DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.10

响应面法优化混凝处理黄河兰州段低温低浊水

闫晓涛[1], 李 杰[1,2], 冯淑琪[2], 李玉皎[2]
(1.兰州城市供水(集团)有限公司, 甘肃 兰州 730060; 2.兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为进一步提高混凝法对冬季黄河兰州段低温低浊水中浊度、有机物、氨氮的去除效果,采用响应面 Box-Behnken 的中心组合设计方法,研究了混凝剂(PFAC)投加量、助凝剂(PAM)投加量、絮凝转速与絮凝时间及其交互作用对浊度、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和氨氮去除率的影响。结果表明:混凝法的最佳控制参数为混凝剂投加量7.87 mL、助凝剂投加量6.06 mL、絮凝时间37 min、絮凝转速90 r/min。在此最佳反应条件下,浊度、高锰酸盐指数、氨氮去除率分别为16.3%、19.7%、14.7%。混凝出水再经砂滤后,出水浊度为0.76 NTU、COD_{Mn}为2.72 mg/L、氨氮为0.44 mg/L,达到了生活饮用水水质标准(GB5749-2006)。研究结果为兰州城市供水(集团)有限公司处理工艺升级改造提供了技术支持。

关键词: 低温低浊水; 响应面法; 混凝工艺; 污染物去除; 黄河兰州段
中图分类号:TU991.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2018)06-0068-07

Optimization of coagulation treatment of low-temperature and low-turbidity water in Lanzhou section of the Yellow River by response surface method

YAN Xiaotao[1], LI Jie[1,2], FENG Shuqing[2], LI Yujiao[2]
(1. *Lanzhou City Water Supply (Group) Co., Ltd., Lanzhou*, 730060, *China*; 2. *School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract: In order to improve the removal efficiency of turbidity, organic matter (COD_{Mn}), and ammonia nitrogen in the low temperature and low turbidity water of the Yellow River in Lanzhou by the coagulation method, the Box-Behnken's center combination design method was used to study the effects of PFAC coagulant dosage, PAM coagulant dosage, flocculation speed and flocculation time and their interactions on turbidity removal, permanganate index removal, and ammonia nitrogen removal. The results show that the best removal conditions of turbidity, organic matter and ammonia nitrogen are as follows: PFAC Coagulant dosage 7.87 mL, PAM coagulant dosage 6.06 mL, flocculation time 37 min, flocculation speed 90 r/min, respectively. Under the optimal conditions, the removal efficiencies of turbidity, COD_{Mn} and ammonia nitrogen were 16.3%, 19.7%, and 14.7%, respectively. The turbidity is 0.76 NTU, the permanganate index is 2.72 mg/L, and the ammoniacal nitrogen is 0.44 mg/L after the coagulated effluent was filtered through sand. which suggest that the effluent can meet the "Standards for Drinking Water Quality" (GB 5749-2006). The research results provide technical support for the upgrade and reconstruction of the treatment process of Lanzhou City Water Supply (Group) Co., Ltd.

Key words: low temperature and low turbidity water; response surface method; coagulation method; pollutants removal; Lanzhou section of Yellow River

1 研究背景

冬季黄河水源水长期处于水温低于10℃、浊度低于10 NTU的低温低浊状态[1-2]。低温会使水处理药剂水解不彻底,同时由于水中浊质颗粒过少,混凝时颗粒间凝聚、碰撞几率减少,不易形成絮体[3-5],导致常规给水混凝工艺处理效果较差,这成为黄河沿线水厂冬季水处理中水质保障的一个主要

收稿日期:2018-04-16; **修回日期**:2018-06-26
基金项目:国家重点研发项目(2016YFC0400705)
作者简介:闫晓涛(1966-),男,山西河津人,学士,高级工程师,研究方向为水处理。
通讯作者:李 杰(1964-),男,甘肃天水人,博士,教授,研究方向为水污染防治。

难题。目前,给水厂处理低温低浊水时,通常采取增加絮凝剂的投药量,甚至投加黏土等附加微粒作为絮凝介质等处理措施以提高水处理效果[6-9],但这种方法不仅提高了处理成本,而且还将导致污泥量增加、滤池过滤周期缩短、混凝剂残余量升高等问题,给净水设施的维护和管理带来很大的弊端[10]。

兰州城市供水集团以黄河兰州段为水源水,目前采用预沉池→机械加速澄清池/平流式沉淀池→V 型滤池工艺处理冬季黄河低温低浊水。在混凝沉淀过程中混凝剂投加量较大,导致水处理成本有所增加。优化混凝工艺中混凝剂与助凝剂配比及投加条件,可有效降低水处理成本,提高出水水质,是保障水质安全的有效手段。

通过统计学方法构建反应模型有利于优化反应条件,提高处理效果。响应面分析法在国内外均有大量研究[11-13],其能根据少量具有代表性的实验建立各因素与实验结果数学模型,可预测出最佳区域响应最优值,进一步优化工艺条件,并可揭示各交互作用内在联系。

本研究根据冬季黄河兰州段给水厂源水低温低浊的水质特点,采用响应面法对混凝工艺进行优化,以期为本厂技术革新和工艺优化提供技术支持。

2　材料和方法

2.1　材料与仪器

材料:采用聚合氯化铝铁(PFAC)为混凝剂(含 Al:0.5%、Fe:0.03%),聚丙烯酰胺(PAM)为助凝剂,均为兰州城市供水集团自配药剂,具有价格低廉,处理效果稳定的特点。

仪器:721N 型可见分光光度计(上海精科仪器有限公司);DK-98-II 型六孔恒温水浴锅(天津市奥斯特仪器有限公司);2100P 型浊度仪(哈希水质分析仪器有限公司);JJ-4A 型六联搅拌机(常州国华电器有限公司);SHB-3A 型循环抽滤装置(郑州杜甫仪器厂)和规格为 Φ50 mm、孔径为 0.45 μm 微孔滤膜(上海兴亚净化材料厂)。

砂滤实验装置:实验用砂取自兰州供水集团,砂砾粒径为 0.8~1.5 mm,不均匀系数为 2,有效过滤高度为 0.7 m,滤速为 10 m/h。

2.2　实验方法

实验取水时间为 2017 年 12 月,取水后立即测定水质参数。测定结果为:温度(5.01±0.24℃)、浊度(8.15±0.19 NTU)、高锰酸盐指数(4.89±0.22 mg/L)、氨氮(0.80±0.02 mg/L)。各项指标均采用国家标准分析法进行测定。

通过对影响因素的单因素分析,确定本实验的主要影响因素有 4 个:混凝剂 PFAC 投加量、助凝剂 PAM 投加量、絮凝时间、絮凝转速。根据响应面分析法的 Box-Behnken 设计,对 4 个显著性因素进行优化,优化 4 个因素的最佳水平点,获得最佳优化条件,并进行实验验证。实验重复 3 次。

3　结果与讨论

3.1　Box-Behnken 设计结果与响应面分析

根据 Box-Behnken 中心组合设计原理[14],以混凝剂投加量、助凝剂投加量、絮凝时间、絮凝转速 4 个因素为自变量(分别以 X_1,X_2,X_3,X_4 表示),以浊度去除率、高锰酸盐指数去除率、氨氮去除率为响应值设计了 4 因素 3 水平共 29 个实验点的响应面分析实验,实验因素水平及编码如表 1 所示。

表 1　响应面分析因素与水平

水平	混凝剂投加量 X_1/mL	助凝剂投加量 X_2/mL	絮凝时间 X_3/min	絮凝转速 X_4/(r·min^{-1})
-1	6	4	30	80
0	8	6	35	90
1	10	8	40	100

实验以随机次序进行,将实验所得的浊度去除率、高锰酸盐指数去除率、氨氮去除率用 Design-Expert8.0.6 软件进行分析,得出响应面分析图、回归拟合方程以及方差分析表,响应面实验设计及结果见表 2。

利用 Design-Expert 8.06 软件对表 2 实验数据进行多元回归拟合,各响应值回归分析结果如表 3 所示,同时得到浊度去除率(Y_1)、高锰酸盐指数去除率(Y_2)、氨氮去除率(Y_3)对混凝剂投加量(X_1)、助凝剂投加量(X_2)、絮凝时间(X_3)及絮凝转速(X_4)的二次回归模型为:

$$Y_1 = 16.29 - 1.47X_1 + 0.091X_2 - 0.28X_3 - 0.048X_4 - 1.09X_1X_2 - 1.03X_1X_3 + 1.19X_1X_4 - 0.022X_2X_3 - 1.65X_2X_4 + 1.24X_3X_4 - 2.57X_1^2 - 1.64X_2^2 + 0.078X_3^2 - 2.97X_4^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 19.89 + 1.36X_1 + 1.02X_2 - 0.064X_3 + 0.76X_4 - 1.02X_1X_2 - 0.64X_1X_3 - 0.69X_1X_4 + 0.37X_2X_3 - 0.53X_2X_4 - 0.45X_3X_4 - 1.830X_1^2 - 4.54X_2^2 - 0.91X_3^2 - 4.73X_4^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 14.22 + 1.90X_1 - 0.74X_2 + 1.73X_3 - 0.52X_4 - 1.61X_1X_2 - 1.68X_1X_3 - 3.48X_1X_4 - 1.41X_2X_3 +$$

$$0.81X_2X_4 - 2.65X_3X_4 - 0.88X_1^2 - 3.52X_2^2 - 0.66X_3^2 - 6.87X_4^2 \quad (3)$$

对二次回归方程的方差分析及显著性检验结果如表 3、4 所示。

模型方差的分析及显著性检验是衡量模型设计合理性及预测能力的重要方式。Y_1 模型的 F 值为 41.67，P 值 < 0.0001；Y_2 模型的 F 值为 15.28、P 值 < 0.0001；Y_3 模型的 F 值为 22.44，P 值 < 0.0001，模型失拟项分别为 0.4064、0.7847、0.2359，均大于 0.05，说明 3 个模型均是显著的，可信度高，模拟精确。由表 4 可知，模型的信噪比分别为 22.009、13.831、13.730，均大于 4，说明 3 个模型均提供了一个足够的信号来响应该设计，表明模型真实度高；相关系数 $R_1^2 = 0.9766$、$R_2^2 = 0.9386$、$R_3^2 = 0.9573$，均大于 0.8，表明模型的拟合程度良好，实验误差小；模型的校正决定系数 $R_{adj1}^2 = 0.9531$、$R_{adj2}^2 = 0.8771$、$R_{adj3}^2 = 0.9147$，表明 3 个模型分别能解释 95.31%、87.71%、91.47% 响应值的变化，仅有总变异的 4.69%、12.29、8.53% 不能用此模型来解释，模型具有较好的回归性。综上，该模型可以用来分析和预测混凝实验对低温低浊水的浊度、高锰酸盐指数、氨氮的去除。

表 2 响应面实验设计及结果

序号	X_1：混凝剂投加量/mL	X_2：助凝剂投加量/mL	X_3：絮凝时间/min	X_4：絮凝转速/(r·min^{-1})	Y_1：浊度去除率/%	Y_2：高锰酸盐指数去除率/%	Y_3：氨氮去除率/%
1	10	6	35	100	10.85	15.91	5.19
2	8	6	35	90	16.69	21.49	14.09
3	8	8	35	100	10.19	12.49	3.08
4	6	6	30	90	14.22	15.80	8.66
5	8	8	40	90	14.96	16.82	9.42
6	6	4	35	90	12.56	9.77	6.03
7	10	6	35	80	8.81	14.61	11.08
8	8	6	35	90	16.54	21.05	15.07
9	6	6	40	90	15.88	16.05	14.31
10	8	6	35	90	16.63	19.93	14.77
11	8	8	35	80	12.98	11.46	5.03
12	8	6	30	80	14.89	12.78	2.38
13	8	6	35	90	15.79	20.47	13.07
14	10	6	40	90	11.00	16.31	14.74
15	8	4	30	90	15.18	13.71	7.37
16	8	8	30	90	15.78	15.71	8.15
17	10	8	35	90	9.00	15.22	9.42
18	6	6	35	80	13.75	10.30	0.32
19	8	6	35	90	15.79	21.49	14.09
20	6	6	35	100	11.01	14.36	8.36
21	10	6	30	90	13.47	18.60	14.81
22	8	6	40	80	11.91	13.94	10.67
23	8	6	40	100	13.95	14.81	3.76
24	8	4	40	90	14.45	13.34	14.27
25	6	8	35	90	14.60	13.59	7.81
26	8	6	30	100	11.96	15.44	7.05
27	8	4	35	100	13.37	9.92	4.12
28	8	4	35	80	9.56	8.78	6.61
29	10	4	35	90	11.30	15.49	14.09

表 3　浊度、高锰酸盐指数和氨氮去除率回归方程的方差分析

方差来源	Y_1 回归分析结果						Y_2 回归分析结果						Y_3 回归分析结果					
	平方和	自由度	均方	F 值	$P>F$ 值	显著性	平方和	自由度	均方	F 值	$P>F$ 值	显著性	平方和	自由度	均方	F 值	$P>F$ 值	显著性
模型	155.06	14	11.08	41.67	<0.0001	**	289.44	14	20.67	15.28	<0.0001	**	546.6	14	39.04	22.44	<0.0001	**
X_1	25.78	1	25.78	97.01	< 0.0001	**	22.06	1	22.06	16.3	0.0012	**	43.47	1	43.47	24.99	0.0002	**
X_2	0.099	1	0.099	0.37	0.5514		12.57	1	12.57	9.29	0.0087	**	6.57	1	6.57	3.78	0.0723	
X_3	0.94	1	0.94	3.52	0.0817		0.049	1	0.049	0.037	0.8512		35.88	1	35.88	20.62	0.0005	**
X_4	0.027	1	0.027	0.1	0.7543		6.84	1	6.84	5.05	0.0412	*	3.23	1	3.23	1.86	0.1943	
X_1X_2	4.71	1	4.71	17.72	0.0009	**	4.18	1	4.18	3.09	0.1006		10.4	1	10.4	5.98	0.0283	*
X_1X_3	4.26	1	4.26	16.04	0.0013	**	1.61	1	1.61	1.19	0.2934		11.29	1	11.29	6.49	0.0232	*
X_1X_4	5.71	1	5.71	21.49	0.0004	**	1.9	1	1.9	1.41	0.2553		48.51	1	48.51	27.88	0.0001	**
X_2X_3	0.00203	1	0.00203	0.0076	0.9317		0.55	1	0.55	0.4	0.535		7.92	1	7.92	4.55	0.051	
X_2X_4	10.89	1	10.89	40.97	< 0.0001	**	1.11	1	1.11	0.82	0.3798		2.62	1	2.62	1.51	0.2396	
X_3X_4	6.18	1	6.18	23.23	0.0003	**	0.8	1	0.8	0.59	0.4545		27.98	1	27.98	16.08	0.0013	**
X_1^2	42.92	1	42.92	161.48	< 0.0001	**	21.62	1	21.62	15.97	0.0013	**	5.05	1	5.05	2.91	0.1104	
X_2^2	17.39	1	17.39	65.43	< 0.0001	**	133.65	1	133.65	98.76	< 0.0001	**	80.5	1	80.5	46.27	< 0.0001	**
X_3^2	0.039	1	0.039	0.15	0.707		5.41	1	5.41	4	0.0654		2.84	1	2.84	1.63	0.2223	
X_4^2	57.4	1	57.4	215.97	<0.0001	**	144.92	1	144.92	107.08	<0.0001	**	305.83	1	305.83	175.79	<0.0001	**
残差	3.72	14	0.27				18.95	14	1.35				24.36	14	1.74			
失拟	2.88	10	0.29	1.38	0.4064		11.14	10	1.11	0.57	0.7847		20.58	10	2.06	2.18	0.2359	
纯误差	0.84	4	0.21				7.8	4	1.95				3.78	4	0.95			
总和	158.78	28					308.39	28					570.95	28				

注:“*”表示显著,“**”表示极显著。

表 4　浊度、高锰酸盐指数和氨氮去除率回归方程显著性

模型	均值	变异系数	相关系数 R^2	信噪比	调整后相关系数 R^2_{adj}
Y_1	13.35	3.86	0.9766	22.009	0.9531
Y_2	14.92	7.80	0.9386	13.831	0.8771
Y_3	9.28	9.21	0.9573	13.730	0.9147

3.2　交互作用分析

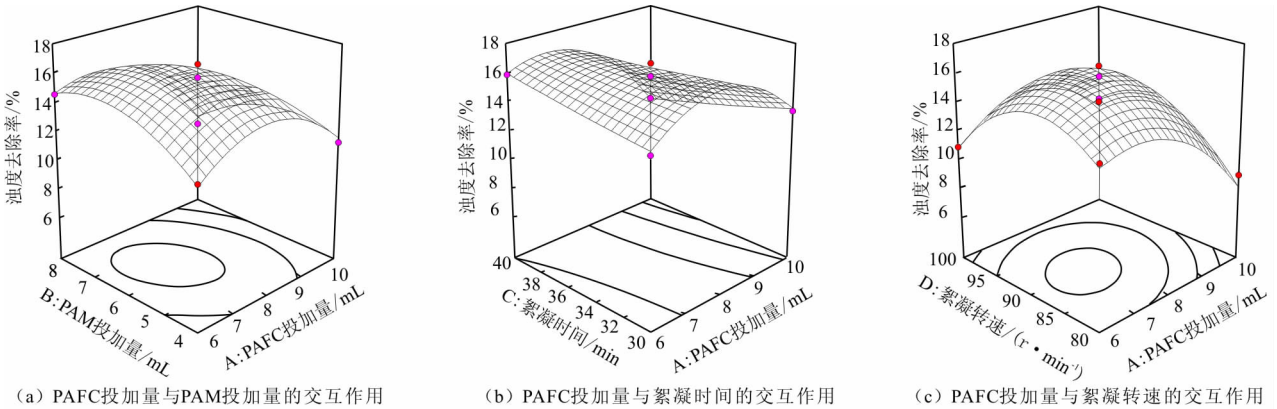
经过 Design – Expert8.0.6 软件分析,得到各交互因素对浊度去除率、高锰酸盐指数去除率、氨氮去除率的响应面,如图 1 ~ 3。从图 1 ~ 3 中可以分析和评估任何 2 个因素的交互作用对响应值的影响效应,从中确定最佳因素水平。

响应面图中曲面坡度可反映因素对响应值的影响大小,坡面越陡,说明该因素对响应值的影响越大;因素间交互效应的强弱是由等高线的形状所反映的,圆形表示因素间交互作用不显著,椭圆形则表示因素间交互作用显著[15]。

由图 1 可以看出,混凝剂量与助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速交互作用均极为显著,助凝剂量与絮凝时间的交互作用不显著,印证了混凝剂量对浊度去除率影响最为显著。低温下,胶体的溶剂化作用增强,颗粒周围水化作用突出,阻碍浊质的凝聚,因而在合适的混凝剂投加量下,可以增加颗粒的碰撞机会,强化浊质的去除。在所选实验范围内,当混凝剂量为 7.56 mL、助凝剂量为 6.56 mL、絮凝时间为 30 min、絮凝转速为 86.81 r/min 时,浊度去除率最大,为 16.93%。

从图 2 可以看出,混凝剂量与助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速的交互作用均显著,混凝剂量、助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速两两之间均与高锰酸盐指数去除率在等高线图中呈椭圆形、并在 3D 图中呈抛物线关系,有极大值。这点出现在混凝剂量为 8.74 mL、助凝剂量为 6.12 mL、絮凝时间为 34.17 min、絮凝转速为 90.57 r/min 交汇处,高锰酸盐指数去除率为 20.20%。

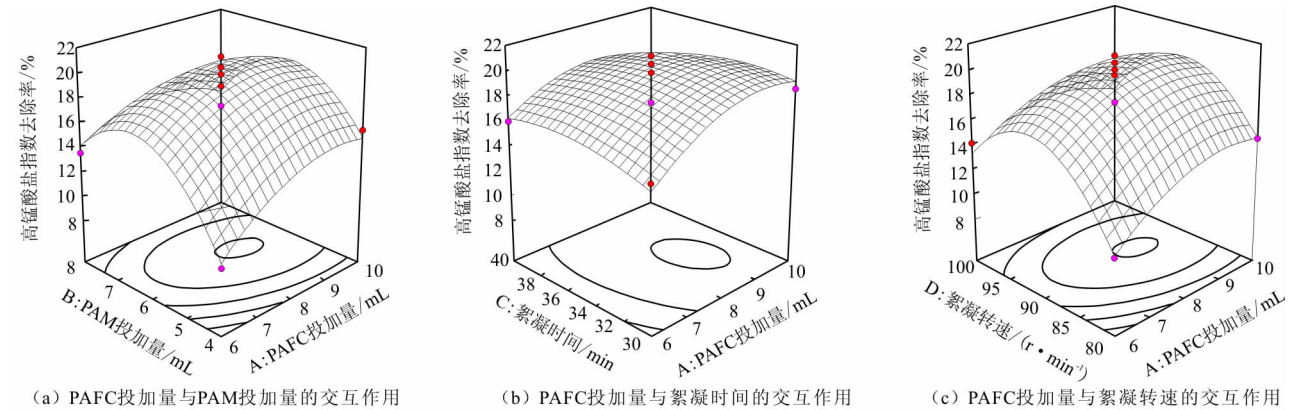
图 3 显示了混凝剂量、助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速 4 个因素对氨氮去除率的交互作用,混凝剂量与助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速对氨氮去除率的影响大小为:混凝剂量 > 絮凝时间 > 助凝剂量 > 絮凝转速。混凝剂量与絮凝转速对氨氮去除率影响的交互作用最显著(p =0.0001 <0.01),混凝剂量与助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速的交互作用较为显著。氨氮去除率随着混凝剂量、助凝剂量、絮凝时间、絮凝转速的变化有极大值,这点出现在混凝剂量为 10 mL、助凝剂量为 4.81 mL、絮凝时间为 40 min、絮凝转速为 84.82 r/min 的交汇处,氨氮去除率为 17.47%。



（a）PAFC投加量与PAM投加量的交互作用　（b）PAFC投加量与絮凝时间的交互作用　（c）PAFC投加量与絮凝转速的交互作用

（d）PAM投加量与絮凝时间的交互作用　（e）PAM投加量与絮凝转速的交互作用　（f）絮凝时间与絮凝转速的交互作用

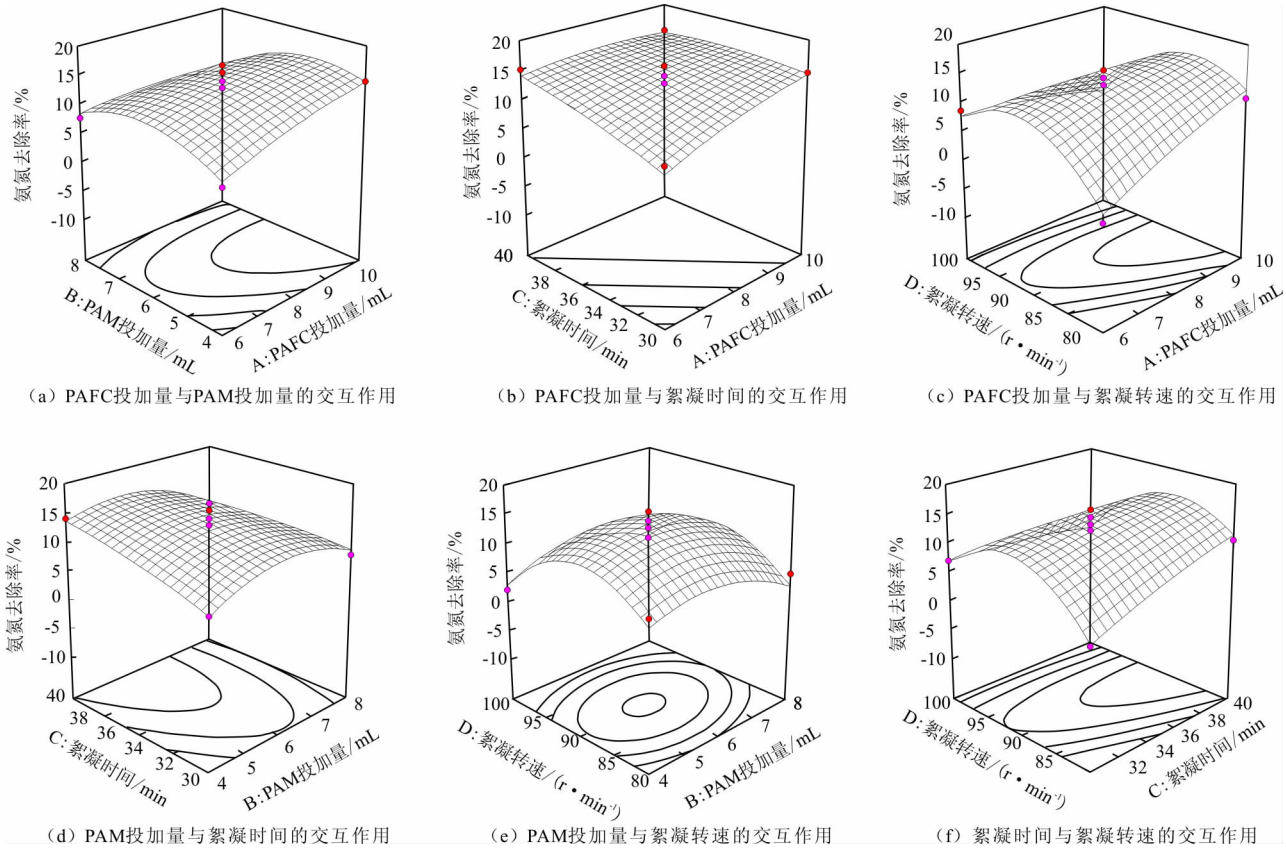
图1　各交互因素对浊度去除的影响的响应面图



（a）PAFC投加量与PAM投加量的交互作用　（b）PAFC投加量与絮凝时间的交互作用　（c）PAFC投加量与絮凝转速的交互作用

（d）PAM投加量与絮凝时间的交互作用　（e）PAM投加量与絮凝转速的交互作用　（f）絮凝时间与絮凝转速的交互作用

图2　各交互因素对高锰酸盐指数去除率影响的响应面图



（a）PAFC投加量与PAM投加量的交互作用　（b）PAFC投加量与絮凝时间的交互作用　（c）PAFC投加量与絮凝转速的交互作用

（d）PAM投加量与絮凝时间的交互作用　（e）PAM投加量与絮凝转速的交互作用　（f）絮凝时间与絮凝转速的交互作用

图 3　各交互因素对氨氮去除率影响的响应面图

3.3　结果优化

以响应面优化得到的条件组合,结合实际情况,最终通过响应面的分析得出混凝法对黄河水中浊度、高锰酸盐指数、氨氮去除率的最佳条件为:混凝剂投加量 7.87mL、助凝剂投加量 6.06 mL、絮凝时间 37 min、絮凝转速 90 r/min。在此条件下,浊度去除率为 16.3%、高锰酸盐指数去除率为 19.67%、氨氮去除率为 14.68%。实验设计上为了检验响应面法所得结果,采用上述条件进行了 3 次重复性验证实验,实际浊度去除率为 16.21%、16.25%、15.98%,实际高锰酸盐指数去除率为 19.46%、19.58%、19.55%,实际氨氮去除率为 14.60%、14.47%、14.56%,与预测值吻合,说明了回归方程的预测值与实验值之间具有较好的拟合度。

给水厂在混凝处理后往往采用滤池作为后续处理。近年来,有部分水厂升级改造中选择新型膜滤工艺作为给水厂把关处理工艺[16]。本实验中进一步探讨了膜滤与传统砂滤分别作为后续处理工艺的可行性,为工艺改革提供参考。实验对混凝法处理黄河冬季低温低浊水优化后,出水沉淀 30min 后分别经膜滤和砂滤处理,处理效果如图 4 所示。

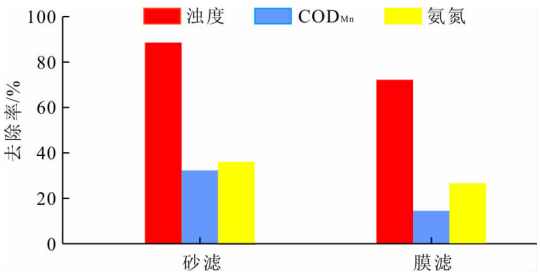


图 4　过滤技术处理混凝优化出水

由图 4 可知,砂滤处理效果优于膜滤。这是因为膜滤的机理仅为物理截留作用,砂滤处理不仅有物理过滤作用,还有生化作用[17]。测定过滤出水的水质指标,浊度处理效果最好,其次是氨氮、高锰酸盐指数。砂滤对浊度去除率为 88.65%、高锰酸盐指数去除率为 32.28%、氨氮去除率为 35.53%。出水水质指标如下:浊度 0.76NTU、高锰酸盐指数2.72 mg/L、氨氮 0.44 mg/L,可达到生活饮用水水质标准(GB5749－2006)。

4　结　论

(1)采用聚合氯化铝铁(PFAC)为混凝剂,聚丙烯酰胺(PAM)为助凝剂的混凝工艺处理低温低浊

水时,最显著的影响因素为混凝剂投加量,其次为絮凝时间、助凝剂投加量、絮凝转速。

(2)响应面法优化混凝工艺去除浊度、高锰酸盐指数、氨氮去除率的最佳操作条件参数为:混凝剂投加量7.87mL、助凝剂投加量6.06 mL、絮凝时间37 min、絮凝转速90 r/min。在此最佳参数条件下,浊度、高锰酸盐指数、氨氮去除率分别为16.3%、19.67%、14.68%。

(3)采用响应面优化混凝后,出水经砂滤处理效果更佳。出水浊度为0.76NTU、高锰酸盐指数为2.72 mg/L、氨氮为0.44 mg/L,达到了生活饮用水水质标准(GB5749-2006)要求。研究结果可为兰州城市供水(集团)有限公司处理工艺升级改造提供技术参考,有效保障冬季水厂供水水质安全。

参考文献:

[1] 汪志永,戴红玲,周 政,等. 低温低浊水处理技术的研究与应用[J]. 水处理技术,2016,42(10):20-24.

[2] 白东江,田 红,杨 勇,等. 活化硅酸钠在黄河低温低浊水处理中的应用[J]. 城镇供水,2015(1):14-17.

[3] 洪 云, 徐 慧. 不同混凝剂处理低温低浊水[J]. 环境工程学报, 2015,9(9):4421-4426.

[4] 梁 鹏,倪中华,吴 恬,等. 低温低浊水处理技术的研究应用现状分析[J]. 给水排水,2012,48(S2):76-79.

[5] 周剑昊. 西北地区高原低温低浊水混凝沉淀工艺试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

[6] 周志伟,杨艳玲,李 星,等. 粉末碳与污泥回流强化混凝低温低浊水及残余铝[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2012,28(2):153-157.

[7] XU Hui, JIAO Ruyuan,XIAO Feng,et al. Relative importance of hydrolyzed Al species (Al a, Al b, Al c) on residual Al and effects of nano-particles (Fe-surface modified TiO_2, and Al_2O_3) on coagulation process [J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2014,446(1):139-150.

[8] 康 旭. 污泥回流强化混凝及微絮凝过滤处理北方低温低浊水[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[9] 赵 欣, 刘 江, 杨 鹏,等. 不同条件下低温低浊水混凝试验研究[J]. 供水技术, 2013,7(6):6-9.

[10] TAN I A W, HAMEED B H, AHMAD A L. Optimization of preparation conditions for activated carbons from coconut husk using response surface methodology [J]. Chemical Engineering Journal,2008,137(3):462-470.

[11] 贾福强, 苗钧魁, 于跃芹,等. 响应面法优化电渗析处理褐藻酸钠废水工艺[J]. 环境工程学报, 2014,8(3):1041-1045.

[12] GURAY G, ALTUNAY P, ABDURRAHMAN T. Electrochemical treatment of deproteinated whey wastewater and optimization of treatment conditions with response surface methodology technology for industrial wastewater treatment [J]. Journal of Hazardous Materials,2008,157(1):69-78.

[13] 狄军贞,赵 微,朱志涛,等. 响应曲面法优化强化混凝工艺处理微污染水[J]. 环境工程学报,2017,11(1):27-32.

[14] 朱俊任,郑怀礼,张 智,等. 响应面法优化制备PAFS-CPAM复合混凝剂及其表征[J]. 化工学报,2012,63(12):4019-4027.

[15] 杜凤龄,王 刚,徐 敏,等. 新型高分子螯合-絮凝剂制备条件的响应面法优化[J]. 中国环境科学,2015,35(4):1116-1122.

[16] 张增荣,邬亦俊,许嘉炯,等. 沉淀膜滤组合工艺的研发与应用[J]. 给水排水,2011,47(5):11-16.

[17] 王 健,陆少鸣. BAF+常规工艺中砂滤池净水效果研究[J]. 环境工程学报,2010,4(3):599-602.