

水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势*

胡金有¹ 王靖杰¹ 张小栓^{2,3} 傅泽田^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 信息化技术已经成为现代渔业可持续发展的重要支撑技术之一。为了展现、引导与促进其在水产养殖环节的应用水平,按照信息的属性与尺度、养殖活动的流程与建模应用的层次,系统分析相关文献,对信息获取技术中知识挖掘、传感网络的辨识参数与其组织形式、遥感对区域水环境信息与养殖面积变化及其时空特征获取与监测的研究现状进行了整理;并对比分析了水质预测与预警模型、水产病害诊断中知识表示模式与推理方法、水产行为的量化与分析方法、饲料配方及投饲决策模型的建立、质量追溯中感知内容与平台的构建以及养殖中的控制策略与方法。综述结果表明,信息化技术正向水产养殖业深层次扩散,逐渐实现对水产养殖信息的全面感知与决策支持;信息获取技术由人工获取向依靠感知网络和遥感等数字化智能技术转变;信息处理向专家系统、管理系统、决策支持系统、追溯系统和精细化控制系统等依托人工智能、信息融合和建模处理的智能化信息系统发展;信息化应用使养殖活动更加强调和注重信息化思维和管理决策与其运作效率、效益的相互适应、促进与优化。

关键词: 水产养殖信息化 全面感知 数字化智能 信息系统

中图分类号: TP274; S95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0251-13

Research Status and Development Trends of Information Technologies in Aquacultures

Hu Jinyou¹ Wang Jingjie¹ Zhang Xiaoshuan^{2,3} Fu Zetian^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Informationization has become one of the essential emerging technologies, which supports the innovation and sustainable development of modern fishery. In order to promote the application level in aquaculture, the knowledge mining technology, parameter identification and organization forms of perception network, research status of acquisition and monitoring for information of regional water environment, and change of breeding area and its spatial and temporal characteristics were summarised according to the attributes and scale of the information, the flow of farming activities and the hierarchy of modeling and applications. And models of prediction and early warning of water quality, methodologies of knowledge representation and inference in aquatic disease diagnosis, quantitative and analytic methods of aquatic products' behaviors, establishments of nutrition formula and feeding decision-making system, perception contents and constructions of platform in traceability, and control strategies and methods in aquaculture system were analyzed and compared by systematically summarising and clarifying the literature. The results indicated that the aquaculture industry has been penetrated profoundly by information technologies for comprehensive perception and decision support; the information acquisition

收稿日期: 2015-05-07 修回日期: 2015-06-07

* 公益性行业(农业)科研专项资金资助项目(201203017)和北京市校共建资助项目

作者简介: 胡金有, 副教授, 博士生导师, 主要从事农业系统工程与信息化技术研究, E-mail: hujiy@cau.edu.cn

通讯作者: 傅泽田, 教授, 博士生导师, 主要从事农业系统工程与信息化技术、食品质量安全追溯与监测研究, E-mail: fzt@cau.edu.cn

has been transformed from artificial to digital intelligence, such as perception networks and remote sensing; information processing was developing towards the process of modeling: the expert systems, management systems, decision support systems, traceability systems and precision control systems, which were based on artificial intelligence, information fusion and intelligent information system; and the applications of information has also paid more attention to mutual adaptation, promotion and optimization between the thoughts of information and management and aquacultures' operational efficiency and benefits.

Key words: Aquaculture informationization Comprehensive perception Digital intelligence
Information system

引言

水产品具有高蛋白、低脂肪、营养平衡性好的特点,成为人们摄取优质动物性蛋白质的主要来源。作为渔业大国,我国率先完成了由捕捞为主向养殖为主的发展模式转变;水产养殖业已经成为我国渔业的重要组成部分与发展重点,为农民就业、食品安全、贫困程度的减轻和社会福利等作出了重要贡献。随着人类社会向信息化时代的快速迈进,利用现代信息技术改造我国传统水产养殖业,促进工业化和信息化在水产养殖业领域的纵向扩散与深度融合,探索现代化养殖模式,加大科技进步在渔业经济发展中的贡献率,对于促进渔业和渔业经济可持续发展具有重要的意义。

自 20 世纪 80 年代以来,国内外学者已经对水

产养殖信息化关键技术、发展模式、支持政策等进行了大量的研究与示范应用。随着物联网、云计算等先进信息技术的发展与应用,水产养殖信息化必将进入新的发展时代。基于此,本文对水产养殖信息化中 2 个关键技术:信息获取和信息处理技术进行系统化的文献整理与综述,以期为新兴的信息技术在水产养殖业领域深入应用提供支持。

1 水产养殖信息获取技术

信息获取技术是一切信息化应用的起点与基础。按所获取信息的属性和尺度,水产养殖信息获取技术可分为面向主观或经验(知识级)的知识挖掘技术、面向微观数据(参数级)的传感网络技术和面向宏观数据(区域级)的空间遥感技术 3 个层次(表 1)。

表 1 水产养殖信息获取技术比较					
Tab. 1 Comparison of information acquisition technologies in aquacultures					
信息层次	来源或对象	获取方法或技术	难易程度	信息量	获取距离
知识级	领域专家	专家访谈、问卷调查、案例分析等	较难获取,重复度高,工作量大,受知识来源质量影响	适中	
	文献数据库	文献分析、机器搜索、数据挖掘、知识提取等			
	专家系统	机器归纳、机器学习、神经网络等			
参数级	养殖水环境参数	pH 值、溶解氧含量、温度、浊度传感器等	较易获取,受传感器精度和环境因素影响	较小	较近
	对象特征与行为	机器视觉、摄像机、光谱分析、颜色传感器等			
区域级	水体条件、污染状况	遥感、高光谱图像处理等	难获取,处理难度大,需要进行处理与提取,受算法影响	较大	较远
	渔场分布与变化	遥感、GIS、实地考察等			

1.1 知识级信息获取技术:知识挖掘技术

知识获取方式主要为通过文献查阅、问卷调查、专家访谈、借助书籍等技术文献、养殖日志、具体案例、专家经验转化等非电子方式获得,经由人工进行信息采编、信息整理后录入,然后通过知识挖掘技术,从中获取与水产养殖决策相关的知识,从而转换为计算机自动识别和应用。该技术的优点是能够识别定性和定量 2 类知识,特别是人类专家思维等难以量化的信息。但由于农业生产活动的影响因素复杂多变,构建水产养殖专家系统等农业专家系统不仅需要该领域的专家,还需要知识工程师的合作,而

且使用系统的构建周期长达几年^[1]。这方面研究比较早,也相对比较成熟,本文不再赘述。

1.2 参数级信息获取技术:传感网络技术

1.2.1 参数辨识

水产养殖传感技术所面对的对象主要有 2 类:一类是水环境参数;另一类是鱼类及其行为参数。参数识别方法主要从水质参数辨识与传感器类型以及鱼体特征辨识与方法两方面描述。

(1)水环境参数辨识:水产养殖对象对养殖水体中的化学因素具有一定的敏感性,水产养殖环节中的传感器开发主要为基于化学特性的水质传感

器,并且正向集成传感的方向发展。表 2 综合分析了目前水产养殖使用比较广泛的传感器及其技术参数。其参数识别方法主要包括各类传感器运用、机器视觉以及图像处理技术的应用,同时一些算法也被用于特征量的提取,如主成分分析法、特征元素法、聚类分析法等,实现对影响因子的降维和筛选。

表 2 水质参数辨识与传感器类型

Tab.2 Water quality parameters identification and sensor types

识别参数	传感器名称或选型	量程范围	分辨率	精度	文献序号
pH 值	pH 复合电极	0 ~ 14. 00			[2]
	E - 201 - C 型 pH 复合电极			± 0. 3	[3]
	PH450 系列	- 2. 00 ~ 15. 00	0. 01	± 0. 01	[4]
溶解氧含量	覆膜原电池式氧传感器				[5]
	极谱式探头	0 ~ 99. 9 mg/L	± 0. 2 %	1 × 10 ⁻⁸	[6]
	极谱式溶解氧电极	0 ~ 20. 00 mg/L			[2]
	DO - 952 型溶解氧电极			± 0. 3 mg/L	[3]
	DO300 型溶氧传感器	0 ~ 20. 00 mg/L	0. 1 %	± 1 %	[4]
温度	DS18B20 型温度计	- 55 ~ 125℃		± 0. 5℃	[4]
	热敏电阻型	- 10 ~ 120℃	0. 1℃	± 0. 1℃	[6]
	红外温度计 Raytek Mini		0. 1℃		[7]
水位	UXI - LY 压力型水位计	1 ~ 70 m		0. 3 %	[4]
太阳辐射量	照度计	0 ~ 120 mW/cm ²	2 mW/cm ²	± 2 %	[7]
相对湿度	Model - Lutron HT - 3003		0. 1 %		[7]
风速	便携式数字风速仪		0. 1 m/s		[7]
流速	AEM1 - D 型电磁流速传感器	0 ~ 5 m/s	0. 002 m/s	± 2 %	[8]

(2)鱼体及其行为特征参数辨识:主要基于其形状特征、纹理特征和颜色特征。吴一全等^[9]通过机器视觉获取的淡水鱼图像采用主动轮廓模型 Snake 算法进行外部轮廓提取得到淡水鱼的长宽比,基于 Krawtchouk 矩不变量、灰度共生矩阵分别对形状特征、纹理特征进行提取,并使用这些特征参数作为特征向量,使用蜂群算法优化的多核 LS - SVM 可以实现鳊鱼、鳙鱼、鲫鱼、草鱼、青鱼在加工过程中的识别挑拣,精度均达到 83. 33% 以上。Hu 等^[10]通过手机获取鱼体图片中颜色和纹理特征的提取分析,得出在 HSV 颜色空间运用 Bior 4. 4 进行小波分析并运用基于导向无环图支持向量机 (DAGMSVM)进行鱼类识别较好,实现了基于颜色和纹理特征的种类识别,可以用于解决由同种鱼病在不同鱼种中症状表现不同导致误诊的问题。Pinkiewicz 等^[11]基于机器视觉运用合适的阈值和边缘检测在连续镜头的连续帧中对鱼体与其背景进行分割从而估算个体游速和方向,达到对水产行为观测的目的。

1. 2. 2 传感技术及组织形式

作为信息获取的有效载体,感知网络中装置布置和组织形式的优化有助于降低系统的能耗,同时相关节点的合理组织形式和布置位置能够提高信息效率,提高监测的精确度,加大传输距离和监测区域,优化对整个感知环境和对象的感知质量。从单

点有线传感到多点无线传感,从一元参数获取到多元,从单一参数到多源参数获取等拓扑结构和组网形式的优化,一定程度上提升了感知设备的使用质量,表 3 分析了传感技术的组织形式及其特点。

组织形式是在空间上的分布,不考虑传感器类型的前提下进行描述,参数识别可以在一个节点上添加多个传感器,实现组织形式上对多参数的获取,在维度上扩大信息获取的能力,并基于信息融合技术对多参数之间的信号匹配进行处理,构建统一的水产养殖系统平台以及如何解决其环境因子之间信息匹配的问题是传感器网络的发展方向。

1. 3 区域级信息获取技术:遥感技术

参数级的信息获取技术实现的是单点或有限区域的信息采集;而遥感技术能够实现区域级的信息采集。两者相比较而言,遥感信息所获取的水质参数是有限的,但可以对水质变化和水体污染进行宏观尺度的监测;与地理信息技术等联合使用能够实现对水产养殖面积及其动态变化、空间分布状态等的宏观感知。

(1)区域水环境信息获取与监测。宋瑜等^[12]结合水体高光谱遥感实验,建立了基于 MODIS 数据的藻华水体遥感信息提取模型并引入基于水体绿度指数的预警阈值范围,实现了藻华的动态监测与预警。Dona 等^[13]提出了一种用于高光谱图像评估的遥感影像挖掘和数据融合的遗传算法,运用融合的反射

表 3 传感技术的组织形式及其特点

组织形式		评价指标			特点	可覆盖区 域面积	传输 距离
		功耗	信息量	稳定性			
传感器单节点	有线节点	较大	较小	好	能够实现对一个采集点信息的精准获取;布置简单,不需考虑多节点之间的协作;连续自动获取,不受其他节点工作状态的影响	适于固定式放置,传输稳定	较近
	无线节点	适中	较小	较好		可以用于移动式安装,实现对移动对象的监测	远
传感器网络	星形网络	较小	适中	适中	便于大范围连续监测以及数据流形成;实现数据遥测,便于多节点参数获取,利于信息融合;能够实现分散式信息获取与集中式信息处理的空间分离	较大	较远
	树状网络	较小	适中	适中		适中	
	网状网络	最小	较大	差	各个传感信息之间时间同步,位置相同;形式详尽,多参数,实时协作感知,有利于信息挖掘	最大	较远
	多源传感网络	较小	最大	较差		较大	

注:表中对 WSNs 的划分未考虑传感器类型;功耗指获取和传输过程中节点的平均功耗;稳定性主要考虑获取的连续性、传输的准确性;功耗及可覆盖区域因传感器选型及节点数量不同而存在差异,此处只进行定性分析。

数据对水体透明度和叶绿素 a 水平进行评估,其相关系数分别为 0.89 和 0.94。Le 等^[14]在 SeaWiFS (宽市场海洋观测传感器)和 MODIS(中等分辨率成像光谱仪)数据的基础上对 Red – Green Chlorophyll Index 算法进行验证,建立了切萨皮克湾长期的叶绿素 a 浓度的环境记录,促进了水质决策模型的发展,并为该地区降低营养化水平提供支持。

(2)水产养殖面积及时空特征变化。马艳娟等^[15]运用比值型指数的构建思想,对 ASTER 影像中养殖区和非养殖水域的光谱值进行对比分析并提取,从而获取养殖区域,总体精度为 86.14%。陈保曦^[16]利用 30 m×30 m 分辨率的 TM 影像数据和同样分辨率的 DEM 数据,基于 ENVIZOOM 软件平台,应用面向对象空间特征提取模块进行了面向对象的多尺度影像分割与知识规则创建相结合的台山市的鱼塘的提取,对鱼塘面积进行了估算。范亚民等^[17]在 Landsat 影像数据分析的基础上,采用高分辨率的 Alos 影像结合 Quickbird 数据及实际考察资料,利用 GIS 技术,运用影像目标类型及范围修正的研究方法得出了太湖网围养殖面积的时空变化情况。Toshihiro 等^[18]对 MODIS 时间序列图像运用遥感的方法对湄公河三角洲内陆水产养殖的扩张情况进行了分析,从宏观视角揭示了其沿海养殖系统的空间结构分布以及动态变化。

以上 3 种主要信息获取方式,从主观或经验知识到参数识别,从水质参数到鱼体特征,从微观参数到宏观变化,涵盖了养殖技术使用、养殖管理等方面,包含时间、空间、抽象、具体等信息内容,从多个层次感知了水产养殖动态发展过程、实时信息等。对这些信息进行合理预处理,能够有效提高信息建模质量及其应用的有效性,为水产养殖业的持续发展提供高质量的基础数据,方便引入更多的先进技术手段到

水产养殖中来,不断提高水产养殖信息化水平。

2 水产养殖信息处理与应用技术

信息处理、建模与应用是为了有效利用所感知和获取的信息,也是信息化的目标。按照水产养殖活动顺序、建模应用的层次,水产养殖信息的挖掘和利用可以分为处理、建模和应用 3 个层次,主要包括水质监测、预测预警及管理,疾病预防及诊治,生物行为学模型的构建,饲料配比与投饲决策,水产品追溯技术,RAS 与设施养殖控制 6 个方面,见图 1。

除以上 6 方面外,水产养殖信息化所获取的水产生物多个生长周期内的有关病害、生长环境参数、行为学特征、饲喂信息等,还能够为品种选育、品系维持、新品种引进、养殖技术与养殖环境的改善和创新、养殖科研等提供必要的前期基础数据。限于篇幅,本文未涉及到。

2.1 水质监测、预警及管理

养殖水质的好坏直接影响水生动物的生长状况及其产品品质。因此,水质监测与预警是养殖管理中最重要的一部分。由于水产养殖环境的开放性使其水质参数具有非线性、动态性、多变性和复杂性等特点^[19],目前水质预测预警主要针对溶解氧含量 (Dissolved oxygen, DO)、水温 (Water temperature, WT)和 pH 值等对水生动物影响较大的水质因素。实际上,预测模型的输入识别变量较多,主要有溶解氧含量、水温、pH 值、电导率、光照度、空气温度、风速等养殖环境参数。表 4 对一些水质预测预警模型和方法进行了比较。

刘双印^[30]对采集的水产养殖环境参数进行参数修复、降噪和特征提取等预处理,对水质组合预测模型进行优化,提出基于计算智能与最小二乘支持向量回归机的水质非线性组合预测预警方法。

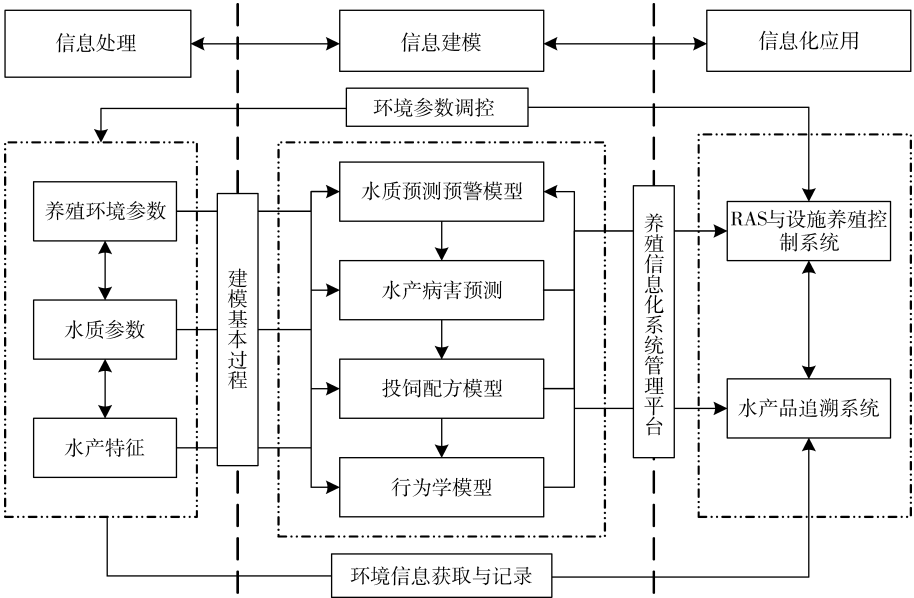


图 1 水产养殖信息处理、建模与应用关系

Fig. 1 Diagram of information processing, modeling and applications in aquacultures

表 4 常用水质预测与预警模型对比

Tab. 4 Commonly used prediction methods

预测对象	影响因子	养殖对象	预测模型或方法	预警阈值或预测精度		文献序号
pH 值	pH 值、溶解氧、氧化还原电位、水温	河蟹	PCA – MCAFA – LSSVM	MAPE:0. 41%	RMSE:4. 74%	[20]
溶解氧含量	溶解氧、水温、太阳辐射、气压、风速、风向、空气温度	河蟹	FPSTWD – LSSVR	MAPE:8. 18%	RRMSE:5. 23%	[21]
	太阳辐射、水温、溶解氧、pH 值、湿度、风速	贻贝	WNN	MAPE:3. 822%		[22]
	溶解氧、pH 值、电导率、水温、太阳辐射、空气温度、风速	河蟹	RGA – SVR	MAPE:4. 53%	RMSE:2. 79%	[19]
	温度、pH 值、总磷、总氮、总氨度、亚硝酸盐、硝酸盐、氯化物、粪大肠菌群、叶绿素 a		ABC – BP	MSE:7. 15%		[23]
	溶解氧、水温、pH 值、降雨量、太阳辐射、风速、相对湿度	河蟹	ACA – LSSVR	RMSE:3. 28%	MAD:4. 48%	[24]
	前期溶解氧		最优加权组合预测	MPE:1. 72%	MAE:0. 188 1 mg/L	[25]
	空气温度、pH 值、盐浓度、进水口水温、出水口水温、溶解氧	鱼	BPNN	R:0. 91	RMSPD:1. 56%	[26]
水温	空气温度、湿度、风速、太阳辐射	龙须菜		RMSE:0. 62℃	MBE: – 0. 05℃	[27]
	溶解氧、pH 值、电导率、水温、太阳辐射、空气温度、风速	河蟹	RGA – SVR	MAPE:2. 63%	RMSE:1. 95%	[19]
	环境温度、太阳辐射、风速、温室内相对湿度	鱼	热力学模型	R:0. 91	RMSPD:1. 57%	[7]
叶绿素 a	总磷、化学需氧量	对虾	PCA – MLR	R ² :0. 901	P:0	[28]
	总有机碳、总氮、活性磷、总磷	对虾	MLR	SSR:1. 35	R:0. 715 5	[29]

注:PCA – MCAFA – LSSVM 为基于主成分分析、改进文化鱼群算法和最小支持向量机的预测模型;FPSTWD – LSSVR 为基于特征点分段时间弯曲距离算法的最小二乘支持向量回归机;WNN 为小波神经网络;RGA – SVR 为基于真值遗传算法改进的支持向量回归机;ABC – BP 为基于人工蜂群和反向神经网络算法;ACA – LSSVR 为蚁群优化的最小二乘支持向量回归机;BPNN 为反向神经网络;PCA – MLR 为主成分分析的多元线性回归;MLR 为多元线性回归。MAPE 为平均绝对百分比误差;RMSE 为均方根误差;RRMSE 为相对均方根误差;MSE 为均方误差;MAD 为平均绝对误差;MAE 为平均绝对误差;RMSPD 为预测误差均方根;MBE 为相对平均误差;SSR 为残差平方和。

Liu 等^[19]采用了一种真值遗传算法修正的支持向量回归算法,并证明优于 BP 神经网络和传统支持向量回归机算法。于承先等^[31]为解决集约化养殖水质预警问题,通过系统动力学分析水中溶氧变化的影响因子,阐述了水质预警内涵、警兆、预警体系建设,通过 BP 神经网络优化算法和规则预警策略实

现了溶解氧预警。为解决水质监测数据不充分对水质预警质量的影响,Tan 等^[32]提出了基于最小二乘支持向量回归机的时间序列水质预测模型。Xu 等^[22]对基于短波神经网络的短期水质预测模型进行了研究。Heddam 等^[33]用基于进化聚类方法的动态进化神经模糊推理系统的人工智能方法对河流中

氧气浓度进行建模,证明了该方法在预测溶解氧浓度上是可行的。

然而受全面获取水产养殖生态环境参数、水质动态变化软硬件设备的局限,使现阶段对水产养殖水质预测预警大多局限于单因子预测预警研究上。宋协法等^[34]根据对虾养殖水质特征,采用多元逐步回归方法建立了凡纳滨对虾养殖水质多因子预警模型,运用 BP 神经网络建立了水质预测预警模型。由于缺乏对先进信息处理技术的使用,对水质综合状况的预测预警理论和方法研究仍处于探索阶段。

2.2 疾病诊断与预警

水产病害已成为影响中国水产品质量安全的主要因素,由于病害防治观念落后、病害的突发性以及病害快速诊断能力的缺乏^[35]引起的误诊、诊治不及时、过度用药等导致直接死亡和水产品品质的下降,已对水产产业造成巨大的直接或间接损失。一些研究学者运用现代科技手段对鱼病进行预测并构建了疾病诊断专家系统,专家系统作为水产养殖信息化的重要组成部分,能够加快水产病害信息的诊断速度,提高诊断的时效性和准确性。

鱼病诊断的知识表示模式是鱼病诊断的基础和核心^[36],常用的有产生式知识表示法^[37]、逻辑表示法、面向对象表示法^[38]、基于 XML 的表示法^[39-40]、本体表示方法^[41]等。有效的知识表示以及大量病例的收集有利于建立知识库,通过信息手段加快病例搜集和共享,构建病例档案共享和远程诊断相结合以及基于云储存^[42]的水产病害诊断与健康养殖系统。综合利用计算机技术、显微图像处理技术和网络通信技术,构建跨平台的水产养殖远程动态图像与传输系统,能够实现水产病害的远程诊断^[43]。

鱼病诊断的推理方法是诊断求解的过程。比如,尹银平等^[44]针对鱼病中存在的大量 Fuzzy 性问题,提出了一个基于 R_{∞} 蕴涵算子的三 I (Implication reasoning) 算法,该算法结合鱼病专家知识库,提取出鱼病诊断规则,抽象出鱼病诊断 Fuzzy 推理模型,一定程度上解决了养殖户难以准确描述鱼病具体症状的问题,提高了诊断的有效性。温继文等^[45]在分析鱼病发生和传播的因果关系基础上,将鱼病诊断问题转换为“症状-疾病”和“疾病-病因”双层因果网络的集合求解问题,能够得到可能的疾病范围、疾病发生的可能性和相应的病因分析,从而有针对性的进行鱼病防治。Gutierrez Estrada 等^[46]采用标准语言以分层结构对知识库进行表示,基于模糊逻辑和 Dempster - Shafer 理论,采用模糊控制器和 D - S 证据推理相结合的推理机,建立了鱼病诊断系统并成功地对鳗鱼鱼病进行了诊断。郭永洪等^[47]根据

鱼病诊断的特征及内容,对基于案例的推理方法进行了系统的研究,提出了将案例知识与规则相结合的方法,有效地解决了鱼病的诊断问题,并提高了系统的运行效率。周云等^[48]采用基于案例推理的研究方法克服了鱼病诊断专家系统在知识获取上的瓶颈问题,以案例库中已经确诊的案例为基础,提出从案例推理的角度研究鱼病诊断问题,对诊断专家系统进行了重构,并给出了诊断问题形式化定义。以上研究表明,探索能够有效结合与鱼病特征相适应的表示方法的处理算法、推理方法是一个趋势。

但是鱼病诊断总是在鱼病产生之后采取的处理方式。因此,如何与水质监测和预警集成形成一体化的平台成为一个主要研究方向^[49]。比如,温继文等^[50]采用统一建模语言 UML 和统一过程 URP,构建并开发鱼病远程监测预警与诊断系统。Zhang 等^[51]针对一些专家系统的构建过程缺乏需求分析和长期支持维护而没有推广的问题,应用进化原形模型构建鱼病健康管理的智能决策支持系统。Li 等^[52]通过对水质因子与鱼病/健康资料的搜集与整理,构建了水质因子(温度、溶解氧、化学需氧量等)与鱼病之间的关系模型与预警系统,比较不同核函数下支持向量机模型的表现,实现了基于水质单因子对鱼病的预警。

2.3 水产养殖动物的生物行为学建模

2.1 节和 2.2 节所实施的水产养殖管理更多是基于水质参数进行,是通过水质变化推断水产养殖动物状态。而水产养殖动物行为学研究更多是直接应用图像处理技术对不同种类鱼在各种养殖环境和应激条件下的行为进行量化分析^[53]。表 5 对获得文献中的相关分析、量化方法进行了描述,其与各种传感、机器视觉等技术紧密结合。

目前研究主要集中于实验环境下特定影响因子对具有特点鱼类进行研究,研究方法主要是对视频获取与机器视觉获取的图像的处理,包括帧间减法、延时复合图像、质心坐标提取、差分图像等方法,对鱼类行为的描述性评价指标涵盖群体行为与个体行为、生理行为与应激行为主要有运动距离、活动性、游动性、鱼群结构、代谢消耗水平、逃脱意愿、位置喜好、速度、缺氧耐受能力、生长表现等。比如,Chew 等^[63]、Papadakis 等^[55]基于机器视觉对鱼的行为进行描述,在视频采集基础上对视频不同帧(由采集的频率决定)形成的图像信息进行提取,对鱼类的行为研究主要分为个体行为和群体行为,个体行为主要包括游速、转向^[56]等能够量化的行为,以及水面呼吸、失稳,群体行为^[64]包括鱼群结构、最小距离等。

表 5 水产鱼类行为量化与分析方法

Tab.5 Methods of quantity and analysis of aquaculture fish

研究对象	实验方法或分析方法			行为相关指标			文献 序号
	影响因素	实验设计	方法	描述性指标	量化指标	详细方法	
金头海鲷	养殖密度	养殖密度分别为每 组 10、15、20 条	计算机视觉系统、 差分图像、算法提 取	逃脱意愿	观察网的时间、咬 网的次数	图像差分算法、标准 目标检测算法、人工 计数	[54 – 55]
条纹海鲫	渐进式低氧		质心坐标提取与分 析	游动活动、鱼群结 构、代谢消耗	净位移、群内相邻距 离、鱼群极性、游速、 转向角、转向速度	5 Hz 下连续坐标的向 量与夹角, $r = \cos\theta_T$ 等	[56]
斑马鱼	精神药物		多功能视频追踪技 术	运动总距离、速度、 轨迹地图			[57]
南方鲇	昼夜循环式耐 氧驯化	耐氧驯化组, 非耐 氧驯化组	MS-222 麻醉后测 量、称量、计时、溶 氧传感器	缺氧耐受、游动能 力、生长表现	临界氧气浓度、水 面呼吸溶解氧阈 值、失稳阈值、进 食率、饲料系数、生 长速率	$U_{crit} = V + (t/T) \Delta V$ 、 $R_{FR} = 100F_c \cdot$ $\frac{2}{(W_t + W_o)t}$	[58]
琥珀鱼	渐进式低氧	渐进式供氧减少, BA 两侧, BA 一侧, 两侧均无	机器视觉、质心坐 标取样与分析	位置喜好、姿态、游 速	质心位置提取、每 秒的累积速度	Loligo 软件	[59]
石斑鱼	灯光颜色	同时暴露在两种灯 光之下, 分别暴露 在 2 种灯光之下	延时复合图像、粒 子图像测速	游动性	方向、游速	$(x, y) = F(p) = a_0 +$ $a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 +$ $a_4 XY + \cdots + a_9 Y^3$	[60]
比目鱼	养殖密度	210PCA, 92PCA	图像分析、帧间减 法	活动性	IPAI	$R_{IPAI} = \frac{P_A}{P} \times 100\%$	[61]
海马	环境颜色、 光强、温度	6 个颜色处理, 6 个 光强处理, 3 个温度 处理	单因素方差分析、 回归分析	存活率、体色变化	存活率、颜色变化 率	SPSS 11.5、 $R_{CCR} = -1.75L^2 +$ $11.739L + 46.6$	[62]

注:表中 PCA 为鱼体投影面积占养殖区域的百分比;BA 为行为表现与测定区域; R_{FR} 为进食率;IPAI 为活动性指数; R_{CCR} 为颜色变化率; L 为光照强度。

2.4 水产养殖饲料配方与投饲决策

通过建立水产养殖管理决策系统,有效分析饵料投喂的各种因素影响,建立饲料配方与营养知识库和数据库,构建水产养殖饲料配方模型,并根据水产的摄食行为或与摄食相关参数而确定投喂决策模型,可以实现饲料配方设计、次投喂量、投喂时间、投喂次数的决策以及实现对养殖知识库的管理^[65]。比如,邢克智等^[66]开发了基于模型和专家经验相结合的水产品全程健康养殖精细管理决策系统,建立了不同养殖品种的生长阶段与投喂率、投喂量间的定量关系模型,采用产生式规则和最邻近算法,结合专家知识和经验及养殖对象生长预测模型,建立基于 CBR 的饲料投喂决策模型。于承先等^[67]使用线性优化算法在满足不同鱼种不同生长阶段营养需求的前提下通过价格最优决策求得饲料的最佳配比,同时根据饲料及配比,结合鱼种、生长阶段、水温、尾数、体重等信息,利用基于知识的推理实现了最优投喂时间、投喂量的决策。

进一步考虑到温度和溶氧是影响鱼类摄食的主

要因子,因此,以水体溶解氧(DO)和温度为指标控制淡水鱼类养殖投饲控制也逐步成为投饲管理决策之一^[3]。比如,Soto-Zarazua 等^[68]以温度、溶解氧量作为控制算法的输入量,考虑罗非鱼鱼龄和平均单尾质量,以投喂比例作为模糊逻辑控制投喂器的输出。liu 等^[69]以 DO 在投饲前后的变化情况,建立鱼群聚集指数和争抢强度来作为 ANFIS(Adaptive neural-based fuzzy inference system)模型的输入量,采用基于人工神经网络的模糊逻辑方法,来进行投饲决策,结果表明其投饲决策阈值为 0.17 时,很好地模拟了鱼类的食欲,投饲的准确性为 100%,均方根误差为 0.077 3。Chang 等^[70]基于鳗鱼的集聚行为,提出了一种用于室内集约养殖的智能控制器,并对其进行了评估,表明鱼类摄食行为的研究^[71]对于投饲具有积极意义,能够有效减轻水体污染,提高水产动物的福利,进而以鱼类的行为或相关参数进行投饲决策。

2.5 水产品质量追溯技术

养殖环节的水产品质量追溯关键技术包括对追

溯内容的确定与获取和追溯方法两方面,也即感知内容获取和追溯平台构建。其追溯主要依托传感等感知手段获取的能够反映每个对象或批次特点^[72]的并可进行封装的信息^[73],即追溯内容,同时对这些信息的可追溯过程相关方法的描述也是追溯技术的重要部分。

(1)感知内容获取。追溯主要指对水产品可追溯性信息的构建,颜波等^[74]构建的平台可以对鱼苗苗种、鱼池消毒、投饲、疾病治疗、转池等养殖信息进行记录,并在出塘时开始使用 RFID,实现水产品从养殖、加工、配送到销售的全程跟踪与追溯。Costa 等^[75]运用 RGB 矩阵对鱼体的形态特征进行识别,结果证明其颜色分析能够辨别两批生长于不同养殖环境下不同食品配方的欧洲鲈鱼。Qi 等^[76]通过 WSN 对循环养殖中水质参数(溶氧、温度、pH 值、盐度)和日常业务流程的记录,且通过对鱼病控制关键节点水质参数的监测减轻鱼病的发生,并实现管理者、工人与消费者之间对养殖环节的信息交互。杨信廷等^[77]通过对水产养殖产品从育苗、放养到收获、运输、销售流程的剖析,设计了水产养殖产品质量管理通用框架,实现了养殖用水、养殖生产、苗种管理、饲料投喂、药物使用等全流程、全方位的电子化管理,实现了水产养殖产品的全程信息追溯。

(2)追溯平台构建。消费者健康意识的提高使追溯技术的应用向源头信息延伸,养殖环境信息的多参数化和多源化等特性使其更需要处理和共享。比如,Karlsen 等^[78]指出各个追溯单元与环节信息融合与交互的重要性,提出要保证信息在各个供应链的传递,以及各个供应链之间的衔接,应具有统一的公开标准和体系;颜波等^[74]构建了基于 RFID 和 EPC 物联网的包含养殖环境的水产品供应链可追溯平台;Qi 等^[76]构建了用于循环水产养殖的基于 WSN 的可追溯系统;任晰等^[79]在分析罗非鱼养殖流程的基础上,设计出可追溯标签,建立了基于 Web 的水产品批次的质量安全追溯系统。

上述对水产品养殖过程环境参数的较为详细的全面感知,特别是对养殖环境信息的处理与共享平台的研究,对追溯链条的信息来源进行了补充,提高了追溯系统的准确性和完整性。水产养殖环节的信息化,能够提高追溯链条的运作效率,电子记录有助于水产养殖信息的封装和追溯单元的划分,有利于水产品质量的信息追溯,进而影响流通模式,信息化的养殖数据也对流通起到了一定的优化作用。

2.6 RAS 与设施养殖控制

传感器等采集的数据信息,在养殖管理控制中发挥了重要作用,基于数据信息构建的水产养殖相关模型与环境控制模型的结合能够提高养殖的科学化水平。循环水养殖系统(Recirculating aquaculture system,RAS)与设施养殖控制系统中必须依托传感技术等采集控制信息形成反馈系统,从而达到对养殖环境等进行调控和科学管理的目的,同时无线通信与手机通讯在养殖环境控制方面的应用也使其控制策略与控制过程得到优化。

表 6 对国内 RAS 与设施养殖中的一些控制方法进行了比较,控制形式以闭环控制形式为主,控制原理主要有智能控制及人工控制、模糊 PID、模糊控制与神经网络等,控制算法有关系方程、自动调整因子模糊算法等。其中,朱明瑞等^[83]采用 PID 控制规律,以占空比方式对养殖环境中的 pH 值进行调整,并比较了不同中和剂配比的控制表现,得出 NaOH 和 NaHCO₃的质量浓度分别为 2 g/L 和 20 g/L 时效果最为满意;史兵等^[81]利用模糊控制与神经网络相结合的算法实现对数据的分析,进而通过控制信号进行闭环控制。以上对养殖环境参数的调控主要采用控制思想对单一参数(溶解氧含量、pH 值、温度、水位等)逐个进行调整控制,在对养殖水体系统的整体调控上体现不明显。

Farghally 等^[85]利用地热作为热源来控制 RAS 中的稳定水温,设计建立 PI、模糊 PID 以及 FLC (Fuzzy logic controller)控制器,在 Matlab/Simulink

表 6 水产养殖中控制方法的比较
Tab. 6 Compartion of control methods in aquacultures

控制原理或算法	控制形式	控制参数	控制精度				文献 序号
			温度	溶解氧含量	pH 值	水位	
智能控制及人工控制	闭环	温度、溶解氧含量、pH 值	±0.5℃	±0.3 mg/L	±0.3		[80]
模糊 PID	闭环	温度、溶解氧含量、pH 值、水位	±0.5℃	±0.3 mg/L	±0.3	±1 cm	[3]
模糊控制与神经网络	闭环	温度、溶解氧含量、pH 值	±0.5℃	±0.3 mg/L	±0.3		[81]
关系方程,PLC 控制;PID 控制,占空比方式	开环	溶解氧含量、pH 值					[82-83]
自动调整因子模糊算法;模糊 PID; PID	开环	温度、溶解氧含量、pH 值	±0.4%	±0.2%	±0.2%		[84]

模型中来模拟并进行比较,证明模糊逻辑控制器算法在控制水池温度上的表现优于 PI 和模糊 PID 控制,并最终采用 FLC 进行控制。Soto-zarazua 等^[86]以 RAS 中的浊度、温度、溶解氧含量、投喂量、硝酸盐含量、阀门开启比例作为模糊集,采用基于 IF-THEN 条件规则的 ARAS (Automated recirculation aquaculture system) 模糊控制器决定需要进行处理的水量,并对蒸发和沉积物中损失的水分进行补充,结果表明其可节水 97.42%,并且水质环境参数均控制在罗非鱼养殖的可接受范围内。以上研究表明,基于系统观点并应用现代控制技术对整个养殖系统的调控能够提高水产养殖系统的效益并提升资源的利用率。

开展水产养殖数字化集成系统研究,实现对水产养殖全过程的自动控制^[87]及科学管理,以及对养殖的精细化调控,对于保障水产养殖高产、高效、安全、健康,实现水产养殖业的可持续发展具有重要意义。我国集约化水产养殖仍处于发展阶段,沿海地区的设施海水养殖已成为防治外来物对养殖生物污染的有效途径,淡水名贵鱼类的集约养殖也为提高其产品的品质和效益提供了一种可行的工程化方案。

本文主要针对水产动物的养殖信息化应用技术等做了综述,水产养殖除动物外包括水产植物、参类、贝类、藻类等,水产动物养殖的信息化模型的构建基本上涵盖了所有的养殖环境条件,这些模式能够为水产养殖实践的信息化模式提供参考和借鉴。

3 水产养殖信息化的发展趋势

水产养殖信息化已成为现代渔业的重要内涵和支撑,能够促进水产养殖业的发展和渔业信息化体系的建立,并提升养殖户市场参与能力和养殖品质。信息化手段的运用是设施养殖的技术前提,同时为其他信息化处理手段的运用提供有效载体。水产养殖全过程的信息化有助于水产品质量的安全追溯,实现对水产养殖环节的全面感知,提升我国水产养

殖体系的运作速度和质量,同时促进我国水产养殖基础数据和适合我国国情的信息化模式的形成。

(1) 信息获取方式由人工获取向自动化获取发展。传统的信息获取方式具有周期长、重复性高、工作量大、主观性强等缺点,水产养殖的环境参数变化的周期性、多元性、复杂性,信息建模方法和参数处理能力的发展要求实现对环境参数的全时全程感知和数字化获取,同时传感技术的发展也使信息获取的智能化、集成化程度不断提高。

(2) 信息化技术的应用是信息获取范围、广度、精度和质量的不断提高。传感技术和集成传感的发展,遥感和 3S 技术在农业领域水产养殖的应用日渐成熟,这些应用技术的不断发展以及水产养殖特性的不断结合,使其对水产养殖信息获取的精度和质量不断提高。同时提升了水产养殖基础数据的水平,保证了水产养殖数据的准确性与可信度。

(3) 信息处理的方法向模型化、智能化和多元化方向发展。人工智能、数据挖掘等计算机算法在信息处理中的应用,较传统的处理方式更高效,时效性和准确性更高,能够有效解决水产养殖环境复杂多变、影响因子较多的问题,并且组合模型、复合模型和三角形法等的使用使模型的构建方法更多元化。

(4) 水产养殖信息化使养殖管理决策向精细化、科学化方向发展。信息系统的发展能够更好地促进现代管理科学与农业生产结合,使水产养殖由传统的生产方式向精细化水产养殖系统发展,由传统的古典控制方法向依靠模型控制的现代模型控制方法转变,使管理更高效。

(5) 更加注重信息化思维和技术在水产养殖全过程中的运用。随着信息化手段在水产养殖上应用的不断深入,应更加注重信息化过程的本质,遵循信息化的规律,综合集成控制论、信息论等理论以及分布式计算、信息融合技术,促进技术与养殖流程的紧密结合,不断提高科技的转化能力与应用水平。

参 考 文 献

- 1 李朝东,崔国贤,盛畅,等. 农业专家系统的发展概况与展望[J]. 农业网络信息, 2009(2): 4-8.
Li Zhao Dong, Cui Guo Xian, Sheng Chang, et al. Development and perspective of agricultural expert system[J]. Agriculture Network Information, 2009(2): 4-8. (in Chinese)
- 2 黄建清,王卫星,姜晟,等. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统开发与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 183-190.
Huang Jianqing, Wang Weixing, Jiang Sheng, et al. Development and test of aquacultural water quality monitoring system based on wireless sensor network[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 183-190. (in Chinese)
- 3 李慧,刘星桥,李景,等. 基于物联网 Android 平台的水产养殖远程监控系统[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 175-181.
Li Hui, Liu Xingqiao, Li Jing, et al. Aquiculture remote monitoring system based on IOT Android platform[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(13): 175-181. (in Chinese)
- 4 Daudi S Simbeye, Jimin Zhao, Shifeng Yang. Design and deployment of wireless sensor networks for aquaculture monitoring and

- control based on virtual instruments[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014,102: 31–42.
- 5 肖忠,陈怡,莫洪林. 鱼塘溶解氧自动监控系统的设计与研究[J]. *农机化研究*,2009,31(5):142–145.
Xiao Zhong, Chen Yi, Mo Honglin. Design and research of dissolved oxygen automatic monitoring system[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009,31(5):142–145. (in Chinese)
- 6 刘兴国,刘兆普,王鹏祥,等. 基于水质监测技术的水产养殖安全保障系统及应用[J]. *农业工程学报*,2009,25(6):186–191.
Liu Xingguo, Liu Zhaopu, Wang Pengxiang, et al. Aquaculture security guarantee system based on water quality monitoring and its application[J]. *Transactions of the CSAE*,2009,25(6):186–191. (in Chinese)
- 7 Bikash Sarkar, Tiwari G N. Thermal modeling and parametric studies of a greenhouse fish pond in the Central Himalayan Region[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006,47(18–19):3174–3184.
- 8 Yusuke Ito, Hiroki Yasuma, Reiji Masuda, et al. Swimming angle and target strength of larval Japanese anchovy[J]. *Fisheries Science*, 2011,77(2):161–167.
- 9 吴一全,殷骏,戴一冕,等. 基于蜂群优化多核支持向量机的淡水鱼种类识别[J]. *农业工程学报*,2014,30(16):312–319.
Wu Yiquan, Yin Jun, Dai Yimian, et al. Identification method of freshwater fish species using multi-kernel support vector machine with bee colony optimization[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014,30(16):312–319. (in Chinese)
- 10 Hu Jing, Li Daoliang, Duan Qinging, et al. Fish species classification by color, texture and multi-class support vector machine using computer vision[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012,88:133–140.
- 11 Pinkiewicz T H, Purser G L, Williams R N. A computer vision system to analyse the swimming behavior of farmed fish in commercial aquaculture facilities: a case study using cage-held Atlantic salmon[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011,45(1): 20–27.
- 12 宋瑜,宋晓东,郭青海,等. 太湖藻华水体的遥感监测与预警[J]. *光谱学与光谱分析*,2011,31(2):753–757.
Song Yu, Song Xiaodong, Guo Qinghai, et al. Remote sensing monitoring and pre-alarming of algal blooms in Taihu Lake[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011,31(2):753–757. (in Chinese)
- 13 Carolina Dona, Chang Nibin, Vicente Caselles, et al. Integrated satellite data fusion and mining for monitoring lake water quality status of the Albufera de Valencia in Spain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015,151:416–426.
- 14 Le Chengfeng, Hu Chuanmin, Jennifer Cannizzaro, et al. Long-term parameters distribution patterns of remotely sensed water quality in Chesapeake Bay[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013,128:93–103.
- 15 马艳娟,赵冬玲,王瑞梅,等. 基于 ASTER 数据的近海水产养殖区提取方法[J]. *农业工程学报*,2010,26(增刊2): 120–124.
Ma Yanjuan, Zhao Dongling, Wang Ruimei, et al. Offshore aquatic farming areas extraction method based on ASTER data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010,26(Supp.2): 120–124. (in Chinese)
- 16 陈侯曦. 基于面向对象的鱼塘面积遥感估算——以台山市为例[D]. 南京:南京大学,2011.
Chen Yuxi. Estimation of ponds area based on object-oriented classification methods with remote sensing data: a case of Taishan [D]. Nanjing: Nanjing University,2011. (in Chinese)
- 17 范亚民,李海宇,何华春,等. 近 30 年来太湖围湖利用及东太湖网围养殖动态变化研究[J]. *长江流域资源与环境*,2012, 21(增刊2): 121–126.
Fan Yamin, Li Haiyu, He Huachun, et al. Dynamic monitoring of lake reclamation in the Taihu Lake and lake enclosure culture of the east Taihu Lake in recent 30 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2012,21(Supp.2):121–126. (in Chinese)
- 18 Toshihiro Sakamoto, Cao Van Phung, Aikihiko Kotera, et al. Analysis of rapid expansion of inland aquaculture and triple rice-cropping areas in a coastal area of the Vietnamese Mekong Delta using MODIS time-series imagery[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009,92(1):34–46.
- 19 Shuangyin Liu, Haijiang Tai, Qisheng Ding, et al. A hybrid approach of support vector regression with genetic algorithm optimization for aquaculture water quality prediction[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013,58(3–4):458–465.
- 20 刘双印,徐龙琴,李振波,等. 基于 PCA–MCAFA–LSSVM 的养殖水质 pH 值预测模型[J]. *农业机械学报*,2014,45(5): 239–246.
Liu Shuangyin, Xu Longqin, Li Zhenbo, et al. Forecasting model for pH value of aquaculture water quality based on PCA–MCAFA–LSSVM[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 239–246. (in Chinese)
- 21 刘双印,徐龙琴,李道亮,等. 基于时间相似数据的支持向量机水质溶解氧在线预测[J]. *农业工程学报*,2014,30(3): 155–162.
Liu Shuangyin, Xu Longqin, Li Daoliang, et al. Online prediction for dissolved oxygen of water quality based on support vector machine with time series similar data[J]. *Transactions of the CSAE*,2014,30(3): 155–162. (in Chinese)
- 22 Xu Longqin, Liu Shuangyin. Study of short-term water quality prediction model based on wavelet neural network[J]. *Mathematical and Computer Modelling*,2013,58(3–4):807–813.
- 23 苏彩虹,向娜,林梅金. 基于 ABC 优化算法的神经网络水溶解氧预测[J]. *计算机仿真*, 2013,30(11):325–329.
Su Caihong, Xiang Na, Lin Meijin. Dissolved oxygen prediction based on artificial bee colony optimization algorithm and BP neural network[J]. *Computer Simulation*,2013,30(11): 325–329. (in Chinese)
- 24 刘双印,徐龙琴,李道亮,等. 基于蚁群优化最小二乘支持向量回归机的河蟹养殖溶解氧预测模型[J]. *农业工程学报*,

- 2012,28(23):167–175.
- Liu Shuangyin, Xu Longqin, Li Daoliang, et al. Dissolved oxygen prediction model of eriocheir sinensis culture based on least squares support vector regression optimized by ant colony algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(23):167–175. (in Chinese)
- 25 刘东君,邹志红. 最优加权组合预测法在水质预测中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2012,32(12):3128–3132.
- Liu Dongjun, Zou Zhihong. Application of weighted combination model on forecasting water quality[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(12):3128–3132. (in Chinese)
- 26 Zhu Xiuna, Li Daoliang, He Dongxian, et al. A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010,71(Supp.):3–9.
- 27 Andrew V Davison, Raul H Piedrahita. Temperature modeling of a land-based aquaculture system for the production of *Gracilaria pacifica*: possible system modifications to conserve heat and extend the growing season[J]. Aquacultural Engineering, 2015,66:1–10.
- 28 韦璐,江敏,余根鼎,等. 凡纳滨对虾养殖塘叶绿素 a 与水质因子主成分多元线性回归分析[J]. 中国水产科学, 2012,19(4):620–625.
- Wei Lu, Jiang Min, Yu Gending, et al. Exploring the influence of water quality parameters on chlorophyll-a in *Litopenaeus vannamei* culture ponds using the method of multiple linear regression of principal components[J]. Journal of Fishery Sciences of China,2012,19(4):620–625. (in Chinese)
- 29 江敏,余根鼎,戴习林,等. 凡纳滨对虾养殖塘叶绿素 a 与水质因子的多元回归分析[J]. 水产学报, 2010,34(11):1712–1718.
- Jiang Min, Yu Gending, Dai Xilin, et al. Multivariate statistical analysis of chlorophyll-a and water quality parameters in ponds of *litopenaeus vannamei* culturing[J]. Journal of Fisheries of China,2010,34(11):1712–1718. (in Chinese)
- 30 刘双印. 基于计算智能的水产养殖水质预测预警方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2014.
- Liu Shuangyin. Prediction and early-warning of water quality in aquaculture based on computational intelligence[D]. Beijing: China Agricultural University,2014. (in Chinese)
- 31 于承先,徐丽英,邢斌,等. 集约化水产养殖水质预警系统的设计与实现[J]. 计算机工程, 2009,35(17):268–270.
- Yu Chengxian, Xu Liying, Xing Bin, et al. Design and implementation of intensive aquaculture water quality early warning system[J]. Computer Engineering,2009,35(17):268–270. (in Chinese)
- 32 Tan Guohua, Yan Jianzhuo, Gao Chen. Prediction of water quality time series data based on least squares support vector machine[J]. Procedia Engineering, 2012,31:1194–1199.
- 33 Salim Heddad. Modelling hourly dissolved oxygen concentration (DO) using dynamic evolving neurl-fuzzy inference system (DENFIS)-based approach: case study of Klamath River at Miller Island Boat Ramp, OR,USA [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21:9212–9227.
- 34 宋协法,马真,万荣,等. 人工神经网络在凡纳滨对虾养殖水质预测中的应用研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2014,44(6):28–33.
- Song Xiefa, Ma Zhen, Wan Rong, et al. Applicability of artificial neural network in the quality prediction of *Litopenaeus vannamei* culturing water[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014,44(6):28–33. (in Chinese)
- 35 吴淑勤,王亚军. 我国水产养殖病害控制技术现状与发展趋势[J]. 中国水产, 2010(8):9–10.
- 36 傅泽田,张小栓,温继文,等. 鱼病诊断专家系统中领域知识概念化体系的建立[J]. 农业系统科学与综合研究, 2003,19(3):180–182.
- Fu Zetian, Zhang Xiaoshuan, Wen Jiwen, et al. Structure on domain knowledge conceptualization architecture in a fish disease diagnosis expert system[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2003,19(3):180–182. (in Chinese)
- 37 郑育红,傅泽田,张小栓. 鱼病诊断专家系统设计[J]. 中国农业大学学报,2000,5(6):94–97.
- Zheng Yuhong, Fu Zetian, Zhang Xiaoshuan. Design of an expert system for fish disease diagnosis[J]. Journal of China Agricultural University,2000,5(6):94–97. (in Chinese)
- 38 彭琳,杨林楠,张丽莲,等. 基于面向对象知识表示的农业专家系统的设计[J]. 农机化研究,2007,29(2):166–168.
- Peng Lin, Yang Linnan, Zhang Lilian. Agricultural expert system based on object-oriented knowledge representation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(2):166–168. (in Chinese)
- 39 Chen Yuchuan, Hsu Chienyeh, Liu Li, et al. Consturcting a nutrition diagnosis expert syetem[J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(2):2132–2156.
- 40 Neil Dunstan. Generating domain-specific web-based expert systems[J]. Expert Systems with Applications, 2008,35(3):686–690.
- 41 卜伟琼,方遼,张晓玲,等. 基于本体的柑橘病虫害知识模型构建[J]. 江苏农业科学, 2013,41(10):363–366.
- 42 刘光明,邢克智,田云臣,等. 云存储在水产健康养殖中的应用[J]. 江苏农业科学, 2014,42(7):246–247.
- 43 冯子慧,王丽娟,梁晶莹,等. 水产养殖病害远程动态图像采集与传输系统的组成及实现[J]. 水产科技情报, 2014(4):180–183.
- 44 尹银平,印润远. 基于 Fuzzy 推理的鱼病诊断专家系统[J]. 上海海洋大学学报, 2009,18(1):77–82.

- Yin Yinping, Yin Runyuan. Fish disease diagnosis' expert system based on Fuzzy reasoning[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2009,18(1): 77-82. (in Chinese)
- 45 温继文,傅泽田,李道亮. 基于双层因果网络的鱼病诊断模型及其应用[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2006, 32(2):214-218.
- Wen Jiwen, Fu Zetian, Li Daoliang. A fish-disease model based on double causal network[J]. Journal of Hunan Agricultural University:Natural Sciences, 2006,32(2): 214-218. (in Chinese)
- 46 Gutierrez Estrada J C ,Pedro Sanz E De ,Lopez Luque R,et al. SEDPA, an expert system for disease diagnosis in eel rearing systems[J]. Aquacultural Engineering, 2005,33(2):110-125.
- 47 郭永洪,傅泽田. 基于案例推理(CBR)的鱼病诊断模型研究[J]. 计算机与现代化, 2005(9): 1-4.
- Guo Yonghong, Fu Zetian. Research on fish disease diagnosis model based on CBR[J]. Computer and Modernization, 2005(9): 1-4. (in Chinese)
- 48 周云,傅泽田,张小栓,等. 基于案例推理的鱼病诊断专家系统及其数据库设计[J]. 计算机工程与应用,2004(34):206-208.
- Zhou Yun, Fu Zetian, Zhang Xiaoshuan. The design of a fish disease diagnosis expert system and its database on CBR[J]. Computer Engineering and Applications,2004(34): 206-208. (in Chinese)
- 49 曹晶,谢骏,王海英,等. 基于 BP 神经网络的水产健康养殖专家系统设计与实现[J]. 湘潭大学自然科学学报,2010, 32(1):117-121.
- Cao Jing, Xie Jun, Wang Haiying, et al. Design and implementation on expert system of health aquiculture based on BP neural networks[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2010,32(1): 117-121. (in Chinese)
- 50 温继文,李道亮,陈梅生,等. 基于 UML 的鱼病远程监测预警与诊断系统[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊 2):166-171.
- Wen Jiwen, Li Daoliang, Chen Meisheng, et al. UML-based remote monitoring and early warning system for fish diseases diagnosis[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(Supp. 2): 166-171. (in Chinese)
- 51 Zhang Xiaoshuan, Fu Zetian, Cai Wengui, et al. Applying evolutionary prototyping model in developing FIDSS: an intelligent decision support system for fish disease/health management[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(2):3901-3913.
- 52 Li Nan, Wang Ruimei, Zhang Jian, et al. Developing a knowledge-based early warning system for fish disease/health via water quality management[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(3): 6500-6511.
- 53 徐建瑜,崔绍荣,苗香雯,等. 计算机视觉技术在水产养殖中的应用与展望[J]. 农业工程学报,2005, 21(8):174-178.
- Xu Jianyu, Cui Shaorong, Miao Xiangwen, et al. Application and prospect of computer vision technology in aquaculture[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(8):174-178. (in Chinese)
- 54 Vassilis M Papadakis, Alexios Glaropoulos, Maroudio Kentouri. Sub-second analysis of fish behavior using a novel computer-vision system[J]. Aquacultural Engineering, 2014,62: 36-41.
- 55 Vassilis M Papadakis, Ioannis E Papadakis, Fani Lamprianidou, et al. A computer-vision system and methodology for the analysis of fish behavior[J]. Aquacultural Engineering, 2012,46: 53-59.
- 56 Cook D G, Brown E J, Lefevre S, et al. The response of striped surfperch *Embiotoca lateralis* to progressive hypoxia: swimming activity, shoal structure, and estimated metabolic expenditure[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2014, 460: 162-169.
- 57 Julian T Pittman, Katie M Ichikawa. iPhone applications as versatile video tracking tools to analyze behavior in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Pharmacology, Biochemistry and Behavior, 2013,106:137-142.
- 58 Yang Han, Cao Zhendong, Fu Shijian. The effects of diel-cycling hypoxia acclimation on the hypoxia tolerance, swimming capacity and growth performance of southern catfish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology—Part A, 2013,165(2): 131-138.
- 59 Cook D G, Herbert N A. The physiological and behavioral response of juvenile kingfish (*Seriola lalandi*) differs between escapable and inescapable progressive hypoxia[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2012,413: 138-144.
- 60 Cha Bong Jin, Bae Bong Seong, Cho Sam Kwang, et al. A simple method to quantify fish behavior by forming time-lapse images [J]. Aquacultural Engineering, 2012,51: 15-20.
- 61 Duarte S, Reig J Oca. Measurement of sole activity by digital image analysis[J]. Aquacultural Engineering,2009,41(1):22-27.
- 62 Lin Qiang, Lin Junda, Huang Liangmin. Effects of substrate color, light intensity and temperature on survival and skin color change of juvenile seahorses, *hippocampus erectus* Perry, 1810 [J]. Aquaculture, 2009,208(1-2): 157-161.
- 63 Boon Fong Chew, How Lung Eng, Myo Thina. Vision-based real-time monitoring on the behavior of fish school [C] // Proceedings of IAPR Conference on Machine Vision Application, 2009:90-93.
- 64 Lars Helge Stien, Silje Bratland, Ivar Austevoll, et al. A video analysis procedure for assessing vertical fish distribution in aquaculture tanks[J]. Aquacultural Engineering, 2007, 37(2):115-124.
- 65 徐丽英,于承先,邢斌,等. 基于 PDA 的集约化水产饲料投喂决策系统[J]. 农业工程学报,2008,24(增刊 2): 250-254.
- Xu Liying, Yu Chengxian, Xing Bin, et al. PDA-based aquaculture feeding support system [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(Supp. 2): 250-254. (in Chinese)
- 66 邢克智,郭永军,陈成勋,等. 水产养殖先进传感与智能处理关键技术及产品[J]. 天津科技, 2013(2):45-46.
- 67 于承先,徐丽英,邢斌,等. 集约化水产养殖信息系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2008,24(增刊 2): 235-239.
- Yu Chengxian, Xu Liying, Xing Bin, et al. Design and implementation of information system for intensive aquaculture [J].

- Transactions of the CSAE, 2008,24(Supp.2): 235 – 239. (in Chinese)
- 68 Genaro M Soto-Zarazua, Enrique Rico-Garcia, Rosalia Ocampo, et al. Fuzzy-logic-based feeder system for intensive tilapia production[J]. Aquaculture International, 2010,18(3): 379 – 391.
- 69 Ziyi Liu, Xian Li, Liangzhong Fan, et al. Measuring feeding activity of fish in RAS using computer vision[J]. Aquacultural Engineering, 2014,60:20 – 27.
- 70 Chang C M, Fang W, Jao R C, et al. Development of an intelligent feeding controller for indoor intensive culturing of eel[J]. Aquacultural Engineering, 2005,32(2): 343 – 353.
- 71 Tehui Wu, Yu-I Huang, Jiunn-Ming Chen. Development of an adaptive neural-based fuzzy inference system for feeding decision-making assessment in silver perch (*Bidynus bidyanus*) culture[J]. Aquacultural Engineering, 2015,66:41 – 51.
- 72 傅泽田,邢少华,张小栓. 食品质量安全可追溯关键技术研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 144 – 153.
- Fu Zetian, Xing Shaohua, Zhang Xiaoshuan. Development trend of food quality safety traceability technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7): 144 – 153. (in Chinese)
- 73 钱志鸿,王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述[J]. 电子与信息学报, 2013,35(1): 215 – 227.
- Qian Zhihong, Wang Yijun. Internet of things-oriented wireless sensor networks review[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013,35(1): 215 – 227. (in Chinese)
- 74 颜波,石平,黄广文. 基于 RFID 和 EPC 物联网的水产品供应链可追溯平台开发[J]. 农业工程学报, 2013,29(15): 172 – 183.
- Yan Bo, Shi Ping, Huang Guangwen. Development of traceability system of aquatic foods supply chain based on RFID and EPC internet of things[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(15): 172 – 183. (in Chinese)
- 75 Costa Menesatti P C, Rambaldi E, et al. Preliminary evidences of colour differences in European sea bass reared under organic protocols[J]. Aquacultural Engineering, 2013,57: 82 – 88.
- 76 Qi lin, Zhang Jian, Mark Xu. Developing WSN-based traceability system for recirculation aquaculture[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2011(53): 2162 – 2172.
- 77 杨信廷,孙传恒,钱建平,等. 基于流程编码的水产养殖产品质量追溯系统的构建与实现[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 159 – 164.
- Yang Xinting, Sun Chuanheng, Qian Jianping, et al. Construction and implementation of fishery product quality traceability system based on the flow code of aquaculture[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(2): 159 – 164. (in Chinese)
- 78 Karlens K M, Sorensen C F, Foras F, et al. Critical criteria when implementing electronic chain traceability in a fish supply chain [J]. Food Control, 2011,22(8): 1399 – 1347.
- 79 任晰,傅泽田,穆维松,等. 基于 Web 的罗非鱼养殖质量安全信息可追溯系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 163 – 167.
- Ren Xi, Fu Zetian, Mu Weisong, et al. Traceability system for tilapia breeding quality safety information based on Web[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(4): 163 – 167. (in Chinese)
- 80 颜波,石平. 基于物联网的水产养殖智能化监控系统[J]. 农业机械学报, 2014,45(1): 259 – 265.
- Yan Bo, Shi Ping. Intelligent monitoring system for aquiculture based on Internet of things[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(1): 259 – 265. (in Chinese)
- 81 史兵,赵德安,刘星桥,等. 工厂化水产养殖智能监控系统设计[J]. 农业机械学报, 2011,42(9): 191 – 196.
- Shi Bing, Zhao Dean, Liu Xingqiao, et al. Design of intelligent monitoring system for aquaculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9): 191 – 196. (in Chinese)
- 82 朱明瑞,曹广斌,蒋树义,等. 工厂化水产养殖溶解氧自动监控系统研究[J]. 大连水产学院学报, 2007,22(3): 226 – 230.
- Zhu Mingrui, Cao Guangbin, Jiang Shuyi, et al. Automatic monitoring and control system of dissolved oxygen levels in recirculating aquaculture[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2007,22(3): 226 – 230. (in Chinese)
- 83 朱明瑞,曹广斌,蒋树义,等. 工厂化水产养殖水体的 pH 值在线自动控制系统[J]. 水产学报, 2007,31(3): 335 – 342.
- Zhu Mingrui, Cao Guangbin, Jiang Shuyi, et al. Automatic control system of pH value in the recirculating aquaculture[J]. Journal of Fisheries of China, 2007,31(3): 335 – 342. (in Chinese)
- 84 马从国,倪伟. 基于 PLC 工厂化水产养殖监控系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2005(2): 51 – 53,42.
- Ma Congguo, Ni Wei. The design of a factory aquiculture monitor system based on PLC[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2005(2): 51 – 53,42. (in Chinese)
- 85 Hanaa M Farghally, Doaa M Atia, Hanaa T El-madany, et al. Control methodologies based on geothermal recirculating aquaculture system[J]. Energy, 2014,78: 826 – 833.
- 86 Genaro M Soto-Zarazua, Rocio Peniche-Vera, Enrique Rico-Garcia, et al. An automated recirculation aquaculture system based on fuzzy logic control for aquaculture production of tilapia(*Oreochromis niloticus*)[J]. Aquaculture International, 2011,19(4): 797 – 808.
- 87 曹广斌,蒋树义,韩世成,等. 工厂化水产养殖中的自动控制技术[J]. 水产学杂志, 2011,24(1): 60 – 64.
- Cao Guangbin, Jiang Shuyi, Han Shicheng, et al. Automatic technology in a recirculating aquaculture system[J]. Chinese Journal Fisheries, 2011,24(1): 60 – 64. (in Chinese)