

文章编号: 1000- 0615(2005)05- 0706- 05

• 综述 •

渔场渔情分析预报的研究及其进展

樊 伟^{1, 2}, 崔雪森², 沈新强¹

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090;

2. 中国水产科学研究院渔业资源遥感信息技术重点开放实验室, 上海 200090)

关键词: 渔场; 渔情分析预报; 卫星遥感; 地理信息系统; 数据挖掘; 人工智能

中图分类号: S934

文献标识码: A

Progress in fishing-ground analysis and fishing condition forecasting

FAN Wei^{1, 2}, CUI Xue-sen², SHEN Xin-qiang¹

(1. Key Laboratory of Marine & Estuarine Fisheries, Ministry of Agriculture,

East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences Shanghai 200090, China;

2. Key Laboratory of Fisheries Resources Remote Sensing and Information Technology,

Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Fishing-ground analysis and fishing condition forecasting are important research focuses of fisheries oceanography in recent decades. Theoretic basis of fishing-ground analysis and fishing condition analysis are summarized firstly, then the ways of data acquired, technologies for fishery mapping and visualization analysis, as well as new analysis and predicting methods are described, such as spatial analysis models and geostatistics, artificial intelligence, rough set, fuzzy logic, Bayesian probability forecasting, numerical simulation and so on.

Key words: fishing-ground; fishing condition analysis and forecasting; satellite remote sensing; geographical information system; data mining; artificial intelligence

早在 19 世纪末期,人们在有限的海洋水文调查的基础上,就开始了渔场海洋学的研究探索并试图进行渔情分析和渔场预报^[1]。但由于当时的技术条件限制和所获数据非常有限,其分析预报结果可想而知。20 世纪 60 年代卫星遥感技术出现之后,人们开始能够快速获取大范围实时或准实时的海水表层温度(SST)、海洋水色、海洋动力环境等渔场环境信息,渔场渔情分析预报逐渐实用化。尤其是近十年来随着卫星遥感反演数据精度的大幅度提高和数据源的增多,日、美等渔业发达国家的渔场渔情分析预报工作渐进入业务化应用阶段。20 世纪 60- 80 年代,海洋渔场渔情分析预报在我国也极为受管理部门和生产单位的重视,国内许多学者都进行了研究探索^[2-5]。80 年代中后期开始,由于我国近海渔业资源的衰退、渔业生产

主体及生产结构的重大变化,渔场渔情分析预报的研究应用也一度陷入困境。近年来,随着我国远洋渔业的快速发展和近海渔业资源及环境的养护与管理日益受到重视,为此国家 863 计划海洋监测技术主题先后立项开展了应用卫星遥感、地理信息系统(GIS)、空间数据分析及人工智能(AI)等信息技术进行海渔况速预报和渔业资源评估等若干项目的研究。本文是笔者在参加上述研究工作的基础上,对近年来国内外渔场渔情分析预报的技术及方法给予阶段性的概括和总结。

1 理论基础

海洋渔场的渔情分析预报根据其研究对象和研究内

收稿日期: 2004-04-30

资助项目: 国家 863 计划资源环境技术领域海洋监测技术主题资助项目(2003AA637030)

作者简介: 樊 伟(1971-),男,河南遂平人,副研究员,主要从事渔场海洋学及卫星遥感的渔业应用研究。Tel: 021- 65680117, E-

mail: dhvz@public4.sta.net.cn

容,可简单定义为对某一鱼类或某一类型渔业(渔场、资源与环境)的时空分布及其变化进行分析和预测的技术手段与方法。其理论基础是海洋水体环境作为海洋生物及海洋鱼类赖以生存的基本空间,海洋生物及鱼类的生长发育、生活习性、时空分布等与海洋环境密不可分,据此可通过对海洋水体环境要素的信息获取、海洋鱼类生活习性的掌握以及它们的时空动态演变来进行渔场渔情分析预报。对于具体的海洋环境要素而言,当前技术条件下,可用于业务化渔场渔情分析预报信息服务的主要是海水温度、海洋水色叶绿素和海流等相关海洋动力环境信息。

海水温度是最基本的海洋环境要素之一,同时鱼类作为变温动物,对温度变化非常敏感,其栖息水层、洄游通道及集群区域都与周围水体温度密切相关,因而水温是控制海洋鱼类种群分布、洄游及繁殖过程的基本量。因此,可依据不同鱼类对水温的适应性和耐受性确定其最适温度和适温范围,进而来分析判断渔场位置、渔场时空移动路径等。海水叶绿素的渔情分析应用则是基于海洋食物链原理的,即浮游植物的丰富使其为食的浮游动物资源丰富,进而促使以浮游动物为饵料的海洋鱼类资源丰富^[6]。海洋动力环境主要指海流流速、流向、海面动力地形信息等,海流输送海水物质及能量,使海水温度、盐度、溶解氧、营养盐等海洋环境与生源要素的时空分布不断处于变化之中,同时把浮游生物(鱼的饵料)、鱼卵或无游泳能力的稚幼鱼从一个地方输送至其它海域,也使渔业资源的时空分布总处于动态演变之中。

2 主要的技术手段

2.1 卫星遥感信息获取

及时快速地获取大范围高精度的渔场环境要素信息是开展渔场渔情分析预报工作的基础,传统的海上现场测量调查所获数据非常有限,而卫星遥感及其信息的定量反演作为当前海洋环境监测及获取海洋环境要素信息的主要技术手段得到了广泛应用。卫星遥感反演获取的 SST、海洋水色叶绿素(*Chl a*)及海洋动力环境信息是渔场渔情分析预报的主要利用对象。

卫星遥感 SST 的获取技术已经比较成熟,目前反演精度可达 0.5~0.8 °C^[7],完全可满足渔业生产需求及科研应用。遥感 SST 从卫星工作方式可分为极轨卫星和地球静止卫星两种,极轨卫星获取信息的空间分辨率高,静止卫星则时间周期短。从遥感原理及波谱分析,又可分为红外遥感和微波遥感,红外遥感 SST 反演精度高但易受云遮挡的影响,微波遥感 SST 反演精度和空间分辨率较低但不受天气的影响。卫星遥感海水叶绿素信息则主要通过可见光波段反演获取,由于海洋水色要素比较复杂以及卫星传感器的波段限制,目前叶绿素信息的反演精度约为 35%~40%,还需要不断发展完善,海洋高光谱的研究及进展可望使海水叶绿素的反演精度大大提高。卫星遥感

海流流速、流向、海洋动力地形等海洋动力环境信息的获取主要是通过雷达卫星主动微波遥感方式得到的,如卫星高度计获取海洋地转流、波浪、海面高度信息,散射计获取海面风场信息等。其中卫星高度计反演计算的海面高度误差仅有 3 cm,由此推算的地转流流速、流向信息近年来在大洋渔场分析中得到探索性应用^[8]。

2.2 可视化分析与制图

渔场渔情分析预报的研究应用离不开对所获海洋环境要素及捕捞生产数据的可视化分析和分析预报结果的制图输出。传统方法主要依靠人们丰富的经验手工绘制海况及渔场分析图,费时费力,结果的定量性差。计算机技术的发展使得地理信息系统(GIS)、交互式数据可视化工具(如 IDL、Matlab 等)的可视化分析与多维显示技术在渔场渔情分析预报领域应用广泛^[9,10]。GIS 依赖所建立的自主数据库,可实现时空数据的一体化管理、空间叠加与缓冲区分析、等值线分析、空间数据的探索分析、模型分析结果的直观显示、地图的矢量化输出等功能。交互式数据可视化工具具有强大的超大规模数据处理、交互式及跨平台应用、多维数据可视化、高级图像图形处理等功能,有助于增强渔情分析结果的可视化显示以及提高分析预报结果的可靠性。并且网络 GIS 和交互式数据可视化工具(如 IDL 等)可对预报结果进行网络发布,提高了渔场渔情分析预报信息服务的时效性。

3 主要分析预报方法

3.1 统计分析预报

早期的或传统的渔场渔情分析预报受计算技术和渔场环境信息获取能力的限制,主要采用经典统计学为主的线性回归分析、相关分析、判别分析、聚类分析等模型方法^[2-5,11,12],如刘树勋等^[3,4]用判别分析研究渔情预报问题,韦晟和周彬彬^[5]采用一元线性回归方法进行蓝点马鲛的渔情预报。统计分析预报主要是用观测获取的诸如水温、盐度、气压、气温等海洋环境参数与捕捞产量数据进行统计分析并计算各种渔业统计学参数,建立回归方程,分析相关性或进行归属划分等,对渔期出现的早晚或渔获量的丰歉预报取得了一定的成功^[2-5]。但是,由于渔场是一个具有时间和空间概念的预报因子,且海洋(渔业)现象多具有动态性、不确定性、模糊性与随机性等特点,而经典的统计学方法对空间数据分析或非线性复杂问题的处理存在很大的局限性,因而 20 世纪 90 年代以来,许多学者开始采用空间信息分析与地理计算模型、数据挖掘及人工智能等新的模型与方法应用到渔场渔情分析预报的研究中。

3.2 空间统计分析及空间模型

空间信息分析是指分析、模拟、预测和调控空间过程的一系列理论和技术,包括有空间统计指标、空间关联表达、空间信息分析模型、空间动力学模型、空间复杂模型、空间动力统计模型等^[13]。空间统计分析是经典统计学关

于采样论在地理研究中的应用,其研究的核心内容是空间位置、空间相关、空间结构和空间过程,注重揭示研究对象在空间分布结构上的依赖性、复杂性、相关性和异质性,是“数据驱动”的分析方法。空间模型指依据各种空间信息建立的模型或具有空间分布意义的模型,包括有空间相互作用模型、时空自适应模型和空间过程机理模型等。

渔业上常常采用渔场资源重心描述渔场空间位置的变动^[1,14]。空间自相关是邻接单元之间相似性的量度,空间自相关程度高说明空间分布关联性程度高,Simard等^[15]采用空间自相关研究了加拿大北方长额虾资源量的空间分布结构,苏奋振^[14]计算了东海区渔业资源密度分布的空间自相关指数。以区域化变量理论为基础的地理统计学最早于1985年由Conan用于渔业研究领域^[16],此后广泛应用于渔业资源的空间结构分析与评估研究^[16-18],如Fletcher等^[6]对沙丁鱼鱼卵及稚鱼的研究,2000年法国学者Rivoirard等在其出版的专著中对地理统计学的渔业资源评估应用进行了系统总结^[7],国内学者苏奋振等^[8]也应用地理统计学方法对东海区渔业资源的时空分布格局进行了研究。

数据挖掘(DM)也称数据库知识发现(KDD),是从数据集中识别出有效的、新颖的、潜在有用的最终可理解模式的复杂过程^[9]。空间数据挖掘研究中基于关联规则(association rule)的空间关联分析是建立在数据仓库技术和知识发现技术之上的,即空间分布的各要素间的相互联系,通过要素间的联系可以从某要素的存在推之另一要素的存在及其属性和规模,或更广泛地指一组时空事件导致另一组时空事件的发生。空间关联分析采用统计方法对客观世界的空间关系、空间过程和空间相关进行发现和表达。苏奋振等^[14]采用可信度、支持度、期望可信度和作用度等关联规则对东海区大沙渔场与温度场的关系进行了研究探索,显示了空间关联分析可应用于渔场渔情分析的研究。

海洋渔场渔情分析预报的数据时空分布及变化特征适合于各类空间分析模型的应用,但由于海洋及渔业捕捞的详细数据获取比较困难,目前仍处于初期应用发展阶段,主要应用包括:具有空间信息的人工神经网络模型、元胞自动机(cellular automata)模型等。

元胞自动机定义为在一个由有限个状态离散的元胞组成的元胞空间上,依据确定的局部状态转移规则,在离散的时间轴上,大量元胞通过简单的相互作用而进行演化的网格动力学系统模型^[20]。它由4个基本要素构成:即离散的元胞、有限的状态、邻域范围和局部转换规则。元胞自动机不是由严格定义的物理方程或函数确定,而是用一系列模型构造的规则构成,可模拟和预测复杂的地理过程(海洋现象),属于空间复杂模型。元胞自动机已经成功应用于城市动态演化及林火模型,但海洋(渔业)的应用还不多见,如Slcker设计了六边形网格作为元胞单元用于

东太平洋金枪鱼渔场集群形成机制的研究^[21],英国学者Spencer用于研究生境大小对食物网结构的影响^[22]。

3.3 人工智能

人工智能是计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学、语言学和数学等多学科互相渗透而发展起来的一门综合性边缘学科,可用于问题求解、逻辑推理与定理证明、自然语言处理、智能信息检索技术以及专家系统等^[19]。人工智能领域中的专家系统(expert system)技术早在20世纪80年代便应用到渔业资源评估的研究中^[23],此后人工神经网络(ANN)、范例推理(case-based reasoning, CBR)等人工智能技术都在渔场分析和渔情预报中得到成功应用。

专家系统将特定领域人类专家的特殊知识赋予机器,用计算机模拟专家的思维活动、推理判断,使对问题的求解达到专家的水平。渔情专家系统就是把渔业专家丰富的经验知识或文献知识等各种信息形成知识库、规则库,按照一定的规则进行推理(推理机),最后给出渔场预报结果或渔业资源评估等渔情分析结果。如日本学者Ichiro A等应用包含有鱼卵丰度、幼鱼渔获量和黑潮暖流路径等28个变量和由该28个变量之间的关系构成146条规则的专家系统较早地用于鱼渔况的预报^[23]。联合国粮农组织开发了一个包含环境因子的剩余产量模型的交互式实验软件(CLIMPROD)专家系统,分别建立了专家知识库和模型库,可用于进行渔业资源的评估和预测^[24]。国内学者陈卫忠等也将专家系统用于东海鲈鱼的资源量评估^[25]。

ANN方法是一种由大量简单处理单元(神经元)以某种方式互相连接而成的,对连续的或断续的输入做出状态响应的动态信息处理系统,它具有联想记忆、自组织、自适应、自学习和容错等优异的特性而得到广泛应用^[19]。遗传算法(Genetic algorithm)是自然选择中所隐含的优化思想,实质上是一种概率性搜索算法或自适应迭代寻优过程,可用于优化神经网络连接权值或连接结构^[19]。人工神经网络或与遗传算法相结合的渔场渔情分析应用较多^[26-28],如Sazonova对鱼类资源及可捕量评估的研究,Laurent对印度洋金枪鱼移动规律的模拟研究,Huse等在构造人工神经网络模型研究渔业问题时采用了遗传算法。楼文高在综述ANN模型在水产科学中的应用时也介绍了其在渔业资源及渔情分析中的应用^[29]。

范例推理也是人工智能领域发展较为成熟的一个分支,它是基于过去的实际经验或经历的推理,范例记录了过去发生的种种相关情节,因而范例推理是从记忆中或范例库中找到与当前问题最相关的范例,然后对该问题作必要的改动以适合当前问题^[19]。沈新强等^[30]采用范例推理建立的东海区中心渔场预报专家系统,其根据收集的多年捕捞产量和SST数据等,依据预报周期的长短建立历史渔场和环境范例库,然后经过时间、温度、渔场等的相似检

索, 得出相似范例, 采用人机交互的方式进行修正, 平均预报精度达到 80% 左右。此后, 该方法又被成功应用到北太平洋鲑鱼渔场渔情的速预报专家系统之中^[31]。

3.4 模糊性及不确定性分析

模糊性或不确定性是指客观世界或实体本身就具有的变异, 表现为不精确性、随机性和模糊性。海洋(渔业)事件中存在着大量的诸如中心渔场、水团等比较模糊的概念, 有很大的不确定性。模糊集(fuzzy set)、粗糙集(rough set)与概率论等不确定性理论为解决这些模糊的海洋(渔业)事件提供了有效的方法。

模糊集是对传统集合理论的推广, 在模糊集中, 每个元素都是以一定的程度属于某个集合或几个集合。模糊集还被认为是解决许多人工智能问题的最合适的工具, 模糊集与人工神经网络结合就产生了模糊神经网络^[19]。Chen 等^[32]采用模糊逻辑与遗传算法结合研究分析南阿拉斯加海域鲑鱼和西海岸太平洋鲑鱼资源与补充量的关系, Mackinson^[33]开发了模糊逻辑专家系统, 可用于鲑鱼不同生活史阶段中尺度洄游的预测。粗糙集理论是由波兰的 Pawlak 提出的处理含糊和不精确性问题的数学工具。苏奋振等把粗糙集引入地学栅格系统中与空间关联分析相结合, 以东海区大沙渔场为例, 提取了温度场如何决定渔场的关联规则^[14]。

贝叶斯(Bayes)统计理论^[34]认为: 先验分布反映了试验前对总体参数分布的认识, 在获得样本信息后, 对这个认识有了改变, 其结果就反映在后验分布中, 即后验分布综合了先验分布和样本的信息。贝叶斯概率预报是基于人们掌握一定先验知识基础上的一种方法, 是一个“从有到无”的过程, 其应用于渔场形成概率的预报见于 Nieto 等^[35]对秘鲁 鱼渔场预报专家系统的研究, 其根据历史捕捞产量数据首先确定 鱼渔场时空分布的先验概率, 在对 鱼和 SST、叶绿素、温度梯度关系研究的基础上, 根据所获取的实时卫星遥感渔场环境信息, 结合已经获取的渔场先验概率计算渔区形成渔场的后验概率分布, 从而进行了 鱼渔场概率预报。

3.5 数值计算与模拟

海洋科学中的数值计算与模拟主要是指以流体力学、热力学及物理海洋学等为理论基础, 以计算数学(差分、有限元、谱分析等)和高速计算机为实现方法与手段, 在给定的初始条件和边界条件下, 对一系列闭合方程组进行数值求解的过程。数值计算与模拟以往多用于潮流、风暴潮、波浪等的数值预报研究, 近年来也被广泛应用到海洋生态系统动力学、海洋生物地球化学循环和渔场海洋学的研究领域。如 Lehodey 等采用耦合的生物地球化学动态方程进行鲑鱼饵料生物分布的预测研究^[36], 美国学者 Sibert 等应用平流扩散方程研究鲑鱼的移动过程^[37], Flierl 等人建立的幼鱼输送模型研究了暖涡环对陆架海域幼鱼分布的影响^[38]。

4 应用前景

如前所述, 上述各学科近年来的快速发展为解决海洋(渔业)事件中的空间关联性、不确定性、模糊性、动态性与随机性等复杂问题提供了多样化的研究方法及解决手段, 促进了渔场渔情分析预报技术及方法的发展和更新, 使其不再单纯依赖传统的统计学方法, 丰富了渔场海洋学的研究内容。但是, 也应看到, 各种方法都有其适用范围和局限性。如地统计学可以很好的定量分析某时段渔业资源的空间分布格局, 但较难进行动态预测。元胞自动机模型采用离散的网格系统, 适合于遥感渔场环境和渔区的栅格数据特点, 其难点在于如何确定合适的元胞局部转换规则。模糊性及不确定性分析方法非常符合海洋(渔业)现象本身所具有的模糊性、随机性等客观实际, 可更加真实的描述海洋现象, 但常常需要把时空连续的海洋要素场(温度场、流场等)进行离散化表达。人工智能领域渔场渔情专家系统的应用相对比较成熟, 但建立专家系统需要依赖不同的专业分析模型或建立较完备的渔业知识库及规则库才能实现。利用 ANN 方法不要求事先的假设条件和了解因变量与自变量之间的关系, 只要求提供足够的学习样本(实例), 适用性较广, 但 ANN 对知识的表达、存储和推理(计算)都是隐式的, 不能解释自己的推理依据和推理过程。渔场渔情分析 CBR 原理简单明了, 易于理解, 不足之处是要求积累有足够多的详细的历史资料以建立范例库, 由于其应用主要是基于以往历史经验的推理, 因而难以用来寻找开发新的渔场。数值模拟方法物理意义清楚, 可精确表达, 但数值模拟方法计算量大, 需要建立有明确物理量含义的数学物理方程。

从其研究应用阶段分析, 无论是卫星遥感的信息获取、地理信息系统等的制图与数据的可视化分析, 还是数据挖掘、空间模型与人工智能的预报方法等, 都将随着信息技术的进步而处于快速的发展阶段, 其在渔场渔情分析预报领域中的应用方兴未艾, 且各种技术与方法的应用不是孤立的, 而是多种技术手段与方法的集成应用, 如地理信息系统与空间分析模型的结合, 数据挖掘与人工智能技术的结合, 3S 技术的集成应用^[39, 40]等。事实上, 海洋(渔业)现象的复杂性也决定了只有采用综合的或集成的研究手段才能更为详尽的揭示其内在的规律性。

此外, 本文虽然对新近主要发展的渔场渔情分析预报模型与方法给予概括性综述, 但显然无法包罗所有的模型及方法。随着信息技术和现代系统科学的发展, 其它诸如混沌与分形理论^[41]、蒙特卡洛及马尔科夫过程^[42]等新的学科理论与前述的各种方法都将更进一步地渗透到渔业研究领域, 有望在渔场渔情分析中得到深层次的应用及推广。

5 结语

进入 21 世纪以来, 虽然我国早已成为世界海洋渔业

捕捞大国,远洋渔业捕捞船队遍布全球三大洋,但海洋渔业的可持续发展任重道远,所面临的近海资源及环境的养护与管理,远洋渔业的合理开发与利用等问题不容回避。渔场渔情分析预报技术的发展及方法实现可为解决这些问题提供有效的技术决策支持,如为远洋渔船提供多样的助渔海况信息产品,为近海渔业资源的养护及管理提供多角度透视等。相信随着这些研究的不断深入发展,渔场渔情分析预报的精度和可靠性等将会不断提高,将大大促进近海渔业资源的管理与保护,有助于实现大洋渔业资源的合理开发及可持续利用。

参考文献:

- [1] 宇田道隆. 海洋渔场学[M]. 东京: 恒星社厚生阁发行所, 1963. 20- 22.
- [2] 李雪渡. 海水温度与渔场之间的关系[J]. 海洋学报, 1982, 4(1): 103- 112.
- [3] 刘树勋, 韩士鑫, 魏永康. 判别分析在渔情预报中应用的研究[J]. 海洋通报, 1988, 7(1): 63- 70.
- [4] 刘树勋, 韩士鑫, 魏永康. 东海西北部水团分析及与渔场的关系[J]. 水产学报, 1984, 8(2): 125- 133.
- [5] 韦 晟, 周彬彬, 黄渤海蓝点马鲛短期渔情预报的研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(2): 216- 221.
- [6] Srokosz M A. Biological oceanography by remote sensing, encyclopedia of analytical chemistry [M]. Meyers R A, ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1997. 8506- 8533.
- [7] Walton C C, Pichel W G, Sapper F J, et al. The development and operational application of nonlinear algorithms for the measurement of sea surface temperature with NOAA polar-orbiting environmental satellite[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 27999- 28012.
- [8] 仇天宇, 邵全琴, 周成虎. 卫星测高数据在渔情分析中的应用探索[J]. 水产科学, 2001, 20(6): 4- 8.
- [9] 苏奋振, 周成虎, 邵全琴, 等. 海洋渔业地理信息系统的发展、应用与前景[J]. 水产学报, 2002, 26(2): 169- 174.
- [10] 闫殿武. IDL 可视化工具入门与提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 1- 20.
- [11] 杨 红, 章守宇, 戴小杰, 等. 夏季东海水团变动特征及对鲈渔场的影响[J]. 水产学报, 2001, 25(3): 209- 214.
- [12] 苗振清. 东海北部鲈中心渔场形成机制的统计学[J]. 水产学报, 2003, 27(2): 143- 150.
- [13] 王劲峰, 李连发, 葛 咏, 等. 地理信息空间分析的理论体系探讨[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 92- 103.
- [14] 苏奋振. 海洋渔业资源时空动态研究[D]. 中科院地理所博士论文, 2001.
- [15] Simard Y, Legendre P, Lavoie G, et al. Mapping, estimating biomass, and optimizing sampling programs for spatially autocorrelated data: case study of the Northern Shrimp (*Pandalus borealis*) [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1992, 49: 32- 45.
- [16] Pelletier D, Parma A M. Spatial distribution of Pacific Halibut (*Hippoglossus stenolepis*): an application of geostatistics to longline survey data [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1994, 51: 1506 - 1518.
- [17] Rivoirand J, Simmonds J, Foote K G, et al. Geostatistics for estimating fish abundance [M]. London: Blackwell Science Inc, 2000. 1- 206.
- [18] 苏奋振, 周成虎, 仇天宇, 等. 东海水域中上层鱼类资源的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1971- 1975.
- [19] 史忠植. 知识发现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002. 1- 295.
- [20] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 26- 49.
- [21] Søraker S. Models for tuna school formation [J]. Mathematical Biosciences, 1999, 156: 167- 190.
- [22] Spencer M. The effects of habitat size and energy on food web structure: An individual-based cellular automata model [J]. Ecological Modeling, 1997(94): 299- 316.
- [23] Ichiro A, Tadashi I, Isamu M, et al. A prototype expert system for predicting fishing condition of anchovy (*Engraulidae*) off the coast of Kanagawa Prefecture [J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1989, 55(10): 1777- 1783.
- [24] Fr on P, Mullon C, Pichon G. Experimental interactive software for choosing and fitting surplus production models including environmental variables [M]. Rome: FAO computerized information series fisheries, 1993, (5), 76.
- [25] 陈卫忠, 李长松, 胡 芬, 等. 渔业资源评估专家系统设计及实践[J]. 水产学报, 1999, 23(4): 343- 349.
- [26] Sazonova L, Osipov G, Godovnikov M. Intelligent system for fish stock prediction and allowable catch evaluation [J]. Environment Modeling & Software, 1999(14): 391- 399.
- [27] Laurent D, Michel P, Stretta J M. Simulation of large scale tropical tuna movements in relation with daily remote sensing data: the artificial life approach [J]. Biosystems, 1997, 44: 167 - 180.
- [28] Huse G, Giske J. Ecology in Mare Pentium: an individual-based spatio-temporal model for fish with adapted behavior [J]. Fisheries Research, 1998, 37: 163- 178.
- [29] 楼文高. 人工神经网络在水产科学中的应用[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(4): 347- 352.
- [30] 沈新强, 樊 伟, 韩士鑫, 等. 中心渔场智能预报系统的设计与实现[J]. 中国水产科学, 2000(2): 69- 72.
- [31] 崔雪森, 樊 伟, 沈新强. 西北太平洋柔鱼渔情速报系统的开发[J]. 水产学报, 2003, 27(6): 600- 605.
- [32] Chen D G, Hargreaves N B, Ware D M. A fuzzy logic model with genetic algorithm for analyzing fish stock-recruitment relationships [J]. Can J Fish Aquat Sci, 2000, 57: 1878- 1887.
- [33] Mackinson S. Integrating local and scientific knowledge: an example in fisheries science [J]. Environmental Management, 2001, 27(4): 533- 545.
- [34] 茆诗松. 贝叶斯统计[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999. 1 - 30.
- [35] Nieto K, Y nez E, Silva C. Probable fishing grounds for anchovy in the northern Chile using an expert system [A]. IGARSS, International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Sidney, IEEE, 2001, 9- 13.
- [36] Lehodey P, Andre J M, Bertignac M, et al. Predicting skipjack tuna forage distributions in the equatorial Pacific using a coupled dynamical bio-geochemical model [J]. Fish, Oceanogr, 1998, 7: 317- 325.
- [37] Silbert J R, Hampton J, Fournier D A, et al. An advection-diffusion-reaction model for the estimation of fish movement parameters from tagging data, with application to skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1999, 56: 925 - 938.
- [38] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 118- 129.
- [39] 苏奋振, 周成虎, 杜云艳, 等. 3S 空间信息技术在海洋渔业研究与管理中的应用[J]. 上海水产大学学报, 2002, 11 (3): 277- 282.
- [40] 王立华, 黄其泉. 3S 技术在渔业领域的应用和前景展望 [J]. 计算机与农业, 2002, 12: 3- 5.
- [41] Tikhonov D A, Enderlein J, Malchow H, et al. Chaos and fractals in fish school motion [J]. Chaos Solitons and Fractals, 2001, 12: 277- 288.
- [42] Lewy P, Nielsen A. Modelling stochastic fish stock dynamics using Markov Chain Monte Carlo [J]. ICES Journal of Marine Science, 2003, 60: 743- 752.