

冯国富, 刘亚蕊, 陈 明, 等. 基于 DCP 算法增强暗纹东方鲀胚胎图像[J]. 江苏农业学报, 2021, 37( 6 ): 1493-1500.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.018

## 基于 DCP 算法增强暗纹东方鲀胚胎图像

冯国富<sup>1,2</sup>, 刘亚蕊<sup>1,2</sup>, 陈 明<sup>1,2</sup>, 翁 正<sup>1,2</sup>, 王耀辉<sup>3</sup>

(1. 上海海洋大学信息学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学, 农业农村部渔业信息重点实验室, 上海 201306; 3. 南通龙洋水产有限公司, 江苏 南通 226634)

**摘要:** 为了能够精准地识别出暗纹东方鲀胚胎发育的各个时期, 提高人工繁殖和杂交育种的成活率, 采用暗通道先验(DCP)算法和它的 2 个反演以及推导, 对胚胎图像进行增强。推导出 4 种透射率, 再结合像素值的缩小和放大最终生成 8 种增强效果。其中图像增亮与图像增暗结合的 A+X 组合算法效果最佳, 增强后的图像细节信息更加丰富, 各个时期的特征更加清晰。选用多目标检测算法 YOLOv5 网络对图像中的胚胎进行提取和分类。结果表明, 增强后图像分类结果的准确率比原始图像提高 4.5%, 损失函数降低 0.16%。

**关键词:** 暗纹东方鲀; 胚胎检测; 暗通道先验; 图像增强; YOLOv5 网络

**中图分类号:** S961.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1493-08

## Image enhancement of *Takifugu obscurus* embryos based on DCP algorithm

FENG Guo-fu<sup>1,2</sup>, LIU Ya-rui<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, WENG Zheng<sup>1,2</sup>, WANG Yao-hui<sup>3</sup>

(1. School of Information, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Ocean University, Key Laboratory of Fishery Information, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 3. Nantong Longyang Aquatic Products Co., Ltd., Nantong 226634, China)

**Abstract:** In order to accurately identify each stage of embryonic development of *Takifugu obscurus* and improve the survival rate of artificial reproduction and cross breeding, dark channel prior (DCP) algorithm and its two inversions and derivation were used to enhance embryo image. Among them, four kinds of transmittances were derived in this study, and eight kinds of enhancement effects were finally generated by combining the reduction and amplification of pixel values. Through comparative analysis, A+X combination algorithm combining image brightening and image darkening had the best effect. The enhanced image details were more abundant, and the features of each period were clearer. The YOLOv5 network, a multi-target detection algorithm, was selected to extract and classify embryos in the images. The results showed that the classification accuracy of enhanced image was 4.5% higher than that of original image, and the loss function was 0.16% lower.

**Key words:** *Takifugu obscurus*; embryos detection; dark channel prior; image enhancement; YOLOv5 network

暗纹东方鲀与鲟鱼、刀鱼并称“长江三鲜”, 享誉古今中外。近几年, 暗纹东方鲀仅依靠自然繁殖已不能满足市场的需求, 对它进行人工繁殖逐渐成

为研究热点<sup>[1]</sup>。在人工繁殖和杂交育种过程中对胚胎发育的各个时期进行检测与分类显得非常重要<sup>[2-3]</sup>。通过观察胚胎的形态特征识别发育时期, 选择适宜的温度、盐度等环境培育胚胎, 来提高胚胎的孵化率<sup>[4-5]</sup>。然而, 人工肉眼识别胚胎发育的各个时期效率较低且准确性不高。因此, 我们使用基于图像处理的人工智能技术来解决这一难题, 当前, 国内外将人工智能技术应用在胚胎检测、分类方面的研

收稿日期: 2021-03-13

基金项目: 江苏省现代农业产业关键技术创新项目[ CX(20)2028 ]

作者简介: 冯国富(1971-), 男, 河南新乡人, 博士, 副教授, 研究方向为嵌入式技术研究。

通讯作者: 陈 明, (E-mail) mchen@shou.edu.cn

究几乎是空白。

胚胎图像通过数字显微镜获取,由于胚胎带有水珠等原因,导致图像存在光照不均、细节不清晰、色彩对比度不明显等问题,因此需要对获取的胚胎图像进行特征增强。常见的图像增强算法有基于 Retinex 理论的带色彩恢复的多尺度视网膜增强算法(MSRCR)<sup>[6]</sup>和基于直方图均衡化改进的自适应局部区域伸展直方图均衡化(LRS-CLAHE)<sup>[7]</sup>,此类方法是在提高图像对比度的基础上突出细节信息,忽略图像的质量因素。而图像去雾处理方法能很好地解决这个问题,它是从散射介质成像退化模型出发,根据图像估计模型中的相关参数,反演获得无雾条件下的清晰图像。传统的大气散射物理模型为<sup>[8-9]</sup>:

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)] \quad (1)$$

其中, $x$  是图像的像素点位置, $I$  是真实观察的图像, $J$  是曝光良好的自然图像, $t$  是介质透射率, $A$  是光照度。上述模型中包含了 RGB 3 个通道。本式是已知  $I$  求解  $J$ , 则是一个无穷解的问题,需要先验信息或附加约束求解。He 等<sup>[10]</sup>统计了 5 000 多幅图像的特征,证明了暗通道先验理论(Dark channel prior, DCP)的普遍性。即图像场景中大部分像素的 RGB 3 个通道中存在一个暗通道,其亮度值趋于 0, 据此由公式(1)估计出透射率图,从而恢复出无雾场景图像。由于 DCP 算法导致图像细节丢失,因此,He 等<sup>[11]</sup>又提出引导滤波(Guided filter)<sup>[12]</sup>来细化透射率,恢复细节并提高了算法效率。该算法简单有效且适应性较强,因而得到广泛应用。

为了恢复图像的真实色彩,解决图像曝光、光晕伪影和边缘等细节信息丢失的问题,本研究基于 DCP 算法和它的 2 种反演以及推导对图像增亮和暗化,使光照达到平衡。并对比 MSRCR、LRS-CLAHE、DCP 算法,通过信息熵、平均梯度评价指标进行对比分析。再利用多目标检测算法 YOLOv5 对胚胎图像进行分类检测和识别,通过精确度、召回率和损失函数等参数对图像增强效果进行分析讨论。

## 1 DCP 算法与反演

### 1.1 DCP 算法

DCP 算法<sup>[13-14]</sup>通过对 RGB 图像进行先验假设来解决公式(1)的去雾任务。公式为:

$$J_{\text{dark}}(x) = \min_{c \in (r, g, b)} \min_{y \in \Omega(x)} J^c(y) \quad (2)$$

式中, $J$  是图像  $J$  的一个颜色通道, $\Omega(x)$  是以  $x$  为中心的一个局部区域。使用暗通道的概念观察结果表明,如果  $J$  是室外清晰的无雾图像,除了天空区域, $J$  的暗通道强度很低并且趋向于 0, 即:

$$J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (3)$$

已知光照度  $A$  为:

$$\vec{A} = (r, g, b) \quad (4)$$

这一观察即被称为暗通道先验。对公式(1)两边进行 2 次最小值运算,得:

$$\min_c \min_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{I^c(y)}{A^c} = \tilde{t}(x) \min_c \min_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{J^c(y)}{A^c} + 1 - \tilde{t}(x) \quad (5)$$

所以根据暗通道先验理论, $J$  的暗通道强度接近于 0, 可以估计出透射率为:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_{c \in (r, g, b)} \min_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{I^c(y)}{A^c} \quad (6)$$

引入引导滤波来细化透射率<sup>[11]</sup>, 为:

$$t(x) = \text{guidedFilter}[I, \tilde{t}(x)] \quad (7)$$

在大气环境下会含有一些颗粒,彻底去雾图像则会失真。因此,需要保留一些雾增加图像的真实感,引入了因子  $\epsilon$ 。 $t(x)$  过小也会引起失真,再结合公式(1)和公式(7)得出去雾清晰图像  $J$  为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), \epsilon]} + A \Rightarrow J = f_{\text{DCP}}(I, A) \quad (8)$$

式中, $I(x) - A$  控制清晰图像  $J$  效果的方向和幅度。透射率本身是一个灰度图像矩阵,但它可以是一个常数或三通道彩色图像。 $t(x)$  取值范围为  $[0, 1]$ , 规定信号中不失真的比例。当  $t(x) = 1$  时,不存在失真;当  $t(x)$  趋于 0 时,则失真增大。

### 1.2 DCP 的 2 种反演

DCP 算法支持不同的反演,本研究介绍 2 种反演曝光校正的亮通道先验(Bright channel prior, BCP)<sup>[15]</sup>和光照校正的反暗通道先验(Inverted dark channel prior, IDCP)<sup>[16]</sup>。BCP 反演是将 DCP 算法中的 2 次最小值换成 2 次最大值运算,其余与 DCP 算法保持不变。即:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \max_{c \in (r, g, b)} \max_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{I^c(y)}{A^c} \quad (9)$$

同理得出去雾清晰图像  $J$  为:

$$J = f_{\text{BCP}}(I, A) \quad (10)$$

而 IDCP 反演则是将 DCP 算法中输入图像  $I$  进

行反转,中心思想是对  $I$  进行反转应用于公式(8),再对最后结果进行反演,最后去雾清晰图像  $J$  为:

$$J = 1 - f_{\text{DCP}}(1 - I, A) \quad (11)$$

式中,由于图像是白平衡的,所以假设光照度  $A$  为 1,即:

$$\vec{A} = (1, 1, 1) \quad (12)$$

基于 DCP 算法以及它的 2 种先验,本研究方法是 将图像的明暗扩展为像素的颜色放大,使 DCP 算 法适用于更广泛的图像增强。

## 2 研究方法

### 2.1 DCP 算法的推论

通过 DCP 算法以及它的 2 个反演,推导出一个 新的先验即 DCP 算法推论(Corollaries of dark chan- nel prior, CDCP)<sup>[17]</sup>,它对公式(1)左右两边进行 2 次最大值运算,再反转输入图像  $I$ ,对最终结果进行 反演得到不失真增强图像  $J$  为:

$$J = 1 - f_{\text{BCP}}(1 - I, A) \quad (13)$$

同理,假设  $A$  恒等于 1。

由恒等式(14)和(15)得出表 1 中的 4 种透射 率。

$$\begin{aligned} \text{solveMin}_t(I, A) &= 1 - \min_c \min_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{Ic(y)}{Ac} \equiv \\ &\max_c \max_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{1 - Ic(y)}{Ac} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{solveMax}_t(I, A) &= 1 - \max_c \max_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{Ic(y)}{Ac} \equiv \\ &\min_c \min_{y \in \Omega_{I(x)}} \frac{1 - Ic(y)}{Ac} \end{aligned} \quad (15)$$

结合公式(6)、(9),得出 DCP 算法的透射率  $t$  的表示方式为  $\text{solveMin}_t(I, A)$ ,BCP 算法的表示方 式为  $\text{solveMax}_t(I, A)$ ,IDCP 算法的表示方式为  $\text{solveMin}_t(1 - I, A)$ 。由此,反演出一个新颖的 CDCP 算法为  $\text{solveMax}_t(1 - I, A)$ 。

表 1 中总结了 DCP 算法与它的 2 个反演以及 推导之间的关系,也证明了 IDCP 先验和 BCP 先验 是反向等价的,并都利用了通道间的最大像素值运 算;同样,DCP 和 CDCP 也是反向等价的,并且都利 用了通道间的最小像素值运算。总之,这 4 种透射 率区分了弱放大和强放大,以及亮像素和暗像素的 放大。其中,2 次最小值运算是透射率的弱放大,2 次最大值运算是透射率的强放大,使增强的图像在

色彩上达到平衡,细节边缘信息更加突出。

表 1 由 DCP 算法与其 2 个反演以及推导得出的 4 种透射率

Table 1 Four transmittances obtained by dark channel prior (DCP) algorithm and its two inversions and derivation

透射率运算	放大暗区域	放大亮区域
弱放大	IDCP $\text{solveMin}_t(1 - I, A = 1)$ $1 - \text{solveMax}_t(I, A = 1)$	DCP $\text{solveMin}_t(I, A = 1)$ $1 - \text{solveMax}_t(1 - I, A = 1)$
强放大	CDCP $1 - \text{solveMin}_t(I, A = 1)$ $\text{solveMax}_t(1 - I, A = 1)$	BCP $1 - \text{solveMin}_t(1 - I, A = 1)$ $\text{solveMax}_t(I, A = 1)$

IDCP:反暗通道先验算法;DCP:暗通道先验算法;CDCP:DCP 推论 算法;BCP:亮通道先验算法。

### 2.2 像素值缩放方法

像素值缩放方法是对图像进行像素上的亮化和 暗化,增强图像的细节,克服伪影现象。由公式(8) 推导出:

$$J = \frac{I - A}{t} + A = 1 - \left[ \frac{(1 - I) - (1 - A)}{t} + (1 - A) \right] \quad (16)$$

则得出恢复图像  $J$  的 2 种等效公式如下,表明 光照度( $A$ )在反演下是对称的。

$$J = \text{solve}_J(I, t, A) \equiv 1 - \text{solve}_J(1 - I, t, 1 - A) \quad (17)$$

根据公式(11)与公式(12),IDCP 算法求解  $J$  为:

$$J = 1 - \left( \frac{1 - I - A}{t} + A \right) = \frac{I - 0}{t} + 0 \quad (18)$$

因此,由于白平衡即使假设了光照度( $A$ ) = 1, IDCP 算法在实际上是  $A = 0$ 。这些都证明了 4 种先 验的可逆性。接下来,对表 1 中 4 种先验算法分别 进行增亮和增暗。

对于整幅图像的增亮和增暗是对像素放大方向 的选择问题,光照度( $A$ )的选择将导致图像中所有 像素的增亮和增暗。由公式(8)求透射率( $t$ )为:

$$t = \frac{I - A}{J - A} \in [0, 1] \quad (19)$$

因此,得到 2 个等式关系  $J \leq I \leq A$  和  $J \geq I \geq A$ 。 当  $A = 1$  时,恢复后的图像  $J$  比失真图像  $I$  暗;当  $A = 0$  时,恢复后的图像  $J$  比失真图像  $I$  亮。进一步,当  $1 \geq A \geq \max_x Ic(x)$  时,图像  $J$  增暗;当  $0 \leq A \leq \min_x Ic(x)$  时,图像  $J$  增亮。根据表 1 中 4 种先验算法的透 射率来增亮( $A = 0$ )或增暗( $A = 1$ ),从而产生 8 种可 视化效果,如图 1 所示。

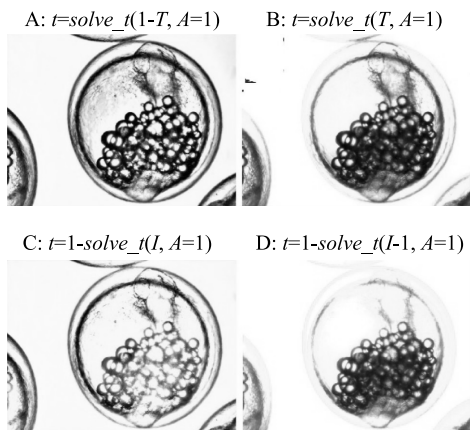
由公式(18)求解透射率( $t$ )时,光照度  $A = 1$ 。 但是,实际值为  $A = 0$  或  $A = 1$ ,对应增亮或增暗。对

于图 1(左)是整个图像增亮即恢复图像  $J = \frac{I-0}{t} - 0$ ;

对于图 1(右)是整个图像增暗即恢复图像  $J = \frac{I-1}{t} - 1$ 。

进一步,对 8 种方法[ A:  $t = \text{solve}_t(1-T, A=1)$ ;

图像增亮  $A=0$



B:  $t = \text{solve}_t(T, A=1)$ ; C:  $t = 1 - \text{solve}_t(I, A=1)$ ;

D:  $t = 1 - \text{solve}_t(I-1, A=1)$ ; W:  $t = \text{solve}_t(1-T, A=1)$ ;

X:  $t = \text{solve}_t(T, A=1)$ ; Y:  $t = 1 - \text{solve}_t(I, A=1)$ ;

Z:  $t = 1 - \text{solve}_t(I-1, A=1)$ ] 进行不同的叠加组

合得到不同的可视化效果。

图像增暗  $A=1$

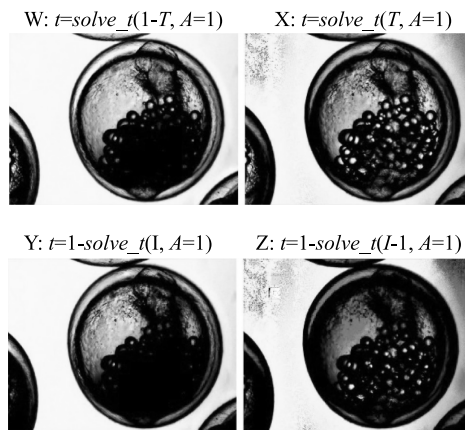


图 1 图像增亮(左)和图像增暗(右)的 8 种效果图

Fig.1 Eight effect diagrams of image brightening (left) and image darkening (right)

### 3 结果与分析

试验设备中处理器 CPU 为 i5-10400F,主频为 2.90 GHz,设备内存为 16 GB,显卡为 GeForce RTX 2060。胚胎图像数据集采样于江苏中洋集团股份有限公司现代化大型特种水产养殖基地,使用数字显微镜采集暗纹东方鲀的胚胎图像,利用翻转变换的方法将图像数据集扩充至 3 030 份。

针对暗纹东方鲀胚胎发育的不同时期,选择发育特征明显的死亡期、原肠中期、神经胚期和肌节出现期 4 个时期进行胚胎识别和分类<sup>[18-20]</sup>。如图 2 所示,对于死亡期,囊胚层、胚芽和肌节等全部消失,胚胎死亡且卵成混乱状;对于原肠中期,隆起的囊胚层向四周扩张而逐渐变低,胚层开始向卵黄部分扩展,边缘细胞开始下包,囊胚腔清晰可见;对于神经胚期,原肠下包和内卷继续进行,胚环明显缩小,背侧神经物质增厚,凹陷形成神经沟;对于肌节出现期,胚体前端稍膨大和隆起,胚体头部两侧隐约可见眼泡<sup>[21-22]</sup>。

#### 3.1 暗纹东方鲀胚胎图像增强结果对比与分析

利用上文提到的 8 种方法组合出较经典的 4 种增亮增暗混合方法,即 A+B+X+Z、A+B+C+X、A+B+C+W+X 和 A+X。通过这 4 种方法对胚胎的死亡

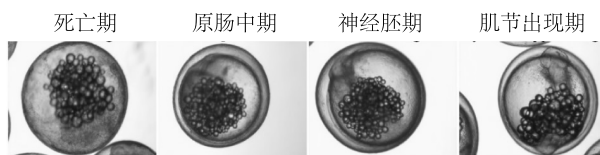


图 2 暗纹东方鲀胚胎发育的 4 个时期

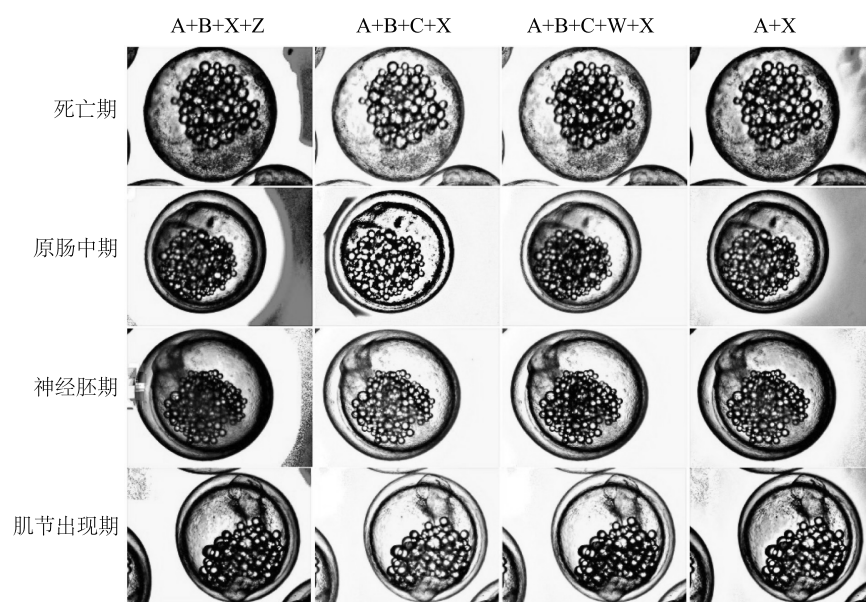
Fig.2 Four stages of embryonic development of *Takifugu obsoletus*

期、原肠中期、神经胚期和肌节出现期进行图像增强,对亮区域像素增亮和对暗区域像素增暗提高图像效果,使每个时期的特征信息都非常清晰,如图 3 所示。

将 4 个时期增强后的图像与图 2 中原始胚胎图像进行对比分析,图像增强后的特征更加明显,胚胎特征的细节信息更加清晰。从图 3 可以看出,这 4 种混合方法中 A+X 组合的效果更佳,此方法对 4 个时期的图像增强后均能很好地呈现出各个时期的特征。因此,本研究采用 A+X 组合方法作为暗纹东方鲀胚胎图像的增强算法。

为了研究本文算法的有效性,分别利用 MSRCR 算法、LRS-CLAHE 算法、文献[11]中的 DCP 算法和本算法对 4 个时期的暗纹东方鲀胚胎图像进行增强。从图 4 可以看出,MSRCR 算法对高亮度区域过增强,造成胚胎图像偏色严重;LRS-CLAHE 算法虽





A+B+X+Z、A+B+C+X、A+B+C+W+X、A+X 见图 1。

图 3 暗纹东方鲀胚胎各个时期图像增强效果

Fig.3 Image enhancement effect at various stages of embryos of *Takifugu obscurus*

然能很好地增强低亮度区域,但增加了噪声,导致图像中的特征信息模糊;DCP 算法具有良好的色调保持性,能较好地保持图像的自然性,但是对于细节特征的增强效果并不明显;相比而言,本算法不仅提升了低亮度区域的亮度,还有效抑制了高亮度区域的过增强,从而很好地呈现出胚胎图像中的细节信息。可以看出,死亡期的混乱效果明显,原肠中期的囊胚层与卵黄分界清晰,神经胚期的神经沟与肌节出现期的肌节和眼泡的细节信息突出,可以为后续胚胎分类提供有力支撑。

本研究使用 2 种性能指标来评估图像,即信息熵和平均梯度<sup>[23-24]</sup>,每个性能指标取图 4 中每个时期 2 个图像的平均值。由图 5 可见,本算法的信息熵和平均梯度均最大,它们的均值分别比原图提高了 10.01% 和 1.36 倍。信息熵越大,图像的特征细节越丰富;平均梯度越大,图像的纹理特征越清晰。综上所述,本算法对胚胎图像的增强效果更具有优越性。

### 3.2 暗纹东方鲀胚胎图像检测与分类

本研究运用 YOLOv5 网络<sup>[25]</sup>对暗纹东方鲀胚胎原始图像和增强后的图像进行分别检测和分类,网络中迭代训练 1 000 次,基于准确率、损失函数、召回率和均值平均准确率 (mAP) 4 个参数来比较图像增强的效果。结果如图 6 所示,增强后图像的准确

率比原始图像提高 4.5%,损失函数降低 0.16%,召回率和 mAP 没有改变。从图 5 中可知,增强后图像的分类准确率在迭代 800 次左右达到最大值 95.2%,且后续趋于平缓;原始图像准确率最大值达到 90.7%,且抖动较大。增强后图像损失函数比原始图像更接近于 0。

选择迭代 820 次的网络权重作为 YOLOv5 网络检测的模型参数,对暗纹东方鲀胚胎进行检测,分类效果如图 7 所示。在训练中,对胚胎的 4 个时期进行检测,把死亡期、原肠中期、神经胚期和肌节出现期标签为 00、01、02 和 03。每个时期随机选择 3 个效果图进行对比分析。通过 YOLOv5 网络对暗纹东方鲀胚胎原图与增强后图像进行检测对比,可以得出结论,图 7 中(a)、(b)、(c)、(d) 4 个时期增强后的图像检测分类识别准确性均高于原图。

## 4 结论

本研究将图像处理技术应用于暗纹东方鲀胚胎发育各个时期的检测与分类,采用多目标检测 YOLOv5 算法进行分类与识别。采用 DCP 算法以及它的先验推导出的一系列图像增强算法,对暗纹东方鲀胚胎图像进行增强,增强后图像的信息熵均值提高了 10.01%,平均梯度均值提高了 1.36 倍,增强后的胚胎图像细节信息更丰富且特征更加明显清

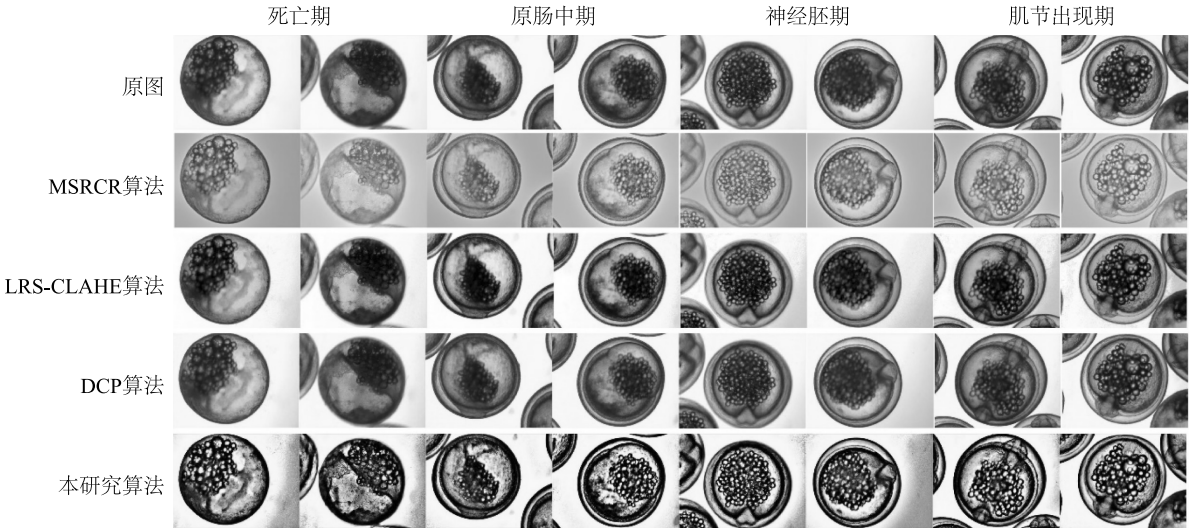


图 4 不同胚胎时期不同算法对暗纹东方鲀胚胎图像的增强结果  
Fig.4 Image enhancement results of *Takifugu obscurus* embryos based on different methods at different embryonic periods

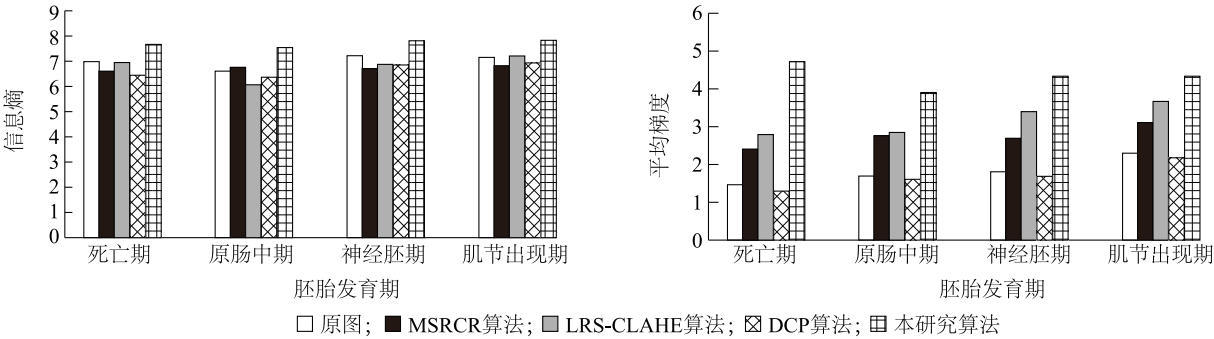


图 5 4 种算法的图像增强性能  
Fig.5 Image enhancement performance of four algorithms

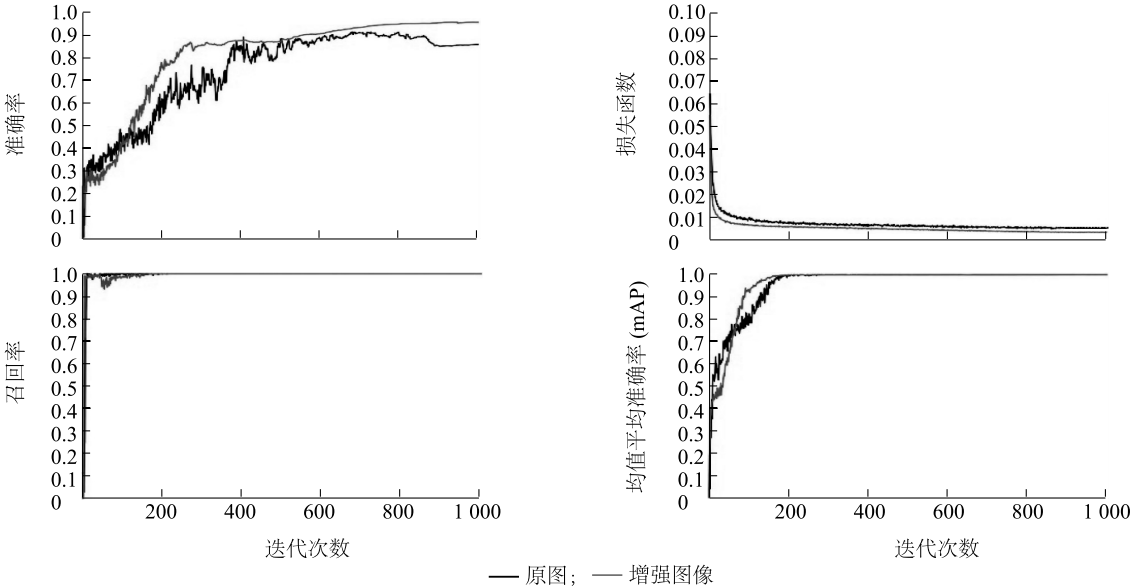


图 6 原图与增强后图像的 4 种参数对比  
Fig.6 Comparison of four parameters between original image and enhanced image

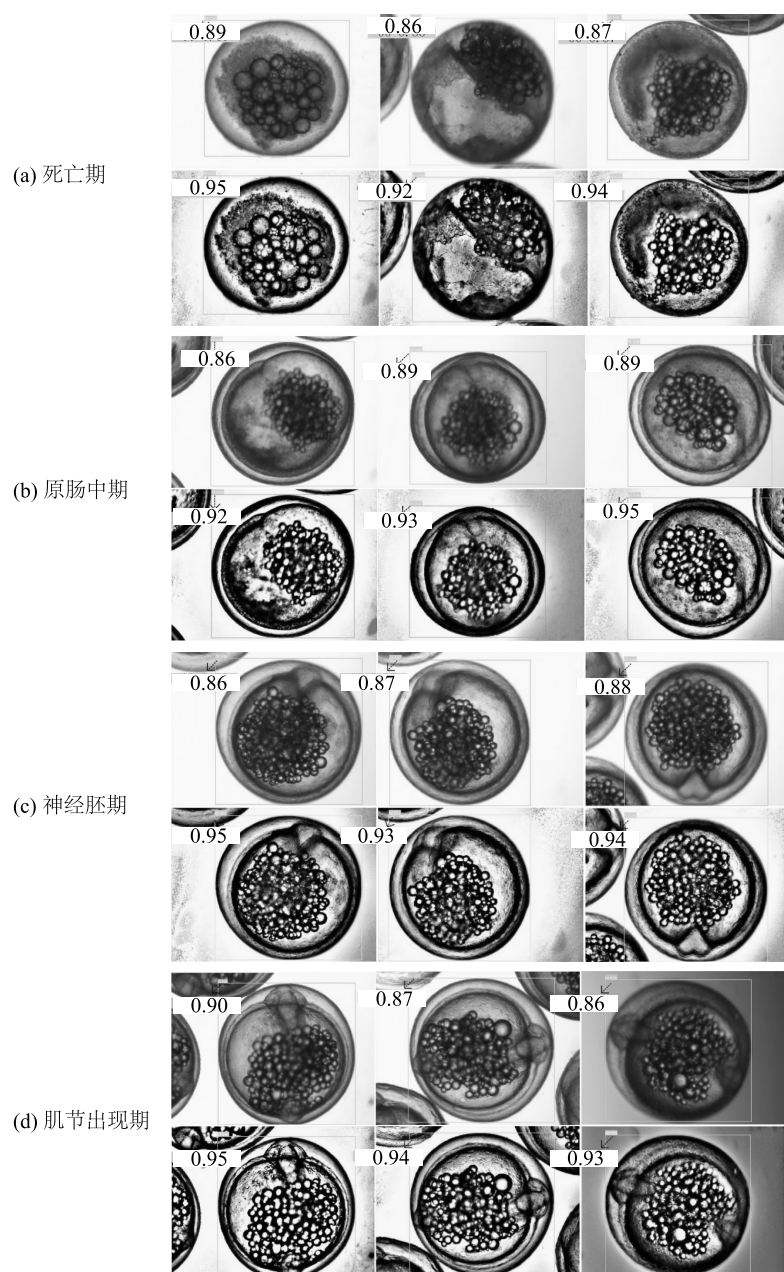


图7 原始图像与增强后图像在 YOLOv5 网络训练后 4 个时期的分类识别准确性对比

Fig.7 Comparison of classification and recognition accuracy between original image and enhanced image in four periods after YOLOv5 network training

晰。在 YOLOv5 网络上进行训练,增强后的图像比原图准确率提高 4.5%,效果更佳。因此,本研究把 DCP 等一系列图像增强算法运用于暗纹东方鲀胚胎图像上,且取得了一定的效果。对暗纹东方鲀胚胎进行准确检测与分类,不仅给人工繁殖、杂交育种带来了方便,也对在不同环境下胚胎生长速度的研究提供了必要的参考材料。

#### 参考文献:

- [1] 吴剑峰,华元渝. 家化暗纹东方鲀全人工繁殖技术[J]. 水产养殖, 2002(5): 7-9.
- [2] 李子奇,成美玲,吴玉萍,等. 鞍带石斑鱼(♀)×云纹石斑鱼(♂)杂交后代早期发育及正反交后代生长特性[J]. 水产学报, 2020, 44(3): 436-446.
- [3] 崔文耀,周丽青,杨继辉,等. 四带小鲷胚胎发育及系统进化



- 分析[J]. 水产学报, 2020, 44(8): 1286-1295.
- [4] 谢刚, 陈焜慈, 胡隐昌, 等. 倒刺鲃胚胎发育与水温 and 盐度的关系[J]. 大连水产学院学报, 2003, 18(2): 95-98.
- [5] 杨州, 华洁, 陈晰. 暗纹东方鲀胚胎发育历期与温度的关系[J]. 淡水渔业, 2004(2): 6-8.
- [6] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 6(7): 965-976.
- [7] SRINIVASAN S, BALRAM N. Adaptive contrast enhancement using local region stretching[C]//SATYENDRA K, IIT K. Proceedings of the 9th Asian symposium on information display. New Delhi, India: ASID, 2006: 152-155.
- [8] 赵馨宇, 黄福珍. 基于双通道先验和光照图引导滤波的图像增强[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 53-62.
- [9] 徐浩, 谭一博, 刘博文, 等. 基于超像素和暗通道先验的图像去雾复原方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(10): 118-124.
- [10] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 33(12): 2341-2353.
- [11] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] 廖娟, 陈民慧, 汪鹄, 等. 基于双重 Gamma 校正的秧苗图像增强算法[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(6): 1411-1418.
- [13] LEE S, YUN S, NAM J H, et al. A review on dark channel prior based image dehazing algorithms[J]. Eurasip Journal on Image & Video Processing, 2016, 2016(1): 1-23.
- [14] 刘玲. 基于暗通道先验的图像去雾改进算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [15] GALDRAN A, ALVAREZ-GILA A, BRIA A, et al. On the duality between retinex and image dehazing[C]//IEEE. 2018 IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2018: 8212-8221.
- [16] SAVELLI B, BRIA A, GALDRAN A, et al. Illumination Correction by Dehazing for Retinal Vessel Segmentation[C]//IEEE. 2017 IEEE 30th international symposium on computer-based medical systems (CBMS). Greece: IEEE, 2017: 219-224.
- [17] GAUDIO A, SMALAGIC A, AURÉLIO C. Enhancement of retinal fundus images via pixel color amplification[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2020, 12132: 299-312.
- [18] 胡亚丽, 华元渝. 暗纹东方鲀胚胎发育的观察[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 1995, 18(4): 139-144.
- [19] 刘俊果, 宋炜, 蒋科技, 等. 棘头梅童鱼胚胎发育和仔鱼形态观察[J]. 海洋渔业, 2018, 40(6): 691-702.
- [20] 易祖盛, 陈湘舜, 王春, 等. 倒刺鲃胚胎发育的研究[J]. 中国水产科学, 2004(1): 65-69.
- [21] 侯雪宁. 暗纹东方鲀胚胎发育相关 miRNA 表达差异研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [22] 周立斌, 叶卫. 长臀鲩胚胎发育的研究[J]. 水产科学, 2007(1): 31-34.
- [23] 周治, 黄若兰, 刘文慧, 等. 基于暗通道和色彩校正的水下图像增强方法[J]. 大众标准化, 2020(23): 168-169.
- [24] 王红茹, 张玲, 王佳, 等. 基于改进的同态滤波和 Retinex 的水下图像增强的算法研究[J]. 电光与控制, 2021, 28(5): 32-35.
- [25] KUZNETSOVA A, MALEVA T, SOLOVIEV V. Detecting apples in orchards using YOLOv3 and YOLOv5 in general and close-up images[C]//HAN M, QIN S T, ZHANG N A. International symposium on neural networks. Cham: Springer, 2020: 233-243.

(责任编辑: 张震林)