

酚类内分泌干扰物的污染现状及处理研究进展

冯然然, 华祖林, 白雪

(河海大学环境学院河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了更好的治理水体中 pEDCs 的污染, 针对 pEDCs 的代表物质双酚 A 和烷基酚, 综述了世界范围内污染源水中 pEDCs 的污染现状, 并介绍了吸附法、膜处理法、生物降解法、化学氧化法及高级氧化法等主要处理方法。同时, 展望了今后 pEDCs 处理的主要研究方向及现存处理方法的应用前景。两种或两种以上方法的联用将是未来研究的一个重要方向。

关键词: 内分泌干扰物 (EDCs); 双酚 A; 烷基酚; 辛基酚; 壬基酚; 水处理

中图分类号: X52

文献标志码: A

Pollution Status and Treatment Progress of Phenolic Endocrine Disrupting Chemicals

Feng Ranran, Hua Zulin, Bai Xue

(College of Environment, Hohai University, Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake of Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: For better treatment, the current existence situation of two typical Phenolic Endocrine Disrupting Chemicals (pEDCs), bisphenol A and alkylphenols, in water is summarized. Also, the main treatment approaches such as adsorption, membrane treatment, biodegradation, chemical oxidation and advanced chemical oxidation are reviewed in this paper. Meanwhile, the prospects of research directions of pEDCs treatment and application of current existing methods are presented. The combination of two or more methods would be an important trend in the future.

Keywords: Endocrine Disrupting Chemicals (EDCs); Bisphenol A; Alkylphenols; Octylphenol; Nonylphenol; Water Treatment

CLC number: X52

内分泌干扰物(endocrine disrupting chemicals, EDCs)是一种新型污染物, 通过打破机体原有的内分泌平衡来影响有机体的正常生长、行为和繁殖等^[1-3]。文献^[4]表明, EDCs在远低于理论安全浓度时仍会使实验动物产生生物效应, 即低剂量效应。水环境中的酚类内分泌干扰物(pEDCs)雌激素效应强、化工应用量大, 主要来源于工业废水、生活污水以及垃圾渗滤液等^[5], 如果处理不善会造成严重危害, 因此如何对其进行高效处理是目前研究的热点。

以烷基酚(alkylphenols, APs)和双酚A(bisphenol A, BPA)作为pEDCs的代表, 总结了pEDCs在污染源水中的污染现状及目前研究的处

理方法, 并对今后pEDCs的处理方法进行展望。

1 水环境中酚类内分泌干扰物的污染现状

烷基酚聚氧乙烯醚(APEOs)作为一种非离子表面活性剂广泛应用于人们的生活中。APs主要是作为APEOs的合成原料, 而APEOs的主要分解产物也是APs, 且其比APEOs本身的毒性更强^[6]。APs主要由壬基酚(nonylphenol, NP)和辛基酚(octylphenol, OP)组成。NP和OP均具有类激素性质, 会干扰野生动物和人体的内分泌活动^[7, 8]。BPA主要用于环氧树脂和聚碳酸酯塑料的合成等, 世界年产量约为4 700 000 t^[9]。BPA危害很大, 可以在新陈代谢过程中结合DNA^[10]。

收稿日期: 2013-10-04

基金项目: 国家自然科学基金项目, 超顺磁性石墨烯在水体中的双吸附机制及形态分布特性研究(51308183)资助

作者简介: 冯然然(1988-), 女, 硕士研究生。研究方向: 水污染控制工程。

通信作者: 白雪, 副教授。E-mail: baixue@hhu.edu.cn

不同地区的污染源水中BPA、NP和OP的浓度见表1。

表1 不同地区污水中BPA、NP和OP的浓度 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

地区	水体	BPA	APs	
			NP	OP
中国北京 ^[11]	某污水处理厂进水	89.0	13.4	1.4
	某污水处理厂出水	0.32	0.41	0.11
中国珠江三角洲 ^[12]	纺织印染厂（5个厂）	0.685 8	56.094	0.515
	造纸厂（8个厂）	2.304	2.629	0.116
	电子、电镀厂（6个厂）	0.644 3	17.301	0.118
	精细化工品厂（3个厂）	0.608 7	23.041	0.221
	城市污水（4个厂）	0.601	1.310	0.003 1
日本静岡 ^[13]	8个废纸回收厂废水	8~370		
英国苏赛克斯 ^[14]	霍舍姆污水处理厂进水	0.298~1.01	0.087~0.321	0.014~0.078
	霍舍姆污水处理厂出水	<0.05	0.006~0.036	<0~0.015 6
美国 ^[15]	某污水处理厂一级出水	0.281~3.642	1.57~27.411	0.3~16.704
	某污水处理厂二级出水	0.006~0.05	0.426~4.926	0.037 5~0.18
加拿大多伦多 ^[16]	某工业废水	0.23~149.2		
希腊北部 ^[17]	某污水处理厂进水	0.525~0.827	0.511~2.637	0~0.251
	某污水处理厂出水	0.022~0.044	0~1.58	0.009~0.071
	某纺织厂	0.035	0.54	0.051
	某制革厂	1.00	433	0.004

注：双酚A（BPA）；烷基酚（APs）；壬基酚(NP)；辛基酚(OP)。

由表1可见，pEDCs广泛存在于制革、造纸、电镀、印染等废水和污水处理厂进水中。总体来看，工业废水中BPA、NP和OP的浓度范围分别为0.035~370 $\mu\text{g/L}$ 、0.54~433 $\mu\text{g/L}$ 和0.004~0.515 $\mu\text{g/L}$ ，污水处理厂进水中的BPA、NP和OP浓度分别在0.298~89.0 $\mu\text{g/L}$ 、>0.087~27.411 $\mu\text{g/L}$ 和>0~16.704 $\mu\text{g/L}$ 水平，污染严重。BPA和NP在工业废水中的污染比在污水处理厂中严重，OP则情况相反。然而，这与工业废水的性质和污水处理厂进水中是否含有工业废水有关。

2 酚类内分泌干扰物的处理方法

由表1污水处理厂的进出水浓度还可以看出，现有的实际应用方法不能实现对水环境中pEDCs的完全去除。目前对处理pEDCs的方法研究有很多，分类也不统一，主要有吸附法、膜处理法、生物降解法、氧化法及高级氧化法等。

2.1 吸附法

吸附法中，活性炭是最常用的吸附剂。此外，碳纳米管（CNT）、石墨烯等新兴的纳米材

料也在吸附EDCs上扮演着重要角色^[18]。

Tsai et al^[19]用拟二阶模型对BPA在椰壳活性炭和煤基活性炭以及4种矿物质（安山岩、硅藻土、二氧化钛和活性漂土）上吸附行为进行对比研究发现，活性炭的吸附能力明显大于矿物吸附剂。且活性炭单独使用时虽然去除效果较好但易吸附穿透，与其它工艺联合会优化其处理效果^[9]。此外，对活性炭进行改良也可以提高其吸附效率^[20]。

刘桂芳等^[20]用准二级动力学模型研究粉末活性炭(WP)和改性WP(WPN)的吸附行为，发现4-n-NP在WP和WPN上的去除效率可分别达到88.12%和89.13%，去除效率最高；而BPA的去除效率最低，分别为36.36%和42.97%。此外可见，WPN的吸附效果优于WP，其平衡吸附量比原WP高2.5%~63.6%，即改性的活性炭吸附性能更佳。

单壁碳纳米管(SWCNT)吸附垃圾渗滤液中EDCs的研究显示，pH越高、电导率越小、DOC浓度越低、离子强度越弱，则对BPA和炔雌

醇的吸附效率越低^[21]。

Sharma et al^[22]通过实验对比BPA在活性炭和SWCNT上的吸附结果发现, BPA在SWCNT上的吸附效率最高, 且高于已有文献显示的活性炭吸附的最高值。

2.2 膜处理法

膜处理法对pEDCs的去除受很多因素的影响, 主要取决于pEDCs和膜的性质以及膜所处的环境条件^[23-24]。目前, 微滤(UF)和纳滤(NF)已广泛应用于饮用水和废水处理^[24]。还有相关报道利用膜生物反应器(MBR)和NF技术去除废水中的NP和BPA^[25]。此外, 将膜处理技术与其他方法联合使用也是膜处理法研究的一个重要方向。Heo et al^[24]将单壁纳米管吸附与纳滤结合来去除水体中EDCs(BPA和E₂), 研究发现, 吸附反应由疏水吸附控制, BPA和E₂和去除率分别可达78.4%和94.9%。

2.3 生物降解

生物降解一般是指微生物或其酶的分解活动。生物降解通常受环境条件的影响, 如pH、温度、溶解氧等。可以通过改变环境条件来控制微生物的新陈代谢从而改变生物降解过程。

Kang et al^[26]从3条河流中分离并培养可高效降解BPA的菌株, 研究发现大部分菌株有降解BPA的能力, 其中两株菌株的去除效率高达90%。同时发现有氧条件利于降解的发生, 此时BPA的半衰期为2~3 d, 而厌氧条件下, 降解作用微弱(10 d的降解率<10%)。

还有研究利用白腐真菌中提取的漆酶去除NP和BPA^[27]。研究发现天然漆酶和纯化的漆酶对BPA的去除效率基本相同, 且当底物为EDCs混合物时, 去除作用增强。

在实际的污水处理工艺中发现, MBR对垃圾渗滤液中的BPA和NP去除率可达80%以上^[25,28]。Chen et al^[29]从污泥负荷、水力停留时间等方面对比研究MBR和活性污泥法对BPA的去除效果, 发现两者的去除效率分别为93.7%和73.2%~99.3%。表明MBR在去除BPA上比活性污泥法更有优势, 受污泥负荷影响小, 生物降解是

BPA去除的控制步骤。

2.4 化学氧化法

在化学氧化法处理系统中, 氯气、次氯酸、二氧化氯和臭氧由于其高还原电位经常用于氧化处理^[3,30], 此外高铁酸盐(VI)法、高锰酸钾法等也在水处理中广泛的应用^[31-33]。

Jiang et al^[32]研究高锰酸钾氧化法去除水体中pEDCs发现, 中性条件下, 其反应的二级速率常数与高铁酸盐(VI)和氯相当, 而远比臭氧低, 但由于Mn(VII)相对较高的稳定性, 高锰酸钾法更适宜应用于现实水体。在酸性溶液中, 高铁酸盐(VI)在常用的水处理氧化剂中氧化还原电位最高, 且由于高铁酸盐(VI)的副产品是无毒的三价铁离子, 所以用高铁酸盐(VI)作氧化剂非常环保^[34-36]。

2.5 高级化学氧化法

高级化学氧化法兴起于20世纪80年代, 主要通过激发链反应及其产生的高氧化还原电位的HO·来降解有机物, 从而实现污染物的去除^[37]。高级化学氧化法种类繁多、工艺各异, 以下是常见的几种类型。

Fenton法和类Fenton法。H₂O₂与催化剂Fe²⁺构成的氧化体系通常称为Fenton试剂。Fenton氧化法广泛应用于废水整治, 特别是难降解有机污染物的去除, 对pEDCs的处理较为理想。胡玲等^[38]分别采用Fe²⁺、H₂O₂和Fe²⁺与H₂O₂联用生成的Fenton试剂去除水中BPA发现, Fe²⁺和H₂O₂单独作用都不能有效去除BPA, 而Fenton试剂的去除效果良好, BPA的去除率高达99.12%。光-Fenton法的相关研究表明, 该方法适用于含BPA和APs废水的处理, 反应迅速, 去除效率高达90%以上, 但存在影响因素多、不易控制和副产物不明确等缺陷, 需要进一步研究^[39]。

光化学氧化法。光化学氧化法, 主要包括: UV/TiO₂、UV/H₂O₂、UV/O₃、UV/H₂O₂/O₃等。Chen et al^[40]通过研究UV和UV/H₂O₂对BPA的降解效果发现, UV单独处理时不能很好的去除BPA, 而加入H₂O₂后BPA的去除效率则大大提高, 此外生物检测表明UV/H₂O₂可以有效去除BPA。Ike et al^[41]用

UV/TiO₂降解NP, 其降解率在30 min内即可高达90%。

此外, 超声波氧化法、声化学氧化法、电化学氧化法、等离子体法、核辐射法等高级化学氧化法以及联用技术在去除水中EDCs方面的应用也有大量研究^[37,42-43]。

3 结论与展望

以APs和BPA为代表的pEDCs普遍存在于世界范围内的水环境中。从其污染源水来看, 酚类内分泌干扰物在制革、造纸、电镀、印染等工业废水以及污水处理厂进水中广泛存在。总体来看, 工业废水中BPA、NP和OP的浓度范围分别为0.035~370 μg/L、0.54~433 μg/L和0.004~0.515 μg/L, 污水处理厂进水中的BPA、NP和OP浓度分别在0.298~89.0 μg/L、>0.087~27.411 μg/L和>0~16.704 μg/L水平, 污染严重。

在考察pEDCs污染现状的同时, 更多的研究致力于寻求对其高效处理的方法。吸附法、膜处理法、生物降解法、化学氧化法、Fenton法和类Fenton法、光化学氧化法等都在去除水中的pEDCs上发挥着重要作用。纳滤、活性炭吸附法、化学氧化法(尤其是高铁酸盐(VI)法), 简单高效, 工艺较为成熟, 应用普遍。此外, 用改良吸附剂和新型纳米材料(如SWCNT等)吸附pEDCs也越来越成为研究的热点。新型光催化剂的制备及反应条件的选择是光化学氧化法的重要研究方向。由于单一处理方法都会存在缺陷, 且在水处理中需考虑成本及实际运用等问题, 所以两种或两种以上方法的联用去除水体中的酚类内分泌干扰物是未来的研究趋势。

参考文献

- [1] Tapiero H, Nguyen Ba G, Tew K. Estrogens and environmental estrogens[J]. Biomed. Pharmacother., 2002, 56(1): 36-44.
- [2] Crisp T M, Clegg E D, Cooper R L, et al. Special report on environmental endocrine disruption: An effects assessment and analysis[M]. Wash, D.C.: USEPA, 1997: 2-10.
- [3] Rodríguez R V, López A L. Endocrine disrupting compounds in surface water and their degradation by advanced oxidation process with ozone[J]. Water Resour. in Mex., 2011, 7: 279-297.
- [4] Kaiser J. Panel cautiously confirms low-dose effects[J]. Science,

- 2000, 290(5492): 695-697.
- [5] 吴 睿. 活性炭和膜技术去除水中内分泌干扰物的研究进展[J]. 工业水处理, 2010, 30(7): 11-14.
- [6] Giger W, Brunner P H, Schaffner C. 4-Nonylphenol in sewage sludge: Accumulation of toxic metabolites from nonionic surfactants[J]. Science, 1984, 225(4662): 623-625.
- [7] Wahlberg C, Renberg L, Wideqvist U. Determination of nonylphenol and nonylphenol ethoxylates as their pentafluorobenzoates in water, sewage sludge and biota[J]. Chemosphere, 1990, 20(1): 179-195.
- [8] Ahel M, McEvoy J, Giger W. Bioaccumulation of the lipophilic metabolites of nonionic surfactants in freshwater organisms[J]. Environ. Pollut., 1993, 79(3): 243-248.
- [9] Jiao F R, Sun X, Pang Z. Production and market analysis of Bisphenol A[J]. Chem. Ind., 2008, 26(9): 21-33.
- [10] Marwick C. Hormonally active agents throughout the environment[J]. JAMA-J. Am. Med. Assoc., 1999, 282(8): 722.
- [11] Sun Q, Deng S, Huang Jun, et al. Contributors to estrogenic activity in wastewater from a large wastewater treatment plant in Beijing, China[J]. Environ. Toxicol. Phar., 2008, 25(1): 20-26.
- [12] Fang Y, Ying G, Zhao J, et al. Assessment of hormonal activities and genotoxicity of industrial effluents using in vitro bioassays combined with chemical analysis[J]. Environ. Toxicol. Chem., 2012, 31(6): 1273-1282.
- [13] Fukazawa Hitoshi, Hoshino Kentaro, Shiozawa Tatsushi, et al. Identification and quantification of chlorinated bisphenol A in wastewater from wastepaper recycling plants[J]. Chemosphere, 2001, 44(5): 973-979.
- [14] Zhang Y, Zhou J L. Occurrence and removal of endocrine disrupting chemicals in wastewater[J]. Chemosphere, 2008, 73(5): 848-853.
- [15] Drewes J E, Hemming J, Ladenburger S J, et al. An assessment of endocrine disrupting activity changes during wastewater treatment through the use of bioassays and chemical measurements[J]. Water Environ. Res., 2005, 77(1): 12-23.
- [16] Lee H B, Peart T E. Bisphenol A contamination in Canadian municipal and industrial wastewater and sludge samples[J]. Water Qual. Res. J. Can., 2000, 35(2): 283-298.
- [17] Pothitou P, Voutsas D. Endocrine disrupting compounds in municipal and industrial wastewater treatment plants in Northern Greece[J]. Chemosphere, 2008, 73(11): 1716-1723.
- [18] Pan B, Lin D, Mashayekhi H, et al. Adsorption and hysteresis of bisphenol A and 17-ethinyl estradiol on carbon nanomaterials[J]. Environ. Sci. Technol., 2008, 42(15): 5480-5485.
- [19] Tsai W T, Lai C W, Su T Y. Adsorption of bisphenol A from aqueous solution onto minerals and carbon adsorbents[J]. J. Hazard. Mater., 2006, 134(1): 169-175.
- [20] 刘桂芳, 马 军, 任芝军, 等. 典型酚类内分泌干扰物的活性炭吸附行为[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(3): 369-373.
- [21] Joseph L, Zaib Q, Khan I A, et al. Removal of bisphenol A and 17α-ethinyl estradiol from landfill leachate using single-walled carbon nanotubes[J]. Water Res., 2011, 45(13): 4056-4068.
- [22] Sharma V K, Anquandah G A K, Yngard R A, et al. Nonylphenol, octylphenol, and bisphenol A in the aquatic environment: A review on occurrence, fate, and treatment[J]. J. Environ. Sci. Heal., Part A, 2009, 44(5): 423-442.
- [23] 徐 斌. 水中典型内分泌干扰物的去除特性及机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.

(下转第50页)

PM₁₀小时浓度范围在28~1 744 μg/m³之间, 平均浓度为332 μg/m³; PM_{2.5}的小时浓度范围13~946 μg/m³, 平均浓度为207 μg/m³

(2) 颗粒物浓度日变化呈现弱双峰特征, 分别在凌晨2:00和上午7:00~8:00左右达到浓度最高值。

(3) 由于受采暖燃煤的影响, 颗粒物浓度在18:00之后有明显的上升。

参考文献

- [1]Pope A C,Hill R W, Villegas G M. Particulate air pollution and daily mortality on Utah's Wasatch Front[J]. Environmental Health Perspectives, 1999, 107(7): 567-573.
- [2]Panyacosit L. A review of particulate matter and health: focus on developing countries[R]. Laxenburg,Austria:II ASA,2000.
- [3]Patterson E, Eatough D J. Indoor/outdoor relationships for ambient PM_{2.5} and associated pollutants: epidemiological implications in London,

Utah[J]. Journal of Air and waste Management Association, 2000, 50: 103-110.

- [4]World Health Organization. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide[R]. Bonn, Germany: Report on a WHO Working Group 2003, 2003.
- [5]赵晓红, 王勋陵, 牛静萍,等. 兰州市交通要道颗粒物污染状况及其致突变活性的研究[J].环境科学学报, 2001, 21(4):444-447.
- [6]马 静.兰州市大气污染现状分析及防治对策建议[J].环境研究与监测, 2008, 21(1):21-27.
- [7]孟晓红, 王喜梅, 李 源. 西宁市大气环境污染特征分析[J].环境科学研究, 2001, 14(1):14-15.
- [8]郭宇宏, 高利军, 吕爱华. 乌鲁木齐市典型的冬季环境空气重污染过程剖析[J]. 环境化学, 2006, 25(3):379-380.
- [9]钟艳霞. 银川市大气环境污染特征分析[J]. 宁夏大学学报, 2003, 24(3):290-292.
- [10]仝 青, 冯沈迎, 阮玉英,等. 呼和浩特市不同粒径空气颗粒物上酚酞酯的污染[J].环境科学学报, 1999, 19(2):159-163.
- [11]于建华, 虞 统, 魏 强, 等.北京地区PM₁₀和PM_{2.5}质量浓度的日特征[J]. 环境科学研究, 2001,17(1): 45-47.
- [12]穆珍珍, 赵景波, 徐 娜, 等.西安市雁塔区冬季可吸入颗粒物时空变化研究[J].环境科学学报, 2011,31(7):1509-1516.

(上接第21页)

- [24]Heo J, Flora J R V, Her N, et al. Removal of bisphenol A and 17-estradiol in single walled carbon nanotubes ultrafiltration (SWNTsUF) membrane systems[J]. Sep. Purif. Technol., 2012, 90:39-52.
- [25]Wintgens T, Gallenkemper M, Melin T. Endocrine disrupter removal from wastewater using membrane bioreactor and nanofiltration technology[J]. Desalination, 2002, 146(1):387-391.
- [26]Kang J H, Kondo F. Bisphenol A degradation by bacteria isolated from river water[J]. Arch. Environ. Contam. Tox., 2002, 43(3):265-269.
- [27]Sei K, Takeda T, Soda S O, et al. Removal characteristics of endocrine-disrupting chemicals by laccase from white-rot fungi[J]. J. Environ. Sci. Heal., Part A, 2008, 43(1):53-60.
- [28]Wintgens T, Gallenkemper M, Melin T. Occurrence and removal of endocrine disrupters in landfill leachate treatment plants[J]. New Res. Water Wastewater, 2003, 48(3):127-134.
- [29]Chen J, Huang X, Lee D. Bisphenol A removal by a membrane bioreactor[J]. Process Biochem., 2008, 43(4):451-456.
- [30]Choi Keun Joo, Kim Sang Goo, Kim Chang Won, et al. Removal efficiencies of endocrine disrupting chemicals by coagulation/flocculation, ozonation, powdered/granular activated carbon adsorption, and chlorination[J]. Korean J. Chem. Eng., 2006, 23 (3):399-408.
- [31]Yang B, Ying G, Zhao J, et al. Removal of selected endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) during ferrate (VI) treatment of secondary wastewater effluents[J]. Water Res., 2012, 46 (7):2194-2204.
- [32]Jiang J, Pang S, Ma J, et al. Oxidation of phenolic endocrine disrupting chemicals by potassium permanganate in synthetic and real

waters[J]. Environ. Sci. Technol., 2012, 46(3):1774-1781.

- [33]Li C, Li X Z, Graham N, et al. The aqueous degradation of bisphenol A and steroid estrogens by ferrate[J]. Water Res., 2008, 42(1):109-120.
- [34]Sharma V K. Potassium ferrate (VI): An environmentally friendly oxidant[J]. Adv. Environ. Res., 2002, 6(2):143-156.
- [35]Jiang J Q, Lloyd B. Progress in the development and use of ferrate (VI) salt as an oxidant and coagulant for water and wastewater treatment[J]. Water Res., 2002, 36(6):1397-1408.
- [36]Sharma V K, Anquandah G A K, Nesnas N. Kinetics of the oxidation of endocrine disruptor nonylphenol by ferrate (VI) [J]. Environ. Chem. Lett., 2009, 7(2):115-119.
- [37]朱 斌, 钟 理. 高级氧化技术降解水中环境激素的研究进展[J]. 工业水处理, 2008, 28(1): 5-8.
- [38]胡 玲, 高乃云. Fenton 试剂降解内分泌干扰物双酚A的研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(7): 80-82.
- [39]Giusy Lofrano. Green technologies for wastewater treatment[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2012:59-90.
- [40]Chen P J, Linden K G, Hinton D E, et al. Biological assessment of bisphenol A degradation in water following direct photolysis and UV advanced oxidation[J]. Chemosphere, 2006, 65(7):1094-1102.
- [41]Ike M, Asano M, Belkade F, et al. Degradation of biotransformation products of nonylphenol ethoxylates by ozonation and UV/TiO₂ treatment[J]. Water. Sci. Technol., 2002, 46 (11-12): 127-132.
- [42]叶林静, 关卫省, 李宇亮. 高级氧化技术降解双酚A的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(4):909-918.
- [43]张晏晏, 高乃云, 高玉琼, 等. 高级氧化技术去除水中双酚A研究进展[J]. 水处理技术, 2012, 38(8), 1-4.