

响应面法优化壳聚糖/沸石分子筛吸附工艺

郜玉楠,王 静,茹雅芳,周历涛

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 确定壳聚糖/沸石分子筛去除氨氮和硝酸盐氮的最佳投加量和最佳吸附时间,并建立吸附模型,同时验证模型的准确度. 方法 通过响应面(Response Surface Methodology)试验设计方法,分析壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒对氨氮与硝酸盐氮去除的最佳投加量和最佳吸附时间. 结果 响应面法优化所得的最佳工艺条件为:壳聚糖/沸石分子筛投加量为6.5~7.0 g/L,吸附时间为6.0~6.5 h,在此条件下,原水中氨氮与硝酸盐氮的去除率达到最大,分别为80.2%与40.5%. 试验结果与模型预测值相近,理论值与实测值相对误差均不超过2%. 结论 响应面法优化壳聚糖/沸石分子筛吸附氨氮和硝酸盐氮工艺参数合理. 该新型吸附颗粒制备过程简单,操作方便,并能达到同步去除水中氨氮与硝酸盐氮的效果,可作为新型滤料用于北方地区水厂的提标改造.

关键词 壳聚糖;沸石分子筛;氨氮;硝酸盐氮

中图分类号 X523

文献标志码 A

Optimization of Chitosan/Zeolite Molecular Sieve Adsorption Process by Response Surface Methodology

GAO Yunan, WANG Jing, RU Yafang, ZHOU Litao

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

Abstract: Determine the optimal dosage and optimal adsorption time of chitosan/zeolite molecular sieve to remove ammonia nitrogen and nitrate nitrogen and establish the adsorption model, meanwhile, the accuracy of the model was verified. The optimal dosage and optimal adsorption time of ammonia/nitrate nitrogen removal by chitosan/zeolite molecular sieve adsorption particles were designed and analyzed by Response Surface Methodology. The optimum process conditions obtained by response surface methodology were as follows; the amount of chitosan/zeolite was 6.5 ~ 7.0 g/L, and the adsorption time was 6.0 ~ 6.5 h. Under this condition, the removal rate of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in raw water reached the maximum, 80.2% and 40.5%, respectively. The experimental results are close to the predicted values of the model. The relative error between the theoretical and measured values was less than 2%. It can be seen that the optimization

收稿日期:2018-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51508342);辽宁省自然科学基金项目(201602607);沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017008)

作者简介:郜玉楠(1981—),女,副教授,博士,主要从事饮用水安全与保障技术方面研究.

tion parameters of chitosan/zeolite molecular sieve adsorption process by response surface methodology are reasonable. The preparation process of the novel adsorption particles was simple, convenient to operate, and can achieve the effect of simultaneously removing ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in water, and can be used as a new filter material for the upgrading of water plants in northern regions.

Key words: chitosan; zeolite molecular sieve; ammonia nitrogen; nitrate nitrogen

由于氮肥的过量使用,工业、农业废水的不合理处置,导致地下水水源污染,尤其是浅层地下水中氨氮和硝酸盐氮的污染越来越严重.我国北方农村大部分地区主要以地下水作为饮用水源^[1-5],当水中氨氮与硝酸盐氮超标时,严重影响居民的饮用水安全,威胁人体健康^[6-8].

目前,我国净水厂普遍采用“混凝-沉淀-过滤-消毒”常规处理工艺,该工艺对于氨氮和硝酸盐氮的去除效果较差,当原水中含有过量的氨氮及硝酸盐氮时,出厂水的水质难以得到保证^[9-10].目前针对地下水中氨氮的去除方法主要有生物预处理法和曝气吹脱法.而生物预处理法构筑物占地面积大,基建投资高,并且受外界因素变化影响较大,在我国自来水管网的普及应用较少;曝气吹脱法需要将水体 pH 值上升到 10.5 或以上才能获得较好的去除效果,因此使用该方法去除氨氮时,出水需要降低 pH 值,增加处理费用,另外进入大气的气相氨氮会对大气造成二次污染^[11-12].对于硝酸盐氮超标的地下水,主要的处理方法有反渗透、电化学法.而反渗透的方法主要是通过反渗透膜来截留硝酸根离子,反渗透膜造价过高,而且预处理环节要求严格,运行费用也较高,所以目前使用

反渗透工艺来去除硝酸盐氮的水厂比较少^[13].电化学法处理硝酸盐氮过程较复杂,并且会在电极上产生多种含氮化合物,因此对水厂实际应用造成较大困难^[14-16].笔者试验采用的实验室自制壳聚糖/沸石分子筛作为新型吸附材料,主要是利用自身结构与离子交换作用来实现对氨氮和硝酸盐氮的去除,高效、无副产物、工艺简单、可再生重复利用.通过响应面试验设计方法,改变壳聚糖/沸石分子筛的投加量与吸附时间对氨氮与硝酸盐氮去除效果进行分析;设计并得出壳聚糖/沸石分子筛对氨氮与硝酸盐氮去除的最佳投加量和最佳吸附时间,为北方地区地下水氨氮和硝酸盐氮污染处理提供参考.

1 试 验

1.1 原水水质

试验原水模拟北方某地区受氨氮与硝酸盐氮污染的地下水,采用 NH₄Cl、KNO₃ 配置成 NH₄⁺-N 质量浓度为 4.5~5.0 mg/L, NO₃⁻-N 质量浓度为 28~30 mg/L 的水样.

1.2 试验仪器与材料

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
恒温干燥箱	202-00A	红杉实验设备厂
台式恒温振荡器	ZD-85A	常州中诚仪器制造有限公司
数显控温磁力搅拌器	85-2A	金坛市大地自动化仪器厂
电子分析天平	FA2104	上海科学实验仪器厂
紫外可见分光光度计	T52	上海元析仪器有限公司

表2 试验材料

Table 2 Test materials

药品名称	类型	生产厂家
氯化铵	分析纯	天津大茂化学试剂有限公司
碘化钾	分析纯	天津市风船化学试剂有限公司
碘化汞	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
酒石酸钾钠	分析纯	天津大茂化学试剂有限公司
氢氧化钠	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
硝酸钾	分析纯	天津大茂化学试剂有限公司
盐酸	分析纯	天津大茂化学试剂有限公司
氨基磺酸	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
乙酸	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
沸石分子筛	NaX 型	上海有新分子筛有限公司
壳聚糖	脱乙酰度 > 90	上海国药集团

1.3 壳聚糖/沸石分子筛的制备

称取一定量的沸石分子筛用去离子水多次洗涤,将洗涤过后的沸石分子筛放入105 ℃的干燥箱中干燥2 h,取出干燥后的沸石分子筛放入干燥器中备用.将5 g/L的壳聚糖溶解在2%乙酸溶液中,配置成壳聚糖乙酸溶胶;将经过处理的20 g沸石分子筛放入制得的壳聚糖乙酸溶胶中置于恒温振荡器,室温条件下,转速为130 ~ 150 r/min,振荡12 h后取出,置于60 ℃的真空干燥箱内干燥18 h,即制得壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒^[17](见图1).



图1 壳聚糖/沸石分子筛

Fig.1 Chitosan/zeolite molecular sieve

1.4 试验方法

通过响应面试验设计方法,以壳聚糖/沸石分子筛投加量和吸附时间作为自变量,确

定最佳投加量与最佳吸附时间^[18-19].在试验所需操作条件下对各自变量的低中高试验水平进行编码,由Design - Expert 8.0设计得出试验方案,并进行回归分析.

2 结果与分析

2.1 壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒去除氨氮的响应面试验

采用响应面分析法和中心组合设计(Central Composite Design),对壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒去除氨氮进行试验,选取壳聚糖/沸石分子筛的投加量 X_1 为1.0 ~ 10 g/L,吸附时间 X_2 为0.5 ~ 12 h,由Design Expert 8.0设计得到13个试验方案,并对试验后的数据进行拟合,对壳聚糖/沸石分子筛吸附氨氮的效果进行分析氨氮去除率 Y .根据中心组合设计原理,得到2因素3水平的13组试验,试验因素与水平的设计及试验结果分别见表3和表4.

表3 试验因素与水平

Table 3 Test factors and levels

水平	因素	
	$X_1/(g \cdot L^{-1})$	X_2/h
-1	1	0.5
0	5.5	6.25
1	10	12

表4 响应面实验方案及结果

Table 4 Response surface experiment scheme and result

试验序号	因素		Y/%
	$X_1/(g \cdot L^{-1})$	X_2/h	
1	-1	-1	23.2
2	1	-1	51.4
3	0	0	76.0
4	0	-1	42.3
5	0	0	77.2
6	0	1	75.3
7	0	0	76.4
8	-1	1	42.0
9	1	1	80.2
10	0	0	76.9
11	0	0	77.0
12	1	0	79.6
13	-1	0	37.0

2.1.1 氨氮去除效果响应面分析

响应面三维(3D)图可直观地表征响应面的函数形状,比较好地反映出壳聚糖/沸石分子筛的投加量,吸附时间以及交互作用对氨氮去除率的影响.二维等高线图则可反映出各因素的显著性,等高线图呈椭圆表示因变量的交互作用显著,呈圆形则表示交互作用不显著^[20].根据表4的试验数据,通过响应面试验分析可得到氨氮去除率的响应面三维(3D)图及二维等高线图(见图2).

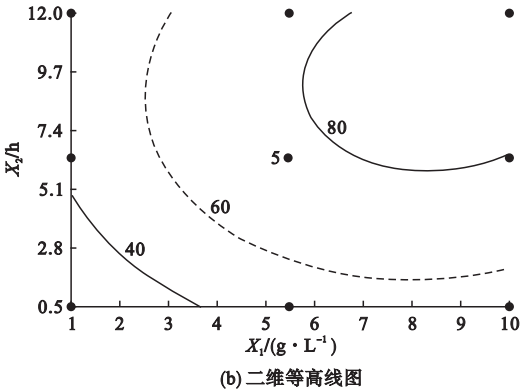
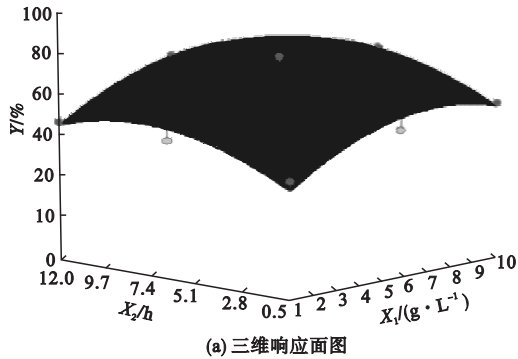


图2 氨氮去除效果的响应面图及二维等高线图

Fig. 2 Response surface methodology and two-dimensional contour map for removal efficiency of ammonia nitrogen

由图2可知,响应面图中响应曲面坡度较大,说明两种影响因素对吸附氨氮效果的影响较大.二维等高线图呈椭圆形,表明壳聚糖/沸石分子筛投加量与吸附时间的交互作用显著^[21].在吸附时间确定的条件下,随着壳聚糖/沸石分子筛投加量的增高,氨氮的去除效果逐渐升高,当增高到6.5~7.0 g/L时,氨氮的去除率保持在一定水平基本不变.当壳聚糖/沸石分子筛的投加量固定时,随着吸附时间的增大,氨氮的去除率也呈现先增大后趋于稳定的变化.从三维响应面图与二维等高线图分析可以看出,当壳聚糖/沸石分子筛的投加量为6.5~7.0 g/L,吸附时间为6.0~6.5 h时,氨氮的去除率达到最大,为80.2%.

2.1.2 壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒对氨氮吸附响应面试验模型建立与分析

在表4的基础上,采用多元二次多项式拟合壳聚糖/沸石分子筛的投加量,吸附时间两者因素与氨氮去除率的函数关系,得到关于氨氮去除率的响应值曲面模型:

$$Y=4.733+11.121 \times X_1+6.966 \times X_2+0.0966 \times X_1X_2-0.6989 \times X_1^2-0.4129 \times X_2^2.$$
 (1)

图3为残差概率分布图,在进行回归方程的分析中,测定值和回归方程预测值的差是残差δ.由图3可以看出,壳聚糖/沸石分子筛的投加量和吸附时间对氨氮的吸附效果

影响规律的残差概率分布在拟合直线上和直线的两侧,模型的 R^2 为 0.977 3 大于 0.9,说明拟合模型能够较为准确地反应不同条件组合下氨氮去除率的变化规律.

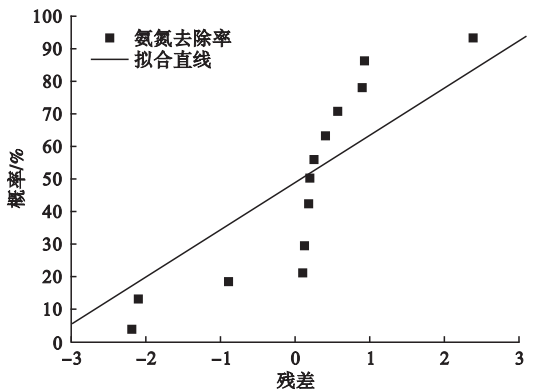


图3 残差概率分布

Fig. 3 The studentized residuals and normal probability plot

模型的方差分析及回归系数显著性检查结果如表 5 所示. 表中 F 值表示回归均方差与实际误差的比值, P 值反应模型的显著性, F 值越大, P 值越小则相关性越高,表明模型为显著水平^[22]. 对二次回归模型进行显著性分析,由表 5 可知,自变量 X_1 和 X_2 对氨氮的去除均影响显著; X_1 和 X_2 的 P 值较低,说明改性颗粒的投加量与吸附时间的影响显著性较强,两者有一定交互作用, X_1^2, X_2^2 对氨氮去除率的曲面效应均表现显著. 通过方差分析可知,模型 F 值为 60.14, P 值 $<0.000\ 1$,因此模型达到显著水平,模型的多元相关系数 $R^2=0.977\ 3$,说明在整个被研究的区间内拟合度较高^[23-24]. *, **, *** 分别表示 $P < 0.05, P < 0.01$ 水平差异,具有统计学意义.

表5 回归方程的方差分析

Table 5 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	F 值	P 值	显著性
模型	4 812.60	5	60.14	$<0.000\ 1$	***
X_1	1 980.17	1	123.72	$<0.000\ 1$	***
X_2	1 082.73	1	67.65	$<0.000\ 1$	***
$X_1 X_2$	25.00	1	1.56	0.025 15	**
X_1^2	553.13	1	34.56	0.000 6	***
X_2^2	514.74	1	32.16	0.000 8	***
残差	112.03	7	—	—	—
失拟项	117.07	3	154.27	0.000 1	***
纯误差	0.96	4	—	—	—
总和	4 924.63	12	—	—	—

2.2 壳聚糖/沸石分子筛去除硝酸盐氮的响应面试验

通过响应面分析法和中心组合设计,对壳聚糖/沸石分子筛去除硝酸盐氮进行试验,选取壳聚糖/沸石分子筛的投加量 A 为 1.0 ~ 10 g/L,吸附时间 B 为 0.5 ~ 12 h 作为自变量,确定最佳投加量与最佳吸附时间. 由 Design Expert 8.0 设计得到 13 个试验方案,并对试验后的数据进行拟合,对壳聚糖/沸石分子筛吸附硝酸盐氮的效果进行分析,得到

硝酸盐氮去除率 Z . 根据中心组合设计原理,得到 2 因素 3 水平的 13 组试验,试验因素与水平的设计及试验结果分别见表 6 和表 7.

表6 试验因素与水平

Table 6 Test factors and levels

水平	因素	
	$A/(g \cdot L^{-1})$	B/h
-1	1	0.5
0	5.5	6.25
1	10	12

表7 响应面实验方案及结果

Table 7 Response surface experiment scheme and result result

试验序号	因素		Z/%
	A/(g·L ⁻¹)	B/h	
1	1	0	40.5
2	0	0	39.6
3	0	0	39.5
4	1	1	39.3
5	0	-1	17.6
6	1	-1	24.1
7	0	0	40.1
8	-1	0	14.3
9	0	1	37.2
10	0	0	40
11	-1	-1	10.2
12	0	0	39.8
13	-1	1	12.1

2.2.1 硝酸盐氮去除效果响应面分析

在表6的基础上,分析两个自变量对硝酸盐氮去除率的影响,从而确定,在 原水硝酸盐氮质量浓度为 28~30 mg/L 的条件下,壳

聚糖/沸石分子筛吸附颗粒的最佳投加量与最佳吸附时间. 经 Design Expert 8.0 分析,得到响应面三维图(3D)与二维等高线图(见图4). 由图4可知,响应面图中响应曲面坡度较大,说明两种影响因素对吸附硝酸盐氮效果的影响较大. 二维等高线图呈椭圆形,表明壳聚糖/沸石分子筛投加量与吸附时间对硝酸盐氮去除率的影响作用显著. 由响应面图可以看出,随着壳聚糖/沸石分子筛的投加量与吸附时间的增大,硝酸盐氮的去除率变化趋势为先升高后缓慢降低,曲面呈现凸面. 在吸附时间确定的条件下,随着壳聚糖/沸石分子筛投加量的增高,硝酸盐氮的去除效果逐渐升高,当增高到 6.5~7.0 g/L 时,硝酸盐氮的去除率保持在一定水平基本不变. 当壳聚糖/沸石分子筛的投加量固定时,随着吸附时间的增大,硝酸盐氮的去除率呈现先增大后略微降低的趋势. 从响应面三维图与二维等高线图分析可看出,当壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒的投加量为 6.5~7.0 g/L,吸附时间为 6.0~6.5 h 时,硝酸盐氮的去除率可达到 40.5%.

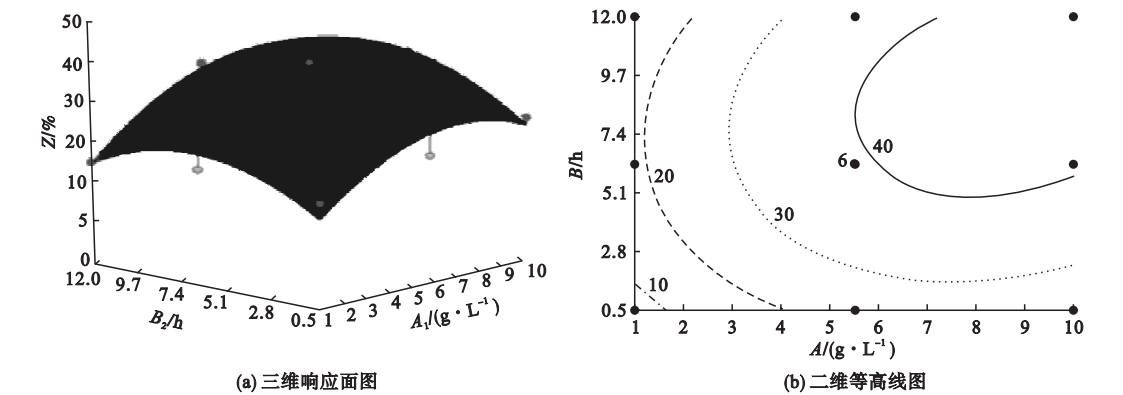


图4 硝酸盐氮去除效果的响应面图及二维等高线图

Fig. 4 Response surface methodology and two-dimensional contour map for removal efficiency of nitrate nitrogen

2.2.2 壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒对硝酸盐氮吸附响应面试验模型建立与分析

在表7的基础上,采用多元二次多项式拟合壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒的投加量,吸附时间两者因素与硝酸盐氮去除率函数关系,得硝酸盐氮去除率的响应值曲面模型:

$$Z = 6.8076 \times A + 4.06 \times B + 0.1411 \times AB - 0.470 \times A^2 - 0.298 \times B^2 - 2.70. \quad (2)$$

图5为残差概率分布. 可以看出,壳聚糖/沸石分子筛的投加量和吸附时间对硝酸盐氮的吸附效果影响规律残差概率分布在拟合直线的两侧,接近拟合直线,模型 R² 为

0.969 0 大于 0.9,说明拟合模型能较为准确反应不同条件组合下硝酸盐氮去除率变化规律.

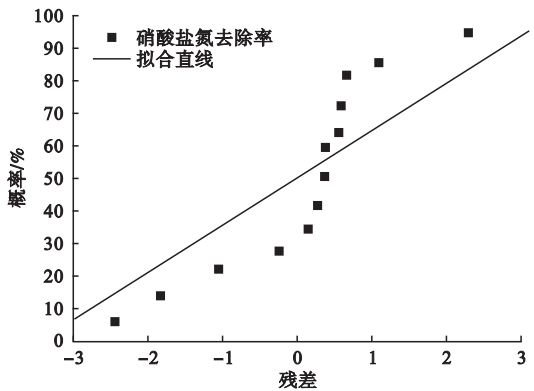


图5 残差概率分布

Fig.5 The studentized residuals and normal probability plot

模型的方差分析及回归系数显著性检查结果如表 8 所示,对二次回归模型进行显著性 P 值分析,自变量 A 和 B 对硝酸盐氮的去除均影响显著; AB 的 P 值较低,说明壳聚糖/沸石分子筛的投加量与吸附时间的影响显著性较强,两者有一定交互作用, A^2 、 B^2 对硝酸盐氮去除率的曲面效应均表现为极显著.通过方差分析可知,模型 F 值为 43.71, P 值 $<0.000\ 1$,因此模型达到显著水平,模型的多元相关系数 $R^2=0.969\ 0$,说明在整个被研究的区间内拟合度较高^[24]. **, *** 分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$ 水平差异,具有统计学意义.

表 8 回归方程的方差分析

Table 8 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 906.89	5	381.38	43.71	$<0.000\ 1$	***
A	772.94	1	772.94	88.58	$<0.000\ 1$	***
B	243.21	1	243.21	27.87	0.001 1	**
AB	53.29	1	53.29	6.11	0.042 8	**
A^2	249.90	1	249.90	28.64	0.001 1	**
B^2	268.62	1	268.62	30.78	0.000 9	***
残差	61.08	7	8.73	—	—	—
失拟项	60.91	3	20.30	472.16	$<0.000\ 1$	***
纯误差	0.17	4	0.043	—	—	—
总和	1 967.97	12	—	—	—	—

2.3 氨氮与硝酸盐氮吸附模型优化结果及验证

根据回归方程和响应面分析确定的理论值,采用试验对所得模型进行验证,即在壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒的投加量为 6.5 g/L,吸附时间为 6.0 h 时,氨氮与硝酸盐氮的去除率,对比实测值和理论值误差,进一步确定回归模型的准确性和实用性.

图 6 为理论值与实测值误差分析,当壳聚糖/沸石分子筛的投加量为 6.5 g/L,吸附时间为 6.0 h 时,回归方程计算的氨氮与硝酸盐氮去除率的理论值为 78.2% 与

40.6%,在相同条件下进行 3 次试验,实测的氨氮与硝酸盐氮的去除率分别为 78.0%、78.9%、78.6% 与 40.4%、40.1%、41.2%.从图 6 可以看出,在不同试验的条件下的理论值与实测值相对误差均不超过 2%.由此可确定,在原水氨氮质量浓度为 4.5 ~ 5.0 mg/L,硝酸盐氮质量浓度为 28 ~ 30 mg/L 的条件下,通过响应面法建立的模型对氨氮,硝酸盐氮的去除具有较好的预测效果,所得最佳工艺参数可为水厂实际工程应用提供技术参考.

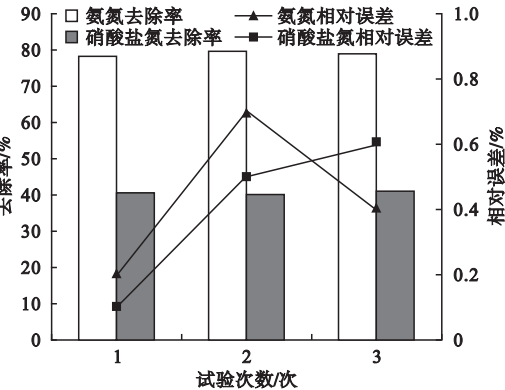


图6 理论值与实测值误差分析

Fig. 6 Error analysis between theoretical and measured values

3 结 论

(1)通过响应面试验设计方法得到当壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒最佳投加量为6.5~7.0 g/L,最佳吸附时间为6.0~6.5 h时,原水中氨氮与硝酸盐氮的去除率达到最大,分别为80.2%与40.5%。

(2)根据回归方程和响应面分析确定的理论值,采用试验对所得模型进行验证,试验结果与模型预测值相近,理论值与实测值相对误差均不超过2%,可见响应面法优化壳聚糖/沸石分子筛吸附氨氮和硝酸盐氮工艺参数合理。

(3)壳聚糖/沸石分子筛吸附颗粒制备过程简单,操作方便,并能达到同步去除水中氨氮与硝酸盐氮的效果,可作为新型滤料用于北方地区水厂的提标改造。

参考文献

[1] 吴方力. 地下水污染场地污染的控制与修复[J]. 大科技, 2013(9): 171-172.
(WU Fangli. Ground water pollution control and remdiation[J]. Super science, 2013(9): 171-172.)

[2] 于树宾. 南水北调中线焦作典型区地下水系统污染物特征研究[D]. 济南: 济南大学, 2012.
(YU Shubin. Study on pollutant characteristics of groundwater pollution in Jiaozuo site of the Middle South-to-north water diversion project

[D]. Jinan: Jinan University, 2012.)

[3] WANG Y, QU J, LIU H, et al. Adsorption and reduction of nitrate in water on hydrotalcite-supported Pd-Cu catalyst[J]. Catalysis today, 2007, 126(3/4): 476-482.

[4] 李彤岩, 傅金祥. 辽宁城镇供水水质安全面临的挑战与保障对策[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2002, 18(4): 285-288.
(LI Tongyan, FU Jinxiang. Challenges and guarantee countermeasures for water quality safety of urban water supply in Liaoning[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2002, 18(4): 285-288.)

[5] 唐婧, 陈金楠, 肖亚男, 等. 不同条件下耐盐脱氮复合菌剂的脱氮特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(6): 1133-1139.
(TANG Jing, CHEN Jinnan, XIAO Yanan, et al. Denitrification characteristics of halophilic denitrification complex microbial inoculants under different conditions[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013, 29(6): 1133-1139.)

[6] 李奇聪. 氮素超标地下水源饮用水处理厂工艺改造研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
(LI Qicong. Process transformation design of water treatment plant with nitrogen over the criteria for groundwater sources [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)

[7] 刘刚. 生活饮用水中的氨氮污染问题探讨[J]. 中国高新技术企业, 2011(27): 146-148.
(LIU Gang. Discussion on ammonia nitrogen pollution in drinking water[J]. Chinese high-tech enterprises, 2011(27): 146-148.)

[8] 赵玉华, 李妍, 刘芳蕊, 等. 有机物与氨氮污染对含铁锰地下水接触氧化过滤的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(4): 746-750.
(ZHAO Yuhua, LI Yan, LIU Fangrui, et al. Effect of grounder water containing iron and manganese ammonium and organics pollutants on the contact oxidation filter treatment[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2011, 27(4): 746-750.)

[9] BOND T, HUANG J, TEMPLETON M R, et al. Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water-a review[J]. Water research, 2011, 45(15): 4341.

[10] 赵阳. 水质变动条件下传统水处理工艺优化中试研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
(ZHAO Yang. Traditional water treatment

- process optimization of pilot study under the condition of the water quality change[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2016.)
- [11] BI J J, PENG C S, XU H Z, et al. Removal of nitrate from groundwater using the technology of electrodialysis and electrodeionization[J]. Desalination & water treatment, 2011, 34(1-3):394-401.
- [12] 周荣清. 还原沉淀-吹脱-MAP工艺处理 V_2O_5 生产废水的试验及应用研究[D]. 海南:海南大学,2010.
(ZHOU Rongqing. A research on experimental and applied of the wastewater treatment from V_2O_5 production by reduction-sedimentation-air stripping-MAP process[D]. Hainan:Hainan University,2010.)
- [13] RICHARDS L A, VUACHERE M, SCHAFFER A I, et al. Impact of pH on the removal of fluoride, nitrate and boron by nanofiltration/reverse osmosis[J]. Desalination, 2010, 261(3):331-337.
- [14] ROUSSELOT S, GUAY D, ROUE L. Comparative study on the structure and electrochemical hydriding properties of MgTi, Mg 0.5 Ni 0.5 Ti and MgTi 0.5 Ni 0.5, alloys prepared by high energy ball milling[J]. Journal of power sources, 2011, 196(3):1561-1568.
- [15] WANG Y, QU J, LIU H, et al. Adsorption and reduction of nitrate in water on hydrotalcite-supported Pd-Cu catalyst[J]. Catalysis today, 2007, 126(3/4):476-482.
- [16] 郜玉楠, 孙美乔, 周历涛, 等. 响应曲面优化改性壳聚糖强化混凝处理硝酸盐研究[J]. 环境工程, 2018, 36(3):33-37.
(GAO Yunan, SUN Meiqiao, ZHOU Litao, et al. Study on optimization of modified chitosan for remapval of nitrate by response surface methodology[J]. Environmental engineering, 2018, 36(3):33-37.)
- [17] 郜玉楠, 孙美乔, 周历涛. 一种改性壳聚糖/沸石/纳米锆吸附剂的制备方法及应用: CN106622162A[P]. 2017-05-15.
(GAO Yunan, SUN Meiqiao, ZHOU Litao. Preparation and application of modified chitosan/zeolite/nano-zirconium adsorbent: CN106622162A[P]. 2017-05-15.)
- [18] 陈树人, 蒋成宠, 姚勇, 等. 水稻秸秆压块热值模型构建及其影响因子相关性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24):200-208.
(CHEN Shuren, JIANG Chengchong, YAO Yong, et al. Establishment of predicted model of calorific value for rice straw briquetting and analysis of correlation of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2014, 30(24):200-208.)
- [19] 任浩华, 关杰, 王芳杰, 等. 采用 Design-Expert 软件优化高频气力分选机风量配合设计[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(7):27-30.
(REN Haohua, GUAN Jie, WANG Fangjie, et al. Optimal design of the air volumes of high-frequency vibration air separator by design-expert[J]. Environmental pollution and control, 2013, 35(7):27-30.)
- [20] 赵瑾, 王文华, 姜天翔, 等. 响应面法优化石英砂负载壳聚糖去除海水中磷的吸附条件[J]. 盐业与化工, 2017, 46(2):19-24.
(ZHAO Jin, WANG Wenhua, JIANG Tianxiang, et al. Condition Optimization for adsorption of phosphate in seawater by chitosan coated quartz sand using response surface methodology[J]. Journal of salt science and chemical industry, 2017, 46(2):19-24.)
- [21] YE Z L, CHEN S H, WANG S M, et al. Phosphorus recovery from synthetic swine wastewater by chemical precipitation using response surface methodology[J]. Journal of hazardous materials, 2010, 176(1/3):1083-1088.
- [22] YETILMEZSOY K, DEMIREL S, VANDERBEI R J. Response surface modeling of Pb(II) removal from aqueous solution by pistacia vera l. :Box-Behnken experimental design[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 171(1/3):551-562.
- [23] MATSUBARA K, KEITA U A, SHIBATA Y. Synthesis and structures of nickel halide complexes bearing mono-and bis-coordinated N-heterocyclic carbene ligands, catalyzing grignard cross-coupling reactions[J]. Organometallics, 2006, 25(14):3422-3427.
- [24] 唐霁旭, 王志伟, 牟晓明, 等. 利用响应面分析法优化低浓度城镇污水中有机质回收[J]. 水处理技术, 2014(1):66-72.
(TANG Jixu, WANG Zhiwei, MOU Xiaoming, et al. Optimization of organic matter recovery from low-concentration urban wastewater by using response surface methodology[J]. Technology of water treatment, 2014(1):66-72.)