

霉菌菌丝球 WY 对酸性棕染料 PR 的脱色研究^{*}

王国惠

(中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 研究了霉菌菌丝球 WY 对酸性棕染料 PR 的脱色性能及对实际印染废水的脱色作用。WY 的脱色温度范围较宽, 在 25 ~ 50 ℃ 范围内, 其脱色率均在 92% 以上。菌球 WY 的最佳脱色温度为 45℃, 在此温度时, PR 的脱色率达 97.92%。菌球 WY 的最佳脱色 pH 值为 5.0、最佳摇速为 90 r/min, PR 的相应脱色率分别达 93.73% 和 92.45%。染料浓度在 100 ~ 300mg/L 范围内, WY 对 PR 具有明显的去除活性, 300 mg/L 时, 其去除率达 88.71%。菌球 WY 对染料 PR 的脱色需要一定的营养。WY 对 PR 脱色所需碳源和氮源范围都较宽。废牛奶可作为 WY 的良好营养, 在省去碳源和氮源的培养基中按 2% 和 10% 加入废牛奶制备的菌丝球, 对 PR 的脱色率分别达 75.94% 和 98.06%。WY 对实际印染废水有较好的脱色作用, 脱色率为 86.24%。甲醇对 PR 具有很好的解吸效果, 其解吸率达 97.17%。解吸后的菌球对染料仍有很好的脱色作用, 其脱色率达 93.78%, 菌球可重复利用。

关键词: 菌丝球; 印染废水; 染料; 脱色

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2009) 04-0107-06

Decoloring Effect of Acid Brown Dye PR by Mold Pellet WY

WANG Guohui

(School of Environmental Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275)

Abstract: Mold pellet WY was studied on its decoloring characteristics of acid brown dye PR and effect of real printing and dyeing wastewater. WY had a wider decoloring temperature range. In the range of 25 ~ 50 ℃, the decoloring rate of PR was over 92%. The optimum decoloring temperature of pellet WY was 45 ℃, where the decoloring rate of PR reached 97.92%. The optimum pH of pellet WY was 5.0 and the optimum shaking speed was 90r/min and the corresponding decoloring rate of PR was 93.73% and 92.45% respectively. In the range of dye concentration of 100 ~ 300 mg/L, WY had high removal activity of dye PR and the removal rate reached 88.71%. Pellet WY needed some nutrition for the decoloration of PR. WY had a wider range of carbon sources and nitrogen sources for the decoloration of PR. Waste milk was used as a nice nutrition for WY. The decoloring rate of milk-made pellet WY for PR was 75.94% and 98.06% respectively when waste milk was added at 2% and 10% to the culture without carbon and nitrogen sources. Pellet WY had better decoloring activity for real printing and dyeing wastewater, with decoloring rate 86.24%. Methanol had good desorption effect with desorption rate 97.17%. After desorption, the pellet still had good decoloring effect and the decoloring rate was 93.78%. Pellet WY could be reused.

Key words: pellets; printing and dyeing wastewater; dye; decoloration

^{*} 收稿日期: 2008-07-07

基金项目: 国家科技攻关基金资助项目 (2003BA872C), 中山大学重点基金后备启动项目 (2006-38000-1132-196);
中山大学实验室开放基金资助项目 (KF200708)

作者简介: 王国惠 (1962 年生), 女, 博士, 副教授; E-mail: wgh126@126.com

随着染料和印染工业的迅猛发展, 染料的数量和种类不断增加。在染料生产和使用过程中, 大约有 10% ~ 20% 的染料随废水排入环境^[1]。由于染料分子结构复杂且极为稳定, 具有抗酸、抗碱、抗光等特性, 给整个水生生态系统带来了严重破坏。近年来, 各种高级氧化技术如臭氧氧化、光催化氧化和 Fenton 试剂氧化等虽能有效处理该类废水, 但因成本极高而在应用上受到了限制^[2]。对染料废水的处理大多采用生化处理法^[3-6], 但染料经微生物降解后仍会产生有毒的中间产物, 虽然色度可以降低, 但往往不能解决根本性的污染问题, 甚至有时还会加重污染。因此, 人们开始研究利用生物吸附法处理此类废水。生物吸附法具有生物材料来源广泛、处理效率高、操作简单、不会产生有毒代谢产物等特点, 因此, 该技术已受到国内外的普遍关注^[7-8]。菌丝球极易沉降, 有一定的机械强度, 无需任何载体, 可直接应用于固定床或流化床等反应器, 通过吸附处理染料废水、含重金属废水, 同时可贵重金属回收及染料^[9-11]。

目前相关报道较少, 特别是菌丝球的营养条件及廉价培养方面的研究鲜见报道。本文研究了染料脱色率很高的霉菌菌丝球 WY 的培养条件、降低生产成本的廉价培养及 WY 对实际印染废水的脱色活性, 旨在为进一步研究和应用提供科学依据。

1 材料与仪器

1.1 材料

(1) 菌种为本实验室分离保存的菌种。

(2) 酸性棕染料 PR 由某染料化工有限公司生产, 其最大吸收波长为 462 nm。

(3) 培养基。菌种保存培养基: PDA; 菌丝球制备培养基: KH_2PO_4 1.0 g, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.0 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, NaCl 0.5 g, 酵母膏 1.0 g, 葡萄糖 15 g, H_2O 1 L, 自然 pH; 染料培养基: KH_2PO_4 1.0 g, NH_4NO_3 0.75 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g, NaCl 0.5 g, 葡萄糖 10 g, PR 染料 200 mg, H_2O 1.0 L, pH 5.5 ~ 6.0。

1.2 主要仪器

酸度计 (瑞士); 水浴锅 (德国); ALP 压力蒸汽灭菌器 (日本); 超净工作台 (上海); NSKY 型恒温摇床 (上海); 3K30 型高速离心机 (德国); 752 型紫外可见分光光度计 (德国)。

2 方法

2.1 菌丝球的制备

先将斜面菌种活化, 然后接种到内装 150 mL 菌丝球制备培养基的 500 mL 锥形瓶中, 150 r/min, 30 °C 摇床培养 48 ~ 60 h, 使其形成菌丝球或称菌球 (图 1)。过滤收集菌球, 并将其悬浮在灭菌生理盐水中, 冰箱保存备用。

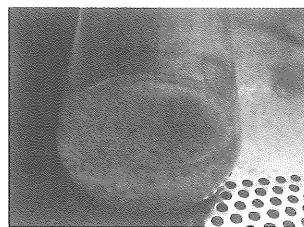


图 1 制备的菌球 WY

Fig. 1 Made pellet WY

2.2 脱色实验

在装有 20 mL 染料培养基的 50 mL 小锥形瓶中, 各接入 $\rho = 1\%$ 的接种量接种菌球 WY, 150 r/min、30 °C 摇床脱色 2 d 后, 取一定量的培养液, 以 2 000 r/min 离心 10 min, 吸取一定量的上清液, 测其光密度 (OD), 接种染料溶液的光密度 (OD_1), 不接种染料溶液的光密度 (OD_0)。脱色率按下列公式计算:

$$\text{脱色率} = \frac{\text{OD}_0 - \text{OD}_1}{\text{OD}_0} \times 100\%$$

3 结果与讨论

菌球 WY 对酸性棕 PR 的脱色效果 (图 2)。

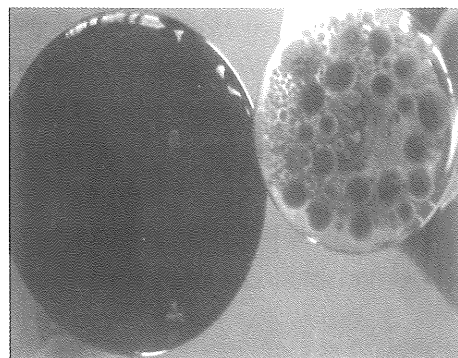


图 2 WY 对酸性棕 PR 的脱色效果

Fig. 2 Decoloring effect of acid brown PR by WY

3.1 菌球 WY 脱色性能

3.1.1 温度对脱色效果的影响。将菌球 WY 按 1% 的接种量接种到 PR 染料培养基中, 摇速 150 r/min, 自然 pH, 振荡培养 2~3 d, 考察温度对菌球 WY 脱色效果的影响 (图 3)。

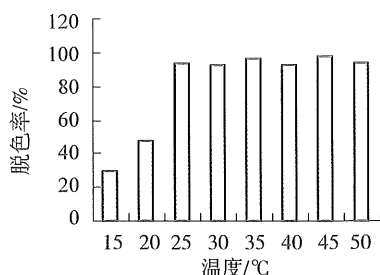


图3 温度对 WY 脱色效果的影响

Fig. 3 Influence of temperature on decoloring effect by WY

由图 3 可见, 在一定温度范围内, 脱色率随温度的升高而提高。15 °C 时, PR 的脱色率仅为 30.23%; 20 °C 时脱色率上升为 47.01%; 25 °C 时脱色率达 93.31%。WY 的脱色温度范围较宽, 在 25~50 °C 范围内, 脱色效果明显, PR 的脱色率均在 92% 以上。菌球 WY 对 PR 的最佳脱色温度为 45 °C, 脱色率达 97.92%。超过 45 °C 时脱色率略有下降, 50 °C 时的脱色率为 94.00%。

印染废水水温高^[12] (40~45 °C), 处理时通常需要设调节池进行降温预处理。利用菌球 WY 无须降温, 可直接进行脱色, 成本低, 具有一定的实际意义。

3.1.2 pH 值对脱色效果的影响。将菌球 WY 按 1% 的接种量接种到染料培养基中, 30 °C, 摇速 150 r/min, 振荡培养 2~3 d, 考察 pH 值对其脱色效果的影响 (图 4)。

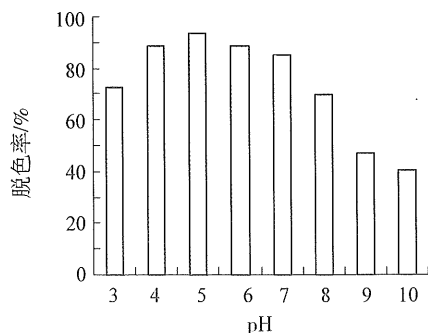


图4 pH 对 WY 脱色效果的影响

Fig. 4 Influence of pH on decoloring effect by WY

由图 4 可知, 菌球 WY 在酸性条件下脱色效果

较好。pH4 时脱色率为 88.98%; pH5 时脱色率达 93.73%; pH6 时脱色率有所下降, 为 88.75%; pH7 时脱色率下降为 85.09%; pH8 时脱色率为 69.35%; pH9 时脱色率只有 46.94%。菌球 WY 对 PR 的最佳脱色 pH 值为 5, 其脱色率达 93.73%。

当 pH 高于最适 pH 值时, 随 pH 值的增加脱色率逐渐下降的原因可能与真菌所带电荷有关。真菌的等电点一般在 pH4~6 之间。在高于等电点的溶液中, 真菌带负电荷, 与酸性染料作用时会相互排斥。因此, 减弱了细胞对染料的吸附, 使之去除率下降。

3.1.3 摇速对脱色效果的影响。将菌球 WY 按 1% 的接种量接种到染料培养基中, 自然 pH, 30 °C, 连续振荡培养 2~3 d, 考察摇速对菌球 WY 脱色效果的影响 (图 5)。

由图 5 可知, WY 的最适摇速范围为 90~210 r/min, 脱色率基本保持在 92% 左右。低于 90 r/min 时, 脱色率显著下降。这表明菌球 WY 对染料脱色时需要一定的振荡, 以促使菌球与染料的有效接触, 进而发生吸附与脱色。菌球 WY 的脱色最佳摇速为 90 r/min, 其脱色率为 92.45%。在最适摇速范围内取 90 r/min 也有利于减少动力消耗。

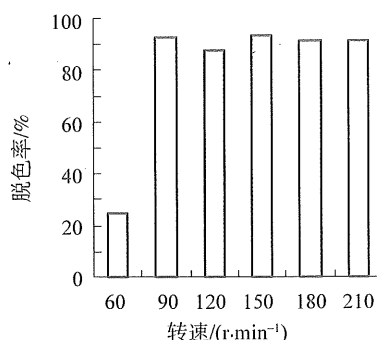


图5 摇速对 WY 脱色效果的影响

Fig. 5 Influence of rotating speed on decoloring effect by WY

3.1.4 染料浓度对脱色效果的影响。在无菌条件下, 将菌球 WY 按 1% 的接种量接种到不同浓度的染料培养基中, 30 °C、90 r/min, 摇床培养 2~3 d, 考察染料浓度对脱色效果的影响。

结果表明, 染料浓度在 100~300 mg/L 范围内, WY 对 PR 具有明显的去除活性。染料浓度为 100 mg/L 时, 去除率达 99.15%; 染料浓度为 150 mg/L 时, 脱色率达 98.03%; 浓度为 200 和 250 mg/L 时, 其脱色率分别为 96.26% 和 96.13%; 300 mg/L 时, 脱色率仍然较高, 达 88.71%。但随

着染料浓度的增加,脱色率开始下降。350 mg/L 时,脱色率为 19.28%;400 mg/L 时,脱色率只有 6.33%。究其原因,可能是在高质量浓度范围,随着染料 PR 初始质量浓度的上升,一方面会导致其生物毒性作用增强;另一方面,菌体的吸附容量逐渐接近饱和,致使其去除率迅速下降。

3.1.5 养分对脱色效果的影响。将菌球 WY 按 1% 的接种量接种到染料培养基中,同时,按相同的接种量将菌球 WY 接种染料浓度为 200 mg/L 的纯水(即无营养物质)中,30℃、90 r/min 的条件下摇床培养 2~3 d,考察养分对菌球 WY 脱色效果的影响(图 6)。

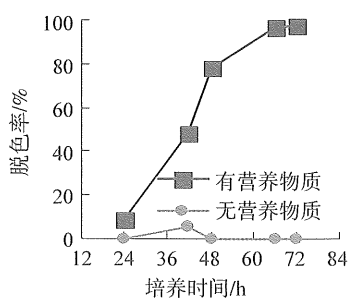


图 6 养分对 WY 脱色效果的影响

Fig. 6 Influence of nutrition on decoloring effect by WY

从图 6 可以看出,在有营养物质的情况下,48 h 时脱色率为 78.52%;66 h 时脱色率上升到 96.48%,WY 对 PR 的脱色率较高。而在纯水条件下,菌球 WY 对 PR 几乎无脱色效果。表明 WY 对染料 PR 的脱色需要一定的营养。同时,实验过程中观察到,随着时间的延长,在营养染料培养基中的菌球会稍有增大,而纯水中的菌球无此变化。这说明菌球在进行染料脱色时亦进行着生命活动。由此推测,菌球 WY 对染料的吸附并非单纯的物理吸附,而是一个与代谢有关的吸附(或吸收)过程。有生命的活细胞与无生命的材料相比更具有重要的环境意义,特别是对于成分复杂的印染废水,活细胞在吸附染料的过程中,不仅能够去掉色度,而且还能将污(废)水中其他有机物作为营养和能源加以利用,从而起到净化污水的作用。

3.1.6 营养物种类对脱色效果的影响。为了解营养物种类对 WY 脱色效果的影响,将菌球 WY 分别接种到染料浓度为 200 mg/L 的无碳源培养基及无氮源培养基中,30℃、90 r/min 摇床培养 2~3 d,测定其脱色率。

结果显示,缺少碳源或缺少氮源时,菌球 WY 对染料的脱色活性都偏低,脱色率均不足 10%。

实验过程中发现,接种到无碳源或无氮源染料培养基中的菌球几乎无增大现象。碳源是构成微生物细胞的碳架物质和微生物生长、繁殖及运动所需的能量,菌球 WY 在碳源供给不足的情况下难以进行正常生命活动,由此导致脱色率降低。而氮源是合成微生物蛋白质包括各种酶的原料,氮源供给不足,使得菌球难以合成所需蛋白质,抑制了菌球生长发育及代谢过程,致使脱色率降低。

3.1.7 不同碳源对脱色效果的影响。将染料培养基中葡萄糖换成其他碳源,配成染料浓度为 200 mg/L 的染料培养基,将菌丝球按 1% 的接种量接种到上述培养基中,30℃、90 r/min,摇床培养 2~3 d,比较不同碳源对脱色作用的影响(图 7)。

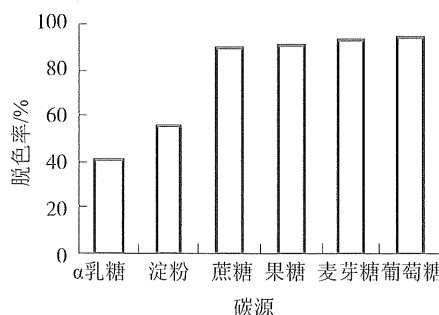


图 7 碳源对脱色效果的影响

Fig. 7 Influence of carbon source on decoloring effect

由图 7 看出,在所研究的 6 种碳源中,除 α 乳糖和淀粉外,其他四种碳源的效果都比较明显。以蔗糖、果糖、麦芽糖和葡萄糖为碳源时所达到的脱色率分别为 90.42%、91.37%、93.66%、94.12%,所能利用的碳源范围较宽,其中葡萄糖的效果尤为显著,葡萄糖是 WY 进行染料脱色的最佳碳源。

3.1.8 不同氮源对脱色效果的影响。将染料培养基中硝酸铵换成其他氮源,其他条件同 3.1.7,比较不同氮源对脱色效果的影响(图 8)。

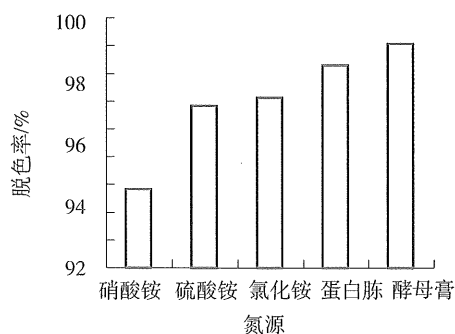


图 8 氮源对脱色效果的影响

Fig. 8 Influence of nitrogen source on decoloring effect

由图8可见, WY以酵母膏、蛋白胨、氯化铵、硫酸胺、硝酸胺为氮源时其脱色率分别达99.08%、98.34%、97.13%、96.88%和93.85%, 该结果表明, 所研究的五种氮源均可作为WY的良好氮源, 说明WY对氮源的选择性较低, 可利用的氮源范围较广。从结果中还可以看出, 与氯化铵、硫酸胺、硝酸胺相比, 以酵母膏和蛋白胨作为氮源效果更好。但酵母膏和蛋白胨较贵, 其价格比其他三种氮源价格的八到十倍。因此, 在考虑脱色效果的同时, 应兼顾经济上的投入, 认为选择氯化铵和硫酸胺更合适。

3.2 以废牛奶作为廉价营养制备菌球, 降低生产成本并考察其脱色效果

将菌球培养基中的碳源、氮源用废牛奶(奶制品厂洗桶水)替代, 按体积比分别为2/100、10/100加入培养基并灭菌后, 在无菌条件下接入孢子, 30℃、150 r/min摇床培养2~3 d, 将培养出的菌球WY按1%的接种量接种到浓度为200 mg/L的染料培养基中, 30℃、90 r/min, 摇床吸附2~3 d, 考察以废牛奶作为廉价营养时WY的脱色效果。结果显示, 用废牛奶培养的菌球脱色效果较好。培养基中废牛奶的浓度为2/100、10/100时, WY的脱色率分别为75.94%和98.06%, 说明废牛奶可以作为菌球的良好营养。此项研究可获得3种功效: 染料废水得到了脱色; 废牛奶得到回收利用, 使之资源化, 同时牛奶废水得到了净化; 可以节约生产成本。

在本实验中, 用废牛奶代替碳源和氮源培养的菌球初步证明有明显的脱色作用, 对此值得进一步探讨, 特别是对废牛奶中的成分及比例有待深入研究。

3.3 WY对实际印染废水的处理效果

一般来说, 实际印染废水中的碳氮浓度较低, 在实际处理过程中需要添加一定比例的碳源和氮源。本研究在印染废水中按5%加入废牛奶, 以废牛奶制备的菌球按1%的接种量接种, 同时以相同体积的实际印染废水作对照, 30℃、90 r/min, 摇床培养2~3 d, 考察WY对印染废水的脱色效果。结果显示, 菌球WY对该废水有较好的脱色作用, 其脱色率达86.24%。

3.4 WY染料的解附及菌球的再利用

将吸附染料后的菌球WY用甲醇、乙醇、丙酮、正丁醇在常温条件下解吸30 min, 菌球与解吸剂的比例为1:8 (w:V), 解析后测定溶液的光密度。解吸率按下式计算:

$$\text{解吸率} = \frac{OD_2}{OD_0 - OD_1} \times 100\%$$

式中, OD_1 为接种染料溶液的光密度; OD_0 为不接种的染料溶液的光密度; OD_2 为解吸染料溶液的光密度。

结果表明, 甲醇对PR的解吸效果最好, 其解吸率达97.17%; 乙醇为63.17%; 丙酮为57.03%; 正丁醇为52.86%。由甲醇解吸后的菌球对染料仍有很好的脱色作用, 在30℃、90 r/min, 脱色2~3 d, 其脱色率达93.78%, 菌球可重复利用。

4 结 论

菌球WY具有良好的脱色性能, 对酸性棕染料PR有较高的脱色活性, 脱色率达97.92%。WY对PR的最佳脱色温度为45℃, pH为5.0, 摇速为90 r/min。染料浓度在100~300 mg/L范围内, WY对PR具有明显的去除活性。WY对PR的脱色需要一定的营养。推测菌球WY对PR的吸附并非单纯的物理吸附, 而是一个与代谢有关的吸附(或吸收)过程。有生命的活细胞与无生命的材料相比更具有重要的环境意义, 特别是对于成分复杂的印染废水, 活细胞在吸附染料的过程中, 不仅能够去掉色度, 而且还能将污(废)水中其他有机物作为营养和能源加以利用, 从而起到净化污水的作用。WY对PR脱色时适应的碳源和氮源范围都较宽。用废牛奶代替碳源和氮源培养的菌球初步证明有较强的脱色作用, 其脱色率达98.06%。实际应用时可采用废牛奶制备菌球, 具有良好的环境意义及经济意义。菌球WY对印染废水有较好的脱色作用, 其脱色率为86.24%, 具有一定的应用价值。解析实验证明, 甲醇是最好的解吸溶剂。解吸后菌球仍有较高的吸附活性, 可重复利用。

参考文献:

- [1] 金晶, 汪永辉, 汪进辉. 印染废水生物活性炭深度处理后的回用研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(4): 12-15.
JIN Jing, WANG Yonghui, WANG Jinhui. Reuse of dyeing wastewater by advanced treatment of biological activated carbon [J]. Pollution Control Technology, 2006, 19(4): 12-15.
- [2] 张书军, 杨敏, 辛宝平, 等. 应用青霉菌 BX1 活体吸附水中活性艳蓝 KN-R [J]. 环境科学, 2004, 25(1): 87-90.
ZHANG Shujun, YANG Min, XIN Baoping, et al. Decolorization of reactive blue KN-R by penicillium oxilicum

- BX1 adsorption [J]. Environmental Science, 2004, 25 (1): 87 - 90.
- [3] KIRBY N, MARCHANT R, McMULLAN G. Decolourisation of synthetic textile dyes by *phlebia tremellosa* [J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, 188 (1): 93 - 96.
- [4] YESILADA O, CING S, ASMA D. Decolourisation of the textile dye Astrazon Red FBL by *Funalia troglia* pellets [J]. Bioresource Technology, 2002, 81 (2): 155 - 157.
- [5] 薛锐, 赵美玲. 印染废水脱色的研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2005, 30(3): 30 - 33.
- XUE Rui, ZHAO Meiling. Research of color removal of printed wastewater [J]. Environmental Science and Management, 2005, 30(3): 30 - 33.
- [6] 辛宝平, 杨敏, 庄源益. 降解菌和吸附菌的联合作用对混合染料的脱色研究 [J]. 环境科学, 2002, 23: 6 - 10.
- XIN Baoping, YANG Min, ZHUANG Yuanyi. Decolorization of mixed dyes by mixed culture of GX2 and BX26 [J]. Environmental Science, 2002, 23: 6 - 10.
- [7] 吴赞敏, 瓮亮, 魏乃福, 等. 印染废水脱色菌的培育及脱色工艺的研究 [J]. 染料与染色, 2005, 42(1): 60 - 62.
- WU Zanmin, WENG Liang, WEI Naifu, et al. A study on sieving decolorizing germ of dyeing wastewater and Decolorizing Technics [J]. Dyestuffs and coloration, 2005, 42 (1): 60 - 62.
- [8] 张世敏, 徐淑霞, 张跃灵, 等. 黄孢原毛平革菌对印染废水脱色条件研究 [J]. 安全与环境学报, 2005, 5(3): 9 - 11.
- ZHANG Shimin, XU Shuxia, ZHANG Yaoling, et al. Decolorization of dyeing wastewater by *Phanerochaete Hrysosporium* [J]. Journal of Safety and Environment, 2005, 5(3): 9 - 11.
- [9] 满悦芝, 庄源益, 辛宝平, 等. 染料生物吸附影响因素与解吸条件研究 [J]. 化工环保, 2003, 23(4): 187 - 190.
- MAN Yuezhi, ZHUANG Yuanyi, XIN Baoping, et al. Study on affecting factors of biological adsorption of dyes and desorption conditions [J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2003, 23(4): 187 - 190.
- [10] 辛宝平, 庄源益, 邹其猛, 等. 青霉菌 GX2 对蒽醌染料的吸附作用 [J]. 环境科学, 2001, 22(1): 14 - 18.
- XIN Baoping, ZHUANG Yuanyi, ZOU Qimeng, et al. Adsorption of anthraquinone dyes by biosorbent GX2 [J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 14 - 18.
- [11] MAHONY T O, GUIBAL E, TOBIN J M. Reactive dye biosorption by *Rhizopus arrhizus* biomass [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 31 (4): 456 - 463.
- [12] 朱宏飞, 李定龙, 朱传为. 印染废水的危害及源头治理举措 [J]. 环境科学与管理, 2007, 32(11): 90 - 94.
- ZHU Hongfei, LI Dinglong, ZHU Chuanwei. Harm of the printing and dyeing wastewater and the emission source treatment [J]. Environmental Science and Management, 2007, 32(11): 90 - 94.

(上接第 106 页)

- [6] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The Extraction of Drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323 - 344.
- [7] BLÖSCHL G, SIVAPALAN M. Scale issues in hydrological modeling: A review. Hydrol Process [J]. 1995, 9: 251 - 290.
- [8] SHAW D, MARTZ L W, PIETRONIRO A. Flow routing in large-scale models using vector addition [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307: 38 - 47.
- [9] ARORA V K, BOER G J. A variable velocity flow routing algorithm for GCMs [J]. Journal of Geophysical research, 1999, 104 (D24): 30965 - 30979.
- [10] ARORA V K, CHIEW F H S, GRAYSON R B. Effect of sub-grid variability of soil moisture and precipitation intensity on surface runoff and streamflow [J]. Journal of Geophysical research, 2001, 106 (D15): 17073 - 17091.
- [11] SHAW D, MARTZ L W, PIETRONIRO A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological models [J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 149 - 168.
- [12] GARBRECHT J, MARTZ L W. TOPAZ: an automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and sub-catchment parameterization [EB/OL]. <http://duke.usask.ca/wmartzl/topaz/overview.html>.
- [13] KOUWEN N. "WATFLOOD: A Micro-Computer based Flood Forecasting System based on Real-Time Weather Radar" [J]. Canadian Water Resources Journal, 1988, 13 (1): 62-77.
- [14] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [15] 杨邦. 集水面积阈值确定及其水文响应研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.