

# 张家界大鲵生态繁育池水质

宋英杰<sup>1,2</sup> 罗庆华<sup>1,2\*</sup> 胡 骁<sup>2,3</sup> 王 寒<sup>1,2</sup> 魏梦雅<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>吉首大学林产化工工程湖南省重点实验室, 湖南张家界 427000; <sup>2</sup>吉首大学城乡资源与规划学院大鲵资源保护与综合利用湖南省工程实验室, 湖南张家界 427000; <sup>3</sup>吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首 416000)

**摘 要** 分析大鲵生态繁育池中水质变化的过程, 探讨生态池中影响水质变化的主要因素, 为生态繁育池结构优化提供依据。实地调查张家界市 12 个大鲵生态繁育场, 测量其入水口、池中央与出水口的主要水质指标。结果表明: 除了浊度外, 各样点水质的各项指标都满足大鲵生长的需要, 也满足池塘养殖水排放一级标准; 生态池从入口到池中间到出口, 水的浊度、溶解氧(DO)呈降低趋势, 总磷(TP)、总氮(TN)、化学耗氧量(COD)和硬度(GH)呈增加趋势; 大鲵生态繁育池具有良好的水自净作用, 使浊度下降 31.7%, 由于工程结构合理以及水体有一定流速, TP、TN、COD 和 GH 的变化维持在大鲵对水质要求范围内。生态繁育池结构简单、经济, 但需要提高沉淀池的效率, 以保证水的浊度符合要求。

**关键词** 水质; 生态繁育池; 大鲵; 张家界

**Water quality of ecological breeding pond for Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*) in Zhangjiajie City.** SONG Ying-jie<sup>1,2</sup>, LUO Qing-hua<sup>1,2\*</sup>, HU Xiao<sup>2,3</sup>, WANG Han<sup>1,2</sup>, WEI Meng-ya<sup>2</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Hunan Forest Products and Chemical Industry Engineering, Jishou University, Zhangjiajie 427000, Hunan, China; <sup>2</sup>Hunan Engineering Laboratory for Chinese Giant Salamander's Resource Protection and Comprehensive Utilization, College of Resource and Planning Science, Jishou University, Zhangjiajie 427000, Hunan, China; <sup>3</sup>College of Biological Resources and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China).

**Abstract:** In order to provide a basis for optimizing the structure of ecological breeding ponds for Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*), the change processes of water quality in the ponds were analyzed and the main factors affecting the changes were discussed. Twelve ecological breeding fields in Zhangjiajie City were investigated. The main water quality indexes were measured at the inlet, center and outlet of each pond. The results showed that the water quality indicators met the growth requirement for Chinese giant salamanders and the first standard of breeding water discharge standard from pond except for turbidity. From the inlet to the center, to the outlet of the ecological pond, the water turbidity and dissolved oxygen (DO) showed a decreasing trend while total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), chemical oxygen demand (COD) and total hardness (GH) showed an increasing trend. The good self-purification of water in the ecological breeding ponds made the turbidity fell by 31.7%. Due to the reasonable engineering structure and certain water velocity, TN, TP, COD and GH were kept within the requirements for Chinese giant salamanders. Ecological breeding pools are simple in structure and economic; however, the efficiency of settling pond needs to be further improved to insure water turbidity demand of Chinese giant salamanders.

**Key words:** water quality; ecological breeding pond; Chinese giant salamander (*Andrias davidianus*); Zhangjiajie City.

国家自然科学基金项目(31460160)、国家星火计划项目(2014GA770016)、湖南省自然科学基金项目(13JJB013)、大鲵资源保护与综合利用湖南省工程实验室开放项目(DNGC1604)和吉首大学校级课题(15JDY013)资助。

收稿日期: 2016-11-25 接受日期: 2017-03-09

\* 通讯作者 E-mail: lqh700930@126.com

中国大鲵(*Andrias davidianus*)是世界上最大的两栖动物,起源于中侏罗纪或前白垩纪,被认为是生物进化的“活化石”(Ijspeert *et al.*, 2007)。由于过度捕捞和生境破坏,野生大鲵数量日渐稀少,被列为国家二级重点保护野生动物(Cunningham *et al.*, 2016)。在 1996 年 11 月,为了保护大鲵物种,中国已经建立了 25 个大鲵自然保护区(雒林通等, 2011),其中在湖南张家界建立了国家级大鲵自然保护区。

大鲵生态繁育池是模拟大鲵野外栖息地特点,在大鲵的适生地,人工建造小溪流,并在溪流两侧建造洞穴,在洞穴上方种植木本与草本植物,构建大鲵的适宜栖息环境,以使大鲵在其中能够自然产卵繁殖。关于大鲵生态繁育技术已有部分报道,王开锋等(2007)探讨了人工模拟生态建设大鲵繁育池的方法,罗庆华等(2015)研究了全球变化背景下中国大鲵生态繁育工程的结构和功能。其中少数报道涉及到水质特征,张红星等(2003)论述了养殖水源可通过基岩和植被来确定;并提出了水的 pH 值 6.3~7.5,溶解氧(DO)(5~6) mg · L<sup>-1</sup>(张红星等, 2012);艾为明等(2005)报道了大鲵生态养殖池,水流速保持在(0.1~0.3) m · s<sup>-1</sup>为宜。水质是影响大鲵栖息生长最重要的生境因子,关于生态池中水质的变化过程,以及与生态池结构的关系未见相关报道。本文对大鲵生态繁育池水质调查与分析,探明池中水质从进口到中间以及到出口的变化过程与特点,分析影响其变化的因素,研究结果为大鲵生态繁育池水质优化提供依据。

表 1 生态繁育工程调查点  
Table 1 Investigated sites of ecological breeding engineering

编号	调查点	公司名称	经纬度	海拔(m)	所属行政区
1	农科站	张家界金鲵生物工程股份公司	29°27'N 110°23'E	462	桑植县麦地坪乡
2	冉家坪	桑植县国宝大鲵养殖合作社	29°26'N 110°22'E	435	桑植县麦地坪乡
3	马安会	桑植县淋溪河大鲵养殖合作社	29°16'N 110°58'E	286	桑植县淋溪河乡
4	救护中心	湖南省大鲵救护中心	29°20'N 110°32'E	415	武陵源区军地坪办事处
5	大泉	张家界大泉大鲵生物科技公司	29°25'N 110°36'E	253	慈利县三官寺镇
6	枫木	张家界点鲵成金生态开发公司	29°16'N 110°58'E	239	慈利县枫木乡
7	竹园	张家界竹园大鲵生物科技公司	29°28'N 110°22'E	480	桑植县空壳树乡
8	陈家湾	张家界澧源生物科技公司	29°39'N 110°72'E	487	桑植县五道水镇
9	熊家湾	桑植县青山大鲵养殖场	29°67'N 109°93'E	763	桑植县五道水镇
10	车湾	桑植县澧源大鲵养殖合作社	29°71'N 109°93'E	1161	桑植县五道水镇
11	泉坪	桑植县涌泉大鲵养殖合作社	29°71'N 109°92'E	769	桑植县五道水镇
12	谢永坪	永定区双溪桥大鲵养殖场	29°00'N 110°35'E	337	永定区双溪桥乡

1 材料与方法

1.1 调查点选择

张家界市位于湖南省西北部(28°52'N—29°48'N, 109°40'E—111°20'E),属山地季风温润气候,年均气温 16℃,境内溶洞、深潭、阴河、泉水众多,为大鲵的生长繁殖提供了得天独厚的生态环境。张家界市境内建有大鲵生态繁育场共 35 个,其中能够成功繁殖的有 20 家。从中随机抽取 12 家作为调查点。生态繁育池人工溪中,水深为(0.23±0.04) m,池底质以卵石与砂石为宜,两岸坡度多为 90°,植被类型为树加草,植被覆盖率为(82.5±15.0)%,人为干扰弱。人工洞穴的面积为(1.31±0.19) m<sup>2</sup>,洞口宽为(0.27±0.06) m,洞口高为(0.28±0.04) m,洞穴内水深为(0.24±0.09) m,底质组成以卵石和砂子复合为主。各调查点结构差异小。

于 2015 年 8—10 月对生态池水质进行调查。利用全球卫星定位仪(GPS)测定各调查点的位置与海拔(表 1)。

1.2 调查方法

在生态繁育池中采集水样,每个调查点取样点 3 个,分别为生态繁育池进水口、池中和出水口。按照水库渔业资源调查规范 SL167-96(中华人民共和国水利部,1998)。测定指标包括:(1)水温(WT):采用水银温度计现场测量,精度 0.1℃;(2)浊度:目视比浊法;(3) pH 值:便携式 pH 计测量;(4)溶解氧:碘量法;(5)化学耗氧量(COD):重铬酸钾法;(6)总硬度(GH):EDTA 滴定法;(7)总氮(TN):过

表 2 入口、中间与出口间水质指标 *t* 检验  
Table 2 *T*-test of water quality index between entrance, middle and exit

	<i>P</i> 值							
	WT	浊度	pH	DO	COD	TN	TP	GH
入-中	0.027 *	0.082	0.241	0.082	0.004 **	0.001 **	0.000 **	0.082
中-出	0.001 **	0.194	0.343	0.320	0.416	0.032 *	0.021 *	0.787
入-出	0.000 **	0.027 *	0.246	0.024 *	0.002 **	0.001 **	0.000 **	0.016 *

\* 差异性显著, \*\* 差异性极显著。

硫酸钾-紫外分光光度法;(8)总磷(TP):氯化亚锡还原光度法;(9)硫化物:碘量法。此外,测定人工溪流中水流速度。

1.3 数据处理

采用 SPSS 软件对水质各项指标的从进口、池中到出口进行配对样本 *t* 检验,并对各指标进行相关性分析。对流速和各指标变化(进口值-出口值/进口值)之间进行相关性分析。

2 结果分析

2.1 水温与浊度

由图 1 可知,各样点从进水口到出水口的水温介于 15~22 ℃。样点均值在入口为 17.93±2.20 ℃、中间水为 18.08±2.08 ℃,出口水为 18.24±2.06 ℃。*t* 检验(表 2),发现入口水温与池中间水温差异显著,入口水温和池中水温与出口水差异极显著。从入口到池中央,再到出口,水温呈上升趋势。

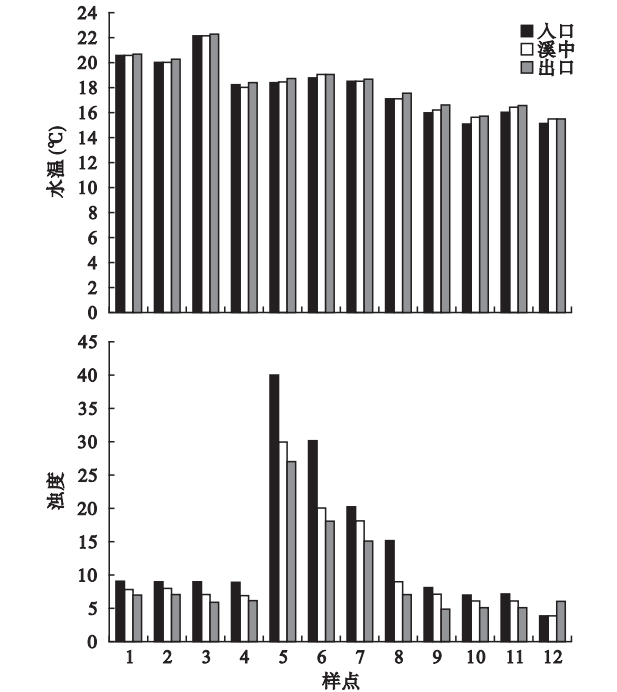


图 1 样点水的水温与浊度  
Fig.1 WT and turbidity of water at sampling points

除了样点 5、6、7 外,其他样点中间与出口水浊度在 10 NTU 以下,样点 5 与 6 进口的浊度较大,分别为 40 和 30 NTU,其中间和出口的浊度为 30、20 和 27、18 NTU。*t* 检验发现(表 2),入口与出口水的浊度差异性显著,其他不显著。从入口到出口,浊度呈下降趋势,对浊度的去除率为 31.7%。

相关性分析结果显示(表 3),浊度与 GH、TN 和 TP 相关性显著,浊度主要体现水中含有的泥沙、细小有机物和其他不溶颗粒,浊度增加会导致 GH、TN 与 TP 上升(Joao *et al.*, 2014),可见,清澈的水质非常重要。

2.2 pH 值与溶解氧

由图 2 可知,pH 值介于 6.60~7.70,呈中性略偏酸性到略偏碱性,生态繁育池入口水的 pH 均值分别为 7.28±0.34,池中间水为 7.27±0.32,池出口水为 7.21±0.31,从入口水到出口水 pH 更趋于中性。*t* 检验发现(表 2),各样点入口、中间与出口之间水的 pH 值差异性不显著。

各样点入口水的 DO 均值 9.32±1.13 mg·L<sup>-1</sup>,池中间水的 DO 均值为 9.02±1.31 mg·L<sup>-1</sup>,出口水的 DO 均值分别为 8.77±1.20 mg·L<sup>-1</sup>。*t* 检验表明(表 2),入口与出口水的 DO 差异性显著,其他不显著。可见,从入口到出口,DO 呈下降趋势。

2.3 总氮与总磷

由图 3 可知,生态繁育池入口、池中与出口水的 TN 含量均值分别为 0.019±0.015、0.025±0.015 与 0.028±0.015 mg·L<sup>-1</sup>。*t* 检验表明(表 2),入口与池中水、出口水的 TN 差异性极显著,池中水与出口水的 TN 差异性显著。可见,各样点从进口到出口,TN 呈上升趋势。

表 3 水质各指标相关性系数  
Table 3 Correlation coefficients of water indexes

指标	相关系数			
	TN	TP	COD	GH
浊度	0.026 *	0.035 *	0.901	0.046 *
水温	0.732	0.793	0.027 *	0.122

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

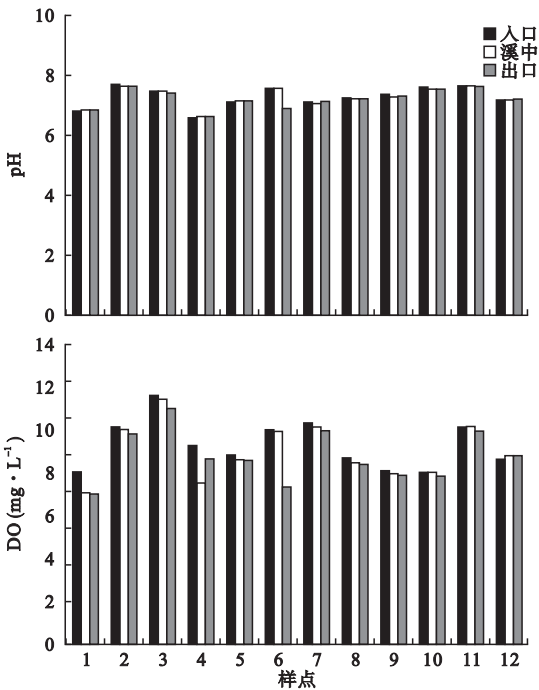


图2 样点水的 pH 与 DO  
Fig.2 pH and DO of water at sampling points

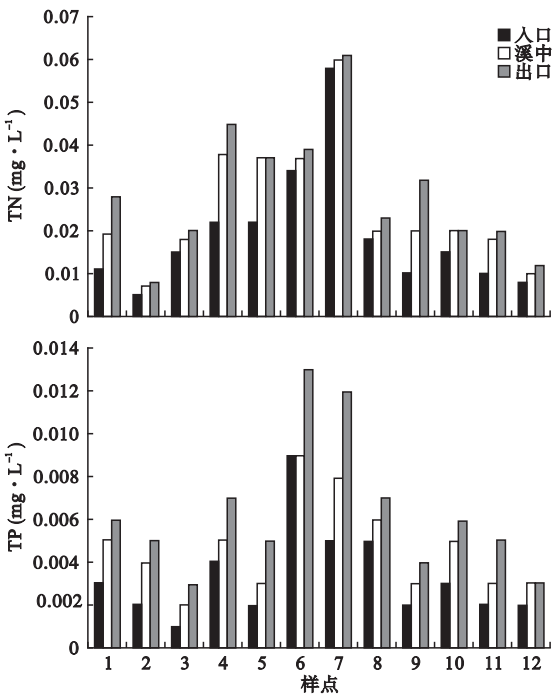


图3 样点水的 TP 与 TN  
Fig.3 TP and TN of water at sampling points

生态繁育池入口、池中水与出口水的 TP 含量均值分别为  $0.003 \pm 0.002$ 、 $0.005 \pm 0.002$  与  $0.006 \pm 0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。t 检验表明(表 2),各样点入口水与池中水和出口水的 TP 差异性极显著,池中水与出口水的 TP 差异性显著。可见,各样点从入口到

出口,TP 呈上升趋势。

2.4 化学耗氧量与总硬度

由图 4 可知,入口、池中与出口水的 COD 含量均值分别为  $8.20 \pm 0.96$ 、 $8.51 \pm 0.98$  与  $8.38 \pm 1.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。t 检验表明(表 2),各样点入口与池中水、出口水的 COD 差异性极显著。可见,各样点从入口到出口,COD 呈上升趋势。

各样点入口、池中与出口水的 GH 均值分别为  $132.00 \pm 17.78$ 、 $137.00 \pm 21.83$  与  $137.33 \pm 19.93 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。从进口水、池中水到出口水的 GH 呈略上升趋势,t 检验表明(表 2),入口水与出口水的 GH 之间差异性显著。可见,各样点从入口到出口,GH 呈上升趋势。

2.5 硫化物与流速

所有样点水中硫化物测定均为 0。各样点水流速度见图 5,介于  $0.01 \sim 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均为  $0.042 \pm 0.027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,流速和各指标变化相关性分析结果表明(表 4),流速仅与 WT、DO 变化呈负显著相关。

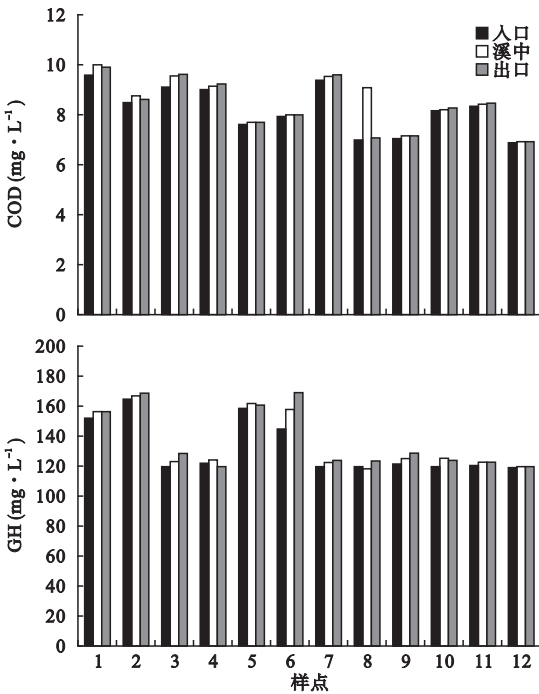


图4 样点水的 COD 与 GH  
Fig.4 COD and GH of water at sampling points

表 4 水流速度与水质各指标变化相关性系数  
Table 4 Correlation coefficients between water velocity and water indexes

指标	WT	DO
水流速度	-0.012 *	-0.030 *

\*:在 0.05 水平(双侧)上显著相关。



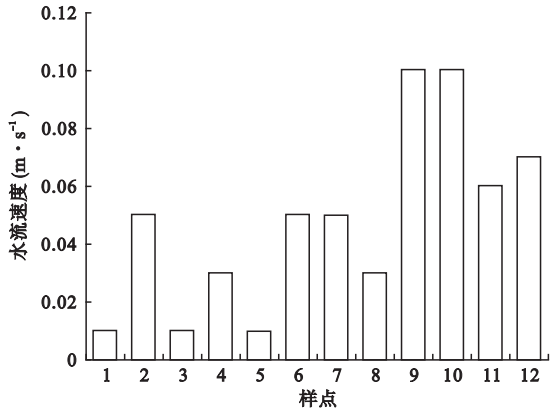


图5 样点水流速  
Fig.5 Velocity of water at sampling points

### 3 讨论与结论

#### 3.1 水温与浊度

所有样点大鲵生态繁育池水源均为山泉水,全年水温变化保持稳定,各样点水温从入口水、池中水到出口水呈上升趋势。在高温季节,水源水温度低于气温,水流经生态池的过程中水温逐渐上升,在低温季节相反。但是由于生态繁育池人工岛屿上植被可以防止烈日暴晒水温剧烈升高,另外,一定的水流速度维持水体交换量,保持水温稳定,水温的变化与水流速度负相关,整个过程中水温变化幅度小于 $0.317\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,能满足大鲵温度变化在 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内的要求(费梁等,2005)。

各样点从入口到出口,浊度呈下降趋势,下降率31.7%。由于大鲵生态池砂石或卵石的底质,以及人工溪流中的植物,对水中的悬浮物具有较好的沉淀与固定作用。另外,人工岛屿上的植物具有固沙固土作用,避免雨天土壤大量流入人工溪流,符合生态工程设计原则(Scott *et al.*, 2001; David *et al.*, 2002)。部分调查点的沉淀池小且结构简单,仅靠生态池的自净作用不能有效控制雨季水质浑浊,是张家界大鲵生态繁殖池存在的主要问题。大鲵喜欢清澈水(罗庆华,2009),按照地表水Ⅱ类水质要求,水浊度不应超过20,所以必须建造效果良好的沉淀池,有效控制水的浊度,否则大鲵容易相互撕咬,不适宜大鲵生活。

#### 3.2 pH与DO

张家界大鲵生态养殖场水源水酸碱性适应,各样点水的pH值介于6.60~7.70。pH在繁育池水的入口、池中与出口变化小,可见,大鲵日常活动对pH

影响小。此外,生态繁育池中水的缓冲系统使pH维持在相对稳定状态。

在生态繁育池中DO呈降低趋势,水中微生物对有机物的分解消耗一部分DO(Nas *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2016),生态繁育池中有有机物主要来源于大鲵排泄物和饵料残体,另外,大鲵生活会消耗水中的DO。但是由于水源水DO高,同时,夏天光照好,水温高,生态繁育溪流中的浮游植物光合作用能产生氧(Abowei *et al.*, 2010),此外,池水有一定流速 $0.042\pm0.027\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水体交换量较大,使DO保持较高含量,各样点出口的DO最低为 $7.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,高于陕西大鲵生态池中DO( $5\sim6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )(张红星等,2012),满足大鲵喜高溶解氧的习性(费梁等,2005)。

#### 3.3 TN与TP

在生态繁育池中TN与TP均上升,主要是由于水中微生物对大鲵排泄物、饵料的残体降解而致(Yilmaz *et al.*, 2014; Ji *et al.*, 2016),由于生态繁育池为流水,有足够的水交换,大鲵的密度适中,及生态繁育池内水体的自净作用,使分别低于 $0.38$ 与 $0.11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,始终在大鲵饲养池水中TN、TP要求范围(刘鉴毅等,1992),同样也符合地表水环境质量的Ⅰ类指标(GB 3838—2002)。

#### 3.4 COD与GH

COD由 $(8.20\pm0.96)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $(8.51\pm0.98)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,可能是由微生物对有机物的分解和复氧反应造成的有机物的氧化引起(Omari *et al.*, 2013),检出最大值为 $9.95\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,符合地表水环境质量标准(GB 3838—2002)的Ⅰ类指标。可见,生态繁育池耗氧因子较少,此外,溪水的流动可缓冲COD的升高,导致COD的升高较小。GH在生态繁育池中呈现上升趋势,由 $132.00\pm17.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $137.33\pm19.93\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,主要是水源山泉水GH普遍较高(李菁等,2007),另外,水流对池底的冲刷以及有机酸对底质的腐蚀导致GH- $\text{Ca}^{2+}$ 增加,但符合大鲵对硬度的要求(罗庆华,2009)。

#### 3.5 流速

各样点水流速为 $0.01\sim0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,平均 $0.042\pm0.027\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,分别小于文献报道的江西与陕西生态繁育池水流速 $0.1\sim0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (艾为明等,2005)与 $0.2\sim0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (杨长明等,2015),可见张家界大鲵生态繁育池较其更节约水资源。适宜的水流速度可以维持各项水质指标相对稳定,使各指标

维持在大鲵适应的状态,特别是与 WT 与 DO 变化呈负相关,水体的交换是影响这 2 个因子的主要因素。水流速度对浊度、COD、TN、TP 与 GH 水质指标的稳定是有贡献的,但与它们的变化没有显著相关,可能水体的自净作用以及其他因素较流速对这些指标影响更大。

### 3.6 小结

张家界大鲵生态繁育池优点是使 pH 稳定在中性,浊度下降 31.7%。由于该生态池水源水质较好,池中水成流水状态,水体交换较大,大鲵养殖密度小,生态池结构合理,没有其他污染因子,各样点水的 WT、pH、DO、COD、TN、TP 与 GH 从进口到出口均满足大鲵生长对水质的要求,出水符合淡水池塘养殖水排放要求(SC/T 9101—2007)。张家界大鲵生态繁育池结构简单,经济易建,能满足大鲵养殖需要,其不足是没有循环利用水。建议修建沉淀效率高的沉淀池,防治雨后进水的浊度过大,此外,对水进行循环利用,做到节水减排。

### 参考文献

艾为明,敖鑫如. 2005. 大鲵的生物学特性及人工模拟生态繁殖. 水利渔业, **25**(6): 46–47.

雒林通,万红玲,兰小平,等. 2011. 中国大鲵资源现状及保护遗传学研究进展. 广东农业科学, (17): 100–103.

刘鉴毅,肖汉兵,林锡芝. 1992. 大鲵饲养池水质状况分析. 淡水渔业, (2): 16–18.

罗庆华. 2009. 张家界大鲵生境特征. 应用生态学报, **20**(7): 1723–1730.

罗庆华,谢坚,李捷,等. 2015. 全球背景下中国大鲵生态繁育工程的结构与功能分析. 江苏农业科学, **42**(10): 292–295.

费梁,叶昌媛,江建平,等. 2005. 中国两栖动物检索及图解. 成都: 四川科学技术出版社.

李菁,黄刚. 2007. 湖南怀化市中坡山泉水水质情况调查. 现代预防医学, **34**(6): 1187–1188.

王开锋,张红星,方树森. 2007. 秦岭山区大鲵繁殖生态环境研究及人工模拟生态建设. 河南水产, (1): 37–38.

杨长明,杜贵贤,樊萍,等. 2015. 新型大鲵仿生态繁殖池建造结构及使用方法. 现代农业科技, (1): 282.

张红星,王开锋,权清转,等. 2003. 秦岭山区大鲵生态繁育工程技术研究. 淡水渔业, **33**(5): 25–27.

张红星,王开锋,刘婷婷,等. 2012. 秦岭山区大鲵生境及繁

育关键技术研究// 水库养鱼技术问题与发展总集: 45–57.

Abowei JFN. 2010. Salinity, dissolved oxygen, pH and surface water temperature conditions in Nkoro River, Niger Delta, Nigeria. *Advance Journal of Food Science and Technology*, **2**: 36–40.

Cunningham AA, Turvey ST, Zhou F, et al. 2016. Development of the Chinese giant salamander *Andrias davidianus* farming industry in Shaanxi Province, China: Conservation threats and opportunities. *Oryx*, **50**: 265–273.

David RT, Harish B, Ronald R, et al. 2002. Constructed wetlands as recirculation filters in large-scale shrimp aquaculture. *Aquacultural Engineering*, **26**: 81–109.

Ijspeert AJ, Crespi A, Ryczko D, et al. 2007. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *Science*, **315**: 1416–1420.

Joao VMA, Robson B, Maria PPR, et al. 2014. Water quality of Aroeira River for use in irrigation of vegetable crops in the northern region of the state of Espirito Santo, Brazil. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **10**: 797–805.

Ji B, Yang K, Chen W, et al. 2016. Impacts of dissolved oxygen and initial sludge concentrations on aerobic stabilization of sewage sludge. *Polish Journal of Environmental Studies*, **25**: 153–157.

Nas SS, Bayram A, Nas E, et al. 2008. Effects of some water quality parameters on the dissolved oxygen balance of streams. *Polish Journal of Environmental Studies*, **17**: 531–538.

Omari A, Houri Z, Weshah R. 2013. Impact of the As Samra waste water treatment plant upgrade on the water quality (COD, electrical conductivity, TP, TN) of the Zarqa River. *Water Science & Technology*, **67**: 1455–1464.

Scott DB, Susan MB, James LF. 2001. Design principles for ecological engineering. *Ecological Engineering*, **18**: 201–210.

Yilmaz E, Koc C. 2014. Research on water quality of Lake Bafa in Turkey. *Environmental Engineering and Management Journal*, **13**: 153–162.

Zhang P, Pang Y, Shi CC, et al. 2016. Analysis and numerical simulation of natural and human caused low dissolved oxygen in the Minjiang River Estuary. *Water Science & Technology*, **73**: 2475–2485.

**作者简介** 宋英杰,1991年生,男,硕士研究生,主要从事大鲵生态工程研究。E-mail: yjsong0517@163.com  
**责任编辑** 李凤芹