

# 石英砂负载巯基材料去除 $\text{Hg}(\text{II})$ 离子 影响因素的响应曲面分析

刘 军,董万里,傅金祥,蒋安娜

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究石英砂负载巯基材料(SFQ)去除  $\text{Hg}(\text{II})$  离子过程中各因素的影响,优化  $\text{Hg}(\text{II})$  离子去除条件. 方法 采用响应曲面(RSM)试验中的中心组合设计(CCD)方法,以吸附时间、 $\text{Hg}(\text{II})$  离子质量浓度和 pH 作为试验因子,建立 3 因素 3 水平响应曲面回归模型,以  $\text{Hg}(\text{II})$  离子的去除率作为响应值进行全面分析,并验证模型的准确度. 结果 响应曲面 CCD 建立的吸附模型对 SFQ 吸附  $\text{Hg}(\text{II})$  离子拟合度较高, $R^2=0.9822$ ,模型优化所得的最佳条件为: $\text{Hg}(\text{II})$  离子质量浓度为  $0.96 \text{ mg/L}$ ,pH 值为 3.78,处理时间为 102.94 min. 在此条件下, $\text{Hg}(\text{II})$  去除率为 92.05%. 试验结果与模型预测值符合,理论值与实测相对误差不超过 2%. 结论 SFQ 吸附  $\text{Hg}(\text{II})$  离子去除率的影响因素大小顺序依次为:pH、 $\text{Hg}(\text{II})$  离子质量浓度、吸附时间. SFQ 对污水中  $\text{Hg}(\text{II})$  离子去除率较高,可以将 SFQ 材料应用于含汞废水的处理.

**关键词** 石英砂;巯基;响应曲面; $\text{Hg}(\text{II})$

中图分类号 X523

文献标志码 A

## Response Surface Analysis on Influence Factors of $\text{Hg}(\text{II})$ Ions Removal by Quartz Sand Loaded Cerium-Based Materials

LIU Jun, DONG Wanli, FU Jinxiang, JIANG Anna

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The effects of various factors in the removal of  $\text{Hg}(\text{II})$  ions by quartz-supported cerium-based materials were studied, and the removal conditions of  $\text{Hg}(\text{II})$  ions were optimized. The removal test was designed by the Central Composite Design (CCD) of response surface (RSM) test. Adsorption time,  $\text{Hg}(\text{II})$  ion mass concentration and pH were used as test factors to be established a 3-factor 3-level response surface regression model. The  $\text{Hg}(\text{II})$  ion removal rate was used as a response value for comprehensive analysis, and the accuracy of the model was verified.

收稿日期:2019-04-15

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601001-3)

作者简介:刘军(1964—),女,教授,主要从事水处理技术及水质检测方面研究.

SFQ adsorption model of  $\text{Hg}(\text{II})$  ions established by curved CCD has a high fitting degree, and  $R^2 = 0.9822$ . The optimal conditions for model as follow:  $\text{Hg}(\text{II})$  concentration is  $0.96 \text{ mg/L}$ , pH is 3.78, the treatment time is 102.94 min. Under this condition, the removal rate of  $\text{Hg}(\text{II})$  is 92.05%, which indicates the SFQ can be applied to the treatment of mercury-containing wastewater. The experimental results are in agreement with the predicted values of the model. The relative error between the theoretical value and the measured value is less than 2%. The order of influence factors on the removal rate of  $\text{Hg}(\text{II})$  ions by SFQ materials was as follows:  $\text{pH} > \text{Hg}(\text{II})$  ion mass concentration  $>$  adsorption time.

**Key words:** quartz sand; cerium-base; response surface;  $\text{Hg}(\text{II})$

重金属汞是一种具有严重生物毒性的环境污染物,是危害最大的重金属元素之一,但是汞的用途又十分广泛,短期内不可替代. 重金属汞污染主要来源于煤化工、钢铁冶炼、电力、氯碱化学等领域生产过程产生的废水以及排放的废气. 联合国环境规划署(UNEP)在2003年2月发表的全球汞状况评估报告中指出,自工业革命以来,汞在全球大气、水和土壤中的含量已经增加了3倍左右,在工业区附近汞的含量更高<sup>[1-2]</sup>. 汞污染目前已经涉及江水、地下水及海洋、大气、土壤,甚至人迹罕见的北极都出现了汞元素<sup>[3-4]</sup>. 由于汞污染的不断加剧对人类健康和环境造成了极大的危害,在全球产生了重大的不利影响. 尤其进入水环境的无机汞会在生物化学作用下生成毒性更大的甲基汞,存在严重的生物毒性,经生物富集和食物链放大后将会产生严重的后果<sup>[5-10]</sup>. 所以,含汞废水的控制与治理已成为环境科学技术领域关注的主要问题<sup>[11]</sup>. 我国在《国家污水综合排放标准》(GB8979—1996)中对工业废水中总汞的排放规定了严格的限量,最大允许排放质量浓度为  $0.05 \text{ mg/L}$ . 各地方标准的规定更加严格,《天津市污水综合排放标准》(DB12/356—2018)规定,总汞直接排放标准为  $0.001 \text{ mg/L}$ ,间接排放标准为  $0.005 \text{ mg/L}$ . 2017年8月16日《关于汞的水俣公约》对我国正式生效,标志着我国对汞污染的防治及治理工作会采

取更加严格的控制及治理措施,履行公约规定的各项义务.

常见的含汞废水处理方法,如化学沉淀法、电解法、吸附法等,主要适用于处理较高浓度的含汞废水,每种方法都有各自的优势之处,但总体来看欲达标排放需要进行二级处理<sup>[12-18]</sup>. 近年来,一些研究表明,改性材料处理重金属废水效果非常明显,可达到一次处理达标的效果. 唐振平等<sup>[19]</sup>认为改性硅基材料对重金属  $\text{Pb}(\text{II})$ 、 $\text{Zn}(\text{II})$ 、 $\text{Hg}(\text{II})$  离子去除率最低为 93.5%,最高甚至可达 99.9%. 谢婧如等<sup>[20]</sup>利用巯基乙酸对天然海泡石改性,改性后海泡石对  $\text{Hg}(\text{II})$  离子的吸附量可达  $3.26 \text{ mg/g}$ ,对  $\text{Hg}(\text{II})$  离子吸附作用明显提高. 笔者采用石英砂负载巯基材料(SFQ)吸附水中  $\text{Hg}(\text{II})$  离子,并通过响应面试验设计方法,得到 SFQ 对  $\text{Hg}(\text{II})$  离子去除的最佳吸附时间、最佳  $\text{Hg}(\text{II})$  离子质量浓度和最佳 pH 值,为 SFQ 在含汞废水深度处理的实际工程应用提供技术参考.

## 1 试 验

### 1.1 试验水质

试验用水采用  $\text{HgCl}_2$  自配水样模拟含汞废水,温度为室温为  $18 \sim 25^\circ\text{C}$ , pH 为 7.2.

### 1.2 试验材料与仪器

试验所需仪器如表 1 所示,试验所需材料如表 2 所示.

表 1 试验仪器

Table 1 Test instruments

仪器名称	仪器型号	生产厂家
电感耦合等离子体谱仪(ICP-MS)	Agilent Technologies;7500CX	安捷伦科技有限公司
加热型磁力搅拌器	MS-H280-Pro	大龙兴创试验仪器(北京)有限公司
真空干燥箱	LVO-6210	上海龙跃仪器设备有限公司
电热鼓风干燥箱	BGZ-246	上海博讯仪器设备有限公司
实验室 pH 计	6010M	上海任氏电子有限公司
电子天平	EL104	梅特勒-托利多仪器有限公司
明澈纯水机	F7JA24418	上海泰坦科技股份有限公司

表 2 试验材料

Table 2 Test materials

试剂名称	类型	生产厂家
石英砂	—	沈阳中兴石英砂厂
巯基乙酸	分析纯	东京化成工业株式会社
乙酸酐	分析纯	沈阳试剂一厂
盐酸	分析纯	国药集团有限公司
浓硫酸	分析纯	国药集团有限公司
氢氧化钠	分析纯	国药集团有限公司
二氧化汞	分析纯	美国 O2si 公司

1.3 SFQ 材料制备及表征

1.3.1 材料的制备

(1)筛分出粒径为 0.85 ~ 0.71 mm 的石英砂基质材料 200 g,在纯水中煮沸 60 min,冷却后用纯水清洗干净,电热鼓风干燥箱 105℃烘干 12 h.

(2)将处理后的石英砂用 1 mol/L 的盐酸浸泡 24 h,倾去盐酸用纯水清洗至 pH = 7.

(3)将酸洗后的石英砂浸入 150 mL 95% 乙醇溶液,磁力搅拌器 120 r/min 搅拌 2 h,静置 15 min,倾去乙醇用纯水清洗至中性,置于 35℃电热鼓风干燥箱烘干待用.

(4)将处理后的石英砂、巯基乙酸、乙酸酐和硫酸以质量比 15:13:7:3 混合均匀置于棕色广口瓶中,密封后放入恒温箱中以 90 ℃ 恒温反应 8 h 进行负载.

(5)负载后的材料冷却至室温后取出,用纯水冲洗至中性,放置真空干燥箱中 30 ℃ 烘干制备出 SFQ.

1.3.2 SFQ 材料表征

采用傅里叶红外光谱仪 TENSOR27,在 20 ℃左右,扫描次数 100 次,分辨率 4 cm<sup>-1</sup>,扫描步长 2 cm<sup>-1</sup>,扫描波数 400 ~ 4 000 cm<sup>-1</sup> 的条件下,分析检测材料表面官能团.检测结果如图 1 所示.

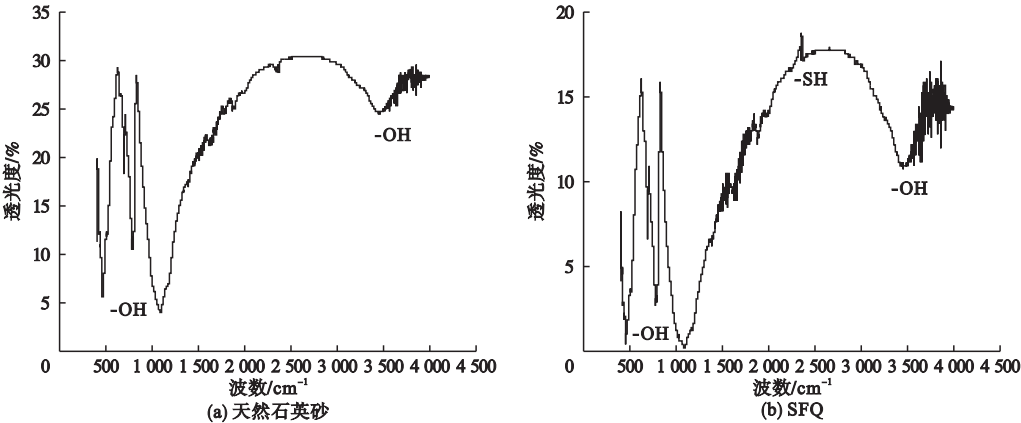


图 1 天然石英砂和 SFQ 傅里叶红外光谱图

Fig. 1 Fourier infrared spectrum of natural quartz sand and SFQ

从图1傅里叶红外光谱图曲线可以看出,天然石英砂与SFQ表面官能团突峰基本一致,波数 $3\,200\sim 3\,500\text{ cm}^{-1}$ 处的官能团突峰表明-OH存在,但SFQ的图谱在波数 $2\,500\text{ cm}^{-1}$ 处有新的官能团突峰,表明-SH存在,从而可以证明利用SFQ制备成功。

1.4 试验方法

1.4.1 单因素试验

选取对Hg(Ⅱ)离子的去除效果影响较大的Hg(Ⅱ)离子质量浓度、pH、吸附时间3个因素分别做单因素试验,确定3个因素的取值.单因素试验结果为:Hg(Ⅱ)离子质量浓度 $1\text{ mg/L}$ 、pH值4、吸附时间 $120\text{ min}$ 时SFQ对Hg(Ⅱ)离子的去除率最高.依据单因素试验结果确定响应曲面试验设计中各因素水平的取值范围. Hg(Ⅱ)离子质量浓度取 $0.5\text{ mg/L}$ 、 $1.0\text{ mg/L}$ 、 $1.5\text{ mg/L}$ ;吸附时间取 $60\text{ min}$ 、 $120\text{ min}$ 、 $180\text{ min}$ ;pH值取3、4、5.

1.4.2 响应曲面试验

响应曲面法(RSM)是基于试验设计、模型建立和数据分析来评估各影响因素间的交互作用,进而确定最优试验条件的一种优化分析方法<sup>[21]</sup>.

根据Design-Expert 8.0.5软件中的Central Composite Design 试验,设计3因素3水平共20组试验方案<sup>[22]</sup>.选吸附时间A为 $60\sim 180\text{ min}$ ,Hg(Ⅱ)离子质量浓度B为 $0.5\sim 1.5\text{ mg/L}$ ,pH值C为3~5为响应变量,以Hg(Ⅱ)离子去除率Y为响应值,通过响应曲面CCD法分析优化得到用SFQ处理含Hg(Ⅱ)离子废水的最佳试验条件.各试验组的设计因素与水平取值如表3所示,组合试验结果如表4所示.

表3 响应面设计因素及水平  
Table 3 Response surface design factors and levels

水平	因素		
	A/min	B/(g·L <sup>-1</sup> )	C
-1	60	0.5	3
0	120	1	4
1	180	1.5	5

表4 CCD组合设计及结果  
Table 4 CCD combination design and its results

试验 序号	因素			Hg(Ⅱ)去除 率/%
	A/min	B/(mg·L <sup>-1</sup> )	C	
1	-1	-1	1	78.218 5
2	-1	0	0	87.971
3	0	0	0	90.897 1
4	0	0	1	84.425 6
5	-1	-1	-1	83.204 4
6	0	0	0	93.639 9
7	1	1	1	73.159 3
8	-1	1	-1	81.814 2
9	0	-1	0	84.498 6
10	0	0	0	92.708 1
11	0	0	0	91.513 6
12	0	0	-1	86.346 1
13	0	0	0	91.774 6
14	0	1	0	83.734 5
15	1	-1	-1	73.576 4
16	-1	1	1	69.508 8
17	1	1	-1	77.477 9
18	1	-1	1	77.613 9
19	1	0	0	87.595 9
20	0	0	0	92.638 9

2 结果与分析

2.1 SFQ去除Hg(Ⅱ)离子响应面分析  
三维响应面图直观展现响应面的函数形状,反映出Hg(Ⅱ)离子质量浓度、吸附时间、pH以及交互作用对Hg(Ⅱ)离子去除率的影响.二维等高线图也可直接反应两因素间交互作用的强弱,等高线越接近圆形,表明两因素交互作用越不显著,而越接近椭圆,表明两因素交互作用越显著,椭圆排列越紧密,因素变化对结果影响越大<sup>[19]</sup>.

2. 1. 1 吸附时间与 Hg( II ) 离子质量浓度对去除率的影响

图 2 为 pH = 4 的情况下,吸附时间与 Hg( II ) 离子质量浓度及其交互作用对去除率影响的二维等高线图和三维响应曲面图.从图 2 可以看出,Hg( II ) 离子质量浓度为

0. 70 ~ 1. 15mg/L、吸附时间为 60 ~ 160min 时 Hg( II ) 离子去除率较高,大于 90%. 二维等高线图呈椭圆形,说明吸附时间与Hg( II ) 离子质量浓度交互作用显著. 当吸附时间为 118 min,Hg( II ) 离子质量浓度为0. 95 mg/L 时,去除率达最高 90. 8% .

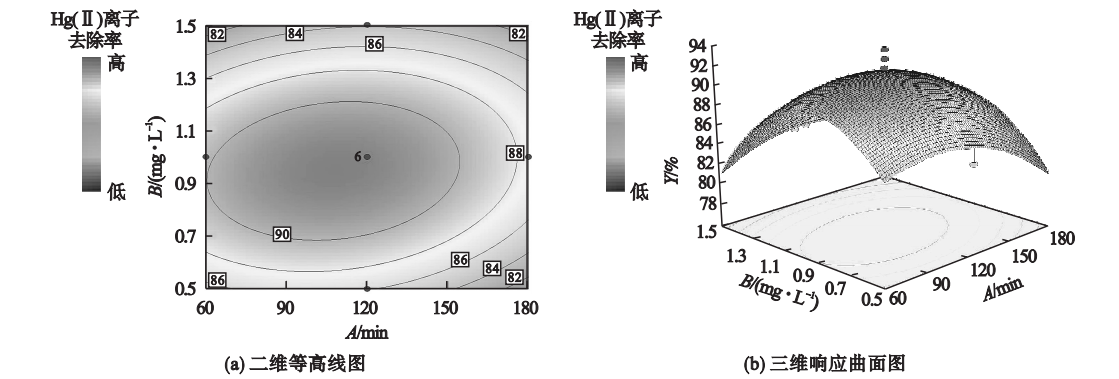


图 2 吸附时间、Hg( II ) 离子质量浓度对去除率影响

Fig. 2 Effect of adsorption time and Hg(II) ion mass concentration on removal rate

2. 1. 2 吸附时间与 pH 对去除率的影响

图 3 为 Hg(II) 离子质量浓度为1.0 mg/L 的情况下,吸附时间与 pH 及其交互作用对去除率影响的二维等高线图和三维响应曲面图.从图 3 可以看出,pH 为 3. 2 ~ 4. 1、吸附时间为

60 ~ 145 min 时 Hg(II) 离子去除率较高,大于 90%. 二维等高线图呈椭圆图形,说明吸附时间与 pH 交互作用对 Hg(II) 离子的去除率影响显著. 当吸附时间为 118 min ,pH = 3. 8 时,去除率达最高 90. 8% .

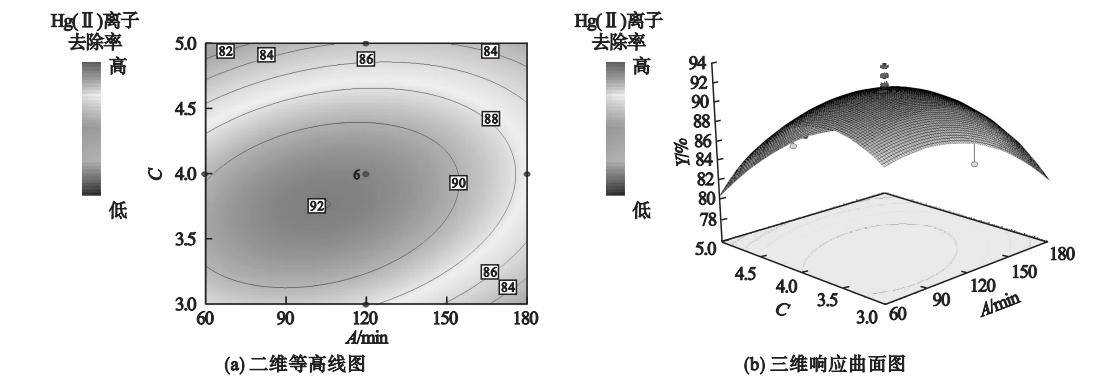


图 3 吸附时间、pH 对去除率影响

Fig. 3 Effect of adsorption time and pH on removal rate

2. 1. 3 pH 与 Hg( II ) 离子质量浓度对去除率的影响

图 4 为吸附时间为 120 min 情况下 pH 与 Hg( II ) 离子质量浓度及其交互作用对去除率影响的二维等高线图和三维响应曲面图.从图 4 可以看出,Hg( II ) 离子质量浓度为

为 0. 73 ~ 1. 22 mg/L、pH 为 3. 28 ~ 4. 31 时 Hg( II ) 离子去除率较高,大于 90% ,二维等高线图呈椭圆图形,说明 pH 与 Hg( II ) 离子质量浓度的交互作用对Hg( II ) 离子的去除率影响显著. 当 pH = 3. 9 时,Hg( II ) 质量浓度为1. 0 mg/L 时去除率达最高 90. 7% .



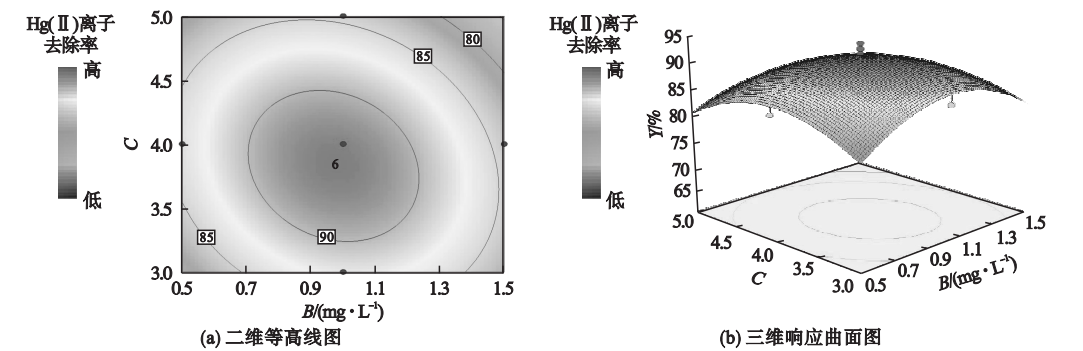


图 4 pH、Hg( II ) 离子质量浓度对去除率影响

Fig. 4 Effect of pH and Hg(II) ion mass concentration on removal rate

2.2 SFQ 吸附 Hg( II ) 离子响应曲面试验模型及显著性分析

根据 CCD 分析原理,进行多元回归拟合和方差分析. 3 因素最小二乘法拟合的二次多元回归方程为

$$Y = X_0 + X_1A + X_2B + X_3C + X_{12}AB + X_{13}AC + X_{23}BC + X_{11}A^2 + X_{22}B^2 + X_{33}C^2. \quad (1)$$

式中: $X_0$  多为常数项; $X_1, X_2, X_3$  多为常数项; $X_{12}, X_{13}, X_{23}$  为交叉项系数; $X_{11}, X_{22}, X_{33}$  为二次项系数.

将表 4 分析结果代入式(1),确定关于单因素,交叉项,平方项对 Hg( II ) 离子去除率的影响. 最终得到关于 Hg ( II ) 离子去除率的多元二次多项式为

$$Y = 91.62 - 1.13 \times A - 1.14 \times B - 1.95 \times C + 1.19 \times AB + 2.13 \times AC - 1.96 \times BC - 2.98A^2 - 6.65B^2 - 5.38 \times C^2. \quad (2)$$

图 5 为残差概率分布图.

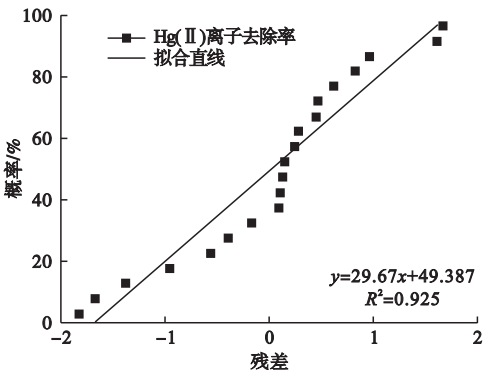


图 5 残差概率分布

Fig. 5 Residual probability distribution

从图 5 可以看出,影响 Hg( II ) 离子去除率的 Hg( II ) 离子质量浓度、pH、吸附时间 3 个因素的残差概率分布在拟合直线的两侧,接近拟合直线,模型的  $R^2$  为 0.925 大于 0.9,说明拟合模型准确反应了 3 种因素对 Hg( II ) 离子去除率影响的变化规律.

模型的方差分析及回归系数显著性检查结果如表 5 所示.

表 5 回归方程的方差分析

Table 5 Variance analysis of regression equation					
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	982.78	9	109.2	61.2	<0.000 1
A	12.75	1	12.75	7.15	0.023 3
B	13.04	1	13.04	7.31	0.022 2
C	38	1	38	21.3	0.001
AB	11.39	1	11.39	6.39	0.03
AC	36.17	1	36.17	20.27	0.001 1
BC	30.72	1	30.72	17.22	0.002
A <sup>2</sup>	24.49	1	24.49	13.73	0.004 1
B <sup>2</sup>	121.65	1	121.6	68.18	<0.000 1
C <sup>2</sup>	79.65	1	79.65	44.64	<0.000 1
残差	17.84	10	1.78	—	—
失拟项	12.97	5	2.59	2.66	0.153 3
纯误差	4.87	5	0.97	—	—
总和	1 000.62	19	—	—	—

对二次回归模型进行显著性  $P$  值分析,自变量  $C$  对 Hg( II ) 离子去除影响非常显著;自变量  $A, B$  对 Hg( II ) 离子去除影响显

著; $AB$ 、 $AC$ 、 $BC$  的  $P$  值较低,说明吸附时间与  $Hg(II)$  离子质量浓度、吸附时间与  $pH$ 、 $Hg(II)$  离子质量浓度与  $pH$  的影响显著性都较强,彼此有一定交互作用, $B^2$ 、 $C^2$  对  $Hg(II)$  离子去除率的曲面效应表现为极显著. 通过方差分析可知,模型  $F$  值 61. 2,  $P$  值  $<0.0001$ , 因此模型达到显著水平. 3 个因素对  $Hg(II)$  离子去除率影响大小的顺序依次为: $pH$ 、 $Hg(II)$  离子质量浓度、吸附时间. 模型的多元相关系数  $R^2 = 0.9822$ , 变异系数为  $1.59\% < 10\%$ , 表明此模型与实际情况拟合良好, 试验可信度与精度较高. 精密密度为 23. 565, 大于 4. 0 视为合理因此, 模型可以很好地拟合对  $Hg(II)$  离子去除率的影响过程.

2.3 CCD 试验模型优化结果及验证

利用 Design-Expert 软件进行试验结果优化,通过分析得到最佳参数为: $Hg( II )$  离子质量浓度 0. 96 mg/L, 初始  $pH$  3. 78, 反应时间 102. 94 min. 此时 SFQ 对水中  $Hg( II )$  离子去除率应为 92. 05% .

在最优条件下进行模型验证试验, 为方便实际操作, 将试验条件修正为  $Hg( II )$  离子质量浓度 1. 0 mg/L, 初始  $pH$  3. 8, 反应时间 103 min, 在此条件下进行 3 次平行试验, 模拟验证试验结果如表 6 所示.  $Hg( II )$  离子平均去除率为 91. 57% , 理论值与实测值误差为  $0.35\% < 2\%$  , 由此可以确定响应曲面 CCD 优化的 SFQ 去除  $Hg( II )$  最优条件是可行的, 预测模型可靠.

表 6 模拟验证试验

Table 6 Test for simulation verification			
试验次数	理论去除率/%	实际去除率/%	相对误差/%
1	92. 05	91. 61	0. 48
2	92. 05	91. 62	0. 47
3	92. 05	91. 48	0. 62
平均值	92. 05	91. 57	0. 52

3 结 论

(1) $Hg(II)$  离子质量浓度、吸附时间、 $pH$

3 因素均影响 SFQ 对  $Hg(II)$  离子去除率, 并且每两个因素之间都有显著的交互作用. 各因素对  $Hg( II )$  离子去除率影响大小顺序依次为: $pH$ 、 $Hg(II)$  离子质量浓度、吸附时间.

(2) 3 个影响因素的最佳取值为:  $Hg( II )$  离子质量浓度 1. 0 mg/L, 初始  $pH$  3. 8, 反应时间 103 min,  $Hg( II )$  离子去除率 92. 05% . 在此条件下进行 3 次平行验证试验,  $Hg( II )$  离子平均去除率为 91. 57% , 相对误差为  $0.35\% < 2\%$  , 证明模型优化得到的最佳参数可靠.

(3) SFQ 对污水中  $Hg( II )$  离子去除率较高, 且 SFQ 制备方法简单易行, 可以将 SFQ 应用于含汞废水的处理.

参考文献

[ 1 ] 周维娜. 金属有机框架材料吸附痕量  $Hg^{2+}$  研究[ D ]. 上海: 东华理工大学, 2015.  
( ZHOU Weina. The adsorption research of metal-organic frameworks materials for trace  $Hg^{2+}$  [ D ]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015. )

[ 2 ] 龙海洋, 王维生, 韦月越, 等. 矿区周边土壤中重金属形态分析及污染风险评价[ J ]. 广西大学学报( 自然科学版 ), 2016, 41 ( 5 ): 1677 - 1682.  
( LONG Haiyang, WANG Weisheng, WEI Yueyue, et al. Speciation analysis and pollution risk assessment of heavy metals in the soils surrounding mine area[ J ]. Journal of Guangxi university ( natural science edition ), 2016, 41 ( 5 ): 1677 - 1682. )

[ 3 ] YIN R S, FENG X B, SHI W F. Application of the stable-isotope system to the study of sources and fate of Hg in the environment: A review [ J ]. Applied geochemistry, 2010, 25 ( 10 ): 1467 - 1477.

[ 4 ] DIETZ R, SONNE C, BASU N, et al. What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota [ J ]. Science of the total environment, 2013, 443 ( 1 ): 775 - 790.

[ 5 ] 李江, 徐柯, 韩慧珏, 等. 电石法 PVC 生产中汞污染减排措施[ J ]. 聚氯乙烯, 2017, 45 ( 4 ): 41 - 44.  
( LI Jiang, XU Ke, HAN Huijue, et al. Mercury pollution reduction measures in calcium carbide based PVC production[ J ]. Polyvinyl chloride, 2017, 45 ( 4 ): 41 - 44. )

[ 6 ] DAYE M, KADECOVA M, OUDDANE B. Biogeochemical factors affecting the distribution, speciation, and transport of Hg species in the deule and lys rivers ( northern france ) [ J ]. Environmental science and

- pollution research international, 2015, 22(4): 2708 - 2720.
- [7] VANE C H, BERIRO D J, TURNER G H. Rise and fall of mercury (Hg) pollution in sediment cores of the Thames Estuary, London, UK [J]. Earth and environmental science transactions of the royal society of edinburgh, 2015, 105(4): 285 - 296.
  - [8] 杨杰, 谷新晰, 李晨, 等. 响应面法优化植物乳杆菌绿豆乳增殖培养基[J]. 中国食品学报, 2015, 15(12): 83 - 90.  
(YANG Jie, GU Xinxin, LI Chen, et al. Optimization of multiplying culture of mung bean milk of Lactobacillus plantrumby response surface method [J]. Journal of Chinese institute of food science and technology, 2015, 15(12): 83 - 90.)
  - [9] HU D, ZHANG W, CHEN L, et al. Mercury emissions from waste combustion in China from 2004 to 2010 [J]. Atmospheric environment, 2012, 62: 359 - 366.
  - [10] MERCOLA K. Mercury toxicity and systemic elimination agents [J]. Journal of nutritional environmental medicine, 2001, 11(1): 53 - 62.
  - [11] 陈卓尔. 农业秸秆活性炭改性及处理含汞废水的研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2016.  
(CHEN Zhuoer. Treatment of mercury wastewater by modified agricultural straw active carbon [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2016.)
  - [12] BAO S Y, LI K, NING P, et al. Highly effective removal of mercury and lead ions from wastewater by mercaptoamine-functionalised silica-coated magnetic nano-adsorbents: Behaviours and mechanisms[J]. Applied surface science, 2017, 393: 457 - 466.
  - [13] 吕佳勇. 电石法聚氯乙烯生产中含汞污水的治理探讨[J]. 化工管理, 2016(17): 264.  
(LÜ Jiayong. Discussion on treatment of mercury-containing sewage in the production of polyvinyl chloride by calcium carbide [J]. Chemical enterprise management, 2016(17): 264.)
  - [14] 王小昌, 李国栋, 李春华. 电石法聚氯乙烯含汞废水处理[J]. 聚氯乙烯, 2013, 41(4): 42 - 44.  
(WANG Xiaochang, LI Guodong, LI Chunhua. Treatment of mercury-containing wastewater from production of PVC by calcium carbide method [J]. Polyvinyl chloride, 2013, 41(4): 42 - 44.)
  - [15] 杨兴娟, 史志伟, 李开明. 含汞废水处理工艺运行常见问题及解决措施[J]. 中国氯碱, 2014(8): 37 - 39.  
(YANG Xingjuan, SHI Zhiwei, LI Kaiming. Operating problems and solutions about treatment process of mercury-containing wastewater [J]. China chlor-alkali, 2014(8): 37 - 39.)
  - [16] 赵述彬. 电石法聚氯乙烯生产行业的汞污染防治[J]. 化工环保, 2014, 34(5): 434 - 437.  
(ZHAO Shubin. Mercury pollution control in PVC production by calcium carbide process [J]. Environmental protection of chemical industry, 2014, 34(5): 434 - 437.)
  - [17] 唐志军, 王欣欣. 电石法 PVC 企业含汞废水的治理[J]. 聚氯乙烯, 2015, 43(6): 38 - 40.  
(TANG Zhijun, WANG Xinxin. Treatment of mercury containing waste water in calcium carbide process PVC producing enterprises [J]. Polyvinyl chloride, 2015, 43(6): 38 - 40.)
  - [18] 王晓焕, 黄富铭. 高效脱汞吸附材料在氯碱工业含汞废水深度处理中的应用[J]. 中国氯碱, 2015(9): 39 - 41.  
(WANG Xiaohuan, HUANG Fuming. Application of high-performance adsorbent for mercury removal in advanced treatment of chlor-alkali industrial wastewater containing mercury [J]. China chlor-alkali, 2015(9): 39 - 41.)
  - [19] 唐振平, 毕玉玺, 凌辉, 等. 改性硅基介孔材料去除废水中重金属研究进展[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2018, 32(5): 1 - 6.  
(TANG Zhenping, BI Yuxi, LING Hui, et al. Research progress on removal of heavy metals from wastewater by modified silicon-based mesoporous materials [J]. Journal of university of south China (science and technology), 2018, 32(5): 1 - 6.)
  - [20] 谢靖如, 陈本寿, 张进忠, 等. 巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) [J]. 环境科学, 2016(6): 2187 - 2194.  
XIE Qingru, CHEN Benshou, ZHANG Jinzhong, et al. Adsorption of Hg(II) in water by sulfydryl-modified sepiolite [J]. Environment science, 2016, 37(6): 2187 - 2194.)
  - [21] 王刚, 王馨, 宋小三, 等. 响应曲面法中 BBD 和 CCD 在优化巯基乙酰壳聚糖制备条件中的比较[J]. 环境工程学报, 2018, 12(9): 2502 - 2511.  
(WANG Gang, WANG Xin, SONG Xiaosan, et al. Comparison between BBD and CCD in response surface methodology to optimize preparation conditions of mercaptoacetylchitosan [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2018, 12(9): 2502 - 2511.)
  - [22] 张乐, 吕永康, 刘玉香, 等. 响应曲面法优化光合细菌 PB-Z 的产氢条件[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 6 - 10.  
(ZHANG Le, LÜ Yongkang, LIU Yuxiang, et al. Optimization of hydrogen production for photosynthetic bacteria by response surface methodology [J]. Environmental science & technology, 2016, 39(2): 6 - 10.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)