

鱼类行为法水质生物毒性监测仪性能测评研究

李震, 廖伟, 孙锋

(深圳市水务科技有限公司, 广东 深圳 518030)

摘要: 水质生物毒性监测能够反映水质的综合状况; 基于鱼类行为法的水质生物毒性监测仪是水质污染物在线监测预警的重要技术手段; 图像解析法利用计算机图像跟踪处理技术, 识别分析鱼类个体行为和群体行为, 进而实现对水质生物毒性的监测; 对该种类型水质生物毒性监测仪的性能测评进行了研究, 将其主要指标分为检测性能类、数据质量类和运行维护类; 分别阐述了各项指标的测试方法, 并进行了试验测试; 结果表明, 所归纳总结的三类指标能够用于评价水质生物毒性监测仪对水质状况的反映能力、监测数据的可靠性以及在实际应用过程中的表现情况, 可以较为全面地反映仪器性能。

关键词: 水质监测; 生物毒性; 性能测评; 图像解析

Study on Performance Evaluation of Biological Toxicity Monitor for Water Quality Based on Fish Behavior Method

Li Zhen, Liao Wei, Sun Feng

(Shenzhen Water Technology Co., Ltd, Shenzhen 518030, China)

Abstract: Biological toxicity monitoring of water quality can reflect the comprehensive situation of water quality. The biological toxicity monitor for water quality based on fish behavior method is an important technical means for online monitoring and early warning of water pollutants. The image analysis method uses computer image tracking processing technology to identify and analyze the individual behavior and group behavior of fish, so as to realize the monitoring of biological toxicity of water quality. The performance evaluation of this type of biological toxicity monitor for water quality is studied, and its main indexes are divided into detection performance, data quality and operation and maintenance. The test method of each index is described respectively and experimental tests are carried out. The results show that the three types of indexes can be used to evaluate the ability to reflect water quality, the reliability of monitoring data and the performance in practical application of the biological toxicity monitor for water quality and can comprehensively reflect the performance of the instrument.

Keywords: water quality monitoring; biotoxicity; performance evaluation; image analysis

0 引言

随着工业的迅猛发展, 水环境污染与水资源短缺问题受到人们广泛关注。突发性水污染事件直接威胁到人民群众的饮用水安全, 给人们生活造成影响。再生水回用技术可以在一定程度上缓解水资源短缺。同时, 再生水水质安全问题也受到关注。为了保障水质安全, 人们基于电化学法、光学法、生物法等开发了一系列水质在线监测技术^[1-4]。其中, 生物法可以直观地反映水体中各种污染物质对生物种群的综合毒性, 近年来得到广泛应用^[5]。根据受试生物种类的不同, 目前主要的生物在线监测技术可以分为: 鱼类行为法、发光细菌法、微生物燃料电池法、藻类法、水蚤法等^[6-10]。以鱼类行为法为基础的水质监测预警系统具有稳定性好、可靠性高、续航能力强、管理方便、运行费用低等优点, 是水体污染物在线监测的有效技术手段^[11]。根据监测原理的不同, 基于鱼类行为法的水质在线监测仪器可主要分为图像解析法和传感器法两类^[12-13]。图

像解析法采用图像识别处理技术, 通过监测鱼类行为模式及其变化反映水质状况; 传感器法采用电信号传感技术, 通过监测鱼类行为强度及其变化反映水质状况。图像解析法基于计算机摄像跟踪技术, 可以通过对受试鱼类群体行为的变化进行实时分析, 获得全面、有效的水质信息, 及时预警水质突发事件^[14]。深圳水务集团采用图像解析法研制出水质生物毒性监测仪 (RTB), 以斑马鱼作为标准化指示生物, 实现水质在线监测, 提高水质安全保障能力^[15]。目前, 虽然在国家标准 GB/T13267-1991《水质物质对淡水鱼 (斑马鱼) 急性毒性测定方法》中介绍了生物毒性分析方法, 但是属于方法标准, 而对于鱼类行为法水质生物毒性监测仪性能测评方面的研究及报道较少^[16]。因此, 有必要开展鱼类行为法水质生物毒性监测仪的测评方法研究, 以便提升完善仪器性能指标的规范性。

本文以基于图像解析法的水质生物毒性监测仪为例, 探讨仪器性能的测评方法。为了尽可能全面评价仪器性能,

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-08-31。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0112300); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501003)。

作者简介: 李震(1986-), 男, 山东人, 博士, 高级工程师, 主要从事水质监测技术及智慧水务方向的研究。

引用格式: 李震, 廖伟, 孙锋. 鱼类行为法水质生物毒性监测仪性能测评研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 248-251.

将主要指标归纳为检测性能类、数据质量类以及运行维护类,并进行了测试分析。

1 监测原理及系统结构

1.1 鱼类行为法水质监测原理

鱼类对水质状况的变化十分敏感。在正常无污染物的水体中,鱼类的运动行为具有一定的规律,其运动速度、运动范围、运动高度、转弯次数等参数处于一定范围之内。当水体受到污染时,鱼类的运动行为将会发生变化。图像解析法可以对鱼类运动行为进行识别分析。利用计算机图像跟踪处理和识别技术,实时监测鱼类运动轨迹,利用运动行为解析软件包分析鱼类的个体行为参数以及群体行为参数,并通过大量实验,建立起鱼类运动行为模式与水质污染物毒性之间的效应关系,进而实现对水质生物毒性的监测。鱼类的个体行为参数一般包括速度、高度、转弯次数;群体行为参数一般包括平均距离、分散度、分形维数、活鱼数目。

1.2 监测仪系统结构

基于上述监测原理,为了实现水质在线监测,除了需要设计鱼类运动行为识别分析模块之外,还需要综合考虑水样采集、自动控制、数据传输等功能模块的设计。水质生物毒性监测仪包括水样预处理模块、图像采集模块、运动行为识别分析模块、水质预警模块、电气及自动控制模块、远程通信模块等。仪器的系统结构见图1所示。水样预处理模块包括过滤、除氯、温度控制等装置,可保障监测结果不受水体浊度、余氯、温度变化等因素的干扰。图像采集模块用于对鱼类活动区域进行监测,并将采集到的图像实时传输到运动行为识别分析模块进行处理,解析出受试鱼类的个体行为参数及群体行为参数,计算出水质综合毒性指数。当水质综合毒性指数超出设定的阈值时,将会联合水质预警模块发出预警信息,及时通知用户进行处理。电气及自动控制模块负责仪器整机的供电以及对仪器执行机构的控制。远程通信模块可采用有线或无线数据传输方式,实时传输水质监测数据,实现远程在线监测。

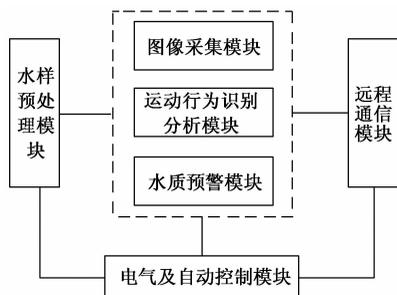


图1 水质生物毒性监测仪系统结构

2 测评方法

为了尽可能全面地对基于鱼类行为法的水质生物毒性监测仪进行测试评价,将其主要指标分为三类:检测性能类、数据质量类和运行维护类。其中,检测性能类指标用于评价水质生物毒性在线监测仪对水质状况的反映能力,

主要包括灵敏度、响应时间;数据质量类指标用于评价水质生物毒性在线监测仪监测结果的可靠性,主要包括稳定性、误报率、监测数据丢失率;运行维护类指标用于评价水质生物毒性监测仪在实际应用过程中的连续工作能力以及环境适应能力,主要包括温度控制误差、受试生物更换周期、平均无故障连续运行时间。

2.1 检测性能类指标及测试方法

1) 响应时间。鱼类行为的变化与水中污染物的剂量以及作用时间相关。水质生物毒性监测仪对水质状况的判断需要基于足够的生物行为数据解析。将受试鱼类从开始接触试验溶液到监测仪发出水质报警所需要的时间定义为响应时间。

2) 灵敏度。该指标用于表征水质生物毒性监测仪在一定的监测周期内产生报警信号所对应的污染物浓度。监测仪对污染物毒性的灵敏度与毒性效应浓度(C_{ei})和系统响应时间相关。在监测仪运行过程中,待受试鱼类适应环境且行为稳定后,向监测仪鱼类活动区域注入一定毒性单位的标准溶液并开始计时,至监测仪报警时所经过的时间为响应时间,所使用的标准溶液浓度即为该响应时间所对应的毒性检测灵敏度。标准溶液浓度采用毒性效应浓度(C_{ei})来表征。毒性效应浓度(C_{ei})将不同污染物的质量浓度($D_{\rho i}$)与该污染物对受试鱼类48小时半数致死剂量(LC_{50-48})的比值作为毒性单位(TU),以进行归一化分析,便于不同污染物之间的比较。毒性效应浓度(C_{ei})的计算公式为:

$$C_{ei} = \frac{D_{\rho i}}{LC_{50-48}^i} \quad (1)$$

其中; $D_{\rho i}$ 为第*i*种污染物的质量浓度(单位为mg/L), LC_{50-48}^i 为第*i*种污染物对受试鱼类48小时半数致死剂量(单位为mg/L)。

2.2 数据质量类指标及测试方法

1) 稳定性。稳定性反映监测仪保持其计量特性随时间恒定的能力。在实际测量中,对于同一待测水样,监测仪在一定时间范围内多次测量时得到的监测数据可能存在波动,用标准差反映该组监测数据的离散程度,从而表征监测数据的稳定性。

2) 误报率。在一定条件下,如果监测仪在水质状况良好的情况下出现误判,将会触发水质报警。误报率是指在一定时间范围内,出现水质误报警数据条数占该时间段内获取的所有监测数据总条数的百分比。误报率可以反映监测仪监测数据的可靠性。在实际测量中,可以用无毒性的水样进行测试,统计误报警数据条数,从而计算误报率。

3) 监测数据丢失率。监测仪的监测数据是按时间顺序进行收集的。监测数据的丢失可能由两个因素导致。(1)在某段时间内,没有任何数据收集记录而导致数据中断;(2)收集到的数据存在部分缺失,即有数据收集记录,但是数据只有时间点,没有数值或数值为空。因此,监测数据丢失率定义为在一段时间内,未收集到的数据条数与有数据缺失的数据条数之和占该时间段内应获取的所有数据条数的百分

比。其中,未收集到的数据条数可以利用数据收集频率与收集中断时间计算得出。监测数据丢失率能够反映监测仪监测结果的可靠性以及远程通信传输的可靠性。

2.3 运行维护类指标及测试方法

1) 温度控制误差。监测仪采用恒温装置控制进入鱼类行为监测区域的水样温度,当进水温度高于或低于设定值时,恒温装置会自动工作,最终达到设定温度 T_0 。每隔 10 min 测量鱼类行为监测区域中的水样温度 1 次,共测量 6 次,记录读数 T_1, T_2, \dots, T_6 ,分别计算读数相对设定值 T_0 的偏差值,将绝对值最大的偏差定义为温度控制误差 ΔT 。温度偏差值的计算公式为:

$$\Delta T_i = T_i - T_0 \quad (2)$$

其中: ΔT_i 为第 i 次测量的温度偏差, T_i 为第 i 次测量的温度值。温度控制误差可以反映监测仪在运行过程中对水环境的适应能力。

2) 受试生物更换周期。为确保监测仪长时间正常运行,受试鱼类应定期更换。该指标直接影响监测仪的维护周期。如果在预定的更换周期内出现受试鱼类非正常死亡,应及时留取水样,充分清洗监测仪流路系统,并更换全部受试鱼类。

3) 平均无故障连续运行时间。该指标为监测仪在测试期间每相邻两次故障之间的平均工作时间。在测试时,采用实际水样,监测仪连续运行至少 2 个月,记录总运行时间和故障次数,总运行时间和故障次数的比值即为平均无故障连续运行时间。平均无故障连续运行时间可以衡量监测仪的可靠性。

3 指标测试与结果分析

3.1 试验条件

测试采用深圳水务集团自主研发的水质生物毒性监测仪(RTB),选取鱼龄 3~4 个月、体长 3~5 cm 的斑马鱼作为受试鱼类,其驯养和选用条件应符合 GB/T13267 的规定,在测试及运行期间一般不喂食。关于被测水体,应满足以下要求:浊度: ≤ 15 NTU;溶解氧饱和度: $\geq 60\%$;余氯: ≤ 0.05 mg/L;水温: (15~40) $^{\circ}\text{C}$ 。在检测性能类指标的测试中,使用分析纯级以上的溴氰菊酯配置标准储备液。

3.2 检测性能类指标

在监测仪运行时,待斑马鱼适应环境并且行为稳定后,向鱼类活动区域注入一定毒性单位的溴氰菊酯溶液,记录至系统报警时所经过的时间。进行多次试验,以获得不同浓度溴氰菊酯溶液所对应的报警时间。试验结果为:注入 0.1 TU 的溴氰菊酯溶液后,报警时间为 12 h;注入 1.0 TU 的溴氰菊酯溶液后,报警时间为 60 min;注入 10 TU 的溴氰菊酯溶液后,报警时间为 6 min。由此可知,监测仪响应时间 12 h 时,灵敏度为 0.1 TU;监测仪响应时间 60 min 时,灵敏度为 1 TU;监测仪响应时间 6 min 时,灵敏度为 10 TU。监测仪的灵敏度与响应时间相关。监测仪具有较高的灵敏性,能够及时对进入水体的污染物做出响应。

3.3 数据质量类指标

使用监测仪对同一实际水样进行监测,设定每隔 5 min 读取一次监测结果,并通过远程通信模块上传到服务器进行统计分析。图 2 为监测仪连续运行一天的监测数据曲线。监测结果表明,监测仪运行稳定,该时间段内监测到的综合毒性指数的平均值为 78.96,标准差为 4.12。综合毒性指数处于 60 至 100 之间表明水质正常,在该时间段内未出现水质误报警,即误报警个数为 0,误报率为 0。上传到服务器的监测数据完整,在一天之内共有 288 个监测数据,不存在数据中断或数据缺失。即在该时间段内的监测数据丢失率为 0。这表明监测仪具有良好的稳定性和可靠性。

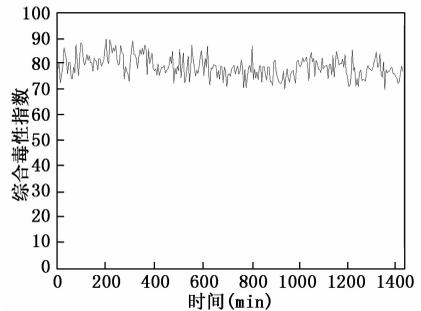


图 2 监测仪运行一天的监测数据曲线

3.4 运行维护类指标

试验中,设定仪器控制温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,当仪器运行稳定后,每隔 10 min 用温度测量装置测量鱼类行为监测区域中的水温 1 次。试验结果如图 3 所示。水温的最大偏差值为 0.9 $^{\circ}\text{C}$,故温度控制误差为 0.9 $^{\circ}\text{C}$,表明监测仪对水环境的适应能力良好。

在监测仪实际运行时,斑马鱼每隔 15 天更换一次,即受试生物更换周期为 15 天。监测仪连续运行 2 个月,无故障发生,即平均无故障连续运行时间为 1 440 h。监测仪具有较高的可靠性,维护周期可以设定为两周一次,进行更换受试鱼类、流路清洗以及其它检查工作。

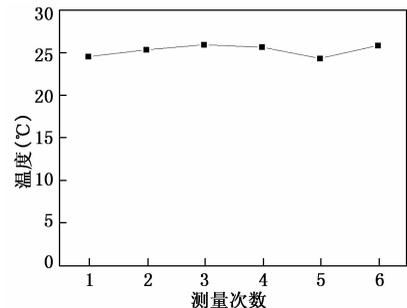


图 3 监测仪温度控制试验结果

4 结束语

基于鱼类行为图像解析法的水质生物毒性监测仪能够对水质的综合状况做出及时反映,对突发污染事件进行预警,可以广泛应用于对原水、再生水等的监测,有效保障水质安全。目前对于该种类型水质监测仪性能测评的研究

报道较少。本文从检测性能、数据质量和运行维护 3 个方面对监测仪的性能进行了综合评价。具体介绍了各项评价指标的测试方法, 并进行了试验测试。文中总结的评价指标可表征监测仪对水质状况的反映能力、监测数据的可靠性以及在实际应用中的表现情况, 对于其它类型的水质生物毒性监测仪的性能测评也具有参考意义。

参考文献:

[1] 张祥琼, 刘 波, 张凌云. 电化学分析法在水质分析与监测中的应用综述 [J]. 城镇供水, 2018 (1): 31-35.
 [2] 赵友全, 王慧敏, 刘子毓等. 基于紫外光谱法的水质化学需氧量在线检测技术 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (9): 1927-1932.
 [3] 邵 玲, 弓巧娟, 孙 鸿, 等. 荧光光谱法在水质监测中的应用 [J]. 光谱实验室, 2011, 28 (2): 940-945.
 [4] 彭强辉, 陈明强, 蔡 强, 等. 水质生物毒性在线监测技术研究进展 [J]. 环境监测管理与技术, 2009, 21 (4): 12-16.
 [5] 沈燕飞, 张 咏, 厉以强. 水质生物毒性检测方法的研究进展 [J]. 环境科技, 2009 (A02): 68-72.
 [6] 程淑红, 刘 洁, 李雷华. 基于鱼类运动行为的水质异常评价因子研究 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (8): 1759-1766.
 [7] 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: 79-81.
 [8] 杨鑫斌, 易 越, 付玉明, 等. 水质监测中的微生物燃料电池技术及其进展 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2016, 35 (1): 72-77.
 [9] 王丙莲, 杨 艳, 张利群, 等. 水质监测中藻类植物的应用研究进展 [J]. 山东科学, 2007, 20 (1): 54-58.
 [10] 袁 玲, 王立华. 水蚤用于环境监测的评价指标分析 [J]. 生物学教学, 2013, 38 (12): 2-3.
 [11] 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 (7): 167-171.
 [12] 李 汝. 基于斑马鱼行为学的水质监测预警技术试验研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.
 [13] 任宗明, 李志良, 饶凯锋, 等. 氰戊菊酯和氯化镉暴露下日本青鳉的行为反应差异 [J]. 生态毒理学报, 2008, 3 (6): 563-569.
 [14] 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.
 [15] 黄凯宁, 尚昭琪, 赵 焱, 等. 水质安全视角下的生物监测技术研究与应用 [J]. 水工业市场, 2011 (1) 54-57.
 [16] 冯 端, 胡 博, 张国城. 水质生物毒性监测仪技术及性能指标研究进展 [J]. 计量技术, 2019 (10): 50-54.

(上接第 233 页)

据以及机器人位置, 在温度或危险气体浓度超过警戒值时, 给予工作人员提示与报警。通过对巡检机器人实时位置的持续监控, 得到其运行路径, 经对比, 与规划路径完全一致。环境量指示灯共 3 种状态, 即安全 (不超过正常范围的 80%), 警告 (正常范围的 80%~100%), 危险 (超出正常范围)。系统运行状态监控界面如图 10 所示。



图 10 系统运行状态监控界面

5 结束语

本文设计的巡检机器人可代替工作人员对车间进行巡检, 降低了成本的同时提高了巡检的安全性。利用 A* 算法进行路径规划, 可根据不同车间环境制定对应巡检路线, 适用性强, 灵活性好。巡检机器人自动化程度高, 由计算机、DSP 等控制, 能够自主完成设定的巡检任务; 利用 WiFi 模块构成无线网络, 实时性好, 可实现中远距离数据的快速传输, 同时保证了工作人员的人身安全。将巡检机器人与原有固定位置传感器相配合, 解决了原有监测系统存在的监测盲区问题, 能够对危险提前预警, 提高生产安全, 降低事故的发生率。

参考文献:

[1] 张道斌. 基于 HSE 管理构建石化企业安全生产个性化预测预报系统 [J]. 安全与环境工程, 2018, 25 (5): 139-144.
 [2] 夏华林, 魏海平, 石元博, 等. 基于物联网的石油化工环境安全监测系统的设计与研究 [J]. 数字技术与应用, 2015 (11): 57-58.
 [3] 高玉健, 胡立夫, 王海明, 等. 化工厂智能巡检机器人系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2020 (3): 55-59.
 [4] 张钊钊, 陈国良, 李晓龙. 基于移动机器人的室内火灾预警点探测与定位的方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 166-169.
 [5] 王 静. 基于计算机技术的室内环境远程监测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 166-169.
 [6] N. Sasikiran, M. Sudhakar Reddy, K. Venkat. Cabernet - Vehicular Content Delivery using Wi - Fi [J]. International Journal for Scientific Research & Development, 2014, 2 (2): 640-644.
 [7] Muhendra R, Rinaldi A, Budiman M, et al. Development of WiFi Mesh Infrastructure for Internet of Things Applications [J]. Procedia Engineering, 2017, 170: 332-337.
 [8] 朱维琳. 基于霍尔传感器在转速测量方面的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (22): 75.
 [9] 威尔江, 彭道刚, 邱 正, 等. 基于嵌入式 ARM 和组合滤波的巡检机器人轮速控制 [J]. 电测与仪表, 2018, 55 (10): 76-83.
 [10] 赵 晓, 王 铮, 黄程侃, 等. 基于改进 A* 算法的移动机器人路径规划 [J]. 机器人, 2018, 40 (6): 903-910.
 [11] 任 昶. 室内移动机器人路径规划及轨迹跟踪控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
 [12] 章 辉, 叶建芳, 叶建威. 基于 MSComm 控件串口通信的实现 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (8): 126-129.