具有突发性、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个在下暴雨时用于防洪的雨水收集池系统,总库容量接近 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$,积蓄的雨水经过以反渗透为核心的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%^[15]。

膜技术不仅可以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,缓解雨洪所引发的城市饮用水安全问题,本课题组^[16]基于超滤(UF)和低压反渗透(RO)过程设计和建立了一套产水量达 $25 \text{ m}^3/\text{d}$ 的双膜集成装置,可在雨洪期间作为应急供水使用。

3.1.3 非常规污染源开发

非常规污染源是指由放射性物质、生化试剂及《生活饮用水卫生标准》规定之外的物质所造成的污染源,为了保护环境和人类健康,非常规污染水必须经过安全、经济和有效的处置。

以放射性污染源为例,其处理方法包括化学沉淀法、膜处理法和离子交换法等。相对于传统的处理方法,膜处理法被认为是最有效的处理方法之

—^[17]。美国的 Rocky Flats 曾安装了一套微滤组合系统,用于处理含铀、重金属和有机毒物等污染物的废水,该装置对铀的去除率超过 99.9 %。超滤可以截留尺寸更小的颗粒物,但仍旧难以截留放射性离子,常和反渗透联用,或者结合离子交换和电渗析工艺(EDI),以获得高核素去除率。纳滤(NF)可以有效去除高价离子,在核工业中主要应用于含硼、锆的废水和燃料铀^[18,19]的回用处理。与上述 3 种压力驱动膜过程相比,反渗透处理放射性废水的技术较为成熟,美国的 Pilgrim、Comanche Peak、Dresden、Bruce 等核电站都采用反渗透技术处理放射性废水。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 等论证了膜蒸馏技术处理废水的可行性^[20],但由于过程热能利用率较低、膜长期使用的亲水化等问题阻碍了膜蒸馏技术在该领域的大规模应用。

生化试剂是另一类重要的非常规污染物,膜技术对水体中生化污染物的去除也有较好的效果。本团队曾开展以纳滤为核心过程的去除饮用水中“三致”有机污染物和炭疽杆菌的研究,结果表明,纳滤过程对有机污染物的去除率超过了 90 %;“三合一消毒”与超滤或纳滤相结合的工艺过程,对炭疽杆菌均有理想的去除效果,去除率接近 100 %^[21]。

3.1.4 膜法中水回用技术

中水作为城市的第二水源,通过新型中水回用技术的实施,能有效实现减排和增加水源的双重效果^[22]。中水来源广泛,水质差异大,常见的有生活污水和工业冷却水等。传统的中水回用工艺主要包括预处理和主处理两个阶段,根据水源水质以及中水的用途不同而采用不同的处理技术,包括混凝沉淀、过滤、活性炭吸附等传统物化处理方法,以及活性污泥、生物接触氧化等生物处理方法。与这些传统工艺相比,新兴的膜分离技术更能满足降低处理成本和提高回用水质的要求。

火电厂的冷却水一直是中水回用技术的重要应用领域,由于其消耗量巨大,回用技术的处理效果和效率是其成功应用的关键。Li 等将微滤与反渗透过程相耦合,对河北省某电厂冷却水进行处理,实现了冷却水的高效回用。该系统能截留 98 % 的盐,出水水质较好,且该双膜法的冷却水处理回用周期仅为传统化学处理法的 35 % 左右^[23]。Altman 等则采用以纳滤为核心的过程去除冷却水中盐离子以达到中水回用的目的,研究发现膜过程装置

的规模控制是决定中水回用经济性的关键所在^[24]。大连北海热电厂采用反渗透技术处理二级中水,出水水质各项指标远小于再生水用作工业用水的水质标准限值,大大节约了水资源消耗量,2013 年全年环比节约自来水 2×10^6 t。

据环保部统计年报数据,2012 年我国城镇生活污水排放量达 4.627×10^{10} t,占全国废水年排放量的 65 % 以上。因此,将膜技术用于我国城镇生活污水处理,实现中水回用的潜力巨大。将生物处理与膜分离过程相结合的膜生物反应器(MBR)可以使污泥保持较高活性,实现水源中污染物的有效降解和去除^[25],既减少了中水系统的占地面积,又有效解决了传统生物法污泥产率较高的缺点^[26]。2008 年北京奥运会多个场馆中心就采用自动化程度高的浸没式 MBR 工艺进行中水回用,处理规模达 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$,确保了绿色奥运的顺利举行^[27]。

为了进一步降低污水处理成本,一种将膜分离与厌氧发酵相结合的新型厌氧膜生物反应器(AMBR)技术正得到日益广泛的关注,该技术在去除污染物的同时产生大量的沼气,有效降低了过程的能耗,如图 1 所示^[28]。Dutta 等采用流态 AMBR 法处理含药物等有机物的城市污水,发现该方法使用颗粒活性炭(GAC)载体媒介能有效降低膜污染^[29]。Wei 等将正渗透膜过程(FO)以及热泵耦合到 AMBR 过程中,能有效实现城市污水处理过程中的能量回收,其对城市污水中化学需氧量(COD)的去除率大于 98 %^[30]。

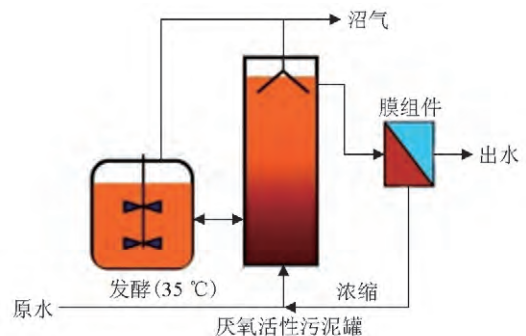


图 1 厌氧膜生物反应器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of anaerobic membrane bioreactor

值得注意的是,由于回用的中水仍可能残存微量的重金属、有机物等污染物,有在土壤、有机体内沉积富集的可能,所以中水回用尚存在一定的环境

与健康风险。为了降低这一风险,除加强管理以及法规建设外,提高中水回用技术的净化效果以及运行稳定性至关重要。研发截留效率高、稳定性好的膜,以及开发新型膜过程组合工艺将是今后研究的重点。

3.2 膜法工业废水减排处理技术

我国目前工业废水排量大,污染物种类复杂,污染行业以及污染程度存在区域差异性,治理难度大。近年来,各种膜技术的快速发展为解决工业废水污染问题提供了可能性,其中微滤、超滤和纳滤等膜具有不同的孔径,主要通过筛分作用去除污水

中的细菌、病毒、大分子污染物以及部分小分子污染物,实现不同类型废水的除污^[31,32];反渗透、离子交换膜、双极膜等致密膜则可实现污水的深度处理以及高附加值物质的回收。因此,可以通过不同膜过程的组合来满足不同的废水处理要求^[33],图2给出了一个理想的全膜法废水处理组合工艺流程概念。实际应用中则往往根据废水的具体情况选择不同的组合工艺。例如,俞海桥等采用超滤-反渗透双膜法对污染浓度高的皮革废水进行处理,产水水质达到回用标准,且处理成本仅为传统处理方法的50%^[34]。

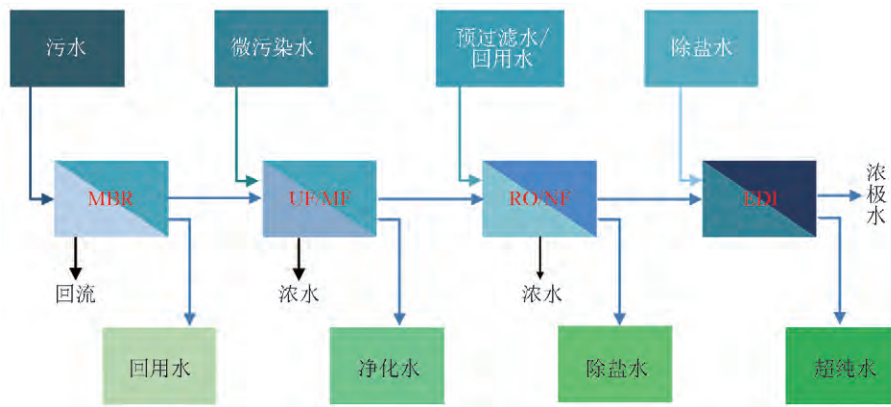


图2 全膜法废水处理组合工艺流程概念图

Fig. 2 Conceptual flow diagram of the integrated total membrane process for wastewater treatment

纳滤是近年来广受关注的一种膜技术,由于其截留分子量大小相对比较集中的特点,可以有效截留水中药物、染料等有机物,成为废水处理组合工艺中的核心技术。Ravikumar等采用纳滤-反渗透双膜法实现了对药物废水的处理,该双膜法对总溶解固体(TDS)和COD的去除率分别达到了95.3%和99.5%^[35]。Qin等通过调节纳滤膜分子链结构,达到了从高盐染料废水中回收萘磺酸的目的^[36]。Zhu等通过选择具有合适截留分子质量的纳滤膜,实现了对染料废水中活性染料的回收去除,活性染料截留率高达99.8%^[37]。Shukla等采用超滤-纳滤-反渗透的组合膜工艺,实现了对造纸行业漂染废水的处理^[38]。

电渗析具有良好的离子交换选择性,因此在处理含盐离子的废水领域展现出明显优势,被广泛应用于含有贵金属离子或其他高浓度酸碱的废水处理。周国平等采用阴离子交换膜法实现了对高浓度硫酸的废水处理并回收硫酸,回收率高达83.4%^[39]。

双极膜是在离子交换膜的基础上发展起来的一种新的膜技术,通常由阴阳离子交换层复合而成,两层中间含有能催化水解的催化剂,具有独特的分离性能^[40]。由于双极膜能够催化水解离,产生的 H^+ 和 OH^- 分别进入不同的膜室,使溶液中的盐重新转变为酸和碱,可同时实现废水处理以及酸碱回收^[41]。双极膜的这一特点使其在处理酸碱废水方面具有其他膜技术不可取代的优势,在解决稀土、冶金、金属加工等行业废水方面具有广阔前景。例如, Ghyselbrecht等利用双极膜实现工业废水中盐分的脱除^[42]。

工业废水的多样性导致了缺乏普适的处理方法和工艺,同时,废水组成的复杂性使得高效处理非常困难。膜技术虽然在该领域已经有了非常重要的应用,但是未来仍需要加强膜技术与其他分离过程集成的研究,进一步提高处理效率。

3.3 膜法饮用水深度处理技术

由于我国过去粗放式的发展模式导致一些地

区水污染问题较严重,虽然近年来国家对水资源的保护力度不断加强,但短期内很难有突破性的改善,而常规饮用水处理工艺对溶解性有机物去除能力不足,若水中有机物去除不彻底,则加氯消毒还有可能产生二次污染^[43],使得部分地区饮用水安全问题较为突出。随着新国家标准《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的执行,为了保证饮用水水质安全,必须对饮用水进行深度处理,以去除常规自来水生产工艺中无法去除的微量有机污染物、消毒副产物等。近年来,以压力驱动的微滤、超滤、纳滤和反渗透等膜过程被认为是饮用水深度处理的先进技术之一。

与纳滤和反渗透过程相比,微滤和超滤的操作压力更低,可替代常规饮用水处理过程中的沉淀池和滤池,处理后的水质远远优于常规处理。但是由于微滤、超滤膜截留分子质量较高,水中存在的低分子质量有机物无法有效去除,为了达到更好的饮用水深度处理效果,微滤、超滤常与高级氧化、吸附等去除有机物效率高的工艺联合使用。例如,最近清华大学报道了将臭氧氧化和超滤陶瓷膜组合进行饮用水深度净化的研究,结果表明用该工艺处理轻度污染水源得到的水质明显优于常规处理工艺^[44]。

纳滤过程不仅能去除大分子污染物,对溶解性有机物、消毒副产物前驱体的去除率也均较高,同时还能保留水中某些对人体有益的小分子和矿物质。因此,近年来纳滤在饮用水深度处理领域得到了越来越多的关注。世界上第一个大型纳滤饮用水深度处理系统建立于法国 Mery-sur-Oise 水厂,该纳滤系统日产淡水 $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$,长期运行结果表明:纳滤工艺去除有机物和杀虫剂非常有效,出水总有机碳浓度(TOC) $<0.1 \text{ mg/L}$,水质极好,且生物稳定性好,能有效防止细菌的再繁殖^[45]。国内,浙江大学为了应对杭州地区钱塘江潮汐导致的饮用水咸度过高,建立了一套以纳滤为核心的自来水深度处理示范集成系统,日产净化水 500 m^3 ,该系统不仅能有效脱除盐分,还能降低水体中的有机污染物,对潮汐地区的饮水安全具有保障作用^[46]。

反渗透可以去除水中各种悬浮物、胶体、溶解性有机物、无机盐、细菌和微生物等,成为制备纯水的主要技术之一。1995年,美国加利福尼亚州建立了第一座以反渗透为核心技术的水再生厂,运行结果表明,反渗透过程能够去除水中大部分的污染物

质,各项指标均优于加利福尼亚州饮用水标准^[47]。2008年12月,澳大利亚昆士兰东南部一座水厂将反渗透技术用于生产可直接饮用的纯水,该纯水生产工艺的核心部分分别是微/超滤膜、反渗透以及高级氧化过程,经过16个月的运行,证明该组合工艺产水水质良好,超过饮用水标准^[48]。

膜技术作为先进的饮用水深度处理技术已经得到了广泛认同,但水的污染源种类复杂,针对水源状况选择合适的过程是膜技术成功应用于饮用水深度处理的关键。而饮用水安全涉及民生问题,制水成本不宜过高的要求使得膜技术在饮用水深度处理领域大规模推广应用的经济可行性有待进一步提高。

4 结语

水安全是维护公众健康、保障人类社会可持续发展和推进生态文明建设的要素,面对日趋严峻的水安全问题,膜技术在应对水安全危机中发挥了巨大的作用。

1) 开辟多样性的水源:多膜集成技术能够满足不同水源、水质的产水要求,为获得安全可靠的水质提供了保障。

2) 提高水的利用效率: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,减少废水排放。

3) 保障饮用水水质安全:无论是单一膜技术还是多膜集成技术在合理的设计下都能保障产水水质的安全,确保了饮用水能够达标。

尽管如此,膜技术仅仅是保障水安全的一种措施和手段,真正解决水安全危机需要政府的统筹规划、行业的积极协调和科技工作者的不懈努力,更需要公众的广泛参与和共同努力。

参考文献

- [1] 张翔,夏军,贾绍凤.水安全定义及其评价指数的应用[J].资源科学,2005,27(3):145-149.
- [2] 谷树忠,胡咏君.水安全:内涵、问题和方略[J].中国水利,2014(10):1-3.
- [3] 侯立安,张林.膜分离技术在缓解水安全问题中的应用[J].中国工程科学,2014,16(7):4-9.
- [4] 中华人民共和国科学与技术部,中华人民共和国国家发展与改革委员会.海水淡化科技发展“十二五”专项规划[Z].2012-08-14. <http://www.most.gov.cn/tztg/201208/W020120829519791096815.pdf>.
- [5] Elimelech Menachem, Phillip William A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333(6043): 712-717.

- [6] Busch M, Mickols W E. Reducing energy consumption in seawater desalination [J]. *Desalination*, 2004, 165: 299–312.
- [7] Shannon Mark A, Bohn Paul W, Elimelech Menachem, et al. Science and technology for water purification in the coming decades [J]. *Nature*, 2008, 452(7185): 301–310.
- [8] 曾艳军, 张林, 陈欢林. 水处理仿生膜研究进展[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(7): 10–16.
- [9] Holt Jason K, Park Hyung Gyu, Wang Yinmin, et al. Fast mass transport through sub-2-nanometer carbon nanotubes [J]. *Science*, 2006, 312(5776): 1034–1037.
- [10] Majumder Mainak, Chopra Nitin, Andrews Rodney, et al. Nanoscale hydrodynamics: Enhanced flow in carbon nanotubes [J]. *Nature*, 2005, 438(7064): 44.
- [11] Zhao Haiyang, Qiu Shi, Wu Liguang, et al. Improving the performance of polyamide reverse osmosis membrane by incorporation of modified multi-walled carbon nanotubes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 450: 249–256.
- [12] Huang Hai, Qu Xinying, Ji Xiaosheng, et al. Acid and multivalent ion resistance of thin film nanocomposite RO membranes loaded with silicalite-1 nanozeolites [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(37): 11343–11349.
- [13] Zhao Yang, Qiu Changquan, Li Xuesong, et al. Synthesis of robust and high-performance aquaporin-based biomimetic membranes by interfacial polymerization-membrane preparation and RO performance characterization [J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, 423/424: 422–428.
- [14] 宫永伟, 李俊齐, 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, 28(22): 50–53.
- [15] 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, 38(6): 141–143.
- [16] 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[J]. *中国市政工程*, 2013(S1): 79–81.
- [17] 侯立安. 关注膜技术在核生化污染水处理中的应用研究[J]. *科技导报*, 2012, 30(10): 3.
- [18] 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, 37(11): 1–3.
- [19] Thanuttamavong Monthon, Yamamoto Kazuo, Oh Jeong Ik, et al. Rejection characteristics of organic and inorganic pollutants by ultra low-pressure nanofiltration of surface water for drinking water treatment [J]. *Desalination*, 2002, 145(1–3): 257–264.
- [20] Zakrzewska-Trznadel G. Membrane processes for environmental protection: Applications in nuclear technology [J]. *Nukleonika*, 2006, 51(S1): S101–S111.
- [21] 侯立安, 左莉. 纳滤去除饮用水中有机物及类炭疽杆菌的研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(7): 62–64, 68.
- [22] Yi Lili, Jiao Wentao, Chen Xiaoning, et al. An overview of reclaimed water reuse in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10): 1585–1593.
- [23] 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 Environment Research*, 2007, 79(7): 753–758.
- [24] Altman Susan J, Jensen Richard P, Cappelle Malynda A, et al. Membrane treatment of side-stream cooling tower water for reduction of water usage [J]. *Desalination*, 2012, 285: 177–183.
- [25] Kraume Matthias, Drews Anja. Membrane bioreactors in waste water treatment—Status and trends [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2010, 33(8): 1251–1259.
- [26] 付翠彦, 张光辉, 顾平. 膜生物反应器在污水处理中的应用进展[J]. *水处理技术*, 2009, 35(5): 1–6.
- [27] 张颢川, 卢振兰. 浅析中水回用技术的应用及发展前景[J]. *中国资源综合利用*, 2013, 31(3): 23–25.
- [28] Ozgun Hale, Dereli Recep Kaan, Ersahin Mustafa Evren, et al. A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, 118: 89–104.
- [29] Dutta Kasturi, Lee Ming-Yi, Lai Webber Wei-Po, et al. Removal of pharmaceuticals and organic matter from municipal wastewater using two-stage anaerobic fluidized membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 165: 42–49.
- [30] Wei Chun-Hai, Harb Moustapha, Amy Gary, et al. Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 166: 326–334.
- [31] Peters Thomas. Membrane Technology for Water Treatment [J]. *Chemical Engineering and Technology*, 2010, 33(8): 1233–1240.
- [32] Antony Alice, Low Jor How, Gray Stephen, et al. Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, 383(1/2): 1–16.
- [33] Konstantinos V Plakas, Anastasios J Karabelas. Removal of pesticides from water by NF and RO membranes—A review [J]. *Desalination*, 2012, 287: 255–265.
- [34] 俞海桥, 王俊川, 曾沿鸿, 等. 超滤-反渗透双膜法深度处理皮革废水的中试研究[J]. *能源与环境*, 2009(4): 82–83, 101.
- [35] Yerrapragada Venkata Lakshmi Ravikumar, Swayampakula Kalyani, Suggala Venkata Satyanarayana, et al. Processing of pharmaceutical effluent condensate by nanofiltration and reverse osmosis membrane techniques [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(1): 50–56.
- [36] Qin Jiaxu, Dai Xingguo, Zhou Yong, et al. Desalting and recovering naphthalenesulfonic acid from wastewater with concentrated bivalent salt by nanofiltration process [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 468: 242–249.
- [37] Zhu Xueyan, Zheng Yiping, Chen Ze, et al. Removal of reactive dye from textile effluent through submerged filtration using hollow fiber composite nanofiltration membrane [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(31–33): 6101–6109.
- [38] Shukla Sudheer Kumar, Kumar Vivek, Kim Taesung, et al. Membrane filtration of chlorination and extraction stage bleach plant effluent in Indian paper industry [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2013, 15(2): 235–243.
- [39] 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, 22(6): 24–27.
- [40] Ilhan F, Kabuk H A, Kurt U, et al. Evaluation of treatment and recovery of leachate by bipolar membrane electrodialysis process [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2014, 75: 67–74.
- [41] Gao Xueli, Yang Yang, Fu Lili, et al. Regenerating spent acid produced by HZSM-5 zeolite preparation by bipolar membrane electrodialysis [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 125: 97–102.
- [42] Ghyselbrecht Karel, Huygebaert Marie, Van der Bruggen Bart, et al. Desalination of an industrial saline water with conventional and bipolar membrane electrodialysis [J]. *Desalination*, 2013, 318: 9–18.
- [43] Karakulski Krzysztof, Gryta Marek, Morawski Antoni. Membrane processes used for potable water quality improvement [J]. *Desalination*, 2002, 145(1–3): 315–319.

- [44] Fan Xiaojiang, Tao Yi, Wang Lingyan, et al. Performance of an integrated process combining ozonation with ceramic membrane ultra-filtration for advanced treatment of drinking water [J]. *Desalination*, 2014, 335(1): 47–54.
- [45] Cyna B, Chagneau G, Bablon G, et al. Two years of nanofiltration at the Mery-sur-Oise plant, France [J]. 2002, 147(1–3): 69–75.
- [46] 陈欢林, 吴礼光, 陈小洁, 等. 钱塘江潮汐水源的饮用水膜法集成系统示范运行经验[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(22): 98–101.
- [47] Gagliardo Paul, Adham Samer, Trussell Rhodes, et al. Water repurification via reverse osmosis [J]. *Desalination*, 1998, 117(1–3): 73–78.
- [48] Poussade Y, Roux A, Walker T, et al. Advanced oxidation for indirect potable reuse: A practical application in Australia [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(9): 2419–2424.

Membrane separation technology : Ensuring water security by resources development and emission reduction

Hou Li'an^{1,2}, Zhang Lin²

(1. Institute for Logistic Science and Technology of the Second Artillery, Beijing 100011, China;

2. Department of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[Abstract] As to the status of water shortage and severe water pollution, developing an effective strategy to ensure the water security is one of the urgent issues. Membrane-based water treatment is highly focused and studied to ensure the water security due to its high efficiency and easy-to-operate. In this paper, the connotation and status of water security in China were presented, and a detailed review was drawn on the application of membrane technologies to develop water resources and reduce wastewater emission. Finally, several suggestions were listed for the development of membrane-based water treatment in water security.

[Key words] water security; membrane technology; water resources development; emission reduction