

固定化微藻在解决环境问题方面的应用

邢丽贞, 李 飞, 张向阳, 安 莹

(山东建筑大学市政与环境工程学院, 山东 济南 250101)

摘要 :介绍微藻固定化技术在环境的生物监测方面具有灵敏度高、同一装置能监测多种污染物等优点, 阐述固定化微藻在污水处理中的脱氮除磷、重金属离子去除、难降解有机物去除及环境的生物监测方面的研究。

关键词 :微藻固定化 ; 污水处理 ; 环境监测 ; 综述

中图分类号 :X17 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2006)05-0009-04

Application of immobilized microalgae in settling environmental problems

XING Li-zhen, LI Fei, ZHANG Xiang-yang, AN Ying

(College of Municipal & Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract :Microalgae immobilization technology has the advantages of high sensitivity and multi usage of the same equipments in the treatment of several pollutants in the aspect of environmental bio-monitoring. The applications of immobilized microalgae in wastewater treatment, such as removal of nitrogen and phosphorus, removal of heavy metal ions and refractory organic compounds, and environmental bio-monitoring were studied.

Key words :microalgae ; immobilization ; wastewater treatment ; environmental monitoring ; review

传统的污水处理方法为达到降解和去除污水中污染物质的目的, 要以大量的能量消耗为基础, 同时它还会使污水中潜在的营养价值丢失, 这是非常不经济的^[1], 并且污水二级处理后进一步脱氮和除磷比较困难^[2]。

微藻是一类非常原始但却十分重要的海洋和水生生物资源, 具有生长快、产量高、含有大量陆地生物所缺乏且十分独特的生物活性物质、可定向培养、适应能力强、易调控等特点。利用微藻进行污水处理最早由 Oswald 和 Gotaas 提出^[3], 这种方法的优点是在进行污水处理的同时能够利用污水中的氮磷等营养物质, 获得含有较高蛋白质类、脂类和糖类的藻类^[4], 并可利用现代高新技术, 将获得的藻类加工成饲料用来喂养家禽、家畜和鱼类等^[1], 或将其用于医疗保健品生产^[5]、化工原料生产^[6]和燃料制造^[7]等, 为人类解决能源、健康、环境和粮食四大问题提供了一条全新而有效的模式, 既经济又有效, 是一种集污水处理与利用相结合的污水资源化生物工程^[8]。

藻类固定化技术起始于 20 世纪 80 年代, 早期主要用于生化生产和提供能源^[9]。而藻类固定化技术在污水处理方面的应用, 使藻类反应器具有藻类密度高、反应速度快、耐毒害能力强、运行稳定可靠、微生物流失少、产物易分离、能纯化和保存高效菌株等优点, 并且其在污水深度处理和氮磷去除方面也具有独特的优点^[10-11]。

1 微藻固定化技术

固定化技术是指利用物理和化学手段将游离细胞定位于限定的空间区域并使其保持生物活性和可反复利用的一种基础技术。该技术分类方法较多, 很难达到统一, 但一般说来可分为: ①载体法; ②吸附法; ③包埋法; ④共价键结合法; ⑤交联法^[12-14]等方法。对于固定化载体, 一般采用具有较高载体活性和稳定性、单位体积内固定细胞量大、容易获得、价格便宜、操作制备方便并能适用于大规模生产的材料^[13, 15, 16], 就目前而言, 所采用的固定化载体材

料主要有三大类,即:有机高分子载体、无机载体和复合载体^[17]。

藻类固定主要采用吸附法和包埋法,这两种方法均具有操作简便、对细胞活性影响小的优点,但是吸附法可固定细胞量有限,并且固定的细胞容易脱落,所以包埋法成为目前应用最广泛的藻类固定化方法^[18]。藻类经固定后,提高了对氮、磷和重金属等物质的吸收和富集,这主要是因为固定化藻类的生长和生理特性发生了变化,但是目前这方面的研究还很不系统,一般认为固定化提高了藻类的合成代谢活性,延迟衰老,并在一定程度上降低了藻类的分解代谢活性^[19-20]。

2 固定化微藻在环境方面的应用^[21]

2.1 污水处理

早在1957年,Oswald等就提出利用藻类去除污水中的氮、磷等营养物质,并为好氧微生物提供氧气^[3],从此,建立在菌藻共生基础上的氧化塘技术得到广泛的应用和发展^[22],到了20世纪60年代,高负荷藻类塘的出现更是引起人们的注意,特别是80年代以后,随着固定化这一生物技术的应用和高效光生物反应器的研制,为克服传统的藻类污水处理系统停留时间长、占地面积大、处理效率欠稳定和固液分离难等问题提供了有效的解决途径,使藻类污水处理技术得到了迅速发展^[8]。

2.1.1 脱氮除磷

污水的脱氮除磷一般分为物理化学法和生物法两种,物理化学法处理费用较高,且易产生二次污染,所以普遍认为生物法脱氮除磷最为经济有效。不过传统的生物脱氮除磷技术,普遍存在停留时间长、处理效果受环境变化影响大、不能有效利用污水中的氮磷、处理费用高等缺点^[23-25]。而固定化微藻由于固定化载体对氮磷具有一定的吸附富集作用,对环境等的变化具有一定的缓冲作用,同时固定化微藻与自由悬浮微藻相比较,显示出更强的增长性和生理活性^[26-27],所以固定化微藻具有处理效率高、对环境变化(如pH值、温度、有毒物质和有机溶剂等)承受能力强等优点^[28],并且它可以通过光合作用,把污水中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 NO_2^- 、 H_2PO_4^- 等无机离子和尿素等有机物质所含有的N、P等元素缔合到碳骨架上,形成藻类细胞^[29],若能开发出简单易行、经济有效的收获固定化基质内微藻的方法,则固定化微藻在实现高效、稳定的去除污水中氮磷的同时,也实现了对其进行利用的目的,即获得了能够制造饲料、生产医疗保健品和其他化工原料的藻类,从而对降低污水脱氮除磷的费用也有一定的意义。

De la Noûte等利用脱乙酰几丁质固定席藻处理市政污水,处理时间为24h,其对无机氮和磷酸盐的去除率分别为95%和92%,而悬浮藻对磷酸盐的去除率仅为60%^[30];Robinson等^[31]将小球藻固定在褐藻酸钙内,研究其对 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除。结果表明,在批量培养试验中,400个藻珠(每个藻珠含 10^7 个细胞)在24h内能去除100mL(含 $10\text{ }\mu\text{mol PO}_4^{3-}-\text{P}$)培养基中的全部 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$;Cañizares等^[32]对悬浮螺旋藻和角叉菜聚糖固定螺旋藻处理造酒废水进行了比较研究,悬浮藻对 NH_4^+-N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和总磷(TP)的去除率分别为75%、98%和53%,而固定藻对氮、磷的去除率均在90%以上;严国安、李益健等^[33]利用褐藻酸钠固定普通小球藻和斜生栅藻^[19],研究表明,固定藻对氨氮和磷酸盐的净化效率比悬浮藻明显提高,即在5d的静态试验中,固定化普通小球藻和斜生栅藻对氨氮的去除率分别为94.8%和78.7%,对磷酸盐的去除率分别为100%和82.7%,而悬浮小球藻和斜生栅藻对氨氮的去除率分别为51.9%和43.0%,对磷酸盐的去除率分别为89.7%和72.7%;张国治等利用固定化微藻处理鸡粪厌氧发酵液,固定化微藻对 NH_4^+-N 和TP的平均去除率分别由悬浮微藻的62.4%和62.7%提高到84.0%和73.8%,且运转效果稳定^[34]。

2.1.2 去除重金属离子

环境污染中所说的重金属主要是指汞、镉、铅、铬和类金属砷等生物毒性显著的元素,以及锰、钼、镍、铜、钴、锡等常见元素^[35],这些元素进入环境后,不仅造成资源浪费,更能造成严重的环境污染,对人类自身安全产生持久的威胁。这是因为环境中的重金属不仅不能像有机污染物那样被生物所降解,且能通过食物链在生物体内积累,破坏生物体的正常生理代谢活动,危害生物和人体健康,所以重金属的去除与回收不仅具有节约资源的意义,更是环境保护领域的重要课题之一^[36-38]。

重金属废水的传统处理方法主要有:离子交换法、化学沉淀法、电解法、反渗透法、吸附法、不溶性络合物法、氧化还原法、蒸发浓缩法等^[39-41],根据重金属离子的最终去除形式,可将这些方法分为两大类,即:①使废水中的溶解态重金属转变成不溶的重金属化合物,这类方法应用较广,但重金属回收较复杂,运行费用较高;②在不改变废水中重金属化学形态的条件下进行浓缩和分离,这一类方法易于回收重金属,但对技术要求较高^[42-43]。但总的来说,这两类方法都存在处理效果不理想,容易产生二次污染等缺点,特别是在重金属离子浓度较低时,往往由于操作费用和原材料成本相对过高而难以投入实际

应用^[44]。

近年来发展起来的利用藻类吸附回收废水中金属离子的技术与以上处理方法相比较,具有以下优点:①不产生二次污染;②吸附容量大,去除效率高,适用范围广;③对金属离子具有良好的选择吸附性;④吸附的重金属离子容易洗脱,利于吸附材料的重复利用和金属离子的回收;⑤对低浓度重金属废水依然具有较好的处理效果等^[36-43]。而固定化微藻用于重金属废水处理时,由于固定化技术在增加单位体积生物量,提高处理负荷的同时,也减少了解吸过程中微藻的损失量,并且固定化载体对重金属离子具有吸附富集作用,对其毒性却具有缓冲作用,从而使得固定化微藻具有更高的处理效率和吸附量^[19-44]。

Geoffrey 等^[45]利用藻朊酸盐固定小球藻来聚集 Co、Zn、Mn 等金属,在 5 h 内其对 Co、Zn、Mn 的吸附率分别为 62%、40% 和 54%,与之相比,在相同条件下,悬浮微藻的吸附量要小的多;严国安、李益健等^[46]利用褐藻酸钠固定斜生栅藻,研究表明,固定化斜生栅藻对 Hg^{2+} 的去除率明显高于悬浮藻,并且污水中 Hg^{2+} 的浓度大小对两种状态斜生栅藻的去除率也有一定影响,即处理时间为 5 d, Hg^{2+} 质量浓度分别为 0.2、0.8、1.4 mg/L 时,固定化栅藻对 Hg^{2+} 去除率分别为 96.5%、97.8%、97.8%,而悬浮栅藻的去除率仅分别为 82.6%、80.7%、75.7%;杨芬等^[47]利用褐藻酸钙固定的普通小球藻处理含铜废水,在 Cu^{2+} 浓度较低时,其去除率可达 95%,并且在吸附完成后,可用 HCl 对固定化藻细胞吸附的 Cu^{2+} 进行解吸,解吸后其仍具有较高的吸附率,可反复使用,不会造成二次污染。

2.1.3 去除难降解有机物

污水中的有机化合物可作为藻类生长所需的重要碳源,藻类可以有效地富集和降解多种有机化合物,如碳氢化合物、有机氯、农药、烷烃、偶氮染料、淀粉、酚类、邻苯二甲酸酯和金属有机污染物等^[8-48]。利用微藻固定化系统吸附降解难降解有机污染物,与悬浮藻类系统相比较,具有去除效率高、可忍受有毒物质浓度高等特点,很有研究价值^[21]。Zhang Li 等利用固定化小球藻降解三丁基锡及其降解产物二、一丁基锡,固定化大大提高了微藻对三丁基锡及其降解产物的摄取,处理时间为 12 h 时,固定化微藻对 3 种丁基锡的去除率分别为 86.5%、79.0%、78.3%,而悬浮态微藻的去除率仅为 37.8%、30.0%、69.4%^[49]。

2.2 固定化微藻用于环境监测

微藻是水相环境中的第一营养水平,对外界环

境异常敏感,对抑制光合作用的化合物,如某些除草剂、重金属等尤其敏感,其对污染的敏感度要比鱼类和脊椎类动物高,所以用藻类作生物监测是目前水污染监测中必不可少的部分,并且由于微藻监测的相关性与灵敏度高,已为一些权威机构,如美国环保署(EPA)、国际经合与发展组织(OECD)、国际标准化组织(ISO)等所承认^[21-50]。而将固定化藻类用于环境的毒性检验是由 Bozeman 等于 1989 年首先提出的^[51],固定化技术提高了藻类毒性检验的应用范围,如可对有色溶液和浑浊水流进行毒性检验等,另外,固定化藻的代谢活性能在较长时间内保持稳定,可使藻类在一定时间内对水流的变化进行“积分”,故可用于长期现场监测^[52]。

Monika 等^[53]将藻细胞固定在藻酸盐上,以二氨基杜烯作为传递介质,二氨基杜烯的亲脂性可以穿透细胞,与光合作用的电子传递链相互作用,在光合系统 I(PS I)和光合系统 II(PS II)的还原位点,或 PSI 的氧化位点,传递介质将电子传递链的抑制程度截获,使 C—Ag 电极得到电流信号,以检测到电子传递的减少,从而可在低纳克级(ppb)下检测到三嗪类、脲类除草剂;Martine 等将小球藻固定在可移动的膜上,并将其置于光学纤维束前以检测小球藻叶绿体的荧光变化,由于叶绿体的荧光可用来表征光合作用的抑制程度,而大多数光敏感的污染物如除草剂、重金属会影响光合过程,使叶绿体荧光显著增加,且与污染物浓度呈正相关关系,所以这样就可以检测出样品中毒性化合物的浓度,这种检测方法相当灵敏,对阿特拉津、西玛津、敌草隆的检测都可达到欧盟对饮用水中除草剂质量浓度不超过 0.1 mg/L 的标准^[54];Twist 等^[55]用海藻酸钠将栅藻固定在尼龙上形成厚 0.75~1 mm 的微膜,用于现场监测水体的富营养化和排水的氮磷浓度变化;Lukavsky 等^[56]将月牙藻固定在 2% 的琼脂上制成生物感应器,用来测定 Cr^{3+} 的毒性。

3 展望

利用固定化微藻进行污水处理,具有处理效果稳定、能够有效防止二次污染等优点,利用固定化微藻进行环境监测比一般的监测方法具有更高的灵敏度。当然也应该看到,虽然固定化微藻已用于实际的污水脱氮除磷,但是其用于污水的生物处理和环境的生物监测方面,都还处于试验室研究阶段,这主要是因为固定化技术还不是非常完善,固定化材料的造价较高,还不适用于大规模的废水处理,同时还没有开发出成型的固定化微藻传感器。但是随着固定化技术和材料科学的发展,有理由相信,固定化微

藻在解决环境问题方面将会有广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] OSWALD W J. Ponds in the twenty-first century[J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(12):1-8.
- [2] 许丹妮. 固定化小球藻净化市政污水的初步研究[J]. *北方环境*, 2004, 29(2):14-18.
- [3] OSWALD W J, GOTAAS H B. Photosynthesis in sewage treatment[J]. *Trans Am Soc Civ Eng*, 1957, 122(1):73-105.
- [4] 李国平. 利用微藻生产有用物质的研究现状与前景[J]. *莆田学院学报*, 2002, 9(3):17-21.
- [5] BOROWITZKA M A. Microalgae as source of pharmaceuticals and other biologically active compounds[J]. *Journal of Appl*, 1995(7):3-15.
- [6] TAPE P. Microalgae production: technical and economic evaluation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1988, 32(7):873-885.
- [7] MINOWA T, YOKOYAMA S Y, KISHIMOTO M. Oil production from algal cells of *dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction[J]. *Fuel*, 1995, 74(12):1735-1738.
- [8] 严国安, 谭智群. 藻类净化污水的研究及其进展[J]. *环境科学进展*, 1995, 3(3):45-54.
- [9] ROBINSON P K. Immobilized Algae: A review[J]. *Process Biochemistry*, 1986, 8:122-127.
- [10] 周定, 王见龙. 固定化细胞在废水处理中的应用及前景[J]. *环境科学*, 1993, 14(5):51-59.
- [11] 李晔, 李凌, 张发有, 等. 生物固定化技术在含氮废水处理中的研究[J]. *工业安全与环保*, 2004, 30(6):18-20.
- [12] BORTONE G. Biological anoxic phosphorus removal the dephano process[J]. *Water Science & Technology*, 1996, 34(1-2):119-128.
- [13] 杨海波, 张欣华, 刘卫东, 等. 藻类固定化研究进展[J]. *大连大学学报*, 2002, 23(6):17-21.
- [14] 况金蓉, 冯道伦, 龚文琪, 等. 固定化细胞技术在废水处理中的应用[J]. *武汉理工大学学报*, 2001, 23(11):88-91.
- [15] 王新, 李培军, 宋宗志, 等. 固定化细胞技术的研究与进展[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(2):120-122.
- [16] 王平, 张洪林, 蒋林时, 等. 固定化细胞技术在废水处理中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2003, 34(2):8-11.
- [17] 朱柱, 李和平, 刘泽根, 等. 固定化细胞技术中的载体材料及其在环境治理中的应用[J]. *重庆建筑大学学报*, 2000, 22(5):95-100.
- [18] 胡燕荣, 于雪峰. 固定化微生物处理有机污染物的研究进展[J]. *干旱环境检测*, 2002, 16(4):195-196.
- [19] 严国安, 李益健, 王志坚, 等. 固定化栅藻对污水的净化及其生理特征的变化[J]. *中国环境科学*, 1995, 15(1):10-13.
- [20] MALLICK N, RAI L C. Removal of inorganic irons from wastewaters by immobilized microalgae[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 1994(10):439-443.
- [21] 孙红文, 黄国兰, 丛丽莉, 等. 藻类固定化技术在环境领域中的应用[J]. *上海环境科学*, 1999, 18(8):356-359.
- [22] SHELEF G. *Algae biomass*[M]. Amsterdam: Elsevier/North-Holland Biomedical Biomedical Press, 1980:217.
- [23] 张自杰. *排水工程*[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000:306-322.
- [24] OSWALD W J, BOROWITZKA M. A. *Micro-algal Biotechnology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988:305.
- [25] 张彤, 曹国民, 赵庆祥, 等. 固定化微生物脱氮技术进展[J]. *城市环境与城市生态*, 2000, 13(2):17-20.
- [26] WILKINSON S C, GOULDING K H, ROBINSON P K. Immobilized algae for waste treatment[J]. *Brit Phycol J*, 1990(25):99-105.
- [27] TAM N F Y, WONG Y S. Effect of immobilized microalgal Bead concentrations on wastewater nutrient removal[J]. *Environ Pollut*, 2000, 107:145-151.
- [28] 曹亚莉, 田沈, 赵军, 等. 固定化微生物细胞技术在废水处理中的应用[J]. *微生物学通报*, 2003, 30(3):77-81.
- [29] 茹至刚. *环境保护治理*[M]. 冶金工业出版社, 1988:214-215.
- [30] DE LA N. Biological tertiary treatment of urban wastewater with chitosan-immobilized phormidium[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1988(29):292-297.
- [31] ROBINSON P K. Kinetics of phosphorus uptake by immobilized chlorella[J]. *Biotechnol Lett*, 1988(10):17-20.
- [32] CAÑIZARES R O. Free and immobilized cultures of *spirulina maxima* for swine waste treatment[J]. *Biotechnol Lett*, 1993, 15(3):321.
- [33] 严国安, 李益健. Hg^{2+} 对固定化小球藻污水净化及生理特征的影响[J]. *环境科学*, 1994, 15(5):6-9.
- [34] 张国治, 姚爱莉, 顾蕴璇, 等. 藻类对沼液中氮、磷去除作用的初步研究[J]. *中国沼气*, 1997, 15(4):11-15.
- [35] 刘静宜. *环境化学*[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987:123-132.
- [36] 陈勇生, 孙启俊, 陈钧, 等. 重金属的生物吸附技术研究[J]. *环境科学进展*, 1997, 3(6):34-43.
- [37] 潘进芬. 海藻对水体中重金属的吸附研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2000.
- [38] 张建梅, 韩志萍, 王玉军, 等. 重金属废水的生物处理技术[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(4):75-78.
- [39] WILKINS C J, ADERHOLD D. Comparison between biosorbents for the removal of metal ions from aqueous solution[J]. *Water Research*, 1998, 31(1):216-224.
- [40] 甘一如. 重金属的生物吸附[J]. *化学工业与工程*, 1999, 16(1):19-25.

(下转第59页)

硝酸菌强,这种高效包埋硝化菌颗粒提供了有利的载体环境来进行生物选择过程,经过低 DO 和高游离氨浓度驯化一个月后可形成亚硝酸菌为优势菌属的系统。

b. 在亚硝酸菌为优势菌属的这种流化床中,靠近基质的亚硝酸菌首先利用 DO 进行氨氧化反应,在某一时间拐点之前,NO₂⁻-N 保持一段时间的高积累率过程,在这一时间之后,NO₂⁻-N 将迅速全部转化为 NO₃⁻-N。

c. 在采用凝胶载体包埋硝化菌的生物流化床系统中,亚硝酸菌和硝酸菌的选择过程完成以后,逐渐恢复 DO 质量浓度到正常水平(3~4 mg/L)的情况下,仍然可以保持稳定的亚硝酸型硝化。这种流化床系统是通过调控反应的 HRT 来保持最优的亚硝酸型硝化效果,这一 HRT 的选择可参考间歇式实验

中相应浓度废水达到最高 NO₂⁻-N 积累率的时间拐点来进行调节。

参考文献:

- [1] 孙英杰,张隽超.亚硝酸型硝化的控制途径[J].中国给水排水,2002,18(6):29-31.
- [2] 王志盈,袁林江,彭党聪,等.内循环生物流化床硝化过程的选择特性研究[J].中国给水排水,2000,16(4):1-4.
- [3] 李强.硝化工艺中硝化菌体的微生物结构及其选择附着生长模式[J].辽宁城乡环境科技,2000,20(6):34-38.
- [4] 徐冬梅,聂梅生,金承基.亚硝酸型硝化实验研究[J].给水排水,1999,25(7):37-39.
- [5] 唐光福,孙国新,徐楚韶.焦化废水的亚硝化反硝化研究[J].水处理技术,2002,28(2):98-100.
- [6] 王建龙.生物固定化技术与水污染控制[M].北京:科学出版社,2002:117-127.

(收稿日期:2005-02-28 编辑:徐娟)

(上接第 12 页)

- [41] 况金蓉.生物吸附技术处理重金属废水的应用[J].武汉理工大学学报,2002,26(3):400-403.
- [42] 王绍文,姜风有.重金属废水治理技术[M].北京:冶金工业出版社,1993.
- [43] 潘进芬,林荣根.海洋微藻吸附重金属的机理研究[J].海洋科学,2000,24(2):31-34.
- [44] 陈佩林.微生物吸附重金属离子研究进展[J].生物学教学,2003,28(12):1-3.
- [45] GEOFFREY W, REHM H J. Accumulation of cobalt zinc and manganese by the estuarine green microalgae *Chlorella salina* immobilized in alginate microbeads[J]. Environ Sci Technol, 1992, 26(5):764-770.
- [46] 严国安,李益健,张忠新,等.汞对固定化斜生栅藻净化污水及其生理特征的影响[J].应用生态学报,1995,6(3):323-328.
- [47] 杨芬.固定化藻细胞对水中 Cu(II)的吸附研究[J].曲靖师专学报,2000,19(6):46-48.
- [48] 刘金齐,刘厚田.藻对偶氮燃料降解作用的研究[J].水生生物学报,1992,16(2):133-143.
- [49] ZHANG L, HUANG G, YU Y. Immobilization of microalgae for biosorption and degradation of butyltin chloride[J]. Artificial Cells, Blood Substitutes, and Immobilization Biotechnology, 1998, 26(4):399-410.
- [50] 王海英,蔡妙颜,郭祀远.微藻与环境检测[J].环境科学与技术,2004,27(3):98-101.
- [51] BOZEMAN J. Toxicity testing using immobilized algae[J]. Aquat Toxicol, 1989, 14:345-352.
- [52] FAAFENG B A. In-situ measurement of algae growth potential in aquatic ecosystem by immobilized algae[J]. J Appl Phycol, 1994(6):301-308.

- [53] MONIKA P, ELIZABETH A H. Mediated herbicide inhibition in a pet biosensor[J]. Anal Chem, 1995(67):1940-1949.
- [54] NAESSENS M, LECLERC J C, TRAN-MINH C. Fiber optic biosensor using *Chlorella vulgaris* for determination of toxic compounds[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2000, 46(2):181-185.
- [55] TWIST H. A novel in-situ biomonitor using alginate immobilized algae (*Scenedesmus subspicatus*) for the assessment of eutrophication in flowing surface waters[J]. Water Res, 1997, 31:2066-2072.
- [56] LUKAVSKY J, MARSALEK B. The evaluation of toxicity by a biosensor with immobilized algae[J]. Archiv Hydrobiol Supp, 1997, 119:147-155.

(收稿日期:2005-03-07 编辑:高渭文)

欢迎订阅《水电能源科学》

《水电能源科学》是由国家教育部主管,中国水力发电工程学会和华中科技大学共同主办的学术性刊物——中国水力发电工程学会会刊。刊物面向从事水、电、能源开发与研究的科研、教学、管理人员及大专院校师生,主要刊登有关水、电、能源及其相关学科的新理论、新技术、新方法以及工程应用的新成果。

主要栏目有:水文水资源与环境、水情测报与优化调度、水利水电工程、大坝安全与监测、水工水力学、机电与控制工程、电力市场等。

本刊为双月刊,逢双月 25 日出版,大 16 开本,正文 96 页,每册定价 8.00 元,全年 6 期共计 48.00 元。全国各地邮局均可订阅,邮发代号:38-111。若有漏订者,也可直接汇款到编辑部函购。

编辑部地址:武汉华中科技大学主校区 邮编:430074 电话:(027)87542126 E-mail:sdny@x263.net