

文章编号: 1005- 8893 (2004) 03- 0050- 06

酶在废物处理中的潜在作用^{*}

李慧蓉

(江苏工业学院 环境与安全工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 介绍固态、液态和有害废物的酶促反应处理系统的进展, 报道各种植物及微生物的酶类在废物处理应用领域的重要作用。酶可以作用于特定的难降解污染物, 通过产生沉淀或转化的方式将它们去除。酶还可以改变废物的性质, 或使其更易处理, 或将废物材料转变为有价值的产品。强调今后应努力研究的方面, 包括反应副产物的鉴定、反应产物的处置及酶法处理费用的降低等。

关键词: 酶; 酶促反应; 污染物; 废物处理

中图分类号: Q 93; X 17

文献标识码: A

多数废物处理工艺是以物理化学或生物处理为特征的。酶法处理则介于这两种传统工艺之间。酶法处理的潜在优点包括: 适用于生物难降解化合物的处理, 高低浓度污染物时均可运行, 没有冲击负荷效应, 无因生物量积累所引起的反应滞后, 污泥量减少, 控制过程简易^[1, 2]。

本文从特定废物的种类和来源入手, 评论废物处理领域的酶学研究, 并讨论酶在未来大规模应用方面的潜力。

1 酚类污染物和相关化合物

芳香族化合物, 包括酚类及芳香胺, 构成了污染物的主要类别。很多工业废物中, 都发现这类物质。大部分芳香族化合物是有毒的, 必须在排放到环境中以前加以处理清除。多种酶可以有效地进攻酚类化合物。

1.1 过氧化物酶

许多微生物和植物产生过氧化物酶这类氧化还原酶。它们能催化多种反应, 但都需要象 H_2O_2 这样的过氧化物来激活。

1.1.1 辣根过氧化物酶

在酶法废水处理的新领域里, 辣根过氧化物酶

(HRP) 无疑是研究最多的酶之一。一旦被 H_2O_2 所激活, HRP 能催化包括酚、联二酚、苯胺、联苯胺及相关化合物在内的各种有毒芳香族化合物的氧化。HRP 能在较宽的 pH 和温度范围内保持活性, 所以特别适合于废水处理^[3]。

包括苯胺、喹啉和象联苯胺、萘胺这样的致癌剂等污染物, 已在实验室里被证明可用 HRP 进行处理。另外, HRP 还能通过诱导形成混合聚合物的方式产生更易去除的化合物, 使某些难去除的污染物 (包括非 HRP 底物) 发生共沉淀。这一现象对于通常含有多种不同污染物的废水具有重要的实际意义。如通过与酚共沉淀的方法可以从溶液从去除多氯联苯就是一个实例。

1.1.2 木质素过氧化物酶

木质素过氧化物酶 (LiP), 它是白腐真菌细胞外酶系统的一部分。LiP 能矿化各种难降解的芳香族化合物, 并氧化大量的多环芳烃及酚类化合物。已证实 LiP 在木质素解聚中的作用。其机制非常类似于 HRP^[4]。

Aitken 和 Irvine 研究了 LiP 的稳定性, 它很大程度上影响酶在废水处理中应用的经济及技术可行性。发现 LiP 在低 pH 时很易失活。提高 pH, 增加酶浓度或将酶与其底物藜芦醇 VA 一起培育, 都

* 收稿日期: 2004- 03- 02

作者简介: 李慧蓉 (1947-), 女, 上海人, 教授, 从事环境生物技术研究。

可提高酶的稳定性。去除酚类物质的优化条件, 包括高酶浓度、4.0 以上的 pH 及控制加入 H_2O_2 ^[5]。Cornwell 等报道, 将酶固定在多孔陶瓷载体上对 LiP 的稳定性没有负面效应, 并且显示出对环境宿存的芳香族化合物的良好降解潜力。

1.1.3 其它过氧化物酶

从真菌 *Caldariomyces fumago* 得到的氯过氧化物酶 (CPO) 能氧化酚类化合物。另外, 它能催化某些氧转移反应, 如将乙醇氧化成乙醛或氧化氯化物离子。

白腐真菌产生的锰过氧化物酶 (MnP) 能催化一些单芳香族酚类和芳香族染料的氧化, 但是反应依赖于二价 Mn 和某类缓冲成分的同时存在。酶对高浓度 Mn 的需求限制了它在废水处理应用中的可行性^[6]。

最近有报道用来自微生物 *Coprinus macrorrhizus* 的过氧化物酶代替 HRP 去除废水中的芳香族化合物。尽管这种酶更易失活, 但在催化相同的反应中, 其性能却比 HRP 更好。

1.1.4 植物材料的利用

Adler 等用从番茄和凤眼兰中提取的过氧化物酶去聚合酚类物。他们还用植物的根进行去除污染物的活体试验。所提取的过氧化物酶能有效地去除愈创木酚, 植物的根还将酚类污染物沉积在根表面。植物的根可作为天然的固定化酶, 去除水及土壤系统中的酚类物质。根中过氧化物酶, 将酚类物质沉积在根表面, 从而最大程度上减少了植物对污染物的吸收。

Dec 和 Bollag 用从粉碎的辣根、土豆和白萝卜中提取的过氧化物酶, 处理质量浓度高达 850 mg/dm^3 的 2, 4- 二氯苯酚, 去除速度可以与纯化的 HRP 相比。以辣根为材料的最佳化研究表明: 去除速度依赖于反应混合体系的 pH、辣根切块的大小、辣根和 H_2O_2 的加量以及培育时间^[7]。

1.2 多酚氧化酶

多酚氧化酶代表着另一个类氧化还原酶, 分为酪氨酸酶和漆酶两类; 也被证明能催化酚类化合物的氧化反应。两类酶的活动都需要双分子氧的存在, 但是不需要辅酶。

1.2.1 酪氨酸酶

酪氨酸酶, 也称之为多酚氧化酶、酚酶或邻苯二酚氧化酶, 催化两个连续的反应: ①利用分子氧将单酚羟基化形成邻苯二酚; ②邻苯二酚双酚脱氢

形成醌。

Atlow 等通过先沉淀后去除的方法, 用酪氨酸酶成功地从工业废水中除去质量浓度 $0.01 \sim 1.0 \text{ g/dm}^3$ 的酚类物质。

但是 Wada 等则发现, 酪氨酸酶并不能使酚类物质聚合并产生沉淀, 而是观察到溶液颜色从无色向深棕色的变化。他们用壳多糖和脱乙酰壳多糖去吸附形成的反应物。尽管脱乙酰壳多糖在去除有色反应物方面要比壳多糖好, 但两者均能迅速吸附产物。Sun 等也成功地利用脱乙酰壳多糖去吸附酪氨酸酶产生的醌类物质及其它中间物。这类工作的主要优点是, 将水生有壳动物的废物转化成有用产品。Wada 等还用固定化酪氨酸酶, 去处理酚类, 2 h 内去除率达 100%; 即使在 10 次循环后, 固定化酪氨酸酶仍保持其活性^[8]。

1.2.2 漆酶

一些真菌产生漆酶 (Lac)。通过聚合反应, 漆酶能够降低酚类物的毒性。另外, 因为漆酶相对无专一性, 它能够诱导污染物酚类物与天然酚类物发生交联。实际上, 漆酶能将酚类物氧化成具有高度反应性的阴离子自由基^[9]。

在一项有关真菌 *Rhizoctonia praticola* 的漆酶的研究中, Bollag 等^[9]证明: 漆酶能对一些酚类物脱毒。根据初始酚类物消失的现象, 酚类物的脱毒似乎依赖于酶对这种化合物的转化能力。Bollag 等认为, 漆酶对含酚溶液的脱毒能力与被处理的特定化合物、酶的来源以及其它环境因子有关。

2 纸浆和造纸废物

2.1 过氧化物酶和漆酶

普遍采用的硫酸盐制浆法, 纸浆中残有 5% ~ 8% 的改性木质素。这些残余物造成了纸浆特殊的棕色, 工业上用氯和氯氧化物作为漂白剂去色。漂白工艺产生了深棕色的废水, 其中含有对环境构成危害的有毒致突变的氯化产物。大量的研究集中在利用微生物去处理漂白废水, 以后又对用酶 (如过氧化物酶和漆酶) 处理发生兴趣。

Ferrer 等报道了利用 HRP 和 LiP 对造纸废水进行脱色。两种酶都具有相当大的潜力, 而且酶的固定形式要比游离状态更有效。LiP 在漂白废水的脱色中有积极的作用, 其机理解释为: LiP 通过催化芳香单元氧化为能自发分解的阳离子基的方式降解木质素。

漆酶被认为是漂白废水处理的可能选择之一^[10]。Milstein 等报道, 漆酶能使低分子量的酚类发生聚合, 再通过与聚吡嗪反应和沉淀的方式, 促进酚类的去除。Royer 等提到, 真菌 *Coriolus versicolor* 的细胞内漆酶对废水脱色有作用。游离的酶只引起轻度的脱色, 而固定化酶的结果则好得多^[11, 12]。

2.2 纤维素水解酶

纤维素水解酶能用于处理纸浆制备和脱墨工艺所产生的污泥。Duff 等研究了将纸浆和造纸工艺所产生的高度纤维化的污泥转化为象乙醇这样的能源物质的可能性。每生产 1 t 纸浆要产生 60 kg 的初级污泥, 因此生产象乙醇这样的畅销产品, 是降低污泥处置量的一种有吸引力的途径。所用的酶是包括纤维二糖水解酶、纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶的混合体系。在另一项研究中, Duff 等关注的是: 将纤维再利用和脱墨工艺中所产生的低分子量纤维素物质转化成可发酵的糖。所用的酶并不受高墨含量的抑制, 表面活性剂的存在促进了酶促水解反应的速度, 特别是在反应的早期。

3 农药

常用处理方法有: 焚烧、化学法及填埋。但有严重的局限性: 成本高、形成有害副产物、化学药剂的处置、生物处理对冲击负荷的敏感性。

柏拉息昂水解酶对农药有去毒作用。许多细菌产生柏拉息昂水解酶, 包括 *Pseudomonas* 属、*Flavobacterium* 属和 *Streptomyces* 属的一些种^[13]。该酶能水解多种被最广泛使用的有机磷农药, 如甲基和乙基柏拉息昂、丰索磷、氯蜚硫磷和蝇毒磷。

已证明柏拉息昂水解酶能成功地水解蝇毒磷, 其水解速度比化学水解快得多。当酶量特定时, 柏拉息昂水解酶有选择地水解 Potasan (二乙氧基硫酸磷酸酯) 而保护蝇毒磷。这种方法延长了蝇毒磷的使用寿命, 并减少蝇毒磷废物的产生。在实验室试验中, 直至 45~50 °C 和 pH 为 5.5~10.0, 游离的柏拉息昂水解酶仍是稳定的; 45~50 °C 时, 固定化酶也是稳定的; 最佳 pH 大约 8.5。Murnecke 报道了固定在玻璃上的柏拉息昂水解酶对有机磷杀虫剂的成功水解。

4 氰化物废物

估计全世界每年要用 3 百万 t 氰化物, 包括化

学中间体、合成纤维、橡胶和药品的生产以及矿石浸提、煤炭加工和电镀工业。另外, 许多植物、微生物和昆虫在对其自身合成的某些化合物进行酶促水解时, 也释放 HCN。食品和饲料的生产废水也含有大量的氰化物, 氰化物是一种代谢抑制剂, 使人及其它生物致死。

4.1 氰化物酶

氰化物酶是一种新的酶制品, 可通过一步反应将工业废水中的氰化物转化为氨和甲酸。氰化物酶是从 *Alcaligenes denitrificans* (反硝化产碱杆菌) 的 G^- 分离菌中制取的。对氰化物的高度亲和力及稳定性, 能将氰化物降低到低于 0.02 mg/dm³ CN⁻ 水平。

氰化物酶的动力学遵循 Michaelis-Menten 方程。废水中常有的一般离子 (如 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、和 Ni^{2+}), 以及象乙酸、甲酰胺、乙酰胺及乙腈这样的有机物, 都不影响氰化物酶的活性。其最佳 pH 范围为 7.8~8.0; pH 高于 8.3 时活性显著且不可逆地丧失。

Basheer 等发展了一种扩散型平膜反应器 (FMR), 它相对于搅动池反应器和固定床反应器的构型而言具有一些独特的优点: 保护酶免遭干扰颗粒和大分子对固定化载体的摩擦及剪切破坏; 溶液中的氰化物通过半渗透膜扩散, 与膜内包埋的酶反应; 反应产物再通过膜扩散回到溶液中^[14]。

4.2 氰化物水合酶

氰化物水合酶, 也叫甲酰胺水解酶, 水解氰化物为甲酰胺。多种真菌能产生氰化物水合酶, 将真菌置于低浓度的氰化物中则可被诱导。Nazly 等报道, 氰化物水合酶被固定时更稳定, *Gloeosporora sorghi* 中得到的氰化物水合酶要比从 *Stemphylium loti* 的稳定得多。

5 食品加工废物

食品加工业是产生大量废物的主要工业之一。其它工业产生的废物一般是有毒的, 必须通过合适的处理工程将其无害化, 但食品加工业的废物能被转化为食品、饲料和具有附加值的非食品产品。因此, 最近提出的用酶法处理食品废物是有意义的^[15]。通过酶促反应, 加工生产高价值的副产品和治理食品废水, 从而减少食品工业废物, 一举两得。

5.1 蛋白酶

蛋白酶是一类水解酶, 被广泛用于鱼和肉的加工。蛋白酶能使废水中的蛋白质得到溶解, 产生对鱼或家畜有营养价值的可再利用的液体浓缩物或干固体物。

Dalev 报道了用来源于 *Bacillus subtilis* 的碱性蛋白酶处理禽类屠宰中的废弃羽毛。羽毛占禽类体重的 5%, 如果将其坚硬的角质结构彻底破坏, 得到的是可作为食品和饲料的高蛋白源。用 NaOH 预处理、机械粉碎和酶法水解后, 羽毛全部溶溶。终产物是一种蛋白质含量非常高的重质浅灰色粉状物, 主要作为饲料用。

Venugopal 等用海藻酸钙固定 *Bacillus megaterium*、*Pseudomonas marino-glutinosa* 和 *Acromonas hydrophilia* 细胞。用这些细胞分泌的细胞外蛋白酶去溶解鱼肉。固定化细胞在连续式反应器里比分批式反应器的产量高。

5.2 淀粉酶

淀粉酶是多糖水解酶, 被用于淀粉的同步糖化和发酵以及含淀粉的食品废水的处理。Shoemaker 报道, 淀粉酶可从大米加工废水中生产醇。淀粉酶还被用于活性污泥的处置来缩短处理时间。

Coleman 报道, α - 淀粉酶和葡糖淀粉酶可用于光可降解和生物可降解塑料的生产。所用的工艺涉及到将源于工业食品加工的奶酪乳清或土豆废物中淀粉材料转化为真正生物可降解的塑料。先用 α - 淀粉酶把长淀粉分子打破为较小的片段, 再用葡糖淀粉酶进攻小片段, 通过糖化产生葡萄糖 (90% 以上的淀粉转化成葡萄糖)。一种乳酸菌将葡萄糖发酵为乳酸, 最后将乳酸回收、纯化, 用于生产光可降解和生物可降解塑料。

5.3 其它酶

来自 *Clostridium thermosulfurogenes* 的果胶酯酶和源于 *Clostridium beijerinckii* 的果胶裂解酶, 可降解果胶。如用这些酶降解苹果渣 (一种食品加工废物) 生产丁酸。

用从酵母 *Candida norvegensis* 中得到的 L- 半乳糖酸内酯氧化酶, 将乳清里所含的乳糖水解产生的半乳糖转化为有价值的 L- 抗坏血酸。

乳糖酶也可被用于乳制品废物的加工。通过酶促反应从含有高浓度乳糖的固体物中分离到乳清蛋

白质浓缩物。对每年几十亿 kg 的乳清废物的有益处理对环境有积极作用。

来自 *Serratia marcescens* 的几丁质酶能降解几丁质。Cosio 等先将虾预处理以缩小体积; 经脱蛋白作用及脱矿质作用, 产生的几丁质物质易被几丁质酶生物转化为单体 N- 乙酰葡萄糖胺; 后者再作为生产单细胞蛋白的底物。

6 固体废物和污泥处理

过去十年, 对酶促方法水解纤维素的兴趣日益增大, 因为可将木质纤维素和纤维素废物转化为有用的能源物质。

通过对市政固体废物中有机组分中的纤维素进行酶促水解, 可生产糖和乙醇、丁醇。Clanet 等从 *Trichoderma reesei* CL847、*Penicillium* 品系 CLD20 和嗜热真菌 CL240 中获得水解酶, 用于厌氧发酵生产象丙酮-丁醇或有机酸。

Rivers 和 Emert 研究了酶促水解报纸及瓦楞卡纸板中各种参数对反应的影响。采用的是 *Trichoderma reesei* QM9414G 的纤维素酶系统, 其组成为: 内源葡聚糖酶、纤维二糖水解酶和纤维二糖酶。结果表明, 在木素纤维物对纤维素水解性酶的可利用性及敏感性中, 纤维素的结晶度和颗粒大小不是主要因子。

一些工作是有关用酶去改善污泥的脱水性能的。Thomas 等用一种含糖酶、脂酶和蛋白酶活性的酶制品去改进污泥的脱水性。酶的作用是引起水与结合大分子的断裂。酶量控制在 $2.5 \sim 5 \text{ mg/dm}^3$ 则产生较好的结果; 酶量的增加会导致亲水性产物, 反而影响脱水效果^[16]。

Hakulinen 在污泥脱水中利用纤维素酶、细菌溶菌酶。溶菌酶能改变污泥絮体的结构, 引起脱水率的急剧上升。

7 重金属的去除

很多工业及采矿业的废水和固体废弃物、市政污水污泥和土地填埋渗滤液中, 都可发现砷、铜、镉、铅和铬等这样的重金属污染物。

Macaskie 和 Dean 发展了一项新技术, 从工业废物中成功地去除镉、铅、铜、铀和锶。将 *Citrobacter* sp. 菌先预培养在以甘油-2-磷酸盐为唯一的磷源上, 菌细胞上形成一种结合磷酸盐, 当超过生长所需量时, 将释放无机磷酸盐。将含有重金属的溶液通过固定在聚乙酰胺胶体中菌细胞, 释放

的无机磷酸盐与金属结合,在细胞表面形成不溶性金属磷酸盐。金属去除率达到 90% 以上。细胞的最佳温度为 30 ℃, pH 5~9 之间磷酸盐相对稳定。现在认为玻璃及其它惰性载体是更好的固定材料。

白腐真菌的酶与重金属之间存在的相互作用,将促进真菌技术在重金属污染治理中潜力的开发和利用^[17]。

8 其它应用潜力

8.1 土壤去污染

Bollag 认为,在污染的土壤中加入漆酶可以促进异生物质结合和掺入进腐殖土里。*Trametes versicolor*、*Rhizoctonia praticola* 和其它真菌中的漆酶,用于促进各种氯化酚及芳胺与酚腐殖结构的氧化结合。这一方法的优点是对有害化合物的固定及脱毒。污染物与腐殖材料的结合,减少了作用于植物的污染物质,降低了污染物的毒性,并形成不溶性沉淀物而防止发生化学物渗漏。异生物质一旦整合到土壤中就稳定了。它们很少和逐步释放,不构成健康危害;释放的化合物或被矿化或通过自然过程结合到腐殖土上^[9]。

8.2 飞灰和土壤稳定

Khan 和 Sarker 试验了酶的加入对纯泥质土壤和土壤—飞灰混合物的强度及稳定性的作用。飞灰—高岭土混合物 (w (飞灰) = 5%) 中加入一种工业上可获得的酶产品“Perma-Zyme”,持续地提高了混合物的强度; w (酶) = 10% 时混合物的压缩强度增加 53%。

用酶去稳定土壤—飞灰,在解决土壤处置问题的同时增加土壤强度。煤燃烧残物中,飞灰占了 90% 的,估计美国一年约产生 650 万 t 飞灰。用酶固定飞灰要比其它工艺便宜。

8.3 表面活性剂的降解

表面活性剂是具有相当大极性的有机物,是去垢剂的基本组分。当洗发剂生产厂的高浓度废水进入市政污水系统时,表面活性剂会引起严重的污染并造成大量的泡沫。

Thomas 和 White^[18] 报道,固定化烷基硫酸酯酶能有效地降解质量浓度高达 750 mg/dm³ 表面活性剂。这种酶对初级烷基硫酸酯有专一性,能够彻底地降解纯的和工业级的烷基硫酸酯及烷基乙氧基

硫酸酯表面活性剂。烷基硫酸酯酶对于处理洗发剂生产厂废水中的各种表面活性剂是有很好的前途的。

9 讨 论

酶在各种废物处理中所表现出的潜力,和广泛的应用前景,引起相应领域工作者的高度关注,并提出了一些主要问题。

(1) 反应副产物:有时酶促反应产物可能比原初化合物的毒性更大,这就违背了利用酶的目的。因此,在实施一种特定的酶法处理之前,有必要对形成的产物的毒性进行研究。Aitken 等和 Massey 等研究了酶氧化酚类物质所产生的反应产物的致突变性。Massey 等试验了 CPO、HRP、LiP 和多酚氧化酶氧化酚类化合物的 17 种反应产物。通常没有观察到致突变产物的形成。但是 LiP 对硝基苯酚的氧化确实形成了突变产物, MnP 也有相同的作用。CPO 将氯离子氧化成一些有毒产物^[19]。

(2) 副产物的处置:如何处置在酶法处理中形成的象酚类沉淀物或重金属复合物这样的固体产物,是另一重要问题。假如能够对燃烧后产生的危险副产物实施有效控制或防止,则焚烧酚类沉淀物则可以进一步利用能量;土地填埋会产生泄漏,因此重金属复合物可能更难以对付。用来吸附酚类副产物的几丁质废弃物,也存在再处置问题。

(3) 处理成本:实施酶法处理的首要问题是成本问题。目前正被研究的酶是昂贵的,因为其分离、纯化和生产的成本很高。但是,这并不阻碍我们以更大的努力去开发最有希望的酶,去确定其使用的最佳条件。实际上,这样的研究结果将最终推动大规模低成本生产酶的工业发展。因为成本低,用植物材料直接代替纯化酶,是非常有意义。

(4) 其它考虑:酶的最佳选择,取决于酶的专一性、酶对辅助因子(如 H₂O₂ 或 O₂) 的需求、酶的活性及寿命等。当污染物浓度很低时,酶的专一性尤为重要。酶的专一性太广谱,可能会降低反应效率。要求廉价的辅助因子或完全不需要辅助因子的酶,显然是优先选择的。将酶固定在固体载体上可以明显改善酶的催化寿命。大多数情况下,固定化酶确要比游离酶更有效^[20]。

在一些情况下,酶并不一定有优势:当废物含高浓度的有机物或废物含多种多样的有问题的化学物质时,因需要的酶量过大而使酶法处理过于昂贵。另外,在处理常规的市政废水的活性污泥反应

器中加入酶, 似乎并不是非常有意义的, 因为必须相当大量地添加高成本的催化剂 (自然情况下则由细菌产生)。

参考文献:

- [1] Nicell J A, Al-Kassim L, Bewtra J K, et al. Wastewater Treatment by Enzyme Catalysed Polymerization and Precipitation [J]. Biodeterioration Abstracts, 1993, 7 (1): 1-8.
- [2] Aitken M D. Waste Treatment Applications of Enzymes: Opportunities and Obstacles [J]. The Chemical Engineering Journal, 1993, 52: B49-B58.
- [3] Nicell J A, Bewtra J K, Biswas N, et al. Enzyme Catalyzed Polymerization and Precipitation of Aromatic Compounds from Aqueous Solution [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1993, 20: 725-735.
- [4] Martínez A. Molecular Biology and Structure-Function of Lignin-Degrading Heme Peroxidases [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30: 425-444.
- [5] Hofrichter M. Review: Lignin Conversion by Manganese Peroxidase (MnP) [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 30: 454-466.
- [6] Aitken M D, Irvine R L. Stability Testing of Ligninase and Mn-Peroxidase from *Phanerochaete chrysosporium* [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1989, 34: 1251-1260.
- [7] Dec J, Bollag J-M. Use of Plant Material for the Decontamination of Water Polluted with Phenols [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, 44: 1132-1139.
- [8] Wada S, Ichikawa H, Tsumi K. Removal of Phenols from Wastewater by Soluble and Immobilized Tyrosinase [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1993, 42: 854-858.
- [9] Bollag J-M. Decontaminating Soil with Enzymes [J]. Environmental Science and Technology, 1992, 26: 1876-1881.
- [10] Grönqvist S, Buchert J, Rantanen K, et al. Activity of Laccase on Unbleached and Bleached Thermomechanical Pulp [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 32: 439-445.
- [11] Royer G, Yerushalmi L, Rouleau D, et al. Continuous Decolorization of Bleached Kraft Effluents by *Coriolus versicolor* on the form of Pellets [J]. Journal of Industrial Microbiology, 1991, 7: 269-278.
- [12] Durón N, Rosa M A, D'Annibale A, et al. Applications of Laccases and Tyrosinase (Phenoloxidases) Immobilized on Different Supports: a Review [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, 31: 907-931.
- [13] Smith J M, Payne G F, Lumpkin J A. Enzyme-Based Strategy for Toxic Waste Treatment and Waste Minimization [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1992, 39: 741-752.
- [14] Basheer S, Kut O M, Prenosil J E, et al. Development of an Enzyme Membrane Reactor for Treatment of Cyanide-Containing Wastewater from the Food Industry [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1993, 41: 465-473.
- [15] Blascheck H P. Approaches to Making the Food Processing Industry More Environmentally Friendly [J]. Trends in Food Science and Technology, 1992, 3: 107-110.
- [16] Thomas L, Jungschaffer G, Sprossler B. Improved Sludge Dewatering by Enzymatic Treatment [J]. Water Science and Technology, 1993, 28 (1): 189-192.
- [17] Baldrian P. Interactions of Heavy Metals with White-Rot Fungi [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 32: 78-91.
- [18] Thomas O R T, White G F. Immobilization of the Surfactant-Degrading Bacterium *Pseudomonas* C12B in Polyacrylamide Gel. III. Biodegradation Specificity for Raw Surfactants and Industrial Wastes [J]. Enzyme and Microbial Technology, 1991, 13: 338-343.
- [19] Massey I J, Aitken M D, Ball L M, et al. Mutagenicity Screening of Reaction Products from the Enzyme-Catalyzed Oxidation of Phenolic Pollutants [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1994, 11: 1743-1752.
- [20] 李慧蓉, 尹艳, 高云霞. 聚乙烯醇包埋黄孢原毛平革菌方法的探讨 [J]. 江苏工业学院学报, 2003, 15 (2): 5-8.

Potential Applications of Enzymes in Waste Treatment

LI Hui-rong

(Department of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: A review of research directed to developing enzymatic treatment systems for soil, liquid and hazardous waste was presented. A large number of enzymes from a variety of plants and microorganisms were reported to play an important role in waste treatment systems. Enzymes could act on specific recalcitrant pollutants to remove them by precipitation or transformation to other products. Enzymes also could change the characteristics of a given waste to render it more amenable to treatment or aid in converting waste material to value-added products. It was recommended that a number of issues be addressed in future research endeavors including the identification of reaction by-products, the disposal of reaction products and reduction of the cost of enzymatic treatment.

Key words: enzymes; enzymatic reaction; pollutants; waste treatment