

任大军, 颜克亮, 刘飞虎, 等. 2007 不同共代谢基质对白腐菌降解吲哚的作用研究 [J]. 环境科学学报, 27(2): 206- 212

Ren D J Yan K L Liu F H, et al. 2007. The study on effects of co-metabolism substrates on the biodegradation of indole by white rot fungus [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27(2): 206- 212

不同共代谢基质对白腐菌降解吲哚的作用研究

任大军¹, 颜克亮², 刘飞虎¹, 张晓昱², 陆晓华^{1,*}

¹ 华中科技大学环境科学研究所, 武汉 430074

² 华中科技大学生命科学与技术学院, 武汉 430074

收稿日期: 2006-03-09 修回日期: 2006-11-30 录用日期: 2006-12-21

摘要: 选用氨氮、苯酚和喹啉作为吲哚的共代谢基质, 通过白腐菌 BP 对共基质体系的降解研究了白腐菌在秸秆滤出液培养基中对不同共基质体系的代谢过程, 并进行了动力学分析, 考察了不同共代谢基质物质对白腐菌漆酶分泌和吲哚降解的影响。结果显示, 不同降解体系中的白腐菌都可去除 99% 以上的吲哚。充分的氮源可提高白腐菌的活性和漆酶酶活的峰值; 共基质苯酚和喹啉可以增加白腐菌漆酶产量, 为吲哚的降解提供较多的电子, 同时苯酚和喹啉也能得到较高的去除。在秸秆滤出液中, 白腐菌在 pH 为 6~8 之间对吲哚都具有较强的降解能力。吲哚在白腐菌的代谢过程中, 可能首先在吡啶环的 2 和 3 位发生一步羧基化。

关键词: 白腐菌; 吲哚; 共基质; 漆酶酶活

文章编号: 0253-2468(2007)02-0206-07 中图分类号: X172 文献标识码: A

The study on effects of co-metabolism substrates on the biodegradation of indole by white rot fungus

REN Da jun¹, YAN K eliang², LIU Feihu¹, ZHANG X iaoyu², LU X iaohua^{1,*}

¹ Environmental Science Research Institute, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074

² School of Life Science & Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074

Received 9 March 2006 received in revised form 30 November 2006 accepted 21 December 2006

Abstract The NH₄⁺-N, phenol and quinoline were selected as co-metabolism substrates of indole. The metabolism process and kinetic analysis of the different co-substrate systems degraded by white rot fungi in the culture medium of straw leaching liquid were investigated by the white rot fungus (BP) on the degradation of the co-substrate systems. The effects of the different co-substrates on the production of laccase and the degradation process of indole were also researched. The results showed that more than 99% of indole was removed by white rot fungi in the different degradation systems. The activity of white rot fungi and the peak value of laccase activity could be improved by the ample nitrogen sources. Since phenol and quinoline were added into the indole degradation process, more laccase of white rot fungi was produced. Therefore, more electrons were provided for the degradation of indole. Meanwhile, phenol and quinoline could be degraded efficiently by white rot fungi. The optimized pH was 6~8 for the degradation of indole with white rot fungus (BP) in the culture medium of straw leaching liquid. A one-step of hydroxylation could most possibly occur at 2 and 3 position of the N-heterocyclic (pyrrole) ring in the initial degradation process of indole.

Keywords white rot fungus; indole; co-substrate; the activity of laccase

1 引言 (Introduction)

随着工业的快速发展, 产生了大量的有毒有害难降解有机污染物。利用高效的生物技术来降解这些污染物, 正日益引起人们的关注。由于实际废水

来源不同, 往往出现多种有机污染物和无机污染物共存的情况。在共基质条件下, 研究微生物对某些特定有机污染物的降解行为, 可为实际工业废水的处理技术提供理论依据(全向春等, 2001)。吲哚是焦化废水中一种常见和典型的难降解有机污染物,

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目 (No. 104250)

Supported by the key project of Ministry of Education of China (No. 104250)

作者简介: 任大军 (1978—), 男, 博士研究生; * 通讯作者 (责任作者), E-mail kh@ hust.edu.cn

Biography REN Da jun (1978—), male, Ph.D. candidate; * Corresponding author, E-mail kh@ hust.edu.cn

它同时与焦化废水中酚类物质、氨氮、芳香族有机物、杂环及多环化合物共存(杨云龙等, 2001), 这大大增加了吲哚生物降解难度, 利用普通生物处理方法难以达到有效去除。

目前, 吲哚的生物降解研究主要集中在细菌和真菌类(主要是黑曲霉)微生物(Claus et al., 1983; Madson et al., 1989; Gu et al., 1991; Kamath et al., 1990), 但它们对吲哚的降解具有很强的专一性, 不适合复杂实际废水环境, 因此, 筛选和研究对底物具有广谱性、对环境具有极强适应性的降解菌, 已经成为急待解决的课题之一。王业耀等(2004)对白腐菌生化降解焦化废水进行了初步探讨, 结果表明, 白腐菌可以有效降解焦化废水中的COD物质。这得益于白腐菌不需经过特定污染物的预条件化、较细菌有动力学优势、对其他微生物具拮抗作用、降解作用发生在细胞外、降解底物具有非专一性等特点, 这些优势使白腐菌对各种有毒害、难降解、在环境中宿存的抑生物质具有广谱、高效、低耗、适用性强的生物降解能力。在前期研究工作中, 我们已经获得了白腐菌对单基质吲哚的降解特点(任大军等, 2006a), 结果表明, 白腐菌可高效的去除吲哚, 而有关共基质物质对吲哚降解过程和白腐菌漆酶分泌的影响的研究未见文献报道。本研究利用模拟焦化废水, 研究一株白腐菌BP对吲哚分别与氨氮、喹啉、苯酚共基质的降解, 以期为白腐菌处理焦化废水提供理论参考。

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 白腐菌的培养

菌株: 侧耳属(*Phleurotus ostreatus*)菌株, 编号BP, 由华中科技大学环境资源微生物技术研究室筛选、保存。将活化后的菌株接入250mL三角锥形瓶(100mL土豆蔗糖液体培养基)、于25°C、150r·m⁻¹摇床上培养4d, 再将该菌液转接至250mL三角锥形瓶, 在同样条件下扩大培养4d, 即可作为备用菌液。

2.2 培养基

土豆蔗糖液体培养基(PDY): 水(1000mL)、土豆(20%质量分数)、蔗糖(2%质量分数)

秸秆滤出液培养基: 水(1000mL)、玉米杆粉(3%质量分数)、麸皮(0.8%质量分数)、棉粕(0.12%质量分数)。

2.3 白腐菌对吲哚的降解试验

将10mL菌液(菌液浓度为2g·L⁻¹左右)接种

到装有100mL培养基的250mL三角烧瓶, 再分别取一定量吲哚、喹啉、苯酚和氨氮(用酒石酸铵配制)备用溶液, 使吲哚与喹啉、吲哚与苯酚、吲哚与氨氮3个共代谢体系中吲哚、喹啉、苯酚和氨氮的初始降解浓度分别为80mg·L⁻¹、80mg·L⁻¹、150mg·L⁻¹和340mg·L⁻¹, 将已接种菌液和底物的三角烧瓶放入摇床(150r·m⁻¹), 在25°C下进行降解试验。

2.4 检测项目及方法

吲哚、喹啉、苯酚浓度采用Hitachi公司的HPLC(高效液相色谱)测定, 配置Hitachi泵L-7100和Hitachi动态混合器, 并配以UV-vis L-7420型检测器和Hypersil C-18反相柱(250mm×4.6mm×5μm), 根据有机物特征吸收波峰的标准曲线测定(Mohan et al., 2003)。吲哚和苯酚浓度的测定条件: 流动相为甲醇和水(含1%醋酸)体积比为80:20流速为0.6mL·m⁻¹, 检测波长为270nm, 进样量为20μL; 喹啉浓度的测定条件: 流动相为甲醇和水(含1%醋酸)体积比为50:50流速为0.6mL·m⁻¹, 检测波长为313nm, 进样量为20μL。

LC-MS采用Agilent 1100LC/MS系统鉴定吲哚的降解中间产物。LC配置二极管阵列检测器和Zorbax SB-C18快速分析柱(2.1×30mm, 3.5M ictron, Agilent)。流动相包括甲醇(A)和水(B)(含1%醋酸)。吲哚测定条件: 采用梯度进样, 0~1mL 50% B; 1~5mL 5% B; 5~6mL 50% B; 流速为0.2mL·m⁻¹; 进样量为2.0μL, 检测波长为270nm。MS配置离子阱和APCI源, 采用正离子检测模式, 雾化氮气(99.99%)温度为400°C, 流量7mL·m⁻¹, 质量扫描范围50~500m/z。

漆酶活力的测定采用UV-754紫外分光光度计, 按Gold等人(1992)的方法进行测定。以每mL降解液每min吸光度值增加0.001为一个酶活单位U。

3 结果(Results)

3.1 白腐菌对不同降解体系中吲哚的去除效果及反应动力学分析

白腐菌对不同降解体系中吲哚的去除效果见图1。共基质体系在5d内可去除99%以上的吲哚; 而单基质吲哚降解体系在9d内可基本去除吲哚。共基质物质的加入为白腐菌提供更多用于吲哚降解的电子, 使得吲哚得到了更快的降解; 而降解环境的改变则可诱导白腐菌酶系的快速启动(邓耀杰

等, 1999).

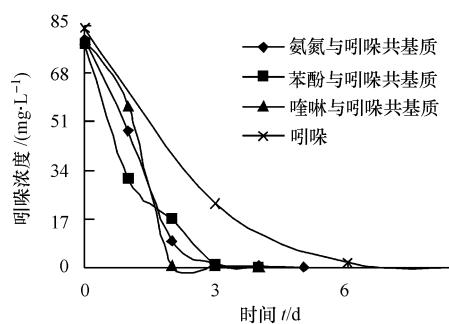


图 1 吲哚浓度随反应时间的变化

Fig. 1 Changes of indole concentrations versus reaction time

将吲哚在不同降解体系中的降解数据, 按一级反应动力学方程进行线性拟合(见表 1), 由表 1 可知, 共基质降解体系中白腐菌对吲哚的反应速率常数大于 1, 其中 $K_{(\text{喹啉与吲哚})} > K_{(\text{苯酚与吲哚})} > K_{(\text{氨氮与吲哚})}$; 而单基质降解体系的吲哚反应速率常数小于 1, 为 $0.686 \text{ mg L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$. 对于传统的焦化废水生物处理方法, 喹啉、苯酚、氨氮的存在会在一定程度上抑制微生物对吲哚的降解(何苗等, 1997), 而白腐菌能充分利用这几种共基质物质的协同作用, 吲哚不仅得到了更快的降解, 同时共基质物质也都有不同程度的去除.

表 1 不同吲哚降解体系反应动力学结果

Table 1 Kinetic results of different indole biodegradation systems

吲哚降解体系	反应动力学方程	反应速率常数 $K / (\text{mg L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$	可决系数 R^2
吲哚	$C = -0.686t + 0.774$	0.686	0.985
氨氮与吲哚共基质	$C = -1.323t + 1.617$	1.323	0.942
苯酚与吲哚共基质	$C = -1.518t + 2.035$	1.518	0.941
喹啉与吲哚共基质	$C = -2.235t + 2.826$	2.235	0.944

3.2 共基质物质对白腐菌漆酶分泌和吲哚降解的影响

白腐菌主要分泌 3 种降解酶, 即木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和漆酶. 有些白腐菌能同时分泌 3 种酶, 但有些白腐菌只分泌其中 1 种或 2 种酶. 白腐菌 *Pleurotus ostreatus* (BP) 以产漆酶为主, 漆酶是 1 种含铜的多酚氧化酶 (*p*-diphenol oxidase, EC 1.10.3.2), 它可以催化氧化酚类化合物脱去羟基上的电子或质子, 形成自由基, 导致酚类及木素类化合物裂解, 同时分子氧被还原为水 (Johannes, 1998). 漆酶在吲哚的降解过程中起着重要作用, 漆酶活力与吲哚的降解过程有着较好的相关性(任大军等, 2006a).

由图 2 可知, 吲哚共基质体系的漆酶活力峰值高于吲哚单基质体系, 且可较快达到酶活峰值. 氨氮与吲哚共基质体系中, 氨氮的引入可为白腐菌提供充分的氮源, 在此条件下白腐菌具有更强的活性, 漆酶活力能达到更高的峰值(喻国策等, 2003). 目前已发现, 数量众多的酚类都可被白腐菌降解(周贤淘等, 2002), 酚类物质可以增加白腐菌的漆酶产量; 漆酶在没有 H_2O_2 和其它次级代谢产物存在下, 只要存在溶解氧就可直接氧化酚类底物(韩晓磊等, 2005), 而苯酚与吲哚共基质体系中, 酚类物质——苯酚为白腐菌分泌漆酶提供了优越的条件.

对于喹啉与吲哚共基质体系, 喹啉的引入促进了白腐菌漆酶的分泌, 这主要是喹啉的代谢中间产物——羟基喹啉类物质可作为白腐菌漆酶分泌的诱导剂(任大军等, 2006b).

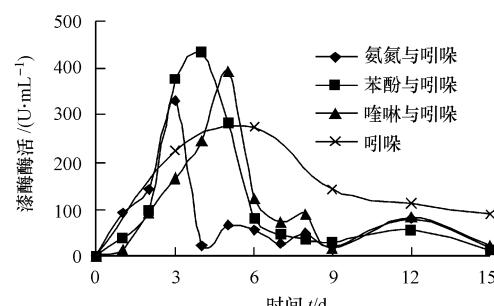


图 2 不同降解体系中白腐菌漆酶活力随反应时间的变化

Fig. 2 Changes of laccase activity of white rot fungi versus reaction time in different degradation systems

由图 3 知, 氨氮与吲哚共基质体系中, 前 3d 氨氮与吲哚保持同步去除; 氨氮在达到最低值后开始增加, 这可能是由于吲哚结构中的 N 转化为了游离态氨氮. 由图 4 知, 共代谢基质苯酚和底物吲哚的浓度随实验的进行不断下降, 并在第 5d 趋于零, 实验开始阶段苯酚和吲哚浓度下降都较快, 说明白腐菌能利用苯酚作为共代谢基质, 为吲哚的降解提供较多的电子. 由图 5 可知, 在喹啉与吲哚共基质体系

中, 吲哚降解非常迅速, 在第 2d 就有 99% 以上的吲哚被去除; 同时喹啉经过 15d 也得到了较高的去除, 对比其它 2 个共基质体系, 喹啉的存在并没有抑制白腐菌对吲哚的降解, 喹啉促进了白腐菌对吲哚的代谢, 使得吲哚的反应速率常数大于 2(见表 1)。

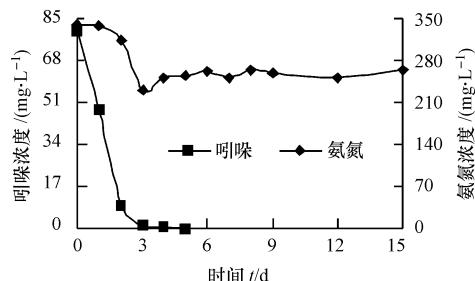


图 3 氨氮与吲哚共基质体系中各物质浓度随反应时间的变化

Fig. 3 Changes of different substrate concentrations in the $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and indole co-substrate system versus reaction time

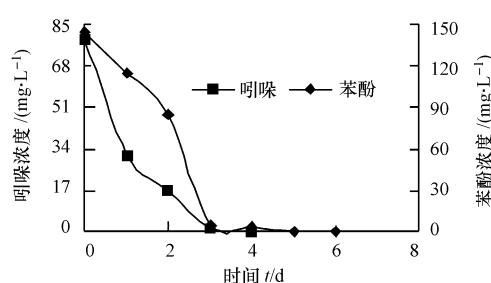


图 4 苯酚与吲哚共基质体系中各物质浓度随反应时间的变化

Fig. 4 Changes of different substrate concentrations in the phenol and indole co-substrate system versus reaction time

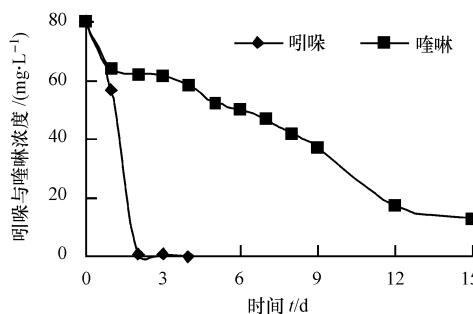


图 5 喹啉与吲哚共基质体系中各物质浓度随反应时间的变化

Fig. 5 Changes of different substrate concentrations in the quinoline and indole co-substrate system versus reaction time

3.3 降解体系 pH 值变化

降解体系的初始 pH 值是由培养基和各降解体

系决定的, 由图 6 可知, 单基质吲哚降解体系的 pH 值始终保持在 7 以下 ($6.15 \sim 6.80$), 而共基质降解体系的 pH 值分别保持在 $6.45 \sim 7.76$ (氨氮与吲哚)、 $5.50 \sim 7.94$ (苯酚与吲哚)、 $5.78 \sim 7.72$ (喹啉与吲哚)范围内。喹啉与吲哚共基质(苯酚与吲哚共基质)降解体系中, 第 4d pH 值突然下降, 这与吲哚和苯酚的完全降解及它们的中间产物有关, 同时秸秆滤出液培养基中的纤维素类物质的降解产物芳香酸类物质的累积也起着重要作用(付时雨等, 1998); 氨氮与吲哚共基质降解体系中, 在第 3d 氨氮浓度趋于稳定后, 它与芳香酸类物质结合形成比较稳定的缓冲体系。白腐菌在降解过程中, 有调节 pH 值的能力(Swamy *et al.*, 1999; Tekere *et al.*, 2001), 从图中可以看出, 在秸秆滤出液中, 白腐菌在 6~8 之间都具有较强的降解能力。

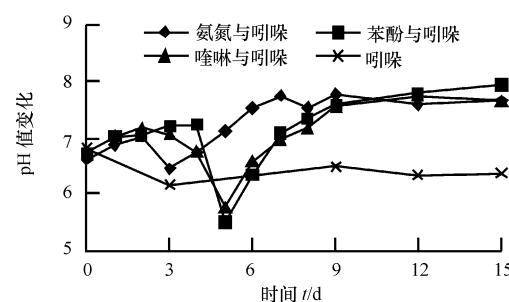


图 6 pH 值随反应时间的变化

Fig. 6 Changes of pH in the biodegradation process versus reaction time

3.4 吲哚降解途径分析

白腐菌对共基质降解体系的紫外扫描图谱见图 7。在 $260 \sim 280\text{ nm}$ 处的紫外吸收峰值不断下降显示在整个白腐菌降解过程中吲哚浓度持续降低, 同时在 $230 \sim 245\text{ nm}$ 和 300 nm 处有新峰出现, 表明有吲哚的中间降解产物产生, 也可能是吲哚的聚合物(Rajendra *et al.*, 1998)。

为了确定吲哚的降解途径, 采用 LC-MS 联用技术鉴定吲哚的中间产物(见图 8)。通过 HPLC 分析可知, 在吲哚降解过程中, 吲哚的出峰时间为 6.5 min (图 8a)。图 8b 显示, 氨氮与吲哚共基质体系中吲哚经白腐菌处理 5d 后吲哚峰消失, 在 4.4 min 和 5.2 min 处有 2 个明显的新峰出现。

在 MS 分析中, 有 2 个明显的离子峰(质荷 m/z 为 165 和 146)。 m/z 为 165 处的物质可能是化合物(见图 8b), 而 m/z 为 146 处的物质可能是靛红。根据以上分析可知, 吲哚在白腐菌的氧化作用

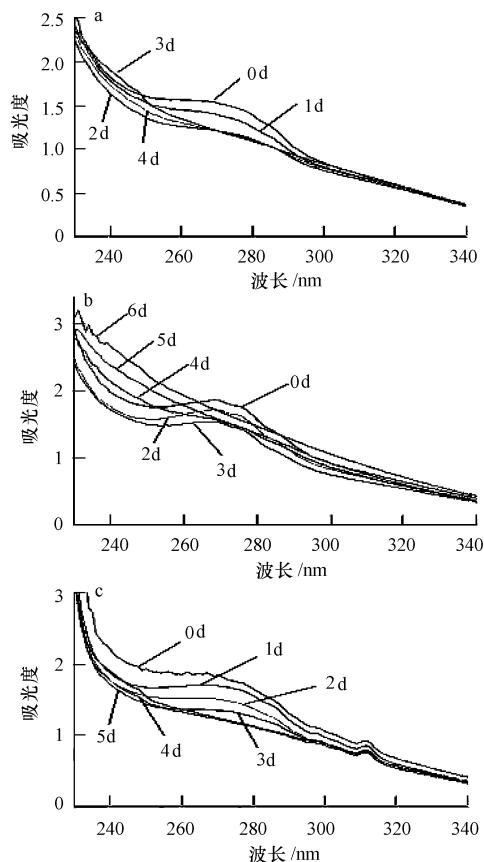


图 7 不同共基质体系的 UV 扫描图 (a 氨氮与吲哚共基质体系; b 苯酚与吲哚共基质体系; c 喹啉与吲哚共基质体系, 313 nm 处的谱峰为喹啉)

Fig. 7 UV spectra of different co-substrate systems (a the NH_4^+ -N and indole co substrate system; b the phenol and indole co substrate system; c the quinoline and indole co substrate system, the peak of quinoline is at 313 nm)

下的初始降解途径见图 9, 可能首先在吡啶环的 2 和 3 位发生一步羰基化, 然后在 2 和 3 位之间断裂开环。

4 讨论 (Discussion)

共基质氨氮、苯酚和喹啉的存在都对吲哚的降解起到一定的促进作用。王佳玲等 (1997) 研究认为, 在富氮培养基中菌体分泌胞外蛋白旺盛, 其中漆酶表现出较高的活力; 菌株 BP 以产漆酶为主, 高浓度氨氮共基质的引入为白腐菌提供了富氮环境, 从而激发了白腐菌漆酶的分泌和活性, 使吲哚的生物降解速率提高。而共基质苯酚在整个降解过程中所充当的作用是白腐菌漆酶分泌的诱导剂。研究表明, 结构和木素有关的低分子芳香化合物或木素降解的碎片化合物, 可作为漆酶的诱导剂提高酶活,

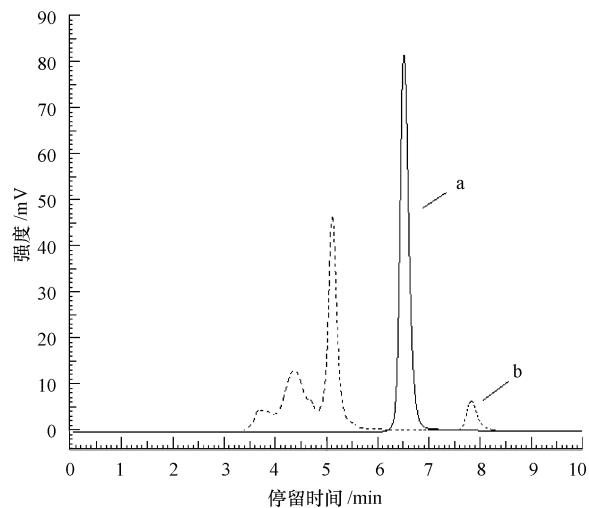


图 8 吲哚的 HPLC 谱图 (a 吲哚空白样; b 氨氮与吲哚共基质体系中吲哚经白腐菌处理 5d)

Fig. 8 HPLC spectra of indole (a the blank sample of indole b indole degraded by white rot fungi in the $\text{N}-\text{NH}_3$ and indole co substrate system after 5 d)

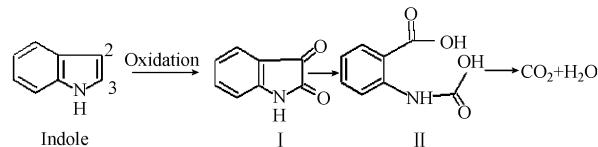


图 9 白腐菌对吲哚的初始降解途径

Fig. 9 Initial degradation pathway of indole by white rot fungi

这些物质如香豆酸、香草酸、藜芦醇、愈疮木酚、紫丁香醛、苄醇、甲苯胺、二甲苯胺, 其结构上的共同特征是芳核上连有一-OH 或 -NH₂ 基团 (Muñoz et al., 1997), 而苯酚结构上也连有一-OH。此外, 苯酚的引入诱发了白腐菌对吲哚的共代谢降解方式, 使吲哚的生化降解速度得到有效提高。喹啉是一种毒性较大的物质, 它与吲哚的结构、性质相类似, 都属于难降解有机物, 它的引入并没有抑制白腐菌对吲哚的降解, 这是因为白腐菌对有机污染物进行的是细胞外代谢, 白腐菌不易受到有毒物质的侵害, 它对毒性较大的污染物有强的耐受力, 喹啉在白腐菌培养过程中也得到了降解, 通常它的初步降解产物是 2-羟基喹啉 (Wang et al., 2002), -OH 的出现也提高了白腐菌的漆酶酶活, 并与吲哚产生共代谢, 白腐菌对吲哚的降解速度得到显著提高。

Claus 等 (1983) 指出, 在好氧条件下, 吲哚的降解过程通常分二步羰基化反应, 分别发生在 2 和 3 位上, 形成氧化吲哚和靛红, 而后在 2 和 3 位之间发

生断裂, 直至矿化。Kamath 等(1990)的研究显示, 黑曲酶(*Aspergillus niger*)的降解是一步羰基化然后芳环断裂, 生成 N-羰基-氨基苯甲酸。这些结果表明, 细菌和真菌的吲哚降解途径有明显的差异。在本研究中, 吲哚的白腐菌生物代谢过程与黑曲酶类似, 可能在吡啶环的 2 和 3 位发生一步羰基化。

5 结论 (Conclusions)

1) 白腐菌在不同降解体系中对吲哚的去除率为 99%以上; 氨氮、苯酚和喹啉共基质的加入可促进吲哚的降解和白腐菌漆酶的分泌, 吲哚降解速率常数 $K_{(\text{喹啉与吲哚})} > K_{(\text{苯酚与吲哚})} > K_{(\text{氨氮与吲哚})} > K_{(\text{吲哚})}$ 。

2) 充分的氮源可提高白腐菌的活性和酶活的峰值; 苯酚和喹啉可以增加白腐菌漆酶产量, 为吲哚的降解提供较多的电子, 同时苯酚和喹啉也能得到较高的去除。

3) 降解体系 pH 值的变化是与降解产物的出现和白腐菌的调节有关的; 在秸秆滤出液中, 白腐菌在 pH = 6~8 之间对吲哚都具有较强的降解能力。

4) 吲哚在白腐菌的代谢过程中, 可能首先在吡啶环的 2 和 3 位发生一步羰基化, 然后在 2 和 3 位之间断裂开环。

致谢: 试验过程中研究生吴婵、本科生刘延杰承担了部分 HPLC 测试和取样工作, 研究生袁松虎协助进行吲哚中间产物鉴定, 在此一并感谢!

通讯作者简介: 陆晓华(1946—), 女, 教授(博士生导师)。主要研究方向为污染控制化学、环境监测技术和水污染控制工程等。

References

- Claus G, Kutzner H J. 1983. Degradation of indole by *A. lcaligenes* sp [J]. *Syst Appl Microbiol* 4: 169—180.
- Deng Y J, Lin L, Zhan H Y. 1999. Mechanism and degradation of aromatic compounds by white rot fungus [J]. *Environmental Science & Technology*, 86(3): 8—12 (in Chinese).
- Fu S Y, Yu H S. 1998. Investigations related to biodegradation of lignin in rice straw by *Panus conchatus*. Characterization of aromatic acids in low-molecular-weight fraction of the lignin degradation products [J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 6(4): 50—55 (in Chinese).
- Gold M H, Wariishi H, Bourbonnaia R, et al. 1992. Demethylation Delignification of Kraft Pulp by *Trametes Versicolor* Laccase in the Presence of 2, 2-azinobis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate) [J]. *Appl Microbiol Biotechnol* 36: 823—827.
- Gu J D, Berry D F. 1991. Degradation of substituted indoles by an indole-degrading methanogenic consortium [J]. *Appl Environ Microbiol* 57: 2622—2627.
- Han X L, Yan L H, Zhou S F. 2005. The influences on the production and activity of laccase—a review [J]. *Chemistry & Biotechnology* 7: 10—13 (in Chinese).
- He M, Zhang X J, Qu F P, et al. 1997. Study on inhibitory characteristics of refractory organics [J]. *Environmental Science* 18(3): 21—23 (in Chinese).
- Johannes P J. 1998. Oxidation acenaphthene and acenaphthylene by laccase of *Trametes versicolor* in a laccase-mediated system [J]. *J Biotechnol* 61: 151—156.
- Kamath A V, Vadivathan C S. 1990. New pathway for the biodegradation of indole in *Aspergillus niger* [J]. *Appl Environ Microbiol* 56: 275—280.
- Madson E L, Bollag J M. 1989. Pathway of indole metabolism by denitrifying microbial community [J]. *Arch Microbiol* 151: 71—76.
- Mohan S, Sistla Gurni R, et al. 2003. Microbial degradation of pyridine using *Pseudomonas* sp. and isolation of plasmid responsible for degradation [J]. *Waste Management* 23: 167—171.
- Munoz C, Guillen F, Martinez A T. 1997. Induction and characterization of laccase in the ligninolytic fungus *Platynotus eryngii* [J]. *Curr Microbiol* 34: 1—5.
- Quan X C, Wang J L, Qi Y, et al. 2001. Biodegradation kinetics of a mixture containing quinoline and glucose by *Burkholderia pickettii* strain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* 21(4): 416—419 (in Chinese).
- Rajendra N G, Neeraj K, Naveen K S. 1998. Oxidation chemistry and biochemistry of indole and effect of its oxidation product in Abino Mine [J]. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 45: 47—53.
- Ren D J, Zhang X Y, Yan K L, et al. 2006a. Degradation of indole in wastewater from coking plants by white rot fungi [J]. *J of Huazhong Univ of Sci & Tech*, 34(5): 121—124 (in Chinese).
- Ren D J, Zhang X Y, Yan K L, et al. 2006b. Study on degradation of quinoline in coking plants wastewater using white rot fungi [J]. *Environmental Protection Science* 32(1): 20—23 (in Chinese).
- Swamy J, Ramsay J A. 1999. The evolution of white rot fungi in the decoloration of textile dyes [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 24: 130—137.
- Tekere M, et al. 2001. Growth dye degradation and ligninolytic activity studies Zimbabwean white rot fungi [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 28: 130—137.
- Wang J L, Quan X C, Han L P, et al. 2002. Microbial degradation of quinoline by immobilized cells of *Burkholderia pickettii* [J]. *Water Research* 36: 2288—2296.
- Wang J L, Fu S Y, Yu H S, et al. 1997. Influences of nitrogen concentration and aromatic compounds on production of ligninolytic enzymes by *Panus conchatus* [J]. *Journal of Cellulose Science and Technology*, 5(4): 25—32 (in Chinese).
- Wang Y Y, Yuan Y X, Tian R S. 2004. Study on the biodegradation of

coke plant wastewater by white rot fungus [J]. Industrial Water Treatment, 24(2): 26—29 (in Chinese)

Yang Y L, Bai X P. 2001 Technologies and advances in the research on coke plant wastewater treatment [J]. Industrial Water & Wastewater, 32(3): 8—10 (in Chinese)

Yu G C, Wen X H, Qi Y, et al. 2003 Formation of the ligninolytic enzymes by *Phanerochaete chrysosporium* under various ammonium nitrogen concentrations [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 23(6): 802—806 (in Chinese)

Zhou X T, Wu J, Lin L. 2002 Biodegradation pathway of aromatic compounds by white rot fungus [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 3(12): 1—8 (in Chinese)

中文参考文献:

邓耀杰, 林鹿, 詹怀宇. 1999 白腐菌对芳香化合物的降解及其机制 [J]. 环境科学与技术, 86(3): 8—12

付时雨, 余惠生. 1998 白腐菌 *Panus conchatus* 降解稻草木素机理研究(三)木素降解产物低分子部分芳香酸类化合物的结构特征 [J]. 纤维素科学与技术, 6(4): 50—55

韩晓磊, 严莲荷, 周申范. 2005 漆酶分泌及其活性影响因素综述 [J]. 化学与生物工程, 7: 10—13

何苗, 张晓健, 龚福平等. 1997 难降解有机物生物抑制特性的研究 [J]. 环境科学, 18(3), 21—23

全向春, 王建龙, 钱易等. 2001 噻吩与葡萄糖共基质条件下生物降解的动力学分析 [J]. 环境科学学报, 21(4): 416—419

任大军, 张晓昱, 颜克亮等. 2006a 白腐菌对焦化废水中吲哚的降解及其机理 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 34(5): 121—124

任大军, 张晓昱, 颜克亮等. 2006b 白腐菌对焦化废水中噻吩的降解及机理研究 [J]. 环境保护科学, 32(1): 20—23

王佳玲, 付时雨, 余惠生等. 1997 氮源浓度和芳香化合物对白腐菌 *Panus conchatus* 产木素降解酶的影响 [J]. 纤维素科学与技术, 5(4): 25—32

王业耀, 袁彦肖, 田仁生. 2004 白腐真菌降解焦化废水的试验研究 [J]. 工业水处理, 24(2): 26—29

杨云龙, 白晓平. 2001 焦化废水的处理技术与进展 [J]. 工业用水与废水, 32(3): 8—10

喻国策, 文湘华, 钱易等. 2003 黄孢原毛平革菌在多种氨基浓度下木质素降解酶的产生 [J]. 环境科学学报, 23(6): 802—806

周贤淘, 吴娟, 林鹿. 2002 白腐菌对芳香族化合物的降解途径 [J]. 环境污染治理技术与设备, 3(12): 1—8