

技术总结

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.09.007

预氧化强化混凝工艺处理南水北调-水库掺混源水

时真男^{1,2}, 陈伯俭^{1,2}, 唐锋兵^{1,2}, 李艳平³, 碗莹^{1,2}, 成瑞雪^{1,2},
李思敏^{1,2}

(1. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038;
2. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 3. 华北电力大学科技学院
建筑工程系, 河北 保定 071000)

摘要: 针对邯郸市双水源供水体系,开展了预氧化强化混凝工艺处理南水北调-本地水库掺混源水试验。结果表明,单因素试验得到的PAC、次氯酸钠最佳投加量分别为5~15、0.1~1.0 mg/L,慢速反应搅拌速度以60~100 r/min为宜;采用Box-Behnken法对单因素试验参数进行优化,并建立了响应值为叶绿素a和浊度去除率与PAC、次氯酸钠投加量及慢速反应搅拌速度的二次回归模型,通过Design-Expert软件得到的最优工艺参数如下:PAC投加量为11.85 mg/L、次氯酸钠投加量为0.88 mg/L、慢速反应搅拌速度为67 r/min,此时对叶绿素a和浊度去除率的预测值分别为93.27%、90.79%,与实测值93.26%、90.85%高度接近。

关键词: 预氧化; 混凝; 南水北调源水; 响应面分析; 叶绿素a; 浊度

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)09-0036-06

Treatment of Source Water from South-to-North Water Diversion Project Mixed with Reservoir Water by Pre-oxidation Enhanced Coagulation Process

SHI Zhen-nan^{1,2}, CHEN Bo-jian^{1,2}, TANG Feng-bing^{1,2}, LI Yan-ping³, WAN Ying^{1,2},
CHENG Rui-xue^{1,2}, LI Si-min^{1,2}

(1. Hebei Technology Innovation Center for Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;
3. Department of Architectural Engineering, North China Electric Power University Science & Technology College, Baoding 071000, China)

Abstract: Based on dual water sources of Handan water supply system, source water from South-to-North Water Diversion Project mixed with local reservoir water was treated by pre-oxidation enhanced coagulation process. The optimum dosage of PAC and sodium hypochlorite were 5-15 mg/L and 0.1-1.0 mg/L respectively, and the optimum stirring speed of slow reaction was 60-100 r/min. The Box-Behnken method was used to optimize the single factor test parameters of the process, and a secondary

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110-002); 河北省重点研发计划项目(18273806D); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(1723209055)

通信作者: 李思敏 E-mail: chyeli@126.com

regression model with the response value (chlorophyll a and turbidity removal rates) and PAC dosage, sodium hypochlorite dosage and slow reaction stirring speed were established. The optimal process parameters obtained by Design-Expert software were as follows: PAC dosage of 11.85 mg/L, sodium hypochlorite dosage of 0.88 mg/L and slow reaction stirring speed of 67 r/min. Under the optimal condition, the predicted removal rates of chlorophyll a and turbidity were 93.27% and 90.79%, respectively, which were close to the measured values of 93.26% and 90.85%.

Key words: pre-oxidation; coagulation; source water from South-to-North Water Diversion Project; response surface analysis; chlorophyll a; turbidity

南水北调工程是我国的战略性大型水利工程,自其建成调水后极大地缓解了我国水资源时空分布不均和北方地区水资源严重短缺、地下水过度开采等问题,优化了国家水资源配置格局。自2014年12月南水北调中线工程建成通水至今,其沿线受水城市已先后将原有水源切换或者部分切换为南水北调水源。

邯郸市作为南水北调中线工程的受水城市,自2015年7月22日起其所辖某饮水厂的供水水源已由单一的本地水库水源切换为以南水北调水源为主、本地水库水源为辅的双水源混掺供水(南水北调水源与本地水库水源的日取水量 $Q_{\text{南}}:Q_{\text{库}}=9:1$),水源切换以后本地水库水源作为“热备水源”,提高了邯郸市的供水安全可靠。但是南水北调水源与本地水库水源的水质存在一定的差异,掺混以后混合水源存在季节性藻类高发、低温低浊等问题,使得常规混凝对藻类的去除效果有限且混凝剂消耗量增加。

有研究表明^[1-2],预氧化强化混凝技术可以大大增强对藻类的去除效果。因此,为综合分析影响混凝效果的因素及其交互作用以提高对藻类的去除效果,笔者采用次氯酸钠预氧化对聚合氯化铝(PAC)的混凝效果进行强化,并以叶绿素a和浊度的去除率为响应值,采用响应面法^[3]确定影响混凝效果各因素的水平,旨在为饮水厂的生产运行提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验试剂:聚合氯化铝(Al_2O_3 的有效成分为29%)、次氯酸钠(有效氯含量为10%)。

试验仪器:混凝试验搅拌机、台式浊度仪、手持式双通道荧光计。

在9月—10月进行试验,试验原水取自邯郸市

某饮水厂进水口,为日取水量 $Q_{\text{南}}:Q_{\text{库}}=9:1$ 的混掺水。具体水质:叶绿素a为1.58~2.25 mg/m³,平均值为1.95 mg/m³;浊度为3.22~4.46 NTU,平均值为3.84 NTU;COD_{Mn}为1.92~2.68 mg/L,平均值为2.23 mg/L;藻数量为(411.2~543.4)×10⁴个/L,平均值为482.4×10⁴个/L;pH值的范围为8.01~8.19,平均值为8.12;温度为16~21℃。

1.2 试验方法

选择PAC投加量、次氯酸钠投加量和慢速反应搅拌速度3个影响因素为自变量,利用响应面法以浊度去除率和叶绿素a去除率为响应值,对其水平进行优化。PAC单独混凝试验中,向烧杯中各加入1 L水样,依次投加5、10、15、20、25和30 mg/L的PAC,并以400 r/min快速搅拌1 min,再以80 r/min慢速搅拌10 min,静置沉淀30 min后于液面下2~3 cm处取样,测定叶绿素a浓度和浊度。

慢速反应搅拌速度试验中,向烧杯中各加入1 L水样后,再加入5 mg/L的PAC,以400 r/min快速搅拌1 min后,分别以20、40、60、80、100、120 r/min的转速慢速搅拌10 min,静置沉淀30 min后于液面下2~3 cm处取样,测定叶绿素a浓度和浊度。

次氯酸钠联合PAC试验中,向烧杯中各加入1 L水样,依次加入0.1、0.2、0.5、1.0、2.0、3.0 mg/L的次氯酸钠,以200 r/min的转速混合搅拌20 min,然后加入5 mg/L的PAC,并以400 r/min快速搅拌1 min,再以80 r/min的转速慢速搅拌10 min,静置沉淀30 min后于液面下2~3 cm处取样,测定叶绿素a浓度和浊度。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验分析

2.1.1 PAC投加量对混凝效果的影响

PAC作为混凝剂具有去除水中藻类和有机物的作用^[4]。PAC投加量对混凝效果的影响见图1。

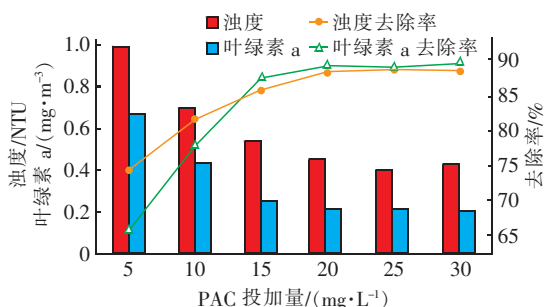


图1 PAC投加量对混凝效果的影响

Fig. 1 Effect of PAC dosage on coagulation

由图1可知,当PAC投加量为5 mg/L时,沉后水的浊度为0.987 NTU,满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的要求。当PAC投加量由5 mg/L增加至15 mg/L时,浊度去除率显著增加,但是当PAC投加量超过20 mg/L时,浊度去除率变化缓慢。其原因为PAC水解产物带正电荷,而藻类带负电荷,当投加量超过一定浓度时,胶体产生再稳现象,影响了胶体的凝聚性,使混凝效果降低^[5]。综合分析加药沉淀后水的剩余浊度与药剂成本,确定PAC投加量以5~15 mg/L为宜。

2.1.2 慢速反应搅拌速度对混凝效果的影响

分析慢速反应搅拌速度对混凝效果的影响,结果如图2所示。

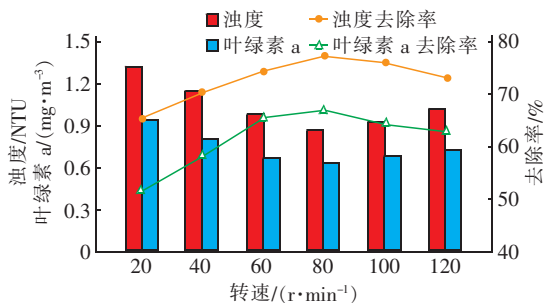


图2 慢速反应搅拌速度对混凝效果的影响

Fig. 2 Effect of slow reaction stirring speed on coagulation

由图2可知,在设定的慢速反应搅拌速度范围内,叶绿素a和浊度的去除率随搅拌速度的增加均呈先增大后减小趋势。这是由于当搅拌速度过慢时,PAC不能与水中藻类和有机物充分接触,PAC的电性中和及吸附架桥作用未充分发挥,导致混凝效果较差;当慢速反应搅拌速度为80 r/min时,叶绿素a和浊度的去除率分别为66.63%和77.16%。当慢速反应搅拌速度过快时,会打破已经成形的较大絮体,从而影响沉后水的剩余浊度^[6],降低了混凝效果。因此,慢速反应搅拌速度应以60~100 r/

min为宜。

2.1.3 次氯酸钠投加量对混凝效果的影响

根据上述研究结果,考察了次氯酸钠联合PAC的混凝效果,结果如图3所示。

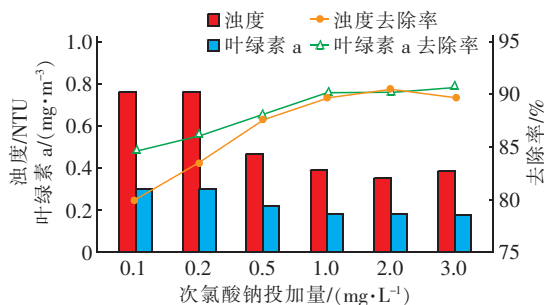


图3 次氯酸钠投加量对混凝效果的影响

Fig. 3 Effect of sodium hypochlorite dosage on coagulation

从图3可以看出,当次氯酸钠投量不超过1.0 mg/L时,随着次氯酸钠投加量的增加,浊度和叶绿素a的去除率均升高。当次氯酸钠投加量为1.0 mg/L时,叶绿素a和浊度的去除率分别为90.25%和89.81%,但继续增加次氯酸钠投加量,去除率变化的幅度均不明显,且当投量为3.0 mg/L时浊度去除率反而下降。次氯酸钠作为一种强氧化剂具有良好的亲水性,能与水以任意比例互溶,通过水解形成的次氯酸可进一步水解为具有极强氧化性的新生态氧,可使藻细胞内的蛋白质变性,从而导致藻细胞死亡,可见投加次氯酸钠后能够有效去除原水中的藻类。此外,投加次氯酸钠以后,在氧化除藻及去除有机物的同时,破坏了原水中胶体的稳定性,增加了对浊度的去除效果。董捷等^[7]对南水北调引江原水(天津段)进行了不同预氧化和消毒试验,研究了消毒副产物,结果表明当原水及滤后水的次氯酸钠投加量分别为1.4、4.0 mg/L时,出水中THMs、二氯乙酸、三氯乙酸等主要消毒副产物指标均低于国标限值。因此,本试验确定次氯酸钠投加量为0.1~1.0 mg/L,此时不会产生消毒副产物超标风险。

2.2 混凝效果影响因素响应面分析

2.2.1 响应面试验结果

当次氯酸钠投加量为0.1~1.0 mg/L、PAC投加量为5~15 mg/L、慢速反应搅拌速度为60~100 r/min时,以叶绿素a和浊度的去除率为响应值,通过Design-Expert软件中的Box-Behnken程序设计3因素3水平共17组试验方案,对3个因素进行优化以找出最优水平。试验设计及结果见表1。

表 1 响应面分析试验设计及结果

Tab. 1 Design and results of response surface analysis test

序号	PAC 投加量/ (mg · L ⁻¹)	次氯酸钠投加量/ (mg · L ⁻¹)	慢速反应搅拌速度/ (r · min ⁻¹)	叶绿素 a 去除率/%	浊度去除 率/%
1	15	0.10	80	87.64	80.55
2	10	0.55	80	88.66	82.56
3	10	0.55	80	88.14	81.54
4	5	1.00	80	86.63	79.59
5	5	0.10	80	65.53	71.79
6	10	0.55	80	89.18	83.59
7	15	0.55	60	92.26	91.15
8	15	1.00	80	93.15	89.23
9	10	1.00	100	89.38	86.03
10	5	0.55	100	75.26	81.54
11	10	1.00	60	92.75	90.77
12	10	0.55	80	88.66	82.56
13	5	0.55	60	77.32	82.22
14	15	0.55	100	91.27	87.18
15	10	0.10	60	76.01	78.97
16	10	0.10	100	75.77	77.95
17	10	0.55	80	88.66	82.56

2.2.2 二次回归模型分析

采用 Design-Expert 软件处理试验数据,拟合得到关于 PAC 投加量(A)、次氯酸钠投加量(B)和慢速反应搅拌速度(C)的二次回归模拟方程,定量描述 PAC 投加量、次氯酸钠投加量和慢速反应搅拌速度及其交互作用对目标响应值叶绿素 a 去除率(Y₁)、浊度去除率(Y₂)的影响,所得回归模型的拟合方程见式(1)和式(2)。

$$Y_1 = 88.66 + 7.45A + 7.12B - 0.83C - 3.90AB + 0.27AC - 0.78BC - 2.44A^2 - 2.99B^2 - 2.20C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 82.56 + 4.12A + 4.55B - 1.30C + 0.22AB - 0.82AC - 0.93BC - 0.09A^2 - 2.18B^2 + 3.05C^2 \quad (2)$$

对该回归方程进行方差分析,结果见表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知,模型的显著性属于极显著(P<0.01),说明模型符合统计学意义。同时,表 2 中自变量一次项 A、B、C 及二次项 AB、A²、B²、C² 和表 3 中自变量一次项 A、B、C 及二次项 B²、C² 都为极显著。表 2、表 3 中失拟项的 P 值分别为 0.057 1、0.233 2(P>0.05),失拟项为不显著。可见所得方程的非正常误差较小,方程 Y 与 A、B、C 回归方程的相关性较强。

表 2 叶绿素 a 去除率回归方程的方差分析

Tab. 2 Variance analysis of chlorophyll a removal rate regression equation

项 目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	1 010.68	9	112.30	261.92	<0.000 1
A	443.72	1	443.72	1 034.92	<0.000 1
B	405.56	1	405.56	945.90	<0.000 1
C	5.54	1	5.54	12.93	0.008 8
AB	60.76	1	60.76	141.72	<0.000 1
AC	0.29	1	0.29	0.67	0.440 8
BC	2.45	1	2.45	5.71	0.048 2
A ²	24.99	1	24.99	58.29	0.000 1
B ²	37.55	1	37.55	87.58	<0.000 1
C ²	20.31	1	20.31	47.37	0.000 2
残差	3.00	7	0.43		
失拟项	2.46	3	0.82	6.07	0.057 1
纯误差	0.54	4	0.14		
总离差	1 013.68	16			

表 3 浊度去除率回归方程的方差分析

Tab. 3 Variance analysis of turbidity removal rate regression equation

项 目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	377.48	9	41.94	53.05	<0.000 1
A	135.88	1	135.88	171.88	<0.000 1
B	165.26	1	165.26	209.04	<0.000 1
C	13.55	1	13.55	17.13	0.004 4

续表3 (Continued)

项 目	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
AB	0.19	1	0.19	0.24	0.635 8
AC	2.71	1	2.71	3.42	0.106 7
BC	3.46	1	3.46	4.38	0.074 8
A ²	0.034	1	0.034	0.043	0.841 8
B ²	20.05	1	20.05	25.36	0.001 5
C ²	39.17	1	39.17	49.55	0.000 2
残差	5.53	7	0.79		
失拟项	3.43	3	1.14	2.18	0.233 2
纯误差	2.10	4	0.53		
总离差	383.01	16			

Design-Expert软件的拟合结果显示,叶绿素a

去除率和浊度去除率的预测值与实测值具有良好的线性关系,回归模型中叶绿素a去除率和浊度去除率的决定系数 R^2 分别为0.997 0、0.985 6,预测去除率的决定系数 R^2_{pred} 分别为0.960 3、0.848 0,校正去除率的决定系数 R^2_{adj} 分别为0.993 2、0.967 0,均大于0.8,说明模型的拟合性好、试验误差小、回归性好^[8]。

2.2.3 交互作用分析及试验验证

次氯酸钠预氧化强化混凝过程中,PAC投加量、次氯酸钠投加量和慢速反应搅拌速度对叶绿素a去除率与浊度去除率影响的响应面分析如图4和图5所示。

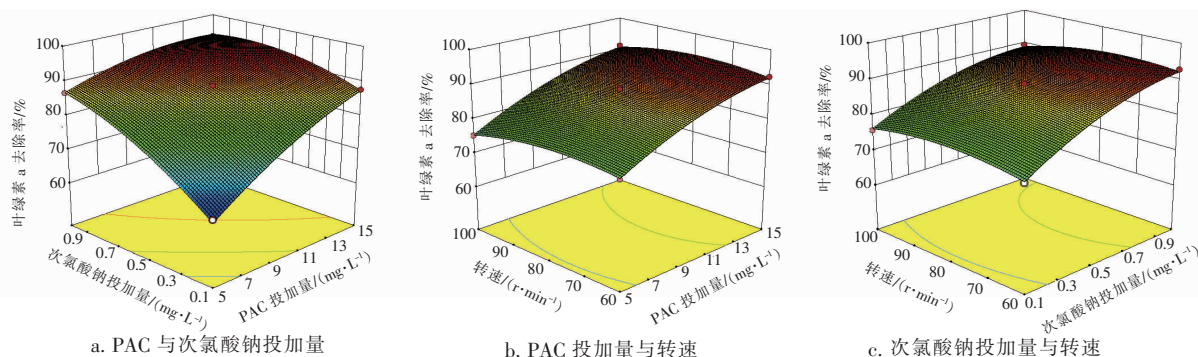


图4 各因素交互作用对叶绿素a去除率影响的响应面分析

Fig.4 Response surface analysis for interactive effects of three parameters on chlorophyll a removal rate

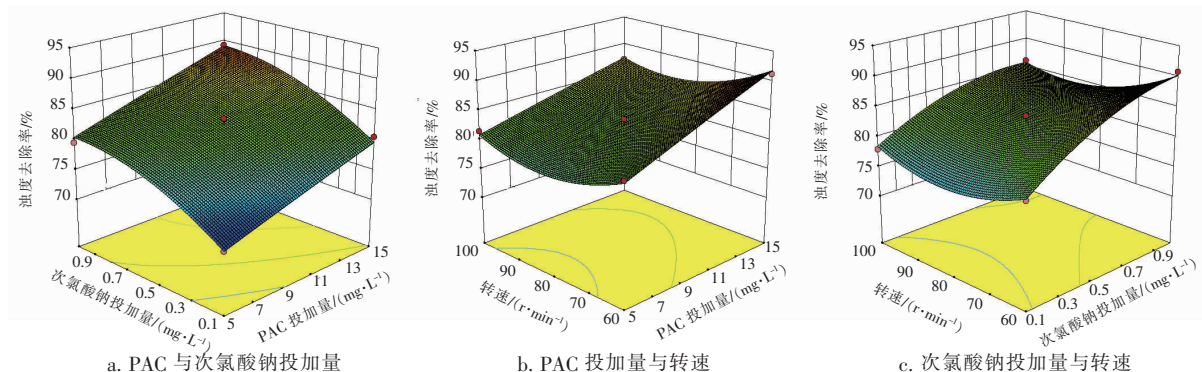


图5 各因素交互作用对浊度去除率影响的响应面分析

Fig.5 Response surface analysis for interactive effects of three parameters on turbidity removal rate

从图4和图5可以看出,在PAC和次氯酸钠投加量范围内,叶绿素a和浊度去除率随投加量的增加而升高,且PAC和次氯酸钠的交互作用极显著。因为次氯酸钠的预氧化可使藻细胞内的蛋白质变性进而导致藻细胞死亡,也可降解或破坏水中有机物的结构,破坏了水中胶体的稳定性,从而达到强化混凝效果,因此采用次氯酸钠进行预氧化可以提高对叶绿素a和浊度的去除效果。

综合考虑对叶绿素a和浊度的去除率,次氯酸钠预氧化强化混凝工艺的最佳参数如下:PAC投加量为11.85 mg/L、次氯酸钠投加量为0.88 mg/L、慢速反应搅拌速度为67 r/min,此时对叶绿素a和浊度的去除率分别为93.27%、90.79%。

2.3 优化参数验证

根据响应面分析法对各参数的优化结果,取PAC投加量为11.85 mg/L、次氯酸钠投加量为0.88

mg/L、慢速反应搅拌速度为 67 r/min,通过 3 组平行试验对其结果进行验证。结果表明,当原水叶绿素 a 为 1.97、1.76、2.08 mg/m³ 时,实际去除率分别为 93.25%、93.23%、93.31%;当原水浊度为 3.45、3.58、4.15 NTU 时,实际去除率分别为 90.70%、90.99%、90.87%,3 组试验中叶绿素 a 与浊度的平均去除率分别为 93.26%、90.85%,与模型得到的预测值 93.27%、90.79% 的偏差均小于 1%,说明模型可真实反映次氯酸钠与 PAC 投加量和慢速反应搅拌速度对次氯酸钠预氧化强化混凝效果的影响。

3 结论

① 以南水北调水源为主、本地水库水源为辅的双水源掺混水为研究对象,通过单因素试验确定 PAC 的投加量为 5~15 mg/L、次氯酸钠的投加量为 0.1~1.0 mg/L、慢速反应搅拌速度为 60~100 r/min 较适宜。

② 建立了叶绿素 a 去除率、浊度去除率与 PAC 投加量、次氯酸钠投加量、慢速反应搅拌速度的二次回归模型,采用 Design-Expert 软件分析得到的最佳 PAC 投加量为 11.85 mg/L、次氯酸钠投加量为 0.88 mg/L、慢速反应搅拌速度为 67 r/min,此时对叶绿素 a 以及浊度的实际平均去除率分别达到 93.26%、90.85%。

参考文献:

- [1] 王品飞,倪澜琦,张丹轶,等. 预氧化强化混凝去除藻类的影响因素[J]. 净水技术,2016,35(1):33-37.
Wang Pinfei, Ni Lanqi, Zhang Danyi, et al. Influencing factors of algae removal with pre-oxidation and enhanced coagulation processes [J]. Water Purification Technology, 2016, 35(1): 33-37 (in Chinese).
- [2] 陆建红,张晋,刘晓冬. 南水北调水源与黄河水源的混合原水混凝工艺试验[J]. 净水技术,2018,37(2):60-64,80.
Lu Jianhong, Zhang Jin, Liu Xiaodong. Technological test of coagulation process for mixed raw water from water sources of Yellow River and South-North Diversion[J]. Water Purification Technology, 2018, 37(2): 60-64, 80 (in Chinese).
- [3] Sevgi P, Perviz S. Application of response surface methodology with a Box-Behnken design for struvite precipitation[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(10):2396-2407.

- [4] Tang X M, Zheng H L, Zhao C, et al. Removal of dissolved organic matter from algae-polluted surface water by coagulation[J]. Desalination and Water Treatment, 2016. DOI:10.1080/19443994.2016.1152510.
- [5] Peter K, Thomas G, Grossart H P, et al. Restoration of a eutrophic hard-water lake by applying an optimised dosage of poly-aluminium chloride (PAC) [J]. Limnologica, 2018, 70:33-48.
- [6] 任鹏飞,南军,郑凯. 机械破碎强度对絮体破碎再絮凝过程的影响[J]. 中国给水排水,2016,32(17):56-60.
Ren Pengfei, Nan Jun, Zheng Kai. Effect of mechanical breakage strength on breakage and re-growth process of flocs[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 56-60 (in Chinese).
- [7] 董捷,张怡然,方自毅,等. 引江原水不同预氧化和消毒条件下消毒副产物生成对比研究[J]. 天津科技,2018,45(7):14-15,20.
Dong Jie, Zhang Yiran, Fang Ziyi, et al. Comparison of DBPs formation of Yangtze River raw water by preoxidation and disinfection [J]. Tianjin Science & Technology, 2018, 45(7): 14-15, 20 (in Chinese).
- [8] 蒋贞贞,朱俊任. 响应面法优化聚合硫酸铁铝强化混凝处理工艺[J]. 湖北农业科学,2014,53(5):1131-1136.
Jiang Zhenzhen, Zhu Junren. Optimizing improved coagulation process of polymeric aluminum ferric sulfate with response surface analysis [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(5): 1131-1136 (in Chinese).



作者简介:时真男(1969-),女,陕西咸阳人,硕士,副教授,从事水及废水处理理论与技术研究。

E-mail:2496660291@qq.com

收稿日期:2019-11-12