

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.23.010

不同阳极板三维电解固定床处理餐饮废水的比较

周俊, 郭倩颖, 杨颖, 刘柏晟, 刘钊, 郑友臣
(湖南城市学院 市政与测绘工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘要: 为提高三维电解固定床对餐饮废水的处理效果,拟在三维电解固定床中采用不同的阳极板材料(不锈钢板、活性炭纤维毡板和钛极板),对三者处理餐饮废水的效果进行综合比较分析,并选出最佳的阳极板材料。通过单因素实验分别改变活性炭投加量、电流密度、初始 pH 值和电解时间,比较这 3 种电极板材料对 COD 和 SS 的去除效果。结果表明,综合考虑处理效果和经济性,钛极板最佳,其次是不锈钢板,最后是活性炭纤维毡板。通过正交实验确定各因素对钛极板处理效果的影响程度,并确定其最佳处理条件如下:活性炭投加量为 15 g/L,电流密度为 50 mA/cm²,初始 pH 值为 3,电解时间为 40 min。最佳条件下,三维电解固定床对动植物油、BOD₅、COD 和 SS 的去除率分别为 99.21%、66.54%、84.21% 和 90.76%。三维电解固定床的阳极可优先选用钛极板,以期在取得较处理好处理效果的同时降低成本。

关键词: 餐饮废水; 三维电解固定床; 钛极板; 活性炭纤维毡板; 不锈钢板

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)23-0058-06

Comparison of Three-dimensional Electrolytic Fixed Bed with Different Anode Plates Treating Catering Wastewater

ZHOU Jun, GUO Qian-ying, YANG Ying, LIU Bai-sheng, LIU Fan,
ZHENG You-chen

(College of Municipal and Mapping Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: In order to improve the treatment efficiency of three-dimensional electrolytic fixed bed treating catering wastewater, different positive plate materials (stainless steel plate, activated carbon fiber plate and titanium plate) were applied in a three-dimensional electrolytic fixed bed. Efficiencies of the three plate materials treating catering wastewater were compared and analyzed comprehensively, and the positive plate material with the best treatment efficiency was selected. By changing the amounts of activated carbon, current density, initial pH and electrolysis time in single-factor experiments, the removal efficiencies of COD and SS were compared among the three plate materials. Considering the treatment efficiency and economy, the titanium plate was the best, followed by the stainless steel plate, and then the activated carbon fiber plate. The influence degree of each factor on the treatment efficiency of titanium plate was determined by orthogonal experiments, and the optimal processing conditions were as follows: dosage of activated carbon was 15 g/L, current density was 50 mA/cm², initial pH was 3 and electrolysis time was 40 min. Under the optimal experimental conditions, the removal efficiencies of

animal and vegetable oils, BOD₅, COD and SS were 99.21%, 66.54%, 84.21% and 90.76%, respectively. Therefore, the titanium plate was suggested to be selected as the anode for the three-dimensional electrolytic fixed bed in order to achieve better treatment efficiency and reduce the cost.

Key words: catering wastewater; three-dimensional electrolytic fixed bed; titanium plate; activated carbon fiber plate; stainless steel plate

餐饮废水含有大量的食物残渣,有机物、油脂、悬浮物含量高。对于油水分离后的餐饮废水,国内外学者研究了很多针对性的处理方法,大致可以分为物理化学法、电化学法和生物法^[1-2]。物理化学法占地面积小、处理设备简单、操作方便,但需要持续投药,处理成本较高、沉渣量大,存在二次污染问题。生物法的处理效率较高、运行成本较低,但其占地面积很大、污泥产量大。电化学法去除效果好、占地面积小、操作简便、沉渣量小、环保清洁,但其存在处理费用较高、电极材料损耗大等问题。若能解决处理成本过高的问题,宜采用电化学法处理城市餐饮废水。

当前电化学法可分为电凝聚法、微电解法、脉冲电解法^[2],但其处理能力有限,为进一步提高其处理能力,可在二维电解的电极板间装填粒状或其他碎屑材料,引入带电的第三极而形成三维电解流化床,增加电解反应面体比,改善传质效果,提高电流效率^[3],但处理成本过高和电极材料损耗较大的问题仍然存在。针对上述问题,采用三维电解固定床,将活性炭颗粒均匀固定在阴阳电极板之间,不需要鼓风机曝气来维持电极粒子的流化状态,但常用的不锈钢阳极板在反应过程中会生成大量Fe(OH)₂絮体,在阳极表面形成一层不溶于水的墨绿色物质,阻碍反应的继续进行,降低污染物的去除效果^[4-5]。因此,分别选择钛极板、活性炭纤维毡板与不锈钢板作为阳极板处理餐饮废水,旨在选出更合适的阳极材料,为三维电解固定床在城市餐饮废水中的进一步应用提供有效参数和技术支持。

1 实验材料及方法

1.1 原水水质

原水为某高校食堂的餐饮废水,其COD、SS、动植物油含量、BOD₅、NH₃-N分别为3 000~4 600、220~500、1 000~1 200、100~600、6~20 mg/L, pH值为5~6; COD、SS、动植物油含量、BOD₅、NH₃-N排放限值分别为500、400、100、350、45 mg/L, pH值为6.5~9.5。

1.2 实验材料与装置

三维电解固定床装置如图1所示。为研究不同电极板材料对餐饮废水的处理效果,分别选择不锈钢板、钛极板和活性炭纤维毡板(缚在不锈钢板表面)作为阳极材料,阴极材料则统一采用石墨板,活性炭颗粒采用捆绑的形式固定在塑料网格板上,极板距为40 mm。自制的有机玻璃电解槽装置尺寸为90 mm×90 mm×100 mm,阳极板尺寸为50 mm×50 mm×2 mm,阴极板尺寸为50 mm×50 mm×2 mm,粒子电极的直径为4 mm、高度为8 mm。采用PS-305AM直流稳压稳流电源(30 V、5 A)。

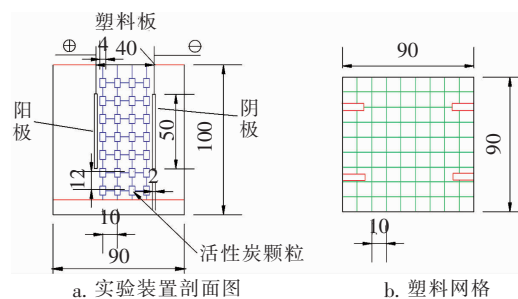


图1 三维电解固定床装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of three-dimensional electrolytic fixed bed

1.3 实验方法

① 粒子电极的制备:将活性炭颗粒在体积浓度为3%的稀硫酸中进行表面活化,再放入清水中浸泡24 h,使其充分解吸,再放入恒温(105 ℃)烘箱中烘烤24 h。使用前将其放入餐饮废水中浸泡72 h,减少其自身的吸附作用。

② 单因素实验:同时对3种电极板进行对比实验,测定对COD和SS的去除率,综合考虑选出最佳电极板。

③ 正交实验:对选出的电极板进行正交实验,以COD为指标,确定最佳组合并比较各因素对电解效果的影响程度。

1.4 分析项目及方法

COD:快速密闭催化消解法,SS:重量法,动植物油:红外测油仪,BOD₅:稀释与接种法,NH₃-N:纳

氏试剂分光光度法。试剂均为分析纯。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验结果

2.1.1 活性炭投加量的影响

假定初始 pH 值为 5、电解时间为 20 min、电流密度为 50 mA/cm^2 ，当活性炭投加量分别为 5、10、15、20、25 g/L 时，三维电解固定床对餐饮废水中 COD 和 SS 的去除率见图 2。

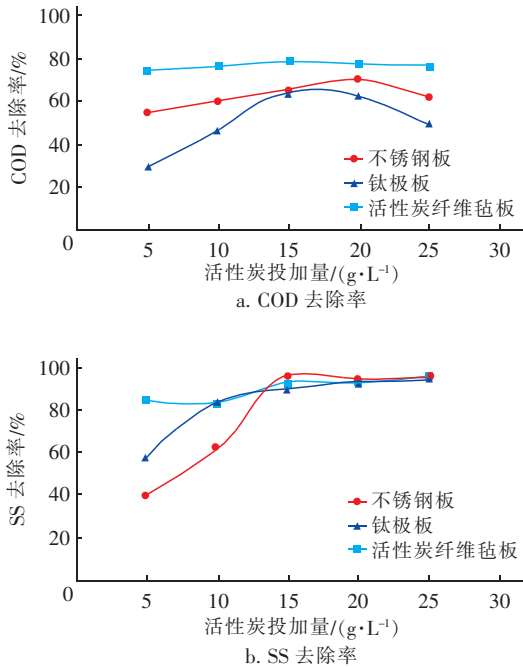


图2 活性炭投加量对 COD 和 SS 去除率的影响

Fig. 2 Effect of activated carbon dosage on COD and SS removal rates

由图 2(a) 可知,当活性炭投加量增加到 15 g/L 时,活性炭纤维毡板对 COD 的去除率最高达到 78.60%,其余活性炭投加量下 COD 去除率接近,这是因为活性炭纤维毡板除了发挥电极作用外,对污染物还具备较强的吸附能力^[6]。不锈钢板、钛极板分别在活性炭投加量为 20、15 g/L 时达到 COD 最高去除率,分别为 70.02%、63.64%,之后两种电极板对 COD 的去除率出现下降,活性炭投加量的增加会使感应带电的活性炭电极数量增加,但活性炭投加量过大则会导致电极粒子之间的距离减小,相互之间产生影响,从而降低去除率^[5]。

由图 2(b) 可知,当活性炭投加量增加到 15 g/L 时,不锈钢板、活性炭纤维毡板和钛极板对 SS 的去除率分别达到 95.35%、92.5% 和 89.40%,之后去

除率趋于平稳。

综合考虑处理效果和经济性,当不锈钢板作为阳极板材料时,活性炭最佳投加量为 20 g/L;当活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板材料时,活性炭最佳投加量为 15 g/L。

2.1.2 电流密度的影响

在最佳活性炭投加量下,假定初始 pH 值为 5、电解时间为 20 min,当电流密度分别为 20、40、50、60、80 mA/cm^2 时,三维电解固定床对餐饮废水中 COD 和 SS 的去除率见图 3。

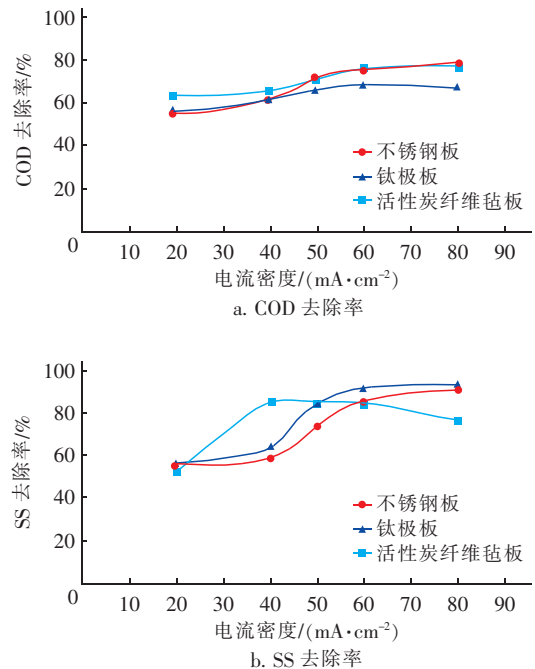


图3 电流密度对 COD 和 SS 去除率的影响

Fig. 3 Effect of current density on COD and SS removal rates

由图 3(a) 可知,当电流密度增加至 60 mA/cm^2 时,不锈钢板、活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板对 COD 的去除率分别达到 75.36%、76.67% 和 67.81%,之后去除率变化趋于平稳,上升幅度明显减小,且增大电流密度使处理成本进一步增加。由图 3(b) 可知,不锈钢板和钛极板作为阳极板时对 SS 的去除率随电流密度的增加而逐步上升,当电流密度增加至 60 mA/cm^2 时,对 SS 的去除率分别达到 85.07% 和 91.20%,之后去除率增长减缓。当电流密度增加至 40 mA/cm^2 时,活性炭纤维毡板作为阳极板对 SS 的去除率最高达到 84.80%,之后随着电流密度的增加反而降低,这是因为当电流密度过

大时被活性炭纤维毡板吸附的 SS 释出,反而增加了溶液中 SS 含量。

综合考虑处理效果和经济成本,不锈钢板、活性炭纤维毡板、钛极板作为阳极板材料时的最佳电流密度均取 60 mA/cm^2 。

2.1.3 初始 pH 值的影响

在最佳活性炭投加量下,电流密度均取 60 mA/cm^2 ,假定电解时间为 20 min ,当初始 pH 值分别为 3、4、5、6、7、9 时,三维电解固定床对 COD 和 SS 的去除率见图 4。

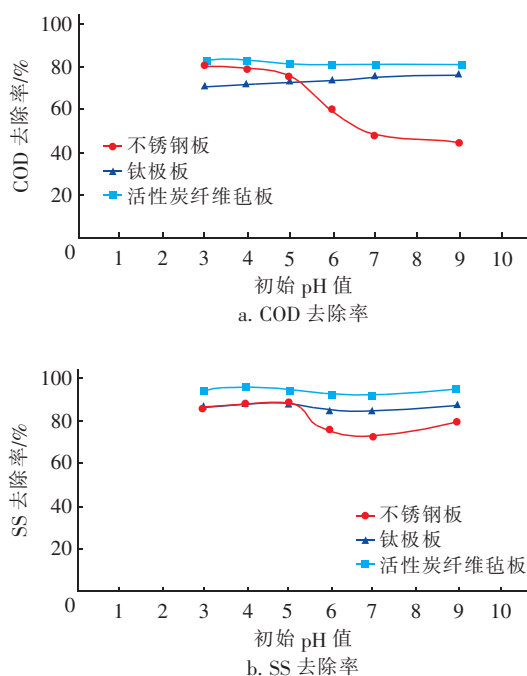


图 4 初始 pH 值对 COD 和 SS 去除率的影响

Fig. 4 Effect of initial pH on COD and SS removal rates

由图 4(a)可知,不锈钢板在酸性条件下去除率较高,初始 pH 值为 3 时,不锈钢板作为阳极板对 COD 的去除率达到 79.66%,这是因为不锈钢阳极在酸性环境中发生 Fenton 反应,产生大量的 $\cdot\text{OH}$ 能够直接氧化有机物,且酸性条件下副反应发生几率较小^[7];而当初始 pH 值为碱性时会产生 Fe^{2+} 和 OH^- ,两者反应产生大量絮凝物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,在电极板表面和粒子电极上覆盖一层不溶于水的墨绿色物质,影响反应的进行,造成 COD 去除率下降。活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板时,在不同初始 pH 值下 COD 去除率比较接近,表明餐饮废水的初始 pH 值对活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极去除 COD 的影响较小。考虑到经济成本,取初始 pH 值

为 5,此时活性炭纤维毡板作为阳极板对 COD 的去除率达到 80.64%,钛极板作为阳极板对 COD 的去除率达到 72.58%。

由图 4(b)可以看出,不同初始 pH 值下活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板时对 SS 的去除率变化不大,考虑到经济成本的问题,取初始 pH 值为 5,此时活性炭纤维毡板作为阳极板对 SS 的去除率达到 94.30%,钛极板作为阳极板对 SS 的去除率达到 87.60%。当初始 pH 值为 5 时,不锈钢板作为阳极板对 SS 的去除率达到 88.20%,之后随着初始 pH 值的增加,SS 去除率大幅下降,在初始 pH 值为 7 时 SS 去除率达到最低,但当初始 pH 值为碱性时 SS 去除率反而又出现上升趋势,这是因为碱性条件下产生了墨绿色的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 絮状沉淀,其增加了 SS 的去除率^[7]。

综合考虑处理效果和经济性,不锈钢板作为阳极板时最适初始 pH 值为 3、活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板时最适初始 pH 值为 5。

2.1.4 电解时间的影响

不锈钢板作为阳极板时活性炭投加量为 20 g/L 、初始 pH 值为 3,活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板时活性炭投加量为 15 g/L 、初始 pH 值为 5,电流密度均取 60 mA/cm^2 ,当电解时间分别为 10、20、30、40、50 min 时,考察三维电解固定床对 COD 和 SS 的去除率。结果表明,当电解时间增加至 30 min 时,不锈钢板作为阳极板对 COD 的去除率最高达到 84.75%。这是因为反应前期产生了大量可以降解有机物的 $\cdot\text{OH}$,所以随时间推移 COD 去除率增加得很快,此后去除能力略微下降,这是因为电解时间越长,溶液中溶解的 Fe^{2+} 越多,部分 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} ,溶液颜色由墨绿色变为红褐色, Fe^{2+} 数量的减少使生成 $\cdot\text{OH}$ 的反应减弱甚至终止,且反应时间越长耗能越多。当电解时间增加至 30 min 时,钛极板和活性炭纤维毡板作为阳极板对 COD 的去除率分别达到 83.46% 和 76.83%,之后随电解时间的增加,二者去除能力趋于稳定。

实验结果还表明,在电解时间增加到 30 min 时,不锈钢板、钛极板、活性炭纤维毡板作为阳极板对 SS 的去除率分别达到 89.40%、90.10% 和 86.49%,此后去除率基本保持平稳。

综合考虑处理效果和经济性,不锈钢板、钛极板、活性炭纤维毡板作为阳极板的最佳电解时间均

为 30 min。

2.2 综合分析

通过活性炭投加量、电流密度、初始 pH 值和电解时间的单因素实验,得出不锈钢板作为阳极板的最佳实验条件如下:活性炭投加量为 20 g/L、电流密度为 60 mA/cm²、初始 pH 值为 3、电解时间为 30 min;钛极板作为阳极板的最佳实验条件如下:活性炭投加量为 15 g/L、电流密度为 60 mA/cm²、初始 pH 值为 5、电解时间为 30 min;活性炭纤维毡板作为阳极板的最佳实验条件如下:活性炭投加量为 15 g/L、电流密度为 60 mA/cm²、初始 pH 值为 5、电解时间为 30 min。

此外,从经济性方面分析,规格同为 50 mm × 50 mm × 2 mm 时,钛极板费用(22 元) > 活性炭纤维毡板(15.5 元) > 不锈钢板(12.5 元),但活性炭纤维毡板和不锈钢板需要经常更换;3 种电极板的运行成本相同(电流密度和电解时间相同)时,不锈钢板处理时需要调节的初始 pH 值较多且活性炭投加量较大,处理费用较高。

从运行管理方面分析,不锈钢阳极易腐蚀,需要定期更换,且反应期间易产生铁泥,对运行管理造成不利影响;钛极板作为阳极板运行管理较方便;活性炭纤维毡板作为阳极板运行效果不稳定,而且反应后期活性炭纤维毡板的吸附能力减弱,需要更换电极板。

综合考虑处理效果、经济成本和运行管理等多方面因素,电极板材料的综合排序为:钛极板 > 不锈钢板 > 活性炭纤维毡板,故决定选用表现较好的钛极板进行正交实验。

2.3 正交实验

以钛极板为阳极、石墨板为阴极,选择活性炭投加量、电流密度、初始 pH 值、电解时间为正交实验的研究因素,每个因素设 3 个水平,以 COD 去除率为指标。正交实验结果见表 1。由表 1 的极差值可知,4 个因素对处理效果的影响排序为:活性炭投加量 > 初始 pH 值 > 电解时间 > 电流密度;最优组合条件为 A₂B₁C₂D₃,即活性炭投加量为 15 g/L,电流密度为 50 mA/cm²,初始 pH 值为 3,电解时间为 40 min。在最优组合条件下,进行钛极板作为阳极板处理餐饮废水实验,测得 COD 去除率为 84.21%、SS 去除率为 90.76%、动植物油去除率为 99.21%、BOD₅ 去除率为 66.54%。

表 1 正交实验结果

Tab. 1 Orthogonal test results

实验号	A:活性炭投加量/(g · L ⁻¹)	B:电流密度/(mA · cm ⁻²)	C:初始 pH 值	D:电解时间/min	COD 去除率/%
1	10	50	2	20	78.80
2	10	60	3	30	80.43
3	10	70	4	40	82.69
4	15	50	3	40	84.62
5	15	60	4	20	81.28
6	15	70	2	30	76.33
7	20	50	4	30	77.56
8	20	60	2	40	75.06
9	20	70	3	20	73.83
均值 1	80.64%	80.33%	76.73%	77.97%	
均值 2	80.74%	78.92%	80.63%	78.10%	
均值 3	75.48%	77.62%	80.51%	80.79%	
极差	5.26%	2.71%	3.78%	2.82%	

3 结论

① 通过不锈钢板、活性炭纤维毡板和钛极板作为阳极板处理餐饮废水的单因素实验,综合考虑处理效果、经济成本和运行管理等方面,确定钛极板更适合作为阳极板处理餐饮废水。

② 通过对钛极板作为阳极板处理餐饮废水进行正交实验,确定各因素对钛极板处理效果影响排序为:活性炭投加量 > 初始 pH 值 > 电解时间 > 电流密度,并确定其最佳处理条件如下:活性炭投加量为 15 g/L、电流密度为 50 mA/cm²、初始 pH 值为 3、电解时间为 40 min,该条件下对动植物油、BOD₅、COD 和 SS 的去除率分别为 99.21%、66.54%、84.21%、90.76%。

参考文献:

- [1] 俞骞,刘勇. 餐饮废水处理方法的研究进展[J]. 工程建设与设计,2017(21):114-116.
Yu Qian, Liu Yong. Research progress of treatment methods for restaurant wastewater[J]. Construction & Design for Engineering, 2017(21):114-116(in Chinese).
- [2] 周俊,焦赞仪,陈翔宇,等. 餐饮废水处理方法的研究现状与展望[J]. 湖南城市学院学报:自然科学版,2016,25(6):73-75,78.
Zhou Jun, Jiao Yunyi, Chen Xiangyu, et al. Introduction and prospect of treatment technique for restaurant wastewater[J]. Journal of Hunan City University: Natural Science, 2016, 25(6):73-75, 78(in Chinese).

- [3] 冯国栋,赵卫星,姜变,等. 三维电极在水处理中的应用[J]. 应用化工,2010,39(9):1390-1393,1396.
Feng Guodong, Zhao Weixing, Jiang Luan, *et al.* Application of 3-dimensional electrode in water treatment [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(9): 1390 - 1393, 1396 (in Chinese).
- [4] Panizza M, Cerisola G. Removal of organic pollutants from industrial wastewater by electrogenerated Fenton's reagent [J]. Water Res, 2001, 35(16): 3987-3992.
- [5] 周俊,鄢恒珍,侯康龙,等. 固定粒子三维电解法处理餐饮废水的研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(7): 78-81.
Zhou Jun, Yan Hengzhen, Hou Kanglong, *et al.* Treatment of restaurant wastewater by fixed particle three-dimensional electrode process [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(7): 78-81 (in Chinese).
- [6] 韩梅,韩占涛,张辰凌,等. 活性炭纤维毡对水中六价铬的吸附性能研究[J]. 化学与生物工程, 2018, 35(7): 51-56.
Han Mei, Han Zhantao, Zhang Chenling, *et al.* Adsorption performance of activated carbon fiber felt for hexavalent chromium in water [J]. Chemistry & Bioengineering, 2018, 35(7): 51-56 (in Chinese).
- [7] 尹玉玲,肖羽堂,朱莹佳. 电 Fenton 法处理难降解废水的研究进展[J]. 水处理技术, 2009, 35(3): 5-9, 17.
Yin Yuling, Xiao Yutang, Zhu Yingjia. Process of refractory wastewater treatment by electro-Fenton method [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(3): 5-9, 17 (in Chinese).



作者简介:周俊(1984-),男,湖南益阳人,硕士,讲师,研究方向为电化学水处理技术。

E-mail: a82800828@163.com

收稿日期:2019-06-25

(上接第 57 页)

中国建筑工业出版社,2008.

Zhang Jinsong, You Zuoliang. Novel Technology for Drinking Water Safety [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008 (in Chinese).

- [19] Lytle D A, Sarin P, Snoeyink V L. The effect of chloride and orthophosphate on the release of iron from a cast iron pipe section [J]. Journal of Water Supply Research and Technology, 2005, 54(5): 267-281.
- [20] Sun H, Shi B, Yang F, *et al.* Effects of sulfate on heavy metal release from iron corrosion scales in drinking water distribution system [J]. Water Res, 2017, 114: 69-77.
- [21] Roberge P R. Corrosion Engineering: Principles and Practice [M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [22] 米子龙. 水源切换对给水管网水质铁稳定的影响及控制特性研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
Mi Zilong. Characteristics of Iron Stability Caused by Water Source Switch and Iron Release Control in Drinking Water Distribution Systems [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015 (in Chinese).



作者简介:赵蓓(1983-),女,河南开封人,博士,高级工程师,主要研究方向为供水管网水质保障技术。

E-mail: zhaobei_10@126.com

收稿日期:2019-10-14