

高盐度有机废水生物处理技术分析 with 展望*

李宗睿, 张 勇, 徐珂珂

(南京师范大学地理科学学院环境科学与工程系, 南京 210023)

摘 要: 随着工业发展而产生的大量高盐度有机废水具有难处理的特点。通过对国内外高盐度有机废水处理工艺的研究进展进行分析,对包括物理法、化学法、生物法以及组合法处理高盐度有机废水的技术进行了综合比较,重点针对生物法阐述了高盐度对生物的影响以及微生物的耐盐机理,提出了采用组合工艺处理高盐度有机废水的良好发展前景。

关键词: 高盐度有机废水; 微生物; 生物处理; 组合工艺

中图分类号: X703 文献标志码: A

Review on technologies of high salinity organic wastewater treatment

Li Zongrui, Zhang Yong, Xu Keke

(School of Environmental Science and Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: With the industry development, a large number of organic wastewater with high salinity was produced. Progress in high salinity organic wastewater treatment technology at home and abroad was reviewed. Technologies including physical, chemical, biological and combination treatment of organic wastewater with high salinity were compared comprehensively, and more details on the effect of high salinity on biological process, and the mechanism of salt-tolerant microorganisms were demonstrated, and finally it presented the combination treatment for organic wastewater with high salinity has a good prospect.

Keywords: high salinity organic wastewater; microorganism; biological treatment; combined process

随着工业的发展以及水资源的日益短缺,工业废水的处理和回收利用越来越受到人们的重视。高盐度有机废水是指含有有机物和至少 3.5% (质量分数) 的总溶解性固体物(TDS)的废水^[1]。这种废水除含有有机污染物外,还含有大量的无机盐。如印染、造纸等行业的废水不仅产生量大、有机污染物含量高、色度深,更含有 15% ~ 25% 左右的高盐度^[2]。而水中所含溶解性盐越多,离子强度越大,一般的微生物越难以生长繁殖。一般而言,高盐度废水的来源主要包括海水直接用于工业生产和生活用水,如工业上海水广泛用于锅炉冷却水,以及工业生产中

排放的高盐度废水,如海产加工、制药、化工、印染等行业。我国高盐废水产生量占废水总量的 5%,且每年仍以 2% 的速率增长^[3]。这些高盐、高有机物废水,若未经适当处理,将会对生态环境造成极大危害。因此,探索一种经济有效的高盐度有机废水处理技术成为当前废水处理领域的研究热点之一。

1 典型的物理化学法处理高盐度有机废水

目前,高盐度废水的处理方法主要分为物理法、化学法、生物法。其中,物理化学法处理一般具有高成本、二次污染等缺点。而生化法因运行费用较低,

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51208266); 江苏省自然科学基金项目(BK2012453); 江苏省环保科研课题(2013014)。

收稿日期: 2013-07-18; 2013-11-4 修回

作者简介: 李宗睿,男,1991年生,研究方向: 水污染治理。E-mail: lizongrui007@gmail.com

通讯作者: 张勇,男,副教授,研究方向: 水体污染与治理。E-mail: zy@njnu.edu.cn

成为高盐度有机废水处理研究的重点之一。此外,一些组合工艺的处理手段也因其独特优势逐渐引起研究人员的注意。

物理化学法主要通过焚烧法、电化学法、深度氧化法等方法处理高盐度有机废水。

焚烧法指废水中的有机物在 800 ~ 1 000℃ 高温条件下与空气中氧进行剧烈的化学反应。王伟等^[4]采用焚烧法处理医药中间体废水,在盐分质量分数大于 5% 的情况下大大降低了废水 COD。电化学法在处理高盐度有机废水中的有效应用源于高盐度环境下废水具有的良好导电性。Barrera - Diaz 等^[5]利用电化学氧化法处理高色度高污染工业废水。王宏等^[6]应用电解凝絮法处理紫胶合成树脂生产过程中排放出的高盐度有机废水。实验结果表明,电化学法能够有效地去除废水中的有机污染物,提高透明度。深度氧化法以生成氧化自由基为主体,利用自由基引发链式氧化反应迅速破坏有机物的分子结构,达到氧化降解有机物的目的^[7]。杨世迎等^[8]提出在印染废水中加入活化硫酸盐和催化剂后置于微波发生器辐射处理的方法,取得了较好的处理效果。

总体而言,虽然一些新工艺新技术的应用使物化法在处理高盐度有机废水中取得了进展,但其投资大、运行费用高的问题依然没有得到有效解决。在进一步探索物化法低成本新工艺的同时,对生物处理法的研究仍是当前的重点。

2 生物法处理高盐度有机废水

生物法处理废水因其应用范围广、运行费用低,效果良好,被广泛应用于污水净化,也是高盐度有机废水处理研究的重点之一。但是普通生物法中的微生物大多适宜于含盐量低于 3.5% 的环境,而高含盐废水的含盐量通常在 5% 以上,有的甚至达到 20%。虽然这些废水中的无机盐离子是微生物生长必需的营养元素,在微生物的生长过程中起重要作用,但是当离子浓度过高时会对微生物产生毒性,从而严重影响生物工艺在高盐度有机废水处理中的应用。

2.1 高盐度对生物处理的影响

2.1.1 高盐度对微生物的影响

高盐度环境下的盐析作用降低了微生物的脱氢酶活性;水的渗透压随着盐浓度的升高而增加,从而引起微生物细胞脱水进而导致细胞原生质分离,最终导致微生物细胞破裂死亡^[9]。国内外学者通过对杆菌的研究发现,当废水中 NaCl 含量大于 10 g/L 时,微生物呼吸速率降低。当 NaCl 含量大于 20 g/L

时,滴滤池 BOD 去除率降低^[10],而当盐度上升到 3% ,则抑制了系统中大部分微生物的新陈代谢作用^[11],且好养和厌氧生化系统的活性微生物数量均呈现下降趋势^[12]。生化系统虽然可以通过驯化或投加耐盐菌^[13]提高耐盐性能,但此类适盐系统需要在 5% 含盐量以下^[14]方能正常运行。此外,一些学者发现相比含盐量高低而言,盐含量的急剧变化对微生物的影响更大^[15]。

2.1.2 高盐度对微生物处理效果的影响

高盐度导致的微生物细胞失活降低了对有机物的处理效果。Kargi F 等^[16]的实验证明,当 NaCl 浓度从 0 增大到 5% 时,COD 的去除率从 85% 下降到 59%。大量研究表明,经驯化的污泥能够有效进行硝化和反硝化将水中的含氮化合物去除,但却难以达到理想的除磷效果。Campos 等^[17]采用活性污泥法对高氨氮高盐度废水的硝化过程进行研究,当进水含盐量为 30 g/L 时,转化率接近于 100% ,若进一步提高盐度,则硝化反应速率会明显降低。Uygun A 等^[18]的研究表明,当废水中盐浓度从 0 增加到 60 g/L 时,除磷效果明显下降,去除率由 84% 降到 22%。

同济大学研究团队^[19]提出了用不同生物处理工艺处理有机废水所允许的最高盐浓度,见表 1:

表 1 几种生物处理法中 NaCl 含量范围

工艺	NaCl
污泥处理	0.5% ~ 1%
活性污泥工艺	0.8% ~ 0.9%
生物滤池	1% ~ 4%
两段接触氧化法	2.5% ~ 3.5%

2.2 耐盐菌种类

目前对微生物耐盐性研究的重点主要集中于嗜盐菌耐盐机理的研究、耐盐微生物的分离与鉴定等领域内。

2.2.1 嗜盐菌耐盐机理的研究

嗜盐菌指在高盐环境下生长的细菌,根据其耐盐的耐受程度不同分为四类,见表 2^[20]。

表 2 耐受不同盐度的微生物

分类	最适盐度	代表性微生物
非嗜盐菌	< 2%	多数普通真细菌和多数淡水微生物
弱嗜盐菌	2% ~ 5%	多数海洋微生物
中等嗜盐菌	5% ~ 20%	肋生弧菌属(<i>Vibrio costicola</i>), 盐脱氮副球菌属(<i>Paracoccus halo - denitrificans</i>)
极端嗜盐菌	15% ~ 30.4%	盐沼盐杆菌属(<i>Halobacterium salinarum</i>), 鳕盐球菌属(<i>Halo - coccus morrhuae</i>)

在耐盐机理方面,针对高盐环境中盐浓度、pH值、氧气、养分等方面的变化,为在高盐环境中存活,不同嗜盐菌有着不同的适应机制。以嗜盐古细菌和某些厌氧异养型真细菌为主要类型的微生物通过在胞内保持持久性高浓度钾离子(4~5 mol/L)来维持渗透压的平衡;其余大多数耐盐微生物通过控制胞内相容性溶质(糖、多元醇、甜菜碱、氨基酸等)的浓度来维持渗透压的平衡^[21]。微生物界在研究耐盐菌的同时也注意到了耐盐放线菌和酵母菌,研究表明,酵母基因组中约有200多个基因与盐有关^[22]。在处理高有机物、高含盐废水方面,耐盐酵母菌有着比普通菌更好的效果。含盐量的变化可能引起微生物代谢途径的改变,当盐度升高时,微生物需要一个适应期。驯化过程就是使代谢方式逐渐适应高盐环境,并使耐盐菌大量增殖的过程。生物体强大的适应能力使其表现出可驯化性。

2.2.2 耐盐微生物的分离与鉴定

嗜盐菌是一类生长在盐湖、海洋等高盐环境下的有着独特生理性质的微生物。在耐盐微生物的分离与鉴定方面,国内外学者对各种耐盐菌进行了鉴定,鉴定的耐盐菌种属包括梭菌属(*Clostridium*)、嗜盐单胞菌属(*Halomonas*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、芽孢杆菌属(*Gracilibacillus*)等。主要筛选方式有:高盐度废水驯化筛选^[23]、土壤分离^[24]、海水沉积物分离^[25]、盐湖沉积物分离^[26]等。通过高盐度废水驯化筛选,从含盐7.2%的腌制废水中分离出一种木糖葡萄球菌,在逐步提高盐度至3%左右时对COD的去除效率提高至94%,对盐度高达7.2%的腌制废水的处理效率也达到88%;从被硝基苯污染的土壤中分离出的一种极端耐盐菌株可以在NaCl浓度高达12%的环境下生存,为高盐度废水生物处理提供一个新的思路;从被化工废水污染的沿岸沉积物中分离出的嗜盐单胞菌菌株,在10%~20% NaCl浓度下有着最佳效果,对测试染料的脱色率达90%以上;从柴达木盆地盐湖沉积物中分离出的芽孢杆菌属菌株YIM-C229T适宜生长在NaCl浓度5%~8%的环境中。

浙江大学研究团队^[27]对新疆阿阿克苏木湖、浙江沿海盐场和中国东海嗜盐菌微生物进行了分离和分析,对部分菌株进行多项分类学研究,并将嗜盐微生物应用于含盐废水处理过程,通过测定菌株对污染物的降解效果和生理生化特征,构建了高盐环境下高效降解污染物的嗜盐微生物群落。

2.3 高盐度有机废水生物处理技术

2.3.1 好氧处理技术

传统的活性污泥法优良的效果使其在有机废水处理中有着广泛的应用。尽管较高的盐度对污泥活性产生严重的影响,但通过合理的驯化可以实现活性污泥对高盐环境的适应。工程上采用从低盐度到高盐度逐渐增加的方式培养微生物使其在高盐度有机废水的处理中取得应用。Kargi等^[28]采用含有嗜盐菌系统的活性污泥处理油田废水,COD去除率达到了95%。张哲等^[29]采用MBR工艺对高盐度废水处理的影响因素进行研究,污水中海水比例为50%时,COD和氨氮的平均去除率可分别达到91.91%和91.44%。张柯等^[30]采用序批式膜反应器,利用从大盐湖中分离出的嗜盐菌进行培养,处理含盐质量分数为1%~15%的合成酚废水,虽然酚的去除率达到99%,但SVI和SS较高。王基成等^[31]将石化企业产生的含有高浓度氯化钙和难降解有机氯化物的高钙盐废水作为水样,采用逐步加压的方法对活性污泥进行耐盐驯化,发现随着盐度逐渐增加,丝状菌、钟虫等种属数量明显减少。实验表明,经过驯化后的耐盐活性污泥工艺对废水中COD的去除效率明显提高。因而,针对不同类型和含盐量的废水,选择适当的驯化方式是实现高盐度废水处理效果的关键。

生物膜法以其多样化的微生物种类对水质、水量变动有着较强适应性,对冲击负荷的耐受较强,在对盐的耐受力方面比活性污泥法更强。Yang L等^[32-33]用生物滤池和滴滤塔处理高盐度石油废水。盐度逐步增加到4%,TOC去除率达到95%。赵慎晃等^[34]采用两段生物接触氧化法处理高盐度废水,通过逐步提高有机负荷和盐浓度的方法驯化出耐高盐度的微生物,对COD、氨氮的去除率分别超过了80%、75%,且此法抗冲击、无污泥膨胀。Kim Windey等^[35]采用转动式生物接触反应器处理高盐废水,在含盐质量浓度为30 g/L时COD去除率达84%。

2.3.2 厌氧生物处理技术

对于大量含盐有机废水,相对好氧技术,厌氧处理更有实用性。厌氧条件下,甲烷菌活性会受到盐度的影响,Na⁺浓度超过10 g/L时,将强烈抑制甲烷的产生^[36]。但经过适当驯化的厌氧微生物可以适应较高的盐度,获得更强的抗冲击性。

相比好氧处理技术来说,厌氧手段还处于发展阶段,但随着国内外研究人员对厌氧机理等的研究逐渐深入,相继开发出了各种厌氧反应器,如AF、UASB、UBF、EGSB、厌氧水解等,取得了良好的效

果。Ramon M^[37]利用中温和高温厌氧滤池(MAF和TAF)处理高浓度含盐工业废水。COD去除率高达73%(TAF)和64%(MAF);COD甲烷化达到69%(TAF)和66%(MAF)。此外,在中温条件下采用UASB厌氧反应器对有机物的去除率也能稳定在65.6%~80.1%^[38]。刘锋等^[39]利用上流式厌氧生物滤池反应器(UBF)处理高含盐有机废水,在进水氯离子浓度为3000 mg/L时,COD去除效率达到85%左右。

2.4 组合法处理高盐度有机废水

2.4.1 厌氧好氧组合工艺

厌氧阶段在稳定有机物密度和种类、抗冲击负荷方面作用显著,更能为后续好氧阶段降低废水毒性。刘洁玲^[40]采用A-B二段接触氧化法处理环氧丙烷皂化废水,不需专门耐盐菌种,COD总去除率可达80%~86%。Lefebvre等^[41]采用厌氧/好氧处理工艺处理皮革废水,UASB技术与活性污泥后处理的结合改善了废水处理的总体效果,COD去除率可达96%。

2.4.2 物化生化组合工艺

对于高盐度有机废水,单一物化或生化难以取得理想的处理效果。为此,研究人员注意到组合法处理高盐度有机废水的优势并开发出了一系列处理工艺。

液/液萃取-膜生物反应器组合工艺^[42],主要包括萃取、剥离、油/水乳状液分离和生物量分离膜与生物反应器4个单元。通过萃取单元实现有机污染物与高浓度无机盐的分离,达到良好的生物处理效果。物理化学-生物处理即:混凝+ABR+SBR相结合的方法对高盐度采油废水的研究处理也取得了满意的效果,各项指标均达到污水综合排放标准的一级标准^[43]。安立超等^[44]从耐冲击负荷、对废水处理效果、动力学参数等方面进行对比实验研究,表明活性炭生物强化技术处理高含盐有机工业废水的高效性,COD去除率达80%。王卓等^[45]采用双效蒸发浓缩器、蒸氨精馏塔等作为一级物化前处理技术;采用铁碳微电解-混凝作为二级物化处理技术;兼氧-好氧作为三级处理技术的工艺流程,成功地治理了含高盐量、高氨氮量的有机化工废水,经驯化污泥生化处理后,出水达到国家排放标准。

3 展望

综上所述,可以看出生物法处理高盐度有机废水因其独有优势成为现今的主流处理手段。同时,对嗜盐菌等耐盐微生物的研究给生物法处理高盐度

水技术带来了良好的发展前景。在“十二五”规划减排工作约束性指标的背景下,对高盐废水的合理处置势在必行,开发出一套效果优良、经济合理的处理工艺成为现今的当务之急。在实际工程中,利用生化法直接处理高盐度有机废水的应用仍存在一定困难,在耐盐微生物的培育驯化和降盐机理方面还需要进行大量的研究工作,面对这种情况,研究人员注意到组合工艺处理高盐度有机废水的优势,以物化和生化法组合的处理工艺综合了不同技术的优点,取得了优良的效果,也成为未来研究发展的方向。

参 考 文 献

- [1] Binder. Use of SBR'S to treat pesticide wastewater [A]. Presented at the Notre Dame/Mile Hazardous Waste Conference [C]. South Bend: University of Notre Dame, 1992.
- [2] 何健,陈立伟,李顺鹏. 高盐度难降解工业废水生化处理的研究[J]. 中国沼气, 2000, 18(2): 12-16.
- [3] Cui Y W, Peng C Y, Peng Y Z, et al. Effects of salt on microbial populations and treatment performance in purifying saline sewage using the MUCT process [J]. Clean - Soil Air Water, 2009, 37(8): 649-656.
- [4] 王伟,刘俊杰,张桂凤. 焚烧法处理高浓度有机、含盐废水的研究分析[J]. 黑龙江环境通报, 2008, 32(3): 70-71.
- [5] Barrera - Diaz C, Urena Nunez F, Campos E, et al. A combined electrochemical - irradiation treatment of highly colored and polluted industrial wastewater [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2003(67): 657-663.
- [6] 王宏,郑一新,钱彪,等. 电解凝聚法处理高盐度有机废水的实验研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(2): 51-53.
- [7] 孙玉香,荆建刚,刘京伟,等. 高浓度有机废水深度氧化治理技术进展[J]. 城市环境与城市生态, 2004, 17(6): 27-29.
- [8] 杨世迎,杨鑫,韦光,等. 活化过硫酸盐处理难生化有机废水的方法: 中国, 101525177 [P]. 2009-09-09.
- [9] 李耀辰,鲍建国,周旋,等. 高盐度有机废水对生物处理系统的影响研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(6): 109-111.
- [10] Ingram M. The influence of sodium chloride and temperature on the endogenous respiration of bacillus cereus [J]. Journal of General Physiology, 1940, 23(6): 773-780.
- [11] Tellez G T, Nirmalakhandan N. Evaluation of biokinetic coefficients in degradation of oil field produced water under varying salt concentrations [J]. Water Research, 1995, 29(7): 1711-1718.
- [12] Kapdan I K, Boylan B. Batch treatment of saline wastewater by Halanaerobium lacusrosei in an anaerobic

- packed bed reactor[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, 84(1): 34-38.
- [13] Ahmet U. Specific nutrient removal rates in saline wastewater treatment using sequencing batch reactor [J]. *Process Biochemistry*, 2006, 41(1): 61-66.
- [14] Dincer A R, Kargi F. Performance of rotating biological disc system treating saline wastewater [J]. *Process Biochemistry*, 2001, 36(8-9): 901-906.
- [15] 文湘华, 占新民, 王建龙, 等. 含盐废水的生物处理研究进展[J]. *环境科学*, 1999, 20(3): 104-106.
- [16] Kargi F, Dincer A R. Biological treatment of saline wastewater by fed-batch operation [J]. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 1997, 69(2): 167-72.
- [17] Campos J L, Mosquera - Corral A, Sanchez M, et al. Nitrification in saline wastewater with high ammonia concentration in an activated sludge unit [J]. *Wat. Res.*, 2002 36: 2555-2560.
- [18] Uygur A, Kargi F. Salt inhibition on biological removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, 34: 313-318.
- [19] An Li, Gu Guowei. The treatment of saline wastewater using two-stage contact oxidation method [J]. *Water Science and Technology*, 1993, 28(7): 31-37.
- [20] 郭艳丽, 张培玉, 于德爽, 等. 嗜盐菌与高盐度废水生物处理研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(9): 79-83.
- [21] Rahnama H, Vakilian H, Fahimi H, et al. Enhanced salt stress tolerance in transgenic potato plants (*Solanum tuberosum* L.) expressing a bacterial mtd gene [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2011 33(4): 1521-1532.
- [22] 雷云, 解庆林, 李艳红. 高盐度废水处理研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2007 32(6): 94-98.
- [23] Abou - Elela S I, Kamel M M, Fawzy M E. Biological treatment of saline wastewater using a salt-tolerant microorganism [J]. *Desalination* 2010 250(1): 1-5.
- [24] Ai H, Zhou J, Lu H, et al. Responses of a novel salt-tolerant *Streptomyces albidoflavus* DUT_AHX capable of degrading nitrobenzene to salinity stress [J]. *Biodegradation*, 2009 20(1): 67-77.
- [25] Guo J, Zhou J, Wang D, et al. A novel moderately halophilic bacterium for decolorizing azo dye under high salt condition [J]. *Biodegradation*, 2008, 19(1): 15-19.
- [26] Chen Y G, Cui X L, Zhang Y Q, et al. *Gracilicoccus quinghaiensis* sp. Nov., isolated from salt-lake sediment in the Qaidam Basin, north-west China [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2008 31(3): 183-189.
- [27] 孟凡旭. 高盐环境微生物的分离、鉴定及其在含盐废水处理中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学生命科学学院, 2009.
- [28] Kargi F, Dincer A R, Pala A. Characterization and Biological Treatment of Pickling Industry Wastewater [J]. *Bioprocess Eng*, 2000 23(4): 371-374.
- [29] 张哲, 于德爽, 张业静. MBR 工艺处理高盐度废水试验[J]. *环境工程*, 2009, 27(5): 22-24.
- [30] 张柯, 陶冠红, 陈建军, 等. 曝气生物滤池处理高含盐乙烯废碱液的试验研究[J]. *石油化工安全环保技术*, 2009 25(1): 50-58.
- [31] 王基成, 张秀霞, 王建娜, 等. 驯化污泥及生物滤池法处理高含盐石化废水[J]. *石油学报(石油加工)*, 2011 27(6): 977-983.
- [32] Yang L. Biodegradation of dispersed diesel fuel under high salinity conditions [J]. *Wat. Res.* 2000 34(13): 3303-3314.
- [33] Yang L, Lai C T. Biological treatment of mineral oil in a salty environment [J]. *Wat. Sci. Tech.* 2000 42(5): 369-375.
- [34] 赵慎晃, 李长江, 马衍文. 两段生物接触氧化处理高盐度废水试验研究[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(11): 99-103.
- [35] Kim Windey Inge De Bo, Willy Verstraete. Oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification (OLAND) in a rotating biological contactor treating high-salinity wastewater [J]. *Water Research* 2005(39): 4512-4520.
- [36] Kugelman I J, McCarty P L. Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment [J]. I. Slug feed studies. *J. Water Pollut. Control. Fed*, 1965 37(1): 97-116.
- [37] Ramon M. Treatment of Wastewaters in the Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Filters [J]. *Wat Envir Res*, 1995 67(1): 33-45.
- [38] 李宇庆, 马楫, 冯标, 等. UASB 厌氧反应器处理制药废水实验研究[J]. *环境科学与管理*, 2011 36(9): 79-81.
- [39] 刘锋, 吴建华, 马向华, 等. 上流式厌氧生物滤池处理高含盐废水的试验研究[J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2003, 16(2): 34-38.
- [40] 刘洁玲. A-B 二段法处理高含盐量皂化废水的研究[J]. *工业用水与废水*, 1999, 30(1): 19-22.
- [41] Lefebvre O, Vasudevan N, Torrijos M, et al. Anaerobic digestion of tannery soak liquor with an aerobic post-treatment [J]. *Water Res.*, 2006 40(7): 1492-1500.
- [42] 杨晔, 陆芳, 潘志彦, 等. 高盐度有机废水处理研究进展[J]. *中国沼气*, 2003, 21(1): 22-25.
- [43] 雷云, 解庆林, 李艳红. 高盐度废水处理研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2007 32(6): 94-98.
- [44] 安立超, 陆路德, 汪信, 等. 活性炭强化生物处理高含盐有机废水研究[J]. *南京理工大学学报*, 2003, 27(6): 715-719.
- [45] 王卓, 纪逸之. 物化-生化组合工艺在含高盐量、高氮量有机废水处理中的应用[J]. *江苏环境科技*, 2000 13(2): 10-13.