

文章编号: 1009-3087(2012)增刊1-0066-05

TDG 过饱和对鲫鱼的急性毒性效应及 CAT 活性的影响

吴松¹ 姜文¹ 刘晓庆² 李克锋^{1*}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室 四川 成都 610065;

2. 西华大学 能源与环境学院 四川 成都 610039)

摘要: 为探讨 TDG 过饱和对鲫鱼的影响,采用流水式生物测试法研究 TDG 过饱和对鲫鱼的急性毒性效应及 CAT 活性的影响。结果表明: TDG 过饱和和水体对第 1 批鲫鱼胁迫时间为 8、10、11 和 14 h 的半致死浓度(LC_{50}) 分别是 150.7%、139.2%、137.9% 和 136.2%。第 2 批试验鲫鱼暴露 9、10、11、15 h 的半致死浓度分别为 142.1%、141.2%、139.0%、134.7%。此外,鲫鱼受 TDG 饱和度为 145% 的水体胁迫,肌肉组织和鳃组织 CAT 活性呈先升后降趋势,且肌肉组织 CAT 活性低于鳃组织。

关键词: TDG 过饱和; 鲫鱼; 毒性效应; CAT

中图分类号: Q17

文献标志码: A

Effect of Acute Toxicity and CAT Activity of Total Dissolved Gas Supersaturation on Crucian (*Carassius auratus*)WU Song¹ JIANG Wen¹ LIU Xiao-qing² LI Ke-feng^{1*}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. School of Energy and Environment, Xihua Univ., Chengdu 610039, China)

Abstract: Effect of the acute toxicity of total dissolved gas (TDG) supersaturation on crucian (*carassius auratus*) was investigated by rheobiotic testing in order to determine the effect of TDG saturation on crucian and catalase (CAT) activity. The results showed that the value of LC_{50} of the first test group are 150.7%, 139.2%, 137.9% and 136.2% corresponding to exposure time in TDG supersaturated water of 8, 10, 11 and 14 h, respectively. And the value of LC_{50} of the second test group are 142.1%, 141.2%, 139.0% and 134.7% corresponding to exposure time in TDG supersaturated water of 9, 10, 11 and 15 h, respectively. The activity of catalase (CAT) in crucian's gill and muscle increases first and then decreases when crucian has been exposed to water with TDG saturation level of 145%. It was revealed that the activity of catalase in crucian's muscle tissues is lower than in gill tissues.

Key words: TDG; supersaturation; crucian (*Carassius auratus*); toxic effect; catalase (CAT)

高坝泄洪过程中,下泄水流与空气剧烈掺混,使水体中气体总压超过大气压,形成总溶解气体(total dissolved gas, TDG)过饱和^[1]。当水体总溶解气体饱和度超过一定限度,将导致鱼类气泡病(gas bubble disease, GBD),严重时致其死亡。据不完全统计,国内外已建成百米以上高坝达 400 多座^[2]。随着国家高坝建设的蓬勃发展,下游水体 TDG 过饱和问题将日渐突出,可能会对下游区域内的鱼类资源造成破坏。

国外关于 TDG 过饱和和水体对鱼类影响的研究开展较早,研究较为深入。从 TDG 过饱和对鱼类行为的影响、不同鱼类对 TDG 过饱和的耐受性、TDG 过饱和对鱼类繁殖和生长发育的影响,以及 TDG 过饱和对鱼类机体的生理反应和生化指标的影响等均有较为广泛且深入的研究。国内有关 TDG 过饱和和水体对鱼类的影响的研究较少。谭德彩等^[3]报道了鱼类对 TDG 过饱和环境的忍耐性及适应行为,研究表明底栖鱼类对 TDG 过饱和有较强的耐受性和适应性。黄翔、李克锋等^[4]研究了 TDG 过饱和和水体对岩原鲤的急性致死效应及逃逸行为,进一步分析了岩原鲤在 TDG 过饱和环境中的耐受性。随后,刘晓庆、李克锋等^[5]对岩原鲤在急、慢性 TDG 过饱和胁迫条件下的生长特性和生化效应作了相关研究,

收稿日期: 2011-12-21

作者简介: 吴松(1988—),男,硕士生,研究方向: 环境水力学及水污染控制。

* 通信联系人 E-mail: kefengli@scu.edu.cn

分析了 TDG 过饱和对岩原鲤生理特征的影响以及该鱼类对该逆境因子产生的生物学响应。张月霞^[6]进行了 TDG 过饱和对岩原鲤和齐口裂腹鱼的急性毒性试验,并对中毒死亡的试验鱼苗进行了 CAT 活性的分析。

对于鱼类受 TDG 过饱和和水体胁迫的急性毒性效应过程中,关于 TDG 过饱和对鱼类机体组织抗氧化酶活性影响的研究尚鲜见到报道。为此,作者借鉴生态毒理学原理,以鲫鱼(*Carassius auratus*)为研究对象,研究 TDG 过饱和和水体对鲫鱼的急性生态毒性效应,分析 TDG 过饱和和水体对鲫鱼鳃和肌肉组织 CAT 活性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

鲫鱼主要以植物为食,喜群集而行,择食而居,其肉质细嫩,营养价值和药用价值很高,是较为经济的杂食性鱼。且鲫鱼分布广泛,全国各地水域常年均有生产,为中国重要食用鱼类之一。因此,选用渔业养殖中常见的鲫鱼为研究对象,可丰富 TDG 过饱和和对鱼类影响的研究成果,为今后的研究工作提供参考依据,以提升 TDG 过饱和对鱼类影响研究工作的意义和重要性。

试验鱼类为鲫鱼,购于成都市农产品中心批发市场。试验前将鲫鱼在实验室条件下暂养 1 d,暂养期间不投饵,活动正常,无病,死亡率低于 5%。暂养期水质条件:事先充分曝气,充气泵连续进行充氧,溶解氧 $7.5 \sim 8.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH $7.3 \sim 7.8$,水温 $24 \sim 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验时选择活动性强的健康鲫鱼进行试验。鲫鱼规格为:第 1 批,平均体长 $(15.3 \pm 0.6) \text{ cm}$,平均体重 $(119.3 \pm 13.7) \text{ g}$;第 2 批,平均体长 $(16.8 \pm 1.2) \text{ cm}$,平均体重 $(146 \pm 21.2) \text{ g}$ 。

1.2 仪器和试剂

TU-1901 双光束紫外分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)、TGL-16 高速冷冻离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司)、ALC-2104 电子天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司)等。

磷酸氢二钠($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、磷酸二氢钠($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na)、30% 的过氧化氢溶液等均为市售,分析纯。

1.3 试验方法

采用流水试验法,实验中蓄水池用水为充分曝气的自来水。借助模拟高坝泄水 TDG 过饱和的试验系统^[4]将生成的 TDG 过饱和水体与曝气自来水

通过控制流量以不同比例混合,可同时产生多股不同饱和度的水流。调试该系统产生试验所需的 TDG 饱和度,分别设置为 130%、135%、140%、145% 的水体,其中水体 TDG 饱和度(%)、试验当地大气压(mmHg)和水体温度($^{\circ}\text{C}$)的测定采用加拿大 Point 公司生产的总溶解气体测定仪 POINT 4。

1.3.1 急性毒性试验

将第 1 批、第 2 批 2 个不同生长发育阶段的试验鲫鱼分别暴露于 TDG 饱和度分别为 130%、135%、140%、145% 的水中,以暴露于曝气自来水中的试验鲫鱼作为对照。每个水箱内分别放入试验鱼 14 尾,循环水水温为 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$,水深 28 cm。试验过程中,观测记录试验组与对照组水箱中试验鱼异常情况和各 TDG 饱和度水体中试验鲫鱼的死亡数。

1.3.2 CAT 活性的测定

在急性毒性试验基础上,根据第 1 批鲫鱼在 TDG 浓度为 145% 的半致死时间(LT_{50})值,设 2 个平行组,同时设 1 个空白对照组,随机放入鲫鱼 20 尾。鲫鱼暴露于 TDG 过饱和水体 0.2、2.2、4.4、6.8、9 h 时,分别随机选取 2 尾存活鲫鱼,取肌肉和鳃各 0.15 g,立即用液氮冷冻进行研磨并加入 1.5 mL 新鲜配制的磷酸缓冲液进行酶液提取,并在 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 000 r/min 条件下对提取液离心 3 min。取上清液作为酶液用于 CAT 活性的测定^[7]。

CAT 活性的测定采用紫外分光光度计法。测定中,3 mL 的反应混合液包括 0.1 mL 酶提取液、2.75 mL 磷酸缓冲液、0.15 mL 0.6% 过氧化氢溶液,在 240 nm 波长条件下测定吸光度。酶活性单位定义为,1 min 内过氧化氢在 240 nm 波长下吸光度减少 0.01 的酶量为 1 个酶活单位(U),CAT 活性(U/g)按式(1)^[8]计算:

$$\text{过氧化氢酶活性} = \frac{\Delta A \times V_1}{0.01 \times t \times V_2 \times m} \quad (1)$$

式中: ΔA 为测定 1.5 min 的吸光度差值; V_1 为样液总体积, mL; t 为测定时间, 1.5 min; V_2 为测定用样液体积, mL; m 为样品质量, g。

1.4 数据处理

应用机率单位法^[9],以 TDG 饱和度的对数值作为自变量,将死亡率转换为概率单位,建立 TDG 过饱和水体对鲫鱼的浓度-反应(死亡率的概率单位)和时间-反应关系。CAT 活性的数据,采用 SPSS17 软件 t 检验方法对处理组与对照组进行差异显著性分析,其中 $p < 0.05$ 表示差异显著, $p < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 中毒症状

随着暴露时间的延长,部分鲫鱼出现异常反应,表现为游动迟缓,身体自控能力逐渐下降,侧游,打转,最后无力游动直至死亡,从出现异常反应到死亡所经历的时间较长;而部分鲫鱼在水中剧烈挣扎游动,碰撞水箱边壁,甚至跃出水面,最后漂浮于水面直至死亡,从出现异常反应到死亡所经历的时间较短。这是由于前者通过减少活动节省体内能量用以克服应激环境,后者由于剧烈活动消耗了体内过多的能量,进而加剧死亡^[4]。

试验观察表明,鲫鱼长时间暴露于 TDG 过饱和水体中,其机体出现较明显的气泡病症状:主要表现为鱼鳍内出现气泡,机体局部有细微的组织隆起。

2.2 急性毒性效应

TDG 过饱和对鲫鱼的急性毒性试验结果如图 1、2 所示。由图可知,随着暴露时间的延长,试验鲫鱼的死亡率逐渐增加;且 TDG 饱和度越大,试验鲫鱼死亡率越大。

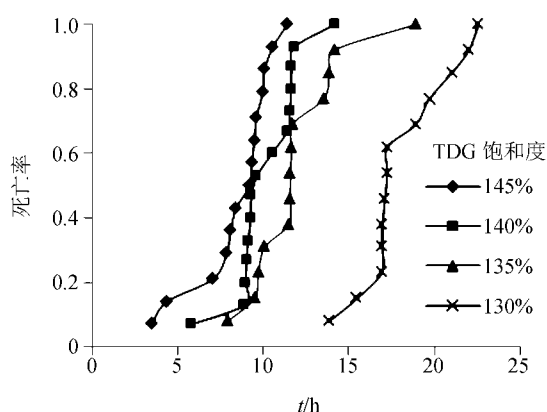


图1 第1批鲫鱼死亡率与暴露时间关系图

Fig.1 The first group mortality and exposure time graph

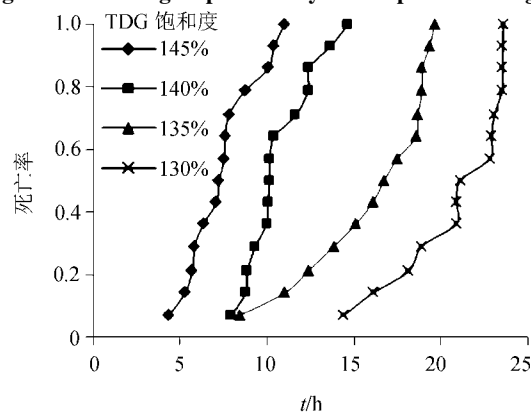


图2 第2批鲫鱼死亡率与暴露时间关系图

Fig.2 The second group mortality and exposure time graph

第1批鲫鱼在 TDG 饱和度为 130% 的水体中暴露 14 h 时,开始出现死亡,暴露 24 h 后死亡率达到 100% (如图 1 所示); TDG 饱和度为 140%、135% 时,死亡率达 100% 的时间分别约为 14、18 h;当水体 TDG 饱和度为 145% 时,暴露约 3 h 后,试验鲫鱼开始出现死亡,暴露约 12 h 后,试验鱼苗已全部死亡。

而第2批鲫鱼在 TDG 饱和度为 130% 的水体中暴露 14 h 时,开始出现死亡现象,暴露 24 h 后试验鲫鱼全部死亡(如图 2 所示); TDG 饱和度为 140%、135% 时,出现死亡时间均约为 8 h。死亡率为 100% 的时间分别约为 14、19 h;当水体 TDG 饱和度为 145% 时,试验鱼 3 h 后出现死亡现象,约 8 h 后,试验鱼苗全部死亡。

根据 TDG 过饱和对鲫鱼的急性毒性试验结果,建立 TDG 过饱和和水体对鲫鱼的浓度-反应和时间-反应关系。不同 TDG 浓度下,试验鲫鱼死亡率的概率单位与时间对数值的曲线方程及其 LT_{50} 见表 1,不同暴露时间下,死亡率的概率单位与 TDG 饱和度对数值的曲线方程及其 LC_{50} 见表 2。

由表 1 分析可知,随着暴露时间的延长,试验鲫鱼的死亡率增加,TDG 饱和度越大,半致死时间越小。

由表 2 分析可知,随着 TDG 饱和度的增高,试验鲫鱼的死亡速率加快,时间越长,半数致死浓度越小。

2.3 TDG 过饱和对鲫鱼鳃组织和肌肉组织 CAT 活性的影响

TDG 过饱和和水体对鲫鱼鳃组织和肌肉组织 CAT 活性的影响如表 3、4 所示。

由表 3、4 可见,随着暴露时间的增加,鲫鱼鳃组织和肌肉组织的 CAT 活性变化呈先增高后减小的变化趋势。

试验鲫鱼暴露 0.2 h 后,鲫鱼处理组与对照组鳃组织 CAT 活性与对照组差异显著($p < 0.05$) (如表 3 所示);而处理组肌肉组织 CAT 活性与对照组无显著性差异($p > 0.05$) (如表 4 所示)。

当暴露 4.6 h 后,处理组鳃组织和肌肉组织 CAT 活性与对照组表现出极显著差异($p < 0.01$),此后两者 CAT 活性呈下降趋势。6.8 h 后,处理组鳃组织和肌肉组织 CAT 活性与对照组差异性显著($p < 0.05$)。试验结束时,处理组与对照组间无显著差异($p > 0.05$)。

表 1 不同 TDG 饱和度下鲫鱼各试验组的 LT_{50} Tab. 1 LT_{50} of different experimental groups exposed to various TDG supersaturation levels

试验组	TDG 饱和度 /%	回归方程	尾数	相关系数 R^2	LT_{50} /h	LT_{50} 的 95% 置信区间 /h
第 1 批试验鱼	130	$y = 16.199x - 15.187$	14	0.937 6	17.6	15.3 ~ 20.3
	135	$y = 10.996x - 6.562 7$	14	0.924 9	11.3	9.2 ~ 13.8
	140	$y = 10.035x - 4.900 9$	14	0.828 4	9.7	7.9 ~ 11.9
	145	$y = 5.478 9x + 0.130 9$	14	0.740 8	8.6	5.9 ~ 12.7
第 2 批试验鱼	130	$y = 12.314x - 11.106$	14	0.824 1	20.3	17.1 ~ 24.2
	135	$y = 7.654x - 4.026 4$	14	0.828 1	15.1	11.4 ~ 19.9
	140	$y = 13.762x - 9.006 2$	14	0.971 2	10.4	8.9 ~ 12.2
	145	$y = 8.379 9x - 2.067 6$	14	0.968 6	7.0	5.4 ~ 9.0

表 2 不同暴露时间下鲫鱼各试验组的 LC_{50} Tab. 2 LC_{50} of different experimental groups to various exposure time

试验组	暴露时间 /h	回归方程	尾数	相关系数 R^2	LC_{50} /%	LC_{50} 的 95% 置信区间 /%
第 1 批试验鱼	8	$y = 33.602x - 68.191$	14	0.690 7	150.7	143.3 ~ 158.6
	10	$y = 58.604x - 120.62$	14	0.995 5	139.2	136.9 ~ 141.5
	11	$y = 58.986x - 120.14$	14	0.999 1	137.9	135.3 ~ 140.5
	14	$y = 199.89x - 421.59$	14	0.809 8	136.2	135.0 ~ 137.3
第 2 批试验鱼	9	$y = 73.599x - 153.43$	14	0.941 0	142.1	139.8 ~ 144.4
	10	$y = 73.841x - 153.74$	14	0.995 4	141.2	138.9 ~ 143.5
	12	$y = 56.964x - 117.07$	14	0.897 4	139.0	134.9 ~ 143.2
	15	$y = 89.586x - 186.04$	14	0.955 1	135.7	133.1 ~ 138.3

表 3 TDG 过饱和对鲫鱼鳃组织 CAT 活性的影响 (U/g)

Tab. 3 Effects of TDG supersaturation on CAT activity (U/g) in crucian's gill tissues

TDG 饱和度 /%	0.2 h	2.4 h	4.6 h	6.8 h	9 h
100	331.68 ± 42.30	438.33 ± 55.86	396.65 ± 45.39	388.33 ± 56.95	426.68 ± 33.99
145	421.65 ± 46.32*	531.65 ± 46.96*	601.65 ± 45.99**	491.50 ± 53.88*	490.13 ± 39.47

注: * 表示处理组与对照组差异显著 ($p < 0.05$), ** 表示处理组与对照组差异极显著 ($p < 0.01$)。

表 4 TDG 过饱和对鲫鱼肌肉组织 CAT 活性的影响 (U/g)

Tab. 4 Effects of TDG supersaturation on CAT activity (U/g) in crucian's muscle tissues

TDG 饱和度 /%	0.2 h	2.4 h	4.6 h	6.8 h	9 h
100	41.68 ± 6.41	51.65 ± 3.30	53.33 ± 5.43	51.67 ± 6.36	46.68 ± 5.43
145	48.35 ± 3.30	58.33 ± 3.35*	78.33 ± 6.41**	65.00 ± 6.37*	48.33 ± 6.36

注: * 表示处理组与对照组差异显著 ($p < 0.05$), ** 表示处理组与对照组差异极显著 ($p < 0.01$)。

3 讨 论

鲫鱼长时间暴露于 TDG 过饱和水体中,出现的两种异常反应反映了试验鲫鱼对应激环境的个体差异。而试验鲫鱼因明显的气泡病症状而死亡,是由于 TDG 过饱和水体中过量溶解的气体以小气核形式析出,附着在鱼类体表及鳃丝上,并进入血管形成气体栓塞致使血管、心脏堵塞导致鱼类死亡。形成

的气体栓塞,经由血液循环进入其机体各处,逐渐积累形成气泡并致使其局部组织隆起。由于自然水体的 TDG 饱和度一般达不到试验数值,且过饱和 TDG 耗散较快,对日常渔业养殖影响较小;但对于高坝下游地区而言,高坝泄洪期间,TDG 过饱和问题仍须给予重视。

外源性污染物进入生物体后,会导致大量活性氧自由基的产生。自由基(FR)又称游离基,主要包

括超氧阴离子自由基(O_2^-)、羟基自由基($OH\cdot$)以及过氧化氢(H_2O_2)等,它们会引发脂质过氧化作用,影响蛋白质分子,造成细胞死亡^[10]。鲫鱼体内存在一套完备的抗氧化防御系统,其作用是阻止氧自由基的形成、消除或灭活已经形成的氧自由基、修复或消除被氧化损伤的分子,可分为酶性和非酶性两部分。酶性主要有超氧化物歧化酶(SOD),各种过氧化物酶、过氧化氢酶(CAT)和其他血红素蛋白过氧化物酶。

过氧化氢酶是过氧化物酶体的标志酶,约占过氧化物酶体酶总量的40%,可与谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)等一起,清除超氧化物歧化酶歧化超氧阴离子自由基(O_2^-)产生的过氧化氢,是鲫鱼体内抗氧化防御系统重要的组成部分之一^[10]。过氧化氢酶将过氧化氢催化分解成氧和水,其活性的变化,反映鲫鱼体内抗氧化防御系统的变化,进而间接反映TDG过饱和引起的鲫鱼生理代谢变化。

试验鲫鱼暴露于TDG过饱和水体中,其鳃和肌肉CAT活性呈先升后降的变化趋势,这与低浓度阿特拉津对鲫鱼肝脏、肾脏和肌肉CAT活性影响^[10]以及双酚A对鲤鱼肝脏、肾脏和鳃CAT活性影响^[11]的变化趋势是一致的。CAT活性的升高,这是由于TDG过饱和激活了生物机体内的抗氧化防御系统,在自由基的诱导下,酶活性逐渐升高以清除过量的自由基,保护机体免受氧化伤害。而当暴露到一定时间,酶活性开始下降,可能是由于活性氧的积累超过了CAT的生成,导致生物体内出现多余的氧自由基,使机体内部的CAT表达生成量下降,此时若CAT不能及时清除产生的自由基,机体将遭受活性氧伤害。试验结果显示出了鲫鱼鳃组织CAT活性远高于肌肉组织中CAT活性,说明在TDG过饱和胁迫下,鲫鱼鳃组织CAT活性较肌肉组织敏感。

4 结 论

1) 鲫鱼长时间暴露于TDG过饱和水体中,其机体出现较明显的气泡病症状,主要表现为鱼鳍内出现气泡,机体局部有细微的组织隆起。

2) 第1批试验鲫鱼暴露8、10、11、14 h的半致死浓度LC50分别为150.7%、139.2%、137.9%、136.2%;第2批试验鲫鱼暴露9、10、11、15 h的半致死浓度LC50分别为142.1%、141.2%、139.0%、134.7%。TDG饱和度越大,半致死时间越小。暴露时间越长,半数致死浓度越小。

3) 鲫鱼受TDG饱和度为145%水体胁迫,鳃和

肌肉组织CAT活性呈先升后降的变化趋势,且前者CAT活性对TDG过饱和的敏感性高于后者。

参考文献:

- [1] McGrath K E, Dawley E M, Geist D R. Total dissolved gas effects on fishes of the lower Columbia River [R]. Report Prepared for the U. S. Army Corps of Engineers (Portland District), PNPL-15525, Portland, Oregon 2006.
- [2] Zhou Jianping, Yang Zeyan, Chen Guanfu. Status and challenges of high dam constructions in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2006, 37(12): 1433-1438. [周建平, 杨泽艳, 陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战 [J]. 水利学报 2006, 37(12): 1433-1438.]
- [3] Tan Decai, Ni Zhaohui, Zheng Yonghua, et al. Dissolved gas supersaturation downstream of dam and its effects on fish [J]. Freshwater Fisheries 2006, 36(3): 56-59. [谭德彩, 倪朝辉, 郑永华, 等. 高坝导致的河流气体过饱和及其对鱼类的影响研究 [J]. 淡水渔业 2006, 36(3): 56-59.]
- [4] Huang Xiang, Li Kefeng, Du Jun, et al. Effects of gas supersaturation on lethality and avoidance responses in Juvenile Rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang) [J]. Journal of Zhejiang University: Science B 2010, 11(10): 806-811.
- [5] Liu Xiaoqing, Li Kefeng, Li Jia, et al. Growth rate, catalase and superoxide dismutase activities in rock carp (*Procypris rabaudi* Tchang) exposed to supersaturated total dissolved gas [J]. Journal of Zhejiang University: Science B 2011, 12(11): 909-914.
- [6] Zhang Yuexia. Effects of TDG supersaturation on survival in *Procypris rabaudi* and *Schizothorax prenanti* [D]. Chengdu: Sichuan University 2011. [张月霞. 水体TDG过饱和对岩原鲤和齐口裂腹鱼的影响研究 [D]. 成都: 四川大学 2011.]
- [7] Wang S T, He X J, An R D. Responses of growth and antioxidant metabolism to nickel toxicity in *Luffa cylindrica* seedlings [J]. Journal of Animal & Plant Sciences 2010, 7(2): 810-821.
- [8] 国家标准化管理委员会. GB/T 23195—2008 蜂花粉中过氧化氢酶的测定方法紫外分光光度法 [S]. 2008.
- [9] 周永欣, 章宗涉. 水生生物毒性试验方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1989.
- [10] Chen Jiazhang, Meng Shunlong, Hu Gengdong, et al. Effects of low concentrations of atrazine on catalase activity in *Carassius auratus* [J]. Journal of Agro-Environment Science 2008, 27(3): 1151-1156. [陈家长, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 低浓度阿特拉津对鲫鱼过氧化氢酶(CAT)活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 1151-1156.]
- [11] Zhuang Huisheng, Yang Guang. Study on the acute and subacute toxicities of bisphenol A on the carp [J]. Environmental Chemistry 2005, 24(6): 682-684. [庄惠生, 杨光. 双酚A对鲤鱼急性和亚急性毒性的研究 [J]. 环境化学, 2005, 24(6): 682-684.]

(编辑 张 琼)