

冬季结冰海域的抗冰海洋观测浮标系统设计

谢孜源¹, 许 宁⁴, 王铭基¹, 孙珊珊³, 张大勇², 王延林²

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 海洋科学与技术学院, 辽宁 盘锦 124221;

3. 大连理工大学 物理学院, 辽宁 盘锦 124221;

4. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023;)

摘 要: 基于冰与锥体的作用规律和现有的海洋浮标观测技术对抗冰浮标标体和系泊系统、太阳能风能互补发电系统、海洋观测传感器系统、观测数据实时远程传输系统等进行了研究。最终对该系统进行了组装调试和海试, 获得了该海域冬季的气温、海水温盐深、溶解氧、叶绿素、浊度和 pH 值等观测数据。数据分析结果表明, 渤海辽东湾海域的冬季海水参数变化显著, 对海洋生物影响较大。

关键词: 海洋观测; 抗冰浮标; 风光互补发电; 水质信息; 海洋牧场

中图分类号: P715.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0052—07

Design of Anti-ice Ocean Observation Buoy System in Winter Frozen Sea Area

XIE Ziyuan¹, XU Ning⁴, WANG Mingji¹, SUN Shanshan³, ZHANG Dayong², WANG Yanlin²

(1. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China;

2. School of Ocean Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin, Liaoning 124221, China;

3. School of Physics, Dalian University of Technology, Panjin, Liaoning 124221, China;

4. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Based on the interaction law of ice and cone and the existing ocean buoy observation technology against the ice buoy body and mooring system, solar and wind complementary power generation system, ocean observation sensor system, real-time remote transmission system of observation data, etc. In the end, the system was assembled, adjusted and tested in the sea, and the observed data such as air temperature, salt depth, dissolved oxygen, chlorophyll, turbidity and pH value were obtained in winter. The data show that the variation of sea water parameters in winter in Liaodong Bay of Bohai Sea is unstable, which has great impacts on marine organism.

Keywords: ocean observation; ice-resistant buoy; wind-solar complementary power generation; water quality information; marine ranching

随着陆地资源匮乏、人口膨胀等问题的日益严重, 各国将目光投向了海洋, 加快了对海洋的开发和利用。海洋观测是海洋国防、海洋运输、海洋环境、海洋气候的重要研究手段之一。发达国家的海洋环境监测历史长达百年以上。美国早在 20 世纪 80 年代就建立了全国永久性的海洋立体监测系统, 英国、

德国、日本、加拿大等国家也都在其邻近有利害关系的海区及大洋布设了以岸基监测站和浮标为主的海洋监测系统^[1]。全球海洋观测网(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, ARGO)是由美国主导, 欧洲多国、中国等参与的全球性海洋观测项目, 以获取海洋上层温、盐剖面的数据, 提高海洋气候预

报为目的^[2]。美国 Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI) 研究所设计了 MBARI Ocean Observatory System (MOOS) 浮标基海底观测系统^[3-5], 在直径 3 m 的浮标上搭载风机、太阳能板, 通过光电复合缆为海底复合仪器供电, 布放深度 3 000 m。意大利研制的 Cabled Underwater Module for Acquisition of Seismological Data (CUMAS) 系统^[6-7], 用于观测海洋气象和海底地质变化, 该系统搭载了 16 块太阳能板作为发电装置, 额定功率为 100 W, 布放深度 100 m。美国 Ocean Works 公司研制的 Cyprus Coastal Ocean Forecasting and Observing System (CYCOFOS) 海洋预报与观测系统^[8-9], 采用柴油机发电方式为海底仪器供电, 额定功率为 1 kW, CYCOFOS 海洋观测系统采用 VSAT 卫星通信, 数据传输速率达到 1 Mbps, 该系统在水深 2 400 m 的范围开展了布放、回收。

我国早在 20 世纪 60 年代中期就开始着手对海洋浮标的研发。而潜标技术的研究工作始于 20 世纪 80 年代初, 到 90 年代初期, 已研制成功了千米潜标系统、深海潜标系统和浅海潜标系统^[10]。1998 年, 我国山东省科学院海洋仪器仪表研究所研发了 FZF223 海洋资料浮标系统, 最大放水深 200 m, 并首次在海洋监测技术上应用了卫星实时传输浮标数据^[11]。2007 年, 中国科学院海洋研究所在北黄海獐子岛首次投放了 ADCP 组合潜标, 2010 年, 在青岛崂山东部海域针对青岛沿海环境变化和浒苔绿藻发生发展灾害而布放了 1 套 3 m 综合观测研究浮标^[1]。

目前在冰区资源开发面中还面临着众多亟待解决的问题^[12], 而且我国北方环渤海港口多为冬季冰冻港口, 从每年的 11 月至次年 3 月为结冰期, 1 月中旬至 2 月下旬的冰期最为严重。在风和流的作用下形成大密集流冰, 对浮标标体造成损伤, 使浮标移位^[13]。同时, 显形面积小, 供电时间短, 频繁更换浮标等问题愈发突出。为解决这些问题, 本文设计了一套高度标准化、模块化、系列化的抗冰海洋观测浮标系统。该观测浮标系统可以在冬季恶劣的结冰环境下对海洋环境要素进行长期、持续、自动、实时的监测, 同时在海洋气象监测和海洋灾害预警方面也具有重大意义。

1 抗冰海洋观测浮标系统

抗冰海洋观测浮标系统(下文统一简称“冰标”)是一种面向冬季结冰或寒区海域的海洋信息

在线监测浮标系统。该冰标系统包括: 抗冰浮标标体、系泊系统、太阳能风能互补发电系统、海洋观测传感器系统、观测数据远程实时传输系统。监测信息主要包括海水的温度、盐度、深度、浊度、pH 值、溶解氧、叶绿素等参数。图 1 是抗冰海洋观测浮标系统示意图, 该模型系统包括航灯、北斗模块、太阳能板发电模块、气温传感器、海水温度传感器、盐度传感器、深度传感器、多参数水质传感器、叶绿素传感器、数据采集存储模块、抗冰浮体、锚链和锚块等装置。

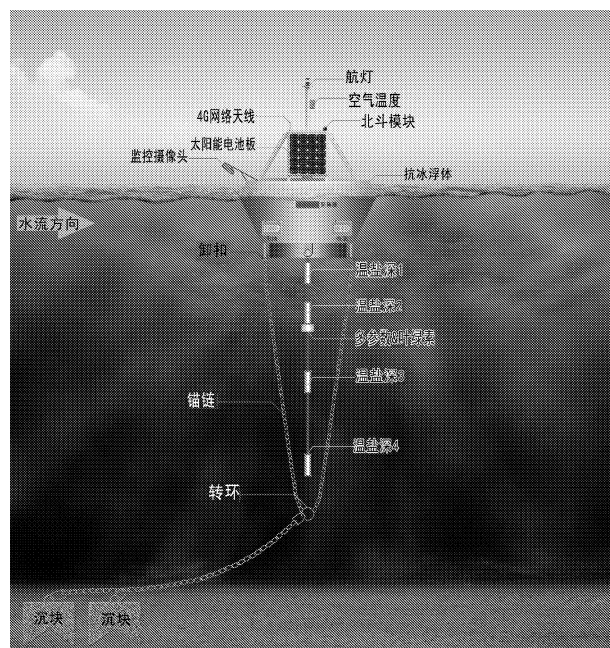


图1 抗冰海洋观测浮标系统示意图程序

1.1 抗冰浮标标体和系泊系统

一般情况下, 冰排在标体前可能产生挤压、弯曲的破坏形式, 而且海冰的弯曲强度远小于其抗压强度, 所以采用合适的浮标结构可以使海冰的破坏形式变为弯曲破坏。此外, 锥体冰载荷随锥角的增大而增大, 海冰的平均断裂长度则随锥角的增大而减小; 当锥角小于 70° 时海冰的破碎模式主要为弯曲破坏, 而当锥角大于 70° 时海冰破坏模式则主要为挤压破碎^[14]。因此, 如图 2 所示, 该冰标标体为钢制结构, 结构强度高, 标体的主体结构由类锥体和柱体结合而成, 锥角为 60° , 使海冰的主要破坏形式变为弯曲破坏, 以满足破冰要求和海浪拍打的强度要求。干湿交替过程会增加氯离子的渗透速率, 增加腐蚀电流, 从而加速腐蚀过程^[15]。因此, 标体表面涂有黄色防腐涂层, 减缓海水对标体的腐蚀。同时黄色涂层在海上形成明显的色差, 减小来往船只与

其碰撞的风险。

标体最大直径 2.5 m,排水量约 1.77 t。整个标体共等分为 8 个水密舱,水密舱为标体提供浮力并满足其抗沉性要求,同时满足《浮标通用技术条件》^[16](JT/T 760—2009)的摇摆周期要求。蓄电池存放在圆柱桶内,为采集仪器供电,同时依靠蓄电池自身重量增加浮标的稳性,降低浮标的重心,达到更好的抗冰、抗风、抗流和导冰效果。标体设计 5 个耳环,其中 2 个在标体上部边缘对称部位,用于冰标的安装和起吊,同时也方便在使用时对冰标检修和维护。冰标顶部安装有航灯、太阳能板、风力发电机。另外 3 个在标体下部(如图 2 所示),以三等分圆的 120°角分布,用于系挂锚链对标体进行系泊。

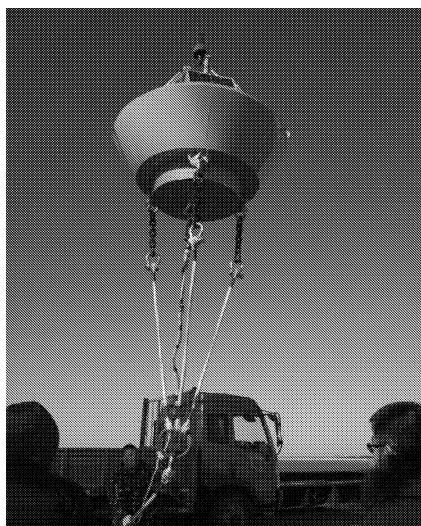


图 2 标体和三点系泊

如图 2 所示,冰标底部的 3 个耳环分别系着三条锚链,为三点系泊方式。采用这样的系泊方式,可以减小每根锚链的张力,增大锚链的安全系数。锚链底部连接锚块。锚块采用粉状水硬性无机胶凝材料,这种材料的锚块强度高、密度大,且具有很强的抗腐蚀性能。本文设计的冰标系统海试地点在辽河口生态保护区,离岸约 10 海里,水深约 7 m ~ 8 m,海底为淤泥和黏性土。在这种海域,“链 + 重块”系泊系统具有减少锚点上拔力,安装、解脱较方便等特点^[17]。

1.2 太阳能风能互补发电系统

常规浮标采用太阳能发电,蓄电池供电,供电期约为 5 个月。但冬季气温较低,常规蓄电池稳定性差^[13]。所以,研究长效稳定的供电系统刻不容缓,本文设计的冰标采用高效能的硅能蓄电池和太阳能风能互补发电系统,降低电源维护周期,增加供电系

统的可靠性。风光互补发电系统主要可分为 4 个环节:发电、控制、储能、送电^[18]。主要包括:光伏发电组件、风机发电组件、逆变器、互补控制器、蓄电池组等。

如图 3 所示,4 个太阳能发电板固定在支架四周,尽可能地增大光照面积,进而增大发电量。本文选用的太阳能板其光电转化率高达 18%,设计电压 18 V,最大电流 2.7 A,每块电池板设计功率 80 W,板长 835 mm,宽 670 mm,厚 30 mm,重量约 6.5 kg,安装平面与地面夹角 60°,使用寿命高达 25 a。本系统的风机设计功率 300 W,设计电压 12 V,净重 9.6 kg,风轮直径 1.35 m,启动风速 3 m/s,安全风速 50 m/s,额定风速 11 m/s。互补控制器:系统电压 12 V,风机输入 300 W,光伏 320 W 输入,采用限压、限流的充电方式,保证在光伏发电或风力发电不足时,通过互补控制器转换为蓄电池供电,同时具有温度补偿和过载、短路保护的作用。逆变器:系统电压 12 V,系统功率 500 W,主要作用是把太阳能板或蓄电池发出的直流电转化为交流电,为监测仪器提供稳定的交流电。蓄电池:采用 4 块光合硅能蓄电池,放电电压 12 V,容量 100 AH/块,使用温度在 -30℃ ~ 60℃ 之间,使用寿命 2 a ~ 3 a。如图 4 所示,蓄电池可以储存太阳能板和风机发出的多余的电能,同时在光伏发电和风力发电均不能满足本系统负载的情况下,蓄电池可以直接给直流负载供电,也可以通过逆变器给交流负载供电。



图 3 太阳能风能互补发电系统实物模型

1.3 传感器系统

本冰标系统主要监测冬季结冰海域的水质情况,为了更好地研究冬季海水水质情况,我们采集了

以下观测数据:海水温盐深、浊度、叶绿素、pH 值、溶解氧等。在选择相应的传感器时需要考虑以下要素:(1)具有良好的性能指标及精度;(2)免维护周期长;(3)携带安装便捷;(4)通用性强;(5)功耗低;(6)供货周期短,价格合理^[19]。

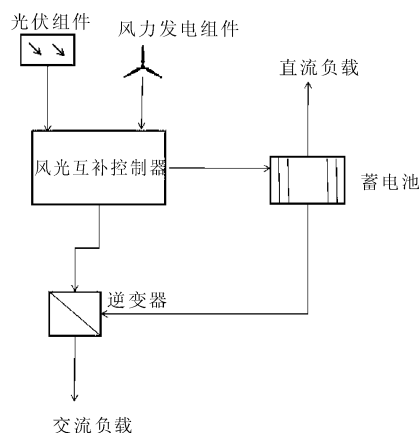


图 4 风光互补发电示意图

辽河入海口距岸约 10 海里处海域落潮水深 4 m ~ 5 m,涨潮水深 7 m ~ 8 m,冬季最大冰厚可达 20 mm,海水盐度约 30PSU (Practical Salinity Unit)。渤海辽东湾冬季盛行偏北浪,波高通常在 0.7 m ~ 1.8 m 之间,寒潮侵袭时最大波高可达 6 m,潮流流速为 100 cm/s,冬季平均风速 6 m/s ~ 7 m/s。根据这些条件,我们选取以下监测仪器作为观测的传感器系统。

盐度传感器:供电电压 12VDC 或 24VDC;用金属钛作外壳材料,具有耐腐蚀、高稳定性等特点;量程 0 ~ 40 ppt (part per thousand),使用寿命 2 a ~ 3 a;通讯接口 RS-485,集成标准 Modbus RTU 通讯协议。

多参数自清洁传感器:供电电压为 12VDC $\pm$ 5%;可同时选配溶解氧、电导率/盐度、浊度、氨氮、pH、ORP 等数字传感器,本系统只选取溶解氧、盐度、浊度、pH 这 4 组参数进行监测,其中溶解氧传感器的量程 0 ~ 20 mg/L,精度 $\pm$ 0.6 mg/L,分辨率 0.01 mg/L,浊度传感器量程 0 ~ 200 NTU,分辨率 0.1 NTU,盐度传感器量程 0 ~ 70PSU, pH 传感器量程 0 ~ 14 pH,分辨率 0.01 pH;通讯接口 RS-485,集成标准 Modbus RTU 通讯协议。

叶绿素传感器:量程 0 ~ 400 μ g/L (或 0 ~ 100 RFU),具有自动清洁刷,可以有效消除气泡,减小污垢对测量的影响,防护等级 IP68,最大测量水深可达 20 m,输出 RS-485 信号,支持 Modbus RTU

通讯协议。

温深传感器:采用投入式静压液位变送器,可同时测量海水的温度和深度,深度量程 0 ~ 200 m,温度量程 -20 $^{\circ}$ C ~ 70 $^{\circ}$ C,供电电压为 12 VDC ~ 32 VDC,防护等级为 IP68,具有抗过载能力强、防浪涌电压、抗腐蚀性能优良、过压过流保护、反向极性保护、稳定性高、抗干扰能力强的特点。

1.4 观测数据实时远程传输系统

观测数据实时远程传输系统主要由数据采集模块、数据处理模块、数据存储模块和数据发送模块组成。数据采集系统通过太阳能风能互补供电系统的供电,利用数据采集模块进行数据采集工作。各个传感器输出的信号均为 485 信号,每个传感器都有各自的地址。现场各监测点数采器以 485 总线“手拉手”模式相互连接。

数采器通过预先设置好的程序向各个传感器发出采集命令,对应的传感器接收到采集命令后反馈给数采器原始数据。数据采集模块把原始数据进行解析,获得各个传感器的实时数据。一方面,这些实时数据可以发送给数据存储模块,存储模块把接收数据时对应的本地时间和传感器数据一同储存在本地储存卡内。另一方面,数据处理模块把传感器数据发送给数据发送模块,数据发送模块接收到传感器数据后,对数据进行打包处理,并把数据按设置好的方式发送给北斗通讯终端。北斗通讯终端通过北斗卫星将数据发送给岸站接收中心。岸站接收中心可以将数据进行解压、还原等操作,获取不同时间的各个监测位置的数据,同时可以通过程序将数据进行实时的显示、本地的储存等操作。

2 系统测试

选取辽河口生态保护区,离岸约 10 海里海域,对抗冰海洋观测浮标系统进行测试,测试内容包括:标体的强度、抗沉性、摇摆性;太阳能风能互补发电系统的可靠性、持续性、安全性;传感器系统的准确性、稳定性、精度;观测数据实时远程传输系统的及时性。2018 年冬季在现场安装好冰标,采集了 5 d 的数据,证明冰标的各系统均运行正常。

为了验证该抗冰海洋观测浮标系统的可行性,研究人员在渤海辽东湾离岸约 10 海里处进行了海上测试。海试得到了 2018 年 12 月 24 日至 12 月 28 日的观测数据,通过 Origin 绘制以下深度,水温,气温,盐度,溶解氧, pH, 叶绿素, 浊度关于时间的折线图。

如图 5 所示, D1、D2、D3、D4 分别代表了四个传感器的深度, T1、T2、T3、T4 分别为对应四个位置的水温, Ta 为海面的气温。由图可推出, 在从水面到水下 12 m 的深度内, 浮标所在深度和相应水温及其变化趋势基本相同, 同时水温保持在 0℃ 附近。在

气温降低 4℃ 的条件下, 水温基本不变, 只呈缓缓下降趋势, 同时在气温升高 4℃ 的条件下, 水温同样基本未发生变化; 并且在气温回升后, 水温也停止下降。而从垂直角度观察, 随着深度的增大, 水温有升高的趋势。

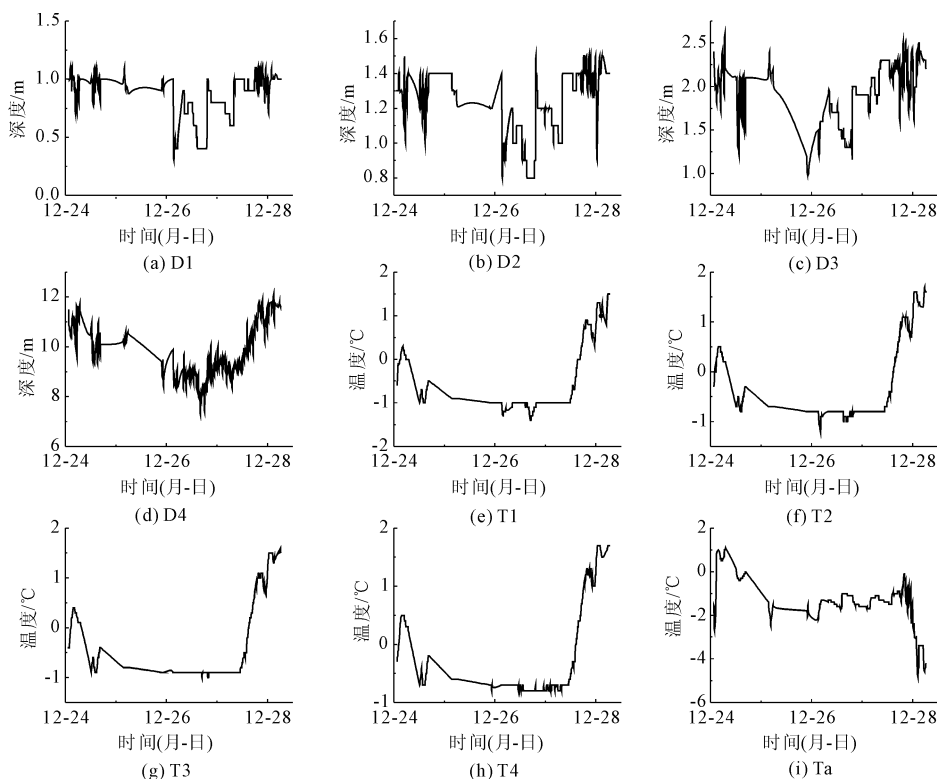


图 5 测试海域水深、水温和气温变化趋势图

总体的水温变化较小可能是由于在大气压下, 水温最低为 0℃ (海水则稍低一些), 此时水体已经到达凝点而结冰。结冰后释放的热能阻止了海冰的进一步形成, 从而使水温维持在冰点。具体而言, 由于初冰期海面上已经结成较薄的冰层, 水温的变化由热传递影响, 与水体直接接触的冰层由于与广大水体有直接接触从而发生的热传导始终保持在 0℃ 附近; 而热对流则由于冰层的存在阻绝了空气与水体的热交换, 使热量交换发生在冰层与大气之间, 而实际效应则体现在了在相变之上, 而非温度, 因此热对流对水温并无影响; 热辐射主要来自于白昼阳光照射, 但是由于冰层冬季表面覆雪, 颜色呈白色且无法融化, 从而反射率较大, 透射率较低, 水体通过热辐射获得的能量有限, 且如果获得热量, 也很快通过与初冰期冰层的热交换重新到达 0℃; 因此水体水温变化较小。而水温随着垂直深度的上升的原因, 推测是越靠近冰层的水体, 由于与冰层的热交换越剧烈, 因此越靠近零度; 同时由于处于冬季初冰期,

垂直角度上波浪以及入海口河水的注入对水体混合的影响减弱, 不同深度水层内质点的上下浮动相比平常较为缓和, 因此不同深度水层之间的混合程度不大, 从而形成了仅由热传导为温度变化因素的温度梯度; 因此, 随着深度越大, 温度具有较为均匀的升高趋势。

图 6 中的 S1、S2、S3、S4 和 Ss 则反映了在五个不同监测位置下, 所对应盐度的变化, 从图中可以观察到, 盐度在 20‰ ~ 32‰ 之间波动, 其中在 26 日午至 27 日结束波动较为剧烈, 而总体稳定在 24‰ ~ 30‰, 符合渤海近岸水体盐度特征^[20]。但从图 6 中的数据分析, 造成这种波动较大同时盐度偏低的情况可能是由于测量位置位于辽河入海口附近, 淡水注入海水中, 稀释了海水的盐度, 并且处于冰期, 每日每时河流入海口处的径流量不同, 造成了盐度的较大波动。然而, 数据中的这些尖峰很有可能并非自然测量得出, 而是测量仪器由于热滞现象^[21]所产生的误差和由于测量间隔时间较大导致盐度在每个

测量点之间变化过大而导致的系统误差两者导致。因此实际上,数据中盐度的波动并不会如图中波动如此剧烈。在河口海域,人类活动造成河口营养盐增加,在地球化学的作用下河口及其附近海域持续富营养化主要是由于N和P两种元素化合物的排放增高所导致的。而营养盐的变化与盐度的变化有着较高的相关度^[22]。考虑到盐度剧烈变化的时间里,叶绿素也有较大的波动幅度,这揭示了在河口海域盐度的剧烈变化与水体的富营养化有着较大关系。

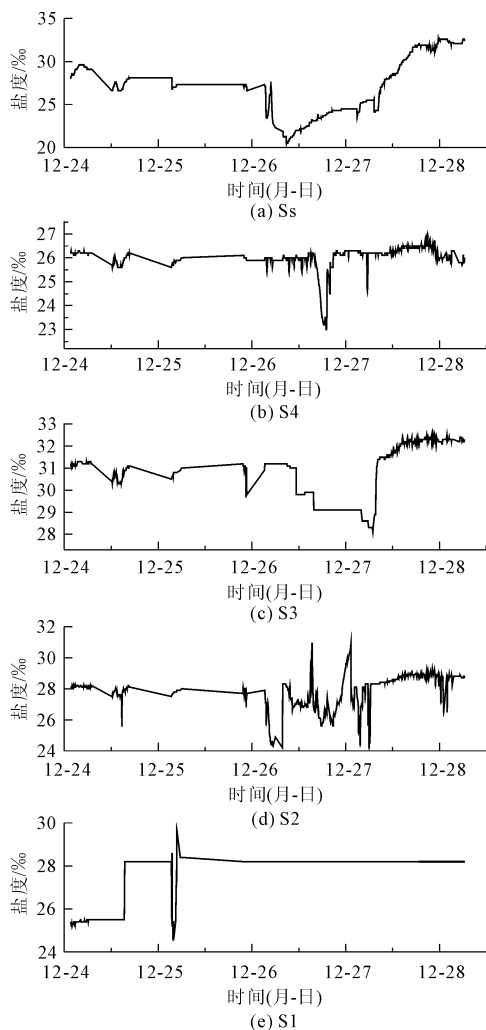


图6 测试海域盐度变化趋势图

测量位置溶解氧保持在9 mg/L附近,伴随有1 mg的上下浮动,由于该海域在此时已处于初冰期,溶解氧并未表现出具有特征的日变化趋势^[23],且测量位置处于海平面1 m~2 m深度,该区域溶解氧对该区域主要活动生物,如浮游植物影响较小,且处于初冰期,不需过多考虑;pH则基本保持在8~9之间,始终处于海水pH值正常的波动范围,但是由于

测量时间短暂并不能以渤海辽东湾历年的pH年际变化趋势进行相关分析^[24];叶绿素含量在12月26日至27日有较大波动,最高达到了4 μg/L~5 μg/L,其余时间则处于较低水平,符合遥感观测结果^[25]。

研究结果表明浊度在12月24日从较低水平升至500 NTU附近,并保持到26日凌晨,后迅速升高,并波动剧烈,至27日清晨结束波动,在28日重新降回较低数值,该数值尚在测量可信度之内^[26]。考虑到该浊度波动时间与图6中各盐度剧烈变化时间以及溶解氧与叶绿素波动时间吻合,推测尽管处于初冰期,临海污水在形成径流的同时,大量浮游植物在其中生长,近岸的污水被排入海水后,使得盐度在该时间段波动较大,同时由于浮游植物的光合作用,溶解氧有较大波动,叶绿素也有较大增长。

综上所述,临海径流由于污水排入后再注入海湾中,在局部海域将使盐度、溶解氧、叶绿素、浊度产生较大变化,然而这些具体参数对海洋生态以及渔业等会造成怎样的影响则需要进一步分析。

3 总结

针对寒区低温、结冰的特点,将抗冰标体和系泊技术、太阳能风能互补发电技术、海洋观测传感器技术和数据远程传输技术结合到一起,设计了冬季结冰海域抗冰海洋观测系统。详细介绍了这四项技术的具体内容以及在该观测系统中的关键作用。本观测系统具有抗冰性、成本低、易维护、耗能低、免布线等优点,可以对冬季结冰海域进行稳定、持续、实时的养殖环境监测,提高养殖产品的质量,同时给出科学的养殖方法,对海洋牧场的建设具有重大意义。

参考文献:

- [1] 戴洪磊,牟乃夏,王春玉,等. 我国海洋浮标发展现状及趋势[J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(2): 118-121, 125.
- [2] 张少伟,杨文才,辛永智,等. 浮标基海洋观测系统研究进展[J]. 科学通报, 2019, 64(Z2): 2963-2973.
- [3] Chaffey M, Mellinger E, Paul W. Communications and power to the seafloor: MBARI's Ocean Observing System mooring concept[C]//Oceans. IEEE, 2002.
- [4] MBARI's buoy based seafloor observatory design[C]//Oceans. IEEE, 2005.
- [5] Paul W, Bentley D, Chaffey M, et al. Electrical and electro-optical mooring links for buoy based ocean observatories[C]// International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables & Related Technologies. IEEE,

- 2003.
- [6] Giovanni Iannaccone, Sergio Guardato, Maurizio Vassallo, et al. A new multidisciplinary marine monitoring system for the surveillance of volcanic and seismic areas[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(2): 203-213.
- [7] Umberto, Tammaro, Maurizio, et al. A first GPS measurement of vertical seafloor displacement in the Campi Flegrei caldera (Italy) [J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 2014, 276: 145-151.
- [8] Georgiou G, Clark A M, Zodiatis G, et al. Design of a prototype Tsunami Warning and Early Response system for Cyprus - TWERC[C]// *Oceans. IEEE*, 2010.
- [9] Kocak D M, Painter H, Anderson G. Anode design and analysis for an undersea cabled observatory with a seawater ground[J]. *IEEE Oceans*, 2011, 1-7.
- [10] 惠绍棠, 霍树梅. 中国海洋仪器设备研究发展的历史回顾[J]. *海洋技术*, 1998(4): 3-8.
- [11] 蔡树群, 张文静, 王盛安. 海洋环境观测技术研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2007(3): 76-81.
- [12] 王国军, 李书兴, 资林钦, 等. 海冰单轴压缩强度影响因素分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(3): 241-247.
- [13] 孔令臣, 刘祥玉, 阚卫明, 等. 冰区长效灯浮标系统[J]. *中国港湾建设*, 2014(7): 50-53.
- [14] 龙 雪, 宋 础, 季顺迎, 等. 锥角对锥体结构抗冰性能影响的离散元分析[J]. *海洋工程*, 2018, 36(6): 92-100.
- [15] 洪 波, 黄 一, 吴智敏. 干湿交替环境对海洋钢腐蚀疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(5): 136-140.
- [16] 王如政, 颜承志. 冰冻港口四季通用灯浮标研究与设计[J]. *港工技术*, 2017, 54(1): 73-78.
- [17] 吴 思, 郭宝中. 两点“链+重块”系泊系统的分析[J]. *中国海上油气. 工程*, 1997(3): 10-15, 3-7.
- [18] 皇甫宜耿, 安晓彤, 马瑞卿, 等. 离网型风光互补发电系统多模态能量控制与管理[J]. *西北工业大学学报*, 2013, 31(3): 470-475.
- [19] 李 晴. 多参数海洋浮标监测系统研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- [20] 隋俊鹏, 李子牛, 王兆宇, 等. 2018—2019 年冬季渤海冰情分析[J]. *海洋预报*, 2019, 36(3): 49-55.
- [21] 肖 波, 温明明, 郭斌斌. 温盐深测量系统误差源分析及处理[J]. *海洋信息*, 2014(3): 7-9.
- [22] 辛 明. 长江口海域关键环境因子的长期变化及其生态效应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [23] 李兆钦, 李 欣, 孙利元, 等. 大沽河口底层海水溶解氧浓度分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(9): 23-33.
- [24] 石 强, 杨朋金. 渤海冬季 pH 年际时空变化与机制[C]//中国环境科学学会. 2014 中国环境科学学会学术年会(第十二章). 中国环境科学学会: 中国环境科学学会, 2014: 10.
- [25] 许士国, 富砚昭, 康萍萍. 渤海表层叶绿素 a 时空分布及演变特征[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(6): 898-903, 924.
- [26] 丁梦娇. 基于多源卫星的渤海黄度分布特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.