

Study on Water Quality Characteristics and Adjusting Target for Reverse Osmosis Desalination

Haibin Liu

Research and Development Institute, Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., LTD., Shanghai
Email: 842226394@qq.com

Received: May 21st, 2019; accepted: June 5th, 2019; published: June 12th, 2019

Abstract

The water quality of primary reverse osmosis and secondary reverse osmosis water of seawater desalination is analyzed. The results show that the characteristics of fresh water quality are: TDS is less than 500 mg/L, Ca^{2+} , Mg^{2+} concentrations are all less than 1 mg/L. The total hardness and basicity are less than 5 mg/L (in CaCO_3). Compared with drinking natural mineral water, the total hardness, total basicity, Ca^{2+} concentration and Mg^{2+} concentration of desalination water are all lower, which affects the drinking taste and may cause corrosion of pipe network and seawater desalination equipment, so it should be adjusted and tempered. According to the characteristic analysis of drinking mineral water quality, it is suggested that the remineralization target should be: total hardness and total basicity are 50 - 200 mg/L and 30 - 200 mg/L (in CaCO_3), Ca^{2+} concentration is 10 - 40 mg/L, Mg^{2+} concentration is 5 - 20 mg/L, respectively. Based on the analysis of the above water quality characteristics, and referring to the standards of drinking water at home and abroad, the final decision of the recommended regulation is made. Quality objectives: total hardness is 50 - 200 mg/L (in CaCO_3), total basicity is 30 - 150 mg/L (in CaCO_3), Ca^{2+} concentration is 10 - 50 mg/L and Mg^{2+} concentration is 5 - 20 mg/L.

Keywords

Reverse Osmosis Desalination Water, Remineralization, Tap-Water, Mineral Water

反渗透淡化水水质特征及调质目标研究

刘海兵

沪东中华造船(集团)有限公司, 上海
Email: 842226394@qq.com

收稿日期: 2019年5月21日; 录用日期: 2019年6月5日; 发布日期: 2019年6月12日

摘要

对海水淡化的一级反渗透和二级反渗透产水进行水质分析,结果表明所产淡水水质特征为: TDS小于500 mg/L, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度均小于1 mg/L, 总硬度和总碱度均小于5 mg/L (以 CaCO_3 计)。与饮用天然矿泉水相比, 反渗透淡化水的总硬度、总碱度及 Ca^{2+} 浓度、 Mg^{2+} 浓度均较低, 影响饮用口感, 并可能会造成管路和海水设备腐蚀, 故应对其进行调质。根据饮用矿泉水水质特征分析, 建议调质目标: 总硬度和总碱度分别为50~200 mg/L和30~200 mg/L (以 CaCO_3 计), Ca^{2+} 浓度为10~40 mg/L, Mg^{2+} 浓度为5~20 mg/L。结合以上水质特征分析比较, 并参考国内外相关饮用水的标准, 最终确定推荐调质目标为: 总硬度50~200 mg/L (以 CaCO_3 计), 总碱度为30~150 mg/L (以 CaCO_3 计), Ca^{2+} 浓度为10~50 mg/L, Mg^{2+} 浓度为5~20 mg/L。

关键词

反渗透淡化水, 再矿化, 城市自来水, 矿泉水

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 淡化水存在的问题

我国拥有 300 多万平方千米的海域面积, 约占国土面积的 1/3。船舶远行过程中每天都要消耗大量的淡水, 因此, 海水淡化成为了解决船舶淡水问题的一种有效方法。反渗透是 20 世纪 60 年代发展起来的以压力为驱动膜分离技术, 现已超过热法成为主流的海水淡化技术[1]。在全世界海水淡化装置中约有 30% 用反渗透方式来实现, 反渗透膜对高价离子及复杂单价离子的脱盐率可以超过 99%, 对单价离子的脱盐率稍低, 但也超过了 98%。反渗透技术在外加压力的作用下, 使水溶附中的某些成分选择性地通过, 从而达到淡化、净化或浓缩分离的目的。较之于传统蒸馏法, 反渗透具有以下优点: 1) 过程无相变; 2) 占地面积省; 3) 能耗低, 单级 RO 装置制淡单位能耗为蒸馏装置的 1/2; 4) 浓水外排压力高, 在水线下工作时, 无需高压泵就可以克服水深压力而直接实现浓水外排; 5) 操作简单, 自动化程度高[2]。

虽然反渗透海水淡化技术能去除海水中大部分的细菌、无机盐、悬浮物和矿物质盐类等, 所产水具有水质纯净, 符合《生活饮用水水质标准》(GB 5749-2006)的水质要求, 但反渗透对海水中各组分离子不是等比例地脱除, 对二价离子如钙、镁、硫酸根等的截留率较一价离子高, 且由于反渗透膜对 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子态物质截留率高导致淡化水的缓冲能力相对较弱。相比于天然饮用水, 反渗透淡化水水质存在以下特征: 1) 淡化水的 TDS 仅为 20~500 mg/L; 2) 总碱度较低, 水的 pH 不稳定; 3) 总硬度较低, 水中钙、镁等二价离子含量偏低; 4) 饮用水口感不好而且有苦咸味, 在洗涤时存在触感差的问题[3]; 5) 由于水中溶解了少量 CO_2 , 导致淡化水具有轻微腐蚀性和偏酸性等特点, 且 Ca^{2+} 浓度、 Mg^{2+} 浓度较低, 管路内 CaCO_3 挂膜较少, 可能会造成管路、附件和海水设备腐蚀。Levin 等[4]分别对西伯利亚南部的四个城市(A, B, C, D) 20~49 岁的女性健康状况开展了调查, 其中 A、B、C、D 四座城市水中钙镁离子的含量分别为: A: 3.0 mg/L 钙、2.4 mg/L 镁; B: 18.0 mg/L 钙、5.0 mg/L 镁; C: 22.0 mg/L 钙、11.3 mg/L 镁; D: 45.0 mg/L 钙、26.2 mg/L 镁。研究发现, 相对于 C 和 D 城市, A 和 B 城市的女性更偏向于患心血管疾病、高血压、头痛、骨质疏松症。有研究者[5]用大鼠进行实验, 在确保大鼠营养与盐摄入充分的情况

下分别给其喂食含钙 5 mg/L、25 mg/L、50 mg/L 的淡化水，喂食 5 mg/L 钙含量的大鼠表现出了甲状腺与其他相关功能衰退现象。

因此需要对反渗透淡化水进行水质调节，目的在于提高淡化水的碱度及硬度。通过提高淡化水的碱度，可以有效增强淡化水的稳定性；通过提高淡化水的硬度，使淡化水中钙、镁离子增加，提高饮用安全性。将淡化水的水质调质至城市自来水和饮用天然矿泉水的水质范围内，使淡化水能像自来水和饮用天然矿泉水一样能够达到较好的洗涤及饮用效果。此外，应参考国内外水质标准使其进一步优化，将一些必要的指标，如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度列入调质目标中。世界卫生组织提出的饮用水中含有的能引起用户不满的物质和中国《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335-92)对相关指标的建议值都是重要参考。

2. 材料与方 法

2.1. 淡化水、自来水与矿泉水样

选取的淡化水水样为船用 20 t/d 反渗透海水淡化装置生产的一级反渗透产水、二级反渗透产水，进水 TDS 为 35,000 mg/L、进水温度 39.2℃、操作压力为 4.2 MPa，产水水质如表 1 所示；自来水水样来自我国 8 个不同地区；矿泉水水样为 19 种牌子的饮用天然矿泉水，对每种牌子的天然矿泉水进行水质检测。

Table 1. Analysis of desalination water quality

表 1. 淡化水水质分析

编号	测试项目	单位	海水	一级产水	二级产水	标准	是否达标
1	铜	μg/L	245	未检出	未检出	1000	是
2	锌	μg/L	122	未检出	5	1000	是
3	钠	mg/L	9830	76	17.4	200	是
4	钙	mg/L	368	0.55	0.38	/	是
5	镁	mg/L	1170	0.10	0.09	/	是
6	氟化物	mg/L	1.02	未检出	未检出	1	是
7	氯化物	mg/L	19700	101	26.5	250	是
8	硫酸盐	mg/L	2860	0.83	0.49	250	是
9	溶解性总固体	mg/L	40700	218	74	1000	是
10	总硬度(以 CaCO_3 计)	mg/L	7410	3.6	3.0	450	是
11	pH		8.00	6.70	8.21	6.5~8.5	是
12	钾	mg/L	/	9.7	1.2	/	
13	总碱度(以 CaCO_3 计)	mg/L		4.84	2.01	/	

2.2. 方法

根据《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)，选取 14 项水质指标，采用 GB5750 检测方法进行检测。

3. 不同类别水质特征分析

3.1. 淡化水水质分析

表 1 是海水经过反渗透处理所产淡化水水质分析。表中所示海水、一级反渗透产水和二级反渗透产

水的 13 项水质指标分析结果。从表中可以看出, 经过一级反渗透后, 淡化产水其他水质指标都符合国家饮用水水质标准。对于海水中含量较高的氯化物、钠盐、硫酸盐等离子, 脱除率可达 99% 以上。

经过二级反渗透处理后, 产水中溶解性总固体(TDS)的浓度进一步降低, 仅为 74 mg/L, 水质指标都符合国家饮用水水质标准。经过一级和二级反渗透处理之后, pH 值在 6.5~8.5 范围之间; 一级反渗透产水的 TDS 浓度为 218 mg/L, 二级反渗透产水的 TDS 浓度为 74 mg/L, 均在 500 mg/L 以下; 且反渗透膜对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的去除率很高(分别为 99.95% 和 99.96%), 产水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度均小于 1 mg/L, 总硬度和总碱度均小于 5 mg/L (以 CaCO_3 计)。与饮用天然矿泉水相比, 淡化水的碱度、硬度及钙镁离子浓度均较低, 需进行调质才更符合人们的饮用要求。

3.2. 矿泉水水质特征分析

由于饮用天然矿泉水有很多优点, 受到人们的欢迎。因此通过对饮用天然矿泉水检测分析, 总结矿泉水的水质特点, 对淡化水水质调节具有指导作用。矿泉水根据所处的地层、岩石种类的不同而不同因此对市售主流品牌 19 种饮用天然矿泉水进行检测分析, 结果如图 1~5 可知, 所检测的饮用天然矿泉水水质指标波动范围较大。

图 1 是饮用天然矿泉水钙离子浓度检测结果。从图中可以看出, 19 种调查的市售天然矿泉水牌子中, Ca^{2+} 浓度波动范围在 0~60 mg/L, 其中品牌 1 中钙离子浓度为 0.237 mg/L, 几乎为 0。钙离子浓度在 2~15 mg/L 范围的有 9 种, 比例为 30%。钙离子浓度在 25~50 mg/L 范围的有 7 种, 所占比例为 23.3%。钙离子浓度高于 50 mg/L 的有 2 种, 品牌 18 和品牌 19 的钙离子浓度分别为 50.84 mg/L 和 57.63 mg/L。可见不同品牌的矿泉水中所含的钙离子浓度也相差很多。

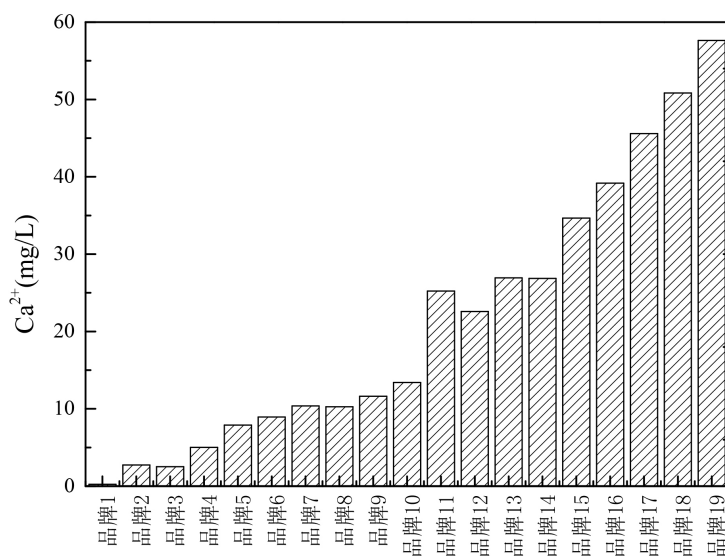


Figure 1. Calcium concentration range for drinking natural mineral water

图 1. 饮用天然矿泉水钙浓度范围

图 2 是饮用天然矿泉水镁离子浓度检测结果。从图中可以看出, 19 种调查的市售天然矿泉水牌子中, Mg^{2+} 浓度波动范围 0~20 mg/L, 其中品牌 3 矿泉水中镁离子浓度为 0.584 mg/L, 而品牌 15 矿泉水中镁离子浓度为 18.72, 两种饮用天然矿泉水牌子中镁离子浓度相差 18.136 mg/L。镁离子浓度在 1~10 mg/L 范围的有 15 种, 所占比例为 78.9%。镁离子浓度高于 15 mg/L 的有 3 种, 分别为品牌 16、品牌 19 和品牌 15, 所占比例为 15.8%。

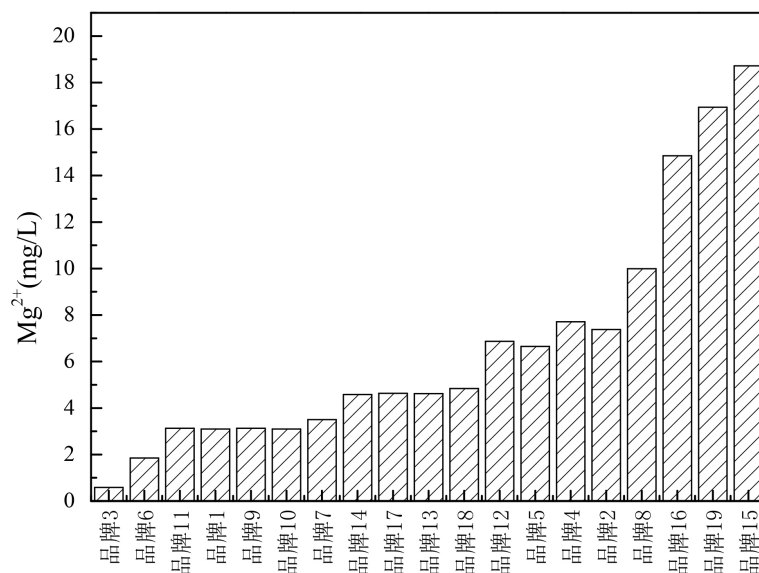


Figure 2. Magnesium concentration range for drinking natural mineral water
图 2. 饮用天然矿泉水镁浓度范围

图 3 和图 4 是饮用天然矿泉水总硬度和总碱度的检测结果。从图中可以看出，品牌 3 是 19 种天然矿泉水中总硬度和总碱度最低的一种，其总硬度和总碱度分别为 28.39 mg/L 和 19.01 mg/L。而品牌 19 是 19 种天然矿泉水中总硬度和总碱度最高的一种，其总硬度和总碱度分别为 346.16 mg/L 和 158.3 mg/L。19 种调查的市售天然矿泉水中，总硬度和总碱度最大差值为 317.77 mg/L 和 139.29 mg/L。19 种天然矿泉水中总硬度在 50~200 mg/L 范围内有 13 种，所占比例为 68.4%，19 种天然矿泉水中总硬度高于 200 mg/L 有 4 种，品牌 18、品牌 16、品牌 15 和品牌 19 的总硬度分别为 212.94 mg/L、242.42 mg/L、260.98 mg/L 和 346.16 mg/L。19 种天然矿泉水中总碱度相同的有 2 种，分别为品牌 3 和品牌 6。19 种天然矿泉水中总碱度在 30~100 mg/L 范围内有 13 种，所占比例为 68.4%。

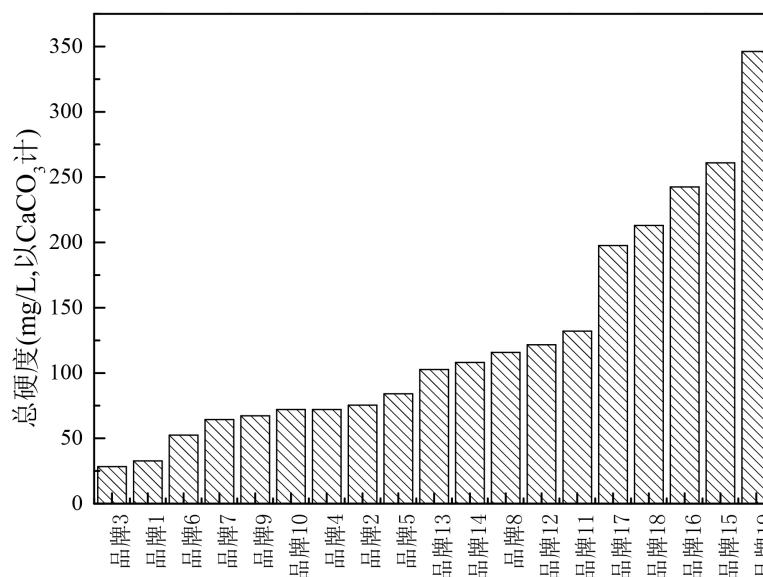


Figure 3. Total hardness concentration range for drinking natural mineral water
图 3. 饮用天然矿泉水总硬度浓度范围

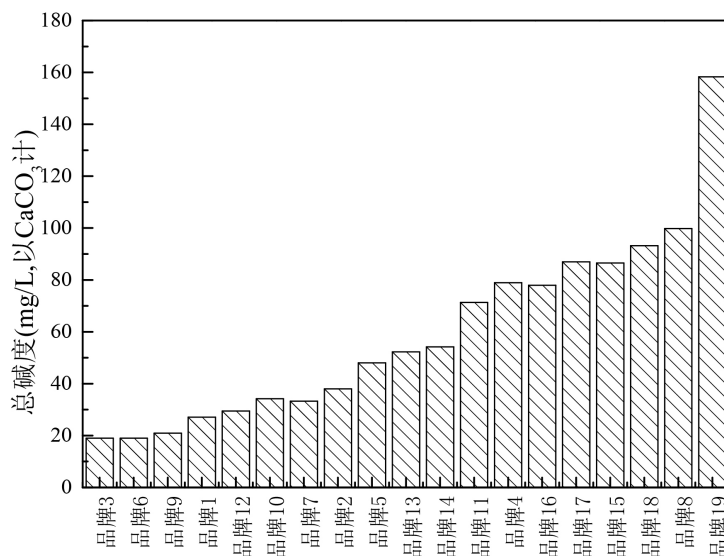


Figure 4. Total alkalinity concentration range for drinking natural mineral water
图 4. 饮用天然矿泉水总碱度浓度范围

图 5 是饮用天然矿泉水 pH 值检测结果。从图中可以看出，19 种调查的市售天然矿泉水中，pH 值近于 7.0~8.5 范围的有 16 种矿泉水，比例为 84.2%。pH 值低于 7.0 的有 5 种矿泉水，品牌 12 的 pH 值为 6.01，品牌 3 的 pH 值为 6.16，品牌 4 的 pH 值为 6.49，品牌 9 的 pH 值为 6.45 以及品牌 7 的 pH 值为 6.79，这 5 种天然矿泉水的 pH 值呈弱酸性。19 种调查的市售天然矿泉水中 pH 值高于 8 的有 1 种，品牌 8 的 pH 值为 8.16，偏碱性。19 种调查的市售天然矿泉水中 pH 最大差值为 2.15。

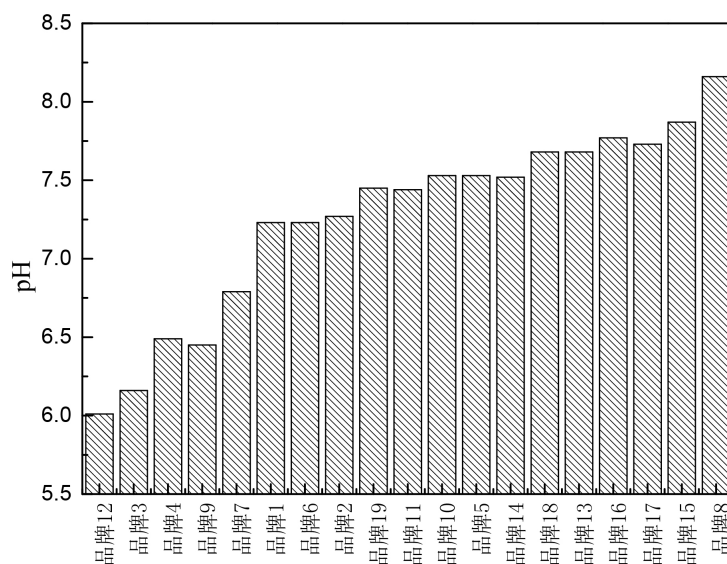


Figure 5. pH range for drinking natural mineral water
图 5. 饮用天然矿泉水 pH 范围

不同品牌市售矿泉水水质指标相差较大，总硬度为 28~346 mg/L (以 CaCO₃ 计)，多为 50~100 mg/L (以 CaCO₃ 计)；总碱度为 19~158 mg/L (以 CaCO₃ 计)，多为 40~80 mg/L (以 CaCO₃ 计)；Ca²⁺含量为 0.2~57 mg/L，多为 10~20 mg/L；Mg²⁺含量为 0.6~18 mg/L，多为 2~6 mg/L；市售饮用天然矿泉水 pH 多为弱碱性，为

7.0~8.0, 少数呈弱酸性。

淡化水的水质若参照饮用天然矿泉水的水质范围进行调质。调质的目标建议值可定为:总硬度 50~200 mg/L (以 CaCO₃ 计), 总碱度 30~200 mg/L (以 CaCO₃ 计), Ca²⁺浓度 10~40 mg/L, Mg²⁺浓度 5~20 mg/L。

3.3. 淡化水推荐水质标准

将不同淡水的水质和相关标准对 Ca²⁺、Mg²⁺、总硬度和总碱度(以 CaCO₃ 计)的浓度范围统计为表 2。

Table 2. Analysis and comparison of different water quality

表 2. 不同水质分析比较

序号	水质	Ca ²⁺ 浓度 (mg/L)	Mg ²⁺ 浓度 (mg/L)	总硬度 (mg/L, 以 CaCO ₃ 计)	总碱度 (mg/L, 以 CaCO ₃ 计)
1	淡化水	≤1	≤1	≤5	≤5
2	饮用天然矿泉水	10~40	5~20	50~200	30~200
3	《生活饮用水水质标准》GB5749-2006	/	/	0~450	/
4	WHO《饮用水水质标准》第四版-2011	/	/	/	/
5	欧盟《饮用水水质指令》80/778/EC-1995	/	/	/	/
6	美国《饮用水水质指令》-2001-一级	/	/	/	/
7	美国《饮用水水质指令》-2001-二级	/	/	/	/
8	日本《生活饮用水水质标准》-1993	/	/	≤300	/
9	中国《低矿化度饮用水矿化卫生标准》GJB 1335-92	20~50	10~20	100~200	80~250 (换算值)
10	淡化水水质调质目标建议值	10~50	5~20	50~200	30~150

由表 2 可知,有关饮用水的水质推荐,国际上无硬性的规定,WHO《饮用水水质标准》(第四版-2011)、欧盟《饮用水水质指令》(80/778/EC-1995)、美国《饮用水水质指令》(2001-一级)和美国《饮用水水质指令》(2001-二级)对 Ca²⁺和 Mg²⁺以及总硬度(以 CaCO₃ 计)和总碱度无水质要求,日本《生活饮用水水质标准》(1993)仅对总硬度有浓度要求,范围 0~300 mg/L;而国内的《生活饮用水水质标准》(GB5749-2006)仅对总硬度有浓度要求,范围 0~450 mg/L。中国《低矿化度饮用水矿化卫生标准》(GJB 1335-92)中对低矿化度饮用水有相应的水质标准,Ca²⁺、Mg²⁺、总硬度和总碱度(以 CaCO₃ 计)的浓度范围分别为 20~50 mg/L、10~20 mg/L、100~200 mg/L 和 80~250 mg/L。

李福志等[6]对健康饮水的水质指标体系探讨中提出在安全性的前提下,健康饮水必须能够保证在长期饮用的条件下可以全面促进人体的健康。在所有的饮水中,只有天然优质饮水符合这样的条件并且得到了长期的验证,因此,在制定健康饮水的水质指标体系时,将以优质天然饮水作为参考的依据。公众健康饮用水研究所指出《健康饮水水质标准》的出现是时代发展所需。安全饮水水质标准主要考虑水中对人体有毒和有害的物质,并且主要针对的是自来水行业。健康饮水标准是建立在安全的基础上,同时强调对人体有益的物质及含量[7]。

由以上标准,再根据调查得到的城市自来水和饮用天然矿泉水的水质,建议淡化水的调质目标可以定为:总硬度 50~200 mg/L (以 CaCO₃ 计),总碱度 30~150 mg/L (以 CaCO₃ 计),Ca²⁺浓度: 10~50 mg/L, Mg²⁺浓度: 5~20 mg/L。

4. 结论

通过上述试验研究,得到以下结论:

1) 海水经过一级和二级反渗透处理之后,水质指标都符合国家饮用水水质标准。一级反渗透产水的TDS浓度为218 mg/L,二级反渗透产水的TDS浓度为74 mg/L,均在500 mg/L以下;产水中Ca²⁺、Mg²⁺浓度均小于1 mg/L,总硬度和总碱度均小于5 mg/L(以CaCO₃计)。与饮用天然矿泉水相比,淡化水的碱度、硬度及钙镁离子浓度均较低,需进行调质才健康安全,更符合人们的饮用要求。

2) 淡化水的水质若参照饮用天然矿泉水的水质范围进行调质,其调质总硬度为50~200 mg/L(以CaCO₃计),总碱度为30~200 mg/L(以CaCO₃计),Ca²⁺浓度为10~40 mg/L,Mg²⁺浓度为5~20 mg/L。

3) 根据调查得到的饮用天然矿泉水的水质,并参考国内外相关饮用水的标准,最终确定推荐调质目标:总硬度50~200 mg/L(以CaCO₃计),总碱度为30~150 mg/L(以CaCO₃计),Ca²⁺浓度为10~50 mg/L,Mg²⁺浓度为5~20 mg/L。

参考文献

- [1] Miller, J.E. (2003) Review of Water Resources and Desalination Technologies. Sandia National Labs Unlimited Release Report Sand-2003-0800. <https://doi.org/10.2172/809106>
- [2] Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., *et al.* (2009) Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges. *Water Research*, **43**, 2317-2348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.010>
- [3] 杨洋, 高学理, 李玉, 等. 海水淡化水的后处理研究[J]. 水处理技术, 2014, 40(6): 62-65.
- [4] Novikov, I., Plitman, S., Levin, A., *et al.* (1983) Hygienic Regulations on the Minimal Level of Magnesium in Drinking Water. *Gigiena i sanitariia*, No. 9, 7.
- [5] Rakhmanin, Y.A., Bonasevskaya, T. and Lestrovoy, A. (1976) Public Health Aspects of Environmental Protection. *Acad. Med. Sci. USSR, Moscow, Russian*, 68-71.
- [6] 李福志, 张晓健, 王占生. 健康饮水的水质指标体系探讨[J]. 环境与健康杂志, 2002, 19(5): 407-408.
- [7] 李复兴. 《健康饮水水质标准》制定的时代要求和科学依据(附《健康饮水水质标准》草案(讨论稿)) [C]//中国医疗保健国际交流促进会健康饮用水专业委员会. 中国饮用水行业高层论坛论文集, 2005: 179-190.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org