

数字技术在水产养殖中的应用进展与展望*

梁晨¹, 张华^{1*}, 周志刚^{2*}, 陈楠³, 暴愿达¹

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京100081; 2. 中国农业科学院饲料研究所, 北京100081;
3. 黄冈市农业科学院, 湖北黄冈438000)

摘要:【目的】数字技术的引入为提高水产养殖生产效率、优化资源利用、改善管理模式提供了新的途径。文章深入探讨水产养殖数字技术在水产养殖领域的应用进展和发展趋势,旨在挖掘数字技术在水产养殖中的关键作用,以期为水产养殖可持续发展提供科学依据和战略指导。【方法】采用文献整理和市场调查相结合的方法,对当前水产养殖中应用较多的数字技术进行了梳理,并针对养殖水质监测、水产品质量安全追溯、养殖作业自动化、病害远程诊断以及水产品网络交易等应用场景展开详细分析。【结果】水产养殖中应用数字技术在提高生产效率、优化管理模式、保障产品质量和安全等方面拥有巨大潜力,但同时也面临基础条件不足、技术门槛和资金投入高、技术可靠性和实用性有待提高等诸多挑战。【结论】在当前社会经济发展和人口快速增长的背景下,数字技术将成为水产养殖产业转型升级的关键驱动力。

关键词: 数字技术; 水产养殖; 应用进展; 展望; 人工智能

DOI: 10.12105/j.issn.1672-0423.20240105

0 引言

我国是水产品大国,总产量自1990年起始终处于世界第一位置,是全球唯一养殖量超过捕捞量的国家。近年来,我国水产品总产值稳步提升,养殖产值比重持续提高。2022年我国水产品总产量6 865.91万t,总产值1.526 749万亿元。其中,养殖水产品产量5 565.46万t,总产值1.250 187万亿元,占水产品总产值的81.9%。然而,以小规模粗放劳作为主的传统养殖模式仍然是主要的水产品生产方式,存在着资源利用不高效、水质管理不精细、生产效率不高、产品质量参差不齐等问题,其环境影响也越来越明显,水域污染、水生生物栖息地破坏等问题日益突出,制约了水产养殖业的可持续发展。加快引入数字技术,转变传统生产方式,发展高效、精准、环保的数字化水产养殖模式是

收稿日期: 2024-01-15

第一作者简介: 梁晨(1980—), 博士。研究方向: 智慧农业、数字乡村。Email: liangchen@caas.cn

※通信作者简介: 张华(1970—), 博士、研究员。研究方向: 智慧农业、数字乡村。Email: zhanghua@caas.cn; 周志刚(1974—), 博士、研究员。研究方向: 水产动物营养与饲料科学与水产动物消化道微生物学。Email: zhouzhigang03@caas.cn

*基金项目: 国家自然科学基金重点项目“肠道菌群调控养殖鱼类生长性状的机制研究”(32330110); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金“草鱼细菌性肠道炎症发生的调控网络及营养干预机制研究”(U21A20267); 现代农业产业技术体系北京市渔业创新团队(BAIC07-2024-11)

2024年2月

解决当前水产养殖业诸多问题的重要途径。

2021年10月18日习近平总书记主持十九届中央政治局第三十四次集体学习时强调,数字技术、数字经济是世界科技革命和产业变革的先机,是新一轮国际竞争重点领域,一定要抓住先机、抢占未来发展制高点。当前,数字技术在各行各业的应用日益广泛,也为水产养殖提供了新的思路和解决方案。从养殖水质监测到水产品质量追溯,从养殖作业自动化到病害远程诊断,再到水产品网络交易,数字技术的应用正在改变水产养殖的面貌。

文章旨在对数字技术在水产养殖中的应用现状进行全面深入的探讨,并对未来水产养殖数字技术的发展趋势进行展望,以期为水产养殖业的可持续发展提供参考和借鉴。

1 水产养殖关键数字技术的研究进展

数字技术(Digital Technology)是指利用计算机和数字设备,以及计算机技术、信息技术和通信技术等现代数字化工具和方法^[1-5],对数据进行采集、存储、处理、传输和应用的一系列技术和手段^[6]。当前,经过单机应用、互联网应用两次高速发展浪潮后,数字技术正处于以数据深度挖掘与智能应用为主要特征第三次高速发展阶段^[7],数字技术迅速衍生,涌现出更丰富多样的技术形态^[8],包括但不限于物联网、区块链、数字孪生、人工智能、大数据分析、云计算、机器学习、深度学习等^[9]。数字技术已经广泛应用于各个领域,如农业、工业、医疗、金融、教育等^[10],为提高效率、创新产品和服务、解决问题等提供了强大的支持^[11],数字技术海量、多样、时效等大数据特征也日益突出^[12]。近年来,水产养殖中逐步引入了一系列关键数字技术^[13, 14],发挥了日益重要的作用^[15],为实现水产养殖全链条精准管理和智能决策提供技术支撑,推动水产养殖业朝着更加智能、高效和可持续发展的方向发展。水产养殖领域数字技术与设备应用体系如图1所示。

1.1 物联网(IoT)技术

物联网(Internet of Things, IoT)技术是一种通过互联网连接和通信的智能网络,是将物理世界中的各种对象(如传感器、设备、机器等)相互交互、收集数据并进行远程控制的技术^[16-19]。在水产养殖中,物联网技术将传感器、摄像头和其他物理对象连接到互联网^[20-24],实时采集和监测养殖信息数据,远程控制自动化养殖设备,从而实现养殖环境监测、养殖过程监控、智能投喂和管理、远程控制和管理、溯源和质量追踪等多方面的功能^[25-29]。

1.2 区块链技术

区块链技术是一种基于密码学原理和分布式计算的信息存储、传输和验证技术,它采用链式数据结构将交易记录按时间顺序连接起来,形成一个不可篡改的数据区块链^[30-32]。每个区块都包含了前一个区块的哈希值,确保了数据的完整性和安全性。区块链技术的去中心化特点将数据存储在网络中的多个节点上,不易被篡改或删除,具有高度的透明性和可追溯性,能够有效防止信息篡改和欺诈^[33]。区块链技术应用于水产养殖中,可以实现产品的溯源和认证、防伪和品质保障、供应链管理、智能合约应用等多方

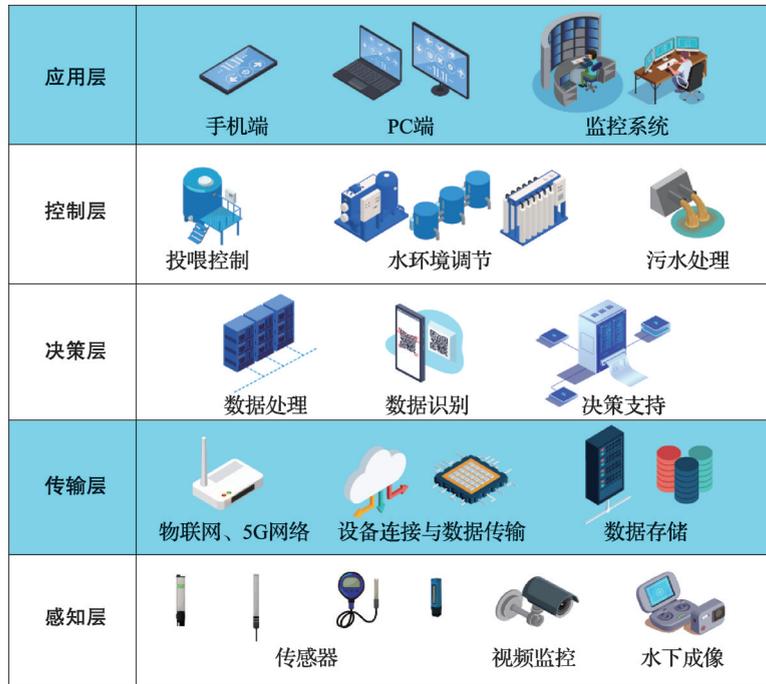


图 1 水产养殖领域数字技术与设备应用体系

Fig. 1 Digital technology application system in aquaculture

面的功能^[34-36]。

1.3 大数据分析技术

大数据分析技术是基于先进的计算机技术和算法，对海量、多样、高维度的数据进行采集、存储、处理、分析和挖掘的一系列方法和工具^[37]。大数据分析的应用建立在对海量数据的采集基础上，首先对数据处理和清洗，确保数据的准确性和一致性。然后通过对海量数据进行深入分析，发现数据之间的关联性、规律性和趋势。最后利用数据可视化技术将分析结果转化为图表、报表、仪表盘等形式，直观地展现给决策者和用户。除此之外，大数据分析技术还具备预测性分析的能力，能够及时发现数据变化趋势，并进行预测和预警，能够支持实时决策和行动^[38-41]。

1.4 数字孪生技术

数字孪生技术是一种基于数字模型的先进技术，它通过将实体物体或数字信息与其实际运行情况相结合，创建一个虚拟的数字副本，实现对实体物体或系统的仿真、监测、预测和优化管理^[42]。这种技术集成数据采集、传感器技术和物联网等手段，将实时数据与数字模型进行比对和分析，从而实现对实体物体或系统的全面监控和管理^[43, 44]。通过建立渔场数字孪生模型，实时监测水质、水温和水流等环境因素，可以预测鱼类进食情况、生长情况与健康状况，配合自动控制系统，调整投饲以及实时优化养殖环境^[45]。对水产养殖设备和设施进行数字化建模和仿真，实时监测设备运行状态，并及时预测故障、采取维护措施，能够减少设备故障和停机时间，提高生产稳定性和可靠性。通过对水产养殖流程进行数字化建模和仿真，分析生产过程中的各个环节，发现潜在问题并提出改

2024年2月

进措施，能够优化水产养殖流程，提高生产效率和产品质量。

1.5 人工智能(AI)技术

人工智能(AI)是一种模拟人类思维和行为的技术，它能够利用计算机系统模拟、扩展和增强人类的智能，具有学习、推理、识别、理解、规划、判断等功能^[46-48]。人工智能技术涵盖了机器学习、深度学习、自然语言处理、专家系统等多个领域，其核心思想是通过对大量数据的学习和分析，从中提取规律和模式，进而实现自主决策和智能应用。人工智能技术应用于水产养殖中，通过对水产养殖数据进行智能分析和预测，能够实现智能养殖管理、智能捕捞、智能预警和决策支持、智能质量控制等多种功能^[49]。水产养殖领域人工智能识别技术的基本原理和过程如图2所示。

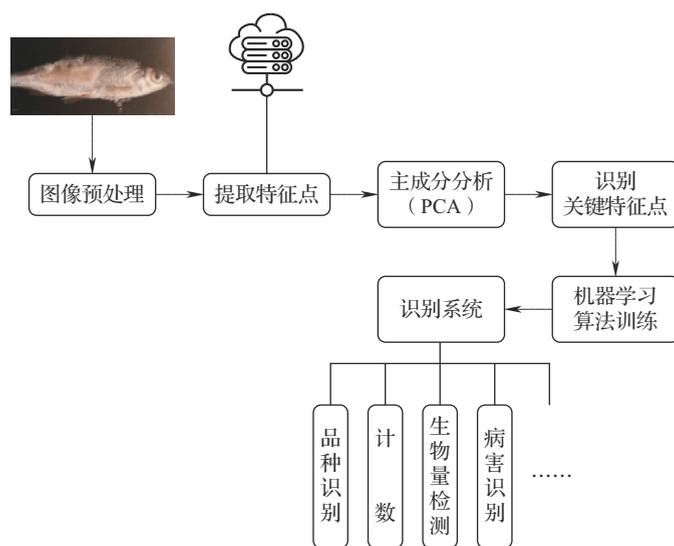


图2 水产养殖领域人工智能识别技术

Fig. 2 Artificial intelligence identification technology in aquaculture

除上述关键数字技术外，传感器、视频监控、自动化、互联网和云计算等技术在水产养殖中也发挥了重要作用，是数字技术应用的重要基础和支撑。传感技术是重要的基础技术，传感器设备实时采集水产养殖的关键参数，如水质、温度和pH等，为水产养殖提供准确的数据支持^[50, 51]。视频监控系统则通过摄像头等设备，实现对养殖环境和生产过程的远程监控^[52, 53]。自动化设备的应用，为实现自动投喂、自动清洁等提供可能性^[54]。云计算技术能够将海量的数据存储和处理转移到云端，提高了数据的存储、计算效率和安全性^[55]。这些技术的综合应用，促进了水产养殖的现代化和智能化发展，为行业的可持续发展提供了有力支持。

2 水产养殖数字技术集成的应用现状

目前，水产养殖数字技术普遍采用“传感器采集数据、物联网链接设备、互联网远

程控制”的集成模式，应用场景主要集中在养殖水质监测、水产品质量安全追溯、养殖作业自动化、病害远程诊断及水产品网络交易等方面。

2.1 养殖水质监测

以数字技术为核心构建养殖水质智能在线监测系统，是数字技术在水产养殖中的重要应用领域之一^[56]。利用传感器实时监测养殖水体的温度、溶解氧、pH和溶解性有机物含量等关键水质指标，传感器数据通过物联网链接，传输到中央控制系统，借助云计算、数据分析等技术进行实时分析与处理，能够及时发现水质异常。设定关键参数的安全限值，链接报警系统模块，可以提前预警养殖环境问题^[57]。结合自动控制设备，可开展相关补救措施能够有效保障水产养殖的健康与稳定。

相较传统养殖模式主要依靠人工经验测量，数字技术在养殖水质监测中的应用，大大提高了监测的精准度和实时性，降低了监测成本和人力投入^[58]，极大地提高了水环境监测系统的自动化和智能化程度，有效提升了生产效率和水质监管水平^[59]。此外，数字技术赋予水环境监测系统记录历史数据、生成报表分析等功能，为水产养殖提供可靠的数据支持和决策依据^[60]。

2.2 水产品质量安全追溯

利用数字技术搭建的水产品质量安全追溯系统，可以实现对水产品从养殖、加工，到运输、配送的全过程实时监控和记录^[61]。养殖环节中，通过传感器监测生产环节的关键数据，例如水质、水温和养殖密度等，确保养殖水环境的稳定性与水产品质量安全^[62]。加工、运输和配送等环节中，利用区块链技术对水产品进行数字化记录和追踪，确保来源可追溯、质量可控制^[63]。消费者可以通过扫描产品包装上的二维码或条形码，查询水产品的生产、加工和运输等信息。此外，借助大数据分析技术，对水产品的生产过程进行全面监测和分析，还可以及时发现潜在的质量问题，实现智能预警和精准控制^[64]。

数字技术在水产品质量安全追溯中的应用，除了提高水产品的质量和安全性，有助于提升生产者的信誉度和竞争力，还可以为政府监管部门强对水产品市场的监管和管理，维护市场秩序，保障消费者的权益提供数据支持。广东、江苏等省率先开展水产品可追溯体系建设，以追溯二维码为载体，实现水产品从生产到销售全环节的信息可查询、来源可追溯、去向可跟踪、责任可追究。截止2018年，广东已建设可追溯管理平台21个，可追溯的重要养殖企业达29个，涉及的养殖品种有罗非鱼、草鱼和对虾等20个^[65]。

2.3 养殖作业自动化

数字技术在水产养殖中的另一个重要应用场景是养殖自动控制。通过控制传感器、智能控制器和自动化设备，数字技术可以实现水产养殖作业过程的实时监测和精准控制。具体来说，养殖作业自动化主要包括自动投饲、自动清洁、自动捕捞等方面。

2.3.1 自动投饲

基于数字技术的自动投饲设备，通过监测水体中的鱼群数量和饲料消耗情况，可以根据实时数据调整投喂量和投喂频率，实现精准投喂，能有效降低饲料成本，提高饵料利用率，避免过度投喂造成的浪费和环境污染^[66]。研究显示，通过探测鱼群饥饿程度并

2024年2月

据此进行自动投饵，可以降低21%的饲料成本。国内普遍采用的基于物联网技术的自动投饲增氧一体化系统，集成了自动上料单元、精确下料单元、气送投喂单元、水体增氧单元和智能控制单元五大部分^[67-69]，将饲料投喂和水体增氧结合，可根据鱼类摄食状况，控制投饲速度和时间，实现按需适时投饲。另外，自主巡航自动投饲船也是养殖作业自动化的重要成果。这种船只配备先进的定位和导航系统，可根据预设路径自主航行至养殖区域，借助激光雷达、摄像头等感知设备，根据水质、鱼群密度等参数调整投喂策略，实现智能化投饲管理^[70]。与传统的人工投饲相比，自动投饲船能够显著减少人力投入和作业时间，提高投饲效率，降低养殖成本。

2.3.2 自动清洁

基于数字技术的自动清洁系统，能够定期清理养殖池底、网箱表面等容易积聚废物的区域，保持水体清洁^[71-72]。自动清洁系统配备高效清洁装置，将废物吸附并排出，避免废物对水质的污染，保持水体清洁，减少病原菌的滋生，提高水产品的品质与安全性。自动清洁设备预设了清洁路径和工作模式，能够自主完成清洁任务，减少人力成本和作业时间。

2.3.3 自动捕捞

基于数字技术的自动捕捞系统^[73]，通常由多个组成部分构成，包括作业传感器、智能控制系统以及作业装置等，野外与远洋渔业自动捕捞还需配备自主导航设备。自动捕捞技术是数字技术在水产养殖中的又一重要应用领域。传统捕捞作业通常依赖于人工操作^[74]，存在着捕捞效率低、成本高、劳动强度大等问题。而自动捕捞技术通过数字化设备和智能化系统的应用，实现了捕捞过程的自动化和智能化，极大地提高了捕捞效率和作业质量。

2.4 病害远程诊断

利用传感器和监测设备，采集养殖水体的水质、温度和溶解氧等关键指标数据，收集大量鱼病病例与影像并存档，通过互联网传输和云存储实现信息共享，构建互联网电子病例档案^[75]。综合利用计算机技术、显微图像处理技术和远程协作平台技术，进行水产病害的远程诊断，实现专家和养殖者之间的远程会诊和交流，共同制定病害防治方案，提高防控效果和治疗效率。

数字技术的应用提高了远程诊断的准确性和可靠性，避免了人为因素对诊断结果的影响，为病害的精准诊断和治疗提供了科学依据。数字技术的远程诊断模式节约了时间和成本，使得专家资源得以充分利用，为更多地区和养殖场提供了专业的技术支持，极大地提高了养殖业的防疫能力和抗风险能力。目前，上海、江苏等地已建立水产病害远程诊断系统，实现了网上看病、远程诊疗^[76]。江苏已建设省、市、县三级防疫体系在线会商和交流系统，水产病害远程诊断体系逐步完善^[77]。

2.5 水产品网络交易

数字技术为水产品网络交易提供了便捷的平台和工具，为水产品市场的规范化、透明化和高效化提供了重要支持。通过电子商务平台和手机app应用，消费者可以随时随地浏览和购买水产品，实现了线上线下的无缝连接^[78]。同时，数字支付和结算系统的应

用简化了交易流程，提高了交易效率，降低了交易成本，促进了水产品市场的发展和繁荣。另外，通过大数据分析和人工智能技术，可以对市场供需情况进行精准预测和分析，帮助企业 and 政府制定合理的市场政策和调控措施。目前政府也积极参与水产品电商平台的建设，水产品电商基本形成了“两超、多强、小众”的电商格局^[79]。

总的来说，数字技术集成在上述水产养殖主要场景中应用，对于提高养殖效率、保障产品质量以及促进市场发展发挥了积极作用，其优势主要体现在以下五大方面。一是提高生产效率，数字技术可以实现养殖过程的自动化、智能化，如自动投饲、自动清洁、自动捕捞等，有效提高了生产效率，降低了人力成本，增强了生产的稳定性和可控性；二是提升养殖质量，通过实时监测和精准控制养殖环境参数，数字技术可以有效预防疾病、优化饲料供应量和投喂时间，保障水产品的健康与安全，提升养殖产品的品质；三是降低经营成本，数字技术的应用能够精确监测资源利用情况，避免了资源浪费和过度投入，降低了养殖成本，提高了经营效益；四是促进信息共享和决策优化，数字技术可以实现数据的实时采集、传输和分析，为养殖管理者提供全面、准确的数据支持，促进了信息的共享和决策的优化，有利于提高管理水平和决策效率；五是强化追溯与监管，通过数字化记录和追踪水产品的生产、加工、运输等全过程信息，数字技术可以实现水产品质量安全追溯，为政府监管部门提供数据支持，强化市场监管和风险控制能力。

3 我国水产养殖应用数字技术面临的主要挑战与发展对策

3.1 主要挑战

3.1.1 水产养殖模式落后,应用数字技术的基础条件不足

数字技术设备的安装应用需要供应稳定的电力系统、覆盖完善的网络支持等条件，而我国水产养殖以传统露天模式为主，水产养殖场多位于山区、乡村等地，环境条件相对复杂，基础设施相对落后，无法满足数字技术设备运行需求，限制了数字技术在水产养殖领域的推广应用。

3.1.2 技术门槛高、投资成本高,限制数字技术的推广普及

除了基础条件不足外，应用数字技术还面临着技术门槛高和投资成本高的挑战。数字技术的应用涉及多个专业领域，包括传感器技术、数据处理和网络通信等，对养殖从业人员的专业程度要求较高。先进的数字技术设备，如高精度传感器和智能监控系统，价格普遍较昂贵。水产养殖应用数字技术并充分发挥其效用，较为理想的是采用工厂化养殖模式，这就要求开展大规模的设备更新和技术改造，极大地增加了养殖场的投资规模和成本。

3.1.3 关键数字技术的可靠性和实用性有待验证和提升

数字技术在水产养殖领域的应用仍处于发展初期阶段，一些关键技术集成应用，特别是在数据处理与分析、智能控制等领域，技术集成应用的稳定性和准确性尚需进一步提升。与之配套的数字设备在实际运行中面临着使用寿命不长、稳定性较差等问题，限制了数字技术的效果发挥。针对水产养殖场景的特征和需求，还需研发更具适用性和实

2024年2月

用性的数字设备，加强设备的标准化管理和质量控制，确保其能够在各种水产养殖环境下稳定运行并提供准确可靠的数据支持。

3.1.4 数据共享不畅和信息孤岛效应,影响数字技术的应用效果

当前，数字技术在构建水产养殖生产管理系统方面应用较为普遍，但由于水产养殖场通常是分散的、独立运营的实体，缺乏统一的数据标准和信息共享平台，各个养殖场之间的数据很难进行交流和共享。此外，水产养殖产业链各环节之间的数据共享和信息交流也存在障碍，信息孤岛效应切断了产、供、销环节之间的紧密联系，无法充分发挥数字技术的作用。

3.2 发展对策

加强数字技术在水产养殖中的应用，关键在于结合中国国情和农业特点，提出有针对性的措施，促进数字技术与水产养殖业的深度融合。一是提升基础设施建设水平。针对水产养殖场位于山区、乡村等环境复杂、基础设施相对落后等现实，加大对电力供应和网络覆盖等基础设施的改造和建设力度，为数字技术设备的安装和应用创造更好的条件。二是加强技术研发与推广。提供相关的培训和指导，提高养殖从业人员的数字化素养和专业技能，鼓励数字技术研发和加大技术普及投入，降低数字技术应用的技术门槛。三是加强技术集成与设备研发。加强对数字设备的优化和改进，提高设备的性能和适应性，确保其能够在各种水产养殖环境下稳定运行并提供准确可靠的数据支持，同时提高数据处理与分析、智能控制等方面的稳定性和准确性。四是由地方政府牵头，搭建水产养殖产供销一体化信息共享平台，实现各个养殖场之间的数据共享和信息交流，打破信息孤岛，推动数字技术在水产养殖领域应用效果的提升。

4 数字技术在水产养殖中的应用场景创新

未来，随着人工智能、大数据、物联网等新一代数字技术的不断成熟和普及，水产养殖数字技术的应用将更加智能化、自动化，有望在以下方面进一步发展和应用。

4.1 水环境动态监测与智能预警

未来的水产养殖数字技术将在水环境动态监测与智能预警方面迎来重大进展^[80, 81]。结合更先进、更高精度的传感器设备，数字技术将加强对水环境动态变化的感知，使监测系统更为灵敏，能够迅速响应环境变化。集成大数据分析和人工智能算法的智能预警系统，通过历史数据的比对和分析，结合机器学习，可提前识别出可能发生的水质异常事件。一旦检测到异常，系统将立即发出预警信号，通知养殖户采取相应的调控措施，从而最大程度地降低不良环境对水生生物的影响。

4.2 表型组信息采集与识别

将数字技术与高通量基因测序技术、计算机图像识别技术、生物信息学技术等结合，利用人工智能和机器学习算法，从海量的表型组数据中挖掘出隐藏的规律和模式，实现对水产生物生长特征的自动化识别和分析^[82]。这种基于数字技术的水产表型组信息的深度分析，将为养殖业提供更为精准的生长监测和管理手段，帮助养殖户更好地掌握养殖

群体的遗传特性和生长状况,从而提高水产养殖效益,为水产养殖业的可持续发展提供重要支持。

4.3 生长调节与智能控制

生长调节与智能控制是水产养殖数字技术应用中的一个关键领域^[83-85],其未来发展将深刻改变水产养殖的管理方式和效益。通过传感器、监测设备和无人机等技术采集大量数据,结合人工智能和大数据分析算法,可以实现对养殖环境的精细化监测和管理^[86],从而提高养殖效益,降低养殖成本,减少资源浪费,为养殖业实现可持续发展提供支持。

4.4 健康监控与疾病预测

未来,随着水产养殖规模的扩大和密集度的增加,水产养殖业面临着诸多健康管理和疾病防控方面的挑战,利用数字技术实现对水产健康状况的实时监控和疾病的预测将成为重要研究领域和发展方向。利用水下成像设备、传感器等,捕捉和监测水环境关键指标、水产表观特征、行为活动等方面的信息,通过机器学习、大数据分析、人工智能算法等,构建水产健康监控与疾病预测模型和疾病诊断数据库,及时发现水产健康问题的迹象,对常见疾病进行预测和诊断^[87]。结合物联网技术,实现通过智能手机或电脑终端就能够远程及时采取措施进行干预,避免疾病扩散和最小化不良影响,全面提高水产养殖的健康管理水平和疾病防控效率^[88]。

5 结论与讨论

该文深入探讨了数字技术在水产养殖中的应用进展和未来发展趋势。通过对数字技术在养殖水质监测、水产品质量安全追溯、养殖作业自动化、病害远程诊断以及水产品网络交易等方面的详细分析,可以清晰地看到数字技术在提高水产养殖效率、优化管理模式、保障产品质量和安全等方面的巨大潜力。未来,随着数字技术的不断发展和应用场景的不断拓展,水产养殖数字技术将迎来更加广阔的发展空间。从水环境动态监测到水产生长调节,再到健康监控与疾病预测,数字技术将为水产养殖提供更加智能化、精准化的解决方案,促进水产养殖的可持续发展。

水产养殖数字技术的应用前景广阔,但也面临着包括缺乏统一的技术标准、高昂的投资成本以及人才培养的不足等一系列问题在内的挑战,需要加强政策支持和产业协同,政府、企业、科研机构和社会各界形成合力,共同推动水产养殖数字技术的健康发展,为我国水产养殖产业的转型升级和可持续发展注入新的活力和动力。

参考文献

- [1] 郭海,杨主恩.从数字技术到数字创业:内涵、特征与内在联系.外国经济与管理,2021,43(9):3-23.
- [2] Rowan N J. The role of digital technologies in supporting and improving fishery and aquaculture across the supply chain—Quo Vadis?. *Aquaculture and Fisheries*, 2023, 8(4): 365-374.
- [3] Zhang H, Gui F. The application and research of new digital technology in marine aquaculture. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(2): 401.
- [4] Yue K, Shen Y. An overview of disruptive technologies for aquaculture. *Aquaculture and Fisheries*, 2022, 7(2): 111-120.

2024年2月

- [5] Mustapha U F, Alhassan A W, Jiang D N, et al. Sustainable aquaculture development: A review on the roles of cloud computing, internet of things and artificial intelligence (CIA). *Reviews in Aquaculture*, 2021, 13(4):2076-91.
- [6] 陆岷峰, 徐阳洋. 低碳经济背景下数字技术助力乡村振兴战略的研究. *西南金融*, 2021(7):3-13.
- [7] 罗千峰, 赵奇锋, 张利庠. 数字技术赋能农业高质量发展的理论框架、增效机制与实现路径. *当代经济管理*, 2022, 44(7):49-56.
- [8] 张志新, 李成, 靳玥. 数字技术赋能农业高质量发展——基于现代农业三大体系分析框架. *宏观经济管理*, 2022(3):63-69.
- [9] 杨军鸽, 王琴梅. 数字技术与农业高质量发展——基于数字生产力的视角. *山西财经大学学报*, 2023, 45(4):47-63.
- [10] 李健. 数字技术赋能乡村振兴的内在机理与政策创新. *经济体制改革*, 2022(3):77-83.
- [11] 周瑜. 数字技术驱动公共服务创新的经济机理与变革方向. *当代经济管理*, 2020, 42(2):78-83.
- [12] 谢璐, 韩文龙. 数字技术和数字经济助力城乡融合发展的理论逻辑与实现路径. *农业经济问题*, 2022(11):96-105.
- [13] 夏显力, 陈哲, 张慧利, 等. 农业高质量发展:数字赋能与实现路径. *中国农村经济*, 2019(12):2-15.
- [14] 韩超. 智慧渔业, 来了!. *农民日报*, 2019-07-06(7).
- [15] Mustafa F H, Bagul A H B P, Senoo S, et al. A review of smart fish farming systems. *Journal of Aquaculture Engineering and Fisheries Research*, 2016, 2(4):193-200.
- [16] Prapti D R, Shariff A R M, Che Man H C, et al. Internet of Things (IoT) -based aquaculture: An overview of IoT application on water quality monitoring. *Reviews in Aquaculture*, 2022, 14(2):979-992.
- [17] 于连军, 于蕴吉. 可视农业物联网数字监测系统应用现状及前景分析——以长春市为例. *农业开发与装备*, 2021(10):64-65.
- [18] 何瑜. 数字农业中物联网技术应用分析. *网信军民融合*, 2022(4):39-42.
- [19] 姚文权, 黄子豪. 5G 数字技术对农业物联网的变革与发展研究. *黑龙江粮食*, 2023(5):56-58.
- [20] 徐磊. 物联网在水产养殖中的应用与发展. *农业工程技术*, 2023, 43(32):60-61.
- [21] 杨宇生, 袁永明, 孙英泽. 物联网技术在我国水产养殖上的应用发展对策. *中国工程科学*, 2016, 18(3):57-61.
- [22] 杨琛, 白波, 匡兴红. 基于物联网的水产养殖环境智能监控系统. *渔业现代化*, 2014, 41(1):35-39.
- [23] 高亮亮, 李道亮, 梁勇, 等. 水产养殖监管物联网应用系统建设与管理研究. *山东农业科学*, 2013, 45(8):1-4.
- [24] 高月红, 陈爱华, 吴杨平, 等. 物联网技术在水产养殖中的实际应用. *物联网技术*, 2014, 4(2):72-74.
- [25] 曾宝国, 刘美琴. 基于物联网的水产养殖水质实时监测系统. *计算机系统应用*, 2013, 22(6):53-56.
- [26] 邢俊, 李庆武, 何飞佳, 等. 基于智能视觉物联网的水产养殖监测系统. *应用科技*, 2017, 44(5):46-51.
- [27] 郑元坤, 程卫东, 邓玉全, 等. 基于物联网的水产饲料全流程追溯系统的设计与实现. *中国饲料*, 2019(9):76-79.
- [28] 黄雅玉, 鄂旭, 杨芳, 等. 水产养殖物联网系统集成与安全预警研究. *计算机技术与发展*, 2017, 27(9):201-204.
- [29] 吴卫祖, 刘利群, 徐兵, 等. 基于物联网的水产养殖气象灾害监测与预警模型研究. *电子技术与软件工程*, 2017(5):210-211.
- [30] Tolentino-Zondervan F, Ngoc P T A, Roskam J L. Use cases and future prospects of blockchain applications in global fishery and aquaculture value chains. *Aquaculture*, 2023, 565:739158.
- [31] Garrard R, Fielke S. Blockchain for trustworthy provenances: A case study in the Australian aquaculture industry. *Technology in society*, 2020, 62(1):101298.
- [32] 曾诗钦, 霍如, 黄韬, 等. 区块链技术研究综述:原理、进展与应用. *通信学报*, 2020, 41(1):134-151.
- [33] 蔡晓晴, 邓尧, 张亮, 等. 区块链原理及其核心技术. *计算机学报*, 2021, 44(1):84-131.
- [34] 洪坤明, 刘新亮, 高圣乔. 基于联盟区块链的水产养殖品质量追溯系统的设计与实现. *科学技术与工程*, 2019, 19(35):79-86.
- [35] 罗娟娟. 区块链视角下水产养殖智慧供应链系统构建. *物流科技*, 2023, 46(21):115-117.
- [36] 尤伟伟. 基于区块链的水产交易计量数据自动采集与传输技术研究[硕士论文]. 上海:上海海洋大学, 2021.
- [37] 蔡家轩, 杜宏宇, 蔡晓童, 等. 面向水产农业的大数据技术应用分析与对策. *南方农机*, 2019, 50(13):86-87.
- [38] Rather M A, Agarwal D, Bhat T A, et al. Bioinformatics approaches and big data analytics opportunities in improving fisheries and aquaculture. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 233:123549.
- [39] Hu Z H, Li R Q, Xia X, et al. A method overview in smart aquaculture. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192:1-25.
- [40] Gutiérrez E, Lozano S, Guillén J. Efficiency data analysis in EU aquaculture production. *Aquaculture*. 2020, 4(520):734962.
- [41] Hu W C, Wu H T, Zhan J W, et al. Big data analysis on water quality condition in a white shrimp farming environment.

- Journal of Internet Technology*. 2021, 22(7): 1563-73.
- [42] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [43] 顾生浩, 卢宪菊, 王勇健, 等. 数字孪生系统在农业生产中的应用探讨. 中国农业科技导报, 2021, 23(10): 82-89.
- [44] 徐栋梁, 黄河清. 基于数字孪生的智慧农业生产监控系统设计与应用. 广东通信技术, 2022, 42(5): 64-67.
- [45] 佚名. 西门子数字孪生解决方案助力水下农业发展. 传感器世界, 2022, 28(4): 46.
- [46] 兰玉彬, 王天伟, 陈盛德, 等. 农业人工智能技术: 现代农业科技的翅膀. 华南农业大学学报, 2020, 41(6): 1-13.
- [47] 刘现, 郑回勇, 施能强, 等. 人工智能在农业生产中的应用进展. 福建农业学报, 2013, 28(6): 609-614.
- [48] 刘双印, 黄建德, 黄子涛, 等. 农业人工智能的现状与应用综述. 现代农业装备, 2019, 40(6): 7-13.
- [49] 徐家利. 人工智能在水产养殖中研究应用分析与未来展望. 现代农业研究, 2022, 28(9): 103-105.
- [50] 朱建锡, 郑涛, 费焱, 等. 无线传感器网络在水产养殖中的应用. 时代农机, 2018, 45(7): 186-189.
- [51] 王帅, 杜宇人, 李鹏飞, 等. 基于多源传感器的水产养殖水质监测系统. 农家参谋, 2018(5): 99-100.
- [52] 连梦想, 于淑卿, 薛磊, 等. 水产养殖移动式水下无线视频系统的设计与研发. 物联网技术, 2018, 8(4): 90-92.
- [53] 吕俊霖, 陈利雄, 潘兴蕾, 等. 视频监控系统在水产养殖基地的充分实现. 科学养鱼, 2015(8): 76-77.
- [54] 时正亚, 赵俊, 黄春香, 等. 基于无线远程控制的自动化水产养殖投食设备设计. 河南科技, 2020(22): 13-15.
- [55] 刘光明, 邢克智, 田云臣, 等. 基于云计算的水产集约化养殖信息平台构建. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 248-251.
- [56] 赵海瑞, 徐效伟, 何春健, 等. 基于自动监测技术的水产养殖水质监测系统设计. 江苏农机化, 2023(6): 18-21.
- [57] 谢云波, 朱志强, 徐伟, 等. 水产养殖水质监测及治理现状分析. 渔业致富指南, 2022(11): 11-15.
- [58] 周先威, 陈龙, 翟书豪. 海水养殖水质在线监测大数据共享平台. 农村实用技术, 2021(2): 86-87.
- [59] 张莹, 肖令禄. 基于无线传感器网络的水产养殖水质监测系统设计. 渭南师范学院学报, 2016, 31(19): 49-53.
- [60] 江先亮, 尚子宁, 金光. 基于无人船的水产养殖水质动态监测系统设计与实验. 农业机械学报, 2020, 51(9): 175-185, 174.
- [61] 高峰, 柯可, 杨涛, 等. 水产品质量安全追溯体系的建设及应用——以烟台市为例. 科学养鱼, 2022(9): 82-83.
- [62] 王大为, 崔正国, 曲克明, 等. 循环水养殖绿色水产品全程追溯系统设计与实现. 广东海洋大学学报, 2022, 42(5): 94-101.
- [63] 崔舒云, 程波, 于润林, 等. 区块链技术在水产品质量安全可追溯中的应用设计探索. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(3): 64-69.
- [64] 王少然, 王海陶. 基于“GS1+区块链”的水产品追溯技术研究. 条码与信息系统, 2020(6): 8-13.
- [65] 吴亚梅, 彭朝明. 抓好广东省水产品质量安全管理工作的一点思考. 黑龙江水产, 2019(1): 17-20.
- [66] 于泽, 姜忠爱, 张靖铎, 等. 水产养殖自动投饵机发展现状. 河北渔业, 2020(1): 57-60.
- [67] 景新, 樊树凯, 史颖刚, 等. 室内工厂化水产养殖自动投饲系统设计. 安徽农业科学, 2016, 44(11): 260-263, 300.
- [68] 顾靖峰. 基于物联网技术的集中式自动投饲增氧集成系统装备的开发应用. 农业开发与装备, 2016(3): 57-58.
- [69] 汪进, 沈巧云. 物联网集中式自动投饲增氧一体化技术. 中国高科技, 2022(11): 97-98.
- [70] 葛迅一, 朱虹, 孙黎明, 等. 虾蟹养殖智能投饵(药)无人船设计与研究. 江苏农机化, 2023(5): 4-7.
- [71] 弓飞龙, 李素芳, 张友凡. 一种新型自动排污生态循环养鱼系统——“郑州 168 养殖”模式探讨. 科学养鱼, 2020(8): 16-17.
- [72] 罗国芝, 陈晓庆, 谭洪新. 水产养殖水体循环利用过程中碱度的变化及调控. 淡水渔业, 2018, 48(2): 100-106.
- [73] 杨其云, 张恭生, 周令贵, 等. 梯形升导式自动进箱定置张网设计与捕捞效果. 江西水产科技, 2017(6): 16.
- [74] 杨淞淳, 王志坤. 一种全自动捕鱼船的设计. 河北农机, 2018(1): 51.
- [75] 张锋, 尹纪元. 全国水生动物疾病远程辅助诊断服务网在水产病害防控中的应用. 中国水产, 2019(2): 21-23.
- [76] 佚名. 上海建立“水产病害远程诊断系统”网络. 天津水产, 2005(1): 39.
- [77] 王习达, 刘肖汉. 江苏省渔业智能信息平台建设实践与启示. 现代农业科技, 2015(17): 349-351.
- [78] 叶超, 黄硕琳, 苏含秋. 基于电子商务的水产批发市场流通模式研究. 广东农业科学, 2015, 42(9): 169-173.
- [79] 富芳. 我国鲜活水产品电子商务模式研究[硕士论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- [80] 马金锋, 郑华, 彭福利, 等. 水环境质量预报预警大数据平台研究. 中国环境监测, 2022, 38(1): 230-240.
- [81] 杨健. 渔业生态环境指示生物诊断和预警技术研究进展中国渔业质量与标准, 2015, 5(2): 1-7.
- [82] 潘锐, 熊勤学, 张文英. 数字图像技术及其在作物表型研究中的应用研究进展. 长江大学学报(本科版), 2016, 13(21): 38-41, 46.
- [83] 杜建军, 熊巍, 雷堡乐, 等. 一个水产养殖场 LED 光照工程应用效果分析. 照明工程学报, 2021, 32(1): 37-41.
- [84] 范启亮. 风光互补智能水体增氧系统的设计. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(12): 65-67.
- [85] 朱鸣山. 水产自动投饵机器人在工厂化养殖中的应用. 福建农机, 2018(1): 7-10.
- [86] 毛焯. 基于物联网技术的泰州市水产精细养殖监管系统研究. 农业网络信息, 2016(9): 67-69.

2024年2月

[87] 郭欣硕. 数字渔业装备在水产养殖中的应用及推广分析. 今日畜牧兽医, 2020, 36(12): 58.

[88] 李祥铜. 基于LSTM深度学习的水产养殖水质预测模型研究及系统实现[硕士论文]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2021.

Progress and prospects of the application of digital technology in aquaculture production *

Liang Chen¹, Zhang Hua^{1*}, Zhou Zhigang^{2*}, Chen Nan³, Bao Yuanda¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Feed Research of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Huang Gang Academy of Agricultural Sciences, Huanggang 438000, Hubei, China)

Abstract: [Purpose] The introduction of digital technology provides a new pathway for enhancing production efficiency, optimizing resource utilization and improving management modes. This paper delves into the application progress and future development trends of digital technology in aquaculture, aiming to uncover the crucial role of digital technology in aquaculture and provide scientific basis and strategic guidance for its sustainable development.

[Method] The paper adopted a combined approach of literature review and market survey to systematically analyze the application of digital technology in aquaculture, focusing on areas such as monitoring water quality, ensuring the safety and traceability of aquatic products, automating farming operations, remotely diagnosing diseases and facilitating online trading of aquatic products. [Results] The application of digital technology in aquaculture helded immense potential for improving production efficiency, optimizing management modes and ensuring product quality and safety. However, it also faced numerous challenges, including inadequate infrastructure, high technological barriers and investment costs, and the need to enhance technological reliability and practicality. [Conclusion] The results indicate that in the current context of socio-economic development and population growth, digital technology will be a key driving force for the transformation and upgrading of the aquaculture industry.

Key words: digital technology; aquaculture; progress in application; outlook; artificial intelligence