

# 新型气浮-沉淀工艺水库水除藻除浊 效果及分析

杨 辉<sup>1</sup>, 严梦姣<sup>1</sup>, 孙志民<sup>2</sup>, 张锐坚<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 广州市市政工程设计研究院, 广东 广州 510060)

**摘要** 目的 研究广东省中山市某水厂侧向流斜板填料在新型气浮-沉淀系统中对水库水藻类、浊度的处理效果,提高水库水藻类和浊度的去除率。方法 确定 PAC 投加量、NaOH 投加量、进水浊度和进水叶绿素浓度为主要影响因素,采用中心组合设计-响应曲面法建模分析气浮-沉淀后藻类和浊度的去除效果。结果 当高藻水( $\rho(\text{叶绿素}) = 4\ 000\ \text{mg/L}$ ) PAC 投加量为 3.84 ~ 8.61 mg/L、NaOH 投加量为 1.88 ~ 5.63 mg/L 时,叶绿素去除率最高达 97.89%;低浊水(浊度 = 12 NTU) NaOH 投加量为 1.67 ~ 3.25 mg/L、高浊水(浊度 = 110 NTU) PAC 投加量为 39.67 ~ 25.46 mg/L 时,浊度去除率最高分别为 97.38% 和 98.66%。结论 含有侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺可提高不同季节水库水除藻除浊效果。

**关键词** 新型气浮-沉淀工艺;侧向流斜板填料;藻类;浊度

中图分类号 TU991.2

文献标志码 A

## The Effect of Integrated Flotation and Sedimentation Unit on Removal of Algae and Turbidity of Reservoir Water

YANG Hui<sup>1</sup>, YAN Mengjiao<sup>1</sup>, SUN Zhimin<sup>2</sup>, ZHANG Ruijian<sup>2</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou, China, 510060)

**Abstract:** In this study, the integrated flotation and sedimentation unit (IFSU) with side flow inclined plate settlers (SFIPS) was applied to study the treatment effect of reservoir water in Zhongshan, Guangdong. PAC, NaOH, turbidity and chlorophyll are the main factors. When the dosage of PAC and NaOH is 3.84 ~ 8.61 mg/L and 1.88 ~ 5.63 mg/L, which can lead the chlorophyll removal rate of algae-laden water up to 97.89%. When the dosage of NaOH is 1.67 ~ 3.25 mg/L and 39.67 ~ 25.46 mg/L, the removal rate of low and high turbidity water maximum 97.38% and

收稿日期:2017-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(50678041);广东省广州市市政工程设计研究院城市环境治理院士工作站研究项目(2013B090400006)

作者简介:杨辉(1973—),女,副教授,博士,主要从事水污染控制工程理论与技术、微污染水深度处理技术等方面研究。

98.66% respectively. The response surface methodology and central composite design was used to model and analysis the removal efficiency of turbidity and chlorophyll. The results showed that SFIPS can increase the removal of algae and turbidity of reservoir water in different season.

**Key words:** the integrated flotation and sedimentation unit (IFSU); side flow inclined plate settlers (SFIPS); chlorophyll; turbidity

由于我国水资源形势短缺和水污染不断加重,水库作为优质水的来源在供水方面的功能越来越重要.根据《2015年中国环境状况公告》<sup>[1]</sup>水质监测结果表明,I~III类、IV~V类及劣V类水质类型分别占64.5%、26.7%、8.8%.水库水水质存在频繁的季节性变化,具体特征表现为藻含量高、低浊或高浊等,不仅阻碍了水厂的设备运行,还影响了出厂水出水水质.饮用水常规的沉淀工艺适用于处理絮体密度较大的高浊水,但对絮体密度较小的高藻水或低温低浊水,其除藻除浊较差<sup>[2-3]</sup>.另一方面,常规的气浮工艺适用于处理絮体密度较小且沉淀性能较差的高藻水或低温低浊水,但对高浊水的处理效果较差<sup>[4-5]</sup>.J. P. Mally 等<sup>[6]</sup>研究得出当原水浊度大于100NTU时,不宜采用气浮法.因此,常规的气浮工艺或沉淀工艺都存在着一一定的局限性.虽然预氧化和超滤等深度处理工艺可用于处理高藻水或低温低浊水,但亦难以适应原水的季节性变化<sup>[7]</sup>.为适应某些地区原水随季节性变化出现浊度高低交替的情况,水厂开始采用沉淀与气浮相结合的浮沉池工艺,典型的有法国 Oegemont 公司研发的 Sediflotazur(沉淀浮清池)、Sediflotor(沉淀浮选池)等<sup>[8]</sup>.为了研究气浮-沉淀的优秀特性,我国科研人员一直对浮沉池工艺进行改造设计.刘国祥等<sup>[9]</sup>对三灶水厂进行了改造,成功将新型气浮-沉淀池应用于三灶水厂.梁恒等<sup>[10]</sup>将浮沉池工艺成功运用于北方地区水库水.徐晓然,孙志民等<sup>[11-12]</sup>以中山市南头一水厂改造工程为例进行研究,在广东省中山市某水库进行试验,水库净水厂设计供水规模为6300 m<sup>3</sup>/d,该试验具有以

下优点:将气浮与沉淀填料装置即侧向流斜板填料安装在分离区内,提高了气浮工艺的运行效果;侧向流斜板填料不仅优化了构筑物内部构造,还可以同时满足气浮和沉淀工艺要求,且构筑物容积相对较小、水力停留时间相对较短.基于此,笔者在文献[11]试验基础上进行后续研究,目的是验证侧向流斜板填料除藻除浊的性能,并与对照试验(不含侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺)进行比较,得出试验设备处理高藻水和低浊水时,不同PAC及NaOH投加量对水库水除藻、除浊的效果,以及对高藻水和低浊水进行除藻、除浊时叶绿素、浊度、COD<sub>Mn</sub>和氨氮的去除率.

## 1 试验分析与方法

### 1.1 原水水质

试验在中山市某水厂进行,为生产性试验,采用连续进行方式,试验时间为1~8月.水厂的取水水源为水库水.根据2010—2013年的水质监测数据(见表1)分析,水源水质的季节性变化较大,具体特征表现为春秋两季高藻、冬季低浊和夏季高浊.

表1 原水水质

Table 1 Main characteristics of reservoir water

指标	$\rho(\text{叶绿素}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	浊度 / NTU	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{氨氮}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
变化范围	50 ~ 10 000	3 ~ 300	0.5 ~ 6	0.05 ~ 0.6

### 1.2 检测项目及分析方法

测量叶绿素质量浓度采用Franco方法<sup>[13]</sup>.浊度测量采用2100P便携式浊度仪(Hach Co., USA).氨氮质量浓度的测量采用标准比色法(Nessler Method)<sup>[14]</sup>.COD<sub>Mn</sub>

质量浓度采用测量化学需氧量的方法<sup>[15]</sup>.

### 1.3 工艺流程

CK 水库净水厂采用的处理工艺为网格絮

凝反应池—新型气浮-沉淀池—单阀滤池—吸水池,其中主要考察新型气浮-沉淀工艺对水库水的处理效果,工艺流程图如图1所示.

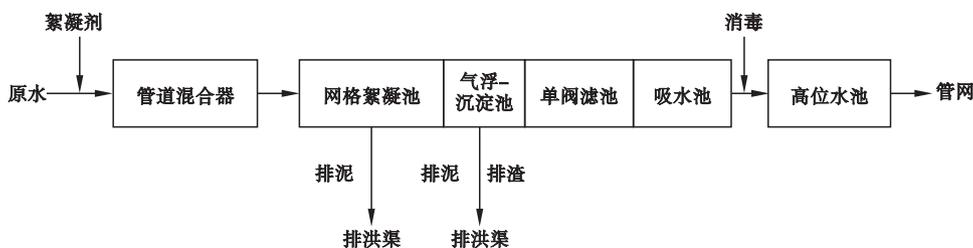


图1 净水厂工艺流程

Fig. 1 Water plants craft

新型气浮-沉淀工艺采用絮凝、气浮-沉淀、过滤、吸水池一体化设备,集投药、絮凝反应、气浮/沉淀、过滤工艺为一体,采用自动化系统控制(见图2).原水经过加药、混凝后进入浮沉池,依据水质在线监测仪器测得的原水水质,运行气浮或沉淀工艺.运行气浮工艺时,关闭阀门A,开启阀门B,浮渣由刮渣机A刮走,出水经气浮出水管流入滤池.运行沉淀工艺时,关闭阀门B,开启阀门A,污泥由刮板B刮走,处理后水经沉淀出水管流入滤池.

### 1.4 构筑物规模

水库净水厂主体设备包括:网格絮凝反应池、新型气浮-沉淀池、单阀滤池.规模及分组情况见表2.

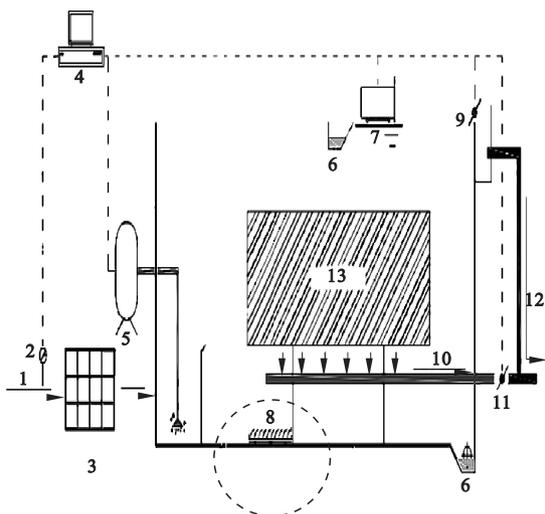
表2 主要生产构筑物规模及分组

Table 2 The size and grouping of the production structure

序号	构筑物	长×宽×高/m	备注
1	网格絮凝池	4.75×4.5×5.66	与浮沉池合建
2	新型气浮-沉淀池	19.4×4.5×5.36	与网格絮凝池合建
3	单阀滤池	5.04.5×5×3.55	与浮沉池合建
4	吸水池	4.9×2.5×5×3.5	与滤池共壁
5	高位清水池	10×10×3.3	一座

### 1.5 确定试验影响因素

PAC 投加量、NaOH 投加量、进水叶绿素和进水浊度为气浮-沉淀后出水效果主要影响因素,不同条件下 PAC、NaOH 投加量对水库水处理效果见表3和表4.表3中,叶绿素的去除率是在  $\rho(\text{NaOH}) = 6 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{叶绿素}) = 4\ 000 \text{ mg/L}$  条件下得到的; A 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 2.6 \text{ mg/L}$ , 浊度 = 12 NTU 的条件下; B 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 8.5 \text{ mg/L}$ , 浊度 = 110 NTU 的条件下; C 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 6 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{叶绿素}) = 4\ 000 \text{ mg/L}$  的条件下; D 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 2.6 \text{ mg/L}$ , 浊度 = 12 NTU 的条件下; E 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 8.5 \text{ mg/L}$ , 浊度 = 110 NTU 的条件下; F 表示  $\rho(\text{NaOH}) = 6 \text{ mg/L}$ ,  $\rho(\text{叶绿素}) = 4\ 000 \text{ mg/L}$



1. 原水;2. 传感器;3. 混凝;4. 水质在线检测器;5. 溶气罐;6. 集泥器;7. 刮渣机 A;8. 刮板 B;9. 阀门 A;10. 气浮出水;11. 阀门 B;12. 沉淀出水;13. 侧向流斜板填料.

图2 新型气浮-沉淀工艺系统流程图

Fig. 2 The flow diagram of integrated flotation and sedimentation unit

的条件下;G表示NaOH=2.6 mg/L,浊度=12 NTU的条件下.表4中,叶绿素的去除率是在PAC投加量为8 mg/L, $\rho$ (叶绿素)=4 000 mg/L条件下得到的;A'表示PAC投加量为5 mg/L,浊度=12 NTU的条件下;B'表

示PAC投加量为4.6 mg/L,浊度=110 NTU的条件下.处理高藻水时,PAC投加量对叶绿素、COD<sub>Mn</sub>去除影响小.处理低浊水时,PAC投加量对浊度和氨氮去除影响小.处理高浊水时,NaOH投加量对浊度去除影响小.

表3 PAC投加量对各指标的影响

Table 3 The influence of different PAC dosing

PAC投加量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	叶绿素去除率/%	浊度去除率/%		COD <sub>Mn</sub> 去除率/%			氨氮去除率/%	
		A	B	C	D	E	F	G
4	98.21	97.08	79.83	53.88	42.21	39.77	53.88	62.53
6	—	96.65	—	—	37.39	—	—	62.98
12	98.19	—	—	52.43	—	—	57.16	—
40	—	—	94.02	—	—	64.85	—	—

表4 NaOH投加量对各指标的影响

Table 4 The influence of different NaOH dosing

NaOH投加 量/(mg·L <sup>-1</sup> )	叶绿素去除 率/%	浊度去除率/%	
		A'	B'
1.6	—	93.15	—
2	96.85	—	85.68
3.6	—	97.58	—
10	98.14	—	85.37

为分类变量,PAC投加量、NaOH投加量和进水浊度为自变量,浊度、COD<sub>Mn</sub>和氨氮的去除率为响应变量.处理高藻水时,分类因子遵循浊度试验设计,PAC投加量、NaOH投加量和进水叶绿素为自变量,叶绿素、浊度、COD<sub>Mn</sub>和氨氮的去除率为响应变量.试验以浊度、叶绿素去除率为考察目标,进行中心组合试验设计,各因素水平详见表5.总实验数为40组,利用响应面分析软件Design Expert(Stat-Ease Inc.,version 8)对试验结果进行响应面分析.

1.6 中心组合设计-响应曲面法

处理低浊或高浊水时,侧向流斜板填料

表5 新型气浮-沉淀工艺中心组合设计的因素和水平

Table 5 Experimental range and levels of the independent variables

编码 水平	高藻水			低浊水			高浊水			侧向流 斜板填 料
	$\rho$ (PAC)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (NaOH)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (进水叶 绿素)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (PAC)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (NaOH)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	进水浊 度/NTU	$\rho$ (PAC)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	$\rho$ (NaOH)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	进水浊 度/NTU	
-1	4	2	1 000	4	1.6	4	4	2	20	有侧向 流斜板
0	8	6	4 000	2	2.6	12	22	8.5	110	(+)
1	12	10	7 000	6	3.6	20	40	200	200	无侧向 流斜板 (-)

注:高藻水、低浊水、高浊水为自变量;侧向流斜板填料为分类变量.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 对比试验方案及结果

相同试验条件下两组不同新型气浮-沉

淀工艺中心组合设计结果见表6~表8。处理高藻水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中叶绿素、浊度、COD<sub>Mn</sub>和氨氮去除率最高分别为99.40%、96.61%、61.68%和

表6 处理高藻水时自变量与响应变量的关系

Table 6 Experimental conditions and results obtained for treatment of algal-rich water

实验组号	自变量			分类变量	响应变量			
	PAC投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	NaOH投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )	ρ(进水叶绿素)/(mg·L <sup>-1</sup> )		叶绿素去除率/%	浊度去除率/%	COD <sub>Mn</sub> 去除率/%	氨氮去除率/%
1	4	2	1 000	+	98.28	94.39	52.56	65.70
2	4	2	7 000	+	99.28	94.91	52.75	56.96
3	4	6	4 000	+	98.03	93.00	54.41	55.31
4	4	10	1 000	+	93.06	94.88	53.39	37.98
5	4	10	7 000	+	96.03	94.36	50.50	54.43
6	8	2	4 000	+	98.87	95.01	54.84	39.71
7	8	6	1 000	+	94.73	95.62	40.86	63.46
8	8	6	4 000	+	98.88	96.61	43.16	51.12
9	8	6	4 000	+	97.55	94.96	48.94	55.67
10	8	6	4 000	+	97.98	93.98	51.67	56.52
11	8	6	4 000	+	97.88	94.14	56.39	59.60
12	8	6	4 000	+	98.14	94.43	53.16	59.34
13	8	6	4 000	+	98.12	93.99	51.37	54.70
14	8	6	7 000	+	99.40	95.97	39.20	55.72
15	8	10	4 000	+	98.22	95.21	41.39	48.45
16	12	2	1 000	+	95.06	92.91	61.68	66.59
17	12	2	7 000	+	97.96	94.27	51.31	41.88
18	12	6	4 000	+	97.76	93.39	43.64	53.87
19	12	10	1 000	+	95.47	93.79	55.66	58.65
20	12	10	7 000	+	98.78	95.04	48.70	59.68
21	4	2	1 000	-	91.07	87.20	39.59	46.07
22	4	2	7 000	-	95.79	83.46	41.57	38.32
23	4	6	4 000	-	96.57	79.60	43.58	36.47
24	4	10	1 000	-	90.72	82.33	42.31	25.31
25	4	10	7 000	-	91.71	84.06	39.20	37.03
26	8	2	4 000	-	93.47	85.70	42.15	27.29
27	8	6	1 000	-	94.32	80.67	33.08	41.41
28	8	6	4 000	-	96.40	83.83	34.20	34.07
29	8	6	4 000	-	94.12	83.51	38.39	37.49
30	8	6	4 000	-	93.57	83.73	40.12	38.45
31	8	6	4 000	-	95.42	81.69	44.69	39.72
32	8	6	4 000	-	97.71	79.67	43.03	38.72
33	8	6	4 000	-	94.67	82.65	40.29	36.84
34	8	6	7 000	-	96.90	83.28	31.07	37.14
35	8	10	4 000	-	93.80	84.82	32.14	32.96
36	12	2	1 000	-	89.86	83.81	47.41	45.76
37	12	2	7 000	-	94.52	82.90	40.25	28.20
38	12	6	4 000	-	95.33	81.04	34.59	35.90
39	12	10	1 000	-	88.46	86.64	41.93	41.12
40	12	10	7 000	-	94.33	84.67	37.81	40.60

注:“+”指含侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺;“-”指不含侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺。

表7 处理低浊水时自变量与响应变量的关系

Table 7 Experimental conditions and results obtained for treatment of low turbidity

实验组号	自变量			分类变量	响应变量		
	PAC投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NaOH投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	进水浊度/ NTU		浊度去除率/%	$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率/%	氨氮去除率/%
1	4	1.6	4	+	90.00	46.75	47.50
2	4	1.6	20	+	98.40	62.60	63.59
3	4	2.6	12	+	97.33	41.38	69.16
4	4	3.6	4	+	86.25	31.25	41.80
5	4	3.6	20	+	97.50	39.20	67.30
6	5	1.6	12	+	96.75	54.00	51.63
7	5	2.6	4	+	94.00	34.04	41.06
8	5	2.6	12	+	97.42	48.97	63.76
9	5	2.6	12	+	97.50	51.01	65.96
10	5	2.6	12	+	96.58	37.59	72.05
11	5	2.6	12	+	95.83	41.18	69.52
12	5	2.6	12	+	93.83	48.48	62.79
13	5	2.6	12	+	93.83	44.44	65.98
14	5	2.6	20	+	98.00	52.11	72.15
15	5	3.6	12	+	96.67	48.48	68.65
16	6	1.6	4	+	94.25	33.33	60.46
17	6	1.6	20	+	97.70	52.11	63.48
18	6	2.6	12	+	97.42	40.32	65.42
19	6	3.6	4	+	83.25	37.04	38.75
20	6	3.6	20	+	98.25	41.18	63.76
21	4	1.6	4	-	90.90	43.95	38.00
22	4	1.6	20	-	96.43	56.96	47.69
23	4	2.6	12	-	94.41	36.83	51.87
24	4	3.6	4	-	81.94	27.81	31.77
25	4	3.6	20	-	91.65	35.67	53.17
26	5	1.6	12	-	92.88	49.68	39.76
27	5	2.6	4	-	91.18	30.64	30.80
28	5	2.6	12	-	95.47	44.56	40.46
29	5	2.6	12	-	96.53	45.40	51.45
30	5	2.6	12	-	93.69	34.58	57.64
31	5	2.6	12	-	92.00	38.29	52.14
32	5	2.6	12	-	94.77	44.12	48.98
33	5	2.6	13	-	91.96	41.78	50.80
34	5	2.6	20	-	94.08	46.38	55.55
35	5	3.6	12	-	90.87	45.58	54.92
36	6	1.6	4	-	91.42	30.67	46.56
37	6	1.6	20	-	96.72	48.46	50.76
38	6	2.6	12	-	95.47	36.29	51.68
39	6	3.6	4	-	79.92	40.64	30.23
40	6	3.6	20	-	94.32	38.71	49.10

66.59% ;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中叶绿素、浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为97.71%、87.20%、47.41%和46.07%。处理低浊水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为98.40%、62.60%和72.15%;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、

$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为96.72%、56.96%和57.64%。处理高浊水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为97.21%、66.33%和32.47%;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为90.97%、54.92%和23.75%。

表8 处理高浊水时自变量与响应变量的关系

Table 8 Experimental conditions and results obtained for treatment of high turbidity

实验组号	自变量			分类变量	响应变量		
	PAC投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NaOH投加量/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	进水浊度/ NTU		浊度去除率/%	$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率/%	氨氮去除率/%
1	4	2	200	+	81.50	19.12	14.34
2	4	2	20	+	82.25	28.81	30.89
3	4	8.5	110	+	78.77	44.36	18.48
4	4	15	20	+	88.35	32.68	22.57
5	4	15	200	+	77.00	22.24	16.23
6	22	2	110	+	92.03	51.90	18.81
7	22	8.5	110	+	96.21	65.73	28.62
8	22	8.5	110	+	95.73	60.00	21.38
9	22	8.5	110	+	97.21	57.41	27.21
10	22	8.5	200	+	96.51	43.94	23.24
11	22	8.5	110	+	93.32	66.33	30.29
12	22	8.5	20	+	93.75	41.59	28.69
13	22	8.5	110	+	95.45	59.84	31.28
14	22	8.5	110	+	94.52	57.67	32.47
15	22	15	110	+	94.96	56.74	32.42
16	40	2	200	+	96.73	58.06	17.44
17	40	2	20	+	96.90	62.32	29.68
18	40	8.5	110	+	95.54	57.41	29.69
19	40	15	20	+	96.90	36.92	29.44
20	40	15	200	+	95.78	62.81	28.69
21	4	2	200	-	75.33	16.18	10.90
22	4	2	20	-	73.40	23.85	22.60
23	4	8.5	110	-	65.85	35.54	13.34
24	4	15	20	-	78.03	26.47	16.72
25	4	15	200	-	69.42	18.22	11.56
26	22	2	110	-	90.19	43.44	14.30
27	22	8.5	110	-	85.80	53.83	21.48
28	22	8.5	110	-	87.20	50.76	15.64
29	22	8.5	110	-	88.81	45.98	19.39
30	22	8.5	200	-	89.71	35.59	17.44
31	22	8.5	110	-	87.72	54.92	22.15
32	22	8.5	110	-	84.53	35.19	21.81
33	22	8.5	20	-	88.75	48.47	22.29
34	22	8.5	110	-	87.62	46.19	23.75
35	22	15	110	-	89.23	46.47	23.41
36	40	2	200	-	90.83	46.51	12.92
37	40	2	20	-	86.47	51.60	22.56
38	40	8.5	110	-	87.91	48.05	21.15
39	40	15	200	-	90.97	30.24	21.81
40	40	15	20	-	89.96	53.14	20.99

2.2.2 方差分析结果

试验采用回归方程<sup>[16]</sup>对试验数据进行拟合

$$Y = \beta_0 + \beta_i X_i + \beta_j X_j + \beta_{ii} X_i^2 + \beta_{jj} X_j^2 + \beta_{ij} X_i X_j + \dots \quad (1)$$

其中,  $i$  是线性系数,  $j$  是二次项系数,  $\beta$  是回归系数. 同时用 Design Expert 软件对高藻

水、低浊水、高浊水的响应变量建立回归模型, 方差分析结果见表 9 ~ 11. 概率  $P$  值 < 0.000 1, 说明模型对响应变量的影响极显著. 复相关系数  $R^2$  越大, 表明预测值与实际值有较好的相关性, 进一步说明了模型的可行性.

表 9 高藻水方差分析结果

Table 9 ANOVA results for algal-rich water

响应变量	回归方程	概率 $P$	负相关系数 $R^2$	标准差 $SD$	变异系数 $CV$
叶绿素去除率	$Y = 96.83 - 0.15A_1 - 0.68A_2 + 1.68A_3 - 1.81D + 0.78A_1A_2 + 0.44A_1A_3 - 0.0083A_2A_3 - 0.19A_1D + 0.11A_2D + 0.2A_3D - 0.3A_1^2 - 1.14A_2^2 - 0.89A_3^2$	< 0.000 1	0.857 9	1.27	1.33
浊度去除率	$Y = 88.43 - 0.014A_1 - 0.061A_2 + 0.035A_3 - 5.67D + 0.66A_1A_2 + 0.11A_1A_3 + 0.2A_2A_3 + 0.23A_1D - 0.12A_2D - 0.26A_3D - 1.55A_1^2 + 1.87A_2^2 + 0.57A_3^2$	< 0.000 1	0.958 9	1.47	1.66
COD <sub>Mn</sub> 去除率	$Y = 43.57 - 0.33A_1 - 2.04A_2 - 1.82A_3 - 5.31D - 0.98A_1A_2 - 1.54A_1A_3 - 0.094A_2A_3 - 0.074A_1D + 0.31A_2D + 0.35A_3D + 4.08A_1^2 + 2.65A_2^2 - 3.92A_3^2$	0.000 2	0.725 2	4.74	10.53
氨氮去除率	$Y = 45.81 + 0.94A_1 - 1.01A_2 - 2.11A_3 - 8.84D + 4.37A_1A_2 - 3.34A_1A_3 + 5.47A_2A_3 - 0.098A_1D + 0.15A_2D + 0.27A_3D + 1.49A_1^2 - 6.8A_2^2 + 5.53A_3^2$	< 0.000 1	0.938 2	3.39	7.38

表 10 低浊水方差分析结果

Table 10 ANOVA results for low turbidity

响应变量	回归方程	概率 $P$	负相关系数 $R^2$	标准差 $SD$	变异系数 $CV$
浊度去除率	$Y = 95.4 + 0.2B_1 - 2.24B_2 + 4B_3 - 1.35D - 0.37B_1B_2 + 0.2B_1B_3 + 1.73B_2B_3 + 0.057B_1D - 0.72B_2D - 0.21B_3D + 0.096B_1^2 - 1.77B_2^2 - 1.75B_3^2$	< 0.000 1	0.861 5	2.01	2.14
COD <sub>Mn</sub> 去除率	$Y = 43.57 - 1.83B_1 - 5.3B_2 + 6.51B_3 - 1.89D + 3.52B_1B_2 + 0.45B_1B_3 - 2.15B_2B_3 + 0.19B_1D + 0.17B_2D - 0.26B_3D - 5.16B_1^2 + 5.57B_2^2 - 3.07B_3^2$	< 0.000 1	0.878 9	3.42	8.10
氨氮去除率	$Y = 58.44 + 0.42B_1 - 0.5B_2 + 8.98B_3 - 6.84D - 2.29B_1B_2 - 1.35B_1B_3 + 3.61B_2B_3 + 0.17B_1D + 0.14B_2D - 1.09B_3D + 2.12B_1^2 - 3.67B_2^2 - 7.52B_3^2$	< 0.000 1	0.871 9	5.12	9.49

表 11 高浊水方差分析结果

Table 11 ANOVA results for low turbidity

响应变量	回归方程	概率 <i>P</i>	负相关系数 <i>R</i> <sup>2</sup>	标准差 <i>SD</i>	变异系数 <i>CV</i>
浊度去除率	$Y = 90.9 + 8.11C_1 - 0.14C_2 - 0.9C_3 - 3.52D - 0.29C_1C_2 + 0.94C_1C_3 - 1.15C_2C_3 + 0.71C_1D - 0.5C_2D + 0.16C_3D - 7.72C_1^2 + 1.12C_2^2 + 1.7C_3^2$	<0.000 1	0.951 9	2.10	2.38
COD <sub>Mn</sub> 去除率	$Y = 53.31 + 12.52C_1 - 1.33C_2 - 3.18C_3 - 4.11D - 3.61C_1C_2 + 1.19C_1C_3 + 1.36C_2C_3 - 0.52C_1D - 0.45C_2D - 3.57C_3D - 5.21C_1^2 - 1.91C_2^2 - 9.15C_3^2$	<0.000 1	0.838 8	6.99	15.48
氨氮去除率	$Y = 22.38 + 3.19C_1 + 1.11C_2 - 3.95C_3 - 3.21D$	<0.000 1	0.623 6	4.06	18.12

2.2.3 响应面分析

根据中心组合设计结果绘制响应曲面图。当处理高藻水 ( $\rho$  (叶绿素) = 4 000 mg/L) 时, PAC 投加量在 3.84 ~ 8.61 mg/L、NaOH 投加量在 1.88 ~ 5.63 mg/L 时可使叶绿素去除率最佳(见图 3、图 4), 可达 97.89%。当处理低浊水(进水浊度 = 12 NTU) 时, NaOH 投加量在 1.67 ~ 3.25 mg/L 时可使浊度去除率最佳(见图 5、图 6), 可达 97.38%。当处理高浊水(进水浊度 = 110 NTU) 时, PAC 投加量 39.67 ~ 25.46 mg/L 时可使浊度去除率最佳, 可达 98.66% (见图 7、图 8)。图中, “+” 含有侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺, “-” 无侧向流斜板填料的新型气浮-沉淀工艺; A 代表 PAC 投加量, mg/L<sup>-1</sup>; B 代表 NaOH 投加量, mg/L<sup>-1</sup>。

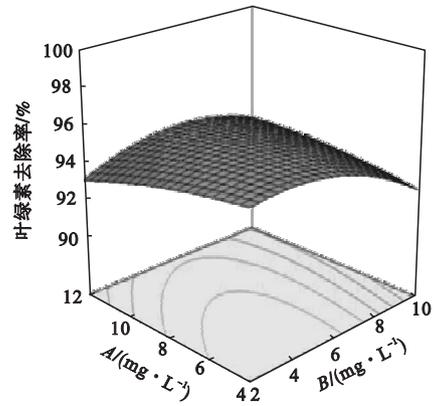


图 4 “-”处理高藻水响应曲面图

Fig. 4 Response surface plots for algal-rich water without SFIPS

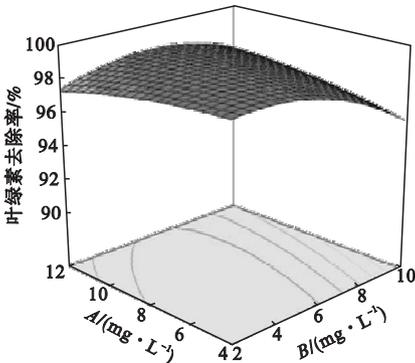


图 3 “+”处理高藻水响应曲面图

Fig. 3 Response surface plots for algal-rich water with SFIPS

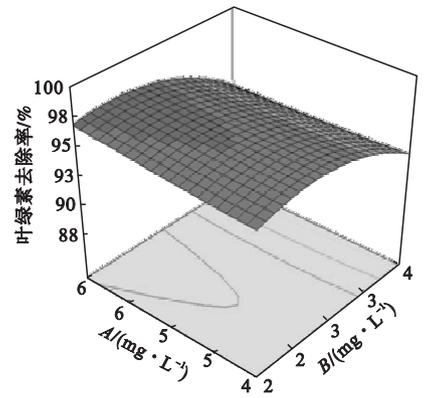


图 5 “+”处理低浊水响应曲面图

Fig. 5 Response surface plots for low turbidity water with SFIPS

由图 3 ~ 图 8 比较可知, 侧向流斜板填料能增加新型气浮-沉淀工艺对水库水除藻除浊效果。

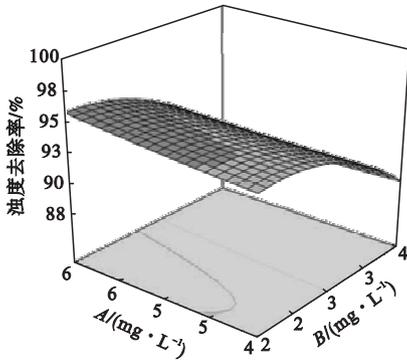


图6 “-”处理低浊水响应曲面图

Fig.6 Response surface plots for low turbidity water without SFIPS

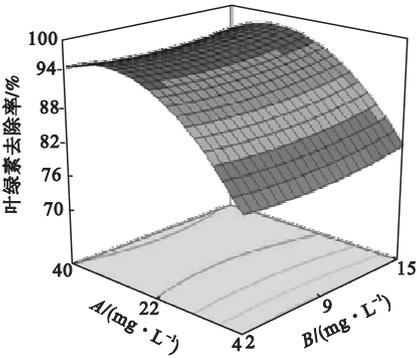


图7 “+”处理高浊水响应曲面图

Fig.7 Response surface plots for high turbidity water with SFIPS

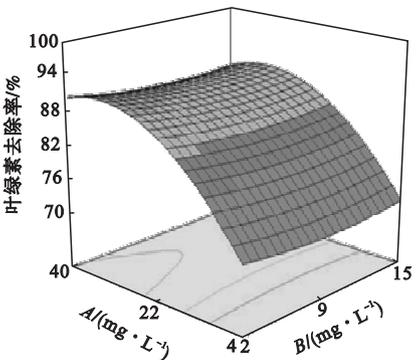


图8 “-”处理高浊水响应曲面图

Fig.8 Response surface plots for high turbidity water without SFIPS

### 3 试验分析

试验除模拟新型气浮-沉淀工艺系统侧向流斜板填料外,还通过水下显微镜来记录分离区上半部分的絮状气泡的移动速度.新

型气浮-沉淀系统在气浮区域设置了一个挡板(见图9),挡板的顶部到水层的距离为3.8 m,水流进入气浮区由于受到挡板阻碍产生一个速度为200.8 m/h的横向流. Lundh 的报告<sup>[17]</sup>证明大于或等于37 m/h的水流速度(位于挡板上)有助于在分离区产生分层流.受到分层流作用的影响,水流速度不断增加,并在分离区最远点发现最高流速,且试验的流线分布在气浮过程中符合分层流模式<sup>[18-19]</sup>.图10所示为分层流模型概念图,气浮-沉淀池分离区上部为澄清区域,水流流态为水平流,澄清区域的水一部分用来进行回流,一部分转为垂直流流入分离区底部(垂直流区域大约为澄清区域的两倍).有试验证明当分离区水力负荷为30 m/h时,澄清区域的水力负荷会减小到10 m/h.由此可得当分离区有三个不同的流程时,澄清区域的水力负荷大约为整个分离区的三分之一.由此可证明在气浮过程中,侧向流斜板填料会加强分离区分层流效果并减少澄清区域的负荷率,使高藻水和低浊水的处理效果得到提升.在新型气浮-沉淀工艺系统中,随着水流在气浮过程不断流入,侧向流斜板填料不仅能减少澄清区域的水力负荷,还增加了饱和和溶解水的停留时间和 $COD_{Mn}$ 、氨氮的接触时间,使它们的去除率得到提高.

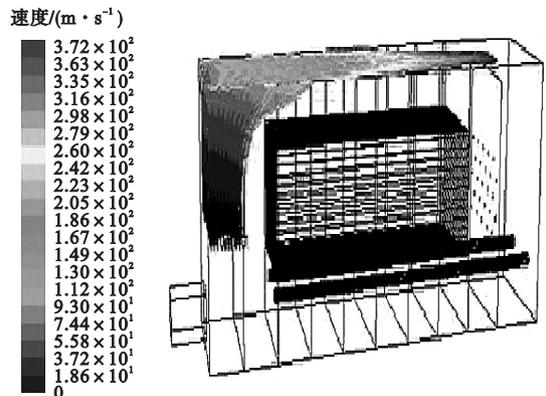


图9 分离区上半部分的絮状气泡移动速度分析图

Fig.9 Velocity of particles in the upper part of the IFSU separation zone during DAF process

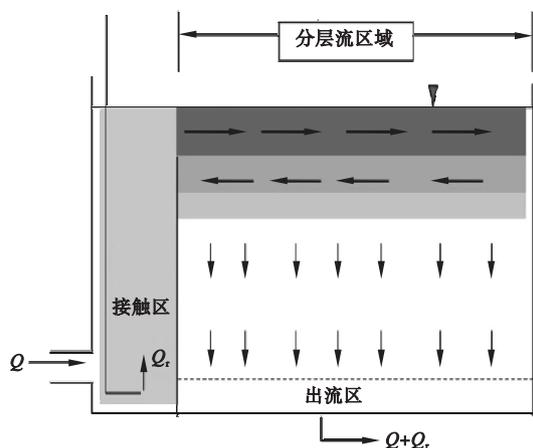


图 10 分层流模型理论图

Fig. 10 A hierarchical flow model diagram

试验表明:当新型气浮-沉淀工艺处理高藻水和低浊水时,随着 NaOH 投加量的不断增高,藻类和浊度的去除率会不断降低,这是因为水里的气泡带负电荷且是亲水性的.负电动电势的产生的原因是由于气泡界面积累带负电荷的表面活性剂或水生腐殖物质<sup>[19]</sup>.由于这些带负电势的气泡之间产生静电斥力,降低了他们之间的接触,使得气泡之间不能融合.混凝的好坏取决于混凝剂的投加量及 pH 值.混凝体的电荷受混凝剂的投加量及 pH 值的影响,当其电荷接近于零且这些混凝体含有相对较高的疏水物质,此时为最佳混凝条件.基于这一理念,增加过量的 NaOH 则可使负电势转换为正电势,使其电势高于零电势并形成正电荷的静电斥力.说明 NaOH 投加量过高会降低藻类和浊度的去除率.

## 4 结论

(1) 新型气浮-沉淀工艺可用于水库水不同季节除藻、除浊.根据中心组合设计结果可得处理高藻水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中叶绿素、浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 99.40%、96.61%、61.68%和 66.59%;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中叶绿素、浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 97.71%、87.20%、

47.41%和 46.07%.处理低浊水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 98.40%、62.60%和 72.15%;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 96.72%、56.96%和 57.64%.处理高浊水时,含有侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 97.21%、66.33%和 32.47%;不含侧向流斜板的新型气浮-沉淀池中浊度、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 和氨氮去除率最高分别为 90.97%、54.92%和 23.75%.以上数据表明侧向流斜板填料可提高新型气浮-沉淀工艺藻类和浊度的去除率.

(2) 由绘制的响应曲面图分析可得,当处理高藻水( $\rho(\text{叶绿素}) = 4\ 000\ \text{mg/L}$ )时, PAC 投加量在 3.84 ~ 8.61 mg/L、NaOH 投加量在 1.88 ~ 5.63 mg/L 可使叶绿素去除率最佳,可达 97.89%.当处理低浊水(进水浊度 = 12 NTU)时,NaOH 投加量在 1.67 ~ 3.25 mg/L 可使浊度去除率最佳,可达 97.38%.当处理高浊水(进水浊度 = 110 NTU)时,PAC 投加量在 39.67 ~ 25.46 mg/L 时可使浊度去除率最佳,可达 98.66%.

(3) PAC 及 NaOH 投加量对水库水除藻、除浊的效果有影响.当 NaOH 投加量过高时会导致藻类和浊度的去除率降低,PAC 投加量增加有利于提高浊度和藻类去除率.

## 参考文献

- [1] 《2015 年中国环境状况公报》公布[J]. 中国环保产业,2016(6):15.  
(Development report on China circular economy industry in 2015[J]. Professional committee of circular economy of CAEPI,2016(6):15.)
- [2] CHIEMCHAI SRI W, CHIEMCHAI SRI C, DUMRONGSUKIT C, et al. Removal of waterborne microorganisms in floating media filter-microfiltration system for water treatment[J]. Bioresource technology,2011,102(9):5438 - 5443.

- [ 3 ] CAMPINAS M, ROSA M J. Evaluation of cyanobacterial cells removal and lysis by ultrafiltration[J]. Separation and purification technology, 2010, 70(3):345-353.
- [ 4 ] 孙志民, 刘万里, 刘国祥. 新型气浮-沉淀池与锰砂滤料 V 型滤池组合除锰[J]. 中国给水排水, 2014(22):34-36.  
(SUN Zhimin, LIU Wanli, LIU Guoxiang. Manganese removal by new flotation/sedimentation and V-type filter[J]. China water & waste water, 2014(22):34-36.)
- [ 5 ] JOH G, CHOI Y S, SHIN J K, et al. Problematic algae in the sedimentation and filtration process of water treatment plants[J]. Journal of water supply; research and technology-aqua, 2011, 60(4):219-230.
- [ 6 ] MALLEY J P, EDZWALD J K. Laboratory comparison of dissolved air flotation with conventional treatment[J]. JAWWA, 1991, 84(9):56-61.
- [ 7 ] QU F, LIANG H, TIAN J, et al. Ultrafiltration (UF) membrane fouling caused by cyanobacteria; fouling effects of cells and extracellular organics matter (EOM)[J]. Desalination, 2012, 293(3):30-37.
- [ 8 ] 田珍, 李梅, 由振华, 等. 浮沉池技术在低温低浊水处理中的应用[J]. 山东建筑大学学报, 2010, 25(1):62-65.  
(TIAN Zhen, LI Mei, YOU Zhenhua, et al. Application of flotation-sedimentation process in treatment for surface water of low temperature and low turbidity[J]. Journal of Shandong jianzhu university, 2010, 25(1):62-65.)
- [ 9 ] 刘国祥, 孙志民, 刘万里. 新型气浮-沉淀工艺用于南方水库含藻水处理改造工程[J]. 中国给水排水, 2012, 28(14):64-66.  
(LIU Guoxiang, SUN Zhimin, LIU Wanli. New flotation/sedimentation process for reconstruction of treatment project of algae-laden water from south reservoir[J]. China water & waste water, 2012, 28(14):64-66.)
- [ 10 ] 梁恒, 张克峰, 王永磊, 等. 浮沉池工艺在北方地区水库水处理中的应用[J]. 净水技术, 2010, 29(5):57-61.  
(LIANG Heng, ZHANG Kefeng, WANG Yonglei, et al. Application of treatment processes of flotation-sedimentation basin for reservoir raw water in north China region[J]. Water purification technology, 2010, 29(5):57-61.)
- [ 11 ] 徐晓然, 孙志民, 李鲁新, 等. 中山市南头一水厂传统工艺升级改造工程案例[J]. 中国给水排水, 2016, (12):114-116.  
(XU Xiaoran, SUN Zhimin, LI Luxin, et al. Upgrading of traditional process in nantou waterworks in Zhongshan city[J]. China water & waste water, 2016, (12):114-116.)
- [ 12 ] LI Y, ZHAO W, GUI X, et al. Flotation kinetics and separation selectivity of coal size fractions[J]. Physicochemical problems of mineral processing, 2013, 49(2):387-395.
- [ 13 ] FRANCO M C, BUFFING M F, JANSSEN M, et al. Performance of chlorella sorokiniana under simulated extreme winter conditions[J]. Journal of applied phycology, 2012, 24(4):693-699.
- [ 14 ] CARRANZO I V, APHA A W. Standard methods for examination of water and wastewater[J]. Anales de hidrología médica, 2012, 5(2):183-190.
- [ 15 ] 郑青, 韩海波, 周保学, 等. 化学需氧量(COD)快速测定新方法研究进展[J]. 科学通报, 2009, (21):3241-3250.  
(ZHENG Qing, HAN Haibo, ZHOU Baoxue, et al. Progress in new methods for rapid determination of chemical oxygen demand (COD)[J]. Chinese science bulletin, 2009, 54:3241-3250.)
- [ 16 ] ZINADINI S, RAHIMI M, ZINATIZADEH A, et al. High frequency ultrasound-induced sequence batch reactor as a practical solution for high rate wastewater treatment[J]. Journal of environmental chemical engineering, 2015, 3(1):217-226.
- [ 17 ] MORUZZI R B, REALI M A P. The influence of floc size and hydraulic detention time on the performance of a dissolved air flotation (DAF) pilot unit in the light of a mathematical model[J]. Bioprocess & biosystems engineering, 2014, 37(12):2445-52.
- [ 18 ] REALI M A P, PATRIZZI L J. The influence of the contact zone configuration on the performance of a DAF pilot plant applied to water treatment[J]. Water science & technology water, 2015, 16(1):186-192.
- [ 19 ] EDZWALD J K. Dissolved air flotation and me[J]. Water research, 2010, 44(7):2077-2106.