

黄毅, 张金松, 韩小波, 等. 2014. 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, 34(2): 398-403

Huang Y, Zhang J S, Han X B, et al. 2014. Vision-based real-time monitoring on the behavior of zebrafish school [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(2): 398-403

## 斑马鱼群体行为变化用于水质在线预警的研究

黄毅<sup>1</sup>, 张金松<sup>1,2,\*</sup>, 韩小波<sup>2,3</sup>, 黄廷林<sup>1</sup>

1. 西安建筑科技大学, 西安 715000

2. 深圳市水务(集团)有限公司, 深圳 518031

3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

收稿日期: 2013-06-24

修回日期: 2013-08-04

录用日期: 2013-08-04

**摘要:** 采用计算机摄像跟踪技术, 以正常水体中斑马鱼鱼群的行为变化为基础, 模拟污染物突发暴露下斑马鱼鱼群游动行为(速度和高度)、通讯行为(平均距离和分散度)和区域分布(不同区域停留时间)的变化规律。结果表明: 在氯氰菊酯和溴氰菊酯联合突发暴露下, 斑马鱼表现出慌乱不安的过度活跃, 游动速度在暴露前 30 min 内持续增大, 变化区间由暴露前 30 ~ 60 mm·s<sup>-1</sup> 增至 60 ~ 85 mm·s<sup>-1</sup>, 而后又迅速下降至 20 mm·s<sup>-1</sup> 左右。高度的变化稍微滞后于速度的突变, 在暴露 12 min 后才明显增高。持续的污染物暴露和其对鱼的毒性作用也破坏了鱼群原有的通讯和分布规律, 平均距离和分散度分别增大 43.5% 和 120.0%, 且鱼群在浓度相对较低、接近水面的出水口附近的停留时间明显增加。与传统的以个体鱼和单一行为反应为监测对象的方式相比, 基于斑马鱼群体行为变化用于水质在线预警系统能够获得更加全面、有效的信息, 是预警水质突变的可靠手段。

**关键词:** 生物监测; 回避反应; 鱼群; 运动区域; 氯氰菊酯; 溴氰菊酯

文章编号: 0253-2468(2014)02-398-06

中图分类号: X832

文献标识码: A

## Vision-based real-time monitoring on the behavior of zebrafish school

HUANG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Jinsong<sup>1,2,\*</sup>, HAN Xiaobo<sup>2,3</sup>, HUANG Tinglin<sup>1</sup>

1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 715000

2. Shenzhen Water Group, Shenzhen 518031

3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

Received 24 June 2013;

received in revised form 4 August 2013;

accepted 4 August 2013

**Abstract:** To study the behavioral responses of zebrafish under the combination effect of cypermethrin and deltamethrin, a set of motion activities were monitored and analyzed using a computer-imaging technique. Endpoints included swimming activity, social interaction within fish school and fish distribution. Results showed that the swimming speed of zebrafish increased significantly when exposed to the two toxicants. The swimming speed increased from 30 ~ 60 mm·s<sup>-1</sup> to 60 ~ 85 mm·s<sup>-1</sup> within the first thirty minutes exposure, and then immediately decreased to 20 mm·s<sup>-1</sup>. The swimming depth decreased after 12 minutes exposure. Under chronic exposure, the communication patterns between fish were changed, and the swimming distance and dispersion increased by 43.5% and 120.0%, respectively. Zebrafish preferred swimming and staying on the water surface with lower toxic concentration. The vision-based real-time zebrafish swimming pattern monitoring method combined the calculation of swimming speed, depth, distance between fish, dispersion and time spend in different areas, therefore is a more comprehensive and effective system than the traditional individual fish and single endpoint monitoring method to give the early warning signal of water contamination.

**Keywords:** biomonitoring; avoidance; fish school; swimming area; cypermethrin; deltamethrin

### 1 引言(Introduction)

生物在线预警是指利用生物体生理、生化或行

为对水环境变化产生的反应信息, 对水质恶化趋势的预测和突发事件的报警(Gerhardt *et al.*, 2006)。与其他生物监测仪器相比较, 以监测鱼类行为变化

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No. 2009ZX07423-001-003); 广东省教育部产学研结合项目(No. 2012B091000110)

**Supported by** the the Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2009ZX07423-001-003) and the Special Project on the Integration of Industry, Education and Research of Guangdong Province (No. 2012B091000110)

**作者简介:** 黄毅(1987—), 女, E-mail: huangyiwater@163.com; \* 通讯作者(责任作者), E-mail: zhangjinsong@waterchina.com

**Biography:** HUANG Yi (1987—), female, E-mail: huangyiwater@163.com; \* **Corresponding author** E-mail: zhangjinsong@waterchina.com

为基础的水质生物在线预警系统具有更好的稳定性、可靠性、管理方便且运行费用低,是水源地、河流、污水处理厂等监测水质变化的最佳选择(张金松等 2013)。

环境中的污染物对几乎所有的鱼的行为都能够产生影响,包括运动、繁殖、学习记忆能力、迁移、对掠食者的回避行为、捕食、社交等(Atchison *et al.*, 1987)。Ingram 等(2004)通过虹鳟鱼的呼吸行为变化,如呼吸频率和深度等,监测某纸浆和造纸废水的毒性。Kang 等(2009)以污染物暴露后青鳉鱼出现急速游动、浮头行动等异常行为作为判断水质是否安全的依据。赵晓艳等(2010)则利用非接触类电场感应斑马鱼的活跃强度、呼吸频率等可迅速检测到水体中有机磷农药和抗生素的突发暴露。这些预警系统都是以 1~2 条鱼为监测单元,因在单独空间内其个体行为差异较大,使仪器的稳定性能较低。和个体相比,当鱼处在群体中时可互相沟通并传导信息,拥有更大的感知范围,并且受到污染物刺激后,鱼群会通过回避、急速运动、集群等一系列行为的改变来维持体内的稳定应对环境的变化(Schlenk *et al.*, 2001)。Chew 等(2009)改变以个体鱼为观察对象的方式,通过捕捉 20 条鱼在鱼缸中的分布和活动,考察鱼群的活跃水平、轨迹曲线密度、回避行为以及鱼群中的“社交互动”等来评价鱼类对污染刺激的行为反应。Barry (2011)的研究表明,在一定浓度的化学药品的刺激下鱼除了有快速游动的反应外,鱼群的轨迹分布也发生明显的变化,鱼群更倾向于贴壁运动,同时分形维数也在不断减小。因此,选择合理的指标,鱼类群体行为变化的连续监测,获得更加全面的信息,可提高水质在线监测预警仪器的灵敏和稳定性。

本研究改变以个体鱼为观察对象的方式,通过捕捉 5 条斑马鱼在鱼缸中的分布和活动,考察鱼群的游动速度、高度、平均距离、分散度和不同区域停留时间等 6 个指标,综合游动行为、通讯行为和分布区域的变化,用更加全面的信息反应水质突变状况。实验以正常水体中斑马鱼的群体行为变化为基础,模拟氯氟菊酯和溴氟菊酯这两种典型污染物质突发性联合胁迫下,斑马鱼的行为响应来验证监测指标选取的合理和有效性。

## 2 实验材料和方法 (Materials and methods)

### 2.1 斑马鱼的培养

实验采用的斑马鱼(*Zebrafish*, *Danio rerio*)是国

际标准化组织(ISO)推荐的标准实验生物之一,在环境毒性评价的相关研究中应用广泛。本实验室对斑马鱼的饲养繁殖采用流水式,养殖用水为脱氯自来水,水温为  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ ,溶解氧为  $(6.5 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,光照周期为 10 h:14 h,以丰年虾为食,每天投食 2~3 次。实验时挑选鱼龄为 6~8 个月,体长为  $(30 \pm 2) \text{ mm}$  的斑马鱼,每组实验用鱼 5 条,雌雄比例为 3:2,实验前 24 h 不喂食。

### 2.2 实验设计

2.2.1 斑马鱼急性毒性实验 参照国际标准 ISO 7346 1-3《物质对淡水鱼(斑马鱼)急性致死毒性的测定》,以  $1.5 \text{ g(鱼)} \cdot \text{L}^{-1}$  的要求,设置 6 个浓度梯度,每个浓度设 3 个平行,每组放 10 尾斑马鱼。实验开始后第 0、8、12、24 h 观察并记录各容器实验鱼的存活情况。用镊子夹鱼的尾部,如无反应,即认为鱼已经死亡,发现死鱼后及时捞出。利用 Graphpad Prism 5.0 拟合剂量-效应曲线并计算得出 24 h 半致死浓度( $\text{LC}_{50-24\text{h}}$ )。

2.2.2 斑马鱼群体行为变化实验 采用水质毒性在线检测仪(RTB,深圳水务(集团)有限公司研制)进行斑马鱼的个体和群体行为变化的定量监测,如图 1 所示。在一个尺寸为  $400 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的测试箱前设置一个 CCD 摄像头,利用摄像追踪系统和图像分析技术,通过识别每条鱼的特征轮廓来确定斑马鱼的运动方向与位置,并以 12~16 帧每秒的速度记录标志点坐标通过软件转换计算出鱼群的运动行为参数,包括游动行为(速度和高度)、通讯行为(平均距离和分散度)和区域分布情况(各区域停留时间占总时间的比例),各指标定义如表 1 所示。

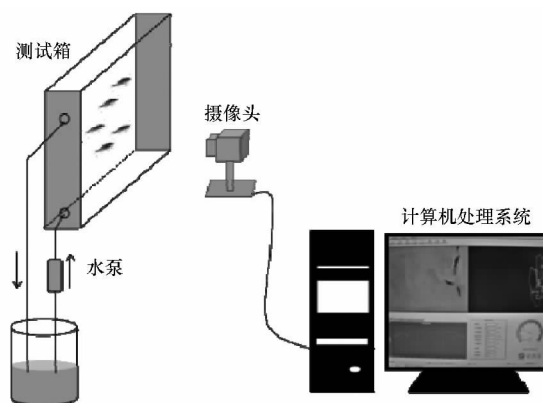


图 1 测量斑马鱼行为变化的实验装置设计图

Fig. 1 Experimental setup for behavioural measurement of zebrafish

表 1 监测指标的解析

Table 1 Summary of endpoints for swimming activity analysis

	指标	定义
游动行为	速度	单位时间内斑马鱼的平均运动速度
	深度	斑马鱼所处位置离测试箱底部的平均距离
通讯行为	平均距离	每 2 条斑马鱼之间的距离的平均值
	分散度	5 条斑马鱼围成的多边形面积占测试箱总面积的百分比
区域分布	列停留时间	每 5 min 内斑马鱼在某一列区域的停留时间所占百分比
	行停留时间	每 5 min 内斑马鱼在某一行区域的停留时间所占百分比

实验用水采用半静态式流水实验,控制进水流速为  $1\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ,水温为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,光照恒定,尽量减少人为、噪音等非水质因素的干扰.实验共计运行 3 h.其中,前 1 h 为空白实验,记录该组斑马鱼在正常水质

表 2 氯氰菊酯和溴氰菊酯对斑马鱼的 24 h 急性毒性

Table 2 The 24 h sub-lethal concentration of zebrafish exposed to cypermethrin and deltamethrin

污染物	$\text{LC}_{50-24\text{h}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	95% 置信区间 $/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$R^2$
溴氰菊酯	$13.75\times 10^{-3}$	$10.6\times 10^{-3}\sim 17.84\times 10^{-3}$	0.9886
氯氰菊酯	$69.61\times 10^{-3}$	$55.24\times 10^{-3}\sim 87.22\times 10^{-3}$	0.9992

3.2 斑马鱼游动行为的变化

如图 2 所示,第 1 h 正常水体暴露时,无外界刺激的干扰,斑马鱼的行为强度变化稳定,游动速度主要在  $30\sim 60\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  之间均匀波动,平均速度为

状况下的各监测指标的变化范围,从第 2 h 开始时,即第 60 min 时加入化学物质,模拟实际水体突发性污染事件,记录斑马鱼的行为变化.每组实验的行为数据由 5 条鱼的平均数求得,每个质量浓度进行 3 组平行,结果以 3 组平行实验组的平均值显示.

3 结果(Results)

3.1 急性毒性实验

氯氰菊酯和溴氰菊酯对斑马鱼的 24 h 半致死浓度如表 2 所示.结果表明,溴氰菊酯和氯氰菊酯对斑马鱼的  $\text{LC}_{50-24\text{h}}$  分别为  $13.75\times 10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $69.61\times 10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,对斑马鱼的毒性大小为溴氰菊酯 > 氯氰菊酯.本研究以  $\text{LC}_{50-24\text{h}}$  为 1 个毒性单位(1 TU),在两种化合物在各自 0.25 TU(氯氰菊酯  $3.75\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和溴氰菊酯  $15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的联合暴露下观察斑马鱼的行为变化规律.

$46.52\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,标准差为  $9.08\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ;而高度在  $50\sim 200\text{ mm}$  之间均匀波动,第 1 h 的平均高度值为  $124.60\text{ mm}$ ,标准差为  $39.85\text{ mm}$ ,如表 3 所示.

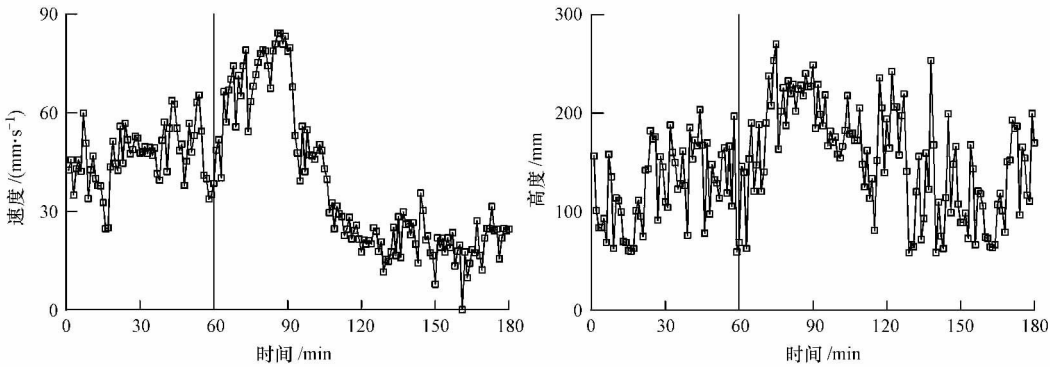


图 2 突发污染暴露下斑马鱼群体游动行为的变化

Fig. 2 Swimming activity changes of zebrafish under sudden exposure

接触到污染物的斑马鱼兴奋异常,速度在 30 min 内持续增大,变化范围明显高于暴露前水平,在  $60\sim 85\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的范围内波动,最大速度高达  $84.25\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .随后急剧下降,在 15 min 内降低至暴露前均值的 42% 左右,速度分布的标准偏差也是暴露前

2 倍,如表 3.最终速度维持在  $10\sim 30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的水平并在后续的暴露中都维持在这一范围内变化.而高度的变化稍微滞后于速度的突变,在暴露 12 min 后才明显增高,并在持续的 20 min 内均值都高于  $200\text{ mm}$ .随着暴露时间的增长,高度又逐渐恢复,第

2 h 的均值大小和暴露前相当 ,但标准偏差较大 ,即 数据波动大.

表 3 暴露前后斑马鱼游动行为数值分析

Table 3 Analysis of zebrafish swimming endpoints before and after exposure

监测指标	0 ~ 60 min		60 ~ 120 min		120 ~ 180 min	
	均值	标准偏差	均值	标准偏差	均值	标准偏差
速度 / ( mm • s <sup>-1</sup> )	46.52	9.08	55.54	19.17	20.27	6.00
高度 / mm	124.60	39.85	178.34	47.96	122.70	56.74
平均距离 / mm	124.44	39.22	178.37	41.63	140.74	54.89
分散度	10.25%	6.36%	22.18%	9.94%	9.65%	10.24%

3.3 斑马鱼通讯行为的变化

受到污染物刺激后的鱼群明显失去原有的群体性 ,在刚接触到污染物的 10 min 内有明显的集群现象 ,平均距离和分散度短暂下降 ,然后又逐渐增大 . 鱼群分布在暴露 1 h 后与暴露前差异显著 ,平均距离均值从暴露前 124 mm 增加到 178 mm ,即增大

43.5% ,而分散度均值也由暴露前 10% 增加到 22% ,增大 120% ,如表 3 所示 . 在第 2 h 的暴露中 ,平均距离和分散度的变化又有缓慢恢复至暴露前水平的趋势 ,均值迅速下降 ,但标准差仍呈增大趋势 ,即数据波动变大 ,如图 3 所示 .

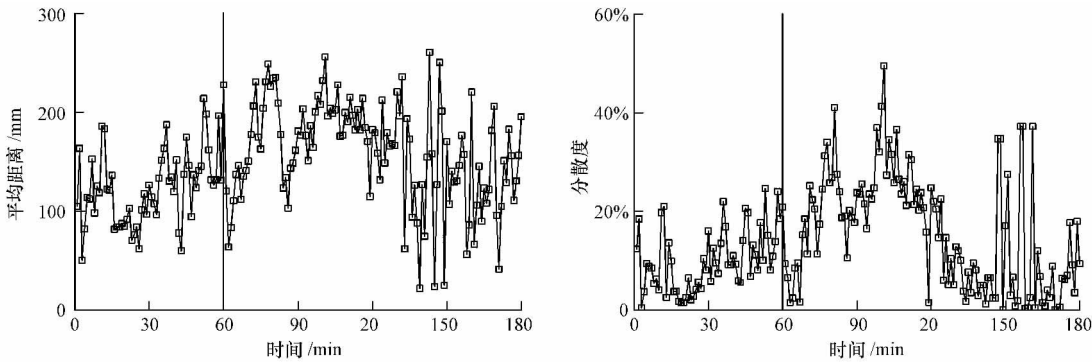


图 3 突发污染暴露下斑马鱼社交行为的变化

Fig. 3 Communication patterns of zebrafish under sudden exposure

3.4 斑马鱼的运动区域的分布

从图 4 明显可以看出 ,正常水体中 ,斑马鱼的运动轨迹均匀分布在鱼箱中 ,污染物暴露后 ,鱼

的活动范围明显减小 ,有逃离监测箱左下角 ( 进水口 ) 在右上角 ( 出口处 ) 游动的趋势 . 为了更好的研究鱼的逃避行为 ,将这一趋势进行量化 ,把鱼箱等

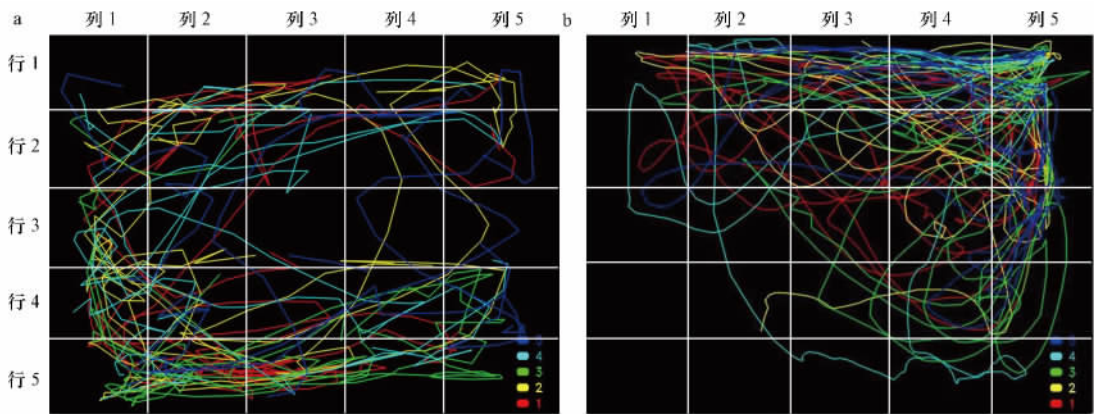


图 4 斑马鱼的鱼群运动轨迹图( a. 第 30 min b. 第 90 min)

Fig. 4 Monitor trajectory of fish school ( a. the 30th minute; b. the 90th minute)

分为五行五列,分别统计每 5 min 内斑马鱼在每一区域的停留时间占总时间的比率.结果如图 5 所示.暴露前 1 h 斑马鱼在各区域内的分布基本稳定,其中在列 1 和行 5 区域内停留时间较多,为 27% 和

25% 左右.随着暴露时间的延长,这两个区域的停留时间逐渐缩短,而列 5 和行 1 内有明显的增加趋势,都增至 25% 左右.

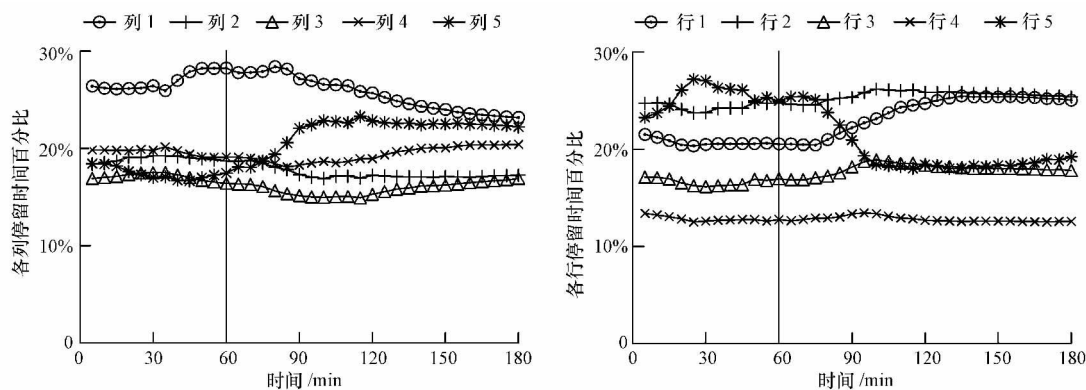


图 5 斑马鱼暴露前后运动区域的分布

Fig. 5 Swimming areas distribution of zebrafish under sudden exposure

#### 4 讨论 (Discussion)

正常水体在监测期间水质保持一致,因无外来刺激的干扰,斑马鱼鱼群的行为变化稳定,游动速度、高度、平均距离和分散度等指标都在均值上下稳定波动,运动轨迹在检测箱中均匀分布.由此可知,斑马鱼的游动行为在正常的水质状况下呈现明显的规律性,可用于水质突变条件下斑马鱼的行为比较,具有一定的可靠性. Gerhardt 等(2002)证明在一定的水体环境下,利用不同频率信号记录的生物的游动、爬行、行走和呼吸等运动行为参数都在一个稳定范围内变化.斑马鱼就被应用于该仪器中,空白暴露时稳定的行为变化趋势为后续污染物暴露的反应提供了可靠的参照(赵晓艳等,2010).

利用对化学刺激品敏锐的感觉器官,斑马鱼可感知水体突变的状况,表现出慌乱不安的过度活跃(Graham *et al.*, 2004).游动速度在暴露过程中变化最为敏感和剧烈,前 30 min 内持续增大,变化区间由暴露前 30 ~ 60 mm·s<sup>-1</sup> 变化到 60 ~ 85 mm·s<sup>-1</sup>.这种急速运动被称为“回避反应”,是鱼对水环境污染所产生的第一层次行为变化,其表现形式和所维持的时间长短受暴露化合物的种类及浓度的影响(任宗明等,2008).斑马鱼通过行为机制逐渐适应污染环境而导致的变化的行为,但随着暴露时间的增长,污染物逐渐在斑马鱼体内积累,毒性最终爆发.暴露 30 min 后,斑马鱼的游动速度急剧下降.有研究表明,溴氰菊酯具有很强的神经毒性,可通过

抑制脑突触体膜上的 ATP 酶,使突触后膜上的乙酰胆碱酯酶(AchE)等神经递质大量聚集,从而引起脑 AchE 被抑制,而氯氰菊酯的暴露则可使鱼体内产生大量的氧元素 O<sup>2-</sup>,以致 SOD 酶活性被抑制,导致鳃、肝等组织的损伤(Soderlund *et al.*, 2002).污染物对斑马鱼生理及组织等的影响导致其游泳速度最终维持在 10 ~ 30 mm·s<sup>-1</sup> 之间,仅是暴露前的 1/2 倍.

速度突然增大是鱼类对环境变化刺激的第一反应,其次才是咳嗽频率等呼吸行为的改变(Gerhardt *et al.*, 2005).Kang 等(2009)以“急速运动”和“浮头行动”作为衡量青鳉鱼运动异常的重要指标,指出污染物质对鱼呼吸系统阻碍可导致游动深度的变化.但是,对呼吸系统的损伤要有一个毒物累积的过程,所以高度的反应会滞后于速度的变化.从鱼群高度的变化可知,暴露 12 min 后游动高度明显的增大,由暴露前的 50 ~ 200 mm 变化到 150 ~ 270 mm.随着暴露时间的延长,斑马鱼不断通过自身的生理和行为调节适应了外界环境的压力,游动高度在第 2 h 内逐渐恢复至暴露前水平,但标准差仍然继续增大,即斑马鱼不断调节适应的过程中行为的稳定性变差.

受到环境污染的刺激,鱼类会在惊慌慌乱或静止某个角落的状态下使鱼群失去原有的分布和通讯行为.接触到污染物的前 10 min 内平均距离和分散度迅速下降,鱼群出现短暂的集群现象.黄东龙等(2001)实证在铅、镉等重金属的暴露下,斑马鱼

在短时间内发生明显的群聚性行为. 这种行为也是一种对外界压力的回避行为. 随着接触时间的增长, 鱼群变得松散, 群体性游动现象减弱, 平均距离和分散度的波动区间明显高于暴露前水平, 分散度甚至为暴露前的 2 倍. Chew 等 (2009) 证明在氯的刺激下, 斑马鱼鱼群失去原有的运动、分布和社交规律. 进一步研究中还要再增加一些如平衡损失率、不规则转弯等个体异常的监测指标, 这样个体和群体变化相结合, 以获得更加全面的信息.

随着暴露时间的增长, 斑马鱼不断通过行为、代谢调节等适应环境的变化, 游动高度、平均距离和分散度等逐渐恢复至暴露前水平, 但仍选择在浓度相对较低、接近水面的出水口附近游动. 感知到水体中污染物的存在后, 鱼会往无污染或污染程度较轻的区域逃避 (Clingerman *et al.*, 2007). Gullick 等 (2003) 使装置形成不同的污染物浓度梯度, 结果发现鱼的大部分时间集中在洁净水一端. 虽然水箱中的水力流态是自下向上但进水口处的浓度还是高于出水处, 鱼可感知这些区域的差异, 逃离浓度较高的列 1 和 2 的区域在行 1 和行 2 的停留时间明显增加.

## 5 结论 (Conclusions)

斑马鱼是一种群游鱼类, 在水体中连续不断的游动且可互相沟通, 和个体相比集群之后能快速获得更大的感知范围, 快速传导信息, 为水质在线预警提供更加全面、有效的信息. 在溴氰菊酯和氯氰菊酯的联合暴露的刺激下, 斑马鱼的表现出快速不安的急速游动, 速度由暴露前  $30 \sim 60 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增至  $60 \sim 85 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而高度的变化滞后于速度 12 min 左右. 在活动强度发生改变的同时, 斑马鱼鱼群的分散度和平均距离也不断增大, 分别增大 43.6% 和 120.0%. 但随着暴露时间的增长, 污染物也不断在体内积累, 最终导致游泳速度明显下降且在污染浓度较低的区域停留时间增长, 而高度、平均距离和分散度逐渐恢复至暴露前水平, 但波动较大. 利用速度、高度、平均距离、分散度、不同区域停留时间等 6 项可完整的描述这一过程的变化, 全面及时的获得鱼群受污染物影响的行为变化特征, 是用于水质预警的可靠指标. 后续的研究应该考察斑马鱼鱼群对其他污染物的行为反应, 并通过计算和比较各指标权重和参与运算的方式, 确定一个能够综合评价水质变化程度的参数.

责任作者简介: 张金松, 男, 工学博士, 教授级高工, 深圳市水务(集团)有限公司总工程师, 哈尔滨工业大学、西安建筑科技大学博士导师. 撰写并发表学术论文 160 余篇, 主编《净水厂技术改造实施指南》等多部学术著作; 研编《城市饮用水水质行业标准》、《深圳市管道优质饮用水安全管理规范》及《深圳市 2010 年水质发展规划》.

## 参考文献 (References):

- Atchison G J, Henry M G, Sandheinrich M B. 1987. Effects of metals on fish behavior: a review [J]. *Environment Biological Fishes*, 18(1): 11-25
- Barry M J. 2012. Application of a novel open-source program for measuring the effects of toxicants on the swimming behavior of large groups of unmarked fish [J]. *Chemosphere* 86(9): 938-944
- Chew B F, Eng L H, Myo T. 2009. Vision-based real-time monitoring on the behaviour of fish school. In MVA2009 IAPR Conference on Machine Vision Applications [C]. Yokohama, Japan. 20-22
- Clingerman J, Bebak J, Mazik P M *et al.* 2007. Use of avoidance response of rainbow trout to carbon dioxide for fish self-transfer between tanks [J]. *Aquaculture Engineering* 37(3): 234-251
- Gerhardt A, Schmidt S. 2002. The multispecies freshwater biomonitor a potential new tool for sediment biotests and biomonitoring [J]. *Journal of Soils and Sediments* 2(2): 67-70
- Gerhardt A, Ingarm M K, Kang I J *et al.* 2006. In situ on-line toxicity biomonitoring in water: recent developments [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* 25(9): 2263-2271
- Gerhardt A, Bisthoven L D, Soares M A *et al.* 2005. Evidence for the stepwise stress model: *Gambusia holbrooki* and *Daphnia magna* under Acid Mine Drainage and Acidified Reference Water Stress [J]. *Environment Science and Technology* 39(11): 4150-4158
- Graham R S, Katherine A S. 2004. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: integrating behavioural and physiological indicators of toxicity [J]. *Aquatic Toxicology* 68(4): 369-392
- Gullick R W, Grayman W M, Deininger R A *et al.* 2003. Design of early warning monitoring systems for source waters [J]. *American Water Works Association Journal* 95(11): 58-72
- 黄东龙. 2011. 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
- Ingram M K, Lee P, Momot W *et al.* 2004. Fourth SETAC World Congress: 25 Years of Interdisciplinary Science Serving Global Society, Portland, November 14-18 [C]. Lawrence: Allen Press
- Kang I J, Juny A M, Mitoshi Y *et al.* 2009. Swimming behavioral toxicity in Japanese medaka exposed to various chemicals for biological monitoring of water quality // Kim Y, Platt V, Gu M B, Iwahashi H. *Atmospheric and Biological Environmental Monitoring* [M]. Berlin: Springer Netherlands. 285-293.
- Little E E, Brewer S K. 2001. Neurobehavioral toxicity in fish // Schlenk D, Benson W H. *Target Organ Toxicity in Marine and Freshwater* [M]. London: Taylor & Francis. 139-174
- 任宗明, 李志良, 饶凯峰, 等. 2008. 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* 6(3): 563-569
- Soderlund D M, Clark J M, Sheets L P *et al.* 2002. Mechanisms of pyrethroid neurotoxicity: implications for cumulative risk assessment [J]. *Toxicology* 171(1): 3-59
- 赵晓艳, 刘丽君, 晨湘平, 等. 2010. 利用多物种净水监测仪在线监测水体抗生素药物及有机磷农药 [J]. *环境科学学报*, 30(1): 180-185
- 张金松, 黄毅, 韩小波, 等. 2013. 鱼的行为变化在水质监测中的应用 [J]. *给水排水* (7): 166-170