

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.015

二次通用旋转组合设计下磁絮凝工艺处理河道水效果

袁文璟¹, 唐利^{2,3}, 何圣兵^{1,2}

(1. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海生态景观水环境工程技术研究中心, 上海 200031; 3. 上海市园林设计研究总院有限公司, 上海 200031)

摘要: 在实验室运用二次通用旋转组合设计研究苏州河道水处理工艺, 系统分析了磁絮凝工艺处理苏州河道水的四个影响因素(PAC 投加量、PAM 投加量、磁粉投加量、沉淀时间)对磁絮凝效果的影响效应。并运用方差分析、回归模型方程分析、单因子效应分析以及双因素交互效应分析, 得出最佳工况为 PAC 投加量 15 mg/L、PAM 投加量 0.58 mg/L、磁粉投加量 2.7 mg/L、沉淀时间 2.1 min, 此时理论上浊度可达到 0.73 NTU, 浊度去除率为 97.2%, 用此参数进行试验, 得到实际浊度为 0.82 NTU, 实际浊度去除率可达 96.9%。

关键词: 河道水; 磁絮凝; 二次通用旋转组合设计; 浊度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0092-07

Effect of Magnetic Flocculation with Quadratic General Rotary Combination Design for Treatment of River Water

YUAN Wen-jing¹, TANG Li^{2,3}, HE Sheng-bing^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Landscape Water Environment, Shanghai 200031, China; 3. Shanghai Landscape Architecture Design Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: River water in Suzhou was treated by magnetic flocculation with quadratic general rotary combination design, and effects of four factors (PAC dosage, PAM dosage, magnetic powder dosage and settling time) on magnetic flocculation performance were analyzed systematically. By using variance analysis, regression model equation analysis, single factor effect analysis and two factor interaction effect analysis, the optimal operating parameters were obtained: PAC dosage of 15 mg/L, PAM dosage of 0.58 mg/L, magnetic powder dosage of 2.7 mg/L and settling time of 2.1 min, and the expected effluent turbidity was 0.73 NTU with the removal efficiency of 97.2%. When these parameters were adopted in the experiment, the actual effluent turbidity was 0.82 NTU with removal efficiency of 96.9%.

Key words: river water; magnetic flocculation; quadratic general rotary combination design; turbidity

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07205003-03); 上海市科委科技创新行动计划(18DZ2254000)

通信作者: 何圣兵 E-mail: heshengbing@sjtu.edu.cn

目前,苏州城区河道水氮磷指标基本可以达到地表水Ⅳ类水标准,但部分景区河道水水体感官品质(如浊度、色度、透明度)仍与民众的期望有较大差距,有待于进一步提升。磁絮凝技术在水处理领域优点众多,通过将絮凝与磁分离相结合,强化了絮凝效果、缩短了沉降时间、降低了污泥体积和含水率,对废水处理效果良好^[1-2],且占地面积小,运行费用低,对水体感官指标(即浊度、色度等)去除效果良好,郭超等^[3]采用磁加载混凝处理受污染景观河水——天津市卫津河河水,对水样中浊度、色度和总磷的去除率分别达到了96.27%、90.6%和91.00%。同时,磁种可回收重复利用,操作简单,经济适用^[4],在打造景区高品质景观水体中具有独特的优势。

在恒磁场下,影响磁絮凝工艺效果的因素为混凝剂投加量、助凝剂投加量、磁粉投加量及沉淀时间,为探究最佳工况点,若使用单因素试验设计或正交试验设计,四因素变量都会导致试验次数多、试验复杂及数据处理量大,四因素二次通用旋转组合设计可以有效减少试验处理数,并在获得试验数据后可以对其做回归分析,不但能够得出自变量及其交互作用对因变量的影响程度大小,还可以求得在自变量取值范围内因变量的极值^[5],因此在农业领域得到了广泛利用^[6]。然而,将此设计应用于环境领域磁絮凝分离技术的试验并不多见。本次试验采用四因素二次通用旋转组合设计,寻求适于处理苏州城区河道水、打造高品质景观水体的最佳工况条件,以提高磁絮凝效率,更大程度地发挥工艺净化潜力,为磁絮凝技术用于实际河道水体感官品质提升提供合理的技术参数。

1 试验方法

1.1 原水与试剂

原水取自苏州市姑苏区新桥河,浊度为26.1 NTU,TP为0.39 mg/L,叶绿素a为13.12 μg/L。

试剂:聚合氯化铝PAC(工业级,纯品含量为25%);聚丙烯酰胺PAM;磁粉(主要成分为Fe₃O₄)。

1.2 试验方法及水质分析方法

本试验采用四因素二次通用旋转组合设计,因素水平如表1所示,对各因素进行编码。

根据计算求得各因素的试验水平编码值与实际值之间的关系: $Z_1 = 2.972X_1 + 15$; $Z_2 = 0.1783X_2 +$

0.4 ; $Z_3 = 0.8917X_3 + 2$; $Z_4 = 0.594X_4 + 1.5$ 。

表1 四元二次通用旋转组合设计的因素水平编码

Tab.1 Factor level coding of quaternion quadratic general rotary combination design

水平	PAC 投加量 $Z_1 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	PAM 投加量 $Z_2 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	磁粉投加量 $Z_3 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	沉淀时间 Z_4 / min
$r(1.682)$	20	0.70	3.5	2.5
1	18	0.58	2.9	2.1
0	15	0.40	2.0	1.5
-1	12	0.22	1.1	0.9
$-r(-1.682)$	10	0.10	0.5	0.5

试验采用ZR4-6六联混凝搅拌机,先用1000 mL量筒取1000 mL水样分别加于搅拌机的杯子中;快速搅拌(350 r/min)2 min,慢速搅拌(50 r/min)3 min,再静置沉淀0.5、1.5、2.5 min后,分别取杯子中的水样进行浊度测试。磁场采用钕铁硼磁铁产生,具体磁场强度如图1所示。

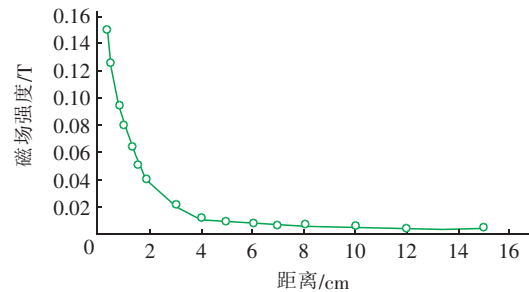


图1 钕铁硼永磁铁产生的磁场强度随距离的变化

Fig.1 Variation of magnetic field intensity by NdFeB permanent magnet with distance

如图1所示,磁场强度在距离柱形磁铁圆面的圆心0.3 cm处磁场强度为0.15 T,但随着距离的增大,磁场强度快速下降,在距离圆心1 cm处,磁场强度快速下降至0.08 T;在距离圆心2 cm处,磁场强度仅有0.04 T。随着距离的增加,磁场强度下降程度变缓,但仍随着距离的增加而持续下降。

水质浊度采用HACH-2100Q浊度仪测定。

1.3 数据处理与分析

采用DPS v7.05、Microsoft excel、Matlab等软件分析数据并作图,采用二次通用旋转组合设计方法建立回归数学模型,进行各因素方差分析、回归模型方程分析、单因子效应分析及双因素交互效应分析。

2 试验结果与讨论

2.1 浊度模型的建立与检验

根据因素配合比进行试验研究。

在四因素(PAC 投加量、PAM 投加量、磁粉投加量以及沉淀时间)的影响下进行 20 组试验,原水浊度为 26.1 NTU,测量得到 20 组的试验结果浊度 Y (见表 2)。

对原水的磁絮凝沉淀后浊度结果进行数据分析,分析各配合比参数对试验结果的影响,得到回归模型如下:

$$Y = 1.916 - 0.992 2X_1 - 0.741 6X_2 - 0.455 1 X_3 - 1.181 X_4 + 0.555 4X_1^2 + 0.368 8X_2^2 + 0.287 7X_3^2 + 0.549 9X_4^2 + 0.745 X_1 X_2 + 0.040 X_1 X_3 + 0.195 X_1 X_4 \quad (1)$$

此方程 $R^2 = 0.952$,表明拟合良好,具有代表性。此处需要提及式(1)中的 Y 是未经编码的浊度,计算结果可直接使用,无需换算。

根据此四元二次方程,可以利用 Matlab 解得当 $X_1 = 0.006 6$ 、 $X_2 = 0.998 7$ 、 $X_3 = 0.790 5$ 、 $X_4 = 1.072 7$ 时, $Y_{\min} = 0.73$, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 均指经过因素水平编码表换算后的值,利用水平编码表换算回原值,可以求出各因素最佳取值,最佳工况为:PAC 投加量 15 mg/L, PAM 投加量 0.58 mg/L,磁粉投加量 2.7 mg/L,沉淀时间 2.1 min,此时理论上浊度可达 0.73 NTU,浊度去除率为 97.2%。利用以上最佳参数进行了试验,得到实际浊度为 0.82 NTU,浊度去除率达 96.9%。

表 2 试验配合比及浊度结果

Tab. 2 Test coordination ratio and the turbidity results

试验组	PAC 投加量 $Z_1 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	PAM 投加量 $Z_2 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	磁粉投加量 $Z_3 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	沉淀时间 Z_4 / min	浊度 Y / NTU
1	18	0.58	2.9	2.1	1.51
2	18	0.58	1.1	0.9	3.57
3	18	0.22	2.9	0.9	5.01
4	18	0.22	1.1	2.1	2.01
5	12	0.58	2.9	0.9	5.27
6	12	0.58	1.1	2.1	3.21
7	12	0.22	2.9	2.1	5.07
8	12	0.22	1.1	0.9	6.51
9	10	0.40	2.0	1.5	4.52
10	20	0.40	2.0	1.5	1.52
11	15	0.10	2.0	1.5	3.82
12	15	0.70	2.0	1.5	1.27
13	15	0.40	0.5	1.5	2.26
14	15	0.40	3.5	1.5	5.22
15	15	0.40	2.0	0.5	5.02
16	15	0.40	2.0	2.5	1.28
17	15	0.40	2.0	1.5	1.70
18	15	0.40	2.0	1.5	1.27
19	15	0.40	2.0	1.5	1.72
20	15	0.40	2.0	1.5	1.28

2.2 方差分析

同时对影响磁絮凝效果的四个影响因素进行方差分析,结果如表 3 所示。

表 3 浊度试验结果方差分析

Tab. 3 Variance analysis of turbidity test results

变异来源	平方和	自由度	均方	偏相关	F 值	p 值
X_1	7.741 0	1	7.741 0	-0.928 9	31.463 1	0.000 5
X_2	3.982 1	1	3.982 1	-0.874 1	16.185 2	0.003 8
X_3	1.954 8	1	1.954 8	0.783 4	7.945 4	0.022 5
X_4	10.091 8	1	10.091 8	-0.944 1	41.017 6	0.000 2
X_1^2	3.149 5	1	3.149 5	0.848 0	12.801 0	0.007 2
X_2^2	1.621 6	1	1.621 6	0.754 1	6.590 8	0.033 3
X_3^2	6.423 8	1	6.423 8	0.916 1	26.109 1	0.000 9
X_4^2	3.655 3	1	3.655 3	0.865 0	14.856 7	0.004 8
$X_1 X_2$	0.105 1	1	0.105 1	0.280 6	0.427 3	0.531 7
$X_1 X_3$	0.008 0	1	0.008 0	0.080 4	0.032 5	0.861 4
$X_1 X_4$	0.190 1	1	0.190 1	-0.365 9	0.772 8	0.405 0
回归	56.897 4	11	5.172 5	$F_2 = 21.023 35$		0.000 1
剩余	1.968 3	8	0.246 0			
失拟	1.778 8	5	0.355 8	$F_1 = 5.632 86$		0.016 1
误差	0.189 5	3	0.063 2			
总和	58.865 7	19				

由表 3 可以看出,相关因素 PAC 投加量 X_1 的 p 值为 0.000 5、PAM 投加量 X_2 的 p 值为 0.003 8、磁

粉投加量 X_3 的 p 值为 0.022 5、沉淀时间 X_4 的 p 值为 0.000 2, 各因素 p 值均小于 0.05, 表明四因素均对浊度有显著影响。由数学原理分析得到 X_2X_3 与 X_1X_4 线性相关、 X_2X_4 与 X_1X_3 线性相关、 X_3X_4 与 X_1X_2 线性相关, 故在表 3 中没有列出 X_2X_3 、 X_2X_4 和 X_3X_4 的相关值。

同时回归方程的失拟性检验 $F_1 = 5.632\ 86 < F_{0.05}(5, 3) = 9.01$ 不显著, 说明未知因素对试验结果干扰较小; 显著性检验 $F_2 = 21.023\ 35 > F_{0.05}(11, 8) = 3.31$, 说明所得回归方程显著相关。

2.3 单因素分析

单因素分析即将四因素中的单一因素作为变量, 其余三个因素均取 0 水平, 代入式(1)四因素模型, 各因素变量的 0 水平如下: PAC 投加量 Z_1 为 15 mg/L, PAM 投加量 Z_2 为 0.4 mg/L, 磁粉投加量 Z_3 为 2 mg/L, 沉淀时间 Z_4 为 1.5 min。

如将 PAC 投加量 X_1 作为单变量时, 可将 PAM 投加量 X_2 、磁粉投加量 X_3 与沉淀时间 X_4 设为 0 水平, 即将回归方程式(1)中 X_2 、 X_3 、 X_4 取 0, 可得到 PAC 投加量 X_1 作为单变量时的一元二次方程, 依此类推, 即可得到各单因素作为单一变量时此单因素的变化趋势及其最佳取值。各单因素变量计算公式如下:

PAC 投加量 X_1 作为单一变量方程:

$$Y_1 = 1.916 - 0.992\ 2X_1 + 0.555\ 4X_1^2 \quad (2)$$

PAM 投加量 X_2 作为单一变量方程:

$$Y_2 = 1.916 - 0.741\ 6X_2 + 0.368\ 8X_2^2 \quad (3)$$

磁粉投加量 X_3 作为单一变量方程:

$$Y_3 = 1.916 - 0.455\ 1X_3 + 0.287\ 7X_3^2 \quad (4)$$

沉淀时间 X_4 作为单一变量方程:

$$Y_4 = 1.916 - 1.181X_4 + 0.549\ 9X_4^2 \quad (5)$$

根据以上四个方程作图, 对单因素效应进行分析, 结果如图 2 所示。

单因素分析的重要性主要体现在趋势分析^[6], 通过单因素分析可以得到当其他水平固定时单一变量对整体效果的影响趋势, 以实现对整体的预估。

首先分析 PAC 单因素 X_1 对浊度的影响。由图 2 可以看出, 在试验水平为 $-1.682 \leq X_i \leq 1.682$ 时, PAM 投加量 X_2 、磁粉投加量 X_3 、沉淀时间 X_4 均取 0 水平, PAC 投加量 X_1 的单因子效应曲线是一条开口向上的抛物线, 水体的浊度随着 PAC 投加量的增加先减小后又略有上升, 根据抛物线顶点公式可以

算出, 在 $X_1 = 0.893\ 2$ 水平时约达到最小值, 代入式(2)即可得此时预估浊度为 1.47 NTU。将 X_1 换算成原数值, 即可得 PAC 此时投加量为 17.6 mg/L。推测 PAC 投加量使得絮凝后浊度呈抛物线形的原因是由于 PAC 投加过量时, 多余的絮体分散于水中, 无法沉淀, 导致水体浊度上升。

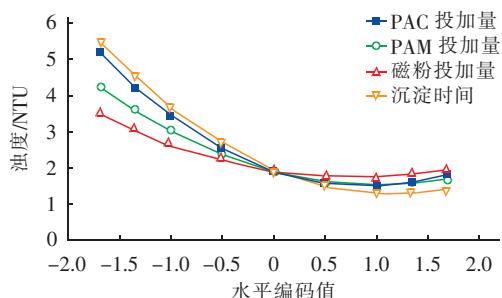


图2 各因素变量对浊度影响的单因子效应曲线

Fig. 2 Single-factor effect curve of various factor influence on turbidity

当 PAM 投加量 X_2 为单一变量, 其他三项均为 0 水平时, 如图 2 所示单因子效应曲线是一条开口向上的抛物线, 水体浊度随着 PAM 投加量增加先减小后增大, 在 $X_2 = 1.010\ 0$ 水平时约达到最小值, 代入式(3)即可得此时预估浊度为 1.54 NTU。而将 X_2 换算成原数值, 即可得 PAM 此时投加量为 0.58 mg/L。关于 PAM 投加量的单因素影响效应呈抛物线形的原因推测是由于聚丙烯酰胺 (PAM) 溶液的黏度随投加量的增大而增大, 高分子溶液的黏度由分子运动时分子间的相互作用产生。当聚合物达到一定浓度时, 高分子线团开始相互渗透, 足以影响对光的散射。浊度是指溶液对光线通过时所产生的阻碍程度, 它包括悬浮物对光的散射和溶质分子对光的吸收^[7]。水的浊度不仅与水中悬浮物质的含量有关, 而且与折射系数等有关。过高浓度的 PAM 通过影响光的散射从而影响了浊度, 使得浊度上升。

当磁粉投加量 X_3 为单一变量, 其余三个变量均为 0 水平时, 单因子效应曲线是一条开口向上的抛物线, 水体浊度随着磁粉投加量呈现出先减小后增大的趋势, 在 $X_3 = 0.792\ 1$ 水平时约达到最小值, 代入式(4)即可得此时预估浊度为 1.74 NTU。将 X_3 换算成原数值, 即可得磁粉此时投加量为 2.7 mg/L。磁粉投加量在一定范围内的增加可以提升絮凝效果。这是由于磁沉淀可以使得沉淀效果在有限的沉淀时间内得到有效提升, 但磁粉投加过量时, 除了与絮体结合形成大絮凝体沉淀的磁粉, 剩余过

量的黑色磁粉会导致水体中悬浮物浓度有所升高^[8-9],因此浊度有所上升。

当 PAC 投加量 X_1 、PAM 投加量 X_2 和磁粉投加量 X_3 均为 0 水平时,沉淀时间 X_4 的单因子效应曲线在 $X_4 = 1.071\ 3$ 水平时达到最小值,代入式(5)可得预估浊度为 1.28 NTU。浊度在沉淀前半段会如抛物线顶点左端趋势一般快速下降,之后沉淀速度会由于大絮凝体已经沉降而减缓,下降趋势逐渐趋于水平,但仍然呈现下降趋势。根据因素编码反算可知此时拟合出的沉淀时间最佳值为 2.1 min。

2.4 交互效应分析

双因素交互效应分析即将所建立的回归模型四个因素中的其中两个固定在 0 水平上,建立两个因素间的互作效应图。由于 X_2X_3 与 X_1X_4 线性相关、 X_2X_4 与 X_1X_3 线性相关、 X_3X_4 与 X_1X_2 线性相关,故只对 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1X_4 的交互效应进行分析。

首先分析以 PAC 投加量 X_1 、PAM 投加量 X_2 作为变量,磁粉投加量 X_3 、沉淀时间 X_4 固定在 0 水平上的双因素交互效应分析,将 $X_3 = 0$ 、 $X_4 = 0$ 代入式(1),可以得到一个与 X_1 、 X_2 相关的二元二次方程:

$$Y = 1.916 - 0.992\ 2X_1 - 0.741\ 6X_2 + 0.555\ 4X_1^2 + 0.368\ 8X_2^2 + 0.745X_1X_2 \quad (6)$$

同理可得与 X_1 、 X_3 相关的二元二次方程为:

$$Y = 1.916 - 0.992\ 2X_1 - 0.455\ 1X_3 + 0.555\ 4X_1^2 + 0.287\ 7X_3^2 + 0.040X_1X_3 \quad (7)$$

与 X_1 、 X_4 相关的二元二次方程为:

$$Y = 1.916 - 0.992\ 2X_1 - 1.181X_4 + 0.555\ 4X_1^2 + 0.549\ 9X_4^2 + 0.195X_1X_4 \quad (8)$$

根据式(6)用 Matlab 可以作出 X_1X_2 双因素交互效应曲面图(见图 3)。

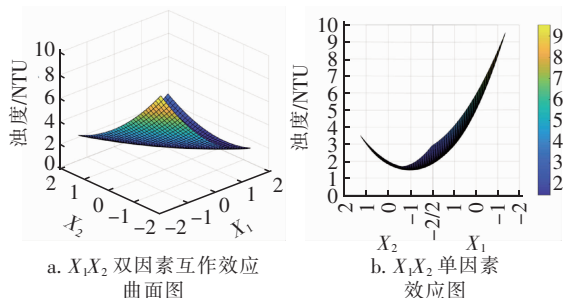


图3 X_1X_2 交互效应曲面图

Fig.3 Interaction effect surface of X_1X_2

由图 3 可以看出,磁絮凝处理后的水体浊度随

着 PAC 投加量和 PAM 投加量的增加整体呈现出先减小后增大的趋势,根据前段单因素分析可知,PAC 投加过量或 PAM 投加过量都会引起浊度的上升,当二者共同作为变量作用于磁絮凝效果时,首先随着二者浓度增加,会使 PAC 的吸附电中和及压缩双电层作用增强,PAM 的吸附加强作用提升,絮凝效果变好。但当二者浓度过量时,过量 PAC 就会作为单体悬浮于溶液中,造成悬浮物对透过水体的光线阻拦;过量 PAM 造成水的光线折射系数改变,二者共同作用下使得浊度以相对较快的速度增大。根据式(6),使用 Matlab 软件可以计算出极值点的大小,即当因素水平 $X_1 = 0.678\ 6$ 、 $X_2 = 0.320\ 0$ 时,浊度出现最小值 1.46 NTU。根据水平因素编码表可以换算出此时 PAC 投加量为 17 mg/L,PAM 投加量为 0.46 mg/L。

根据式(7)用 Matlab 可以作出 X_1X_3 双因素交互效应曲面图(见图 4)。

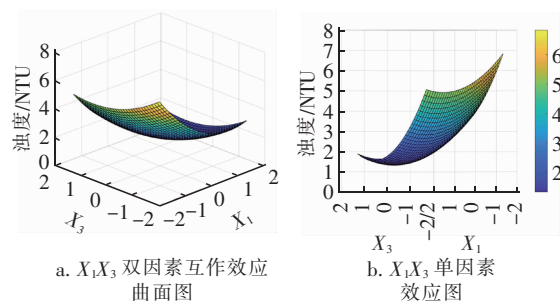


图4 X_1X_3 交互效应曲面图

Fig.4 Interaction effect surface of X_1X_3

由图 4 可以看出,磁絮凝处理后的水体浊度随着 PAC 投加量和磁粉投加量的增加整体呈现出先减小后增大的趋势,但磁粉投加量的影响效果没有 PAC 投加量的影响效果大,一方面这可能是由于磁粉的投加量(0.5 ~ 3.5 mg/L)没有 PAC (10 ~ 20 mg/L)高,因此在二者作为悬浮固体时,PAC 投加过量使水体悬浮物增加的效应要大于磁粉;另一方面可能是由于磁场的作用使得悬浮的磁粉也会被吸至沉淀^[10],但由于磁场强度在 4 cm 高度时仅有 0.01 T,试验用烧杯却高 15 cm 以上,靠近磁铁的部分磁粉可被吸附,但仍有部分磁粉悬浮于液体内部成为悬浮物阻碍光线透过,但总体影响效应小于 PAC。PAC 与磁粉投加过量时,均易成为悬浮物阻拦水体光线通过,当二者共同作为变量作用于磁絮凝效果时,首先随着二者浓度增加,絮凝效果变好;

但当二者浓度过量时,就会由于悬浮物增加使得浊度有所上升。根据式(7),使用 Matlab 软件可以计算出极值点大小,即当水平因素 $X_1 = 0.866\ 9$ 、 $X_3 = 0.730\ 7$ 时,浊度出现最小值 $1.32\ \text{NTU}$ 。根据水平因素编码表可换算出此时 PAC 投加量为 $17.6\ \text{mg/L}$,磁粉投加量为 $2.7\ \text{mg/L}$ 。

根据式(8)用 Matlab 可以作出 X_1X_4 双因素互作效应曲面图(见图5)。

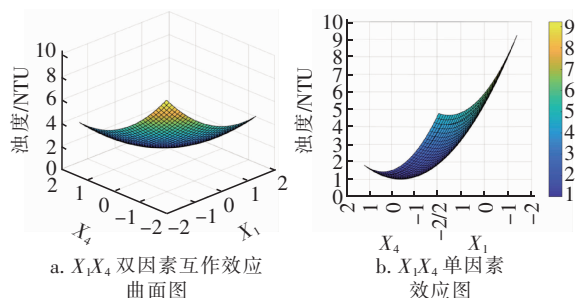


图5 X_1X_4 互作效应曲面图

Fig.5 Interaction effect surface of X_1X_4

由图5可以看出,磁絮凝处理后的水体浊度随着 PAC 投加量和沉淀时间的增加,整体亦呈现出先减小后增大的趋势,从这张双因素互作效应曲面图中可以看出,PAC 与沉淀时间对浊度的影响程度相差不大,二者均对浊度有较强影响。随着 PAC 投加量的增加以及沉淀时间的增加,其浊度快速下降,达到最低值后又出现上升的趋势,这是由于过量投加的 PAC 在水中应是以胶体或者微粒形式存在,这种悬浮物很难随着沉淀时间的增加而沉淀下来,因此 PAC 投加过量时,沉淀时间的增加也并不能使浊度下降。但其浊度增加速度相较于前面分析的 PAC、PAM 共同作用条件下及 PAC、磁粉共同作用条件下,浊度的上升趋势更加缓慢。根据式(8),使用 Matlab 软件可以计算出极值点大小,即当水平因素 $X_1 = 0.727\ 4$ 、 $X_4 = 0.944\ 9$ 时,浊度出现最小值 $0.99\ \text{NTU}$ 。根据水平因素编码表可换算出此时 PAC 投加量为 $17.2\ \text{mg/L}$,沉淀时间为 $2.1\ \text{min}$ 。

3 磁絮凝工艺净化苏州城区河道水的效果

为确保苏州市姑苏区平江片区河道水质,在该片区新桥河与仓街交叉口西南侧停车场建设磁絮凝工艺水质应急保障措施,提升古城区河道水体感官品质。本工程设计水量为 $50\ 000\ \text{m}^3/\text{d}$ 。通过以上数据分析,确定了合适的工艺参数,为工程的实际运行提供了数据支撑。示范工程于2019年6月建成,

工程建成后24 h连续运行。随后开展了对运行效果的监测和评估工作,主要检测了处理装置进出水以及平江河与胡厢使河交汇处的水质。处理装置对 SS 的去除率可达 100% ,对浊度的去除率可达 96.1% 。平江河与胡厢使河交汇处的水体在装置运行前浊度平均为 $26.9\ \text{NTU}$,装置运行后浊度平均为 $3.51\ \text{NTU}$ 。水体透明度由原先的平均 $42\ \text{cm}$ 提升至当前的 $160\ \text{cm}$,平江河道水体感官品质有了显著提升。

4 结论

① 根据四元二次通用旋转组合设计进行试验,对结果处理得到的浊度模型方程 $R^2 = 0.952$,拟合良好,方差分析可以得出四因素均对浊度有显著影响,据此可以算出因素之间的最佳配比为:PAC 投加 $15\ \text{mg/L}$,PAM 投加 $0.58\ \text{mg/L}$,磁粉投加 $2.7\ \text{mg/L}$,沉淀时间 $2.1\ \text{min}$ 。此时浊度理论上可达到最低值 $0.73\ \text{NTU}$ 。用此参数进行试验,得到实际浊度为 $0.82\ \text{NTU}$,实际浊度去除率可达 96.9% ,也可表明模型拟合较好。

② 根据单因素分析,PAC 投加量、PAM 投加量、磁粉投加量和沉淀时间四个因素在分别单独作用时,模拟浊度结果均呈现先减小后略有上升的趋势。根据双因素分析,PAC 与 PAM 同时投加过量时可能使水体浊度有一定程度的上升;PAC 投加过量使水体浊度增加的效应要大于磁粉投加过量产生的效应;PAC 与沉淀时间对浊度的影响程度相差不大,二者均对浊度有较强影响。

③ 依据四元二次通用旋转组合设计取得的工艺参数,用于磁絮凝工艺净化苏州姑苏区平江片区河道水质,河道监测点水体透明度由原先的平均 $42\ \text{cm}$ 提升至 $160\ \text{cm}$,河道水体感官品质得到了显著提升。

参考文献:

- [1] LÜ T, ZHANG S, QI D M, et al. Synthesis of pH-sensitive and recyclable magnetic nanoparticles for efficient separation of emulsified oil from aqueous environments[J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 1604-1612.
- [2] 王欢. 絮凝-磁分离技术处理废水性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
WANG Huan. Study on the Performance of Wastewater Treatment by Flocculation - Magnetic Separation

- Technology [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [3] 郭超,魏连雨,宋连朋,等. 磁加载混凝处理受污染景观河水的试验研究[J]. 天津建设科技, 2013, 23(6): 29-32.
- GUO Chao, WEI Lianyu, SONG Lianpeng, *et al.* Experimental study on magnetic loading coagulation treatment of contaminated landscape river water [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2013, 23(6): 29-32 (in Chinese).
- [4] 王旭阳,刘天顺,陈伟楠. 磁混凝沉淀池在某污水处理厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(4): 73-75.
- WANG Xuyang, LIU Tianshun, CHEN Weinan. Application of magnetic coagulation sedimentation tank in upgrading of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(4): 73-75 (in Chinese).
- [5] 袁志发, 俞海燕. 试验设计与分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- YUAN Zhifa, YUN Haiyan. Experimental Design and Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007 (in Chinese).
- [6] 陈科皓. 二次通用旋转组合设计下耐旱树种的生长特性研究[J]. 林业科技通讯, 2018(1): 3-7.
- CHEN Kehao. Study on growth characteristics of drought tolerant tree species under the second universal rotary combination design [J]. Practical Forestry Technology, 2018(1): 3-7 (in Chinese).
- [7] 宋连朋. 混凝沉淀法处理景观水体污染水的试验研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2012.
- SONG Lianpeng. Experimental Study on Treatment of Polluted Water from Landscape Water by Coagulation and Sedimentation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [8] ZAIDI N S, SOHAILI J, MUDA K, *et al.* Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems [J]. Separation and Purification Reviews, 2014, 43(3): 206-240.
- [9] ZHANG J H, SHAO Y W, HSIEH C T, *et al.* Synthesis of magnetic iron oxide nanoparticles onto fluorinated carbon fabrics for contaminant removal and oil-water separation [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 174: 312-319.
- [10] 郁片红. 磁混凝/强化耦合生物膜工艺用于河道水质提升[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 83-87.
- YU Pianhong. Application of magnetic coagulation sedimentation/enhanced hybrid biofilm reactor in river water quality improvement [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 83-87 (in Chinese).
- 作者简介: 袁文璟(1995-), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制。
E-mail: 357560802@qq.com
收稿日期: 2019-12-30
修回日期: 2020-01-15

(编辑: 孔红春)

依法划定河湖管理范围**严格水域岸线水生态空间管控**