

烟台-威海北部海洋牧场底层溶解氧浓度的季节变化研究*

樊思琦¹ 刘子洲¹ 翟方国¹ 顾艳镇²

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院 山东青岛 266100; 2. 浙江大学 海洋学院 浙江舟山 316021)

摘要 基于 2021 年 4~12 月山东半岛烟台-威海北部海洋牧场区域 4 处连续观测站的长期观测数据,研究了该海域底层溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度的季节变化特征,并探讨了物理机制。该海域底层 DO 从春季到夏季逐渐降低,而从夏季到秋季逐渐升高,主要受温度控制;各观测站 DO 均在 8 月达到最低值,受垂向层结增强和底层生物化学耗氧增多的共同影响。底层 DO 浓度在东西方向差异较小,而在南北方向上差异明显;在春季和秋季 DO 浓度南高北低,是由于层结较弱,海水垂向混合向底层提供 DO,且南边水深更浅,DO 更容易达到饱和或过饱和状态,而水深更深处 DO 仍处于不饱和状态;夏季 DO 浓度南边大于北边是季节性层结强度的空间差异所致,同时南边底层 DO 浓度下降更快,使其南北差异在夏季有所减小。在 11 月中旬,近岸 3 个观测站底层 DO 快速增多,可能是由于此前的大风过程引起浮游植物繁殖,晴朗天气促进其光合作用使海水中 DO 增多,之后海水层结消失,海水充分垂向混合使丰富的 DO 到达底层。

关键词 海洋牧场;溶解氧浓度;季节性海水层结;生化过程

中图分类号 P717 **doi:** 10.11693/hyhz20221200317

山东半岛位于中国北部,毗邻渤海和黄海,海域广阔,具有丰富的海洋资源,海洋渔业位于全国前列,但长期过度捕捞、环境污染及产卵场破坏等导致近几年渔业资源急速衰退、海洋荒漠化问题严重。为此,山东省高度重视并积极开展海洋生态修复工作,于 2005 年开始全省海洋牧场的建设,于 2014 年进一步提出“蓝黄两区”及“海上粮仓”发展计划,大力开展海洋牧场建设,将海洋牧场打造成“海上粮仓”核心区(翟方国等, 2020)。但是随着海洋牧场的大力建设发展,海洋生态灾害造成的生态和经济损失也日益突出。目前,山东半岛周边海域海洋生态环境安全保障已成为亟须解决的问题。

海水中的溶解氧(dissolved oxygen, DO)是重要的海洋环境参数,与海洋动植物生长以及海洋渔业发展密切相关,故厘清海水 DO 的时空变化规律及其物

理-生态机制至关重要。关于黄海海水 DO 季节尺度的时空变化研究已有不少成果,由于复杂的海洋动力、生态环境和人类活动的影响,我国黄海海域海水 DO 存在显著的季节变化特征,并且不同季节 DO 浓度变化的主导因素不尽相同(宋国栋等, 2007; 辛明等, 2013; 石强, 2016; 刘春利等, 2017)。这些研究主要集中在水深较大、离岸较远的区域。近年来也有些研究者利用山东省海洋牧场观测网的观测数据,对部分海洋牧场海水 DO 的时空变化特征和影响机制进行了研究。刘禹铎等(2019)在天鹅湖海洋牧场研究得到 2016 年 7~10 月底层海水 DO 浓度呈先下降后上升的变化趋势,还指出近岸 DO 浓度受到潮流运输过程的影响,涨潮时海水 DO 浓度升高,而落潮时降低。李兆钦等(2019)阐明了刘公岛海洋牧场底层海水 DO 浓度以季节变化为主,其主要因素是海水温度;夏季海

* 山东省自然科学基金项目, ZR2020MD059 号; 国家自然科学基金项目, 42176016 号。樊思琦, 硕士研究生, E-mail: siqifan1001@163.com

通信作者: 刘子洲, 实验师, E-mail: lzz2013@ouc.edu.cn

收稿日期: 2022-12-02, 收修改稿日期: 2023-01-19

水层结使 DO 浓度降低, 而大风过程会打破温跃层为海底提供氧气, 王心怡等(2020)对西港海洋牧场底层海水 DO 的研究也有类似结论。孙利元等(2021)指出夏季烟台-威海北部近海 DO 浓度垂向分布最小值形成的必要条件是密度层结抑制垂向湍流扩散, 而生物地球化学耗氧是控制其形成和空间分布的重要过程。Zhai 等(2021)研究了山东半岛东北部海水养殖区夏季底层 DO 浓度年际变化及其物理机制, 得到在年际时间尺度上, 海水层结强度和底层 DO 浓度呈现同步变化, 并与由偏南季风驱动的底层向岸平流有关。虽然近几年海洋牧场 DO 的研究有所增加, 但只是针对单点观测, 无法对同时刻 DO 浓度空间差异进行探究。

基于此, 本研究利用 2021 年 4~12 月烟台-威海北部海域 4 个海洋牧场观测站的同步、连续观测资料, 进行多点联合研究, 探究该海域海水 DO 在季节尺度上的时间变化和空间分布特征, 揭示其物理机制, 进

一步系统完善对该海域海水 DO 浓度的时空变化特征及其影响机制的研究。

1 数据与方法

1.1 数据

本研究采用的数据主要是 2021 年 4~12 月烟台-威海北部 4 个海洋牧场海床基连续观测站的同步观测资料, 还利用 2021 年 3 月、4 月、6 月、7 月、8 月和 9 月共 14 次大面调查获取的海水 pH 观测数据以及卫星观测资料、ERA5 再分析资料进行辅助分析。

连续观测资料取自东宇南部、东宇北部、瑜泰和瑜泰北部海洋牧场在线观测系统, 包含了水深、DO 浓度、温度、盐度和叶绿素浓度数据, 均为系统搭载的温盐深仪(conductivity temperature depth, CTD)获得的底层观测结果。各连续观测站位置分布如图 1 所示: 东宇南部最靠近岸边, 东宇北部与瑜泰基本呈纬

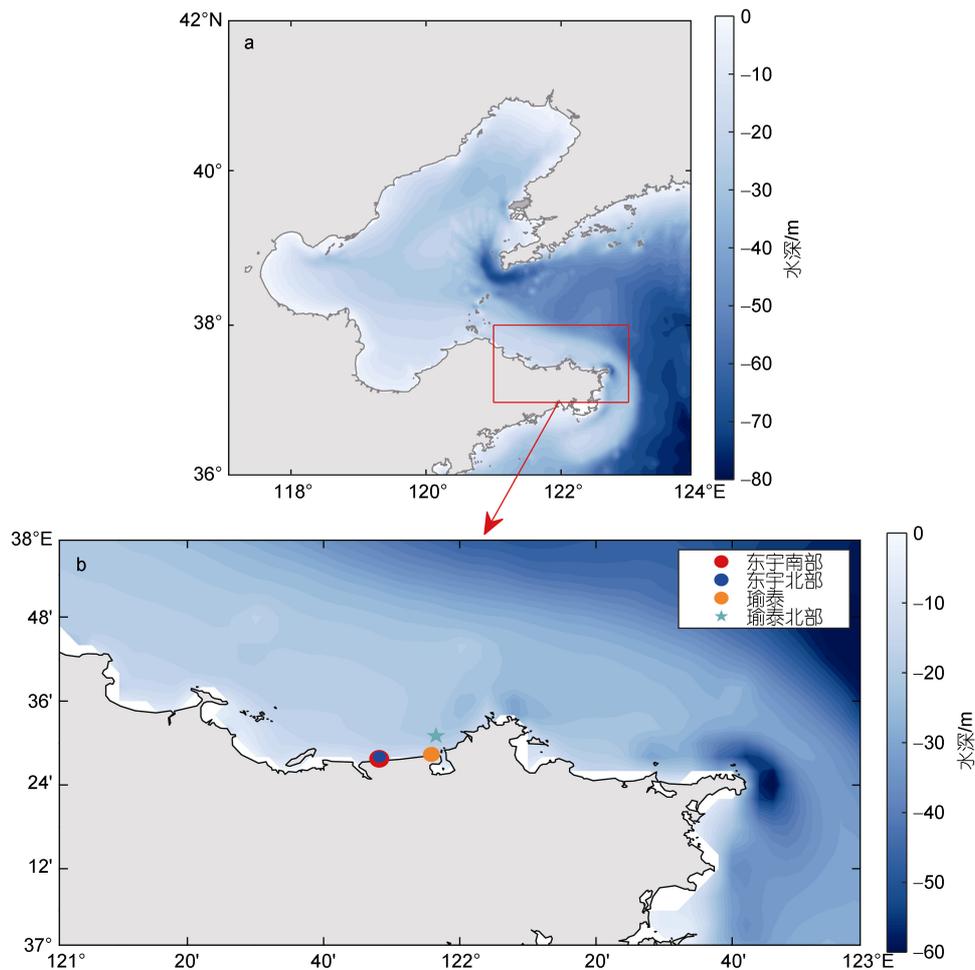


图 1 渤、黄海水深分布图(a)及连续观测站位分布图(b)

Fig.1 Bathymetry of the Bohai and Yellow Seas (a) and distribution of four continuous observation stations (b)

向分布, 瑜泰与瑜泰北部大体呈经向分布, 瑜泰北部位于最北边。时间范围、经度、纬度和平均观测水深如表 1 所示, 结合站位分布情况(图 1)可知, 东宇南部离岸最近, 观测水深最浅; 瑜泰北部离岸最远, 观测水深最深, 平均超过 20 m; 东宇北部和瑜泰平均观测水深较接近。

图 2 展示了 2021 年威海东北部大面调查断面分布情况, 各月经向断面站点分布较为一致, 沿断面方向水深变化不大, 基本保持在 20 m 左右; 3、4、6 月纬向断面站点分布较为一致, 而 7、8、9 月站点分布与之差别较大, 其中 7 月和 9 月各有两次大面调查。

大面调查采用日本亚力克公司生产的多参数水质仪(型号: AAQ171), 观测频率为 4 Hz。

表 1 2021 年烟台-威海北部海洋牧场观测站位信息
Tab.1 Information of marine pasture observation stations in north Yantai-Weihai in 2021

站位名称	时间范围/ 月.日	经度	纬度	平均水深 /m
东宇南部	7.23~11.28	121°48.162'E	37°27.753'N	5.64
东宇北部	7.22~12.20	121°48.195'E	37°28.040'N	12.35
瑜泰	4.15~12.8	121°55.833'E	37°28.383'N	10.60
瑜泰北部	4.23~10.14	121°56.509'E	37°31.027'N	20.56

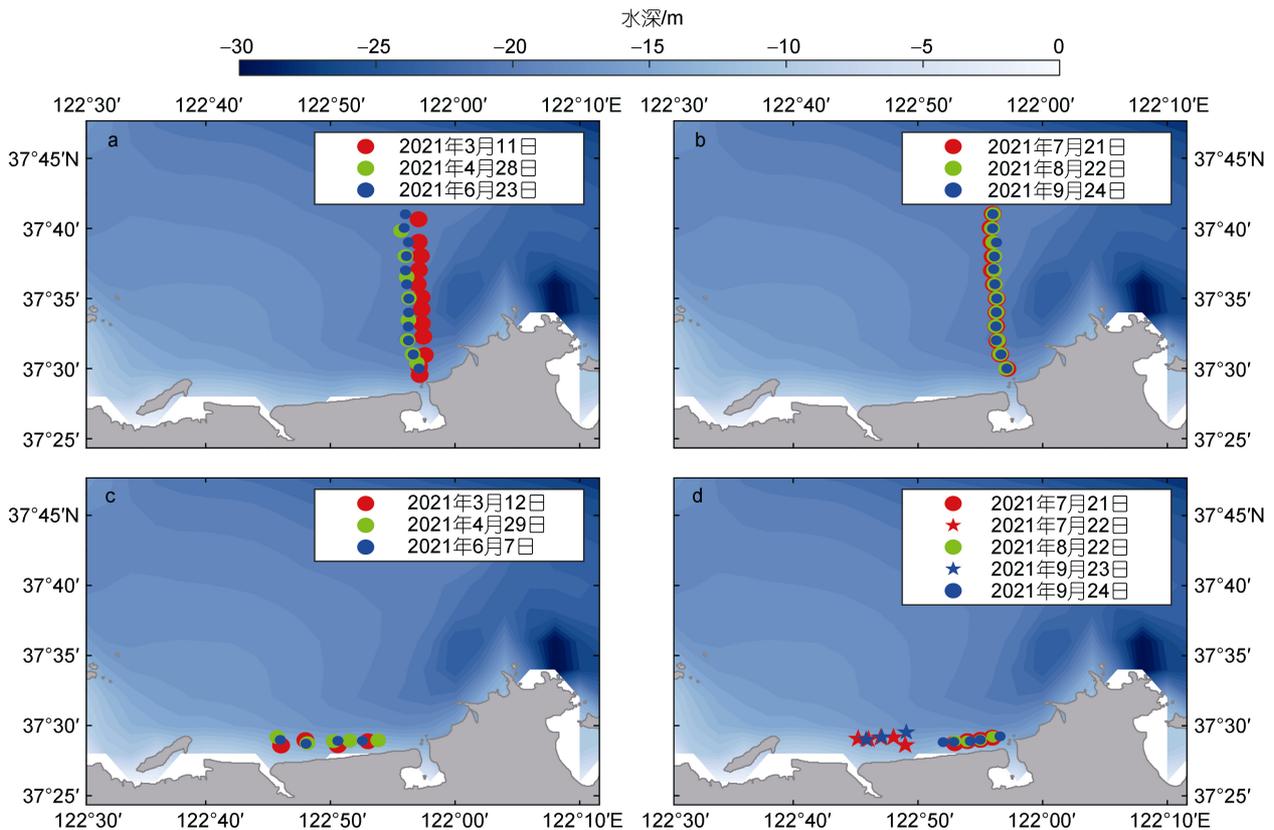


图 2 2021 年威海东北部大面调查断面分布图

Fig.2 Cross-section distribution of the navigation survey in sea areas northeast off Weihai in 2021
注: a、b 为经向断面; c、d 为纬向断面

卫星观测资料使用的是 MURSST (Multi-sensor Ultra-high Resolution SST), 用以分析连续观测站夏季的层结情况。其为由多个卫星的海表温度(sea surface temperature, SST)二级数据产品合并而成的 4 级高分辨率日均海表面温度数据集, 以空间分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 覆盖全球海洋, 跨度从 2002 年至今, 数据原始来源为 NASA/JPL Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO DAAC), 以 Zarr

格式提供。

为了探讨天气过程对 DO 浓度的影响, 本文采用了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA5 再分析数据集, 主要使用的变量是海面 10 m 高度风和海面 2 m 高度空气温度, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间间隔为 1 h, 时间范围为 2021 年 4 月 1 日至 12 月 20 日, 通过线性插值得到研究海域的海面风和海面

气温, 天平均处理得到时间序列。

1.2 方法

对于连续观测资料, 温度、盐度、DO 浓度和叶绿素浓度数据进行天平均处理。对于大面观测的海水 pH 资料, 选取多参数水质仪下过程的观测数据, 每 0.5 m 水深取一层, 与站点纬度或经度形成二维网格, 对数据进行插值, 以形成网格数据。

为了探讨水文生化过程对 DO 浓度分布的影响, 计算了饱和溶解氧浓度、溶解氧饱和度和表观耗氧量。借鉴李兆钦等(2019)计算 DO 相关参数的方法, 其中, 饱和溶解氧浓度的计算采用 Garcia 等(1992)改进过的公式, 溶解氧饱和度为观测溶解氧浓度与饱和溶解氧浓度之比, 表观耗氧量为饱和溶解氧浓度与观测溶解氧浓度之差, 其可以很好地表征生物地球化学过程消耗的 DO。

2 结果

2.1 溶解氧浓度

表 2 为 4 个连续观测站各季节的 DO 浓度平均值, 从量值上展示出各季节的 DO 浓度差异。按照北半球气象学划分, 计算得到 DO 浓度春季最高, 秋季大于

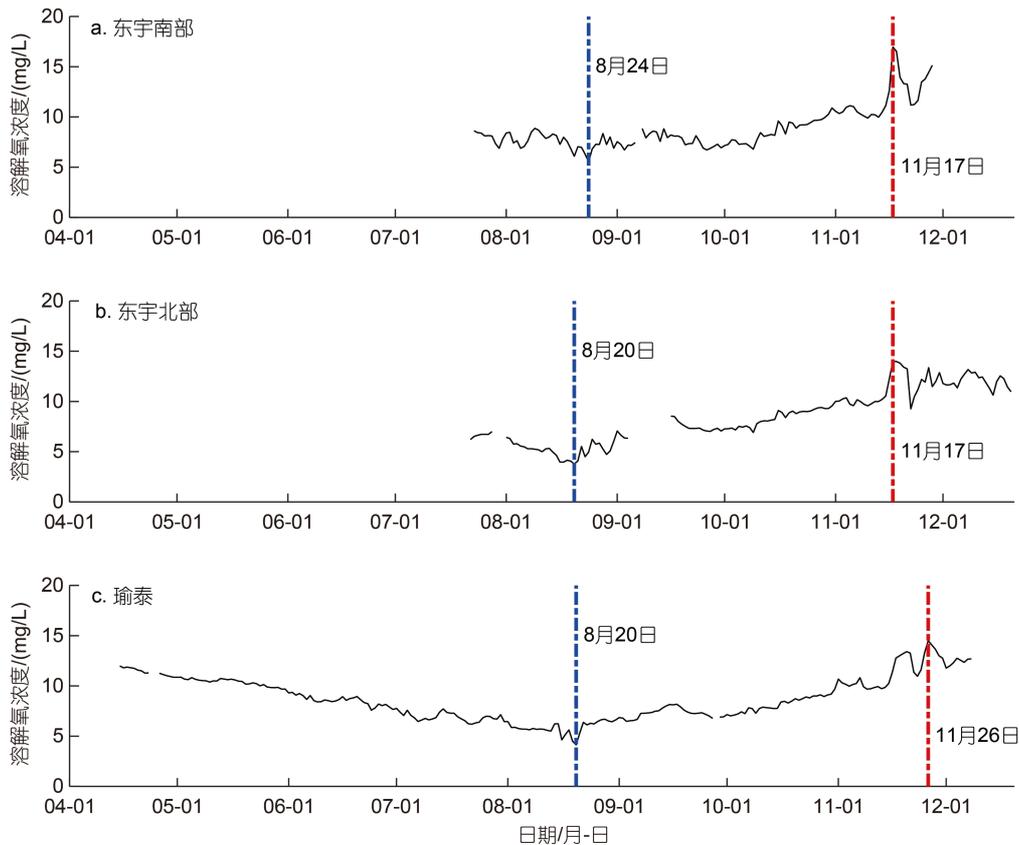
夏季。由于东宇南部、东宇北部以及瑜泰北部缺少冬季观测数据, 并且瑜泰冬季数据质量较差, 本文不对冬季 DO 浓度的特征进行分析和比较。图 3 展示了 4 个连续观测站的 DO 浓度时间序列, 发现研究海域未出现低氧现象[DO 浓度 < 2 mg/L (Diaz, 2001; 李道季等, 2002)], 并表现出显著的随季节变化特征, 即从春季到夏季逐渐降低, 从夏季到秋季逐渐升高, 各观测站海水 DO 浓度均在 8 月 20 日左右达到最低值, 而在 11 月中下旬达到最高值。

图 4a 对比展示了 4 个海洋牧场连续观测站底层 DO 浓度的差异, 结合各观测站位置来看, 瑜泰北部位于最北端, 总体上各月 DO 浓度均小于其余 3 个观

表 2 各连续观测站春季、夏季、秋季平均溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 浓度

Tab.2 Mean DO concentration in spring, summer and autumn at each continuous observation station

站位名称	DO 浓度/(mg/L)		
	春季	夏季	秋季
东宇南部		7.59	9.44
东宇北部		5.31	9.28
瑜泰	10.68	7.01	9.06
瑜泰北部	8.37	6.09	



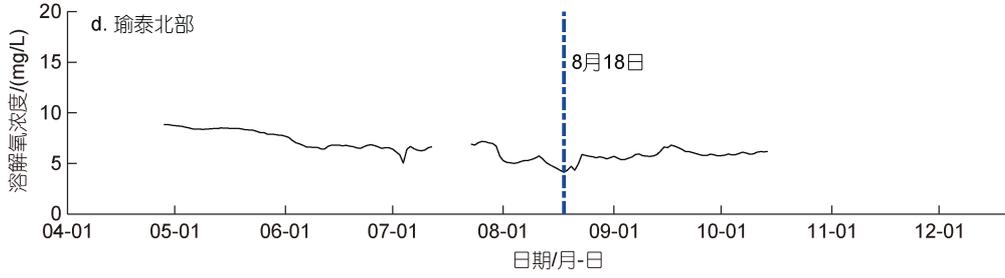


图 3 各连续观测站日平均溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度时间序列图

Fig.3 Time series of daily mean DO concentration at each continuous observation station

注: 蓝色虚线标明 DO 浓度最低值, 红色虚线标明 DO 浓度最高值, 虚线所在日期为极值出现的日期

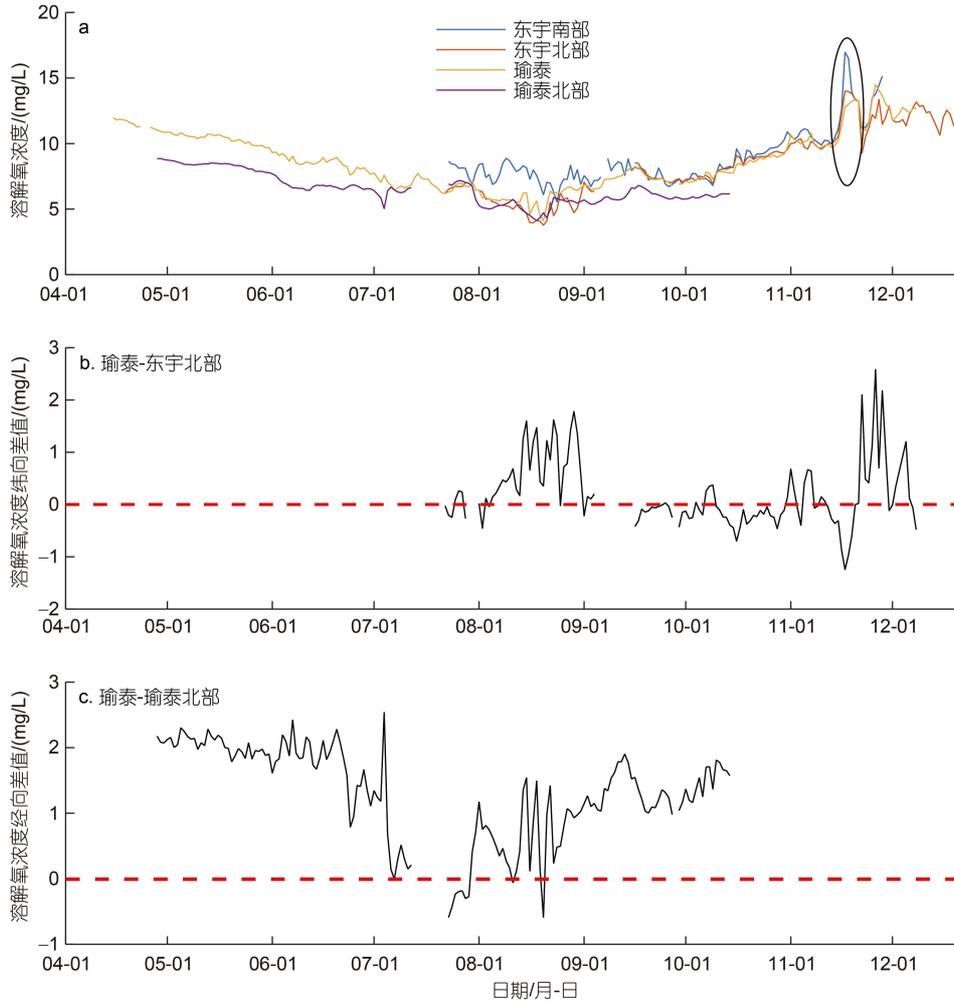


图 4 各连续观测站溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度对比(a), 东西向(b)和南北向(c)各月日平均 DO 浓度差异

Fig.4 Comparison of DO concentrations at successive observation stations (a), and differences in daily mean DO concentrations in each month in the east-west direction(b) and in north-south direction(c)

注: a 中黑色椭圆标记的是东宇南部、东宇北部和瑜泰 DO 浓度明显升高的现象

测站, 但其 8 月份与东宇北部 DO 浓度值相近, 推测与二者水深都较深有关; 东宇南部位于最南端, 除 9 月中旬至 10 月上旬外 DO 浓度是各站中最大的, 可能是由于该站最靠近岸边且水深最浅; 而 9 月中旬至 10

月上旬, 东宇南部、东宇北部和瑜泰 DO 浓度差距不大。由图 1 已知东宇北部与瑜泰基本呈纬向分布, 瑜泰与瑜泰北部大体呈经向分布, 为了更直观地分析 DO 浓度纬向、经向分布特征, 图 4b 和图 4c 分别展

示了瑜泰和东宇北部、瑜泰和瑜泰北部的 DO 浓度差, 可以看出, 仅 8 月中下旬和 11 月下旬瑜泰 DO 浓度略高于东宇北部, 其余月份 DO 浓度东西方向差异不大; 瑜泰 DO 浓度基本上在各月均大于瑜泰北部, 即底层 DO 浓度南大北小。综上, 在研究海域, 海水底层 DO 浓度在夏、秋季节纬向差异整体不大, 瑜泰 DO 浓度在夏季以及 11 月下旬略高于东宇北部; 而在春、夏和秋季, 经向上 DO 浓度均南高北低, 并且春季和秋季差异更大, 在夏季差异有所减小。特别的是东宇南部、东宇北部和瑜泰 DO 浓度在 11 月中旬出现快速升高的现象(图 4a 黑圈处)。

2.2 饱和溶解氧、溶解氧饱和度和表观耗氧量

图 5a 为温盐调控下的饱和溶解氧浓度, 在 4 个连续观测站其均表现出和观测 DO 浓度一致的季节变化趋势, 从春季到夏季逐渐降低继而到秋季逐渐

升高; 饱和溶解氧浓度的空间差异并不显著, 仅东宇南部饱和溶解氧浓度在 7、8 月略低于其他观测站, 而在 10、11 月略高, 以及瑜泰北部饱和溶解氧浓度在 7 月略高于瑜泰。将溶解氧饱和度和表观耗氧量 (apparent oxygen utilization, AOU) 结合分析(图 5b、5c), 从春季到夏季溶解氧饱和度减小, 最小可至 50%, AOU 逐渐增大。除东宇南部外, 夏季 AOU > 0, 8 月中旬 DO 不饱和程度以及 AOU 达到最大, 夏季到秋季 AOU 逐渐减小为负值, DO 积累达到饱和或过饱和。瑜泰北部各月 AOU > 0, DO 被消耗始终处于不饱和状态, 而东宇南部则基本与之相反。可以发现, 在各季节底层 DO 不饱和程度以及其消耗总是北边大于南边, 且春、秋季节差异比夏季更大, 而溶解氧饱和度和 AOU 在纬向上相近, 这与底层 DO 浓度空间分布特征相对应。

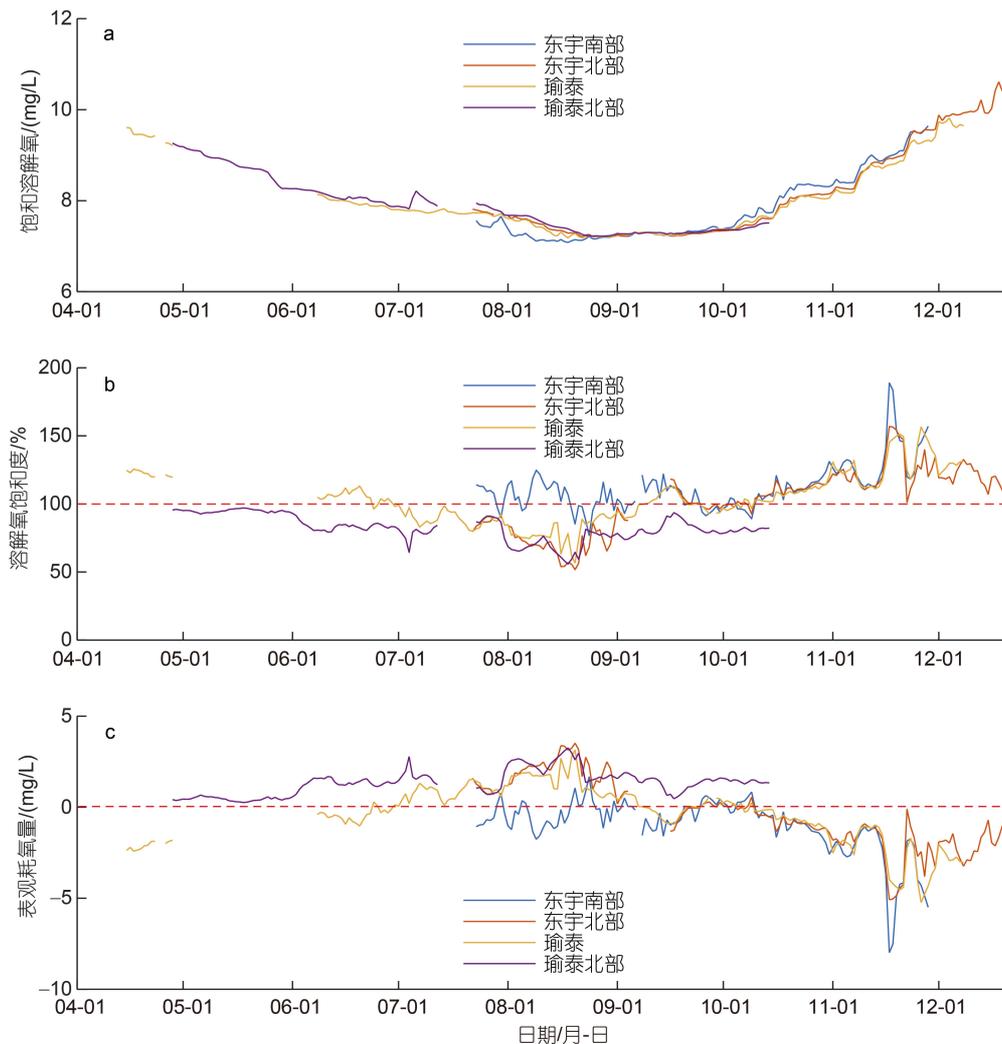


图 5 各连续观测站饱和溶解氧(a)、溶解氧饱和度(b)和表观耗氧量(c)时间序列图

Fig. 5 Time series of saturated dissolved oxygen (a), saturation percentage (b) and apparent oxygen utilization (c) at each continuous observation station

3 讨论

3.1 温盐物理调控

已有许多研究得出海水温度和盐度对 DO 浓度有一定影响(Younjoo *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2019)。由图 6a 可看出, 各连续观测站海水温度均具有显著的季节变化特征, 从春季到夏季逐渐升高, 从夏季到秋季逐渐降低。春季和秋季, 各观测站之间海水温度差异不大; 夏季东宇南部温度最高, 瑜泰北部温度最低, 东宇北部和瑜泰温度相近, 即海水温度南部大于北部, 而东西向差异较小。已知温度越高, 氧

的溶解度越小, 结合底层 DO 的时空分布特征, 推测其随季节变化的特征可能受到海水温度季节变化的影响, 而其空间分布差异也许与温度的物理调控没有直接关系。如图 6b 所示, 各连续观测站海水盐度没有明显的季节变化特征, 故其对 DO 浓度季节变化的影响还需进一步分析。图 7 对比了分别由实际温盐、实际盐度和平均温度以及实际温度和平均盐度计算得到的饱和溶解氧浓度, 发现海水温度是底层 DO 浓度有上述季节变化的主要影响因素, 而盐度对 DO 浓度季节变化以及空间差异的影响可以忽略不计。

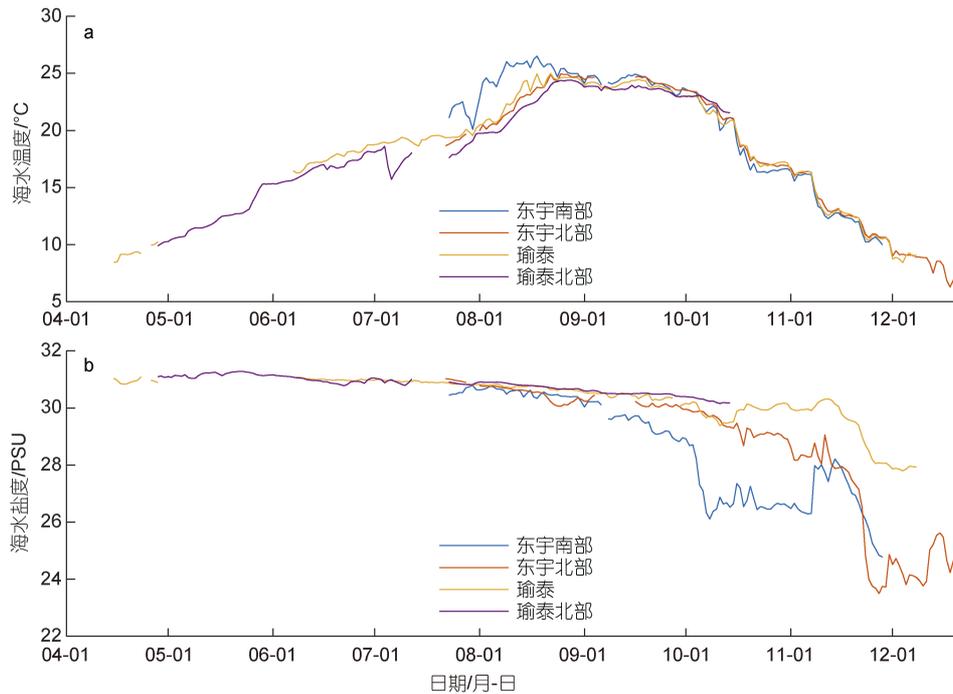
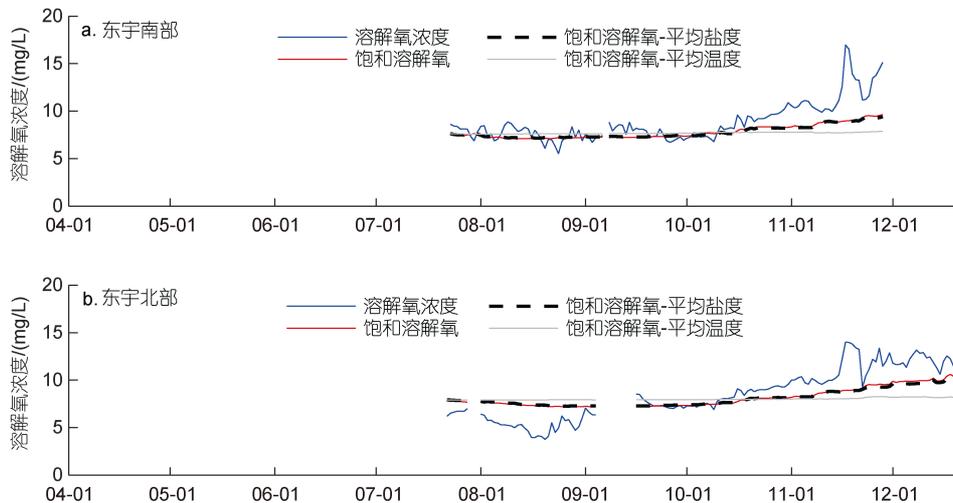


图 6 各连续观测站日平均温度(a)和日平均盐度(b)时间序列图

Fig.6 Time series of daily mean temperature (a) and salinity (b) at each continuous observation station



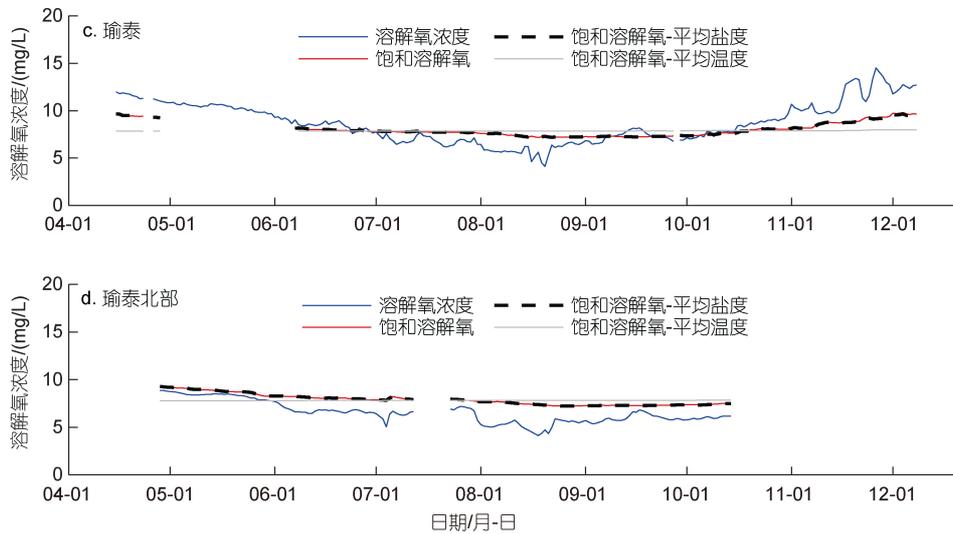


图7 各海洋牧场连续观测站日平均溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度(蓝线)、饱和溶解氧浓度(红线)、用平均盐度(黑虚线)和平均温度得到的饱和溶解氧浓度(灰线)时间序列

Fig.7 Time series of daily mean DO concentration (blue line), saturated DO concentration (red line), saturated DO concentration obtained using mean salinity (dashed black line), and mean temperature (gray line) at each continuous observation station

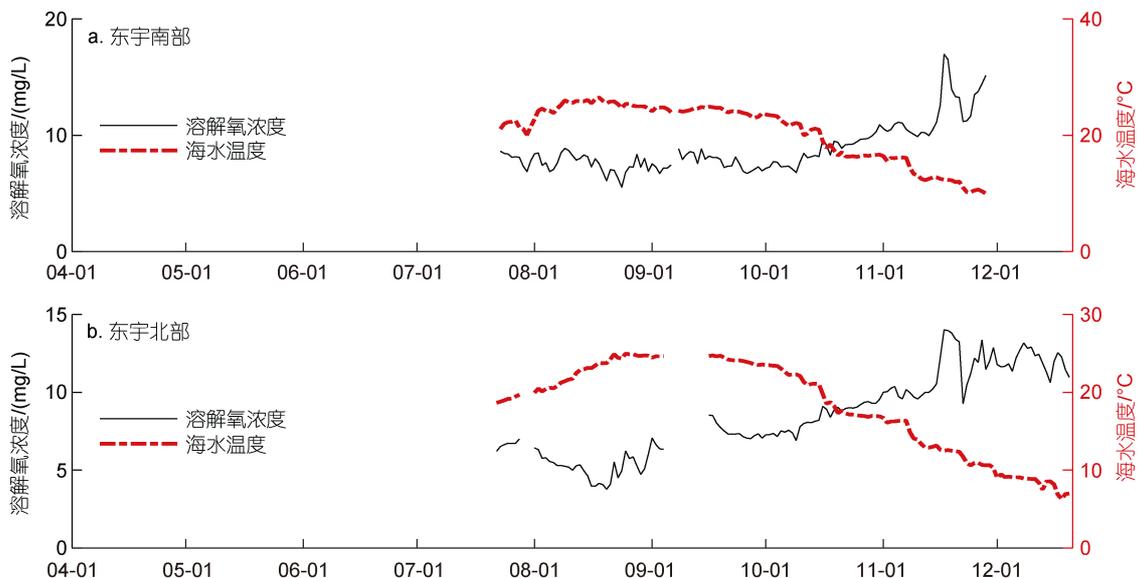
上文分析得到, 连续观测的底层 DO 浓度以及海水温度具有显著季节变化特征, 并且图 8 展示出 DO 浓度和海水温度随时间有相反的变化趋势, 即春季到夏季温度升高时, DO 浓度下降, 夏季到秋季温度降低时, DO 浓度逐渐升高。计算两者同期相关系数(表 3), 得到 4 个海洋牧场连续观测站的 DO 浓度和海水温度同期相关系数均在 -0.85 左右, 即两者有明显负相关关系, 进一步说明了 DO 浓度的季节变化趋势主要由海水温度进行物理调控。

线性拟合求得 DO 浓度和海水温度在升高以及降低阶段的变化速率(表 3), 对比可得: 温度升高(下

降)得越快, DO 浓度下降(升高)得越快, 反之越慢, 再次印证了 DO 浓度对温度季节变化的响应。

3.2 层结

已知 4 个海洋牧场连续观测站的 DO 浓度均在夏季降低并且达到最低值, 但如果只有海水温度的物理调控, 并不能使夏季 DO 浓度降低到观测结果所显示的程度(图 7)。有研究者得出, 对于在夏季经常出现的沿海底层海水低氧现象, 层结被认为是限制 DO 物理供应的主要因素, 因为层结阻碍了底层水与富氧表层水的交换(Diaz, 2001; Fennel *et al*, 2019), 并且在该海域夏季确有季节性温跃层存在(李兆钦等, 2019;



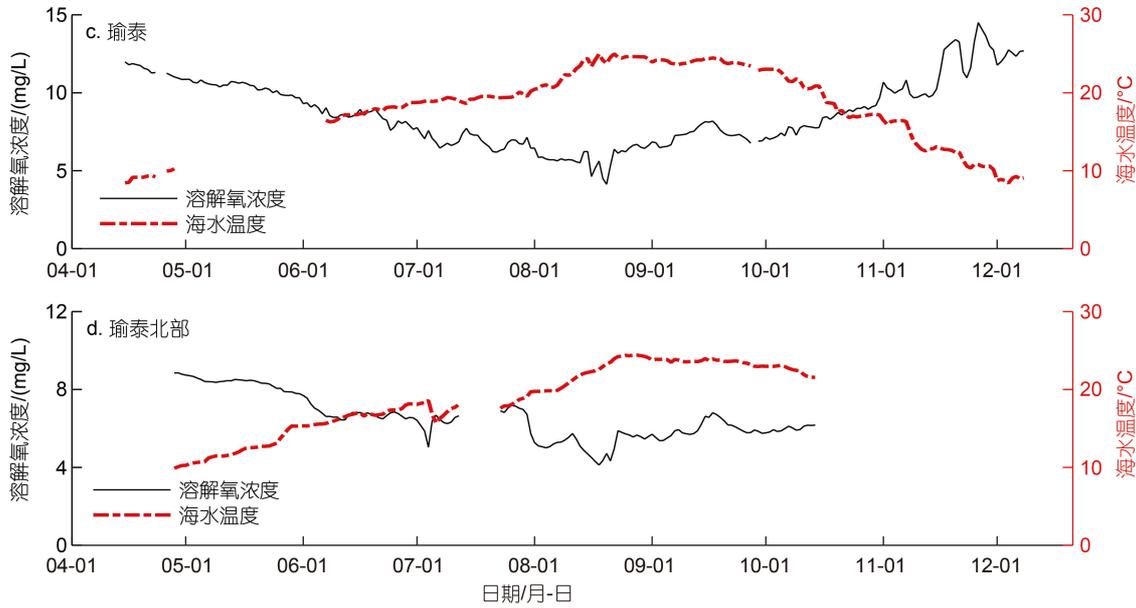


图 8 各连续观测站日平均溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度和海水温度时间序列

Fig.8 Time series of daily mean DO concentration and seawater temperature at each continuous observation station

表 3 各连续观测站溶解氧(dissolved oxygen, DO)浓度和海水温度同期相关系数以及升高、下降速率

Tab.3 Correlation coefficients of DO concentration and seawater temperature, and the rates of increase and decrease in DO concentration and temperature at each continuous observation station

站位名称	同期相关系数	温度升高速率/(°C/d)	DO 下降速率/(mg/L·d)	温度降低速率/(°C/d)	DO 升高速率/(mg/L·d)
东宇南部	-0.84	0.24	-0.18	-0.22	0.12
东宇北部	-0.88	0.22	-0.12	-0.21	0.06
瑜泰	-0.86	0.11	-0.05	-0.21	0.08
瑜泰北部	-0.86	0.15	-0.07	-0.04	0.02

刘禹铨等, 2019; 王心怡等, 2020; Zhai *et al.*, 2021), 故 4 个连续观测站 DO 浓度在夏季降低, 而且在 8 月 20 日左右达到最低值, 很可能是海水季节性层结所致。对于 4 个连续观测站, 用海表与海底的温差来作为海水层结强度的指标, 海表温度使用的是 MURSST 数据。

分析图 9 可知, 在 4 月和 5 月, 以及从 8 月 20 日左右至 12 月, 表底温差在 0 附近波动, 层结较弱; 而在 6、7 月至 8 月上、中旬表底温差较大, 即海水温度层结较强, 说明 4 个连续观测站夏季 DO 浓度降低并至最小值, 是季节性层结阻碍了表底海水交换所致。此外, 东宇南部、东宇西部和瑜泰在 11 月份表底温差减小为 0 时, 对应 AOU 也明显减小, 说明此时海水充分垂向混合, 表层丰沛的 DO 可以到达底层, 使得底层海水 AOU 减小, DO 浓度升高达到饱和状态。另外, 表底温差最大值即层结最强出现在 7 月下旬(7 月 20 日之后), 而 AOU 最大值(DO 浓度最小值)出现在 8 月 20 日左右(蓝色虚线标明), 也就是层结转

弱的时候, 即二者有近一个月的时间差。

在夏季, 瑜泰北部 DO 浓度小于瑜泰, 而瑜泰 DO 浓度又略高于东宇北部, 并且东宇南部 DO 浓度最大。图 10 展示了各连续观测站夏季层结强度的空间差异: 瑜泰北部海水层结强度从 6 月下旬至 8 月中旬一直明显强于瑜泰; 东宇北部海水层结强度虽然在 7 月份弱于瑜泰北部, 但整体强于瑜泰; 东宇南部层结最弱, 即在经向上, 北边季节性层结要比南边更强, 而在纬向上层结强度差异较小。综上, 海水层结强度的空间分布差异导致了研究海域夏季底层 DO 浓度在经向上南边大于北边, 而在纬向上东边略大于西边。

3.3 生化过程

生化过程也是造成 DO 浓度季节差异的一个重要因素。Wang 等(2018)研究得出 DO 与浮游植物总量呈负相关, 并证明了初级生产力对 DO 的影响。春季到夏季透光层内浮游植物的繁殖、有机质沉积及其耗氧分解为夏季底部低氧的形成提供了条件(Wei *et al.*, 2019)。

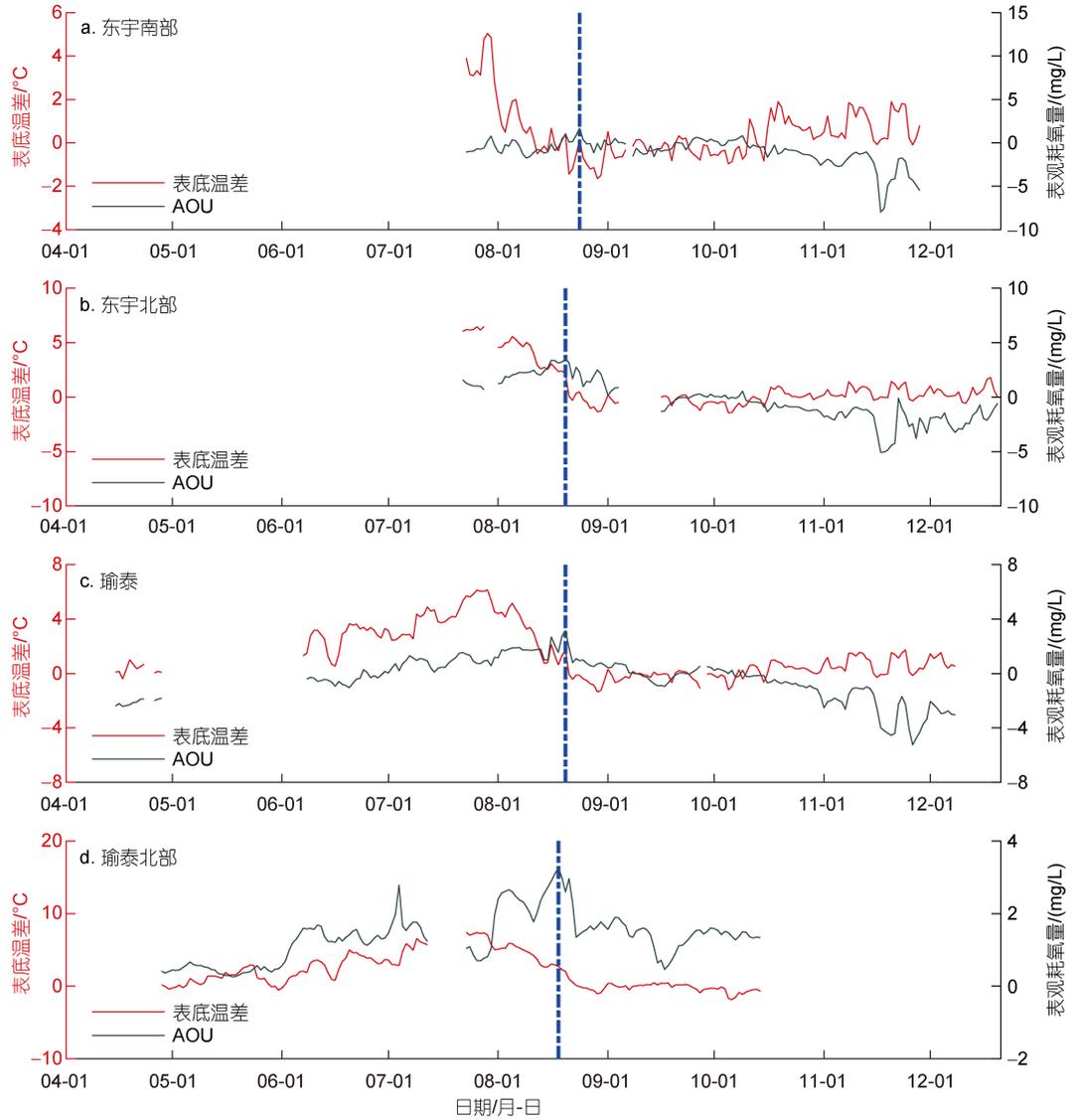


图9 各连续观测站日平均表底温差和表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU)时间序列

Fig.9 Time series of daily mean surface-bottom temperature difference and AOU at each continuous observation station
注: 蓝色虚线标明 AOU 最大值

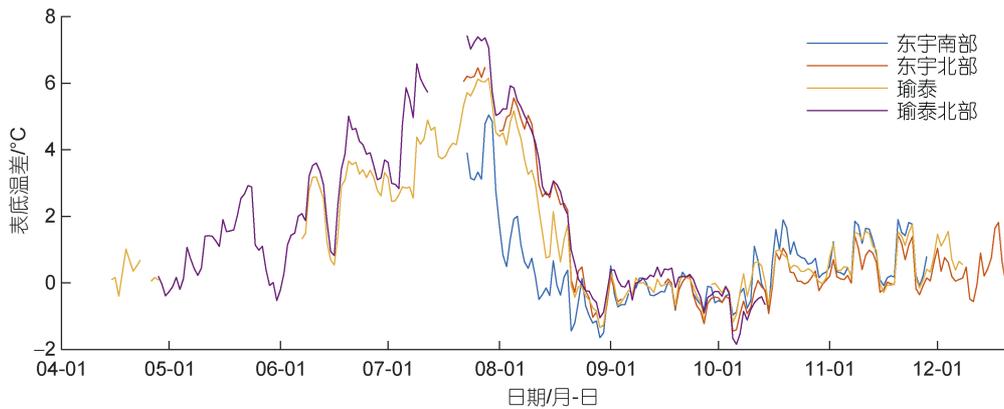


图 10 各连续观测站日平均表底温差对比图

Fig.10 Comparison of daily mean surface-bottom temperature differences at each continuous observation station

在东宇南部、东宇北部和瑜泰, DO 浓度在 11 月中旬显著升高(图 4a 黑圈处), 但是海水温度并没有明显降低(图 6a), 又发现 11 月中旬在这 3 个连续观测站叶绿素浓度有快速升高的现象(图 11), 故考虑可能是生化过程对 DO 浓度的变化有一定影响。由于瑜泰北部缺少叶绿素数据, 在此不对该观测站做分析。由图 11 可知, 叶绿素浓度并无显著季节变化, 说明其不是导致 DO 季节变化趋势的主要因素; 整体上东宇北部叶绿素浓度最小, 瑜泰最大; 东宇南部叶绿素和 AOU 有较明显的负相关关系, 在 10~11 月二者的相关系数为 -0.87 , 但东宇北部和瑜泰二者关系并不显著, 然而 11 月中旬近岸 3 个观测站都出现了叶绿素显著升高同时 AOU 显著减小的现象。

查阅《2021 年中国海洋灾害公报》(2022), 发现烟威近岸海域的主要赤潮过程发生在 11 月 27 日至

12 月 16 日, 故 11 月中旬研究海域叶绿素显著升高并非由于发生赤潮; 近岸 3 个站位间水深差异较大, 却都存在上述叶绿素和 AOU 快速变化的现象。综合上述两点, 考虑上述现象可能是极端的天气过程增强了海水垂向混合所致。ERA5 数据显示, 研究海域在 2021 年 11 月 10 日左右确实发生了持续 4 d 风速大于 8 m/s 的大风天气, 风向东南(图 12)。根据上文分析已知, 在 11 月中上旬, 3 个观测站的表底温差减小至 0 和叶绿素浓度显著增大、AOU 显著减小的时间一致(图 9、图 11), 与风速时间序列对比发现, 三者均滞后于大风过程 3~4 d。11 月上旬大风过后的几天内气温并未骤降反而略有升高(图 12b), 故查阅历史天气, 发现该时间内多为晴朗天气。综上推测, 可能是大风引起海底有机物悬浮、海水中营养盐增多, 浮游植物得以大量繁殖, 加之天气晴朗阳光充足促进其光合

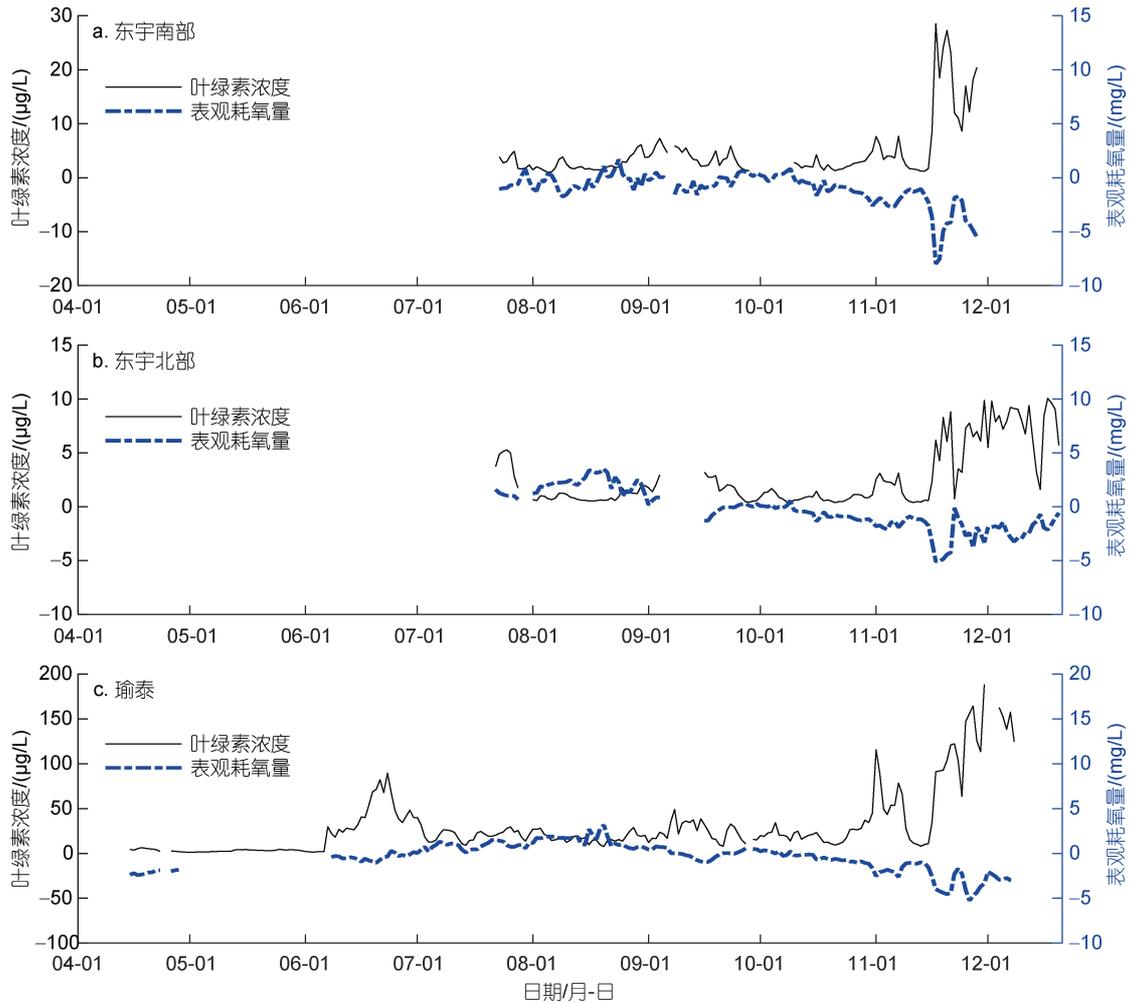


图 11 各海洋牧场连续观测站日平均叶绿素和表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU)时间序列
Fig. 11 Time series of daily mean chlorophyll and AOU at each continuous observation station

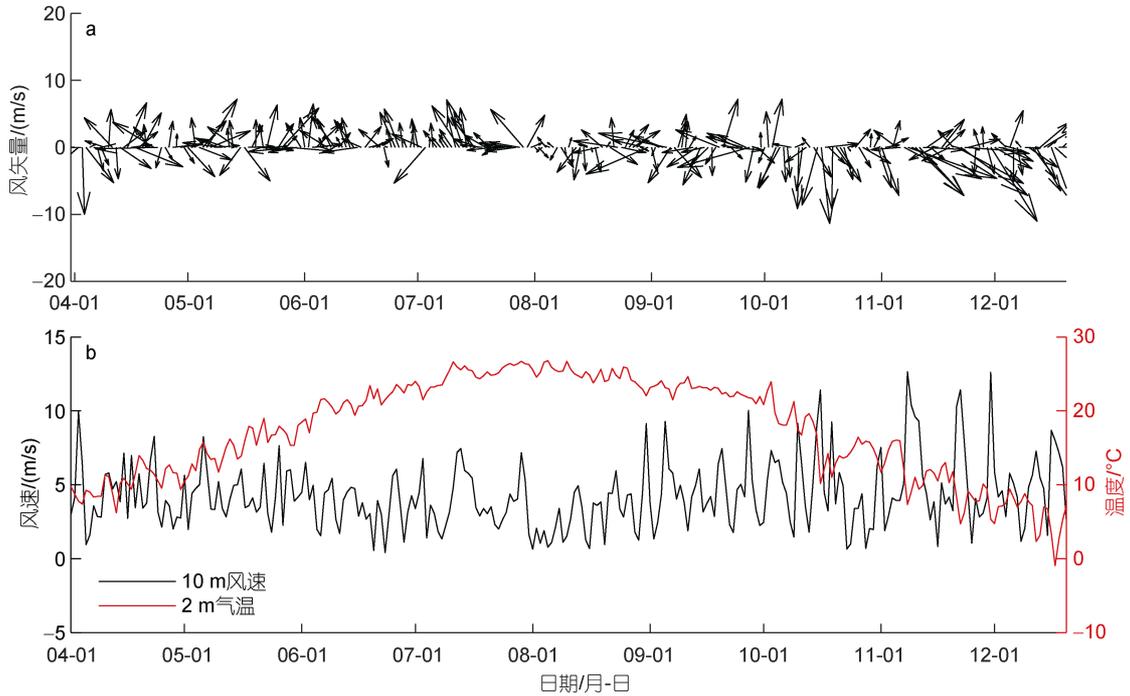


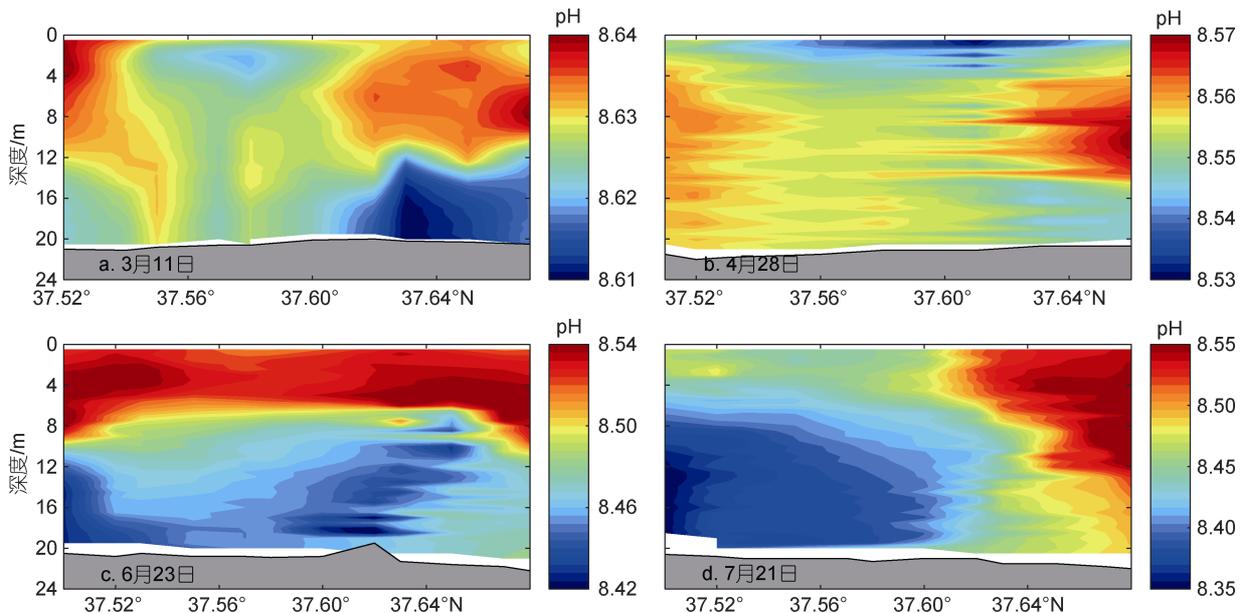
图 12 2021 年 4~12 月 10 m 风矢量(a)和 10 m 风速、2 m 气温(b)时间序列

Fig.12 Time series of 10 m wind vector (a), 10 m wind speed, and 2 m air temperature (b) from April to December 2021

作用的进行,使上层海水中叶绿素和 DO 浓度增加,之后表底温差降至 0,海水层结消失,海水充分垂向混合,丰富的 DO 和叶绿素随之到达底层,导致叶绿素显著增多、AOU 显著减小,同时底层 DO 浓度快速升高的现象(图 4a 黑圈处)。

根据上文分析得出,底层 DO 浓度在夏季达到最小值,AOU 达到最大值,除了夏季海水层结阻碍 DO 物理供应外是否也有生化过程在起作用,还需要分

析该海域海水 pH 时空分布情况来做进一步探究。由于连续观测资料缺少 pH 数据,本研究使用该海域大面观测得到的 pH 数据进行补充。图 13、图 14 展示了经、纬向断面海水 pH 分布情况,发现该海域未出现酸化现象(pH 在 8.35~8.65)。从各月观测断面海水 pH 可看出,pH 从春季到夏季减小,8 月份最小,8 月到 9 月增大,并且 pH 有明显随深度减小的趋势,说明夏季底层生化作用比其他季节更活跃,同时耗



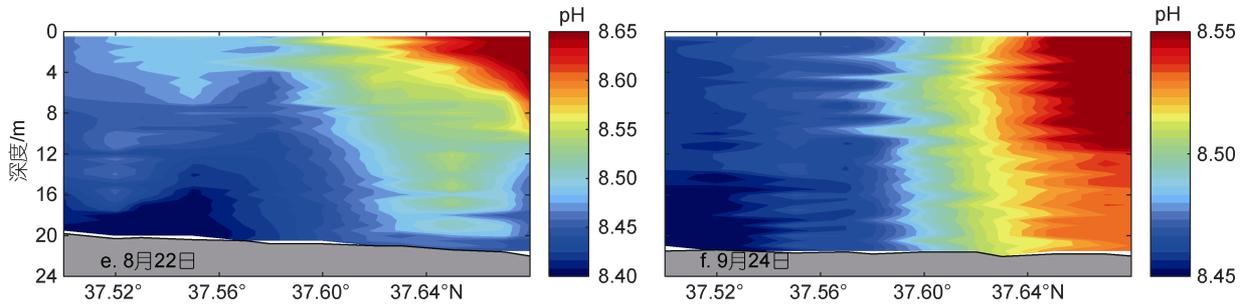


图 13 pH 经向断面分布图
Fig.13 Meridional distribution of pH

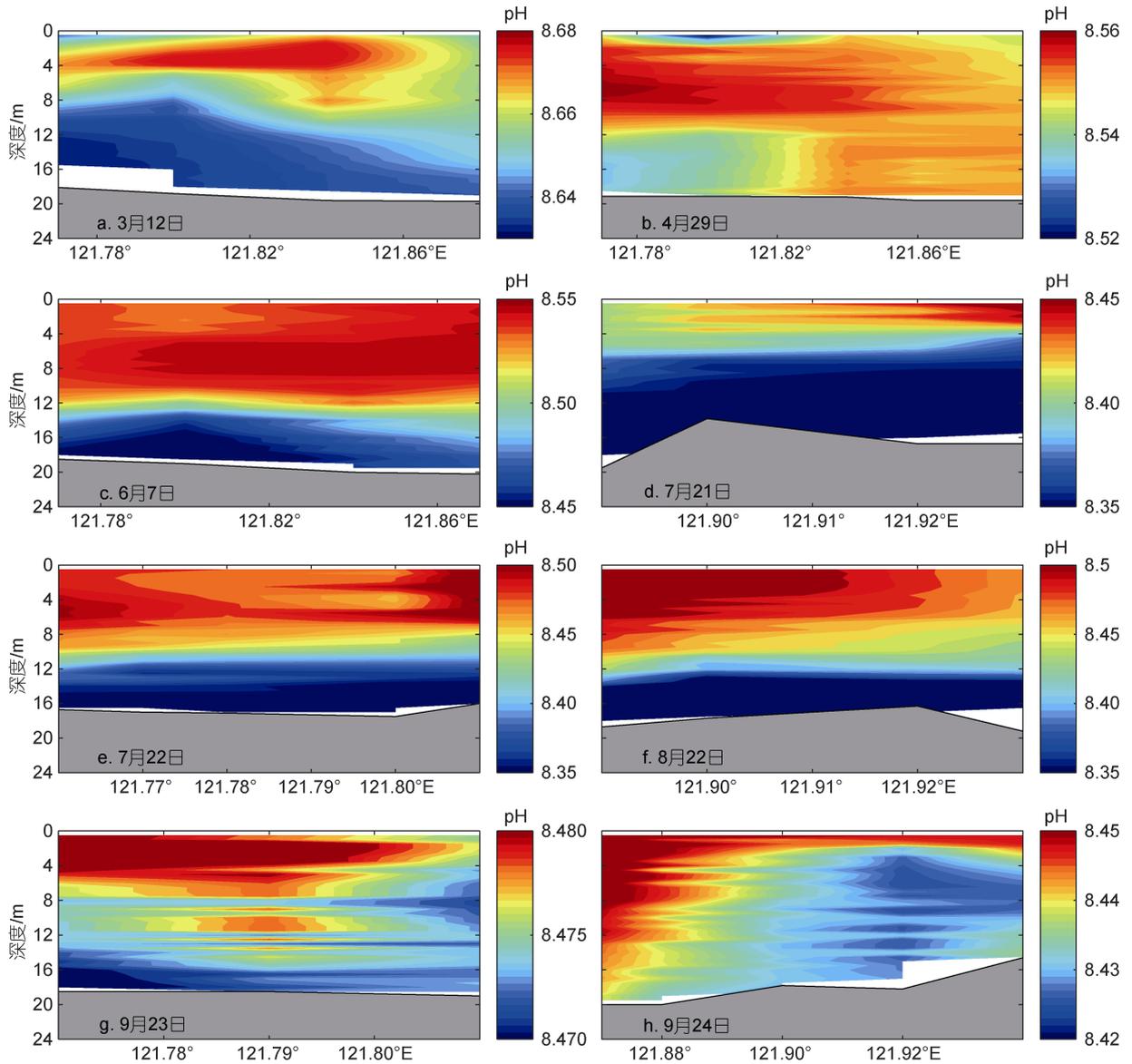


图 14 pH 纬向断面分布图
Fig.14 Zonal distribution of pH

氧也更多。结合底层 DO 浓度和 AOU 季节分布特征, 夏季 DO 浓度最低可能不仅是由于层结阻碍底层 DO

物理供应, 还存在夏季海底生物化学耗氧过程更活跃的因素。

4 结论

本文基于 2021 年 4~12 月山东半岛烟台-威海北部海洋牧场区域 4 处连续观测站的长期、同步观测数据, 分析了该海域底层 DO 的季节变化特征, 并探讨了影响 DO 浓度的物理机制。在时间上, 4 个连续观测站的 DO 浓度均表现出明显的季节变化特征, 即从春季到夏季逐渐降低, 从夏季到秋季逐渐升高, 这种季节变化趋势主要由温度进行物理调控; 各观测站底层 DO 浓度均在夏季降低, 并且在 8 月 20 日左右达到最低值, 海水层结限制 DO 垂向物理供应是主要因素, 其阻碍了底层水与上层富氧水的交换, 并且夏季海底生化作用更活跃, 消耗 DO 增多。在空间上, 夏季位于最南边的东宇南部 DO 浓度最大, 并且 DO 浓度在南北方向上瑜泰>瑜泰北部, 东西方向上瑜泰>东宇北部, 这是海水层结强度的空间差异所致, 层结强度越大底层 DO 浓度越低; 在春季和秋季, DO 浓度纬向差异整体不大, 而在经向上 DO 浓度北边显著小于南边, 这是由于在春、秋季海水层结很弱, 底层 DO 通过海水垂向混合得以补充, 并且水深更浅的瑜泰 DO 更容易到达海底而呈饱和或过饱和状态, 而水深更深的瑜泰北部底层 DO 仍处于不饱和状态; 春、秋季 DO 浓度南北差异比夏季更大, 是因为夏季层结阻碍作用, 各观测站处的底层 DO 均不易得到物理供应而处于不饱和状态, 并且南边 DO 降低更快, 故南北差异减小。近岸 3 个观测站底层 DO 浓度在 11 月中旬快速升高, 叶绿素浓度也显著增加, 推测该现象可能是海水垂向混合的结果, 即持续大风天气引起浮游生物大量繁殖, 加之天气晴朗促进其光合作用的进行, 上层海水中叶绿素和 DO 浓度增加, 之后海水层结消失, 海水充分垂向混合, 最终导致底层叶绿素显著增多, 同时 DO 浓度快速升高。本研究使用长期的连续观测数据, 首次对烟台-威海北部海域 4 个海洋牧场观测站进行了多点联合研究, 进一步补充和完善了该海域海水 DO 浓度季节尺度的时空变化特征及影响机制的研究理论。

参 考 文 献

- 王心怡, 刘子洲, 顾艳镇, 等, 2020. 西港海洋牧场底层海水溶解氧浓度时变特征[J]. 海洋科学, 44(9): 9-20.
- 石强, 2016. 黄海溶解氧含量场季节循环时空模态与机制[J]. 应用海洋学学报, 35(1): 1-14.
- 自然资源部海洋预警监测司, 2022. 2021 年中国海洋灾害公报[R/OL]. (2022-04-08)[2023-01-20]. http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735508.html.
- 刘春利, 葛长宇, 张玉娟, 等, 2017. 黄海表层溶解氧时空分布特征[J]. 海洋环境科学, 36(2): 255-260.
- 刘禹铨, 刘子洲, 顾艳镇, 等, 2019. 威海市天鹅湖海洋牧场底层海水溶解氧浓度时间变化特征[J]. 海洋科学, 43(9): 41-53.
- 孙利元, 刘子洲, 丁金强, 等, 2021. 夏季烟台-威海北部近海溶解氧浓度垂向分布的最小值[J]. 海洋科学, 45(11): 20-29.
- 李兆钦, 李欣, 孙利元, 等, 2019. 刘公岛海洋牧场底层海水溶解氧浓度的变化特征[J]. 海洋与湖沼, 50(1): 86-99.
- 李道季, 张经, 黄大吉, 等, 2002. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学(D 辑), 32(8): 686-694.
- 辛明, 马德毅, 王保栋, 等, 2013. 黄海溶解氧的平面分布特征及其季节变化[J]. 中国海洋大学学报, 43(7): 56-60.
- 宋国栋, 石晓勇, 祝陈坚, 2007. 春季黄海溶解氧的平面分布特征及主要影响因素初探[J]. 海洋环境科学, 26(6): 534-536.
- 翟方国, 顾艳镇, 李培良, 等, 2020. 山东省海洋牧场观测网的建设与发展[J]. 海洋科学, 44(12): 93-106.
- DIAZ R J, 2001. Overview of hypoxia around the world [J]. Journal of Environmental Quality, 30(2): 275-281.
- FENNEL K, TESTA J M, 2019. Biogeochemical controls on coastal hypoxia [J]. Annual Review of Marine Science, 11: 105-130.
- GARCIA H E, GORDON L I, 1992. Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations [J]. Limnology and Oceanography, 37(6): 1307-1312.
- WANG N, HUANG B Q, DONG Y T, *et al*, 2018. The evolution of deepwater dissolved oxygen in the northern South China Sea since 400 ka [J]. Palaeoworld, 27(2): 301-308.
- WEI Q S, WANG B D, YAO Q Z, *et al*, 2019. Spatiotemporal variations in the summer hypoxia in the Bohai Sea (China) and controlling mechanisms [J]. Marine Pollution Bulletin, 138: 125-134.
- YOUNJOO J L, LWIZA K M M, 2008. Characteristics of bottom dissolved oxygen in Long Island Sound, New York [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76(2): 187-200.
- ZHAI F G, LIU Z Z, LI P L, *et al*, 2021. Physical controls of summer variations in bottom layer oxygen concentrations in the coastal hypoxic region off the northeastern Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 126(5): e2021JC017299.

SEASONAL VARIATION OF DISSOLVED OXYGEN CONCENTRATION IN BOTTOM WATER OF MARINE RANCHES NORTH OF YANTAI-WEIHAI

FAN Si-Qi¹, LIU Zi-Zhou¹, ZHAI Fang-Guo¹, GU Yan-Zhen²

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Oceanic, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract Based on the long-term observed data from four consecutive stations in marine ranch area north of Yantai and Weihai, Shandong Peninsula from April to December 2021, the dissolved oxygen (DO) concentration in the bottom was investigated, and the physical mechanism was discussed. The DO in the bottom water layer gradually decreased from spring to summer, and gradually increased from summer to autumn, which was mainly controlled by temperature. The DO at all the stations was the lowest in August, which was influenced by vertical stratification and the increase of underlying biochemical oxygen consumption. The DO concentration in the bottom water had a small difference in the east-west direction, but a significant difference in the north-south direction. In spring and autumn, the DO concentration was higher in the south and lower in the north, because the stratification was weak and the vertical mixing of seawater provided DO to the bottom. Moreover, the water depth in the south was shallower, thus DO was more likely to reach saturation, while DO in the deeper water depth remained in unsaturated state. In summer, caused by the spatial difference of seasonal stratification intensity, DO concentration in the south was higher than it in the north. Meanwhile, the DO concentration in the south decreased faster, which reduced the difference between the north and the south in summer. In mid-November, there was a rapid increase in DO at the three nearshore stations, which was possibly due to the phytoplankton bloom caused by previous strong wind process. And sunny weather promoted photosynthesis in phytoplankton, increasing DO in seawater.

Key words marine ranch; bottom dissolved oxygen concentration; seasonal seawater stratification; biochemical processes