

应用白腐真菌降解染料的研究现状及发展趋势

高大文, 文湘华, 钱 易

(清华大学 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084, E-mail: gdw@mail.tsinghua.edu.cn)

摘 要: 综述了白腐真菌的生物学特性、悬浮和固定化培养白腐真菌降解染料以及白腐真菌生物反应器的研究现状, 指出目前国内外研究白腐真菌降解染料中存在的主要问题是大部分研究均是在无菌操作下进行的, 即无论是反应器、培养基还是载体, 甚至含有染料的废水都是先经过灭菌后再投到反应器中的, 而且整个降解过程也是严格控制在无菌条件下运行. 这样, 造成该项技术仍然停留在实验室研究阶段, 应用到实际工程中的案例基本没有. 分析制约该项技术应用到实际工程中的原因是反应体系的染菌问题. 因此, 针对目前研究中存在的问题, 提出探索非灭菌环境下有效抑制杂菌生长的控制策略和抑菌机理是今后白腐真菌降解染料的研究方向.

关键词: 白腐真菌; 活性染料; 降解; 非灭菌

中图分类号: X172

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2005)09-1200-05

Status and development trend of degradation of reactive dyes by white rot fungus

GAO Da-wen, WEN Xiang-hua, QIAN Yi

(ESPC State Key Joint Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China, E-mail: gdw@mail.tsinghua.edu.cn)

Abstract: The current status of research in the field of degradation of reactive dyes by white rot fungus is reviewed. For this purpose, the biological characteristic of white rot fungus and decolorization with suspended and immobilized cultures, and biological reactor, are discussed. From this it can be seen that the key problem exist in study of degradation of reactive dyes by white rot fungus is the almost whole investigations are performed under sterile condition, i. e. the reactor, culture media, carrier and even wastewater are all sterilized. So almost all the studies both domestic and international using white rot fungi for dye wastewater treatment have rested on laboratory. There is no case of full scale application. One very important reason is bacterial contamination in reactor under non-sterile conditions. Aim at this problem, we put forward that to develop the strategies for suppressing bacterial growth and to study the mechanism of suppressing bacterial growth are future development trends in degradation of reactive dyes by white rot fungus.

Key words: white rot fungus; reactive dyes; degradation; non-sterile

目前, 对印染废水的处理方法主要有物理化学法和生物处理法. 其中, 物理化学法主要有吸附法、混凝法、化学氧化法、湿式空气氧化法等, 而生物法中用得较多是厌氧处理法. 虽然这些方法通过长期的应用和实验证明对印染废水处理具有一

定的效果. 但这些方法也存在一些问题, 如物理和化学处理技术费用太高 (例如膜技术) 或者经常产生大量的固体废物 (例如混凝技术). 与之相比, 生物法则经济有效、可被广泛接受的环保处理方法, 它不仅运行费用低, 而且无二次污染, 符合可持续性发展的需要. 但传统的生物处理技术对非偶氮染料基本没用脱色效果, 偶氮染料可以在厌氧条件下脱色, 但是几乎不能在好氧条件下脱色^[1], 而且在厌氧条件下对活性染料进行脱

收稿日期: 2004-08-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50478010); 中国博士后基金资助项目 (20040350022)

作者简介: 高大文 (1967-), 男, 博士, 副教授.

色,还可生成苯胺等有毒及致癌物质^[2]。尽管生物处理存在许多问题,但是由于它的潜在的低成本特点使得它在印染废水处理上仍然被认为是一种理想的处理方法。因此,寻求一种更安全、更有效、更彻底,也更廉价的生物处理方法则为当务之急。

20世纪80年代《Science》首次报道了白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 能向胞外分泌降解木质素的酶,使降解木质素研究取得了重大进展^[3]。这一发现同时也引起环境界的广泛关注,随后科研人员对白腐真菌生物学特性、降解规律、生化原理、酶学、分子生物学、工业化生产以及环境工程实际应用等方面进行了大量研究。白腐真菌处理含染料废水技术是近几年来新兴的有效处理方法,它通过白腐真菌所分泌的特殊的降解酶系及其它机制将各种人工合成染料彻底降解为 CO_2 和 H_2O 。白腐真菌正因为其极强的降解能力和特殊的代谢类型而成为近年来国内外研究的热点。

1 白腐真菌生物学特性

白腐真菌 (White rot fungi) 多属担子菌纲 (Basidiomycetes), 寄生或腐生在树木或木材上, 能释放降解性酶降解木质素、纤维素, 侵入木质细胞内获取营养而引起木质腐烂成为海绵状白色团块而得名^[4]。它是整个碳素循环的中心, 是目前已知的唯一能在纯系培养中将木质素矿化的一类微生物。

当白腐真菌被引入废水中后, 由于生物具有的应激性将对营养限制 (一些主要营养物质如氮、碳等缺乏时) 作出应答反应, 从而形成一套酶系统^[4]。这套酶系统主要包括产生 H_2O_2 的氧化酶、需 H_2O_2 的过氧化酶以及漆酶 (Laccase)、还原酶、甲基化酶和蛋白酶等。产生 H_2O_2 的氧化酶在分子氧参与下氧化底物而形成 H_2O_2 , 从而激活过氧化酶, 启动酶的催化循环。需 H_2O_2 的过氧化酶主要有木质素过氧化物酶 (Lignin Peroxidase, LiP) 和锰过氧化物酶 (Manganese Peroxidase, MnP), 这些酶均在细胞内合成, 分泌到细胞外, 以 H_2O_2 为最初氧化底物。上述酶共同组成白腐真菌降解系统主体。

2 白腐真菌降解染料的研究现状

2.1 悬浮培养白腐真菌降解染料的研究

自从 Glenn^[5] 等和 Tien 和 Kirk^[3] 首次发表了发现过氧化物酶 Lip 以来, 应用白腐真菌降解难

降解有机化合物的研究主要有两方面, 一方面是直接将待处理有机化合物加入到白腐真菌的活性培养液中, 利用白腐真菌分泌的胞外过氧化物酶对其直接氧化; 另一方面是先将过氧化物酶从活性培养液中提取出来, 然后把这些经过纯化的酶液加入到含有污染物的待处理液中实施对污染物的降解。1993年 Ollikka 等^[6] 比较了 *Phanerochaete chrysosporium* 三种木质素过氧化物酶同工酶对多种染料的降解能力, 指出不同同工酶对以染料作为底物具有不同的特异性。1997年 Young 等^[7] 研究发现, 在藜芦醇、过氧化氢和酸性 pH (3.5~5) 存在条件下, 经部分纯化的木质素过氧化物酶对 8 种染料的脱色能力比含有木质素过氧化物酶的白腐真菌培养液更强。1999年 Reyes 等^[8] 研究了用活性琼脂糖固定漆酶后对工业染料的脱色效果, 结果发现经固定化的漆酶在系统运行 10 个周期后活性仍然保持在最初的 85% 左右, 同时研究中还发现添加羟基苯并三唑有利于提高固定化漆酶对染料的脱色率。2000年 Schliephake 等^[9] 应用经纯化的漆酶对双偶氮染料进行降解, 发现纯化后的漆酶在 60℃ 能够稳定 1h, 而且其对染料的脱色率随着酶量的增加而增加。2001年 Moreira 等^[10] 通过 H_2O_2 的适当补充来实现 Mnp 对染料 Poly R-478 的优化降解。2002年 Verma 等^[11] 用部分纯化的木质素过氧化物酶对 4 种工业染料进行脱色, 发现添加的藜芦醇、过氧化氢、酶量和染料浓度对染料脱色效率影响较大。2003年 Moldes 等^[12] 采用在用尼龙海绵块填充的固定床管式生物反应器中 *Phanerochaete chrysosporium* 半固态发酵获得的粗酶液对 Poly R-478 和结晶紫进行脱色试验, 获得了较好的效果; 另外, 作者还通过采用连续投加锰过氧化物酶 (Mnp) 和过氧化氢 (H_2O_2) 的方式使对染料的脱色能力能够长期保持, 并将这种处理方式与光化学脱色过程进行对比, 得出采用酶液处理效果要好于光化学处理方式。总之, 采用酶液对染料进行降解的方法优点是具有较高的独立性, 受废水成分影响小, 但它的缺点是提取和纯化这些过氧化物酶需要很高的成本; 另外, 直接利用酶液处理废水还存在酶的失活问题。应用木质素降解酶液降解有机污染物, 除了很少量针对合成染料报道外, 其他研究极少见到。

目前应用白腐真菌降解染料废水普遍采用的方法是在白腐真菌培养液中直接加入染料, 利用白腐真菌分泌的胞外过氧化物酶对其直接氧化。Tatarko 等^[13] 采用 *Phanerochaete chrysosporium* 对

刚果红偶氮染料进行脱色研究,发现振荡液体培养和麦芽汁琼脂固体培养 *Phanerochaete chrysosporium* 对刚果红偶氮染料都具有较好的脱色能力;另外,作者还发现在麦芽汁琼脂固体培养基上补充营养物氮后, *Phanerochaete chrysosporium* 对刚果红偶氮染料的脱色率受到抑制. 李向飞等^[14]采用自行分离的白腐真菌 F1 对 4 种难降解染料进行脱色试验,结果表明 F1 对中性深黄 GRL、酸性媒介漂蓝 B 和刚果红的脱色效率都超过 90%, 经与 *Phanerochaete chrysosporium* 比较,能够达到或超过它对 3 种染料的脱色效果. 张朝晖等^[15]培养 *Phanerochaete chrysosporium* 同步产酶降解含有卡布龙红和弱酸大红的染料废水时,发现若加入葡萄糖 1 g/L,菌丝可以重复脱色废水 5 批以上,每批废水脱色率大于 90%, 5 批废水总的染料质量降解率约 80%.

2.2 固定化培养白腐真菌降解染料的研究

研究中发现将白腐真菌细胞固定化后有利于白腐真菌菌丝体的生长和产酶,并提高了脱色效率,从而可以解决白腐真菌在实际工程应用中的生长控制和长时间保持胞外酶浓度问题. Kapdan 等^[16]用摇瓶实验研究了白腐真菌 *Coriolus versicolor* 在金属网、海绵、石粒、木灰、聚亚安酯和木屑上固定时的脱色性能. 结果显示,金属网载体优于其它固定化材料,其脱色率达到 97%. 2002 年 Shin 等^[17]也通过摇瓶试验研究了几种天然材料(小麦杆、枫木片、大麻纤维、大麻席子和黄麻线)和人工合成材料(尼龙纤维、聚乙烯纤维和大麻-聚丙烯纤维)对白腐真菌 *Trametes versicolor* ATCC 20869 的固定效果以及随后对苋红的脱色效果,试验结果显示黄麻作为 *Trametes versicolor* 生长所需的固定化材料最好;另外,固定在这种材料上的 *Trametes versicolor* 对苋红有最高的脱色率($8.4 \text{ mg l}^{-1} \text{ h}^{-1}$),而悬浮培养的菌丝小球对苋红的脱色率只有 $3.7 \text{ mg l}^{-1} \text{ h}^{-1}$. 随后 2003 年 Kasinath 等^[18]应用聚氨酯泡沫和松木作为载体对白腐真菌 *Irpex lacteus* 进行固定化,并考察了两种载体上生长的 *Irpex lacteus* 对 Remazol 亮蓝 R (RBBR) 染料的脱色情况,结果显示聚氨酯泡沫载体上 *Irpex lacteus* 产生的锰过氧化物酶(Mnp)比松木载体产生的高,但是,含有两种载体的液体培养基都能很快对 Remazol 亮蓝 R (RBBR) 染料脱色. Zhang 等^[19]开发了一种复合菌丝小球,就是将粉末活性炭加到白腐真菌 *Trametes versicolor* 菌丝小球中,他们将这种复合菌丝小球、粉末活性炭和没有活性炭的菌丝小球加到含有偶氮染料的

溶液中进行脱色试验,发现复合菌丝小球对偶氮染料的脱色率最高和最稳定. 国内学者茆荣等^[20]采用聚乙烯泡沫、聚氨酯泡沫和聚酯无纺布固定化白腐真菌,并比较它们对不同结构的多种染料的脱色能力,得出聚酯无纺布是该菌固定化的最佳载体.

2.3 白腐真菌降解染料的生物反应器研究

除了解决白腐真菌的生长控制和长时间保持胞外酶浓度问题,白腐真菌长期培养的生物反应器的开发是使这项技术工业化的先决条件. 在纯培养(无菌条件)下运行的不同类型生物反应器已有报道^[21-27]. 研究较多的生物反应器有搅拌罐反应器^[21,22],鼓泡柱^[23],固定床^[24]或流化床反应器^[24,25]. 已经研究的运行模式有间歇,半间歇^[26]和连续流^[27]. 所有形式的反应器都可以产生高水平酶活. 由于培养基中蛋白酶的存在,这些酶活随着菌丝体的老化逐渐降低. Zhang 等^[24]设计了连续流填充床生物反应器、间歇补料流化床生物反应器和连续流流化床生物反应器三种不同结构的反应器,并对他们对偶氮染料的脱色效果进行了研究,3 种白腐真菌生物反应器在长期运行中均表现出较高的和稳定的脱色效果,其中间歇补料流化床生物反应器脱色效率最高(对 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 偶氮染料橙 II 1 d 的脱色率在 97% 以上). Mielgo 等^[28]应用 *Phanerochaete chrysosporium* 在一个连续填充床生物反应器里进行了偶氮染料降解研究,当染料负荷率为 $0.2 \text{ gL}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 、温度 37°C 和水力停留时间为 24 h,并向反应器通入氧气时,该反应装置对偶氮染料的脱色率在 95% 以上. 2004 年 Lopez 等^[29]开发了一种酶-膜反应器(EMR)来对偶氮进行脱色,该反应器主要由一个搅拌罐反应器和一个超滤膜组件组成,试验中他们还进行了间歇运行、补料间歇运行以及连续运行等运行方式对脱色效果的影响,得出连续运行方式脱色率最好. 近几年国内科研人员也开始对白腐真菌生物反应器进行研究,华东师范大学黄民生等^[30]自制了聚氨酯小球曝气生物滤池反应器、组合填料生物接触氧化反应器和聚氨酯生物转盘反应器 3 种白腐真菌生物膜反应器处理染料废水,结果显示,无论采用间歇式运行还是连续式运行方式,组合填料生物接触氧化反应器的脱色速度、最终脱色率和抗杂菌污染能力均最强. 王永华等^[31]设计了一种白腐真菌煤渣生物膜反应器,并应用该反应器处理模拟活性艳红染料废水,获得了较好的处理效果,其最高脱色率达到 95% 以上.

以上研究均是在无菌操作下完成的,即无论

是反应器、培养基还是载体,甚至含有染料的废水都是先经过灭菌后再投到反应器中的,而且整个降解过程也是严格控制在无菌条件下运行。

3 目前研究白腐真菌降解染料中存在的问题

尽管大多数研究的目标是评价白腐真菌处理废水中污染物的能力,但是目前却很少见报道研究考察在非灭菌运行方式下使用白腐真菌。同时,无论国内还是国外,对白腐真菌处理染料废水研究都还停留在实验室研究阶段,应用到实际工程中的案例基本没有。是什么制约了白腐真菌在实际工程中的应用呢?白腐真菌属于低等真核微生物,生长速度很慢,因此,一旦反应体系有细菌进入,细菌就会与白腐真菌争夺培养基中的营养物质。由于细菌的生长繁殖速度比真菌快很多,它们就会在反应体系内占优势,而白腐真菌将因缺乏营养而停止生长,进而影响胞外降解酶系的分泌,致使整个处理系统失去降解染料的功能。因此,如果在实际含染料废水处理中应用白腐真菌,必须要解决的问题就是反应体系染菌。如果对实际工程中的反应器、培养液、载体以及废水都进行灭菌处理并保证处理过程不染菌,显然将大大增加处理工艺的运行成本,并且在实际工程中也是行不通的。因此,如何解决白腐真菌降解含染料废水过程中的染菌问题是该工艺能否应用到实际工程中的瓶颈。不解决染菌问题,该工艺则很难在实际工程中使用,将会严重制约该项技术的发展。

4 今后的研究方向

随着白腐真菌降解染料等一些有机污染物技术的越来越成熟,对在非灭菌条件下有效抑制细菌生长而使白腐真菌在整个处理过程始终占优势的方法显得越来越迫切。这一问题已经引起国外科学家的重视,并在最近几年开始研究^[32,33]。

1999年 Leidig 等^[32]用聚乙烯醇包埋法保护了白腐真菌 *Trametes versicolor* 和细胞外产生的过氧化物酶免受细菌攻击,达到对染料 Poly R-478 的连续生物氧化。他采用的方法是先把白腐真菌 *Trametes versicolor* 包埋在直径 1~2 mm 的聚乙烯醇小球内,然后把它投到未经过灭菌处理的曝气反应器中,使白腐真菌生长和分泌胞外氧化酶均在有菌条件下进行。经过 65 d 的试验,被细菌污染的聚乙烯醇小球仅在最外层到 50 μm 深度的区域存在污染,扫描电镜观察细菌并未深入聚乙烯醇小球内部。被聚乙烯醇小球包裹着的

白腐真菌仍然分泌木质素过氧化物酶,并连续对 Poly R-478 进行生物降解,去除率达到 89% 以上。为了确定该技术工程应用的潜力,仍需要做长期的考察和经济评价。

2003 年 Libra 等^[33]应用白腐真菌 *Trametes versicolor* 研究了非灭菌环境降解活性染料的控制策略。作者采用悬浮培养和细胞固定化两种方法进行试验,其中在悬浮培养试验中采用了 3 种策略,即降低培养液 pH、采用氮限制培养基和单独使用粗酶液;固定化培养试验采用的载体同时也是白腐真菌可以利用的底物,即木质纤维素载体。试验结果显示,在悬浮培养试验中,培养液 pH 降低到 3 以下都没有抑制细菌生长,相反白腐真菌在此 pH 时已停止生长和产酶;单独使用粗酶液可以将白腐真菌生长和处理废水两个过程分开,从而间接减小细菌对白腐真菌的影响,但是,试验发现,在非灭菌环境使用酶液时酶活急剧降低,最终影响处理废水的效果;只有采用氮限制培养基获得了较好的抑菌效果。另外,采用谷物作为白腐真菌生长的唯一底物同时又作为载体的试验也获得了较好的抑菌效果,并且对染料的脱色率依赖于接种带有白腐真菌的载体的量。

清华大学文湘华教授领导的课题组在非灭菌环境下应用 *P. chrysosporium* 对活性艳红 K-2BP 进行脱色也进行了探索性研究^[34],初步确定在非灭菌环境下氮限制液体培养基(碳氮比为 56/2.2 mmol)容易抑制细菌生长,使该培养基下的白腐真菌在非灭菌环境对活性艳红仍具有很高的脱色率;而碳限制液体培养基(碳氮比为 28/44 mmol)容易感染细菌,从而影响脱色效果。

综上所述,白腐真菌广谱的降解范围、低廉的营养要求、降解的彻底性、竞争的优势和对固液基质的适应性,使其在处理染料废水的应用中具有经济、高效、实用等多项优势。但是,这些技术大部分是在灭菌条件下获得的。如何使这些技术应用于工程实践,目前急待解决的问题是避免反应体系染菌。尽管近年来,国内外对如何避免白腐真菌降解染料反应体系染菌,使白腐真菌降解染料废水由实验室走向实际工程做了一些工作,取得了一些成果。但是,从文献上看,这些工作还比较初步,特别是对非灭菌环境下有效抑制细菌的机理研究还很不深入。而我国对白腐真菌的研究本来就起步较晚,与国外相比还存在一定差距。因此,如果抓住当前国外对白腐真菌应用过程中的染菌问题研究也刚刚起步这一契机,深入研究非灭菌环境下白腐真菌降解印染废水的控制策略以及抑

制杂菌的机理将有助于使这一研究领域走在国际前列。同时,也有助于使对白腐真菌降解染料的十几年研究成果早日运用到实践中,解决目前印染废水处理困难,运行成本高等问题,为我国印染废水处理做贡献。

参考文献:

- [1] ZISSI U, LYBERATOS G. Partial degradation of p-aminazobenzene by a defined mixed culture of bacillus subtilis and stenotrophomonas maltophilia[J]. Biotechnol Bioeng, 2001, 72(1): 49-54.
- [2] CHUNG K T, CERNIGLIA C E. Mutagenicity of azo dyes: structure activity relationships[J]. Mutat Res, 1992, 77: 201-220.
- [3] TIEN M, KIRK T K. Lignin-degrading enzyme from the hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Science, 1983, 221: 661-663.
- [4] 李慧蓉. 白腐真菌的研究进展[J]. 环境科学进展, 1996, 4(6): 69-77.
- [5] GLENN J K, MORGAN M A, MAYFIELD M B, et al. An extracellular H_2O_2 requiring enzyme preparation involved in lignin biodegradation by white rot basiomycete *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Biochem Biophys Res Commun, 1983, 114: 1077-1083.
- [6] OLLIKKA P, ALHONMAKI K, LEPPANEN V M, et al. Decolorization of azo, triphenyl methane, heterocyclic, and polymeric dyes by lignin peroxidase isoenzymes from *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Appl Environ Microbiol, 1993, 59: 4010-4016.
- [7] YOUNG L, YU J. Ligninase-catalysed decolorization of synthetic dyes[J]. Wat Res, 1997, 31: 1187-1193.
- [8] REYES P, PICKARD M A, VAZQUEZ-DUHALT R. Hydroxybenzotriazole increases the range of textile dyes decolorized by immobilized laccase [J]. Biotechnology Letters, 1999, 21(10): 875-880.
- [9] SCHLIEPHAKE K, MAINWARING D E, LONERGAN G T, et al. Transformation and degradation of the disazo dye Chicago Sky Blue by a purified laccase from *Pycnoporus cinnabarinus* [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2000, 27(1-2): 100-107.
- [10] MOREIRA M T. In vitro degradation of a polymeric dye (Poly R-478) by manganese peroxidase[J]. Biotechnol Bioeng, 2001, 75: 362-368.
- [11] VERMA P, MADAMWAR D. Decolorization of synthetic textile dyes by lignin peroxidase of *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Folia Microbiologica, 2002, 47(3): 283-286.
- [12] MOLDES D, COUTO S R, CAMESELLE C, et al. Study of the degradation of dyes by MnP of *Phanerochaete chrysosporium* produced in a fixed-bed bioreactor [J]. Chemosphere, 2003, 51(4): 295-303.
- [13] TATARKO M, BUMPUS J A. Biodegradation of Congo Red by *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Wat Res, 1998, 32(5): 1713-1717.
- [14] 李向飞, 文湘华, 林刚. 白腐真菌 F1 对染料脱色特性的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(7): 1-4.
- [15] 张朝晖, 夏黎明, 林建平, 等. 黄孢原毛平革菌对染料和印染废水的降解[J]. 应用与环境生物学报. 2001, 7(4): 382-387.
- [16] KAPDAN I K, KARGI F, MCMULLAN G, et al. Biological decolorization of textile dyestuff by *Coriolus versicolor* in a packed column reactor [J]. Environ Tech, 2000, 21(2): 231-236.
- [17] SHIN M, NGUYEN T, RAMSAY J. Evaluation of support materials for the surface immobilization and decoloration of amaranth by *Trametes versicolor* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 60(1-2): 218-223.
- [18] KASINATH A, NOVOTNY C, SYVORODOVA K, et al. Decolorization of synthetic dyes by *hplex lacteus* in liquid cultures and packed-bed bioreactor [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 32(1): 167-173.
- [19] ZHANG F M, YU J. Decolourisation of Acid Violet 7 with complex pellets of white rot fungus and activated carbon [J]. Bioprocess Engineering, 2000, 23(3): 295-301.
- [20] 英荣, 谢萍, 秦易. 固定化白腐真菌对多种染料脱色的研究[J]. 菌物系统, 2003, 22(2): 308-313.
- [21] KIRKPATRICK N, PALMER J M. Semi-continuous ligninase production using foam-immobilised *Phanerochaete chrysosporium*. Appl Environ Microbiol, 1987, 27: 129-133.
- [22] WILLERSHAUSEN H, JAGER A, GRAF H. Ligninase production of *Phanerochaete chrysosporium* by immobilisation in bioreactors [J]. J Biotechnol, 1987, 6: 239-243.
- [23] BONARME P, DELATTRE M, DROUET H, et al. Toward a control of lignin and manganese peroxidases hypersecretion by *Phanerochaete chrysosporium* in agitated vessels: Evidence of the superiority of pneumatic bioreactors on mechanically agitated bioreactors [J]. Biotechnol Bioeng, 1993, 41: 440-450.
- [24] ZHANG F M, KNAPP J S, TAPLEY K N. Development of bioreactor systems for decolorization of Orange II using white rot fungus [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1999, 24: 48-53.

(下转第 1306 页)

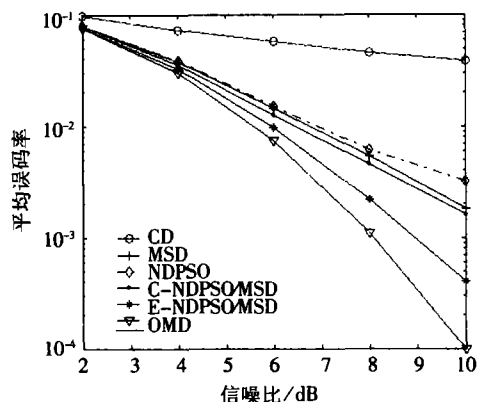


图2 平均误码率和信噪比关系曲线

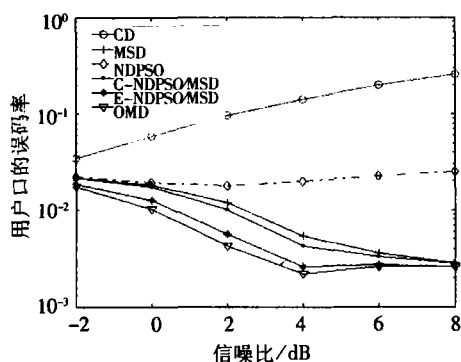


图3 用户1 误码率和远近比关系曲线

4 结论

1) C-NDPSO/MSD 和 E-NDPSO/MSD 能

降低基本离散粒子群优化算法自身的冗余计算, 加快全局收敛速度和收敛性能。

2) 随着并行硬件技术的发展, E-NDPSO/MSD 将会更具应用价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 张贤达, 保铮. 通信信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] VERDU S. Minimum probability of error for asynchronous Gaussian multiple-access channels[J]. IEEE Trans Info Theory, 1986, 32(1): 85-96.
- [3] ERGUN C, HACIOGLU K. Multiuser detection using a genetic algorithm in CDMA communications systems[J]. IEEE Trans Commun, 2000, 48(8): 1374-1383.
- [4] ABEDI S, TAFAZOLLI R. Genetically modified multiuser detection for code division multiple access systems[J]. IEEE JSAC, 2002, 20(2): 463-473.
- [5] LIM H S, 书馆 RAO M V, TAN A WC, et al. Multiuser Detection for DS-SS systems using evolutionary programming[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(3): 101-103.
- [6] KENNEDY J, EBERHART R C. A discrete binary version of the particle swarm optimization algorithm[A]. Proceedings of the World Multiconference on Systems, Cybernetics and Informatics[C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1997: 4104-4109. (编辑 姚向红)

(上接第1204页)

- [25] PALLERLA S, CHAMBERS R P. Reactor development for biodegradation of pentachlorophenol[J]. Catalysis Today, 1998, 40: 103-111.
- [26] FEIJOO G, DOSORETZ C, LEMA J M. Production of lignin peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium* in a packed bed bioreactor operated in a semicontinuous mode[J]. J Biotechnol, 1995, 40: 247-253.
- [27] MOREIRA M T, PALMA C, FEIJOO G, et al. Strategies for the continuous production of ligninolytic enzymes in fixed and fluidised bed bioreactors[J]. J Biotechnol, 1998, 66: 27-39.
- [28] MIELGO I, MOREIRA M T, FEIJOO G, et al. A packed-bed fungal bioreactor for the continuous decolorisation of azo-dyes (Orange II) [J]. J Biotechnol, 2001, 89(2-3): 99-106.
- [29] LOPEZ C, MOREIRA M T, FEIJOO G, et al. Dye decolorization by manganese peroxidase in an enzymatic membrane bioreactor [J]. Biotechnology Progress, 2004, 20(1): 74-81.
- [30] 黄民生, 吴苑, 黄昇. 白腐真菌生物膜反应器

处理染料生产废水实验研究[J]. 上海环境科学, 2003, 22(7): 451-455.

- [31] 王永华, 黄民生, 丁珉. 白腐真菌煤渣生物膜反应器对染料废水的脱色试验研究[J]. 工业用水与废水, 2000, 31(6): 25-28.
- [32] LEIDIG E, PRUSSE U, VORLOP K D, et al. Biotransformation of Poly R-478 by continuous cultures of PVAL-encapsulated *Trametes versicolor* under non-sterile conditions[J]. Bioprocess Eng, 1999, 21: 5-12.
- [33] LIBRA J A, BORCHERT M, BANIT S. Competition strategies for the decolorization of a textile-reactive dye with the white-rot fungi *Trametes versicolor* under non-sterile conditions[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2003, 82(6): 736-744.
- [34] GAO Dawen, WEN Xianghua, QIAN Yi. Decolorization of reactive brilliant red K-2BP with the white rot fungi under non-sterile conditions[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(9): 981-982.

(编辑 姚向红)