水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA

试论数字赋能助力水域生态牧场建设

杨红生 江春嬉 张立斌 李富超 许强 任焕萍 林承刚

Digital empowerment promotes the construction of aquatic ecological ranching

关注微信公众号，获得更多资讯信息

YANG Hongsheng JIANG Chunxi ZHANG Libin LI Fuchao XU Qiang REN Huanping LIN Chenggang

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11964/jfc.20230113868

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

中国海洋牧场研究现状与发展
Present situation and future development of marine ranching construction in China
水产学报. 2019, 43(9): 1870 https://doi.org/10.11964/jfc.20190311699

中国现代化海洋牧场建设的战略思考
Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China
水产学报. 2019, 43(4): 1255 https://doi.org/10.11964/jfc.20190211670

大型海藻生境的生态功能及其在海洋牧场应用中的探讨
Ecological function of seaweed-formed habitat and discussion of its application to sea ranching
水产学报. 2019, 43(9): 2004 https://doi.org/10.11964/jfc.20190711873

我国渔业船舶技术法规体系的研究
Study on China's fishing vessel technical regulations system
上海海洋大学学报. 2018, 27(2): 298 https://doi.org/10.12024/jsou.20170902124

蓝色增长背景下的海洋生物生态城市化设想与海洋牧场建设关键技术研究综述
Review of marine livestock ecological urbanization hypothesis and marine ranching construction key-technology against blue growth background
水产学报. 2019, 43(1): 81 https://doi.org/10.11964/jfc.20180211193

海洋牧场景观生态分类研究：以柘林湾海洋牧场为例
Ecological Classification of Marine Ranching Based on Landscape Ecology: A Case Study of Zhelin Bay Marine Ranching
渔业科学进展. 2020, 41(2): 1 https://doi.org/10.19663/j.issn2095-9869.20190129001

水产学报, 2023, 47(4): 049508

水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20230113868

Science Press

杨红生博士，中国科学院海洋研究所研究员，博士生导师。长期从事养殖生态学、海参遗传育种与养殖、海洋牧场建设等研究。系统地揭示了大型藻类、滤食性贝类、棘皮动物的生态功能；培育了刺参东科一号新品种，丰富了海洋牧场构建原理，研制了系列陆基工厂化和浅海增养殖工程设施设备，研发并建立了浅海生态增养殖、典型海湾受损生境和生物资源修复及海洋牧场建设与安全保障技术，相关设施和技术已经在山东、河北等地沿海得以推广应用。发表SCI论文200余篇，授权发明专利40余项，主持制定国家和行业标准各1项，制定地方标准5项，出版专著10部。曾获山东省技术发明奖一等奖1项、山东省科技进步奖一等奖2项、第五届范蠡科学技术奖特等奖。入选“新世纪百千万人才工程”国家级人选、泰山学者特聘专家，农业部海洋牧场建设专家咨询委员会副主任，国家濒危物种科学委员会委员、国务院学位委员会第八届水产学科评议组成员，山东省五一劳动奖章获得者等。兼任中国自然资源学会副理事长等；《海洋科学》主编、《Aquaculture and Fisheries》副主编、《Korean Journal of Malacology》编委等。

试论数字赋能助力水域生态牧场建设

杨红生[1,2,3,4,5,6,7*]， 江春嬉[1,2,3,4,5,6]， 张立斌[1,2,3,4,5,6]， 李富超[3,8]，
许 强[9]， 任焕萍[3,8]， 林承刚[1,2,3,4,5,6]

(1. 中国科学院海洋研究所，海洋生态与环境科学重点实验室，山东 青岛 266071；
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室，海洋生态与环境科学功能实验室，山东 青岛 266237；
3. 中国科学院海洋大科学研究中心，山东 青岛，266071；
4. 中国科学院海洋牧场工程实验室，山东 青岛 266071；
5. 中国科学院大学，北京 100049；
6. 山东省实验海洋生物学重点实验室，山东 青岛 266071；
7. 中国科学院种子创新研究院，武汉 430000；
8. 中国科学院海洋研究所海洋大数据中心，山东 青岛 266071；
9. 海南大学，南海海洋资源利用国家重点实验室，海南 海口 570228)

摘要：水域生态牧场从水域生态学和景观生态学角度出发，高度重视生态系统的整体性和连通性，是拓展渔业空间、推动业态融合发展的重要场景。为了实现我国渔业的健康高质量发展，生态经济和数字经济将共同驱动水域生态牧场的模式创新和产业发展。本文详述了水域生态牧场建设的必要性、发展理念和应对策略，阐述了数字赋能从关键技术、无人装备和智能管理三方面助力水域生态牧场的体系化、数字化建设，提出了四场联动、陆海贯通、牧养互动和业态融合的发展模式，以期为更好地利用数字技术，科学、规范建设水域生态牧场提供参考。

关键词: 水域生态牧场；数字赋能；理论体系；技术体系；装备体系；管理体系；发展模式

中图分类号: S 953 **文献标志码:** A

收稿日期：2023-01-06 **修回日期：**2023-02-07

资助项目：国家重点研发计划 (2021YFB3901304)；科技创新战略研究专项 (ZLY202264)；山东省重点研发计划 (2022RZB07051)；中国科学院网信专项战略研究项目 (CAS-WX2022ZX01-07)

通信作者：杨红生 (照片)，从事养殖生态学、刺参遗传育种与增养殖、海洋牧场建设等研究，
E-mail：hshyang@qdio.ac.cn

版权所有 ©《水产学报》编辑部（CC BY-NC-ND 4.0）
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)
https://www.china-fishery.cn

水域生态牧场是基于生态学原理，充分利用自然生产力，运用现代工程技术和管理模式，通过生境修复和人工增殖，在适宜的海洋及淡水水域构建的兼具环境保护、资源养护和渔业持续产出功能的生态系统[1]。建设水域生态牧场是践行“两山理论”的重要途径，也是应对“双碳目标”的重要抓手。经过百年的发展，水域生态牧场历经农牧化、工程化驱动的 1.0 阶段和生态化、信息化驱动的 2.0 阶段，正在向数字化、体系化驱动的 3.0 阶段迈进[2]，水域生态牧场建设迫在眉睫，数字赋能也将成为牧场建设的重要驱动力。水域生态牧场从水域生态学和景观生态学角度出发，高度重视生态系统的整体性和连通性，从而充分利用湖泊 (水库)、河流、滩涂、海湾、岛礁、深水等各类型水域空间，是实现渔业产业空间拓展、推动业态融合发展，并实现渔业中国式现代化的重要场景。

1 水域生态牧场建设的必要性

1.1 践行大食物观和大农业观的重要途径

水域生态牧场是筑实保障蓝色粮仓的重要抓手。大食物观和大农业观要求面向“大系统”，既包括来自传统农作物和畜禽资源的主食与副食，也包括多元安全高品质的水产品供给[3]。水产品在我国居民膳食结构中的比重不断增加，助推了渔业产出由淡水向海洋全水域的拓展、近海向远海延伸、由海洋向内陆淡水等全水域拓展、加工方式由粗加工向深加工转变。据测算，已建成的海洋牧场年产生直接经济效益 940 亿元，是水产品产出的重要途径[4]。未来，水域生态牧场建设将进一步筑实保障蓝色粮仓，提高农业供给和可持续发展能力，支撑我国由农业大国向农业强国转变。

水域生态牧场是推动渔业绿色转型的关键所在。在充分评估资源环境承载力和有序合理保障水域生态安全的前提下，水域生态牧场将增强绿色优质水产品的生产与供给，构建更加健康、生态的生产观和消费观[1]。牧场将保护水域生态环境，养护渔业资源，大幅提高水域自然产能，推动渔业的绿色转型，促进渔业产业结构调整，让渔民得以“耕水牧渔”，是贯彻践行大食物观和大农业观的重要途径。

1.2 助力实现“双碳”战略目标的重要场景

基于碳汇渔业理论，强化生物的固碳增汇作用。水域生态牧场充分发挥浮游植物、水草、大型藻类、滤食性鱼类和贝类等生物通过光合作用、贝壳钙化和有机碳沉降埋藏的固碳作用，结合陆海统筹减排增汇、缺氧海区生态修复增汇、牧场区上升流增汇效应进行储碳，进而成为微型生物泵-生物碳泵-碳酸盐泵耦合储碳的新出口[5]。据测算，已建成的海洋牧场示范区每年可固碳 56 万 t，消减氮 49 679 万 t、磷 4 966 万 t，为环境保护和固碳增汇做出了贡献[4]。

基于融合发展理念，强化清洁能源的立体开发。水域生态牧场坚持立体生态开发模式，利用光能发电、风能发电、波浪能发电、温差能发电等提供充足的电能，开创“水下清洁水产品，水上清洁新能源”的“双清”战略新局面，促进牧场空间、结构、功能和业态的融合发展，是推动实现“双碳”战略目标的新赛道。

1.3 水域生态牧场建设亟待数字赋能

物联网、大数据、云计算、人工智能、区块链等数字技术引领水产发展战略转型，产业数字化趋势明显。新一代数字技术是助力海洋强国建设的重要抓手和积极探索，也是推进水域生态牧场建设的重要驱动力。水域生态牧场建设中的数字赋能是指以数据化知识和信息为关键生产要素，以数字化技术和装备为核心驱动力，以现代互联网信息平台为重要载体，通过数字技术与牧场建设深度融合，推动牧场构建形式、作业方式、管控模式的数字化转型[6-7]。

“因海制宜”、“因种而异”、“因数而为”是海洋牧场建设的重要途径[2]，其中“因数而为”是信息化、数字化时代的需要，是解决牧场结构、功能与过程的基础研究薄弱、牧场同质化现象严重、牧场产业化程度较低、牧场建设缺乏系统性等诸多问题的关键。将数字技术与生产过程、装备作业、综合管理相互融合，对传统牧场建设进行赋能，及时、准确掌握资源使用状况，有效构建鱼礁、网箱、工船、平台等装备体系，提升牧场管理效率，提高水域生态牧场建设的科学性和精准性，推动牧场建设走向精准高效。

综上所述，水域生态牧场的建设亟待数字赋能，即利用信息化和智能化技术提升牧场生态承载力评估、资源环境监测、生产过程管控、灾害

预警预报等能力；运用北斗精准导航定位与高分辨率遥感集成技术提升牧场精准决策和智能管控水平；通过海量数据的精准判别实现经营决策便捷化、经营体系高效化，保障牧场优质持续发展[8]。

2 水域生态牧场发展策略

2.1 发展理念

以先进理念为指导 建设生态文明, 实质上就是要建设以资源环境承载力为基础、以自然规律为准则、以可持续发展为目标的资源节约型、环境友好型社会[9]。水域生态牧场以新时代中国特色社会主义生态文明思想为指导，以数字化和体系化为目标，以无人/少人装备为基础，以关键技术为突破，以大数据为驱动，以智能管理为核心，构建监测评估-科学选址-规划布局-生境营造-资源养护-安全保障-融合发展的全链条产业技术体系[2]。

以数字技术为驱动 水域生态牧场的建设要求以数字化技术驱动牧场建设各方面的创新与发展过程。具体而言，是指建立“空天地水”一体化环境与资源感知系统，实现多维度水域环境信息感知与自动化获取，通过机器学习和计算机视觉进行资源生物种类识别和生物量估算；建立牧场大数据中心，解决海量数据存储困难、利用率低、数据“孤岛”等问题，汇聚浮标、遥感、模式等多源观测数据，并与资源、生产以及装备信息等数据进行集成融合，形成牧场数据采集、存储、分析和应用的一体化全过程管理；构建高分辨率水域环境参数预测模型，实现水域温度、盐度、溶解氧以及流场等要素的精细化预测，全面掌握牧场环境状态变化，及时发现和解决问题；建立专家决策系统，实现水域环境变化趋势预测、灾害预警预报、生物行为识别追踪和病害诊断预警，为牧场提供生产环境保障和决策支持；建立智能管控平台，实时查阅牧场环境要素的监测数据和预测信息，监控异常报警和灾害预警信息，对作业计划、下达、执行、反馈等全过程进行数字化管理，及时了解现场作业情况，保障过程可追溯，实现水域环境人工智能预测、牧场动物精准喂养、水下渔获精准采捕，从而有效提高牧场的智能管理和信息化水平。

以体系建设为抓手 水域生态牧场不仅要实现建设水域的空间拓展，更亟需突破理论、技术、装备和管理的体系化建设。强化牧场结构、功能和关键过程的机制研究，形成数字化和体系化的理论体系，在牧场选址、布局、构建、评估和运营管理的全过程中，以环境调查和实时监测数据为基础，以先进模型和算法为核心，构建牧场可视化一张图，实现中枢管控，远程监控生产现场，实时监测牧场区的资源环境动态；构建牧场产能动态预测模型，指导牧场精准生产，规范技术和装备的使用条件和应用场景，规范生产管理流程和作业过程，形成科学化的管理模式，最终建立从精准化到标准化的技术体系，从轻简化到无人化的装备体系和从流程化到智能化的管理体系。

2.2 发展策略

建立新范式 水域生态牧场的发展需建立智能感知-智能作业-智能管控的新范式。智能感知，即监测评估做到立体透视，通过“空天地水”多介质的监测设备和多种评估模型，对牧场的环境资源和生物要素状况进行全时空、全过程、多维度监测评估。智能作业，即作业方式走向轻简无人，通过集成模块化技术、水上通信技术、长期续航技术和人工智能技术的无人装备，显著扩大作业范围，提高工作效率，减轻工作人员负担。智能管控，即管理模式实现自主可控，为牧场提供智能化生产决策支持和生产全过程作业管理，指导制定生产计划，下达作业指令，对生产作业进行调度管控，通过机械播苗、自动监测、精准计量、智能采收、系统管理，贯穿牧场生产作业的全周期，形成从流程化到智能化的管理体系。

完善新体系 水域生态牧场的发展需构建理论、技术、装备、管控等新体系。坚持理论体系创新，构建监测评估、规划布局、生境营造、资源养护等理论体系，创新建设理念，拓展建设空间，打造“生态、精准、智能、融合”的水域生态牧场。坚持技术体系创新，依托北斗卫星导航系统精准定位与高分遥感基础服务，提升智能管控与少人化精准协同作业水平。坚持装备体系创新，通过研发水面自主监测无人船，水下巡检机器人与采收机器人等装备，实现监测、管理和采收效率的综合提升[2]。坚持管控体系创新，通过信息化技术、智能化平台、机械化装备，实现播苗-监测-采收-加工-销售的自动化管控，构建产品质量安全全程追溯和管理体系，全面保障牧场的平稳运营[10-11]。

强化多驱动　水域生态牧场建设必须坚持场景驱动、种业牵动、牧养互动、装备推动、强强联动、政策促动等多元驱动[12]。坚持场景驱动，将水域生态牧场看做一个大的“场景”，加强系统认知和立体透视，面向场景需求，阐明运营机制，实现驱动发展；坚持种业牵动，系统普查种质资源，突破关键物种资源修复技术，研究种质保存原理，筛选培育优质苗种；坚持牧养互动，以水域生态牧场作为大生态系统，以点状分布的养殖设施作为平台载体，使水上智能网箱和水下生态牧场相结合，兼顾环境保护、资源养护和渔业持续产出；坚持装备推动，研发轻简化、无人化装备，实现机械化播苗、自动化监测、精准化计量与智能化采收；坚持强强联动，政府做好规划指导，企业加强自主创新，学科激发人才活力，科技研发产出成果，金融配套强化保障，成果转化增加效益。坚持政策促动，积极响应国家海洋发展战略和区域协调发展战略需求，加强产业政策扶持力度，促进牧场建设。

3　水域生态牧场发展途径

3.1　从精准化到标准化的技术体系

监测与评价技术体系　生态承载力评估技术。Ecopath with Ecosim 模型是生物承载力及相关生物可持续产出能力评估的有力工具，其中 Ecopath 模型是当前评估牧场生态承载力的主流方法[13]。环境监测评价技术。重点突破多元化环境监测评价技术，实现水环境和气象数据的多维度自动监测、无线传输及多终端访问，实现环境及生态要素的“实时监测+可视化”。生物要素监测评价技术。集成应用水下视频等光学成像监测技术，实现鱼类、甲壳动物、软体动物和棘皮动物的精准识别，直观获取生物资源变动的实时资料；综合利用成像声呐、回声探测和多频声学等技术开展水生物资源调查，对水下生境进行规模化成像[13]。综合效益评价技术。加快提升生物遥测技术和水下定位系统，实现对多种生物的快速标记和精准遥测，有效提升回捕率计算及牧场生产效益评价的准确性；构建适用于牧场综合效益评估的指标体系和模型，实现牧场生产效益和生态效益的可靠评估[14]。

选址与布局技术体系　选址调查技术。集成应用侧扫声呐技术、水下三维激光扫描技术、水域声光综合探测等技术，对牧场区域流场、水下地形地貌、渔业资源情况进行探测调查；创新开发优化层次结构模型等新型选址技术，结合历史资料分析法与站位调查法，对调查结果进行系统化分析评估，智能选择最佳构建区域[15]。规划布局技术。全面提升牧场布局设计、环境适应性评价、生态环境营造、资源评估和清洁能源保障等技术，精准评估牧场建设区的初始环境和生物承载力状况，优化牧场建设与相关产业融合发展布局，推动环境保护、资源养护和新能源开发的融合发展[10]。信息化平台布设技术。重点突破环境-资源监测网络布设与综合预警预报技术，为智能监管和信息化运营奠定基础，保障牧场的资源安全和持续利用。

修复与养护技术体系　生境保护与修复技术。加快攻克生态承载力提升技术，优化食物网结构，丰富生物资源营养级结构，提升水域的生物承载力，根据水域特点科学保护生物栖息地，做到“先场后牧”，实现水域生态环境的保护和持续利用[11]。创新研发关键物种规模化扩繁和机械辅助移栽/播种技术，辅以生境构建的适宜性评价和生境改造技术，快速构建功能群[16]。生物资源养护技术。重点突破生物行为控制技术、增殖潜力评估技术、多物种生态混养技术，构建最适采捕量评估模型，建立牧场渔业资源信息的实时监测网络，采用多元模型预测评估牧场安全与经济生物资源产出，制定科学合理的采捕策略，促进关键苗种扩繁，保障重要增养殖经济物种的资源养护和优质安全生产[17]。

信息与管理技术体系　资源生物精细化管理技术。全面提升智能管控信息系统，结合牧场生物资源量监测评估、生长状态智能监测与精准养殖、饵料智能投喂、物联网和检测控制等技术，实现定点投苗、智能投饵及无人化远程控制[18]。经济物种监测巡检与智能采捕技术。综合完善牧场数据云服务平台，系统整合牧场生物产出量及智能精准加工技术，结合水上无人船、水下巡检机器人及采收机器人等装备，实现基于生产力、承载力的精确估算，确定最适采捕策略。预警预报与应急管控技术。集成应用地理信息系统技术、精准北斗定位技术、气象及渔情多源信息集成智能管理技术，结合高光谱、高时空分辨率遥感技术，实现牧场环境的预报减灾及系统信息的综合管理[19]。

3.2 从轻简化到无人化的装备体系

环境监测装备体系　实时在线监测系统。创新开发由水质信息采集节点、数据中转节点和数据处理中心节点构成的水质环境监测系统，结合近岸浅水浮标、海床基等新型监测设备，实现牧场环境在线实时监测[20]。走航连续性监测系统。全面提升无人测量船平台和卫星导航定位系统，搭载多波束测深装备、侧扫声呐探测装备，实现牧场环境走航连续调查[21]。自动巡航监测系统。综合利用无人机、无人艇、水下滑翔机等新兴设备，结合数据的云存储和信息处理平台，实现牧场环境自动巡航监测[13]；多维监测集成系统。集成应用浮标原位实时监测装备、动态监测无人船及无线传输系统，形成完整的牧场信息监测网络。

资源探测装备体系　水域生物资源探测系统。综合应用水下三维激光系统、光学摄像照相系统等图像识别和信息处理装备，提供牧场水下目标物的基础信息[15]；综合应用单波束声呐、多波束声呐和鱼探仪等多种声学设备，对牧场的渔业资源种类、分布和增殖情况进行定期探测评估；借助缆控水下潜器和自主水下潜器等可移动式探测平台，实现牧场生物多样性、优势物种及牧场健康程度评估。水域动力环境探测系统。重点利用水域动力环境探测卫星提供的多要素动力环境信息，借助搭载声学多普勒流速剖面仪、多波束及浅剖装备的无人船等，实现牧场潮汐能、波浪能、海流能等动力资源的大范围环境探测[15]。

牧场构建装备体系　人工鱼礁装备。基于水域环境和牧场发展定位可因地制宜投放渔获型、保护型、培育型、诱导型和增殖型人工鱼礁，为水生生物提供生长、繁殖、索饵和庇护的场所。深远海智能化网箱装备。“深蓝 1 号”、“经海 1 号”等大型深远海智能网箱搭载全覆盖式深远海养殖所需装备，推动标准化、集约化、规模化、智能化深远海养殖，在减少养殖污染的前提下，显著提高养殖资源产出效益。大型智能化养殖工船。十万吨级大型养殖工船“国信 1 号”能实现深层测温、智能取水与交换、饲料仓储与自动投喂、舱养水质环境监控以及鱼类行为监测等功能[18]。自升式多功能牧场平台。利用风能、太阳能等绿色能源进行供电的自升式多功能牧场平台，具备水质、水文、气象监测、海上值守瞭望等功能，还可为休闲垂钓、海上观光提供舒适安全的场所，延长休闲渔业产业链。渔业配套船舶装备。活鱼运输船、饲料运输船等作为牧场的辅助配套装备，可为深远海牧养互动提供全面保障，有效拓展绿色生产空间。

信息管理装备体系　立体监测和数字化管理平台。全面提升指挥监测系统、能源系统和作业系统的协同能力，利用通信系统与岸基中心进行信息反馈和指令接收，对牧场生态系统环境要素和生物状况进行实时监测，实现网箱无人作业和远程操控。大数据分析和专家决策系统。系统整合牧场水文、气象、水质、资源等相关数据，对牧场环境面临的风险因素、级别和风险区域位置进行精准评估和预报，运用机器学习等方法对生物生长状态进行诊断和预警，保障牧场生产运营安全。

业态融合装备体系　渔能融合装备。将海上风机装备与监测平台、智能化网箱、水面筏架、水下礁体等有机结合，实现海洋牧场与海上风电融合发展；利用波浪能发电平台、海上波浪能供电浮标等装备，实现海上波浪能与牧场互动的立体化开发；利用桩基式、漂浮式的海上光伏装备，实现海上光能与资源增殖的综合利用。渔旅融合装备。以滨海沙滩、海钓基地、渔家乐园、渔俗新村、海上民宿等休闲平台为载体，完善游钓型快艇、海上观光游艇、水上运动装备、半潜船、水下观光潜器、潜水安全保障装备等设施，构建集“休闲观光、竞技垂钓、水下探险、餐饮娱乐、科普教育”等功能于一体的生态体验型水域生态牧场。

3.3 从流程化到智能化的管理体系

流程化管理体系　苗种投入与生产监测管理体系，利用机械化设备大范围精准投放苗种，建立牧场环境因子和渔业资源信息实时监测网络，确保牧场可视、可测、可控、可预警，实现机械化播苗和自动化监测。牧场资源探测与采收管理体系，发展浑浊水体机器人自主采收“手眼协同”智能控制设备，依托北斗精准导航定位，结合自主监测水面无人船、水下巡检机器人与无人采收机器人等装备，实现智能化采收和系统化管理[2]。保鲜贮藏、物流和加工管理体系，应用新型生物保鲜技术，推动物流公司和精深加工企业建立稳定的合作关系，做到保鲜加工、快速送达。在整个生产过程当中，加强水上看护，利用水上平台、水上巡逻和远程监控等手段，实时精准监控管理，

确保牧场的安全平稳运行。

智能化管控体系　生境与资源信息评估系统，可实现牧场生境特征和本底资源的智能化调查；生态同步实时监控与警报系统，可实现牧场资源生物和生态状况的智能化监控；生产过程和资源管理系统，可实现牧场生产过程的智能化管理和生产效益的智能化评估；产品生产加工销售与安全信息系统，可实现供应链上下游信息的实时共享和高效协同。智能化管控体系使价值链各环节的运营更加高效敏捷，减少协调成本，优化内外部资源的整体配置和管理，为生态系统和产业链创造更多的价值，实现牧场产品从生产走向市场的智能化管控。

4　水域生态牧场的发展模式

4.1　基于场景驱动的四场联动布局模式

水域生态牧场要求兼顾不同场景，通过四场联动逐步拓展产业空间。四场联动模式是指通过淡水生态牧场、滩涂生态牧场、浅海生态牧场和深远海智慧渔场的四场联动，构建智慧养殖、智能捕捞和绿色加工等新生产体系。在淡水以水域生态系统的保护、养护与修复为重点，在滩涂以生境修复、苗种培育、增殖放流为突破，在浅海以引领现代化海洋牧场发展为主线，在深远海以提高装备养殖、精准捕捞和一体化加工能力为抓手。强化水域生态牧场的空间布局优化，除深远海智慧渔场投饵外，其他三场尽可能做到“不投饵”、“不施肥”、“不用药”，通过生态系统的连通性，实现物质和能量的充分利用，推动渔业产业迈上新台阶。

4.2　基于种业牵引的陆海贯通发展模式

水域生态牧场要求陆海链条贯通统筹发展，通过陆海接力逐步实现牧养互动的一体化。陆海接力模式将陆基工厂化循环水养殖和海上深水网箱、大型生态围网和智能化养殖工船相结合，充分发挥陆海的区位优势。陆上建设种业基地，生产优质饵料，加强苗种免疫，防控生物病害；海上提供自然生境，优化区域环境，拓展产业空间。强化陆上种业创新的重要性，加快完善苗种“保、育、测、繁、推”的一体化建设，推动良种开发、苗种培育、生境优化、生态增养殖和终端销售的创新结合，集成装备化、信息化的先进管理技术，实现产业链条的整体优化。

4.3　基于三生一体的点面结合牧养互动模式

水域生态牧场要求以点带面、点面结合促进牧场建设，牧养互动模式亟待研究和实践。在水面设置智能网箱，提升牧场水面空间的综合利用能力，作为实现工业化生态养殖和智能化实时监测的核心枢纽和关键载体；在水下构建生态牧场，利用天然饵料，减少人工投饵投药造成的水质污染。坚持“生态、生产、生活”三位一体，强化牧场的产业转型升级，从“粗放式”到“精细化”再到“生态化”发展，合理利用各类资源，形成多层次、多结构、多功能的动态平衡系统，实现环境保护和渔业产出的多赢。

4.4　基于生态系统的立体集群业态融合模式

实现空间融合，实施水上水下立体化开发，综合利用水面光能、风能、波浪能和潮汐能与水下生物资源，实现海上风机、监测平台、智能网箱、人工鱼礁和养殖筏架的综合利用；实施陆水一体化开发，充分挖掘陆上的研发、加工、运输和销售潜力以及水域的修复、保护、养护和生产潜力，实现水陆空间融合发展。实现结构融合，加强牧场构建设施与海上风电、光伏发电、波浪能发电等设施的有机结合，实现结构和谐与多用。实现功能融合，通过牧场与能源融合发展，提供优质蛋白和清洁能源，推动新旧动能转换；通过牧场与装备制造及加工运输融合发展，充分拉动上下游产业和周边区域产业，刺激经济增长，促进产业互动和体系化建设；通过牧场与休闲渔业及生态旅游融合发展，充实渔业发展内涵和空间，促进生态环境的修复保护，实现观光、游览、垂钓、科普和研学等多重功能。实现业态融合，在水域生态牧场提供的生态场景下，保障充足的能源供给，推动一二三产优化重组、交叉互渗，形成水上城市综合体，构建业态融合运营模式；加强文化创新与建设，在系统传承中国传统文化 (特别是渔文化) 的同时，在结构、物化、精神等层面，积极开展文化创新和实践，让水域生态牧场成为“人鱼同乐”家园。

5　结语

水域生态牧场是海洋牧场发展的内涵和空间拓展，是我国渔业发展的新模式和业态发展新途径。在水域生态牧场的建设当中融入数字赋能，将发挥数据作为新型生产要素的价值，形成智能

感知-智能作业-智能管控的新范式，创新从数字化到体系化的理论体系，创建从标准化到精准化的技术体系，构建从轻简化到无人化的装备体系，形成从流程化到智能化的管理体系。四场联动、陆海贯通、牧养互动和业态融合作为水域生态牧场的发展模式，兼顾不同场景，发挥种业牵引，实现点面结合，推动空间、结构、功能、业态融合发展。要切实根据自身发展情况、资源禀赋等条件，合理选择发展模式，构建良性发展的技术、装备和管理体系，实现水域生态牧场的可持续发展，为渔业的中国式现代化发展提供成功范例。

（作者声明本文无实际或潜在的利益冲突）

参考文献 (References):

[1] 杨红生, 霍达, 茹小尚, 等. 水域生态牧场发展理念与对策[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 133-137.
Yang H S, Huo D, Ru X S, *et al*. New conception and development strategies for aquatic ecological ranching[J]. Science and Technology for Development, 2020, 16(2): 133-137 (in Chinese).

[2] 杨红生, 丁德文. 海洋牧场3.0: 历程、现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(6): 832-839.
Yang H S, Ding D W. Marine ranching version 3.0: history, status and prospects[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(6): 832-839 (in Chinese).

[3] 陈利根. 坚持以大食物观统筹保障粮食安全[J]. 群众, 2022(9): 26-27.
Chen L G. Adhere to the big food concept to ensure food security in an integrated manner[J]. Masses, 2022(9): 26-27 (in Chinese).

[4] 李加林, 沈满洪, 马仁锋, 等. 海洋生态文明建设背景下的海洋资源经济与海洋战略[J]. 自然资源学报, 2022, 37(4): 829-849.
Li J L, Shen M H, Ma R F, *et al*. Marine resource economy and strategy under the background of marine ecological civilization construction[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(4): 829-849 (in Chinese).

[5] 焦念志, 戴民汉, 翦知湣, 等. 海洋储碳机制及相关生物地球化学过程研究策略[J]. 科学通报, 2022, 67(15): 1600-1606.
Jiao N Z, Dai M H, Jian Z M, *et al*. Research strategies for ocean carbon storage mechanisms and effects[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(15): 1600-1606 (in Chinese).

[6] 秦秋霞, 郭红东, 曾亿武. 乡村振兴中的数字赋能及实现途径[J]. 江苏大学学报(社会科学版), 2021, 23(5): 22-33.
Qin Q X, Guo H D, Zeng Y W. The mechanism and countermeasures of digital empowerment to promote rural revitalization[J]. Journal of Jiangsu University (Social Science Edition), 2021, 23(5): 22-33 (in Chinese).

[7] 陈海贝, 卓翔芝. 数字赋能研究综述[J]. 图书馆论坛, 2019, 39(6): 53-60,132.
Chen H B, Zhuo X Z. A survey of digital empowerment[J]. Library Tribune, 2019, 39(6): 53-60,132 (in Chinese).

[8] 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[J]. 中国农村经济, 2019(12): 2-15.
Xia X L, Chen Z, Zhang H L, *et al*. Agricultural high-quality development: Digital empowerment and implementation path[J]. Chinese Rural Economy, 2019(12): 2-15 (in Chinese).

[9] 高子舒. 生态文明建设背景下农村生态环境建设的意义、问题与对策研究[J]. 农业经济, 2019(7): 33-34.
Gao Z S. Study on the significance, problems and countermeasures of rural ecological environment construction in the context of ecological civilization construction [J]. Agricultural Economy, 2019(7): 33-34 (in Chinese).

[10] 杨红生, 杨心愿, 林承刚, 等. 着力实现海洋牧场建设的理念、装备、技术、管理现代化[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(7): 732-738.
Yang H S, Yang X Y, Lin C G, *et al*. Strive to realize modernization of concept, equipment, technology, and management of modern marine ranching development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2018, 33(7): 732-738 (in Chinese).

[11] 杨红生, 章守宇, 张秀梅, 等. 中国现代化海洋牧场建设的战略思考[J]. 水产学报, 2019, 43(4): 1255-1262.
Yang H S, Zhang S Y, Zhang X M, *et al*. Strategic thinking on the construction of modern marine ranching in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(4): 1255-1262 (in Chinese).

[12] 袁秀堂, 于正林, 王清, 等. 试论黄河三角洲生态农牧

化高质量发展的策略与途径[J]. 水产学报, 2022, 46(4): 626-635.
Yuan X T, Yu Z L, Wang Q, *et al*. On the strategies and approaches of high-quality development of coastal ecological farm and ranch in the Yellow River Delta[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(4): 626-635 (in Chinese).

[13] 刘辉, 奉杰, 赵建民. 海洋牧场生态系统监测评估研究进展与展望[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 213-218.
Liu H, Feng J, Zhao J M. Research process and perspective on the monitoring and evaluation of marine ranch ecosystem[J]. Science and Technology for Development, 2020, 16(2): 213-218 (in Chinese).

[14] 岳奇, 鄂俊, 杜新远, 等. 我国北方典型海洋牧场综合效率评估初探[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 142-149.
Yue Q, E J, Du X Y, *et al*. Preliminary study on comprehensive efficiency evaluation of typical marine ranch in north China[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 142-149 (in Chinese).

[15] 马龙, 马治忠, 曾现敏, 等. 基于海洋声光综合探测技术的海洋牧场应用研究探讨[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(6): 89-98.
Ma L, Ma Z Z, Zeng X M, *et al*. Applied research on marine ranch based on ocean acousto-optic comprehensive detection technology[J]. Journal of Ocean Technology, 2020, 39(6): 89-98 (in Chinese).

[16] 周毅, 徐少春, 张晓梅, 等. 海洋牧场海草床生境构建技术[J]. 科技促进发展, 2020, 16(2): 200-205.
Zhou Y, Xu S C, Zhang X M, *et al*. Construction technology of seagrass bed habitats in marine ranching[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(2): 200-205 (in Chinese).

[17] 丁德文, 索安宁. 现代海洋牧场建设的人工生态系统理论思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(9): 1335-1346.
Ding D W, Suo A N. Theoretical thinking of artificial ecosystem for modern marine ranching[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(9): 1335-1346 (in Chinese).

[18] 吴有生, 司马灿, 朱忠, 等. 海洋装备技术的重点发展方向[J]. 前瞻科技, 2022, 1(2): 20-35.
Wu Y S, Si M C, Zhu Z, *et al*. Key development directions of marine science and technology[J]. Science & Technology Foresight, 2022, 1(2): 20-35 (in Chinese).

[19] 吴祖立, 张胜茂, 戴阳, 等. 空间信息技术在海洋牧场中的应用研究进展[J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 753-762.
Wu Z L, Zhang S M, Dai Y, *et al*. Application and research progress of spatial information technologies in marine ranching[J]. Marine Fisheries, 2019, 41(6): 753-762 (in Chinese).

[20] 曾兆铭, 王启铭, 吴胜, 等. 海洋生态牧场水质环境监测系统设计[J]. 智慧农业导刊, 2021, 1(21): 7-9,13.
Zeng Z M, Wang Q M, Wu S, *et al*. Design of water quality and environmental monitoring system for marine ecological pastures[J]. Journal of Smart Agriculture, 2021, 1(21): 7-9,13 (in Chinese).

[21] 赵晓龙, 夏涛, 张秋艳. 基于无人测量船的人工鱼礁投放空方量测量与评估[J]. 海岸工程, 2020, 39(3): 196-203.
Zhao X L, Xia T, Zhang Q Y. Surveying and evaluation of earthwork volume of artificial reefs using unmanned surface vehicle[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(3): 196-203 (in Chinese).

Digital empowerment promotes the construction of aquatic ecological ranching

YANG Hongsheng [1,2,3,4,5,6,7*], JIANG Chunxi [1,2,3,4,5,6], ZHANG Libin [1,2,3,4,5,6], LI Fuchao [3,8], XU Qiang [9], REN Huanping [3,8], LIN Chenggang [1,2,3,4,5,6]

(1. *CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences*, *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*;
2. *Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science*, *Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology*, *Qingdao* 266237, *China*;
3. *Center for Ocean Mega-Science*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*;
4. *CAS Engineering Laboratory for Marine Ranching*, *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*;
5. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
6. *Shandong Province Key Laboratory of Experimental Marine Biology*, *Qingdao* 266071, *China*;
7. *The Innovation of Seed Design*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan* 430000, *China*;
8. *Oceanographic Data Center*, *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*;
9. *State Key Laboratory of Marine Resources Utilization in South China Sea*, *Hainan University*, *Haikou* 570228, *China*)

Abstract: After a century of development, marine ranching through the 1.0 stage driven by agro-pastoralism and engineering, the 2.0 stage driven by ecology and information technology, and is moving towards the 3.0 stage driven by digitalization and systematization. From the perspective of aquatic ecology and landscape ecology, aquatic ecological ranching attaches great importance to the connectivity and integrity of ecosystem, which is an essential scene for expanding fishery space and promoting integrated development. In order to achieve healthy and high-quality development of fisheries, ecological and digital economies should jointly promote the model innovation and industrial development of aquatic ecological ranching. This paper reviews the necessity, development concept and response strategy of the construction of aquatic ecological ranching, and demonstrates how digital empowerment promotes the systematic and digital construction of aquatic ecological ranching from three aspects: key technologies, unmanned equipment and intelligent management. In terms of key technologies, we will establish a precise technical system and take a transition to a standardized technical system in all aspects of monitoring and evaluation, site selection and layout, restoration and maintenance, and information management. In terms of unmanned equipment, we will establish a light and simplified equipment system and take a transition to an unmanned technology system, including environmental monitoring equipment, resource detection equipment, ranch construction equipment, information management equipment, industry integration equipment. In terms of intelligent management, we will establish a full-cycle process-oriented management system and take a transition to a full-chain intelligent management system. We also propose the development model of four linked fields, land and sea relay, grazing and breeding interaction, and industry integration, so as to provide a reference for better use of digital technology to build aquatic ecological ranching in a scientific and standardized way.

Key words: aquatic ecological ranching; digital empowerment; theoretical system; technical system; equipment system; management system; development pattern

Corresponding author: YANG Hongsheng. E-mail: hshyang@qdio.ac.cn

Funding projects: National Key R & D Program of China (2021YFB3901304); Special Program for Research of Science and Technology Innovation Strategy (ZLY202264); Key R&D Project of Shandong Province (2022RZB07051); Special Program for Research of the Network Information of the Chinese Academy of Sciences (CAS-WX2022ZX01-07)