

# 天然有机物对铁锰复合氧化膜去除氨氮的影响

卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 田璇

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 利用中试系统和静态试验,以富里酸为对象,研究天然有机物对石英砂滤料表面负载的铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响。中试结果表明,当富里酸浓度在0~10 mg/L时,富里酸对氨氮的去除没有明显影响,氨氮去除率均高于95.2%;当富里酸浓度在10~20 mg/L时,氨氮去除率降至65.4%,甚至出水氨氮超标。静态试验结果表明,氨氮降解过程符合一级反应动力学,相关系数 $R^2 > 0.9$ , $\ln(C_0/C_t)$ 与反应时间 $t$ 有很好的线性关系,随着富里酸浓度的增加,氨氮降解速率 $k_1$ 值逐渐降低,其中空白的 $k_1$ 值为 $0.012\ 67\ \text{min}^{-1}$ ,富里酸浓度为5、10和20 mg/L时 $k_1$ 值分别为空白的78.6%、63.4%和57.6%,即富里酸对氨氮的氧化过程有不利的影响。FTIR光谱分析结果证实了富里酸在铁锰复合氧化膜的表面吸附,且富里酸的羧基离子和铁锰复合氧化膜的表面羟基在吸附过程中起着重要作用。

**关键词:** 铁锰复合氧化膜; 地表水; 氨氮; 富里酸

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0007-06

## Effect of Natural Organic Matter on Ammonium Removal Performance of Iron-manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment

ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, TIAN Xuan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Iron-manganese co-oxide film coated quartz sands was used to treat surface water, and the effect of natural organic matter (the representative substance was fulvic acid) on the ammonium removal performance was investigated in a pilot-scale filtration system and static experiment. The pilot-scale experiment results showed that the removal efficiency of ammonium stabilized over 95.2% with fulvic acid concentrations ranging from 0 to 10 mg/L, while it fell to 65.4% and even effluent ammonium concentration exceeded the standard with fulvic acid concentrations ranging from 10 mg/L to 20 mg/L. In static experiment, the degradation of ammonium fitted the first-order reaction kinetics, the related coefficient  $R^2 > 0.9$ ,  $\ln(C_0/C_t)$  and the reaction time presented a good linear relation, that was to say, as fulvic acid concentration increasing, the degradation rate of ammonium  $k_1$  value would decrease gradually, among which the blank  $k_1$  was  $0.012\ 67\ \text{min}^{-1}$ , while fulvic acid concentration was 5 mg/L, 10 mg/L and 20 mg/L, the  $k_1$  values were 78.6%, 63.4% and 57.6% of the blank  $k_1$ , respectively; fulvic acid played an adverse part in the ammonium oxidation process. FTIR spectra demonstrated the

adsorption of fulvic acid on iron-manganese co-oxide film, showing that carboxyl ions in the fulvic acid and the surface hydroxyl of the iron-manganese co-oxide film played an important role in adsorption process.

**Key words:** iron-manganese co-oxide film; surface water; ammonium; fulvic acid

地表水源是我国饮用水的主要来源<sup>[1]</sup>,但随着工农业的发展和城市化进程的加快,地表水源的水质逐渐呈现微污染状态,其中氨氮是主要污染因子之一<sup>[2-3]</sup>。氨氮浓度超标会使供水系统的消毒效率降低,增加氯消毒过程中的需氯量<sup>[4]</sup>。此外,在加氯消毒时氨氮及其与氯反应生成的氯胺能够参与消毒副产物(DBPs)的产生过程,对人类健康具有潜在危害<sup>[5]</sup>。天然水体受到污染时,通常氨氮和有机物的含量均较高<sup>[6]</sup>,故需考察天然有机物(NOM)对氨氮去除的影响。微污染水源水中的有机物主要为天然有机物,地表水源水中腐殖质类化合物是 NOM 的代表性物质,占 NOM 的 60%~90%,它由腐殖酸(HA)和富里酸(FA)组成,其浓度范围从地下水的 30  $\mu\text{g/L}$  到地表水的 30  $\text{mg/L}$ ,一般水源水中的含量在 10  $\text{mg/L}$  左右,在天然水环境中 FA 约占腐殖质类化合物的 80%<sup>[7]</sup>。NOM 会影响水体的色度和嗅味,并且会导致消毒过程中消毒副产物的产生<sup>[8-9]</sup>。

近年来研究发现,铁锰复合氧化膜( $\text{MeO}_x$ )可高效去除地下水和地表水中的氨氮,氨氮几乎全部被转化为硝态氮,其去除机理为催化氧化作用<sup>[10-14]</sup>。相对传统的生物法和吸附法,该方法具有可实现铁、锰和氨氮的同步高效去除,启动成熟时间短(26 d),冬季低温阶段氨氮去除活性仍可保持较高水平等优势。目前铁锰复合氧化膜去除氨氮的技术已经成熟,但天然有机物对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响及作用机制研究还未开展。笔者以富里酸为研究对象,通过人工模拟不同类型的地表水源水,探究天然有机物对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响及作用机制,明确铁锰复合氧化膜对不同浓度天然有机物水体中氨氮的去除特性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

中试装置主要由两个完全相同的有机玻璃滤柱组成,分别命名为 B0 和 B1,如图 1 所示。滤料为地下水条件下培养成熟的铁锰复合氧化膜活性滤料,有效滤层厚度为 80 cm,承托层厚为 20 cm。B0 和 B1 滤柱进行同步试验,滤速为 7  $\text{m/h}$ 。

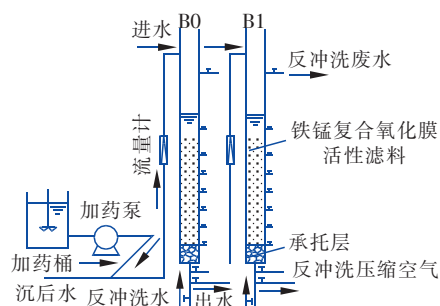


图 1 中试装置示意

Fig. 1 Schematic of pilot-scale filter

静态试验装置是一个高为 25 cm、内径为 10 cm 的透明有机玻璃柱,如图 2 所示。装置内放置磁力搅拌子且底部持续通入空气,使反应液混合均匀的同时,保证滤料与反应液充分接触。

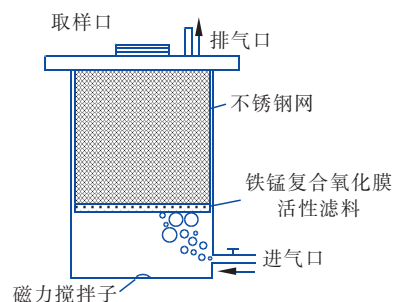


图 2 静态试验装置示意

Fig. 2 Schematic of static experimental device

### 1.2 水质参数

试验期间,滤柱进水水质如表 1 所示。

表 1 滤柱进水水质参数

Tab. 1 Influent quality of ASBR and biofilter

项 目	范围
$T/^{\circ}\text{C}$	19.0~23.3
$\text{DO}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	6.7~8.0
pH 值	7.53~7.83
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.85~2.49
$\text{TOC}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.44~1.73
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	1.48~1.52
$\text{TP}/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	3~8
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.024~0.055
碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	50~55

地表水源水经过混凝沉淀处理后,通过加药泵

向沉后水中投加一定量的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  和富里酸,调节进水氨氮和富里酸浓度,再由滤柱进行过滤处理。

### 1.3 试验方法

中试系统将 B0 滤柱作为空白对照,B1 滤柱分别投加 5、10、15 和 20 mg/L 的 FA 溶液,研究天然有机物含量对  $\text{MeO}_x$  去除氨氮的影响;通过比较滤柱上部 60 cm 滤层的氨氮体积去除效率 (VARR),进一步研究  $\text{MeO}_x$  对氨氮去除活性的变化。VARR 计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$\text{VARR} = \frac{(c_{a,\text{in}} - c_{a,\text{out}}) \times Q}{\Delta z \times A} \quad (1)$$

式中  $c_{a,\text{in}}$ 、 $c_{a,\text{out}}$ ——滤柱进水和取样点出水的氨氮浓度,mg/L

$Q$ ——进水流量, $\text{m}^3/\text{h}$

$A$ ——滤柱的横截面积, $\text{m}^2$

$\Delta z$ ——对应取样点的滤层厚度,m

静态试验中称取约 50 g 湿滤料,并放置在不锈钢网内。采用蒸馏水配制 1.5 L 反应液(每组的氨氮浓度均为 1.0 mg/L,FA 浓度分别为 0、5、10 和 20 mg/L)。向反应液中投加 150 mg/L 的  $\text{NaHCO}_3$  以保证水中具有一定的碱度。同时向装置底部持续通入 0.4  $\text{m}^3/\text{h}$  的空气,以保持试验过程中 DO 恒定。将反应液曝气 5 min 充分混合后取样作为起始浓度,将滤料浸没液面,重新计时,于 0、10、20、30、60 和 90 min 分别测定氨氮、硝态氮、亚硝态氮、pH 值、DO 和水温,研究不同 FA 浓度下的氨氮降解动力学。对未吸附与吸附富里酸的  $\text{MeO}_x$  进行 FE-SEM、EDS 和 FTIR 表征,探讨天然有机物对活性氧化膜去除氨氮的影响机制。

### 1.4 分析测试方法

氨氮:纳氏试剂分光光度法;硝态氮:紫外分光光度法;亚硝态氮:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;TP:钼锑抗分光光度法; $\text{COD}_{\text{Mn}}$ :高锰酸盐指数法;碱度:酸碱指示剂滴定法;DO 浓度:溶解氧仪;pH 值:雷磁 PHS-3C 型 pH 计;水温:温度计;浊度:雷磁 WZG-2000 浊度计;TOC:燃烧氧化-非分散红外吸收法;表面形貌及元素组成:场发射扫描电子显微镜;官能团定性分析:傅里叶变换红外光谱仪。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铁锰复合氧化膜对天然有机物的去除

地表水源水中有机物浓度较低,滤柱出水  $\text{UV}_{254}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TOC 浓度分别为 0.021 ~ 0.054

$\text{cm}^{-1}$ 、0.69 ~ 2.22 mg/L、0.37 ~ 1.58 mg/L,相应的去除率分别为 10.6% ~ 16.0%、20.2% ~ 25.4%、16.9% ~ 20.2%。有文献指出生物砂滤池对微污染源水中的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TOC 均有很好的去除效果,对 TOC 的去除率为 18% ~ 25%;温度对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果有较大影响,常温下对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的平均去除率为 30%,低温下平均去除率则降至 15.9%<sup>[16]</sup>。由此可知,铁锰复合氧化膜对有机物的去除能力较好。

通过测定滤柱进出水的  $\text{UV}_{254}$  值来间接反映水中富里酸的浓度( $y = 183.39x$ )。通过人工投加一定浓度的富里酸溶液,以模拟不同的水质条件。滤柱进出水的 FA 浓度及其去除率见表 2,可以看出铁锰复合氧化膜对有机物的去除效果较好。

表 2 滤柱进出水的 FA 浓度及其去除率

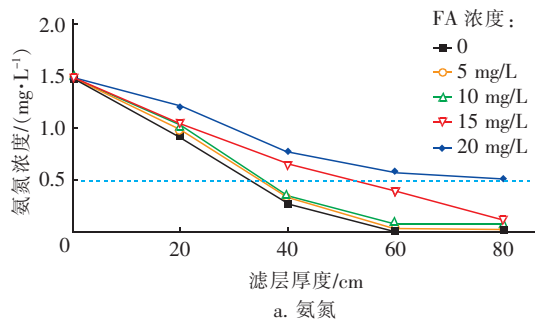
Tab. 2 Concentration and removal rate of FA

FA 投加量/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	进水/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	出水/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	去除率%
5	7.70	6.42	16.6
10	12.29	10.82	12.0
15	17.97	16.14	10.2
20	21.82	19.62	10.1

### 2.2 天然有机物含量对复合氧化膜活性的影响

#### 2.2.1 中试结果

图 3 为不同 FA 浓度下滤柱对氨氮的去除效果。由图 3(a)可知,FA 浓度在 0 ~ 10 mg/L 时,FA 对氨氮的去除没有明显影响,氨氮去除率均高于 95.2%;而 FA 浓度在 10 ~ 20 mg/L 时,氨氮去除率持续下降,其中当 FA 浓度为 20 mg/L 时去除率为 65.4%,出水氨氮浓度超标。随着 FA 浓度的增加,滤柱上部 60 cm 滤层的氨氮体积去除效率均逐渐下降,依次为 17.28%、16.83%、16.25%、12.65%、10.66%,其中 FA 浓度为 20 mg/L 时的氨氮体积去除效率为不加 FA 的 61.7%,说明高浓度 FA 会抑制氨氮的去除。



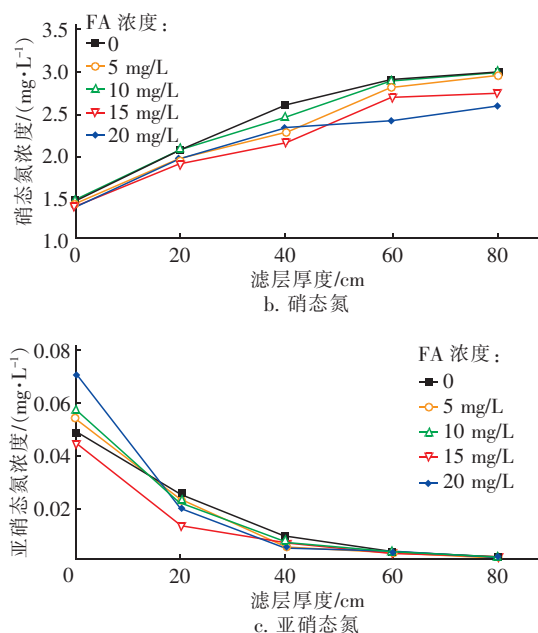


图3 不同FA浓度下氨氮、亚硝态氮、硝态氮浓度的沿程变化

Fig. 3 Variation of nitrogen concentration along the process at different FA concentrations

由图3(b)可知,FA浓度在0~10 mg/L时硝态氮生成量几乎没有变化,而FA浓度在10~20 mg/L时硝态氮生成量逐渐减少,说明高浓度的FA对氨氮的氧化过程有抑制作用。由图3(c)可知,沿程均无亚硝态氮的积累,氨氮几乎全部转化为硝态氮。

### 2.2.2 静态试验

静态试验中溶解氧充足,那么滤料表面的氧化活性位将是污染物去除的限制因素。图4为不同FA浓度下氨氮降解反应动力学拟合曲线。

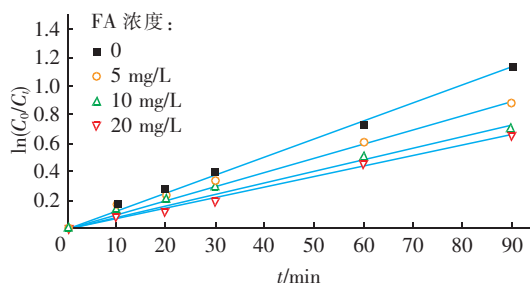


图4 不同FA浓度下氨氮降解反应动力学拟合曲线

Fig. 4 Kinetic fitting curve of ammonium degradation reaction at different FA concentrations

由图4可知,氨氮降解过程符合一级反应动力学,相关系数 $R^2 > 0.9$ , $\ln(C_0/C_t)$ 与反应时间 $t$ 有很好的线性关系。随着FA浓度的增加,氨氮降解速

率 $k_1$ 值逐渐降低,其中空白组的氨氮降解速率值为 $0.01267 \text{ min}^{-1}$ ,FA浓度为5、10和20 mg/L时 $k_1$ 值分别为空白组的78.6%、63.4%和57.6%。

### 2.3 天然有机物对去除氨氮的影响机制

图5为 $\text{MeO}_x$ 的FE-SEM图像。未吸附FA的 $\text{MeO}_x$ 表面较为致密光滑,而吸附FA的 $\text{MeO}_x$ 表面有较多粘稠状的絮体,这些絮体可能是富里酸与 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 等结合形成的不溶性络合物,覆盖 $\text{MeO}_x$ 表面后占据了氨氮的氧化活性位,从而导致氨氮去除能力下降。

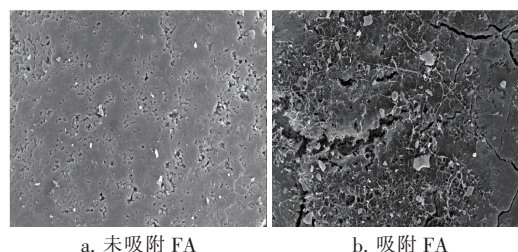


图5  $\text{MeO}_x$ 的SEM照片( $\times 1000$ )

Fig. 5 SEM of  $\text{MeO}_x$  before and after adsorption of FA

EDS谱线显示, $\text{MeO}_x$ 含有Mn、O、Fe、Ca、Si、Al和C这几种元素,其中Mn、Fe和O是构成 $\text{MeO}_x$ 的主要元素,Si和O可能是裸露的石英砂的主要元素,Ca和Al可能是与富里酸结合形成的络合物的主要元素,C和O是 $\text{MeO}_x$ 表面有机物的主要元素(见图6)。

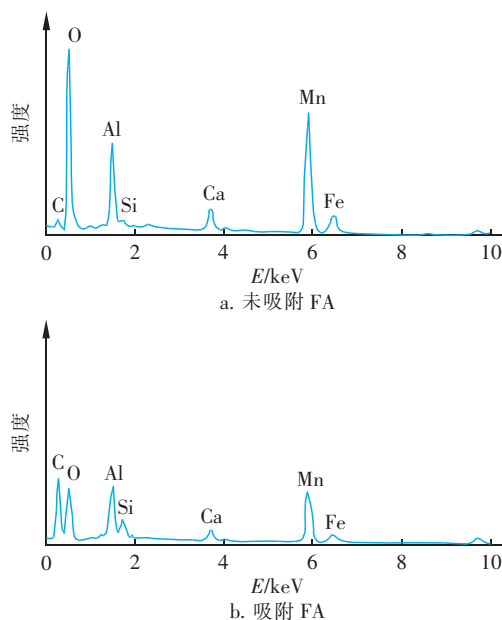


图6  $\text{MeO}_x$ 的EDS谱线

Fig. 6 EDS spectra of  $\text{MeO}_x$



由EDS点扫结果可知,未吸附FA时,C、O、Al、Si、Ca、Mn、Fe的比例分别为18.06%、49.39%、7.34%、0.63%、1.84%、17.99%和0.85%,而吸附了FA后的值相应为55.53%、26.09%、3.98%、1.40%、1.04%、8.02%、0.30%。可知,MeO<sub>x</sub>表面C元素的原子百分数大幅增加,进一步证实了FA在MeO<sub>x</sub>表面的吸附行为,该结果与SEM分析结果相一致。

为进一步研究FA在MeO<sub>x</sub>表面的吸附行为,对FA、MeO<sub>x</sub>及吸附FA的MeO<sub>x</sub>等样品进行FTIR表征,结果见图7。

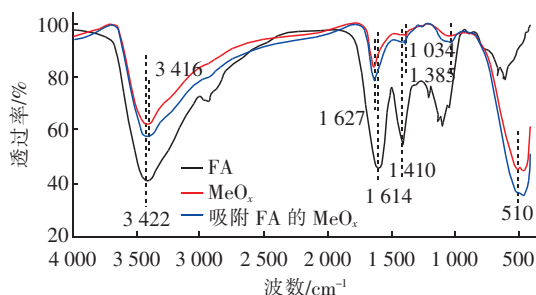


图7 MeO<sub>x</sub>的FTIR谱线

Fig. 7 FTIR spectra of MeO<sub>x</sub>

从图7可以看出,FA的FTIR图谱在不同波数范围内出现许多强吸收峰,证明FA中存在复杂的官能团,其中3422 cm<sup>-1</sup>处的强宽峰为芳环C—H及=C—H的伸缩振动,3000~2800 cm<sup>-1</sup>之间出现饱和C—H的反对称和对称伸缩振动,1614 cm<sup>-1</sup>处较尖锐的吸收峰为苯环的骨架振动,证明有苯环存在,与Stevenson等提出的某种富里酸的结构模型相一致。1410 cm<sup>-1</sup>处的强峰为羧基离子、酚—OH变形或—C—O伸缩,1150~1070 cm<sup>-1</sup>之间出现的一系列尖峰为脂肪族和苯环的C—O—C伸缩,可以推断出FA中含有较多的羧基和酚羟基。

对于MeO<sub>x</sub>的FTIR图谱,510 cm<sup>-1</sup>附近出现了O—Mn—O键的特征伸缩振动峰,证实了MeO<sub>x</sub>的存在。3600~3000 cm<sup>-1</sup>范围内为水分子H—O—H键的伸缩振动及羟基吸收带,1627 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰表示H—O—H键的弯曲振动,表明样品中含有结合水分子。1034 cm<sup>-1</sup>附近的吸收峰对应MeO<sub>x</sub>的表面羟基Mn—OH。对于吸附FA的MeO<sub>x</sub>的FTIR图谱,510 cm<sup>-1</sup>及3416 cm<sup>-1</sup>附近出现的强吸收峰分别对应了O—Mn—O键和H—O—H键的伸缩振动。1627 cm<sup>-1</sup>及1385 cm<sup>-1</sup>附近的强尖峰分

别对应—COO<sup>-</sup>基团的不对称和对称的伸缩弯曲振动。这些吸收峰的出现证实了FA在MeO<sub>x</sub>表面的吸附,可以推断出Mn—OH、—COO<sup>-</sup>等官能基团在吸附过程中起到重要作用。

### 3 结论

① 富里酸对铁锰复合氧化膜的氨氮去除活性有明显的不良影响,进水FA浓度高于10 mg/L时氨氮氧化去除过程明显受到抑制,进水FA浓度高于20 mg/L时,出水氨氮浓度超标。

② 氨氮降解过程符合一级反应动力学,随着FA浓度的增加,氨氮降解速率 $k_1$ 值逐渐降低,静态试验结果表明FA对氨氮的氧化过程有不良影响。

③ 通过SEM和EDS表征可以证实FA在MeO<sub>x</sub>表面的吸附行为,由FA与溶液中离子形成的不溶性络合物覆盖MeO<sub>x</sub>表面,占据了氨氮的氧化活性位,从而导致氨氮去除能力下降。FTIR表征结果进一步证实了FA在MeO<sub>x</sub>表面的吸附,并表明FA的羧基离子和MeO<sub>x</sub>的表面羟基在吸附过程中起着重要作用。

### 参考文献:

- [1] 周怀东,彭文启,杜霞,等. 中国地表水水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004,2(4):21-30.  
Zhou Huaidong, Peng Wenqi, Du Xia, et al. Assessment of surface water quality in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004,2(4):21-30(in Chinese).
- [2] 叶少帆,王志伟,吴志超. 微污染水源水处理技术研究进展和对策分析[J]. 水处理技术,2010,12(6):22-28.  
Ye Shaofan, Wang Zhiwei, Wu Zhichao. Progress of slightly polluted water resource treatment technology and evaluation on treatment measures[J]. Technology of Water Treatment, 2010,12(6):22-28(in Chinese).
- [3] 叶辉,许建华. 饮用水中的氨氮问题[J]. 中国给水排水,2000,16(11):31-34.  
Ye Hui, Xu Jianhua. The problem of ammonium in drinking water[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(11):31-34(in Chinese).
- [4] 魏彬,李君,崔莹,等. 水厂出水加氯消毒的加氯量确定[J]. 中国给水排水,2010,26(2):86-92.  
Wei Bin, Li Jun, Cui Ying, et al. Determination of chlorine dosage during chlorination of finished water from waterworks[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26

- (2):86-92(in Chinese).
- [5] Enns G M. Neurologic damage and neurocognitive dysfunction in urea cycle disorders[J]. *Seminars in Pediatric Neurology*, 2008, 15(3):132-139.
- [6] 何斐,李磊,徐炎华. 微污染水源水处理技术研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(11):4672-4673.  
He Fei, Li Lei, Xu Yanhua. Research progress on micro-polluted source water treatment[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(11):4672-4673(in Chinese).
- [7] 刘文,吴一蓁. 二氧化钛光催化氧化水中天然有机物富里酸[J]. *净水技术*, 2010, 29(6):66-71.  
Liu Wen, Wu Yifan.  $\text{TiO}_2$  photocatalytic oxidation for natural organic matter of fulvic acid in water[J]. *Water Purification Technology*, 2010, 29(6):66-71(in Chinese).
- [8] 刘艳芳,王启山,鲁金凤,等. 原水天然有机物化学特性与消毒副产物关系[J]. *水处理技术*, 2010, 36(2):25-28.  
Liu Yanfang, Wang Qishan, Lu Jinfeng, et al. Chemical characteristic of natural organic matter and relationship with disinfection by-product in drinking water[J]. *Technology of Water Treatment*, 2010, 36(2):25-28(in Chinese).
- [9] 林英姿,吕尊敬. 饮用水氯消毒副产物的控制研究[J]. *中国资源综合利用*, 2017, 35(12):62-66.  
Lin Yingzi, Lü Zunjing. Studies on the control of chlorine disinfection by-products in drinking water[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2017, 35(12):62-66(in Chinese).
- [10] 李埜,黄廷林,程亚,等. 催化氧化滤池中As(V)与铁、锰、氨氮的协同去除[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(23):5-9, 15.  
Li Ye, Huang Tinglin, Cheng Ya, et al. Removal of iron, manganese, ammonia nitrogen and arsenic(V) by active filter film coating on quartz sands[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(23):5-9, 15(in Chinese).
- [11] 汪洋,黄廷林,文刚,等. 地下水中锰对滤料表面氧化膜去除氨氮的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(12):5737-5744.  
Wang Yang, Huang Tinglin, Wen Gang, et al. Effect of manganese on removal of ammonia from groundwater by co-oxides membrane coated sands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(12):5737-5744(in Chinese).
- [12] Huang T, Cao X, Wen G, et al. The study on chemical adsorption of dissolved oxygen on naturally formed co-oxides filter film in aqueous solution: Combined characterization of XPS and TPD[J]. *Water Sci Technol*, 2015, 15(2):411-416.
- [13] Guo Y, Huang T, Wen G, et al. The simultaneous removal of ammonium and manganese from groundwater by iron-manganese co-oxide filter film: The role of chemical catalytic oxidation for ammonium removal[J]. *Chem Eng J*, 2017, 308:322-329.
- [14] Zhang R, Huang T, Wen G, et al. Phosphate dosing to sustain the ammonium removal activity of an iron-manganese co-oxide filter film at pilot scale: Effects on chemical catalytic oxidation[J]. *Chem Eng J*, 2018, 334:1186-1194.
- [15] Lee C O, Boe-Hansen R, Musovic S, et al. Effects of dynamic operating conditions on nitrification in biological rapid sand filters for drinking water treatment[J]. *Water Res*, 2014, 64(7):226-236.
- [16] 李思敏,张建昆,宿程远,等. 生物砂滤池去除微污染源水中有有机物的试验研究[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(17):57-59.  
Li Simin, Zhang Jiankun, Su Chengyuan, et al. Study on organic matter removal in micro-polluted source water by biological sand filter[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(17):57-59(in Chinese).



作者简介:卓瑞双(1993-),女,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为微污染水源水处理及水质改善理论与技术。

E-mail: djewelr@foxmail.com

收稿日期:2018-05-20