

## 2种除草剂联合胁迫下日本青鳉的逐级行为响应

刘勇<sup>1,2</sup>, 张高生<sup>1</sup>, 陈琳琳<sup>1</sup>, 任宗明<sup>1,\*</sup>, 付荣恕<sup>2</sup>, 王子健<sup>3</sup>, 赵建平<sup>4</sup>,  
高占国<sup>4</sup>, 翁燕波<sup>4</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003
2. 山东师范大学生命科学学院, 济南 250014
3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085
4. 宁波市环境监测中心, 宁波 315012

**摘要:** 探讨了日本青鳉在两种除草剂阿特拉津和百草枯联合暴露下的逐级行为响应, 采用水质安全在线生物预警系统(BEWs)记录行为强度数据, 分析不同暴露浓度、不同暴露时间日本青鳉的行为响应. 10、5、1和0.1TU的暴露浓度下行为反应时间分别为: 0.74、7.7、29.4和42.2h, 而每个浓度不同配比之间行为反应时间差异明显. 结果表明: 在两种除草剂的暴露下, 日本青鳉的逐级行为响应既受化合物浓度高低的影响, 又受暴露时间的影响, 而且每个浓度两种药物不同配比暴露下的青鳉鱼的逐级行为响应基本一致, 每个浓度不同配比之间行为反应时间差异明显, 即两种作用机制不同的除草剂对日本青鳉的行为毒性是协同作用.

**关键词:** 除草剂; 联合作用; 日本青鳉; 逐级行为响应

文章编号: 1673-5897(2010)1-032-06 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

## The Stepwise Behavioral Responses of the Japanese Medaka under the Joint Stress of Two Herbicides

LIU Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Gao-sheng<sup>1</sup>, CHEN Lin-lin<sup>1</sup>, REN Zong-ming<sup>1,\*</sup>, FU Rong-shu<sup>2</sup>,  
WANG Zi-jian<sup>3</sup>, ZHAO Jian-ping<sup>4</sup>, GAO Zhan-guo<sup>4</sup>, WENG Yan-bo<sup>4</sup>

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264000
2. College of Life Science, Shandong Normal University, Ji'nan 250014
3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085
4. Ningbo Environmental Monitoring Center, Ningbo 315012

**Received** 2 December 2009 **accepted** 15 January 2010

**Abstract:** In this study, the stepwise behavioral responses of the Japanese medaka (*Oryzias latipes*) under the joint stress of two herbicides (Atrazine and Paraquat) were discussed. BEWs was used to record the data of behavior strength to analyze the behavioral responses of Japanese medaka. The evident difference of the behavioral responses time were: 0.74、7.7、29.4 and 42.2h, and evident difference of the behavioral responses time was detected. The results suggested that the stepwise behavioral responses of the Japanese medaka were affected by both the chemical concentration and exposure time. And the evident difference of the behavioral response time was detected. The stepwise behavioral responses in different proportion of the two herbicides were almost the same as each other. It proved that the toxicity effects of the joint stress of the two herbicides on the stepwise behavioral responses of Japanese medaka were synergistic.

**Keywords:** herbicide; combined toxicity; Japanese Medaka (*Oryzias latipes*); stepwise behavioral responses

收稿日期: 2009-12-02 录用日期: 2010-01-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (No. 2009ZX07527-002-06); 环保公益性行业科研专项 (No. 200809147)

作者简介: 刘勇 (1983—), 男, 硕士研究生, E-mail: biolyqh@yahoo.com.cn; \* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zmren@yic.ac.cn

## 1 引言(Introduction)

阿特拉津是一种在世界范围内广泛使用的中等偏低毒性除草剂,已有 50 余年历史.阿特拉津使用量大、残留期长,农田施用后在水中能抵抗自然的递降分解作用,因此近年来不断有阿特拉津污染事件的报道.阿特拉津的长期、大量施用已经对水生态系统和饮用水源构成严重威胁(Hayes *et al.*, 2002).百草枯自 1962 年作为除草剂上市后,现已在 130 多个国家广泛使用.百草枯中毒死亡率高达 50%~80%,其毒性作用目前已引起广泛重视.百草枯对人毒性极大,且无特效药,口服中毒死亡率可达 90%以上(Chen *et al.*, 2000).在实际生产过程中,阿特拉津和百草枯通常交替使用,因此实际环境中存在两种除草剂的联合作用.

日本青鳉(*Oryzias latipes*)隶属鲷科,个体小,全长 2.5~5.0cm,可以耐受低溶氧和较宽的水温和盐度范围.由于其生物学背景研究非常充分,自从 Denny 等(1987)对青鳉饲养管理与实验操作进行了规范化后,青鳉作为模式实验动物已被多数世界组织认可(Yamamoto *et al.*, 1975; 任宗明和李志良,2009),并于 20 世纪 80 年代被国际标准化组织列为毒性实验受试种之一.目前,日本青鳉的行为变化已经作为一个重要指标已经被广泛地应用到水质监测中(Shioda *et al.*, 2000; 任宗明等,2008).

本研究利用日本青鳉行为变化分析了阿特拉津和百草枯联合作用下的环境胁迫导致的生物逐级行为响应,以期结合不同化合物的联合作用研究,分析在实际污染环境下受试生物的行为响应机制,发展一定环境胁迫下生物行为逐级胁迫模型.

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 监测系统

在日本青鳉行为在线监测中,采用水质安全在线生物预警系统(BEWS,中国科学院生态环境研究中心研制)进行(任宗明等,2007; 2008).

不同的生物个体大小采用相匹配的传感器:日本青鳉行为监测过程中,采用直径 5cm、长 7cm 的圆柱形生物传感器.

### 2.2 生物培养

日本青鳉由本实验室饲养并繁殖驯化多代,已

获得相对纯正的实验鱼体系.采用流水繁殖,繁殖水温为  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,光照周期 16L:8D.刚孵出 2d 内,无需投喂饵料.2d 后使用刚孵出丰年虫作为开口饵料,每天 2~3 次饱食投喂.15d 后即使用配合饲料投喂,每天投喂 2 次.保持密度为每升水 2~3 条(Teather *et al.*, 2001).

### 2.3 实验设计

本实验采用流水环境监测日本青鳉逐级行为反应.在化合物暴露实验过程中,选取目前比较常用的除草剂:百草枯、阿特拉津.其标准样品从中国标准样品中心购买.将化合物对日本青鳉的 48h 半数致死剂量(50% Lethal Concentration of 48h), $LC_{50-48}$  作为 1 个毒性单位(Toxic Unit, TU)(Ren *et al.*, 2009a; 2009b),每种农药组合设定 4 个浓度组,分别为 0.1、1、5 和 10 TU.每个相同浓度组的 2 种农药按照下列比例混合( $c_P:c_A$ ):10:0; 7:3; 5:5; 3:7; 0:10,进行 2 种除草剂的联合作用对日本青鳉逐级行为响应研究.每种比例的化合物联合作用进行 3 组平行,结果以 3 组平行结果的平均值显示.

实验过程中,为了明确生物综合行为的变化,采用生物综合行为强度(Behavior strength)来反映其行为变化(Ren *et al.*, 2009a; 2009b),在此过程中,判断日本青鳉行为发生剧烈变化的标准是:变化前连续 5 次行为强度平均值与变化后连续 5 次行为强度平均值的相对差值降低达到 20% 以上(Ren *et al.*, 2009a; 2009b),而低浓度(1TU 和 0.1TU)则需要 10% 的行为强度降低为显著变化.

在日本青鳉流水实验过程中,每通道保持 3 条 2.5~3.0cm 体长的健康日本青鳉,直至实验结束.实验过程中不投加食物,并控制每个通道水体流速每小时 2L(Guilhermino *et al.*, 2000).

试验用水为充分曝气的自来水,温度  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ,溶解氧  $>8\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,硬度以  $\text{CaCO}_3$  计,  $(250 \pm 25)\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,控制光照周期 16h:8h(白天:黑夜,白天 04:00~20:00,夜间 21:00~04:00),为保证生物行为监测平行,每次行为监测实验开始于第 1d 16:00,第 3d 16:00 结束.空白采用国际标准化组织规定的标准水(Standard reference water, SRW)(Cladocera *et al.*, 1996),pH 值为  $7.8 \pm 0.2$ ,硬度以  $\text{CaCO}_3$  计为  $(250 \pm 25)\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

### 3 结果(Results)

#### 3.1 行为强度与化合物浓度之间关系

结合研究报道,2种除草剂对日本青鳉  $LC_{50-48}$  分别为阿特拉津  $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和百草枯  $7.2\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

(Nishiuchi and Hashimoto, 1967; Hashimoto and Nishiuchi, 1981). 本研究中,以上述化合物的  $LC_{50-48}$  作为日本青鳉的1个毒性单位(1TU),并以SRW为对照,研究一定化合物暴露下的日本青鳉的综合行为强度变化.

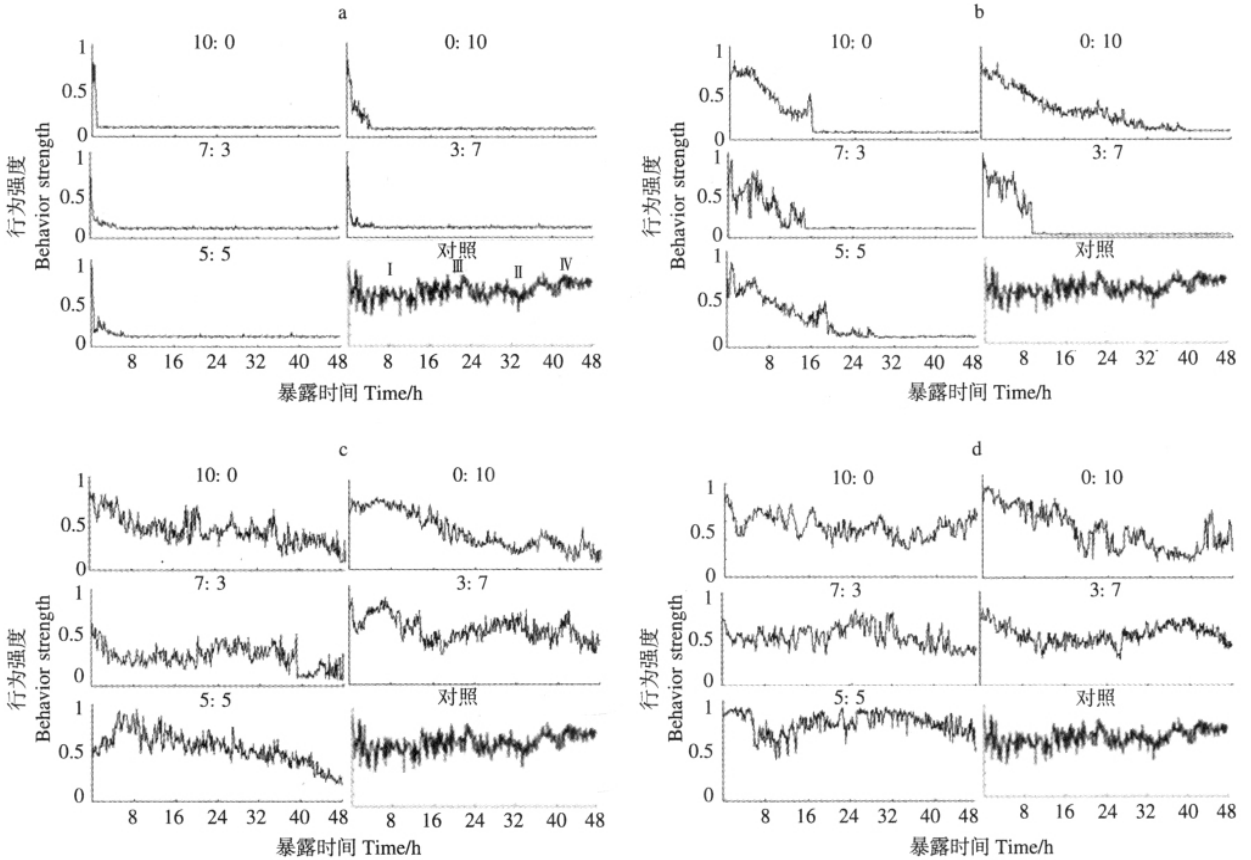


图1 不同浓度阿特拉津和百草枯联合作用下日本青鳉 48h 行为强度变化

(图 a-d 分别为各为 10、5、1 和 0.1TU 的阿特拉津和百草枯按一定比例( $c_A:c_P$ )联合作用下日本青鳉的行为强度变化)

Fig.1 The effects of different concentration herbicides on the behavior strength of medaka in 48 hours exposure

(a-d: The evident difference of the behavior strength of medaka under different proportion of the two herbicides of 10, 5, 1 and 0.1TU)

不同浓度阿特拉津和百草枯联合作用下日本青鳉 48h 的行为强度变化如图 1 所示. 图 1 表示的行为强度变化结果中, 对照组内日本青鳉行为强度基本维持在 0.7 左右, 但其最大值位于 0.8 左右, 最小值位于 0.5 左右, 尤其在暴露时间 8h 左右( , 黑暗)和 32h 左右( , 黑暗), 日本青鳉行为强度比 20h 左右( , 光照)和 40h 左右( , 光照)明显降低(图 1-(a)). 产生对照组行为强度变化的原因可能在于日本青鳉行为变化的内在节律, 即生物钟现象 (Biological clock) (Binkley *et al.*, 1978; Wang *et al.*, 2006; 任宗明等, 2009). 因此, 在不同浓度阿特拉津和百草枯联合作用下日本青鳉的行为强度变化结果分析中, 应该考虑到生物

钟现象对日本青鳉行为变化的影响.

在暴露组中, 不管  $c_P:c_A$  的比例为多少, 随着暴露浓度的逐渐升高, 日本青鳉行为强度均会明显降低. 在较高浓度(5 和 10TU)暴露中, 日本青鳉行为强度变化在经历一个逐渐降低过程以后, 逐渐趋于零. 而在此过程中, 日本青鳉的行为强度基本上是逐渐降低的, 没有明显的行为调解(行为强度回复)过程, 这与日本青鳉在有机磷农药暴露中的行为强度变化是不同的. 上述行为变化的差异性主要归因于不同污染物的毒性效应作用机制不同, 这可能是日本青鳉行为强度逐渐降低而没有出现行为调解的主要原因 (John *et al.*, 2009). 阿特拉津会使鱼体内的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等无机离子浓度显

著下降，从而导致其重要的生理功能发生紊乱 (Prasad and Reddy, 1994),百草枯主要是通过其强氧化作用,使机体内还原酶及脂质的氧化,或直接或间接损伤 DNA,使细胞坏死或凋亡 (Suntres *et al.*, 2002). 在较低浓度(1 和 0.1TU)暴露中,日本青鲮行为变化主要以调整为主,并且其调整过程基本符合对照组内日本青鲮的行为过程,具有明显内在节律性. 但是,该浓度组中日本青鲮的行为强度在暴露后期出现明显的降低,该现象与对照组相比较,行为强度差异明显. 这 2 个浓度组出现行为调解过程的原因可能是低浓度的环境污染物导致细胞和器官损伤,但并未超过受试生物启动行为调节机制的阈值,受试生物通过行为调解对抗环境胁迫对自己的损伤.

化合物浓度增高,日本青鲮行为变化剧烈,随暴露化合物浓度降低,日本青鲮行为过程增加,发生的调解行为增多. 暴露结束,日本青鲮行为强度也从高浓度的零值升高到 0.4 左右. 上述分析表明,日本青鲮行为强度变化与暴露化合物浓度密切相关,在暴露时间确定情况下,日本青鲮行为强度变化直接受环境内化合物浓度的影响.

### 3.2 行为强度与暴露时间之间关系

根据实验设计中判断日本青鲮行为发生剧烈变化的标准,日本青鲮在不同浓度配比的化合物暴露下的行为强度明显变化所需时间见表 1.

表 1 日本青鲮在不同浓度配比的阿特拉津和百草枯暴露下的行为强度明显变化所需时间

Table 1 The evident difference of the behavioral response time of medaka under different proportion of the two herbicides

暴露浓度 /TU	不同 $c_P:c_A$ 行为强度明显变化时间/h					平均
	10:0	7:3	5:5	3:7	0:10	
10	0.8	0.5	0.6	0.6	1.2	0.74
5	8.2	7.2	6.9	7.5	8.7	7.7
1	34.6	29.7	26.5	23.6	32.4	29.4
0.1	44.5	42.5	39.5	41.4	43.3	42.2

不同浓度的暴露中,在日本青鲮发生行为强度明显变化以后,行为过程会产生明显不同. 在较高浓度中,日本青鲮行为强度会逐渐降低至消失,而在较低浓度中,日本青鲮行为强度变化经历明显降低后,会产生明显的行为调节过程,尤其是在 1TU 和 0.1TU 暴露中,该过程与几乎发生在暴露 20h 左右,与对照组的行为生物钟现象相对应.

试验结果显示,两种除草剂随其浓度的增加,行为强度明显变化时间呈明显下降趋势(图 2),它们的联合作用剂量与其毒性效应具有明显的正相关,其毒性效应趋势与单一污染物效应是不同的,联合毒性作用下行为变化时间明显小于单一污染物作用下行为反应时间. 结果表明,暴露浓度越低,日本青鲮行为强度发生明显变化所需时间越长,并且,从总体变化趋势分析,该改变化时间长短与  $c_P:c_A$  存在直接联系(图 2).

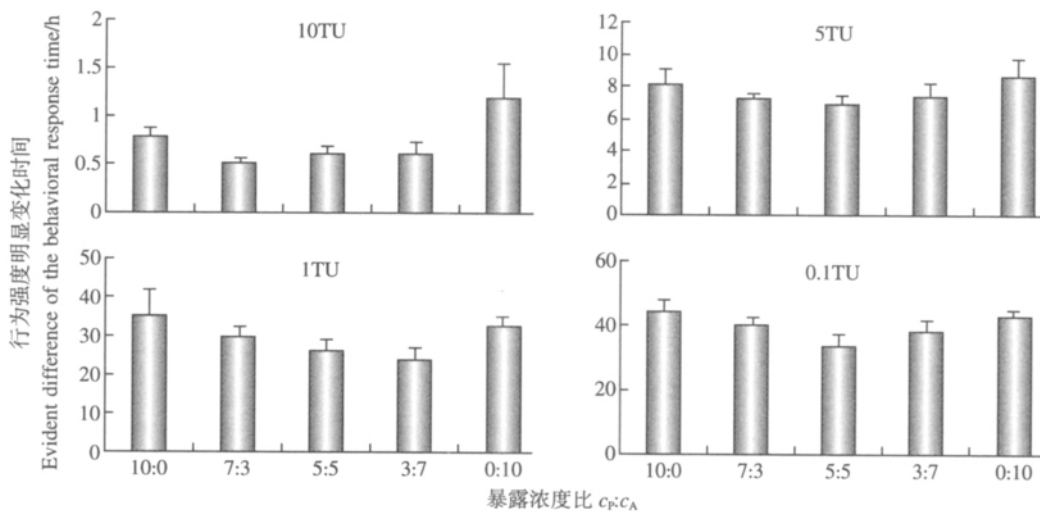


图 2 2 种除草剂联合毒性试验结果

Fig.2 The result of joint toxicity of two herbicides



由此得出进一步结论:作为作用机制不同的的2种除草剂百草枯和阿特拉津对日本青鲮的行为毒性应该是协同作用(Eldefrawi *et al.*, 1985; 李志良等,2007).

#### 4 讨论(Discussion)

从日本青鲮行为强度变化与化合物浓度和暴露时间关系分析,在一定浓度的除草剂暴露中,其行为强度变化与暴露时间直接关联,而在暴露时间确定的情况下,行为强度变化与暴露浓度相关.同时,日本青鲮暴露于一定污染环境以后,其行为变化主要经历行为刺激、行为适应、行为调整甚至再调整,直至产生明显行为毒性效应(Ren *et al.*, 2007).在上述行为调节过程中,环境胁迫阈对生物行为变化起决定性作用.

一定浓度污染物暴露下日本青鲮行为变化与暴露时间之间的关系,在不考虑生物行为内在节律性前提下,符合基于大型蚤行为变化构建逐级行为模型(图3)(任宗明等,2005).

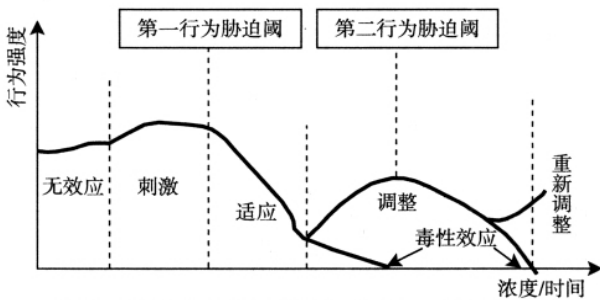


图3 大型蚤在污染物暴露下的行为强度变化模型

Fig.3 The Daphnia's stepwise stress model exposed in pollution

在低浓度除草剂暴露浓度下,行为强度随暴露时间延长呈现明显规律性,并且在暴露时间确定的情况下,日本青鲮行为强度变化与暴露化合物浓度直接相关,同时,在大部分暴露过程中,日本青鲮行为强度会经历明显的行为适应和调节过程,因此,日本青鲮逐级行为响应既受化合物浓度大小影响,又与暴露时间密切相关,结合上述分析,其行为强度变化主要经历行为刺激、行为适应、行为调整甚至再调整,直至产生明显行为毒性效应,行为趋势符合如图3所示的逐级行为模型.

结合行为强度与化合物浓度和暴露时间之间关系分析,在逐级行为模型中,日本青鲮无效应行为变化和为行为刺激组成的行为强度变化过程(回

避行为过程)和所维持的时间长短主要受暴露化合物浓度影响,并呈现明显规律性,并由此决定环境胁迫导致第一行为为胁迫阈发挥作用的时间和强度.环境胁迫越大,回避行为过程越短,第一行为为胁迫阈对日本青鲮产生的胁迫越强,在行为适应失败以后,可能直接导致日本青鲮的毒性效应.在较强的环境胁迫下,日本青鲮可能会在经历行为适应和调整过程后,遭受第二行为为胁迫阈的直接影响.由此,日本青鲮在一定环境胁迫下,会产生明显的逐级行为调整过程,直至其行为毒性效应产生.日本青鲮逐级行为调整,尤其是在回避行为产生以后,既受环境化合物浓度影响,又与暴露时间相关.

研究结果证明,在百草枯和阿特拉津两种除草剂联合暴露下,日本青鲮的逐级行为响应既受化合物浓度大小的影响,又受暴露时间的影响,而且每个浓度的不同配比之间的行为反应时间差异明显,即每个浓度两种药物不同配比暴露下的青鲮鱼的逐级行为响应是不一致的.实验结果证明了两种作用机制不同的除草剂对日本青鲮的行为毒性不是简单的相加作用,而是协同作用,同时表明日本青鲮逐级行为响应既受化合物浓度大小影响,又与暴露时间密切相关.

针对日本青鲮在产生行为过程中的明显生物钟现象,为了进一步明确行为调解与行为内在节律之间关系,在后续水生生物行为强度变化研究中,有必要考虑生物钟现象对生物行为调节的影响.

通讯作者简介:任宗明(1978—),副研究员,主要从事生态毒理学方面的研究.

#### References

Binkley S A, Riebman J B, Reilly K B. 1978. The pineal gland: a biological clock *in vitro* [J]. *Science*, 202(4373): 1198-1120

Casida J E. 2009. Pest toxicology: The primary mechanisms of pesticide action [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 22(4): 609-619

Chen C M, Lua A C. 2000. Lung toxicity of paraquat in the rat [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 60(7): 477-487

Denny J S. 1987. Guidelines for the culture of fathead minnows for use in toxicity tests [M]. USA: Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Duluth M N

Eldefrawi A T. 1985. Acetylcholinesterases and anticholinesterases [A]. //Kerkut G A, Gilbert L I. *Comparative Insects Physiology*,

- Biochemistry, and Pharmacology [C]. New York: Pergamon press, 12: 115-130
- Guilhermino L, Diamantino T, Silva M C, Soares A M V M. 2000. Acute toxicity test with *Daphnia magna*: An alternative to mammals in the prescreening of chemical toxicity? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 46(3): 357-362
- Hashimoto Y, Nishiuchi Y. 1981. Establishment of Bioassay Methods for the Evaluation of Acute Toxicity of Pesticides to Aquatic Organisms[J]. *Journal of Pesticide Science*, 6(2): 257-264
- Hayes T B, Collins A, Lee M, Mendoza M, Noriega N, Stuart A A, Vonk A. 2002. Hermaphroditic demasculinized frogs after exposure to the herbicide atrazine at low ecologically relevant doses [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(8): 5476-5480
- International Organization for Standardization. 1996. ISO 6341 Water quality-determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea)-Acute toxicity test [S]. Switzerland
- Li Z L, Ren Z M, Ma M, Zha J M, Wang Z J. 2007. Application of behavioral changes of *daphnia magna* to early warning of sudden organophosphorous water contamination [J]. *Water & Wastewater*, 23(12): 73-75(in Chinese)
- Nishiuchi Y, Hashimoto Y. 1967. Toxicity of pesticide ingredients to some fresh water organisms [J]. *Science of Pest Control*, 32(1): 5-11
- Prasad T A V, Reddy D C. 1994. Atrazine toxicity on hydromineral balance of fish, *Tilapia mossambicus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 28(3): 313-316
- Ren Z M, Fu R S, Wang Z J, Ma M, Liu L J. 2005. Acute and chronic toxicities of residual chlorine in drinking water on *Daphnia magna* [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 31(4): 26-28(in Chinese)
- Ren Z M, Li Z L, Rao K F, Wang Z J, Zhao L T, Wang P, Wang T. 2008. The differences of the behavioral responses of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) in the exposure of fenvalerate and cadmium chloride [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 3(6): 563-569(in Chinese)
- Ren Z M, Li Z L, Wang Z J. 2009. Comparisons between applications of *Daphnia magna* and Japanese Medaka (*Oryzias latipes*) in the water quality on line biomonitoring [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 35(5): 32-36(in Chinese)
- Ren Z M, Li Z L, Zha J M, Rao K F, Ma M, Wang Z J, Fu R S. 2009a. The avoidance responses of *Daphnia magna* to the exposure of organophosphorus pesticides in an on-line biomonitoring system[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 14(3): 405-410
- Ren Z M, Li Z L. 2009. Toxic effects of potassium permanganate and manganese chloride on the early life stage of Japanese medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 4(6): 841-846(in Chinese)
- Ren Z M, Ma M, Zha J M, Wang Z J. 2007. The researches of on-line monitoring techniques in typical pesticides accidental contamination [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 33(3): 20-23(in Chinese)
- Ren Z, Ma M, Wang Z. 2009b. Behavioral responses of *Daphnia magna* to stresses of chemicals with different toxic characteristics [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(3): 310-316
- Ren Z, Zha J, Ma M, Wang Z, Gerhardt A. 2007. The early warning of aquatic organophosphorus pesticide contamination by on-line monitoring behavioral changes of *Daphnia magna* [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 134(1-3): 373-383
- Shioda T, Wakabayashi M. 2000. Effect of certain chemicals on the reproduction of medaka (*Oryzias latipes*) [J]. *Chemosphere*, 40(3): 239-243
- Suntres Z E. 2002. Role of antioxidants in paraquat toxicity [J]. *Toxicology*, 180(1): 65-77
- Teather K, Harris M, Boswell J, Gray M. 2001. Effects of Acrobat MZ and Tatto C on Japanese medaka (*Oryzias latipes*) development and adult male behavior [J]. *Aquatic Toxicology*, 51(4): 419-430
- Wang G Q, Fu C L, Li J X, Du Y Z, Tong J. 2006. Circadian rhythms and different photoresponses of Clock gene transcription in the rat suprachiasmatic nucleus and pineal gland [J]. *Acta Physiologica Sinica*, 58(4): 359-364(in Chinese)
- Yamamoto T. 1975. Medaka (Killifish): Biology and Strains [M]. Tokyo: Keigaku Publishing Company
- 中文参考文献  
李志良, 任宗明, 马梅, 查金苗, 王子健, 付荣恕. 2007. 利用大型蚤运动行为变化预警突发性有机磷农药污染事件 [J]. *中国给水排水*, 23(12): 73-75
- 任宗明, 付荣恕, 王子健, 马梅, 刘丽君. 2005. 饮用水中余氯对大型蚤的急性和慢性毒性 [J]. *给水排水*, 31(4): 26-28
- 任宗明, 李志良, 饶凯锋, 王子健, 赵立庭, 王鹏, 王涛. 2008. 氟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*, 3(6): 563-569
- 任宗明, 李志良, 王子健. 2009. 大型蚤和日本青鳉在水质在线生物安全预警应用中的比较 [J]. *给水排水*, 35(5): 32-36
- 任宗明, 李志良. 2009. 高锰酸钾及氯化锰对日本青鳉的急、慢性毒性 [J]. *生态毒理学报*, 4(6): 841-846
- 任宗明, 马梅, 查金苗, 王子健. 2007. 在线生物监测技术用于典型农药突发性污染的研究 [J]. *给水排水*, 33(3): 20-23
- 王国卿, 傅春玲, 李建祥, 杜玉珍, 童建. 2006. 大鼠视交叉上核与松果体中 Clock 基因转录的昼夜节律性及不同光反应性 [J]. *生理学报*, 58(4): 359-364