

文章编号: 1674-5566(2023)04-0785-09

DOI:10.12024/jsou.20230104054

角质色素沉积可视化及其在头足类判别分类中的应用

刘必林^{1,2,3,4}, 顾心雨¹, 王冰妍⁵, 储莫闲¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 农业农村部大洋渔业可持续利用重点实验室, 上海 201306; 5. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306)

摘要: 角质颚是研究头足类各种生物信息的重要组织, 为实现头足类角质色素沉积的精确化测量, 探究色素沉积在头足类角质颚判别分类中的作用, 研究选取茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*)、柔鱼 (*Ommastrephes bartrami*) 以及翼柄柔鱼 (*Ommastrephes pteropus*) 等 3 种头足类生物的角质颚下颚为研究对象, 以其侧视图像为基础, 对其色素沉积按照等级 I (黑色)、等级 II (灰色)、等级 III (浅灰色)、等级 IV (透明) 等 4 个等级进行可视化, 分别计算出茎柔鱼、柔鱼以及翼柄柔鱼角质颚 4 个等级的色素沉积面积与头盖-翼部区域以及脊突-侧壁区域面积的比例关系, 并且采用逐步判别分析法对 3 种头足类角质颚之间的色素沉积差异进行分析, 结果显示等级 I、IV 在脊突-侧壁区域占比判定效果较好, 判别成功率为 74.4%。研究认为, 3 种头足类的角质色素沉积情况存在一定差异, 而这些差异有可能是由于 3 种头足类不同的生活特性和摄食习惯导致。研究实现了角质色素沉积的数值化和色素沉积等级的精确化划分, 并按照划分的结果, 将色素沉积情况作为全新的定量测量方法, 为头足类生物角质色素沉积研究提供了新的思路。

关键词: 头足类角质颚; 色素沉积可视化; 机器视觉

中图分类号: S 917.4 **文献标志码:** A

头足类在海洋生态系统中起着承上启下的重要作用, 是海洋哺乳动物、大型鱼类的重要食物, 对头足类的研究将推动对整个海洋生态系统食物链、摄食关系以及资源状况的研究^[1]。研究头足类的材料包括内壳、耳石、乌贼骨、角质颚等, 其中角质颚具有大小适中、形态稳定、不易被腐蚀、坚硬等良好特性, 同时蕴含着丰富的生物信息, 是研究头足类的重要材料^[2]。

角质颚分为上颚和下颚, 为不对称结构, 由于下颚具有易采集、较为稳定的形态特征、不同种之间差异明显等优点, 较上颚而言, 更常被用于种类鉴别与划分^[3]。角质颚分为喙部、翼部、头盖、侧壁和脊突等 5 个部分, 这些部位有着不同程度的黑色素分布, 即色素沉积。色素沉积伴随着角质颚的生长过程, 影响角质颚的硬度, 因此, 角质色素可以反映头足类包括摄食及生长环境等生物信息, 对头足类生物学研究至关重要

要^[4]。角质颚体积小, 形态不规则, 如何测量其色素沉积占比, 一直是角质颚研究中的棘手问题。WOLFF^[5]最先对太平洋海域的 18 种头足类角质颚的色素沉积进行了描述; CASTRO 等^[6]首次提出了角质颚的色素沉积 8 级分类; 方舟^[1]在研究角质色素沉积与性腺成熟度关系基础上, 提出了新的 7 级分类方法, 使色素沉积等级的特征更为具体; 胡贯宇等^[7]利用神经网络模型建立了角质色素沉积等级与头足类生物信息如日龄、胴长、性腺成熟度等和角质颚外部形态参数的关系。卜心宇等^[8]对西北太平洋富山武装乌贼 (*Enoploteuthis chunii*) 个体发育期角质色素沉积的变化按照 3 个等级进行了分析, 并首次对角质色素沉积进行了定量分析, 然而研究方法主要是借助图像测量软件, 实验的人工智能性差。宋自根等^[9]在 2021 年基于神经网络深度学习模型, 对角质颚进行分类识别和图像切割, 实

收稿日期: 2023-01-02 修回日期: 2023-04-26

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目 (YFD0901404); 上海市高校特聘教授“东方学者”岗位跟踪计划项目 (GZ2022011); 农业农村部全球渔业资源调查监测评估专项 (D-8021-22-0129-01)

作者简介: 刘必林 (1980—), 男, 教授, 研究方向为渔业资源生物学。E-mail: bl-liu@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

现了角质色素沉积的自动化定量测量,但并未将定量测量出的色素沉积情况用于头足类分类。机器视觉指用计算机模拟人的视觉功能,从客观事物的图像中提取信息,进行处理并加以理解,最终进行应用^[10],可以在很大程度上减少人类的重复劳动,提高生产效率和自动化程度。因此,随着科技的进步和农业的不断发展,机器视觉也被广泛应用到农业包括渔业等领域。在头足类角质颚应用方面,贺芊菡等^[11-12]和林俊杰等^[13]基于机器视觉实现了头足类角质颚的轮廓与特征点提取以及形态学参数的测量。宋自根等^[9]利用 Mask-RCNN 深度学习的神经网络模型,实现角质色素的定量测量。

本研究基于机器学习,定量测量角质颚的色素沉积,将角质色素沉积作为角质颚判别分类的指标来进行头足类的分类,希望为色素沉积在头足类分类研究中提供新的思路。选取中东太平洋茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*)、北太平洋柔鱼 (*Ommastrephes bartrami*) 以及中东大西洋翼柄柔鱼 (*Ommastrephes pteropus*) 这 3 种头足类的角质

颚下颚为样本,以其侧视图为基础,基于角质颚下颚的色素沉积情况,利用机器视觉计算出 3 种角质颚 4 个等级的色素沉积面积与头盖-翼部区域以及脊突-侧壁区域面积的比例关系,并利用 3 种头足类角质颚之间色素沉积的差异来进行头足类的判别。本研究将机器视觉和头足类角质颚色素沉积相结合,实现角质色素等级的精确化划分,创造一种全新的定量测量方法和头足类判别分类方法,为头足类角质颚色素沉积研究以及头足类分类研究提供一种新的思路,为依据角质色素沉积实现对头足类分类的研究提供新的方向,在一定程度上促进了头足类信息处理的自动化和智能化。

1 材料与方法

1.1 材料

采集中东太平洋茎柔鱼、西北太平洋柔鱼、中东大西洋翼柄柔鱼各 30 尾,以角质颚下颚为样本,清洗后存放于装有体积分数为 75% 的乙醇离心管中(表 1)。

表 1 头足类采样信息

Tab. 1 Sampling information of cephalopods

种名 Species	采集时间 Sampling date	采集海域 Sampling area	经纬度 Location	胴长 Mantle length/mm	样品数量 Sample size/尾
茎柔鱼 <i>D. gigas</i>	2020. 05. 25—2020. 05. 26	中东太平洋	103°09'W~104°14'W 01°49'S~02°19'S	239~378	30
柔鱼 <i>O. bartrami</i>	2017. 10. 14—2017. 11. 12	西北太平洋	155°47'E~155°55'E 42°57'N~43°26'N	258~365	30
翼柄柔鱼 <i>O. pteropus</i>	2018. 08. 23—2018. 09. 13	中东大西洋	-	203~289	30

1.2 方法

1.2.1 图像拍摄

分别采集 90 尾头足类下颚的彩色二维侧视图,并将图像保存为 JPEG (Joint photographic experts group) 文件格式。

1.2.2 图像预处理

对采集到的 90 尾头足类下颚图片进行图像预处理,包括滤波平滑与图像灰度化 2 个步骤。首先,通过均值迁移滤波处理角质颚图像。均值迁移滤波是对于色彩层面平滑处理的滤波器,可以中和色彩分布相近的颜色,平滑色彩细节,侵蚀面积较小的颜色区域^[13]。接着,对平滑后的图像进行灰度化处理,使彩色图像变为灰度图像。

1.2.3 构建目标连通域

构建目标连通域主要分为 4 个步骤:

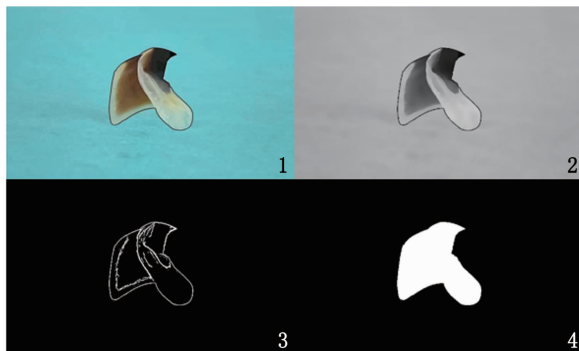
(1) 图像二值化。图像二值化是实现图像分割的关键步骤之一,采用自适应阈值对灰度图像进行二值化处理,阈值类型选择黑白二值反转,自适应方法选择高斯加权均值,设置像素值上限为 255。当待处理的像素灰度值大于自适应阈值时,将该像素值处理为 0;当待处理的像素灰度值小于自适应阈值时,将该像素值处理为像素值上限。经过二值化的图像分离了角质颚背景,也进一步精简了图像信息。

(2) 自定义去噪。图像上存在不同程度的噪声点,对角质颚轮廓信息的提取产生了一定影

响。定义连通域为相连且不间断的白色像素点组成的区域,再定义一个值 m , m 值的确定是经过多次尝试,选出来最合适的值,使得输出的图像噪声最少且满足图像轮廓完整。检测图像中所有轮廓的像素点个数,将像素点小于 m 的连通域认作噪声并删除,达到去噪的效果。新建像素值为 0 的单通道画布,绘制出所有轮廓并用值为 255 的像素值填充。

(3) 构建连通域。对图像进行去噪处理之后,对所得图像采用最小结构元素作 1 次形态学闭运算处理,得到 1 次处理的样本图像后,检索图像中样本轮廓。如果得到的轮廓数量等于 1,则表示已构造得到了目标连通域,则直接选择连通域;如果轮廓数量大于 1,则说明样本轮廓图像仍然存在缺损。此时,对图像作进一步处理:迭代增大卷积核对轮廓进行形态学闭运算,直到完全消除图像的轮廓缺损,同时还要保证图像的变形程度在误差允许的范围内。

(4) 选择连通域。新建像素值为 0 的单通道画布,检测最长轮廓对应的连通域并绘制在画布上(图版 I)。



1. 角质颚原图; 2. 滤波平滑及图像灰度化; 3. 图像二值化及自定义去噪; 4. 选择连通域。

1. Original image of cephalopod beak; 2. Filter smoothing and image greyscaling; 3. Image binarisation and custom denoising; 4. Select a connectivity domain.

图版 I 角质颚识别过程

Plate I Cephalopod beak identification process

1.2.4 色素分割及可视化

(1) 目标分割,遍历二值化的角质颚连通域图像,搜索角质颚在图中占据的像素点坐标,并保存至列表。根据列表中记录的像素点制作掩膜,分割出彩色图像与灰度图像中的角质颚。

(2) 色素可视化,由于角质颚喙部色素沉积颜色最深,侧壁部位的色素沿其边缘从前往后逐

渐变浅,通过观察我们发现,色素沉积由深至浅,有 3 个明显的界限,因此将其色素沉积划分为 4 个不同等级。

新建一张白色画布用于绘制分割色素后的角质颚图像。将角质颚色素沉积由深到浅分别划分为 4 个等级:像素值位于 $[0, 40)$ 的像素点归为等级 I,等级 I 表示色素沉积现象最显著,呈现黑色;将像素值位于 $[24, 72)$ 的像素点归为等级 II,等级 II 表示色素沉积呈现灰色,色素沉积较显著;将像素值位于 $[64, 112)$ 的像素点归为等级 III,等级 III 表示色素沉积呈现浅灰色,有一定色素沉积;剩余像素点归为等级 IV,等级 IV 则表示角质颚呈现透明,色素沉积极少。

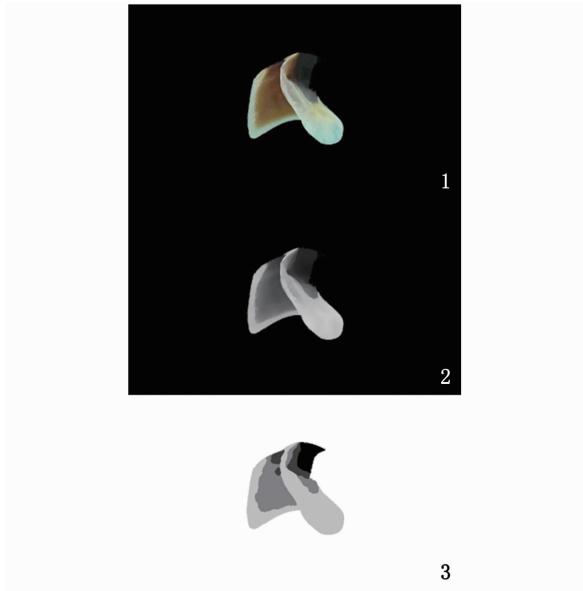
在研究过程中,划分色素值的 4 个区间存在交集,这是由于在平滑 I、II、III 等级的过程中,各区域边缘的像素值会产生变化,从而出现交集,若选取的区间没有交集,则在划分等级的过程中,由于第 IV 等级取其他 3 个等级剩余像素值,会将区域边缘的像素值归为第 IV 区域,影响结果的准确性。

在分割后的灰度图像中,遍历列表中保存的角质颚像素点坐标,将像素值位于 $[0, 40)$ 的像素点用像素值 255、像素值位于 $[24, 72)$ 的像素点用像素值 127、像素值位于 $[64, 112)$ 的像素点用像素值 63、其余像素点用像素值 0,分别绘制在白色画布中并记录每个等级中像素点的数量。

(3) 平滑处理,在每分割完一个等级后,对分割得到区域采用均值滤波做一次平滑处理,消除计算机视觉的绝对化处理在等级边缘处产生的锯齿(图版 II)。

图像处理部分均采用 Python。角质颚色素沉积面积计算由于图像拍摄过程中不能确保角质颚的分辨率完全一致,因此选取角质颚各色素沉积等级的像素点数量占角质颚头盖-翼部区域以及脊突-侧壁区域的总像素点数量之比进行研究。等级占比采用各区域像素点数量除以角质颚图像总像素点数量。

角质颚下颚分为喙部、翼部、头盖、侧壁和脊突 5 个部分(图 1),本研究将下颚分为 2 个主要区域:头盖-翼部区域(A 区)以及脊突-侧壁区域(B 区)。利用实际投影面积,计算出角质颚 4 个等级的色素沉积面积在这 2 个区域面积的比例关系。



1. 彩色图像; 2. 灰度图像; 3. 色素分割。
1. Color image; 2. Grayscale images; 3. Segmentation of pigmentation.

图版 II 角质颚色素分割及可视化过程

Plate II Process of segmentation and visualization of pigmentation of the cephalopod beak

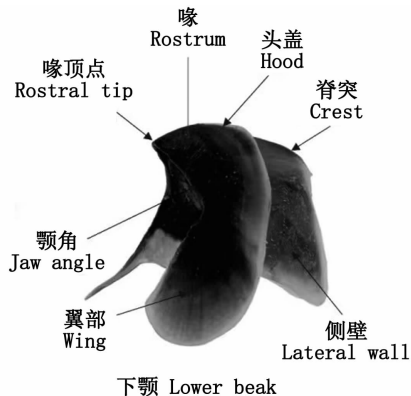


图 1 角质颚部位示意图

Fig. 1 Part diagram of cephalopod beak

数据处理采用 Excel 2021, 数值精确至 0.01。为了探究结果的准确度, 本研究采用逐步判别分析法对 3 种头足类之间的色素沉积差异进行分

析^[14], 通过正态检验和方差齐性检验, 将剩余入选的因子用 Wilks' Lambda 方法进行筛选^[15], 使用的软件为 SPSS 26。

2 结果

2.1 角质颚色素可视化

数据显示, 茎柔鱼色素等级 I、II、III、IV 在头盖-翼部区分别占总体的 22.38%、10.10%、13.09% 和 54.43%, 在脊突-侧壁区分别占总体的 2.96%、23.39%、36.69% 和 36.96%。柔鱼色素等级 I、II、III、IV 在头盖-翼部区分别占总体的 26.20%、17.76%、17.73% 和 38.31%, 在脊突-侧壁区分别占总体的 20.35%、29.34%、21.45% 和 28.86%。翼柄柔鱼色素等级 I、II、III、IV 在头盖-翼部区分别占总体的 27.28%、16.21%、18.77% 和 37.74%, 在脊突-侧壁区分别占总体的 27.23%、23.48%、16.15% 和 33.14% (表 2)。

2.2 角质颚色素分布差异

在茎柔鱼角质颚 A 区, 色素沉积以 IV 级为主。翼部沉积以 I 级为主, 主要位于翼部下端, 喙部色素以 I 级为主, II、III 级比例相当。柔鱼角质颚下颚等级 IV 只占一小部分, A 区的大部分色素沉积较为明显, 且以等级 I 为主。翼柄柔鱼角质颚下颚的 A 区等级 IV 占比也最多, 但和等级 I 比例相当, II、III 级比例接近。

在 B 区, 茎柔鱼角质颚色素沉积较浅, III、IV 级占了很大一部分比例, 等级 I 比例很低, 4 个等级在柔鱼角质颚 B 区分布比较均匀, 等级 II 较多, 翼柄柔鱼角质颚下颚色素分布也较为均匀, 以等级 IV 为主, 等级 III 较低 (图版 III)。

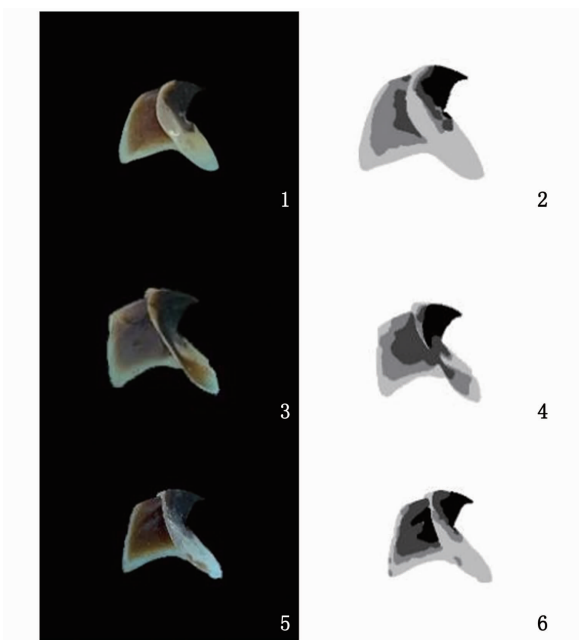
2.3 角质颚判别分析

通过逐步判别分析法对 3 种角质颚色素沉积情况进行分析, 结果显示, 等级 I、IV 在脊突-侧壁区域占比判定效果较好, 判别成功率为 74.4% (表 3)。

表 2 3 种头足类角质颚各色素等级占比

Tab. 2 Percentage of each pigmentation class of beaks of three different cephalopods

种类 Species	数据类型 Data type	头盖-翼部区域各色素等级占比 Percentage of each pigmentation class in the hood-wing region				脊突-侧壁区域各色素等级占比 Percentage of each pigmentation class in the crest-lateral wall region			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
茎柔鱼 <i>D. gigas</i>	范围 Range	1.08~51.71	0~26.32	2.92~53.03	19.77~67.33	0.31~18.47	0~50.07	8.12~61.89	23.87~60.69
	均值 Average value	22.38	10.10	13.09	54.43	2.96	23.39	36.69	36.96
	标准差 Standard deviation	10.63	6.07	8.83	9.68	3.31	15	11.6	10.38
柔鱼 <i>O. bartrami</i>	范围 Range	8.38~39.81	8.63~28.76	0.20~44.09	13.35~37.04	4.59~36.05	17.68~57.78	8.80~46.00	17.75~43.86
	均值 Average value	26.20	17.76	17.73	38.31	20.35	29.34	21.45	28.86
	标准差 Standard deviation	9.24	9.21	5.76	10.39	11.9	9.24	5.39	5.60
翼柄柔鱼 <i>O. pteropus</i>	范围 Range	0.94~48.31	0.19~35.13	6.29~30.70	16.66~53.83	2.22~49.42	9.47~40.09	7.57~26.77	16.62~54.46
	均值 Average value	27.28	16.21	18.77	37.74	27.23	23.48	16.15	33.14
	标准差 Standard deviation	12.12	8.76	5.75	10.58	12.65	9.37	4.36	9.01



1. 茎柔鱼原图; 2. 茎柔鱼色素等级图; 3. 柔鱼原图; 4. 柔鱼色素等级图; 5. 翼柄柔鱼原图; 6. 翼柄柔鱼色素等级图。

1. Original image of *D. gigas*; 2. Pigmentation grade chart of *D. gigas*; 3. Original image of *O. bartrami*; 4. Pigmentation grade chart of *O. bartrami*; 5. Original image of *O. pteropus*; 6. Pigmentation grade chart of *O. pteropus*.

图版 III 3 种角质颚原图及色素等级图

Plate III Original image and pigmentation grade chart of cephalopod beak

3 讨论

3.1 角质颚色素沉积及其应用研究

角质颚体积小,形态不规则,如何测量其色素沉积占比,一直是角质颚研究中的棘手问题。由于角质颚外部形态特征的相似性,甚至有些相

近的种类之间的角质颚形态特征完全没有差异^[14],利用角质颚进行头足类的种类判别时会有难度,业内的学者也在不断探索角质颚判别分类的方法,但大多以形态特征参数作为研究对象^[16]。对角质颚的色素沉着研究主要停留在定性分析。目前已有研究对角质颚色素沉着进行定量分析,但主要是借助图像处理软件,智能性较差。宋自根等^[9]采用人工智能的自动化定量测量方法未用于头足类分类。

本研究基于机器视觉,创新性地根据色素沉积情况,将角质颚下颚划分为 4 个等级,利用自定义算法自动化准确地计算出了头足类 A、B 区域的色素沉积占比,实现了角质颚色素占比的精确化测量,并基于此,首次把角质颚色素沉积作为角质颚判别分类的指标来进行头足类的分类,并取得了良好的分类效果,创造了一种全新的定量测量方法,将生物形态差异定量描述和可视化,为头足类色素沉积研究智能化提供新方法。

3.2 角质颚色素沉积的摄食生态学分析

头足类生物特有的摄食器官角质颚具有坚硬、结构稳定、耐腐蚀等特点,储存着重要的生物信息,被广泛应用于头足类年龄生长、资源评估、种群判别等方面^[17]。其色素沉积能够反映个体的生长、摄食习性等信息^[18]。下颚更是常被作为种群判别的重要材料^[3]。本文研究发现,不同头足类的角质颚色素沉积存在一定的差异,利用机器视觉可以将这种差异量化,形成可观的数据集,逐步判别分析结果显示,等级 I、IV 在脊突-侧壁区域占比判定效果较好,判别成功率为 74.4% (表 3)。

表 3 3 种角质颚判别分析结果
Tab. 3 Results of analysis of three cephalopods beaks

逐步判别分析 SDA	种类 Species	种类 Species			总计 Total	正确率 Accuracy/%	总正确率 Total accuracy/%
		茎柔鱼 <i>D. gigas</i>	柔鱼 <i>O. bartrami</i>	翼柄柔鱼 <i>O. pteropus</i>			
初始判别 Original	茎柔鱼 <i>D. gigas</i>	25	4	1	30	83.3	74.4
	柔鱼 <i>O. bartrami</i>	2	21	7	30	70.0	
	翼柄柔鱼 <i>O. pteropus</i>	0	9	21	30	70.0	
交叉验证 Cross- validation	茎柔鱼 <i>D. gigas</i>	25	4	1	30	83.3	74.4
	柔鱼 <i>O. bartrami</i>	2	21	7	30	70.0	
	翼柄柔鱼 <i>O. pteropus</i>	2	21	7	30	70.0	

茎柔鱼、柔鱼、翼柄柔鱼等 3 种角质颚的色素沉积由喙部开始,逐渐向头盖、翼部、脊突、侧壁沉积,并且色素沉积逐渐变淡^[19]。茎柔鱼角质颚色素沉积在 A 区呈现等级 IV > I > III > II 的情况,等级 IV 主要出现在喙部,面积最大,等级 I 主要出现在翼部,由于翼部色素沉积较浅,这符合茎柔鱼个体发育期摄食习性的变化以及角质颚自身的化学成分组成^[20]。林静远等^[4]发现茎柔鱼角质颚 C/N 从喙部到翼部逐渐升高,表征从喙部到翼部色素沉积逐渐变浅;GUERRA 等^[21]研究发现,茎柔鱼垂直活动能力很强,在幼龄时期以甲壳类为食,因此角质颚喙部色素沉积较深,成体主要以鱼类和头足类为食,其角质颚侧壁和翼部色素沉积较浅。

研究认为,头足类角质颚色素的沉积与其食性息息相关,生活在不同海域的头足类由于摄食行为和摄食偏好的不同,角质颚色素沉积状况也会存在差异^[22],而色素沉积程度将影响角质颚硬度^[23]。

冯志萍等^[24]在研究秘鲁海域茎柔鱼中发现,茎柔鱼主要摄食其他头足类和灯笼鱼类,摄食种类和结构单一,主要为串光鱼 (*Vinciguerria nimbara*) 和灯笼鱼科 (*Myctophidae*)^[25],其主要原因是荧串光鱼 (*Vinciguerria lucetia*) 在东南太平洋资源丰度和空间分布上占有主要地位^[26]。此外,操亮亮等^[27]在对东太平洋公海茎柔鱼的食性研究中发现,茎柔鱼主饵料生物中含鱼类 10 种、头足类 4 种,从出现频率来看,主要摄食的鱼类饵料为荧串光鱼、朗明灯鱼 (*Diogenichthys laternatus*) 和墨西哥尾灯鱼 (*Triphoturus mexicanus*),荧串光鱼和茎柔鱼等头足类出现频率较高,是最重要的摄食饵料,并且,随着胴长的增大,茎柔鱼摄食的饵料种类不断增加,头足类和灯笼鱼饵料比例增加,摄食营养水平不断提

高。同时,翼柄柔鱼以鱼类、甲壳类、头足类为食,同类残食的现象明显^[28];根据张鑫浩等^[29]的研究,中东大西洋翼柄柔鱼主要摄食对象为灯笼鱼科、巨口鱼科 (*Stomiidae*) 及头足类,其中灯笼鱼科数量最多,其次为头足类和巨口鱼科。同样的,随着胴长的增加,翼柄柔鱼摄食的饵料生物种类与数量不断增加,摄食营养结构出现变化,灯笼鱼科占比下降,巨口鱼科呈现增加趋势。但随着胴长的增加,翼柄柔鱼依旧以较小的饵料生物为主要摄食对象,或许是因为翼柄柔鱼对于饵料生物不具有选择性,是一种机会主义捕食者^[30-31]。而马金等^[32]认为,西北太平洋柔鱼摄食鱼类、头足类和甲壳类,其中以鱼类为主、头足类次之、甲壳类再次。同时,幼年期的柔鱼大量捕食甲壳类,成体逐渐减少^[33]。这与本文研究结果类似,大量摄食甲壳类等硬度大的食物,导致了柔鱼在 A 区相较于食性偏软的茎柔鱼和翼柄柔鱼,角质颚的色素沉积面积大且色素沉积颜色深。茎柔鱼和翼柄柔鱼角质颚 A 区的色素沉积情况类似,等级 I、II、III 占 A 区总面积的比值较小,而柔鱼色素沉积占比较多,几乎覆盖了整个 A 区。这表明茎柔鱼和翼柄柔鱼摄食习性基本相似,但与柔鱼不同,后者更倾向于摄食硬度更大的食物。

3.3 不足与展望

由于角质颚本身光滑,在光线照射下会存在一定的反光现象,在拍摄过程中,也会由于灯光照射角度等原因,使角质颚图像上存在光点,进而影响色素值的计算与色素占比的计算。后续拟对拍摄环境、拍摄角度以及拍摄设备进行调整,减轻此类因素的干扰,此外,后续将考虑改变图像处理方法,降低对图片预处理的要求,方便操作以适于推广。

此外,由于头足类个体生长的差异,性别、年龄差异均会对色素沉积情况产生影响,如柔鱼雌雄个体角质颚色素沉积就存在一定差异性,雌性个体上颚撕咬能力较强,色素沉积较快^[34]。本研究中并未对此类情况做出具体划分,后续可以对此类问题跟进研究。

参考文献:

- [1] 方舟. 基于角质颚的北太平洋柔鱼渔业生态学研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2016: 7-115.
FANG Z. Fisheries ecology of neon flying squid *Ommastrephes bartramii* in North Pacific Ocean based on beak [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 7-115.
- [2] 刘必林,陈新军,方舟,等. 利用角质颚研究头足类的年龄与生长[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(6): 930-936.
LIU B L, CHEN X J, FANG Z, et al. Study of age and growth of cephalopod using their beaks [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2014, 23(6): 930-936.
- [3] CLARKE M R. A handbook for the identification of cephalopod beaks[M]. Oxford: Clarendon Press, 1986: 273-274.
- [4] 林静远,刘必林,金宵. 头足类角质颚的色素沉积机制[J]. 水产学报, 2020, 44(5): 777-783.
LIN J Y, LIU B L, JIN X. Mechanism analysis of Cephalopod beak pigmentation[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(5): 777-783.
- [5] WOLFF G A. Identification and estimation of size from the beaks of 18 species of cephalopods from the Pacific Ocean [R]. Seattle: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1984.
- [6] CASTRO J J, HERNÁNDEZ-GARCÍA V. Ontogenetic changes in mouth structures, foraging behaviour and habitat use of *Scomber japonicus* and *Illex coindetii* [J]. Scientia Marina, 1995, 59(3/4): 347-355.
- [7] 胡贯宇,陈新军. 基于神经网络模型的秘鲁外海柔鱼角质颚色素沉积的研究[C]//2016年中国水产学会学术年会论文摘要集. 成都:中国水产学会, 2016: 242.
HU G Y, CHEN X J. A study on the pigment deposition of jaws of soft fish stems in the Peruvian sea based on neural network model [C]//2016 China Society of Fisheries. Chengdu: China Society of Fisheries, 2016: 242.
- [8] 卜心宇,刘必林,欧利国,等. 富山武装乌贼个体发育期角质颚表型变化分析[J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 144-152.
BU X Y, LIU B L, OU L G, et al. Analysis of ontogenetic phenotype changes of *Enoploteuthis chunii* beak [J]. South China Fisheries Science, 2022, 18(1): 144-152.
- [9] 宋自根,张佳彬,覃学标,等. 一种基于Mask-RCNN图像分割的头足类动物角质颚色素沉积量化方法[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 70-78.
SONG Z G, ZHANG J B, QIN X B, et al. A mask-RCNN based quantification method for pigmentation of cephalopod beaks[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(5): 70-78.
- [10] 段峰,王耀南,雷晓峰,等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002, 19(3): 59-61.
DUAN F, WANG Y N, LEI X F, et al. Machine vision technologies [J]. Automation Panorama, 2002, 19(3): 59-61.
- [11] 贺芊茜,孙翁杰,刘必林,等. 基于计算机视觉的头足类角质颚特征研究 I: 轮廓与特征点提取[J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(6): 1493-1500.
HE Q H, SUN W J, LIU B L, et al. Morphological study on beak of cephalopods based on computer vision I: contour and feature point extraction [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2020, 51(6): 1493-1500.
- [12] 贺芊茜,孙翁杰,刘必林,等. 基于计算机视觉的头足类角质颚特征研究 II: 形态学参数测量[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(1): 252-259.
HE Q H, SUN W J, LIU B L, et al. Morphological study of cephalopod beak based on computer vision II: morphological parameter measurement [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(1): 252-259.
- [13] 林俊杰,蒋新华,胡蓉,等. 基于 Mean Shift 的改进型图像滤波算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 243-247, 253.
LIN J J, JIANG X H, HU R, et al. Improved image filtering algorithm based on mean shift [J]. Computer Engineering, 2016, 42(1): 243-247, 253.
- [14] 刘必林,陈新军,方舟,等. 基于角质颚长度的头足类种类判别[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(6): 1365-1372.
LIU B L, CHEN X J, FANG Z, et al. Species identification of cephalopods based on beak morphometric variables [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2015, 46(6): 1365-1372.
- [15] 韩霁武,陈新军,方舟,等. 基于鱼体和耳石形态的东海两种鲈属鱼类判别分析[J]. 海洋渔业, 2020, 42(2): 161-169.
HAN P W, CHEN X J, FANG Z, et al. Discriminant analysis of two *Scomber* species in the East China Sea based on shape and otolith morphology [J]. Marine Fisheries, 2020, 42(2): 161-169.
- [16] CLARKE M R. The identification of cephalopod "beaks" and the relationship between beak size and totalbody weight [J]. Bulletin of the British Museum (Natural History) Zoology, 1962, 8(10): 419-480.
- [17] 何静茹,陆化杰,陈炫好,等. 冬春季西北印度洋鳶乌贼角质颚外部形态及生长特性[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2775-2784.
HE J R, LU H J, CHEN X Y, et al. Beak morphological and growth characteristic of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the northwest Indian Ocean in winter and spring [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2775-2784.
- [18] 刘必林,陈新军. 头足类角质颚的研究进展[J]. 水产学

- 报, 2009, 33(1): 157-164.
- LIU B L, CHEN X J. Review on the research development of beaks in Cephalopoda [J]. Journal of Fisheries of China, 2009, 33(1): 157-164.
- [19] 林静远, 刘必林, 桓梦瑶, 等. 我国几种常见头足类角质颚碳氮稳定同位素分析[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 394-401.
- LIN J Y, LIU B L, HUAN M Y, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes analysis of the common cephalopods beaks in the offshore of China [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 394-401.
- [20] 林静远, 刘必林, 陈新军. 头足类角质颚微化学及其在渔业生态学中的应用研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(2): 280-287.
- LIN J Y, LIU B L, CHEN X J. Advances on cephalopod beak microchemistry and its application in fishery ecology: a review [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(2): 280-287.
- [21] GUERRA Á, RODRÍGUEZ-NAVARRO A B, GONZÁLEZ Á F, et al. Life-history traits of the giant squid *Architeuthis dux* revealed from stable isotope signatures recorded in beaks [J]. ICES Journal of Marine Science, 2010, 67(7): 1425-1431.
- [22] 陈炫好, 陆化杰, 王洪浩, 等. 西北印度洋鸢鸟贼角质颚色素沉积特性分析[J]. 动物学杂志, 2020, 55(4): 468-476.
- CHEN X Y, LU H J, WANG H H, et al. Analysis of pigmentation character on beak for *Sthenoteuthis oualaniensis* in Northwest Indian Ocean [J]. Chinese Journal of Zoology, 2020, 55(4): 468-476.
- [23] 梁佳伟, 彭苗苗, 陈新军, 等. 北太平洋2种鱿鱼类角质颚生长特性及其种类判别[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(3): 546-554.
- LIANG J W, PENG M M, CHEN X J, et al. Beak's growth characteristics and species identification for two kinds of squids in the north Pacific Ocean [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(3): 546-554.
- [24] 冯志萍, 余为, 陈新军, 等. 基于不同权重栖息地模型的秘鲁外海茎柔鱼渔场分析[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 878-888.
- FENG Z P, YU W, CHEN X J, et al. Analysis of fishing ground of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* in the southeast Pacific Ocean off Peru based on weighting-based habitat suitability index model [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(6): 878-888.
- [25] 韩东燕, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 胶州湾六丝钝尾虾虎鱼的摄食生态特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1446-1452.
- HAN D Y, XUE Y, JI Y P, et al. Feeding ecology of *Amblychaeturichthys hexanema* in Jiaozhou Bay, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1446-1452.
- [26] CORNEJO R, KOPPELMANN R. Distribution patterns of mesopelagic fishes with special reference to *Vinciguerria lucetia* Garman 1899 (Phosichthyidae: Pisces) in the Humboldt Current Region off Peru [J]. Marine Biology, 2006, 149(6): 1519-1537.
- [27] 操亮亮, 力清影, 刘必林. 东太平洋公海茎柔鱼饵料中鱼类和头足类组成初步分析[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4515-4522.
- CAO L L, LI Q Y, LIU B L. Preliminary analysis on the composition of fish and cephalopod in diet of *Dosidicus gigas* in the high sea of Eastern Pacific Ocean [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4515-4522.
- [28] 陈新军, 刘必林, 王尧耕. 世界头足类[M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 1054-1055.
- CHEN X J, LIU B L, WANG Y C. Cephalopods of the world. Beijing: China Ocean Press, 2009: 1054-1055.
- [29] 张鑫浩. 中东大西洋翼柄柔鱼渔业生物学研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- ZHANG X H. A study on fishery biology of the Orangeback Flying Squid in the Eastern Central Atlantic Ocean [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [30] MERTEN V, CHRISTIANSEN B, JAVIDPOUR J, et al. Diet and stable isotope analyses reveal the feeding ecology of the orangeback squid *Sthenoteuthis pteropus* (Steenstrup 1855) (Mollusca, Ommastrephidae) in the eastern tropical Atlantic [J]. PLoS One, 2017, 12(12): e0189691.
- [31] 张鑫浩, 刘必林, 李纲, 等. 中东大西洋翼柄柔鱼种群、年龄、生长及性成熟特征[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(6): 1040-1045.
- ZHANG X H, LIU B L, LI G, et al. Population, age, growth and maturation characteristics of orange back flying squid *Sthenoteuthis pteropus* in Eastern Central Atlantic Ocean [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(6): 1040-1045.
- [32] 马金, 陈新军, 刘必林, 等. 北太平洋柔鱼渔业生物学研究进展[J]. 上海海洋大学学报, 2011, 20(4): 563-570.
- MA J, CHEN X J, LIU B L, et al. Review of fisheries biology of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the North Pacific Ocean [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2011, 20(4): 563-570.
- [33] 陈新军, 田思泉, 陈勇, 等. 北太平洋柔鱼渔业生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1050-1080.
- CHEN X J, TIAN S Q, CHEN Y, et al. Squid in the North Pacific fisheries biology [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1050-1080.
- [34] 陆化杰, 张旭, 童玉和, 等. 中国南海西沙群岛海域鸢鸟贼耳石微结构及生长特性[J]. 水产学报, 2020, 44(5): 767-776.
- LU H J, ZHANG X, TONG Y H, et al. Statolith microstructure and growth characteristics of *Sthenoteuthis oualaniensis* in the Xisha Islands waters of the South China Sea [J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(5): 767-776.

Visualization of cephalopod beak pigmentation and its application to the classification of cephalopods

LIU Bilin^{1,2,3,4}, GU Xinyu¹, WANG Bingyan⁵, CHU Moxian¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. The Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 3. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Exploitation Oceanic Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China; 5. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Cephalopod beaks are important tissues for the study of cephalopod organisms. In order to achieve the accurate measurement of pigmentation of cephalopod beaks and to investigate the role of pigmentation in the discriminative classification of cephalopod beaks, this study selected the beaks of three cephalopods, the Middle East Pacific *Dosidicus gigas*, the northwest Pacific *Ommastrephes bartrami* and the Middle East Atlantic *Ommastrephes pteropus*. The pigmentation is visualised on the basis of its lateral view image according to four classes: class I (black), class II (grey), class III (light grey) and class IV (transparent). The ratio of the area of pigmentation to the area of the hood-wing region and the area of the crest-lateral wall region was calculated for the four classes of *Dosidicus gigas*, *Ommastrephes bartrami* and *Ommastrephes pteropus*, respectively. The difference in pigmentation between the three cephalopods was analysed using stepwise discriminant analysis, and the correct rate of discrimination was 74.4%. It is suggested that there are some differences in the pigmentation of the beak of the three cephalopods, and that these differences may be due to the different life characteristics and feeding habits of the three cephalopods. The study achieves numerical and precise classification of pigmentation classes in cephalopod beak, which is a new quantitative measurement method and provides new ideas for the study of pigmentation in cephalopod beak.

Key words: cephalopod beak; visualization of pigmentation; machine vision