

池塘养殖废水处理技术研究进展

宋伟, 韩士群, 刘海琴, 张志勇, 常志州

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏南京 210014)

摘要:介绍了池塘养殖废水的各种综合处理方法,并作了简要比较。结合我国池塘养殖大多规模较小、地域分散、季节性换水和废水排放时间比较集中的特点,指出在我国发展简易经济的集成式生物加强处理系统是比较可行的废水处理模式。

关键词:池塘养殖;生物净化;废水处理

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2008)06-0277-04

池塘养殖是我国传统的水产养殖方式,也是我国饲养食用鱼的主要形式。2003年我国淡水养殖面积为557.15万 hm^2 ,其中池塘养殖面积达到239.87万 hm^2 ,占50%以上,池塘养殖产量占淡水渔业总产量的75%^[1]。我国池塘养鱼主要是利用经过整理或人工开挖的面积较小(一般面积亩至十余亩)的静水水体进行养鱼生产,池塘水体较小,环境易于控制,有利于技术措施的应用。随着养殖技术的提高和推广,我国池塘养殖已越来越多地采用高密度、高投饵率的精养技术模式。与传统粗养模式相比,精养池塘单产大幅度提高,从而提高了养殖经济效益。由于池塘精养大都是半封闭式净水养殖,池塘只有蓄水养鱼功能,缺乏有效的水质净化功能,大量的饲料投入和鱼类代谢物积累导致池塘内有机污染物越来越多,池塘内源性污染加重,养殖水环境恶化。据报道,在鱼类养殖过程中,有70%~80%的投喂饲料以溶解和颗粒物的形式排入水体环境中^[2],饲料中的营养物质最终约有51%的氮和64%的磷成为废物^[3]。这不仅使鱼类生长速度减慢,疾病发生率上升,养殖产品质量和产量下降,影响水产养殖的总体经济效益,而且导致养殖废水的排放量大大增加,进一步加剧了周围海域、江河、湖泊等水域的富营养化进程。

随着精养密度的提高,养殖产品质量和环境问题备受各界关注。如何净化池塘养殖水、改善养殖环境已成为养殖生态和环境研究的热点,养殖废水的处理技术也随之发展起来。目前,已经报道了多种处理养殖用水和废水的技术措施,以清除或转化水中的污染物质,达到了改善养殖水质、提高养殖效果和减轻对环境影响的目的。目前有关养殖用水和废水的处理方法多见如下报道。

1 物理处理法

换水和物理增氧是池塘精养中日常管理最常用的方法。一般每天更换10%左右的水就能使水质维持良好状态,增氧机可增加水体的溶解氧,促进池水对流、氧化,使有毒气体溢出。而根据养殖废水的物理特性,机械与物理方法也已被广泛应用于去除水中的悬浮物质或有害物质。由于养殖废水中

残饵和粪便较多,水中悬浮有机物浓度较高,这些悬浮物不仅氮磷含量高,而且分解时耗氧量大,研究表明^[4]在精养池水中悬浮有机物分解耗氧占到池塘氧总支出的65%左右,去除悬浮物即可有效净化水体。目前在池塘养殖中常见的主要有过滤、吸附、泡沫分离、物理消毒等几种。过滤通常可去除粒径60~200 μm 的颗粒物,如Ridha等^[5]用塑料生物过滤介质对简易罗非鱼循环养殖系统废水取得了很好的净化效果。吸附作用可以降低养殖水中的有毒物质、固体悬浮物的浓度,从而起到净化水质的目的,如钟全福等^[6]研究表明麦饭石能显著降低水体中氨氮和亚硝酸盐氮的浓度;丁永良^[7]应用纳米材料使养殖水体长期保持优良水质。泡沫分离可去除水中溶解有机物和悬浮物,降低水体总氮量和BOD、COD含量,增加水体溶解氧^[8]。物理消毒由于具有杀菌高效性、广谱性、无二次污染、无噪音、占地少及连续大量水消毒等优点,在我国水产育苗中应用较广,主要用于养殖用水的前期处理,常和臭氧处理联用。但紫外线在水中的穿透力差,受水色和透明度影响较大,且设备昂贵易坏,目前仅适用于小水体^[9]。

2 化学处理法

指通过泼洒有机或无机化合物,与水中污染物或悬浮物起化学反应来改善水质,该法在传统养殖中应用比较广泛。按化学反应类型^[10]可分为:絮凝法、中和法、络合法、氧化还原法。其中臭氧已较广泛应用^[11]于池塘精养养殖用水的前处理和养殖过程中的水质调节,调节水质收效较快,但常大幅度增加养殖的成本并伴有一定的副作用,且不能减少池塘营养物质氮、磷含量,因此在养殖废水的后处理中应用较少。

3 生物处理方法

生物技术是当前水产养殖废水处理技术和养殖污染控制方法的研究热点^[12]。该方法对环境友好,费用低,适用于各种环境条件的水域,是一项有发展前途的“绿色”养殖污染控制技术。其最大优点是使用不可再生材料和能源比较少,并且不会对环境造成二次污染。它主要是指利用生物的生命代谢活动来降低存在于环境中有害物质的浓度或使其完全无害化,从而使受到污染的生态环境能够部分或完全恢复到原初状态的过程。它包括植物、动物和微生物以及复合生态系统,利用生物的生长代谢来吸收、降解、转化水体和底泥中的污染物,降低污染物浓度,减轻污染物对环境的影响。

收稿日期:2008-06-06

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金(编号:6110727)。

作者简介:宋伟(1979—),男,湖北黄冈人,硕士,研究实习员,主要从事水污染防治研究。Tel:(025)84390241;E-mail:njweisong@163.com。

3.1 植物净化

是指利用植物的生长来吸收养殖水中的营养物质,富集和稳定水体中过量的氮、磷、悬浮颗粒和重金属元素,达到净化水体的目的。目前,研究与应用较多的有鱼菜共生^[13]、鱼藻共生^[14]和鱼草共生系统^[15]。包括高等植物和藻类两种净化种类。

3.1.1 高等植物 水生植物能够快速吸收水体和底泥中的营养盐,在池塘中种植并收割水生植物,可有效减少水体及底泥中氮、磷的含量。Halide等^[16]研究表明,植草和未植草池塘沉积物的沉积速率分别为 $63\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $14\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,植草池塘在污染物得到植物净化的同时,水中的营养物质也得以循环利用。鱼塘植莲后,底泥中总氮和总磷的浓度都有显著性下降^[17-18];种植轮叶黑藻10 d对水体总氮、总磷的去除率分别为90.12%和64.84%,种植水薹菜5 d对总氮、总磷的去除率分别为76.79%和80.41%^[19]。目前,在废水处理上应用较多的水生植物主要有水芹菜、水薹菜、水浮莲、伊乐藻等。此外,一些陆生植物通过水培方式也可应用于养殖废水的处理,如Pan等^[20]报道用纤维层黑麦草浮床1 d就能吸收废水中72%的总氮和80%的总磷;Chate等^[21]利用土培百慕大和巴哈雀稗草带生物过滤鲑鱼养殖污水,取得了较好的净化效果。郭沛涌等^[22]利用浮床黑麦草净化富营养水体中的氨氮,当覆盖率为30%时,对氨氮的去除率最高,达到95.89%。

3.1.2 藻类 利用藻类净化水质,不仅能够显著提高水体溶氧,使好氧菌能够不断地进行有机质的降解,而且能够有效降低水体中的营养盐含量^[23-24]。目前,应用较多的是大型藻类,黄鹤忠^[25]报道在虾池中混养石花菜、石莼、江篱等大型海藻,能减少池水中的氨氮等无机盐,增加水体溶解氧。岳维忠等^[26]报道种植草叶马尾藻、蝠菜和网地藻对养殖水中氨态氮及溶解态磷有明显的吸收效果。单细胞藻类因体积微小,不利于收集,藻水分离困难和在养殖池塘中难以大量生长,加上固定化藻类技术也没有成熟,因而在实际中应用不多^[27-29]。

3.2 微生物净化

是指利用微生物将水体或底质沉积物中的有机物、氨氮、亚硝态氮分解吸收,转化为有益或无害物质,达到环境净化的目的。

3.2.1 微生物制剂 微生物制剂是一些对人类和养殖对象无致病危害并能改良水质状况、抑制水产病害的有益微生物。常用于改善养殖水质的有光合细菌、放线菌、芽孢杆菌、硝化细菌、氯化细菌、硫化细菌等,它们能够有效地降低氨氮和硫化氢等有害物质含量,改良池塘水质。吴伟等^[30]使用藻青菌处理鲤鱼养殖废水的中试结果表明,运行1个月对氨氮和磷酸盐的去除率分别高达82%和85%;Grommen等^[31]向养鱼池废水中投加复合菌液,4 d内可使氨氮由 10 mg/L 降低到低于可检测范围;田伟君等^[32]应用微生物强化系统集中式生物系统(central biological system, CBS)净化河水的研究表明,该系统对BOD的去除率为83.1%~86.6%,氮的去除率为53%~68.2%,磷的去除率为74.3%~80.9%,净化效果比较明显。目前市场上商业菌种比较单一,不能满足多种养殖对象和养殖环境的要求,还有待于进一步研发多菌株多功能的复合微生物制剂。

3.2.2 固定化微生物技术 一般是经过富集、培养、筛选得到高密度生化处理混合菌,然后通过一定的包埋方式将菌种固定在一个适宜它繁殖、生长的微环境中(如海藻酸钠、PVA等凝胶材料)的技术,从而达到有效降解养殖废水中某些特定污染物的目的。近年来,将该技术用于养殖水处理的研究越来越受到人们的重视,目前对处理水产养殖废水的固定化菌株研究较多的是光合细菌和硝化细菌。郑耀通等^[33]试验结果表明,加入固定化光合细菌15 d后,氨氮含量下降98.9%,溶解氧增加63.4%,COD去除率为70.6%。黄正等^[34]报道固定化硝化细菌结合混凝沉淀处理养殖废水24 h COD去除率为74.9%,氨氮去除率达82.5%。Koo等^[35]试验表明固定化微生物运行40 d对氨氮的去除率能达到98%。目前该技术在养殖水体中的应用主要还处在室内模拟阶段,在实际应用中还存在许多问题,尚须进一步研究和完善。

3.2.3 生物膜法 指通过生长在滤料(或填料)表面的生物膜来处理废水,已广泛应用于养殖水处理,对受有机物及氨氮轻度污染的水体有明显的净化效果。目前使用较多的类型有生物滤池、滴滤池、生物转盘、生物接触氧化池和生物流化床等^[36]。生物膜法在养殖废水封闭循环处理中应用较广泛, Yang等^[37]试验的生物滤池,停留时间为2.5 h时SS和BOD去除率分别为98.8%和80.2%。通过Chin等^[38]的2次物滤工艺处理,河口大面积集约化养殖水体处理后可回用。Abeyinghe等^[39]的好氧淹没升流式生物滤池填料停留时间为4 h时,能去除40%的磷和100%的氮。Bjornar^[40]的生物过滤器,放在鱼塘里,能使污染物减少90%~95%。

3.3 水生动物净化

近年来,滤食性鱼类和贝类被越来越多地应用于水体富营养化和养殖污水的治理,目前主要包括鲢鳙、河蚌和扇贝、缢蛏、牡蛎等贝类品种。滤食性鱼类和贝类是以水中的有机碎屑和浮游生物作为食物来源,因而其滤食活动可有效降低水中悬浮有机颗粒和藻类的数量,提高水体透明度。配养滤食性鱼类和贝类,既能提高饵料利用率,又能改善水体环境,有助于扩大池塘养殖容量^[41]。李德尚等^[4]指出,配养动物滤食悬浮有机物而减少的氧消耗要远大于它们自身呼吸而增加的氧消耗,但是滤食性鱼类和贝类在滤食悬浮有机物的同时也大量滤食藻类,而藻类光合作用增氧占池塘氧总输入的90%以上。因此,须要合理配养滤食性动物,以避免影响到水体溶氧功能的恢复。

4 集成水质处理方法

4.1 人工湿地-养殖池塘复合生态系统

人工湿地(constructed wetland)是由人工基质和生长在它上面的湿地植物、微生物组成的一个独特的土壤-植物-微生物生态系统,利用湿地中的基质、植物和微生物之间通过物理、化学和生物的协同作用净化污水。近年来,人工湿地在净化养殖废水并回收利用方面取得了一定的效果。人工湿地不仅可去除养殖废水中的溶解性污染物,还可去除和固定养殖污泥。Tilley等^[42]构建的湿地可使对虾养殖废水中的TP、TSS和ISS分别降低31%、65%和76%。Lin等^[43]研究表明,利用人工湿地净化技术可有效降低对虾循环养殖系统中的氮、磷含量,能够去除86%~98%的氨态氮和95%~98%的

总无机氮,磷的去除效率是32%~71%。Comeau等^[44]用湿地处理鳊鱼养殖废水,对有机物和磷的去除率分别高达95%和80%以上。岳春雷等^[45]利用复合垂直流人工湿地技术循环净化低浓度养殖废水,在不换水条件下,鱼池水质能够保持较好的状态。Kerepeczki等^[46]对鱼塘-人工湿地联合系统的研究表明,两种生态系统串联起来适合于精养池塘的养殖废水处理。李谷等^[47]和Kruzie等^[48]构建的人工湿地-养殖池塘复合生态系统,都成功实现了养殖废水的回用。

4.2 池塘综合养殖

综合养殖是运用生态学原理,将各具特点的生态单元,按照一定的比例和方式组合起来使其具有污水净化功能的高效无污染的养殖系统。按种类来划分,有鱼、虾、蟹、贝、藻之间的二元、三元或四元综合养殖;按混养种类的时空来划分,有同池综合养殖和异池综合养殖两大类。彭建华等^[49]试验的同池综合塘运行15 d使氨氮下降70.5%,总磷下降47.4%;Liang等^[50]的研究表明综合池塘对氨氮和可溶性磷酸盐的去除率高达93.4%和82.7%;黄国强等^[51]进行对虾、大型藻类和滤食性鱼、贝3个池塘循环水综合养殖的试验研究,结果显示3个池塘生态系统能够相辅相成、互惠互利,形成了一个具有较强水质自我调节功能的养殖模式。

5 存在问题和发展方向

我国池塘养鱼已有3 100多年的历史,目前已成为世界第一水产养殖国。池塘养殖作为我国水产养殖的主要方式,在面积和产量上均占据主导地位。随着技术的不断进步,养殖密度不断提高,养殖环境不断恶化,不仅引起鱼类疾病频繁发生,而且使池塘的换水量和换水频率加大。Phillips等^[52]报道,池塘养殖尼罗罗非鱼和斑点叉尾鲷,每生产1 kg鱼分别消耗2.1万L和0.3万~0.5万L水。熊国中等^[53]报道了洱海149.25 hm²鱼塘每年向洱海排换水671.6万m³,输出氮33.2 t、磷3.83 t、COD 420.4 t。养殖水环境问题越来越受到人们的重视,许多发达国家都制定了水产废水的排放标准,我国也于2003年发布并实施了《水产养殖质量安全管理规定》,其中对水产养殖用水及其排放制定了严格的政策法规和管理制度。但由于我国的实际情况比较复杂,养殖废水大都未经处理直接排放到周围水域中。

养殖废水主要来自养殖过程中的季节性换水和养殖结束后的排水,换排水时间比较集中,而发达国家大力发展的循环养殖模式所需技术较高,运行经费昂贵,不适合我国国情,在我国很难推广。鉴于池塘养殖水体中存在的废弃物主要是鱼类排泄物、生物残骸、残饵及分解产生的氮磷等化合物和蛋白质等有机物,结合我国池塘养殖多以小规模、分散形式存在,主要养殖品种的经济效益相对较低的特点,笔者认为采用集成水质净化系统处理养殖废水,通过调整养殖生态系统的结构,减少和避免养殖废弃物在水体中的积累,在使养殖水质得到净化的同时使这些废弃物再循环利用,将是今后我国池塘养殖水处理技术的重点发展方向。该处理方法简单实用、经济和易于被我国广大中小型养殖户所接受。同时进一步研究高效简易的养殖废水集中处理系统,改善养殖生态环境,节约水资源和减轻养殖对环境的负面影响,是我国池塘养殖可持续发展的重要方向。

参考文献:

- [1]张德隆,李刚,肖志国,等.我国池塘生态养殖的回顾与展望[J].中国渔业经济,2004(2):44-45.
- [2]Hall P O J, Holly O, Kollberg S, et al. Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm IV nitrogen [J]. Marine Ecology Progress Series, 1992, 89: 81-91.
- [3]刘长发.环境友好的水产养殖业——零污水排放循环水产养殖系统[J].大连水产学院学报,2002,17(3):220-226.
- [4]李德尚,董双林.对虾与鱼、贝类封闭式综合养殖的实验研究[J].海洋与湖沼,2002,33(1):90-96.
- [5]Ridha M T, Cruz E M. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) reared in a simple recirculating system [J]. Aquacultural Engineering, 2001, 24: 157-166.
- [6]钟全福,林岗.麦饭石对养殖水体水质调控的研究[J].福建师范大学学报,2001,17(2):118-120.
- [7]丁永良.纳米与纳米养鱼技术[J].现代渔业信息,2001,16(6):3-5.
- [8]罗国芝,谭洪新,施正峰,等.泡沫分离技术在水产养殖水处理中的应用[J].水产科技情报,1999,26(5):202-206.
- [9]姜叶琴,姚健萍,杨万喜.水产养殖水体处理方法及应用前景综述[J].洋湖沼通报,2004(3):99-105.
- [10]郭立新.循环水培高等陆生植物系统对水产养殖废水的净化研究[D].杭州:浙江大学,2004.
- [11]朱学宝,谭洪新,罗国芝.封闭循环工厂化水产养殖水质净化系统的技术构成[J].内陆水产,2000(1):24-25.
- [12]Brix H. How green are aquaculture, constructed wetlands and conventional wastewater treatment system [J]. Wat Sci Tech, 1999, 40(3):45-50.
- [13]丁永良,张明华,张建华,等.鱼菜共生系统的研究[J].中国水产科学,1997,4(5):70-76.
- [14]王吉桥,靳翠丽,张欣,等.不同密度的石药与中国对虾的混养实验[J].水产学报,2001,25(1):32-36.
- [15]洋进明,邵志鹏,苗香雯,等.循环流水鱼草共生生态系统的鱼草配比试验[J].生态学报,2004,24(2):389-392.
- [16]Halide H, Rodd P V, Peterson E L, et al. Assessing sediment removal capacity of vegetated and settling ponds in prawn farms [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 27(4):295-314.
- [17]Yi Y, Lin C K, Diana J S. Recycling pond mud nutrients in integrated lotus-fish culture [J]. Aquaculture, 2002, 212: 213-226.
- [18]Picard C R, Fraser L H, Steer D. The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms [J]. Bioresource Technology, 2005, 96: 1039-1047.
- [19]林连升.精养鱼池水质生物净化初步研究[D].南京:南京农业大学,2006.
- [20]Pan J, Sun H, Nduwimana A, et al. Hydroponic plate/fabric/grass system for treatment of aquacultural wastewater [J]. Aquacult Eng, 2007, 37: 266-273.
- [21]Ghate S R, Burtle G J, Vellidis G, et al. Effectiveness of grass strips to filter catfish (*Ictalurus punctatus*) pond effluent [J]. Aquacultural Engineering, 1997, 16: 149-159.
- [22]郭沛涌,朱荫涓,宋祥甫,等.陆生植物黑麦草对富营养化水体修复的围隔实验研究[J].浙江大学学报,2007,34(1):76-79.

- [23] 胡海燕, 卢继武, 杨红生. 大型藻类对海水鱼类养殖水体的生态调控[J]. 海洋科学, 2003, 27(2): 19-21.
- [24] 温志良, 温瑛茂, 张爱军. 藻类在水环境保护中的利用[J]. 贵州环保科技, 2000(3): 9-12.
- [25] 黄鹤忠. 几种对虾池塘放养模式的生态效益评价[J]. 水产科技情报, 1999, 26(4): 159-161.
- [26] 岳维忠, 黄小平, 黄良民, 等. 大型藻类净化养殖水体的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(1): 13-15.
- [27] Mallick N. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal: A review [J]. Bio Metals, 2002, 15: 377-390.
- [28] 李秀辰, 张国探, 崔引安, 等. 孔石药对鲍鱼养殖水体的静态净化研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 173-176.
- [29] 林 艳. 利用高等植物修复富营养化水体试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.
- [30] 吴 伟, 余晓丽, 李咏梅, 等. 不同种属的微生物对养殖水体中有机物质的生物降解[J]. 湛江海洋大学学报, 1997, 17(3): 16-20.
- [31] Grommen R, Hautrghem Van, Van Wambeke M, et al. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems [J]. Aquaculture, 2002, 211: 115-124.
- [32] 田伟君, 翟金波, 王 超. 城市缓流水体的生物强化净化技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(9): 59.
- [33] 郑耀通, 胡开辉. 固定化光合细菌净化养鱼水质试验[J]. 中国水产科学, 1999, 6(4): 56-58.
- [34] 黄 正, 范 玮, 李 谷, 等. 固定化硝化细菌去除养殖废水中氨氮的研究[J]. 华中科技大学学报, 2002, 31(1): 18-20.
- [35] Koo K S, Insoo K, Lee Byung Hun, et al. Removal of ammonium - N from a recirculation aquacultural system using an immobilized nitrifier [J]. Aquacultural Engineering, 2000, 21: 139-150.
- [36] 许敬亮, 高勇生. 生物技术在废水处理中的应用[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(3): 10-13.
- [37] Yang L, Chou L S, Shieh W K. Biofilter treatment of aquaculture water for reuse applications. [J]. Water Research, 2001, 35(13): 3097-3108.
- [38] Chin K K, Ong S L. Water conservation and pollution control for intensive prawn farms [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(8): 77-81.
- [39] Abyeinghe D H, Shanabeh A, Rigden B. Biofilters for water reuse in aquaculture [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(11): 253-260.
- [40] Bjornar E. Design and performance of the biofish water recirculation system [J]. Aquacultural Engineering, 1990, 9(4): 285-294.
- [41] 赵志东, 常抗美, 吴雄飞, 等. 养虾废水经贝类滤食净化后池塘主要水环境因子的变化分析[J]. 宁波大学学报, 2004, 17(1): 52-57.
- [42] Tilley D R, Badrinarayannh, Rosatir, et al. Constructed wetlands as recirculation filters large - scale shrimp aquaculture [J]. Aquaculture Engineering, 2002, 26: 81-109.
- [43] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands system [J]. Aquaculture, 2002, 209: 169-184.
- [44] Comeau Y, Brisson J, Reville J P, et al. Phosphorus removal from trout farm effluents by constructed wetlands [J]. Water Science and Technology, 2001, 44(11/12): 55-60.
- [45] 岳春雷, 常 杰, 葛 滢, 等. 复合垂直流人工湿地对低浓度养殖废水循环净化功能研究[J]. 科技通报, 2004, 20(1): 15-17.
- [46] Kerepeczki E, Gal D, Szabo P, et al. Preliminary investigation on the nutrient removal efficiency of a wetland - type ecosystem [J]. Hydrobiologia, 2003, 506: 665-670.
- [47] 李 谷, 钟 非, 成水平, 等. 人工湿地 - 养殖池塘复合生态系统构建及初步研究[J]. 渔业现代化, 2006(1): 12-14.
- [48] Kruzic A P, White K D. Natural treatment and on site processes. [J]. Water Environment Research, 1996, 68(4): 498-503.
- [49] 彭建华, 陈文祥, 陈会明, 等. 综合生物塘处理养殖废水初探[J]. 水利渔业, 2004, 24(4): 60-62.
- [50] Liang R Y, Cheung Y H, Everitt S, et al. Reclamation of wastewater for polyculture of fresh water fish: wastewater treatment in ponds [J]. Wat Res, 1998, 32(6): 1864-1880.
- [51] 黄国强, 李德尚. 一种新型对虾多池循环水综合养殖模式[J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 48-49.
- [52] Phillips M J, Beveridge M C M, Clarke R M. Impact of aquaculture on water resources [J]. World Aquaculture Society: Advances in Aquaculture, 1991, 3: 568-591.
- [53] 熊国中, 沈 兵. 海湖滨区鱼塘污染状况调查研究[J]. 云南环境科学, 2000, 19(3): 32-34.

(上接第 255 页)

- exposure of adult women in Xian City and two farming villages in Shaanxi Province, China [J]. The Science of the Total Environment, 2000, 247(1): 1-13.
- [4] 钱 进, 王子健, 单孝全, 等. 土壤中微量元素元素的植物可给性研究进展[J]. 环境科学, 1995, 16(6): 73-75.
- [5] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M, et al. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [6] 陈守莉, 孙 波, 王平祖, 等. 污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素[J]. 土壤, 2007, 39(3): 375-380.
- [7] 卢 瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤中重金属的化学形态分布[J]. 环境化学, 2003, 22(2): 131-136.
- [8] 方利平, 章明奎, 陈美娜, 等. 长三角和珠三角农业土壤中铅、铜、镉的化学形态与转化[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 39-41.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 308-316.
- [10] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及微生物效应[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 44-48.
- [11] 许嘉琳, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.