生物监测技术在水环境中的应用及研究

张述伟¹, 孔祥峰^{1,2}, 姜源庆³, 吕 婧¹, 吴 宁¹, 张 婧¹, 马 然¹, 邹 妍¹

(1.山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001; 2.中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100; 3.国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 山东 烟台 264006)

摘要: 随着水环境污染状况的日益加剧, 对水体环境的监测以及水体安全的及时预警响应要求极为迫切, 水生生物环境监测技术作为有效的水质环境监测评估和预警手段得到快速发展。文章介绍了水环境中生物监测的方法及特点, 对近年来生物监测技术的研究及应用进行了综述, 对生物监测技术存在的问题及对策进行了总结, 最后对生物监测技术的前景进行了展望。

关键词: 水环境; 生物监测; 发光细菌法

中图分类号: X835

文献标志码: A

Review of Application and Research of Biological Monitoring Technologies in Aquatic Environment

Zhang Shuwei¹, Kong Xiangfeng^{1,2}, Jiang Yuanqing³, Lv Jing¹, Wu Ning¹, Zhang Jing¹, Ma Ran¹, Zou Yan¹

(1.Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China;

2.School of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3.Yantai Oceanic Environmental Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Yantai 264006, China)

Abstract: With the increasing aggravation of aquatic environmental pollution, it is quite urgent to monitor the aquatic environment and have timely early warning of water quality security. As an effective means of monitoring and early warning of water environmental quality, aquatic biological monitoring technologies have been developed quickly. In this paper, the methods and characteristics of biological monitoring of the aquatic environment are introduced. Then, study and application of biological monitoring technologies developed in the recent years are reviewed, and problems and countermeasures are summarized. Finally, the prospect of biological monitoring is discussed.

Keywords: Aquatic Environment; Biological Monitoring; Microtox

CLC number: X835

随着近代工业技术的迅速发展, 水体中污染物种类逐年增多, 其引起的环境危害日益严重, 水环境监测也越来越受重视^[1-2]。目前, 环境监测和评估的方法主要有生物监测和理化分析两大类。当环境遭受到污染, 环境中生物的生长繁殖过程会受到影响, 生物活动特性也会相应改变。生物监测是系统地利用生物组分、个体或种

群等对环境变化所产生的反应监测和评估环境污染的技术^[3]。生物监测技术主要包括生态学方法和毒理学方法, 是理化监测方法的重要补充, 在环境监测和评估过程中起着十分重要的作用^[4-5]。生物监测方法可以用来测定环境中某一毒性物质的强弱, 还可以评价多种污染物的综合毒性^[6]。与理化分析相比, 生物监测方法具有直观可靠、

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406104); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ008); 山东省科学院青年基金项目(2013QN020); 青岛市战略性新兴产业培育计划项目(14912HY); 山东省科技发展计划项目(2014GGH215004)资助

作者简介: 张述伟(1986-), 男, 实习研究员。研究方向: 海洋环境监测。

通信作者: 孔祥峰, E-mail: kxf_1985@163.com

经济实用以及准确全面等特点,能反映环境的长期污染情况,可用于环境的综合评价,同时兼备预警功能。生物监测的目标是在污染物尚未危害生态系统之前,以最快的速度把它监测出来,防止系统的生态平衡受到破坏;或者是侦测出系统中潜在的毒性物质,及时预警响应,以免造成更大的危害^[7]。随着水环境污染状况的日益加剧,对水体环境的监测以及水体安全的及时预警响应要求极为迫切,水生生物环境监测技术作为有效的水质环境监测评估和预警手段得到广泛应用和快速发展^[8]。

1 水生生物环境监测方法及研究

在一定条件和范围内,水生生物群落和水环境之间互相作用、联系,保持着动态平衡关系。外部物质进入水环境后,作用于生物个体,由此影响生态系统中生物的生理状况、种群的数量以及物种的组成等^[9]。通过生物监测指示物和监测对象的不同,可将生物监测进行分类。

1.1 微生物群落监测法

微生物群落监测法是发展应用较早的生物监测方法^[10],主要是监测微型生物(含细菌、真菌、藻类、原生动物等)在水环境中出现的物种频率或者相对数量,通过数学计算统计得出的分布指数,以此为指标评价水污染程度^[11]。Cairns et al^[12]利用聚氨酯塑料块(Polyurethane Foam Unit, PFU)为基质采集水体中的微型生物,然后统计分析收集到的微生物群落各种参数,以评价水质的污染状况。沈韞芬 et al^[13]以此为基础,对微生物群落监测法进行了修正和改进,提出了与化学监测参数有显著相关性的四个生物学参数,包括原生动物种数、植鞭毛虫百分比、多样性指数和异养性指数,发展和建立适用于我国生态环境的微生物群落监测方法,并成为我国第一个自行制订的生物监测标准。Kuidong Xu et al^[14]改进微生物监测装置,采用瓶装聚氨酯泡沫塑料块消除海洋潮汐流和环流的影响,监测海水环境中的微型生物,取得较好的效果。李朝霞等^[15]采用微生物群落监测法评价化工废水的静态毒性,发

现原生动植物群落对化工废水效应浓度变化非常敏感。随着效应浓度的增加和毒性时间的延长,原生动植物群落群集的物种多样性下降,群集的速度也随之减缓。Cheng Ding et al^[16]则将微生物群落监测法应用于处理后造纸废水的监测,通过Shannon-Wiener多样性指数评价处理后的废水是否可用于农田灌溉。

随着微生物群落监测法的发展,数学分析在微生物群落监测法发挥的作用越来越明显。数学分析以及计算机应用的发展有助于更大范围内揭示生物群落参数的变化规律,使微生物群落监测法的使用范围更加广泛而且结果更加精确。

1.2 发光细菌法

发光细菌法是比较成熟的生物监测方法^[17],在国内外研究及应用非常广泛^[18-19],具有简便快速、灵敏度高、应用范围广等特点,能够监测出水样中大部分有毒物质,是经过标准认证的方法^[20]。李书钺等^[21]利用费氏弧菌的细胞发光特性,设计了一种水质毒性检测仪,用来测定水环境污染物质综合毒性水平。崔志松等^[22]选用遗传改造的发光细菌*Acinetobacter* sp. RecA作为指示物种,建立了污染物遗传毒性快速检测方法,该方法能够在3 h内获得毒性评价结果。Beckman公司依据发光细菌的发光原理,已推出用于环境监测的生物毒性检测仪Microtox,已成功应用于自来水源水及出厂水等水质的毒性情况监测。

发光细菌法在有机物及重金属等毒性物质监测领域有广泛的应用前景,但其本身也存在操作繁琐、误差较大等问题。电子技术的发展为发光细菌法的研究和应用提供了保证,结合荧光光度法、紫外分光光度法等仪器方法以及基因操作技术,发光细菌法将有更加广泛的发展和空间。

1.3 生物行为反应监测

生物行为反应监测是通过生物受到污染物危害后所产生的趋利避害的行为反应或生理机能的变化,来评价水体污染情况,确定污染物安全浓度,并及时做出预警响应的方法^[23]。常用的环境监测水生生物主要有鱼类、双壳软体动物以及水蚤等,其中鱼类作为环境监测的指示生物最

为常用^[24-25]。

斑马鱼是一种对水质非常敏感的热带淡水鱼，一旦水体发生污染，会在几分钟内做出相应的行为反应，是非常好的环境监测生物^[26]。斑马鱼的基因与人类基因有较高的相似度，以斑马鱼为指示物得出的水质监测结果，多数情况下都适用于人类。宋志慧等^[27]采用半静态法以斑马鱼为受试生物研究重金属对水生生物的综合毒性作用，实验发现重金属离子 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cr^{6+} 对斑马鱼具有的不同毒性作用，斑马鱼体内过氧化氢酶CAT活性与 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cr^{6+} 浓度均具有显著的剂量-效应关系，因此可以用斑马鱼为指示生物来监测重金属污染。深圳水务集团通过摄录机24 h监察斑马鱼在水中的活动情况，研发了水质毒性监测系统。计算机通过实时录像分析斑马鱼活动轨迹，若发现鱼出现异常活动或死亡，系统会及时响应并发出警告^[28]。另外，还有采用鲤鱼、金鱼等作为监测生物的报道^[29-30]，根据鱼的呼吸变化指示有毒环境，汪红军等^[31]研究发现在有污染物存在的情况下，鱼鳃呼吸加快且无规律。孙婕等^[32]提出一种以时间为变量，用多种小型组合鱼在污染源废水原液中的半致死时间判定其生物毒性的分级标准。

鱼类多用于淡水环境下的生物监测，而在海洋中一般利用双壳类生物活体对水体污染做出的生理或行为响应，国外已经取得较好的研究进展和应用示范^[33]。荷兰科学家Schuring et al^[34]将电磁感应技术应用于贻贝双壳距离变化的监测作为水体毒性状况指示，而Jenner^[35]则通过高频电磁感应系统监测其贝类运动，提高了监测效率。而荷兰生产的Musselmonitor仪器就是利用双壳贝类的张合频率随水体污染状况变化而变化的原理制备，使用电磁转换系统检测蚌壳张合状况，对水体生物毒性进行在线监测和早期预报预警，并将其成功应用于河流及近海海域污染监测中^[36-37]。乌克兰国家科学院海洋水文物理研究所基于黑海中贻贝类生物的行为反应利用水下高清摄像头连续监测7年，发展相应的算法和软件技术，研制出自动化生物监测仪。该生物监测仪可以标示出

毒性物质的存在，估算水域环境的生态状况。

除了鱼类和双壳贝类，水蚤也常被用作生物监测的指示生物^[38]，水质预警监测系统使用光电检测器来测算出水蚤的位移能力，由此判断水蚤的生命活动，从而得知水质受污染状况，另外水蚤的死亡率或繁殖能力也可作为污染物毒性的测试指标。比利时Persoone et al^[39]采用高速摄像系统测定水蚤的运动速度，以运动速度的变化指示水质的毒性。

以生物行为监测技术为基础的生物环境监测可以实现在线监测和早期预警，有较高的实际应用价值，部分地区已形成商业化产品。随着计算机图形化技术及自动化技术的发展，对生物动态的行为的监测及研究更为精确，解决了生物动态行为轨迹数据的分析问题，生物行为模型的建立也更为方便。以此为基础，生物行为监测技术必然得到更好的发展。

1.4 底栖动物和两栖动物监测

同样适用于生物监测的指示生物还有底栖动物和两栖动物^[40-41]，利用指示生物在水体中的出现或消失、数量的多少来监测水质。用于底栖动物水质评价参数主要有Saprobic指数、BI指数（Biotic Index）和群落多样性指数^[42]。其中Saprobic指数和BI指数已经被欧美等国家列为重要的水质生物评价指数，但在中国尚缺乏类似的生物指数监测技术规范^[43]。蔡琨等^[44]利用应用底栖动物完整性指数对太湖生态健康进行了评价，研究发现连续观察采集数据可提高评价指数的可靠性和结果的合理性。利用两栖类动物行为以及生理指标也可以监控水体质量，尤其是其在发育过程中对环境因子变化敏感^[45]，徐仕霞等^[46]以两栖动物作为指示生物，监测农药造成的水体污染，建立了水体污染程度的监测平台及其相应的判定标准和监测方法。

1.5 其他生物监测方法

在研究经典生物监测方法的同时，人们也积极研究开发新的生物监测技术方法，将幼虫变态^[47]、生物分子活性等作为指标监测生态环境的变化。海洋底栖无脊椎动物变态期的幼体对污染

物的敏感性较高,胚胎和幼虫发育过程易受环境污染的干扰,影响变态过程。与监测死亡率相比,生物能否在附着基表面顺利变态是监测污染物毒性更敏感的指标^[47]。Mohamed Dellali et al^[48]则利用生物体内胆碱脂酶的活性评价水体的污染状况,取得较好的效果。Mirjana Pavlica et al^[49]通过观察蚌类血细胞中DNA损伤程度监测水体中五氯酚污染,结果表明高浓度的五氯酚会导致水蚌血细胞中DNA断裂。生物传感器^[50]及生物电化学监测^[51]技术是通过分子元件识别各种被测物质,然后将分子识别元件感知的生物化学信号由转换器转换为可测电信号,对生物体内的酶、抗体、激素、DNA等进行监测,从而就污染对环境的影响做出评价和预测^[52]。

2 水生生物环境监测技术存在问题及对策

大量的水生生物监测研究和应用工作,为水质的生物监测研究的开展提供了可靠的理论依据和实践经验,也为研究者提供了一定的研究思路 and 理论导向^[53]。目前制约水质生物监测研究应用的主要有以下因素:

(1) 生物的生长及分布具有较大的个性差异,同种生物对污染物的反应是不一样的^[54]。因此在应用生物监测系统时,要根据水体特征、指示生物生长状态等设定测试周期;同时还应适当增加样本数量,以提高监测结果可信度^[55]。在不同地区或不同季节应用生物监测时,应当进行前期实验,确定监测频率及生物反应程度,以此制定适应不同地区监测标准。建立全世界范围内大数据生物监测网,对各地的监测结果进行分析处理,有助于消除地域差别。

(2) 部分浓度较低的水体污染物对水生生态系统有潜在危害,但在短时间内的生物学效应不明显^[56]。而且在生物监测方面的研究多是靠模拟实验,这与实际状况下的复杂水生生态系统有一定的差别^[57]。在研究过程中如何更加系统真实的反应水环境与水生生物之间的关系,并快速监测出污染物的慢性毒性结果,值得进一步研究^[58]。应当建立起从生物分子到生物群落不同层级的有效

监测,异常情况下再进行针对性的理化监测,及时监测到污染物以做出预警^[59]。

(3) 研究生物监测的结果与人类健康之间的联系机制^[60]。从分子结构到所处生态系统,生物个体之间都存在巨大差异。如何以不同的生命体为对象,建立适用人类的毒性水平监测标准,将是未来必不可少的研究内容^[61]。

3 总结及展望

生物监测作为环境监测的重要方法在水质监测等方面得到广泛应用。虽然限于地域、物种、生理变化等原因,生物监测技术无法准确的定量分析,但是作为能够评价综合毒性的有效方法,在未来的研究应用中必然会受到人们的密切关注,尤其是在新型毒性物质的监测方面将体现出巨大优势^[62]。联合应用生物监测方法与理化检测方法,不但能够对污染物的成分和浓度进行检测,而且能够评价污染物的综合毒性效应,由此便能准确地监测水质的综合污染状况。随着计算机技术、图像视频捕捉及各种传感器技术的发展,利用生物进行环境监测将越来越简单方便,对污染物毒性的监测也会越来越准确^[63]。利用生物监测结果对水质突发性污染事故进行预警监测研究,提高水质安全的监测预警能力,具有重要的经济意义和社会意义。

参考文献

- [1] 邹曦, 万成炎, 潘晓洁, 等. 水环境在线生物监测的研究与应用[J]. 环境科学与技术, 2011 (S2): 155-159.
- [2] 郑新梅, 冯政, 丁亮, 等. 大型蚤在线生物监测系统研究[J]. 环境监控与预警, 2011(2): 7-11.
- [3] Markert B, 王美娥, W ü nschmann S, 等. 环境质量评价中的生物指示与生物监测[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 33-44.
- [4] John Cairns Jr. Biological monitoring in water pollution[M]. Oxford: Pergamon Press, 1982:221-233.
- [5] Oshida P S, Goochey T K, Mearns A J. Biological monitoring of marine pollutants[M]. New York: Academic Press, 1981:1-36.
- [6] Mochizuki M, Kaitsuka C, Mori M, et al. An innovative approach to biological monitoring using wildlife[Z]. Environmental Monitoring, Publisher: InTech, 2011.
- [7] 邹叶娜, 蔡焕兴, 薛银刚, 等. 成组生物毒性测试法综合评价典型工业废水毒性[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(4): 381-388.
- [8] Gerhardt A, Ingram M K, Kang I J, et al. In situ on-line toxicity biomonitoring in water: Recent developments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, 25(9):2263-2271.
- [9] Karr J R. Seven foundations of biological monitoring and assessment[J]. Biologia Ambientale, 2006, 20:7-18.
- [10] 杨金鹏, 姜勇, 胡晓钟. 青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1703-1712.

- [11]李凤超. 微型生物群落参数与水质关系的研究[D]. 保定: 河北大学生命科学院, 2005.
- [12]Cairns J Jr, Lanza G R, Parker B C. Pollution related structural and functional changes in aquatic communities with emphasis on freshwater algae and protozoa[R]. Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, 1972, 124:79-127.
- [13]沈韞芬, 掌宗涉, 龚循矩. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990:72-75.
- [14]Xu K, Choi J K, Yang E J, et al. Biomonitoring of coastal pollution status using protozoan communities with a modified PFU method[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(9):877-886.
- [15]李朝霞, 张玉国, 梁慧星. 用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7336-7345.
- [16]Ding C, Chen T M, Li Z X, et al. Assessing and monitoring the ecotoxicity of pulp and paper wastewater for irrigating reed fields using the polyurethane foam unit method based on monitoring protozoal communities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(9):6590-6600.
- [17]朱丽娜. 基于发光细菌法的水质综合毒性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2012.
- [18]马勇, 黄燕, 贾玉玲, 等. 发光细菌急性毒性测试方法的优化研究[J]. 环境污染与防治, 2010(11): 48-52.
- [19]Elad T, Almog R, Yagur-Kroll S, et al. Online monitoring of water toxicity by use of bioluminescent reporter bacterial biochips[J]. Environmental science & technology, 2011, 45(19):8536-8544.
- [20]农永光, 胡刚. 发光细菌法在国内水质监测中的应用[J]. 分析仪器, 2012(1): 79-81.
- [21]李书敏. 一种发光细菌快速水质毒性检测仪的设计与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [22]崔志松, 栾晓, 高伟, 等. 发光细菌法在环渤海污水样品遗传毒性检测中的应用[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(1): 228-232.
- [23]王丽娜, 方景龙. 基于视频理解的活体鱼水质监测实验[J]. 杭州电子科技大学学报, 2010(6): 33-35.
- [24]张迎霞. 面向水质监测的鱼类行为异常识别方法研究[D]. 浙江工业大学, 2011.
- [25]黄毅, 张金松, 韩小波, 等. 斑马鱼群体行为变化用于水质在线预警的研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 398-403.
- [26]刘在平, 张松林. 斑马鱼在环境检测领域中的应用[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(1): 17-20.
- [27]宋志慧, 王庆伟. Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Cr^{6+} 对斑马鱼联合毒性作用和生物预警的研究[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(4): 361-366.
- [28]赵晓艳, 刘丽君, 聂湘平, 等. 利用对斑马鱼的在线监测实现对水体重金属铬污染的预警[J]. 给水排水, 2009(6): 20-23.
- [29]汪红军, 李嗣新, 周连凤, 等. 5种重金属暴露对斑马鱼呼吸运动的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1675-1680.
- [30]张金松, 黄毅, 韩小波, 等. 鱼的行为变化在水质监测中的应用[J]. 给水排水, 2013, 39(7): 166-170.
- [31]汪红军, 李嗣新, 周连凤, 等. 5种重金属暴露对斑马鱼呼吸运动的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1675-1680.
- [32]孙婕, 卢振兰, 李莉. 一种鱼类急性毒性监测工业废水新方法研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(5): 113-116.
- [33]Kramer K J M, Jenner H A, de Zwart D. The valve movement response of mussels: a tool in biological monitoring[J]. Hydrobiologia, 1989, 188(1):433-443.
- [34]Schuring B J, Geense M J. Een elektronisch cheschakeling voor het registreren van opeingshoek van de mossel *Mytilus edulis* L[J]. TNO-Rapport CL, 1972, 72(47):8.
- [35]Jenner H A, Noppert F, Sikking T. A new system for the detection of valve movement response of bivalves[R]. KEMA scientific and technical report 1989-7-2, KEMA, Arnhem, Netherlands, 7:91-98.
- [36]Kramer K J M, Foekema E M. The "Musselmonitor?" as biological early warning system[J]. Environmental Science Research, 2001, 56:59-87.
- [37]De Zwart D, Kramer K M J, Jenner H A. Practical experiences with the biological early warning system "musselmonitor" [J]. Environmental Toxicology and Water Quality, 1995, 10(4):237-247.
- [38]Storey M V, van der Gaag B, Burns B P. Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems[J]. Water Research, 2011, 45(2):741-747.
- [39]MacNeil C, Boets P, Platvoet D. 'Killer Shrimps', dangerous experiments and misguided introductions: How freshwater shrimp (Crustacea: Amphipoda) invasions threaten biological water quality monitoring in the British Isles[J]. Freshwater Reviews, 2012, 5(1):21-35.
- [40]Zhang J, Ma L, Ma C X, et al. Zoobenthos used in water quality assessment in Songhua River in Harbin city[J]. Advanced Materials Research, 2011, 339:705-709.
- [41]Videla C, Chung C, Ahumada C, et al. Validation of a biological monitoring design in highly diverse tropical forests[C]//SPE Latin-American and Caribbean Health, Safety, Environment and Social Responsibility Conference, Lima: Society of Petroleum Engineers, 2013:1-11.
- [42]吴东浩, 王备新, 张咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(2): 129-134.
- [43]王静, 池玉林, 陈正西. 利用底栖动物进行水质监测与评价的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(22): 11 401-11 405.
- [44]蔡琨, 张杰, 徐兆安, 等. 应用底栖动物完整性指数评价太湖生态健康[J]. 湖泊科学, 2014, 26(1): 74-82.
- [45]Buckley J, Beebee T J C, Schmidt B R. Monitoring amphibian declines: population trends of an endangered species over 20 years in Britain[J]. Animal Conservation, 2014, 17(1):27-34.
- [46]徐仕霞, 李旭东, 王跃招. 两栖动物在水体污染生物检测中作为指示生物的研究概况[J]. 动物学杂志, 2003, 38(6): 110-114.
- [47]吴荣军, 张学雷. 海洋生物监测新技术探索: 幼虫变态实验[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20(1): 66-71.
- [48]Dellali M, Barelli M G, Romeo M, et al. The use of acetylcholinesterase activity in *Ruditapes decussatus* and *Mytilus galloprovincialis* in the biomonitoring of Bizerta lagoon[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2001, 130(2):227-235.
- [49]Pavlica M, Klobučar G I V, Mojaš N, et al. Detection of DNA damage in haemocytes of zebra mussel using comet assay[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2001, 490(2):209-214.
- [50]Zhang W, Asiri A M, Liu D, et al. Nanomaterial-based biosensors for environmental and biological monitoring of organophosphorus pesticides and nerve agents[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2014, 54:1-10.
- [51]Fagan-Murphy A, Whitley R L D, Patel B A. Buckycolumn electrodes: a practical and improved alternative to conventional materials utilised for biological electrochemical monitoring[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2013, 1(35):4359-4363.
- [52]尹秀丽, 薛钦昭, 秦伟. 生物传感技术在海洋监测中的应用[J]. 海洋科学, 2011, 35(8): 113-118.
- [53]徐东炯, 张咏, 徐恒省, 等. 水环境生物监测的发展方向与核心技术[J]. 环境监控与预警, 2013, 5(6): 9-11.
- [54]汪星, 刘录三, 李黎. 生物监测在跨界河流中的应用进展[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2): 36-39.
- [55]王子健, 饶凯锋. 突发性水源水污染的生物监测, 预警与应急决策[J]. 给水排水, 2013, 39(10): 1-3.
- [56]李嗣新, 汪红军, 周连凤, 等. 流域水体污染的生态学效应及监测预警[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(2): 268-272.
- [57]Uherek C B, Pinto Gouveia F B. Biological monitoring using macroinvertebrates as bioindicators of water quality of Maroaga Stream in the Maroaga Cave System, Presidente Figueiredo, Amazon, Brazil[J]. International Journal of Ecology, 2014, 2014:1-7.
- [58]蔡中华, 陈艳萍, 周进, 等. 生物标志物 (Biomarkers) 在海洋环境监测中的研究与进展[J]. 生命科学, 2012, 24(9): 1 035-1 048.
- [59]黄东龙. 基于计算机视觉的水体突发性污染在线生物监测预警研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [60]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.
- [61]Bevan R, Angerer J, Cocker J, et al. Framework for the development and application of environmental biological monitoring guidance values[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2012, 63(3):453-460.
- [62]Aquilina N J, Delgado-Saborit J M, Meddings C, et al. Environmental and biological monitoring of exposures to PAHs and ETS in the general population[J]. Environment International, 2010, 36(7):763-771.
- [63]刘小卫, 陆光华. 主动生物监测技术在水环境风险评价中的应用[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(3): 12-15.