

水产养殖水质检测与控制技术研究进展分析

尹宝全¹ 曹闪闪² 傅泽田^{3,4} 白雪冰²

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 4. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083)

摘要: 水质的实时监测和调控是水产养殖过程中的关键环节,是保证水产品品质的重要措施。本文在总结和整理现有国内外研究成果的基础上,结合国内水产养殖多为池塘、网箱等封闭水质环境的特点,对水产养殖水质监测与控制系统的典型架构、水质重要参数的检测技术、水质监测与控制系统的通信技术和智能控制技术进行了分析和讨论。提出了未来技术发展方向:实时在线的水质监测和传感技术将成为研究的重点方向;水质参数的预测仍将是水质监测技术的重点研究方向,其中非线性预测模型是水质预测模型构建的主流方法;结合数据融合技术的多参数传感器正成为研究热点;低功耗广域网将成为水产养殖水质监控系统主流的远程通信技术。

关键词: 水产养殖; 水质; 预测; 监测

中图分类号: S959 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0001-13

Review and Trend Analysis of Water Quality Monitoring and Control Technology in Aquaculture

YIN Baoquan¹ CAO Shanshan² FU Zetian^{3,4} BAI Xuebing²

(1. Yantai Academy, China Agricultural University, Yantai 264670, China
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
4. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China)

Abstract: The real-time monitoring and control is an essential part of aquaculture, which is one of the important measures to ensure quality safety of aquatic products. After summarizing and collating the existing domestic and foreign research literature, according to the characteristic that domestic aquaculture is mostly in the closed water quality environment, such as ponds and cages, the typical structure of aquaculture water quality monitoring system, the monitoring technology of water quality, the communication technology and intelligent control technology of water quality monitoring system were summarized and compared. The results showed that the real-time online water quality monitoring and sensing technology would be the focus of research. The research of multi-parameter sensor technology based on data fusion would become a research hotspot. The prediction of water quality parameters remained the focus of water quality monitoring research, and nonlinear modeling was the main method for water quality prediction modeling. The low power wan (LPWAN) would soon become the mainstream remote communication mode in aquaculture water quality monitoring system.

Key words: aquaculture; water quality; prediction; monitoring

0 引言

中国是世界上最大的水产品消费国和生产国,中国和其他地区对水产品的需求为全球渔业和水产

养殖业的发展提供了机遇。水产养殖是指在人为控制条件下养殖鱼类、虾蟹类、贝类、软体动物、藻类等水产品。按生产程度不同可分为粗放型、半集约型和集约型3种模式^[1]。过去30年,全球水产养殖产

收稿日期: 2018-12-11 修回日期: 2018-12-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0111200)和“十二五”农村领域国家科技计划项目(2015BAD17B04-5)
作者简介: 尹宝全(1972—),男,讲师,博士,主要从事农业信息化研究,E-mail: yinbaoquan@cau.edu.cn
通信作者: 傅泽田(1956—),男,教授,博士,主要从事农业信息化研究,E-mail: fzt@cau.edu.cn

量以年均8%的速度快速增长^[2],到2030年全球的水产品将有近2/3来自水产养殖^[3-4]。在水产养殖过程中,养殖水环境为淡水或海洋生物提供了食物、生存环境和氧气。由于人类活动、环境污染、农业生产等原因,可能导致养殖水域的温度、溶解氧含量、酸碱度等指标发生变化,进而影响水生生物的生长。因此,对水质参数进行实时监测和调控是水产养殖过程中的重要环节,是决定水产品品质的重要措施。

本文在分析国外先进水产养殖技术的基础上,结合国内水产养殖多为池塘、网箱等封闭水质环境的特点,从水质控制系统构架角度,分别对现有的水产养殖领域水质传统检测方法、无线通讯技术、水质重要参数的预测建模方法和智能控制技术加以综述分析,并对水质监测与控制技术的发展趋势进行展望。

1 发达国家水产养殖模式及技术现状

根据养殖水域的不同可分为淡水养殖、海水养殖和深远海海水养殖。淡水养殖通常利用池塘、水库、江河、湖泊等,养殖鱼类、虾类、蟹类、贝类、莲、藕等。海水养殖是利用浅海、滩涂、港湾等海域养殖海洋经济动植物的生产方式^[5]。

在海水养殖方面,发达国家的水产养殖以开放环境的海水养殖为主,以北欧的挪威、丹麦等国为代表,其水产养殖技术具有很高的自动化程度。由于受外部水域环境恶化和内部水质劣化的影响,陆基或近浅海养殖的发展空间受到挤压,发展离岸深远海海水养殖成为水产养殖的新方向和趋势。

深海养殖是指在远离大陆、水深20 m以下的海域开展的养殖方式^[6]。2005年美国国会通过了国家深水养殖法令(National offshore aquaculture act of 2005),成为世界上第一个为深水海域进行海水养殖立法的国家。目前深远海海水养殖已在挪威、日本、美国、加拿大等国家得到成功实施^[7-8]。挪威在全球深海养殖领域内处于领先地位,具备较强的深海养殖装备设计能力,其大型深水网箱养殖业几乎垄断了深水网箱式养殖平台的设计技术及运营市场。在配套设施上,挪威大型深水网箱已形成自动投饵系统、鱼苗自动计数设备、水下监控系统、自动分级收鱼和自动收集死鱼设备等为一体的智能管理系统^[9]。

在淡水养殖方面,日本、美国、欧盟等国家或地区科技比较发达,对水环境保护方面要求较高,有较为完善的环境评估体系和养殖废水排放标准,这些国家普遍发展集约化养殖,操作机械化程度很高,从饲料投喂、养殖模式、水质调控、养殖工程和设施以及水处理技术都具有较高的水平^[10]。目前,德国有70多座工厂化水产养殖系统;在丹麦有5 000多家

循环水养殖场,平均每1 000人左右就拥有一家循环水养殖场;西班牙和葡萄牙的养殖量有70%采用工厂化循环水模式;荷兰的工厂化模式养殖尖齿胡鲶鱼,养殖密度可达 300 kg/m^3 ^[11]。以色列集约化养殖系统均配有自动化供饵系统、自动化疫苗注射机、鱼类起捕和分选设备等^[12]。

在养殖水质检测方法方面,经历从经验法、化学法、仪器法3个阶段。经验法是指养殖人员根据经验,人为判断水质的各项指标,如鱼类集中在水面,可能是水中溶解氧偏低;鱼类摄食减少,可能是pH值偏高或偏低,或氨氮超标等。该类方法判断的结果只是一个粗略估计,作为一种水质检测方法已被淘汰。传统化学法是指利用化学方法对水质各参数进行检测。该类方法是目前最为成熟的分析方法,具备精度高、可靠性好、敏感度高、可重复等优点,能够定性、定量的分析水环境。但缺点也较为明显,其检测周期长、成本高、操作复杂,且其自动化程度低,难以满足现代水质检测技术的要求。仪器法是指利用水质检测企业所研制的相关仪器或设备进行检测。该类仪器多为便携式,操作简单,可实现快速检测。

在养殖水质监测仪器研发方面,国外公司起步较早,目前水质检测的主流产品向便携式、多参数可同时测量方向发展。其中代表性公司有美国的YSI公司、HACH公司、In-Situ公司;德国的WTW公司;意大利的HANNA公司;日本的岛津公司等。美国YSI公司以溶解氧检测研究为主,其溶解氧测量仪分辨率为 0.01 mg/L ,测量精度可达 $\pm 0.03\text{ mg/L}$;YSI proplus多参数水质分析仪可同时检测溶解氧含量、水温、电导率、酸碱度、盐度、总溶解固体含量、氧化还原电位、氨氮含量、氯化物含量等多项水质指标。HACH公司成立于1947年,致力于水质分析领域的研究,旗下拥有多个品牌,如:GLI、American Sigma、Hydrolab、OTT、Radiometer、Lachat、Polymetron、Orbisphere、ELE等。同时针对中国市场研发了一系列水质分析仪,如CODmax铬法COD分析仪、DR1010 COD测定仪和1900C便携式浊度仪等。德国的WTW公司成立于1945年,主要生产环保分析仪器和水质在线监测仪器。WTW水质检测产品非常齐全,Multi 3430 IDS三通道数字参数计,可接3支相同或不同的探头,同时测试3个参数。瑞士ABB公司生产的水质分析仪可以实现多个参数同时测量,测量时间短且输出稳定,适合于水域复杂,或水质参数变化较快的场合。相对于国外水质检测设备,国内的水质检测设备在测量范围、精度和稳定性等方面尚存在一定的差距。

虽然国内水产养殖目前仍以池塘、网箱等封闭水质环境为主,但海水网箱养殖向深远海方向发展

是国内外海水养殖的共同趋势。2018 年 5 月由中国海洋大学与湖北海洋工程装备研究院联合设计,青岛武船重工有限公司建造的“深蓝 1 号”全潜式大型网箱已成功应用于离岸 130 海里的黄海海域。深远海水产养殖的发展对养殖设备的智能化提出更高的要求,因此自动化、智能化以及在线监测等特点将是水质检测设备未来发展的方向。

2 水产养殖水质监测系统典型结构

目前在水产养殖水质监控与控制系统方面已开展了许多研究^[13-18],并在水产养殖领域得到了广泛应用。典型的水质控制系统通常采用农业物联网的 4 层架构体系^[19],即感知层、传输层、处理层和应用层。

感知层是水产养殖水质监控系统的基础,它利用溶解氧含量、水温、pH 值等水质传感器及摄像头等感知设备实现对现场水质参数和环境信息的采集。

传输层是指借助于现有的通信技术与感知层技术相融合,把感知层获取的数据快速、安全、可靠地远距离传送到控制中心^[20]。农业物联网的数据传输包括有线和无线两种方式。有线方式是指传感器节点与控制系统之间采用现场总线的方式进行连接,农业物联网中常用的现场总线技术有 CAN 总线和 RS485 总线。无线方式是指现场传感器采用无线传感网络(Wireless sensor network, WSN)的方式组网。与有线方式相比,无线方式具有移动性、分散性、易于部署等特点,在水产养殖水质监控系统中应用更为广泛。因此,基于 WSN 的系统架构是目前水产养殖水质监控系统的典型架构(图 1)。

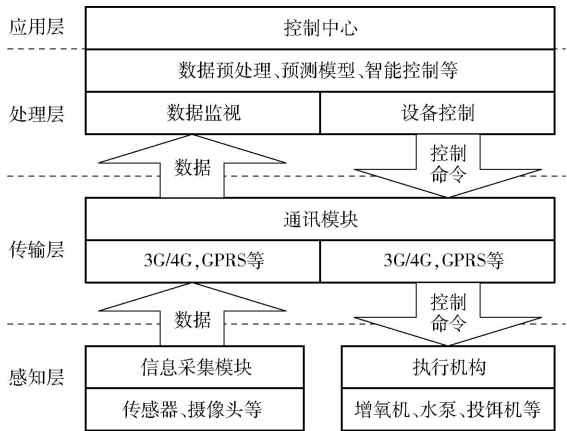


图 1 水产养殖水质监控系统典型架构
Fig. 1 Typical framework of aquaculture water quality monitoring and control system

处理层是指利用数据融合、机器学习等方法对数据进行预处理,并根据预测模型对水质的变化做出判断。

应用层是农业物联网体系的最高层,面向用户,

为用户提供现场水质参数的实时显示、历史数据查询和分析、发送现场设备控制命令等功能。

水质控制系统的技术流程:由数据采集模块(传感器、摄像头等)采集水质信息,通过通信模块传输给控制中心,控制中心对数据进行汇总、分析并预测,用户手动或系统根据智能控制模型自动发送控制命令,通过执行机构驱动现场增氧机、水泵、投饵机等设备对现场水质做出调控动作。

3 水产养殖水质检测技术

水产养殖过程中水质的变化将直接影响鱼类的生长和收获时间,水质是水产养殖是否成功的关键,因此需要对养殖水体的水质进行实时监控,并能预测水质变化的趋势,及时采取措施对水质进行调整。

3.1 水质重要参数检测技术

3.1.1 水质重要参数及传统检测技术

影响水产养殖环境的关键参数包括溶解氧含量(Dissolved oxygen, DO)、水温、pH 值、氨氮含量、盐度、化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、亚硝酸盐含量、重金属含量、浊度等,其中水温、溶解氧含量和 pH 值尤为关键^[21]。养殖种类的不同对水质参数的需求也不相同,不同国家和地区对养殖水质参数的范围指定了相应的标准。

水温:养殖水域的温度变化不仅影响鱼类的食欲和新陈代谢,也影响鱼类的繁殖活动。另外,水温还影响水中的溶解氧、有毒物质的化学反应和氨的毒性等^[22]。比如:水温上升,水中的溶解氧将减少,鱼类呼吸加速,耗氧量增大,溶解氧进一步减少;如果水温过低,可能会造成鱼类陷入休眠停止生长阶段,因此及时检测水体温度,并采取措施将水体温度稳定在一定范围内十分必要。

水温的监测最常用的方法是采用水银温度计,这种方法比较简单,成本低,但只能测水体表层的温度。目前,大部分水质分析仪、溶氧测定仪等检测设备常配有温度测量功能,且可测定不同水层的水温。

溶解氧含量(DO):溶解氧是指溶解在水或液相中的分子态氧,是鱼类呼吸、废物分解和藻类呼吸所必需^[1]。溶解氧是水代谢的指标,可用于监测有机污染物和营养污染物^[23]。溶解氧过低不仅影响鱼类的生存,也会造成厌氧菌的快速繁殖,导致水质变差;但如果溶解氧过高,对卵和幼虫有显著的发育影响^[24],也易造成鱼塘富营养化和气泡病等灾害。目前常用的溶解氧含量测量方法有碘量法、电化学法(电流测定法、电导测定法)和荧光淬灭法等。其中,碘量法属于化学检测方法,耗时长、步骤繁杂,不适于现场测定;电化学法技术成熟、仪器价格相对低廉,检测步骤简单快捷,属于国家标准方法;荧光淬灭法检测溶解氧是基于氧分子对荧光物质的淬灭效

应的原理来实现的,精度高、速度快,但价格昂贵^[25]。

pH 值:是衡量水的酸碱度的指标,因此也称酸碱度,是水环境中化学和生物反应的指标^[26]。pH 值影响鱼类生存养殖的全过程。鱼类通常适于在中性或微碱性的水体中生长,当 pH 值过低时,鱼类维持盐平衡的能力将受到影响,血液中的载氧量会迅速降低,可能会出现窒息;pH 值过高时,鱼类可能会出现鳃出血的现象。pH 值与其他水质参数相互依赖,如二氧化碳含量、碱度、硬度等,同时 pH 值也会在在一定程度上影响硫化氢、氯化物、重金属和氨的毒性。传统的 pH 值测量方法包括:试纸法、酸碱滴定法、电位法(pH 计)等。试纸法操作简便,但缺点是误差较大;酸碱滴定法较试纸法测量精确,但操作繁杂,耗时较长;pH 计测定结果准确,对生产指导作用大。

氮:是水体中主要营养物质之一,在水体中主要以氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、有机氮等形式存在。四者可相互转化,四者之和称为总氮(Total nitrogen, TN),是衡量水体受污染程度的重要指标。氨氮在水中以游离氨(NH_3)和铵离子(NH_4^+)形式存在,二者的总和称为总氨氮(Total ammonia nitrogen, TAN)。离子氨无毒,是水生植物的营养来源之一;游离氨对鱼类有毒性,其毒性的大小与 pH 值有关。离子氨和游离氨在水中可以相互转化,其比例取决于水体中的 pH 值和温度。亚硝酸盐是 NH_3 或 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 的硝化过程中产生的,该过程转化速度较快,因此亚硝酸盐浓度通常不高。但如果出现硝酸盐浓度过高的情况,就会导致鱼类缺氧,出现“褐色病”等。有研究表明,淡水养殖中的亚硝酸盐的毒性是海水的 55 倍^[27],因此淡水养殖中应严格监测和控制水体中亚硝酸盐的含量。硝酸盐在水中具有高度的溶解性,与其他无机氮化合物相比,其毒性最小。氨氮常用的检测方法有纳氏试剂分光光度法、水杨酸分光光度法、电极法和气相分子吸收光谱法等^[28-29]。ZHOU 等^[30]对 4 种氨氮的检测方法进行了对比,证实水杨酸分光光度法适于在水产养殖中广泛应用。硝酸盐氮的常用检测方法有酚二磺酸分光光度法、麝香草酚分光光度法、离子色谱法、紫外分光光度法等^[31]。亚硝酸盐氮常用的检测方法有电化学法、在线镉柱还原-流动注射分析法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法、离子色谱法、气相分子吸收光谱法等^[32]。常用的总氮检测方法有过硫酸钾氧化法、流动注射分析法、微波消解-电极法、离子色谱法、光谱分析法等^[33]。

总磷:磷是生物生长的重要元素,是评定水质富营养化的重要指标。如果磷含量过大,会引起水体中藻类过度繁殖,导致水中缺氧。目前总磷的标准

检测方法是钼酸铵分光光度法,但该方法检测过程复杂、耗时耗能。总磷的其他检测方法还包括过硫酸盐消解法、气相色谱法、连续流动分析法、光催化氧化法、微波消解法等^[34-36]。

重金属:是一种典型的累积性污染物,在水环境中不仅不可降解而且会在生物体中长期积累和传递,引发多种疾病。常用的水质重金属含量检测方法有:原子吸收光谱法、电化学分析法、电感耦合等离子体法、原子荧光光谱法、紫外-可见分光光度法、高效液相色谱法、生物检测法等^[37-38]。

浊度:是指水中悬浮物对光线通过时所产生的阻碍程度^[39],是鱼类粪便、食物残渣、水中的微小藻类(浮游植物)、溶解的有机物等悬浮颗粒对光线的反射引起的。其中的浮游植物提供了溶解氧和鱼类的食物,但浊度过高时,水体透明度下降,又影响藻类的光合作用和浮游生物的生长,导致水体中的溶解氧浓度下降。浊度测量方法有:透射法、散射法和表面散射法等^[40]。其中,透射法适用于浊度较高的情况,在低浊度时,检测精度低、误差较大。散射法与表面散射法适于低浊度检测。

化学需氧量(COD):是在一定的条件下用强氧化剂氧化水中有机物时所消耗的氧化剂的量,反映了水体中受有机物、亚硝酸盐、硫化物等还原性物质的污染程度^[41],是确定改水调水方案的重要依据。COD 的常规检测方法根据使用氧化剂的不同可分为重铬酸盐法(COD_{Cr})和高锰酸盐法(COD_{Mn})^[42-43]。 COD_{Cr} 法主要用于测定有机污染物含量较多的水。 COD_{Mn} 法主要用于监测含有少量污染物的水体,如地表水和地下水。这些方法均存在操作复杂、耗时长、存在二次污染等问题。

盐度:水体中含盐的总量称为盐度或矿化度。盐度的变化会导致鱼类生长存活与摄食等相关生理指标发生相应的变化。关于盐度的检测,国内学者进行了大量的研究,常用的检测方法有液滴分析法、比重法、电导率法、折射率法、微波遥感法等^[44-45]。

3.1.2 基于光谱分析的水质参数检测技术

光谱分析法,又称光谱法,是基于朗伯比尔定律,利用物质的光谱来鉴定物质及其化学组成和相对含量的方法。光谱法可分为吸收光谱法、发射光谱法和散射光谱。其中红外光谱法、近红外光谱法、紫外-可见光分光光度法、原子吸收光谱法等属于吸收光谱法;原子发射光谱法、分子荧光光谱法、原子荧光光谱法等属于发射光谱法;拉曼光谱法属于散射光谱^[38]。相应的实验设备有近红外光谱仪、紫外光谱仪、紫外可见光分光光度计、离子色谱仪、拉曼光谱仪等。与传统方法相比,基于光谱法的水质监测技术具有快速、灵敏、无损等优点,是水质参数检测的一个重要发展方向^[46-47]。在利用光谱法进行

水质检测方面,国内外已有大量学者开展了研究^[48-51]。可利用光谱法进行检测的常见水质参数有溶解氧含量、pH 值、化学需氧量、总氮含量、总磷含量、重金属含量、有机物含量等^[52-58]。

文献[59]对光谱法在水产养殖水质检测中的数据处理方法和研究进展进行了详细综述。应用光谱法进行水样的定性或定量分析包括建模和检测过程,流程如图2所示。

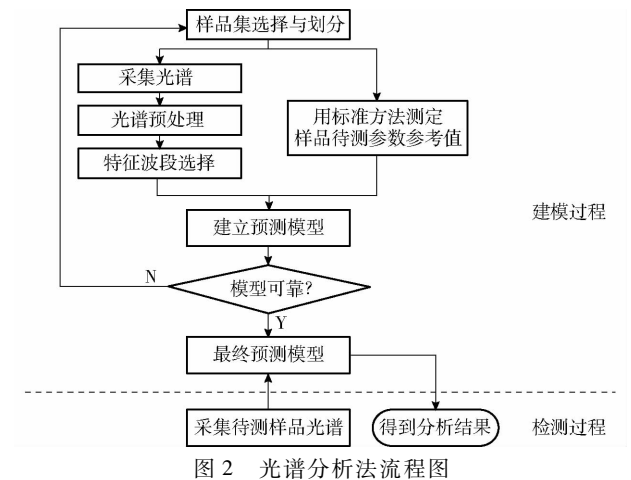


图2 光谱分析法流程图

Fig. 2 Process flow chart of spectral analysis

建模过程是利用样品光谱和标准方法测定样品成分性质或含量,建立预测模型的过程;检测过程是利用建模过程中构建的预测模型对采集到的待测样品的成分或含量进行预测的过程。采集到的光谱数据中常含有各种干扰信号,因此在建模或预测前需首先对光谱数据进行预处理,常见的光谱预处理的方法有标准正态变量变换(Standard normal variate correction, SNV)、SG 平滑算法、小波分析、多元散射校正(Multiple scatter correction, MSC)等。通常光谱仪获取的光谱数据中含有大量冗余数据和无关信息,这样数据导致光谱分析的速度变慢,效率降低。因此,建模前通常需从采集到的光谱数据中提取有益于建模的波长变量,去除冗余变量和无信息变量,以提高预测模型的性能。常见的光谱特征波段选择方法有连续投影算法、主成分分析法、无信息变量消除等。其中,连续投影算法广泛应用于光谱领域,是一种最常用的光谱特征波段选择的算法。主成分分析法是一种典型的高维数据的降维方法,该方法最大优势在于可极大地缩短分类时间,常用于定性分析。常用的光谱建模方法有偏最小二乘法(Partial least square, PLS)、人工神经网络(Artificial neural networks, ANN)、最小二乘支持向量机(Least squares support vector machine, LS-SVM)等方法。其中,PLS 算法属于线性建模算法,从广义上讲,相当于主成分分析、多元线性回归和典型相关分析的组合,在水质重要参数检测中具有较好的效果;LS-SVM 和 ANN 算法属于非线性建模,其中 LS-SVM 更适于

小样本建模情况下的应用;人工神经网络适于大样本情况下的建模,相对于其它人工神经网络,在水质检测中 BP 神经网络应用更为广泛。

总之,基于光谱分析的水质参数检测方法突破了传统检测方法的操作繁杂、耗时长、易造成二次污染等缺点,成为水产养殖水质检测的重要方法。目前,基于水产养殖对水质监测的需求,光谱法在水质水产监测领域的研究方向主要包括水质的在线监测技术^[53,60]、多参数监测技术和多源光谱融合技术^[7]等。

3.1.3 传感器在水质重要参数监测中的应用

传统的水质参数检测和基于光谱分析的水质参数检测技术均较难实现对水产养殖水质的实时在线监测。根据传输方式的不同,传感器可分为有线传感器和无线传感器两种。有线传感器故障率低、抗干扰能力强,可以保证传感器数据的可靠传输,相应技术比较成熟,是农业物联网关键节点间信息传输的必备技术。但在水产养殖领域中存在范围比较广,需要测不同位置和不同深度的水质参数,有线传感器的安装和维护存在很大的局限性。随着学者们在无线传感器节点和网络技术研究的不断深入,无线传感器的应用领域越来越广泛^[61]。

无线传感器通常由感知模块、中央处理单元、无线收发模块和电源模块组成。感知模块执行数据的采集,将待测信息转换成电信号,可由一个或多个传感器和传感处理模块组成;中央处理单元负责对接收到的数据执行处理和存储等操作;无线收发模块负责无线通信,可采用 Wi-Fi、ZigBee 等无线通信技术;电源模块由电池和电源管理系统组成,为整个传感器提供连续稳定的电源^[62]。

与陆地环境不同,水下环境更加恶劣和复杂,对于长期部署在水下的传感器除能满足水下设备间无线通信的复杂性外,还应具有低维护、可实现长期监测的特点^[63]。因此,与陆上传感器相比,水下传感器应具备以下特点^[64]:

(1)保护层应具有防水、防腐蚀、坚固等特点。因为传感器长时间工作在水下环境,特别是在海水环境时盐度较高,易造成传感器的保护层被腐蚀。因此,传感器的保护层应为防水、绝缘、防腐材料,建议采用塑料或防水硅胶等材料作为保护层^[65]。WIRANTO 等^[26]将传感器密封在 PVC 中,用于在线监测养虾池中的 DO、pH 值。以抗腐蚀性的钛合金作为防护层也是一种比较常见的做法,如美国 YSI 公司的溶解氧传感器等。

(2)可长时间工作,少维护。少维护包括两方面:一是传感器可部署在水面或水下不同深度,安装和维护比较困难,传感器本身应尽量运行可靠,故障率较低;二是传感器长时间固定在水下环境中,极易

受到水中悬浮物的污染或者水中藻类等生物体的附着,进而影响传感器的精度。为延长传感器的维护周期,水下传感器应尽量避免使用需要周期性校正或需添加反应介质的化学传感器、需定期人工清洗的光学传感器,或者使用膜或电解质的传感器。目前有些学者在研究水下传感器的免清洗或可自动清洁维护的功能,如单慧勇等^[66]设计了一套集成传感器清洁装置的全自动多点水质监测系统,设备采用清水浸泡、水流冲洗、海绵柔性擦拭相结合的清洗方式,可有效缓解传感器上藻类及微生物的附着问题,实现水质传感器的自动清洁维护。

(3)低能耗。传感器节点的电池功率有限,同时,无线信号在水下传输消耗了很大一部分能量。因此,传感器的低能耗特点是保证长期监测的关键。另外,有些学者在研究采用太阳能、风能或潮汐能等可再生能源来延长电池的使用时间,如 SHAREEF 等^[2]、CHEN 等^[67],采用外接太阳能作为传感器的备用能源。

(4)传感器本身不应影响养殖水生物的生长或对生物体及生物群产生有害影响。因此应尽量避免使用紫外光^[68]以及鱼类能感觉到的声波^[69]和磁场^[70]。

(5)水产养殖水质检测传感器不需要微型化和很高的精度。小型化的传感器反而易丢失或被鱼类吞食。

水质传感器主要包括化学传感器、物理传感器、生物传感器^[71]、光学传感器^[72]等。根据上述描述,水产养殖领域的水质参数传感器宜尽量选用物理传感器,不宜选择化学传感器或光学传感器。在选用光学传感器时传感器应具有自动清洗功能。文献^[73]介绍一种超声波自动清洗方法,并设计了一种 pH 电极和溶解氧电极的自动清洗装置。但在选取水质参数感知原理时,应综合考虑传感器的能耗、成本、对水生物的影响等各种因素。如水产养殖中的水下温度传感器常采用 RTD 导体电阻、NTC 热敏电阻或 IC 传感器;盐度传感器常采用电感法;浊度的自动检测方法包括:利用光学效应和声学多普勒效应两种方法,但声学传感器通常比光学传感器成本高、能耗高,因此,光学方法更适合水产养殖中浊度的监测;溶解氧传感器常采用荧光淬灭法或 Clark 电极法,如 In-situ 公司的 RDO 光学溶解氧传感器、HACH 公司 LDO 溶解氧传感器采用的是荧光淬灭法;HACH 公司的 GLI、日本 FIGARO 公司的 KDS 采用的是 Clark 电极法。其中 Clark 电极法需要定期清洗,因此基于荧光淬灭法的传感器更为常见。但这两种方法均需要定期维护或更换,目前没有其他更好的方法供选择。

表 1 是部分水质参数传感器的常见检测原理及

应用情况^[74]。

表 1 主要水质参数传感器
Tab.1 Major water quality sensors

传感器名称	常见检测原理	应用情况
溶解氧传感器	光学/电化学	应用广泛
水温传感器	物理	应用广泛
pH 值传感器	电化学	应用广泛
盐度传感器	物理	应用广泛
氨氮传感器	电化学	应用较少
浊度传感器	光学	应用较少
水体微量元素	生物学与光学结合	实验室研究

3.2 水产养殖水质重要参数预测模型

由于养殖水体具有体量大,水质变化具有非线性、动态性、多变性和复杂性等特点,构建水质参数预测模型对养殖水体的变化进行提前预测,对及时发现异常、降低养殖风险具有重要意义^[75-77]。水质参数预测也是近几年国内外学者在水产养殖领域研究的热点之一。

RANKOVIĆ 等^[78]利用 3 年收集的 Gruza 水库实验数据构建了一种前馈神经网络(Feedforward neural network,FNN)模型对溶解氧进行了预测。预测因子采用 pH 值、水温、氯化物含量、总磷酸盐含量、亚硝酸盐含量、硝酸盐含量、氨含量、铁含量、锰含量和电导率。实验过程中利用敏感性分析确定输入变量对因变量的影响,得到最优输入因子为 pH 值和水温,硝酸盐含量、氯化物含量和总磷酸盐含量为最不相关因子。然后利用 LM 示范对 FNN 进行训练,确定最优 FNN 网络结构。最后,将 FNN 模型值与实验数据进行比较,结果表明神经网络模型能提供准确的预测结果。

CHEN 等^[79]以水库的水质参数为研究对象,分别建立 BP 神经网络模型、自适应神经模糊推理系统模型(Adaptive neural network fuzzy reasoning system,ANFIS)和多元线性回归模型(Multivariable linear regression,MLR),对水库的溶解氧含量进行预测。输入变量采用水温、pH 值、电导率、浊度、悬浮物含量、总硬度、总碱度和氨氮含量。实验结果表明,神经网络模型优于多元线性回归模型,其中 ANFIS 模型的预测结果最优。

CSÁBRÁGI 等^[80]利用易于测量的 pH 值、水温、电导率和径流量等水质参数,采用了多元线性回归、MLP 神经网络、RBF 神经网络和广义回归神经网络(General regression neural network,GRNN)模型对多瑙河的溶解氧含量进行预测。利用敏感性分析得到 pH 值对预测溶解氧起最重要的作用。实验结果表明,非线性模型的结果优于线性模型结果。其中,GRNN 和 RBFNN 模型优于 MLP 神经网络模型。

OLYAIE 等^[81]分别利用两种人工神经网络

(MLP 模型和 RBF 模型)、LGP 线性遗传算法和 SVM 算法对 Delaware 河的溶解氧含量进行预测,预测因子采用 pH 值、电导率、水温度和流量。实验结果表明以上算法在 DO 值较低时预测精度均较好,但当 DO 值较高时预测精度较差,但 SVM 算法要显著优于另外两种算法。最后,建议通过多种算法结合和优化以节省时间和搜索 SVM 的最优参数。

LIU 等^[82]提出了一种 RGA – SVR 模型,该模型是在支持向量回归算法的基础上,利用 RGA 算法 (Real-value genetic algorithm, RGA) 搜索 SVR 的最优参数,然后采用最优参数构建 SVR 模型。最后,采用无线传感器获取的 pH 值、溶解氧含量、电导率、水温、太阳辐射、气温和风速作为预测因子,对河蟹养殖池中的溶解氧含量和水温进行了短期预测。实验结果表明, RGA – SVR 模型在均方根误差 (RMSE) 和平均绝对百分比误差 (MAPE) 方面均优于传统的 SVR 和 BP 神经网络模型。

BASANT 等^[83]利用 pH 值、总碱度、总硬度、总固体量、COD、氨氮含量、硝酸盐氮含量、氯化物含量、磷含量、钾含量、钠含量、DO 和 BOD,构建 PLS 和 FFBP 神经网络模型,同时对河流的表层水的 OD 和 BOD 进行预测。结果表明,两种模型都能同时对 DO 和 BOD 进行预测。

另外,AHMED^[84]、XU 等^[85]对 DO 进行了预测;丁金婷等^[86]采用模糊方法优化的自适应变步长 BP 神经网络算法对水温、pH 值和溶解氧含量进行了预测;徐大明等^[87]提出了一种基于粒子群优化 BP 神经网络算法对水温和 pH 值进行了预测。

由上述可见,水产养殖水质参数预测模型主要涉及溶解氧含量、pH 值、水温、氨氮含量和 BOD 等,其中以溶解氧含量的预测研究最多。预测因子主要包括溶解氧含量、水温、pH 值、电导率、空气温度、风速等。相应的预测模型构建方法中非线性模型优于线性模型。其中,以神经网络、支持向量机及其优化算法和组合算法效果最优。另外,PLS 和神经网络可实现对多参数同时进行预测。

4 水产养殖水质控制系统通信技术

4.1 水质控制系统通信技术分类

由于应用环境的影响,传统的有线方式的控制系统需要铺设电缆,不适于水产养殖的水质监控,水产养殖领域的水质控制系统通信方式以无线为主,且应具有低成本、低功耗等特点。下面着重分析基于无线传感网的水质控制系统的通信技术。

按通讯距离和覆盖范围的不同,无线传感网可以分为无线局域网技术和无线广域网技术。无线局域网技术主要包括 ZigBee、Wi-Fi、蓝牙等,其通讯距离较短,适于作为前端无线传感器的组网形式。

ZigBee 相对于 Wi-Fi、蓝牙等技术具有低功耗、低成本的特点(如表 2 所示^[88–89]),同时具有多跳、自组织的特点,每个节点均可作为相邻节点传输数据的中继,易于扩展网络的覆盖范围,被广泛应用于无线传感网络中。无线广域网技术包括蜂窝移动通信网(如 2G/3G/4G、GPRS 等)、低功耗广域网 (LPWAN),目前在水产物联网的远程通信技术中仍以 GPRS 为主。

表 2 无线局域网技术对比
Tab. 2 Contrast of wireless local area networks communication performance

性能参数	ZigBee	Wi-Fi	蓝牙
传输距离/m	30 ~ 1 500	100	10
能耗	低	高	低
传输速度/(Mb·s ⁻¹)	0.1	11 ~ 15	1
成本	低	高	低

基于无线传感网的水产养殖水质控制系统的网络拓扑图如图 3 所示^[90–91]。水质传感器节点和路由节点部署在水产养殖监测区域内,利用 ZigBee 以自组织形式构成网络,网络具有节点和路由双重功能。传感器节点既负责数据的采集和处理,同时将数据融合后以多跳的网络方式传送到汇聚节点。汇聚节点接收和处理网络中所有节点的信息后,通过 GPRS 传输到远端控制中心^[92]。

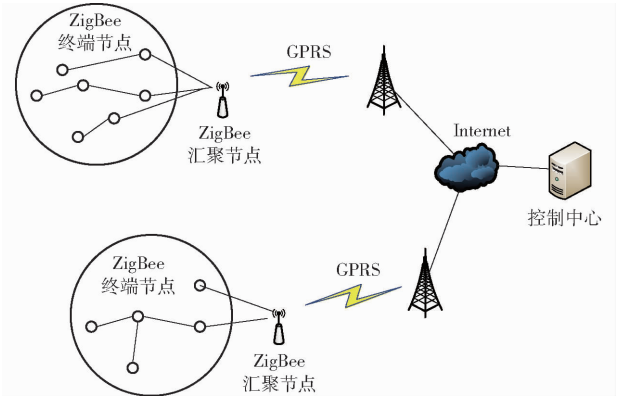


图 3 水质控制系统网络拓扑图
Fig. 3 Network topology of aquaculture water quality monitoring and control system

4.2 ZigBee 通信技术

ZigBee 技术是一种低成本、低功耗、低速率的无线通信技术,采用 IEEE802. 15. 4 标准,适于能耗要求低、数据吞吐量要求不高的场合。

ZigBee 技术具有强大的组网能力,可形成星形、网状、树形 3 种网络拓扑结构,如图 4 所示。其中,星形和树形拓扑具有简单、低功耗等特点,适于小规模、低复杂度、距离相对较近的场景使用;Mesh 网具有高容错能力、自适应性好,传输距离长,适合于大范围、通信距离较远的复杂网络组网方案。在水产养殖水质监控系统中 Mesh 拓扑方式更为常见。

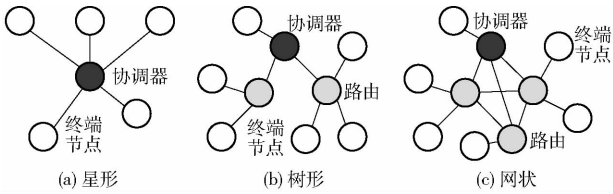


图 4 ZigBee 网络拓扑图

Fig.4 Network topology of ZigBee

4.3 无线广域网技术

通用分组无线服务 GPRS (General packet radio service) 是介于 2G 和 3G 之间的移动通信技术,也被称为 2.5G,是目前水产物联网中普遍使用的一种无线广域网组网技术^[2]。它是在 GSM 的基础上,采用分组交换技术将分组业务与移动业务相结合,以移动分组 IP 或 x.25 的形式为用户提供无线网络链接和高效数据传输。它具有成本低、可扩展、无约束、低误差、系统稳定等优点。GPRS 是物联网建设初期担任网络层数据传输任务的主要技术,特别适于中低数据率、高频率通信的环境监测和监控领域,如水质监测等^[93]。

为满足越来越多的远距离物联网设备的连接需求,低功耗广域网 (Low power wide area network, LPWAN) 应运而生。相对于传统的 GPRS/2G/3G/4G 等移动通信技术,LPWAN 进一步降低了能耗、提高了续航能力、扩大了网络覆盖范围、可以大量接入,成为近年来物联网研究的热点之一。

LPWAN 按工作频谱是否授权,又可分为工作于非授权频谱下的 LPWAN 和工作于授权频谱下的 LPWAN。非授权频谱 LPWAN 技术有 LoRa、SigFox 等,其中以 LoRa 技术为代表;授权频谱的 LPWAN 技术有 EC-GSM、LTE Cat-m、NB-IoT 等,其中以 NB-IoT 为代表。目前我国移动、联通和电信三大运营商以及华为、中兴等设备供应商已于 2017 年推动 NB-IoT 的应用。LoRa 和 NB-IoT 的技术对比如表 3 所示^[88]。

表 3 LoRa 和 NB-IoT 技术对比

Tab.3 Contrast between LoRa and NB-IoT

性能指标	LoRa	NB-IoT
技术特点	扩频	蜂窝
网络部署	独立建站	基于蜂窝基站
频段	0.15~1 GHz	运行商频段
传输距离/km	15	20
速率/(kb·s ⁻¹)	0.3~50	<100
连接数量	2×10 ⁵ ~3×10 ⁵ 个/hub	2×10 ⁵ 个/cell
1 节 5 号电池下的续航时间/a	10	10

由上可见,GPRS 是目前水质监测物联网中应用最为广泛的无线广域网技术;以 LoRa 和 NB-IoT 为代表的 LPWAN 技术虽然目前应用较少,但

LPWAN 是未来物联网的发展方向,特别是在对低功耗、长待机、远距离、大容量有需求的应用场景。另外,随着水产养殖领域对图像和视频信息的实时传输的需要,4G/5G 技术将弥补 LPWAN 传输速率方面的不足,成为 LPWAN 的有效补充。

5 水产养殖水质智能控制技术

5.1 控制中心智能控制机理

水产养殖水质智能控制系统通常包括控制中心和养殖现场设备控制两部分。控制中心除具有对现场水质参数进行实时监控和控制现场设备的功能外,还应根据现场采集的数据、相应预测模型和专家知识库等对水质参数进行分析和预测,并根据设定的报警规则辅助用户做出相应决策。

目前的水质自动控制系统基本上尚未脱离实验室环境,控制方法也限于阈值控制、定时控制、PID 控制等简单算法。但如溶解氧含量等参数的变化受多重因素的制约,其变化存在较大的滞后,当监测到参数值低于阈值时往往来不及采取措施,因此养殖水质的智能控制技术需要利用 3.2 节中介绍的水质参数预测算法对水质的变化趋势做出预测,并结合现场自动控制设备实现水质的智能控制。基于预测的智能控制模型如图 5 所示^[20]。

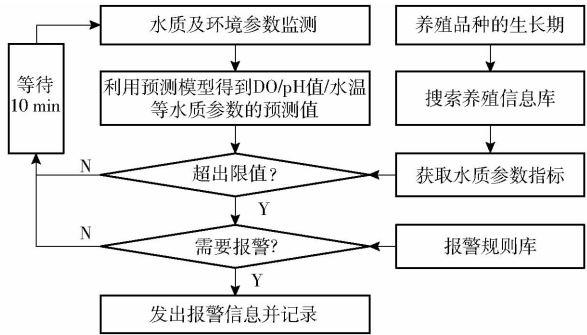


图 5 基于预测的智能控制模型

Fig.5 Aquaculture water quality control model based on prediction

传感器将采集到的 DO、pH 值、水温、盐度、氨氮含量等水质参数及温度、光照强度、风速等环境参数经 GPRS 传送至控制中心,控制中心的监控系统利用建立的预测模型对待控制参数进行预测,并根据养殖品种的不同生长期搜索养殖信息库获取该时期养殖水质的参数指标和报警规则库;如果预测参数超出限值需要报警,则以设定的报警方式(如短信、语音等)发出报警信息及预警等级,并记入报警记录;对于预测值超出限值但未达报警值的情况,应记入日志并向用户提供提醒信息。控制中心还应配置专家知识库,当有报警信息时,能为用户自动提供当前状况下的应对措施。同时,控制中心应具有传感器数据实时显示、历史数据查询、趋势分析、多传感器间的数据比较、现场设备远程

控制等功能。

5.2 现场水质调控设备智能控制

现场设备控制应具有就地控制和远程控制两种模式。就地模式是指独立于控制中心,由现场控制装置直接实现调控设备的控制。就地模式又可分为就地手动控制和就地自动控制模式。就地手动控制是利用现场控制装置上的控制开关或按钮,以人工手动的方式对设备进行启/停控制。就地自动控制是利用现场控制装置上内置的控制流程或简单算法(如阈值、PID、定时)实现设备自动运行和停止。远方控制即由控制中心的控制软件通过 GPRS 向现场控制装置发生控制命令,实现对调控装置的远程控制。

由于水产养殖水体环境具有波动性、季节周期性、趋势性等的非线性特点,以及时间滞后性和大惯性的特点,就地自动控制采用简单的阈值、定时控制无法实现水质参数的精准调控。为实现水质参数的精准调控,王德望等^[102]在 PID 算法的基础上与 BP 神经网络算法相融合,提出一种 BP-PID 控制算法实现对水中的溶解氧的调控,仿真结果显示其控制品质优于常规的 PID 算法;魏坤鹏^[103]提出一种灰色预测和聚类融合理论实现对浊度的调整,仿真结果显示该算法相对于 PID 算法具有更好的动态响应。文献[20]中设计了一种基于模糊控制的溶解氧智能控制器,控制器包括模糊化、模糊推理和解模糊 3 个环节,并选取实时溶解氧和实时溶解氧的变化量作为输入,增氧时间为输出变量。模糊控制器的结构原理如图 6 所示。该控制器在江苏省宜兴市河蟹养殖基地进行了试验,试验结果明显优于传统的定时控制。总之,现场水质参数调控算法以闭环为主,控制原理主要有智能控制及人工控制、模糊 PID 控制、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^[96]。

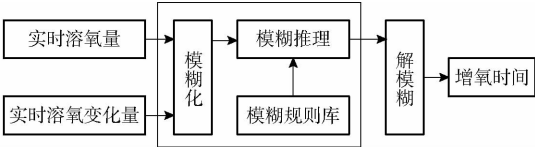


图 6 模糊控制结构原理图

Fig. 6 Structure diagram of fuzzy control

5.3 水质调节措施及设备

水产养殖水质调控主要有物理调控、化学调控和生物调控等方式^[97]。其中,物理调控方式见效快,不产生二次污染,但可持续性差;化学调控见效快,但易产生二次污染;生物调控无毒害,但见效慢,操控复杂。因此实际调控中应多种方式综合使用,有效提高调控性能,但尚缺乏统一有效的调控标准。常见的溶解氧含量的调控措施有启动增氧机、换水、投放增氧剂或沸石等。增加水体中的溶解氧含量的

同时可达到调节亚硝酸盐含量和硫化氢含量等参数的目的;pH 值的常见调控措施有换水或投放酸性或碱性药物等;氨氮含量的调控可采用换水、加溶剂和臭氧等措施^[98-99]。

可自动化控制的调控设备主要有增氧设备、循环泵、压缩机及部分调温设备和水质净化设备^[100]等。其中增氧设备是规模化水产养殖的必备设备,其主要用途是通过搅拌水体,促进水体上下循环,达到增加水中溶氧量的目的。增氧设备的研究向节能低耗、高效可控方向发展。常见的增氧设备主要有叶轮增氧机、水车式增氧机、喷水式增氧机、射流式增氧机、涡流式增氧机、充气式增氧机、微孔曝气增氧机等。目前我国水产养殖中以叶轮式、水车式增氧机为主^[101-102]。国外增氧技术的研究以富(纯)氧增氧为主,富(纯)氧增氧设备具有结构简单、节电、增氧效率高^[103]等优点。

6 发展趋势展望

水产养殖区往往位于偏远地区,环境比较恶劣,特别是随着海洋水产养殖业的扩大并进一步向深海和深远海转移^[104],使水产养殖水质检测系统不同于普通的陆上物联网系统。水产养殖水质监测系统应具有方便部署、低功耗、无人操作、少维护、需远距离传输等特点。

(1)在水质检测技术方面,基于光谱技术的水质检测方法可同时实现多个参数的预测,并具有快速、无损等特点,已成为水质检测领域新的研究方向。将光谱技术与在线监测技术相结合,实现水质的在线实时监测,将对水产养殖领域水质监测具有重要意义。

(2)根据水产养殖水质检测系统的特点,不需要定期维护或更换电池,或者利用太阳能、风能或潮汐能等可再生资源解决无线传感器的长期待机是目前急需解决的问题。

(3)基于数据融合技术的多参数传感器是水产养殖水质监测未来的发展趋势。首先,在水产养殖环境下,特别是海水养殖,多参数传感器可减少系统部署和维护的工作量。其次,数据融合技术可以对传感器数据进行预处理,提高传感器的精度和稳定性^[105]。同时,可以去除冗余信息,减小所需传输的数据量,提高无线通道的利用率。

(4)养殖水质重要参数预测、预警仍将是水产养殖领域的重点研究方向,随着数据的不断积累和深度学习技术的发展,构建增量式在线预测模型将成为未来的研究热点。

(5)未来应将 NB-IoT、LoRa 等低功耗广域网技术以及 IPv6 技术应用于水产养殖水质监控和控制系统中。

参 考 文 献

- [1] BOSMA R H, VERDEGEM M C J. Sustainable aquaculture in ponds: principles, practices and limits[J]. *Livestock Science*, 2011, 139(1-2): 58-68.
- [2] SHAREEF Z, REDDY S R N. Wireless sensor network for aquaculture: review, survey, and case study of aquaculture practices in western Godavari region[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 2018, 10(5): 409-423.
- [3] OTTINGER M, CLAUS K, KUENZER C. Aquaculture: relevance, distribution, impacts and spatial assessments—a review[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 119: 244-266.
- [4] ZHOU C, XU D, LIN K, et al. Intelligent feeding control methods in aquaculture with an emphasis on fish: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2017, 10(4): 1-19.
- [5] 余粮红, 郑珊, 高强. 国外海水养殖生态经济系统协调模式及其对中国的启示[J]. *世界农业*, 2018(7): 112-120.
- [6] 侯海燕, 鞠晓晖, 陈雨生. 国外深海网箱养殖业发展动态及其对中国的启示[J]. *世界农业*, 2017(5): 162-166.
- [7] JANSEN H M, REID G K, BANNISTER R J, et al. Discrete water quality sampling at open-water aquaculture sites: limitations and strategies[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 463-480.
- [8] 闫国琦, 倪小辉, 莫嘉嗣. 深远海养殖装备技术研究现状与发展趋势[J]. *大连海洋大学学报*, 2018, 33(1): 123-129.
- YAN Guoqi, NI Xiaohui, MO Jiasi. Research status and development tendency of deep sea aquaculture equipment: a review[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2018, 33(1): 123-129. (in Chinese)
- [9] 刘碧涛, 王艺颖. 深海养殖装备现状及我国发展策略[J]. *船舶物资与市场*, 2018(2): 39-44.
- [10] 方建光, 李钟杰, 蒋增杰, 等. 水产生态养殖与新养殖模式发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2016(3): 22-28.
- FANG Jianguang, LI Zhongjie, JIANG Zengjie, et al. Development strategy for ecological aquaculture and new mode of aquaculture farming[J]. *Engineering Sciences*, 2016(3): 22-28. (in Chinese)
- [11] 胡金城, 于学权, 辛乃宏, 等. 工厂化循环水养殖研究现状及应用前景[J]. *中国水产*, 2017(6): 94-97.
- [12] 关长涛, 来琦芳. 以色列集约化水产养殖方式与装备介绍[J]. *渔业现代化*, 2006(3): 24-26.
- [13] ZHANG M, LI D, WANG L, et al. Design and development of water quality monitoring system based on wireless sensor network in aquaculture[C]// *International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010: 629-641.
- [14] ZHU X, LI D, HE D, et al. A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 71: S3-S9.
- [15] 刘雨青, 李佳佳, 曹守启, 等. 基于物联网的螃蟹养殖基地监控系统设计及应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 205-213.
- LIU Yuqing, LI Jiajia, CAO Shouqi, et al. Design and application of monitoring system for crab breeding based on internet of things[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(16): 205-213. (in Chinese)
- [16] MAHALIK N, KIM K. Aquaculture monitoring and control systems for seaweed and fish farming[J]. *World Journal of Agricultural Research*, 2014, 2(4): 176-182.
- [17] WANG Z, WANG Q, HAO X. The design of the remote water quality monitoring system based on WSN[C]// *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom'09. 5th International Conference on*. IEEE, 2009: 1-4.
- [18] SIMBEYE D S, YANG S F. Water quality monitoring and control for aquaculture based on wireless sensor networks[J]. *Journal of Networks*, 2014, 9(4): 840-849.
- [19] 李道亮. 物联网与智慧农业[J]. *农业工程*, 2012, 2(1): 1-7.
- LI Daoliang. Internet of things and wisdom agriculture[J]. *Agricultural Engineering*, 2012, 2(1): 1-7. (in Chinese)
- [20] 李道亮. 农业物联网导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] DUPONT C, WUSSAH A, MALO S, et al. Low-cost IoT solutions for fish farmers in Africa[C]// *2018 IST - Africa Week Conference (IST - Africa)*. IEEE, 2018: 1-8.
- [22] SIMBEYE D S, ZHAO J, YANG S. 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.
- [23] BASAVARADDI S B, KOUSAR H, PUTTAIAH E T. Dissolved oxygen concentration—a remarkable indicator of ground water pollution in and around Tiptur town, Tumkur District, Karnataka, India[J]. *Bull. Env., Pharm. & Life Sci.*, 2012, 1(3): 48-54.
- [24] COLT J. Water quality requirements for reuse systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 143-156.
- [25] 廖和琴. 基于液滴分析技术的水质检测仪器的设计[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- LIAO Heqin. The design of water quality testing instrument based on liquid drop analysis technology[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [26] WIRANTO G, MAULANA Y Y, HERMIDA I D P, et al. Integrated online water quality monitoring[C]// *Smart Sensors and Application (ICSSA)*, 2015 International Conference on. IEEE, 2015: 111-115.
- [27] 高明辉, 马立保, 葛立安, 等. 亚硝酸盐在水生动物体内的吸收机制及蓄积的影响因素[J]. *南方水产科学*, 2008, 4(4): 73-79.
- GAO Minghui, MA Libao, GE Lian, et al. Nitrite uptake mechanism and the influencing factors of accumulation in aquatic animals[J]. *South China Fisheries Science*, 2008, 4(4): 73-79. (in Chinese)
- [28] 张卫强, 朱英. 养殖水体中氨氮的危害及其检测方法研究进展[J]. *环境卫生学杂志*, 2012(6): 324-327.
- ZHANG Weiqiang, ZHU Ying. Advances on the research of the hazard of ammonia nitrogen in aquaculture water and its determination method[J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2012(6): 324-327. (in Chinese)
- [29] 张卫, 符伟杰, 孙奕, 等. 水质氨氮测定方法研究进展[J]. *绿色科技*, 2017(10): 19-21.
- ZHANG Wei, FU Weijie, SUN Yi, et al. Advances on the research of the determination of ammonia nitrogen in water[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2017(10): 19-21. (in Chinese)
- [30] ZHOU L, BOYD C E. Comparison of Nessler, phenate, salicylate and ion selective electrode procedures for determination of total ammonia nitrogen in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2016, 450: 187-193.

- [31] 李玉春. 基于紫外可见光谱的水下多参数水质检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [32] 孙晨光. 面向水产养殖的亚硝酸盐氮在线检测系统研制[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
SUN Chenguang. Development of on-line detection system for nitrite nitrogen in aquaculture [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [33] 陈颖, 马琳. 海水中总氮的测定方法比较研究[J]. 环境监控与预警, 2018, 10(4): 32–36.
CHEN Ying, MA Lin. Comparative study on determination of total nitrogen in seawater [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2018, 10(4): 32–36. (in Chinese)
- [34] 唐慧颖. 连续流动分析法测定水中的总磷[J]. 污染防治技术, 2014, 27(1): 51–54.
TANG Huiying. Determination of total phosphorus in water by using continuous flow analysis[J]. Pollution Control Technology, 2014, 27(1): 51–54. (in Chinese)
- [35] 刘建利, 张沛, 宋蓓, 等. 连续流动分析法测定水中总磷、总氮比对研究[J]. 化学研究与应用, 2016, 28(7): 936–941.
LIU Jianli, ZHANG Pei, SONG Bei, et al. Comparison study of determination of total phosphorus and total nitrogen in water by continuous flow analysis [J]. Chemical Research and Application, 2016, 28(7): 936–941. (in Chinese)
- [36] 张丹, 阳章友, 曾一平, 等. 水体中总磷检测技术研究进展[J]. 河南化工, 2010, 27(4): 7–8.
- [37] 胡敬芳, 李玥琪, 高国伟, 等. 水质重金属检测技术研究进展[J]. 传感器世界, 2017, 23(7): 7–15.
HU Jingfang, LI Yueqi, GAO Guowei, et al. Research progress in heavy metal detection technologies in water [J]. Sensor World, 2017, 23(7): 7–15. (in Chinese)
- [38] LOURENÇO N D, LOPES J A, ALMEIDA C F, et al. Bioreactor monitoring with spectroscopy and chemometrics: a review [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2012, 404(4): 1211–1237.
- [39] POSTOLACHE O A, GIRÃO P M B S, PEREIRA J M D, et al. Multibeam optical system and neural processing for turbidity measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(5): 677–684.
- [40] 陈超. 面向鱼塘浊度检测的 WSN 节点关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.
CHEN Chao. Research on the key technology of WSN nodes for turbidity detection in fish ponds [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- [41] OJEDA C B, ROJAS F S. Process analytical chemistry: applications of ultraviolet/visible spectrometry in environmental analysis: an overview [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2009, 44(3): 245–265.
- [42] 罗国兵. 水体化学需氧量的检测方法[J]. 岩矿测试, 2013, 32(6): 860–874.
LUO Guobing. A review on detection methods of chemical oxygen demand in water bodies [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(6): 860–874. (in Chinese)
- [43] 吕正中, 谭爱民. 化学需氧量测定方法综述[J]. 工业水处理, 2000, 20(10): 9–11.
LÜ Zhengzhong, TAN Aimin. Review on the determination of chemical oxygen demand [J]. Industrial Water Treatment, 2000, 20(10): 9–11. (in Chinese)
- [44] 冯国红, 裘祖荣, 廖和琴, 等. 基于液滴分析技术检测水中的溶解氧及盐度[J]. 天津大学学报, 2013, 45(12): 1083–1088.
FENG Guohong, QIU Zurong, LIAO Heqin, et al. Droplet analysis technology in detection of dissolved oxygen and salinity in water [J]. Journal of Tianjin University, 2013, 45(12): 1083–1088. (in Chinese)
- [45] 冯国红, 裘祖荣, 杨慧敏. 光电式液滴分析技术定量检测水中的盐度[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(7): 123–125.
FENG Guohong, QIU Zurong, YANG Huimin. Quantitative detection on salinity of water by photoelectric droplet analysis technology [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(7): 123–125. (in Chinese)
- [46] FIGUEIRÓ S M, OLIVEIRA D B D, RUSSO M R. Fish farming water quality monitored by optical analysis the potential application of UV–Vis absorption and fluorescence spectroscopy [J]. Aquaculture, 2018(490): 91–97.
- [47] 曹泓. 基于多源光谱数据融合的水产养殖水质有机物浓度快速检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
CAO Hong. Research on rapid determination of organic matter concentration in aquaculture water using multi-sourcespectral data fusion [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [48] CARSTEA E M, BRIDGEMAN J, BAKER A, et al. Fluorescence spectroscopy for wastewater monitoring: a review [J]. Water Research, 2016, 95: 205–219.
- [49] CARSTEA E M. Fluorescence spectroscopy as a potential tool for in-situ monitoring of dissolved organic matter in surface water systems [M] // Water pollution. InTech, 2012.
- [50] 侯迪波, 张坚, 陈冷, 等. 基于紫外-可见光光谱的水质分析方法研究进展与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1839–1844.
HOU Dibo, ZHANG Jian, CHEN Lin, et al. Water quality analysis by UV–Vis spectroscopy: a review of methodology and application [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1839–1844. (in Chinese)
- [51] PU H, LIU D, QU J H, et al. Applications of imaging spectrometry in inland water quality monitoring—a review of recent developments [J]. Water Air & Soil Pollution, 2017, 228(4): 131.
- [52] 曾甜玲, 温志渝, 温中泉, 等. 基于紫外光谱分析的水质监测技术研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1098–1103.
ZENG Tianling, WEN Zhiyu, WEN Zhongquan, et al. Research progress in water quality monitoring technology based on ultraviolet spectrum analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1098–1103. (in Chinese)
- [53] HAMBLY A, STEDMON C. FluorAS sensor-online organic matter for optimising recirculating aquaculture systems [J]. Research Ideas and Outcomes, 2018, 4: e23957.
- [54] HAMBLY A C, ARVIN E, PEDERSEN L F, et al. Characterising organic matter in recirculating aquaculture systems with fluorescence EEM spectroscopy [J]. Water Research, 2015, 83: 112–120.
- [55] 王睿, 余震虹, 鱼瑛. 紫外吸收光谱法研究硝酸盐溶液[J]. 光谱实验室, 2009(2): 206–209.
WANG Rui, YU Zhenhong, YU Ying. Investigation on nitrate solution by ultraviolet absorption spectrometry [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2009(2): 206–209. (in Chinese)
- [56] 海彩虹. 紫外分光光度法测定浓维磷糖浆中的总磷量[J]. 中国药业, 2007, 16(19): 22–23.
HAI Caihong. Determination of total sodium phosphate in concentrated divitamins and sodium phosphate syrup by UV–VIS

- [J]. China Pharmaceuticals, 2007, 16(19): 22 – 23. (in Chinese)
- [57] 王斌, 杨慧中. 一种水质总磷在线检测的光谱数据处理方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 236 – 241.
WANG Bin, YANG Huizhong. A processing method for spectral data of online total phosphorus detection in water[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 236 – 241. (in Chinese)
- [58] 杜艳红, 张伟玉, 杨仁杰, 等. 基于可见-近红外光谱的水质 pH 值分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(3): 612 – 614.
DU Yanhong, ZHANG Weiyu, YANG Renjie, et al. Analysis on pH in water by visible-near infrared spectroscopy[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(3): 612 – 614. (in Chinese)
- [59] 李鑫星, 朱晨光, 周婧, 等. 光谱技术在水产养殖水质监测中的应用进展及趋势[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 184 – 194.
LI Xinxing, ZHU Chenguang, ZHOU Jing, et al. Review and trend of water quality detection in aquaculture by spectroscopy technique[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 184 – 194. (in Chinese)
- [60] EICHHORN M, AMENT C, JACOBI M, et al. Modular AUV system with integrated real-time water quality analysis[J]. Sensors, 2018, 18(6): 18 – 37.
- [61] JAIME L. Underwater sensor nodes and networks[J]. Sensors, 2013, 13(9): 11782 – 11796.
- [62] SENDRA S, PARRA L, LLORET J, et al. Oceanographic multisensor buoy based on low cost sensors for Posidonia meadows monitoring in Mediterranean Sea[J]. Journal of Sensors, 2015, 15: 1 – 23.
- [63] SENDRA S, LLORET J, JIMENEZ J M, et al. Underwater acoustic modems[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4063 – 4071.
- [64] PARRA L, LLORET G, LLORET J, et al. Physical sensors for precision aquaculture: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(10): 3915 – 3923.
- [65] PARRA L, SENDRA S, LLORET J, et al. Design and deployment of a smart system for data gathering in aquaculture tanks using wireless sensor networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30(16): e3335.
- [66] 单慧勇, 田云臣, 张仲雄, 等. 水产养殖多点水质监测与传感器清洁装置设计[J]. 渔业现代化, 2018(3): 15 – 21.
SHAN Huiyong, TIAN Yunchen, ZHANG Zhongxiong, et al. Multi-point water quality monitoring and sensor cleaning device design in aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2018(3): 15 – 21. (in Chinese)
- [67] CHEN J H, SUNG W T, LIN G Y. Automated monitoring system for the fish farm aquaculture environment[C]// Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2015 IEEE International Conference on. IEEE, 2015: 1161 – 1166.
- [68] HÄDER D P, HELBLING E W, WILLIAMSON C E, et al. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change[J]. Photochemical & Photobiological Sciences, 2011, 10(2): 242 – 260.
- [69] POPPER A N, FEWTRELL J, SMITH M E, et al. Anthropogenic sound: effects on the behavior and physiology of fishes[J]. Marine Technology Society Journal, 2003, 37(4): 35 – 40.
- [70] ÖHMAN M C, SIGRAY P, WESTERBERG H. Offshore windmills and the effects of electromagnetic fields on fish[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2007, 36(8): 630 – 633.
- [71] DA SILVA L, YANG Z, PIRES N, et al. Monitoring aquaculture water quality: design of an early warning sensor with a liivibriofischeri and predictive models[J]. Sensors, 2018, 18(9): 1 – 16.
- [72] 黎洪松, 刘俊. 水质检测传感器研究的新进展[J]. 传感器与微系统, 2012(3): 11 – 14.
LI Hongsong, LIU Jun. New progress of study of water quality monitoring sensors[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012(3): 11 – 14. (in Chinese)
- [73] 王小格. 基于 WSN 的循环水养殖多参数巡回监控系统研制[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
WANG Xiaoge. Development of multi-parameter circuit monitoring system in recirculating aquaculture based on WSN[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [74] 段青玲, 刘怡然, 张璐, 等. 水产养殖大数据技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 1 – 16.
DUN Qingling, LIU Yiran, ZHANG Lu, et al. State-of-the-art review for application of big data technology in aquaculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 1 – 16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180601&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.001. (in Chinese)
- [75] 王魏, 邓长辉, 关晓燕, 等. 水产养殖溶氧浓度软测量模型研究进展[J]. 渔业现代化, 2015(6): 26 – 30.
WANG Wei, DENG Changhui, GUAN Xiaoyan, et al. Research progress on the soft-sensing model for dissolved oxygen in aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2015(6): 26 – 30. (in Chinese)
- [76] 吕苏娜. 基于 ARIMA-DBN 的水质参数预测模型研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
LÜ Suna. Study on the model of water quality prediction based on ARIMA-DBN[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017. (in Chinese)
- [77] SUN Y, LI D, DU S, et al. WSN-based intelligent detection and control of dissolved oxygen in crab culture[J]. Sensor Letters, 2013, 11(6-7): 1050 – 1054.
- [78] RANKOVIĆ V, RADULOVIĆ J, RADOJEVIĆ I, et al. Neural network modeling of dissolved oxygen in the Gruža reservoir, Serbia[J]. Ecological Modelling, 2010, 221(8): 1239 – 1244.
- [79] CHEN W, LIU W. Artificial neural network modeling of dissolved oxygen in reservoir[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(2): 1203 – 1217.
- [80] CSÁBRÁGI A, MOLNÁR S, TANOS P, et al. Application of artificial neural networks to the forecasting of dissolved oxygen content in the Hungarian section of the river Danube[J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 63 – 72.
- [81] OLYAIE E, ABYANEH H Z, MEHR A D. A comparative analysis among computational intelligence techniques for dissolved oxygen prediction in Delaware River[J]. Geoscience Frontiers, 2017, 8(3): 517 – 527.
- [82] LIU S, TAI H, DING Q, 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.
- [83] BASANT N, GUPTA S, MALIK A, et al. Linear and nonlinear modeling for simultaneous prediction of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand of the surface water — a case study[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2010,

- 104(2): 172 – 180.
- [84] AHMED A A M. Prediction of dissolved oxygen in Surma River by biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand using the artificial neural networks (ANNs)[J]. Journal of King Saud University (Engineering Sciences), 2017, 29(2): 151 – 158.
- [85] XU Z, XU Y J. A deterministic model for predicting hourly dissolved oxygen change: development and application to a shallow eutrophic lake[J]. Water, 2016, 8(2): 41.
- [86] 丁金婷, 臧泽林, 黄敏. 模糊方法改进的反向传输神经网络预测南美白对虾养殖的水质[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43(1): 128 – 136.
- DING Jinting, ZANG Zelin, HUANG Min. Penaeus vannamei aquaculture water quality prediction based on the improved back propagation neural network[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2017, 43(1): 128 – 136. (in Chinese)
- [87] 徐大明, 周超, 孙传恒, 等. 基于粒子群优化 BP 神经网络的水产养殖水温及 pH 预测模型[J]. 渔业现代化, 2016, 43(1): 24 – 29.
- XU Daming, ZHOU Chao, SUN Chuanheng, et al. Prediction model of aquaculture water temperature and pH based on BP neural network optimized by particle swarm algorithm[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(1): 24 – 29. (in Chinese)
- [88] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 1 – 20.
- LI Daoliang, YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 1 – 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180101&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.001. (in Chinese)
- [89] CHANDANAPALLI S B, REDDY E S, RAJYA L D. Efficient design and deployment of aqua monitoring systems using WSNs and correlation analysis[J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2015, 10(4): 471 – 479.
- [90] 王英杰. 基于物联网的水产养殖测控系统的设计与实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- WANG Yingjie. Design and implementation of measurement and control system of aquaculture based on IoT[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [91] 赵小欢. 基于 WSN 的水产养殖水质在线监测系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- ZHAO Xiaohuan. The design of water quality monitoring system in aquaculture based on wireless networks[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [92] 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)
- [93] WU Q, LIANG Y, SUN Y, et al. Application of GPRS technology in water quality monitoring system[C]//World Automation Congress, 2010.
- [94] 胡金有, 王靖杰, 张小栓, 等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 251 – 263.
- HU Jinyou, WANG Jingjie, ZHANG Xiaoshuan, et al. Research status and development trends of information technologies in aquacultures[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 251 – 263. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150737&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.037. (in Chinese)
- [95] 刘世晶, 唐荣, 周海燕, 等. 基于信息化水环境监测的养殖水体调控技术[J]. 渔业现代化, 2015, 42(6): 31 – 36.
- LIU Shijing, TANG Rong, ZHOU Haiyan, et al. The aquaculture water control technology based on informationized monitoring technology of water environment[J]. Fishery Modernization, 2015, 42(6): 31 – 36. (in Chinese)
- [96] 杨家朋, 刘兴国, 顾兆俊, 等. 养殖池塘水质改良设备研究综述[J]. 江西水产科技, 2017(2): 32 – 34.
- [97] 李明. 浙江省水产养殖机械化现状及机械装备需求[J]. 农业工程, 2016, 6(1): 1 – 4.
- LI Ming. Current situation of mechanization production and requirement of mechanized equipments about aquaculture industry in Zhejiang Province[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(1): 1 – 4. (in Chinese)
- [98] 房燕, 韩世成, 蒋树义, 等. 工厂化水产养殖中的增氧技术[J]. 水产学杂志, 2012, 25(2): 56 – 61.
- FANG Yan, HAN Shicheng, JIANG Shuyi, et al. Techniques of increase in dissolved oxygen level in an industrial aquaculture system[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2012, 25(2): 56 – 61. (in Chinese)
- [99] 陈有光, 段登选, 陈秀丽, 等. 工厂化养鱼中氧气锥的增氧规律[J]. 渔业现代化, 2009, 36(3): 26 – 30.
- CHEN Youguang, DUAN Dengxuan, CHEN Xiuli, et al. Study on the oxygen increasing law of oxygen cone in industrialized fish farming system[J]. Fishery Modernization, 2009, 36(3): 26 – 30. (in Chinese)
- [100] 赖年悦, 杨粤首, 魏泽能. 基于物联网的池塘高产养殖水质智能调控技术[J]. 水产养殖, 2013, 34(5): 36 – 39.
- [101] 韩世成, 曹广斌, 蒋树义, 等. 工厂化水产养殖中的水处理技术[J]. 水产学杂志, 2009, 22(3): 54 – 59.
- HAN Shicheng, CAO Guangbin, JIANG Shuyi, et al. Water treatment technology in recirculating aquaculture system[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(3): 54 – 59. (in Chinese)
- [102] 王德望, 赵敏. 污水处理系统溶解氧的 BP – PID 控制算法[J]. 软件导刊, 2018, 17(2): 68 – 70, 73.
- WANG Dewang, ZHAO Min. BP – PID control algorithm for dissolved oxygen in sewage treatment system[J]. Software Guide, 2018, 17(2): 68 – 70, 73. (in Chinese)
- [103] 魏坤鹏. 灰色预测和聚类融合理论在水质检测控制中的应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2017.
- [104] 黄一心, 徐皓, 丁建乐. 我国离岸水产养殖设施装备发展研究[J]. 渔业现代化, 2016, 43(2): 76 – 81.
- HUANG Yixin, XU Hao, DING Jianle. Research on the development of offshore aquaculture facilities and equipment in China[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(2): 76 – 81. (in Chinese)
- [105] CHU J X, WEI G, HUI H. Parameters measurment of marine power system based on multi-sensors data fusion theory[C]//Communications & Signal Processing. IEEE, 2011.