

# 水质生物毒性预警系统建设及在海宁市饮用水源保护中的应用

王博, 王红晓

(浙江省环境保护科学设计研究院, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 介绍了基于微生物燃料电池原理的水质生物毒性预警系统, 说明了其在海宁市饮用水源保护中的应用。该水质生物毒性预警系统具有可感知毒性物质及有机物质污染、响应迅速、灵敏度高、维护管理容易、管理费用低等特点。

**关键词:** 水质预警; 饮用水源; 微生物燃料电池; 生物毒性预警

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2012)-05-0010-04

## Toxicity Early-alarm Biomonitoring System and Its Application in Drinking Water Source Protection in Haining

WANG Bo, WANG Hong-xiao

(Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310007, China)

**ABSTRACT:** The toxicity early-alarm biomonitoring system using microbial fuel cell and technical application of the system in drinking water source protection in Haining was introduced. The system could detect drinking water source pollution that were caused by toxic materials and/or organic substance, and exhibited advantages of fast response, high sensitivity, easy operation and maintenance, low maintenance cost etc.

**KEY WORDS:** water quality early-alarming; drinking water source; microbial fuel cell; toxicity early-alarm biomonitoring system

据调查, 中国 80% 左右的城市供水水源受到不同程度的污染。近年来, 更是发生了一连串严重危及饮用水源的污染事故, 例如松花江水污染事故、珠江上游水污染事故、湖南湘江水污染事故和湖南岳阳饮用水源污染事故等。饮用水安全已引起了人们的广泛关注, 各级政府相继建立了突发饮用水水质污染事件应急预案。在应急预案的执行过程中, 只有通过快速、科学、准确的监测手段, 才能保证预案的有效性, 其中水质预警系统的建设显得尤为重要<sup>[1,2]</sup>。水质预警系统已成为水质应急预案的重要制约因素。一般认为, 有效的水质预警系统应满足如下条件: 首先, 系统应能够适应所监测水源的水质特点, 且响应快速、灵敏、准确; 其次, 应能够实现在线监测, 响应突发水污染事件; 再次, 系统的监测指标对水质突变具有代表性, 可反映水质综合毒性突变; 最后, 系统软件应操作简便、功能合理、具有数据处理与查询功能。

基于微生物燃料电池的水质应急监测技术具有响应速度快、对水体适应能力强、操作维护简单

的特点, 近年来开始在水质预警系统中应用。海宁市在饮用水源保护中, 采用基于微生物燃料电池的水质应急监测技术作为水质毒性预警系统的主要技术, 在海宁实康水务有限公司水厂(原海宁市第三水厂, 以下简称“实康水厂”)建设了水质生物毒性预警系统, 以保障水质应急预案的响应及执行。实康水厂位于海宁市长山河北岸, 占地 12.65 hm<sup>2</sup>, 建设总规模为 30 万 t/d, 现建成一期工程, 规模为 15 万 t/d, 受益人口 40 万人。目前该水质生物毒性预警系统运行稳定, 为保障海宁市供水水质提供了有力支持。

### 1 技术选择与系统建设

#### 1.1 水质预警技术选择

水质预警技术主要有化学法和生物法。单纯

收稿日期: 2009-12-16; 修订日期: 2010-06-30

作者简介: 王博(1982—), 女, 助理工程师, 本科, 从事环境保护、环境管理与环境科技国际合作工作。

的化学分析易标准化,能够准确检出目标污染物的含量,但耗时长,检测费用高,较难实现在线连续监测,最大的局限还在于污染物的化学分析浓度与其生物可利用性不相关,因而不能区分不同形态污染物的毒性,不能全面评价环境质量,不适合开展实时监测或用于预防性监测目的<sup>[3]</sup>。针对海宁市饮用水源的特点,需要建立快速、灵敏、简便的测定水污染物急性的方法以便于现场应急生物监测,目前可应用于现场应急生物预警系统的有鱼类应急监测系统、水蚤应急监测系统、藻类应急监测系统、细菌应急监测系统等。

(1) 鱼类应急监测系统:主要依靠鱼的死亡、腮呼吸、位移等行为对水质污染提供早期应急监测<sup>[4]</sup>。浙江省杭州市曾于2005年在三江口取水头埠设置鱼类生物预警池。这类生物预警系统具有以下缺点:用于监测的鱼类需要精心喂养,工作量大,费用高;系统稳定性较差,鱼类受外界环境影响大;反映速度慢,一般监测时间2h,恢复时间10min;监测精度不高。

(2) 水蚤应急监测系统:水蚤是浮游动物中体形较小的一类,以藻类、真菌、碎屑物及溶解性有机物为食,分布广泛,繁殖能力强,同时对多种有毒物质敏感,是国际上普遍采用的标准毒性实验生物。应用过程中可采用水蚤的移动性与灵敏度、平均移动速度和分布情形、移动的不规则方向性及角度、群聚与分布的距离、泳动的高度、成长的体积等来判断水质情况<sup>[5]</sup>。这类生物预警系统中,水蚤需要专用的培养设施喂养,培养要求高;监测通过采用计算机对蚤类的动态进行图形图像处理,构成复杂,维护成本高;监测精度一般。

(3) 藻类应急监测系统:在水生生态系统及水生食物链中,藻类是初级生产者,其个体小、繁殖快、对毒物敏感,易于分离、培养并可直接观察细胞水平上的中毒症状,是一种较理想的生物毒性实验材料<sup>[6]</sup>。以藻的生长抑制效应作为测试指标,准确可靠,但是工作量大,测定周期长。

(4) 细菌应急监测系统:细菌种类繁多,对水质毒性或有机物浓度的反应多样,比如在含毒性物质的水样中,发光菌的发光强度会产生变化,硝化细菌的耗氧量会变化等。这类生物预警系统中,细菌需要专用的保存系统和实验缓冲液,运行费用高;需要测定细菌的发光强度或耗氧量<sup>[7]</sup>,相对其他生物应急监测系统,测量精度有所提高;系统的

测量时间在3~45min不等。

(5) 新型的微生物燃料电池应急监测系统:近来,基于微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell)技术,研究者开发出一种新型的微生物燃料电池应急监测系统,该系统具有毒性物质响应速度快(10min一个数据)、对水体适应能力强、抗干扰能力强、数据精准、预报及时、操作维护简单等特点,并且数据可以同步传输到中心控制室,便于及时处理水质异常情况。

以HATOX-2000为例,微生物燃料电池应急监测系统的基本原理见图1,当电化学活性微生物消化水样中的有机物时,可产生电子并转移到电极上,而水质的变化可以影响电子的产生和转移过程。系统可进一步将电极电子迁移过程转化为电信号并显示出来,从而直观地反映水质的变化。如图1所示,当水质正常时,微生物产生的电信号可维持在一定范围内,但当水质存在毒性物质或者有机负荷增加时,其电信号会偏离正常范围,见图2。综合来看,微生物燃料电池应急监测系统的电信号变化直观地反映了水质的变化情况,并可进一步推断毒性污染的来源与类型。

综合比较以上几种生物应急监测系统,根据海宁市饮用水源的特点,选择微生物燃料电池应急监测系统作为其饮用水质预警系统的核心技术。

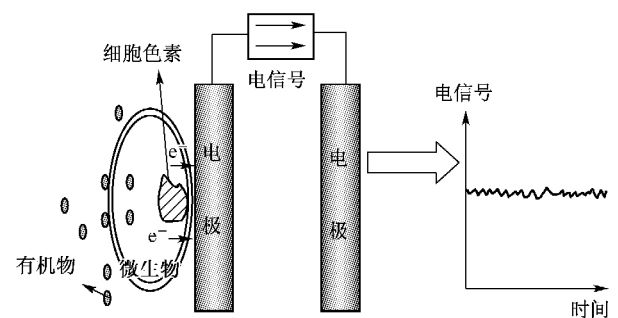
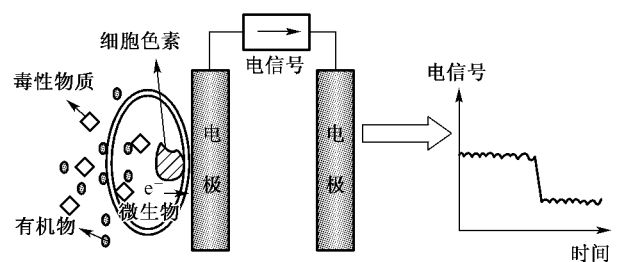


图1 微生物燃料电池应急监测系统基本原理



(a) 毒性物质侵入时系统电信号的变化

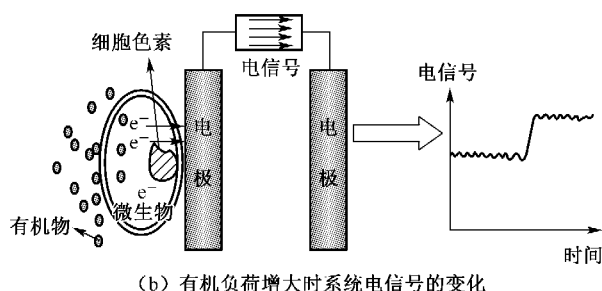


图2 水体中不同毒性类型与监测系统电信号变化示意

### 1.2 实康水厂水质预警示范工程建设

实康水厂的水质预警示范工程基于微生物燃料电池技术建设,核心的水质预警系统采用的是韩国某公司生产的 HATOX-2000 生物毒性预警监测系统。该示范工程包括取样系统、分析系统和管理系统 3 个部分,其处理预警流程见图 3。

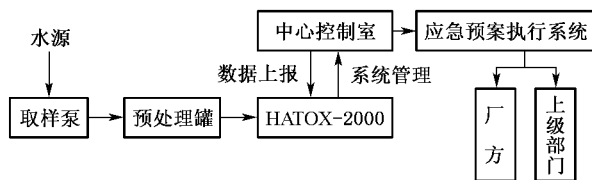


图3 海宁市实康水厂水质预警系统的构成

(1) 取样系统:包括一台取样泵和一套水样预处理系统,预处理系统针对海宁市水质特点设计,主要用于过滤水中的悬浮物,避免泥沙等对分析系统的损害。

(2) 分析系统:采用韩国某公司生产的 HATOX-2000 生物预警监测系统作为水质分析系统。该系统基于微生物燃料电池技术,可感知流入的毒性物质及超负荷的有机物质。系统采用双传感器设置,从而提高了预报的准确性。

分析系统工作过程如下:首先将水质变化通过微生物电极转化为电信号,然后通过对电信号的分析获得生物毒性度,反馈于管理系统。目前系统可以对镉、砷、汞、铅、六价铬、铁、氰化物、多氯联二苯、苯酚、有机磷、十二烷基硫酸钠、有机物、农药、挥发性有机物、藻类等 15 大类物质的毒性度以及综合毒性度变化进行在线无人监控。

(3) 管理系统:管理系统包括中心控制室和应急预案执行系统两部分。中心控制室负责数据的存储及控制系统的运行。数据可以通过 4~20 mA、RS 232 或 TCP/IP 3 种方式传输到中心控制室,整个系统的工作状态、分析流程可以通过主界面清晰直观地反映出来。应急预案执行系统主要负责应

急命令的下达和总协调,具体来说,当系统预警信号发出后,应急预案执行系统即对其进行分析,结果通知水厂管理人员并上报上级管理部门,以便及时采取有效措施防止水质污染事件的发生。

## 2 系统优化与运行

水质预警系统对保障饮用水安全意义重大,但基于微生物燃料电池的水质预警系统在浙江省乃至国内少有应用,缺乏运行经验。在系统建设、实际运行过程中,对所出现的问题进行了细致分析、认真解决,并针对当地水质,优化了处理方案,保证了系统的运行稳定。

### 2.1 系统优化

#### 2.1.1 取样口位置优化

系统的取样口应设置在距水厂取水口较近的水源断面上,以便及时准确反馈取水水源的水质变化情况。但如果距离过近,系统报警后的反应时间较短,不利于后续应急预案的执行。综合考虑水厂的取水口位置和处理工艺,对应急监测系统的取水口位置进行了细致论证,最终将其确定在的水厂进水口上游 50 m 处,并将取样间隔设置为 10 min。

#### 2.1.2 预处理工艺优化

由于应用场地水质的不同,系统并未预先安装预处理装置。考虑到实康水厂进水水质中 SS 含量较高,会堵塞管路,进而对微生物造成损害,影响预警效果。因而在预警系统前设计加装了一套过滤装置,以保证系统的稳定性。

#### 2.1.3 系统报警值优化

系统的报警标准分为“注意”及“警报”两档。若设置过高,则易产生漏报现象;若设置过低,则易产生误报情况。在实康水厂水质预警系统建立以后,对水源中有机物、悬浮物质、氨氮、溶解氧、重金属等因素的影响进行了两个月的实地监测。综合考虑当地水质状况及进水要求,设定水质预警系统的“注意”及“警报”标准分别设定在毒性度变化 50% 和 80%。

### 2.2 系统运行

#### 2.2.1 系统稳定性测试

系统在实际应用中,需要对菌种进行驯化,以适应当地的水质。系统对短时期内的毒性物质及有机物负荷反应灵敏,但长时间的水质缓慢变化可能改变菌种的组成,影响其准确性。实际运行中,采用人工配制毒性水样的方法定期对其预警性能

进行比对测试,以保证其运行稳定。以下是系统运行2个月后,对其预警性能进行的现场测试:

(1) 无毒水样测试:分析仪器中连续注入含一定量 BOD 的无毒水样,记录系统变化。

(2) 毒性物质水样测试:向分析仪器中连续注入浓度为5倍水质标准的有毒水样,记录系统变化,水样水质见表1。

表1 水样水质

毒性物质	铅	铜	铬	汞	氰化物	镉
浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.05	5.0	0.25	0.005	0.25	0.025

(3) 测试结果:分析仪器有A、B两个监测器,对报警设定值定义为,a. 当毒性度超过(含)50%,设定报警值为“注意”;b. 当A或者B传感器所测毒性度连续3次同时超过(含)50%,或者A、B传感器同时超过(含)毒性度为80%时,设定报警值为“报警”。所测结果见表2。

表2 水样测试结果

	通入时间/ min	毒性度/%		备注
		传感器 A	传感器 B	
无毒水样测试	0	1.09	2.01	开始通入水样,未报警
	60	1.21	2.13	未报警
毒性物质水样测试	0	1.19	1.93	开始通入水样,未报警
	10	-32.78	-19.58	未报警
	20	-65.9	-48.32	报警值为“注意”
	30	-72.27	-55.65	报警值为“注意”
	40	-75.43	-61.25	报警值为“注意”
	50	-78.5	-64.9	报警值为“报警”

### 2.2.2 报警事件处理

目前,海宁市实康水厂的水质毒性预警系统运行稳定,积累数据说明该水厂进水水质的毒性度变化范围为7%。经分析监测,这与水质受上游污染的波动吻合。值得指出的是,尽管预报及时,但水质生物毒性预警系统仍是一种通过定性描述水质变化而进行预警的在线技术,并不能确定具体的污染物及污染物浓度。在发生预警的情况下,首先应设法确定污染物,进而有针对性地采取治理措施。在此基础上应逆流确定污染源,采取一定的防护措施。比如2007年10月,该系统成功地为海宁市预警了一次水质污染事件。当时,连日强降雨天气造

成自来水厂取水口下游水平面上涨,并发生倒灌,致使下游农药等高毒性污染物质流入自来水厂取水区域,该系统随即发出了水质异常信号,并通知了厂方及上级管理部门。水厂发现预警后,立即采取了相应的处理措施,并马上展开调查分析,保证了居民饮用水安全和水厂的稳定运行。

### 3 结论与建议

经过改进、优化之后,基于生物燃料电池技术的水质生物毒性预警系统已在海宁市饮用水源保护中成功应用,该系统对水质的毒性度突变反应迅速、准确,实际运行中成功预警了水质污染事件一次,保障了当地的饮用水安全。此外,该技术已应用于北京奥运会期间的首都水质保障工作。

综合海宁市水质生物毒性预警系统的建设、运行及优化过程,得到结论与建议如下:

(1) 基于生物燃料电池技术的水质生物毒性预警系统响应速度快、预报及时、操作维护简单且稳定性较好,适合作为水质应急预案的预警技术。

(2) 建议在水质生物毒性预警系统的具体建设过程中,根据实际工况优化系统布置,合理安排采样口,并针对具体水质设计安装预处理系统,以保证系统运行的稳定性。

(3) 建议在水质生物毒性预警系统的运行过程中,采用人工配制毒性水样的方法定期进行比对测试,以保证系统预警的准确性。

总之,基于生物燃料电池技术的水质生物毒性预警系统可为水质污染应急预案的实施提供重要依据,对保障居民饮用水安全有重要意义,值得进一步推广。

### [参考文献]

- [1] 张锡辉,郑振华,欧阳二明,等. 水源水质在线监测预警系统的建设[J]. 中国给水排水,2007,21(11):14-17.
- [2] 赵耀,范文飙. 水源水质预警系统研究[J]. 黑龙江科技信息,2009,15:57.
- [3] 王海洲,刘文华,侯福林. 在线生物监测技术及其应用研究[J]. 生物学通报,2007,42(1):15-16.
- [4] 刘丽君,黄晓东,尤作亮,等. 水源水质在线预警监测系统的建设与应用[J]. 城镇供水,2006(4):2-4.
- [5] 李志良,任宗明,马梅,等. 利用大型藻类运动行为变化预警突发性有机磷水污染[J]. 中国给水排水,2007,23(12):73-75.
- [6] 高世荣,孙凤英,潘力军,等. 水质污染应急生物预警监测[J]. 2006,9(3):19-22.
- [7] 张俊强,魏建军,张杨,等. MicrotoxR 毒性检测系统与给水水质预警[J]. 中国给水排水,2007,23(16):79-80.