

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.002

黄土高原祖厉河流域咸水淡化与高效利用

时冬萍,谭红兵,柳子豪,许 鹏

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:为缓解我国北方苦咸水分布地区淡水资源紧缺的状况,开展咸水多级冰冻淡化试验,揭示咸水结冰过程水质变化机理。试验结果表明:冷冻结冰法能有效淡化咸水,I 级冰融水的脱盐率可达 60% 以上;咸水多级冷冻结冰过程,不同离子结冰迁移速率不同,致各级冰融水离子组成发生变化。多级冰冻淡化方法可以在祖厉河流域推广和应用,其充分利用自然能源,具有经济环保,简单易行,既可小规模分户实施也可大规模处理等优势,是解决当地春早期生活用水及农业用水困难的有效途径之一。

关键词:咸水淡化;冷冻试验;冰融水;离子迁移;去除率;祖厉河
中图分类号:TU991.2;TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2020)04-0300-07

Brackish water desalination and efficient application in Zuli River catchment of Loess Plateau

SHI Dongping, TAN Hongbing, LIU Zihao, XU Peng

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To alleviate the shortage of fresh water resources in the northern China where large-scale brackish water is widely distributed, a multi-stage freezing desalination experiment of brackish water was carried out to reveal the mechanism of water quality changes during freezing out processes. The experiment indicates that the methods of freezing and icing can effectively dilute the brackish water and the desalination rate of ice melt water can reach more than 60%. In the multi-stage processes of salty water freezing, the different freezing rate of various ions can lead to changes of ion composition in ice-melting water at all levels. The conclusion is that the method of multi-stage freezing and desalination of saltwater can be widely promoted and applied in the local for mitigating the predicament of local water shortage and the potential harm of primary salty water irrigation to the environment. The advantages of this desalination are that it can make fully use of natural cold energy in winter and realize well economic and environmental achievements. In addition, it seems to be very simple and practicable, which can be implemented in small-scale households or on a large scale. It is one of the effective ways to solve the difficulties of domestic water use and agricultural water use during the spring drought.

Key words: brackish water desalinization; freezing experiment; ice melt water; ion migration; removal rate; Zuli River

我国华北、西北等相对干旱地带,淡水资源贫乏,严重制约了社会经济建设的发展^[1-3]。然而,黄土高原中西部地区却储存有相对丰富的咸水资源,具有潜在开发利用价值^[4]。在季节性干旱(春旱)难以人为改变

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0406601);国家自然科学基金(41872074)
作者简介:时冬萍(1994—),女,博士研究生,主要从事水文地质研究。E-mail:ping941221@163.com
通信作者:谭红兵,教授。E-mail:tan815@sina.com
引用本文:时冬萍,谭红兵,柳子豪,等.黄土高原祖厉河流域咸水淡化与高效利用[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):300-306.
SHI Dongping, TAN Hongbing, LIU Zihao, et al. Study of brackish water desalination and efficient application in Zuli River catchment of Loess Plateau[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2020, 48(4): 300-306.

的自然条件下,采用经济高效的方法开发利用咸水,一方面可以有效缓解地区性水危机的困局,另一方面大量咸水被开发利用、消耗,对保护干旱-半干旱区地下淡水资源免遭苦咸水下渗污染具有重大意义^[5]。

祖厉河流域位于甘肃省中部陇西高原,是黄河的一级支流,年径流量 1.19 亿 m³。该河流发源于华家岭,上游由祖河与厉河汇合而成,流经会宁、河畔、甘沟驿、靖远县,于红嘴子处汇入黄河,被誉为甘肃省会宁县的“母亲河”。然而,除源区华家岭分布有淡水资源外,祖厉河流域不论是河水还是地下水,其总溶解性盐分(TDS)都非常高,大部分属于难以直接利用的苦咸水,河水多年 TDS 平均值为 7.8 g/L,是全国平均含盐量最高的内陆河流之一^[6-7]。近 10 年来,当地为了发展经济,引进了各种耐盐性作物,如甜菜和芹菜,目前已成规模化种植。尽管短期来看,咸水灌溉农作物得以推行和发展,但从长远来看,大量咸水直接作为灌溉水源,耕地会严重积盐,而当地又没有较强的降水或淡水冲洗,最终会因土壤盐碱化使农作物生长受到影响^[8-11]。采取大量淡水冲洗盐化土壤,控制土壤盐分以维持土壤耕层中盐分动态平衡的方式在淡水缺乏地区不可实施,也不符合现代以节水灌溉为中心的生态农业发展要求^[12]。因此,在咸水资源丰富的地区积极探索咸水淡化方法是提高水资源利用率,解决水资源供需矛盾的有效途径^[13]。

祖厉河流域几乎每年都会发生春旱并伴随大风,导致土壤极为缺水。这期间,春耕及作物发芽生长面临最严峻的水资源短缺问题。若能将咸水的 TDS 降低一半以缓解几乎每年都发生的春旱,再经夏季集中降雨的适当淋洗,可在很大程度上防止生态层之上严重盐碱化。逢焕成等^[14]、Rajak 等^[15]通过微区定位试验证明了利用 TDS 为 3~5 g/L 的微咸水补充灌溉小麦,不会造成土壤积盐现象。Flores 等^[16]针对美国西南部淡水短缺现象,采用反渗透处理后的地下水作为淡水资源,并尝试利用处理后的废盐水作为耐盐植物的灌溉水,最终证明此方案是可行的。

目前,以电渗析法、膜蒸馏法和反渗透法为基础的工程技术措施是淡化咸水较为成熟的方法^[17]。然而,这些方法由于其本身诸如设备投资、能源能耗、脱盐率及适用范围的局限性,很难实现大规模的推广和应用,特别是对于我国西北经济相对落后、农业产量较低的地区更没有实施的条件。曾有学者对自然冷冻法淡化咸水开展过较多研究,证明在有条件的地区是可行的^[18-21]。祖厉河流域冬季漫长、气温低,大多时候低于冰点,有丰富的冷能资源,如王双合等^[22]曾对祖厉河、渭河等流域的苦咸水开展过模拟试验研究,发现冷冻法对这些地区苦咸水中主要超标离子的去除效果很好。因此,在祖厉河流域实施冰冻淡化咸水有良好的发展前景。前人的研究所用水样多为室内配制,与实际水样物理化学性质差异较大,也对淡化机理缺乏试验表征,特别是冰冻淡化过程很难一次性实现,针对用水需求需要设计多级过程,这方面的精细化深入研究尚需补充。本文结合陇西高原丰富的咸水资源和冬季优越的冷能资源,开展咸水多级冰冻淡化研究,以期能解当地“卡脖子旱”(春旱)水资源短缺的燃眉之急,为当地增辟生活用水及灌溉水源提供新的解决方案。

1 咸水多级冰冻淡化试验

1.1 基本原理

咸水结冰淡化的原理在于无机盐及有机质在水中的分配系数远大于在冰中的分配系数。水分子会在咸水结冰过程中以冰晶形式先结晶,与咸水中的无机盐或有机质分离。当冷冻温度和冷冻时间适宜时,经多级冰冻淡化,大部分水逐渐结冰,浓缩液中盐浓度越来越高,最后获得的分级冰融水即为各级淡水。

1.2 试验仪器与样品

主要试验仪器包括冰柜(恒温可达到-20℃)、一系列冷冻容器、TDS 测试仪、电子天平、100 mL 水样瓶等。

试验样品:为了保证试验结果的准确性和多级冰冻淡化工艺的可行性,在祖厉河流域地质考察过程中采集了大量民用井水样品,现场测定样品 pH、TDS 等水化学参数。在采样当天对所有样品用 0.45 μm 微滤膜抽真空过滤,将过滤后的样品密封保存在经超纯水洗净及样品润洗过的塑料瓶中,及时运回实验室进一步分析。考虑到当地居民用水均源于附近井中抽入窖中的藏水,所以本次试验样品选择所有 TDS 大于 3 g/L 的水样,最后等体积混合成 4 L 的混合水代表整个祖厉河流域咸水的平均水平,其 TDS 为 6.86 g/L,基本是当地储量最多的咸水 TDS 分布范围,也是当地种植耐盐生芹菜等植被的上限,当地菜农多年实践表明只要 TDS 降低一半即可作为这些蔬菜的灌溉水源。

1.3 试验方法与工艺流程

1.3.1 试验方法

以当地最有可能实现淡化且储量丰富的祖厉河代表性咸水为样品,采取实验室可调温冰柜冷冻的方法进行冷冻,冷冻温度设为当地冬季平均气温(−10 ℃)。冷冻装置模拟自然冷冻原理,冷冻容器采用敞口盛水器皿(下端有阀门)。当水面冰层达到一定厚度时,停止冷冻,然后进行冰水分离,冰块在室温下自然融化得到冰融水。依次进行多级冰冻,对原水样和各级冰融水的 TDS 及主要离子成分进行检测,分析检验冷冻法对咸水淡化的效果及各级冰冻后离子的变化规律。

1.3.2 工艺流程

首先取 4 L 的咸水样置于 1 号冷冻容器中(图 1),测量其 TDS、温度、pH 等基本参数,并取 100 mL 装瓶,作为初始水样。将盛水样的 1 号冷冻容器放入−10 ℃ 的冰柜中冻结结冰,6 h 后取出冷冻容器,打开下端阀门,分离溶液和冰晶,将溶液流入下一个冷冻容器后继续置冷柜中冰冻。考虑到当地冬季夜间最低温度持续约 6 h 左右,因此将 6 h 作为冷冻间隔,取各级冰块并在室温下融化作为冰融水,分别测定电导率、pH、TDS 及离子组成。

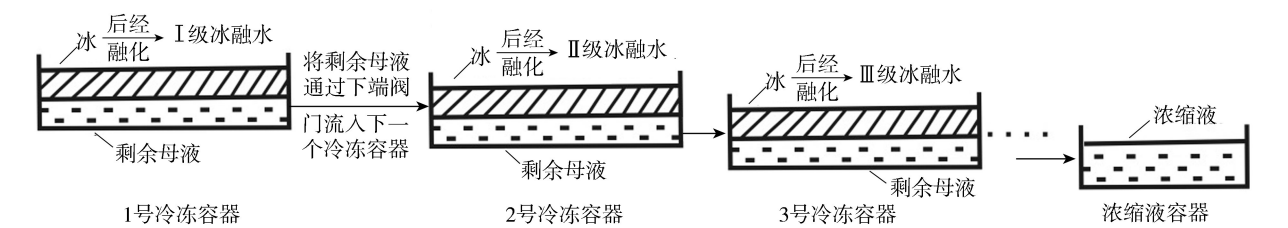


图 1 冷冻工艺流程图
Fig. 1 Experimental flow chart of freezing and icing

1.3.3 主要化学成分分析

电导率及 pH 采用电导率仪法,TDS 利用蒸干称重法,基本离子组成中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等阴离子在河海大学同位素研究所采用 ICS-2000 离子色谱仪测定(误差小于 2.0%), K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子在江苏省华东南工地质技术研究有限公司采用 ICP 等离子体发射光谱仪测定(误差小于 5.0%)。考虑到西北地区以面食为主食,而 B 元素作为面粉添加剂被广泛使用,浓度超标会对环境产生影响,危害人体健康; NO_3^- 是指示人类活动(农业施肥、生活污水等)对环境污染的经典指标; Sr 元素是作为地表风化以及干旱区古盐度判断特征的指标元素,因此除主要化学成分外,也分析了水样的 B^{3+} 、 Sr^{2+} 和 NO_3^- 含量。

1.4 冷冻试验结果分析

1.4.1 咸水多级冰冻过程中电导率、TDS 及 pH 变化

相对初始水样,各级冰融水的 EC 值、TDS、pH 显著降低,且从 I 级到 IV 级冰融水呈现由低到高的变化趋势(表 1)。咸水的钠吸附比(SAR)是表征咸水中钠离子与钙镁离子相对含量的重要指标,对土壤盐分淋洗及防止盐碱化具有重要影响。利用 SAR 较高的咸水灌溉会引起土壤颗粒上的交换性钙、镁离子被交换性钠离子所取代,从而导致土壤物理性质恶化。各水样 SAR 的变化与 TDS 的变化趋势基本一致。在咸水第 1 阶段的结冰过程中,TDS 由初始的 6.86 g/L 下降到 2.63 g/L,淡化效果非常显著。SAR 也由 9.95 降低为 6.96,说明 Na^+ 进入冰晶的比例明显低于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比例。郭永杰等^[23]研究表明,矿化度为 2.0~3.0 g/L 时,可灌溉一般作物,不会造成土地盐碱化。因此,咸水经一级淡化后可以供给农业灌溉,土壤盐渍化程度也将大大降低。I 级冰融水的 TDS 分别是 II、III、IV 级冰融水的 91%、71%、46%,仅占冰融水总 TDS 的 17.57%。因此,咸水结冰过程呈现盐分趋向于在液相富集,较淡的水先结冰,咸水后结冰的规律,实现咸淡水分离,这与杨晖等^[24]研究结果一致。TDS 变化的同时,冰融水 pH 随之变化,IV 级冰融水 pH 比 I 级冰融水高出 0.27,原因是冰冻过程溶液中存在与空气中 CO_2 处于平衡状态的碳酸氢盐,水解呈碱性,且随着冰-水分离溶液不断浓缩,碳酸氢根离子浓度不断减小,最终导致了各级冰融水 pH 总体升高的变化趋势。

表 1 初始水样及各级冰融水化学成分分析结果

Table 1 Chemical component analysis results of initial water sample and multi-stage ice melt water

样品	EC/(mS·cm ⁻¹)	pH	TDS/(g·L ⁻¹)	钠吸附比	ρ(Sr ²⁺)/(mg·L ⁻¹)	ρ(B ³⁺)/(mg·L ⁻¹)
初始水样	9.01	8.58	6.86	9.95	7.93	1.32
I 级冰融水	4.55	8.12	2.63	6.96	4.00	0.58
II 级冰融水	4.61	8.21	2.90	6.68	3.81	0.53
III 级冰融水	5.60	8.41	3.69	7.81	4.52	0.71
IV 级冰融水	6.84	8.39	5.75	9.19	5.72	0.99
浓缩液	18.90	8.62	14.70	14.00	16.11	2.42

1.4.2 咸水多级冰冻对不同盐分离子分布的影响

咸水多级冷冻结冰的过程中各级冰融水的离子浓度与初始水样相比明显下降,包括含量微小的 Sr²⁺ 和 B³⁺ 也有不同程度的降低(表 1、图 2)。咸水第一阶段的冰冻淡化过程,各离子的含量变化最为显著,初始水样的 NO₃⁻ 相对农田灌溉水标准超标近 10 倍,经一级冰冻淡化后降低了近一个数量级,Na⁺、Cl⁻ 质量浓度也有大幅度下降。另外,从 I 级到 IV 级冰融水离子浓度大致呈现由低到高的趋势(图 2),但不同离子在不同阶段进入冰晶的比例不同。如图 3 所示,在 I 级冰融水中,K⁺ 进入冰晶的比例最高,占冰融水总 K⁺ 的 24.17%;NO₃⁻ 和 Ca²⁺ 进入冰晶的比例也达到了 22% 以上;Cl⁻ 结冰比例最低,占冰融水中总 Cl⁻ 的 19.76%,各离子进入冰晶比例的高低顺序为 K⁺>Ca²⁺>NO₃⁻>SO₄²⁻>Na⁺>Mg²⁺>Cl⁻。随多级冰冻的试验进展,各离子进入冰晶的比例逐渐增大,即 I 级<II 级<III 级<IV 级。由于各离子不同阶段进入冰晶的比例不同,不同阶段冰融水中各离子所占的比例也随之发生变化。从 I 级到 IV 级冰融水,Na⁺、Cl⁻ 在冰融水中的比例有轻微升高,Na⁺ 由 22.14% 上升到 23.51%,Cl⁻ 由 22.82% 上升到 9.75%;相反,SO₄²⁻、NO₃⁻ 在融水中的比例有所下降,其中 SO₄²⁻ 由 34.90% 下降到 33.85%,NO₃⁻ 由 2.21% 下降到 1.88%。冰融水中离子的变化导致了钠吸附比的变化,使钠吸附比由 6.96 增加到 9.19。因此,咸水多级冷冻结冰过程也是不同离子重新分布的过程,离子组成的变化导致了水质的变化。

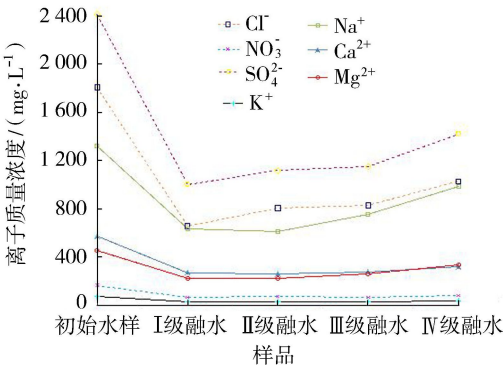


图 2 各级冰融水离子含量变化

Fig. 2 Ion content changes of multi-stage ice melt water

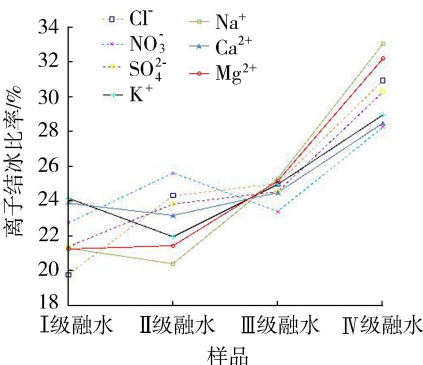


图 3 各级冰融水离子迁移规律

Fig. 3 Ion migration law of multi-stage ice melt water

1.4.3 咸水多级冰冻过程的离子去除率

根据黄土高原祖厉河流域水体的主要超标离子情况,选取测试成分中氯化物、硫酸盐、硝酸盐、总硬度、TDS 数据,对多级冰冻试验提纯效果以及离子去除率进行评价。离子去除率^[25] $A = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\%$, 其中 C_0 、 C_1 分别为原水样、冷冻提纯后某离子的质量浓度。

表 2 冷冻提纯后主要超标离子的去除率

Table 2 Removal rate of main supernormal ions after freeze purification

冰融水	去除率/%				
	总硬度	TDS	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
I 级	52.5	61.7	63.8	61.1	58.5
II 级	52.9	57.7	55.4	56.2	53.7
III 级	46.9	46.2	54.2	60.0	52.4
IV 级	34.5	16.2	43.3	51.7	41.2

由表 2 可以看出:影响咸水水质的各主要指标经冰冻分离后的去除效果均较理想,特别是 I 级冰融水,各离子去除率最高的是氯离子,达到了 63.8%,最低的是总硬度,去除率也超过了 50%。按去除率排列为:氯离子>TDS>硝酸根离子>硫酸根离子>总硬度。各级冰融水离子去除率的排列顺序是不相同的,因此各阶

段冻结结冰的过程中,离子的进入冰晶的速率是不断变化的。从各级冰融水与去除率的关系来看,随着冷冻的进行,各级浓缩液的盐度及冰晶中的盐分含量均逐渐增加。所以随级数增加,各级冰融水离子去除率呈下降趋势。

2 多级冰冻淡化咸水的高效利用

尽管咸水冰冻淡化的过程在商业上没有得到广泛应用,但与其他咸水淡化过程相比,冰冻淡化所需的能量非常低(冰冻融化过程的潜热仅是水的蒸发潜热的 1/7),针对类似祖厉河流域的地区,冰冻与融化的过程可以充分利用自然条件。加之该方法具有经济实用、简单易行、可大规模处理等优点,因而在地域上极具推广优势。对于祖厉河流域,当地常见集雨水窖及涝池等蓄水设施,是储存雨季降水或外调水作为旱季生活水源的最重要方式,这种储水方式对于极端旱季应急灌溉也有重要意义。据统计,20 世纪 80 年代以来,甘肃全省建成的 300 多万眼小水窖,稳定地解决了 260 多万人的饮水问题^[26]。目前这种蓄水设施可以与咸水多级冰冻淡化的工艺配合使用,将淡化后的水直接导入当地各户水窖中供给生活用水及农田灌溉水,既简化了咸水淡化的过程又节约了成本。整个咸水处理的工艺主要包括原水的沉淀过滤、冰冻、融冰 3 个技术环节,所需的工程设施主要包括河流拦蓄设施、导水管道、初级净化池、冷冻池和淡水池。冰冻过程以冬季自然冷冻为主,融冰过程以初春天气转暖后的自然融化为主,融化之后较淡的水正好用于春耕播种、育苗灌溉。另外也可在冷冻池周围加修热管,待融冰时,利用热管辅助加热融冰,所需的电能可以由当地小规模太阳能或风电解决。

图 4 给出了自然条件下咸水多级冰冻淡化处理的技术线路和主要工艺流程构想:首先在地势稍高的位置修建蓄水、初级净化、1 号冷冻综合池。再顺地势分别修建 2 号冷冻池、3 号冷冻池、I 级淡水池、II 级淡水池、III 级淡水池及浓缩液池等。然后通过在河流适当位置修建的蓄水分水工程取水,把原水输入沉淀池中进行沉淀过滤后再输入 1 号冷冻池,利用夜间低温冰冻,当咸水经 6~10 h 结冰分离后打开下端阀门,排出结冰后的剩余母液至 2 号冷冻池接着冰冻。达到逐级分离效果后,每一级分离出来的冰可辅助加热融化,也可以上覆稻草或水泥加盖防止蒸发,等春季来临升温后自然融化。最终获得的 I 级冰融水存入水窖作为基本生活水源,如洗浴、牲畜饮用等,甚至可以再经树脂过滤、膜法或其他化学处理方法进一步降低盐分及除去有害成分来作为饮用水源。II 级冰冻主要是将 1 号冷冻池中分离出的溶液再次冰冻、分离和融化,得到 TDS 相较 I 级冰融水高的微咸水以供春旱季节春耕或种植蔬菜等用。有研究指出^[27]:单一冷冻过程尽管使阴离子、阳离子、TDS 和 EC 值的水平降低了 3~4 倍,但仍然无法达到生活用水和灌溉水的要求,而要通过至少 2 次的冷冻提纯。但就实际情况而言,实施二次结晶分离的工艺,不仅增大成本而且多增一个冷冻、分离、融冰的循环周期,若该处考虑分级融冰集水更具现实意义。咸水冰融化的过程也是一个咸淡水分离的过程,高 TDS 的咸水先溶出,低 TDS 的淡水后溶出。因此在工艺流程的融冰技术环节中,可增设 TDS 检测仪及自动阀门,通过控制融出水的 TDS 来达到供给水的要求。咸水多级冷冻淡化处理的过程可通过调控冷冻时间、融冰时间来提高冰融水的纯度,该过程所需要的能源尽可能采用自然冷能和太阳能。对最后阶段高浓度盐水集中储存、风干、固化待后续利用。

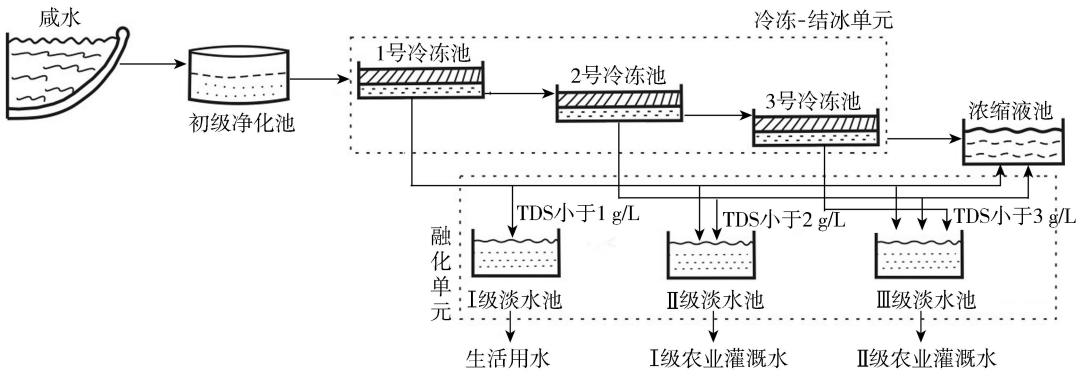


图 4 咸水多级冰冻淡化工艺流程

Fig. 4 Flow chart of multi-level ice desalination of saltwater

3 结 论

a. 多级冰冻淡化方法对类似祖厉河流域广泛分布的苦咸水而言效果良好。Ⅰ级冰融水的脱盐率达到 60% 以上,主要超标离子的去除率最低达到 50% 以上;Ⅱ级冰融水的脱盐率及各离子去除率也达到了 50% 以上。就此而言,Ⅱ级冰融水可用于农业灌溉而不会造成土地盐碱化的现象,Ⅰ级冰融水再经辅助措施淡化后或是调整试验冷冻时间就可直接供给当地生活用水,实现咸水资源的充分利用。

b. 咸水多级结冰的过程中,不同离子进入冰晶的迁移速率不同,Ⅰ级冰融水离子迁移顺序为 $K^+ > Ca^{2+} > NO_3^- > SO_4^{2-} > Na^+ > Mg^{2+} > Cl^-$ 。离子进入冰晶的速率不同使得各级冰融水水质发生变化,钠吸附比逐渐升高,各级冰融水的 pH 也呈现逐渐上升的趋势。

c. 从整个工艺流程来看,多级冰冻淡化处理的过程具有低投资、低能耗、操作过程简单以及可大规模处理的巨大优势,其各个环节均充分利用自然能源并且整个过程不产生污染,充分达到节能减排、可持续发展的目的。

d. 对类似黄土高原祖厉河流域大量咸水分布区而言,多级冰冻淡化咸水的工艺可根据实际情况修建大型冷冻淡化处理设备,Ⅰ级冰融水与每家每户水窖相连接,可考虑作为家庭生活用水来源;Ⅱ级冰融水另设储水设施,用于早春旱情严重季节农田灌溉,以解决当地人民生活用水及农田灌溉水困难的局面。

参考文献:

[1] 严文学. 甘肃省水资源及水能资源开发利用对策[J]. 甘肃水利水电技术, 2006(4): 362-363. (YAN Wenxue. Development and utilization of water resources and water resources in Gansu Province[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2006(4): 362-363. (in Chinese))

[2] 华坚,张瑶瑶,王丹,等. 西北五省水资源消耗对经济增长的影响[J]. 水利经济,2018,36(4):1-6. (HUA Jian,ZHANG Yaoyao,WANG Dan,et al. Effect of consumption of water resources on economic growth of five provinces in Northwest China[J]. Journal of Economics of Water Resources,2018,36(4):1-6. (in Chinese))

[3] 栗晓玲,梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护, 2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))

[4] 柯浩成,牛最荣,王启优. 甘肃省苦咸水淡化利用现状及淡化技术初探[J]. 地下水, 2015, 37(3): 42-44. (KE Haocheng, NIU Zuirong, WANG Qiyu. A preliminary study on the status and desalination technology of brackish water desalination in Gansu Province[J]. Underground Water, 2015, 37(3): 42-44. (in Chinese))

[6] 俄有浩,严平,李文赞,等. 中国内陆干旱、半干旱区苦咸水分布特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 565-573. (E Youhao, YAN Ping, LI Wenzan, et al. Characteristics of brackish water distribution in arid and semi-arid regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 565-573. (in Chinese))

[6] 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): 995-1002. (WANG Shuanghe, HU Xinglin, LAN Yongchao, et al. Study on the temporal and spatial distribution of brackish water resources in Gansu Province[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 995-1002. (in Chinese))

[7] 罗从双. 祖厉河流域水-土盐化及苦咸水淡化研究[D]. 兰州:兰州大学, 2010.

[8] 杜景壮. 关于民勤湖区群众贫困问题的调查报告[J]. 甘肃农业, 2002(10): 20-23. (DU Jingzhuang. An investigation report on the poverty of the Masses in the Minqin Lake District[J]. Gansu Agriculture, 2002(10): 20-23. (in Chinese))

[9] 宋冬梅,肖笃宁,张志诚,等. 石羊河下游民勤绿洲生态安全时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(3): 335-342. (SONG Dongmei, XIAO Duning, ZHANG Zhicheng, et al. Analysis on the spatial and temporal change of ecological security in the Minqin Oasis of the Lower Shiyang River[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(3): 335-342. (in Chinese))

[10] KOTZER E. Artificial kidneys for the soil: solving the problem of salinization of the soil and underground water [J]. Desalination,2005,185(1/2/3): 71-77.

[11] 杨静,杨明欣,董宝娣,等. 咸水灌溉下土壤水盐动态和作物生长研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 976-981. (YANG Jing, YANG Mingxin, DONG Baodi, et al. Research progress in soil water/salt dynamics and crop growth under saline water irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 976-981. (in Chinese))

[12] 蒋静. 咸水灌溉对作物及土壤水盐环境影响研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2015.

[13] 王筱萍. 甘肃省非常水资源开发利用现状及前景分析[J]. 地下水, 2017, 39(2): 40-41. (WANG Xiaoping. Analysis of

status and prospects of development and utilization of extreme water resources in Gansu Province[J]. *Underground Water*, 2017, 39(2): 40-41. (in Chinese))

[14] 逢焕成, 杨劲松, 严惠峻. 微咸水灌溉对土壤盐分和作物产量影响研究[J]. *植物营与肥料学报*, 2004, 10(6): 599-603. (FENG Huancheng, YANG Jinsong, YAN Huijun. Effects of brackish water irrigation on soil salt and crop yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2004, 10(6): 599-603. (in Chinese))

[15] RAJAK D, MANJUNATHA M V, RAJKUMAR G R, et al. Comparative effects of drip and furrow irrigation on the yield and water productivity of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in a saline and waterlogged vertisol[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 83(1/2): 30-36.

[16] FLORES A M, SHUKLA M K, DANIEL D, et al. Evapotranspiration changes with irrigation using saline groundwater and RO concentrate[J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 131: 35-45.

[17] 邹川玲, 刘淑静, 张拂坤. 基于能值理论的海水淡化系统对比分析[J]. *水利经济*, 2018, 36(2): 24-27. (ZOU Chuanling, LIU Shujing, ZHANG Fukun. Comparative analysis of sea water desalination systems based on energy theory[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2018, 36(2): 24-27. (in Chinese))

[18] MAHDAVI M, MAHVI A H, NASSERI S, et al. Application of freezing to the desalination of saline water[J]. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 2011, 36(7): 1171-1177.

[19] SHIRAI Y, WAKISAKA M, MIYAWAKI O, et al. Conditions of producing an ice layer with high purity for freeze wastewater treatment[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 38(3): 297-308.

[20] 史培军, 哈斯, 袁艺, 等. 渤海海冰作为淡水资源: 脱盐机理与可利用价值[J]. *自然资源学报*, 2002(3): 353-360. (SHI Peijun, HA Si, YUAN Yi, et al. Bohai sea ice as a fresh water resource: desalination mechanism and available value[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002(3): 353-360. (in Chinese))

[21] WILLIAMS P M, AHMAD M, CONNOLLY B S. Freeze desalination: an assessment of an ice maker machine for desalting brines[J]. *Desalination*, 2013, 308(6): 219-224.

[22] 王双合, 罗从双, 陈颂平, 等. 苦咸水冷冻淡化试验成果分析及实用方法研究[J]. *水资源保护*, 2009, 25(1): 70-73. (WANG Shuanghe, LUO Congshuang, CHEN Songping, et al. Experiment of freezing and desalting brackish water and its application[J]. *Water Resources Protection*, 2009, 25(1): 70-73. (in Chinese))

[23] 郭永杰, 崔云玲, 吕晓东, 等. 国内外微咸水利用现状及利用途径[J]. *甘肃农业科技*, 2003(8): 3-5. (GUO Yongjie, CUI Yunling, LYU Xiaodong, et al. Utilization status and utilization of brackish water at home and abroad[J]. *Gansu Agriculture Science and Technology*, 2003(8): 3-5. (in Chinese))

[24] 杨晖, 李恒松, 张思健, 等. 基于冷冻过程的海水脱盐研究[J]. *水处理技术*, 2016, 42(7): 57-61. (YANG Hui, LI Hengsong, ZHANG Sijian, et al. Desalination of seawater based on freezing process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(7): 57-61. (in Chinese))

[25] 顾泽平, 孙水裕, 肖华花. Fenton 试剂处理选矿废水的试验研究[J]. *水资源保护*, 2006, 22(4): 82-84. (GU Zeping, SUN Shuiyu, XIAO Huahua. Experimental study on treatment of benbficiation wastewater by Fenton reagent[J]. *Water Resources Protection*, 2006, 22(4): 82-84. (in Chinese))

[26] 卢吉平. 甘肃农村饮水从“水窖”走向“水厂”[N]. *甘肃日报*, 2011-07-25 (5).

[27] MAHDAVI M, NASSERI S, MAHVI A H, et al. Desalination of synthetic brackish and saline water by freezing technology[J]. *Journal of Environmental Studies*, 2013, 39: 1-3.

(收稿日期: 2019-01-08 编辑: 刘晓艳)