

# 农业立体污染与生物修复技术进展

郭 萍, 蒋细良, 田云龙, 朱昌雄

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 农业立体污染是目前农业可持续发展中面临的严峻问题, 建立生态型的快速环境修复技术和方法是解决这一问题的根本出路。生物修复技术由于具有纯生态过程的显著优越性, 因此已成为环境保护技术的重要组成部分。生物修复技术包括微生物修复技术、植物修复技术和植物-微生物协同修复技术。简要评述了农业立体污染的概念、现状以及生物修复技术的特点和国内外发展现状及其在农业立体污染修复中的应用前景。

**关键词:** 生物修复技术; 农业立体污染; 微生物修复; 植物修复; 农药污染; 富营养化

中图分类号: X322

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2006)04-0019-05

## Advances in agricultural stereo-pollution and bio-remediation

GUO Ping, JIANG Xi-liang, TIAN Yun-long, ZHU Chang-xiong

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The stereo-pollution from agriculture production is a very serious problem facing the sustainable agricultural development at home and abroad. The feasible way is to set up the ecotypic environmental remediation technology and methods within a shorter period of time. The bio-remediation has become an important part of environmental protection technology because it's a whole ecotypic course and has more evident advantages than others in restoring the environment. The bio-remediation includes microbial remediation, plant remediation and microbial-plant remediation. The definition and present state of stereo-pollution in China, the characteristics and development situation of bio-remediation at home and abroad, and the prospect of application of bio-remediation are summarized in this paper.

**Key words:** bio-remediation technology; stereoscope agri-pollution; microorganism remediation; phyto-remediation; pesticide pollution; eutrophication

环境保护已成为当前国际关系、经贸合作中的一个极为重要的问题, 引起了联合国组织和世界各国的广泛关注。我国是世界上环境污染最为严重的国家之一, 从城市到乡村, 我国的大气、河流、湖泊、海洋和土壤等均受到不同程度的污染, 其中农业生产引起的水、土壤、大气、生物体的立体污染问题直接威胁到人类的生存。本文就农业立体污染的概念、现状、生物修复的国内外研究现状与发展趋势等进行了简要概述。

## 1 农业环境污染的概念和现状

农业产生的污染主要来自于农作物种植过程中化肥、农药的过量施用和规模化养殖产生的畜禽粪便等。前者污染源分散广泛、没有明确位置, 泛称面源污染; 后者污染源明确, 称为点源污染。农业立体污染是指农业生产过程中面源污染、点源污染和温室气体排放所构成的水体—土壤—生物—大气的动

态污染。我国每年因不合理施肥使得超过 1 000 多万 t 的氮流失到农田之外, 直接经济损失约 300 亿元, 由于农药浪费造成的损失达到 150 多亿元以上。随着我国农业、农村经济的迅速发展和集约化程度的提高, 农业立体污染问题日益突出, 它不仅影响到农业生态安全、人类健康和农产品质量, 还影响到农民收入的提高和农村的可持续发展, 甚至还会影响到我国的环境外交和国际贸易。

农业污染和工业污染一样, 会造成河流、湖泊的污染及对生态系统的损害。我国将近一半的湖泊处于严重的富营养化状态, 这些区域的农业面源污染和人畜粪尿的排放是其主要原因。1997 年杭州湾一项研究表明, 海水中化学耗氧量(COD)来自畜禽粪便、化肥、工业和生活废水的无机氮分别为 35%、40% 和 15%, 总磷分别为 20%、65% 和 14%; 其次, 化肥尤其是氮肥的过量施用, 以氧化亚氮气体形式逸失的氮素破坏了大气平流层的臭氧层, 增加了到

收稿日期: 2005-09-30; 修回日期: 2006-02-16

作者简介: 郭萍(1967-), 女, 出站博士后, 副研究员, 主要研究方向为资源与环境, guoping@cjac.org.cn; 朱昌雄(1963-), 男, 硕士, 研究员, 从事微生物研究工作, 通讯联系人, 010-68919561, zhucx@cjac.org.cn。

达地面的紫外线强度。此外,农业面源污染对人类健康的影响也不容忽视。据调查,累积于饮用水源特别是井水中的化肥氮磷和农药对至少 13 个省份、数以百万计居民的健康构成威胁。如何在经济高速发展的同时控制环境污染,改善环境质量,是实现农业经济可持续发展亟待解决的重要问题,因此迫切需要生态型的快速环境修复技术和方法。

## 2 生物修复的特点和前景

环境修复技术包括物理方法、化学方法和生物方法三大类。生物修复是利用生物的生命代谢活动减少存在于环境中的有毒、有害物质的浓度或使其完全无害化,使受污染的环境能部分或完全恢复到原始状态的过程<sup>[1]</sup>。由于生物修复技术具有纯生态过程的显著优越性,从根本上体现了可持续发展的战略思想,因此生物修复技术已成为环境保护技术的重要组成部分。生物修复的两大主体是微生物和植物,而目前微生物是环境生物修复技术的主力军,另外少部分利用植物作为环境污染控制的生物。

### 2.1 微生物修复技术

微生物修复是利用一种或多种微生物来降解环境中的有机毒物,如石油烃类和有机磷、有机氯农药等,使这类物质变成无毒、无害物质,最终形成二氧化碳、水和氮气。利用生物技术处理污染物通常能一步到位,避免了污染物的多次转移<sup>[2]</sup>,可修复用其他方法难以处理的环境介质,使受污染的水、土壤资源等得以重新利用;微生物修复的另一大特点就是可通过优势菌群和微生态的调整来强化环境的自净

能力。因此,国外已将该类技术成功应用于土壤、地下水、河道和近海洋面的污染治理。

对土壤的微生物修复技术分为地面生物处理和原位生物修复 2 类。地面生物处理是将受污染的土壤挖掘出来,在地面建造的处理设施内进行生物处理,主要有地面堆肥和泥浆生物反应器处理等。原位生物修复是在基本不破坏土壤和地下水自然环境的条件下,将受污染的土壤和地下水原位进行修复。在原位生物修复技术中,一种途径是提供微生物生长所需要的营养,改善微生物生长的环境条件,从而大幅度提高野生微生物的数量和活性,提高其降解污染物的能力,这种途径称为生物强化修复;另一种途径是投加实验室培养的对污染物具有特殊亲和性的目标微生物,使其能够降解土壤和地下水中的污染物,称为生物接种修复。

底物强化微生物筛选法是实验室筛选目标微生物的常用手段。微生物经过一段时间的适应性对底物产生了较强的氧化能力,适应性的可能机制包括特定酶的诱导和抑制、基因突变产生新的代谢群体、有机体的选择性富集等<sup>[3]</sup>。底物强化微生物筛选法由于周期较长,难以同时降解多种底物,所以现在许多实验室采用分子生物技术构建具有所需目标特征的集合菌株<sup>[4]</sup>。但生物接种修复从实验室结果放大到环境应用中还需要考虑一些生态环境问题:如外源微生物在环境中是否能快速生长并具有较高的酶活性,外源微生物是否具有较强的与土著微生物生存生长的竞争能力,接种微生物是否无致病性且不产生有毒代谢物等<sup>[5]</sup>。

(上接第 18 页)

- [16] Shimada Y, Watanabe Y, Sugihara A, *et al.* Enzymatic alcoholysis for biodiesel fuel production and application of the reaction to oil processing [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2002, 17(3/4/5): 133 - 142.
- [17] Dossata V, Combes D, Martyb A. Continuous enzymatic transesterification of high oleic sunflower oil in a packed bed reactor: influence of the glycerol production [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 1999, 25(3/4/5): 194 - 200.
- [18] Du W, Xu Y, Liu D H, *et al.* Comparative study on lipase-catalyzed transformation of soybean oil for biodiesel production with different acyl acceptors [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2004, 30(3/4): 125 - 129.
- [19] Soumanou M M, Bornscheuer U T. Improvement in lipase-catalyzed synthesis of fatty acid methyl esters from sunflower oil [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2003, 33(1): 97 - 103.
- [20] Iso M, Chen B, Eguchi M, *et al.* Production of biodiesel fuel from triglycerides and alcohol using immobilized lipase [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2001, 16(1): 53 - 58.
- [21] 邓利, 谭天伟, 王芳. 脂肪酶催化合成生物柴油的研究 [J]. *生物工程学报*, 2003, 19(1): 97 - 101.
- [22] Matsumoto T, Takahashi S, Kaieda M, *et al.* Yeast whole-cell biocatalyst constructed by intracellular overproduction of *Rhizopus oryzae* lipase is applicable to biodiesel fuel production [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2001, 57(4): 515 - 520.
- [23] Ban K, Kaied M, Matsumoto T, *et al.* Whole cell biocatalyst for biodiesel fuel production utilizing *Rhizopus oryzae* cells immobilized within biomass support particles [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2001, 8(1): 39 - 43.
- [24] Ban K, Hama S, Nishizuka K, *et al.* Repeated use of whole-cell biocatalysts immobilized within biomass support particles for biodiesel fuel production [J]. *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic*, 2002, 17(3/4/5): 157 - 165.
- [25] Hama S, Yamaji H, Kaieda M, *et al.* Effect of fatty acid membrane composition on whole-cell biocatalysts for biodiesel-fuel production [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, 21(2): 155 - 160. ■

## 2.2 植物修复技术

植物修复技术的理论基础是以植物忍耐和超积累某种或某些化学元素来应对环境中的污染物。有些植物虽然可以耐受土壤中的重金属,但却不能从土壤中去掉重金属,只是通过一定的方式降低重金属的生物可利用性或毒性,减少其在土体中通过淋滤进入地下水或通过其他途径进一步扩散,例如通过改变根际的 pH 或分泌有机物,使金属离子形成利用率比较低的沉淀物和稳定的金属螯合物。植物修复技术目前主要用于受重金属污染的土壤的修复,它是一种对环境友好的清除土壤中有毒痕量元素的廉价的新方法<sup>[6]</sup>。植物挥发也是有效降低植物中金属离子浓度的方式,植物可将吸收到体内的污染物转化为气态物质,释放到大气环境中。植物挥发只适用于具有挥发性的金属污染物如 Hg、Se 等,应用范围较小,另外将污染物转移到大气环境中会产生次生污染,从立体污染防治角度考虑是不合适的,因而它的应用受到一定程度的限制<sup>[7]</sup>。研究较多和具有开发前景的是植物吸收并超量积累环境中的金属离子,然后将它们输送并储存在植物体的地上部分。

将植物修复技术应用拓宽到环境有机污染物的修复正在受到更多的关注。植物对有机污染物的修复是通过直接吸收土壤中的有机污染物,并将有机污染物转化成没有毒性的代谢中间体储存于植物组织中,如通过木质化作用使其在新的组织中贮藏,这是植物去除土壤中亲水性有机污染物的一个重要机制;另外还可使污染物矿化或代谢为 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>,研究表明,环境中大多数的苯、甲苯、二甲苯化合物(BTX),含氯溶剂和短链的脂肪族化合物可通过这一途径去除。

## 2.3 植物-微生物协同修复技术

植物与微生物协同修复技术逐渐成为研究的热点。20世纪70年代后,有关重金属超积累植物的研究逐渐受到重视。20世纪90年代后,许多学者注意到了植物与微生物协同修复作用的重要性:一方面微生物的代谢活动提高了养分的利用率并降低了污染物的毒性,另一方面植物的根际分泌物为微生物的活动提供了大量的养分。但目前有关该方面的研究大都停留在实验室和试验模拟阶段,大规模商业性应用还有待于进一步研究。

植物与微生物协同修复环境的主要机制是加强矿化根际微域中的有机污染物。由于植物根系活动的参与,根际微生物生态系统的物理、化学与生物学性质

明显不同于非根际土壤环境。首先植物根系可向土壤环境中释放大量的营养分泌物(糖类、醇类和酸类),其数量约占植物年光合作用的10%~20%,这些物质改善了根际微生物的营养条件,从物质和能量方面加速了有机物的降解速度;其次,植物自身释放的各种具有降解作用的分泌物或酶类,如脱卤酶、过氧化物酶、漆酶及脱氢酶等,可以直接降解三硝基甲苯(TNT)、三氯乙烯、多核芳烃(PAHs)和多氯联苯(PCB)等细菌难以降解的有机污染物<sup>[8-11]</sup>。

另一类与植物具有紧密依存关系的就是植物根区的菌根,菌根与植物形成共生作用,它具有独特的酶系统和代谢途径,可以降解不能被细菌单独降解的有机污染物。由于植物向根区输送了 O<sub>2</sub>,使根区的好氧作用得以顺利进行。一方面,植物在生长发育过程中,根系分泌的有机物和酶类进入土壤,使根际的微生物活性增强,加速了有机污染物的矿化。另一方面,根际环境中微生物作用可促进植物的生长,从而加速对降解产物的吸收。这一共存体系的互动作用将在很大程度上加速受污染土壤的生物修复速度。

## 3 生物修复技术的国内外研究现状和发展趋势

发达国家于20世纪80年代就开展了生物修复技术的研究,并于1991年3月在美国圣地亚哥召开了第一届“原位与就地生物修复”国际会议,这一会议的召开标志着以生物修复为核心的环境生物技术进入了一个全新的发展时期。目前这一技术在发达国家已取得了良好的生态效益和社会效益,尤其是微生物修复技术已经被广泛用于由石油、重金属、有机化合物等造成的立体污染修复领域。

发展中国家在这方面的研究相对比较滞后,我国在20世纪90年代才开始这方面的研究工作<sup>[12-13]</sup>。虽然我国在环境修复技术方面的研究也取得了一定的进展,但与发达国家相比还存在一定的差距。而大多研究集中在工业污染的治理方面,如高硫煤微生物脱硫、造纸工业中的生物制浆和生物漂白、受石油污染的土壤和水体的修复等领域。对于农业立体污染和环境修复方面的研究相对较弱,目前活性腐植酸在农业可持续发展和环境治理方面的研究和应用都取得了一定的进展。活性腐植酸不仅可以达到农业增产增收效果,而且可以有效利用工业产生的废弃物,净化环境<sup>[14]</sup>。

### 3.1 农药污染与生物修复

农药是现代农业发展的物质保障,而化学农药在农业的快速发展阶段发挥了重要作用,但同时也带来了严重的环境问题。目前农药施用的有效利用率很低,一般农药喷施中只有 10%~20% 的农药落于植物体上,其余部分中有 40%~60% 降落于地面,5%~30% 飘浮于空中;而作用于目标物的比例大约只有 0.3%<sup>[15]</sup>。另外化学农药还通过拌种和根施等各种途径进入土壤,又通过水分循环进入水体,同时经过挥发、代谢、气体交流进入大气,从而造成了日趋严重的污染问题,其中最为严重的是土壤污染,目前全国遭受不同程度农药污染的农田面积达 907 万公顷<sup>[16]</sup>。

有关农药污染的生物修复研究从最早的有机氯农药滴滴涕(DDT)的微生物降解开始已有几十年的历史,至今已分离筛选了大量的微生物。由于有机磷杀虫剂的大量使用,所以我国有关农药生物修复的研究主要集中在有机磷化合物的降解方面,而国外近年来因大量使用了除草剂,环境污染问题也随之产生,因此可降解除草剂的微生物的分离和利用便成为国外近期研究的热点。目前分离到的可降解农药的微生物包括细菌、真菌、放线菌和藻类,大多来自土壤微生物类群。其中,对细菌的研究较为深入,其次是真菌。在这些微生物中,往往一种微生物可降解多种农药,如细菌中较活跃并具代表性的假单胞菌属(*Pseudomonas*)可降解 DDT、 $\gamma$ 2BHC、艾氏剂、毒杀芬、马拉硫磷、二嗪农、甲拌磷、敌敌畏、甲基对硫磷、西维因、2,4-D 等。而真菌的代表属曲霉属(*Aspergillus*)则可降解 DDT、 $\gamma$ 2BHC、艾氏剂、狄氏剂、异狄氏剂、七氯、敌百虫、溴硫磷、地虫磷、西维因、利谷隆、灭草隆、西玛津、阿特拉津等。同样,一种农药也可被多种微生物所降解,如可降解 DDT 的微生物包括细菌中的假单胞菌属(*Pseudomonas*)、芽孢杆菌属(*Bacillus*)、节细菌属(*Arthrobacter*)等;真菌中的青霉属(*Penicilium*)、根霉属(*Rhizopus*)、木霉属(*Trichoderma*)等;放线菌中的诺卡氏菌(*Nocardia*);藻类中的菱属硅藻属(*Nitzschia*)等<sup>[17]</sup>。

影响微生物降解活性的因素包括农药本身的理化性质,尤其是内部化学键、浓度、水溶性、分子极性、生物可利用性、化合物的吸附性等<sup>[18]</sup>,另外环境因子如温度、盐度、pH、氧化还原电位、营养可利用程度等也是影响农药等顽固性化合物生物降解和修复的主要因素。

### 3.2 化肥污染与富营养化修复

尽管化肥的施用给农作物产量带来了巨大的增长,但其营养成分单一、利用率低,也存在许多环境问题。在 3 种化肥中,磷肥的施用量最大,但利用率最低:美国为 30%~50%,日本 50%~60%,原苏联 30%~40%,而我国更低,仅为 10%~20%。未被利用的养分通过径流、淋溶、反硝化、吸附和侵蚀等方式进入环境,污染水体、土壤和大气。我国天津近海渤海湾、连云港 Y 海海域、大连湾海区及南海珠江口入海处等一些海域氮污染比较严重,已达到富营养化程度。近几年屡有赤潮发生,已引起人们普遍关注<sup>[19]</sup>。

消除湖泊富营养化的关键在于削减湖泊水体的氮、磷以及底泥有机碳和氮、磷的负荷,达到降低水体中藻类生物量、提高水体透明度的目的。机械清淤由于成本较高使其应用受到了限制。生物修复以其成本低和环境条件宽松而受到研究者和应用者的青睐。富营养化的生物修复包括微生物修复和水生植物修复 2 种方式。发达国家在水体富营养化修复方面已有比较成熟的技术,并有许多成功的案例可以借鉴。如美国 Alken-Murry 公司研究开发的 Clear-Flo 系列菌剂产品,专门用于湖泊和池塘生物清淤、养殖水体净化、河流修复及污泥去除<sup>[20]</sup>。1992 年,在美国 Moulin Vert 水渠中使用 Clear-Flo1200 产品 3 个月, $\text{NH}_4^+$  质量浓度从 0.020 mg/L 降为 0.004 mg/L, COD 降低了 84%, BOD 降低了 74%,无毒性检出。由于污泥的不断矿化,水渠的自净容量大大提高,经过连续几年的处理完成了河流的修复工作。国内目前的工作还处于起步研究阶段,青岛海洋研究所对海藻修复鱼塘富营养化做了初步的研究工作<sup>[21]</sup>。

### 3.3 生物修复评价体系

生物修复的效果要通过一定的诊断评价体系界定,不同的评价体系对同样的修复技术会得出不同的评价结果。最初是通过化学评价体系,即污染物在环境中减少的化学反应体系。近年来生态诊断体系受到较大的关注。生态诊断体系的建立首先要明确污染物的环境风险,污染物在环境中的暴露程度和本身的毒理特性是主要考虑的 2 个因素,前者决定于其传播的特性和在环境中的最终浓度,后者包括污染物对代表性有机体的影响以及在特定空间的无效浓度,环境暴露浓度和对有机体有效浓度的比值是评价环境风险比较客观的方法<sup>[22]</sup>。虽然基于化学毒理学基础的评价体系得到了广泛的认同,但其在农业耕地的应用上仍然存在一定的缺陷。已有

的研究证明,被石油污染的土壤经过生物修复后并不能提高种植物的产量和生物量,因为修复后土壤中的碳氢残余物严重影响了土壤的持水量,因此土壤持水量是评价耕地生物修复效率的重要因素<sup>[23]</sup>。

#### 4 结语及展望

(1)生物修复在未来的环境污染治理中将扮演越来越重要的角色,其市场巨大

在一定的经济发展时期,环境治理费用和发展速度成正比,如20世纪80年代,荷兰花费了近15亿美元用于土壤修复,1995年德国投资约60亿美元净化土壤,美国在20世纪90年代用于土壤修复的投资额超过百亿美元。生物修复技术因其本身具有快速、高效、费用低廉的优点,被称为是一种环境友好的替代技术,成为各个国家政府和研究机构的目标。随着生物修复技术的日臻完善,其在土壤、污泥和地下水修复中将扮演越来越重要的角色。

(2)农业环境问题已引起各界的重视,国家将加大生物修复技术的研究与推广力度

目前,环境问题在我国已被提到了重要的议程,首先在法律政策方面逐渐缩小和发达国家的差距。国家环保总局(SEPA)从1998年就开始致力于有关环境保护法律法规的制定,针对环境污染制定污染预防和削减手册,但是环境中污染物的浓度仍然很高,为此,2002年又出台了清洁生产法,在10个主要城市建立了示范项目,并确定了一些优先治理的河流区域。但仅仅控制工业生产中的点源污染远远不能解决河流的污染问题,应在加强工业点源污染控制的同时,积极开展农业面源和大气污染的控制,才能以最小的投资达到最大限度地提高环境质量、保护资源的可持续利用,使农业环境和生态环境健康、可持续发展。其次在技术层面,我国的环境生物修复技术还处于刚刚起步阶段,与发达国家还存在一定的差距,大力开展以污染控制生物技术为主体的环境生物技术的研究,大力推进生物技术在环境保护中的应用,并通过生物高新技术的发展带动整个环保科技的发展,才能解决我国目前和未来面临的严峻的环境保护问题,并为环保市场提供高品质的环境保护技术。

#### 参考文献

[1] Alexander M. Biodegradation of chemical of environmental concern[J]. Science, 1981, 211: 132 - 138.  
[2] Loppman A, Philip L. Biotechnology newswatch[M]. New York: Oxford

University Press, 1993.

- [3] Heitkamp M A, Cerniglia C E. Mineralization of polycyclic aromatic hydrocarbons by a bacterium isolated from sediment below an oil field[J]. Appl Environ Microbiol, 1988, 54(5): 1612 - 1614.  
[4] Ang E L, Zhao Huimin, Obbard J P. Recent advances in the bioremediation of persistent organic pollutants via biomolecular engineering[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2005, 37(5): 487 - 496.  
[5] Jackson W A, Pardue J H. Potential for enhancement of biodegradation of crude oil in Louisiana salt marshes using Nu2 trient amendments[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1999, 109(1/2/3/4): 343 - 355.  
[6] 孔繁翔,尹大强,严国安. 环境生物学[M]. 北京:高等教育出版社,2000.  
[7] Martin A. Biodegradation and bioremediation[M]. San Diego: Academic Press, 1999.  
[8] Anderson T A, Coats J R. Bioremediation through rhizosphere technology [M]. Washington D C: Amer Chemi Soci, 1994.  
[9] Anderson T A. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environ Sci Technol, 1993, 27(13): 2630 - 2635.  
[10] Cookson J R. Bioremediation engineering: Design and application[M]. New York: McGraw Hill Inc, 1995.  
[11] Cuningham S D. Phytoremediation of contaminated soils [J]. Trend Biotechnol, 1995, 13(9): 393 - 397.  
[12] 戴树桂,刘小琴,徐鹤. 污染土壤的植物修复技术进展[J]. 上海环境科学, 1998, 17(9): 25 - 27.  
[13] 张春桂,许华夏,姜晴楠. 污染土壤生物恢复技术[J]. 生态学杂志, 1997, 16(4): 52 - 58.  
[14] 郭萍,朱昌雄. 活性腐植酸与环境修复[J]. 腐植酸, 2005, 106(5): 3 - 8.  
[15] Pimentel D. Amounts of pesticides reaching target pests: Environmental impacts and ethics[J]. J Agric Environ Ethics, 1995, 8(1): 17 - 29.  
[16] 陆维国. 浅论农业面源污染及防治对策[J]. 环境管理, 2004, 17(4): 42 - 44.  
[17] 尤民生,刘新. 农药污染的生物降解与生物修复[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 73 - 77.  
[18] Rieger P G, Meier H M, Gerle M, et al. Xenobiotics in the environment: Present and future strategies to obviate the problem of biological persistence[J]. J Biotechnol, 2002, 94(1): 101 - 123.  
[19] 罗可尧. 加强生态农业的建设,走可持续发展的生态发展之路[EB/OL]: <http://hzepb.haizhu.gov.cn/ShowArticle.htm>, 2004 - 03 - 16.  
[20] Alken-Murray Corp, USA. Mechanical dredging vs bio-dredging[EB/OL]: <http://www.alken2murray.com/dredge.htm>, 2001 - 11 - 02/2001 - 09 - 26.  
[21] Zhou Yi, Yang Hongsheng, Hu Haiyan, et al. Bioremediation potential of the macroalga Gracilaria lemaneiformis (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China[J]. Aquaculture, 2006, 252(2/3/4): 264 - 276.  
[22] Linders J B H J, Luttik R. Uniform system for the evaluation of substances: V. ESPE, risk assessment for pesticides[J]. Chemosphere, 1995, 31(5): 3237 - 3248.  
[23] Li X, Feng Y, Sawatsky N. Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils[J]. Plant and Soil, 1997, 192(2): 219 - 226. ■