

MgO 吸附材料除氟效果对水化学性质的适应性

李连香^{1,2}, 刘文朝^{1,2}, 李铁光^{1,2}, 孙瑞刚³

(1. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054; 2. 水利部农村饮水安全中心, 北京 100054;

3. 北京市南水北调工程建设委员会办公室, 北京 100086)

摘要:结合目前吸附法除氟技术所面临的应用难点,以 MgO 吸附材料为例,基于非天然高氟地下水加氟、天然高氟地下水等水质背景开展相关吸附试验,探究吸附材料对水化学性质的适应性。试验结果表明 MgO 吸附材料对非高氟地下水和天然高氟地下水均具有适应性,投加量 0.3 g/L 情况下可将天然高氟地下水中氟化物浓度由 3.68 mg/L 降至饮用水卫生标准要求的 1.0 mg/L 以下,具有良好的除氟效果。MgO 吸附材料在吸附氟的同时也吸附了大量共存阴离子 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻,所吸附的差量级共存阴离子降低了吸附材料的可重复利用性能。基于纯水配制高氟水试验条件下的再生手段满足不了实际高氟水再生手段的需求,再生手段不仅仅需考虑脱附 F⁻,更应全面考虑如何脱附 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 等阴离子从而释放更多的吸附位点。

关键词: MgO; 高氟地下水; 吸附法; 氟去除率; 竞争吸附; 适应性

中图分类号: TV213.4; TU991.26⁺6 **文献标识码:** A

Applicability of Defluoridation Effect Under Different Hydrochemical Characters of Porous Magnesium Oxide LI Lian-xiang^{1,2}, LIU Wen-chao^{1,2}, LI Tie-guang^{1,2}, SUN Rui-gang³

(1. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China;

2. Rural Drinking Water Safety Center of Ministry of Water Resources, Beijing 100054, China;

3. The Office of the SNWDP Construction Commission in Beijing City, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to overcome the current application difficulties, the applicability and defluoridation effect of MgO adsorbent under low-fluoride and high-fluoride groundwater are studied in this paper. Results show that MgO adsorbent possesses good applicability and can remove fluoride below the drinking water standard's limit value with low adsorbent dose 0.3 g/L. Meanwhile, MgO adsorbent also adsorbs a lot of coexistence competitive anions, especially bicarbonate and sulfate. These coexistence competition anions have a significant effect on the reused performance of MgO adsorbent. The regeneration method under the condition of deionized water with NaF can hardly satisfy the actual demand of high-fluoride groundwater. As for the regeneration method, it is necessary to consider the desorption and regeneration of fluoride but also the desorption of bicarbonate, sulfate and chloride and thus releasing more adsorption sites.

Key words: porous magnesium oxide; high-fluoride groundwater; adsorption method; fluoride removal rate; competitive adsorption; applicability

0 引言

中国高氟地下水分布广、涉及人口多,予以适宜的降氟措

收稿日期:2017-01-11

基金项目:重大水专项《农村饮用水安全保障技术标准化研究及规模化应用示范》(2015ZX07402003)。

作者简介:李连香(1986-),女,博士,工程师,从事农村饮水安全相关研究。E-mail:Lianxiang.0810@163.com。

施方能饮用。限于自然地理环境和社会经济发展水平,吸附法除氟技术依然是当前研究和应用的重点。吸附法除氟技术最关键的是选择高效、可靠的吸附材料,目前文献报道中的吸附材料种类繁多,主要有氧化铝/铝为基础材料、天然或人工黏土和矿石沸石类,金属水合氧化物等新型吸附材料等^[1-3],其中研究报道 MgO 吸附材料具有较高的吸附容量和良好的吸附性能^[4-5]。

针对吸附材料除氟性能的试验大都在实验室配水情况下

开展^[6-8],主要采用两种方式:一种是采用去离子水添加氟化钠配制;另一种是采用低氟地下水添加氟化钠配制。在模拟配水试验中,其水化学性质以及水化学组分与天然高氟地下水水化学性质以及水化学组分有较大差异。天然高氟地下水水化学性质对吸附法除氟技术提出很高的要求,吸附材料的应用效果会因天然高氟地下水水质情况不同而不同^[9]。为进一步研究和了解吸附材料在不同性质含氟水情况下的适应性,以实验室制备的 MgO 吸附材料为例,开展低氟地下水加氟和天然高氟地下水试验,明确 MgO 吸附材料的吸附性能在实际应用中面临的挑战,为吸附材料的发展与改进提供导向。

1 材料与方 法

1.1 主要材料

主要化学试剂有乙二醇(C₂H₆O₂)、六水氯化镁(MgCl₂·6H₂O)、尿素(NH₂CONH₂)、氟化钠(NaF)、氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl),所用试剂均为分析纯,购置于国药集团化学试剂有限公司和北京化工厂。

1.2 主要仪器

所采用的仪器包括意大利哈纳公司 HI98107 型笔式酸度计、安徽皖仪科技股份有限公司 IC 6000 型离子色谱仪、美国哈希公司 DR890 型多参数分光光度计、英国百灵达公司 7500 型百灵达水质光度计、MTI-科晶集团 OTF-1200X 型开启式真空管式炉、上海精密科学仪器有限公司 FA1004 型电子分析天平、江苏金坛市佳美仪器有限公司 SHA-C 型水浴恒温振荡器、MTI-科晶集团 KSL-1400X-A1 型箱式炉、湖南湘仪实验室仪器开发有限公司 H1650-W 型台式微量高速离心机。

1.3 吸附材料的制备

实验室制备 MgO 吸附材料,主要以去离子水和乙二醇为溶剂,以 MgCl₂·6H₂O 为原料,以尿素为形成前驱体原料,通过水热法的方式制备。磁力搅拌情况下,将 50 mL 纯水与 50 mL 乙二醇添加至 150 mL 烧杯中,混合均匀,添加 2.033 g MgCl₂·6H₂O 和 2.4 g 尿素,搅拌 20 min,混合均匀后转移至不锈钢高压反应釜中密封,120 ℃ 条件下,反应 12 h;反应结束后,将反应物取出进行离心、清洗、干燥和煅烧,煅烧后,自然冷却至室温,取出备用^[10]。

1.4 试验方法

1.4.1 非高氟地下水加氟试验

采取非天然高氟地下水加氟的方法开展吸附试验,采集河北及北京市郊等地区地下水水样 12 个,检测其水化学性质,为增强试验水样的代表性,通过添加 NaF 配制氟化物浓度 1.50~5.00 mg/L,符合高氟地下水中氟化物含量范围。对非高氟地下水(原水)以及非高氟地下水加氟后(原水加氟)均开展吸附试验。MgO 投加量为 1.0 g/L,25 ℃、150 rpm 转速条件下恒温振荡 24 h,检测试验前后 F⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、pH 值等指标,检测次数为 2 次并取平均值,利用式(1)计算氟去除率、式(2)计算各阴离子吸附量 Q^[11]。

$$\text{氟去除率} = \frac{C_s - C_e}{C_s} \times 100\% \quad (1)$$

$$Q_e = \frac{W_e}{W} = \frac{V(C_s - C_e)}{W} \quad (2)$$

式中:C_s为氟离子的初始浓度,mg/L;C_e为氟离子的平衡浓度,mg/L;Q_e为吸附剂吸附量,mg/g;W_e为总吸附量,mg;W为吸附材料质量,g;V为试验溶液体积,L;C_s为初始浓度,mg/L;C_e为平衡浓度,mg/L。

1.4.2 天然高氟地下水试验

选择河北和北京市郊为天然高氟地下水的采样地点,采集高氟地下水水样 2~3 个开展吸附试验。为进一步准确分析吸附材料对天然高氟地下水的适应性,MgO 投加量为 0.1、0.3、0.5、1.0 g/L,25 ℃、150 rpm 转速条件下恒温振荡 24 h,检测试验前后 F⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、pH 值等指标,检测次数为 2 次并取平均值,计算氟去除率和各阴离子吸附量。

1.4.3 可重复利用性能试验

明确吸附材料基于天然高氟地下水情况下的可重复利用性能,MgO 投加量为 1 g/L,25 ℃、150 rpm 转速条件下恒温振荡 24 h,测定平衡氟浓度。针对 MgO 吸附材料采取热再生,收集吸附后的材料用水洗涤后,60 ℃ 烘干,然后在高温炉中 1 000 ℃ 煅烧 1 h,冷却至室温并进行下一周期试验,吸附-再生-再吸附重复 3~4 次。为增加对比性,设置对照试验,采用纯水配制相同氟化物浓度的溶液,同样试验条件下开展吸附材料的可重复利用性能试验。

1.5 测试方法

水质参数测试按照生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750-2006)进行^[12]。使用哈纳 HI98107 笔式酸度计测定 pH 值,使用 Palintest 7500 型多参数分光光度计测定总碱度(TA)、总硬度(TH)和 HCO₃⁻等水质参数,使用哈希 DR890 型多参数分光光度计测定 F⁻,采用离子色谱仪测定 SO₄²⁻、Cl⁻等水质参数。

2 结果与讨论

2.1 基于非高氟地下水加氟的适应性

选择河北以及北京市郊等地区地下水水样 12 个,水化学性质如表 1 所示。

由表 1 可知,所采集地下水中氟化物含量 0.16~0.89 mg/L,加氟后 1.75~3.00 mg/L,符合我国大部分高氟地下水中氟化物含量的范围。此外,Cl⁻含量 1~48 mg/L,SO₄²⁻含量 1~84 mg/L,TA 含量 80~300 mg/L,HCO₃⁻含量是 97.6~366.0 mg/L,TH 范围是 45~240 mg/L,pH 值 7.53~9.08,通过前期对渤海湾、皖北等地区高氟地下水水化学性质的研究与测试^[10],从指标含量的角度而言,可以代表非高氟地下水开展相关吸附试验。

2.1.1 基于非高氟地下水加氟除氟效果

吸附试验结果如图 1 所示。

通过图 1 可知,氟化物含量 0.16~0.89 mg/L 时,MgO 吸附材料的氟去除率为 46.43%~87.93%。加氟后氟化物含量 1.75~3.00 mg/L 时,MgO 吸附材料的氟去除率为 44.44%~98.35%,较低氟水时大有提升,并将氟化物含量降至国家饮用水卫生标准要求的限值 1.0 mg/L 以下。此外,MgO 吸附材料的氟去除率最低值出现在编号为 9 的水样,分别为 46.43%、44.44%,究

表 1 非高氟地下水水质

Tab.1 Water quality of low fluoride groundwater

编号	采样点	F ⁻ / (mg·L ⁻¹)	F _加 ⁻ / (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	TA/ (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	TH/ (mg·L ⁻¹)	pH
1	ZJK	0.58	2.42	31	36	255	311.1	195	7.53
2	CYQ1	0.39	2.20	21	38	240	260.0	155	8.19
3	CYQ2	0.36	2.20	15	34	205	250.1	145	8.07
4	CYQ3	0.38	3.00	1	34	210	256.2	135	8.02
5	CYQ4	0.38	1.90	4	33	165	201.3	45	8.42
6	HDQ1	0.16	2.06	46	41	265	323.3	240	7.54
7	CYQ5	0.37	1.75	17	29	295	359.9	155	7.94
8	HDQ2	0.65	2.08	23	52	190	231.8	150	8.06
9	HDQ3	0.16	1.80	27	29	80	97.6	70	9.08
10	HDQ4	0.56	2.80	48	84	250	305.0	210	8.22
11	TZQ	0.89	2.80	24	44	220	260.0	140	8.10
12	SYQ	0.40	2.40	5	1	290	353.8	145	8.12

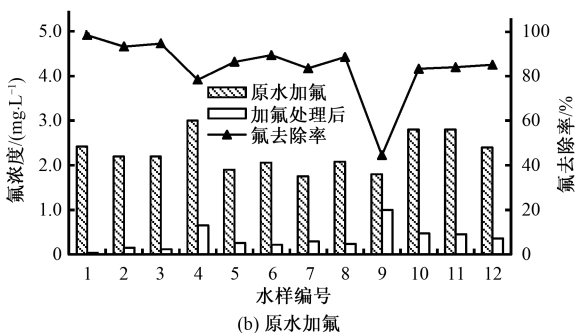
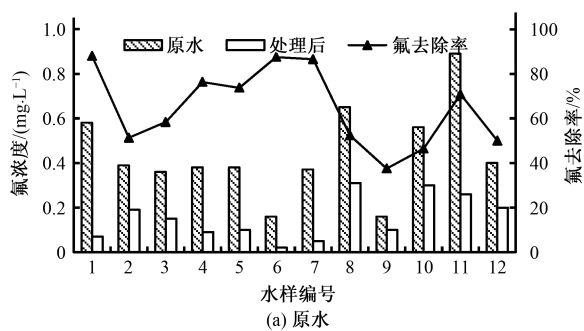


图 1 MgO 吸附材料的除氟效果

Fig.1 Fluoride removal performance of MgO adsorbent

其主要原因是该水样的 pH 值为 9.08, 影响了吸附材料的除氟效果^[3]。

通过 SPSS 软件分析 MgO 吸附材料的氟去除率与地下水水化学性质的相关关系, 分析结果如表 2 所示。

表 2 氟去除率与地下水中各指标之间的相关关系

Tab.2 Relationships between fluoride removal rate and other water quality indicators

类别	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TA	HCO ₃ ⁻	TH	pH
原水	0.036	-0.021	-0.116	0.457	0.486	0.302	-0.735**
原水加氟	0.201	0.010	0.107	0.683*	0.658*	0.506	-0.805**

注: 双侧显著性检验: ** 代表在 0.01 水平上显著; * 代表在 0.05 水平上显著。

通过表 2 中相关系数可知, 无论低氟水还是高氟水, MgO 吸附材料的氟去除率与初始 F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻ 和 TH 没有相关关

系, 与 pH 值呈现 0.01 水平上显著负相关, 表明 MgO 吸附材料的除氟效果受限于地下水的 pH 值, 除氟效果随着 pH 值的升高而降低, 特别当溶液 pH 值升高到 9.0 以上时, 吸附材料的除氟效果较差。此外, 通过表 2 可知, 在原水加氟试验时, MgO 吸附材料的氟去除率与 TA 以及 HCO₃⁻ 呈现 0.05 水平上显著正相关, 这与 HCO₃⁻ 与 F⁻ 产生竞争吸附相矛盾, 究其主要原因是由于非天然高氟地下水中 HCO₃⁻ 含量总体偏低, TH 含量总体偏高, 加氟后虽形成高氟水, 但与天然高氟地下水的水化学性质有很大差异, 因此相关分析的结果存在偏差。

2.1.2 基于非高氟地下水加氟的竞争吸附

通过检测溶液平衡 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 浓度, 计算出整个吸附过程中 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻ 浓度降低值以及吸附量, 计算结果如图 2 所示。

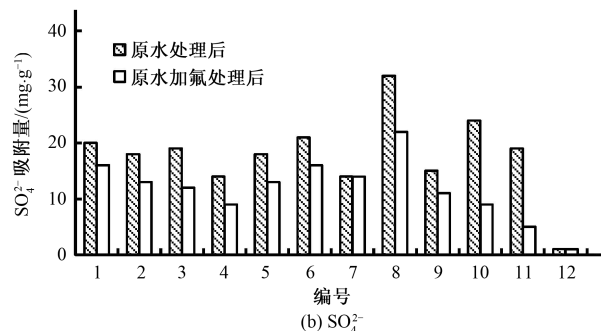
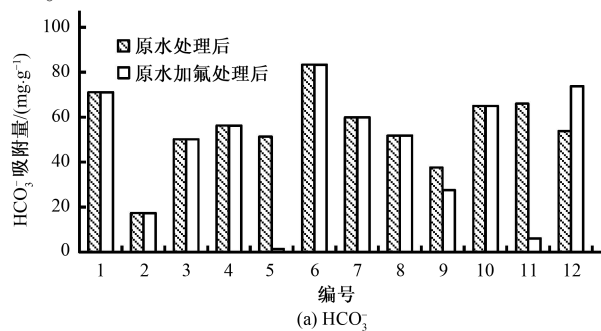
图 2 MgO 吸附材料对 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的吸附

Fig.2 Bicarbonate and sulfate adsorption performance of MgO adsorbent

测试结果表明吸附平衡后 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 浓度呈现不同程度的下降,这表明 MgO 吸附材料在吸附 F^- 的同时也吸附了 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 。由图 2(a) 可见,针对原水试验吸附平衡后, MgO 吸附材料对 HCO_3^- 吸附量大部分在 38~83 mg/g,均值为 50 mg/g;针对原水加氟试验吸附平衡后, MgO 吸附材料对 HCO_3^- 吸附量大部分为 38~84 mg/g,均值为 42 mg/g。基于本试验条件下, MgO 吸附材料对于 F^- 吸附量最大为 2.38 mg/g,可见 MgO 吸附材料对 HCO_3^- 的吸附量是 F^- 吸附量的数十倍,属于差量级竞争吸附,大量的吸附 HCO_3^- 会占据 MgO 吸附材料表层的吸附孔隙,导致吸附孔隙减少。由图 2(b) 可见, MgO 吸附材料针对原水中 SO_4^{2-} 吸附量往往大于原水加氟后 SO_4^{2-} 吸附量,这表明在氟化物浓度高时, MgO 材料在 F^- 和 SO_4^{2-} 之间会择

优吸附 F^- 。通过 SO_4^{2-} 吸附量可以看出,在氟化物浓度为 2.08 mg/L 时, MgO 吸附材料的 SO_4^{2-} 吸附量大于 20 mg/g,也是 F^- 吸附量的数倍或十余倍。此外,检测结果表明吸附平衡后,溶液中 Cl^- 浓度略有降低,由这表明 MgO 吸附材料对 Cl^- 具有微弱的吸附作用,对 Cl^- 的吸附量仅为 1~7 mg/g(由于吸附量小,文中不再用图表进行描述,下同),也会占用部分吸附材料表明的吸附位点。

2.2 基于天然高氟地下水的适应性

为进一步阐明吸附材料对天然高氟地下水的适应性,对 MgO 吸附材料开展基于天然高氟地下水的试验,明确吸附材料的吸附性能在实际应用中面临的挑战。针对所采集高氟地下水水质情况如表 3 所示。

表 3 高氟地下水水质

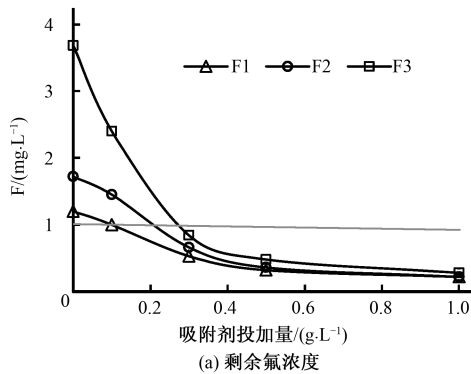
Tab.3 Water quality of high-fluoride groundwater

编号	采样点	$\text{F}^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{Cl}^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{SO}_4^{2-} /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TA/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{HCO}_3^- /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TH/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH
F1	XBT	1.20	7	87	105	120	90	7.83
F2	CC	1.72	21	42	100	120	95	7.55
F3	TT	3.68	3	68	200	220	10	8.51

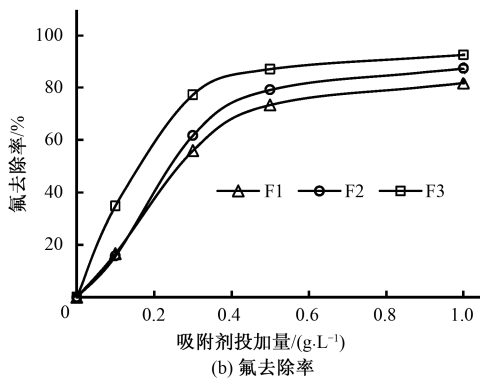
由表 3 可知,所采集地下水水样中氟化物含量分别为 1.20、1.72、3.68 mg/L,涵盖了中、重度高氟地下水。

2.2.1 基于天然高氟地下水的除氟效果

MgO 吸附材料对天然高氟地下水的除氟效果如图 3 所示。



(a) 剩余氟浓度



(b) 氟去除率

图 3 MgO 吸附材料基于天然高氟地下水的除氟效果

Fig.3 Fluoride removal performance of MgO adsorbent in actual high-fluoride groundwater

通过图 3(a) 可知,针对初始氟化物浓度为 1.20、1.72 和 3.68 mg/L, MgO 吸附材料投加量为 0.1、0.25 和 0.3 g/L 时,可将

氟化物浓度降至饮用水卫生标准要求的 1.0 mg/L 以下。通过图 3(b) 可知,随着吸附材料投加量增加,氟去除率逐渐升高。通过上述 3 个天然高氟地下水的吸附试验可知,从首次吸附的除氟效果角度而言, MgO 吸附材料具有很好的除氟效果,对天然高氟地下水具有良好的适应性。

2.2.2 基于天然高氟地下水的竞争吸附

通过检测溶液平衡 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度,计算出整个吸附过程中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 浓度降低值以及吸附量,计算结果如图 4 所示。

测试结果与 2.1.2 试验结果一致,基于天然高氟地下水试验条件下, MgO 吸附材料在吸附 F^- 的同时也吸附了 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,其中 HCO_3^- 吸附量为 10~25 mg/g,对 SO_4^{2-} 的吸附量为 0~12 mg/g,对 Cl^- 的吸附量为 2~10 mg/g。基于本试验条件下, MgO 吸附材料对于 F^- 吸附量为 0.98~9.80 mg/g,均值为 3.87 mg/g。这表明 HCO_3^- 与 F^- 形成差量竞争吸附, SO_4^{2-} 和 Cl^- 均会对 F^- 产生竞争吸附。此外,值得一提的是,在天然高氟地下水水质条件下, MgO 吸附材料对 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的吸附量显著小于非天然高氟地下水水质情况下,表明 MgO 吸附材料对 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 的吸附与初始溶液中 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 含量有关,随着天然高氟地下水中氟化物浓度升高,阴离子之间的竞争吸附作用加强, MgO 吸附材料会同时吸附 F^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} ,但吸附过程会相互抑制。

通过上述非天然高氟地下水加氟试验以及天然高氟地下水试验结果可知, MgO 吸附材料具有良好的除氟效果,对含氟水具有适应性,均能将原水氟化物浓度降至标准限值以下。但同时 MgO 吸附材料在吸附氟的过程中,也吸附了水中大量阴离子,但均对吸附材料的首次吸附性能没有显著影响,推测可能会影响吸附材料的可重复利用性能。因此,进一步开展 MgO 吸附材料基于天然高氟地下水水质背景下的可重复利用性能。

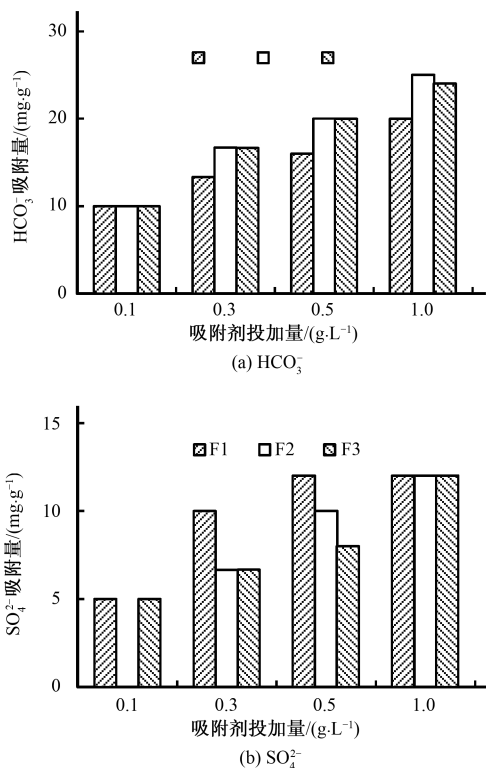


图4 MgO 吸附材料对天然高氟水中 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的吸附

Fig.2 Bicarbonate and sulfate adoption performance of MgO adsorbent in high-fluoride groundwater

2.3 基于天然高氟地下水的可重复利用性能

为进一步明确基于天然高氟地下水情况下吸附材料的可重复利用性能,采用 F2 水样(氟化物浓度为 1.72 mg/L)开展吸附材料可重复利用试验研究,其试验结果如图 5 所示。

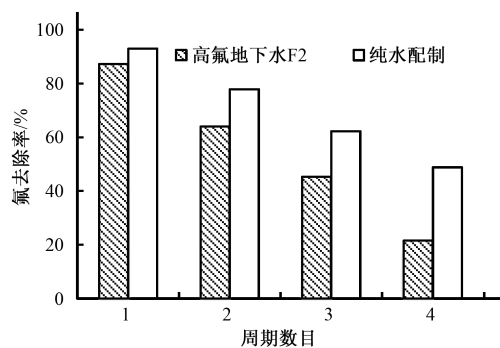


图5 可重复利用性能试验结果

Fig.5 Test result of reusable performance

由图 5 可知,通过与纯水配水试验对比发现,MgO 吸附材料在天然高氟地下水条件下,吸附材料的可重复利用性能降低,除氟效果随着周期数目的增加而下降,氟去除率从第 1 周期的 87.21% 降至第 4 周期的 21.51%,且在第 4 周期运行后,平衡溶液中氟化物浓度超过 1.0 mg/L。此外,通过检测运行过程中其他阴离子的变化情况可知,随着吸附材料再生过程的进行,除了 F⁻ 外,MgO 吸附材料对 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 等竞争离子的吸附作用均呈现下降趋势。试验结果主要体现在两个方面,其一是天然高氟地下水对 MgO 吸附材料的可重复利用性能影响较大;其二是基于纯水配制高氟水试验条件下的再生手段满足不

了实际高氟水再生手段的需求,因为在天然高氟地下水水化学组分条件下,MgO 吸附材料在吸附氟的过程,同样吸附了大量的其他阴离子,再生手段应全面考虑如何脱附这些阴离子从而释放更多的吸附位点。

3 结论

综上所述,MgO 吸附材料对非高氟地下水和天然高氟地下水均具有适应性,具有良好的除氟效果,同时 MgO 吸附材料在吸附氟的同时也吸附了大量共存阴离子,特别是 HCO₃⁻。所吸附的微量级共存阴离子均对首次吸附过程的除氟效果没有显著影响,但对吸附材料的可重复利用性能影响较大,氟去除率从第 1 周期的 87.21% 降至第 4 周期的 21.51%。此外,基于纯水配制高氟水试验条件下的再生手段满足不了实际高氟水再生手段的需求,应加大力度开展高效吸附材料的再生技术研究,再生技术不仅需考虑脱附 F⁻,更应全面考虑如何脱附 HCO₃⁻、SO₄²⁻ 和 Cl⁻ 等阴离子从而释放更多的吸附点位。因此,天然高氟地下水水化学性质及共存阴离子的竞争吸附是限制 MgO 吸附材料应用效果的关键,吸附材料实际应用前,应结合天然高氟地下水开展多个周期的吸附性能试验。 □

参考文献:

- [1] Zhang T, Li Q, Liu Y, et al. Equilibrium and kinetics studies of fluoride ions adsorption on CeO₂/Al₂O₃ composites pretreated with non-thermal plasma [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 168(2): 665-671.
- [2] Wang J, Xu W, Chen L, et al. Excellent fluoride removal performance by CeO₂ - ZrO₂ nanocages in water environment [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 231: 198-205.
- [3] Mohapatra M, Anand S, Mishra B K, et al. Review of fluoride removal from drinking water [J]. Journal of Environmental Management, 2009, (91): 67-77.
- [4] Maliyekkal S M, Antony K R, Pradeep T. High yield combustion synthesis of nanomagnesia and its application for fluoride removal [J]. Science of the total environment, 2010, 408(10): 2 273-2 282.
- [5] Nagappa B, Chandrappa G T. Mesoporous nanocrystalline magnesium oxide for environmental remediation [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2007, 106(1): 212-218.
- [6] Biswas K, Gupta K, Goswami A, et al. Fluoride removal efficiency from aqueous solution by synthetic iron (III)-aluminum (III)-chromium (III) ternary mixed oxide [J]. Desalination, 2010, 255(1-3): 44-51.
- [7] Chen N, Zhang Z Y, Feng C P, et al. Fluoride removal from water by granular ceramic adsorption [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 348(2): 579-584.
- [8] Tor A. Removal of fluoride from an aqueous solution by using montmorillonite [J]. Desalination, 2006, 201(1-3): 267-276.
- [9] Meenakshi, Maheshwari R C. Fluoride in drinking water and its removal [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(1): 456-463.
- [10] 李连香. 多孔铝镁氧化物除氟效果对水化学性质的响应机制及适应性[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015: 58-59.
- [11] 胡小玲, 管萍. 化学分离原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 249-251.
- [12] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].