

# 高铁酸钾预氧化强化混凝除藻效能及机理研究

张忠祥<sup>1</sup>, 宋浩然<sup>2</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 任芝军<sup>3</sup>, 齐晶瑶<sup>1</sup>, 马军<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 东莞理工学院 生态环境工程技术研究中心, 广东 东莞 523808; 3. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401)

**摘要:** 为了应对蓝藻水华,研究了高铁酸钾预氧化对混凝除藻效能的影响。结果表明,高铁酸钾预氧化能显著提高混凝工艺对藻细胞和溶解性有机物的去除效果。在4 mg/L的最佳高铁酸钾投量下,对藻细胞、浊度、总有机物、溶解性有机物的去除率分别为73.0%、65.6%、58.5%、17.4%,与单独混凝相比,分别提高了19.0%、16.9%、11.4%、5.6%。此外,高铁酸钾预氧化对含藻水中具有紫外特性和荧光特性的有机物均有一定的去除效果。机理研究表明,高铁酸钾预氧化使藻细胞失活,Zeta电位升高,且其分解产物纳米铁氧化物吸附在藻细胞表面,增加了藻细胞的密度,从而提高了混凝除藻效能。

**关键词:** 高铁酸钾; 混凝; 蓝藻; 三维荧光; Zeta电位; 破藻率

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)15-0031-06

## Efficiency and Mechanism of Algae Removal by Potassium Ferrate Pre-oxidation Enhanced Coagulation

ZHANG Zhong-xiang<sup>1</sup>, SONG Hao-ran<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, REN Zhi-jun<sup>3</sup>,  
QI Jing-yao<sup>1</sup>, MA Jun<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Research Center for Eco-environmental Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China; 3. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The effect of potassium ferrate pre-oxidation on the removal of algal by coagulation was investigated in order to cope with cyanobacteria bloom. The results indicated that potassium ferrate pre-oxidation could significantly improve the removal efficiency of the algal cell and dissolved organic matters by the coagulation process. Under the optimal potassium ferrate dosage of 4 mg/L, the removal rates of algal cells, turbidity, total organic matter and soluble organic matter were 73.0%, 65.6%, 58.5% and 17.4%, respectively, which increased by 19.0%, 16.9%, 11.4% and 5.6% compared with those of coagulation alone. Besides, potassium ferrate pre-oxidation could remove organic compounds with ultraviolet and fluorescence characteristics. It was found that potassium ferrate pre-oxidation could inactivate algae and improve the Zeta potential of the algal cell. In addition, the decomposition product of potassium ferrate, namely nano iron oxides, could adsorb onto the surface of the algal cells and increase their specific gravity, which might contribute to the coagulation removal of algae.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0207203)

通信作者: 马军 E-mail: majun@hit.edu.cn

**Key words:** potassium ferrate; coagulation; cyanobacteria; three-dimensional fluorescence; Zeta potential; cell lysis rate

随着工农业的不断发展,大量氮、磷等营养物质排放到受纳水体,导致蓝藻水华时常暴发。藻细胞可以穿透滤池进入供水管网,使出水色度、嗅味超标,藻毒素具有极强的肝毒性,且藻类有机物是重要的消毒副产物前体物,严重威胁饮用水供水安全<sup>[1-2]</sup>。混凝是水厂常规工艺中去除悬浮颗粒的重要手段之一,然而藻细胞的密度小、表面电负性强,分泌的藻类有机物增加混凝剂消耗的同时能够附着在藻细胞表面,增加其稳定性,使得混凝除藻效能下降<sup>[3]</sup>。化学预氧化是一种有效的强化混凝手段,目前采用的氧化方式主要包括预氯化、臭氧预氧化和高锰酸钾预氧化等<sup>[4]</sup>。但化学预氧化在强化混凝除藻的同时,存在藻细胞破裂、消毒副产物增加和色度超标的风险<sup>[5]</sup>。高铁酸钾是一种新型绿色水处理药剂,同时具有氧化和絮凝作用,且分解产物铁氧化物没有毒性,是一种理想的强化混凝药剂<sup>[6]</sup>。

笔者选取铜绿微囊藻作为蓝藻代表,模拟蓝藻水华水体,研究高铁酸钾预氧化强化混凝除藻效能。主要考察了高铁酸钾预氧化对藻细胞和溶解性有机物的去除效能,并对高铁酸钾预氧化后有机物紫外特性和荧光特性的变化进行分析,另外对高铁酸钾预氧化强化混凝的机理进行了探讨,旨在为水厂应对蓝藻水华提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

铜绿微囊藻购自中科院水生所(编号:HB909),采用BG11培养基进行培养,培养条件:光暗比为12 h:12 h、光照强度为2 500 lx、温度为(25±1)℃。混凝剂采用硫酸铝,高铁酸钾由实验室自制<sup>[7]</sup>。将生长至稳定期初期的纯培养藻液,在4 500 r/min下离心12 min后弃去培养基,用充分静置后的江水稀释藻细胞浓度至 $(1 \pm 0.1) \times 10^6$ 个/mL,初始pH值为 $7.5 \pm 0.1$ ,模拟含藻水。

### 1.2 试验方法

采用烧杯试验,在六联混凝搅拌器上进行。向500 mL水样中投加特定剂量的高铁酸钾进行预氧化,150 r/min快速搅拌5 min;随后投加2 mg/L硫酸铝(以Al计),150 r/min快速搅拌1 min,50 r/min慢速搅拌10 min后静置30 min。取上清液进行分

析,空白试验为不投加任何药剂的水样。

### 1.3 分析方法与仪器

藻细胞去除率以溶液在680 nm处的吸光度( $OD_{680}$ )计算;高铁酸钾采用分光光度法测定<sup>[7]</sup>;浊度采用哈希台式浊度仪(2100AN)测定;溶液中剩余铁浓度采用电感耦合等离子体质谱仪测定;总有机碳(TOC)和溶解性有机碳(DOC)采用总有机碳检测仪测定;三维荧光采用哈希荧光分光光度计进行测定,并对数据进行荧光区域积分法(FRI)分析<sup>[8]</sup>;Zeta电位采用马尔文激光粒度仪测定;藻细胞经SYTOX green荧光染料染色后由流式细胞仪测定破藻率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高铁酸钾预氧化对藻细胞的去除效果

高铁酸钾在不同投加量条件下对藻细胞的去除效果如图1所示。单纯投加混凝剂时,对藻细胞的去除率为54.0%;投加高铁酸钾预氧化强化混凝后,藻细胞去除率持续上升,当投量达到4 mg/L时,除藻率明显提升,达到了73.0%,当投量增加到7 mg/L时,除藻率为81.0%。高铁酸钾预氧化显著提高了混凝除藻效能,但当其投量超过4 mg/L时,促进作用减弱。

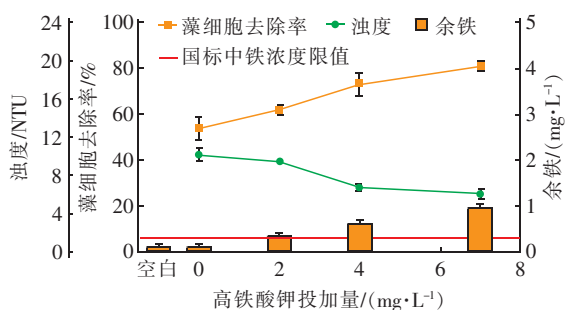


图1 高铁酸钾预氧化对藻细胞和浊度的去除效果以及剩余铁浓度的变化

Fig.1 Removal effect of algal cell and turbidity by potassium ferrate pre-oxidation and change of residue iron concentration

对浊度的去除效果与藻细胞相似。空白水样中的浊度为19.9 NTU,单纯投加混凝剂后浊度下降到10.2 NTU,去除率为48.7%。投加高铁酸钾预氧化后,浊度去除效果明显提高,当高铁酸钾投加量为4 mg/L时,剩余浊度为6.84 NTU,去除率为65.6%,

提高了16.9%。继续增加高铁酸钾投量,浊度去除率提升不明显,这可能是因为增加高铁酸钾投量促进混凝除藻的同时,过量的铁氧化物颗粒本身会产生浊度。所以高铁酸钾预氧化强化混凝的最佳投量为4 mg/L。

高铁酸钾分解产生的羟基氧化铁等纳米铁氧化物会吸附在藻细胞表面,起到促进絮凝的效果<sup>[9]</sup>。水中剩余铁含量可以大致反映出藻细胞表面所吸附的铁含量。随着高铁酸钾投量的增加,吸附在藻细胞表面的铁含量也相应增加。高铁酸钾投量从2 mg/L增加到7 mg/L(以 $K_2FeO_4$ 计)时,吸附在藻细胞表面的铁(以Fe计)含量从0.33 mg/L增加到1.12 mg/L。但藻细胞吸附的铁含量占总投加量的比例稳定在56.8%~58.6%,表明高铁酸盐中发挥作用的有效比例稳定。

投加高铁酸钾预氧化会增加出水铁超标风险。空白水样中的本底铁含量为0.12 mg/L,单独混凝后铁浓度变化不大。当投加高铁酸钾预氧化后,随着投量的增加,剩余铁浓度逐渐升高,在2 mg/L的低投加量下,剩余铁浓度为0.349 mg/L,超过了《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)中0.3 mg/L的限值;当高铁酸钾投加量增加到7 mg/L时,水中剩余铁浓度达到了0.97 mg/L。因此,采用高铁酸钾预氧化时,混凝工艺出水剩余铁浓度较高,应在后续处理单元中注意防范铁超标风险。

## 2.2 高铁酸钾预氧化对有机物的去除效果

试验结果表明,高铁酸钾预氧化强化混凝亦可以有效去除水中的有机物。原水TOC浓度为12.94 mg/L,单独混凝处理后剩余TOC浓度为6.85 mg/L,去除率为47.1%。当投加高铁酸钾强化混凝时,TOC可得到进一步去除,高铁酸钾投量为4 mg/L时,TOC去除率可达到58.5%,提高了11.4%,剩余浓度为5.37 mg/L;继续增加高铁酸钾投量至7 mg/L,TOC去除率为59.9%,提升效果减弱,这与藻细胞和浊度的去除规律一致。

混凝工艺对DOC的去除效果明显弱于TOC,表明相比于悬浮颗粒有机物,溶解性有机物更难被混凝工艺去除。原水DOC浓度为5.51 mg/L,单独混凝工艺处理后剩余浓度为4.86 mg/L,对DOC的去除率为11.8%。当投加高铁酸钾后,DOC的去除效果有一定提高。高铁酸钾投量为4 mg/L时,剩余DOC浓度为4.55 mg/L,DOC去除率为17.4%,相

比预氧化前提高了5.6%;进一步增加高铁酸钾投量至7 mg/L时,DOC去除率为18.7%,剩余浓度为4.48 mg/L,DOC的去除效果提升不明显。

高铁酸钾预氧化处理含藻水的过程中,一方面高铁酸钾的强氧化性会破坏藻细胞结构,影响细胞膜通透性,导致部分胞内有机物释放到水中;另一方面高铁酸钾分解原位产生的羟基氧化铁等纳米颗粒具有良好的吸附性能,能吸附去除水中部分溶解性有机物<sup>[7]</sup>。DOC的持续下降说明即使有少量胞内有机物释放,高铁酸钾预氧化仍能促进含藻水中溶解性有机物的去除。

## 2.3 高铁酸钾预氧化对含藻水紫外特性的影响

紫外吸光度可以有效反映水中的有机物含量,水处理实际应用中通常检测 $UV_{254}$ 来反映水中的溶解性有机物尤其是芳香性有机物的含量<sup>[8]</sup>。对高铁酸钾预氧化强化混凝后的水样进行紫外吸光度测定,水样在紫外波段的全扫描变化如图2所示。

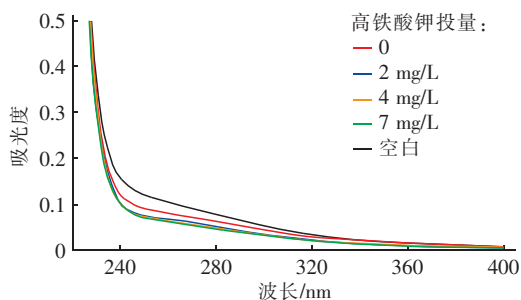


图2 高铁酸钾预氧化强化混凝处理后水样的紫外波段全扫描

Fig. 2 UV full scan of effluent from potassium ferrate pre-oxidation enhanced coagulation process

由图2可知,空白水样在紫外波段具有较强的吸收,单独混凝处理可以降低水样在紫外波段的吸收。当采用高铁酸钾预氧化后,2 mg/L的投量即可以明显降低溶液在紫外波段的吸收,继续增加高铁酸钾的投量,对溶液的紫外吸收影响变弱。空白水样的 $UV_{254}$ 值为 $0.113\text{ cm}^{-1}$ ,单独混凝处理后 $UV_{254}$ 值降为 $0.086\text{ cm}^{-1}$ ,去除率为23.9%;投加2 mg/L的高铁酸钾预氧化可以显著提高 $UV_{254}$ 的去除率至36.3%,当投量增加至4 mg/L时,去除率升至41.6%,进一步增加高铁酸钾投量至7 mg/L, $UV_{254}$ 的去除率变化不明显。一方面高铁酸钾氧化藻细胞会释放一定量的胞内有机物,这些胞内物通常具有一定的紫外吸收<sup>[10]</sup>;另一方面高铁酸钾氧化可以破

坏有机物中具有紫外吸收特性的结构;最后高铁酸钾分解生成的纳米颗粒可以有效吸附水中溶解性有机物并通过混凝去除。紫外吸光度的下降表明,高铁酸钾预氧化强化混凝有助于去除含藻水中具有紫外吸收特性的有机物。

#### 2.4 高铁酸钾预氧化对含藻水荧光特性的影响

荧光光谱技术具有灵敏度高、选择性好、样品预处理简单的特点,已经被大量应用于天然水体中有机物的表征<sup>[8,10]</sup>。Chen等<sup>[8]</sup>将整个荧光光谱划分为5个区域,分别代表不同荧光特性的有机物,如图3(a)所示。区域Ⅰ(Ex:200~250 nm,Em:280~330 nm)和区域Ⅱ(Ex:200~250 nm,Em:330~380 nm)代表具有芳香结构的蛋白质;区域Ⅲ(Ex:200~250 nm,Em:380~500 nm)代表富里酸类物质;区域Ⅳ(Ex:250~450 nm,Em:280~380 nm)代表溶解性微生物代谢类物质;区域Ⅴ(Ex:250~450 nm,Em:380~500 nm)代表腐殖酸类物质。将混凝后的水样进行三维荧光光谱分析,结果如图3所示。

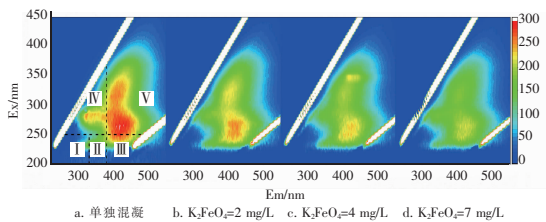


图3 高铁酸钾预氧化强化混凝对含藻水中荧光特性有机物的去除效果

Fig.3 Removal effect of fluorescence organics by potassium ferrate pre-oxidation enhanced coagulation process

单独混凝处理后的水样中以腐殖酸类物质为主,同时含有少量的富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物及芳香性蛋白质。投加高铁酸钾预氧化后,明显提高了各区域有机物的去除效果。采用荧光区域积分法(FRI)对各区域荧光体积的变化进行定量分析,计算公式如下:

$$\Phi_i = \int_{\lambda_{ex}} \int_{\lambda_{em}} I(\lambda_{ex}, \lambda_{em}) d\lambda_{ex} d\lambda_{em} \quad (1)$$

式中: $\Phi_i$ 为区域*i*的荧光体积,  $AU \cdot nm^2$ ;  $I(\lambda_{ex}, \lambda_{em})$ 为在激发波长 $\lambda_{ex}$ 和发射波长 $\lambda_{em}$ 时的荧光强度。高铁酸钾预氧化对各区域荧光体积的影响如图4所示。单独混凝处理后主要成分是腐殖酸类物质(区域Ⅴ),荧光体积为 $33.55 \times 10^5 AU \cdot nm^2$ ,占总荧光体积的71.5%。高铁酸钾预氧化强化混凝处理后,各区域荧光体积都有明显下降。投加2

mg/L 高铁酸钾时,总荧光体积下降23.5%,区域Ⅰ(芳香性蛋白质)的荧光体积下降70.9%;区域Ⅳ(溶解性微生物代谢产物)的荧光体积下降22.1%。区域Ⅳ的主要成分可能包含藻类有机物,表明高铁酸钾预氧化对去除藻类有机物具有强化效果。继续增加高铁酸钾投量至7 mg/L时,总荧光体积的下降率增加了36.4%,其中,区域Ⅰ和区域Ⅳ的荧光体积没有明显下降,表明增加高铁酸钾投量对提高芳香性蛋白质和溶解性微生物代谢产物去除效果的作用不明显;区域Ⅴ的荧光体积下降率提高了36.1%,剩余荧光体积为 $21.43 \times 10^5 AU \cdot nm^2$ 。虽然各荧光区域的去除效果不同,但不同条件处理后的各区域荧光体积占比基本保持稳定,例如投加7 mg/L 高铁酸钾预氧化后区域Ⅴ的荧光体积占总荧光体积的比例为71.8%,与单独混凝处理后的占比基本相当,说明高铁酸钾预氧化强化混凝过程中对不同荧光特性组分的去除没有明显的选择性。

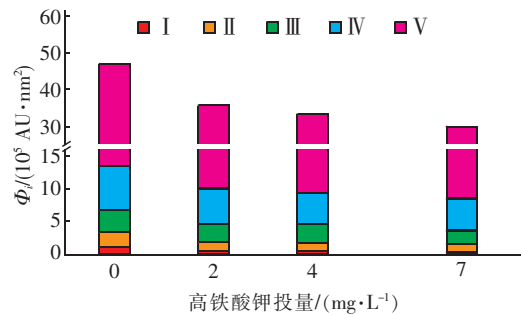


图4 高铁酸钾预氧化强化混凝对不同区域荧光体积的去除效果

Fig.4 Removal effect of fluorescence volume of different regions by potassium ferrate pre-oxidation enhanced coagulation process

#### 2.5 高铁酸钾预氧化强化混凝除藻机理

Zeta 电位代表藻细胞表面所带的电荷,Zeta 电位净值越高,藻细胞之间的静电斥力就越大,不利于藻细胞的凝聚<sup>[11]</sup>。此外,采用化学预氧化的方式强化混凝时都会对藻细胞有不同程度的氧化破坏。为了探讨高铁酸钾预氧化强化混凝机理,考察了高铁酸钾预氧化对藻细胞表面 Zeta 电位和破藻率的影响,结果如图5所示。原水中藻细胞表面的 Zeta 电位为-32.5 mV,单独混凝处理后上升到-26.8 mV;投加高铁酸钾预氧化后,Zeta 电位持续上升,当高铁酸钾投量为4 mg/L时,Zeta 电位上升到-18.6 mV,继续增加投量至7 mg/L,Zeta 电位为-17.4

mV,促进效果减弱。

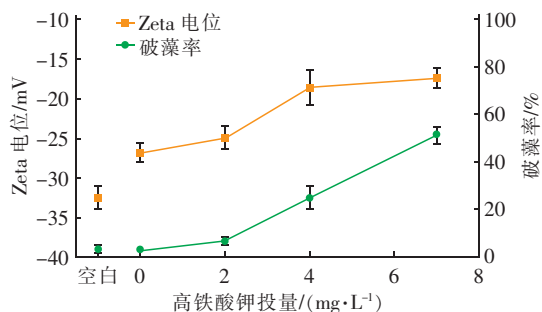


图5 高铁酸钾预氧化对 Zeta 电位和破藻率的影响

Fig.5 Effect of potassium ferrate pre-oxidation on Zeta potential and cell lysis rate

荧光染料 SYTOX green 可以通过通透性较强的细胞膜并与细胞内的核酸结合染色,把被染色的藻细胞比例定义为破藻率。原水中藻细胞破藻率约为3%,单独混凝处理后破藻率并无明显变化。高铁酸钾预氧化明显破坏了藻细胞,破藻率随着高铁酸钾投量的增加而持续上升,当投量为4 mg/L时,破藻率为25.2%;当投量增加到7 mg/L时,破藻率达到58.3%。虽然破藻率明显上升,但胞内有机物的释放并不显著(见2.2~2.4节),所以细胞膜通透性的改变并不等同于胞内物的释放。

高铁酸钾预氧化强化混凝除藻的作用机理主要分为两个方面:高铁酸钾的氧化作用及其分解产物的吸附作用。高铁酸钾的强氧化作用可以使藻细胞失活,主要表现在:破藻率的上升;改变藻细胞表面结构,降低藻细胞表面的空间位阻效应;氧化细胞表面的藻类有机物,提高 Zeta 电位。高铁酸钾分解原位产生的羟基氧化铁等纳米铁氧化物可以吸附在藻细胞表面,一方面,铁氧化物在中性条件下通常带正电,纳米颗粒吸附在藻细胞表面同样有助于提高 Zeta 电位,促进藻细胞互相凝聚;另一方面,纳米铁氧化物的吸附增加了藻细胞的密度,使藻细胞易于沉淀。综合高铁酸钾的氧化作用和吸附作用,高铁酸钾可以有效地强化混凝除藻。

### 3 结论

① 高铁酸钾预氧化显著提高了混凝工艺对含藻水中悬浮有机物和溶解性有机物的去除效果,增加高铁酸钾投量有助于强化混凝除藻效能,但投量超过4 mg/L时促进效果减弱。在4 mg/L的最佳高铁酸钾投量下,藻细胞去除率为73.0%,浊度去除率为65.6%。

② 高铁酸钾预氧化强化混凝对水体中具有紫外特性和荧光特性的有机物均有一定的去除效果,在4 mg/L的高铁酸钾投量下,UV<sub>254</sub>去除率为41.6%;当高铁酸钾投量为7 mg/L时,总荧光强度相比单独混凝工艺降低了36.4%。

③ 高铁酸钾通过氧化作用及其分解产物纳米铁氧化物的吸附作用,使藻细胞失活、Zeta 电位上升、藻细胞密度增加,从而强化混凝除藻效能。

### 参考文献:

- [1] Xie P, Ma J, Fang J, *et al.* Comparison of permanganate preoxidation and preozonation on algae containing water: cell integrity, characteristics, and chlorinated disinfection byproduct formation[J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(24):14051-14061.
- [2] 邵迎,姚峻嵘. 混凝除藻在常规工艺自来水厂中的应用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(21):47-49.  
Shao Ying, Yao Junrong. Application of coagulation for algae removal in waterworks using conventional treatment process[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(21):47-49(in Chinese).
- [3] Xie P, Chen Y, Ma J, *et al.* A mini review of preoxidation to improve coagulation[J]. *Chemosphere*, 2016, 155:550-563.
- [4] 王立宁,方晶云,马军,等. 化学预氧化对藻类细胞结构的影响及其强化混凝除藻[J]. *东南大学学报:自然科学版*, 2005, 35(S1):182-185.  
Wang Lining, Fang Jingyun, Ma Jun, *et al.* Effect of pre-oxidation on algal cell morphology and algal removal by enhanced coagulation process[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2005, 35(S1):182-185(in Chinese).
- [5] 谢鹏超. 化学预氧化对藻类特性及氯化消毒副产物生成规律的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.  
Xie Pengchao. Effects of Pre-oxidation on the Characteristics of Algae and the Formation of Algae Derived Chlorinated Disinfection by Products [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [6] Sharma V K, Zboril R, Varma R S. Ferrates: greener oxidants with multimodal action in water treatment technologies[J]. *Acc Chem Res*, 2015, 48(2):182-191.
- [7] Yang T, Wang L, Liu Y, *et al.* Removal of organoarsenic with ferrate and ferrate resultant nanoparticles: oxidation

- and adsorption [J]. Environ Sci Technol, 2018, 52 (22):13325 – 13335.
- [ 8 ] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation – emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37 (24):5701 – 5710.
- [ 9 ] Kubiňáková E, Hřivěš J, Gál M, *et al.* Effect of ferrate on green algae removal [J]. Environ Sci Pollut Res, 2017, 24 (27):21894 – 21901.
- [10] 方晶云. 蓝藻细胞及藻类有机物在氯化消毒中副产物的形成机理与控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- Fang Jingyun. Formation and Control of Disinfection By-products in Chlorination of B-G Algae and Algal Organic Matter (AOM) [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010 (in Chinese).
- [11] Aktas T S, Takeda F, Maruo C, *et al.* A comparison of Zeta potentials and coagulation behaviors of cyanobacteria

and algae [J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 48 (1/3):294 – 301.



作者简介: 张忠祥 (1991 – ), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 研究方向为消毒副产物控制技术。

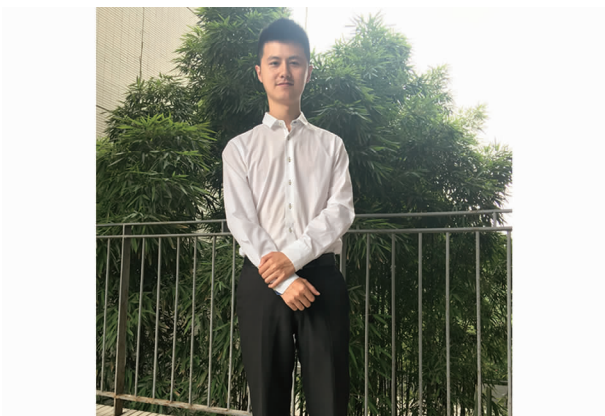
E – mail: zzzxiang2012@163.com

收稿日期: 2019 – 04 – 27

(上接第30页)

- the dairy farm wastewater treatment with bio-nest anaerobic reactor demonstration project [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18 (5): 109 – 114 (in Chinese).
- [12] Huang X, Li W, Zhang D, *et al.* Ammonium removal by a novel oligotrophic *Acinetobacter* sp. Y16 capable of heterotrophic nitrification – aerobic denitrification at low temperature [J]. Bioresour Technol, 2013, 146:44 – 50.
- [13] 辛玉峰, 曲晓华, 袁梦冬, 等. 一株异养硝化 – 反硝化不动杆菌的分离鉴定及脱氮活性 [J]. 微生物学报, 2011, 51 (12):1646 – 1654.
- Xin Yufeng, Qu Xiaohua, Yuan Mengdong, *et al.* Isolation and identification of a heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Acinetobacter* sp. YF14 and its denitrification activity [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51 (12):1646 – 1654 (in Chinese).
- [14] Cai H, He W, Yanan W, *et al.* *Flavobacterium aurantiibacter* sp. nov., an orange-pigmented bacterium isolated from

cyanobacterial aggregates in a eutrophic lake [J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2018, 68 (6):1839 – 1844.



作者简介: 李宸 (1993 – ), 男, 湖北十堰人, 硕士研究生, 主要从事生物膜反应器脱氮工艺研究。

E – mail: 455160796@qq.com

收稿日期: 2019 – 03 – 11