

膜分离技术在缓解水安全问题中的应用

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] 全球气候变化导致的水资源时空分布不均和经济快速发展带来的水污染所引发的水安全问题成为人类社会可持续发展面临的重要挑战。本文针对目前我国水安全的现状和存在的问题, 结合国内外膜技术发展趋势, 综述了膜技术在饮用水深度处理、废水处理、灾害应急供水及特种废水处理中的应用进展, 分析和展望了膜技术应对水安全问题的研究方向。

[关键词] 水安全; 膜分离; 超滤; 纳滤; 反渗透

[中图分类号] TQ028.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)07-0004-06

1 前言

近年来, 随着全球气候急剧变化, 气温上升、热带气旋增加、温带风暴路径向极地推移, 导致了暴雨、干旱等极端天气的频发, 加剧了水资源在时空上的不均匀分布。同时, 气候变化通过温度、降水、光照辐射、风速风型等因素影响着水体污染物的来源和分布, 对水环境质量产生了重要影响^[1]。

经济的快速增长使得大量的工业、农业、生活废水排入水体, 造成严重水污染, 虽然不像洪水和旱灾那样更易冲击人们的视线, 但日益加剧的水污染实际上已逐渐成为世界性的灾难, 无论是对人类生存安全所造成的威胁, 还是给社会经济带来的损害, 水污染都堪称世界头号杀手^[2]。作为人类生存面临的最严峻话题之一, 全球水资源短缺的矛盾可能因水污染而趋向恶化, 水安全问题正在成为全球关注的热点之一。

我国水环境污染较为严重, 虽然经过不断地治理, 但总体改善速度缓慢, 由此造成的功能性缺水迫使我国一些地区不仅将一、二类水源处理作为自

来水, 而且部分地区也逐渐允许使用三类水源。水污染对人类的危害具有直接性、持续性、潜伏性, 一些损害甚至是永久性地危及子孙后代的健康和利益。为此, 水污染治理已是一个迫在眉睫的课题^[3]。传统水处理工艺, 即絮凝、沉淀、过滤、消毒, 主要杀灭水中的微生物, 无法处理目前三类水源中存在的重金属污染和致癌、致畸、致突变等的有机化合物污染, 且占地面积大、成本投入高等缺点限制了它的发展。面对水资源短缺、水环境污染等问题, 寻求水处理新技术是问题解决之道。膜分离技术因具有占地面积小、自动化程度高、去除污染物范围广、工艺流程短等特点, 被称为21世纪最具发展前景的高新技术之一, 在解决水安全的受重视程度逐渐提高。

2 我国水安全现状

水安全不仅是环境和经济问题, 同时也是社会和政治问题。过去由于公众的水安全意识淡薄, 对其重要性、艰巨性及复杂性认识不足, 没有注重节约、保护水资源, 长期开发利用不当, 且相关法律法

[收稿日期] 2014-05-05

[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, 中国工程院院士, 主要研究方向为环境工程; E-mail: houlian678@hotmail.com

规体系不健全,导致了一系列水安全问题的出现。

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,全国每年总缺水量约为 $5 \times 10^{10} \text{ m}^3$,近2/3城市不同程度存在缺水,且水资源时空分布不均、与生产力布局不相匹配,发展需求与水资源条件之间的矛盾突出;b. 水环境污染,相当比重的排污水未经处理,使江河湖海和地下水严重污染;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,接近湖泊总数的1/10,约8千多平方千米,而且湿地面积不断减少、湿地生态环境持续恶化;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. 突发事件频发,近年来,我国极端气候、突发性水源污染事故和自然灾害频发,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. 传统净水工艺具有一定的局限性,新污染物不断出现,污染日趋复杂,饮用水呈现污染物复合、污染过程复合以及污染效应复合的复合污染特征,而传统水处理工艺以去除水中悬浮物、胶体颗粒物为主,对有机物等去除能力有限。

3 膜分离技术现状

膜分离是指利用具有选择性透过能力的薄膜作为分离介质,在外界能量或化学位差的驱动下实现双组分或多组分混合物的分离、纯化、浓缩等处理的一种新型分离技术。目前工业化应用较为成熟的膜分离技术主要有微滤、超滤、纳滤、反渗透和电渗析等。与传统水处理技术相比,膜分离技术具有显著优势^[4]:a. 过程能耗低,大多数膜分离过程是在低温或室温条件下进行的,且分离过程中无相变发生,与萃取、蒸馏、蒸发等传统分离过程相比,能耗得以大幅降低;b. 膜分离技术的分离效率高,产水水质优良,传统混凝、沉淀等技术以重力分离为主,其最小极限是微米级,而膜分离技术可以实现对纳米级物质的分离,水中的消毒副产物、病毒、细菌及有机物都可以通过膜分离技术去除,而且经膜分离处理后的水质明显优于其他处理方法;c. 膜分离过程中药剂添加量极少,传统水处理技术需要投放大量化学药剂,可能对水质产生二次污染,而膜分离技术可以从根本上解决这一问题;d. 膜分离技术操作简单,维护成本不高,且可以提供可靠稳定的水质,出水水质只和膜选择性有关,与原水运行

条件和水质关系不大;e. 膜分离技术所需设备占地面积小,膜分离环节通常可以直接引入到企业原有的生产工艺流程中,避免了对生产线的大幅度改变;f. 膜分离过程通常以压力作为推动力,易于实现自动化。

4 膜技术在水安全保障中的应用

膜分离技术因其独特的优势而被广泛应用于饮用水的深度处理、废水处理、灾害应急供水及特种废水处理,在水安全保障中发挥着重要作用。

4.1 膜技术在饮用水深度处理中的应用

应用于饮用水深度处理的膜技术主要有微滤、超滤、纳滤和反渗透,因其对水中所含杂质的截留性能与能力有很大差异,这些膜技术在饮用水深度处理中发挥着不同作用。

微滤能够截留水中的悬浮物、胶团、大分子有机物、细菌等,而不能去除水中小分子的胶体或有机物,因此微滤过程常用于原水的预处理,并在后续阶段结合其他工艺进一步处理。超滤可以去除水中部分重金属离子及隐孢子虫、细菌、病毒等微生物,还可以降低水中消毒副产物的含量^[5]。张捍民等^[6]运用超滤膜去除饮用水中污染物,发现超滤能够有效地去除水中悬浮固体、胶体,出水浊度保持在0.25 NTU以下。纳滤是介于超滤与反渗透之间的一种膜分离技术,同时也是目前水处理领域的热点之一。纳滤膜孔径范围为纳米级别,一般在1~2 nm,其表面荷负电,纳滤技术可在很低的操作压力下高效地脱除水中有毒有害物质(如三氯甲烷中间体、低分子有机物、农药、环境荷尔蒙类物质等),同时保留对人体有益的微量元素及矿物质^[7]。Sid-diqui等^[8]利用纳滤去除三卤甲烷前体物、水合氯醛前体物及卤乙酸前体物,去除率能够分别达到97%、86%及94%。Ahmad等^[9]对NF90、NF200、NF270和DK四种纳滤膜的截留性能进行了对比,实验表明NF90具有更优的截留率,对药物乐果和阿特拉津的截留率分别为85%和95%,而NF270的渗透通量则最高。本课题组^[10]研究了NFTS40和NFTS80两种聚酰胺纳滤膜处理饮用水,结果表明,NFTS40纳滤膜对总有机碳的去除率达到93.9%,去除效果优于NFTS80纳滤膜,且NFTS40和NFTS80纳滤膜对致突变物的去除率分别为87.5%和75%,显然NFTS40对致癌、致畸、致突变物的去除效果较好。海水淡化作为解决水资源短缺的有

效途径之一,已经在许多国家和地区,尤其是海湾国家,得到了广泛的应用,而以反渗透为代表的膜技术在海水淡化领域的应用受到了高度重视^[11]。国外具有代表性的反渗透海水淡化工厂主要在中东和地中海地区,预计到2016年,海水淡化的产量将超过 $3.8 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$ ^[12-14]。2011年,我国首个自主设计、安装完成的日产淡水 $5 \times 10^4 \text{ t}$ 的膜法海水淡化工程在河北曹妃甸建成投产,标志着我国膜法海水淡化工程技术能力迈上新台阶,预计到2020年,我国海水淡化产水总量将达到 $7.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[15]。

4.2 膜技术在工业废水处理中的应用

工业生产过程中需要消耗大量新鲜水并排出大量废水,所排废水中会夹带很多原料、中间产品或成品,如重金属、有毒化学品、酸碱、有机物、油类、悬浮物等。这些废水如果直接排放会对人体及环境造成巨大危害,因此需要经过处理,使其中的有害物质含量达标后方可排放。膜分离技术在很多行业排放废水的处理中都得到广泛关注及应用。

随着食品、染料和页岩气等行业的发展,含油废水排放量日益增多,膜技术在含油废水的处理中取得了很好的应用效果,Zhang等^[16]利用改性后的聚偏氟乙烯超滤膜进行油水分离,通量可达 $3\ 415 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,截留率达到99.95%,且该膜具有良好的抗污染性,此方法在含油乳化废水处理中能够取得很好的应用。Chen等^[17]利用改性聚丙烯微滤膜进行油水分离,同样取得了满意的效果,通量在 $2\ 000 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,截留率保持在99%以上。在造纸行业中,漂白装置排水中所含的化学需氧量(COD)及生化需氧量(BOD)是纸浆废水的主要色度源,而经过超滤处理后,色度能够降低80%~90%,总需氧量(TOD)和COD能够降低60%~70%^[18]。纳滤技术同样在工业废水处理领域取得了广泛应用。在金属加工及电镀工业中,清洗和电镀废水常含有浓度较高的 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Fe^{2+} 等金属离子,通过纳滤技术可将上述金属离子浓缩10倍,并且这些金属回收率达90%以上^[19]。Chen等^[20]对电镀废液进行了二级纳滤实验,铬酸盐在第一级以 HCrO_4^- 形式存在,pH调至8以上,铬酸盐转化为 CrO_4^{2-} 形式,在两级浓水中分别浓缩 Ni^{2+} 和铬酸盐,从而实现电镀废液中回收 Ni^{2+} 和铬酸盐的目的。Abu Qdais等^[21]应用纳滤处理模拟废水中的 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} ,结果表明,对这两种重金属离子的平均截留率达到97%。研究证明,纳滤技术对纺织工业废水也有很好的处理

效果,可有效去除废水中的色度、有机碳及各种染料等。Capar等^[22]用纳滤技术回收丝绸厂废水中的丝胶蛋白(分子质量为10~25 kDa),废水先经过微滤、离心过滤将丝胶从其他杂质中分离出来,然后用纳滤膜(NF-90 100 Da)回收丝胶蛋白,发现回收率可达94%~95%,但由于丝胶蛋白与膜的相互作用以及丝胶蛋白的浓缩极化,运行一定时间后膜通量会下降70%~75%,采用NaOH溶液进行清洗后,膜通量可恢复至83%以上。Nielson^[23]利用聚酰胺纳滤复合膜处理染料废水,发现该膜对混合染料的截留率可达99%,且98%的废水可以被回用。Raman等^[24]利用纳滤处理木浆漂液,发现其中90%的色度物质和木质素可被去除。苏金坡等^[25]运用超滤-反渗透工艺处理电厂循环冷却排污水,其中超滤作为反渗透的预处理,反渗透系统产水量为1 t/h(回收率为75%),经过1个月的连续运行,发现水中的绝大部分盐分、胶体和有机物已被除去。反渗透技术在重金属废水的处理中也得到了广泛应用,Mohsen-Nia等^[26]研究了聚酰胺反渗透膜对含 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 重金属废水的处理效果,结果发现当废水中重金属含量为100~500 mg/L时,该反渗透膜对 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的截留率均在98%以上,当在重金属废水中添加螯合剂时,其对 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 的截留率可以达到99.5%。

4.3 膜技术在灾害应急供水中的应用

自然或人为灾害多呈现受灾面积大、受灾人员多、经济损失严重等特点。地震、洪涝、干旱、山洪、泥石流等自然灾害发生后,国家在应急物资保障工作上经受极大的挑战,由于构筑物损毁、城市供水管网震裂,造成灾区大多数城市供水受阻甚至中断。因此,做好应急供水,不仅要解决灾区群众和救援人员喝上水的问题,还要解决确保供应安全优质水的问题。本课题组针对和平时可能出现的核化生污染城镇供水情况开展了研究^[27],建立了纳滤膜组合工艺处理模拟放射性污染水、炭疽杆菌和芽孢生物污染水以及化学毒剂污染水,实验结果表明:以纳滤过程为核心的膜组合工艺对核化生污染水净化处理非常有效,出水水质满足国家相关标准,所设计的纳滤组合工艺可作为遭核化生污染的应急保障供水技术。赵海洋等^[28]针对洪灾导致的城市饮用水安全问题,运用超滤和低压反渗透膜过程的双膜集成技术,建立了一套产水量达 $25 \text{ m}^3/\text{d}$ 的集成装置,该装置具有适合多种复杂水源水质、便于

多途径运输与组装、适用于较为复杂的环境等特点。实验发现该集成装置对水质条件与洪水类似的河沟水处理效果良好,其产水水质超过国家饮用水标准,制水成本 <5 元/ m^3 ,表明该技术和装置特别适用于突发洪灾期间城市的应急供水。

4.4 膜技术在特种废水处理中的应用

由于特种废水的水量水质较为特殊,致使其处理流程和工艺与城市污水大相径庭。本课题组在特种废水处理方面做了大量的研究工作^[29, 30]。以模拟核爆后放射性物质污染废水为研究对象,采用纳滤与离子交换组合工艺对污染废水中具有代表性的碘、铯、钚、铀等放射性物质进行去除,结果发现该工艺对铀、钚的去污系数分别为 1.3×10^3 和 6.7×10^3 ,对放射性的去除率可达99.93%。后来采用纳滤工艺,分别对模拟毒剂沾染水和模拟核爆后放射性物质污染水进行处理,也取得了满意的效果。白庆中等^[31]利用聚丙烯酸钠无机纳滤膜处理含 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 放射性核素的低水平放射性废水,通过实验验证了聚丙烯酸钠辅助无机纳滤膜处理放射性核素的可行性,实验结果表明在最佳条件下,低水平放射性废水的总 β 和总 γ 的净化率均达到95%左右,去污因子达到20~30。Hwang等^[32]采用纳滤技术来处理模拟核污染废水中的锶,结果表明,对NaCl有较高除率的纳滤膜对锶也有很好的去除效果,其中当锶以 SrCO_3 形态而不是 $\text{Sr}(\text{OH})_2$ 形态存在时,锶的去除率随pH的升高而升高。Szo-ke等^[33]采用型号为MWCO-200的纳滤膜从硼酸盐碱性溶液中去除长寿命的 ^{60}Co ,研究发现 ^{60}Co 的去除率与溶液的pH密切相关,当pH=8时,去除率为73%,而当pH=11.5时,去除率可达96%。膜分离技术作为新兴放射性废水处理方法,在低浓度放射性废水处理方面有着较好的去除效果及诸多优点,也是目前国内外重点研究的技术,但现有膜材料在物化稳定性、机械强度、使用寿命、清洗维护及核浓缩废水处理等方面尚不能满足工业需要,因此,开发新型膜材料,改进膜的清洗方法,提高膜的使用效能,减少膜二次污染等是膜分离技术在这一领域的发展方向^[34]。对于类炭疽杆菌及其繁殖体和三类常见的化学毒剂模拟沾染水,本课题组^[35]采用自行研制的超滤-纳滤膜分离水处理设备分段对生化污染水进行净化并取得了良好效果。Brandhuber等^[36]用超滤膜处理含砷废水,通过梯次试验研究了操作条件和水质对砷的去除效果的影响,结果表明超滤

膜对砷的去除规律符合Donnan模型。

5 膜技术应对水安全问题的发展趋势

随着经济社会发展,人工合成化合物的种类与数量剧增,新型污染物不断出现,水污染导致的水安全问题也日趋复杂。膜技术在水安全保障方面得到了广泛的应用,但是部分膜过程效率低及膜污染问题是制约其更好应用的主要因素,因此未来研究工作应主要集中于提高膜性能及过程效率,具体主要有以下5个方面:a. 新型膜材料与膜组件研发,发展耐污染、高性能的膜材料与膜组件,延长膜组件使用寿命,增加运行稳定性;b. 通过开发更高通量和截留率的膜来降低反渗透等压力驱动膜过程的高运行压力,从而降低过程的能耗;c. 膜分离机理研究,目前对膜分离机理的研究还不够系统、全面,加强对膜分离机理的研究有助于更好地了解相关膜过程,从而增强对实际应用的指导性;d. 新型膜工艺流程设计与优化,单一膜过程难以达到满意的处理效果,因此需要对膜工艺进行组合优化,控制膜污染程度,提高处理效率;e. 提高膜法海水淡化的产水水质,降低产水中硼酸等有害物质的含量,保留部分微量元素和矿物质。

反渗透作为目前在脱盐方面应用最广泛的技术,需要较高外压力且膜易污染,而新兴的正渗透过程因具有高水回收率、低膜污染和潜在的低能耗等优势^[37],在发电^[38]、脱盐^[39]和食品浓缩^[40]等领域显示出较好的发展前景,正渗透也将会在应急供水等领域发挥重大作用。另外,可以利用太阳能、风能等可再生能源的膜蒸馏及其他新型膜过程为一些远离陆地的岛礁开发提供用水保障^[41]。

6 结语

随着气候变化及水环境恶化,我国水安全问题日益凸显。膜技术作为一项新型分离技术,近20年来发展迅速,在解决水安全问题中发挥着重要作用。与传统水处理技术相比,膜分离技术具有显著优势,使其在饮用水深度处理、废水处理、灾害应急供水及特种废水处理中取得了广泛应用。未来发展过程中,开发新型分离膜、提高膜过程效率和降低过程能耗将成为研究重点,同时膜技术在解决我国水安全问题中将发挥举足轻重的作用,尤其以正渗透与膜集成技术为代表的膜过程将会取得广阔的发展空间。

参考文献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张锐. 水污染: 扑向全球的“头号杀手”[J]. 生态经济, 2010(12): 14-17.
- [3] 宋飞, 魏璟贤. 我国水资源污染问题及解决办法[J]. 中国水运(下半月), 2012(1): 150-151.
- [4] 梁汉超. 膜分离法在饮用水处理中的应用[J]. 四川建材, 2014(2): 306-307.
- [5] Guo H, Wyart Y, Perot J, et al. Low-pressure membrane integrity tests for drinking water treatment: A review[J]. Water Research, 2010, 44(1): 41-57.
- [6] 张捍民, 王宝贞. 淹没式中空纤维膜过滤装置去除饮用水中污染物的试验研究[J]. 给水排水, 2000, 26(6): 28-31.
- [7] 侯立安, 刘晓芳. 纳滤水处理应用研究现状与发展前景[J]. 膜科学与技术, 2010(4): 1-7.
- [8] Siddiqui M, Amy G, Ryan J, et al. Membranes for the control of natural organic matter from surface waters [J]. Water Research, 2000, 34(13): 3355-3370.
- [9] Ahmad A L, Tan L S, Shukor Sra. Dimethoate and atrazine retention from aqueous solution by nanofiltration membranes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 151(1): 71-77.
- [10] 侯立安, 左莉, 郭珍珍. 纳滤膜分离技术处理饮用水的应用研究[J]. 给水排水, 2000, 26(2): 21-23.
- [11] Elimelech Menachem, Phillip William A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment [J]. Science, 2011, 333(6043): 712-717.
- [12] Dreizin Y, Tenne A, Hoffman D. Integrating large scale seawater desalination plants within israel's water supply system [J]. Desalination, 2008, 220(1-3): 132-149.
- [13] Tal Alon. Seeking sustainability: Israel's evolving water management strategy [J]. Science, 2006, 313(5790): 1081-1084.
- [14] Von Medeazza G. "Direct" and socially-induced environmental impacts of desalination [J]. Desalination, 2005, 185(1-3): 57-70.
- [15] 高从培. 反渗透海水淡化技术进展: 第一届海水淡化与水再利用西湖论坛[C]. 杭州, 2006.
- [16] Zhang Wenbin, Shi Zhun, Zhang Feng, et al. Super hydrophobic and superoleophilic PVDF membranes for effective separation of water-in-oil emulsions with high flux [J]. Advanced Materials, 2013, 25(14): 2071-2076.
- [17] Chen Pengcheng, Xu Zhikang. Mineral-coated polymer membranes with superhydrophilicity and underwater superoleophobicity for effective oil/water separation [J]. Scientific Reports, 2013, 3: 2776.
- [18] 张奎, 舒波, 张爽, 等. 超滤技术处理造纸废水的研究与应用[J]. 四川环境, 2010, 29(2): 134-138.
- [19] 韩莎莎, 刘保平. 纳滤膜技术在水处理中的应用[J]. 安徽化工, 2009(3): 7-8.
- [20] Chen S S, Hsu B C, Ko C H, et al. Recovery of chromate from spent plating solutions by two-stage nanofiltration processes [J]. Desalination, 2008, 229(1-3): 147-155.
- [21] Abu Qdais H, Moussa H. Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: A comparative study [J]. Desalination, 2004, 164(2): 105-110.
- [22] Capar Goksen, Aygun S Seylan, Gecit M Rusen. Treatment of silk production wastewaters by membrane processes for sericin recovery [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 325(2): 920-931.
- [23] Nielson C E. Recycling of wastewaters from textile dyeing using cross-flow membrane filtration [J]. Filtration & Separation, 1994, 31(6): 593-595.
- [24] Raman L P, Cheryan M, Rajagopalan N. Consider nanofiltration for membrane separations [J]. Chemical Engineering Progress, 1994, 90(3): 68-74.
- [25] 苏金坡, 尹连庆, 檀素丽, 等. 电厂循环冷却排污水的回用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(1): 72-75.
- [26] Mohsen-Nia M, Montazeri P, Modarress H. Removal of Cu^{2+} and Ni^{2+} from wastewater with a chelating agent and reverse osmosis processes [J]. Desalination, 2007, 217(1-3): 276-281.
- [27] 侯立安, 杨庆. 遭核化生污染的城镇供水应急保障技术研究, 全国给排水技术情报网国防工业分网第十七届学术年会论文集[C]. 成都, 2008.
- [28] 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: 2013 城市防洪国际论坛[C]. 上海, 2013.
- [29] 侯立安, 左莉, 刘晓敏, 等. 膜工艺去除模拟核化废水的试验研究: 膜法水处理技术国际研讨会[C]. 北京, 2005.
- [30] 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, 30(10): 47-49.
- [31] 白庆中, 陈红盛, 叶裕才, 等. 无机纳滤膜处理低水平放射性废水的试验研究[J]. 环境科学, 2006(7): 1334-1338.
- [32] Hwang E D, Lee K W, Choo K H, et al. Effect of precipitation and complexation on nanofiltration of strontium-containing nuclear wastewater [J]. Desalination, 2002, 147(1): 289-294.
- [33] Szoke S, Patzay G, Weiser L. Cobalt(III) EDTA complex removal from aqueous alkaline borate solutions by nanofiltration [J]. Desalination, 2005, 175(2): 179-185.
- [34] 侯立安. 核沾染水处理技术及饮用水安全保障[J]. 给水排水, 2011, 37(11): 1-3.
- [35] 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, 26(2): 52-55.
- [36] Brandhuber P, Amy G. Arsenic removal by a charged ultrafiltration membrane—Influences of membrane operating conditions and water quality on arsenic rejection [J]. Desalination, 2001, 140(1): 1-14.
- [37] 李刚, 李雪梅, 王铎, 等. 正渗透技术及其应用[J]. 化工进展, 2010, 29(8): 1388-1398.
- [38] Pattle R E. Production of electric power by mixing fresh and salt water in the hydroelectric pile [J]. Nature, 1954, 174: 660.
- [39] Kravath R E, Davis J A. Desalination of sea water by direct osmosis [J]. Desalination, 1975, 16: 151-155.
- [40] King C W, Webber M E. Water intensity of transportation [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42: 7866-7872.
- [41] Wang X Y, Zhang L, Yang H J, et al. Feasibility research of potable water production via solar-heated hollow fiber membrane distillation system [J]. Desalination, 2009, 247: 403-411.

The application of membrane technology for reducing water security problem

Hou Li'an^{1,2}, Zhang Lin²

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

[Abstract] Water pollution, which results from rapid economic development and uneven distribution of water resource caused by global climate change, leads to water security problems. It has been a great challenge for the sustainable development of our society. In this article, the development of membrane technology and its applications in deep treatment of drinking water, wastewater treatment, emergency water supply and special wastewater treatment were summarized on the basis of water security situation of our country. Meanwhile, the potential role of membrane technology in solving water security problems is proposed.

[Key words] water security; membrane separation; ultra filtration; nanofiltration; reverse osmosis