

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.012

盐酸黄连素废水处理技术研究进展

徐成斌,包 坤,马溪平,李瑶瑶,牟安毅

(辽宁大学环境学院,辽宁 沈阳 110036)

摘要:综述近年来关于盐酸黄连素废水处理技术的研究进展,盐酸黄连素废水处理技术有物理法、化学法和生物法 3 种,目前的研究热点是高级氧化技术,高级氧化技术与其他方法的联用是今后盐酸黄连素废水处理技术发展的方向,利用生物技术处理盐酸黄连素制药废水具有良好的发展前景,而物化法-生物法联用技术将是处理和根治盐酸黄连素制药废水污染的最佳方法。
关键词:废水处理;盐酸黄连素;制药废水;物理法;化学法;生物法
中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)03-0056-05

Advances in research of berberine hydrochloride wastewater treatment technologies

XU Chengbin, BAO Kun, MA Xiping, LI Yaoyao, MU Anyi

(School of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: Advances in research of berberine hydrochloride wastewater treatment technologies in recent years are summarized. There are three kinds of technologies for berberine hydrochloride wastewater treatment: the physical process, the chemical process, and the biological process. High-grade oxidation technology is a hot issue in present research, and its combination with other technologies is the trend in berberine hydrochloride wastewater treatment. The biological treatment technology for treatment of the berberine hydrochloride wastewater has a wide development prospect, while the combined technologies of the physical-chemical process and biological process are the most effective methods for berberine hydrochloride wastewater treatment.
Key words: wastewater treatment; berberine hydrochloride; pharmaceutical wastewater; physical process; chemical process; biological process

盐酸黄连素 (Berberine Hydrochloride), 也叫盐酸小檗碱 (分子式: $C_{20}H_{18}ClNO_4 \cdot 2H_2O$; 分子量: 407.85, 结构如图 1 所示), 为黄色针状结晶或粉末, 无臭、味极苦。熔点 $145^{\circ}C$, 在 $160 \sim 220^{\circ}C$ 时会分解, 在 $278 \sim 280^{\circ}C$ 时则完全熔融, 可溶于热水和乙醇, 难溶于氯仿和乙醚, 具有很强的抗氧化降解性能^[1-2], 是主要存在于毛茛科、小檗科、芸香科、罂粟科、鼠李科、防己科等 6 科植物中的一种季胺类异喹啉天然生物碱^[3-4]。作为广谱抗生素, 盐酸黄连素对大多数革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌和真菌均有抑

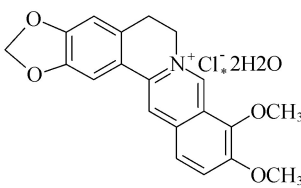


图 1 盐酸黄连素的分子结构式

菌作用,低剂量时抑菌,高剂量时杀菌。此外对病毒、原生动物、衣原体和肠道寄生虫等也有明显的抑制作用^[5-6],在中国、印度和东南亚等国的传统医学中的应用已有 3000 a 的悠久历史^[8-9]。化学合成和从天

基金项目:国家“十二五”科技重大专项子课题(2012ZX07505-003);2011 年辽宁省科学技术计划项目(2011230009);辽宁大学环境学院重点学科资助项目
作者简介:徐成斌(1980—)男,副教授,从事水污染控制研究。E-mail: xuchengbin80@163.com
通信作者:马溪平,教授。E-mail: maxiping@163.com

然植物中提取是盐酸黄连素的主要生产方法,目前比较成熟的植物提取工艺为稀硫酸法和石灰水法^[10]。

作为化学合成黄连素生产工艺过程中的成品冲洗废水的主要污染物,废水中的盐酸黄连素质量浓度在 1 000 mg/L 左右^[11],对环境中的微生物有很强的毒性,属于难生物处理的高浓度有机制药废水。向环境中大量排放含盐酸黄连素的制药废水,会直接杀死土壤、水体和沉积物中的有益微生物(如光合细菌、硝化细菌等)或抑制其生长,影响环境中微生物的种群和群落结构,对微生物的生长繁殖具有持久性的影响,破坏环境中固有的微生态平衡,进而会影响到整个食物链,最终会影响人类健康^[12-14]。同时,也会在环境中的生物体内蓄积并且沿着食物链传递,可能会诱导致病微生物产生抗药性基因,如近年来出现的超级致病菌(MRSA)已经成为 21 世纪的医学难题^[15-16]。近年来,一些学者对盐酸黄连素制药废水的处理技术进行了深入研究,取得了一定的成绩,为盐酸黄连素制药废水的治理提供了理论与技术支持。盐酸黄连素制药废水处理技术主要包括物理法、化学法和生物法等。

1 物理法

吸附法是目前工业废水中处理难降解有机物的重要方法,其中树脂吸附法因其具有吸附容量大、性能稳定、处理效率高、无二次污染以及可回收使用等诸多优点,在治理高浓度、高含盐量、难生化处理的有机工业废水中得到了广泛的应用^[17]。但利用树脂吸附法处理盐酸黄连素废水的研究相对较少。单永平等^[18]对盐酸黄连素模拟废水进行树脂吸附法的试验研究,在 5 种选定的大孔吸附树脂中,优选出了大孔树脂 H103 作为最佳吸附树脂。研究表明,当模拟废水中的盐酸黄连素初始质量浓度为 1 000 mg/L,最佳的初始 pH 值为 7.0,树脂最佳投加量为 3.0 g 时,盐酸黄连素的去除率高达 99% 以上。

2 化学法

2.1 高级氧化技术

高级氧化技术(AOTs)是去除水体中难降解有机污染物的一种新型氧化除污技术,通过光、声、电等过程可以产生出大量活性极强的自由基,如 $\cdot\text{OH}$ 。 $\cdot\text{OH}$ 具有极强的氧化性,其标准氧化还原电位高达 2.80 V,仅次于氟的氧化还原电位(2.87 V)^[19]。通过 $\cdot\text{OH}$ 的强氧化性来分解水体中的高稳定性、高浓度、难降解有机污染物,并最终氧化分解成二氧化碳和水,达到废水处理的目的^[20]。高级氧化技术包括臭氧(O_3)氧化法、Fenton 氧化法、超临界水氧化

法、催化湿式空气氧化法、电化学氧化法以及光催化氧化法等^[21]。

2.1.1 臭氧(O_3)氧化及其组合技术

O_3 是一种强氧化剂和消毒剂,早在 20 世纪初欧洲就用它来消毒处理饮用水。在水处理中应用广泛、目前研究较多的是臭氧与其他方法的联合使用,例如: O_3 -超声波工艺、 O_3 -电解处理联合工艺、催化臭氧化工艺、 O_3 - H_2O_2 氧化工艺、 O_3 -生物活性炭工艺等。秦伟伟等^[22]实验研究了 O_3 /UV 协同氧化法处理盐酸黄连素制药废水,研究表明, O_3 /UV 协同氧化方法比单独采用 O_3 及单独采用紫外光(UV)处理盐酸黄连素废水有更为明显的处理效果。当废水中盐酸黄连素质量浓度为 1 000 mg/L, pH 值为 5.0,投加的 O_3 质量浓度为 279.0 mg/L,处理时间为 45 min 时, O_3 /UV 协同氧化法对盐酸黄连素的去除率在 80% 以上,并提高了废水的可生化性。

2.1.2 Fenton 氧化法

Fenton 氧化法是利用 Fenton 试剂(由亚铁盐和 H_2O_2 组成)中的 Fe^{2+} 作为催化剂,将 H_2O_2 催化分解,生成具有强氧化能力的羟基自由基 $\cdot\text{OH}$,并在短时间内几乎无选择地将水体中的有机物氧化分解。崔晓宇等^[23]以盐酸黄连素成品母液废水为研究对象,采用 Fenton 氧化法进行研究。结果表明,当反应体系的初始 pH 值为 2.0, $c(\text{H}_2\text{O}_2)$ 和 $c(\text{FeSO}_4)$ 分别为 0.24 mol/L 和 10 mmol/L,反应温度为 40℃,反应时间为 30 min 时,对 COD 和盐酸黄连素的去除率可分别达到 44.1% 和 96.2%,废水的可生化性相较出水前提高了 6 倍。

2.1.3 光催化氧化法

光催化氧化法是在反应体系中加入适量的光敏半导体材料(如 TiO_2 、CdS、ZnO、 SnO_2 和 WO_3 等)作为催化剂,利用光辐射(紫外光、模拟太阳光或自然光等)产生 $\cdot\text{OH}$ 来分解水中的有机污染物^[24]。由于氧化能力强、反应条件温和、无二次污染,该方法得到广泛应用,近年来发展迅速。张艳等^[25]研究了纳米 TiO_2 / H_2O_2 体系中盐酸黄连素的光催化降解的效果,结果表明,因为 H_2O_2 是强氧化剂和电子俘获剂,加入 H_2O_2 后可以提高纳米 TiO_2 的光催化氧化速率和效率,从而使盐酸黄连素的降解率提高,光催化降解反应符合一级反应动力学方程。在反应温度为 20℃,反应时间为 4 h,纳米 TiO_2 最佳投加量为 0.064 g 的条件下,质量浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 的 400 mL 盐酸黄连素溶液的降解率为 83%;但当纳米 TiO_2 的投加量继续增加时,盐酸黄连素的降解率反而降低。

2.1.4 催化湿式空气氧化技术

催化湿式空气氧化(catalytic wet air oxidation,

简称 CWAO) 技术是一种高级氧化技术, 作为预处理手段, 因其具有耐负荷、无二次污染等优点, 在高浓度难降解有机废水处理以及市政污泥处理中得到广泛应用。崔娜等^[26] 采用催化湿式空气氧化技术处理盐酸黄连素和磷霉素钠混合制药废水, 发现当 Mn 与 Cu 协同作用时对废水的处理效果最好, COD 去除率可达 72%, 出水中 $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD})$ 能提高至 0.85。

2.2 电化学法

电化学法是一种比较成熟的废水处理技术, 广泛应用于制药、印染、造纸、制革、电镀和化工等行业废水的处理。常用的电化学法主要有电化学氧化法、电化学还原法、电凝聚气浮法、电渗析法、电吸附法、微电解法等^[27-28]。目前有文献报道处理盐酸黄连素制药废水的电化学法主要是电化学氧化法、微电解法和脉冲电絮凝法。其中电化学氧化法属于高级氧化技术的范畴。

2.2.1 电化学氧化法

电化学氧化法分为直接和间接电化学氧化法两种, 都属于阳极过程。直接电化学氧化法是使污染物在阳极上直接被氧化, 转化为无害物质; 间接电化学氧化法是利用阳极反应产生活性自由基 (如 $\cdot\text{OH}$), 将污染物氧化分解, 最终转化为无害物质, 达到有效去除污染物的目的^[28]。

肖宏康等^[29] 对盐酸黄连素制药废水进行电化学氧化法的处理研究, 认为废水中盐酸黄连素降解的主要原因是电化学原位生成具有强氧化性的活性氯, 并确定了 pH 值、电流强度、电极板间距和电解质浓度等最优工艺条件, 从而使盐酸黄连素和 COD 的去除率分别达到 95% 和 60% 以上。

肖书虎等^[30] 针对含铜盐酸黄连素制药废水中含有高浓度 Cu^{2+} 的特点, 开展利用电化学双极法处理盐酸黄连素制药废水的研究。结果表明, 由于废水中含有 Cu^{2+} , 所以不需要添加其他任何电解质和氧化剂, 废水中的 Cu^{2+} 就能在阴极还原析出, 同时在阳极发生氧化作用能有效地降解盐酸黄连素。在电极板间距是 2.0 cm、电流强度是 4.0 A/cm² 及不调节废水的 pH 值的条件下, 处理时间在 300 min 内时, 盐酸黄连素和 Cu^{2+} 的去除率分别达到 93% 和 99% 以上。

张国芳等^[31] 采用阳极为 RuO_2/Ti 的网状电极, 阴极采用 Ti 金属网, 对盐酸黄连素制药废水进行电化学预处理试验。结果表明, 当废水的初始 pH 值为 7.05、电极板间距为 1.0 cm、电流强度为 50.0 mA/cm² 时, 处理时间 120 min, 废水中的 COD 和盐酸黄连素去除率分别达到 60.2% 和 97.5%, 并且明

显提高了出水的可生化性。

2.2.2 微电解法

微电解法是一种新型的工业废水处理方法, 又叫内电解法。该方法利用铁屑中的铁和炭组成微小的原电池的正极和负极, 电解质溶液为充入的盐酸黄连素废水, 从而发生氧化还原反应, 形成无数个微小的原电池, 使污染物在正、负极发生氧化还原反应, 达到去除废水中污染物的目的。张艳桥^[32] 以铁炭微电解法对盐酸黄连素废水 (废水中, $\rho(\text{COD}) = 175\,970\text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5) = 14\,400\text{ mg/L}$, $\text{pH} = 9.0$) 进行处理。结果表明, 在适宜的反应条件下, 利用铁炭微电解法对盐酸黄连素废水进行预处理, COD 的去除率可以达到 93.1%, 并且废水的 $\rho(\text{BOD}_5)/\rho(\text{COD})$ 值由 0.08 提高到 0.41, 提高了盐酸黄连素废水的可生化性。

2.2.3 脉冲电絮凝技术

脉冲电絮凝技术是近几年来发展起来的一种新型有效的处理难降解废水的技术方法, 它采用“供电-断电-供电”持续重复的间歇供电方式, 在脉冲电絮凝过程中施加脉冲信号, 使电极上发生时断时续的反应, 促进溶液中的离子在电极表面的扩散。与传统电絮凝技术相比, 脉冲电絮凝技术不仅能降低能耗, 而且还可以提高难降解废水的处理效果^[33]。任美洁等^[34] 利用脉冲电絮凝法来处理盐酸黄连素制药废水, 结果表明, 脉冲电絮凝法与传统电絮凝法相比, 节能优势明显, 能耗仅为传统电絮凝法的 20%, 并且在最优反应条件 (占空比: 0.3, 电极间距: 2.0 cm, 电流密度: 19.44 mA/cm², 脉冲频率: 1.0 kHz, 反应时间: 210 min) 下, 对盐酸黄连素和 COD 的去除率分别在 90% 和 60% 以上。

3 生物法

与物理法、化学法相比, 生物法具有经济、高效、无二次污染等特点, 同时, 微生物具有很强的适应性和可变性, 所以生物法在处理有机污染物领域越来越受到推崇。对盐酸黄连素制药废水的微生物处理研究, 国内外鲜有报道。目前, 盐酸黄连素制药废水的生物处理方法主要还是侧重于两种或两种以上的工艺组合。

刘风华等^[35] 采用厌氧折流板反应器 (ABR)-好氧颗粒污泥组合工艺对盐酸黄连素制药废水处理的启动运行进行研究。结果表明, 当 ABR 装置在水力停留时间 (HRT) 为 4 d, 进水中盐酸黄连素质量浓度为 50 mg/L 时成功启动; 然后以 ABR 的出水作为营养物, 培养出沉降性能良好的好氧颗粒污泥 (粒度: 2 ~ 10 mm, 沉降速率: 104 ~ 137 m/h)。当进水中的

COD 质量浓度为 3 000 ~ 4 000 mg/L 时,该组合工艺对进水中盐酸黄连素和 COD 的去除率均在 90% 以上,达到了良好的处理效果。

此外,邱光磊等^[36]利用 UASB-MBR(升流式厌氧污泥床-膜生物反应器)组合工艺对模拟盐酸黄连素废水进行实验研究。结果表明,当水力停留时间(HRT)为 24h,进水中的盐酸黄连素、COD 和 NH₄⁺-N 的质量浓度分别为 64.4 ~ 276.8 mg/L、1 717 ~ 4 393 mg/L 和 91.8 ~ 158.7 mg/L 时,组合工艺对盐酸黄连素、COD 和 NH₄⁺-N 的有效去除率分别达到 99%、90% 和 98% 以上。同时,研究表明,模拟废水中的盐酸黄连素主要是在组合工艺中的 UASB 部分去除,去除率在 95% 以上。

4 结 语

目前盐酸黄连素制药废水的处理技术主要还是集中在化学方法范畴,研究的热点是高级氧化技术。但是,单一利用高级氧化技术处理大量的盐酸黄连素制药废水,不仅处理效率低,而且增加成本,因此与其他方法的联用是今后发展的方向。

到目前为止,生物技术在治理和防治环境污染方面发挥了重要作用,所以利用生物技术处理盐酸黄连素制药废水具有良好的发展前景。但是,由于盐酸黄连素是广谱抗生素,在高浓度时杀菌,低浓度时抑菌,对微生物具有很强的毒性,因此单一使用生物技术很难解决盐酸黄连素制药废水的污染问题。如何提高盐酸黄连素制药废水的可生化性是关键。笔者认为,物化法-生物法联用技术应该是处理和根治盐酸黄连素制药废水污染的最佳方法。

参考文献:

[1] 任贻军, 高逢喜. 黄连素的研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报, 2009, 11(1): 50-51. (REN Yijun, GAO Fengxi. The research progress of berberine[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2009, 11(1): 50-51. (in Chinese))

[2] 蒋飙. 从黄柏中提取盐酸黄连素[J]. 贵州化工, 2005, 30(1): 56-57. (JIANG Biao. Extraction of berberine hydrochloride from phellodendron bark [J]. Guizhou Chemical Industry, 2005, 30(1): 56-57. (in Chinese))

[3] DOSTAL J, MAN S, SECKAROVA P, et al. Berberine and coptisine free bases[J]. J Molecular Structure, 2004, 687(1/2/3): 135-142.

[4] 郑洪艳, 徐为人. 小檗碱药理作用研究进展[J]. 中草药, 2004, 35(6): 708-710. (ZHENG Hongyan, XU Weiren. The advance on pharmacological effects of berberine [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs,

2004, 35(6): 708-710. (in Chinese))

[5] SILVIA L, SONA J, MARTA M, et al. Antiproliferative activity of berberine in vitro and in vivo[J]. Biomed Pap Med Fac Univ Palacky Olomouc Czech Repub, 2005, 149(2): 461-463.

[6] AMIN A H, SUBBAIAH T V, ABBASI K M. Berberine sulfate: antimicrobial activity, bioassay, and mode of action [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1969, 15(9): 1067-1076.

[7] CREASEY W. Biochemical effects of berberine [J]. Biochemical Pharmacology, 1979, 28: 1081-1083.

[8] ISSAC S R P, ARUN S, ANNIE S. Antidiabetic activity of benzyl tetra isoquinoline alkaloid Berberine in streptozotocin-nicotinamide induced type 2 diabetic rats [J]. Diabetologia Croatica, 2005, 34(4): 117-125.

[9] JARUWAN W. Physiological effects of berberine [J]. Thai Pharmaceutical and Health Science Journal, 2009, 4(1): 78-81.

[10] 陈小全, 翟虎, 邵辉莹, 等. 黄连素提取方法的改进[J]. 西南民族大学学报: 自然科学版, 2007, 33(5): 1121-1123. (CHEN Xiaoquan, ZHAI Hu, SHAO Huiying, et al. Extraction of berberine from rhizomacoptidis by improved method [J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2007, 33(5): 1121-1123. (in Chinese))

[11] REN M J, ZENG P, SONG Y H, et al. Performance of pulse electro-coagulation on berberine hydrochloride wastewater [C] // IWA. Proceeding of the 2nd IWA Asia Pacific Regional YWP Conference. Beijing: IWA Publishing, 2009: 181-187.

[12] 吕玄文. 淡水养殖鱼塘中氯霉素污染及微生物降解研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2009: 3-7.

[13] MARTINEZ J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(11): 2893-2902.

[14] HALLER M Y, MÜLLER S R, MCARDELL C S, et al. Quantification of veterinary antibiotics (sulfonamides and trimethoprim) in animal manure by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography, 2002, 952(1/2): 111-120.

[15] PRUDEN A, PEI R T, STORTEBOOM H, et al. Antibiotic resistance genes as emerging contaminants: studies in Northern Colorado [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(23): 7445-7450.

[16] ARIAS C A, MURRAY B E. Antibiotic-resistant bugs in the 21st century: a clinical super challenge [J]. The New England Journal of Medicine, 2009, 360(5): 439-443.

[17] 张全兴, 陈金龙, 许昭怡. 树脂吸附法处理有毒有机化工废水及其资源化研究 [J]. 高分子通报, 2005(4): 116-121. (ZHANG Quanxing, CHEN Jinlong, XU Zhaoyi. Application of polymeric resin adsorbent in organic

- chemical wastewater treatment and resources reuse [J]. Acta Polymerica Sinica, 2005 (4): 116-121. (in Chinese))
- [18] 单永平,曾萍,宋永会,等. 树脂吸附法处理黄连素模拟废水[J]. 环境工程技术学报,2011,1(4):300-304. (SHAN Yongping, ZENG Ping, SONG Yonghui, et al. Treatment of simulated berberine wastewater using resin adsorption [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2011,1(4):300-304. (in Chinese))
- [19] 刘晶冰,燕磊,白文荣,等. 高级氧化技术在水处理的研究进展[J]. 水处理技术,2011,37(3):11-17. (LIU Jingbing, YAN Lei, BAI Wenrong, et al. Study progress of Water Treatment by advanced oxidation processes [J]. Technology of Water Treatment,2011,37(3):11-17. (in Chinese))
- [20] POYATOS J M, ALMECIJA M C, TORRES J C, et al. Advanced oxidation processes for wastewater treatment; tate of the art [J]. Water Air Soil Pollut, 2010, 205 (1-4):187-204.
- [21] 刘建华. 高级氧化技术及应用研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2009, 27 (1): 139-141. (LIU Jianhua. Research on advanced oxidation technology and its application[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 2009, 27 (1): 139-141. (in Chinese))
- [22] 秦伟伟,肖书虎,宋永会,等. O_3 /UV 协同氧化处理黄连素制药废水[J]. 环境科学研究,2010,23(7):877-880. (QIN Weiwei, XIAO Shuhu, SONG Yonghui, et al. Treatment of berberine pharmaceutical wastewater by O_3 /UV synergetic oxidation [J]. Research of Environmental Sciences,2010,23(7):877-880. (in Chinese))
- [23] 崔晓宇,曾萍,邱光磊,等. Fenton 法处理黄连素废水试验[J]. 环境科学研究,2012,25(8):916-921. (CUI Xiaoyu, ZENG Ping, QIU Guanglei, et al. Berberine wastewater treatment test using fenton oxidation [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25 (8): 916-921. (in Chinese))
- [24] 贾陈忠,刘松. TiO_2 光催化氧化技术在水处理中的研究进展[J]. 广州化工,2012,40(4):5-7. (JIA Chenzhong, LIU Song. Research progress on TiO_2 photocatalytic oxidation technology and its application in water treatment [J]. Guangzhou Chemical Industry,2012,40(4):5-7. (in Chinese))
- [25] 张艳,申世刚. 纳米 TiO_2 光催化降解黄连素的动力学研究[J]. 医学研究与教育,2011,28(1):12-18. (ZHANG Yan, SHEN Shigang. Kinetics study on photocatalytic degradation of berberine hydrochloride in Nano- TiO_2 suspension system[J]. Medical Research and Education,2011,28(1):12-18. (in Chinese))
- [26] 崔娜,王国文,徐晓晨,等. 催化湿式空气氧化处理磷霉素钠、黄连素制药废水试验研究[J]. 水处理技术,2012,38(2):72-75. (CUI Na, WANG Guowen, XU Xiaochen, et al. Pretreatment of fosfomicin sodium and berberine pharmaceutical wastewater with CWAQ [J]. Technology of Water Treatment,2012,38(2):72-75. (in Chinese))
- [27] 王翠,史佩红,杨春林,等. 电化学氧化法在废水处理中的应用[J]. 河北工业科技,2004,21(1):49-52. (WANG Cui, SHI Peihong, YANG Chunlin, et al. Application of the research of the electrochemical oxidation in wastewater treatment [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2004,21(1):49-52. (in Chinese))
- [28] 区尧万,陈欣义,陈彬,等. 电化学水处理技术的研究与应用[J]. 广东化工,2008,35(7):104-107. (OU Yaowan, CHEN Xinyi, CHEN Bin, et al. Research and application of electric chemistry technology [J]. Guangzhou Chemical Industry,2008,35(7):104-107. (in Chinese))
- [29] 肖宏康,肖书虎,张国芳,等. 电化学氧化法处理模拟黄连素制药废水的研究[J]. 环境工程学报,2011,5(5):987-991. (XIAO Hongkang, XIAO Shuhu, ZHANG Guofang, et al. Treatment of simulated berberine wastewater in electrochemical process[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5 (5): 987-991. (in Chinese))
- [30] 肖书虎,张国芳,宋永会,等. 电化学双极法处理高浓度含铜黄连素制药废水[J]. 环境工程技术学报,2011,1(4):295-299. (XIAO Shuhu, ZHANG Guofang, SONG Yonghui, et al. Treatment of berberine pharmaceutical wastewater containing copper by bipolar-electrochemical process [J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2011,1(4):295-299. (in Chinese))
- [31] 张国芳,肖书虎,肖宏康,等. 黄连素制药废水的电化学预处理试验[J]. 环境科学研究,2011,24(1):79-83. (ZHANG Guofang, XIAO Shuhu, XIAO Hongkang, et al. Pretreatment of berberine pharmaceutical wastewater using electrochemical process [J]. Research of Environmental Sciences,2011,24(1):79-83. (in Chinese))
- [32] 张艳桥. 铁炭微电解法处理黄连素废水应用研究[J]. 环境保护科学,2010,36(2):24-27. (ZHANG Yanqiao. Study on application of internal electrolysis to treat berberine wastewater [J]. Environmental Protection Science,2010,36(2):24-27. (in Chinese))
- [33] 陈意民,李金花,李龙海,等. 脉冲电絮凝处理难降解印染废水的研究[J]. 环境科学与技术,2009,32(9):144-147. (CHEN Yimin, LI Jinhua, LI Longhai, et al. Experimental study on degradation of dyeing wastewater by pulse electro-coagulation [J]. Environmental Science and Technology,2009,32(9):144-147. (in Chinese))

(下转第 65 页)

concentration powdered activated carbon and ultrafiltration [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(23):8-12. (in Chinese))

[7] 杨忆新,刘文君,尹艳敏. 超滤/粉末活性炭组合工艺深度处理黄河源水[J]. 中国给水排水, 2010, 26(15):48-50. (YANG Yixin, LIU Wenjun, YIN Yanmin. Combined process of ultrafiltration and PAC for advanced treatment of source water from Yellow River [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(15):48-50. (in Chinese))

[8] QIN Jianjun, MAUNG H O, LEE H, et al. Dead-end ultrafiltration for pretreatment of RO in reclamation of municipal wastewater effluent [J]. Journal of Membrane Science, 2004, 243(1/2):107-113.

[9] 傅金祥,陈正清,赵玉华,等. 微絮凝过滤处理污水厂二级出水用作景观水研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(19):65-68. (FU Jinxiang, CHEN Zhengqing, ZHAO Yuhua, et al. Study on secondary effluent reuse as scenic water by using microflocculation filtration [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(19):65-68. (in Chinese))

[10] 李桂平,栾兆坤. 微絮凝-直接过滤工艺在城市污水深度处理中的应用研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(4):65-67. (LI Guiping, LUAN Zhaokun. The study of phosphorus removal for secondary effluent in advanced municipal wastewater treatment using microflocculation-direct filtration [J]. Techniques & Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(4):65-67. (in Chinese))

[11] 张继伟,曾杭成,张国亮,等. 絮凝-超滤组合工艺深度

处理印染废水及阻力分析[J]. 水处理技术, 2009, 35(11):84-88. (ZHANG Jiwei, ZENG Hangcheng, ZHANG Guoliang, et al. Advanced treatment of industrial textile wastewater by ultrafiltration with coagulation [J]. Technology of Water Treatment, 2009, 35(11):84-88. (in Chinese))

[12] KIM S H, MOON S Y, YOON C H, et al. Role of coagulation in membrane filtration of wastewater for reuse [J]. Desalination, 2005, 173:301-307.

[13] LEE E K, CHEN V, FANE A G. Natural organic matter (NOM) fouling in low pressure membrane filtration-effect of membranes and operation modes [J]. Desalination, 2008, 218(1/3):257-270.

[14] 严偃世. 给水工程[M]. 4 版. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

[15] 刘志刚,虞静静,马天,等. 污水深度处理微絮凝-砂滤工程实例[J]. 环境工程, 2011, 29(4):15-17. (LIU Zhigang, YU Jingjing, MA Tian, et al. Engineering design of micro-flocculation-sand filtration of advanced wastewater treatment [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(4):15-17. (in Chinese))

[16] 王锦,曹宇,王晓昌,等. 超滤及其组合工艺对污水的深度处理试验[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(2):14-16. (WANG Jin, CAO Yu, WANG Xiaochang, et al. Ultra-filtration and its hybrid processes for tertiary treatment of sewage [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 25(2):14-16. (in Chinese))

(收稿日期:2012-12-27 编辑:彭桃英)

(上接第 60 页)

[34] 任美洁,宋永会,曾萍,等. 脉冲电絮凝法处理黄连素制药废水[J]. 环境科学研究, 2010, 23(7):892-896. (REN Meijie, SONG Yonghui, ZENG Ping, et al. Treatment of berberine hydrochloride pharmaceutical wastewater by pulse electro-coagulation [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(7):892-896. (in Chinese))

[35] 刘风华,曾萍,宋永会,等. ABR-好氧颗粒污泥处理黄连素废水的启动研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(9):1937-1941. (LIU Fenghua, ZENG Ping, SONG Yonghui, et al. Start-up performance of hybrid ABR-aerobic granulation reactor for berberine wastewater treatment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(9):1937-1941. (in Chinese))

[36] 邱光磊,宋永会,曾萍,等. UASB-MBR 组合工艺处理模拟黄连素废水[J]. 环境科学研究, 2010, 23(7):942-947. (QIU Guanglei, SONG Yonghui, ZENG Ping, et al. Treatment of synthetic berberine wastewater in a hybrid up

flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)-membrane bioreactor (MBR) system [J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(7):942-947. (in Chinese))

(收稿日期:2012-10-18 编辑:彭桃英)

