

微咸水淡化技术研究进展

吴敏, 黄茁, 李青云, 林莉

(长江水利委员会 长江科学院流域水环境所,)

摘要: 微咸水淡化是解决水资源短缺、提高水资源供给保障能力的可行途径。我国微咸水资源蕴藏丰富且主要集中在淡水资源短缺的西北和华北地区,总量约 200 亿 m^3 ,具有重要淡化利用价值。在综述国内微咸水脱盐及淡化利用领域的技术优缺点、应用范围及相关经验的基础上,从脱盐技术特征、能源供给、数值模拟辅助工艺优化、数字管理等方面进行总结国外先进微咸水淡化处理工艺,并提出我国微咸水资源化利用技术对策及发展方向。

关键词: 微咸水; 淡化技术; 资源化

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)02-0059-05

Research progress for brackish water desalination

WU Min, HUANG Zhuo, LI Qingyun, LIN Li

(Department of Basin Water Environment, Institute of Yangtze River scientific Research of CWRC, Wuhan 430070, China)

Abstract: Desalination is the reasonable and reliable approach for solving water resource shortage and improving freshwater support capacity. China has almost 20 billion m^3 of brackish water resources but the majority of this resource are located in the north and northwest areas where subject seriously freshwater shortage. After reviewing the technical merits and shortcomings, application scope and experiences for different brackish water utilization and desalination at home, from the aspects of character of desalination technology, energy supply, numerical simulation assisted technique optimization and digital management, the paper analyzed and summarized the foreign techniques for brackish water desalination, and Finally proposed technical countermeasures and deveopment direction for utilizing valuable brackish groundwater at a more efficient level.

Key words: brackish water; desalination technology; resources utilization

0 引言

我国部分区域水资源短缺现象十分严重,以天津为例,2009年天津市的水资源总量为 15.2 亿 m^3 ,而用水量达到 23.4 亿 m^3 ,水资源短缺制约了经济发展和社会和谐^[1]。开源是解决水资源短缺重要手段之一,例如将非常规水资源例如微咸水、苦咸水和海水等通过技术手段转化成的淡水资源^[2-3]。我国非常规水资源尤其是微咸水储量庞大,可开采量极为可观,主要分布在我国经济欠发达、地表水资源短缺的中西部地区。微咸水经淡化处理后是一种数量巨大的再生水资源,对我国节约水资源、提高水的有效利用率、缓解水资源紧缺的矛盾、满足各行业用水有着重要作用。

国内外关于微咸水资源化利用已经开展了大量的研究,尤其在缺水的中东地区,在微咸水灌溉、脱

盐等方面技术相当成熟^[4-6]。国内对微咸水的利用研究目前尚处于探索阶段,研究成果还未普遍推广应用。积极探寻开发和利用微咸水资源,缓解当地用水压力,是促进社会经济和谐发展的重要保障。本文通过总结我国微咸水资源分布和淡化研究成果,综述国内外微咸水资源化利用技术特征,以期为我国微咸水资源化利用提供参考。

1 我国微咸水资源分布和形成机制

微咸水一般指矿化度为 1~3 g/L 且在一定技术条件下是可以被开发利用的水资源^[1]。通常情况下,微咸水常赋存于地表土壤盐渍化的地区,以及由地表径流汇集的坑塘、洼淀等^[1]。我国微咸水资源储量丰富和分布广泛,据统计约为 200 亿 m^3/a ,其中可开采量为 130 亿 m^3 ,绝大部分埋藏于地下 10~100 m 处,宜于开采利用^[1];从分布的地理位置

收稿日期:2011-10-15; 修回日期:2011-12-14

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201101027);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2011010/SH+HL);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF20120561SH)

作者简介:吴敏(1985-),女,安徽铜陵人,博士(后),主要从事水资源保护和水污染控制方面的研究。

看,北起辽东半岛,南至广东、广西的沿海地带,东起淮河、秦岭、巴颜喀拉山,西至喜马拉雅山沿线以北的干旱、半干旱、半湿润地区的大部分低平区域,主要分布在易干旱的华北、西北以及沿海地带。其中,黄淮海平原地区微咸水资源量为 54 亿 $\text{m}^3/\text{a}^{[2]}$ 。黄河片微咸水可利用量为 30 亿 m^3/a ,海河片为 22 亿 $\text{m}^3/\text{a}^{[3]}$ 。从省区来看,河北省咸水分布最多,面积达 4 万 km^2 ,总储蓄量达 1793.85 亿 m^3 ,其中微咸水为 990.55 亿 $\text{m}^3^{[7]}$ 。甘肃省矿化度大于 1.5 mg/L 的微咸水总量为 24 亿 m^3 ,其中地表水为 9.4 亿 m^3 ,浅层地下水为 14.6 亿 $\text{m}^3^{[8]}$ 。由于地表水和地下水径流的土壤和岩石成份、地理位置、地质条件不同,微咸水的化学组成存在差异。一般来说,低含盐量水以重碳酸根离子(HCO_3^-)和钙、镁离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})为主,随着含盐浓度的升高,硫酸根离子(SO_4^{2-})、氯离子(Cl^-)和钾、钠离子(K^+ 、 Na^+)所占比例逐渐增加^[9]。

我国微咸水形成机制复杂。沧州市受地理环

境、气候以及河流、湖泊冲淤等因素影响,微咸水呈封闭和半封闭分布^[10]。馆陶县微咸水水平分布与其形成条件、后期地质作用和人为因素有关,垂向分布则与浅层淡水发育程度相关,如微咸水体总厚度由含水层发育程度决定^[11]。除微咸水水平与垂向分布外,其空间形态也备受关注,河北省微咸水的空间形态近似于一个由咸淡水边界向渤海湾方向倾斜的楔形体,自西向东加厚,上覆浅层淡水呈条带状分布于河道带或河流故道等地段,有的地区无浅层淡水覆盖^[12]。

2 微咸水淡化技术

2.1 国内微咸水淡化技术

淡化处理是微咸水资源化利用的重要途径,国内常用的技术有蒸馏法、电渗析法、反渗透法、冷冻法、超滤法等,表 1 总结了上述几种淡化技术的原理、优缺点及应用范围。蒸馏法主要包括多效蒸发、多级闪蒸、膜蒸馏、膜蒸馏等。

表 1 国内几种微咸水淡化处理技术比较

			元/t
技术	原理和适用范围	优、缺点	制水成本
蒸馏法	加热使微咸水沸腾蒸发,蒸汽冷凝成淡水。适用于各浓度水平的咸水	操作简单、淡水水质好;但能耗高,且易在设备传热面形成垢物,腐蚀设备。	未统计
电渗析法	膜在电场作用下分离盐水中离子,降低盐分浓度。适用于低盐度咸水。	工艺简单、操作方便;但能耗大,对原水水质要求高, SO_4^{2-} 去除率低,出水口感差。	3.89 ~ 4.18
反渗透	利用高压,把溶液中的离子压到半透膜另一边。适用的盐度范围广。	工艺简单,操作方便,出水水质好;可去除 90% 的盐类和 99% 的胶体微生物;但膜使用寿命有限。	1.48 ~ 1.74
冷冻法	水分子以冰晶的形式结晶析出。常用于海水和卤水	不产生二次污染,规模大小随意;但冰水混合物处理比较困难。	未统计
纳滤	允许溶剂分子或某些低相对分子量溶质透过。操作压力低、出水效率高,对高价离子有较高截留率。		未统计

陈志莉等利用太阳能集热器系统和风力发电系统作为能源的多效闪蒸方式处理微咸水,结果显示该系统稳定、自动运行且产水率高,当太阳能辐射为 20 MJ/d 时,系统产水量为 12 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 以上,适合太阳能和风能丰富的微咸水地区^[13]。新疆大学匡琼之研究减压膜蒸馏淡化罗布泊地下微咸水,溜出液电导率低于 10 $\mu\text{s}/\text{cm}^{[14]}$ 。侯得印等以无机盐氯化锂(LiCl)和水溶性聚合物聚乙二醇(PEG)为添加剂,制备了聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维疏水膜,进行了直接接触式膜蒸馏苦咸水脱盐试验研究,在进水温度为 80℃ 时,盐截留率高达 99.99%^[15]。

电渗析(Electrodialysis)对铁、镁、钙、钾、氯化物等溶解性无机盐及毒理学指标砷、氟化物的去除率为 66% ~ 93%。中国在上个世纪 80 年代将此法应

用于微咸水淡化、工业用纯水和超纯水制造。河北省利用电渗析法淡化微咸水,成品水各项指标均超过国家 I 类饮用水标准^[16]。刘俊龙等^[17]使用小型电渗析装置淡化微咸水,成本合计仅为 4.18 元/t。但是,电渗析对 COD 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 去除率低,淡化 SO_4-Na 型水和 SO_4-Cl 型水,很难满足生活饮用水卫生要求。此外,电渗析不能去除水中有机物和细菌。

反渗透法(Reverse Osmosis)可除去 90% 以上的溶解性盐类和 99% 以上的胶体微生物及有机物等。刘玉洁等采用普通反渗透复合膜 BW30-4040 对新疆铁路沿线微咸水进行淡化研究,结果显示该膜处理系统脱盐率达 95% 以上,并且随着操作压力的增加,反渗透膜的产水量呈线性增大,但是过高的压力

会加速膜的压密化,使产水量过快衰减,影响膜的使用寿命^[18]。在以风能、太阳能作动力的反渗透净化苦咸水装置,是解决常规能源短缺地区人们生活用水的既经济又可靠的途径。

2.2 国外微咸淡化技术

2.2.1 淡化技术 在中东、北非、北美、南欧、东亚以及地中海小岛等国外某些城市及地区,微咸水、苦咸水是唯一供水水源。发展技术可靠、经济可行和环境友好的微咸水脱盐技术成为需要迫切解决的问题。因此有必要从能源供给、能耗、技术先进性、环境保护等角度出发,将自然絮凝预处理技术、太阳能电池板集成技术、反渗透技术(RO)、低温多效蒸馏技术(LT-MED)、多级闪蒸技术(MSF)、太阳能蒸馏技术(SD)以及电渗析技术(ED)等进行比选^[19]。表 2 给出两种主流脱盐技术经济指标,总体来看,工艺技术成熟,能够处理各种类型的微咸水技术集成是主要努力方向。

表 2 主流脱盐工艺主要技术经济参数比较^[19]

技术经济参数	单位	蒸馏/LT-MED	膜处理/RO
初期投资		高	一般
安装时间	月	12	18
维护费	USD/m ³	0.126	0.126
化学操控费	USD/m ³	0.024	0.047
预处理		较少	精细
后处理		较少	精细
过程控制		低	高
电力消耗	kWh/m ³	2.3	4.2
过程温度	℃	70~75	常温
净转化率	%	35~65	>80
原水水质	mg/L	高达 100000	高达 50000
出水水质	mg/L	2~50	100~500
能量需要类型		电力或废热	电力
能耗	kJ/kg	100~150	<80
处理量	m ³ /d	300~65000	高达 400

2.2.2 能源供给 在各种微咸水淡化技术中,能源消耗是必不可少的,高效、清洁和环境友好的能源供给方式一直是研究热点。燃料电池系统属于新的能源供给方式,通过氢气和氧气构成燃料电池系统,其环境友好,排放的 SO₂、CO₂ 和 NO_x 不足化石燃料的千分之一。将燃料电池系统与反渗透系统组合,能够使进水温度从 20℃ 增加到 30℃ 状况下,将反渗透能耗降低 7%~11%,并使下阶段处理过程能量费用削减 10%~20%^[20]。为了降低能耗,有机郎肯循环(ORC)发动机也被用于和反渗透组合实施脱盐。实验结果表明,ORC 能够在低温(温度范围为 40~

70℃)条件下实施微咸水及苦咸水反渗透脱盐。这种低温在广泛的工业余热、太阳能系统及地热领域中广泛存在,这意味着 ORC-RO 有着广阔的应用空间^[21]。

除上述燃料电池及工艺设计创新外,国外研究人员还积极寻求环境友好的可再生能源用于集成新的反渗透工艺。在中东、北非、南欧以及地中海小岛,研究人员成功利用光电驱动的反渗透脱盐(PV-BWRO),该技术有望成为解决缺水或水质较差地区的偏远社区或小岛上饮用水供给的成熟选择。由于能耗高(10~20 kWh/m³),PV-BWRO 费用不菲,每立方水处理费约 15~20 欧元。希腊研究人员探索采用能量回收系统(ERD)降低能耗并取得成功,将费用和能耗分别降至 7.8 欧元/m³ 和 4.6 kWh/m³^[22]。Tzen 等进一步研究了反渗透系统与风能以及太阳能组合情况下的运行效率,结果发现太阳能反渗透系统比风能反渗透系统更稳定^[23]。能量回收能够有效降低反渗透运行成本,反向泵和佩尔顿涡轮均被用于回收能量,结果表明,佩尔顿涡轮较反向泵具有更好的能量回收效率;此外通过在二级反渗透处增设加压泵,获得较高的水流及转换速度,也能够极大提高膜处理能力和降低能耗^[24]。

与太阳能一样,风能作为可再生能源,在英国、德国、哥伦比亚、夏威夷、澳大利亚以及希腊等国家和地区被广泛用于膜技术脱盐工艺中,其具体工艺状况见表 3。Aerodyn 设计出了风能直接驱动的 RO 和 MVC 海水淡化装置;Enercon 公司也设计并生产出了可以大规模应用的集成化风电海水淡化设备,已经接近于实际应用阶段。通过对比设置在加纳的不同小型风力涡轮机和风速间的数据关系发现,采用 1kW FuturEnergy 的风力涡轮效率最高,费用最低。利用其与膜组合,可在能耗 1.8 kWh/m³ 条件下达到 1.3 m³/d 的净化产量^[25]。再生能源的特点不同,因此其在微咸水处理中的适用性也不尽一致,探讨和总结再生能源的基本特征(表 4)有助于因地制宜采用可再生能源优化微咸水、苦咸水工艺布置和运行^[26]。

2.2.3 其它有害物质去除 除脱盐外,微咸水净化用于饮用水供给时,砷等有害物质必须加以去除。研究人员发现在 pH=10.3 的高碱性条件下,碳酸钠软化去除 As, Ba, B, Cr, Sr 和 V 的效率均值分别达到 24%,100%,92%,99% 和 60%^[27]。对于砷的去除,McNeill and Edwards (1995)发现砷酸盐去除取决于沉淀剂组成,当沉淀剂为单一 CaCO₃ 时,砷酸盐去除

率不足 10%。然而,在 CaCO_3 与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 共存时,磷酸盐去除率可达 60% ~ 95%^[28]。除金属元素外,国外研究人员对微咸水中的石油烃(PHCs)去除也十分关注,通过引入化学絮凝剂,可以完全去除碳原子数为 11 ~ 35 间的石油烃,对 C7 - C9 之间的苯等石油烃可部分去除,碳原子数越多,PHCs 去除效果越好^[29]。此外,由于杂质及各类污染物存在,反渗透膜经过一

段时间运行后会被污染。膜污染主要包括结垢(无机污染),污染(有机污染和胶体)以及生物污染(细菌、病毒和寄生虫)。在突尼斯,为探讨膜污染成因,有机碳分析(TOC),扫描电镜(SEM),傅里叶变换红外分析(FR - IR)以及 X 射线衍射等方法被用来揭示膜污染过程,结果发现,膜表面上的沉积物组要由有机质、硅石、铁及 CaCO_3 组成^[30]。

表 3 各种小型风力驱动膜脱盐系统性能^[25] g/L, 10⁵ Pa, %, m³/d, kW, kWh/m³

国家	TDS	膜压力	除盐率	回收率	过膜流量	涡轮机功率	能量储存	单位能耗
英国	40	40 ~ 60	97	30 ~ 45	8.5	2.2	无	3.4
德国	36	80	-	27	6.0	6.0	电池	11.0
哥伦比亚	35	3.4 ~ 5.5	99	3.0 ~ 9.7	0.4	0.9	无	-
夏威夷	3	5.2 ~ 7.2	97	20	4.0	-	稳压器	1.1
澳大利亚	2 ~ 6	6 ~ 11	83	9.3	0.21	<0.15	压力容器	0.7
希腊	36	58	99	15	0.6 ~ 1	0.9	蓄电池	16.9

表 4 可再生能源的评价^[26]

评价标准	光电系统	太阳能热	风能	地热
驱动脱盐系统适用性	适用性好	需热电配合	需风电配合	需热电系统配合
资源可利用性	资源丰富	资源丰富	区域性可行	局部区域可行
能量输出的连续性	间歇性输出	间歇性输出	间歇性输出	连续输出
能量产量的可预期性	不可预期	不可预期	不可预期	可预期

2.2.4 数值模拟及 GIS 技术的应用 数模作为有效辅助研究工具,在国外的微咸水处理中得以应用,在微咸水膜处理净化生活饮用水技术中,膜处理过程优化如优化费效比和操作参数等成为研究热点。具体来讲,膜处理过程优化包括对膜物理参数如类型、几何形状、结构、操作参数比如膜压力、流速、系统回收率、水动力频率、化学清洗频率等内容。Sethi 等采用弥漫流与费用模型计算反渗透工艺的膜性能及处理费用,费用最小化优化过程中采用连续二次程序算法(Sequential quadratic programming algorithm)。结果表明采用相对窄小的中空纤维及相对高的流速能够降低膜处理系统的压力,提高和改善小型膜处理系统性能^[31]。此外,数学模型还被用于微咸水管理以及流域盐度控制,这些模型主要用于探讨天然流量与天然含盐量间的线性关系,Prairie 等采用非参数回归模型研究流量与含盐量间关系,模拟结果发现在 1941 - 1995 年间,采用新非参数模型更为科学合理,可降低约 15% 的盐度过高预测^[32]。

在微咸水开发利用管理方面,地理信息系统(GIS)作为有效工具能有效将地理数据和脱盐工艺有效组合。埃及研究人员通过对太阳辐射、含水层

深度、含水层盐度、含水层的位置以及地质状况等数据进行 GIS 录入图示及分析,然后结合脱盐工艺的特征进行太阳能脱盐工艺布局和优化,以达到能量利用最大化,降低运行费用和环境不利影响^[33]。

3 我国微咸水淡化技术对策

我国微咸水资源丰富,集中在经济不发达的西北和华北地区,开发利用时受资金不足、技术落后等因素制约,且对微咸水利用缺乏统筹规划,存在微咸水利用过度和不充分问题。此外,在已经实施微咸水淡化措施部分地区因设备运行和维护成本高、使用寿命有限等因素掣肘。因此,在微咸水淡化前期准备和规划设计时,可考虑借鉴国外先进经验,例如采用 GIS(地理信息系统)等数字化技术结合地质调查结果等优化微咸水开采和淡化布局,并采用数值模拟等先进技术手段辅助工艺参数设定和工艺过程优化。

在我国微咸水淡化利用方面,应根据微咸水储量、化学组成以及用水水质要求等信息,选用成本低、易操作、生态环保的预处理技术(图 1)。我国西北地区人口密度相对稀少、土地资源丰富,结合当地已有的水利设施和辅助措施,可采用土地处理等生

态措施如稳定塘、生态渠系、人工湿地等进行微咸水淡化预处理,利用稳定塘和种有湿生植物的生态渠系的沉淀、过滤作用,将微咸水和苦咸水中悬浮物固体颗粒、泥沙和部分胶体物质滤掉,以免堵塞流水道、增加水流阻力和造成后续处理中设施的污染,降低预处理成本和操作难度。经过预处理的微咸水进行二级脱盐处理即淡化,此过程一般需要动力驱动,可根据当地能源供给情况,将淡化处理与风能或太阳能等清洁能源开发利用相结合,解决能耗问题。

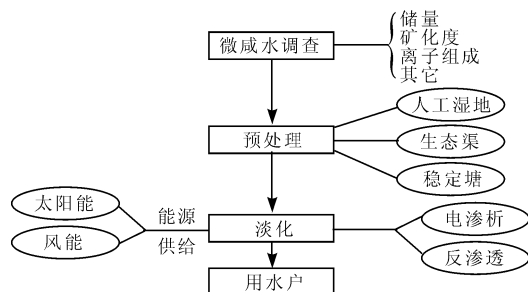


图1 微咸水淡化流程图

4 结 语

我国西北和华北地区淡水资源严重缺乏,但微咸水资源储量丰富,通过淡化处理将其转变为可利用的淡水资源。国内外微咸水淡化方面已经有很多成熟经验,通过对这些技术方法的比较,确定适合于中国缺水地区的微咸水淡化利用技术。可在以下方面做进一步研究:

(1)研究和开发高效、环保、低成本等的预处理工艺,结合当地已有的水利设施,例如人工湿地、生态渠和稳定塘等对微咸水进行预处理,降低预处理的成本和难度。

(2)根据微咸水储藏地的能源特点,集成风能、太阳能等清洁能源驱动条件下的微咸水淡化技术,实现节能降耗和资源持续高效利用。

参考文献:

- [1] 刘友兆,付光辉. 中国微咸水资源化若干问题研究[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(2):57-60.
- [2] 乔玉辉,宇振荣,张银锁,等. 微咸水灌溉对盐渍化地区冬小麦生长的影响和土壤环境效应[J]. 土壤肥料,1999(4):11-14.
- [3] 潘家铮,张泽祯. 中国北方地区水资源的合理配置和南水北调问题[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [4] Birnhack L, Shlesinger N, Lahav O. A cost effect method for improving the quality of inland desalinated brackish water destined for agriculture irrigation [J]. Desalination,

- 2010,262(1-3):152-160.
- [5] Glueckstern P, Priel M, Gelman E, et al. Wastewater desalination in Israel [J]. Desalination, 2008, 222:151-164.
- [6] Qiblawey H, Banat F, Al-Nasser Q. Performance of reverse osmosis pilot plant powered by Photovoltaic in Jordan [J]. Renewable Energy, 2011,36(1):1-9.
- [7] 李少华,黄伟,闫金龙,等. 充分利用咸水微咸水资源发展高效生态模式养殖[J]. 河北工程技术高等专科学校学报,2001,3(1):79-81.
- [8] 王双合,胡兴林,蓝永超,等. 甘肃省苦咸水资源量及时空分布规律研究[J]. 中国沙漠,2009,29(5):995-1012.
- [9] 王菁,孟祥周,陈玲,等. 苦咸水成因及其淡化技术研究进展[J]. 甘肃农业科技,2010(7):39-42.
- [10] 李文章,庞学智,庞元清. 沧州市微咸水开发利用情况及效益分析[J]. 河北水利,2007(4):13.
- [11] 龙秋波,袁刚,王立志,等. 河北省馆陶县微咸水现状及开发利用研究[J]. 水科学与工程,2010(3):41-43.
- [12] 张亚哲,申建梅,王莹,等. 河北平原地下(微)咸水的分布特征及开发利用[J]. 农业环境与发展,2009(6):29-33.
- [13] 陈志莉,何强,庄春龙,等. 太阳能苦咸水(海水)淡化系统的运行研究[J]. 中国给水排水,2009,25(23):61-63.
- [14] 匡琼芝,李玲,闵梨园,等. 用减压膜蒸馏淡化罗布泊地下苦咸水[J]. 膜科学与技术,2007,27(4):45-49.
- [15] 侯得印,王军,王宝强,等. PVDF疏水膜的制备及其在苦咸水中脱盐中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),2010,46(3):395-400.
- [16] 王燕江. 浅谈苦咸水淡化技术——电渗析法[J]. 河北水利,2002(1):42.
- [17] 刘俊龙,宗岳,雷宝军,等. 苦咸水淡化技术在解决农村饮用水困难中的应用和推广[J]. 地下水,2005,27(3):210-211.
- [18] 刘玉洁,董波. 普通反渗透膜在新疆铁路沿线高含盐量苦咸水淡化中的应用研究[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,2007,34(1):12-14.
- [19] Téllez Diego, Lom Horacio, Chargoy Pablo, et al. Evaluation of technologies for a desalination operation and disposal in the Tularosa Basin, New Mexico [J]. Desalination, 2009, 249:983-990.
- [20] Singh Rajindar. Sustainable fuel cell integrated membrane desalination systems [J]. Desalination, 2008, 227:14-33.
- [21] Manolakis D, Kosmadakis G, Kyritsis S, et al. Identification of behaviour and evaluation of performance of small scale, low-temperature organic rankine cycle system coupled with a RO desalination unit[J]. Energy, 2009, 34:767-774.

表 1 标准化处理计算表

水土流失影响指数关键指标	$\min(X)$	$\max(X)$	X_i	$\max(X) - \min(X)$	$X_i - \min(X)$	X'_i
占地面积与影响范围(X_1)	0.045	159.606	53.83	159.561	53.785	0.337
对地表的扰动强度(X_2)	0.045	144.970	33.34	144.925	33.295	0.230
影响时间(X_3)	2.000	60.000	24.00	58.000	22.000	0.379
造成的水土流失总量(X_4)	1.180	51607.020	4463.44	51605.840	4462.260	0.086
可恢复程度(X_5)	0.000	0.248	0.10	0.248	0.100	0.403

表 2 水土流失影响指数计算表

水土流失影响 指数关键指标	水土流失 影响指数 因子权重 α_i	归一后的水土 流失影响指数 关键指标 X'_i	加权 计算
占地面积与影响范围(X_1)	0.193	0.337	0.065
对地表的扰动强度(X_2)	0.221	0.230	0.051
影响时间(X_3)	0.167	0.379	0.063
造成的水土流失总量(X_4)	0.210	0.086	0.018
可恢复程度(X_5)	0.209	0.403	0.084
求和计算 SWII			0.282

3.5 水土流失影响指数(SWII)评价

根据“水土流失影响指数(SWII)愈小愈好准则”^[1],水土流失影响指数是对开发建设项目水土流失影响的一个定量评价,当计算得出的SWII值愈小时,说明开发建设项目对水土流失的影响范围及面积愈小、对地表的扰动强度愈小、影响的时间愈

短、造成的水土流失量愈小、不可恢复的面积愈小,这些都是对水土保持有利的。经计算得出的克拉玛依市南新湿地恢复工程水土流失影响指数偏小,因此,该工程水土流失影响程度较小。

参考文献:

[1] 姜德文. 开发建设项目水土保持损益分析研究[D]. 北京:北京林业大学,2007:40-114.
[2] 姜德文. 以科学发展观建立开发建设项目水土保持损益评价体系[J]. 中国水土保持,2005(6):5-7.
[3] GB/T 20465-2006,水土保持术语[S].
[4] GB50433-2008,开发建设项目水土保持技术规范[S].
[5] GB/T15774-2008,水土保持综合治理效益计算方法[S].
[6] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
[7] 王礼先,朱金兆. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,2005.

(上接第 63 页)

[22] Mohamed E, Papadakis G, Mathioulakis E, et al. A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems - a technical and economical experimental comparative study [J]. Desalination, 2008, 221:17-22.
[23] Tzen E, Theofilloyianakos D, Kologios Z. Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned [J]. Desalination, 2008, 221:29-36.
[24] Sadhwani J J, Veza, J M. Desalination and energy consumption in Canary Islands [J]. Desalination, 2008, 221:143-150.
[25] Park G L, Schäfer A I, Richards B S. Potential of wind - powered renewable energy membrane systems for Ghana [J]. Desalination, 2009, 248:169-176.
[26] Oldach R. Matching Renewable Energy with Desalination Plants[C]//The Middle East Desalination Research Center (MEDRC), MEDRC Series of R & D Reports, 2001.9.
[27] Parks J L, Edwards M. Precipitative removal of As, Ba, B, Cr, Sr, and V using sodium carbonate [J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, 132 (5): 489-496.
[28] McNeill L S, Edwards M. Soluble arsenic removal at water treatment plants [J]. J. Am. Water Works Assoc., 1995,87(4):105-113.
[29] Tansel B, Eifert J L. Removal of emulsified PHCs from brackish water by coagulation[J]. Journal of Environmental Engineering, 1999, 125 (12): 1173-1176.
[30] Boubakri A, Bouguecha S. Diagnostic and membrane autopsy of Djerba Island desalination station [J]. Desalination, 2008, 220:403-411.
[31] Sethi S, Wiesner M R, Dennis J E. Optimization of hollow - fiber design and low - pressure membrane system operation [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, 127 (6): 485-492.
[32] Prairie J R, Rajagopalan B, Fulp T J, et al. Statistical non-parametric model for natural salt estimation[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, 131 (1): 130-138.
[33] Salim M G. Selection of groundwater sites in Egypt, using geographic information systems, for desalination by solar energy in order to reduce greenhouse gases [J]. Journal of Advance Research,2011,3(1):11-19.