

有机磷等农药残留生物监测技术研究进展

宋文丽, 杨超, 乔传令

(中国科学院动物研究所, 北京 100101)

摘要 综述了有机磷等农监测技术的最新进展, 简述和比较了国内外各种最新生物监测技术的原理和应用, 为农业和环境保护领域的监测提供参考, 同时也为我国的在线生物监测技术的发展作出铺垫。

关键词 有机磷农药; 生物监测; 生物指示剂; 生物传感器; 酶的可再生性

中图分类号 X835 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2010.6E.042 文章编号 1003-6504(2010)6E-153-05

The Research Development of Biological Monitoring of Pesticides like Organophosphorus Pesticides Residued in Agricultural Products

SONG Wen-li, YANG Chao, QIAO Chuan-ling

(Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The research progress of biological monitoring of organophosphorus pesticides (OPs) residing in the environment was summarized. The principle and application of the global latest bio-detection technologies were also compared. These provide a solid basis for the practical applications of the biosensors for the on-line monitoring of OPs in agriculture and environmental protection, and promote the development of China's online bio-detection technology.

Key words: rganophosphorus pesticides; on-line monitoring; biosensor

农药为我国的农、林、牧业发展做出了巨大的贡献, 但同时也是环境污染和食品中毒的重要污染源。目前我国使用的农药主要为有机磷农药和有机氯农药, 其中有机磷农药(OPs)是我国目前使用范围最广、用量最大的农药, 所以, 在环境监测上也研究的比较多。传统的农药监测方法主要是色谱法等化学方法, 存在费时、费力和耗时的缺点。所以, 以生物监测为主的在线监测技术已经被越来越多的研究和应用。生物监测的目的是希望在有害物质还未达到受纳系统之前, 在工厂或现场就以最快的速度把它检测出来, 以免破坏受纳系统的生态平衡, 或是能快速评价其潜在的毒性, 以免酿成更大的公害^[1-2]。并且, 生物的方法也在不断的与物理化学方法相融合, 以更好、更高效的监测环境中农药的污染。

1 用于监测的生物物质

1.1 利用指示生物作为环境监测的指标

某些特定环境下的生物物种, 其生物群落、活动强度和能量代谢都受到周围环境的影响。因此, 测量

这种特殊生物的特征变化可以监测环境污染程度。例如任宗明等研究了大型蚤在不同浓度有机磷农药作用下的行为变化规律后的得出大型蚤的运动强度会随水中有机磷农药的浓度和暴露时间增加而逐步减弱, 即使在污染物浓度很低的情况下依然会引起运动行为改变, 从而建立了一种对突发性有机磷农药污染事故的在线预警方法^[3]。当然, 也有与生物标签连用的研究方法出现, 例如 Carlos 等利用在四个不同地点采集的大米里的大型蚤的能量消耗和生化反应的变化, 例如致死量、呼吸运动强度及其体内羧酸酯酶和胆碱酯酶等生物标签的抑制等变化参数共同作为环境监测的指标来估计环境中的有机磷污染^[4]。

1.2 利用生物分子作为环境监测的指标

对于特定的污染物, 生物体内的某些分子会发生数量和活性等等的变化, 这些发生变化的分子同样可以作为生物标签来监测环境的污染状况。关于利用生物分子特别是酶作为环境监测指标来进行环境监测目前是应用最为广泛的一种方法。关于这方面的研究很多, 例如 Sarkar 等就介绍了在海洋中经常利用的四

收稿日期 2009-10-27, 修回 2009-11-10

基金项目: 中国科学院创新项目资金支持(KSCX2-YW-G-008), 国家项目资助 863(2007AA06Z335)

作者简介: 宋文丽(1984-), 女, 硕士研究生在读, 从事抗性分子遗传及环境微生物研究。(手机)15210237561(电子信箱)smo115@yahoo.com.cn

种生物标签^[5]。细胞色素 P450,金属硫蛋白, DNA 完整性监测和乙酰胆碱酯酶。他们都是广泛存在于生物体内的分子,在不同的环境中其含量或是结构是不一样的,这样就可以利用各种手段对生物标签进行分析,如利用光谱法,免疫酶联方法,生物化学分析,荧光测量,原子吸收光谱,高效液相色谱法等方法来确定异质污染如 PCBs, PAHs, PCDs 等多种污染物。目前应用最多的乙酰胆碱酯酶,并且该酶结合各种物理,生物,化学的分析方法也层出不穷。最近,也有利用植物酯酶作为生物标签来代替乙酰胆碱酯酶的方法出现^[6]。同时,更多的分子生物学方法例如蛋白质组分析也被应用到环境监测中来。例如 Hongkun 等首先通过双向聚丙烯酰胺凝胶电泳分析了不同浓度甲基对硫磷胁迫下牙鲈脑中的蛋白变化,然后在用蛋白质组分析方法来确定是那些蛋白发生了怎样的变化。研究表明,有 17 种蛋白质发生了变化,其中热激蛋白 70,金属硫蛋白和细胞色素 p450 发生了巨大的变化,这也为它们可以作为环境监测的分子标签作了佐证。同时,也说明蛋白质组学也可以用来发现新的生物标签^[7]。

目前许多研究是结合多种方法,单一的研究方法已不多见,例如 Ros 等在分析半干旱土壤(半干旱土壤中农药相对持续时间更长)中的阿特拉津时就是利用菌群的生物量和代谢指标共同分析的。因为微生物对于外界环境的变化反应迅速, Ros 利用细菌计数 CFU 来研究不同浓度阿特拉津下半干旱土壤中微生物数量的变化。同时,由于不同的环境会影响整个微生物生态系统的种群变化和基因交流,所以就可以研究利用单一碳源的多种微生物的群落生理图谱 CLPPs,变性梯度凝胶电泳(DGGE)分别对不同浓度的阿特拉津半干旱土壤样品进行研究,再整合前面所提供的数据,就可以在生态系统和基因即宏观和微观上对环境做出一个更为准确的评价^[8]。

1.3 利用免疫学抗原抗体作为环境监测的指标

传统的 ELISA 也在环境监测领域得到了广泛应用,这种方法虽然可以分析大量样品,但是却不适合实地监测,并且 ELISA 还需要大量处理,昂贵的塑料托盘和较长的操作时间,这些都限制了它的应用。Kim 等对传统 ELISA 方法进行改造,构建一种通过抗阿特拉津抗体与辣根过氧化物酶融合蛋白结合的可调免疫法快速廉价有效的分析环境中的阿特拉津^[9]。国内的余向阳等则以间苯氧基苯甲酸为半抗原,通过与牛血清蛋白偶联后免疫新西兰大白兔,获得对多种菊酯类农药有特异性的光谱性抗体,并对抗体进行标记,建立了一种直接竞争性 ELISA 方法,并在批量样品的快速筛选监测中进行初步应用^[10]。

2 生物传感器

2.1 酶生物传感器

目前,用于有机磷农药的生物监测的酶生物传感器根据使用酶的机制不同可以分为两大类。第一种是利用有催化性质的酶设计的生物传感器,即可以催化转化有机磷农药的酶,其代表为有机磷水解酶。而另一类则是利用有机磷农药对有些酶的抑制作用而设计的生物传感器。其代表为乙酰胆碱酯酶。这种生物传感器又可以分为三大类:(1)把表达酶的整个细胞固定化的生物传感器。这种传感器比较稳定并且易于再生,但是也会由于几种酶的共同作用而有副反应的影响。(2)固定酶基质的生物传感器,此类传感器通过测量抑制前后酶的产物变化来监测环境中待测物质的浓度变化。(3)直接固定酶的生物传感器,即酶与信号转导元件紧密连接在一起^[11]。当然,也有的传感器需要联合细菌细胞和酶的共同作用,例如 Yu 等首先利用有机磷水解酶水解有机磷农药释放 PNP,然后再利用秸秆菌去氧化 PNP,通过氧化作用产生的电流变化来监测环境有机磷污染物^[12]。或是直接把有机磷水解酶表达在假单胞菌 JS444 的表面,然后把菌细胞固定在感知电流的电极板上来监测有机磷农药^[13-14]。

2.2 微生物传感器

早期的微生物传感器就是利用微生物的呼吸代谢过程中的底物或是抑制剂所引起的呼吸或是代谢变化来监测这些底物或是抑制剂的。目前,利用 *lux*, *gfp* 或 *lacZ* 基因作为生物标签分子,并在它们上游融合受污染物调控的可诱导型的启动子,构建重组表达质粒,利用含该表达质粒的完整的微生物细胞,快速检测环境中的污染物^[15]。

还有就是越来越受到重视的在微生物传感器基础上发展而来的一种把酶表达在细胞的表面构建的电流传感器,这种方法不仅免除了酶的纯化底物通过细胞壁等步骤,并且具有很好的稳定性和可再生性^[16]。

3 生物传感器类型

3.1 电流酶生物传感器

电流型微生物传感器主要探测生化反应中的电活性物质,通过固定工作电极的电位给电活性的电子转移反应提供驱动力,探测电流随时间的变化。该电流直接测量了电子转移反应的速度,反映了生物分子识别的速度,即该电流正比于待测物质的浓度。对于有机磷农药的探测来说,有机磷水解酶水解的许多有机磷化合物,如巴拉松,甲基对硫磷,对氧磷,苯硫磷和杀螟硫磷,会产生硝基苯酚 PNP 这种电活性物质。PNP 可以在正电极被氧化,其氧化电流可以被探测,并且

是与它的浓度是成正比的。目前关于依赖电流的监测方法的研究较多是结合其他技术一起进行的。例如 Mulchandani 等就是利用构建流动注射电传感器来监测环境中的有机磷的^[17]。同时,也有人利用专门降解 PNP 成为对苯二酚的莫拉菌来监测电流的变化,其依据是对苯二酚比 PNP 更具有电活性^[18]。或是把莫拉菌的有机磷水解酶表达在细胞表面来构建电流监测型的生物传感器。这样,更方便的简化了监测的步骤,并且具有更好的稳定性^[19]。目前构建的电流型生物传感器主要有两种,其一是在丝网印刷厚膜碳电极表面涂高氯化离子交换树脂膜,同时把 OPH 固定于离子交换树脂膜中。另一种则是把 OPH 固定在碳糊电极表面,构造能远程监测的电化学传感器^[20]。

3.2 电位酶生物传感器

电位型微生物传感器将生化反应转换为电位信号,该信号与生化反应过程中产生或消耗的活性物质浓度对数成正比,既是与待测物质浓度的对数成正比。对于有机磷农药的探测,它的工作原理是利用戊二醛交联法把有机磷水解酶与牛血清蛋白交联在一起固定化,并与一个 pH 电极一起形成一种简单的酶电极。其他元件还包括 pH 计,一个放置在磁搅拌器中用于混合和图表记录的测量单元。传感器的信号和响应时间可以在缓冲液的 pH 值,离子浓度,温度和酶的固定化等方面得以优化。例如 Schoning 等用 pH 敏感材料和硅构建的有机磷水解酶生物传感器即是利用了电容点位的方法^[21]。同时,利用植物络合素对重金属的吸附而构建的监测环境中重金属物质的电容式传感器也有报道^[22]。由于依赖于电流的生物传感器多是监测可以水解释放硝基苯酚 PNP 的有机磷化合物,这样对底物就有一定的限制。所以 Wang 等就构建了一种电流电势开关转换型传感器,虽然该传感器利用一种有机磷水解酶,但是,可以通过开关来调节不同的监测方法(电流或电势)来监测不同的底物^[23]。

3.3 电导率酶生物传感器

许多微生物催化的反应包括离子的反应,这样,反应中就会引起溶液的导电性质的改变。虽然这种探测不是特异性的,但是,通过导电性的监测方法是十分灵敏的。目前运用此法在农药的环境监测领域的研究还较少。但是,在生物传感器的实时监测研究中也是一门不可或缺的重要技术。例如, Liu 等曾把有机磷农药固定在单壁碳纳米管上,通过反应过程中电导率的变化来监测有机磷农药的浓度^[24]。

3.4 光学生物传感器

光学微生物传感器通过建立发光物质于酶底物浓度的一种偶联关系来对目的底物进行监测。目前主

要有生物体发光生物传感器,荧光生物传感器和比色生物传感器三种^[21]。早期使用的生物传感器主要是把异硫氰酸荧光素固定在酶上,主要是测定酶周围底物反应所引起的 pH 变化。另外一种则是探测由于有机磷水解酶水解作用所产生的发色团,这种发色团一般都有一个特异的吸收波长,以此来判断反应的进行。此种技术也可以利用环境污染物与酶的反应所产生的有色物的方法来监测环境污染物。例如苯系物可以用双加氧酶和过氧化物酶连锁反应产生有色物来监测苯系物的浓度。Xu 等就是把甲苯双加氧酶和甲苯二氢二醇脱氢酶共同表达在大肠杆菌细胞内,这样就可以把苯系物转化为儿茶酚,通过与辣根过氧化物酶偶联的反应而进一步转化为有色产物。这种有色产物可以通过分光光度法得以监测^[25]。也有利用荧光染料如 oxazol-5-one 及其衍生物或是把对 pH 敏感的荧光探针 SNARF-1 表达于胆碱酯酶上制成聚乙烯醇水凝胶微粒来监测环境中的有机磷农药浓度^[26-27]。同时由于不同的荧光素对于不同的变化具有不同的敏感性,同样可以根据需要来选择不同的荧光探针。例如 DiBAC4(3)为最常用的膜电位荧光探针,Fluo-3、Rhod-1、Indo-1、Fura-2 等为游离钙荧光探针, Dichlorodihydrofluorescein diacetate (2,7-二氯二氢荧光素乙酰乙酸, H₂DCFDA) 为活性氧荧光探针等。还有利用纳米量子点代替以往使用的荧光探针和同位素去标记生物分子,从而达到实时监测的目的。由于纳米量子点的发射波长可通过控制它的粒径大小来“调谐”,因而可获得多种可分辨的颜色。同时不同大小的纳米晶体能被同一波长的光激发并发出不同颜色的光,其激发光谱宽且连续分布,而发射光谱呈对称分布且宽度窄,因此不同的量子点可以由同一波长的光激发并且允许同时使用不同光谱的量子点来进行生物标记。另外,量子点具有良好的光化学稳定性,可以耐受更强的激发光和更长的光发射周期^[28-29]。所以这些优点都是以往荧光探针和同位素无法比拟的。

3.5 力学生物传感器

微悬臂可以随分子吸附或是结合作用而表面张力发生变化从而发生倾斜作用,这种倾斜可以是向下或是向上,通过记录倾斜程度或是热力学变化就可以知道所要测量的目的生物或是化学物质的性质和浓度。目前,表面具有选择性涂层的微悬臂(MCLs)构建的极其敏感的化学气相传感器已经出现。另外 MCLs 所具有的特殊优点就是它在空气或是溶液中都可以使用。分子识别物质可以集合或是共价连接到微悬臂的一边,经过修饰的微悬臂可以自组装成单层膜、溶胶凝胶或是水凝胶。最近,也产生了修饰微悬臂产生

的纳米逐层组装方法。这种逐层技术可以通过改变相反电荷化合物例如线性聚离子或是酶的吸附(主要是通过静电吸引)从而在任何表面形成超薄有组织的薄层。目前,在环境监测上,出现了把降解有机磷的有机磷水解酶固定在薄膜网上从而影响微悬臂的倾斜,不同于早期的微悬臂传感器的是,这种传感器是可以再再利用的^[30]。

4 酶的可再生性研究

许多因素可以影响酶的活性进而影响监测的灵敏性,例如温度、pH 值、离子强度和酶的存在状态等都可以影响酶的活性和可再生性。对于酶的抑制和可再生机制的研究一直是生物化学和生物技术领域的一个重要方面,特别是在固定化酶的应用上,酶的可再生机制显得尤为重要。在早期的研究中,TMB-4 和 NaF 都被用作抑制性酶生物传感器的复活剂。同样,一些被重金属抑制的酶也可以通过添加金属离子螯合剂来恢复其活性。例如 EDTA 对汞抑制酶生物传感器的恢复作用。也有很多人研究如何改进增强酶的稳定性,例如 Chough 等认为在酶包被的尼龙网上加入矿物油和硅油可以增强酶的稳定性和敏感性并且可以改变酶电极的选择性^[31]。另外,现在兴起的介孔二氧化硅技术 FMS 也是一门强大的技术。介孔二氧化硅可以螺旋成 FMS 小孔,与细胞的拥挤程度相仿。一般酶在细胞中的活性比溶液中的活性更高,因为在细胞中,酶被其他分子包围,其浓度是实验室条件下的 1000~10000 倍。拥挤现象可以使展开的、自由漂浮的蛋白重新折叠,向上折起,恢复活性。所以,介孔二氧化硅材料可以恢复酶的活性^[32]。所以 Lei 等就固定有机磷水解酶在 FMS 上,并且把这种 OPH-FMS 通过干的高氯化离子交换树脂凝胶置于玻碳电极上,这样,FMS 就可以保护有机磷水解酶使它活性不会丧失^[33]。

[参考文献]

- [1] 杨阳. 污/废水的生物监测方法及其发展[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(12):1538-1539.
Yang Yang. Sewage/waste water biological monitoring method and its development [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2006, 16(12):1538-1539. (in Chinese)
- [2] 刘小兵, 蒋柏泉, 刘海. 生物传感器应用于环境监测的新进展[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(4):111-113.
Liu Xiao-bing, Jiang Ba-quan, Liu Hai. Advances on application of biosensor to environmental monitoring [J]. Environment Science & Technology, 2004, 27 (4):111-113. (in Chinese)
- [3] 任宗明, 马梅, 王子健. 饮用水生产中突发性有机磷农药污

- 染事故的在线生物监测[J]. 给水排水, 2006, 32(2):17-20.
Ren Zong-ming, Ma Mei, Wang Zi-jian. On-line bio-monitoring of organophosphorous pesticides in case of accidental contamination of drinking water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(2):17-20. (in Chinese)
- [4] Carlos B, Joana D. Combined use of biomarkers and in situ bioassays in daphnia magna to monitor environmental hazards of pesticides in the field [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, 26(2):370-379.
- [5] Sarkar A, Ray D. Molecular Biomarkers: Their significance and application in marine pollution monitoring[J]. Ecotoxicology, 2006, 15:333-340.
- [6] 林素英, 林少琴, 王军. 豆类酯酶的提取及其在有机磷农药检测中的应用[J]. 现代农业科学, 2008, 15(9):14-23.
Lin Su-ying, Lin Shao-qin, Wang Jun. Extraction of esterase in beans and Its application in the detection of organic phosphoric pesticide [J]. Modern Agricultural Science, 2008, 15(9):14-23. (in Chinese)
- [7] Na H K, Huang Q Y. Differential proteins revealed with proteomics in the brain tissue of paralichthys olivaceus under the Stress of methyl parathion[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2008, 26(6):662-666.
- [8] Ros M, Goberna M. Molecular and physiological bacterial diversity of a semi-arid soil contaminated with different levels of formulated atrazine[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34:93-102.
- [9] Kim J Y, Mulchandani A. An immunoassay for atrazine using tunable immunosorbent[J]. Analytical Biochemistry, 2003, 322:251-256.
- [10] 余向阳, 刘媛. 拟除虫菊酯类农药多残留直接竞争 ELISA 建立及初步应用[J]. 分析测试学报, 2008, 21(3):249-252.
Yu X Y, Liu Y. Development of direct competitive ELISA for pyrethroids and its application[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2008, (3):249-252. (in Chinese)
- [11] Amine A, Mohammadi H. Enzyme inhibition-based biosensors for food safety and environmental monitoring [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, 21:1405-1423.
- [12] Yu L, Mulchandani P. Whole cell-enzyme hybrid amperometric biosensor for direct determination of organ phosphorous nerve agents with p-Nitro phenyl substituent [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 85(7): 706-713.
- [13] Yu L, Mulchandani P. Direct determination of p-Nitro phenyl substituent organ phosphorus nerve agents using a recombinant pseudomonas putida JS444-modified Clark oxygen electrode[J]. Journal of Agriculture Food, 2005, 53: 524-52.
- [14] Yu L, Mulchandani P. Biosensor for direct determination of fenitrothion and EPN using recombinant pseudomonas putida JS444 with surface expressed organ phosphorus hydro-lase.1[J]. Modified Clark Oxygen Electrode, Sensors, 2006,

6:466-472.

- [15] Yu L, Chen W. Microbial biosensor[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 568:200-210.
- [16] Mulchandani P, Chen W. Amperometric microbial biosensor for direct determination of organophosphate pesticides using microorganism with surface expressed organophosphorus hydrolase[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2001, 16:433-437.
- [17] Chandani P, Chen W. Flow Injection amperometric enzyme biosensor for direct determination of organophosphate nerve agents[J]. *Environment Science Technology*, 2001, 35(12):2562-2565.
- [18] Mulchandani P, Yu L. Amperometric microbial biosensor for P-nitrophenol using *Moraxella* sp.-modified carbon paste electrode[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2005, 21: 523-527.
- [19] Pailwal S, Wales M. Fluorescence-based sensing of P-nitrophenol and P-nitrophenyl substituent organophosphates [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 596(1):9-15.
- [20] 王丽红, 张林, 陈欢林. 有机磷农药酶生物传感器研究进展 [J]. *化学进展*, 2006, 18(4):440-452.
Wang Li-hong, Zhang Lin, Chen Huan-hin. Development of enzyme biosensor of organophosphorus pesticides [J]. *Progress in Chemistry*, 2006, 18(4):440-452. (in Chinese)
- [21] SchÖning M J, Arzdorf M. A capacitive field-effect sensor for the direct determination of organophosphorus pesticides [J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 91:92-97.
- [22] Bontidean I, Ahlqvist J. Novel synthetic phytochelatin - based capacitive biosensor for heavy metal Ion detection[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2003, 18:547-553.
- [23] Wang J, Krause R. Dual amperometric -potentiometric biosensor detection system for monitoring organ phosphorus neurotoxins [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2002, 469:197-203.
- [24] Cai X P, Yu L. Single-walled carbon nanotube Based real-time organophosphate detector[J]. *Electroanalysis*, 2007, 19(5):616-619.
- [25] Xu Z H, Mulchandani A. Detection of benzene, toluene, ethyl benzene, and xylenes (BTE-X) using toluene dioxygenase-peroxidase coupling reactions[J]. *Biotechnology Program*. 2003, 19(6):1812-1815.
- [26] Ozturk G, Alp S. Photo physical characterization of fluorescent oxazol-5-one derivatives in PVC and their application as biosensors in the detection of ACh and AChE inhibitor: Donepezil[J]. *Dyes and Pigments*, 2008, 76:792-798.
- [27] Kim B, Lee Y. Poly(ethylene glycol) hydro gel micro particles containing enzyme-fluorophore conjugates for the detection of organ phosphorus compounds[J]. *Sensors and actuators B: Chemical*, 2008, 137(1):209-214.
- [28] 杨婉身, 张寒飞. 量子点作为生物荧光标记物的研究进展 [J]. *锦阳师范学院学报*, 2006, 25(2):1-7.
Yang Wan-shen, Zhang Han-fei. Quantum dots for biological labeling[J]. *Journal of Jin yang Teacher University*, 2006, 25(2):1-7. (in Chinese)
- [29] Chan W, Maxwell D. Luminescent quantum dots for multiplexed biological detection and imaging[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2002, 13:40-46.
- [30] Karnati C, Du H W. Organ phosphorus hydrolase multilayer modified micro cantilevers for organ phosphorus detection [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22:2636-2642.
- [31] Chough S H, Mulchandani A. Organophosphorus hydrolase-based amperometric sensor: modulation of sensitivity and substrate selectivity[J]. *Electroanalysis*, 2002, 14(4):273-276.
- [32] Lei C H, Shin Y. Characterization of functionalized nanoporous supports for protein confinement[J]. *Nanotechnology*, 2006, 17:5531-5538.
- [33] Lei C H, Michelle M. Biosensing paraoxon in simulated environmental samples by immobilized organ phosphorus hydrolase in functionalized mesoporous silica[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36:233-23.

(上接第 127 页)

水环境质量标准》限值的钒污染物处理到《地表水环境质量标准》限值以下。

(3) 硫化沉淀法对钪、钒污染物基本无去除效果, 随着硫化钠投加量的增加, 钪、钒污染物的去除效果基本维持不变。对于《地表水环境质量标准》5 倍限值的钪、钒污染物溶液, 经硫化沉淀法处理后, 出水不能达到国家标准。

[参考文献]

- [1] 魏艳, 康宇炜, 章民驹, 等. 突发性氰化物污染原水的应急处理工艺研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(23):48-50.
- [2] 崔福义. 城市供水应对突发性水质污染若干技术问题的思考[J]. *给水排水*, 2009, 35(8):1-3.
- [3] 王健, 陆少鸣. 突发性水污染事件中氰化物的去除研究[J]. *水处理技术*, 2009, 35(3):27-29.
- [4] 纪洪杰, 田希彬, 郑玉清, 等. 混凝沉淀/PAC 吸附/超滤工艺处理引黄水库冬季原水[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(21):1-4.