基于手机拍照图像的对虾鲜度分级技术研究

徐紫嫣[1#], 刘婧婧[2#], 丁　慧[1], 徐仰仓[2*]

(1. 珠海科技学院阿里云大数据应用学院, 珠海　519090; 2. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津　300457)

摘　要: 目的　研究基于手机拍照图像的对虾鲜度等级分级技术。**方法**　将加冰猝死的南美白对虾贮藏于室温环境以获得不同鲜度的对虾。测定每一鲜度对虾的感官分值和挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量; 同时用手机摄像头采集每一鲜度对虾的图像, 用 ImageJ 软件分析对虾图像的灰度值, 最后建立对虾鲜度与图像灰度值之间的回归模型。**结果**　随着对虾新鲜度的降低, 感官分值降低, TVB-N 含量增高。参照海捕虾的分级标准, 依据 TVB-N 含量将淡水虾分成了 4 个鲜度级别。对虾头胸甲处的颜色总密度与感官分值及 TVB-N 的相关系数均在 0.90 以上, 因此, 以感官分值和 TVB-N 为自变量, 颜色总密度为因变量建立了二元回归模型。依据该模型, 淡水南美白对虾 4 个鲜度等级的颜色总密度分别为: 一级>70; 61≤二级<70; 51≤三级<61; 四级<51。**结论**　依据 TVB-N 含量把冷冻淡水南美白对虾分成了 4 个鲜度级别, 相应地建立了通过手机拍照图像判定 4 个鲜度级别的标准, 为快速检测对虾的鲜度级别提供了参考。

关键词: 南美白对虾; 手机拍照图像; 新鲜度; 分级; 模型

Study on grading technology of shrimp freshness based on mobile phone photo images

XU Zi-Yan[1#], LIU Jing-Jing[2#], DING Hui[1], XU Yang-Cang[2*]

(1. *Alibaba Cloud Big Data Application College*, *Zhuhai College of Science and Technology*, *Zhuhai* 519090, *China*;
2. *College of Marine and Environmental Sciences*, *Tianjin University of Science and Technology*, *Tianjin* 300457, *China*)

ABSTRACT: Objective　To study the grading technology of shrimp freshness based on mobile phone photo images. M**ethod**　*Penaeus vannamei* that died suddenly on ice were stored at room temperature to obtain shrimp of different freshness. The sensory score and total volatile basic nitrogen (TVB-N) content of each freshness shrimp were measured; at the same time, images of each freshness shrimp were collect by using a mobile phone camera, the grayscale value of the shrimp image was analyzed by ImageJ software, and finally regression model between the shrimp freshness and the grayscale value of the image was established. **Result**　It was found that as the freshness of shrimp decreased the sensory score decreased and the TVB-N content increased. According to the classification standard for marine shrimp, the freshwater shrimp were divided into 4 freshness levels based on TVB-N content. The correlation coefficient between the total color density at the head and chest armor and the sensory score or TVB-N was above 0.90. Therefore, a binary regression model was set up with the sensory score and TVB-N as independent

基金项目: 天津市科技兴海项目(KJXH2012-14)

Fund: Supported by the Tianjin Development Marine Science and Technology Project (KJXH2012-14)

#徐紫嫣、刘婧婧为共同第一作者

#XU Zi-Yan and LIU Jing-Jing are Co-first Authors

***通信作者:** 徐仰仓, 教授, 主要研究方向为水产品保鲜贮藏。E-mail: xuyc@tust.edu.cn

***Corresponding author:** XU Yang-Cang, Professor, Tianjin University of Science and Technology, No.29 13th Avenue, Economic and Technological Development Zone, Tianjin 300457, China. E-mail: xuyc@tust.edu.cn

variables and the total color density as dependent variable. According to the regression model, the total color density of 4 freshness levels of frozen *Penaeus vannamei* was: First level≥70; 61≤level 2<70; 51≤level 3<61 and level 4<51. **Conclusion** According to the TVB-N content, frozen freshwater *Penaeus vannamei* has been divided into 4 freshness levels. And the standard of mobile phone photo image determining corresponding freshness levels have been established, which provide a reference for rapid detection of shrimp freshness levels.

KEY WORDS: *Penaeus vannamei*; mobile phone photo images; freshness; grading; model

0 引 言

南美白对虾(*Penaeus vannamei*)肉质鲜美, 富含蛋白、矿物质和不饱和脂肪酸, 备受消费者青睐[1−2], 因此, 世界各地均在扩大养殖面积[3−5], 致使对虾价格下跌。为了提高价格, 各地采取了保鲜贮藏、错峰上市的措施。南美白对虾含水量高, 死后新鲜度迅速下降[6−7]。关于对虾的新鲜度等级, 仅有浙江省对海捕虾的鲜度级别进行了规定(DB 33/451—2003《海捕虾质量要求》), 目前还没有标准规定淡水虾的鲜度级别。关于对虾新鲜度的检测, 主要有实验室测定法和感官评价法(GB 2733—2015《食品安全国家标准 鲜、冻动物性水产品》、DB 33/451—2003), 前者操作繁杂且需要特殊的仪器, 后者受主观因素的影响使准确度较低, 因此, 目前很难准确地实时监测南美白对虾的新鲜度。无损检测是利用物质的声、光、磁和电等特性, 在不损害或不影响被检测对象使用性能的前提下, 检测被检对象特性参数的一种技术。因该技术是非破坏性检测, 且样品无需前处理, 检测速度快, 受到各领域的广泛关注。目前, 已有人研究了血橙[8]、甜瓜[9]、水果[10]、冷鲜猪肉[11]、牛肉[12]及鸡蛋[13]的无损检测技术。在水产品领域, GUO 等[14]利用高光谱成像仪研究了对虾的新鲜度。高光谱成像仪是基于光谱的图像采集及分析仪器, 它将成像技术与光谱技术相结合, 探测样品的二维几何空间及一维光谱信息, 能够对样品进行快速准确的无损检测, 然而, 该仪器价格昂贵, 只有检测部门或大型企业才有财力购买。因此, 虽然高光谱成像仪能实现对虾新鲜度的实时检测, 但仍难以普及推广。

手机是最普遍的一种照相工具, 能够随时采集被测物的图像。徐炜桢等[15]利用手机拍照图像, 结合 ImageJ 软件检测了东北大米和湖南大米的颗粒长度、宽度、面积和周长, 研究成果有望得到应用。黄晓辉等[16]通过手机拍照图像检测了井水、酒店预制菜、麻辣鱼仔熟食中的细菌菌落数, 结果表明手机拍照图像检测与人工检测无显著差异。ImageJ 是由美国国立卫生研究院开发的一款软件, 其功能强大, 可免费下载, 已经在生物学的多个领域得到了应用。本研究拟通过手机采集不同鲜度的对虾图像, 后者经 ImageJ 软件分析后, 建立对虾图像灰度值与国家标准鲜度指标的回归模型, 再利用回归模型建立基于南美白对虾体表色泽的鲜度分级标准, 实现南美白对虾鲜度级别的快速实时检测, 为水产品鲜度等级的无损检测提供方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活淡水南美白对虾(*Penaeus vannamei*)购买于天津市北塘海鲜市场, 单只平均质量(15±5) g, 共 100 只。鲜虾装于聚乙烯袋运回实验室清水冲洗后加冰猝死, 分装后放置于室温(20~26℃)贮藏。

无水乙醇(分析纯, 天津市赢达稀贵化学试剂厂); 高氯酸(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Kjeltec 8400 全自动凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 公司); iPhone Xs Max 苹果手机(美国 Apple 公司); AB104-N 电子天平[精度 0.1 mg, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]。

1.3 实验方法

1.3.1 感官鉴定

参照食品感官鉴别手册[17], 略有改动。感官分值为气味和状态分值的总和。取适量对虾置于白瓷盘中, 自然光下, 由鉴定小组(5 人)按表 1 标准评价。

表 1 南美白对虾感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standard for *Penaeus vannamei*

分数	气味	状态
31~40	新鲜对虾的固有气味, 无异味	肌肉纹理清晰, 有弹性, 肉与壳连接紧密
21~30	轻微的对虾自身气味, 无异味	肌肉略有弹性, 肉与壳连接较紧密
11~20	出现轻微腥臭味	肌肉弹性较差, 肉与壳连接较松弛, 虾头松弛
0~10	氨味、尿素味较重, 腥臭味、腐败味浓烈	肌肉松弛, 肉与壳连接松弛, 虾头轻微脱落, 肉质变软

1.3.2 挥发性盐基氮含量测定

将对虾在冰浴中研碎, 取虾肉 10.0 g, 加入 0.6 mol/L 的高氯酸溶液少许, 混匀, 再加上述溶液至 40 mL, 混匀, 静置 30 min。上清液用 Kjeltec 8400 凯氏定氮仪测定挥发

性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)含量。

1.3.3　图像采集

参考陈继光[18]的方法, 将对虾放于内装 5 W 环形 LED 灯条的密闭箱中, 在箱子顶部开口处用 iPhone Xs Max 后置摄像头以 4032×3024 像素分辨率拍摄对虾, 手机位于对虾正上方 21 cm 处, 拍摄焦距 35 mm, 关闭闪光灯。采集的图像大小为 4.39~4.56 MB。

1.3.4　图像增强

图像增强采用直方图均衡法, 打开图像, 选择 Process-Enhance Contrast 命令, 设 Saturated pixels 为 0.5%。

1.3.5　目标区域选择

在 Analyze 窗口的 Tools 命令中, 选择 ROI Manager 管理器中的 Specify 命令, 目标区域用椭圆形划定, 其宽 47, 高 27。在对虾眼睛与尾节之间均匀地设置 6 个图像采集点位(头胸甲处设两个位点, 即位点 2 和 3)(图 1), 每个采集位点的面积为 997 像素。

图 1　南美白对虾图像采集位点

Fig.1　Image collection sites of *Penaeus vannamei*

1.3.6　图像数字化

图像目标区域的灰度级强度用灰度直方图表示, 在 ImageJ 主菜单选择“Analyze-Histogram 命令, 即可读出“Intensity (unweighted), Red, Green, Blue”的灰度值。

1.4　数据处理

采用 Office Excel 2021 处理数据, SPSS 24.0 进行显著性差异和相关性分析, ImageJ 进行图像灰度值分析。ImageJ 软件下载于官网(https://imagej.net/ij/index.html), 版本为: ij153-win-java8。

2　结果与分析

2.1　南美白对虾的感官评价

感官评价是表征水产品鲜度不可或缺的指标。南美白对虾在室温环境下感官分值随贮藏时间的延长逐渐降低(图 2), 说明对虾的新鲜度越来越低。

根据以上感官分值的变化, 结合浙江省海捕虾新鲜度的感官分级, 规定了淡水虾感官评价的分级标准(表 2): 一级虾的感官总分在 50 以上, 气味至少没有异味, 肌肉与壳连接比较紧密; 二级虾的感官总分在 35~50 之间, 此阶段的虾, 可以闻到轻微腥臭味, 肌肉弹性较差, 虾头连接松弛; 三级虾的感官总分在20~35之间, 此阶段的虾, 腥臭味较浓, 肌肉松弛, 轻微碰撞虾头即可脱落; 四级虾的感官总分低于 20, 对虾的氨味、尿素味均浓烈, 肌肉松弛, 虾肉变软。

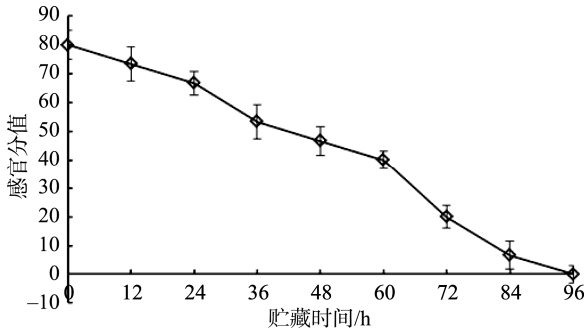


图 2　室温下对虾感官分值的变化(n=5)

Fig.2　Variation in sensory scores of shrimp at room temperature (n=5)

表 2　淡水虾鲜度等级划分标准

Table 2　Freshness grade classification standard for freshwater shrimp

品级	感官分值	TVB-N/(mg/100 g)
一级虾	≥50	≤10
二级虾	≥35 且<50	>10 且≤13.3
三级虾	≥20 且<35	>13.3 且≤20
四级虾	<20	>20

2.2　南美白对虾的 TVB-N 检测

TVB-N 是氨、二甲胺、三甲胺以及其他胺类化合物的总称, 如图 3 所示, 随着贮藏时间的延长, 南美白对虾的 TVB-N 含量逐渐增高。

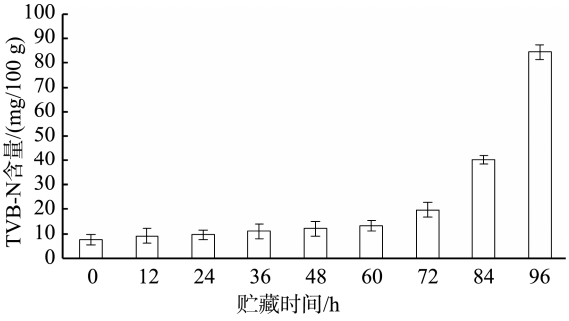


图 3　室温下对虾 TVB-N 含量的变化(n=3)

Fig.3　Variation of TVB-N content in shrimp at room temperature (n=3)

GB 2733—2015 规定: 海水虾 TVB-N 的值应低于 30 mg/100 g 样品, 淡水虾的值应低于 20 mg/100 g 样品。

浙江省根据 TVB-N 的含量把海捕虾分为三级: TVB-N≤15 mg/100 g 为一级鲜度的虾; 在 15~20 mg/100 g 之间的为二级鲜度的虾; 在 20~30 mg/100 g 之间的为三级鲜度的虾(DB 33/451—2003)。据此, 可推算出淡水虾的分级标准(表 2)。由表 2 可知, 各级虾的 TVB-N 覆盖范围并不相同, 如二级虾的下限与上限之间相距 3.3 mg/100 g, 而三级虾却相距 6.7 mg/100 g。

2.3 南美白对虾不同部位的色变差异

色变是对虾死后体表变化的重要现象, 然而, 即使同只对虾, 其头部、躯干及尾部的色变并不同步。为了确定色变最敏感的部位, 本研究在对虾眼睛与尾节之间设置了 7 个图像采集点位。

南美白对虾死后黑变、红变同时发生[19], 因此, 本研究分析了每个采样点的 R(红)、G(绿)及 B(蓝)分量的灰度值, 以及采样区域的颜色总密度(Intensity)。RGB 是一种颜色模式, 每种颜色的深度均有 256 个灰度级别, 3 种颜色叠加可形成 1670 万种颜色[20]。如图 4 所示, 每个采集点 R 分量的灰度值最大, 说明颜色比例中红色的份额最多。B 分量的灰度值最小, G 分量的灰度值与选取点颜色总密度相差不大。位点 2 与位点 3 的各指标比较接近, 且是各位点中灰度值最小的位点。灰度值是评价颜色深浅的单位, 范围从 0 到 255, 白色为 255, 黑色为 0。灰度值越大, 颜色越接近白色, 反之亦然。位点 2 和位点 3 的灰度值最小, 说明同等条件下该处的黑色程度高于其他各位点。因此, 南美白对虾的头胸甲处是黑变最容易发生的部位。

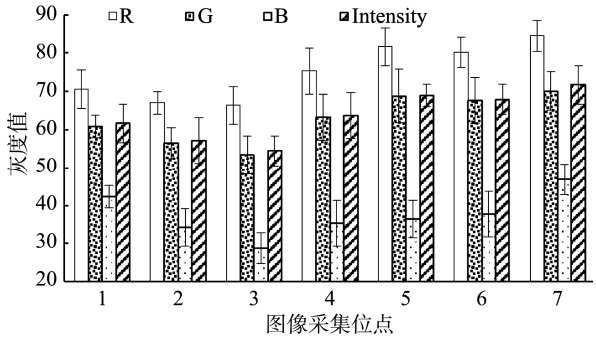


图 4 南美白对虾不同部位的色变差异(n=3)

Fig.4 Color difference in different parts of *Penaeus vannamei* (n=3)

2.4 鲜度指标间的相关性分析

分析 0~96 h 贮藏期间 TVB-N(或感官分值)与各采样位点的 R 分量、G 分量、B 分量、Intensity 间的相关性时, 发现 TVB-N 与各颜色指标均成负相关, 其中与 Intensity 的平均相关系数的绝对值最大, 平均为 0.86。与其他位点相比, 位点 2 和位点 3 的 R、G、B 及 Intensity 与 TVB-N 的相关系数的绝对值较大, 均在 0.85 及以上, 说明南美白对虾头胸甲两侧的颜色深度与其新鲜度有很好的相关性(表 3)。与 TVB-N 相反, 感官分值与各颜色指标呈正相关, 同样 Intensity 及位点 2、3 与感官分值的相关系数较大。

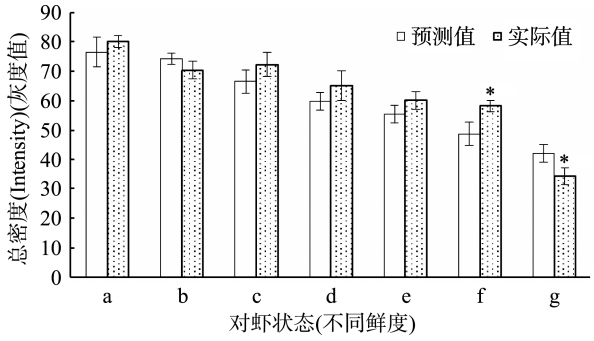
表 3 TVB-N 与各颜色指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between TVB-N and various color indicators

分析位点	R	G	B	Intensity
1	–0.83	–0.82	–0.80	–0.85
2	–0.86	–0.85	–0.86	–0.91
3	–0.87	–0.85	–0.86	–0.90
4	–0.84	–0.83	–0.84	–0.85
5	–0.78	–0.80	–0.81	–0.82
6	–0.80	–0.81	–0.82	–0.80
7	–0.80	–0.81	–0.83	–0.88
平均	–0.83	–0.82	–0.83	–0.86

2.5 南美白对虾色变模型的建立及检验

如前所述, 南美白对虾头胸甲处的 Intensity 与 TVB-N 和感官分值的相关系数均在 0.90 及以上, 为此, 本研究重新采集了该处的图像(采集面积 2511 像素), 并测定了 TVB-N 和感官分值。根据测定结果建立了二元回归方程: Y=47.65+0.51X_1–0.36X_2, 其中 X_1 代表感官分值, X_2 代表 TVB-N 含量, Y 代表颜色总密度(Intensity)。验证回归方程的显著性时发现 Adjusted R Square 为 0.98。Significance F 为 4.74383E-06, Intercept、X Variable 1 及 X Variable 2 的 P 分别为 5.45607E-05、0.000339941 和 0.00378489, 均小于 0.05, 说明回归方程合理。为了进一步验证回归方程的准确性, 本研究另外测定了 35 只不同新鲜度南美白对虾的 TVB-N 含量、感官分值及 Intensity, 并借助回归方程预测了它们的 TVB-N 含量和感官分值。结果发现在国家标准规定的可食用鲜度范围内(TVB-N、感官分值均在三级鲜度之内), 预测值与实测值之间没有统计意义上的差异(图 5a~e), 而对虾不新鲜时(根据 TVB-N 和感官分值判定为四级虾), 预测值与实测值之间有明显的差异(图 5f、g)。说明在对虾较新鲜时(三级鲜度之内)回归模型的准确度较高。



注: *表示组间(预测值与实际值之间)具有显著性差异(P<0.05); a~g 代表不同鲜度的对虾。

图 5 南美白对虾回归方程的准确性检验(n=3)

Fig.5 Accuracy test of regression equation for *Penaeus vannamei* (n=3)

2.6　基于颜色的南美白对虾分级标准

如前所述, 依据感官分值和 TVB-N 含量, 本研究将淡水南美白对虾的鲜度级别分为 4 级, 通过回归方程 Y=47.65+0.51X_1–0.36X_2 计算相应鲜度级别头胸甲的颜色总密度(Intensity), 得出不同鲜度南美白对虾的颜色等级划分标准(表 4)。根据表 4, 只要采集南美白对虾头胸甲处的图像, 再通过图像处理, 获得该处图像的颜色总密度(Intensity), 即可得知该虾的鲜度级别。比如, 测得头胸甲图像的颜色总密度(Intensity)介于 61 和 70 之间, 说明该虾处于二级鲜度。

表 4　基于图像颜色总密度的对虾鲜度等级划分标准
Table 4　Classification criteria for shrimp freshness level based on the total density of image color

品级	头胸甲颜色总密度
一级虾	≥70
二级虾	≥61 且<70
三级虾	≥51 且<61
四级虾	<51

3　讨论与结论

冷冻虾的新鲜度是消费者关心的问题, 然而国家标准并没有对水产品的新鲜度进行细分(GB 2733—2015)。浙江省对海捕虾的新鲜度等级进行了划分, 但感官指标仍未定量化, 且 TVB-N 测定要在实验室进行(DB 33/451—2003), 无法实时监测。目前, 有一些研究对虾无损检测的报道, 但很少涉及新鲜度的等级划分[21–25]。本研究首先规定了淡水虾新鲜度的定量划分标准, 如一级对虾的感官分值应大于等于 50 分, TVB-N 的含量应不高于 10 mg/100 g。这使冷冻对虾的新鲜度等级有了定量化的标准。对虾死后体表色泽会发生黑变和红变, 但研究者并不善用这种变化评价其新鲜度, 而善用 TVB-N 评价其新鲜度[26–28]。南美白对虾各部位的色变程度并不同步, 其中头胸甲处最敏感, 这可能与该处分布着大量的内脏器官有关[29–30]。因此, 头胸甲处是测定色变的最佳部位。对虾体表色泽的测定多以感官评价为主, 本研究发现, 对虾的感官分值、TVB-N 与颜色三分量(R、G、B)及总密度(Intensity)均有好的相关性, 其中颜色总密度(Intensity)与感官分值、TVB-N 的平均相关系数的绝对值最大, 因此建立了 Intensity 与感官分值和 TVB-N 的二元回归模型: Y=47.65+0.51X_1–0.36X_2。统计学检验结果表明该模型显著有效。实测结果表明在国家标准规定的可食用鲜度范围内, 该模型的预测值与实测值没有明显的差异。若对虾的新鲜度超出了国家标准的范围, 则模型预测值与实测值有统计意义上的差异。因此, 用该模型预测可食用对虾的色变比较准确。最后, 本研究依据模型规定了基于颜色密度的新鲜度级别。据此鲜度级别, 消费者可以实时掌握对虾的鲜度级别, 从而确定商品的价格以及是否购买。

参考文献

[1] 潘英, 王如才, 罗永巨, 等. 海水和淡水养殖南美白对虾肌肉营养成分的分析比较[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2001, 31(6): 828–834.
PAN Y, WANG RC, LUO YJ, *et al*. Analysis of the nutritive composition in muscle of marine cultured and fresh-water cultured *Penaeus vannamei* [J]. J Ocean Univ Qingdao, 2001, 31(6): 828–834.

[2] 陈晓汉, 陈琴, 谢达祥. 南美白对虾含肉率及肌肉营养价值的评定[J]. 水产科技情报, 2001, 28(4): 165–168.
CHEN XH, CHEN Q, XIE DX. Evaluation of meat content and muscle nutritional value of *Penaeus vannamei* [J]. Fish Sci Technol Inform, 2001, 28(4): 165–168.

[3] CHENG XL, LI MF, LENG XJ, *et al*. Creatine improves the flesh quality of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared in freshwater [J]. Food Chem, 2021, 354: 1–10.

[4] 于秀娟, 徐乐俊, 吴反修. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
YU XJ, XU LJ, WU FX. China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020.

[5] YUAN Y, LUO JX, ZHU TT, *et al*. Alteration of growth performance, meat quality, antioxidant and immune capacity of juvenile *Litopenaeus vannamei* in response to different dietary dosage forms of zinc: Comparative advantages of zinc amino acid complex [J]. Aquaculture, 2020, 522: 735120.

[6] HUANG XX, CHEN M, WANG WJ, *et al*. Shelf-life prediction of chilled *Penaeus vannamei* using grey relational analysis and support vector regression [J]. J Aquat Food Product Technol, 2020, 29(6): 507–519.

[7] 张高静, 韩丽萍, 孙剑锋, 等. 南美白对虾营养成分分析与评价[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 254–260.
ZHANG GJ, HAN LP, SUN JF, *et al*. Analysis and evaluation of nutritive composition in *Penaeus vannamei* [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2013, 13(8): 254–260.

[8] 伍光绪. 基于计算机视觉的血橙无损检测与分级技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
WU GX. Research on the non-destructive testing and classification technology of blood oranges based on computer vision [D]. Chongqing: Southwest University, 2016.

[9] 徐莹莹. 基于计算机视觉的甜瓜外观品质检测研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
XU YY. Study on melon external quality inspection based on computer vision [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2011.

[10] 童旭. 基于机器视觉水果表面等级分类识别的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
TONG X. Research on classification of fruit surface level based on machine vision [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.

[11] 齐亮, 赵婕, 赵茂程. 冷鲜猪肉的新鲜度无损检测技术现状及 THz 检测技术展望[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 219–224.
QI L, ZHAO J, ZHAO MC. Status of nondestructive detection methods on chilled pork freshness and prospect of THz spectrum inspection technique [J]. Food Mach, 2016, 32(9): 219–224.

[12] PANNIER L, WEIJER TM, STEEN FTHJ, *et al*. Prediction of chemical intramuscular fat and visual marbling scores with a conveyor vision scanner system on beef portion steaks [J]. Meat Sci, 2023, 199: 1–9.

[13] 范维, 胡建超, 王巧华, 等. 基于深度学习的移动端缺陷蛋检测系统研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 411–420.
FAN W, HU JC, WANG QH, *et al*. Detection system study of defective egg on mobile devices based on deep learning [J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 2023, 54(3): 411–420.

[14] GUO W, LI XX, XIE TH. Method and system for nondestructive detection of freshness in *Penaeus vannamei* based on hyperspectral technology [J]. Aquaculture, 2021, 538: 1–9.

[15] 徐炜桢, 许东, 林亲录, 等. 基于手机拍照和 ImageJ 软件的大米外观形状参数的测定[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(10): 109–113.
XU WZ, XU D, LIN QL, *et al*. Determination of parameters of appearance shape of rice based on mobile phone camera and ImageJ software [J]. J Chin Cereal Oils Ass, 2019, 34(10): 109–113.

[16] 黄晓辉, 徐炜祯, 冯立国, 等. 手机拍照图像快速实现菌落计数[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 468–471.
HUANG XH, XU WZ, FENG LG, *et al*. Research on quickly realizing colony counting with mobile phone photo images [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(2): 468–471.

[17] 傅德成, 刘明堂. 食品感官鉴别手册[M]. 北京: 中国轻工出版社, 1991.
FU DC, LIU MT. Food sensory identification manual [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1991.

[18] 陈继光. 樟树果实性状及其花青素生物合成途径与降糖功能研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.
CHEN JG. Study on anthocyanin hypoglycemic action and its biosynthetic pathways and fruit traits in *Cinnamomum camphora* [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.

[19] THANASAK SL, SOOTTAWAT B. Prevention of melanosis in crustaceans by plant polyphenols: A review [J]. Trend Food Sci Technol, 2019, 85: 1–9.

[20] 孙水发, 董方敏. ImageJ 图像处理与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
SUN SF, DONG FM. ImageJ image processing and practice [M]. Beijing: Arms Industry Press, 2013.

[21] 刘子豪. 基于机器视觉技术的南美白对虾分类算法研究与在线实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
LIU ZH. Study and on-line verification for shrimp classification algorithm based on machine vision technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[22] 罗艳. 基于机器视觉技术的对虾规格检测方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
LUO Y. Detection of shrimp specification based on machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[23] 洪寒梅. 黑变对虾的机器视觉识别方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HONG HM. Research of melanotic cooked shrimp recognition method using machine vision [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[24] DWIVEDI SK, VISHWAKARMA M, SONI A. Advances researches on non- destructive testing: A review [C]. 7th International Conference of Materials Processing and Characterization (ICMPC), 2018.

[25] ZHANG D, LILLYWHITE KD, LEE D, *et al*. Automatic shrimp shape grading using evolution constructed features [J]. Comp Electron Agric, 2014, 100: 116–122.

[26] LAN WJ, WANG SHY, CHEN MR, *et al*. Developing poly(vinyl alcohol)/chitosan films incorporate with *D*-limonene: Study of structural, antibacterial, and fruit preservation properties [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 145: 722–732.

[27] 陈胜军, 张晓凡, 潘创, 等. 水产品品质评价研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(6): 53–59.
CHEN SJ, ZHANG XF, PAN C, *et al*. Recent progress in quality evaluation of aquatic products [J]. Meat Res, 2022, 36(6): 53–59.

[28] 李娜, 孙敏, 王春华, 等. 水产品保鲜贮藏期间品质评价方式的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(4): 1099–1105.
LI N, SUN M, WANG CH, *et al*. Research progress on quality evaluation indexes of aquatic products during fresh-keeping and storage [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(4): 1099–1105.

[29] 吴佳煜, 龚静妮, 郑君滦, 等. 虾类保鲜技术的研究现状及其发展趋势[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 309–318.
WU JY, GONG JN, ZHENG JY, *et al*. Research status and development trend of shrimp preservation technology [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(17): 309–318.

[30] 刘品, 陈静. 低温等离子体对南美白对虾防黑变及品质的研究[J]. 食品工业, 2018, 39(11): 184–187.
LIU P, CHEN J. Study on prevention of blackening of *Penaeus vannamei* by low temperature plasma [J]. Food Ind, 2018, 39(11): 184–187.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介

徐紫嫣, 主要研究方向为图像处理及数据分析。
E-mail: xu_zy321@163.com

刘婧婧, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品保鲜贮藏。
E-mail: 2622315745@qq.com

徐仰仓, 教授, 主要研究方向为水产品保鲜贮藏。
E-mail: xuyc@tust.edu.cn