

夏、冬季黄东海溶解氧的分布特征研究*

池连宝^{1, 2, 3} 宋秀贤^{1, 2, 3} 袁涌铨^{1, 2} 周鹏^{1, 2, 3} 曹西华^{1, 2} 俞志明^{1, 2, 3}

(1. 中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266237; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 本文基于 2015 年 8 月和 12 月的现场调查资料, 分析了我国黄东海溶解氧(DO)分布特征与季节变化, 并对其影响因素进行了探讨。结果表明: 黄东海 DO 的分布存在明显的时空差异。夏季, DO 质量浓度的变化范围为 1.92—11.35mg/L, 南黄海冷水团海域存在中层水体 DO 最大值现象; 长江口附近(30.73°—32.30°N, 122.96°—124.60°E)与浙江近海(28.43°—29.40°N, 121.97°—122.63°E)底层存在低氧区(DO<3mg/L), 面积可达 14800km²; 且东海外侧底层(28.88°—29.70°N, 124.08°—124.90°E)存在 DO<4mg/L 的 DO 低值区。冬季, DO 质量浓度变化范围为 4.81—10.29mg/L, 总体上呈现近岸高、外海低的分布特征; 南黄海中部(33.80°—34.66°N, 123.52°—124.23°E)与北部(35.50°—36.36°N, 122.96°—123.82°E)底层水体 DO 质量浓度低于 6mg/L, DO 最低值为 4.81mg/L。黄东海 DO 分布特征及其变化受物理过程与生物化学过程等多种因素的综合影响, 且表现出明显的时空分布差异。

关键词 黄东海; DO 分布特征; 季节变化; 影响因素

中图分类号 P734 doi: 10.11693/hyhz20170500142

海洋中的溶解氧(dissolved oxygen, DO)是一项重要的生源要素参数, DO 含量变化对海洋生物的生存与分布以及海洋中的生物地球化学过程均会产生重要影响(Diaz *et al*, 2008; Middelburg *et al*, 2009)。受物理、生物与化学过程等因素的综合作用, DO 分布呈现出明显的时空差异特征(Rabouille *et al*, 2008; Zhang *et al*, 2010; Li *et al*, 2011)。我国黄东海是西太平洋的陆架边缘海, 陆架面积广阔且拥有丰富的海洋资源。受黄海冷水团(YSCW)、长江冲淡水(CDW)、沿岸径流、台湾暖流(TWC)与黑潮(Kuroshio)等不同水系的影响, 生态环境十分复杂。前期针对长江口及其邻近水域、浙江近岸、南黄海等黄东海典型海域 DO 分布特征已开展了诸多研究, 并取得了一定成果(蒋国昌等, 1991; 王保栋等, 1999; 杨庆霄等, 2001; 宋国栋等, 2007; 张莹莹等, 2007; 韦钦胜等, 2010a, b; Wang *et al*, 2012; 柴小平等, 2015)。但受限于航次调查时间和调查区域等因素, 目前对我国黄东海广阔

水域 DO 分布特征的研究相对较少, 对黄东海 DO 的分布特征及季节变化规律尚缺乏系统的了解与认识。

本文基于 2015 年 8 月与 12 月黄东海两个航次的调查资料, 较系统的分析了我国黄、东海海域的 DO 分布特征与季节变化规律, 并结合温度、盐度与营养盐等同步资料, 对研究海域的 DO 分布特征及季节变化的影响因素进行了初步探讨。

1 材料与方法

1.1 调查区域

在 2015 年 8 月 27 日—9 月 14 日(夏季)与 2015 年 12 月 17 日—2016 年 1 月 3 日(冬季)期间, 分别搭载“北斗号”和“科学三号”科学考察船对我国黄海和东海海域(25°—37°N, 119°—126°E)进行了水文、化学和生物的多学科综合调查, 共设置采样断面 15 条, 采样站位 86 个(图 1)。以长江口—济州岛连线为界, 将研究海域分为黄海海域和东海海域两个区域。

* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类), XDA11020601 号; 国家重点研发计划, 2016YFE0101500 号; 国家自然科学基金-山东省人民政府联合资助项目, U1606404 号。池连宝, 博士研究生, E-mail: chilianbaobio@163.com

通讯作者: 宋秀贤, 研究员, 博士生导师, E-mail: songxx@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-05-22, 收修改稿日期: 2017-09-12

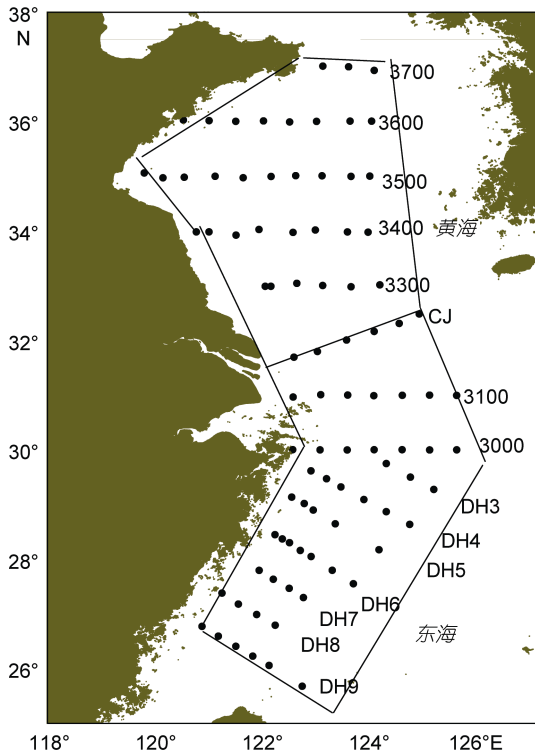


图1 2015年夏、冬季我国黄东海调查海域及站位分布示意图

Fig.1 The study area and sampling sites in the Yellow Sea and East China Sea in summer and winter of 2015

1.2 样品采集与分析

利用 Sea-Bird Equipment 917 CTD 仪测定现场的温度、盐度和深度等水文参数, 并利用 Niskin 12 采水器采集水样; 根据水深情况采集各个站位的标准层水样, 包括表层、5、10、20、30、50m 和底层(离底 3m)水样。现场样品的采集、保存及部分环境参数的测定按照《海洋调查规范》(GB 17378.3-2007)进行。

DO 的测定采用 Winkler 碘量法完成现场滴定, 并据此对 CTD 探头数据进行校正获取 1m/层精度的 DO 数据; 营养盐水样按照《海洋监测规范》的规定方法, 经 Whatman GF/F 滤膜过滤后, 水样用洁净的聚乙烯瓶封装, 加入 1—2 滴氯仿固定, 并在 -20°C 环境中冷冻保存, 之后在实验室通过 SKALAR 营养盐自动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定。

1.3 数据处理与统计分析

利用 Weiss 方程计算夏季与冬季各站位采样点的饱和 DO 含量, 并据此计算各个采样点的 DO 饱和度与表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU) (Pytkowicz, 1971)。DO 与主要环境因子间的相关关系利用 OriginPro8.6 软件的 Pearson 进行相关性分析, 相关参数的等值线分布图采用 Golden Software

Surfer 11.0 软件进行绘制。

$$\text{AOU} = \text{DO}_{\text{饱和值}} - \text{DO}_{\text{现场实测值}}$$

$$\text{DO}_{\text{饱和度}} = \text{DO}_{\text{现场实测值}} / \text{DO}_{\text{饱和值}} \times 100\%$$

2 结果

2.1 水文参数的平面分布特征及季节变化特点

2015 年夏、冬季调查海域表、底层温度与盐度平面分布如图 2 所示。夏季研究海域表、底层温度与盐度差别较大, CDW 对研究海域的温度、盐度分布具有重要影响, 且对表层水体影响更为显著。其中, 黄海海域表层水体温度与盐度的变化范围分别为 $23.21\text{—}27.13^{\circ}\text{C}$ 和 $28.88\text{—}32.08$; 整体上而言, 随着纬度升高, 黄海海域表层水体温度逐渐降低而盐度则逐渐升高。黄海海域底层水体温度与盐度的变化范围分别是 $7.11\text{—}27.12^{\circ}\text{C}$ 与 $28.90\text{—}33.22$, 温度呈现近岸高、外海低的分布特征, 盐度的变化则呈现出相反的趋势。在黄海海域的东北部($33.74^{\circ}\text{—}37.00^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ}\text{—}124^{\circ}\text{E}$)底层存在低温水体($T < 10^{\circ}\text{C}$), 呈 YSCW 特征。东海海域表层水体温度与盐度的变化范围分别是 $24.99\text{—}28.04^{\circ}\text{C}$ 与 $24.00\text{—}34.13$, 表层水体温度与盐度的变化趋势相同, 呈现近岸低、外海高的分布特征。东海底层水体温度与盐度的变化范围分别为 $14.26\text{—}26.45^{\circ}\text{C}$ 与 $27.14\text{—}34.66$, 随着离岸距离的增加, 温度逐渐降低而盐度逐渐升高, 受黑潮影响, 东南部海域($25.90^{\circ}\text{—}30.06^{\circ}\text{N}$, $121.91^{\circ}\text{—}123.09^{\circ}\text{E}$)底层水体呈现低温($T < 20^{\circ}\text{C}$)、高盐($S > 34.4$)的特征。

冬季, CDW 对研究海域的影响减弱。黄海海域表层水体温度与盐度的变化范围分别是 $9.05\text{—}13.86^{\circ}\text{C}$ 与 $29.85\text{—}32.18$, 总体上呈现近岸低、外海高的分布特征。受黄海暖流(YSWC)影响, 在南黄海南部存在一支自东南向西北方向延伸的高盐($S > 32$)暖水($T > 12^{\circ}\text{C}$), 水温与盐度明显高于两侧。黄海海域底层水体温度与盐度分布特征与表层基本一致。东海海域水体温度与盐度整体上高于黄海海域, 表层水体温度与盐度的变化范围分别为 $12.06\text{—}23.58^{\circ}\text{C}$ 与 $24.32\text{—}34.77$, 随着离岸距离的增加, 温度与盐度逐渐增加。底层温度与盐度的变化范围分别是 $13.38\text{—}20.68^{\circ}\text{C}$ 与 $27.06\text{—}34.69$, 其分布特征与表层基本一致。

2.2 DO 平面分布特征及季节变化特点

2015 年夏、冬季我国黄东海表层与底层 DO 浓度及饱和度变化如表 1 所示。研究海域表层水体 DO 含量高于底层, 基本上处于饱和状态且季节变化不显著($n=173$, $P > 0.05$)。底层水体 DO 含量具有显著的

季节变化特点($n=178, P<0.01$), 夏季底层水体 DO 含量较低, 整体上处于不饱和状态, 且东海海域底层水体 DO 含量低于黄海海域。冬季黄东海表、底层水体

DO 质量浓度与饱和度较夏季均有提高, 且底层水体的变化更为显著。与夏季不同, 冬季东海海域底层水体 DO 饱和度高于黄海海域。

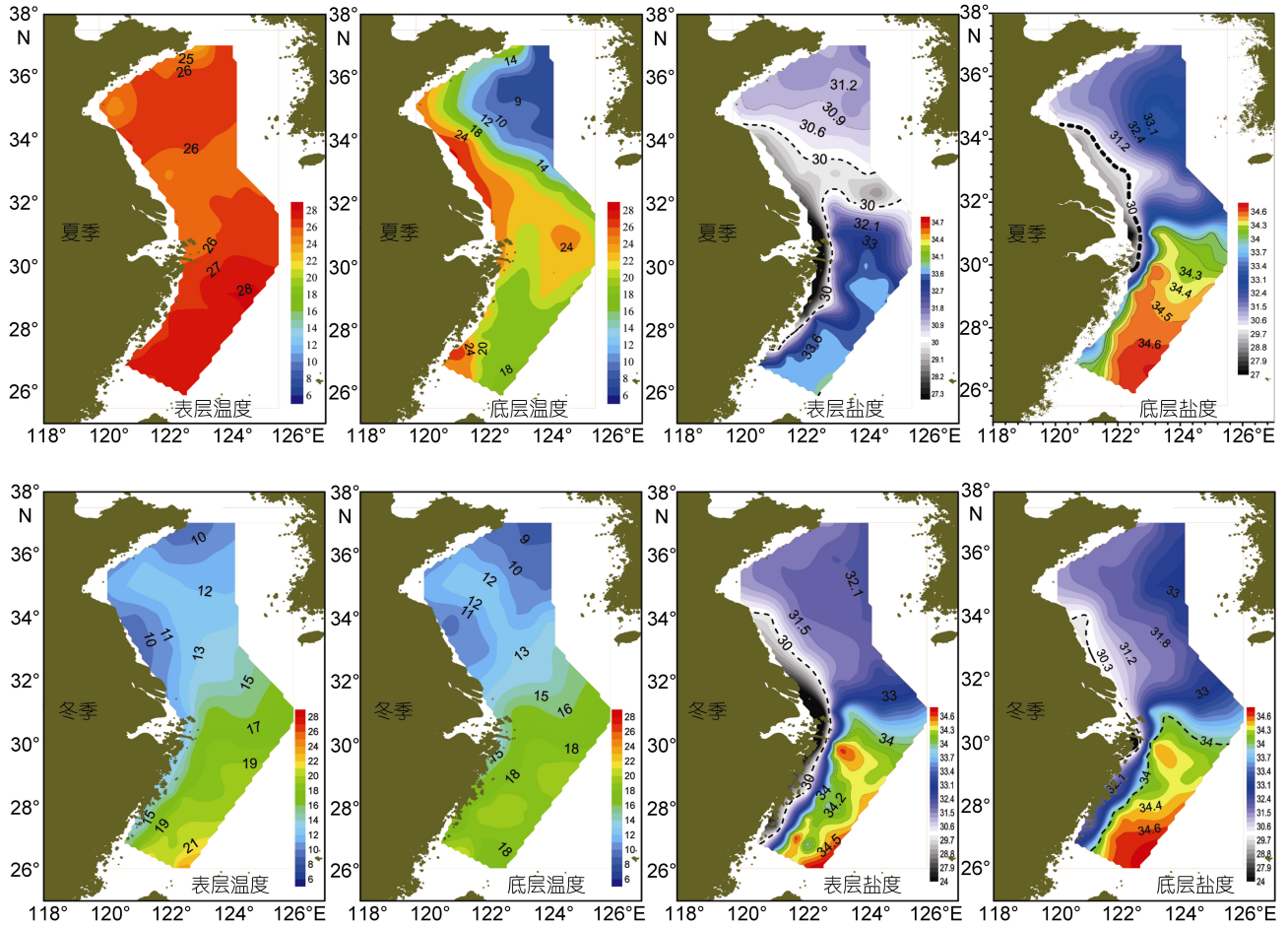


图 2 2015 年夏、冬季我国黄东海表、底层温度与盐度平面分布

Fig.2 The surface and bottom distribution of temperature (°C) and salinity in the study area in summer and winter of 2015

表 1 2015 年夏、冬季研究海域表、底层 DO 质量浓度及 DO 饱和度值
Tab.1 DO concentration and saturation of the study area in summer and winter of 2015

样品		夏季		冬季	
		DO 质量浓度(mg/L)	DO 饱和度(%)	DO 质量浓度(mg/L)	DO 饱和度(%)
黄海海域	表层	6.40—9.67 7.68(平均值, 余同)	94.97—140.71 113.06	8.50—10.29 9.19	98.28—112.69 103.24
	底层	3.63—8.82 6.96	47.84—116.04 84.53	4.81—9.86 8.16	55.95—108.96 90.92
东海海域	表层	6.73—9.63 7.52	96.35—141.21 113.07	7.20—9.67 8.26	100.32—113.02 105.83
	底层	1.92—6.62 4.62	25.27—94.27 63.34	6.00—9.39 8.09	76.78—113.24 104.03

在夏季, 研究海域表层 DO 整体上处于饱和状态且分布较为均匀(图 3a)。黄海海域底层水体 DO 整体上呈现不饱和状态, 平均饱和度为 84.53%。DO 质量

浓度低且随着纬度减小而逐渐降低(图 3b)。东海海域底层水体 DO 平均含量仅为 4.62mg/L, DO 饱和度平均为 63.34%, 明显低于黄海海域的同期水平。东海海

域底层水体 DO 含量随离岸距离的增加而逐渐升高, 在长江口附近海域 ($30.73^{\circ}\text{--}32.30^{\circ}\text{N}$, $122.96^{\circ}\text{--}124.60^{\circ}\text{E}$) 与浙江近海 ($28.43^{\circ}\text{--}29.40^{\circ}\text{N}$, $121.97^{\circ}\text{--}122.63^{\circ}\text{E}$) 存在 $\text{DO} < 3\text{mg/L}$ 的低氧区, 两处低氧区均位于 50m 等深线以内, 面积分别为 9900 与 4900km^2 , DO 质量浓度最低可达 1.92mg/L (图 3b)。在东海海域接近 100m 等深线的海域 ($28.88^{\circ}\text{--}29.70^{\circ}\text{N}$, $124.08^{\circ}\text{--}124.90^{\circ}\text{E}$), 底层水体 DO 质量浓度低于 4mg/L , 覆盖面积可达 6000km^2 。

在冬季, 研究海域 DO 平均含量较夏季高。黄海

海域表层水体 DO 分布呈现近岸高、外海低的梯度变化特征。在南黄海的中南部海域, 受黄海暖流影响, DO 质量浓度较低, 且呈自东南向西北方向延伸的水舌状分布特征 (图 4a)。黄海海域底层水体总体上处于不饱和状态, DO 平均饱和度为 90.92% ; 底层水体的分布特征与表层存在较大差别, 低 DO 水舌在底层不明显且在南黄海中 ($33.80^{\circ}\text{--}34.66^{\circ}\text{N}$, $123.52^{\circ}\text{--}124.23^{\circ}\text{E}$)、北部 ($35.50^{\circ}\text{--}36.36^{\circ}\text{N}$, $122.96^{\circ}\text{--}123.82^{\circ}\text{E}$) 海域底层存在 DO 低值区 ($\text{DO} < 6\text{mg/L}$); DO 质量浓度最低可达 4.81mg/L , 低于该海域夏季底层水体 DO 最

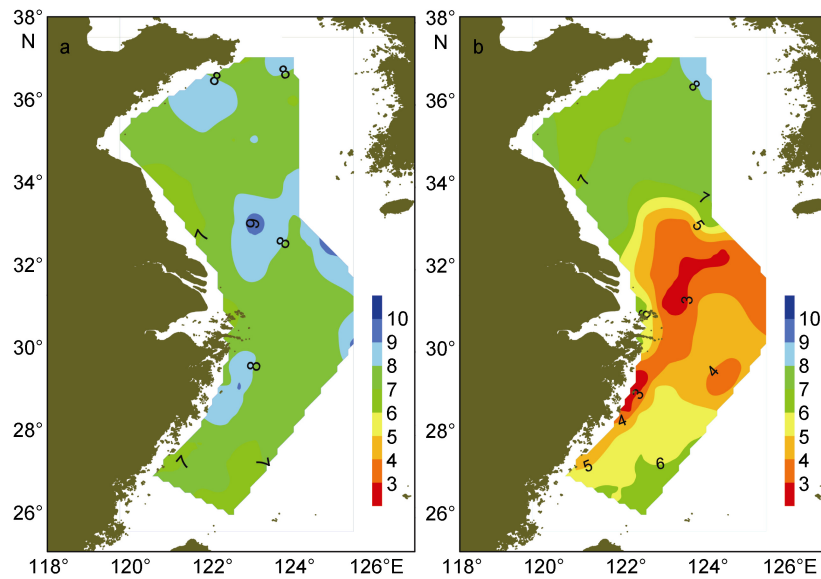


图 3 2015 年夏季我国黄东海表(a)、底层(b) DO 质量浓度(mg/L)平面分布

Fig.3 The surface (a) and bottom (b) distribution of DO (mg/L) in the study area in summer of 2015

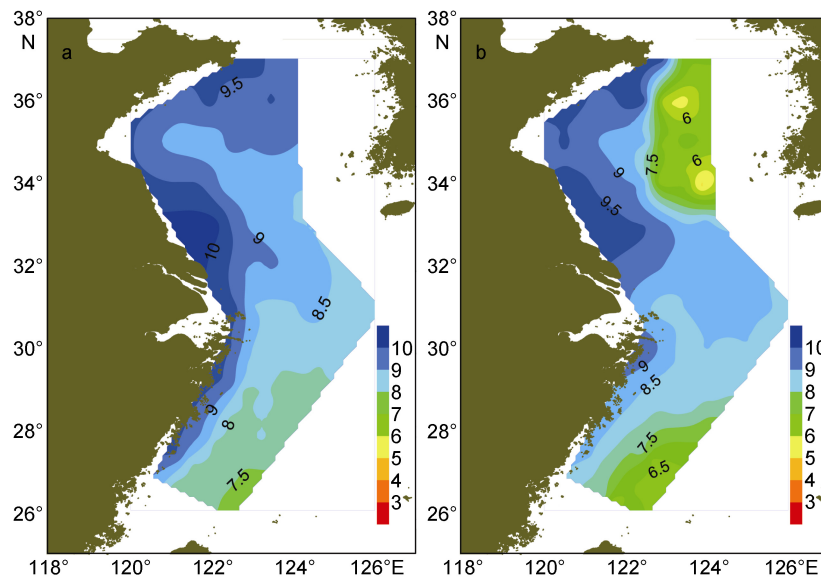


图 4 2015 年冬季我国黄东海表(a)、底层(b)DO 质量浓度(mg/L)平面分布

Fig.4 The surface (a) and bottom (b) distribution of DO (mg/L) in the study area in winter of 2015

低值(图 3b)。冬季东海海域表、底层水体 DO 分布特征基本一致, 均呈现近岸高、外海低的分布趋势, 且表、底层水体 DO 质量浓度差异不大(图 4a, b)。东海海域表、底层 DO 均处于饱和状态, DO 饱和度高于同期黄海海域; 其中底层水体 DO 平均饱和度为 104.03%。

2.3 典型断面 DO 分布特征及季节变化特点

受不同控制因素影响, 研究海域内 DO 分布具有明显的时空差异。根据研究海域内不同性质水团的特征, 分别在黄海和东海海域选取 3600 和 DH4 为典型断面, 研究其 DO 的垂向分布特征, 结果如图 5、图 6 所示。

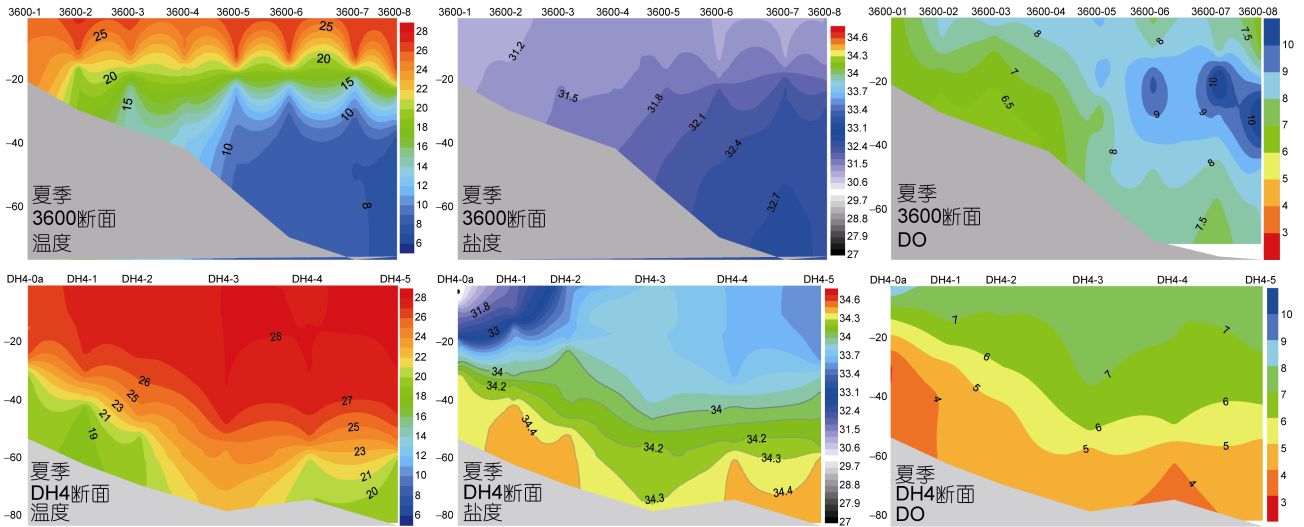


图 5 2015 年夏季 3600 断面与 DH4 断面温度、盐度与 DO 分布

Fig.5 The vertical distribution of temperature (°C), salinity, and DO (mg/L) along Transects 3600 and DH4 in summer of 2015

夏季, 黄海海域 3600 断面水体存在明显的层化现象, 温度垂向梯度变化明显而盐度垂向梯度变化较小; 在 122.50°E 以西, 受 YSCW 影响, 底层存在 $T < 10^{\circ}\text{C}$ 的低温水团, 温度梯度变化更为显著。受温度层化影响, DO 在垂向分布上具有明显的分层现象。3600 断面 DO 质量浓度的变化范围为 6.23—11.35mg/L, 近岸海域 DO 浓度随水深增加而逐渐降低; 在 YSCW 影响海域, 中层水体(20—35m)存在 DO 最大值现象, DO 含量高于 9mg/L, 底层水体 DO 含量较中层水体有所降低, 但仍处于较高水平, 均高于 7mg/L。

东海海域 DH4 断面存在强烈的温盐跃层, 温度随着水深的增加而逐渐降低, 盐度则逐渐升高。在 123.00°—123.38°E 及 124.21°E 以东海域, 底层存在两个低温($T < 21^{\circ}\text{C}$)、高盐($S > 34.3$)水团。DH4 断面 DO 质量浓度的变化范围为 2.96—9.11mg/L; 受水体层化影响, 该断面 DO 在垂向分布上具有明显的分层现象, 从表层到底层 DO 含量逐渐降低。DO < 4mg/L 的低氧水团位置与两个低温、高盐水团位置较为吻合。

在冬季, 黄海海域 3600 断面 122.47°E 以西的近岸区域水体混合均匀, 温度、盐度表底层差异较小;

受地形变化影响, 122.47°E 以东的外海区域的垂直混合未达到海底, 底层水体仍存在较弱的层化作用。DO 质量浓度的垂向变化与温度、盐度的变化吻合, 在 122.47°E 以西混合较好的近岸区域 DO 垂向分布均匀; 在 122.47°E 以东的外海区域近底层水体存在分层现象; DO 质量浓度较低, 最低可达 4.81mg/L。

东海海域 DH4 断面整体水体混合作用强烈, 温度与盐度在垂直方向上分布均匀且随着离岸距离的增加而逐渐升高。同期 DO 在垂直方向上分布均匀, 呈现近岸高、外海低的分布特征, 且底层 DO 低值区完全消失。

3 讨论

海水中 DO 含量变化与其水文条件密切相关, 不同海域的水文特征及其季节变化对 DO 分布具有重要的影响, 使 DO 分布呈现出明显的时空差异(图 7)。夏季, 黄东海典型海域水体具有明显的层化特征; 南黄海南部与东海海域底层 DO 含量较低, 存在 DO 低值区甚至在长江口与浙江近海附近存在低氧区, 低氧区位于 50m 等深线以内, 同时在外海靠近 100m 等深线的海域, 底层存在 DO < 4mg/L 的水体。而南黄海中

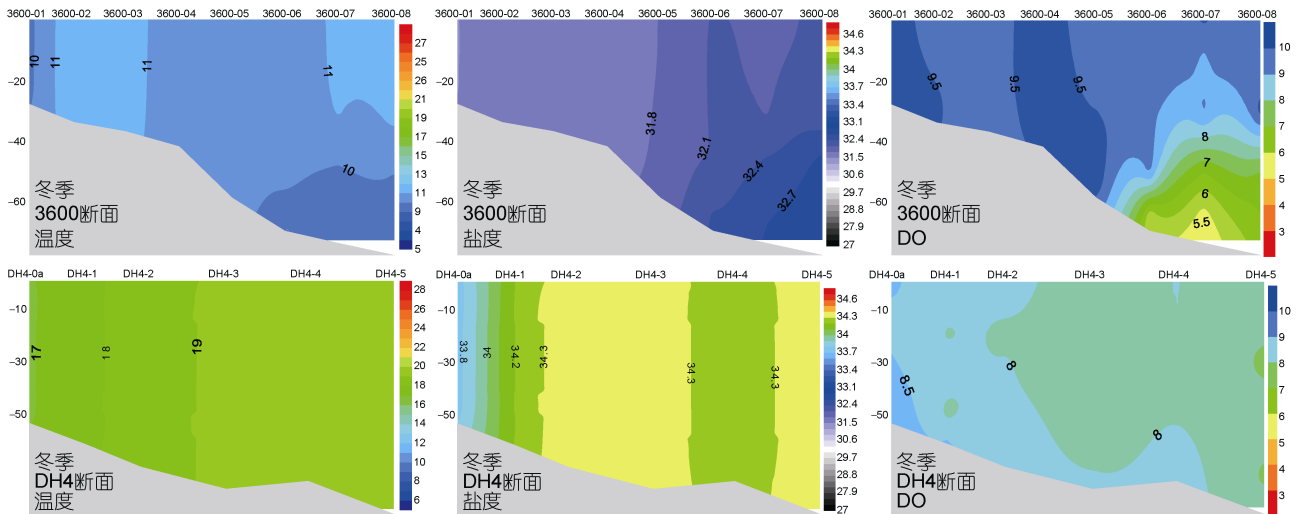


图6 2015年冬季3600断面、DH4断面温度、盐度与DO分布

Fig.6 The vertical distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, and DO(mg/L) along Transects 3600 and DH4 in winter of 2015

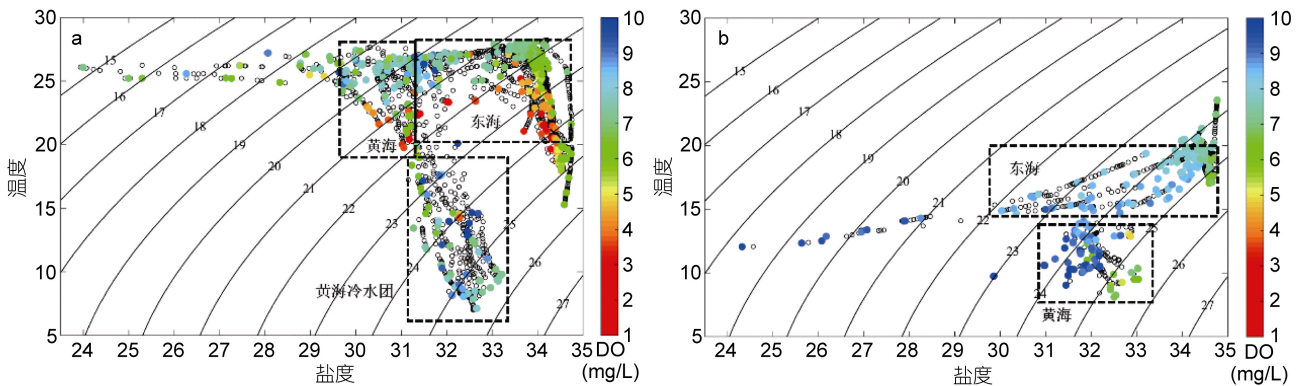


图7 研究海域的温度-盐度与DO点聚图

Fig.7 The temperature-salinity diagram with DO data of the study area

注: a. 夏季; b. 冬季; 带有颜色的圆点代表DO值(mg/L)

北部受黄海冷水团影响海域具有明显的低温特征, 存在中层DO最大值现象, 底层DO整体含量显著高于同期其他研究海域($n=178$, $P<0.01$)。冬季, 水体在垂向上混合均匀, 表、底层水体DO含量较高, 整体上处于饱和状态。调查期间, 南黄海冷水团消失, 南黄海中北部海域底层DO含量较夏季有所降低, DO最低值为4.81mg/L。

3.1 黄海海域DO的分布特征与季节变化的影响因素

海水中的DO含量与其溶解度有关, 而DO溶解度受到温度、盐度等环境因素的影响, 随着温度与盐度的升高而降低(张竹琦, 1990)。在冬季, 黄海海域表层水体DO处于饱和状态, DO质量浓度与温度、盐度具有显著的负相关关系(表2); 夏季表层水体温度较冬季有所提高, 黄海表层水体DO饱和值与DO含量

较冬季均有所降低, 表层水体DO处于过饱和状态, 这与水体增温导致DO溶解度降低以及浮游植物光合作用产生氧气有关(Middelburg *et al*, 2009; 吴金浩等, 2013), 表层DO与温度、盐度不再具有显著的负相关关系(表2)。另一方面, 温盐跃层的形成对DO的分布产生重要的影响。冬季由于垂直混合作用未达到海底, 在黄海海域外侧近底层水体仍存在一定的层化作用, 限制了底层水体与上覆水体的交换, 使得底层水体的DO的消耗未能得到及时补充(辛明等, 2013); 此外, 入秋后有机物的分解消耗了水体中的DO(韦钦胜等, 2010a), 使得该海域底层水体DO含量低于夏季并存在 $\text{DO}<6\text{mg/L}$ 的低值区。在夏季, YSCW影响海域存在中层水体(20—35m)DO最大值现象, DO最大值水层位于跃层下部。研究表明, 稳定的跃层是形成中层水体DO最、大值现象的必要条件(王保栋等, 1999;

韦钦胜等,2010c)。进一步分析发现, DO 最大值水体具有低温特征, 为 DO 提供了较高的背景值。而跃层上覆水体温度较高, 降低了 DO 的溶解度; 底层水体营养盐含量较高, DIN(溶解无机氮)、DIP(溶解无机磷)与 AOU 具有显著的正相关关系(图 8), 表明底层水体中有机物的分解生成营养盐并进一步消耗了水体中的 DO。跃层以上水体与跃层以下水体 DO 含量分别因增温与有机物分解有所下降, 而跃层的存在限制了 DO 在垂直方向上的输送, 导致了该海域中层水体 DO 最大值现象的产生。

3.2 东海海域 DO 的分布特征、季节变化及其影响因素

在冬季, 东海海域表、底层水体 DO 质量浓度与温度、盐度均具有显著的负相关关系(表 2)。在夏季, 东海海域水体温度升高, DO 饱和值与 DO 含量较冬季均有所降低。在长江口邻近海域和浙江近海底层均存在低氧区, 低氧区位于 50m 等深线以内, 低氧区面积为 14800km²。同时在靠近 100m 等深线的东海外侧海域底层存在 DO<4mg/L 的低氧现象。研究表明, 跃

层的阻隔与底层水体中有机物的耗氧分解是导致底层低氧区形成的主要原因(Li *et al*, 2002; 张莹莹等, 2007; 韦钦胜等, 2010b)。夏季, 东海海域底层水体具有较高的 AOU, 底层水体存在严重的氧亏损且营养盐含量丰富。进一步分析发现 DIN、DIP 与 AOU 具有显著的正相关关系, 表明底层水体中有机物分解作用强烈, 生成营养盐的同时消耗了水体中的 DO。同时东海海域强烈的跃层限制了表层水体与底层水体 DO 的交换, 使得底层水体 DO 的消耗得不到及时的补充, 促进了低氧区的形成。

表 2 夏、冬季研究海域 DO 与温度、盐度的相关性分析
Tab.2 Pearson correlation analysis between DO and temperature of the study area in summer and winter

样品	夏季		冬季	
	温度	盐度	温度	盐度
黄海海域 表层	—	—	-0.78**	-0.41*
底层	-0.34*	—	—	-0.77**
东海海域 表层	—	—	-0.92**	-0.82**
底层	—	—	-0.70**	-0.60**

注: *: $P<0.05$, **: $P<0.01$; —表示无显著相关关系。

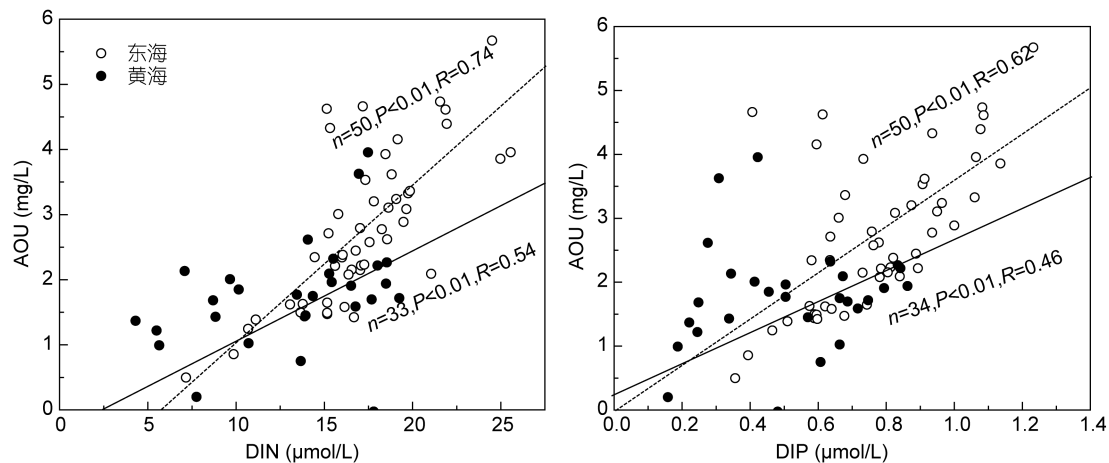


图 8 夏季研究海域底层水体 DIN、DIP 与 AOU 相关性分析

Fig.8 Relationships among DIN, DIP, and AOU in summer in the study area

注: DIN: 溶解无机氮; DIP: 溶解无机磷; AOU: 表观耗氧量

4 结论

根据 2015 年 8 月与 12 月现场大面调查资料, 分析探讨了我国黄东海的 DO 分布特征、季节变化特点, 并对其影响因素进行了初步分析, 结果表明:

夏季南黄海中北部、YSCW 影响海域存在中层水体 DO 最大值现象, 冬季南黄海中北部海域底层存在 DO 低值区, DO 最低值为 4.81mg/L。夏季在东海长江口海域与浙江近岸海域存在低氧区(DO<3mg/L), DO

最低值为 1.92mg/L; 低氧区影响范围广阔, 面积达 14800km², 在东海海域外侧 100m 等深线位置存在 DO<4mg/L 的低氧现象。我国黄东海表层水体 DO 总体上均处于饱和状态、季节变化幅度小。

黄东海 DO 分布特征及其变化受物理过程与生物化学过程等多种因素的综合影响, 且不同海域、不同季节 DO 分布的影响因素存在差异。夏季, 跃层的形成与底层有机物的分解是 YSCW 影响海域中层水体 DO 最大值现象与东海低氧区形成的必要条件。冬

季, 南黄海中北部海域由于垂直混合作用未达到海底, 底层水体的 DO 亏损未得到及时的补充, 导致底层 DO 低值区的存在; 而东海水体垂直混合均匀, DO 分布主要受温度与盐度的控制。

致谢 中国科学院海洋研究所于非研究员提供了温盐等 CTD 资料, 中国科学院海洋研究所张悦、邱丽霞同学协助完成现场采样, “北斗号”与“科学三号”调查船全体人员为调查工作提供了大量帮助和支持, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- 王保栋, 刘 峰, 王桂云, 1999. 南黄海溶解氧的平面分布及其季节变化. 海洋学报, 21(4): 47—53
- 韦钦胜, 周 明, 魏修华等, 2010a. 冬季南黄海海水化学要素的分布特征及变化趋势. 海洋科学进展, 28(3): 353—363
- 韦钦胜, 战 闰, 魏修华等, 2010b. 夏季长江口东北部海域 DO 的分布及低氧特征. 海洋科学进展, 28(1): 32—40
- 韦钦胜, 魏修华, 战 闰等, 2010c. 夏季南黄海西部溶解氧的分布特征及其影响因素分析. 海洋环境科学, 29(6): 808—814
- 吴金浩, 王年斌, 张玉凤等, 2013. 夏季大连湾溶解氧分布变化特征及其与营养盐的关系. 海洋通报, 32(1): 66—71
- 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. 海洋环境科学, 26(6): 534—536
- 张竹琦, 1990. 黄海和东海北部夏季底层溶解氧最大值和最小值特征分析. 海洋通报, (4): 22—26
- 张莹莹, 张 经, 吴 莹等, 2007. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究. 环境科学, 28(8): 1649—1654
- 杨庆霄, 董娅婕, 蒋岳文等, 2001. 黄海和东海海域溶解氧的分布特征. 海洋环境科学, 20(3): 9—13
- 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. 中国海洋大学学报自然科学版, 43(7): 56—60
- 柴小平, 魏 娜, 母清林等, 2015. 浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素. 中国环境监测, 31(5): 140—144
- 蒋国昌, 王玉衡, 唐仁友等, 1991. 东海溶解氧垂直分布和季节变化. 海洋学报, 13(3): 348—355
- Diaz R J, Rosenberg R, 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science, 321(5891): 926—929
- Li D, Zhang J, Huang D *et al*, 2002. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. Science in China Series D: Earth Sciences, 45(12): 1137—1146
- Li X A, Yu Z M, Song X X *et al*, 2011. The seasonal characteristics of dissolved oxygen distribution and hypoxia in the Changjiang Estuary. Journal of Coastal Research, 27(6A): 52—62
- Middelburg J J, Levin L A, 2009. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry. Biogeosciences Discussions, 6(7): 1273—1293
- Pytkowicz R M, 1971. On the apparent oxygen utilization and the preformed phosphate in the oceans. Limnology and Oceanography, 16(1): 39—42
- Rabouille C, Conley D J, Dai M H *et al*, 2008. Comparison of hypoxia among four river—dominated ocean margins: The Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhone rivers. Continental Shelf Research, 28(12): 1527—1537
- Wang B D, Wei Q S, Chen J S *et al*, 2012. Annual cycle of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. Marine Environmental Research, 77: 1—5
- Zhang H, Li S Y, 2010. Effects of physical and biochemical processes on the dissolved oxygen budget for the Pearl River Estuary during summer. Journal of Marine Systems, 79(1—2): 65—88

DISTRIBUTION OF DISSOLVED OXYGEN IN THE YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA IN SUMMER AND WINTER

CHI Lian-Bao^{1,2,3}, SONG Xiu-Xian^{1,2,3}, YUAN Yong-Quan^{1,2}, ZHOU Peng^{1,2,3},
CAO Xi-Hua^{1,2}, YU Zhi-Ming^{1,2,3}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using the field data of August and December 2015, we analyzed the distribution and seasonal variation of dissolved oxygen (DO) in Yellow Sea and East China Sea (ECS) and the influencing factors. The results show obvious spatial and temporal distributions of DO in the study area. In summer, DO content ranged 1.92—11.35mg/L. In the southern Yellow Sea Cold Water (YSCW), the DO maximum occurred in the middle layer. The hypoxic zone (DO<3mg/L) was observed in the bottom water of Changjiang (Yangtze) River estuary (30.73°—32.30°N, 122.96°—124.60°E) and near-shore coastal waters off Zhejiang (28.43°—29.40°N, 121.97°—122.63°E), which covered an area of 14800km². Beyond ECS (28.88°—29.70°N, 124.08°—124.90°E), DO dropped to <4mg/L in bottom water. In winter, DO content varied from 4.81 to 10.29mg/L, and decreased offshore gradually, which decreased to <6mg/L in the middle and northern parts of the southern Yellow Sea. The DO distribution in the study area was affected by multiple factors and varied in season and space, of which temperature and salinity were the major ones in winter. And other derivative factors, including water column stratification, organic matter decomposition and vertical convection etc., played an important role in summer.

Key words Yellow Sea and East China Sea; DO distribution; seasonal variation; influencing factors