

基于 FerryBox 的渤海海峡水质低成本长期自动监测

侯朝伟, 唐 诚, 邹 涛, 刘 欣, 张 华

(中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264005)

摘要: FerryBox 是一套全自动、实时的水生生态监测系统, 具有多参数、低维护、低成本、监测覆盖范围广、可持续性强等诸多优点。2015 年 10 月~2016 年 7 月, 作者通过将其安装在一条频繁往返于烟台-大连之间的货船上, 实现了 10 个月的渤海海峡水质低成本长期自动监测。监测结果表明, 渤海海峡水环境因子在时空分布上存在显著的南北差异, 秋季海峡南部海域的表层浊度及 pH 均高于中部及北部海域; 冬季海峡北部海域的表层温度、盐度和浊度均大于南部海域; 进入春季以后海峡中南部海域为表层叶绿素 a 浓度高值区。季风、黄海暖流以及渤海环流等因素是造成渤海海峡水环境因子南北差异的主要原因。春、夏季渤海海峡营养盐监测结果表明, 渤海海峡营养盐的时空分布具有明显的季节性和区域性特征, 在时间变化上整体呈现初春和夏末较高, 在空间分布上整体呈现海峡两侧高于海峡中部。海底冷水团颗粒物的分解、藻类繁殖、地表径流以及渤海环流等, 是影响渤海海峡春、夏季营养盐时空分布的重要因素。春季渤海海峡浮游生物生长受硅和磷的双重限制, 夏季主要受磷限制。

关键词: FerryBox; 渤海海峡; 水质; 水环境因子; 营养盐

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)05-0059-12

DOI: 10.11759/hyxx20161019003

渤海海峡位于黄海和渤海、山东半岛和辽东半岛之间, 是黄海与渤海的分界线^[1]。它不但是黄渤海水体和物质交换的唯一通道^[2-3], 也是渤海长距离洄游生物进出渤海的必经之路, 更是交通部确定的“四区一线”重点水域之一^[4], 是各类船舶进出渤海各港口的必经水域。2009 年 12 月国家又全面启动了“渤海海峡跨海通道建设发展战略规划”的研究^[5], 跨海通道的建设工作可能近在咫尺。因此, 其独特的地理位置条件决定了针对该海域开展的各项研究不但具有较强的科学意义, 而且具有较大的战略意义。

渤海海峡作为连接黄、渤海的通道, 其海流活动频繁, 水团相互作用剧烈, 加上海峡南北两面紧邻大连、烟台等工农业发达的经济区, 生态环境受人为活动影响显著, 导致其海洋生态环境复杂多变^[6-7], 因此, 不乏有诸多学者对该海域的地质地貌^[8-10]、水动力特征^[2, 11]、沉积物运输^[12-13]等方面进行研究。关于该海域生态环境特征方面的调查和研究也常见报道^[14-16], 但多为阶段性或者季节性的海上布点调查, 且不同的调查航次之间时间跨度较大, 无法实现空间尺度上的无间断以及在时间尺度上的可持续性, 因此并不能获取整个渤海海峡断面的水文水质长期的持续性动态变化。作者利用一套全自动的水生生态监测系统-FerryBox, 实现了 10 个月的渤海海峡断

面水质的低成本自动监测, 分析了 2015 年秋季至 2016 年夏季渤海海峡水质的时空动态变化。

1 材料与方法

1.1 关于 FerryBox

随着全球陆地资源日趋紧张, 深入了解和开发海洋资源成为世界各国可持续发展战略的重要组成部分。但由于目前的海洋水质监测设备多为定点观测设备, 空间覆盖范围较小。走航式监测设备也多为短时间、短距离监测, 无法实现长期、可持续性监测, 另外监测数据大多也无法实现长距离实时传输, 这成为制约深入了解海洋生态环境变化的重要因素^[17-19]。因此, 为了解决这一难题, 许多水生

收稿日期: 2016-10-19; 修回日期: 2017-01-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB453301); 国家自然科学基金重点项目(41530966); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)

[Foundation: National Key Basic Research Program of China (973), No.2015CB453301; Key Program of National Natural Science Foundation of China, No. 41530966; Key Deployment Project of Chinese Academy of Sciences, No. KZZD-EW-14]

作者简介: 侯朝伟(1988-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事海洋渔业资源与生态学, 电话: 0535-2109260, E-mail: hewhew@126.com; 唐诚, 通信作者, E-mail: ctang@yic.ac.cn

生态监测设备被不断研发和测试,但大多未达到理想的效果^[18]。FerryBox 是一套全自动、实时的水生生态监测系统,与传统的调查设备及调查方法相比,它具有多参数、低维护、低成本、监测覆盖范围广、可持续性强等诸多优点。可通过将其安装于考察船、货船甚至渔船上,依靠船只在两地的频繁往返或较高的出航频率,来实现海洋、河流及湖泊等水域低成本长期可持续性监测,也可通过将其安装在水质监测站或码头上的集装箱中等进行长期定点监测。其

结构设计主要包括水路循环系统、传感器、数据存储和传输系统、自动清洗系统四大部分(图 1),其完美的水路循环系统设计实现了设备可在干燥的室内或机舱内运行,多型号和多参数的高精度的传感器确保了其监测内容多样、监测数据可靠,监测数据由大容量的存储硬盘实时存储,当船抵达近岸或者停靠码头时,可通过网络实现监测数据长距离无线传输,自动清洗系统的设计在极大程度上减少了设备维护的工作量。

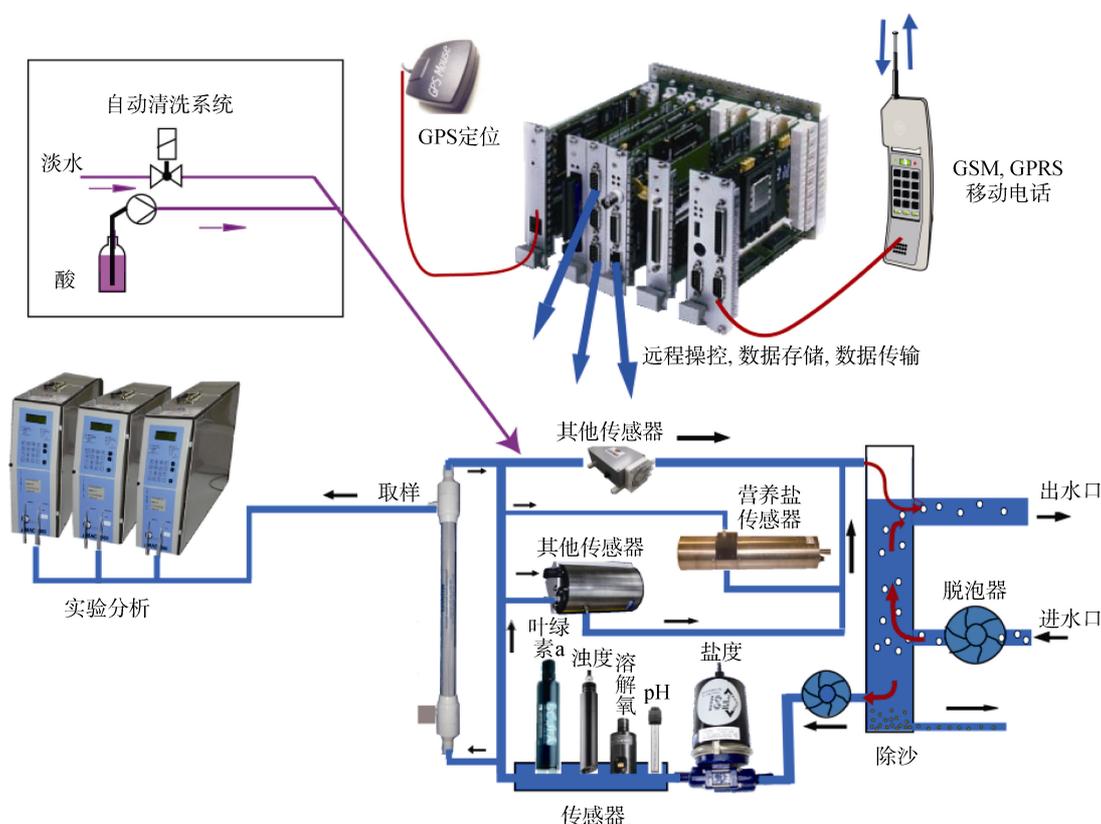


图 1 FerryBox 结构原理示意图(改自文献[18])

Fig. 1 Schematic representation of the FerryBox configuration (Modified from[18])

1.1.1 水路循环系统

FerryBox 安装完成以后,水由机舱内的潜水泵抽取,可通过流量控制器控制适量的水进入水路循环系统,多余的水由排水口直接排出^[17-18]。进入水路循环系统的水先进入脱泡器去除气泡,再依次经过盐度传感器单元、pH 传感器单元、溶解氧传感器单元、浊度传感器单元、叶绿素传感器单元等不同的传感器单元,各参数测定完毕后,水由排水口排至机舱外,从而完成一个水路循环。另外,该系统设有水路分支,可供采集水样进行数据校准以及其他参数的室内分析。在海上风力和海浪较大情况下,脱泡

器的设计可去除水中的气泡,以保证溶解氧、浊度等参数测定结果的准确性。另外,一些 FerryBox 还可配有泥沙沉降系统,可去除水中泥沙。

1.1.2 传感器

多种高精度的传感器单元通过水路循环系统依次连接,形成了 FerryBox 多参数、高精度的特点,常规的水质参数传感器包括:温度传感器(Excell, 美国)、盐度传感器(Excell, 美国)、pH 传感器(CPS 11, 德国)、叶绿素传感器(SCUFA-II, 美国)、浊度传感器(TurbiMax W CUS 41, 德国)、溶解氧/饱和度传感器(Optode 3830, 挪威)。另外还可根据需求,添加如

测定营养盐(铵氮、硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐)的传感器(Micromac 1000, 意大利)、测定CDOM的传感器(Cyclops-7, 美国)以及测定其他化学参数的传感器。

1.1.3 数据存储和传输系统

FerryBox的数据测量频率为6次/min, 系统自动将6次测量结果进行平均作为最终结果进行存储, 数据记录和存储频率为每分钟1次。通过GPS设备对测量结果进行精确定位, 其精确度可达到 1×10^{-6} 。各项参数的最终测量结果和实时动态变化可通过PC液晶显示屏实时显示。无线传输系统的设计可保证监测数据能被远距离实时传输, 当船抵达近岸或者停靠码头时, 可通过远程操控进行仪器运行状况的检测、数据质量的检测以及数据下载。

1.1.4 自动清洗系统

仪器运行结束后, 打开淡水阀门, 仪器即可进行自动清洗。该系统具备硫酸(pH=2)及草酸存储单元, 混有硫酸和草酸的淡水可去除循环水路内的铁锈以及微生物, 从而避免传感器表面的铁锈及微生物的富集对测定效果造成影响^[17-18, 20]。自动清洗系统的设计, 可保证FerryBox每次运行结束后都会得到及时的清洗, 而且直至下一次仪器运行开始之前, 水路循环系统内会一直充溢着干净的淡水。这不但可使测量结果的准确性得以有效保证, 也在一定程度上减少了人工维护的工作量。

1.2 监测海域及监测内容

2015年10月中旬, 作者将FerryBox-PocketBox(4H-Jena, 德国)安装在往返于烟台芝罘岛和大连大连湾港之间的货轮-“锦川9号”上, 借助货轮在渤海海峡之间的频繁往返, 实现渤海海峡水质低成本长期自动监测, “锦川9号”的航行轨迹如图2所示。监测周期依据货轮的航行计划而行, 平均5d往返1次, 截至2016年7月底共获取92组单程监测数据。由于货轮在航行过程中潜水泵只能取得表层水(2.5~4.5 m水深), 因此FerryBox的监测内容主要包括: 表层水温、盐度、pH、叶绿素、浊度、溶解氧以及饱和度7项。2016年4月、5月、6月和8月, 通过FerryBox水路循环系统的水路分支每月进行1次营养盐样品采集, 样品采集方法按《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)进行。在实验室内采用连续流动分析仪(AA3)进行硝酸盐(NO_3^- -N)、亚硝酸盐(NO_2^- -N)、铵盐(NH_4^+ -N)、活性磷酸盐(PO_4^{3-} -P)和活性硅酸盐

(SiO_3^{2-} -Si)的测定, 共测定40组样品。溶解无机氮DIN为 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和 NH_4^+ -N浓度之和。

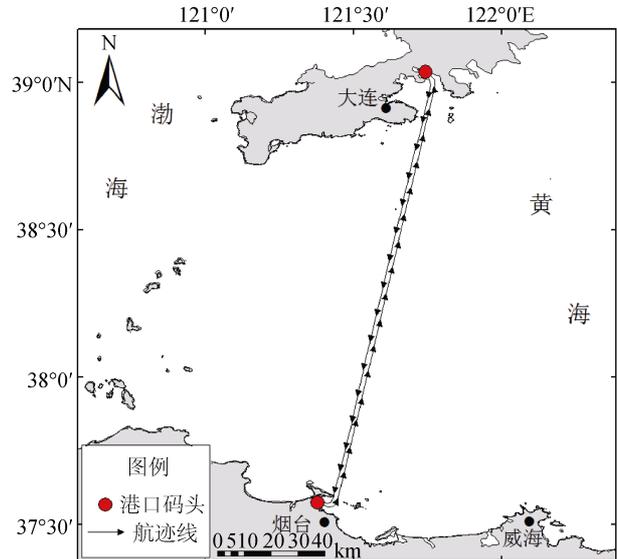


图2 货轮-“锦川9号”航行轨迹

Fig. 2 The trajectory of the cargo ship-“JinChuan 9”

1.3 数据检验

为检验FerryBox监测数据的准确性, 通过FerryBox水路循环系统的水路分支取样进行实验分析, 并将分析结果与FerryBox监测数据对比, 进行数据检验。2016年4月和6月共进行2次取样。除水温现场用水温计测量外, 盐度(盐度计法)、pH(pH计法)、溶解氧(碘量法)及叶绿素a(丙酮萃取分光光度法)均为室内实验分析。

2 监测结果与分析

2.1 渤海海峡水环境因子时间动态变化

从FerryBox在渤海海峡的监测结果来看, 各项水环境因子在时间变化上呈现出明显的季节性差异(图3~图8)。2015年10月~翌年7月, 渤海海峡平均表层水温分布范围在 $4.26 \sim 24.56^\circ\text{C}$, 平均为 10.92°C 。水温自10月中旬开始持续下降~翌年2月, 其最低水温出现在2月下旬, 最低水温为 1.48°C 。进入3月以后, 水温开始逐渐上升。平均表层盐度分布范围在 $31.26 \sim 32.15$, 平均为 31.94 , 夏季和秋季的盐度明显低于冬季和春季。进入6月中旬以后, 盐度的下降速度明显增大, 7月最低盐度仅为 30.48 , 这多与夏季雨水充沛, 大量淡水注入有关。

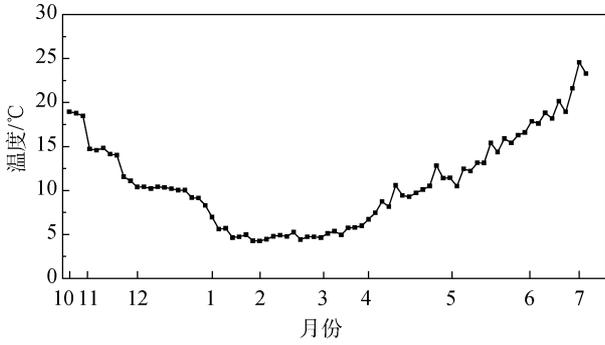


图3 渤海海峡平均表层水温随时间动态变化

Fig. 3 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface temperature of the Bohai Strait

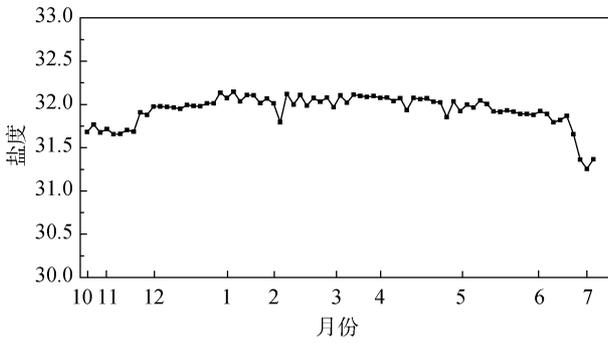


图4 渤海海峡平均表层盐度随时间动态变化

Fig. 4 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface salinity of the Bohai Strait

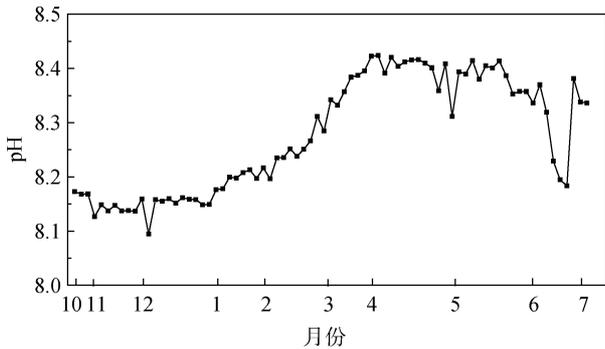


图5 渤海海峡平均表层 pH 随时间动态变化

Fig. 5 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface pH of the Bohai Strait

渤海海峡平均表层 pH 分布范围在 8.09~8.42, 平均为 8.26。从其变化趋势来看, pH 的季节性差异较为明显, 秋冬季 pH 相对较低, 平均为 8.15。冬季至翌年春季随着时间的推移呈持续的上升趋势, 春季平均 pH 可达到 8.38, 5月中旬以后才开始呈现下降趋势, 持续下降直至 6月底的 8.18, 之后又开始上升。平均表层溶解氧浓度分布在(221.23~407.90) mmol/L, 平均为 328.490 mmol/L, 秋冬季~翌年春季溶解氧浓度

呈持续上升趋势, 可持续上升至翌年 3 月底。春季溶解氧浓度相对较高, 平均浓度可达 351.40 mmol/L, 进入 4 月以后开始呈现逐渐下降趋势。

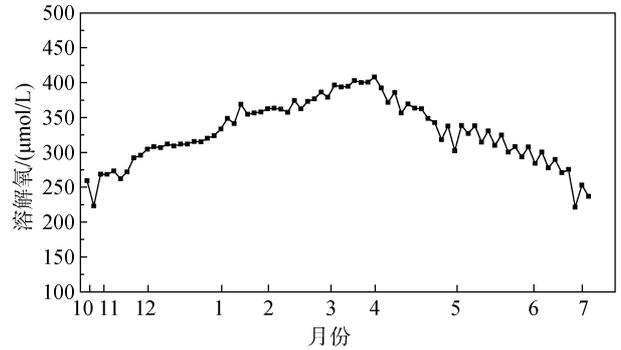


图6 渤海海峡平均表层溶解氧随时间动态变化

Fig. 6 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface dissolved oxygen of the Bohai Strait

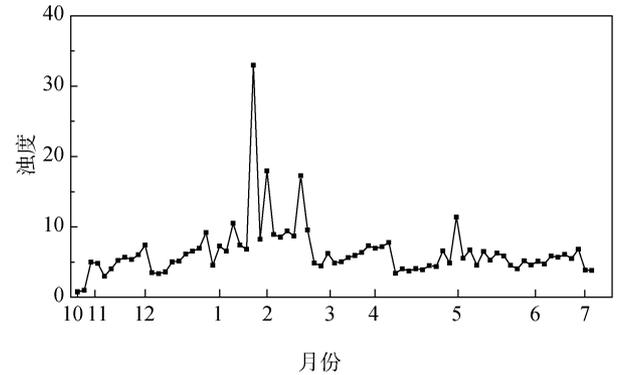


图7 渤海海峡平均表层浊度随时间动态变化

Fig. 7 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface turbidity of the Bohai Strait

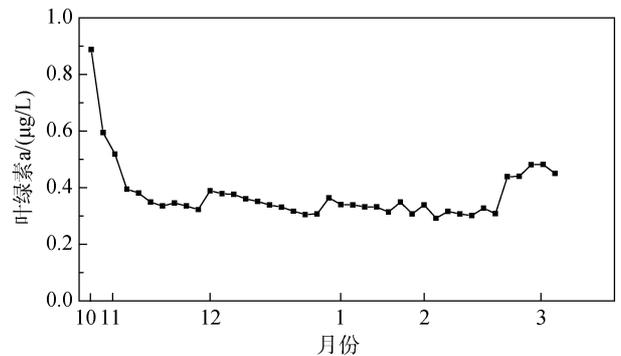


图8 渤海海峡平均表层叶绿素-a 随时间动态变化

Fig. 8 Seasonal/monthly dynamics of the sea surface chlorophyll-a of the Bohai Strait

浊度主要反映水体中的悬浮体特征, 悬浮体分布则与径流、环流、潮流、波浪及水深等动力因素密切相关^[21]。渤海海峡平均表层浊度分布在(0.76~

32.97) FTU, 平均为 6.39 FTU, 冬季浊度明显要高于其他季节, 这多与渤海海峡冬季大风的搅拌有关。2015 年 10 月~翌年 3 月, 平均表层叶绿素-a 浓度分布在(0.291~0.887) $\mu\text{g/L}$, 平均为 0.387 $\mu\text{g/L}$ 。秋季 10 月~冬季 12 月叶绿素-a 浓度呈持续的下降趋势, 冬季平均叶绿素-a 浓度维持在(0.291~0.440) $\mu\text{g/L}$, 2 月底以后随着水温逐渐升高, 藻类开始繁殖, 叶绿素-a 浓度开始呈现上升趋势。

2.2 渤海海峡水环境因子时空分布特征

从渤海海峡各项水环境参数的时空分布来看, 各项水环境因子同样具有明显的空间分布差异, 且具有明显的季节性和区域性特征。进入冬季以后, 随

着水温的不断降低, 渤海海峡表层水温空间分布差异也不断显著, 1~3 月海峡中部表层水温要高于海峡两侧水温, 且海峡南部近烟台一侧海域表层水温明显低于北部近大连一侧海域。冬季受黄海暖流的影响, 海峡两侧海域表层水温温差可达 1.50 $^{\circ}\text{C}$ 。进入 4 月以后, 随着水温不断上升其空间分布差异也逐渐减弱。渤海海峡表层盐度时空分布差异也十分显著, 秋冬季海峡南部海域表层盐度明显低于海峡北部海域, 受冬季黄海暖流的影响, 12 月~翌年 4 月海峡南北表层盐度差异尤为明显。表层溶解氧在空间分布上并无明显的南北差异, 冬季 1 月~春季 3 月整个渤海海峡的溶解氧浓度明显要高于其他月份(图 9)。

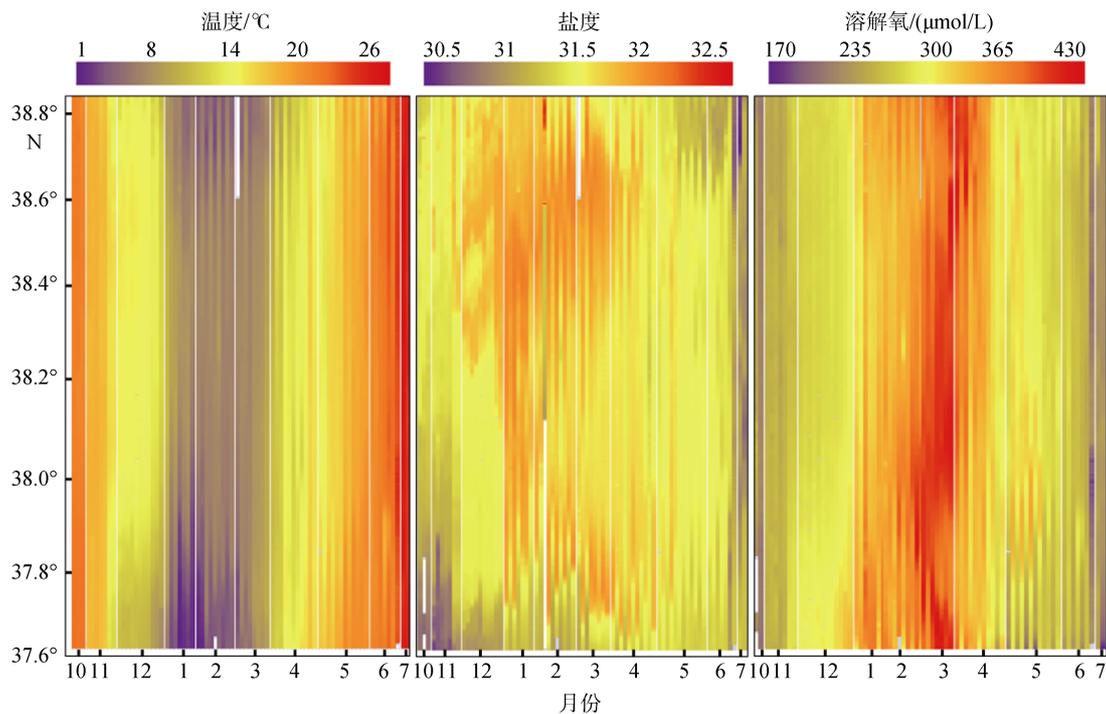


图 9 渤海海峡表层温度、盐度及溶解氧时空动态变化

Fig. 9 Spatiotemporal dynamics of the sea surface temperature, salinity, and dissolved oxygen of the Bohai Strait

秋季 10~11 月, 渤海海峡南部海域表层浊度要高于中部及北部海域, 受冬季大风的影响, 1~2 月海峡中北部海域表层浊度出现明显的高值区。秋季渤海海峡表层叶绿素-a 含量相对较高, 但南北分布差异并不显著, 冬季表层叶绿素-a 含量明显降低, 海峡南部海域略高于中北部海域。进入春季以后, 随着水温的升高浮游生物开始大量繁殖, 叶绿素-a 含量也逐渐上升, 海峡中南部海域出现了表层叶绿素-a 的高值区。秋季 10 月~冬季 12 月, 渤海海峡表层 pH 相对较低, 海峡南部海域明显高于中部及北部海域,

进入 1 月以后海峡中部及北部海域表层 pH 升高, 南北分布差异也逐渐消失。春季渤海海峡表层 pH 相对较高, 中部海域 pH 略高于海峡南北两侧海域(图 10)。

2.3 数据检验

FerryBox 监测数据和实验分析数据对比结果如图 11 所示。从对比结果来看, 由于 pH 变化范围较小, 两者数据对比相对离散, 但两者数据变化趋势一致, 相关系数达到 0.60 以上。温度、盐度及溶解氧数据相关性极高, 相关系数均达到 0.95 以上, 斜

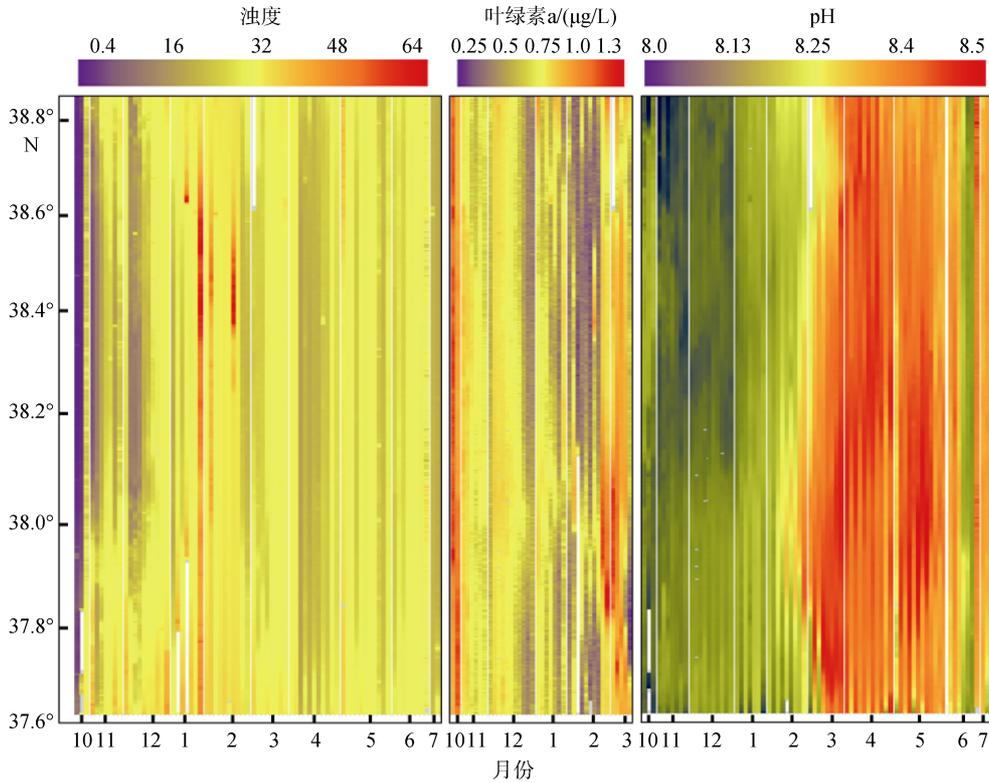


图 10 渤海海峡表层浊度、叶绿素 a 及 pH 时空动态变化

Fig. 10 Spatiotemporal dynamics of the sea surface turbidity, chlorophyll a, and pH of the Bohai Strait

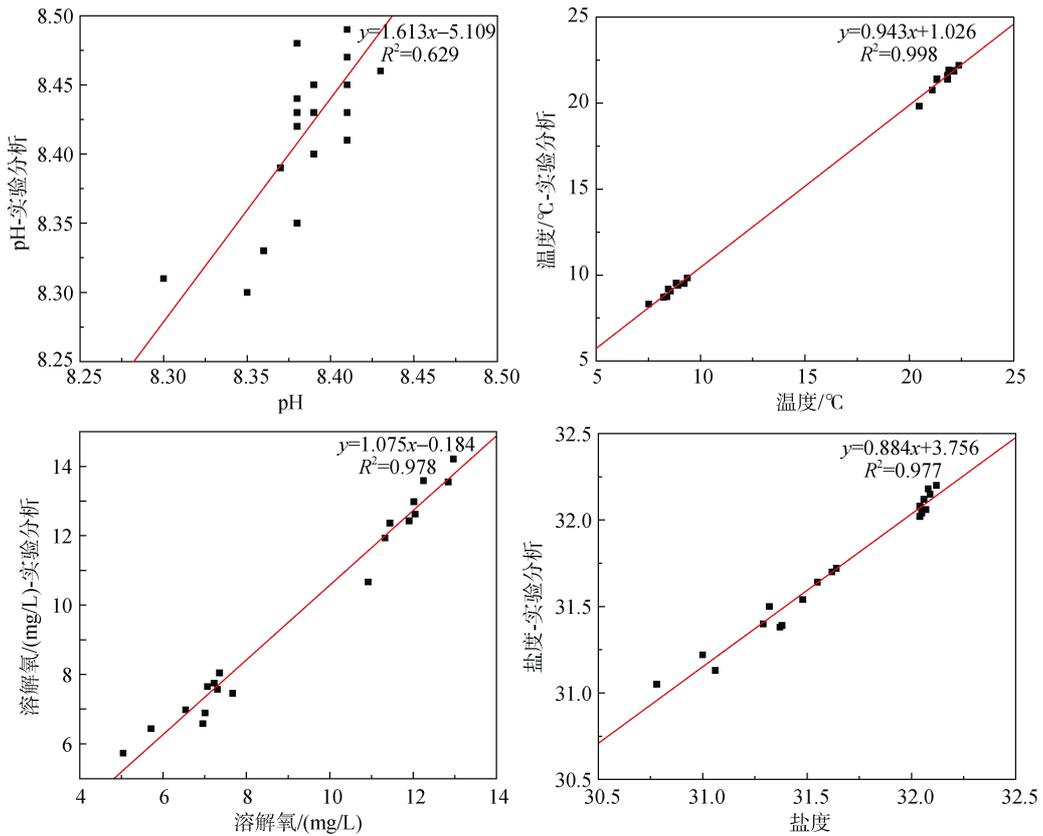


图 11 FerryBox 监测数据和实验分析数据对比

Fig. 11 Comparison of FerryBox data with bottle samples analyzed in the lab

率均接近于 1, 表明了 FerryBox 监测数据与实验分析数据较为接近, 进而说明了 FerryBox 的监测结果较高的准确性。

2.4 渤海海峡春、夏季表层营养盐的时空变化及其营养结构特征

氮、磷和硅是海洋浮游植物生长繁殖所必需的营养元素, 与海洋初级生产力及环境质量有着密切的关系^[22-23], 渤海海峡春、夏季营养盐时空变化如图 12 所示, 其含量和分布具有明显的季节性和区域性特征, 变化趋势整体呈现初春和夏末较高, 近岸海域高于中部海域。DIN 春季平均质量浓度为 0.131 mg/L, 夏季平均质量浓度为 0.110 mg/L, NO_3^- -N 为 DIN 的主要形态, 分别占 DIN 的 88.55%和 85.45%。4 月和 8 月平均 DIN 浓度相对较高, 且海峡北部海域要高于中部

和南部海域。 NO_3^- -N 春季平均质量浓度为 0.116 mg/L, 夏季平均质量浓度为 0.094 mg/L, 其变化趋势与 DIN 变化趋势一致。 NH_4^+ -N 春季平均质量浓度为 12.623 $\mu\text{g/L}$, 夏季平均质量浓度为 14.237 $\mu\text{g/L}$, 其分布具有明显的季节性和区域性特征, 夏季高于春季, 近岸海域高于中部海域。 NO_2^- -N 春季平均质量浓度为 1.687 $\mu\text{g/L}$, 夏季平均质量浓度为 1.988 $\mu\text{g/L}$, 4 月和 8 月平均 NO_2^- -N 浓度相对较高, 且海峡南部近烟台一侧海域明显高于中部及北部海域。 PO_4^{3-} -P 春季平均质量浓度为 3.709 $\mu\text{g/L}$, 夏季平均质量浓度为 4.210 $\mu\text{g/L}$, 4 月和 8 月平均 PO_4^{3-} -P 浓度相对较高, 春季近岸海域高于中部海域。 SiO_3^{2-} -Si 春季平均质量浓度为 0.046 mg/L, 夏季平均质量浓度为 0.130 mg/L, 其浓度呈逐月递增的趋势, 8 月海峡两侧海域浓度高于海峡中部海域。

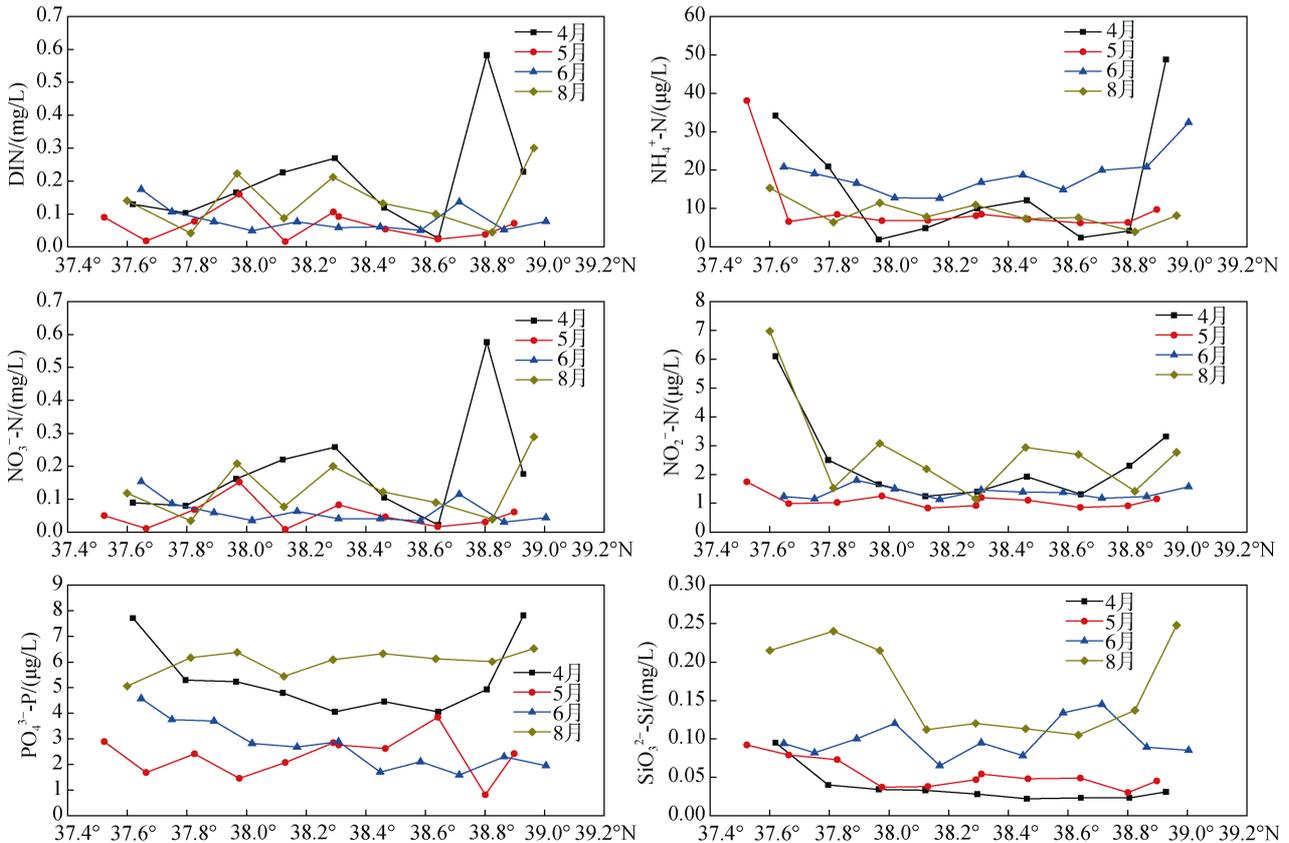


图 12 渤海海峡表层营养盐时空变化

Fig. 12 Spatiotemporal dynamics of the sea surface nutrients of the Bohai Strait

目前, 评价营养结构的方法多采用 DIN、P 和 Si 的绝对含量及三者之间的比值来综合判断。当海水中 Si/N/P=16:16:1(Redfield 比值)时, 最适宜于浮游植物的生长, 可通过将 Si/N/P 相对比值与 Redfield 比值进行比较, 推断出海水中限制浮游植物生长的

元素^[24-26]。Nelson 等^[27]研究表明, SiO_3^{2-} -Si=2 $\mu\text{mol/L}$, DIN=1 $\mu\text{mol/L}$, PO_4^{3-} -P=1 $\mu\text{mol/L}$, 可作为浮游植物生长的最低阈值。渤海海峡春夏季营养盐结构时空变化如图 13 所示, 春季 Si/DIN 比均小于 1, 且 SiO_3^{2-} -Si 浓度均小于最低阈值(2 $\mu\text{mol/L}$), 表明春季 Si 为渤海

海峡浮游生物生长的限制元素。夏季 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 浓度逐渐升高, 6 月 Si 仍为浮游生物生长的限制元素, 但限制作用明显减弱, 进入 8 月后, 绝大部分海域 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 浓度已大于 $2 \mu\text{mol/L}$, Si 不再为浮游生物生长的限制元素。渤海海峡各月份 DIN/P 均明显大于 16, 除 8 月 1 个点的 Si/DIN 大于 1 以外, 其他月份

Si/DIN 均小于 1, 且各月份含量 DIN 明显大于最低阈值($1 \mu\text{mol/L}$), 表明渤海海峡 DIN 含量过剩, N 不是浮游生物生长的限制元素。但各月份 DIN/P 均明显大于 16, 且 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量均小于 $1 \mu\text{mol/L}$, 表明 P 是浮游生物生长的限制元素。综上, 春季渤海海峡浮游生物生长受 Si 和 P 的双重限制, 夏季主要受 P 限制。

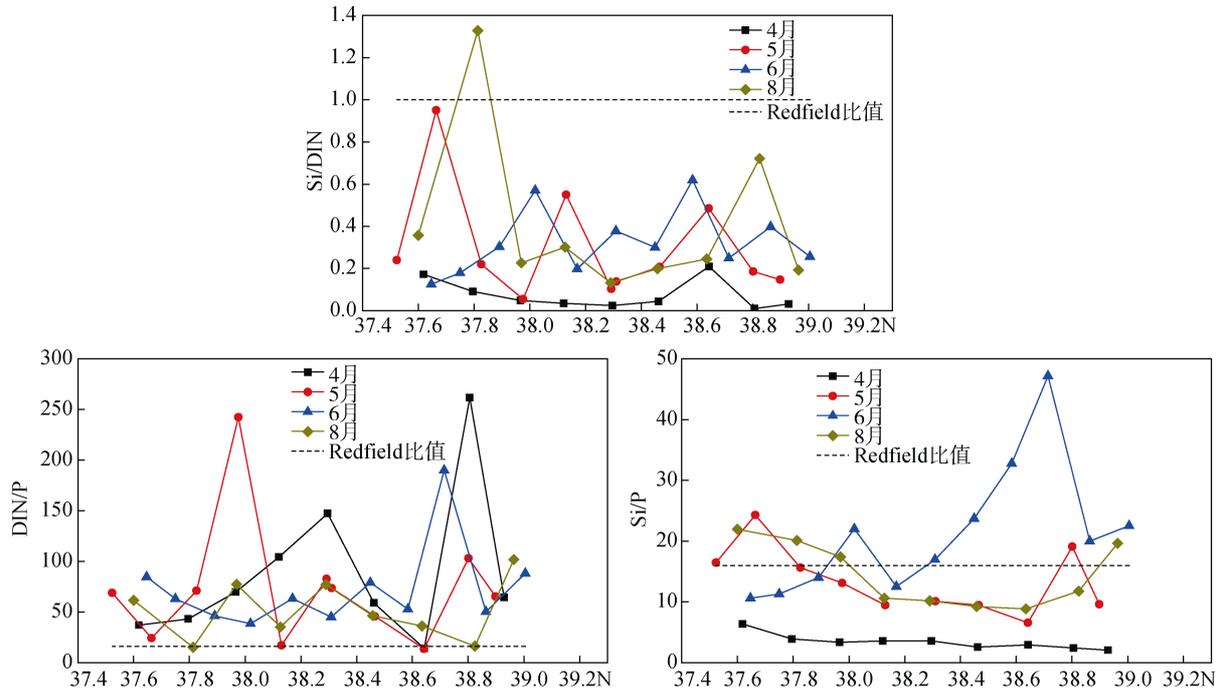


图 13 渤海海峡表层营养盐结构时空变化

Fig. 13 Spatiotemporal dynamics of the sea surface nutrients' structure of the Bohai Strait

3 讨论

3.1 Ferrybox 可有效实现海洋生态环境的低成本长期自动监测

20 世纪 80 年代以来, 随着科学技术的发展, 尤其是空间技术、海洋遥感技术、海洋声学技术以及海洋探测技术的发展, 使得海洋调查自动化的程度大大提高^[28]。但目前中国海洋环境调查仍然多以采用海上布点调查的方式进行^[29], 通过海上布点在不同的时间段开展不同的调查航次, 这也是目前了解海洋环境时空变化的一种极其有效的调查方式。同时这种传统的调查方式也存在一些弊端, 如各调查断面的调查点之间存在较大的调查空白区, 缺少空间尺度上的连续性, 不同调查航次时间跨度较大, 缺乏时间尺度上的持续性, 在时间尺度和空间尺度上均存在调查盲区, 然而这些调查盲区可能就是正确评估自然因素或人为因素导致的海洋生态环境变

化的关键因素。另外这种调查方式的调查计划和调查结果较易受海况及天气等因素影响, 调查结果存在一定的偶然性, 且耗资较大。

FerryBox 恰好能够弥补传统调查方式存在的不足之处。首先, 它除具备温度、盐度、pH、溶解氧、叶绿素等一些常规的水环境参数传感器之外, 还可根据需求添加其他化学参数的传感器, 多种高精度的传感器监测单元的设计, 保证了其监测内容多样, 监测结果可靠, 完全可满足常规海洋水文水质监测的需求。其次, 其完美的水路循环系统设计实现了设备的运行是在干燥的室内或机舱内进行, 较为干燥的工作环境条件可保证设备运行具有极高的稳定性。再次, 该设备系统较为智能、操作使用简单, 将其安装在目标船上以后, 可满足经简单培训的船方非专业人员进行日常操作和维护, 从而避免了科研人员需长期跟踪操作和维护的需求, 加上其自动清洗系统的设计, 极大地减少了设备维护的工作量。另

外,它具备远程操控功能和监测数据长距离无线传输功能,可对仪器的运行远程操控,并保证监测数据被及时传输。因此,不但可以将其装配在科考船上,来实现海洋生态环境的极高空间覆盖率的大面积调查,也可通过将其安装于货船或渔船上,依靠船只在两地的频繁往返或较高的出航频率,来实现在较低的成本下完成海洋生态环境的长期、可持续监测。

3.2 渤海海峡水环境因子时空分布的南北差异显著

渤海海峡南北宽度近 60 nmile,作为黄海和渤海水体和物质交换的唯一通道,其海流活动频繁,水团相互作用剧烈,加上渤海海峡环流有“北进南出”的特点^[11,30],必然会造成水环境因子在时空分布上存在显著的南北差异。FerryBox 监测结果表明,这种南北差异具体表现为:冬季海峡北部海域的表层温度和盐度均明显大于南部海域;秋季海峡南部海域的表层浊度和 pH 均高于中部及北部海域,冬季海峡中部及北部海域为表层浊度高值区;冬季海峡南部海域叶绿素 a 浓度略高于北部海域,进入春季以后海峡中南部海域为叶绿素 a 浓度高值区。

渤海海峡独特的地理位置造成了其水环境因子的南北差异要受到季风、降水、径流、环流等多重因素的影响。吕翠兰等^[31]研究表明,冬季受黄海暖流的影响,渤海海峡处有一高盐水舌自北黄海中部经渤海海峡北部伸入渤海内部,该高盐水舌的最大盐度值约为 32。冬季黄海暖流余脉的高温高盐水自海峡北部进入渤海,在海峡处形成高温高盐水舌,是导致冬季海峡表层温度和盐度南北差异的主要原因。渤海海峡为典型的季风气候,其表层浊度变化受季风影响显著。秦蕴珊等^[32]研究表明,渤海表层悬沙质量浓度的季节性差异显著,风场等气候因素是导致该季节性差异的主要原因。庞重光等^[33]研究表明,渤海海峡表层悬沙质量浓度与风速呈正相关。冬季渤海海峡北部较大潮流流速加上较强的东北季风,导致海水涡动强度不断增强,海底沉积物发生再悬浮,从而导致冬季海峡中部及北部海域出现较高表层浊度。进入春季以后,含有高营养盐的渤海沿岸流自海峡南部进入黄海,较高的营养盐导致海峡南部浮游生物大量繁殖,可能是造成春季渤海海峡南部海域叶绿素 a 含量较高的主要原因。

3.3 影响渤海海峡营养盐时空变化的主要因素探讨

营养盐作为海洋生态系统的生源物质,其分

布和结构特征直接影响到海洋初级生产力和生物资源^[34-35],同时其在海中的含量和分布也受到诸多人为因素以及环境因素的影响^[36-38],营养盐在海水中的含量和分布并不均匀也不恒定,具有明显的季节性和区域性特征。从春、夏季渤海海峡营养盐的时空动态变化来看,在时间变化上体呈现初春和夏末较高,4月和8月的 DIN、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 及 PO₄³⁻-P 含量均明显高于5月和6月。据赵倩等^[39]报道,北黄海冷水团区域中颗粒物的累积与分解是北黄海西部海区四季营养盐浓度变化的主要影响因素。秋冬季沉入海底冷水团区域的生物碎屑不断被微生物分解,产生了大量溶解无机态营养盐,经过一年的分解与累积在冬季达到最高值。4月渤海海峡的营养盐并没有因浮游植物的繁殖而被过度消耗,所以仍然保持较高的水平。随着时间推移,营养盐随着浮游植物的大量繁殖而不断消耗,所以5月和6月的营养盐含量明显要低于4月。8月渤海海峡的营养盐含量较5月和6月有明显的提升,分析其原因可能与进入8月以后雨水充沛导致径流输入量增大以及大风天气水体垂直混合作用加强导致底层冷水团营养盐向上补充有关,另外较早繁殖的浮游植物开始大量死亡分解可能也会对营养盐的补充起到一定作用。

营养盐在空间分布上整体呈现海峡两侧含量高于海峡中部,表明原因多与陆源输入有关。辽东半岛有鸭绿江、大洋河、庄河和碧流河等河流,每年均有大量的营养盐被输入北黄海。李延伟等^[38]研究表明,在北黄海冷水团环流的作用下,陆源输入是影响北黄海西部及海峡北部营养盐含量的重要因素。据赵倩等^[39]报道,春季和夏季鸭绿江携带大量营养盐输入北黄海西部。高营养盐的北黄海海水在北黄海冷水团环流的作用下,经渤海海峡北部与高营养盐的渤海海水发生混合,导致海峡北部较高的营养盐含量。黄海水经渤海海峡北部向西流入渤海,富营养盐的渤海沿岸流经海峡南部进入黄海,从而又使得渤海海峡南部营养盐含量高于中部海域。据 Wang 等^[35-36]报道,海水中营养盐的分布还受到水温、盐度(S)、pH、化学需氧量(COD)、表观耗氧量(AOU)等环境因子的影响。据邱少芳等^[40]报道,海水无机磷与 pH 和溶解氧呈显著的负相关,无机氮与温度及化学需氧量呈显著正相关。表明温盐等环境因子也是影响海水中营养盐的时空分布的重要因素。因此,还可从渤海海峡营养盐时空变化与水文因子及海水化学因子的关系等角度展开进一步研究,以充分了解影响渤

海海峡营养盐时空变化的主要因素。

参考文献:

- [1] 尹文昱, 张永宁. 渤海海峡风浪特征统计分析[J]. 大连海事大学学报, 2006, 32(4): 84-88.
Yin Wenyu, Zhang Yongning. Statistical analysis of wind and wave features at Bohai Straits[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2006, 32(4): 84-88.
- [2] 刘建华, 王庆, 仲少云, 等. 渤海海峡老铁山水道动力地貌及演变研究[J]. 海洋通报, 2008, 27(1): 68-74.
Liu Jianhua, Wang Qing, Zhong Shaoyun, et al. Study on dynamic geomorphology and evolution of the Lao Tieshan Channel, the Bohai Strait[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(1): 68-74.
- [3] 李爱超, 乔璐璐, 万修全, 等. 渤海海峡悬浮体分布、通量及其季节变化[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 310-318.
Li Aichao, Qiao Lulu, Wan Xiuquan, et al. Distribution, flux and seasonal variation of suspended particulate matters in the Bohai Strait[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(2): 310-318.
- [4] 刘敬贤, 韩晓宝, 高维杰. 渤海海峡海域船舶定线制完善的研究[J]. 航海技术, 2008, 5: 2-7.
Liu Jingxian, Han Xiaobao, Gao Weijie. Research on ships' routing of Bohai Sea channel improvement[J]. Marine Technology, 2008, 5: 2-7.
- [5] 孙海燕, 陆大道, 孙峰华, 等. 渤海海峡跨海通道建设对山东半岛、辽东半岛城市经济联系的影响研究[J]. 地理科学, 2014, 2: 147-153.
Sun Haiyan, Lu Dadao, Sun Fenghua, et al. Influence of the economic contacts between cities in Shandong peninsula and east liaoning peninsula on the construction of trans-Bohai strait passageway [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 2: 147-153.
- [6] 张乃星, 任荣珠, 吴凤丛, 等. 渤海海峡冬季营养盐的分布特征及影响因素[J]. 海洋通报, 2011, 30(6): 607-614.
Zhang Naixing, Ren Rongzhu, Wu Fengcong, et al. Characteristics of vertical distribution and influence factors of the nutrients at Bohai Strait in winter[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(6): 607-614.
- [7] 张乃星, 孙旭, 曹丛华, 等. 渤海海峡冬季无机碳的立体分布特征及其源汇变化[J]. 海洋学报(中文版), 2012, 34(6): 94-101.
Zhang Naixing, Sun Xu, Cao Conghua, et al. Distribution characteristics and source/sink changes of dissolved inorganic carbon around the Bohai Strait in winter[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(6): 94-101.
- [8] 张伟. 渤海海峡南部海域地貌特征及控制因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Zhang Wei. Study on the geomorphological character-
- istic and controlling factors in the southern Bohai Strait[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [9] 冯京. 基于高分辨率声学探测的渤海海峡地貌及灾害地质研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Feng Jing. Study on geomorphological and geohazards in Bohai Strait based on high resolution acoustic detection[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] Liu Z X, Xia D X, Berne S, et al. Tidal depositional systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. Marine Geology, 1998, 145: 225-253.
- [11] 魏泽勋, 李春雁, 方国洪, 等. 渤海夏季环流和渤海海峡水体输运的数值诊断研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 454-464.
Wei Zexun, Li Chunyan, Fang Guohong, et al. Numerical diagnostic study of the summertime circulation in the Bohai Sea and the water transport in the Bohai Strait[J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(4): 454-464.
- [12] 蒋东辉, 高抒, 程鹏. 渤海海峡沉积物输运的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 553-561.
Jiang Donghui, Gao Shu, Cheng Peng. Modeling sediment transport in the Bohai Strait[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 553-561.
- [13] 王桂芝, 高抒. 黄渤海水体交换、悬沙特征及其对渤海海峡沉积的影响[J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 43-48.
Wang Guizhi, Gao Shu. Characteristics of Yellow-Bohai Sea water exchange and suspended sediment: their effects on sedimentation in the Bohai Strait[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(1): 43-48.
- [14] 李冕, 兰冬东, 梁斌, 等. 渤海无机氮水质稳定性预测[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(2): 161-165.
Li Mian, Lan Dongdong, Liang Bin, et al. Stability prediction of inorganic nitrogen in water environment of Bohai Sea[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(2): 161-165.
- [15] 刘相兵. 渤海环境污染及其治理研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013.
Liu Xiangbing. Bohai Sea environment pollution and its governance[D]. Yantai: Yantai University, 2013.
- [16] 慕建东. 渤海重要渔业水域生态环境质量状况评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Mu Jiandong. The evaluation of ecological environment for key fishery waters in Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [17] Frank C, Schroeder F, Petersen W. FerryBox: Using automated water measurement systems to monitor water quality: perspectives for the Yangtze River and Three Gorges Dam[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(6): 861-869.
- [18] Petersen W, Schroeder F, Bockelmann F D. Ferry-

- Box-application of continuous water quality observations along transects in the North Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2011, 61: 1541-1554.
- [19] Barger C P, Hydes D J, Woolfa D K, et al. A regional analysis of new production on the northwest European shelf using oxygen fluxes and a ship-of-opportunity[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2006, 69: 478-490.
- [20] Charria G, Lamouroux J, Mey P D. Optimizing observational networks combining gliders, moored buoys and FerryBox in the Bay of Biscay and English Channel[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 162: 112-125.
- [21] 黄以琛, 李炎, 邵浩, 等. 北部湾夏冬季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(6): 856-863.
Huang Yichen, Li Yan, Shao Hao, et al. Seasonal variations of sea surface temperature, chlorophyll-a and turbidity in Beibu Gulf, MODIS imagery study[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2008, 47(6): 856-863.
- [22] Justic D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41-46.
- [23] 张静, 张瑜斌, 周凯, 等. 深圳湾海域营养盐的时空分布及潜在性富营养化程度评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 253-261.
Zhang Jing, Zhang Yubin, Zhou Kai, et al. Evaluation on temporal and spatial distribution of nutrients and potential eutrophication in Shenzhen Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2): 253-261.
- [24] Liu S M, Zhang J. Nutrient dynamics in the macro-tidal Yalujiang Estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 2004, 20(3): 147-161.
- [25] Liu S M, Hong G M, Zhang J, et al. Nutrient budgets for large Chinese estuaries[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(1): 391-435.
- [26] Xu J, Ho A Y, Yin K D, et al. Temporal and spatial variations in nutrient stoichiometry and regulation of phytoplankton biomass in Hong Kong waters: Influence of the Pearl River outflow and sewage inputs [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57: 335-348.
- [27] Nelson D M, Brzezinski M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf Stream warm-core rings[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62: 283-292.
- [28] 曲英涛. 海洋调查综合管理信息系统研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
Qu Yingtao. The research and realization of marine investigation integrated management information system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [29] 于志强. 海洋环境在线监测与实时信息发布系统的研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
Yu Zhiqiang. Research on marine environment on-line monitoring and real-time information release system[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [30] Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 60: 203-212.
- [31] 吕翠兰, 鲍献文, 吴德星, 等. 渤海和北黄海冬季盐度变化的年代际及年际特征分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(S1): 267-273.
Lü Cuilan, Bao Xianwen, Wu Dexing, et al. Analysis of decadal variability and interannual variability of salinity field in Bohai and Northern Yellow Sea in winter[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(S1): 267-273.
- [32] 秦蕴珊, 赵松龄, 赵一阳, 等. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Qin Yunshan, Zhao Songling, Zhao Yiyang, et al. *Geology of Bohai Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [33] 庞重光, 李坤, 于炜. 渤海表层悬沙的时空分布特征及其动力成因[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(4): 450-458.
Pang Chongguang, Li Kun, Yu Wei. Distribution characteristics, seasonal variability and dynamical mechanism of suspended sediment in the surface layer of the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(4): 450-458.
- [34] 米铁柱, 姚庆祯, 孟佳, 等. 2011年春、夏季黄海、东海营养盐分布特征研究[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 678-688.
Mi Tiezhu, Yao Qingzhen, Meng Jia, et al. Distributions of nutrients in the Southern Yellow Sea and East China Sea in spring and summer 2011[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(3): 678-688.
- [35] Wang Z, Qi Y, Chen J, et al. Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 62(1): 85-94.
- [36] Wang Z, Zhao J, Zhang Y, et al. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(9): 1268-1275.
- [37] 张立娟. 长江口及其邻近水域碳、氮、磷的时空分布[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
Zhang Lijuan. Temporal and spatial distributions of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Changjiang Estuary and adjacent sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [38] 李延伟, 胡莹莹, 陈淑梅. 夏、秋季北黄海营养盐的时空分布特征及其影响机制[J]. *中国环境科学*, 2013,

33(6): 1060-1067.

Li Yanwei, Hu Yingying, Chen Shumei. Distribution and influence factors of nutrients in the North Yellow Sea in summer and autumn[J]. China Environmental Science, 2013, 33(6): 1060-1067.

[39] 赵倩, 臧路, 张传松, 等. 北黄海西部海区营养盐季节变化及其影响因素探讨[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(1): 69-76.

Zhao Qian, Zang Lu, Zhang Chuansong, et al. The seasonal changes of nutrients and interfering factors in

the west of the North Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(1): 69-76.

[40] 邱绍芳, 赖廷和. 廉州湾海水营养盐组成特征与主要环境因子的关系[J]. 广西科学院学报, 2004, 3: 179-181, 188.

Qiu Shaofang, Lai Tinghe. The composition characteristics of nutrient salts and their relations with the main environmental factors in the seawaters of Lianzhou Bay[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2004, 3: 179-181, 188.

Long-term and low-cost automatic monitoring of water quality in the Bohai Strait using FerryBox

HOU Chao-wei, TANG Cheng, ZOU Tao, LIU Xin, ZHANG Hua

(Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264005, China)

Received: Oct. 19, 2016

Key words: FerryBox; Bohai strait; water quality; water environmental factors; nutrients

Abstract: FerryBox is an automated, real-time aquatic ecosystem monitoring system that has many advantages such as multiple parameters, low maintenance, low cost, wide monitoring coverage, and strong sustainability. The FerryBox that was installed in a cargo ship that frequently shuttled between Yantai and Dalian from October 2015 to July 2016 achieved a ten-month low-cost water quality automatic monitoring of the Bohai Strait. The monitoring results showed that the spatial and temporal distribution of water environmental factors between the northern and southern Bohai Strait had significant differences. While the surface turbidity and surface pH in the southern Bohai Strait were higher than that in the central and northern sea area in autumn, the surface temperature, surface salinity, and surface turbidity of the northern Bohai Strait were higher than that in the southern sea area in winter; in addition, the chlorophyll-a concentration of the central and southern Bohai Strait was higher than that of the northern sea area after the beginning of spring. Monsoon, warm current of the Yellow Sea, and the Bohai Sea circulation were the main reasons for the differences in the water environmental factors distribution in the Bohai Strait. The monitoring results of the nutrients in the Bohai Strait in the spring and summer of 2016 showed that the temporal and spatial distribution of nutrients in the Bohai strait had obvious seasonal and regional characteristics. The nutrient content was high in early spring and late summer in the temporal variation, and the nutrient content of both sides of the Bohai Strait was higher than that of the central sea area in the spatial distribution. Decomposition of particles in a submarine, cold water mass, algae reproduction, surface runoff, and the Bohai Sea circulation were the important factors that affected the temporal and spatial distribution of nutrients in the Bohai Strait during spring and summer. The nutrients that limited the phytoplankton growth were silicon and phosphorus in spring and solely phosphorus in summer.

(本文编辑: 谭雪静)