

文章编号: 1000-0615(2019)07-1678-13

DOI: 10.11964/jfc.20181011504

· 综述 ·

## 水生动物洄游分布研究方法综述

马金<sup>1</sup>, 田思泉<sup>2,3,4,5</sup>, 陈新军<sup>2,3,4,5\*</sup>

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306;

4. 上海海洋大学, 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306;

5. 上海海洋大学, 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 水生动物洄游分布是水生生物学研究的主要内容, 目的是掌握水生动物洄游分布规律及其与水域环境之间的关系, 以制定有效的资源保护和管理策略。标记技术监测、物种分布模型预测、生物体组织微量元素与稳定同位素分析推测是此类研究的主要方法, 已被广泛应用于气候变化背景下水生动物洄游分布的研究。上述3种方法包括多种技术手段、模型以及分析测试内容, 但现有研究报道缺乏对各种监测或预测方法的系统梳理, 也鲜有各方法彼此之间的交叉或组合研究。本文从标记技术、物种分布模型、生物体组织微量元素与稳定同位素分析3个层面综述了水生动物洄游分布研究方法的特点及进展, 同时, 依据文献统计计量数据, 明确了相关方法的实际应用情况。研究表明, 3种方法是水生动物洄游分布研究的有效工具, 现有研究注重每种方法内部之间的比较与改进, 后续研究应加强3种方法彼此之间的交叉与组合研究。此外, 对于渔业资源生物, 渔获量统计分析法也可作为获得其洄游分布规律及适宜环境因子范围的研究方法。

**关键词:** 水生动物; 洄游分布; 微化学; 稳定同位素; 标记技术; 分布模型

**中图分类号:** Q 178.1; S 931.1

**文献标志码:** A

生物多样性的减少是目前全球水体生态系统面临的一个重要而紧迫的问题<sup>[1]</sup>, 了解和掌握水生生物的洄游分布模式是评价生物多样性减少的重要途径<sup>[2]</sup>, 特别是对濒危水生生物意义更为重大。17世纪, 人们已将体外标记技术应用在大西洋鲑(*Salmo salar*)的溯河洄游研究中<sup>[3]</sup>。进入20世纪后半叶, 电子技术的飞速发展使电子标记技术成为此类研究直接、有效的研究手段, 但同时也存在成本因素和不稳定等问题。近年来, 随着可利用数据(地理、环境及物种分布数据)的不断增长以及计算机模拟技术的发展, 生物学家和决策管理者对预测模型作为资源分布模式预测方式的依赖逐渐增加, 很多分布预测模型

被用来评估入侵种类的潜在扩散<sup>[4]</sup>、管理濒危物种、划定生物多样性保护区、评价气候变化对生物分布的潜在影响以及生物分布的热点预测<sup>[5]</sup>; 此外, 基于生物体组织微量元素沉积与经历的环境之间的关系, 新兴的电子探针技术<sup>[6]</sup>和稳定同位素技术<sup>[7]</sup>可挖掘印记在生物体组织中的生活史信息, 成为推测水生生物洄游分布的主要方法之一。本文从标记技术监测、基于环境因素的生物分布模型预测、利用生物体组织微量化学元素指纹与稳定同位素分析推测3个主要方面, 系统综述了水生动物洄游分布研究方法进展情况, 以期国内开展此类相关研究提供理论参考。

收稿日期: 2018-10-23 修回日期: 2019-01-21

资助项目: 国家自然科学基金(41876141)

通信作者: 陈新军, E-mail: xjchen@shou.edu.cn

## 1 标记技术监测

标记技术是在水生动物身体上做显著标记或将标记物挂在水生动物身体上,然后将水生动物放回水体重新捕获进而获得回收数据的技术。早在17世纪,人们开始了对鱼类等水生动物的标记研究<sup>[3]</sup>。20世纪之前,标记方法发展比较缓慢<sup>[8]</sup>,标记种主要集中在大麻哈鱼(*Oncorhynchus keta*)、大西洋油鲱(*Brevoortia tyrannus*)、大西洋鳕(*Gadus morhua*)等<sup>[9]</sup>,并且,标记方法以体外标记法为主。进入20世纪以后,大规模的标记研究才逐渐开展<sup>[9]</sup>,特别是20世纪70年代以来,电子标记方法(声波标记<sup>[10]</sup>、档案标记<sup>[11]</sup>、弹出式卫星标记<sup>[12]</sup>)被成功应用在蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)等水生动物各种尺度洄游的研究中。有研究者将标记技术分为体外(常规)标记和电子标记2种<sup>[13]</sup>。

### 1.1 体外标记

体外标记主要是将各种类型的体外标记物固定在水生动物身体上或者在水生动物身体某个部位做印记,待标记个体被重捕后,获取标记个体洄游路径、生长情况等信息的方法。

起初体外标记研究的出发点主要是掌握标记物种的移动路线和群体组成,在20世纪30年代后,体外标记的研究范围扩展到年龄与生长、种群大小评估、出生和死亡率估计等方面<sup>[14]</sup>。体外标记物和体外印记主要包括物理标记物(纽扣标、锚标、飘带)、颜料标记法(染色、入墨、颜料标记等)和体外切痕(切鳍法、剪棘法等)等。每种标记物和印记方法都有其适用性和局限性,在不同标记种类上的表现也不尽相同,在选择标记物和印记方法时,应以掌握标记种类较为完整的生物学信息为前提<sup>[3]</sup>,并兼顾标记的操作简便性、识别度和成本<sup>[15]</sup>。

随着水生生物体外标记研究的发展,国际合作性的标记计划(international tagging programs, ITP)自20世纪20年代以来逐渐开展或建立,例如,McFarlane等<sup>[3]</sup>列举了美洲间热带金枪鱼保护委员会开展的9项国际性鱼类标记计划,包括太平洋鲭科(*Scombridae*)鱼类在内;鲨鱼类等高度洄游性水生动物的标记研究也在各国研究者之间合作开展<sup>[16]</sup>。

### 1.2 电子标记

20世纪50年代,电子标记第一次被应用在

水生生物标记相关研究中,这标志着电子标记时代的到来。声学遥测(acoustic telemetry)方法在电子标记研究中出现最早,随着微型电子芯片的同步发展,20世纪90年代,档案标记方法被应用,但是这2种标记方式在存储上存在数据循环覆盖的问题。随后,弹出式卫星标记方法的出现解决了上述问题,它能够记录、储存一系列长时间的环境、行为和生理数据,为水生生物标记的研究提供最理想的研究手段<sup>[17]</sup>。根据Hussey等<sup>[18]</sup>报道,近20年来(1995—2014年),利用电子标记技术研究鱼类等水生动物生物学的文献数量呈现指数式增长,我们对此作了文献检索验证,在Web of Science中,以“Electronic tagging”为主题检索了近20年发表的文献数量(检索日期2018年8月2日),发现相关文献数量呈现显著的指数式增长趋势(图1)。

在探寻适用于研究对象最佳的电子标记技术的相关研究中,研究者逐渐注重各种电子标记技术在标记个体上的比较研究<sup>[19]</sup>。表1对主要的电子标记技术及其优缺点进行了归纳。虽然大多数电子标记类研究的对象聚焦在鱼类,但近年来对海龟、甲壳类和软体动物等水生生物的研究逐渐增加。实际应用中,会出现多种电子标记技术适用于同一种(类)标记个体的现象,所以在电子标记技术选择时,研究者应充分考虑标记技术的优缺点以及该标记技术对水生动物的行为产生的潜在影响<sup>[19]</sup>。

从表1可以看出,水生动物电子标记的研究主要集中在美国、加拿大、日本等国家。在Web of Science中,以“电子标记技术名称”为标题并以“洄游”为主题进行检索,仅发现Lin等<sup>[20]</sup>在2012年利用编码线标记技术对蒙古鲈(*Culter mongolicus*)死亡和标记物保持的研究,可见国内利用电子标记技术研究水生动物洄游的研究很少在以英文为主流的学术期刊上发表。

近些年来,科学家们为了系统全面地掌握高度洄游性水生动物的洄游分布信息和论证水生动物洄游过程所经历的环境变化,全球性的水下兼容信号接收器跟踪监测网<sup>[21]</sup>(the ocean tracking network, OTN)计划逐渐被建立起来。OTN提供了很多商业和濒危水生动物种类的洄游信息,OTN计划更远的目的是整合监测网接收器监测的数据和电子标记记录的数据,使这些数据能够应用在海洋(生物)学模拟以及其他研究中。

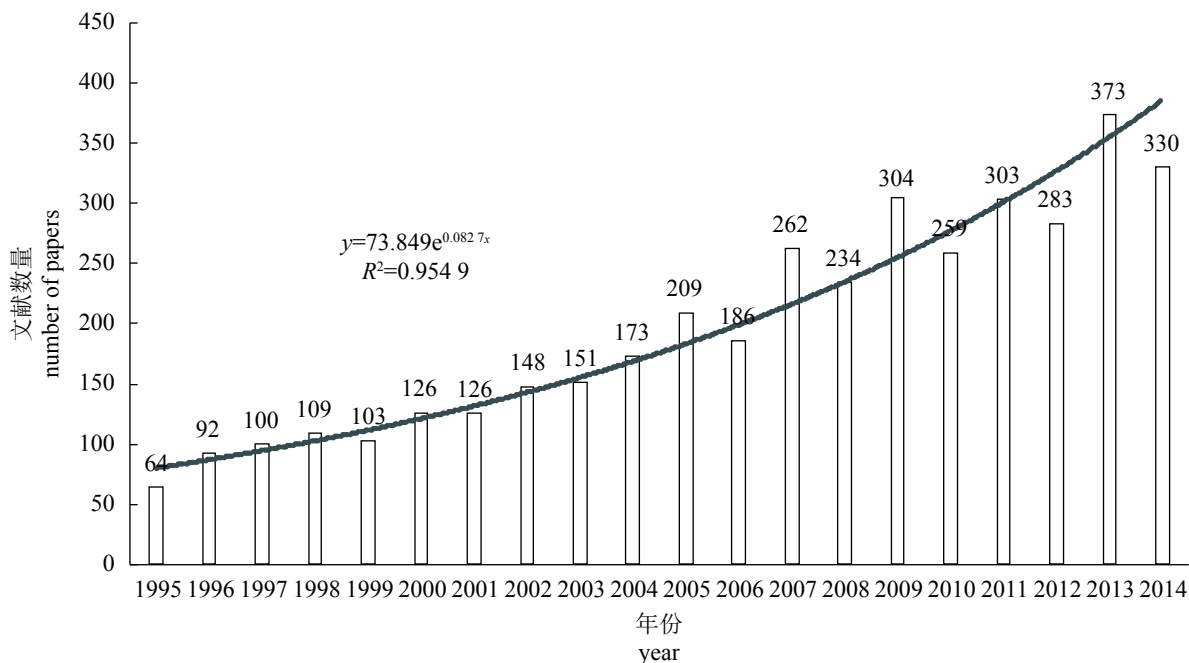


图 1 近20年(1995—2014年)以“电子标记”为主题的文献数量增长趋势

Fig. 1 Yearly number of published papers searched by “electronic tagging” in theme in the recent 20 years (1995—2014)

## 2 分布模型预测

基于数据建模的种类分布模型(species distribution models, SDMs)是研究物种和栖息环境之间关系的有效工具<sup>[35]</sup>。SDMs可定义为利用研究对象分布数据(出现与否或生物量)与环境数据,基于特定的算法估计并以概率的形式反映研究对象对环境因子的偏好程度,结果可以解释研究对象出现的概率、生境适宜度或物种丰富度等<sup>[36]</sup>。目前,SDMs已被广泛应用在水生生物的分布模式与预测研究当中<sup>[37]</sup>,且随着科学、全面的调查数据的积累和模型算法的不断成熟,SDMs在物种生态位解析和洄游分布预测方面逐渐展现其良好的适用性,相关文献发表数量增长明显(基于文献检索的SDMs应用研究可参考Elith等<sup>[38]</sup>、Robinson等<sup>[39]</sup>)。同时,计算机科学的飞速发展带动了SDMs计算编程(程序包)的免费共享<sup>[36]</sup>,一些相关的教学文本和大学课程可以在线获得<sup>[40]</sup>,在技术层面上促进了SDMs在科学研究上的应用。

SDMs的实现可分为构思、数据准备、模型拟合、模型验证和空间预测等过程<sup>[41]</sup>。在构思阶段,研究者应了解研究对象的基本分布模式,根据已有研究积累、查阅文献确定模型算法;数据准备包括物种分布数据和环境数据的收集,物种分布数据可以通过优化采样设计的方

式获得较为科学的数据样本,也可以从调查报告、博物馆收集<sup>[42]</sup>;模型拟合、验证阶段一般将数据分为模拟数据和验证数据,并进行重复抽样(bootstrap),经过校准的模型最后可用于研究对象的空间预测。关于SDMs的实现步骤的详细描述可参考Guisan等<sup>[43]</sup>、刘芳等<sup>[42]</sup>。

借鉴SDMs在陆地生物分布预测上的研究经验,基于水生动物的游动性,SDMs在水生动物分布预测研究中考虑了生物游动、种间关系、个体生长和集群对模型预测结果的影响,同时,注重多模型间的比较研究,并采用多个评价指标评价不同模型的预测表现<sup>[44]</sup>。

### 2.1 SDMs预测比较研究

Fukuda等<sup>[45]</sup>在探讨几种常见分布模型在欧洲茴鱼(*Thymallus thymallus*)洄游分布的研究中,比较了人工神经网络(artificial neural network, ANN)、随机森林(random forest, RF)等模型的预测表现。ANN通过模拟人脑神经元,能够获得、代表和计算一个多变量的空间信息并映射到另外一个空间信息,并以一定的数据结果输出,代表原有的数据信息<sup>[46]</sup>。ANN主要通过反向传播训练算法(back-propagation)对物种的分布情况进行预测<sup>[37,47]</sup>。作为数据挖掘模型,基于研究个体的出现与环境因子空间关系,ANN被应用在个体空

表 1 主要电子标记技术及其优缺点

标记技术 technology	简述 summary	优点 strengths	缺点 limitations	应用案例 applications	主要研究国家和机构 countries and institutions (注: 在web of science 中检索, 检索年份为 “所有年份”; 检索时间 为2018年8月2日)
编码线标记 coded wire tags(CWT)	用针将编号的金属细丝注入动物体内, 回捕时通过金属探测器进行标记鉴别	适用于很小的个体、对标记个体影响小	不易发现; 标记装置费用高	大鳞大麻哈鱼( <i>O. tshawytscha</i> ) <sup>[22]</sup> 、大西洋绒须石首鱼( <i>Micropogonias undulatus</i> ) <sup>[23]</sup>	加拿大(54.2%); 美国(37.5%), ……; 中国 <sup>[20]</sup> (4.1%, 1 of 24)(*以标题“coded wire tags”和主题“migration”检索, 命中24条记录)
声学遥测 acoustic telemetry	标记个体中植入能发射声波信号的电子转换器(transducer), 利用移动 <sup>[24]</sup> 或固定站位 <sup>[25]</sup> 的水下声波监测器(hydrophone)探测声学信号	费用可接受, 个体小, 可应用在幼体的洄游研究 <sup>[26]</sup> ; 探测水深大于20 m; 能够提供标记个体详细的游动数据; 固定站位监测器可以框式、网格等方式展开监测 <sup>[27]</sup> , 同时, 可在固定站位同步设置环境数据的监测装置	不适用浅水区和急流区; 监测器必须放置在水下; 后期数据处理过程复杂	在淡水鱼类中应用最为广泛 <sup>[28]</sup> , 在溯河洄游的水生动物 <sup>[26]</sup> 中也有应用	美国(51.6%); 澳大利亚(14.1%); 日本(10.9%)(*以标题“acoustic telemetry”和主题“migration”检索, 命中64条记录)
无线电遥测 radio telemetry	在标记个体内或体外植入能发射一定无线电频率信号的传送器(transmitters) <sup>[29]</sup> , 利用移动或固定站位的水上/下天线或者接收器探测信号	费用尚可; 可在水深小于10 m的浅水区使用	易受外界因素干扰	多应用于淡水鱼类	美国(30%); 加拿大(10%); 荷兰(10%); 法国(8%)(*以标题“radio telemetry”和主题“migration”检索, 命中50条记录)
被动整合雷达标记 passive integrated transponder tags, PIT	PIT是一种置于和组织相容的生化玻璃管中、注有标识代码的电子微芯片装置, 整体基于无线射频技术 <sup>[30]</sup> 。当被移动或固定站位的阅读器以一定频率的无线电信号激发后, 微芯片发射出唯一的识别信号, 并被接收器采集、解码 <sup>[28]</sup>	不用更换电源, 使用寿命长; 体型小, 信息储量大; 成本相对较低, 可接受	探测范围小, 多适用于浅水区; 远基站点需要能源维持	常应用于鱼类洄游的研究, 尤其是在大麻哈鱼的洄游研究中	美国(76.0%)(*以标题“passive integrated transponder tags”和主题“migration”检索, 命中25条记录)
无传输功能的档案标记 archival tags	将装配有传感器的标记物植入标记个体, 放回水体后连续记录地理位置等信息, 但不能自动传送数据的技术	能够连续地记录水温、深度、地理位置等参数	需要回捕标记个体并从标记传感器上下载已记录的数据; 回捕率不高	多应用于大洋性洄游动物和降海洄游动物, 如金枪鱼 <sup>[31]</sup> 、鲟类 <sup>[32]</sup> 、海龟 <sup>[33]</sup> 和鲨鱼 <sup>[34]</sup> 等	美国(48.1%); 加拿大(13.6%); 澳大利亚(12.3%); 日本(12.3%); 英格兰(11.1%)(*以标题“archival tags”和主题“migration”检索, 命中81条记录)
弹出式卫星档案标记 pop-up satellite archival tags, PAT	在标记个体中植入可自动脱离的标记, 可设定脱离时间或因外因脱离, 脱离后该标记能向卫星传送数据记录	能够记录大尺度的移动信息和标记个体经历的环境信息	价格昂贵; 回收率不高, 标记物和数据下载技术仍需进一步的改进和精细化		

间潜在分布<sup>[48]</sup>、生物多样性预测<sup>[49]</sup>、生态系统保护和修复<sup>[50]</sup>等与生物个体分布相关的研究中。在国内, ANN已应用于经济类渔业资源的渔情预报<sup>[51]</sup>等方面。相比ANN模型, RF不易产生过度拟合的现象<sup>[52]</sup>, 且RF模型可以处理非线性问题, 且不需对数据进行预处理, 可通过对大量分类树的汇总提高模型的预测精度。RF在陆地水文现象预测<sup>[53]</sup>和植被空间分布<sup>[54]</sup>研究的应用中

也取得较好效果, 在鱼类<sup>[45]</sup>的洄游分布及渔场预报<sup>[52]</sup>方面也有较好应用。

Meynard等<sup>[44]</sup>比较了GLM、GAM等模型的预测表现。实际应用中, GLM模型被广泛应用于物种的潜在分布与生境预测, 国内相关研究涉及经济鱼类渔场与环境因子的关系<sup>[55]</sup>和栖息地综合指数<sup>[56]</sup>等方面。GAM可以很好地展现因变量和多个自变量间的非线性关系, 并且具备较好的资

源时空分布预测功能,已广泛应用在水生生物资源的时空特征与环境因子之间的关系研究中<sup>[57-58]</sup>。同时,随着模型的逐步改进,GAM模型在解决采样数据零值方面也有良好应用<sup>[59]</sup>,很适合用于独立调查为样本数据来源的渔业相关研究中<sup>[60]</sup>。

此外,支持向量机(support vector machine, SVM)和分类与回归树(classification and regression trees, CART)等模型也常被用于水生动物的洄游分布预测。SVM基本思想是通过一个非线性映射,把样本空间映射到一个高维乃至无穷维的特征空间中,使得在原来的样本空间中非线性可分的问题转化为在特征空间中的线性可分的问题<sup>[61]</sup>,相关研究包括生物栖息地指数<sup>[62]</sup>和渔情预报<sup>[63]</sup>等方面。CART是一种递归回归树模型,可以从大量的解释变量中选择最重要的解释变量(x)来确定因变量(y),CART已应用于鱼类空间动态分布和聚集模式<sup>[64]</sup>、空间丰富度<sup>[65]</sup>和渔情预报<sup>[66]</sup>等方面。杨晓龙等<sup>[37]</sup>系统总结了海洋潜在生境预测中常用SDMs的分类与功能,可作为SDMs预测比较研究的参考。

## 2.2 模型评价

模型预测精度的评价是预测模型发展过程中很重要的一个方面。模型精度的评价给模型之间的比较及模型的改进提供了基础,同时,模型的评价帮助研究者发现研究对象、数据等模型组成元素对资源分布预测的影响程度。分布模型的预测,一般以布尔值(1表示潜在分布,0表示潜在不分布)或连续值(概率大小表示物种分布的可能性)给出模拟结果<sup>[67]</sup>,对应的模型评价方法也分为2类:阈值相关法(threshold-dependent)和阈值无关法(threshold-independent)<sup>[45, 67]</sup>。阈值相关法流行评价指标以真实技巧统计值(true skill statistic, TSS)<sup>[68]</sup>、Kappa<sup>[45, 68]</sup>和正确预测指标(correctly classified instances, CCI)<sup>[45, 69]</sup>为主。各评价指标的值越大,表明模型的预测性能越好。阈值无关法的主要评价指标包括最大卡帕系数(maximum Kappa)、最大真实技巧统计值、受试者操作特征曲线下面积(area under receiver operating character curve, AUC)、基尼系数(Gini index)、点二列相关系数、均方差、均方根误差、决定系数和平均绝对预测误差<sup>[67]</sup>。这其中,以AUC应用最为广泛<sup>[45, 70]</sup>,AUC值越大,表明模型的预测性能越好。许仲林等<sup>[67]</sup>系统总结评述了各评价指标的适

用性和优缺点,可作为模型评价研究的参考。

## 3 微量元素和稳定同位素分析推测

### 3.1 微量元素分析

基于耳石等机体组织具有生境指纹等特征<sup>[71]</sup>,其含有的微量元素组成常被用于推测水生生物个体的生活履历<sup>[72]</sup>。利用耳石等机体组织推测水生动物的洄游分布的方法原理一般为:利用激光剥蚀等离子电感耦合质谱等设备测定研磨后的硬组织的切面微化学元素分布<sup>[73]</sup>,以微量元素与钙元素比值<sup>[74]</sup>(如Sr/Ca)等方式,建立研究个体从硬组织切面核心区(个体出生)至边缘区(个体死亡)整个时间序列的元素分布模式<sup>[73-75]</sup>,结合研究对象的采样时间和年龄反推得到其出生至死亡(捕捞或采样死亡)的时间周期。利用该时间周期不同时间段的水域温度、盐度和相应微量元素浓度等环境数据,依据或参考实验室条件或野外环境条件下已确定的相应微量元素沉积与水体温度、盐度等环境因子之间的关系<sup>[76]</sup>,推测研究个体(群)从出生至死亡各主要生命阶段出现在高/低温度、高/低盐度、高/低元素浓度等环境因子对应水域的可能性<sup>[77]</sup>。如Zumholz<sup>[78]</sup>运用激光剥蚀电感耦合等离子质谱技术从时间序列上分析了贻乌贼(*Gonatus fabricii*)耳石中的9中微量元素,一方面从Ba/Ca的变化证实了贻乌贼幼体生活在表层水域而成体生活在深层水域,另一方面根据耳石中心至外围区U/Ca和Sr/Ca逐渐增加的趋势,推断出贻乌贼成体后向冷水区进行洄游。

在微量元素与钙的比值中,Sr/Ca的研究应用较为广泛,现有研究较多地认为耳石中Sr/Ca的大小与水体盐度存在正相关关系<sup>[79]</sup>,且海水中Sr浓度要远大于淡水中的Sr浓度,所以,Sr/Ca被广泛应用于水生动物在淡水之间的洄游推测。国内研究者利用耳石中Sr/Ca比值与环境因子的关系,研究推测了鲚属(*Coilia*)<sup>[80]</sup>、鳗鲡属(*Anguilla*)<sup>[81]</sup>、带鱼(*Trichiurus lepturus*)<sup>[82]</sup>、金枪鱼(*Thunnus thynnus*)<sup>[83]</sup>等鱼类和头足类(Cephalopoda)<sup>[77]</sup>等水生动物的洄游分布。

### 3.2 稳定同位素分析

近年来,稳定同位素分析逐渐应用在水生动物洄游移动的推测研究中,其方法原理可总结为:机体组织当中稳定同位素印记反映了栖息水域的食物网<sup>[84]</sup>,基于不同的生化过程,食物

网中的稳定同位素含量具有空间差异性。生物体在同位素不同的食物网之间移动时,保留了先前摄食位置的信息。这些信息印记依赖于组织对化学元素的转化效率<sup>[85]</sup>,通过热电质谱仪等技术设备分析机体组织中稳定同位素含量,或者利用激光剥蚀等离子质谱仪等设备检测机体组织研磨截面的稳定同位素含量<sup>[86]</sup>,将分析结果与水体当中相应稳定同位素的含量进行比较,推测研究个体(群)可能出现的地理位置。

已有研究发现,碳稳定同位素比值( $\delta C^{13}$ )能够反映水生动物摄食海域的初级生产力水平(环境的空间差异)<sup>[87]</sup>,且借鉴近岸海床 $C^{13}$ 含量显著高于远海<sup>[88]</sup>,以及表层海水 $C^{13}$ 含量高于底层海水<sup>[89]</sup>的研究发现, $\delta C^{13}$ 多用来指示生物个体(群体)在近远海、表底层、高低纬度海域的洄游经历<sup>[90]</sup>。氧稳定同位素比值( $\delta O^{18}$ )可作为 $\delta C^{13}$ 的有效补充,用来指示个体(群体)所经历的温度<sup>[91]</sup>和盐度<sup>[92]</sup>变化。例如通过研究目标生物个体上附着的藤壶(*Balanus*)贝壳中的 $\delta O^{18}$ 变化来间接推测目标生物所经历的温度和盐度环境,这一方法已应用于鲸鱼<sup>[93]</sup>和海龟<sup>[94]</sup>的洄游分布研究中。锶稳定同位素比值( $\delta Sr^{87}$ )在溯河洄游鱼类的起源的研究中被认为非常有效<sup>[87]</sup>,利用耳石年轮结构中印记的环境信息, $\delta Sr^{87}$ 在大麻哈鱼<sup>[95]</sup>的溯河洄游研究中已有较多应用。在利用稳定同位素分析的生物机体材料的选取方面,耳石、鳍条、骨骼和肌肉常被用作此类研究的信息载体<sup>[96]</sup>,进而对水生生物在近海与外海、海洋与河流之间洄游移动进行推测<sup>[97]</sup>。

#### 4 总结与展望

标记技术可以对标记物种某生活阶段的洄游过程进行监测,能够直观地了解标记物种的洄游路线,是水生动物洄游分布研究的实证研究方法。但是,标记技术往往要求标记物种为大个体样本,且标记个体并不一定反映了所属群体的洄游分布<sup>[98]</sup>,ITP<sup>[3,16]</sup>和OTN<sup>[21]</sup>计划的建立为水生生物洄游标记研究的发展提供了参考方向。标记计划合作研究的目的是收集标记物种的各种信息,包括生活史信息、种群动态信息、管理策略信息,以促进各种信息的收集与整合,并利于制定科学与全面的标记物种管理策略。国际合作性的标记研究对我国一些水生动物标记研究具有借鉴意义,尤其是跨研究区域和管理区域溯河和降海洄游的水生濒危生物。在国

际标记合作计划开展的过程中,也面临着电子标记物的统一和标准化、生态标记物和海洋环境标记物信号的交互影响排除、地理信息位置精度最大化等问题<sup>[21]</sup>。此外,标记物对标记物种生长、死亡等生活史过程的影响仍未得到有效评价,在复杂多变的外部环境(冰冻条件下等)中,标记物如何更好地保持在标记种类的身体上均给标记技术带来挑战。

近年来,生物分布预测模型在水生动物潜在分布研究领域中的应用进展迅速,为水生生物多样性保护和水生资源科学管理提供了理论依据,但随着研究的深入和理论框架的完善,也面临一些困境与挑战。分布模型的预测精度受到数据源的影响,用于构建模型的海洋环境数据多来自卫星遥感和声学观测,现场调查不能完全覆盖物种分布水域,通过插值法获得数据存在误差<sup>[37]</sup>;模型注重分析环境因子对物种分布的影响,忽略了生物之间的交互作用,通过捕食被捕食关系间接预测捕(被)食者的分布热点可以进一步掌握研究物种的洄游分布情况<sup>[99]</sup>。

环境因子与生物机体组织中微量元素含量之间的关系,是利用微量元素分析推测生物体洄游分布的理论基础。实际应用中,一方面耳石等生物体组织微结构形成是一个复杂的过程,通常受到其生物环境(如饵料)和非生物环境(如温度和盐度)的影响。另一方面环境因子与生物体组织微量元素沉积的关系一般通过实验室饲养<sup>[100]</sup>确定或者借鉴相近种类已有实验结果作为参考,这忽略了野生复杂环境条件对微量元素沉积的实际影响,以及物种响应和环境变化之间存在滞后效应<sup>[101]</sup>。此外,当一个环境因子变化时会影响另一个环境因子对微量化学元素沉积的作用,由此产生了环境因子间的交互作用<sup>[102]</sup>,在环境因子不稳定的海域(如河口)开展此类研究时应当考虑这些交互作用产生的影响。再者,海水中一些化学元素的时空分布(数据)变动仍未得到重视,尤其是对此类研究非常有帮助的一些元素(如Sr和Ba)<sup>[72]</sup>。因此,为了全面掌握环境因子对生物体组织微结构形成的影响,需要加强多学科的合作。

3种方法是水生生物洄游分布研究的有效工具,并且现有研究注重了各方法内部所用不同标记技术、分布模型、硬组织材料之间的比较分析,但尚缺乏3种方法在此类研究上的交叉与

协同应用, 这在一些研究者的展望中均有提及<sup>[103]</sup>。此外, 对于渔业资源生物来讲, 渔获量统计分析法也可以推测出捕捞对象的洄游分布, 长期大量收集生产作业船的渔捞记录, 按照渔区、旬月进行捕捞对象的渔获量统计, 将统计资料按照捕捞对象分别绘制各渔区渔获量分布图, 根据时间序列的渔获量分布图, 可分析和推测捕捞对象的洄游路线和分布范围<sup>[104]</sup>。

水生动物时空洄游分布的研究可为水生生物保护区的设立提供决策支持<sup>[105]</sup>, 这已成为一个重要研究领域。针对我国渔业等水生生物资源衰退的现状, 在设立海洋保护区时, 可根据洄游分布的研究方法掌握经济物种或濒危物种的适宜栖息地, 从而为水生生物保护区的划界提供科学的理论参考。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Estes J A, Terborgh J, Brashares J S, *et al.* Trophic downgrading of planet earth[J]. *Science*, 2011, 333 (6040): 301-306.
- [ 2 ] Thrush S F, Dayton P K. Disturbance to marine benthic habitats by trawling and dredging: implications for marine biodiversity[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 449-473.
- [ 3 ] McFarlane G A, Wydoski R S, Prince E D. Historical review of the development of external tags and marks[J]. *American Fisheries Society Symposium*, 1990, 7: 9-29.
- [ 4 ] Peterson A T, Vieglais D A. Predicting species invasions using ecological niche modeling: new approaches from bioinformatics attack a pressing problem[J]. *BioScience*, 2001, 51(5): 363-371.
- [ 5 ] Williams P H, Araújo M B. Using probability of persistence to identify important areas for biodiversity conservation[J]. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 2000, 267(1456): 1959-1966.
- [ 6 ] Ikeda Y, Arai N, Kidokoro H, *et al.* Strontium: calcium ratios in statoliths of Japanese common squid *Todarodes pacificus* (Cephalopoda: Ommastrephidae) as indicators of migratory behavior[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 251: 169-179.
- [ 7 ] Hussey N E, McCarthy I D, Dudley S F J, *et al.* Nursery grounds, movement patterns and growth rates of dusky sharks, *Carcharhinus obscurus*: a long-term tag and release study in South African waters[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2009, 60(6): 571-583.
- [ 8 ] Rounsefell G A, Everhart W H. *Fishery science: its methods and applications*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1953.
- [ 9 ] Jacobsson J. On fish tags and tagging[M]//Barnes H. *Oceanography and marine biology: an annual review*. London: George Alien and Unwin Ltd., 1970: 457-499.
- [ 10 ] Carey F G, Lawson K D. Temperature regulation in free-swimming bluefin tuna[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology*, 1973, 44(2): 375-392.
- [ 11 ] Delong R L, Stewart B S, Hill R D. Documenting migrations of northern elephant seals using day length[J]. *Marine Mammal Science*, 1992, 8(2): 155-159.
- [ 12 ] Block B A, Dewar H, Farwell C, *et al.* A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(16): 9384-9389.
- [ 13 ] Papaconstantinou C, Zenetos A, Vassilopoulou V, *et al.* State of hellenic fisheries[M]. Athens: Hellenic Center of Marine Research Publications, 2007: 369-375.
- [ 14 ] Woodbury A M, Ricker W E, Cottam C, *et al.* Symposium: uses of marking animals in ecological studies[J]. *Ecology*, 1956, 37(4): 665-689.
- [ 15 ] Casey J G. Transatlantic migrations of the blue shark: a case history of cooperative shark tagging[C]//Stroud R H. *World angling resources and challenges: proceedings of the first world angling conference*. Cap d'Agde, France: International Game Fish Association, Ft. Lauderdale, 1985: 253-268.
- [ 16 ] Kohler N E, Turner P A. Shark tagging: a review of conventional methods and studies[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2001, 60(1-3): 191-224.
- [ 17 ] Arnold G, Dewar H. Electronic tags in marine fisheries research: a 30-year perspective[C]//Proceedings of the Symposium on Tagging and Tracking Marine Fish with Electronic Devices. Dordrecht: Springer, 2001: 7-64.
- [ 18 ] Hussey N E, Kessel S T, Aarestrup K, *et al.* Aquatic animal telemetry: a panoramic window into the underwater world[J]. *Science*, 2015, 348(6240): 1255642.
- [ 19 ] Hanson K C, Barron J M. Evaluation of the effects of

- marking Pacific lamprey ammocoetes with visual implant elastomer, coded wire tags, and passive integrated transponders[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2017, 146(4): 626-633.
- [ 20 ] Lin M L, Xia Y G, Murphy B R, *et al.* Size-dependent effects of coded wire tags on mortality and tag retention in redbtail culter *Culter mongolicus*[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2012, 32(5): 968-973.
- [ 21 ] O'Dor R K, Stokesbury M J W. The ocean tracking network: adding marine animal movements to the global ocean observing system[M]//Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, *et al.* Tagging and tracking of marine animals with electronic devices. Dordrecht: Springer, 2009: 91-100.
- [ 22 ] Trudel M, Fisher J, Orsi J A, *et al.* distribution and migration of juvenile chinook salmon derived from coded wire tag recoveries along the continental shelf of western North America[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2009, 138(6): 1369-1391.
- [ 23 ] Miller M J, Able K W. Movements and growth of tagged young-of-the-year Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus* L.) in restored and reference marsh creeks in Delaware Bay, USA[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, 267(1): 15-33.
- [ 24 ] Stasko A B, Pincock D G. Review of underwater biotelemetry, with emphasis on ultrasonic techniques[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1977, 34(9): 1261-1285.
- [ 25 ] Klimley A P, Voegeli F, Beavers S C, *et al.* Automated listening stations for tagged marine fishes[J]. *Marine Technology Society Journal*, 1998, 32: 94-101.
- [ 26 ] McMichael G A, Eppard M B, Carlson T J, *et al.* The juvenile salmon acoustic telemetry system: a new tool[J]. *Fisheries*, 2010, 35(1): 9-22.
- [ 27 ] Heupel M R, Semmens J M, Hobday A J. Automated acoustic tracking of aquatic animals: scales, design and deployment of listening station arrays[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2006, 57(1): 1-13.
- [ 28 ] Cooke S J, Midwood J D, Thiem J D, *et al.* Tracking animals in freshwater with electronic tags: past, present and future[J]. *Animal Biotelemetry*, 2013, 1: 5.
- [ 29 ] Núñez-Rodríguez J, Duponchelle F, Cotrina-Doria M, *et al.* Movement patterns and home range of wild and restocked *Arapaima gigas* (Schinz, 1822) monitored by radio-telemetry in Lake Imiria, Peru[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2015, 31(suppl.4): 10-18.
- [ 30 ] 黄松林, 胡德夫, 陈力. PIT标记在野生动物个体识别中的应用研究[J]. *野生动物学报*, 2016, 37(2): 172-177.
- Huang S L, Hu D F, Chen L. Study on application of passive integrated transponder(PIT) in wildlife individual identification[J]. *Chinese Journal of Wildlife*, 2016, 37(2): 172-177(in Chinese).
- [ 31 ] Furukawa S, Fujioka K, Fukuda H, *et al.* Archival tagging reveals swimming depth and ambient and peritoneal cavity temperature in age-0 Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, off the southern coast of Japan[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2017, 100(1): 35-48.
- [ 32 ] Briggs A S, Hondorp D W, Quinlan H R, *et al.* Electronic archival tags provide first glimpse of bathythermal habitat use by free-ranging adult lake sturgeon *Acipenser fulvescens*[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2016, 31(3): 477-483.
- [ 33 ] Epperly S P, Wyneken J, Flanagan J P, *et al.* Attachment of popup archival transmitting (PAT) tags to loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*)[J]. *Herpetological Review*, 2007, 38(4): 419-425.
- [ 34 ] Campana S E, Fisk A T, Klimley A P. Movements of Arctic and northwest Atlantic Greenland sharks (*Somniosus microcephalus*) monitored with archival satellite pop-up tags suggest long-range migrations[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 115: 109-115.
- [ 35 ] Mouton A M, Schneider M, Peter A, *et al.* Optimisation of a fuzzy physical habitat model for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) in the Aare river (Thun, Switzerland)[J]. *Ecological Modelling*, 2008, 215(1-3): 122-132.
- [ 36 ] 李国庆, 刘长成, 刘玉国, 等. 物种分布模型理论研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 4827-4835.
- Li G Q, Liu C C, Liu Y G, *et al.* Advances in theoretical issues of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 4827-4835(in Chinese).
- [ 37 ] 杨晓龙, 杨超杰, 胡成业, 等. 物种分布模型在海洋潜



- 在生境预测的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 2063-2072.
- Yang X L, Yang C J, Hu C Y, *et al.* Application of species distribution models in the prediction of marine potential habitat: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 2063-2072(in Chinese).
- [ 38 ] Elith J, Leathwick J R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2009, 40: 667-697.
- [ 39 ] Robinson N M, Nelson W A, Costello M J, *et al.* A systematic review of marine-based species distribution models (SDMs) with recommendations for best practice[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2017, 4: 421.
- [ 40 ] Pearson R G. Species' distribution modeling for conservation educators and practitioners[J]. *Lessons in Conservation*, 2007, 3: 54-89.
- [ 41 ] Guisan A, Zimmermann N E. Predictive habitat distribution models in ecology[J]. *Ecological Modelling*, 2000, 135(2/3): 147-186.
- [ 42 ] 刘芳, 李晟, 李迪强. 利用分布有/无数据预测物种空间分布的研究方法综述[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7047-7057.
- Liu F, Li S, Li D Q. The review of methods for mapping species spatial distribution using presence/absence data[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7047-7057.
- [ 43 ] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models[J]. *Ecology Letters*, 2010, 8(9): 993-1009.
- [ 44 ] Meynard C N, Quinn J F. Predicting species distributions: a critical comparison of the most common statistical models using artificial species[J]. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(8): 1455-1469.
- [ 45 ] Fukuda S, De Baets B, Waegeman W, *et al.* Habitat prediction and knowledge extraction for spawning European grayling (*Thymallus thymallus* L.) using a broad range of species distribution models[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47: 1-6.
- [ 46 ] Garrett J H. Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1994, 8(2): 129-130.
- [ 47 ] Lee S, Park I, Koo B J, *et al.* Macroinvertebrates habitat potential mapping using GIS-based artificial neural network models[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67(1-2): 177-186.
- [ 48 ] Choi J, Oh H J, Won J S, *et al.* Validation of an artificial neural network model for landslide susceptibility mapping[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(3): 473-483.
- [ 49 ] Lek S, Guégan J F. Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction[J]. *Ecological Modelling*, 1999, 120(2/3): 65-73.
- [ 50 ] Goethals P L M, Dedecker A P, Gabriels W, *et al.* Applications of artificial neural networks predicting macroinvertebrates in freshwaters[J]. *Aquatic Ecology*, 2007, 41(3): 491-508.
- [ 51 ] 汪金涛. 大洋性经济柔鱼渔情预报与资源量评估研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Wang J T. Fishery forecasting and stock assessment for commercial oceanic ommastrephid squid[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015(in Chinese).
- [ 52 ] 陈雪忠, 樊伟, 崔雪森, 等. 基于随机森林的印度洋长鳍金枪鱼渔场预报[J]. *海洋学报*, 2013, 35(1): 158-164.
- Chen X Z, Fan W, Cui X S, *et al.* Fishing ground forecasting of *Thunnus alalunga* in Indian Ocean based on random forest[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35(1): 158-164(in Chinese).
- [ 53 ] 吴晶, 陈元芳, 余胜男. 基于随机森林模型的干旱预测研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(11): 17-22.
- Wu J, Chen Y F, Yu S N. Research on drought prediction based on random forest model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(11): 17-22(in Chinese).
- [ 54 ] 张晓羽. 黑龙江省森林植被空间分布及影响因子研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- Zhang X Y. Spatial distribution of forest vegetation and its impact factors in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016(in Chinese).
- [ 55 ] 郑波, 陈新军, 李纲. GLM和GAM模型研究东黄海鲈资源渔场与环境因子的关系[J]. *水产学报*, 2008, 32(3): 379-386.
- Zheng B, Chen X J, Li G. Relationship between the resource and fishing ground of mackerel and environmental factors based on GAM and GLM models in the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(3): 379-386(in Chinese).
- [ 56 ] 武亚苹. 基于QRM、GLM和GAM的吉尔伯特群岛海

- 域黄鳍金枪鱼栖息地综合指数比较[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- Wu Y P. A Comparison on integrated habitat index for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in waters near gilbert islands based on QRM, GLM and GAM[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012(in Chinese).
- [ 57 ] 陈新军, 田思泉. 利用GAM模型分析表温和时空因子对西北太平洋海域柔鱼资源状况的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2007(2): 104-113.
- Chen X J, Tian S Q. Effects of SST and temp-spatial factors on abundance of Nylon flying squid *ommatrephes bartrami* in the Northwestern Pacific using generalized additive models[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(2): 104-113(in Chinese).
- [ 58 ] Li B, Cao J, Chang J H, *et al.* Evaluation of effectiveness of fixed-station sampling for monitoring American lobster settlement[J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2015, 35(5): 942-957.
- [ 59 ] Porch C E. A numerical evaluation of GLM methods for estimating indices of abundance from west Atlantic small bluefin tuna catch per trip data when the data are aggregated to minimize zero catches[J]. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers*, 1995, 44(2): 332-336.
- [ 60 ] Barry S C, Welsh A H. Generalized additive modelling and zero inflated count data[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 157(2-3): 179-188.
- [ 61 ] 张浩然, 韩正之, 李昌刚. 支持向量机[J]. *计算机科学*, 2002, 29(12): 135-137, 142.
- Zhang H R, Han Z Z, Li C G. Support vector machine[J]. *Computer Science*, 2002, 29(12): 135-137, 142(in Chinese).
- [ 62 ] 周建坤. 基于分位数回归和支持向量机模型的长鳍金枪鱼栖息环境综合指数比较——以库克群岛海域调查数据为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- Zhou J K. A comparison of integrated habitat index for albacore tuna between quantile regression method and support vector machine method: a case study based on survey data in waters near Cook islands[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016(in Chinese).
- [ 63 ] 袁红春, 黎莹, 熊范纶. 一种新的面向渔情预测的智能数据处理模型研究[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(12): 4520-4522.
- Yuan H C, Li Y, Xiong F L. Novel intelligent data processing model for fishery forecasting[J]. *Application Research of Computers*, 2009, 26(12): 4520-4522(in Chinese).
- [ 64 ] Gutiérrez M, Swartzman G, Bertrand A, *et al.* Anchovy (*Engraulis ringens*) and sardine (*Sardinops sagax*) spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983-2003[J]. *Fisheries Oceanography*, 2007, 16(2): 155-168.
- [ 65 ] Guo C B, Lek S, Ye S W, *et al.* Predicting fish species richness and assemblages with climatic, geographic and morphometric factors: a broad-scale study in Chinese lakes[J]. *Limnologica*, 2015, 54: 66-74.
- [ 66 ] 崔雪森, 伍玉梅, 张晶, 等. 基于分类回归树算法的东南太平洋智利竹筴鱼渔场预报[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(7-8): 53-59.
- Cui X S, Wu Y M, Zhang J, *et al.* Fishing ground forecasting of Chilean Jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the Southeast Pacific ocean based on CART decision tree[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(7-8): 53-59(in Chinese).
- [ 67 ] 许仲林, 彭焕华, 彭守璋. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 557-567.
- Xu Z L, Peng H H, Peng S Z. The development and evaluation of species distribution models[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 557-567(in Chinese).
- [ 68 ] Allouche O, Tsoar A, Kadmon R. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS)[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(6): 1223-1232.
- [ 69 ] Mouton A M, De Baets B, Goethals P L M. Ecological relevance of performance criteria for species distribution models[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(16): 1995-2002.
- [ 70 ] Raes N, ter Steege H. A null-model for significance testing of presence-only species distribution models[J]. *Ecography*, 2007, 30(5): 727-736.
- [ 71 ] Campana S E. Otolith science entering the 21st century[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2005, 56(5): 485-495.
- [ 72 ] Elsdon T S, Wells B K, Campana S E, *et al.* Otolith chemistry to describe movements and life-history parameters of fishes: hypotheses, assumptions, limitations and inferences[J]. *Oceanography and*

- Marine Biology: An Annual Review, 2008, 46: 297-330.
- [ 73 ] Panfili J, Darnaude A M, Lin Y J, *et al.* Habitat residence during continental life of the European eel *Anguilla anguilla* investigated using linear discriminant analysis applied to otolith Sr : Ca ratios[J]. *Aquatic Biology*, 2012, 15(2): 175-185.
- [ 74 ] Milton D A, Chenery S R. Movement patterns of barramundi *Lates calcarifer*, inferred from 87Sr/86Sr and Sr/Ca ratios in otoliths, indicate non-participation in spawning[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 301: 279-291.
- [ 75 ] 熊瑛, 刘洪波, 汤建华, 等. 耳石微化学在海洋鱼类洄游类型和种群识别研究中的应用[J]. *生命科学*, 2015, 27(7): 953-959.
- Xiong Y, Liu H B, Tang J H, *et al.* Application of otolith microchemistry on reconstruction of migratory patterns and stock discrimination in marine fishes[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2015, 27(7): 953-959(in Chinese).
- [ 76 ] Thorrold S R, Jones C M, Campana S E. Response of otolith microchemistry to environmental variations experienced by larval and juvenile Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*)[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(1): 102-111.
- [ 77 ] Liu B L, Cao J, Truesdell S B, *et al.* Reconstructing cephalopod migration with statolith elemental signatures: a case study using *Dosidicus gigas*[J]. *Fisheries Science*, 2016, 82(3): 425-433.
- [ 78 ] Zumholz K. The influence of environmental factors on the micro-chemical composition of cephalopod statoliths[D]. Kiel, Germany: University of Kiel, 2005.
- [ 79 ] Secor D H, Rooker J R. Is otolith strontium a useful scalar of life cycles in estuarine fishes?[J]. *Fisheries Research*, 2000, 46(1-3): 359-371.
- [ 80 ] 李孟孟, 姜涛, 陈婷婷, 等. 长江安庆江段刀鲚耳石微化学及洄游生态学意义[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2788-2795.
- Li M M, Jiang T, Chen T T, *et al.* Otolith microchemistry of the estuarine tapertail anchovy *Coilia nasus* from the Anqing section of the Yangtze River and its significance for migration ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(8): 2788-2795(in Chinese).
- [ 81 ] 张亚, 郭弘艺, 唐文乔, 等. 长江口日本鳗鲡幼体矢耳石元素的SRXRF分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2013, 22(6): 821-826.
- Zhang Y, Guo H Y, Tang W Q, *et al.* Elemental SRXRF analysis of sagittal otolith of Japanese eel larvae collected from Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2013, 22(6): 821-826(in Chinese).
- [ 82 ] 窦硕增, 横内一树, 于鑫, 等. 基于EPMA的耳石Sr:Ca比分析及其在鱼类生活履历反演中的应用实例研究[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(4): 512-520.
- Dou S Z, Yokouchi K, Yu X, *et al.* Reconstructing migratory history of fish using otolith strontium : calcium ratios by EPMA: A case study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(4): 512-520(in Chinese).
- [ 83 ] 朱国平. 金枪鱼类耳石微化学研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2211-2218.
- Zhu G P. Otolith microchemistry of tuna species: research progress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2211-2218(in Chinese).
- [ 84 ] Michener R H, Schell D M. Stable isotope ratios as tracers in marine aquatic food webs[M]//Lajtha K, Michener R. *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Oxford: Blackwell, 1994: 138-157.
- [ 85 ] Hobson K A, Clark R G. Assessing avian diets using stable isotopes I: turnover of 13C in tissues[J]. *Condor: Ornithological Applications*, 1992, 94(1): 181-188.
- [ 86 ] Milton D A, Chenery S R. Movement patterns of the tropical shad hilsa (*Tenualosa ilisha*) inferred from transects of 87Sr/86Sr isotope ratios in their otoliths[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, 60(11): 1376-1385.
- [ 87 ] Zimmo S, Blanco J, Nebel S. The use of stable isotopes in the study of animal migration[J]. *Nature Education Knowledge*, 2012, 3(12): 3.
- [ 88 ] Fry B. Natural stable carbon isotope tag traces Texas shrimp migrations[J]. *Fishery Bulletin*, 1981, 79(2): 337-345.
- [ 89 ] Schwarcz H P, Gao Y, Campana S, *et al.* Stable carbon isotope variations in otoliths of Atlantic cod (*Gadus morhua*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, 55(8): 1798-1806.
- [ 90 ] ChereI Y, Hobson K A. Geographical variation in carbon stable isotope signatures of marine predators: a tool to investigate their foraging areas in the Southern

- Ocean[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 329: 281-287.
- [ 91 ] Begg G A, Weidman C R. Stable  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  isotopes in otoliths of haddock *Melanogrammus aeglefinus* from the northwest Atlantic Ocean[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 216: 223-233.
- [ 92 ] Kerr L A, Secor D H, Kraus R T. Stable isotope ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) and Sr/Ca composition of otoliths as proxies for environmental salinity experienced by an estuarine fish[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2007, 349: 245-253.
- [ 93 ] Killingley J S. Migrations of California gray whales tracked by oxygen-18 variations in their epizoic barnacles[J]. *Science*, 1980, 207(4432): 759-760.
- [ 94 ] Killingley J S, Lutcavage M. Loggerhead turtle movements reconstructed from  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$  profiles from commensal barnacle shells[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 16(3): 345-349.
- [ 95 ] Kennedy B P, Folt C L, Blum J D, *et al.* Natural isotope markers in salmon[J]. *Nature*, 1997, 387(6635): 766-767.
- [ 96 ] Zannella C, Adamo P, Opper C, *et al.* Isotopic and elemental analysis of fish tissues for provenance determination[C]//Proceedings of the 19th EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria: EGU, 2017: 19.
- [ 97 ] 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 等. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052-3060.
- Li Z Y, Jin X S, Zhuang Z M, *et al.* Applications of stable isotope techniques in aquatic ecological studies[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3052-3060(in Chinese).
- [ 98 ] Torniaainen J, Lensu A, Vuorinen P J, *et al.* Oxygen and carbon isoscapes for the Baltic Sea: testing their applicability in fish migration studies[J]. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(7): 2255-2267.
- [ 99 ] Sydeman W J, Brodeur R D, Grimes C B, *et al.* Marine habitat “hotspots” and their use by migratory species and top predators in the North Pacific Ocean: introduction[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(3-4): 247-249.
- [100] Arkhipkin A I. Statoliths as ‘black boxes’ (life recorders) in squid[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2005, 56(5): 573-583.
- [101] Zumholz K, Hansteen T H, Piatkowski U, *et al.* Influence of temperature and salinity on the trace element incorporation into statoliths of the common cuttlefish (*Sepia officinalis*)[J]. *Marine Biology*, 2007, 151(4): 1321-1330.
- [102] Bath M G, Thorrold S R. Temperature and salinity effects on magnesium, manganese, and barium incorporation in otoliths of larval and early juvenile spot *Leiostomus xanthurus*[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 293: 223-232.
- [103] Lorrain A, Argüelles J, Alegre A, *et al.* Sequential isotopic signature along gladius highlights contrasted individual foraging strategies of jumbo squid (*Dosidicus gigas*)[J]. *PLoS One*, 2011, 6(7): e22194.
- [104] 陈新军, 刘必林. 渔业资源生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2017, 164-171.
- Chen X J, Liu B L. Fishery resources biology[M]. Beijing: Science Press, 2017: 164-171(in Chinese).
- [105] Afonso P, Fontes J, Guedes R, *et al.* A multi-scale study of red porgy movements and habitat use, and its application to the design of marine reserve networks[M]//Nielsen J L, Arrizabalaga H, Fragoso N, *et al.* Tagging and tracking of marine animals with electronic devices. Dordrecht: Springer, 2009: 423-443.

## Review of the research methods for migration and distribution of aquatic animals

MA Jin<sup>1</sup>, TIAN Siqun<sup>2,3,4,5</sup>, CHEN Xinjun<sup>2,3,4,5\*</sup>

(1. *College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

3. *National Distant-Water Fisheries Engineering Research Center, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

4. *Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

5. *Key Laboratory of Exploitation of Ocean Fisheries Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)*

**Abstract:** Migration and distribution of aquatic animals have always been considered as the research hotspots of aquatic ecology, and the aim is to understand the pattern of migration and the relationship between migration and environmental factors. This kind of research plays an important role in the protection and management strategy of aquatic animals. Monitor by tagging, prediction by species distribution models, speculation based on analysis of microchemistry and stable isotope recorded in organism tissues are the three main methods and have widely been used in the research aspects including species distribution under climate influence. The three methods consist of many technological tools, models and test contents in its own method system respectively, but little study has focused on the summary of these methods, and collaborative usage of the three methods has not received high attention. So the three main methods for understanding migration and distribution of aquatic animals were reviewed. Meanwhile, literature research on migration and distribution of aquatic animals using related methods was introduced to some extent. The three methods were recognized as effective tools for understanding migration and distribution of aquatic animals, and the present study has focused on the comparison among the different means which were used in each of the three methods, but little research has displayed high value on collaborative usage of the three methods. In addition, statistical analysis of catch can be used to know the migration pattern of fishes and other fishery resources in fishery. The suggestions listed in this paper can provide good reference for the research on migration and distribution of aquatic animals.

**Key words:** aquatic animals; migration and distribution; microchemistry; stable isotope; tagging; distribution model

**Corresponding author:** CHEN Xinjun. E-mail: xjchen@shou.edu.cn

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (41876141)