

·科技信息综述·

臭氧高级氧化技术在饮用水安全保障中的作用

赵金辉^{1,2} 陈卫¹ 林涛¹

(1 河海大学环境科学与工程学院,南京 210098; 2 南京工业大学城市建设与安全环境学院,南京 210009)

摘要 随着水源污染的加剧,饮用水安全问题受到了很大的挑战,结合近年来高级氧化技术在水处理中的研究成果,综述了臭氧高级氧化技术在保障饮用水化学和生物安全性方面的研究进展,指出高级氧化—生物活性炭过滤(AOPs—BAC)是未来解决饮用水安全的有效途径之一。

关键词 饮用水安全 高级氧化过程 生物活性炭过滤 控制措施

Effect of advanced ozone oxidization in ensuring drinking water safety

Zhao Jinhui^{1,2}, Chen Wei¹, Lin Tao¹

(1. College of Environmental Science & Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Urban Construction and Safety & Environmental Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: With the intensify of water pollution, drinking water safety faces a big challenge. On the basis of recent progress in research of advanced oxidization processes (AOPs), a summary was made on the use of ozone related advanced oxidization processes in ensuring chemical safety and biological safety of drinking water. In addition, it is pointed that AOPs—BAC is an effective craft in ensuring drinking water safety.

Keywords: Drinking water safety; Advanced oxidization processes (AOPs); Biological activated carbon filter; Controlling measures

近年来,随着研究的深入,饮用水中农药、难降解有毒有机物、第三代污染物——内分泌干扰素、消毒副产物等对人体健康影响较大的污染物对饮用水的安全产生了严峻的挑战,如何保障饮用水安全是近年来给水处理研究的重点。

1 臭氧—活性炭工艺概述

臭氧—活性炭技术被认为是目前解决水源微污染,保障饮用水安全的较理想的深度处理工艺,但在应用中还存在着一些局限,主要如下:

(1) 臭氧的发生成本高,而利用率偏低,使臭氧处理的费用高。

(2) 臭氧对有机物的氧化有选择性,对一些污染

物氧化效果很差。

(3) 由于对有机物氧化的不完全,分解生成的中间产物会阻止臭氧进一步氧化^[1]。对水的 TOC 去除效果很弱,且通常会增加有机物可生化性,导致臭氧氧化后水的 AOC 升高,而后续的生物活性炭过滤对 AOC 的去除有限,对有机污染较严重的原水可能导致出水 AOC 较高,引起生物安全性问题。

(4) 臭氧化会破坏三卤甲烷前体物(THMFP),但去除有限,后续的活性炭过滤对 THMFP 的去除通常也只能达到 20%~35%,导致出水氯化后仍有相当量的三卤甲烷存在,加之臭氧化产生的溴酸盐等臭氧化副产物,使得出水的化学安全性仍存在一定的威胁。

因此,对于污染较严重的原水,提高臭氧利用率和氧化能力成为研究热点。高级氧化技术(AOTs),

国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z311);江苏省自然科学基金项目(BK2006170)。

也叫高级氧化过程(AOPs),就是通过各种水处理技术组合,形成氧化性更强、反应选择性较低的羟基自由基(其氧化还原电位 2.80 V),可使水中的有机物完全矿化。下面就有应用前景的臭氧高级氧化技术在饮用水安全保障方面的研究作一综述。

2 臭氧高级氧化技术在饮用水安全保障方面研究

臭氧高级氧化技术是 20 世纪 80 年代以来发展起来的新技术, O_3/UV 、 O_3/H_2O_2 、 $O_3/UV/H_2O_2$ 是水处理中几种典型的均相臭氧高级氧化技术。

2.1 高级氧化技术的原理和特点

高级氧化技术有不同的实现方式,但其共同的特点是通过反应产生羟基自由基($\cdot OH$)。通过 $\cdot OH$ 反应能够将有机污染物更有效地分解,甚至彻底地转化为无害无机物,如二氧化碳和水。其特点在于:

反应过程中产生大量的 $\cdot OH$ 。反应速度快,多数有机物在此过程中的氧化动力学速率常数可达 $10^4 \sim 10^6 (mol/L)^{-1} \cdot s^{-1}$ 甚至更高。由表 1^[2]可以看出:臭氧氧化有机微污染物时,只对含有氨基活化芳香族体系或双键化合物有效,在较短的水处理接触时间内对很多有害有机物不能很好地降解,而 $\cdot OH$

表 1 环境温度下 O_3 和 $\cdot OH$ 对有机物的氧化动力学常数

化合物	k_{O_3} / $(mol/L)^{-1} \cdot s^{-1}$	$t_{1/2}$	$k_{\cdot OH}$ / $(mol/L)^{-1} \cdot s^{-1}$
藻类产物			
土臭素	< 10	> 1 h	8.2×10^9
2-甲基异冰片(MIB)	< 10	> 1 h	约 3×10^9
微囊藻-LR 毒素	3.4×10^4	1 s	
农药			
莠去津	6	96 min	3×10^9
草不绿	3.8	151 min	7×10^9
地乐酚	1.5×10^5	0.23 s	4×10^9
异狄氏剂	< 0.02	> 20 d	1×10^9
溶剂			
氯乙烯	1.4×10^4	2.5 s	1.2×10^{10}
三氯乙烯	17	34 min	2.9×10^9
氯苯	0.75	13 h	5.6×10^9
p-二氯苯	3	3 h	5.4×10^9
消毒副产物			
氯仿	≤ 0.1	≥ 100 h	5×10^7
溴仿	≤ 0.2	≥ 50 h	1.3×10^8
三氯乙酸	$< 3 \times 10^{-5}$	36 a	6×10^7

注: $t_{1/2}$ 表示 pH 为 7、臭氧浓度为 1 mg/L 时有机物的降解半衰期。

对大部分有机物的氧化几乎在瞬间完成。适用范围广,2.80 V 氧化电位使得 $\cdot OH$ 几乎可将所有有机物氧化甚至完全矿化。反应条件温和,通常对温度和压力无要求,不需要在强酸或强碱介质中进行。可诱发链反应,由于 $\cdot OH$ 的电子亲和能为 569.3 kJ,可将饱和烃中的 H 拉出来,使有机物氧化而降解。因此,AOPs 在氧化水中各种有机污染物方面具有明显的优势。

2.2 臭氧高级氧化技术在保障饮用水化学安全性方面研究

2.2.1 臭氧高级氧化技术在脱色、除臭方面作用

水的色度主要由天然腐殖质等引起,产生色度的原因是有机物中的一些不饱和基团,含有这种结合基团的化合物称为生色基团,臭氧易与不饱和基团起反应,打开碳-碳双键,破坏生色基团从而去除色度。

水的臭味主要来自于植物的分解和藻类的代谢活动,此外,合成化学物,如酚可加重天然水的臭味,藻类、铁细菌、放线菌等生物在水中的繁殖以及工业废水和生活污水等排入水体,水的氯化均可导致水的臭味。臭氧及 $\cdot OH$ 可与这些化合物作用,使其氧化从而达到除臭的目的。

2.2.2 臭氧高级氧化技术在农药污染处理方面研究

臭氧对农药的降解能力与农药种类及其在水中的溶解性有关。臭氧对含有不饱和键和环的农药反应活性较高,而对有氯原子取代的农药反应活性很低(异狄氏剂、氯丹、林丹 $k_{O_3} < 0.04 (mol/L)^{-1} \cdot s^{-1}$)^[3]。臭氧化(2~3 mg O_3 /L, 10 min 接触时间)除对艾氏剂,七氯等去除效果较好外,对狄氏剂、DDT、多氯联苯几乎无去除效果,而利用高级氧化方法如 O_3/UV 或 O_3/H_2O_2 可以获得较快的降解速度^[4,5]。S-三嗪类农药(西玛嗪、特丁基嗪、莠去津)被分子臭氧的氧化很慢, $\cdot OH$ 的存在可以大大促进反应^[4,6]。有机磷农药较容易被臭氧所降解,但降解速度相对较慢, O_3/H_2O_2 可在 20 min 内降解超过 95%的久效磷^[7]。此外通过表 1 及以上分析可以发现,AOPs 技术能够迅速使绝大多数农药降解,在控制饮用水水源农药污染方面具有重要作用。

2.2.3 臭氧高级氧化技术去除有机物研究

O_3 对水中有机物的氧化有选择性,对含有氨基

活化芳香族体系或双键化合物较有效,但在较短的水处理接触时间内对很多有害有机物不能很好地降解,而 $\cdot\text{OH}$ 对大部分有机物的氧化几乎在瞬间完成。 UV/O_3 工艺对饮用水中的二氯甲烷、四氯化碳、芳香族化合物、氯苯类化合物和五氯苯酚等有机污染物的去除均可达到很好的效果,这种方法的氧化能力和反应速率都远远超过单独使用 UV 或 O_3 工艺所能达到的效果^[2]。Prengle等^[8]发现 UV/O_3 工艺可显著提高有机物的降解速率,大大降低其COD和BOD。多氯联苯、六氯苯、三卤甲烷和四氯化碳等难降解污染物不与臭氧反应,但在 O_3/UV 作用下它们均可被迅速氧化,此法已被美国环保局定为处理多氯联苯的最有效技术。Hayashi等^[9]的研究表明,使用 O_3/UV 体系对有机物的降解能力比单独的氧化增强了10倍以上。

Aeita^[10]等人用 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 对San Fernando受三氯乙烯(TCE)和四氯乙烯(PCE)污染的地下水进行了中试,结果表明该工艺可提高臭氧进入水中的质量迁移,提高因子为1.7,而且TCE、PCE去除率为95%时所需要的臭氧量,仅是单独用臭氧处理时所需臭氧量的56%~64%。Duguet^[11]采用 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 对地下水中苯化合物、邻二氯硝基苯、2-甲基异丁醇、TCE和PCE等微量污染物的去除效果进行了实验研究,取得了很好效果。Amiri^[12]研究了用 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 高级氧化技术处理被汽油中的甲基叔丁基醚(MTBE)污染过的地表及地下水,取得了传统方法难以达到的效果,认为高级氧化技术是一种较有前途的处理受MTBE污染过的水源的方法。

Zeff^[13]在1988年申请了 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 去除多种有机物的专利。对浓度为200 mg/L的甲醇溶液,30 min后其DOC去除率达到97%;用该方法处理受氯甲烷、二氯甲烷、1,1-二氯乙烷,1,2-二氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯、苯、氯苯、甲苯等污染的地下水,60 min内TOC去除率达98%。

有关此方面的其他研究见表2。

通过上述分析可以看出,臭氧高级氧化技术在较低的投加量和有限的水处理时间内能够快速氧化很多臭氧难以氧化的有机物,对保障饮用水安全性具有重要作用。其在控制水中有机污染物尤其是水中优先控制污染物方面的研究有待深入。

表2 高级氧化法在有机物降解方面的研究

AOPs	处理对象	处理效果
$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ^[2]	顺-氯苯甲酸	地下水中 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 比单纯 O_3 氧化快
O_3/UV ^[14]	自来水中有机物	苯、甲苯、乙苯氧化1 h后至检出限以下,169种有机物经2 h处理后去除率达65%以上,致突变试验证实水质由强阳性转为偏阴性。
$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ ^[2]	氯苯	pH=2, O_3 氧化动力学速率常数 $0.06 \sim 3(\text{mol/L})^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 氧化动力学速率常数 $4 \sim 5(\text{mol/L})^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
UV/O_3 ^[15]	饮用水中硝基苯酚和腐殖酸	UV/O_3 对自来水中的 UV_{254} 有很高的去除率,反应1 h时, UV_{254} 去除率可达80%以上,对腐殖酸,10 min COD_{Mn} 去除率超过75%,继续反应至1 h,去除率为90%

2.2.4 臭氧高级氧化技术对内分泌干扰物的去除效果研究

被称为第三代环境污染物的环境内分泌干扰物已成为21世纪各国环境科学界共同研究的焦点问题。在目前被怀疑可能具有内分泌干扰作用的化学物质中,大部分属于农药及其代谢产物,国内外有关此方面的研究还刚起步。文献[2]报道的采用臭氧处理内分泌物双酚A的试验结果表明,在保证臭氧连续投加条件下,反应进行到30 min后,分别在1.0 mg/L、1.5 mg/L、2.0 mg/L的臭氧总投量下,双酚A的去除率分别达到70%、82%、90%,取得了良好的效果,但通过对分解产物UV光谱分析发现,这种氧化过程很不完全,氧化后在波长235~275 nm范围内吸光度有明显的升高, UV_{254} 也有较大幅度升高, UV_{254} 通常可看作DOC和THMFP的替代参数,因此,臭氧处理导致了潜在的消毒副产物和生物不稳定性。AOPs法用于氧化去除内分泌干扰物国内已有尝试,但少有公开报道,有待进一步研究。

2.2.5 臭氧高级氧化技术在消毒及消毒副产物控制方面研究

臭氧应用于饮用水处理的最初目的就是为了消毒,其强氧化能力能够在很短的时间灭活水中微生物,并可灭活普通消毒剂(氯、二氧化氯)所难以去除的致病微生物,如:隐孢子虫、贾第鞭毛虫、旋转病毒等。AOPs技术不仅可以有效去除环境中污染物,而且也为饮用水的消毒提供了一个新思路。Gaire^[16]研究发现,在去除大肠埃希氏菌属方面, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 与 O_3 一样有效;Wolfe^[17]研究指出 $\text{O}_3/$

H_2O_2 也是有效消毒剂,当 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 为 0.2 时,能有效杀灭贾第鞭毛虫。Camimeo 等人^[18]对使用 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ 替换 O_3 作为未过滤水预消毒的中试厂运行一年进行了回顾,结果表明 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ 是一个令人满意的消毒剂,能预防消毒副产物的形成以及消毒后水中微生物的再生长。

氯消毒时产生的三卤甲烷类 (THMs) 副产物被公认为致癌和致畸物质,而腐殖酸等水中天然有机物 (NOM) 被认为是主要的 THMF。有效去除 THMF 是减少 THMs 的有效途径。如前所述臭氧—活性炭工艺可一定程度减少 THMF^[19],但难以达到完全消除,而 AOPs 可将 THMF 氧化成二氧化碳和水,另外当水中存在 THMs 时,AOPs 法也可以部分消除这些物质。Berube^[20]研究表明:在臭氧投加量 $(0.62 \pm 0.019) \text{ mgO}_3/\text{L}$,UV 强度 $1.61 \text{ Ws}/\text{cm}^2$ 条件下,UV/ O_3 法可以去除原水中 50% 的 TOC、80% 的 THMF 和 70% 卤乙酸前体物 (HAASFP)。

在天然水的臭氧化过程中,臭氧与水中 Br^- 反应可生成 HOBr/BrO^- ,进一步氧化形成一种潜在致癌物——溴酸盐,AOPs 过程中产生的 $\cdot\text{OH}$ 可消耗水中过量 O_3 ,从而限制溴酸盐的形成^[21],且当水中有 H_2O_2 存在时,能使次溴酸 (盐) 还原,应用 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 技术,提高 H_2O_2 的比例,使得在 H_2O_2 条件下形成 Br^- 而减少 BrO^- 的生成,从而减少溴酸 (盐) 的生成^[11,22-24]。因此,通过调整 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 的比例,可控制由溴化引起的副产物的生成,减少对人的危害。目前对 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$,UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 等的消毒效果均在进行研究。

2.3 臭氧高级氧化技术在保障饮用水生物安全性方面研究

生物可同化有机碳 (AOC) 是目前国际上判断饮用水生物稳定性的一项重要指标。在不加氯的情况下 $\text{AOC} < (10 \sim 20) \mu\text{g}$ 乙酸碳/L 或在加氯的情况下 $\text{AOC} < (50 \sim 100) \mu\text{g}$ 乙酸碳/L 的水被认为是生物稳定性饮用水。张金松^[25]等对臭氧—活性炭工艺的研究结果表明 (见表 3),臭氧化会导致 AOC 的升高,而后续活性炭对 AOC 去除有限,出水仍然存在 AOC 较高的问题。张淑琪等^[26]研究了国内某地区臭氧氧化自来水的生物稳定性,原水 AOC 为

$413 \mu\text{g}/\text{L}$,臭氧化后水中 AOC 增加了 7 倍,活性炭吸附出水 AOC 降为 $257 \mu\text{g}/\text{L}$,但原水中过高的 AOC 使工艺出水仍不具备生物稳定性。对于有机微污染较严重的水,臭氧—活性炭工艺的生物安全性仍值得研究。

表 3 AOC 在处理流程中的变化

项目	原水	砂滤出水	臭氧化出水	活性炭出水	消毒出水
AOC/ $\mu\text{g}/\text{L}$	126	108	194	101	90

AOPs 技术为保障饮用水安全提供了一个有益的思路,通过高级氧化技术,可以较完全氧化广谱的有机物,降低 TOC。许沁和徐迪民^[2]通过研究发现: $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 对 TOC 的去除率可达 70%。可以有效地减少水中有机物量,从而从根本上保障出水的生物安全性,目前有关此方面的研究有待深入。

2.4 臭氧高级氧化—生物活性炭工艺

臭氧高级氧化技术由于其氧化速率快,选择性低、氧化彻底等特点在水处理中具有很好的应用前景,但是,在生产过程中一定的投加量和接触时间下,仍不可能完全将所有有机物矿化,因此,后续的生物活性炭工艺是保障出水安全性的有效措施,AOPs-BAC 技术的联用应是处理有机微污染水,保障出水安全性的较理想的工艺之一,在国外已逐渐得到应用^[2]。1980 年,欧共体 (现为欧盟) 在制定饮用水标准中,将单种农药的允许浓度规定为 $0.1 \mu\text{g}/\text{L}$,农药总量规定为 $0.5 \mu\text{g}/\text{L}$ 。由于只用臭氧并不能达到这个标准,所以很多国家采用了 AOPs-BAC 工艺,到 1995 年底,法国至少有 24 家给水厂进行了改建,收到了很好的效果。1990 年初英国泰晤士水务局在伦敦附近建造示范水厂,采用了 AOPs-BAC 方法去除农药以及低相对分子质量有机氧化副产物,经过几年的实践,到 2000 年,英国至少有 50 家深度处理水厂在建造或运行。

在 AOPs-BAC 工艺中, $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ -BAC 被认为是最具应用前途的工艺,对于已经有臭氧装置的水厂,只需再向水中投加 H_2O_2 ,即可改建为深度氧化处理的水厂,改建简单,具有很好的应用前景。

3 结语

AOPs 法同传统的化学氧化法相比,具有氧化能力强,氧化过程无选择性,反应彻底等优点,在原水中微量难降解有机物处理方面具有极大的应用价

值。AOPs - BAC 工艺组合对于保障饮用水的安全具有重要作用,是一种有应用前景的饮用水深度处理方法,但对如何进一步提高其处理效率,减少不利影响,降低处理成本以及具体的工艺操作条件等问题还需要在今后作进一步研究。

参考文献

- 1 王凯雄. 水化学. 北京:化学工业出版社, 2001
- 2 高乃云, 严敏, 乐林生. 饮用水强化处理技术. 北京:化学工业出版社, 2005
- 3 Yao C C D, Haag W R. Rate constants for direct reactions of ozone with several drinking water contaminants. *Wat Res*, 1999, 25(7): 761 ~ 773
- 4 Prados M, Paillard H, Roche P. Hydroxyl radical oxidation processes for the removal of triazine from natural water. *Ozone Sci Engng*, 1995, 17(2): 183 ~ 194
- 5 Gahr A, Niessner R. Drinking waters treatment with ozone in combination with UV-radiation: removal of pesticides and by-product formation[a]. In: proceedings of the 12th Ozone world Congress. United States of America: the International Ozone Association, 1995. 349 ~ 360
- 6 Benitez F J, Beltran Heredia J, Gonzalez T, et al. Advanced oxidation processes in the degradation of cyanazine. *Ozone Sci & Engng*, 1995, 17(3): 237 ~ 258
- 7 Ku Y, Wang W. The decomposition kinetics of monocrotophos in aqueous solutions by peroxide/ ozone process. *Proceedings of the 13th Ozone World Congress*. Japan Kyoto, 1997. 325 ~ 330
- 8 Prengle H W. Experimental rate constant and reactor consideration for the destruction of micropollutants and trihalomethane precursors by ozone with UV radiations. *Environ Sci & Technol*, 1983, 17(4): 743 ~ 749
- 9 Hayashi J I, Ikeda J, Kusakabe K, et al. Decomposition of volatile organ chlorines by ozone and utilization efficiency of ozone with ultraviolet in a bubble-column. *Wat Res*, 1993, 27(6): 1091 ~ 1097
- 10 Aetia E M, Reagan K M, Lang J S, et al. Advanced oxidation processes for treating groundwater contaminated with TCE and PCE: Pilot scale evaluations. *Journal AWWA*, 1988, 80(5): 64 ~ 72
- 11 Duguet J P, Brodard E, Dussert B, et al. Improvement in the effectiveness of ozonation of drinking water through the use of hydrogen peroxide. *Ozone Sci & Engng*, 1995, 7(2): 241 ~ 258
- 12 Amiri A S. O₃/ H₂O₂ treatment of Methyl-tert-Butyl Ether (MTBE) in contaminated waters. *Waste Res*, 2001, 35(15): 3706 ~ 3714
- 13 Zeff J D, Leitis E. Oxidation of organic compounds in water. U.S. Patent 4 792 407, 1988
- 14 吕锡武, 严熙世. 光化学氧化饮用水中有机优先污染物. *中国环境科学*, 1992, 12(1): 71 ~ 75
- 15 姜安玺, 徐桂琴, 于尔捷. UV-O₃ 水深度净化技术的研究. *哈尔滨建筑大学学报*, 1999, 32(6): 12 ~ 15
- 16 Mc Guire M J, Davis M K. Treating water with peroxone: a revolution in the making. *Wat Engng Manage.*, 1998, 135(5): 42 ~ 49
- 17 Wolfe R L, Stewart M H, Scott K N, et al. Inactivation of *Gardia muris* and indicator organisms seeded in surface water supplies by peroxone and ozone. *Environ Sci & Technol*, 1989, 23(6): 744 ~ 745
- 18 Carmimeo D, Marino R D, Donadio F, et al. Comparison between H₂O₂/ UV and O₃ disinfection of drinking water. *Water Supply*, 1995, 13(2): 159 ~ 169
- 19 Clausus H, Gerhard S, Specht O, et al. Oxidation degradation of AOX and COD by different advanced oxidation processes: A comparative study with two samples of a pharmaceutical wastewater. *Wat Sci Technol*, 1997, 35(4): 257 ~ 264
- 20 Chin A, Berube P R. Removal of disinfection by-product precursors with ozone-UV advanced oxidation process. *Water Res*, 2005, 39(10): 2136 ~ 2144
- 21 Griffini O, Iozzelli P. The influence of H₂O₂ in ozonation treatment: the experience of the water supply service of Florence. *Ozone Sci Engng*, 1996, 18(2): 117 ~ 126
- 22 张维佳, 王宝贞, 伍悦滨. 臭氧及深度氧化法去除水中污染物. *给水排水*, 2000, 26(5): 11 ~ 14
- 23 Miller S. Disinfection products in water treatment. *Environ. Sci & Technol*, 1993, 27(12): 2292 ~ 2294
- 24 Gunten U V, Oliveras Y. Kinetics of the reaction between hydrogen peroxide and hypobromous acid: implications on waters treatment and natural systems. *Wat Res*, 1997, 31(4): 900 ~ 906
- 25 张金松, 董文艺, 张红亮, 等. 臭氧化—生物活性炭深度处理工艺安全性研究. *给水排水*, 2003, 29(9): 1 ~ 4
- 26 张淑琪, 刘彦竹, 胡江泳, 等. 臭氧氧化自来水生物稳定性研究. *环境科学*, 1998, 19(5): 34 ~ 36

○通讯处: 210009 南京市中山北路 200 号 南京工业大学 31 号信箱

电话: (025) 85071258

E-mail: zjh-huaxian@163. com

收稿日期: 2006-08-28

修回日期: 2007-03-26