



郝晓地, 李会海
(北京建筑工程学院可持续环境生物
技术研发中心, 北京 100044)

海水淡化 + 风能发电 + 盐业化工 三位一体的清洁生产技术

摘要: 提出一种将水业、能源、盐业三个行业结合而形成的三位一体的清洁生产技术, 清洁的风电为反渗透海水淡化提供动力需要, 反渗透的产物不仅仅是产生了淡水, 同时又为海盐生产创造了高效的浓缩液。三业组合可以形成一种污染零排放的可持续清洁生产技术。

关键词: 海水淡化; 风能发电; 海盐生产; 清洁生产技术

中国在实施可持续发展战略中, 水的可持续利用问题日益突出。换句话说, 水已经成为制约我国经济和社会发展的的重要因素。因此, 水的问题引起了政府部门、社会各界的高度重视。各行各业围绕水的发展战略、管理体制、技术路线、市场开发等已开始全方位深入研究。

世纪之初, 中国行将实施的新水价机制正向着市场经济方向迈进, 说明水经济时代将在 21 世纪的中国成为热点。这意味着水经济的背后蕴藏着水管理体制的巨大改革和对一些技术应用限制的突破。面对新的机遇和挑战, 仁者见仁, 智者见智。本文结合可持续发展中全球普遍倡导的生态经济特点, 提出一种将水业、能源、盐业三个业已成熟的行业有机结合而形成的一种三位一体的清洁生产技术。技术拟应用的范围主要涉及沿海与海岛区域, 同时也适用于苦咸水地区。

1 三位一体的清洁生产技术

到 2025 年, 全世界将有近 1/3 的人口面临缺水问题, 波及的国家和地区多达 40 多个。目前我国 617 个城市中, 有 300 个城市缺水, 其中 110 个城市严重缺水。沿海地区也不例外, 水已经成为这些地区经济发展的瓶颈。按国际惯例, 一个国家用水量达到水资源可利用量的 20% 便会产生水危机, 而到本世纪中叶, 我国总用水量将增至 8000 多亿 m^3 , 占我国可利用水资源的 28%。因此, 对我国来说, 淡水资源问题的确是到了迫在眉睫、非解决不可的地步。

我国海岸线总长 32647 公里, 向海洋要水, 开发利用海水资源, 进行海水淡化不失为一种解决沿海地区与海岛区域淡水紧缺的有效途径。当今, 发展海水淡化技术, 向大海要淡水业已经成为世界各国的共识。

海水淡化, 亦称海水脱盐, 一般是指通过反渗透或蒸馏法除去海水中的盐分并获得淡水的工艺过程。无论是

反渗透还是蒸馏法最主要的运行管理费用表现为电耗。化石燃料发电所提供的能量非清洁能源,即使再便宜也存在着发电过程排放 CO_2 ,从而污染大气的问题。事实上,沿海和海岛区域蕴藏着丰富的风力资源,风力发电无疑是一种被全球普遍看好的可持续清洁能源。所以,就近利用风电进行海水淡化不失为一种理想的技术组合。海水淡化以目前使用较多的反渗透技术而言,淡水产水率约为处理海水量的 $2/3$,而余下的 $1/3$ 则形成含盐量极高的所谓“浓缩液”。一般而言,浓缩液通常被作为副产品或“废弃物”排回大海。如果浓缩液被当作海盐生产的原料,这无形中等于减少了 $2/3$ 的海水蒸发量,即缩短了 $2/3$ 的晒盐时间进程。因此,将风能发电、海水淡化、海盐生产这三个业已成熟的技术有机结合,则会产生一个没有废弃物与污染物且符合生态经济学原理的新兴产业。这种三位一体的清洁生产构想可用图 1 来表述。

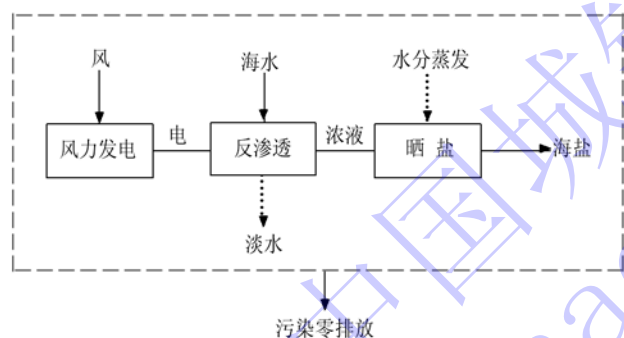


图 1 三位一体（海水淡化、风能发电、海盐生产）的清洁生产示意图

2 海水淡化现状与未来

海水淡化技术主要有蒸发法、膜法（反渗透、电渗析）和冷冻法。与蒸发相比,膜法淡化海水具有投资省、能耗低（ $7\text{kWh}/\text{m}^3$,而蒸发法为 $65\text{kWh}/\text{m}^3$ ）、占地少、建设周期短、操作简便、易于自控、启动迅速等优点。膜法主要指反渗透（RO）技术,它利用半透膜,在压力下允许水透过而使盐分和杂质被截留的技术。因此,膜法,特别是以反渗透（RO）技术为主的膜技术,自 30 年前进入海水淡化技术市场以来,其工程应用一直呈上升趋势。以日本为例,目前全日本已安装的海水淡化装置总生产能力为 $109\text{万 m}^3/\text{d}$,其中,反渗透装置生产能力便占了 90% 。近年来,日本每年平均以新建一座生产能力为 $5\sim 6\text{万 m}^3/\text{d}$ 的速度发展反渗

透海水淡化技术。日本现有 187 座用于海岛饮用水的反渗透海水淡化装置,总生产能力为 $12.3\text{万 m}^3/\text{d}$ 。到目前为止,于 1996~1997 年间建成的一座最大的反渗透海水淡化工厂处理能力为 $4\text{万 m}^3/\text{d}$ 。2005 年底,一座有着更大生产能力（ $5\text{万 m}^3/\text{d}$ ）的反渗透海水淡化工厂投入运行。

海水淡化是当今世界竞相研究与应用的高新技术,除上述提及的日本外,美国、英国、西班牙、法国以及以色列等国的反渗透技术也已经相当发达,并且相继形成了海水淡化产业。目前,英国的反渗透技术正以 $8\%\sim 10\%$ 的年增长速度快速发展。在英国,因为膜技术在水处理行业的广泛应用,已出现许多专门从事膜清洗的专业性公司。英国一家膜清洗公司从他们飞速发展的业务中预测,再经过 50 年的时间,今后人类所有的饮用水恐怕都要经过膜处理后才能饮用。这不仅是因为膜能够截留像盐分这样的化学物质,而且它也能截留病原菌与病毒。

我国的海水淡化技术研究始于上世纪 50 年代,经过半个世纪的发展也有了长足的进展和一些经验。但由于国人对反渗透等淡化技术应用的认知仅停留在过高的生产成本上,所以,目前以反渗透为主的海水淡化技术在国内还没有形成大规模应用的局面。

能耗是决定反渗透海水淡化技术生产成本的关键。然而,反渗透的能量消耗已比传统蒸发法低若干倍(如上所述)。如果考虑将反渗透膜料液侧排出的高浓缩液中的能量回收,如带动水轮机、多级离心泵等,则可回收其中 $80\%\sim 90\%$ 的能量,从而使反渗透脱盐的能量消耗节省 35% 左右。虽然反渗透海水淡化的综合成本估计为 $5\sim 10\text{元}/\text{m}^3$,但与专家目前估计的“南水北调” $5\sim 20\text{元}/\text{m}^3$ 的综合成本相比较,反渗透海水淡化技术的优势在经济上初露端倪。况且,此处述及的反渗透海水淡化是与风能、产盐综合为一体的生态经济或清洁生产技术。事实上,美国有资料认为,远程调水超过 40km 成本将超过海水淡化。

综上所述,可以看到海水淡化具有广阔的应用前景。我们还应该看到,在海水淡化综合成本逐渐下降的同时也应注意到海水淡化所需的动力消耗主要来源于化石燃料,如煤、石油。换句话说,传统海水淡化技术正在用一种不可再生的非清洁能源来换取另一种资源的使用。显然,现在的工业化经济模式已不能维持

经济的进步。当我们目光短浅的为保持现行经济模式而努力的时候，我们正在耗尽地球的有限资源，同时也污染着生存的环境。可以说，目前经济繁荣的同时也暗示着现行经济发展模式的长远前景是生态赤字。因此，伴随着可再生的清洁能源问题解决，反渗透海水淡化不失为解决我国沿海与海岛区域水资源匮乏的一项行之有效的技术措施。

3 风能——潜在的清洁能源

上述分析得知，未来我们将需要海水淡化，我们更需要为海水淡化提供清洁能源。那么，在沿海与海岛区域蕴藏着巨大的风能便是一种潜在的清洁能源。

3.1 世界风力发电的现状

现代风能工业于20世纪80年代初在加利福尼亚诞生。到了90年代对环境保护的要求日益严格，特别是要兑现减少排放CO₂等温室气体的承诺，风电的发展进一步受到鼓励。1999年10月5日，欧洲风能协会的一项国际能源研究报告指出，到2020年，风能可提供世界电力需求的10% 并为此创造170万个就业机会，同时在全球范围减少100多亿吨CO₂废气排放。风电技术经过20年的开发日臻成熟，商业化风电价格已经下降了80% 风电成本已从20美分/kWh持续下降到3美分/kWh。

全球风电发展在近十年有极快速的进展，每年以近40%的速度增长。根据欧洲风能协会的统计，2002年全球新增风电装机容量为686.8万kW 从而使世界累计风电装机容量超过3100万kW 其中以德国与丹麦最为突出。丹麦是开发风电最早的国家，且在风电机组技术和生产方面仍处于领先地位；德国风电装机总量8753MW，居世界第一。欧盟风电发展规划目标是2010年要达到40GW，2020年达到100GW，届时风电的比例将超过10% 亚洲的风电到2002年初，装机总容量已达到2220MW，占世界风电装机总容量的9.1%

3.2 我国风力资源

我国幅员辽阔，风能资源较为丰富。根据全国气象台部分风能资料的统计和计算，我国风能分区及占全国面积的百分比见表1。

据中国气象科学研究院估算，全国风功率密度为100W/m²，风能资源总储量约3226GW，可开发和利

用的陆地上风能储量有253GW（依据陆地上离地10m高度资料计算）；每年风速在3m/s以上的时间近4000h左右，一些地区年平均风速可达7m/s以上，具有很大的开发利用价值。

表1 中国风能分区及占全国面积的百分比

指 标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度 (W/m ²)	>200	200~150	<150~50	<50
年≥3m/s累计小时数 (h)	>5000	5000~4000	<4000~2000	<2000
年≥6m/s累计小时数 (h)	>2200	2200~1500	<1500~350	<350
占全国面积的百分比 %	8	18	50	24

据最新科技报道，日本已开发出垂直轴风车（见图2）。该风车最大特点是可以利用各个方向的风，在风速达到3m/s时即可发电。这样一来，风速需达≥6m/s时才适合经济发电的传统认识便受到挑战。换句话说，这种新型风力发电机的问世会使得我国可利用的风力发电资源至少增加1倍。该风电机组由于采用静音设计，所以也适合于住宅密集区。可见，随着科技的不断进步，人类利用风能的能力将不断加强。



图2 日本新近研发的垂直轴风车

3.3 我国风电发远景规划

我国并网型风力发电机组逐渐发展起来，到2001年底装机容量为399.9MW。“十五”期间，风力发电发展重点：一是新建设100MW风电场约3~5座（包括海上风电场），并取得规模效益；二是鼓励有风能资源但还未建设一座风电场地区的电力企业或非电力企业开发风电项目。预计21世纪将是我国风能大发展时期，风力发电总装机目标：2005年达到全国电力工业总装机容量的0.5% 即1500MW左右。2010年争取达到3000MW。有些部门预测以2000MW为目标值，按现



在 1.05 万元 /kW 的设备价值计算, 风力发电新的设备产值将是 210 亿元人民币。

3.4 有关风电的政策扶持

我国政府近年来对风力发电事业提供的一系列优惠政策, 为中国的风力发电发展提供了新动力。如国家计委于 1996 年提出“乘风计划”。支持风电立项, 协调各方关系, 并积极着手制订风电发展优惠政策, 力图解决风电并网、风电电价、设备进口关税和增值税问题; 国家计委和科技部于 1999 年 1 月发出《关于进一步支持可再生能源发展有关问题的通知》(计基础[1999] 44 号), 规定对于银行安排基本建设贷款的项目给予 2% 的财政贴息; 国家经贸委与财政部、国家税务总局协调后, 2002 年经国务院批准, 决定给予风力发电减半征收增值税的优惠(即由 17% 降至 8.5%)。

3.5 对于风电产业可持续发展的一些思索

一种新能源的出现能否打破原有能源框架的束缚, 在很大程度上取决于该种能源的市场竞争能力, 即生产成本。据统计, 我国目前风力发电的成本为 0.42~0.72 元 / kWh, 在没有优惠政策及补贴的前提下, 尚无法与火力发电竞争。但这里需要特别指出的是我们在计算一种能源的综合成本时, 主要运用的是经济方法而忽略了它在生态方面的价值。如将风力发电和燃煤发电加以比较, 风力发电的成本, 反映了涡轮机的制造、安装和维修以及向用户的电力输送; 燃烧煤炭发电的成本, 包括建造发电厂、开采煤炭、运输煤炭到发电厂和向用户输送电力。这里没有包括的成本是, 燃烧煤炭所排放的 CO₂ 对气候的破坏——无论是破坏性更大的风暴、冰盖的融化、海平面的上升, 或者是创纪录的热浪。这个成本计算也没有酸雨对淡水湖和森林的破坏, 或者由于空气污染引起呼吸系统疾病的医疗费用。因此, 燃煤发电厂的市场价格, 大大低估了它们的成本。

另外我国能源分布和使用状况的特点是: 能源和电力资源多分布在中西部, 而能源消耗和使用多分布在东南沿海和中部, 这样就造成了大量的电力输送和电力输送设备的建设投资和运行, 而东南沿海丰富的风力资源却没有很好的利用来进行风力发电。我国广大的沿海地区储有极其丰富的风能, 其稳定性和风速远高于陆地。在海洋环境中, 风更稳定, 更少紊流, 也更少剪切力的风, 因而可设计安装较便宜而寿命更长

的风力滑轮发电机组。使用风力发电不但可以解决能源短缺的问题, 既可以节省大量的输送设备, 又可以实现能源生产的本地产业化。

4 晒盐——传统海盐生产方式

食盐是日常生活中人不可缺少的物质。目前制盐的技术主要有盐田法, 蒸馏法、电渗析法或冷冻法制盐, 还有真空法制盐。就其本质来说制盐的关键就是要去除过多的水分, 使其浓缩。海水制盐在各种盐业资源中是最具优势的生产方式。首先, 海盐的原料是海水, 取之不尽, 用之不竭, 而井、矿、湖盐资源都是有限资源; 其次, 中国沿海有广阔的适合建立盐场的滩涂, 目前共有 500 多万亩盐田。由于盐田法节约燃料、工艺简单, 加之我国有广阔的海岸线, 所以我国是海水晒盐产量最多的国家, 也是盐田面积最大的国家, 年产海盐 1500 万吨左右, 约占全国原盐产量的 70% 占世界原盐总量 30% (目前海盐的世界总年产量约 5000 万 t)。

海盐生产为节约能源而通常靠日晒蒸发水分。这样一来便导致用原海水晒盐生产周期长、效率低下的缺陷。如果应用反渗透技术淡化海水, 一方面能产生我们所需要的主产品——淡水, 另一方面还会产生晒盐所希望的海水浓缩液。以海水淡化后的淡水回收率为 60%~70% 计算, 其浓缩液如果被用于晒盐便相当于已蒸发掉 60%~70% 的水分, 也就等于缩短海盐生产约 2/3 的生产周期, 或提高约 70% 的生产效率。这样以来, 也可极大地缓解海水晒盐场用地的供需矛盾。事实上, 膜法正是现代海盐生产的一种高效方式, 只不过所强调的主体有所不同而已。

除此之外, 借助于反渗透海水淡化产生浓缩液的同时, 还可以积极开展对海水中化学物质的提取。海水中化学物质提取是有无限前景的新兴产业, 溶解于海水的 3.5% 的矿物质是自然界给人类的巨大财富。不少发达国家已在这方面获取了很大利益。我国对海水化学元素的提取, 目前形成规模的有钾、镁、溴、氯、钠、硫酸盐等。在某种程度上, 也有助于海水淡化成本的进一步降低。

综上所述, 我们提出的风能发电、海水淡化与淡化后浓缩液晒盐这种三位一体的生态经济或清洁生产构想应该具有广阔的应用前景。■