

文章编号: 1674-5566(2023)03-0637-12

DOI:10.12024/jsou.20221004006

## 大型游泳动物卫星标志技术应用进展

曾晓起<sup>1</sup>, 陈思远<sup>1,2</sup>, 刘世刚<sup>2</sup>, 王 芮<sup>2</sup>, 赵林林<sup>3</sup>, 李 渊<sup>2</sup>, 林龙山<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 水生动物行为生理与资源生态实验室, 山东 青岛 266003; 2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 3. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 掌握大型游泳动物的迁徙和分布情况是分析其种群动态、开展种群保护管理的基础, 但大型游泳动物游泳能力强、活动范围广、回捕难度大, 传统标志放流技术具有很大的局限性。卫星标志放流技术因其不依赖回捕、数据采集量大、准确性高等特点已成为研究深远海大型游泳动物种群变动和行为习性的有效技术手段之一。目前, 主流卫星标志均是基于 Argos 卫星系统开发, 通过卫星信道进行传输, 相较依赖回收的传统标志优势显著。综述卫星标志的工作原理、发展历程、主要卫星标志种类, 介绍主要应用进展, 总结存在问题, 提出研究展望, 旨在为大型游泳动物种群变动和行为习性研究提供参考资料。

**关键词:** 卫星标志; Argos 系统; 行为模式; 大型游泳动物

**中图分类号:** S 932 **文献标志码:** A

大型游泳动物包括远洋渔业捕捞的金枪鱼、剑鱼类等经济鱼类, 也包括鲨鱼、海龟等全球关注的保护对象。掌握大型游泳动物的迁徙和分布是了解其种群动态、进行种群保护管理的基础<sup>[1]</sup>。早期开展相关研究时, 一般采用挂牌法或剪鳍法等标志手段, 后来发展出了金属编码标签、传统档案式标志以及超声波标志、无线电标志等标志手段<sup>[2-4]</sup>, 但均需要对标志个体进行回捕或长期观测。随着卫星技术的发展, 20 世纪末期卫星标志技术产生并快速发展, 该方法不依赖回捕、无须建设基站, 成为研究深远海大型游泳动物最有效的技术手段之一<sup>[5-9]</sup>。除了位置信息外, 卫星标志在工作过程中可持续获取深度、温度、光照等数据, 为标志物种行为习性和生活环境的研究提供了重要依据<sup>[8]</sup>。

卫星标志技术创造性地解决了数据回收困难的窘境, 被用作数据收集手段广泛应用于各个研究领域<sup>[10-17]</sup>。但此前的研究<sup>[3, 18-19]</sup>大多将卫星标志技术作为一种数据收集手段与其他技术结合, 或将卫星标志作为档案式标志的一个分支介绍。因此, 有必要聚焦于卫星标志本身做一个系

统性的回顾。

笔者针对卫星标志放流技术的发展历程、几种卫星标志放流类型的优劣及具体应用, 以及目前存在的问题等进行回顾和综述, 并提出相应的总结和展望, 以期为大型游泳动物种群变动和行为习性等研究提供参考。

### 1 卫星标志工作原理及常见种类

卫星标志 (Satellite archival tags, SATs) 相较于传统的放流标志, 其最大的特点是通过卫星信道上传数据, 使得无需回收标志物即可实现对标志对象活动位置的追踪及周边环境参数的采集<sup>[20]</sup>。卫星标志作为一种物理标志, 具有可存储数据量大、数据分辨率高、真实性强等特点, 适合对大型游泳动物进行追踪。

#### 1.1 卫星标志结构及工作原理

根据 Wildlife computers 公司提供的示意图 (图 1) 可看出, 卫星标志主体由传感器、信号装置和链接装置等 3 部分组成, 通过钢丝绳、胶水等将标志固定在标志对象体表。卫星标志与传统标志的区别主要体现在: 基于光照的经纬度获取

收稿日期: 2022-10-27 修回日期: 2022-12-27

基金项目: 全球变化与海气相互作用 (二期) 专项 (GASI-01-EIND-YD01 aut/spr/02 aut)

作者简介: 曾晓起 (1963—), 男, 教授, 研究方向为渔业资源。E-mail: zengxq@ouc.edu.cn

通信作者: 林龙山, E-mail: linlongshan@tio.org.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>

和信号传输这两个方面。卫星标志的时间序列经纬度是通过光照传感器获取日出日落时间及天顶角反演,这种计算坐标利用太阳高度角最大出现时刻(当地时间中午 12:00)与国际标准时时差来获取经度,利用光照时间长(日出到日落时刻)计算纬度<sup>[21]</sup>,理论精度可达 250 m。Argos 系统作为低轨道的极轨卫星,可覆盖包括南北极在内的全球范围,而信号传输则得益于低轨卫星和 Argos 卫星灵敏度极高的接收器,对地面信号发射器的要求极低,仅 0.1 ~ 2.0 W 就可以进行卫星信号的传输,每次卫星过顶大约 8 ~ 15 min<sup>[22]</sup>,在此期间卫星标志可向卫星发送数据。

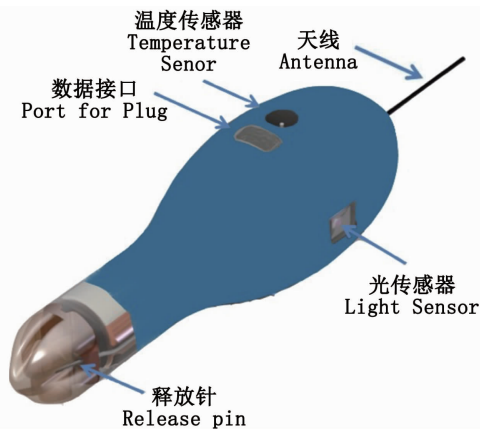


图 1 分离式卫星标志示意图  
Fig. 1 Pop-up Satellite Archival Tags

卫星标志按链接方式可分为 2 种:分离式和不分离式卫星标志。在完成卫星标志准备进行放流前,需要根据数据需求进行工作时长、数据采集精度、数据种类等程序预设。卫星标志后进

入水中,自动打开传感器和内置的时钟装置,根据设置的时间间隔采集时间序列数据。其中分离式卫星标志在达到预设工作时间或满足其他预设的脱离条件后熔断链接装置悬浮于水面,在接下来几天内持续向经过的 Argos 卫星发射数据包;不分离式卫星标志则在标志生物每次上浮至水面后向 Argos 卫星发射数据包。每枚卫星标志所能采集的数据总量与电池电量及内存大小有关,一般要求预设数据采集量不超过最大数据传输量的 110%。Argos 卫星在接收到数据后会及时反馈给地面中心进行位置计算和数据处理,用户可通过网络平台下载所需数据<sup>[8]</sup>。

## 1.2 卫星标志信号传输系统发展历程

目前,常用的卫星标志基本都是基于 Argos 卫星进行数据传输。Argos 卫星系统建立于 1978 年,由法国航天局(Centre national d'études spatiales, CNES)、美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)共同建立,包括欧洲气象卫星组织(Eumetsat)和印度空间研究组织(Indian Space Research Organisation, ISRO)等其他几个国际空间机构也积极参与 Argos 系统的维护及升级<sup>[23]</sup>。目前由 CNES 的子单位 CLS (Collecte localisation satellites)负责管理。

Argos 卫星系统作为分离式卫星标志的数据接收部分,其体系发生了 3 次较大的变化,分为 Argos-1、Argos-2、Argos-3 体系(表 1)。

表 1 Argos 系统的主要参数  
Tab. 1 Main parameters of Argos system

主要参数 Main parameters	单行道系统 Single-lane system		双行道系统 Two-lane system
系统 System	Argos-1	Argos-2	Argos-3
发展历程 Development	1998—2001	1998—2003	2003—2021
带宽 Bandwidth/kHz	24	80	110
上行速率 Uplink rate/bps	400	400	400 ~ 4 800
信道数 Channels	4	8	12

根据 Argos 卫星与标志之间的通信过程的区别,可将其大致分为 2 类,即单行道系统通信(Argos-1、Argos-2)和双行道系统通信(Argos-3)过程。单行道系统下,用户无法对分离式卫星标志进行实时控制,Argos-1 与 Argos-2 系统的主要

区别在于带宽的提升。而双行道系统的 Argos-3 系统,拥有双向传输信息的能力,用户可以对浮标发送一些简单的命令,如开关机操作、重新启动标志等,同时浮标在与卫星的沟通中能够通过调整数据传输模式和数据传输的时间节点以降

低功耗<sup>[8]</sup>。

### 1.3 常见卫星标志种类

目前,卫星标志的生产厂家主要有 2 家,分别是 Microwave telemetry 公司和 Wildlife computers 公司,均基于 Argos 平台开发。同样基于 Argos 平台的还有 Desert star systems 公司和 Lotek wireless 公司等<sup>[24]</sup>,但由于产品覆盖面较小,可替代性高,故在此只列出主要的 2 家公司, Microwave telemetry 公司和 Wildlife computers 公司(表 2)。其中 Microwave telemetry 公司于 1997 年生产了全球第一个分离式卫星标志,用于传输地理位置和温度数据,为种群管理和鱼类洄游研究提供了全新的技术手段。目前, Microwave telemetry 生产的游泳动物分离式卫星标志(Pop-

up satellite archival tag, PSAT) 共两种型号, PTT-100 和 X-Tag。其中 X-Tag 的体积相较 PTT-100 小 43%, 质量少了 42%, 更适合追踪较小的物种。但 PTT-100 的续航能力更强, 允许更长的传输周期, 返回数据百分比更高。Wildlife computers 公司的产品相较 Microwave telemetry 公司更为丰富, 针对不同目标设计了具有针对性的标志。MINIPAT、SPAT 和 MRPAT 为分离式标志, 其中 SPAT 和 MRPAT 不记录位置时间序列数据, 仅在弹出后反馈弹出位置和日期。SPOT 和 SPLASH10 作为不分离式标志, 需要直接与卫星建立联系, 须应用于能够上浮至水面的生物背部。

表 2 常见卫星标志种类

Tab. 2 Types of common Satellite Archival Tags

主要参数 Main parameters	Microwave telemetry (MTI)			Wildlife computers (WC)			
	PTT-100	X-Tag	MRPAT	SPAT	MINIPAT	SPOT	SPLASH10
弹出功能 Popup function	√	√	√	√	√	×	×
时间序列数据 Time-series data	√	√	×	×	√	√	√
深度(压力)传感器 Depth (Pressure) sensor	√	×	√	√	√	√	√
空气中质量 Mass in Air/g	78	46	40	60	60	39~390	69
使用寿命 Life/d	30~360(SR)	30~360(SR)	720	60	720	171~1486	112~120
	1~30(HR)	1~30(HR)					

注:SR. 标准采样模式;HR. 高速采样模式。

Notes:SR. Standard Rate; HR. High Rate.

尽管 Wildlife computers 公司和 Microwave telemetry 公司的卫星标志在尺寸、外观、传感器等方面相似,但在具体功能的实现方式上存在一些细节上的差异:例如 Wildlife computers 公司的卫星标志使用专用 Argos 发射器 Cricket,可以稳定进行 100 000 次传输;而 Microwave telemetry 公司的产品则通过 Satellite-in View (SIVTM) 技术实现 15 000 次高效传输。此外, Microwave Telemetry 公司的数据预部署编程和数据解码与处理都是由制造商提供,减少由用户设置差异导致的偏差,而 Wildlife computers 公司则把这项功能交给用户设置,可以根据需求自行调整;同时, Microwave telemetry 公司仅提供原始时间序列数据,但 Wildlife computers 公司提供这些参数的汇总直方图。

为探究影响放流成功率的主要因素,统计了近 5 年以来使用卫星标志的放流情况<sup>[25-44]</sup>,包括

来自 Wildlife computers 公司和 Microwave telemetry 公司的 7 种共计 777 个卫星标志,根据标志对象的物种进行分类。结果显示总体数据回收率在 82.4%,成功完成预计放流目标的卫星标志只占整体的 27.8%。其中, Wildlife computers 公司卫星标志数据回收率 87.8%, Microwave telemetry 公司卫星标志数据回收率 74.4%,但不同生产厂家对成功率的影响并不明显,成功率与标志动物种类关系更大,其中海龟、鲸偶蹄目的数据回收率更是高达 100% (表 3)。

## 2 卫星标志技术应用

卫星标志技术根据需要灵活选配传感器和卫星标志型号,有针对性地获取数据,可以用于记录大型游泳动物的栖息地偏好、水平和垂直运动、种群变动和死亡率等。目前,国内外学者基于卫星标志技术开发出了一系列应用,主要包括

存活率评估、行为模式追踪、洄游监测、分布范围界定等。

### 2.1 存活率评估

放流初期的放流种类存活率是评估放流效果的重要参数<sup>[45]</sup>,一般采用的方法有渔获量曲线

分析法<sup>[46]</sup>、标志-回捕法<sup>[47]</sup>等两大类,但对放流生物的回捕依旧是最直观,最精确的数据来源<sup>[48]</sup>。对于海洋大型游泳动物,放流数量较少、活动范围大,回捕难度高,不依赖回捕的卫星标志放流技术成了最合适的技术手段。

表 3 2018 年来卫星标志的放流情况汇总表

Tab.3 Summary of satellite archival tags record since 2018

生产厂家 Company	类 Species type	物种 Species	标志种类 Types of Tags	标志数量 Number	追踪时间 Time/d	数据回收率 Data recovery rate/%	达到预期占比 Reach target ratio/%	参考文献 Reference
		鼬鲨 <i>Galeocerdo cuvier</i>	SPOT	69	4 ~ 318	47/69	0/69	[25]
		鼬鲨 <i>Galeocerdo cuvier</i>	PSAT	10	4 ~ 27	-	-	[25]
		长吻翅鲨 <i>Galeorhinus galeus</i>	MINI	4	168 ~ 253	4/4	-	[26]
		锤头双髻鲨 <i>Sphyrna zygaena</i>	MINI	8	6 ~ 150	7/8	3/8	[27]
	软骨鱼纲 Chondrichthyes	路氏双髻鲨 <i>Sphyrna lewini</i>	MINI	1	180	1/1	1/1	[28]
		噬人鲨 <i>Carcharodon carcharias</i>	PSAT	35	1 ~ 381	34/35	-	[29]
		大青鲨 <i>Prionace glauca</i>	PSAT + SPOT	3	107 ~ 180	3/3	2/3	[30]
		灰鯖鲨 <i>Isurus oxyrinchus</i>	PSAT + SPOT	1	180	1/1	1/1	[30]
Wildlife computers		灰鯖鲨 <i>Isurus oxyrinchus</i>	MINI	29	0 ~ 121	28/29	4/29	[31]
		灰鯖鲨 <i>Isurus oxyrinchus</i>	SPAT	12	1 ~ 30	11/12	7/12	[31]
		狭鳞庸鲈 <i>Hippoglossus stenolepis</i>	MK10	145	11 ~ 370	121/145	-	[32]
		大西洋蓝枪鱼 <i>Makaira nigricans</i>	MK10	3	24 ~ 83	3/3	0/3	[33]
	硬骨鱼纲 Osteichthyes	大西洋蓝鳍金枪鱼 <i>Thunnus thynnus</i>	PSAT	18	3 ~ 365	15/18	5/18	[34]
		剑旗鱼 <i>Xiphias gladius</i>	MINI	24	0 ~ 240	22/24	6/24	[35]
		剑旗鱼 <i>Xiphias gladius</i>	SPAT + MINI	9	0 ~ 180	8/9	1/9	[36]
鲸偶蹄目 Cetartiodactyla		座头鲸 <i>Megaptera novaeangliae</i>	SPLASH10	19	1.3 ~ 12.5	19/19	-	[37]
	海龟 <i>Chelonia</i> spp.	绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>	SPLASH10	78	26 ~ 687	78/78	51/78	[38]
		玳瑁 <i>Eretmochelys imbricata</i>						[38]

· 续表 3 ·

生产厂家 Company	类 Species type	物种 Species	标志种类 Types of Tags	标志数量 Number	追踪时间 Time/d	数据回收率 Data recovery rate/%	达到预期占比 Reach target ratio/%	文献出处 Reference
		长吻锯鲨 <i>Pristiophorus cirratus</i>	SR	2	14 ~ 23	2/2	-	[39]
		长吻锯鲨 <i>Pristiophorus cirratus</i>	HR	1	14	1/1	-	[39]
	软骨鱼纲 Chondrichthyes	锤头双髻鲨 <i>Sphyrna zygaena</i>	SR	3	6 ~ 28	2/3	0/3	[27]
		锤头双髻鲨 <i>Sphyrna zygaena</i>	HR	2	31 ~ 31	2/2	2/2	[27]
		噬人鲨 <i>Carcharodon carcharias</i>	PSAT	1	117	1/1	0/1	[29]
Microwave telemetry		欧洲鳗鲡 <i>Anguilla anguilla</i>	PTT-100	19	32 ~ 366	19/19	2/19	[40]
		大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	X-TAG	227	1 ~ 313	156/227	-	[41]
	硬骨鱼纲 Osteichthyes	大鳞大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	X-TAG	26	9 ~ 143	19/26	0/26	[42]
		鲱鳉 <i>Coryphaena hippurus</i>	X-TAG	5	7 ~ 40	5/5	-	[43]
		鲱鳉 <i>Coryphaena hippurus</i>	HR-TAG	2	8 ~ 30	2/2	-	[43]
	海龟 <i>Chelonia</i> spp.	绿海龟 <i>Chelonia mydas</i>	PTT-100	21	10 ~ 152	21/21	-	[44]

注:表中“-”表示该参数未公布。

Notes: “-” in the table indicates that the parameter is not published.

卫星标志技术评估放流物种的存活率主要通过其搭载的加速度传感器和倾斜传感器,当鱼体活动时,原本垂直悬浮于标志物上方的卫星标志会产生一定的倾斜角,倾角的突然变化指示游泳行为的开始<sup>[6, 49]</sup>。同时,基于压强的深度传感器也可以提供一个阈值,即深度大于 1 000 m (阈值可根据鱼种自行设置)或长期漂浮于水面(24 h 或以上),即可认定标志生物死亡。AALBERS 等<sup>[50]</sup>对美国西海岸布放的链接浮标装置(类似于延绳钓的一种捕捞装置)所误捕的深海长尾鲨(*Alopias superciliosus*)的放流死亡率进行了研究。为了评估链接浮标所捕获的深海长尾鲨在释放后 30 d 内的存活率, AALBERS 等<sup>[50]</sup>将 SPAT 和 MINIPAT 附着到链接浮标捕获的 14 条深海长尾鲨背鳍基部,通过 SPAT 专用软件记录释放后的运动状况,并通过温度、深度和相对光照的变化辅助判断是否存活,以此计算释放 30 d 后存活率。结果表明,除一只深海长尾鲨在释放后被丝线缠绕窒息而死后,其他深海长尾鲨均在释放后的 30 d 内保持存活,存活率为 93%。该研究为当地的远洋渔业提供了重要的数据,有助于进一步

降低日间深层捕捞的副渔获率,优化渔获物组成结构。

卫星标志技术对存活率的评估对于渔业政策的制定也有一定的指导作用。C&R (Catch-and-release) 模式作为一种管理策略,要求垂钓者将捕获的庸鲽(*Hippoglossus hippoglossus*)进行释放,其降低庸鲽捕捞死亡率的效果备受质疑。为探究庸鲽放流后的死亡率, FERTER 等<sup>[51]</sup>使用了 10 个 X-Tag 和 1 个 MINIPAT 对 11 只庸鲽进行了为期 248 d 的监测,通过监测被标志个体的垂直迁移模式来确定是否存活。结果显示,在 9 个成功反馈数据的标志中,庸鲽的短期(释放后 3 d 内)死亡率为 0。就长期死亡率而言,整个监测期间内所有卫星标志均未返回死亡数据,该研究证明庸鲽适合采用 C&R 管理模式。

## 2.2 行为模式追踪

在动物学研究中,行为模式是重要的研究内容<sup>[52]</sup>,可以反映动物的生活习性、生理需要、种间及种内关系等<sup>[53]</sup>,对于野生动物资源的保护及开发利用有重要意义。卫星标志放流技术提供了一种简捷直观的方式对大型游泳动物进行追踪,

持续获取数据以观测其行为模式。其中行为模式的研究内容主要包括两大类:活动节律和行为时间分配。活动节律主要指动物在不同时空尺度下表现出的规律性、周期性的活动<sup>[54]</sup>,对于大型游泳动物来说,规律的昼夜垂直迁移(Diel vertical migrations, DVM)行为<sup>[5,20,55-57]</sup>是一种非常重要的行为模式研究对象。COSGROVE 等<sup>[58]</sup>利用 X-Tag 对 10 尾长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)进行了追踪,发现长鳍金枪鱼存在规律的 DVM 行为,且下潜深度与季节相关,叶绿素质量浓度与下潜深度也存在相关性。该研究证明卫星标志技术可以成为大型游泳动物行为模式研究的有效数据采集手段。

由于直接观测难度较大,研究陆生动物常用的瞬时扫描法、路线调查法等直接观测法很难适用于大型游泳动物<sup>[59-61]</sup>。卫星标志放流技术根据其搭载的温度、压力和加速度传感器等可以间接获取其行为时间分配数据,从而获取其在不同水层的时间分配<sup>[62-63]</sup>。HERNÁNDEZ-TLAPALE 等<sup>[63]</sup>利用刺网捕获产卵季节的加利福尼亚湾石首鱼(*Totoaba macdonaldi*),并使用分离式卫星标志标记了其中 10 尾,每隔 4 min 采集环境水温、深度、瞬时运动加速度、环境光照和用于位置估计的地磁场强度。结果发现,加利福尼亚湾石首鱼的垂直分布深度为 10~50 m,其中 47% 的时间分布在 25~35 m 水层;其栖息地水温为 17~26 °C,其中 80% 的时间分布在 21~23 °C 水层,其垂直运动的深度及模式与月相和水温均有显著相关性( $P < 0.05$ )。这项研究表明了加利福尼亚湾石首鱼对特定水温和深度的偏好情况,有助于对其进行更好地资源保护。

### 2.3 洄游监测

大型游泳动物较大的分布范围和较快的游泳速度决定了传统的研究方法很难记录一个较长时间段内的完整活动过程,卫星标志放流技术的高分辨率和长追踪时间特性使其成为了绝佳的技术手段。可以用于观测较长时间、较大空间跨度的行为,如洄游<sup>[64-67]</sup>和栖息地选择<sup>[68-70]</sup>等。

洄游是某些游泳动物的重要特征,一般具有相对固定的时间和路线。研究洄游特征对于资源增殖、保护区规划有重要科学意义<sup>[71]</sup>。但是海洋游泳动物的取样难度大,研究其洄游难度大<sup>[72]</sup>。因此,研究者们将目光投向了卫星标志技

术,通过卫星标志采集时间序列数据,可以绘制高质量的洄游路线图,用于分析目标种类的洄游通道<sup>[73-74]</sup>,寻找其索饵场、越冬场和产卵场<sup>[75]</sup>。为了获取南露脊鲸(*Eubalaena australis*)在澳大利亚和新西兰之间的迁徙路径和潜在的索饵场,MACKAY 等<sup>[76]</sup>在新西兰奥克兰群岛、澳大利亚塔斯马尼亚群岛等海域标志了 16 头成年南露脊鲸,成功获取了南露脊鲸从澳大利亚(澳大利亚、新西兰及邻近岛屿)越冬场出发的迁徙数据,提供了可能的迁徙走廊以及 4 个潜在觅食区域:西澳大利亚西南部、亚热带锋、亚南极锋和极锋。同时发现了塔斯马尼亚标志的南露脊鲸迁徙跨度相对奥克兰群岛的标志个体的迁徙跨度更大,这可能是由于觅食策略不同导致迁徙行为出现差异,对两个群体的同位素数据及胃含物分析(来源于当地的捕鲸数据)也证实了这一推测。

### 2.4 分布范围界定

大型游泳动物的分布范围往往超出单一国家的管辖范围,一直是海洋渔业资源管理的一个难题,往往需要多个国家和地区合作<sup>[22]</sup>。目前,卫星标志放流技术已成功应用于澳大利亚东部海域的青甘金枪鱼(*Thunnus tonggol*)<sup>[66]</sup>、阿拉斯加北极地区的花膏红点鲑(*Salvelinus malma*)<sup>[77]</sup>、加拿大新不伦瑞克省周边海域的大西洋鲑(*Salmo salar*)<sup>[78]</sup>、大西洋海域的蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)<sup>[79]</sup>等。掌握大型游泳动物的分布范围,对于渔业部门制定资源开发计划、指导生产和保护有着重要意义。

SIBERT 等<sup>[79]</sup>通过对 1999—2002 年内大西洋蓝鳍金枪鱼的分离式卫星标志回收数据进行分析,发现 2002 年的大西洋蓝鳍金枪鱼的分布范围相较于前三年逐渐缩减,活动范围由北大西洋大部分区域收缩到北大西洋西部(以 45°W 为界)。这种变动受到多种因素调控:包括温跃层深度变动、海面温度锋、饵料生物丰度以及大西洋蓝鳍金枪鱼种群的年龄组成,标志蓝鳍金枪鱼的个体大小对分布范围也存在一定影响。该研究指出渔业部门分配渔业资源和跨境渔业合作时需要考虑环境因素导致的种群分布变化。

### 2.5 其他应用

卫星标志技术作为一项极具开发前景的应用技术,根据研究目的还可被应用于入侵物种防治<sup>[80]</sup>、种群结构研究<sup>[81]</sup>、资源评估模型选择<sup>[82]</sup>、

行为策略选择<sup>[83]</sup>等领域。根据不同研究目的大致可分为3类:关注个体行为的行为学研究、关注种群变动的资源评估以及基于利用标志生物采集数据的生物遥感技术。作为一种较前沿的技术手段,卫星标志技术还有很大的潜力值得挖掘利用。

### 3 卫星标志技术存在的问题

卫星标志存在的主要不足之处包括:(1)卫星标志技术由于卫星标志通过卫星传输的数据数量限制,其时间分辨率与预设工作时长呈负相关,往往需要牺牲部分数据精度来获取一个较长时间序列数据<sup>[84]</sup>。在这种较低的数据传输水平下,很多短时间内发生的高频活动会被掩盖甚至误判为错误数据<sup>[85]</sup>,如庸鲽在预产卵周期内会出现一种仅持续时间仅6~20 min 高速上升,但只有在分辨率高于2 min 的数据中才能被准确识别出来<sup>[70]</sup>。(2)由于卫星标志的地理位置测算是基于光照测算的正午时间和日出及日落时间,对于经度测算较为准确,但纬度测算误差较大,其经度误差一般在1°左右,而纬度误差可以达到3°<sup>[86]</sup>,春分日及秋分日时,由于全球昼夜等长,经纬度误差尤其大,只能依靠内置数据进行推算<sup>[87]</sup>。(3)卫星标志还存在数据反馈率低于预期、数据回收不完整以及提前脱落等问题<sup>[88]</sup>。绝大多数(约80%)的分离式卫星标志在达到预设工作时间前脱落<sup>[89]</sup>,通过物理恢复后发现故障原因主要包括:电池故障<sup>[90-92]</sup>、分离装置的机械故障<sup>[93-95]</sup>、污损生物附着<sup>[96-98]</sup>、标志对象打标伤口处感染<sup>[99-100]</sup>、被渔网海藻等缠绕<sup>[101-102]</sup>或其他行为导致标志脱落或无法弹出上浮<sup>[103]</sup>。

为解决卫星标志提前脱落的问题,科研人员也提出了一些有针对性的解决方案:使用银纳米颗粒<sup>[104-105]</sup>或抗生素<sup>[106-107]</sup>等对卫星标志进行消毒,以降低感染可能性;通过水槽测试目标生物的游泳速度及卫星标志对鱼体的影响<sup>[108]</sup>,以确定最合适的锚、系绳组合及打标部位;涂抹防损材料以减少污损生物附着<sup>[98]</sup>;根据目标物种确定最合适的卫星标志种类<sup>[108]</sup>。

### 4 研究展望

卫星标志放流技术有效解决了传统标志放流技术在大型游泳动物追踪中的难题,能够在较

大的时空跨度下进行数据采集。随着技术进步,卫星标志放流技术早期存在的追踪时间短、数据回收率低的问题已得到了一定的改善。但目前的卫星标志仍然不能完全满足科研需求,数据采集量和有效工作时间仍然需要进一步改善。同时,卫星标志的稳定性不高,仅有少数(不足20%)能够完成预期的工作计划并成功返回数据。卫星标志放流技术作为一项较先进的数据采集手段,除了卫星标志本身需要进一步更新换代外,改善标志固定方式、选择合适的卫星标志种类以及对目标物种开展前期研究都是提高卫星标志放流效率的有效手段。国内厂商用于鸟类及其他陆生动物的卫星标志产品丰富,但针对游泳动物的标志仍然处于一个起步阶段,期望能尽快研制出较为成熟的国产游泳动物卫星标志。

### 参考文献:

- [1] 王成友,杜浩,刘猛,等. 厦门海域放流中华鲟的迁移和分布[J]. 中国科学:生命科学, 2016, 46(3): 294-303. WANG C Y, DU H, LIU M, et al. Migrations and distributions of Chinese sturgeon released in the sea of Xiamen[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2016, 46(3): 294-303.
- [2] 徐开达,徐汉祥,王洋,等. 金属线码标记技术在渔业生物增殖放流中的应用[J]. 渔业现代化, 2018, 45(1): 75-80. XU K D, XU H X, WANG Y, et al. The technology of Coded Wire Tag and its application in fishery stock enhancement[J]. *Fishery Modernization*, 2018, 45(1): 75-80.
- [3] 张天凤,樊伟,戴阳. 海洋动物档案式标志及其定位方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3561-3566. ZHANG T F, FAN W, DAI Y. Archival tags and geolocation methods for marine animals; a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3561-3566.
- [4] 吕少梁. 鱼类标志放流技术优化:以黄鳍棘鲷为例[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2019:1-3. LYU S L. Improvements of fish tagging methods and its application on yellowfin seabream (*Acanthopagrus latus*) [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2019:1-3.
- [5] DEWAR H, PRINCE E D, MUSYL M K, et al. Movements and behaviors of swordfish in the Atlantic and Pacific Oceans examined using pop-up satellite archival tags[J]. *Fisheries Oceanography*, 2011, 20(3): 219-241.
- [6] NIELSEN J K, ROSE C S, TIMOTHY L, et al. Characterizing activity and assessing bycatch survival of Pacific halibut with accelerometer Pop-up Satellite Archival Tags [J]. *Animal Biotelemetry*, 2018, 6(1): 10.

- [7] 陈锦辉, 庄平, 吴建辉, 等. 应用弹式卫星数据回收标志技术研究放流中华鲟幼鱼在海洋中的迁移与分布[J]. 中国水产科学, 2011, 18(2): 437-442.  
CHEN J H, ZHUANG P, WU J H, et al. Migration and distribution of released *Acipenser sinensis* in the sea based on Pop-up Archival Tag technique [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(2): 437-442.
- [8] 张珺. 分离式卫星标志放流中的通信问题研究[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(11): 54-56.  
ZHANG J. Research on the communication problems in pop-up satellite archival tags [J]. China Water Transport, 2012, 12(11): 54-56.
- [9] 郑仰桥, 靳少非, 伍玉梅, 等. 分离式卫星标志放流技术及其在金枪鱼渔业中的应用[J]. 渔业信息与战略, 2012, 27(4): 295-302.  
ZHENG Y Q, JIN S F, WU Y M, et al. The application and prospect of pop-up satellite archival tagging technology in research of tuna fisheries [J]. Fishery Information & Strategy, 2012, 27(4): 295-302.
- [10] 陈锦淘, 戴小杰. 鱼类标志放流技术的研究现状[J]. 上海水产大学学报, 2005, 14(4): 451-456.  
CHEN J T, DAI X J. Current status of fish tagging technology [J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2005, 14(4): 451-456.
- [11] LYNCH S D, MARCEK B J, MARSHALL H M, et al. The effects of pop-up satellite archival tags (PSATs) on the metabolic rate and swimming kinematics of juvenile sandbar shark *Carcharhinus plumbeus* [J]. Fisheries Research, 2017, 186: 205-215.
- [12] MARCINEK D J, BLACKWELL S B, DEWAR H, et al. Depth and muscle temperature of Pacific bluefin tuna examined with acoustic and pop-up satellite archival tags [J]. Marine Biology, 2001, 138(4): 869-885.
- [13] PATTERSON T A, EVANS K, CARTER T I, et al. Movement and behaviour of large southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) in the Australian region determined using pop-up satellite archival tags [J]. Fisheries Oceanography, 2008, 17(5): 352-367.
- [14] HALLIER J P. Tagging manual in tropical tuna fisheries[S]. ResearchGate, 2004: 30-31.
- [15] BLOCK B A, LAWSON G L, BOUSTANY A M, et al. Preliminary results from electronic tagging of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Gulf of St. Lawrence, Canada [J]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2009, 64(2): 469-479.
- [16] MATSUMOTO T, SAITO H, MIYABE N. Swimming behavior of adult bigeye tuna using pop-up tags in the central Atlantic [J]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2004, 57(1): 151-170.
- [17] WENG K C, STOKESBURY M J W, BOUSTANY A M, et al. Habitat and behaviour of yellowfin tuna *Thunnus albacares* in the Gulf of Mexico determined using pop-up satellite archival tags [J]. Journal of Fish Biology, 2009, 74(7): 1434-1449.
- [18] PINE W E, POLLOCK K H, HIGHTOWER J E, et al. A review of tagging methods for estimating fish population size and components of mortality [J]. Fisheries, 2003, 28(10): 10-23.
- [19] CHITTENDEN C. A review of "advances in fish tagging and marking technology" Edited by Jeremy R. McKenzie, Bradford Parsons, Andrew C. Seitz, R. Keller Kopf, Matthew Mesa, and Quinton Phelps. American Fisheries Society, Symposium 76, Bethesda, Maryland. 560 pages. \$ 79.00 ( \$ 55.30 for American Fisheries Society members) [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2013, 142(3): 884.
- [20] 张衡, 戴阳, 杨胜龙, 等. 基于分离式卫星标志信息的金枪鱼垂直移动特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 196-203.  
ZHANG H, DAI Y, YANG S L, et al. Vertical movement characteristics of tuna (*Thunnus albacares*) in Pacific Ocean determined using pop-up satellite archival tags [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 196-203.
- [21] METCALFE J D. Summary report of a workshop on daylight measurements for geolocation in animal telemetry [M]// SIBERT J R, NIELSEN J L. Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries. Dordrecht: Springer, 2001: 331-342.
- [22] 梁洁雯. 卫星通信中的数据采集系统[J]. 电信科学, 2002, 18(9): 61-64.  
LIANG J W. Data acquisition system in satellite communication [J]. Telecommunications Science, 2002, 18(9): 61-64.
- [23] 崔仑, 王国忠. Argos 系统简介[J]. 国外空间动态, 1980(3): 29-30.  
CUI L, WANG G Z. Introduction to the Argos system [J]. Space International, 1980(3): 29-30.
- [24] 吴川, 朱佳志, 苏巍, 等. 弹出式卫星标记在海洋动物分布与迁移研究中的应用[J]. 水产学杂志, 2022, 35(2): 108-116.  
WU C, ZHU J Z, SU W, et al. Application of pop-up satellite archival tags in research of distribution and migration of marine animals: a review [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2022, 35(2): 108-116.
- [25] HAMMERSCHLAG N, MCDONNELL L H, RIDER M J, et al. Ocean warming alters the distributional range, migratory timing, and spatial protections of an apex predator, the tiger shark (*Galeocerdo cuvier*) [J]. Global Change Biology, 2022, 28(6): 1990-2005.
- [26] SCHABERM, GASTAUERS, CISEWSKIB, et al. Extensive oceanic mesopelagic habitat use of a migratory continental shark species [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 2047.
- [27] SANTOS C C, COELHO R. Migrations and habitat use of the



- smooth hammerhead shark (*Sphyrna zygaena*) in the Atlantic Ocean[J]. PLoS One, 2018, 13(6): e0198664.
- [28] ANDERSON J M, REX P T, MALONEY K, et al. Observations of a species-record deep dive by a central Pacific female scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) [J]. Journal of Fish Biology, 2022, 101(1): 323-327.
- [29] BRADFORD R, PATTERSON T A, ROGERS P J, et al. Evidence of diverse movement strategies and habitat use by white sharks, *Carcharodon carcharias*, off southern Australia [J]. Marine Biology, 2020, 167(7): 96.
- [30] BRAUN C D, GALUARDI B, THORROLD S R. HMMoce: an R package for improved geolocation of archival-tagged fishes using a hidden Markov method [J]. Methods in Ecology and Evolution, 2018, 9(5): 1212-1220.
- [31] SANTOS C C, DOMINGO A, CARLSON J, et al. Updates on the habitat use and migrations of shortfin mako in the Atlantic using satellite telemetry [R]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2020, 76(10): 235-246.
- [32] LOHER T. Dispersal and seasonal movements of Pacific halibut (*Hippoglossus stenolepis*) in the eastern Bering Sea and Aleutian Islands, as inferred from satellite-transmitting archival tags [J]. Animal Biotelemetry, 2022, 10(1): 18.
- [33] FREITAS C, FREITAS M, ANDRZEJACZEK S, et al. First insights into the movements and vertical habitat use of blue marlin (*Makaira nigricans*) in the eastern North Atlantic [J]. Animal Biotelemetry, 2022, 10(1): 12.
- [34] AARESTRUP K, BAKTOFT H, BIRNIE-GAUVIN K, et al. First tagging data on large Atlantic bluefin tuna returning to Nordic waters suggest repeated behaviour and skipped spawning [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 11772.
- [35] ROSA D, GARIBALDI F, SNODGRASS D, et al. Update on the satellite tagging of atlantic and mediterranean swordfish [R]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2022, 79(2): 249-264.
- [36] ROSA D, SANTOS C C, MACIAS D, et al. Brief update on the satellite tagging of atlantic swordfish [J]. Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT, 2020, 77(3): 113-121.
- [37] HENDERSON E E, DEAKOS M, ASCHETTINO J, et al. Behavior and inter-island movements of satellite-tagged humpback whales in Hawai'i, USA [J]. Marine Ecology Progress Series, 2022, 685: 197-213.
- [38] HAYS G C, LALOË J O, RATTRAY A, et al. Why do Argos satellite tags stop relaying data? [J]. Ecology and Evolution, 2021, 11(11): 7093-7101.
- [39] BURKE P J, MOURIER J, GASTON T F, et al. Novel use of pop-up satellite archival telemetry in sawsharks: insights into the movement of the common sawshark *Pristiophorus cirratus* (Pristiophoridae) [J]. Animal Biotelemetry, 2020, 8(1): 33.
- [40] WRIGHT R M, PIPER A T, AARESTRUP K, et al. First direct evidence of adult European eels migrating to their breeding place in the Sargasso Sea [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 15362.
- [41] STRØM J F, RIKARSEN A H, CAMPANA S E, et al. Ocean predation and mortality of adult Atlantic salmon [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 7890.
- [42] SEITZ A C, COURTNEY M B, EVANS M D, et al. Pop-up satellite archival tags reveal evidence of intense predation on large immature Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in the North Pacific Ocean [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2019, 76(9): 1608-1615.
- [43] LIN S J, MUSYL M K, WANG S P, et al. Movement behaviour of released wild and farm-raised dolphinfish *Coryphaena hippurus* tracked by pop-up satellite archival tags [J]. Fisheries Science, 2019, 85(5): 779-790.
- [44] MANSFIELD K L, WYNEKEN J, LUO J G. First Atlantic satellite tracks of 'lost years' green turtles support the importance of the Sargasso Sea as a sea turtle nursery [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2021, 288(1950): 20210057.
- [45] 周艳波, 陈丕茂, 冯雪, 等. 广东主要海洋经济物种增殖放流初期存活率探讨 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(22): 103-106, 140.
- ZHOU Y B, CHEN P M, FENG X, et al. Study on the survival rate of main marine economic species during initial enhancement and releasing stages in Guangdong Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(22): 103-106, 140.
- [46] JENSEN A L. Comparison of catch-curve methods for estimation of mortality [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1985, 114(5): 743-747.
- [47] CHAPMAN D G. Statistical problems in dynamics of exploited fisheries populations [C]//Proceedings of the 4th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley: University of California Press, 1961: 153-168.
- [48] LORENZEN K, LEBER K M, BLANKENSHIP H L. Responsible approach to marine stock enhancement: an update [J]. Reviews in Fisheries Science, 2010, 18(2): 189-210.
- [49] BROELL F, TAYLOR A D, LITVAK M K, et al. Post-tagging behaviour and habitat use in shortnose sturgeon measured with high-frequency accelerometer and PSATs [J]. Animal Biotelemetry, 2016, 4(1): 11.
- [50] AALBERS S A, WANG M, VILLAFANA C, et al. Bigeye thresher shark *Alopias superciliosus* movements and post-release survivorship following capture on linked buoy gear [J]. Fisheries Research, 2021, 236: 105857.
- [51] FERTER K, RIKARSEN A H, EVENSEN T H, et al. Survival of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) following catch-and-release angling [J]. Fisheries Research, 2017, 186: 634-641.
- [52] BELOVSKY G E, SLADE J B. Time budgets of grassland herbivores: body size similarities [J]. Oecologia, 1986, 70(1): 53-62.
- [53] 邵明勤, 龚浩林, 戴年华, 等. 鄱阳湖围垦区藕塘越冬白

- 鹤的时间分配与行为节律[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5206-5212.
- SHAO M Q, GONG H L, DAI N H, et al. Study on time budgets and behavioral rhythm of wintering Siberian Cranes in a lotus pond reclamation area in Poyang Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(14): 5206-5212.
- [54] HALLE S, STENSETH N C. Activity patterns in small mammals: an ecological approach [M]. New York: Springer, 2000: 49-50.
- [55] 袁梦. 南海北部陆坡海域中层鱼的群落结构及其垂直迁移特征[D]. 大连: 大连海洋大学, 2017: 22-23.
- YUAN M. Community structure and vertical migration characteristics of mesocarp in the northern slope of the South China Sea [D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2017: 22-23.
- [56] GOETZ F W, JASONOWICZ A J, ROBERTS S B. What goes up must come down: diel vertical migration in the deep-water sablefish (*Anoplopoma fimbria*) revealed by pop-up satellite archival tags [J]. Fisheries Oceanography, 2018, 27(2): 127-142.
- [57] HIGUCHI T, WATANABE S, MANABE R, et al. Horizontal and vertical migration behavior of silver-phase Japanese eels in coastal, pelagic and spawning areas observed by pop-up satellite archival tags [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2021, 542-543: 151587.
- [58] COSGROVE R, ARREGUI I, ARRIZABALAGA H, et al. New insights to behaviour of North Atlantic albacore tuna (*Thunnus alalunga*) observed with pop-up satellite archival tags [J]. Fisheries Research, 2014, 150: 89-99.
- [59] 周晓禹, 刘振生, 吴建平, 等. 丹顶鹤繁殖期行为时间分配及活动规律 [J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(1): 60-62.
- ZHOU X Y, LIU Z S, WU J P, et al. Time budget and activity rhythm of red-crowned crane (*Grus japonensis*) during breeding season [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(1): 60-62.
- [60] 连新明, 张同作, 曹伊凡, 等. 夏季雌性藏羚昼间行为时间分配及活动节律 [J]. 兽类学报, 2007, 27(1): 53-57.
- LIAN X M, ZHANG T Z, CAO Y F, et al. Diurnal behavioral time budgets and activity rhythm of the female Tibetan antelope (*Pantholops hodgsoni*) in summer [J]. Acta Theriologica Sinica, 2007, 27(1): 53-57.
- [61] 吕九全, 李保国. 秦岭川金丝猴的昼间活动时间分配 [J]. 兽类学报, 2006, 26(1): 26-32.
- LYU J Q, LI B G. Diurnal activity budgets of the Sichuan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*) in the Qinling Mountains of China [J]. Acta Theriologica Sinica, 2006, 26(1): 26-32.
- [62] JENSEN D R, GRAVES J E. Movements, habitat utilization, and post-release survival of cobia (*Rachycentron canadum*) that summer in Virginia waters assessed using pop-up satellite archival tags [J]. Animal Biotelemetry, 2020, 8(1): 24.
- [63] HERNÁNDEZ-TLAPALE C, DE-ANDA-MONTAÑEZ J A, TRASVIÑA-CASTRO A, et al. First record of vertical movements of the totoaba (*Totoaba macdonaldi*) as evidenced by pop-up satellite tags in the Upper Gulf of California [J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2020, 100(1): 143-151.
- [64] 王文质, 王东晓, 王华接. 港口海龟洄游卫星追踪试验 [J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(2): 152-153.
- WANG W Z, WANG D X, WANG H J. An experiment on satellite tracking of post-nesting migration of green turtles from Gangkou [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(2): 152-153.
- [65] 叶明彬, 陈华灵, 古河祥, 等. 人工培育幼年绿海龟的卫星追踪试验 [J]. 四川动物, 2015, 34(1): 15-20.
- YE M B, CHEN H L, GU H X, et al. Satellite tracking of migration for three captive-reared juvenile green turtles from Huidong national sea turtle reserve [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2015, 34(1): 15-20.
- [66] LUTCAVAGE M E, BRILL R W, SKOMAL G B, et al. Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine; do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic? [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1999, 56(2): 173-177.
- [67] SORIA M, TREMBLAY Y, BLAISON A, et al. Large-scale movements and site fidelity of two bull sharks *Carcharhinus leucas* estimated from a double-tagging experiment at Réunion Island (southwest Indian Ocean) [J]. African Journal of Marine Science, 2021, 43(1): 135-140.
- [68] GRIFFITHS S P. Restricted vertical and cross-shelf movements of longtail tuna (*Thunnus tonggol*) as determined by pop-up satellite archival tags [J]. Marine Biology, 2020, 167(8): 117.
- [69] WEST W M, KERWATH S E, DA SILVA C, et al. Horizontal and vertical movements of swordfish tagged with pop up-satellite transmitters in the south-west Indian ocean, off south Africa [R]. IOTC-2012-WPB10-16, 2012: 1-36.
- [70] FISHER J A D, ROBERT D, LE BRIS A, et al. Pop-up satellite archival tag (PSAT) temporal data resolution affects interpretations of spawning behaviour of a commercially important teleost [J]. Animal Biotelemetry, 2017, 5(1): 21.
- [71] 徐兆礼, 陈佳杰. 小黄鱼洄游路线分析 [J]. 中国水产科学, 2009, 16(6): 931-940.
- XU Z L, CHEN J J. Analysis on migratory routine of *Larimichthys polyactis* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(6): 931-940.
- [72] NEAVE F. Ocean migrations of Pacific salmon [J]. Journal of the Fisheries Board of Canada, 1964, 21(5): 1227-1244.
- [73] BRYAN D R, MCDERMOTT S F, NIELSEN J K, et al. Seasonal migratory patterns of Pacific cod (*Gadus macrocephalus*) in the

- Aleutian Islands [J]. *Animal Biotelemetry*, 2021, 9(1): 24.
- [74] 吴建辉, 陈锦辉, 高春霞. 基于标志放流信息的长江口中华鲟降海洄游和分布特征[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(12): 1559-1567.
- WU J H, CHEN J H, GAO C X. Research on the downstream migration and distribution characteristics of Chinese sturgeon in the Yangtze Estuary based on tagging and releasing information [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(12): 1559-1567.
- [75] LE BRIS A, FISHER J A D, MURPHY H M, et al. Migration patterns and putative spawning habitats of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in the Gulf of St. Lawrence revealed by geolocation of pop-up satellite archival tags[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2018, 75(1): 135-147.
- [76] MACKAY A I, BAILLEUL F, CARROLL E L, et al. Satellite derived offshore migratory movements of southern right whales (*Eubalaena australis*) from Australian and New Zealand wintering grounds[J]. *PLoS One*, 2020, 15(5): e0231577.
- [77] COURTNEY M B, SCANLON B S, RIKARSEN A H, et al. Utility of pop-up satellite archival tags to study the summer dispersal and habitat occupancy of Dolly Varden in Arctic Alaska[J]. *Arctic*, 2016, 69(2): 137-146.
- [78] LACROIX G L. Population-specific ranges of oceanic migration for adult Atlantic salmon (*Salmo salar*) documented using pop-up satellite archival tags[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2013, 70(7): 1011-1030.
- [79] SIBERT J R, LUTCAVAGE M E, NIELSEN A, et al. Interannual variation in large-scale movement of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) determined from pop-up satellite archival tags [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, 63(10): 2154-2166.
- [80] HONDA N, WATANABE T, MATSUSHITA Y. Swimming depths of the giant jellyfish *Nemopilema nomurai* investigated using pop-up archival transmitting tags and ultrasonic pingers [J]. *Fisheries Science*, 2009, 75(4): 947-956.
- [81] CARVALHO F, AHRENS R, MURIE D, et al. Using pop-up satellite archival tags to inform selectivity in fisheries stock assessment models: a case study for the blue shark in the South Atlantic Ocean[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2015, 72(6): 1715-1730.
- [82] BREWSTER L R, CAHILL B V, BURTON M N, et al. First insights into the vertical habitat use of the whitespotted eagle ray *Aetobatus narinari* revealed by pop-up satellite archival tags[J]. *Journal of Fish Biology*, 2021, 98(1): 89-101.
- [83] RICHARDSON D E, MARANCIK K E, GUYON J R, et al. Discovery of a spawning ground reveals diverse migration strategies in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(12): 3299-3304.
- [84] PATTERSON T A, HARTMANN K. Designing satellite tagging studies: estimating and optimizing data recovery[J]. *Fisheries Oceanography*, 2011, 20(6): 449-461.
- [85] BREED G A, COSTA D P, GOEBEL M E, et al. Electronic tracking tag programming is critical to data collection for behavioral time-series analysis [J]. *Ecosphere*, 2011, 2(1): 1-12.
- [86] 林龙山, 丁峰元, 程家骅. 运用 POP-UP TAG 对金枪鱼进行标志放流几个值得注意的问题[J]. *现代渔业信息*, 2005, 20(2): 17-19.
- LIN L S, DING F Y, CHENG J H. Remarkable problems for using POP-UP TAG on tuna [J]. *Modern Fisheries Information*, 2005, 20(2): 17-19.
- [87] ROYER F, LUTCAVAGE M. Positioning pelagic fish from sunrise and sunset times: complex observation errors call for constrained, robust modeling [M]//NIELSEN J L, ARRIZABALAGA H, FRAGOSO N, et al. *Tagging and Tracking of Marine Animals with Electronic Devices*. Dordrecht: Springer, 2009: 323-341.
- [88] MUSYL M K, DOMEIER M L, NASBY-LUCAS N, et al. Performance of pop-up satellite archival tags [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2011, 433: 1-28.
- [89] ARNOLD G, DEWAR H. Electronic tags in marine fisheries research: a 30-Year Perspective [M]//SIBERT J R, NIELSEN J L. *Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries*. Dordrecht: Springer, 2001: 7-64.
- [90] SEITZ A C, WILSON D, NORCROSS B L, et al. Pop-up archival transmitting (PAT) tags: a method to investigate the migration and behavior of Pacific halibut (*Hippoglossus stenolepis*) in the Gulf of Alaska [J]. *Alaska Fishery Research Bulletin*, 2003, 10(2): 124-136.
- [91] HAYS G C, BRADSHAW C J A, JAMES M C, et al. Why do Argos satellite tags deployed on marine animals stop transmitting? [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 349(1): 52-60.
- [92] WENG K C, BOUSTANY A M, PYLE P, et al. Migration and habitat of white sharks (*Carcharodon carcharias*) in the eastern Pacific Ocean[J]. *Marine Biology*, 2007, 152(4): 877-894.
- [93] DOMEIER M L. An analysis of Pacific striped marlin (*Tetrapturus audax*) horizontal movement patterns using pop-up satellite archival tags [J]. *Bulletin of Marine Science*, 2006, 79(3): 811-825.
- [94] STOKESBURY M J W, TEO S L H, SEITZ A, et al. Movement of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) as determined by satellite tagging experiments initiated off New England [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 61(10): 1976-1987.
- [95] WILSON S G, LUTCAVAGE M E, BRILL R W, et al. Movements of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the northwestern Atlantic Ocean recorded by pop-up satellite archival tags [J]. *Marine Biology*, 2005, 146(2): 409-

- 423.
- [96] GUNN J, BLOCK B. Advances in acoustic, archival, and satellite tagging of tunas [J]. *Fish Physiology*, 2001, 19: 167-224.
- [97] KERSTETTER D W, GRAVES J E. Survival of white marlin (*Tetrapturus albidus*) released from commercial pelagic longline gear in the western North Atlantic [J]. *Fishery Bulletin*, 2006, 104(3): 434-444.
- [98] WILSON S G, POLOVINA J J, STEWART B S, et al. Movements of whale sharks (*Rhincodon typus*) tagged at Ningaloo Reef, Western Australia [J]. *Marine Biology*, 2006, 148(5): 1157-1166.
- [99] JELLYMAN D, TSUKAMOTO K. First use of archival transmitters to track migrating freshwater eels *Anguilla dieffenbachii* at sea [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2002, 233: 207-215.
- [100] DE METRIO G, ARNOLD G P, DE LA SERNA J M, et al. Further results of tagging mediterranean bluefin tuna with pop-up satellite-detected tags [J]. *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 2001, 52(2): 776-783.
- [101] SWIMMER Y, BRILL R, MUSYL M. Use of pop-up satellite archival tags to quantify mortality of marine turtles incidentally captured in longline fishing gear [J]. *Marine Turtle Newsletter*, 2002, 97: 3-7.
- [102] SWIMMER Y, ARAUZ R, MCCRACKEN M, et al. Diving behavior and delayed mortality of olive ridley sea turtles *Lepidochelys olivacea* after their release from longline fishing gear [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 323: 253-261.
- [103] THORSTEINSSON V. Tagging methods for stock assessment and research in fisheries [R]. Report of Concerted Action FAIR CT.96.1394, 2002: 179.
- [104] KUMAR A, VEMULA P K, AJAYAN P M, et al. Silver-nanoparticle-embedded antimicrobial paints based on vegetable oil [J]. *Nature Materials*, 2008, 7(3): 236-241.
- [105] ZODROW K, BRUNET L, MAHENDRA S, et al. Polysulfone ultrafiltration membranes impregnated with silver nanoparticles show improved biofouling resistance and virus removal [J]. *Water Research*, 2009, 43(3): 715-723.
- [106] POPE D H, BERGER L R. Algal photosynthesis at increased hydrostatic pressure and constant  $pO_2$  [J]. *Archiv für Mikrobiologie*, 1973, 89(4): 321-325.
- [107] DANIEL A J, HICKS B J, LING N, et al. Acoustic and radio-transmitter retention in common carp (*Cyprinus carpio*) in New Zealand [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2009, 60(4): 328-333.
- [108] GRUSHA D S, PATTERSON M R. Quantification of drag and lift imposed by pop-up satellite archival tags and estimation of the metabolic cost to cownose rays (*Rhinoptera bonasus*) [J]. *Fishery Bulletin*, 2005, 103(1): 63-70.

## Application progress of satellite archival tags technique in large nekton

ZENG Xiaoqi<sup>1</sup>, CHEN Siyuan<sup>1,2</sup>, LIU Shigang<sup>2</sup>, WANG Rui<sup>2</sup>, ZHAO Linlin<sup>3</sup>, LI Yuan<sup>2</sup>, LIN Longshan<sup>2</sup>  
 (1. Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. The First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, Shandong, China)

**Abstract:** Mastering the migration and distribution of large nekton is the basis for analyzing their population dynamics, and carrying out population conservation and management. However, large nekton has strong swimming ability, wide range of activities and difficulty in recapture, so the traditional tagging technology has great limitations. Satellite Archival Tags technique has become one of the effective technical means to study the population changes and behavioral habits of deep-sea large nekton because of its features of not relying on retrieval, large data collection volume and high accuracy. Currently, mainstream Satellite Archival Tags are developed based on the Argos satellite system and transmitted via satellite channels, which has significant advantages over traditional tags that rely on sign recovery. This paper reviews the working principle, development history and main types of Satellite Archival Tags, introduces the main application progress, summarizes the problems and presents the research outlook, aiming to provide reference for the study of population dynamics and behavioral habits of large nekton.

**Key words:** Satellite archival tags; Argos system; behavior pattern; large nekton