

微生物对蒽醌类染料废水脱色的研究进展

陈瑶 梁红昌 吴晓玉* (江西农业大学生物科学与工程学院, 江西南昌 330045)

摘要 蒽醌类染料已经成为目前比较重要的一种染料,但其成分复杂,有毒性,给废水处理带来一定难度。阐述了对蒽醌类染料具有脱色作用的细菌和真菌的种类与脱色机理,以及这些微生物在废水处理中的应用前景。

关键词 蒽醌染料;脱色降解;细菌;真菌

中图分类号 Q939.99 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)18-07896-04

Research Progress in the Degradation of Anthraquinone Dye by Microorganisms in Wastewater

CHEN Yao et al (College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045)

Abstract Anthraquinone dyes are significant among various coloring matter for textile manufacturing at present but it is difficult to treat wastewater due to both complex component and toxicity of the dyes. In the paper the various species and degradation mechanisms of both bacteria and fungi, which was related to decolorization and degradation of anthraquinone dyes, were reviewed. Their application prospect was discussed as well.

Key words Anthraquinone dye; Degradation; Bacteria; Fungi

蒽醌类染料是一类分子结构中含蒽醌基的染料通称,其品种主要有还原蓝RSN、中性艳蓝GL、酸性蒽醌蓝、活性艳蓝XBR、分散蓝2BLN等。蒽醌类染料因其色泽鲜艳、固色率高、染色牢度好,已成为目前比较重要的一种染料^[1]。然而,蒽醌类染料大多数是芳香族化合物,有稳定的共轭结构,结构复杂又难降解,存在潜在毒性;其产生的废水由于染料的特殊性质不仅有机成分含量高,不易被氧化,生化性差,COD高,BOD/COD低,而且色度高,成分复杂,有毒性,这些都给废水处理带来一定难度^[2]。

传统的蒽醌染料废水处理方法较多。物化法有中和法、混凝沉淀法、气浮法、砂滤法等;化学法有沉淀法、臭氧氧化法、过氧化氢及过氧化物氧化法、氯系氧化法、电解氧化法、还原法、碳化法等;生化法有厌氧降解法和好氧降解法等^[1]。其中,生化法在处理蒽醌类染料废水中有明显的优势,已受

到越来越多的关注。特别是利用高效脱色微生物进行环境污染整治,不仅成本低,且可以减少二次污染的产生,因此被认为是染料脱色和降解最经济有效的方法^[2]。

近几年,国内外大量报道了利用一些微生物,如细菌、真菌和基因工程菌等通过吸附或降解方式对蒽醌类染料废水进行有效处理。笔者针对目前国内外利用微生物处理蒽醌类染料的研究情况作了以下概述。

1 脱色细菌

1.1 种类 近几年,蒽醌类染料逐渐应用于印染工业,有关蒽醌类染料废水脱色细菌的筛选及脱色机理的研究逐渐成为一个热门话题。目前,能对蒽醌类染料废水进行降解脱色的细菌种类很多,主要分布在气单胞菌属、假单胞菌属、芽孢杆菌属和克雷伯氏菌属中(表1),其多为好氧生长,但在厌氧条件下也可以产生相关的脱色酶,表现出脱色活性^[15]。但

表1 对蒽醌染料脱色降解的细菌种类

Table 1 Bacterial species of the decoloration and degradation of anthraquinone dye

脱色细菌 Decolorizing bacteria	属类 Genera type	脱色机制 Decoloration mechanism
红假单胞菌 XL-1 <i>Rhodospirillum rubrum</i> XL-1	红假单胞菌属	降解脱色
黄杆菌 BX26 <i>Xanthomonas</i> sp. BX26	黄杆菌属	降解脱色
脱色希瓦氏菌 SI2 <i>Shewanella decolorationis</i> SI2	希瓦氏菌属	絮凝、降解脱色
希瓦氏菌 B ₃₀₋₃₋₂ <i>Shewanella</i> sp. B ₃₀₋₃₋₂	希瓦氏菌属	降解脱色
希瓦氏菌 D ₄₋₂₋₁ <i>Shewanella</i> sp. D ₄₋₂₋₁	希瓦氏菌属	降解脱色
希瓦氏菌 B ₃₅₋₄₋₁ <i>Shewanella</i> sp. B ₃₅₋₄₋₁	希瓦氏菌属	降解脱色
产脂固氮螺菌 <i>Azospirillum lipiferum</i>	固氮螺菌属	降解脱色
嗜水气单胞菌 DN322 <i>Aeromonas hydrophila</i> DN322	气单胞菌属	吸附、降解脱色
嗜水气单胞菌 LA15-1 <i>Aeromonas hydrophila</i> LA15-1	气单胞菌属	降解脱色
枯草杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	芽孢杆菌属	降解脱色
戈氏芽孢杆菌 <i>Bacillus gordonae</i>	芽孢杆菌属	吸附、降解脱色
恶臭假单胞菌 <i>Pseudomonas putida</i>	假单胞菌属	吸附、降解脱色
假单胞菌 W ₀₈₋₁ <i>Pseudomonas</i> W ₀₈₋₁	假单胞菌属	降解脱色
假单胞菌 W ₀₃₋₃ <i>Pseudomonas</i> W ₀₃₋₃	假单胞菌属	降解脱色
苍白杆菌 M ₄ <i>Ochrobactrum</i> sp. M ₄	苍白杆菌属	降解脱色
苍白杆菌 20-1 <i>Ochrobactrum</i> sp. 20-1	苍白杆菌属	降解脱色
克雷伯氏菌 M ₁₁₂ <i>Klebsiella</i> M ₁₁₂	克雷伯氏菌属	降解脱色
克雷伯氏菌 C _{K1} <i>Klebsiella</i> C _{K1}	克雷伯氏菌属	降解脱色
沙门氏菌 C ₂₃ <i>Salmonella</i> C ₂₃	沙门氏菌属	降解脱色

注:表中资料参照文献[3-10]。

Note: Information in the table is accorded to references [3-10].

基金项目 国家自然科学基金(30360050);江西省教育厅科技项目(赣教技字[2005]100号)资助。

作者简介 陈瑶(1964-),女,江西南康人,硕士,实验师,从事生物工程研究。* 通讯作者, E-mail: wuxiaoyu58@yahoo.com.cn。

收稿日期 2008-01-25

其降解产物是芳香胺类化合物,属致癌物质,且不能在厌氧条件下继续被降解,即不能彻底降解实现染料的无机化。由于多种混合的微生物之间代谢互补或共代谢作用可以对染料分子高度降解和矿化,因此很多生物脱色反应器都是利用混合菌群的共同作用。许玫英等利用分子生物学手段分析

印染废水脱色处理系统中的菌群关系,发现具有广谱脱色性能的细菌在系统进化树上基本聚为1群,分属于希瓦氏菌属和气单胞菌属^[6]。

1.2 细菌脱色机制 细菌对蒽醌类染料的脱色机制包括:降解脱色和吸附脱色。吸附脱色类似于物理吸附过程,微生物细胞表面的各种活性基团具有吸附基团功能,其细胞的各种组分均对染料有吸附能力,它们的性质决定所能吸附染料的种类和性质^[12]。由于染料被吸附后的废菌体需要进行再次处理,故采用该法用于脱色的较少。目前,主要采用降解脱色,此脱色反应与偶氮染料的作用机制相似,均属还原反应,其差异在于前者是形成无色二羟基蒽醌,后者为偶氮键断裂^[13]。染料降解机理的研究,主要涉及染料分子中发色团的消失、复杂多环芳烃分解为单环或简单多环芳烃(萘环、蒽环等),最后再将相应的单环或多环芳香族化合物的分解代谢途径进行彻底降解。

细菌降解蒽醌染料时,一般认为先通过还原酶催化裂解染料分子共轭键,使其结构发生变化,从而达到脱色的目的^[2]。Itoh 等研究发现,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)对蒽醌染料的脱色还原速率与醌环上取代基的性质有很大的关系,其脱色顺序如下:二羟基>氨基-羟基>氨基-甲基>二氨基^[2]。许玫英等对脱色希瓦氏菌(*Shewanella decolorationis*) S12 的蒽醌染料脱色特性及其脱色酶的研究结果表明,该菌株首先以生物絮凝方式使培养液染料浓度迅速降低,继而通过生物降解方式逐步实现染料的开环降解。该菌的蒽醌染料脱色酶属于组成型表达,主要为位于细胞膜的外周可溶

性蛋白^[10]。庄源益等对黄杆菌(*Flavobacterium* sp.) BX26 降解蒽醌染料中间体溴氨酸的研究结果表明,该菌株有氧条件下能分泌1种由溴氨酸诱导的胞外降解酶,经诱导的酶在原体系中具有高而持久的脱色能力,可将再次加入的溴氨酸在3h内脱色。若将酶液移出原体系并稀释后进行脱色试验,胞外酶仍具有良好的脱色能力,只是由于稀释等原因使酶的脱色时间延长^[9]。有些难以降解的化合物不能被单一微生物完全矿化,这些化合物不能作为该微生物唯一的碳源和能源,降解微生物还须从其他底物获得大部分碳源和能源,即为共代谢,而提供碳源和能源的化合物称为共代谢底物^[14-15]。如董晓丽等人报道的 *Rhodospseudomonas* XL1 在以染料作为唯一碳源的培养基上不能生长,只有在加入蛋白胨的情况下才表现出较高的脱色作用,这种脱色机制就是共代谢机制^[3]。

2 脱色真菌

2.1 种类 1980年,D.Eaton 报道了白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 和 *Tinctoptia* sp. 对含木质素的纸浆和造纸废水的生物脱色^[16],由此展开了真菌对包括蒽醌染料在内的复杂有机物生物脱色降解的研究。近年来,真菌在蒽醌染料脱色中的作用受到了广泛关注,随着研究的深入,新的染料脱色降解真菌不断被报道。归纳发现,蒽醌染料脱色真菌主要分布在青霉属、红酵母属、曲霉属、镰刀属、头孢霉属、栓菌属、地霉属、北风菌属、鸟巢菌属中,其中每个属又包括不同的种,结果见表2。

表2 蒽醌染料脱色降解的真菌种类

Table 2 Fung species of the decoloration and degradation of anthraquinone dye

脱色细菌	属类	脱色机制	脱色酶
Decolorizing bacteria	Genera type	Decoloration mechanism	Decoloring enzyme
黄孢原毛平革菌 <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	平革菌属	降解脱色	Lip、MP
银耳状平革菌 <i>Phanerochaete tremelli</i>	平革菌属	-	-
毛栓菌 <i>Tranetes hirsute</i>	栓菌属	降解脱色	Laccase
韩国白腐菌 <i>Tranetes versicolor</i>	栓菌属	降解脱色	Laccase
长绒毛栓菌 <i>Tranetes villosa</i>	栓菌属	降解脱色	-
青霉菌B <i>Penicillium</i> sp. B	青霉属	降解脱色	-
青霉菌GX2 <i>Penicillium</i> sp. GX2	青霉属	吸附脱色	-
烟曲霉 <i>Aspergillus fumigatus</i>	曲霉属	降解脱色	-
温特曲霉HD ₁ (<i>Aspergillus vertii</i> HD ₁)	曲霉属	-	-
糙皮侧耳 <i>Pleurotus ostreatus</i>	北风菌属	降解脱色	Laccase
朱红秘孔菌 <i>Phenoporus cinnabarinus</i>	-	降解脱色	Laccase
粪生黑鸟巢菌 <i>Cyathus stercoreus</i>	鸟巢菌属	降解脱色	木质素降解酶系
红酵母菌 <i>Rhodotropa harrison</i> sp.	红酵母属	降解脱色	-
齐整小核菌 <i>Sclerotium rolfsii</i>	小核菌属	降解脱色	-
镰刀菌 <i>Fusarium</i> sp.	镰刀属	降解脱色	Laccase
头孢霉菌 <i>Cephalosporium corda</i>	头孢霉属	吸附脱色	-
白地霉Dec1(<i>Guetriochum candidum</i> Dec1)	地霉属	降解脱色	DyP
伯克霍尔德菌 <i>Berkhanderia</i> sp. BCS55)	伯克霍尔德菌属	-	-
裂褶菌 <i>Schizophyllum commune</i>	裂褶菌属	降解脱色	-
粗糙脉孢霉菌 <i>Neurospora crassa</i>	链孢霉属	降解脱色	-
多孔菌 <i>Polyporus</i> sp.	多孔属	降解脱色	-

注:“-”表示目前该项研究不明确;表中资料参照文献[17-33]。

Note: - stands for the researches in this field are uncertain. Information in the table is accorded to references[17-33].

2.2 真菌脱色机制

2.2.1 真菌对染料的吸附脱色。真菌不同生理状态对染料

的吸附机制不同。死菌体的吸附机制比较简单,主要为物化作用,如吸附、沉积、离子交换等;活细胞的吸附作用比较复

杂,往往菌体利用染料物质代谢生长与吸附脱色同时进行。Alsu 在研究干燥的根霉去除水溶液中的活性阴离子染料时指出,生物吸附是真菌表面活性基团如甲壳素、酸性多糖、脂质、氨基酸及另外一些组成细胞结构的物质和染料阴离子之间作用的结果。他还研究了9种酵母对活性蓝的吸附容量和吸附率,结果表明,酵母的结构、吸附基团、表面积、形态决定了它对染料的结合能力^[34]。酵母细胞壁上的多聚糖作为离子交换剂的骨架,蛋白质、脂质则提供了大量能结合染料分子的吸附基团,这些吸附基团如氨基、羧基、巯基、磷酸基、硫醇基对染料有不同的亲和力和特异性。研究发现,真菌死菌体和活菌体对染料的吸附性能有较大差别,黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)灭活的菌体对刚果红的吸附脱色率为90%,而活菌体对刚果红的吸附脱色率为70%。Polman 等研究细菌、真菌和酵母菌对活性染料的吸附性能,在对活性黑5脱色的28种菌种中,64%的菌种死菌体具有较高的吸附性能;在对活性蓝19脱色的21种菌种中,71%的菌种死菌体具有较高的吸附性能。Polman 等认为死细胞吸附能力的提高是细胞结构破坏导致表面积增大的结果^[12]。

真菌对染料的吸附作用具有诸多优越性,如用于染料吸附时容易与染料溶液分离。真菌的生物吸附作用对染料结构选择性较小,1种真菌可对多种染料进行吸附脱色,并且吸附速度很快。辛宝平等报道的青霉菌GX2对蒽醌染料表现出广谱高效的吸附性能,其生长菌体对浓度为250 ng/L的活性艳蓝KNR吸附率为100%,对浓度为400 ng/L的KNR吸附率为91.4%,在实际废水处理中有良好的应用前景^[32]。另外,由于吸附脱色过程不涉及酶的作用过程,因此,该脱色过程不受废水环境、底物浓度、营养供给等方面因素的影响,很多工业发酵的废菌体可以直接用来作为吸附材料。因此,真菌相对于细菌应用于染料吸附更受人们关注。

2.2.2 真菌对染料的降解脱色。多数真菌既具有吸附染料,同时又具有降解染料的功能,染料分子先吸附在菌体上,然后通过细胞酶的作用逐渐降解。1983年,Tien 等首次发现了*P. chrysosporium*可以产生木质素过氧化物酶(LiP),此后又发现该菌的另一种过氧化物酶——锰过氧化物酶(MnP)^[3],及白腐菌(*Fanetes versicolor*)中的漆酶(Laccase)。目前认为这3种酶组成了木质素过氧化物酶系,主要由白腐真菌产生并分泌到细胞外,为非底物专一性酶,对多种有机物和染料具有广谱的氧化降解作用。

LiP和MnP对染料的降解方式与对木质素的相似,是一个以染料为还原剂的自由基链式反应过程^[16]。

LiP是一系列含有铁原卟啉IX(血红素)辅基的同功酶,它降解染料的机理主要是直接氧化。首先,葡萄糖氧化酶和乙二醛氧化酶在分子氧参与下氧化相应底物而形成 H_2O_2 ;然后激活LiP,使其形成失去2个电子的氧化型中间体LiPI;LiPI进一步和染料分子反应,将其转变成自由基,从而导致GC键断裂或芳环开环等,最终达到染料脱色目的,而自身得到1个电子变成LiPII,LiPII再和藜芦醇反应得到1个电子还原成原酶,完成1个催化循环。MnP的作用机理与LiP类似,也生成2个酶中间体MnPI和MnPII。不同的是,LiP以藜芦醇为中间电子递体,MnP以 Mn^{2+} 为中间电子递体。

漆酶是一种含铜的多酚氧化酶,可以氧化酚类化合物和芳香胺等。1883年,Yoshida 最先对漆酶进行了描述,1894年Bertrand 确定了它是一种包含金属的氧化酶^[35]。该酶催化中心由不同的3型铜组成:I型为铜催化电子传递,型为铜活化分子氧,型铜为铜二聚体主要吸收氧^[35]。其中,担子菌纲的白腐菌是漆酶主要产生者,目前,还发现细菌*Azospirillum lipoferum*、镰刀菌(*Fusarium* sp.)等能分泌漆酶。

漆酶对染料的催化作用不同于LiP和MnP,它的作用过程不需要 H_2O_2 ,通常认为它是在氧气的作用下导致脱羧、脱氢等反应,造成GC键断裂、芳环断裂等。它的催化底物机制表现在底物自由基的形成和漆酶分子中4个铜离子的相互协同作用。首先底物结合于酶活性中心1型铜原子位点,通过Cys-Hs途径将电子传递给3核位点,该位点又把电子传递给氧分子,使其还原成水。但漆酶对不同有机污染物的降解机理并不相同,而且反应机制还不完全清楚,这些都是目前研究的热点。

漆酶与木质素降解酶系统中其他的过氧化物酶相比,具有更大的优势,漆酶可在碳、氮或二者共存条件下由菌体分泌。更重要的是漆酶具有780 mV氧化还原电位,能把分子氧直接还原为水,在没有 H_2O_2 和其他次级代谢产物存在时,可催化有机污染物的氧化。由于漆酶作用的底物范围广,反应条件温和,因此在生物技术和环境保护方面有着巨大的应用潜力^[36]。侯红漫等研究指出,白腐菌糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus* strain 3.42)只分泌漆酶,在添加小分子的芳香化合物和铜离子的限氮培养基中,可获得高产漆酶,同时使蒽醌染料明显脱色,该酶在蒽醌染料废水处理中有着潜在的应用价值^[36]。李济吾等试验结果显示,真菌属镰刀菌(*Fusarium* sp.)在培养96 h时,加入到含100 ng/L酸性蓝B液体培养基中继续培养96 h后,酸性蓝B脱色率可达100%。该菌株脱色的机理主要是发色基团蒽醌环被漆酶破坏,共轭体系被打破^[29]。另外,真菌中除上述几种脱色降解染料的酶以外,1999年Seong Jun Kim报道了由*G. candidum*菌体产生的另一种过氧化物酶——DyP^[19],从该菌分离纯化的DyP能对包括蒽醌染料在内的9种染料降解脱色。

3 基因工程菌的脱色

蒽醌染料属于难降解芳香族有机化合物,虽然已筛选出多种微生物菌株可以对其降解,但有些菌株仍难以适应处理环境,繁殖速度慢,其分解有机物的速度和效果难以达到预期目标,以及有些菌株专一性太强,不能满足废水降解的广泛性要求等。目前,国内外有通过分子生物技术构建高效基因工程菌用于蒽醌染料废水脱色的相关文章,通过将降解性基因转入繁殖力强和适应性能佳的受体菌株内,或将降解各种化合物的基因克隆到同一菌株内,构建出高效基因工程菌,达到彻底降解污染物的目的。

宋文华等对分离到的2株蒽醌染料脱色优势菌ND1和ND2的脱色基因进行初步定位,结果发现,这2株菌降解染料的能力都由质粒控制^[37]。杜翠红等从蒽醌型染料中间体溴胺酸生产车间污口的污泥中筛选到1株以溴胺酸为唯一碳、氮源的假单胞菌,然后从该菌株降解性质粒或染色体中获得目的基因片段,将其与适当的载体连接后,转入受体菌

中,使其具有高效脱色的功能^[38]。2005年,南开大学科研人员在用生物技术处理染料废水的研究中,分离出具有生物絮凝作用和对蒽醌染料及其中间体具有生物降解作用的2类菌株,运用生物工程技术把降解菌的基因片段通过转基因工程转入絮凝菌株,获得具有絮凝和降解双功能基因的高效基因工程菌并应用于染料废水的处理,该技术在国内外处于领先水平。

4 存在的问题及展望

生物降解是蒽醌染料废水处理的重要方法。目前,有关蒽醌染料脱色菌的研究大多只涉及细菌和真菌,对其他微生物类群的研究开发还较少,而且,脱色菌株能够同时降解多种有机污染物的能力比较有限。国内外对脱色微生物仍主要集中于染料高效菌株分离、选育以及个别脱色酶纯化和特性的研究。但是,受污染环境的影响,在实际应用降解菌时常会发生降解菌在总量上减少等问题。通常,人们从自然界筛选的降解菌其降解酶活性较低,不能满足实际需要。今后的研究方向应该着力于具有广谱脱色性能的新微生物类群的开发研究。利用现代分子生物学技术,通过遗传工程改良或构建环境污染物降解菌,扩大降解菌对污染物的降解范围,提高其降解酶的活性,以增强降解菌对污染物的降解能力,进一步提高染料生物降解的效率。

参考文献

- [1] 洪颖,陈国松,张红漫,等.蒽醌类染料废水处理的研究进展[J].工业水处理,2004,24(10):5-8.
- [2] 许玫英,郭俊,岑英华,等.染料的生物降解研究[J].微生物学通报,2006,33(1):138-143.
- [3] DONG X L, ZHOU J T, WANG J. Decolorization of Anthraquinone dye by *Rhodospirillum rubrum* XL-1[J]. High Technology Letters, 2002, 8(2): 11-14.
- [4] RENS Z, GUO J, ZENG Q, et al. Decolorization of triphenyl methane, azo, and anthraquinone dyes by a newly isolated *Aeromonas hydrophila* strain[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 72(6): 1316-1321.
- [5] WALKER G M, WEATHERLEY L R. Biodegradation and biosorption of acid anthraquinone dye[J]. Environmental Pollution, 2000, 108(2): 219-223.
- [6] 许玫英,李建军,曹渭,等.染料脱色菌的分子分类和有关基因与其脱色特性的关系[J].微生物学杂志,2004,24(6):25-28.
- [7] GVAUDAN A, EFOSE A, FAURE D, et al. Polyphenol oxidase in *Azospirillum lipoferum* isolated from rice rhizosphere: Evidence for laccase activity in non-nitrite swarms of *Azospirillum lipoferum*[J]. FEMS Microbiol Lett, 1993, 108: 205-210.
- [8] FAURE D, BOULLANT ML, BALLY R. Isolation of *Azospirillum lipoferum* 4T Tr5 mutants affected in nitrification and laccase activity[J]. Appl Environ Microbiol, 1994, 60(9): 3413-3415.
- [9] 庄源益,辛宝平,宋文华,等.蒽醌染料中间体溴氨酸降解酶的特性[J].城市环境与城市生态,2001,14(2):1-3.
- [10] 许玫英,钟小燕,曹渭,等.脱色希瓦氏菌(*Sewanella decolorationis* S12T)的脱色特性[J].微生物学通报,2005,32(1):5-9.
- [11] 杨清香,贾振杰,杨敏.微生物染料脱色研究进展[J].微生物学通报,2006,33(4):144-148.
- [12] 芦国营,张朝晖,周晓云,等.生物吸附在染料废水处理中的应用[J].化工环保,2005,25(6):446-450.
- [13] 宋文华,颜慧,冯火.染料脱色酶特性研究[J].南开大学学报,1999,32(3):146-150.
- [14] LANDA A S, SIPKEMA E M, WEJMA J, et al. Comatabdic degradation of trichloroethylene by *Pseudomonas cepacia* G4 in a chemostat with toluene as the primary substrate[J]. Appl Environ Microbiol, 1994, 60(9): 3368-3374.
- [15] CHANG W K, CRIDDLE C S. Experimental evaluation of a model for cometabolism: Prediction of simultaneous degradation of trichloroethylene and methane by a methanotropic mixed culture[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1997, 56(5): 492-501.
- [16] 李蒙英,孟祥勋.真菌对染料废水脱色降解的研究进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(10):20-22.
- [17] COLLEEN CRIPPS, JOHN A B, STEVEN D A. Biodegradation of azo and heterocyclic dyes by *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(4): 1114-1118.
- [18] ELIAS ABADULLA, TZANKO TZANOV, SILGA COSTA, et al. Decolorization and detoxification of textile dyes with a laccase from *Fanates hirsute*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(8): 3357-3362.
- [19] SEONG JUN KIM, MAKOTO SHODA. Purification and characterization of a novel peroxidase from *Geotrichum candidum* decolorized in decolorization of dyes[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(3): 1029-1035.
- [20] SWAMY J, RAMSAY J A. The evaluation of white rot fungi in the decoloration of textile dyes[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 24: 130-137.
- [21] SWAMY J, RAMSAY J A. Effects of glucose and NH_4^+ concentrations on sequential dye decoloration by *Fanates versicolor*[J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 25: 278-284.
- [22] WONG Y X, YU J. Laccase catalyzed decolorization of synthetic dyes[J]. Wat Res, 1999, 33(16): 3512-3520.
- [23] LAN R HARDIN, CAO H T, SUSAN S WILSON. Decolorization of textile wastewater by selective fungi[J]. Textile Chemist and Colorist & American Dyestuff Reporter, 2000, 32(11): 38-42.
- [24] GERD HUBLIK, FRANZ SCHINNER. Characterization and immobilization of the laccase from *Heurotus ostreatus* and its use for the continuous elimination of phenolic pollutants[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2000, 27: 330-336.
- [25] 李慧蓉,李华兵,李文琼,等.黄孢原毛平革菌对6种染料的脱色降解[J].环境科学研究,1999,12(3):14-21.
- [26] 李蒙英,孟祥勋,王雪峰,等.青霉菌(*Penicillium* sp.)对三种活性染料的吸附和降解[J].中国环境科学,2001,21(5):449-452.
- [27] 董新姣,林晓华,李晓云,等.酵母菌T2对蒽醌染料的脱色研究[J].环境科学与技术,2003,26(5):30-32.
- [28] 肖继波,胡勇.吸附菌HX5对活性艳蓝KNR的吸附脱色作用[J].应用与环境生物学报,2005,11(6):763-766.
- [29] II J W, II F. Isolation of acid blue B degrading *Fusarium* sp. HJ01 and the studies on its degradation characteristics[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1641-1646.
- [30] 金朝晖,柴英涛,李铁龙,等.3株真菌对活性艳蓝KNR的脱色条件[J].环境科学,2004,25(2):81-84.
- [31] 李雳,白景华,倪红,等.染料脱色真菌的分离鉴定及其某些特性的研究[J].湖北大学学报,1996,18(3):284-288.
- [32] 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.
- [33] ELIAS ABADULLA, KARL HEINZ ROEBA, GEORG M GÜTZ, et al. Enzymatic decolorization of textile dyeing effluents[J]. Textile Research Journal, 2000, 70(5): 409-414.
- [34] AKSUZ, TEZERS. Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of remazol black by *Trichoderma reesei* in a batch system: Effect of temperature[J]. Process Biochem, 2000, 36(5): 431-439.
- [35] ALFRED MM, RICHARD C S. Laccase new functions for an old enzyme[J]. Phytochemistry, 2002, 60: 551-565.
- [36] 侯红漫,周集体,王竞,等.白腐菌糙皮侧耳漆酶性质及其对蒽醌染料脱色性能的研究[J].林产化学与工业,2004,24(1):48-52.
- [37] 宋文华,颜慧,胡国臣,等.蒽醌染料及中间体脱色优势菌的特性研究和基因定位[J].环境化学,1999,18(3):263-269.
- [38] 杜翠红,周集体,王竞,等.难降解芳香烃生物降解及基因工程菌研究进展[J].环境科学与技术,2005,28(1):106-108.

(上接第7879页)

合理开发客水、雨水和海水资源,做好中水回用和节约用水,就能解决海南西南地区的水资源问题,以水资源和水工程的可持续利用保障海南省西南地区经济社会的可持续发展。

参考文献

- [1] 刘阳生.海南省水资源水环境现状分析及对策研究[J].水文,2006,26(1):89-91.
- [2] 曹利军.可持续发展评价理论与方法[M].北京:科学出版社,1999.
- [3] 吴季松.水资源及其管理的研究与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [4] 王长明.沧州市水资源保护对策措施[J].水资源保护,2003(4):52-53.
- [5] 孙静,阮本清,张春玲.国内外非传统水资源开发利用[J].中国水利,2007(7):8-11.
- [6] 姚晨光.河北省水资源开发利用现状与对策[J].海河水利,2006(4):6-7.