

专论与综述

制药工业废水处理技术

陆杰, 徐高田, 张玲, 张国莹

(上海大学环境与化学工程学院, 上海 200072)

[摘要] 综述了目前制药工业废水处理中应用的各种物化、生物处理技术; 并对各种处理方法的应用特点进行了论述。最后指出了制药工业废水处理技术今后研究开发的方向和思路。

[关键词] 制药工业废水; 物化处理; 生物处理

[中图分类号] X787 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2001)10-0001-05

Advances in pharmaceutical wastewater treatment technology

LU Jie, XU Gao-tian, ZHANG Ling, ZHANG Guo-ying

(School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Some physical, chemical and biological methods used in the pharmaceutical wastewater treatment at present are summarized. Finally the research and development aspects in the future are pointed out.

Key words: pharmaceutical wastewater; physiochemical treatment; biological treatment

制药工业废水通常属于较难处理的高浓度有机污水之一。因药物产品不同、生产工艺不同而差异较大。制药工业废水通常具有组成复杂, 有机污染物种类多、浓度高, COD_{Cr}值和 BOD₅ 值高且波动性大, 废水的 BOD₅/COD_{Cr} 值差异较大, NH₃-N 浓度高, 色度深, 毒性大, 固体悬浮物 SS 浓度高等特点^[1-8]。

目前, 制药工业废水常用的处理方法大多为: 物化法、生物法、物化法—生物法联用等处理工艺。本文在分析各种处理方法的基础上, 提出以后亟待研究的方向和思路。

1 物化处理技术

物化处理不仅可作为制药工业废水的单独处理工序, 而且还可作为生物处理工序的预处理或后处理工序。在制药工业废水处理中采用的物化法有很多, 因不同的制药废水而不同。

1.1 凝聚法

对于像小诺霉素等抗生素废水^[9], 从发酵工艺过程知道, COD 和 TOC 的绝大部分是培养基成分, 即葡萄糖、淀粉、蛋白胨、鱼粉、玉米粉等, 这些成分主要以胶体形态存在, 加入硫酸亚铁等凝聚剂后, 可以使体系中存在三价铁, 从而改善絮体的沉降性能, 激活废水中降解微生物某些酶的活性。投加的硫酸亚铁还可与废水中的有机硫化物, 特别是硫醇类化

合物形成铁盐沉淀而去除。此外, 硫酸亚铁对脂、硝基化合物具有强大的、有选择的还原作用, 可以将其还原成可生化的氨基化合物, 这样, 也可削减硝基化合物对微生物的抑制作用, 同时, 去除一部分的 COD, 提高生化效果, 对于氟洛芬废水^[10], 投加氯化钙亦可以有效地除氟。通常, 采用凝聚处理后, 不仅有效地降低污染物的浓度, 而且废水的生物降解性能也能得到改善。

在制药工业废水处理中常用的凝聚剂有: 聚合硫酸铁、氯化铁、亚铁盐、聚合氯化硫酸铝、聚合氯化铝、聚合氯化硫酸铝铁、聚丙烯酰胺(PAM)等。见表 1。

表 1 制药工业废水处理常用的凝聚剂

制药工业废水	常用凝聚剂
吡喹酮	聚铝 ^[1]
红霉素	锌盐 ^[2]
洁霉素	氯化铁、硫酸亚铁、聚合硫酸铁 ^[13]
土霉素	聚合硫酸铁 ^[4]
麦迪霉素	聚合硫酸铁 ^[4]
维生素 B ₆	聚合硫酸铁 ^[5]
利福平	聚合硫酸铁、阳离子型聚丙烯酰胺 ^[15]
叶酸	锆剂 ^[7]

1.2 气浮法

气浮法通常包括充气气浮、溶气气浮、化学气浮和电解气浮等多种形式。化学气浮适用于悬浮物含

量较高的废水的预处理,具有投资少、能耗低、工艺简单、维修方便等优点,但不能有效地去除废水中可溶性有机物,尚需用其他方法作进一步的处理。在制药工业废水处理中,如庆大霉素^[16]、土霉素、麦迪霉素^[17]等废水的处理,常采用化学气浮法。庆大霉素废水经化学气浮处理后,COD去除率可达50%以上,固体悬浮物去除率可达70%以上。

1.3 吸附法

吸附法是指利用多孔性固体吸附废水中某种或几种污染物,以回收或去除污染物,从而使废水得到净化的方法。常用的吸附剂有粉末活性炭、煤质柱状活性炭、人造浮石、腐殖酸(钠)、高岭土、漂白土、硅藻土、皂土等。在制药工业废水处理中,常用煤灰或活性炭吸附预处理生产中成药^[18]、米菲司酮^[19]、双氯灭痛^[20]、洁霉素^[13]、扑热息痛^[21]、维生素B₆^[5]等产生的废水。

1.4 反渗透

反渗透法是利用半透膜将浓、稀溶液隔开,以压力差作为推动力,施加超过溶液渗透压的压力,使其改变自然渗透方向,将浓溶液中的水压渗到稀溶液一侧,可实现废水浓缩和净化目的。如采用反渗透法处理新诺明生产废水^[22]。

1.5 吹脱法

当氨氮浓度大大超过微生物允许的浓度时,在采用生物处理过程中,微生物受到NH₃-N的抑制作用,难以取得良好的处理效果。赶氨脱氮往往是废水处理效果好坏的关键。在制药工业废水处理中,常用吹脱法来降低氨氮含量,如乙胺碘呋酮废水的赶氨脱氮^[23]。

2 生物处理技术

2.1 普通活性污泥法

目前,国内外处理抗生素废水比较成熟的方法是活性污泥法。由于加强了预处理,改进了曝气方法,使装置运行稳定,到20世纪70年代已成为一些工业发达国家的制药厂普遍采用的方法。

普通活性污泥法的缺点是废水需要大量稀释,运行中泡沫多,易发生污泥膨胀,剩余污泥量大,去除率不高,常必须采用二级或多级处理。因此,近年来,改进曝气方法和微生物固定技术以提高废水的处理效果,已成为活性污泥法研究和发展的主要内容^[24]。

2.2 深井曝气法

深井曝气法是活性污泥法的一种,是高速活性污泥系统。和普通活性污泥法相比,深井曝气法具

有以下优点:(1)氧利用率高,可达60%~90%,深井中溶解氧一般可达30~40 mg/L,充氧能力可达3 kg/(h·m³),相当于普通曝气的10倍;(2)污泥负荷速率高,比普通活性污泥法高2.5~4倍;(3)占地面积小、投资少、运转费用低、效率高,COD的平均去除率可达到70%以上;(4)耐水力和有机负荷冲击(COD_{Cr}质量浓度可高达40 000 mg/L);(5)不存在污泥膨胀问题;(6)保温效果好,可保证北方地区冬天处理废水获得较好的效果。

我国于1980年在东北制药总厂建成了国内第一座深井曝气装置,随后,苏州第一、第二、第四制药厂,上海第三制药厂,湖南制药厂等相继建成深井曝气废水处理装置。随着我国工业废水排放标准的提高,采用现行的深井曝气装置来处理制药废水,已不能达到排放标准。因此,切实可行的办法是在其后增加其他的处理装置。通常将深井曝气和其他生物处理方法,如生物接触氧化法等联用,处理高浓度的制药废水,如林可霉素生产废水^[25]。

2.3 序批式间歇活性污泥法(SBR法)

SBR法具有均化水质、无需污泥回流、耐冲击、污泥活性高、结构简单、操作灵活、占地少、投资省、运行稳定、基质去除率高于普通的活性污泥法等优点,比较适合于处理间歇排放、水量水质波动大的废水。SBR生物处理技术已经广泛用于城市污水、食品工业废水等的处理中。目前,SBR法也已成功应用于许多制药工业生产废水的处理中,如中药材^[26]、四环素^[4]、庆大霉素^[27]等生产废水的处理。

但SBR法具有污泥沉降、泥水分离时间较长的缺点。在处理高浓度废水时,要求维持较高的污泥浓度,同时,还易发生高粘性膨胀。因此,常考虑在活性污泥系统中投加粉末活性炭(PAC),这样可以减少曝气池泡沫,改善污泥沉降性能,及液-固分离性能、污泥脱水性能等,获得较高的去除率^[9, 28]。

厌氧-好氧间歇式活性污泥法,即在进水、反应阶段充氧;在沉降、排水、空载排泥时不充氧,此时为厌氧消化。用此工艺处理青霉素废水时,可克服常规好氧法处理青霉素能耗高、稀释水量大,以及厌氧法预处理要求高、运行费用高的缺点。另外,厌氧-好氧间歇式活性污泥法在厌氧反应阶段,不出现反应时间长、控制条件要求高的甲烷发酵阶段^[3]。

2.4 生物流化床法

生物流化床将普通的活性污泥法和生物滤池法两者的优点融为一体,因而具有容积负荷高、反应速度快、占地面积小等优点。

生物流化床常以工厂烟道灰等做载体, 内设挡板, 使流化床分为曝气区、回流区、沉淀区。COD 去除率可达 80% 以上, BOD 去除率可达 95% 以上。对麦迪霉素^[29]、四环素、卡那霉素^[30]等制药工业废水, 可采用生物流化床技术进行处理。

2.5 上流式厌氧污泥床(UASB)法

UASB 反应器具有厌氧消化效率高、结构简单等优点。UASB 能否高效和稳定运行的关键在于反应器内能否形成微生物适宜、产甲烷活性高、沉降性能良好的颗粒污泥。但在采用 UASB 法处理庆大霉素^[27]、金霉素^[31]、卡那霉素^[32]、洁霉素^[13]、链霉素^[33]、谷氨酸^[34]、维生素 B₁₂^[35]等制药生产废水时, 通常要求 SS 含量不能过高, 以保证 COD 去除率可在 85%~90% 以上。二级串联 UASB 的 COD 去除率可达到 90% 以上。

UASB 运行时, 对管理技术要求较高, 且启动驯化困难。在启动初期, 通常要采用间歇脉冲进料的方式搅拌, 以弥补因产气不足而不能达到菌体与基质的充分接触。

改进反应器结构对提高厌氧消化和处理效率有较大的影响, 如在其悬浮层下部预设排气系统, 设置一个集气罩, 可排除在床部产生的大部分气体, 减少污泥流失。

采用加压上流式厌氧污泥床(PUASB)处理废水时, 氧浓度显著升高, 加快了基质降解速率, 提高了处理效果, 如采用 PUASB 处理米菲司酮、倍他美松等制药废水^[36]。

上流式厌氧污泥床过滤器(UASB+AF)是近年来发展起来的一种新型复合式厌氧反应器, 它结合了 UASB 和厌氧滤池(AF)的优点, 使反应器的性能有了改善。该复合反应器在启动运行期间, 可有效地截留污泥, 加速污泥颗粒化, 对容积负荷、温度、pH 值的波动有较好的承受能力。该复合式厌氧反应器已用来处理维生素 C、双黄连粉针剂等制药废水^[37, 38]。

2.6 生物接触氧化法

生物接触氧化法兼有活性污泥法和生物膜法的特点, 具有较高的处理负荷, 能够处理容易引起污泥膨胀的有机废水。

在制药工业生产废水的处理中, 常常直接采用生物接触氧化法, 或用厌氧消化、酸化作为预处理工序, 来处理土霉素、麦迪霉素^[1, 29]、维生素 C^[8]、洁霉素^[39]、四环素^[39]、甾体类激素^[40]、中药^[41]等制药生产废水。但在实际运行中, 要保持生物接触氧化对

废水中 COD 良好的去除率, 通常要求进水的 COD_{Cr} 不大于 1 000 mg/L。

2.7 优势菌株生物膜法

投加优势菌种挂膜可在高进水 COD_{Cr} 浓度(可超过 3 500 mg/L)和高负荷下运转, 其 COD 去除率可高达 88%~90%, 且挂膜时间短^[42]。在制药工业废水处理中, 已采用投菌生物接触氧化法来处理洁霉素生产废水^[43]。

2.8 光合细菌处理法(PSB)^[44]

光合细菌(Photosynthesis Bacteria, 简称 PSB)中红假单胞菌属的许多菌株能以小分子有机物作为供氢体和碳源, 具有分解和去除有机物的能力。因此, 光合细菌处理法可用来处理某些食品加工、化工和发酵等工业的废水。

PSB 可在好氧、微好氧和厌氧条件下代谢有机物, 采用厌氧酸化预处理常可以提高 PSB 的处理效果。PSB 处理工艺具有如下优点: (1) 可承受较高的有机负荷, 高浓度有机废水经稀释后即可处理, 而且负荷越高, 处理效果越好; (2) 不产生沼气, 受温度影响小; (3) 系统有除氮能力, 可处理含有高盐分、油脂和环状化合物的废水; (4) 设备占地小, 动力消耗少, 投资低, 可作为其他低负荷处理工序的前处理; (5) 处理过程中产生的菌体回收后可加以综合利用, 如作为饲料和肥料, 不会产生二次污染。对于某些非抗生素类生化药物, 可考虑采用光合细菌处理法与其他物化或生物处理技术相结合的工艺进行废水处理。

2.9 固定化微生物法

固定化微生物法是将微生物固定在载体上或定位于限定的空间区域内, 并保持其生物功能, 反复利用。固定化微生物处理工业废水具有以下特点: (1) 可提供高浓度的生物量和高度的生物活性, 因此处理能力提高, 且稳定性好; (2) 微生物由于固定化而避免了在废水处理过程中因摩擦等物理作用的消耗, 且不被废水中的原生动物所吞噬, 因而可保持高密度的微生物量, 另外, 由于固定化, 有效地避免了污泥上浮问题, 有效地防止了菌体流失; (3) 固定化改善了细胞的透性, 污泥产生量少, 减少了二沉池的负荷; (4) 通过生物育种, 能处理常规方法难以降解的微生物; (5) 气-液-固三相分离效果好; (6) 可处理污染成分多的废水; (7) 占地小, 可连续使用, 操作方便, 便于管理和操作; (8) 提高了废水处理的深度和效率, 减少投资, 节省能源, 降低处理成本。固定化微生物技术已用来处理四环素^[45]、阿苯哒唑、扑

尔敏、布洛芬^[46]等制药生产废水,另外,亦可在 SBR 中采用固定化微生物技术来处理氨氮含量高的制药废水。

2.10 生物活性炭法^[7,13,28,47]

生物活性炭技术既能发挥活性炭的物理吸附作用,又能充分利用附着微生物对污染物的降解作用,可大大提高 COD 的去除率,废水的氨氮、色度的去除率也较常规方法要高。另外,粉末活性炭对降解微生物有毒的抑制物的吸附也缓和了抑制物对微生物的影响。

在添加活性炭后,停止进水,进行闷曝,使氧化池尚存的部分药物大分子成为微生物生存的主要营养物质,促使微生物分泌出活性炭再生所需的胞外酶。微生物分泌胞外酶的主要作用是将大分子有机物分解成小分子有机物质,从而进入细胞体内。所以,活性炭起着富集大分子物质的作用,而胞外酶则使活性炭再生,微生物与活性炭之间、吸附与生物降解之间存在的这种协同作用,对提高废水的 COD、NH₃-N、色度的去除率起着重要的作用。因此,生物活性炭技术已广泛应用于制药工业废水的治理中。

3 结论与展望

由前文所述可以看出,由于制药工业废水的多样化,因此采取的处理方法亦是千差万别的。在预处理—厌氧—好氧—后处理的工序中,可根据废水的水量水质等特征,采取相应的组合工艺路线。

通过以上对制药工业废水处理现状的论述,不难看出,今后应从以下几个方面进行研究和实践:

(1) 实行以废治废。如以氯霉素的副产物邻硝基乙苯为燃料,采用焚烧法,处理维生素 C 的古龙酸母液,实现以废治废,节约能源之目的。

(2) 资源回收与再利用。如:“安乃近”甲基化工段排放的废水主要含硫酸铵,因此可以利用制药厂“安乃近”废水生产农用测土配方肥。

(3) 推行绿色化生产工艺和清洁化生产管理,力求实施生产工艺的闭路循环。对药物生产的各个工序进行清洁化生产与管理,消除“漏、滴、跑、冒”等现象;同时,也应考虑物流的闭路循环,努力实现“零”排放。

(4) 采取清污分流,避免重复污染。

(5) 开发新型废水处理技术、高效低能耗的废水处理装置,特别是复合反应器的研究开发。

[参考文献]

- [1] 潘志祥. 土霉素麦迪霉素废液的生化处理[J]. 化工环保, 1990, 10(2): 76~ 80
- [2] 潘绍先, 罗毅, 牛颜. 化工厂、制药厂、焦化厂废水中有机污染组成分析[J]. 上海环境科学, 1993, 12(6): 25~ 27.
- [3] 张林海. 厌氧—好氧 SBR 法处理青霉素生产废水[C]. 第三届全国污水处理技术交流会, 北京, 1997: 231~ 238.
- [4] 张统, 张志仁. SBR 处理四环素废水试验研究[C]. 第三届全国污水处理技术交流会, 北京, 1997: 189~ 192.
- [5] 倪梦贤, 董宏理. 噁唑法维生素 B₆ 生产废水处理的试验研究[J]. 环境科学与技术, 1991, (1): 18~ 20
- [6] 刘晓涛. 双氯灭痛生产废水处理工艺设计[J]. 污染防治技术, 1999, 12(2): 121~ 122.
- [7] 伊颖, 等. 叶酸废水治理研究[C]. 上海市环境科学学会第 8 届年会论文摘要集, 上海, 1997: 308~ 309.
- [8] 刘新亭, 杨秀强. 酸化—生物接触氧化法处理维生素 C 废水[J]. 上海环境科学, 1990, 9(6): 12~ 14.
- [9] 陈一申, 等. 制药发酵废水处理[C]. 上海市环境科学学会第 8 届年会论文摘要集, 上海, 1997: 301~ 302
- [10] 陈一申, 等. 氟洛芬合成废水的处理[C]. 上海市环境科学学会第 8 届年会论文摘要集, 上海, 1997: 299~ 300.
- [11] 沈志松, 黄健, 孙立. 凝聚—膜分离集成技术处理吡啶酮废水[J]. 污染防治技术, 1999, 12(2): 101~ 103.
- [12] 张述忠, 等. 红霉素发酵液新型凝聚剂的研究[J]. 化工环保, 1990, 10(2): 66~ 69
- [13] 罗启芳, 等. 高浓度青霉素生产废水处理技术研究[J]. 重庆环境科学, 1990, 12(6): 17~ 20.
- [14] 郭耀基. 土霉素麦迪霉素废水处理研究[J]. 化工环保, 1990, 10(4): 199~ 202.
- [15] 迟春娟, 付月彪, 张嗣炯. 利福平废水的絮凝和生化处理研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2000, (2): 17~ 19.
- [16] 贾学庆, 郑奋筹. 化学气浮法处理庆大霉素废液研究[J]. 化工环保, 1986, 6(1): 17~ 19
- [17] 潘志祥. 土霉素、麦迪霉素废水的化学气浮处理[J]. 工业水处理, 1991, 11(1): 24~ 26.
- [18] 夏文林, 李武. 煤灰吸附—两级好氧生物工艺处理制药废水[J]. 环境工程, 1999, 17(2): 13~ 15.
- [19] 张一先, 张俊强, 张哲如. 米菲司酮废水处理的试验研究[J]. 上海环境科学, 1994, 13(2): 38~ 40.
- [20] 郝存江, 等. 沉淀—吸附法处理双氯灭痛废水[J]. 环境污染与防治, 2000, 22(3): 24~ 26
- [21] 李凤仙, 李善评, 张成禄. 药厂扑热息痛废水治理的研究[J]. 环境科学与技术, 1996, (1): 31~ 34.
- [22] 邵刚. 反渗透法处理新诺明废水[J]. 环境工程, 1992, 10(1): 5~ 8.
- [23] 胡允良, 等. 制药废水的氨氮吹脱试验[J]. 工业水处理, 1999, 19(4): 19~ 21.
- [24] 张明友, 唐国良, 高骊影. 土霉素废水处理工艺探索[J]. 上海环境科学, 1988, 7(6): 18~ 20.
- [25] 谭智, 汪大翠, 张伟烈. 深井曝气工艺处理高浓度制药废水[J]. 环境污染与防治, 1993, 15(6): 6~ 8.

电解法在废水处理中的应用及研究进展

张乐华, 朱又春, 李勇

(广东工业大学环境工程系, 广东 广州 510090)

[摘要] 综合分析了近年来电解法在废水处理中的应用及研究进展情况。重点阐明电解法处理难生物降解废水、电解法应用于消毒杀菌和电解法与其他方法联合处理方面, 并同时提出了电解法废水处理技术目前存在的问题及今后发展的方向。

[关键词] 电解; 废水处理; 电极

[中图分类号] X703 [文献标识码] A [文章编号] 1005-829X(2001)10-0005-04

Application of electrolysis to wastewater treatment and its research progress

ZHANG Le-hua, ZHU You-chun, LI Yong

(Department of Environment Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract: The application of electrolysis to wastewater treatment around the world in recent years are reviewed. The progress in aspects of the refractory wastewater, the disinfection, and the combination treatment with other methods is emphatically expounded. At the same time, the existing problem of wastewater treatment technology by electrolysis and the research direction of this field are discussed. The technology by electrolysis and the research direction of this field are also discussed and proposed.

Key words: electrolysis; wastewater treatment; electrode

废水的电解法处理, 由于在一台设备中可能同时完成电凝聚、电气浮、电解氧化和还原等多种净化

- [26] 韩相奎, 周春生, 姚秀芹. SBR法处理中药废水的试验研究[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 65~67.
- [27] 郭卫兵, 王世宏, 周青叶. 庆大霉素废水治理工艺[J]. 污染防治技术, 2000, 13(2): 117~118.
- [28] 陈郭建, 魏兴义. PAC-SBR法处理高浓度有机废水[J]. 环境工程, 1995, 13(5): 3~6.
- [29] 俞汝华, 张林生. 麦迪霉素废水的两级好氧处理[J]. 化工环保, 1993, 13(6): 325~327.
- [30] 邵林, 顾其祥, 沈霖垦. 流化床法处理抗生素制药废水[J]. 上海环境科学, 1987, 6(9): 61~64.
- [31] 周平, 等. 庆大霉素和金霉素废水的处理试验研究[J]. 环境科学, 1995, 16(5): 45~47.
- [32] 郝晓刚, 李春. 接种颗粒污泥UASB反应器处理味精-卡那霉素混合废水[J]. 工业水处理, 1999, 19(2): 18~19.
- [33] 王勇军, 陆正禹, 任立力. 单相中温UASB工艺处理链霉素生产废水[J]. 给水排水, 1997, 23(4): 28~30.
- [34] 于玉根, 伦世仪. 二级串联UASB反应器处理酵母废水研究[J]. 环境污染与防治, 1992, 14(4): 2~4.
- [35] 杨景亮, 等. UASB反应器处理维生素B₁₂淀粉混合废水的研究[J]. 环境科学, 1996, 17(6): 63~65.
- [36] 修光利, 等. PUASB法处理制药废水初探[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 47~50.
- [37] 杨景亮, 罗人明, 黄群贤. UASB+AF处理维生素C废水的研究[J]. 环境科学, 1994, 15(6): 54~57.
- [38] 白晓慧, 等. 复合式厌氧反应器处理中药废水[J]. 给水排水, 1999, 25(4): 39~40.
- [39] 高良进, 叶爱萍, 程岩法. 缺氧-好氧生物法处理抗生素废水的试验研究[J]. 环境污染与防治, 1988, 10(5): 18~20.
- [40] 吴斌, 等. 化学制药废水处理[J]. 环境污染与防治, 1989, 11(6): 24~27.
- [41] 李泓, 等. 生物接触氧化-气浮工艺处理中成药生产废水[J]. 环境污染与防治, 1993, 15(5): 21~27.
- [42] 张仲燕, 杨明凤, 陈玉莉. 优势菌株生物膜法处理卡那霉素废水[J]. 上海环境科学, 1997, 16(8): 34~35.
- [43] 罗国维, 杨丹青, 林世光. 投菌生物接触氧化法处理洁霉素废水的机理研究[J]. 环境科学, 1994, 15(6): 20~22.
- [44] 方明成, 吴珊, 李桂枝. 生化制药废水处理试验研究[C]. 第三届全国污水处理技术交流会, 北京, 1997: 208~211.
- [45] 王蕾, 俞毓馨. 固定化细胞厌氧-好氧工艺处理四环素结晶母液的试验研究[J]. 环境科学, 1995, 16(1): 29~31.
- [46] 杨意东, 赵丽君. SBR法处理制药废水的试验研究[J]. 给水排水, 2000, 26(1): 43~48.
- [47] 嵇雅颖, 等. 生物碳/生物铁系统处理制药废水[C]. 上海市环境科学学会第8届年会论文摘要集, 上海, 1997: 330~332.
- [作者简介] 陆杰(1970-), 1997年毕业于天津大学化工学院, 获化学工程博士学位, 副教授。
- [收稿日期] 2000-11-13