



基于 CT 扫描数据的黄鳍金枪鱼鱼体三维重构

宋利明^{1,2*}, 李金霖¹, 张敏^{1,2}

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为研究鱼类分类与其内部结构, 实验利用 X 射线计算机断层 (CT) 扫描技术对黄鳍金枪鱼鱼体进行扫描, 通过医学影像软件 Mimics (MIS_Research_21.0) 对 CT 扫描数据进行处理, 对黄鳍金枪鱼的骨骼、鳔和肌肉进行三维重构并测定了相应部分的体积和表面积。结果显示: ① CT 扫描可获得清晰的黄鳍金枪鱼骨骼、肌肉和鳔的影像; ② 医学影像软件 Mimics 可计算出黄鳍金枪鱼的骨骼、鳔和肌肉的体积和表面积, 其体积分别占鱼体体积的 7.76%、0.88% 和 91.36%, 表面积分别占鱼体表面积的 29.52%、0.74% 和 69.74%。研究表明: ① 使用 X 射线 CT 扫描技术是目前对鱼类损伤较小、鱼体骨骼、鳔和肌肉成像最便捷、最直观的方法; ② 医学影像软件 Mimics 可用于鱼体三维重构、计算鱼类骨骼、鳔和肌肉的体积和表面积; ③ CT 扫描可用于鱼类学、鱼病学和鱼类声学回波强度的深入研究。实验可为鱼类学、鱼病学和鱼类声学回波强度等的深入研究提供参考。

关键词: 黄鳍金枪鱼; 鱼体; CT 扫描; 三维重构; Mimics 软件

中图分类号: S 917.4; TP 391.41

文献标志码: A

黄鳍金枪鱼 (*Thunnus albacares*) 是一种高度洄游的金枪鱼类, 广泛分布在大西洋、太平洋和印度洋的热带和亚热带海域^[1]。黄鳍金枪鱼是一种相对较大的金枪鱼类, 最常见的捕获尺寸为叉长 40~150 cm, 体重 1.3~70.0 kg^[1]。该物种在约 3~5 龄、叉长 100 cm 时达到性成熟^[2-3]。近年来国内外许多学者对多种鱼类的成鱼和仔稚鱼的鱼体骨骼结构进行了研究^[4-23], 还对鱼类尾部骨骼发育情况进行了研究^[24-26], 但对金枪鱼类骨骼的探索较少^[27]。骨骼是鱼类年龄鉴定和生长发育状况分析的重要依据^[28], 研究鱼类的骨骼, 对鱼类分类学有较大的帮助。

计算机断层扫描是利用 X 射线可以穿透生物体的特性对生物体内部结构进行成像, X 射线 CT 对生物体密度的分辨率高, 不仅能够清晰显示

密度差别大的软组织和骨骼结构, 同时能清晰显示差别小的软组织结构和器官, 一般所显示的组织结构之间没有重叠。由于 CT 成像是一种数字化成像技术, 所以 CT 扫描的图像数据可以运用计算机软件进行多种后期处理, 包括二维显示、三维显示等, 可用于深入研究。

在鱼体中, 骨骼、肌肉以及带有空气囊的鳔的密度差别较大, 当 X 射线穿透鱼体时, 不同密度的部位对 X 射线的吸收程度不同, 在鱼体结构中, 骨骼部分的密度高, 对 X 射线吸收多, 照片中呈白影; 鳔部分含气体、密度低, X 射线吸收少, 呈黑影^[29]。许多学者使用 X 射线对金枪鱼类的骨骼和鳔进行了拍摄, 以研究骨骼系统, 确定鳔的位置、长度、宽度等^[27]。本实验通过 X 射线计算机断层 (CT) 扫描技术对黄鳍金枪鱼鱼体进行

收稿日期: 2021-11-27 修回日期: 2022-05-29

资助项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401301); 2021 年农业农村部海洋渔业资源调查与探捕项目 (D-8006-21-0215)

通信作者: 宋利明 (照片), 从事捕捞学研究, E-mail: lmsong@shou.edu.cn



扫描, 通过医学影像软件 Mimics 对 CT 扫描数据进行处理, 重构了黄鳍金枪鱼的骨骼、鳔和肌肉等三维图像并测定其相应的体积和表面积, 以期鱼类学、鱼病学和鱼类声学回波强度等的深入研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验对象

实验用黄鳍金枪鱼样品由浙江大洋世家股份有限公司提供, 捕自中西太平洋基里巴斯海域。该样本有关参数: 叉长 66.0 cm、体宽 13.6 cm、体高 16.5 cm、体重 5.75 kg。

1.2 实验方法

实验前将冷库中冷冻的样本提前 24 h 解冻。将鱼体放入某医院的 CT 成像系统中进行扫描。CT 成像系统的型号为: TOSHIBA Aquilion, 扫描时焦点设置为小焦点, 扫描参数为 120 kV, 100 mA, kV 为高压电下 X 射线球管产生的管电压, mA 为管电流, 二者的高低影响 CT 成像的清晰度。

1.3 数据分析

本实验选择层厚为 1 mm 进行扫描, 得到大量鱼体断层扫描图像。将 X 射线 CT 扫描图像 DICOM 文件导入 Mimics 软件 (MIS_Research_21.0) 中, 选取骨骼、鳔和肌肉进行三维重建。对于骨骼、鳔和肌肉部分, 模型可识别出每部分的 CT 值 (单位 HU), 设置骨骼的 CT 值阈值为 126~1 500 HU, 鳔和肌肉的阈值分别为 -1 015~985 HU 和 50~110 HU, 软件自动提取 CT 值阈值范围内的部分, 上述鱼体各部分阈值范围没有重叠, 可以准确把鱼体各部分分开, 此时的鱼体各个部分图像最为清晰, 在软件中构建出鱼体每个器官或组织的图像后, 软件会自动计算所建图像的体积、表面积, 在软件右下角 Object 栏中, 选中需要查看的目标图像, 点击 Properties 可以看到每个器官或组织图像的体积、表面积以及每个器官或组织在软件坐标系下的具体位置等详细信息。利用该软件中的标尺可量出鳔的最大长度和宽度。利用下列公式计算得出骨骼、鳔和肌肉的体积 (表面积) 占整个鱼体体积 (表面积) 的百分比:

$$P_i = \frac{Q_i}{Q} \times 100\%$$

式中, P_i 为 i 项的体积 (表面积) 占鱼体总体积 (表

面积) 的百分比, Q_i 为 i 项的体积 (表面积), Q 为鱼体总体积 (表面积)。

2 结果

2.1 不同部位的三维重构

通过对黄鳍金枪鱼不同器官或组织的三维重构, 可以清晰地看出黄鳍金枪鱼的整体影像 (图 1-a)、鱼体结构 (图 1-b)、骨骼结构 (图 1-c)、鳔 (图 1-d) 及其在腹腔中的相对位置 (图 1-e) 以及肌肉部分 (图 1-f)。鱼体呈纺锤形, 尾柄较细, 鳔的最大长度和宽度分别为 11.20 和 2.33 cm (图 1-a); 鱼体的腹腔较小, 肌肉较多 (图 1-b); 骨骼细密、粗壮、每节躯椎和尾椎、腹肋、背肋和脉棘等明显 (图 1-c); 鳔呈辣椒状、鳔壁较厚, 其形态清晰 (图 1-d); 鳔紧贴躯椎和腹肋, 占腹腔体积的比例较高, 在腹腔中的相对位置清晰 (图 1-e); 肌肉丰满, 呈纺锤形 (图 1-f)。

2.2 不同部位的体积和表面积

黄鳍金枪鱼骨骼、鳔、肌肉的体积和表面积以及相应的百分比见表 1。骨骼、鳔、肌肉的体积分别占整体的 7.76%、0.88% 和 91.36%, 其对应的表面积分别占 29.52%、0.74% 和 69.74%。

3 讨论

3.1 X 射线 CT 鱼体扫描成像方法的精度

X 射线 CT 鱼体扫描成像方法操作简单, 实验步骤较少, 还原度高。X 射线 CT 的优势在于对骨骼等高密度组织成像较清晰准确, 可以精确地对骨骼和软组织分别成像。目前对鱼类骨骼系统的研究主要有煮沸剥离鱼肉法^[15]、X 射线骨骼成像法^[23] 和去肉浸泡漂白法等^[16]。还有一些学者采用软骨-硬骨双染色技术, 对施氏鲟 (*Acipenser schrenckii*) 仔稚幼鱼^[30]、鳊 (*Siniperca chuatsi*) 仔稚鱼^[22], 以及尖吻鲈 (*Lates calcarifer*) 仔鱼^[21] 的骨骼系统进行连续观察, 总结出相应骨骼的生长发育规律及骨化时间。杨蕊等^[27] 使用了方斑东风螺 (*Babylonia areolata*) 舔食骨骼标本制作法获得了青干金枪鱼 (*T. tonggol*) 骨骼, 对青干金枪鱼骨骼系统做了比较详尽的分析。

本实验使用 X 射线 CT 鱼体扫描成像与三维建模软件相结合的方法对黄鳍金枪鱼鱼体各器官或组织进行三维重建得出其形态, 对硬骨鱼类的

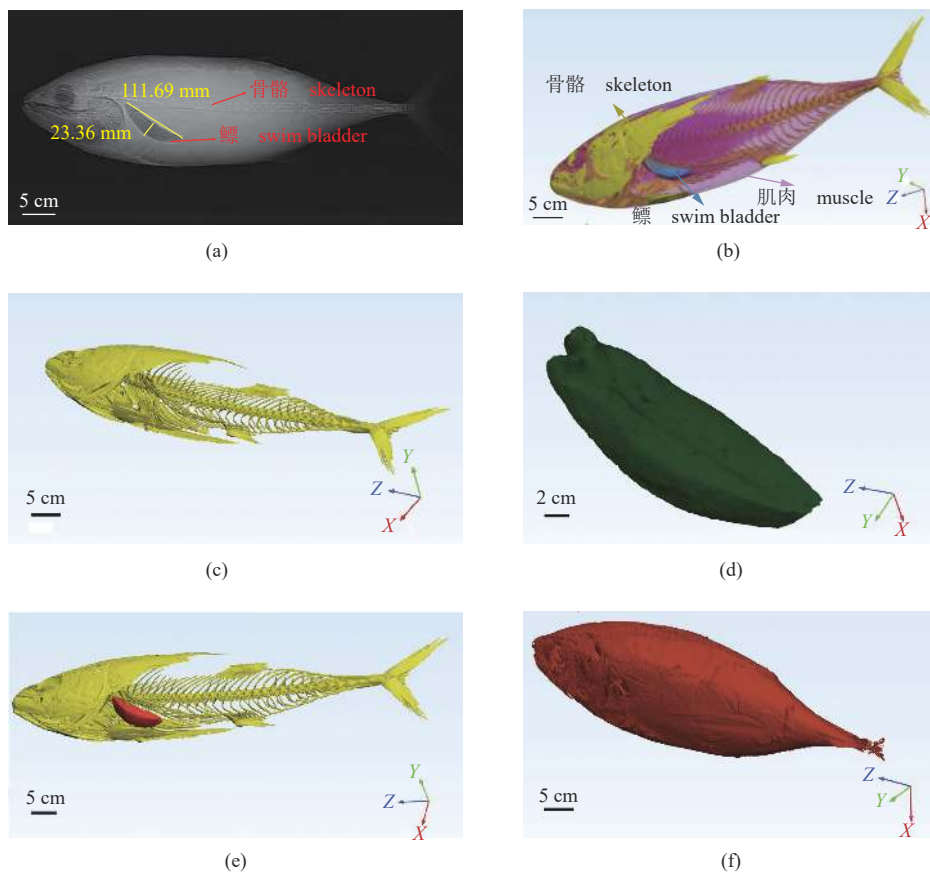


图 1 黄鳍金枪鱼 CT 扫描图像

(a) 整体影像, (b) 鱼体结构, (c) 骨骼, (d) 鳔的形态, (e) 鳔在腹腔中的相对位置, (f) 肌肉。

Fig. 1 Computed tomography (CT) scan image of *T. albacares*

(a) overall image, (b) fish body structure, (c) skeleton, (d) swim bladder morphology, (e) relative position of swim bladder in abdominal cavity, (f) muscle.

表 1 骨骼、鳔和肌肉的体积和表面积以及相应的百分比

Tab. 1 Volume and surface area of the skeleton, swim bladder and muscle, and the corresponding percentage

组织或器官 tissue or organ	相对坐标/mm relative coordinate position	体积/cm ³ volume	体积百分比/% volume percentage	表面积/cm ² surface area	表面积百分比/% surface area percentage
骨骼 skeleton	X:-85.50~80.71 Y:139.13~268.10 Z:-742.46~-46.45	381.77	7.76	3 647.81	29.52
鳔 swim bladder	X:-12.13~45.95 Y:188.98~226.56 Z:-298.45~-206.45	43.41	0.88	91.01	0.74
肌肉 muscle	X:-83.86~80.09 Y:138.63~269.46 Z:-699.45~-46.45	4 493.69	91.36	8 619.11	69.74

骨骼研究更加快捷方便。特别是对鱼体骨骼和鳔部分三维重建还原度较高, 图像可以清晰反映出鱼体骨骼和鳔的结构, 有利于鱼类学、鱼类声波回波方面的研究。通过本实验可以清楚呈现黄鳍

金枪鱼鳔的形态和其在腹腔中的相对位置, 说明黄鳍金枪鱼是有鳔鱼类, 这一结果与学者们^[31-33]的研究结果一致, 他们认为黄鳍金枪鱼生长到 2 kg 时鳔开始发育^[31], 属于有鳔鱼类。Bertrand

等^[32]根据海上观测估计, 得出 60 和 90 cm 叉长的黄鳍金枪鱼鳔的体积分别为 80 和 130 cm³, 为鱼体体积的 1.0%~1.7%。根据 Moreno 等^[34]对叉长为 45.2~70.8 cm (平均值为 58 cm) 4 尾黄鳍金枪鱼鳔的最大长度的测定, 得出平均最大长度为 11 cm, 占叉长的 20%左右。本实验中黄鳍金枪鱼的叉长为 66.0 cm, 鳔的体积为 43.41 cm³, 约为鱼体体积的 0.88%, 最大长度为 11.2 cm, 占叉长的 17%。本研究得出的结果更加精确。

3.2 X 射线 CT 鱼体扫描成像方法可用于量化分析

X 射线 CT 鱼体扫描成像方法可把鱼体结构数字化处理, 可用于鱼类器官、组织结构的量化分析。对比其他研究方法, 此方法可以快速得到鱼体各部分的体积和表面积(如骨骼、鳔和肌肉), 甚至对于某一器官的内部结构进行深入分析, 有利于养殖的名贵鱼类活体, 如蓝鳍金枪鱼(*T. thynnus*)、马苏金枪鱼(*T. maccoyii*)等鱼病的诊断。今后还可以对活体鱼类的生物学特性进行深入研究, 可以通过图像找到耳石, 测定同一尾鱼在不同的生长条件下耳石的形态变化参数等。

3.3 X 射线 CT 鱼体扫描成像的不足

X 射线 CT 成像, 利用生物体中不同组织对 X 射线的吸收能力不同进而穿过生物体后 X 射线的能量不同进行成像。X 射线可以精确区分人体中的骨骼和肌肉, 对于鱼类而言, 其各部分组织、器官的密度与人类的存在一定的差距, 特别是鱼类头部的肌肉密度不同于鱼体其他部分, 本实验所使用的 X 射线 CT 扫描机成像精度一般, 对于鱼体头部的肌肉和骨骼分辨率偏低。今后如果要对鱼类头部的结构和组织进行精确研究, 建议使用成像精度较高的 X 射线 CT 扫描机。

3.4 展望

本方法肌肉部分的形态和体积计算存在一定的误差。骨骼密度高, 吸收的 X 射线量多, 影像在照片上成白影, 充满空气的鳔密度小, 吸收的 X 射线量少, 影像呈现黑影。肌肉的密度较小, 介于骨骼和鳔的密度之间, 选取密度阈值需要有一定的经验。本实验所用的黄鳍金枪鱼经过反复的冷冻、化冻, 肌肉的密度发生一定的变化, 也影响了鱼体的完整性, 对肌肉部分的三维重建造成一定的误差。今后应不断积累各个组织、器官

选取密度阈值的经验, 使用鲜度较好的鱼类进行实验, 以提高测定精度。

感谢浙江大洋世家股份有限公司和中水集团远洋股份有限公司的大力支持。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Collette B B, Nauen C E. FAO species catalogue: Vol. 2. scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1983.
- [2] Zhu G P, Xu L X, Zhou Y Q, et al. Reproductive biology of yellowfin tuna *T. albacares* in the west-central Indian Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2008, 7(3): 327-332.
- [3] Kailola P J, Williams M J, Stewart P C, et al. Australian fisheries resources[M]. Canberra: Bureau of Resource Sciences, Australia, 1993.
- [4] 林华英. 牙鲆骨骼结构与生态习性统一性的研究[J]. *海洋科学*, 1985, 9(3): 28-31.
Lin H Y. Studies on the unity of skeleton structures and its ecological habit of left-eyed flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J]. *Marine Sciences*, 1985, 9(3): 28-31 (in Chinese).
- [5] 苏锦祥, 孟庆闻, 唐宇平. 团头鲂骨骼系统的发育[J]. *水生生物学报*, 1989, 13(1): 1-14.
Su J X, Meng Q W, Tang Y P. Development of skeletal system of *Megalobrama amblycephala* (Pisces: Cyprinidae)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1989, 13(1): 1-14 (in Chinese).
- [6] Gosline W A. Functional morphology of the caudal skeleton in teleostean fishes[J]. *Ichthyological Research*, 1997, 44(2): 137-141.
- [7] 李仲辉. 鲈和蓝点马鲛骨骼系统的比较[J]. *湛江海洋大学学报*, 2000, 20(3): 1-7.
Li Z H. Comparative study on the skeletal system of *Pneumatophorus japonicus* (Hourruyn) and *Scomberomorus niphomius* (C. et V.)[J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 2000, 20(3): 1-7 (in Chinese).
- [8] 李仲辉, 杨太有. 大口黑鲈和尖吻鲈骨骼系统的比较

- 研究[J]. 动物学报, 2001, 47(S1): 110-115.
- Li Z H, Yang T Y. Studies on osteology of *Micropterus salmoides* (Lacepede) and *Lates calcarifer* (Bloch)[J]. Journal of Animal, 2001, 47(S1): 110-115 (in Chinese).
- [9] 陈刚, 张健东, 吴灶和. 军曹鱼骨骼系统的研究[J]. 湛江海洋大学学报, 2004, 24(6): 6-10.
- Chen G, Zhang J D, Wu Z H. Morphological observation on the skeleton of *Cobia, Rachycentron canadum* (Linnaeus)[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2004, 24(6): 6-10 (in Chinese).
- [10] Frederich B, Parmentier E, Vandewalle P. A preliminary study of development of the buccal apparatus in Pomacentridae (Teleostei, Perciformes)[J]. *Animal Biology*, 2006, 56(3): 351-372.
- [11] 李仲辉, 关建义. 侧斑离鳍鱼 *Hemipteronotus Verrens* (J. et. E.) 骨骼的研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 157-159.
- Li Z H, Guan J Y. Observations on the skeleton of *Hemipteronotus Verrens* (J. et. E.) [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2007, 35(1): 157-159 (in Chinese).
- [12] 陈晓峰. 两种石斑鱼骨骼系统比较解剖研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007: 49-59.
- Chen X F. Comparative studies of the skeleton system of two groupers[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007: 49-59 (in Chinese).
- [13] 李仲辉, 杨太有. 秋刀鱼 *Cololabis saira* Brevoort 骨骼的研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 150-152.
- Li Z H, Yang T Y. Skeleton of *Cololabis saira* Brevoort[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2007, 35(4): 150-152 (in Chinese).
- [14] 杨凡, 郭明兰, 苏永全, 等. 红罗非鱼的骨骼系统[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(S1): 161-166.
- Yang F, Guo M L, Su Y Q, et al. The skeletal system of *Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2007, 46(S1): 161-166 (in Chinese).
- [15] 孙金辉, 乔秀亭, 白东清, 等. 金鱧骨骼系统解剖观察[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(26): 14451-14454.
- Sun J H, Qiao X T, Bai D Q. et al. Research on the anatomy skeleton system of *Oncorhynchus myhiss*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(26): 14451-14454 (in Chinese).
- [16] 李仲辉, 靳萍, 杨太有. 斑鳍方头鱼骨骼学研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2012, 40(2): 137-139.
- Li Z H, Jin P, Yang T Y. Skeleton system of *Branchiostegus auratus*[J]. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(2): 137-139 (in Chinese).
- [17] 李仲辉, 马云霞, 杨太有. 长尾大眼鲷骨骼学的研究[J]. 水产科学, 2012, 31(12): 741-744.
- Li Z H, Ma Y X, Yang T Y. Observation of skeleton system in spotfin bigeye *Priacanthus tayenus* Richardson[J]. *Fisheries Science*, 2012, 31(12): 741-744 (in Chinese).
- [18] 王秋荣, 毕建功, 林利民, 等. 青石斑鱼骨骼发育异常的形态特征[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(5): 417-421.
- Wang Q R, Bi J G, Lin L M, et al. Skeletal abnormalities in cultured juvenile yellow grouper *Epinephelus awoara*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2012, 27(5): 417-421 (in Chinese).
- [19] 郭长江, 赵文, 石振广, 等. 达氏鳇幼鱼骨骼系统解剖研究[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(3): 301-306.
- Guo C J, Zhao W, Shi Z G, et al. Skeletal system of juvenile Kaluga sturgeon *Huso dauricus*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, 31(3): 301-306 (in Chinese).
- [20] 杨启超, 张晓华, 鲍传和. 白斑狗鱼 (*Esox lucius* Linnaeus) 的骨骼结构[J]. 安徽农业大学学报, 2016, 43(5): 704-710.
- Yang Q C, Zhang X H, Bao C H. The skeletal system of *Esox lucius* Linnaeus[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2016, 43(5): 704-710 (in Chinese).
- [21] 周胜杰, 马婷, 胡静, 等. 尖吻鲈仔鱼骨骼发育观察[J]. 南方农业学报, 2018, 49(3): 592-598.
- Zhou S J, Ma T, Hu J, et al. Skeleton development observation of *Lates calcarifer* larva fish[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(3): 592-598 (in Chinese).
- [22] 曹晓颖, 赵金良, 陈晓武, 等. 鳊仔稚鱼骨骼系统骨化发育[J]. 中国水产科学, 2019, 26(2): 304-313.
- Cao X Y, Zhao J L, Chen X W, et al. Early ossification of the skeletal system in larval and juvenile *Siniperca chuatsi*[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2019, 26(2): 304-313 (in Chinese).
- [23] 王梦婷, 韩雨哲. 4种常见金鱼骨骼的比较[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(18): 90-92, 107.

- Wang M T, Han Y Z. Comparison of bone among 4 species of common goldfishes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(18): 90-92,107 (in Chinese).
- [24] Gavaia P J, Dinis M T, Cancela M L. Osteological development and abnormalities of the vertebral column and caudal skeleton in larval and juvenile stages of hatchery-reared Senegal sole (*Solea senegalensis*)[J]. *Aquaculture*, 2002, 211(1-4): 305-323.
- [25] Koumoundouros G, Sfakianakis D, Maingot E, et al. Osteological development of the vertebral column and of the fins in *Diplodus sargus* (Teleostei: Perciformes: Sparidae)[J]. *Marine Biology*, 2001, 139(5): 853-862.
- [26] Koumoundouros G, Gagliardi F, Divanach P, et al. Normal and abnormal osteological development of caudal fin in *Sparus aurata* L. fry[J]. *Aquaculture*, 1997, 149(3-4): 215-226.
- [27] 杨蕊, 于刚, 胡静, 等. 青干金枪鱼骨骼系统研究[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(2): 36-43.
- Yang R, Yu G, Hu J, et al. Research on skeleton system of *Thunnus tonggol*[J]. *South China Fisheries Science*, 2021, 17(2): 36-43 (in Chinese).
- [28] 王映, 赵金良, 柯巧珍, 等. 大黄鱼养殖群体和野生群体骨骼micro CT扫描显微结构比较[J]. *海洋科学*, 2016, 40(12): 36-40.
- Wang Y, Zhao J L, Ke Q Z, et al. Comparison of bone microstructures in cultured and wild stocks of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) using micro CT scanning[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(12): 36-40 (in Chinese).
- [29] 张学龙. 医学影像物理学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Zhang X L. Course in medical imaging physics [M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [30] 高丽楠, 胡红霞, 王巍, 等. 施氏鲟仔稚幼鱼骨骼系统发育观察[J]. *大连海洋大学学报*, 2021, 36(2): 295-302.
- Gao L N, Hu H X, Wang W, et al. Observation of skeletal system development of larval and juvenile Amur sturgeon *Acipenser schrenckii*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2021, 36(2): 295-302 (in Chinese).
- [31] Magnuson J J. Comparative study of adaptation for continuous swimming and hydrostatic equilibrium of scombroid and xiphoid fishes[J]. *Fishery Bulletin*, 1973, 71(2): 337-356.
- [32] Bertrand A, Josse E, Massé J. *In situ* acoustic target-strength measurement of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1999, 56(1): 51-60.
- [33] Josse E, Bertrand A. *In situ* acoustic target strength measurements of tuna associated with a fish aggregating device[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57(4): 911-918.
- [34] Moreno G, Boyra G, Salaberria X, et al. Towards acoustic discrimination of tuna species at FADs: measuring acoustic properties of yellowfin tuna[R]. La Jolla: SAC-08 INF B, Inter-American tropical tuna commission scientific advisory committee eighth meeting, 2017.

Three-dimensional reconstruction of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) body based on CT scan data

SONG Liming^{1,2*}, LI Jinlin¹, ZHANG Min^{1,2}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Distant-water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The skeleton, swim bladder, muscle and so on are the basic structure of fish body, which is also the basis of studies on the classification and internal structure of fish. In recent years, many scholars at home and abroad studied the fish body internal skeleton structure for a variety of fish, but there was few exploration to the skeleton of tunas. X-ray computed tomography (CT) uses the characteristics of X ray that can penetrate the organism and the internal structure imaging of the organism can be built. X-ray CT has the higher resolution for the density of the organ. X-ray CT can display the large density difference between the soft tissue and skeleton structure clearly, it can also display the small density difference between soft tissue structures and organs. Because CT imaging is a kind of digital imaging, the image data of CT can be processed in different methods by using computer software, including three-dimensional display, etc., and can be used for further in-depth study. In this paper, the body of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) was scanned by X-ray CT, the layer thickness is 1 mm, and the study method and results can be used to provide the reference for the further studies on ichthyology, fish pathology and fish acoustic target strength. The *T. albacares* was provided by the Chinese pelagic fishery enterprise and was caught from the Kiribati waters in the western and central Pacific Ocean. The fork length, body wide, body height, and body weight of this fish were 66.0 cm, 13.6 cm, 16.5 cm, and 5.75 kg, respectively. Before the measurement, the fish was taken out from the cold storage 24 hs ahead of time. The fish was put into a CT scan system in the hospital. The model of the CT scan system was TOSHIBA Aquilion. The CT data were input into the medical imaging software Mimics (MIS_Research_21.0). The software can be used to identify the CT value (unit: HU) of skeleton, swim bladder, and muscles. The CT threshold value of the skeleton, swim bladder, and muscles were set to 126-1 500, -1 015- -985, and 50-110 HU, respectively. The software automatically extracted CT values within the threshold range of skeleton, swim bladder, and muscles. The 3D images of skeleton, swim bladder, muscles, the body internal structure and the relative position of the swim bladder in the body internal structure of *T. albacares* were reconstructed and their corresponding volumes and surface areas etc. were measured. The results showed that: ① the clear images of *T. albacares* skeleton, muscles and swim bladder etc. can be obtained by X-ray CT scan; ② mimics, a medical imaging software, can be used to calculate the volumes and surface areas of skeleton, swim bladder and muscle of *T. albacares*. The volume of skeleton, swim bladder and muscle of *T. albacares* was accounting for 7.76%, 0.88% and 91.36% of the fish body volume, respectively and the surface area of skeleton, swim bladder and muscle of *T. albacares* was accounting for 29.52%, 0.74% and 69.74% of body surface area, respectively. This study suggested that: ① X-ray CT scanning is the low injury, most convenient and intuitive method for imaging fish skeleton, swim bladder and muscle; ② mimics, a medical imaging software, can be used to reconstruct the fish body and calculate the volumes and surface areas of fish skeleton, swim bladder and muscle; ③ X-ray CT scanning can be used for the in-depth study of ichthyology, fish pathology and fish acoustic target strength.

Key words: *Thunnus albacares*; fish body; computed tomography; 3D reconstruction; Mimics software

Corresponding author: SONG Liming. E-mail: lmsong@shou.edu.cn

Funding projects: National Key R & D Program (2023YFD2401301); Marine Fishery Resources Investigation Project of the Ministry of Agriculture and Rural Areas in 2021 (D-8006-21-0215)