

# 高硬度高硫酸盐地下水深度处理试验研究\*

李静<sup>1</sup>, 吴松<sup>1</sup>, 王丽<sup>1</sup>, 张杰<sup>1</sup>, 程小龙<sup>1</sup>, 杨力<sup>2,3</sup>, 马雪姣<sup>2</sup>

(1. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆永川 402160; 2. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400716;  
3. 重庆市永川区环保局环境监测站, 重庆永川 402160)

**摘要:**针对中国西南地区岩溶地下水资源非常丰富、开发利用程度低且水资源供需矛盾又日益突出的现状,采用药剂预处理与膜技术相结合的方法探索了岩溶地下水资源化利用途径。结果表明,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和Ca(OH)<sub>2</sub>预处理+纳滤深度处理是处理高硬度高硫酸盐地下水行之有效的方法,在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub>投加量分别为780、125 mg·L<sup>-1</sup>且操作压力为0.8 MPa时,出水硬度、硫酸盐含量、溶解性总固体含量分别为40、36、193 mg·L<sup>-1</sup>,pH值为7.45,产水率为70.59%。处理后的地下水水质达到《饮用净水水质标准》(CJ 94-2005)要求,且能够满足生产实际需要。

**关键词:**高硬度;高硫酸盐;岩溶地下水;反渗透;纳滤

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2014)06-0153-06

岩溶地下水是重要的饮用水源,全球范围内大约有1/4的人口以岩溶水为饮用水源<sup>[1]</sup>;在欧洲,超过50%的饮用水由岩溶地下水供给<sup>[2]</sup>。由此可见,岩溶地下水资源不仅是岩溶地区主要的供水水源,在很多地方甚至是唯一的淡水水源<sup>[3]</sup>。中国西南地区岩溶地下水资源非常丰富,其储量约占全国储量的66%<sup>[2]</sup>,但开发利用程度较低,仅为10%左右<sup>[1,4]</sup>,造成岩溶地下水资源的极度浪费。受地质背景、岩溶作用等影响,部分岩溶地下水硬度、硫酸盐等污染物超过了饮用水标准<sup>[5-7]</sup>,使之开发利用受到一定的限制。目前,对硬度、硫酸盐的去除可采用药剂法、离子交换法和膜处理法<sup>[8]</sup>。与传统药剂法和离子交换法相比,膜技术具有去除污染物范围广,运转可靠,设备紧凑和易于控制等优点,被认为是最有前途的水处理方法之一<sup>[9]</sup>。因此,本研究采用药剂预处理与膜技术深度处理相结合方式来探寻高硬度、高硫酸盐岩溶地下水净化工艺条件,以期西南岩溶地下水资源开发利用提供依据,为缓解西南岩溶山区水资源短缺矛盾提供技术支持。

## 1 材料与方 法

### 1.1 水样采集

原水水样取自重庆市某地下水库,运回实验室后,冰箱冷藏保存,测定原水pH值、硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量。

### 1.2 试验装置

试验装置采用上海江科实验设备有限公司生产的机械反应同向流斜板斜管沉淀池+纳滤试验装置和高纯水反渗透实验设备。

### 1.3 材料与方 法

1.3.1 药剂预处理试验 1) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>预处理试验。分别进行单因素试验和正交试验。

单因素试验:A) Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>投加量对预处理的影响:取水样200 mL,分别投加Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 0、200、400、500、600、700、800、1 000 mg·L<sup>-1</sup>,用NaOH调节水样pH值为11,在25℃下以慢速(60 r·min<sup>-1</sup>,下同)搅拌1 min,快速(250 r·min<sup>-1</sup>,下同)搅拌2 min,再慢速搅拌20 min,静置沉淀0.5 h,测定滤液硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量,各处理重复3次(下同)。B) pH值对预处理的影响:取水样200 mL,在前期较优的Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>投加量下,

\* 收稿日期:2014-05-09 修回日期:2014-07-15 网络出版时间:2014-11-19 21:49

资助项目:重庆市北碚区科委科技计划重点项目(No. 2011-24/2011);重庆水利电力职业技术学院院级科研重大项目(No. K201209/2012)

作者简介:李静,男,教授,博士,研究方向为环境科学与工程, E-mail:46601128@qq.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20141119.2149.031.html>

用 NaOH 或 HCl 调节水样 pH 值分别为 4、5、6、7、8、9、10、11, 在前述条件下搅拌、沉淀、过滤和测定。C) 温度对预处理的影响: 取水样 200 mL, 在前期较优的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量和 pH 值下, 调节温度分别为 5、10、15、20、25、30、35  $^\circ\text{C}$ , 在前述条件下搅拌、沉淀、过滤和测定。D) 搅拌时间对预处理的影响: 取水样 200 mL, 在前期较优的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量、pH 值和温度下, 先搅拌, 然后分别慢速搅拌 0、20、30、40、50、60、80、100 min, 再沉淀、过滤、测定。E) 沉淀时间对预处理的影响: 取水样 200 mL, 在前期较优的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量、pH 值、温度和搅拌时间下处理试样, 然后分别静置沉淀 0、0.25、0.5、1、2、3、4、5 h, 过滤、测定。

正交试验: 采用五因素四水平正交试验( $L_{16}(4^5)$ )以确定最佳处理条件(表 1), 试验方法同上。

2)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  预处理试验。取水样 200 mL,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量分别为 780、880、980、1 080、1 180、1 280  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 慢速搅拌 1 min, 然后加入 170  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 快速搅拌 2 min, 后慢速搅拌 20 min, 静置沉淀 2 h 后, 测定滤液硬度和硫酸盐含量。在上述较优的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量下, 分别投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  为 125、140、155、170、185、200  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 按上述方法搅拌、沉淀, 测定滤液硬度和硫酸盐含量。

3)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 NaOH 预处理试验。取水样 200 mL,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量分别为 0、200、400、600、800、900、1 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以慢速搅拌 1 min, 再加入 183  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  NaOH, 按前述方法搅拌、沉淀, 测定滤液硬度和硫酸盐含量。在上述较优的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量下, 分别投加 NaOH 0、25、50、100、150、200、250  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 按上述方法搅拌、沉淀, 测定滤液硬度和硫酸盐含量。

1.3.2 预处理 + 纳滤和反渗透深度处理试验 选用上述药剂预处理试验中除硬效果较好的投加量, 采用  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  预处理、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  预处理与纳滤组合,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和 NaOH 预处理与反渗透组合, 分别组成深度处理小试试验, 考察不同操作压力对原水的净化效果, 从中筛选经济可行的地下水除硬脱盐处理方法。

#### 1.4 测定方法

pH 值、硬度和溶解性总固体采用国家标准方法 GB/T 5750.4-2006 中的方法进行, 其中地下水 pH 值采用玻璃电极法测定, 硬度采用乙二胺四乙酸二钠滴定法测定, 溶解性总固体含量采用称量法测定。硫酸盐含量采用国家标准方法 GB/T 5750.5-2006 中的硫酸钡比浊法测定, 菌落总数采用国家标准方法 GB/T 5750.12-2006 中的平皿计数法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原水水质现状

调查发现, 该地下水原水硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量、菌落总数超过了《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006); 如直接饮用, 会对人体健康产生不良影响(表 2)。因此需要对该地下水进行处理, 降低硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量, 才能作为生活饮用水使用。

### 2.2 药剂预处理对除硬脱盐的影响

#### 2.2.1 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 预处理对除硬脱盐的影响

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  主要与  $\text{Ca}^{2+}$  结合形成  $\text{CaCO}_3$  沉淀而去除,

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  暂时性硬度需要在 pH 值为 10.0 左右才能形成沉淀而得以去除<sup>[10]</sup>, 而  $\text{MgCO}_3$  的溶解度较大, 只有当 pH 值在 11.3 左右才能形成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉淀而去除<sup>[11]</sup>。从图 1 可以看出, 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量的增加, 硬度先下降很快, 当投加量达到 600  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  后趋于平缓。pH 值对原水硬度的影响也非常明显, 随着 pH 值不断提高, 原水硬度逐渐降低, 在原水 pH 值达到 10 左右时趋于平缓, 并能达标。温度是沉淀反应的重要因素, 过高或过低都会影响沉淀的效果<sup>[12]</sup>, 试验显示, 在 25  $^\circ\text{C}$  时对硬度的去除效果最好。从沉淀时间来看, 随着沉淀时间的

表 1  $L_{16}(4^5)$  的正交试验因子水平设计

水平	因素				
	A	B	C	D	E
1	500	9	20	20	38
2	550	9.5	23	30	40
3	600	10	25	40	42
4	650	11	27	50	44

注: 因素 A~E 分别为  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  含量(单位:  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )、pH 值、温度(单位:  $^\circ\text{C}$ )、沉淀时间(单位: min)、搅拌时间(单位: min); 下同。

表 2 原水水质与《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)相关标准的比较

	pH 值	硬度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	硫酸盐含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	溶解性总固体含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	菌落总数/ (个 $\cdot \text{L}^{-1}$ )
原水水质	7.4	1 100.0	938.0	1 440.0	328
生活饮用水水质标准	6.5~8.5	450	250	1 000	100

增加,水中硬度先急剧降低,然后在 0.5 h 后沉淀溶解达到平衡状态。搅拌时间对原水硬度也有影响,原水硬度随着搅拌时间的增加而逐渐降低,在 40 min 时硬度降至最低,继续搅拌则引起已形成的大絮凝体破碎,絮凝体沉降减少,导致原水硬度增加。图 1 还显示,5 种处理对硫酸盐和溶解性总固体的含量影响较小,故在正交试验中只讨论对硬度的影响。

由正交试验极差  $R$  值分析可知(表 3),pH 值(B)是影响硬度的最重要因素,其次是  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (A),再次是温度(C),沉淀时间(D)和搅拌时间(E)对硬度影响较小,因而,影响硬度的主次关系为: $B > A > C > E > D$ 。进一步的方差分析显示(表 4),pH 值和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量对硬度的影响达极显著水平( $p < 0.01$ ),温度对硬度的影响达显著水平,而沉淀时间和搅拌时间对硬度的影响不显著。结合新复极差多重比较和出水能否达标,并考虑节约成本,确定  $A_4B_1C_3D_1E_1$  为去除硬度的最适宜水平组合,即  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  为  $650 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH 值为 11、温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、沉淀时间为 20 min、搅拌时间为 38 min;此时硬度能够达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)要求。

表 3 正交试验结果的直观分析

水平	因素					硬度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	570
2	1	2	2	2	2	550
3	1	3	3	3	3	445
4	1	4	4	4	4	330
5	2	1	2	3	4	545
6	2	2	1	4	3	538
7	2	3	4	1	2	420
8	2	4	3	2	1	290
9	3	1	3	4	2	505
10	3	2	4	3	1	475
11	3	3	1	2	4	395
12	3	4	2	1	3	279
13	4	1	4	2	3	495
14	4	2	3	1	4	469
15	4	3	2	4	1	378
16	4	4	1	3	2	275
$k_i$	474	529	470	435	428	
$k_{ii}$	448	508	412	433	445	
$k_{iii}$	414	410	427	435	439	
$k_{iiii}$	404	294	430	438	435	
$R$	70	235	58	5	17	

注: $k_i \sim k_{iiii}$ 表示 5 个因素在水平 1~4 时的平均硬度(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), $R$  表示极差。

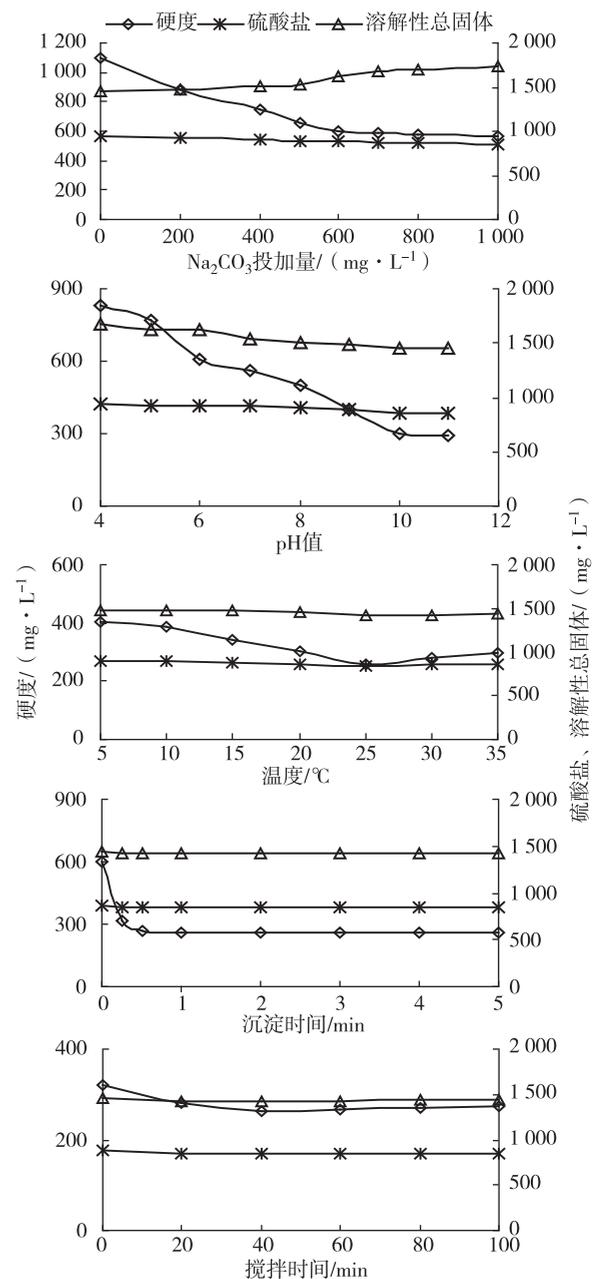


图 1  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  投加量、pH、温度、沉淀时间和搅拌时间对除硬脱盐的影响

表 4 正交试验结果的方差分析

变异来源	平方和 SS	自由度 df	均方 MS	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
A	12 340	3	4 113	220 **	9.28	29.5
B	139 162	3	46 387	2 477 **		
C	737	3	246	13 *		
D	56	3	19	1		
E	280	3	93	5		
误差	56	3	19			
总变异	152 575	15				

注:\* 表示因素影响显著( $p < 0.05$ ); \*\* 表示因素影响极显著( $p < 0.01$ )。

2.2.2  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量对除硬脱盐的影响 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量的增加(图 2), 水体硬度先降低后增高, 特别是随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量的进一步增加, 硬度增加很明显, 可能是未反应的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  直接导致硬度增加。从节约成本角度来看, 在两者投加量分别为  $780$ 、 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水硬度已分别降为  $374$ 、 $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 能够达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 要求。而水体中硫酸盐含量仅有小幅度降低, 最高去除率分别为  $13.16\%$ 、 $11.17\%$ , 此时硫酸盐含量分别为  $867$ 、 $887 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 未达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 要求。鉴于硫酸盐去除率较低, 因而以硬度指标确定两者投加量, 故考虑  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量分别为  $780$ 、 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.2.3  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  投加量对除硬脱盐的影响 从图 3 来看, 随着  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  投加量的增加, 水体硬度成直线下降, 在投加量分别为  $600$ 、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 水体硬度分别降为  $324$ 、 $383 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 达到《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 要求。而硫酸盐含量先降低然后上升, 但去除率较低, 含量远未达标, 故考虑  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  投加量分别为  $600$ 、 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从预处理效果上来看, 出水硬度均能够达标, 但硫酸盐去除率都较低, 不能达标。因此需要进一步的深度处理, 才能满足《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 要求。

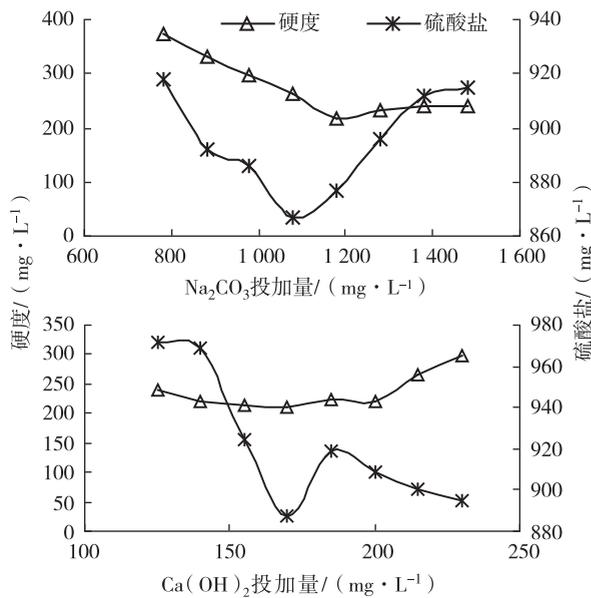


图 2  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  投加量对硬度和硫酸盐含量的影响

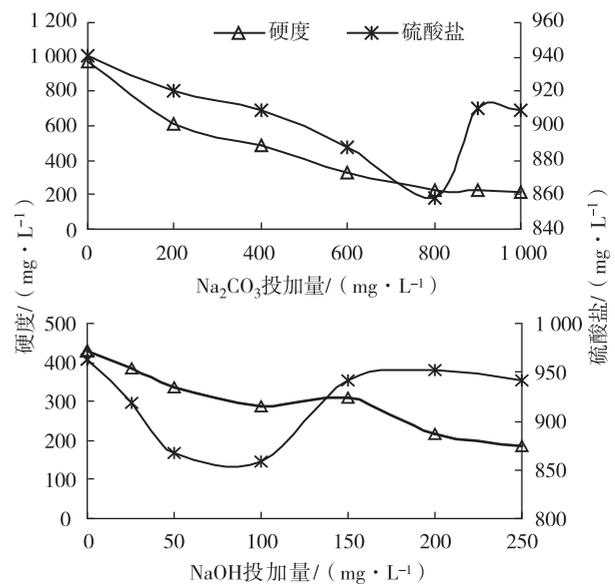


图 3  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  投加量对硬度和硫酸盐含量的影响

## 2.3 药剂预处理+纳滤或反渗透深度处理效果

2.3.1  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  预处理+纳滤深度处理对水质的影响 出水硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量随着操作压力的增加而增加(图 4), 说明压力增大, 会导致  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  等离子透过纳滤膜而进入到净水中, 但它们的含量都较低, 硬度、硫酸盐含量能够达到《饮用净水水质标准》(CJ94-2005) 要求, 而溶解性总固体达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006) 要求。刘玉荣等人<sup>[13]</sup> 的研究表明, 操作压力对透过液通量和透盐率影响很明显: 操作压力太低, 则通量太小; 操作压力增高, 则通量增大, 而透盐率低时易造成膜污染而影响膜的寿命。故对纳滤膜而言, 操作压力定在  $0.8 \text{ MPa}$  为宜。在此操作压力下, 纳滤深度处理出水的硬度为  $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 硫酸盐含量为  $64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 溶解性总固体含量为  $530 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH}$  为  $7.34$ , 产水率为  $81.9\%$ , 能够满足生产实际需要。

2.3.2  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  预处理+纳滤深度处理对水质的影响  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  预处理+纳滤深度处理出水硬度、硫酸盐和溶解性总固体的含量表现出与  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  预处理+纳滤深度处理较为一致的趋势(图 5), 出水浓度都能达到《饮用净水水质标准》(CJ94-2005) 要求。在  $0.8 \text{ MPa}$  条件下, 纳滤出水硬度、硫酸盐含量、溶解性总固体含量分别为  $40$ 、 $36$ 、 $193 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{pH}$  为  $7.45$ , 产水率为  $70.59\%$ , 能够满足生产实际需要。

2.3.3  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  预处理+反渗透深度处理对水质的影响 从表 5 可见, 原水经过  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaOH}$  预处理、然后进入反渗透装置进行深度处理后, 净水硬度和硫酸盐含量分别在  $7$ 、 $11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 硬度和硫酸盐的去除率高达  $99.5\%$  以上; 且随着操作压力增大, 净水产水率呈上升趋势。在操作压力为  $0.3 \text{ MPa}$  时, 产水率为  $25\%$ 。然而, 由于本实验选取的反渗透装置较小, 进一步增加操作压力有一定的难度, 故没有探索  $0.3 \text{ MPa}$  以

上操作压力的情况,无法确定高压时除硬脱盐和产水率的影响。

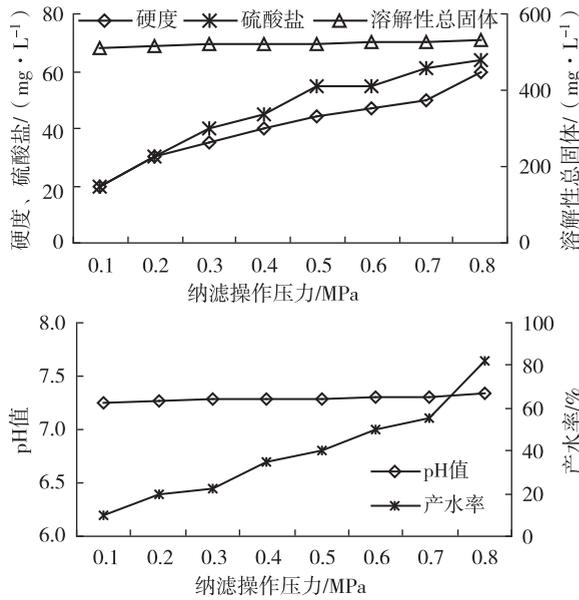


图 4 纳滤操作压力对除硬脱盐、pH 值和产水率的影响(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 预处理)

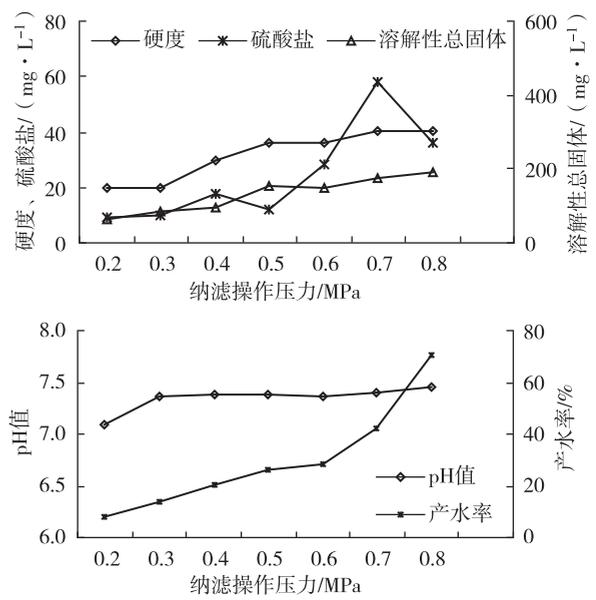


图 5 纳滤操作压力对除硬脱盐、pH 值和产水率的影响(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 Ca(OH)<sub>2</sub> 预处理)

比较 3 种深度处理方法后可见,反渗透的产水率较低,运行不够经济。而 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 预处理+纳滤深度处理虽然成本较低,但溶解性总固体只能达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)要求。故 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 Ca(OH)<sub>2</sub> 预处理+纳滤深度处理是处理高硬度高硫酸盐地下水行之有效的办法,出水能够达到《饮用净水水质标准》(CJ94-2005)要求,且能够满足生产实际需要。

表 5 反渗透处理对水质的影响

操作压力/MPa	硬度/(mg·L <sup>-1</sup> )	硫酸盐含量/(mg·L <sup>-1</sup> )	产水率/%
0.15	0	5	10
0.2	0	8	14
0.25	1	8	23
0.3	7	11	25

### 3 结论

1) 原水经过药剂预处理后,硬度能够达到《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)要求,但硫酸盐含量仍然较高,需要进一步深度处理后才能饮用。

2) 3 种深度处理的出水都能够达标,综合考虑产水率、运行的经济性和出水品质,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 Ca(OH)<sub>2</sub> 预处理+纳滤深度处理是较优的高硬度高硫酸盐地下水处理方法。在 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Ca(OH)<sub>2</sub> 投加量分别为 780、125 mg·L<sup>-1</sup>且操作压力为 0.8 MPa 时,出水硬度、硫酸盐含量、溶解性总固体含量分别为 40、36、193 mg·L<sup>-1</sup>,pH 为 7.45,产水率为 70.59%,达到《饮用净水水质标准》(CJ 94-2005)要求,且能够满足生产实际需要。

### 参考文献:

[1] Ford D C, Williams P W. Karst geomorphology and hydrology[M]. London: Unwin Hyman, 1989.

[2] 邹胜章. 西南岩溶区分散供水水污染机理与数学模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.

Zou S Z, Contamination mechanism & mathematical simulation of dispersed-water supply in karst areas of southwest China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.

[3] 罗毅. 西南岩溶地区水窖水质及水体中微生物群落的年动态研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2012.

Luo Y. Studing on the annual dynamic of the microbial community and the water quality of the water cellar in the karst mountainous area of Southwest China[D]. Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[4] 陈晓岚, 刘滔, 吴晓宾. 重庆岩溶地区水资源评价及供需平衡分析[J]. 中国水运, 2008, 8(11): 266-268.

Chen X F, Liu T, Wu X B. Evaluation on water resources and the balance analysis of supply and demand of karst areas in Chongqing[J]. China Water Transport, 2008, 8(11):

- 266-268.
- [5] White W B. Geomorphology and hydrology of karst terrains [M]. Oxford: Oxford University Press, 1988.
- [6] 杨雷. 重庆市温塘峡背斜地下热水水文地球化学特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- Yang L. Study on hydrogeochemical features of the thermal water at Wentang Gorge anticline in Chongqing, China [D]. Chongqing: Southwestern University, 2012.
- [7] 丁德超, 何靖蕾, 程鲁云, 等. 枣庄市实施地表水与地下水掺混法降低生活饮用水中总硬度的效果评价[J]. 预防医学论坛, 2013, 19(2): 98-100.
- Ding D C, He J L, Chen L Y, et al. Evaluation on the method of mixing surface water and groundwater to lower the hardness of drinking water, Zaozhuang city[J]. Preventive Medicine Tribune, 2013, 19(2): 98-100.
- [8] 张显球, 侯小刚, 张林生, 等. 面向软化水处理的纳滤膜分离技术[J]. 膜科学与技术, 2006, 26(2): 64-67.
- Zhang X Q, Hou X G, Zhang L S, et al. Application of nanofiltration membrane to water softening[J]. Membrane Science and Technology, 2006, 26(2): 64-67.
- [9] 侯立安, 高鑫, 赵兰. 纳滤膜技术净化饮用水的应用研究进展[J]. 膜科学与技术, 2012, 32(5): 1-7.
- Hou L A, Gao X, Zhao L. Applied research progress of nanofiltration membrane technology for purifying drinking water[J]. Membrane Science and Technology, 2012, 32(5): 1-7.
- [10] 张国亮. 高硬度水质下纳滤系统的运行状态及分析[J]. 膜科学与技术, 2000, 20(2): 43-48.
- Zhang G L. Studies on operating characteristics of NF system in high hardness water treatment[J]. Membrane Science and Technology, 2000, 20(2): 43-48.
- [11] 谢祖芳, 谭华颖, 朱万仁, 等. 石灰-纯碱软化/混凝预处理刁江河水[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(6): 72-74.
- Xie Z F, Tan H Y, Zhu W R, et al. Softening and coagulating method for pre-treatment of river water by lime and soda ash[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(6): 72-74.
- [12] Kettunen R, Keskitalo P. Combination of membrane technology and limestone filtration to control drinking water quality[J]. Desalination, 2000, 131: 271-283.
- [13] 刘玉荣, 陈东升, 洪勇琦, 等. 用纳滤技术对染料溶液脱水除盐的研究. 化工装备技术[J], 2000, 21(6): 9-12.
- Liu Y Z, Chen D S, Hong Y Q, et al. Study on dewater and desalination treatment of dye solutions by nanofiltration technology[J]. Chemical Equipment Technology, 2000, 21(6): 9-12.

## Study on the Advanced Treatment of Groundwater with High Concentration of Hardness and Sulfate

LI Jing<sup>1</sup>, WU Song<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, CHENG Xiaolong<sup>1</sup>, YANG Li<sup>2,3</sup>, MA Xuejiao<sup>2</sup>

(1. Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Yongchuan Chongqing 402160;

2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716;

3. Environmental Monitoring Station of Environmental Protection Bureau in Yongchuan, Yongchuan Chongqing 402160, China)

**Abstract:** Aiming at the current situation of the abundant groundwater resources locating in mountain suburb of southwest area of China with lower rate of exploitation and use, and increasingly conspicuous conflict of water resources supply and demand, the experimental research on resource utilization of groundwater by the advanced treatment with chemical substances pretreatment add membrane technique was carried out. The result shows that the advanced treatment method by pretreatment of lime and soda ash add nanofiltration membrane was an effective way to deal with the groundwater with high concentration of hardness and sulfate. The optimum effects were  $\text{Na}_2\text{CO}_3$   $780 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , and operating pressure 0.8 MPa with effluent hardness  $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , sulfate  $36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , total dissolved solids  $193 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 7.45, and water production rate 70.59%, respectively, which can meet the requirements of the Water Quality Standard for Fine Drinking Water(CJ 94-2005), and can well satisfy the need of producing.

**Key words:** high concentration of hardness; high concentration of sulfate; karst groundwater; reverse osmosis; nanofiltration

(责任编辑 方 兴)