

渤海底层低氧区的空间特征与形成机制

张华*, 李艳芳, 唐诚, 邹涛, 于靖, 郭凯

中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

* 联系人, E-mail: hzhang@yic.ac.cn

2015-10-08 收稿, 2015-10-28 修回, 2015-11-02 接受, 2016-03-11 网络版发表

中国科学院战略性先导专项(XDA11020305)、中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)和青年“千人计划”项目资助

摘要 近海低氧区的发生是影响海洋生态系统健康的重要因素,也是海洋科学的研究热点.通过对2014年渤海夏季(8月末)航次观测数据的深入分析及与春(4月末)、秋(11月)两季观测的对比,研究了半封闭的渤海底层低氧区的分布特征、形成机制、及其与温盐结构的关系.结果表明,春季和秋季渤海底部溶解氧(DO) >8 mg/L,但在夏季出现大范围底部DO低值区,其中DO <3 mg/L的低氧区总面积约为 4.2×10^3 km²,具有南、北“双核”结构,空间特征与双中心冷水结构基本一致.渤海中部断面分析表明渤海浅滩南北两侧洼地在夏季出现明显垂向分层,导致底部冷水团DO含量下降与明显酸化(pH <7.8).冷水区稳定的沉积环境使其表层沉积物总有机碳(TOC)和总有机氮(TON)含量明显高于其他海区.对数据综合分析表明,渤海中部海水季节性层化及其对溶氧的阻滞作用是低氧区产生的关键物理机制,沉积物中累积的有机质在夏季的矿化分解是产生底部低氧和酸化环境的重要原因.该低氧区的产生是渤海生态系统剧变的结果和集中体现,与赤潮等生态灾害频繁发生和渔业资源衰退可能存在密切关系.

关键词 渤海, 低氧, 层化, 有机质, 生态灾害

自从20世纪60年代以来,世界范围内近海低氧区的面积呈指数增长,爆发频率和持续时间日益增加,已经成为威胁海洋生态健康的重要因素.过去50年里人口增长和经济发展造成的陆源营养盐入海通量增加,在河口和近岸海域导致的富营养化现象,被认为是低氧区扩大的关键原因^[1-5].缺氧现象通常发生在夏季到秋季,此时水体温度较高,垂向分层明显,表层溶解氧向海底的扩散速率缓慢.由于沉积物和水体中微生物矿化分解有机质的耗氧作用,导致海水底层缺氧,矿化过程通常还伴随局部酸化过程.当水体溶解氧低于临界值时,底栖动物会大量死亡,鱼虾等渔业生物的生存受到威胁^[4-10].国际上一些主要的河口和边缘海,如波罗的海、墨西哥湾、切萨皮克湾、亚德里亚海、黑海等,都存在大范围的底层低氧区^[1-3],因而对低氧区形成机制、演化趋势、生态

效应等的研究是海洋科学的一个热点.我国近海也存在大面积的缺氧区,特别是长江口外的东海缺氧区面积可达10000 km²以上,近十几年来其夏季底层低氧程度和范围呈现明显加重趋势.研究表明营养盐和有机质大量输入导致的富营养化,以及长江冲淡水与台湾暖流上涌形成的强烈温盐跃层是长江口外缺氧区的两个主要控制因素^[8-11].

目前已知的缺氧区多数出现在水体分层的半封闭海域,我国渤海是一个典型的半封闭陆架浅海,仅在东部以狭窄的渤海海峡与北黄海相通,其面积为 7.7×10^4 km²,平均深度仅为18 m,水交换能力弱^[12-14].渤海中部海域由于局部地形特征,在海表热交换的作用下形成季节性温跃层,一般从4月开始,至9月结束,呈现非对称的南北双中心底层冷水结构^[15,16].此外,随着环渤海工农业经济的迅猛发展,大量营养物

引用格式: 张华, 李艳芳, 唐诚, 等. 渤海底层低氧区的空间特征与形成机制. 科学通报, 2016, 61: 1612-1620

Zhang H, Li Y F, Tang C, et al. Spatial characteristics and formation mechanisms of bottom hypoxia zone in the Bohai Sea during summer (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1612-1620, doi: 10.1360/N972015-00915

质输入渤海,海水中氮和磷酸盐含量严重超标,富营养化海域面积不断增加^[17-21].然而目前对渤海低氧现象的研究和报道非常匮乏,翟惟东等人^[22]根据2011年6月下旬和8月下旬调查资料发现渤海西北部和北部近岸海域夏季出现一个底层DO不足4 mg/L的带状区域,并且伴随着底层酸化环境的形成.但是对于低氧区的具体范围、生消过程及控制因素还缺乏深入研究.

1 材料与方法

本研究主要采用的调查资料来自于中国科学院战略性先导专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”课题“外海输入对渤海生态系统的影响”实施的渤海2014年夏季(8月11日~9月6日)综合调查航次,共计调查站位125个,分别采用SBE19+ CTD和SBE25+ CTD (Sea-Bird Electronics Inc., Bellevue, WA, USA)现场测定了温度、盐度、溶解氧、叶绿素(Chla)、pH等参数.其中溶解氧用SBE 43传感器测定,叶绿素采用WET Labs ECO-AFL荧光传感器测定,pH采用SBE18传感器测定.在使用前传感器测定结果与化学测定方法结果进行比对.现场调查数据经过过滤、校正、分层平均处理后形成1 m分层数据被用于之后分析.夏季航次现场采用0.2 m²箱式采泥器共采集99个表层5 cm沉积物样品,冷冻保存后,经过冷冻干燥,去除杂质,研磨过100目筛,酸化去除碳酸盐后应用碳氮分析仪(Elementar-Vario Macro Cube, Germany)测定总有机碳(TOC)和总有机氮(TON)含量,重复结果表明分析误差为±0.4wt%(TOC)和 ±1.3wt% N (TON).在本分析中还采用了国家自然科学基金委员会2014年春季(5月9日~5月18日)和秋季(11月16日~11月23日)渤黄海海洋学综合科学考察航次资料,以及2014年春季(4月22日~5月6日)莱州湾和渤海湾综合调查航次资料.各航次调查站位如图1所示.地图等值线作图应用ArcGIS软件(ESRI, Redlands, CA)中的克里格插值方法实现,断面等值线作图应用Ocean Data View软件的DIVA方法实现.

2 结果

2.1 渤海底层低氧区的分布与季节动态

图2显示的调查结果表明,渤海2014年夏季出现大范围底部DO低值区,其中DO<3 mg/L的总面积约

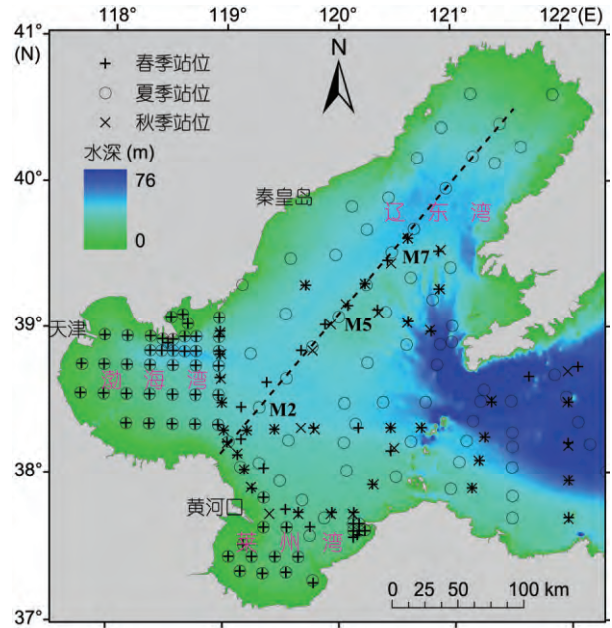


图1 2014年春、夏、秋季航次调查站位与渤海水深分布

Figure 1 Bathymetry of the Bohai Sea and sampling locations of the spring, summer, and autumn cruise in 2014

为 4.2×10^3 km²,低氧区具有南、北“双核”结构,其中北部低氧区位于秦皇岛以东辽东湾中部,面积约为 2.9×10^3 km²;南部低氧区位于渤海湾东部,面积约为 1.3×10^3 km².夏季渤海底层DO含量普遍偏低,最低值为2.3 mg/L,最高值为7.6 mg/L.除水深<15 m的近岸海域和渤海海峡以外,其余大部分区域底层DO含量<5 mg/L.与春季和秋季调查结果的对比表明,渤海春季所有调查站位底层DO含量均>8 mg/L,空间分布不存在明显规律.秋季在大连外海存在一个溶解氧低值区(最低为4.5 mg/L),而渤海内所有调查站位底部DO含量均>8 mg/L.说明渤海低氧现象主要出现在夏季(8月),在春季(5月)和秋季(11月)渤海尚不存在低氧现象.

2.2 渤海夏季底层低氧区的环境状况

图3所展示渤海夏季底层温度、盐度、pH、溶解氧调查结果显示,夏季渤海底层存在明显的双中心冷水结构^[15,16].两个冷水团分别位于渤海中部浅滩的南部和北部洼地,与图2显示的两个低氧区的空间位置高度一致,说明低氧区主要出现在冷水所处位置.其中北部洼地底层海水温度(15.1℃)较南部洼地底层海水温度(17.4℃)低2.3℃.对pH测定结果的分析表明在两个低氧区底层海水都存在明显酸化,其

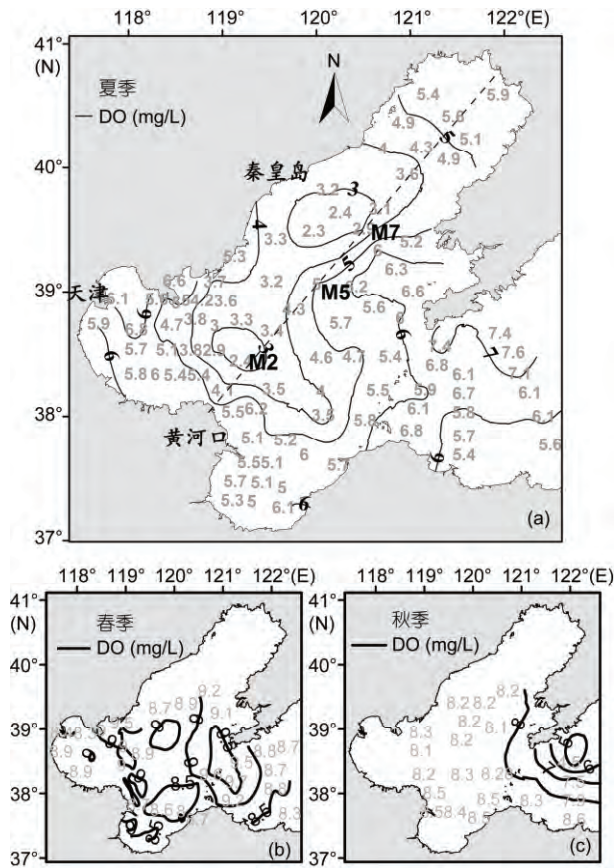


图2 2014年夏、春、秋季渤海底层溶解氧含量的等值线(实线)分布和各站位观测值(灰色数字)。(a) 虚线指示黄河口到辽东湾断面, M2, M5, M7 指示3个关键站位位置

Figure 2 Dissolved oxygen (DO) content at bottom of the Bohai Sea measured from summer, spring, and autumn cruise carried out in 2014. The solid curves depict contours of DO content and the grey numbers give the measured DO content at sampling locations. The dashed line in (a) shows the cross section from Yellow River Mouth to the Liaodong Bay. M2, M5, and M7 shows three key sampling locations

中北部低氧区最低pH为7.76, 南部低氧区最低pH为7.73, 并且渤海海峡和渤海中部底层海水都呈现明显的酸化趋势. 海水叶绿素a含量的空间分布呈现从渤海海峡到三大海湾(辽东湾、渤海湾、莱州湾)湾口递增的整体趋势, 在低氧区附近叶绿素浓度($<1 \mu\text{g/L}$)略微低于周边海域. 底层海水盐度呈现出从海峡(31.5‰)到沿岸递减趋势, 低氧区盐度没有表现出明显特征.

2.3 沉积物中有机质与有机氮累积

渤海夏季航次采集的表层沉积物中总有机碳(TOC)和总有机氮(TON)含量的分析结果(图4)表明, 渤海表层沉积物TOC含量在1.5~8.8 mg/g之间, TON

含量在0.10~1.3 mg/g之间, TOC和TON之间显著正相关, 相关系数为0.957($P<0.001$). 在两个低氧区核心存在两个明显的TOC和TON含量高值区, 显示在该区域存在有机质累积. 对3个海湾的分析表明, 渤海湾TOC和TON含量明显高于莱州湾及辽东湾, 存在有机质富集. 沉积物有机质C/N比常被用来判别有机质物源, 测定得到的C/N比在5~10.5之间, 显示沉积物有机质受海洋来源和陆源输入共同作用.

2.4 典型断面水文与生物化学特征的垂向分布

为了表征渤海夏季中部层化现象, 选择了黄河口到辽东湾湾顶的关键断面分析5个水文与生物化学特征(夏季溶解氧、温度、盐度、pH、叶绿素a)的垂向分布(图5). 该断面地形特征呈南北不对称的“W”型, 中部凸起为渤海中部浅滩, 两侧分别为南部和北部洼地. 进一步选择了3个典型站位分别代表南部洼地(M2), 中部浅滩(M5), 北部洼地(M7)详细分析各指标的垂向分布情况(图6). 结果显示夏季渤海存在明显的垂向分层, 特别是在双中心冷水结构所处位置, 5个指标都存在明显的表底层差异. 南部和北部洼地温盐跃层出现在6~12 m, 在跃层以上DO值在7 mg/L以上, 在跃层以下DO迅速下降, 南部洼地DO低于北部洼地. 南部洼地和北部洼地在水深10 m以下存在明显的底部冷水团, 表层温度较底层温度高10℃左右. 盐度明显受沿岸淡水输入的影响, 表层盐度较底层盐度低. pH的垂向分布与DO基本一致, 在两个冷水结构的位置, 底层海水pH(~7.8)较表层海水pH(~8.3)低0.5左右, 呈现严重酸化. 叶绿素最大层出现在温盐跃层以上, 在跃层上下叶绿素含量均明显降低. 而在渤海中部浅滩位置存在一个暖水柱, 表底层差异相对较小, 断面平均温度为24.4℃, 垂向平均梯度仅为0.04℃/m. 断面平均DO较低, 仅为5.2 mg/L, 底层DO仅比表层DO低0.4 mg/L. 平均盐度为30.45, 平均pH为8.09, 垂向分布均匀. 相关分析表明各站位DO和温度(平均 $r^2=0.91$)及pH(平均 $r^2=0.93$)均存在显著正相关, 和叶绿素a含量也存在正相关(平均 $r^2=0.70$).

3 讨论

3.1 渤海低氧区的空间分布

本研究结果显示渤海2014年夏季(8月)存在总面

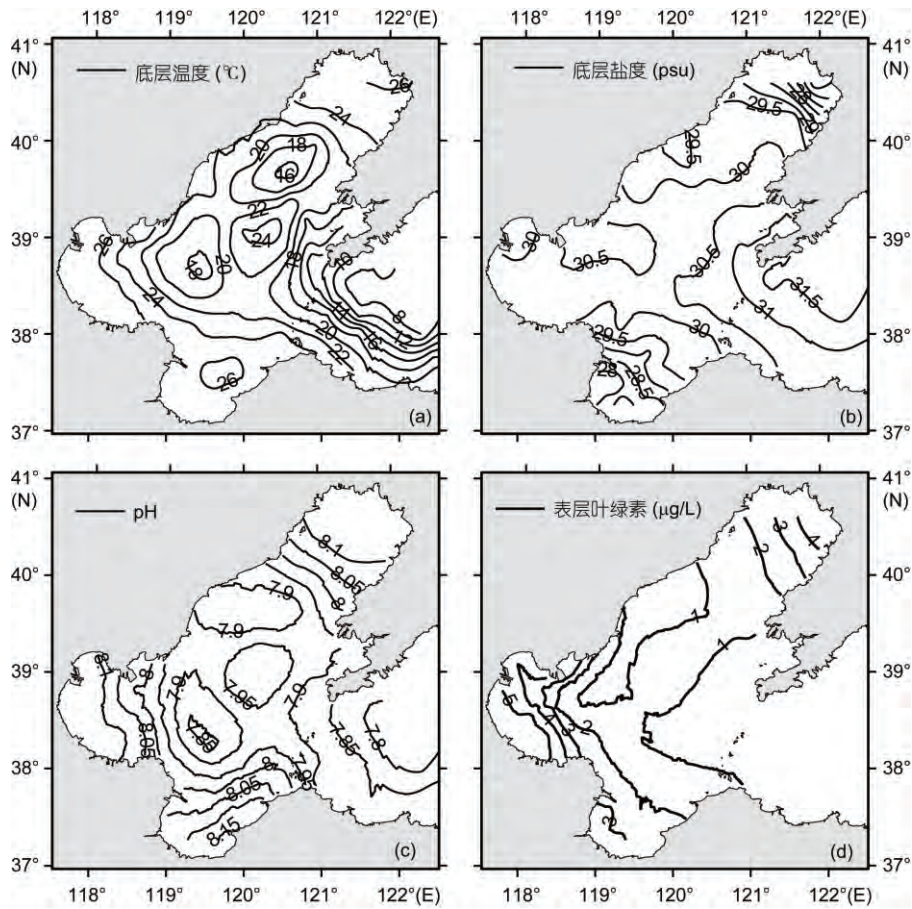


图3 2014年夏季渤海底层温度、盐度、pH以及表层叶绿素a空间等值线分布

Figure 3 Contour map of temperature, salinity, pH at sea bottom and chlorophyll a content at sea surface in the Bohai Sea measured during summer 2014 cruise

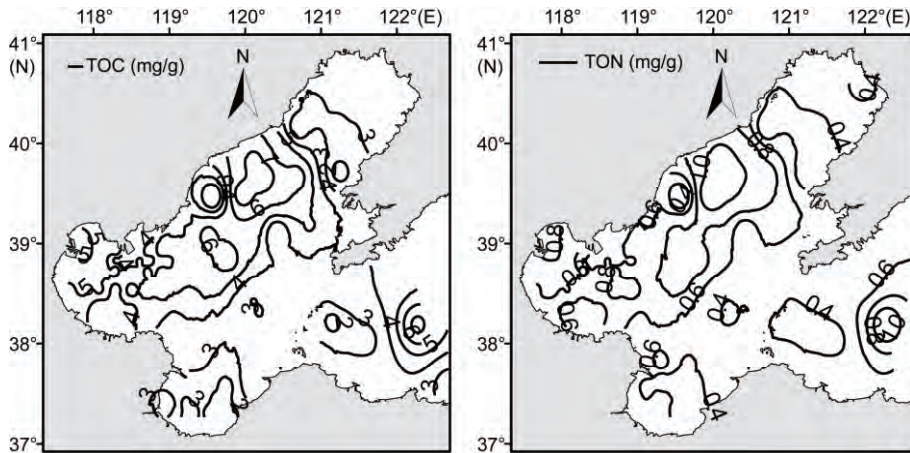


图4 渤海2014年夏季航次表层沉积物总有机碳(TOC)与总有机氮(TON)含量等值线分布图

Figure 4 Contour map of total organic carbon (TOC) and nitrogen (TON) content in sediments of the Bohai Sea measured during summer 2014 cruise

积约 4.2×10^3 km²的两个DO<3 mg/L的底部低氧区, 北部和南部低氧区面积分别约为 2.9×10^3 和 1.3×10^3

km², 观测到的最低DO为2.3 mg/L, 已经达到了低氧区标准. 并且除水深较浅的近岸区域和渤海海峡以

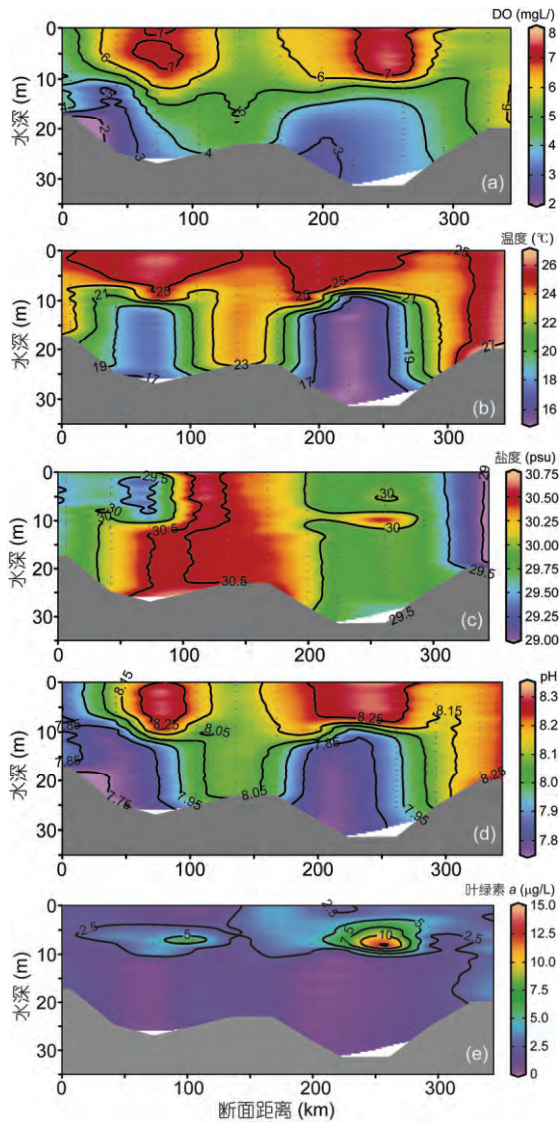


图5 2014年夏季黄河口至辽东湾北部断面溶解氧(a)、温度(b)、盐度(c)、pH(d)与叶绿素a(e)垂向分布图. 实线为各指标等值线. 剖面位置见图1

Figure 5 Cross section distribution of dissolved oxygen (a), temperature (b), salinity (c), pH (d), and chlorophyll a content (e) at the cross section from Yellow River Mouth to the Liaodong Bay measured during summer 2014 cruise. The solid curves depict contours. The location of cross section see Figure 1

外, 渤海大部分区域底层DO含量<5 mg/L. 与翟惟东等人^[22]2011年调查结果和姐婷婷等人^[23]的分析结果相比较, 发现采用不同分析方法得到的DO值基本吻合, 共同证实夏季渤海底部存在一个较大范围的DO低值区. 历史调查资料分析表明渤海中央海区DO含量从1978~1991年来呈下降趋势^[24], 这可能与近十年来环渤海工农业发展造成的营养盐输入有关^[17~21]. 海洋环境公报数据显示渤海富营养化面积达10000

km²以上, 主要表现为海水无机氮含量显著增加, 这可能是渤海低氧区产生的生物化学背景.

3.2 季节性层化对低氧区的控制作用

渤海底部低氧区和双中心冷水团所在空间位置基本一致(图2(a)和3(a)), 断面数据显示南北洼地的低氧区存在于温度跃层以下(图5), 这些都表明渤海季节性层化是夏季底部低氧区形成的主要动力控制因素. 历史资料^[12,25,26]和数值模拟^[15,16]显示渤海季节性层化一般从4月开始, 至9月结束, 在局部海底地形和季节性增温控制下, 渤海中部浅滩的南北两侧洼地分别形成两个底层冷水团(图3(a)和5(b)). 表层和底层海水温度相差10℃左右, 同时受沿岸淡水输入影响, 表层盐度较底层盐度低, 因此在10 m左右形成明显密度跃层, 跃层以上的表层海水DO为6~7 mg/L, 之下DO迅速下降, 底层DO<3 mg/L. 证明海水温度跃层的形成限制了大气及表层溶解氧与海底的交换, 是渤海夏季低氧区形成的关键物理机制. 与此形成对照的是渤海中央浅滩位置存在一个温度24~25℃的暖水柱, 平均温度梯度仅为0.04℃/m, 因而 DO垂向均匀分布(5.2 mg/L), 底层DO仅比表层DO低0.4 mg/L. 详细分析渤海低氧区的形成机制, 需要综合考虑地形、潮汐、季风及外海输入等因素. 渤海中部断面地形特征呈现不对称的“W”型, 在增温季节南部和北部洼地底部的冬季冷水因温跃层的形成与上层隔绝, 因而分别形成底层冷水团. 数值模拟表明渤海夏季温盐层化结构是底部的潮混合过程和海表的波浪混合过程共同作用的结果^[15], 增温季节渤海海峡处北黄海深层冷水输入对双中心冷水结构的形成有一定贡献^[16].

3.3 有机质累积与低氧区形成

本研究显示低氧区表层沉积物TOC和TON含量高于周边海区(图4). 相关研究也表明渤海中部泥质区存在有机质高值区^[27]. 有机质富集是该区相对稳定的水动力与沉积环境造成的, 由于该区域夏季水动力较弱, 黄河、海河、滦河等在丰水期携带的大量陆源有机物质可能在在该区域沉降^[28]. 同时, 稳定的沉积环境也有利于藻类等海洋生物在沉积物中的累积^[6]. 尽管目前还难以准确判定沉积物中有机质的来源, 但是可以判断沉积物中有机质累积与低氧区形成密切相关.

夏季微生物对有机物质的矿化分解是一个持续

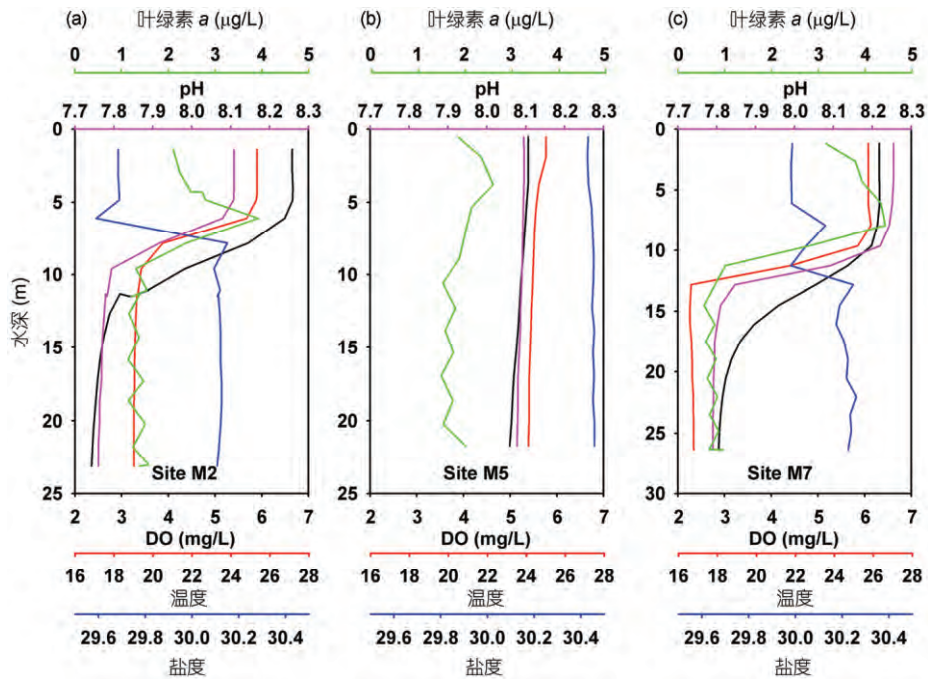


图6 2014年渤海夏季航次南部洼地(M2), 中部浅滩(M5)与北部洼地(M7)典型站位溶解氧、温度、盐度、pH、叶绿素a垂向分布
 Figure 6 Vertical distribution of dissolved oxygen (DO), temperature, salinity, pH, and chlorophyll *a* content at sampling locations M2 (south depression), M5 (central ridge), and M7 (north depression) measured during summer 2014 cruise

耗氧过程. 矿化耗氧过程伴随着酸性CO₂气体产生, 导致海水酸化. 本研究的观测结果显示低氧区底层海水pH在7.8左右, 比表层海水pH低0.5左右, 已经出现了非常严重的酸化, 这与2011年夏季观测结果的趋势基本一致, 与墨西哥湾和长江口外典型近岸低氧区相当^[22]. 渤海底部低氧和酸化环境的形成, 将对海洋生物形成胁迫, 严重威胁海洋生态环境健康.

3.4 低氧区的生态效应

目前还没有关于渤海底部低氧及酸化环境对生态系统的效应的专门研究报道. 国际低氧区研究表明季节性和阶段性的缺氧现象, 生态效应表现为动物种群的周期性生长与衰亡^[1-5]. 近年来的调查表明自20世纪80年代以来, 渤海大型底栖动物丰度减小, 物种数目也明显减少, 优势物种出现小型化趋势^[29]. 同时, 渤海渔业资源处在持续的衰退过程中, 表现为营养层次高的优质底层中型鱼类逐渐被营养层次低的小型中上层鱼类替代^[30]. 目前对导致渔业资源衰退的原因还不清楚, 底部低氧区的形成可能是导致鱼类种群结构演替的原因之一.

大量研究表明季节性低氧现象与赤潮发生密切

相关, 渤海是赤潮灾害多发区, 观测到的主要发生于5~9月, 其中6月发生频率和灾害面积最大^[31,32]. 根据国家海洋局北海分局发布的《2014年北海区海洋环境公报》, 2014年秦皇岛附近海域共发生6次赤潮, 与本研究发现的中部低氧区的位置重合, 在靠近南部洼地低氧区的渤海湾中部也是赤潮频发区域. 可以判断渤海赤潮发生和低氧区形成之间存在密切的相互关系, 春季赤潮爆发后, 浮游植物旺发和死亡后的沉降和矿化分解过程对缺氧区的产生具有重要作用. 对此过程有必要做进一步的详细分析.

4 结论

对2014年夏季(8月)渤海综合调查航次数据以及春秋两季调查数据的综合分析表明在渤海夏季已经形成总面积约为4.2×10³ km²的DO<3 mg/L的底部低氧区, 主要分布在渤海中央浅滩两侧的洼地, 面积分别约为2.9×10³ km² (北部洼地)和1.3×10³ km² (南部洼地), DO最低值为2.3 mg/L. 两个低氧区所在位置与渤海双中心冷水团基本一致, 结合对渤海中部断面各环境参数(DO、温度、盐度、pH和叶绿素a)的垂向分析表明, 夏季季节性温跃层的形成是底部低氧区的主要物理过程, 底部耗氧伴随着酸化环境形成. 沉

积物TOC和TON分析结果表明由于双中心冷水结构区域的水动力过程较弱, 沉积环境稳定, 有机质在该区累积, 其矿化分解耗氧也是低氧区形成的原因. 渤海近年来赤潮灾害频发和渔业资源衰退可能与低氧

区的形成存在密切关系. 今后需要对渤海中部的低氧现象密切关注, 深入分析低氧区形成的生物化学机制及其对近海生态系统演化的影响, 构建物理-生态耦合模型定量分析过程机制与主控因素.

致谢 感谢国家自然科学基金委员会2014年渤海海洋学综合科学考察航次, 以及东方红2号船(青岛)、浩海号(东营)、意兴轮(大连)全体船员的大力支持. 感谢参与各个航次的调查队员的辛勤工作.

参考文献

- 1 Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 2008, 321: 926–929
- 2 Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, et al. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 2008, 319: 948–952
- 3 Rabalais N N. Human impacts on fisheries across the land-sea interface. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 7892–7893
- 4 Zhang J, Gilbert D, Gooday A J, et al. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: Synthesis and future development. *Biogeosciences*, 2010, 7: 1443–1467
- 5 Rabalais N N, Diaz R J, Levin L A, et al. Dynamics and distribution of natural and human-caused hypoxia. *Biogeosciences*, 2010, 7: 585–619
- 6 Orita R, Umehara A, Komorita T, et al. Contribution of the development of the stratification of water to the expansion of Dead Zone: A sedimentological approach. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2015, 164: 204–213
- 7 Simpson J H, Sharples J. *Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas*. London: Cambridge University Press, 2012
- 8 Li D J, Zhang J, Huang D J, et al. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2002, 32: 1137–1146 [李道季, 张经, 黄大吉, 等. 长江口外氧的亏损. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 686–694]
- 9 Wei Q S, Wang B D, Chen J F, et al. Recognition on the forming-vanishing process and underlying mechanisms of the hypoxia off the Yangtze River estuary. *Sci China Earth Sci*, 2015, 58: 628–648
- 10 Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: One of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Mar Environ Res*, 2007, 64: 399–408
- 11 Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition. *Mar Chem*, 2011, 125: 108–116
- 12 Editorial Board for Marine Atlas. *Marine atlas of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea: Hydrology (in Chinese)*. Beijing: China Ocean Press, 1992 [海洋水文图集编辑委员会. 渤海、黄海、东海海洋图集: 水文. 北京: 海洋出版社, 1992]
- 13 Feng S Z, Zhang J, Wei H, et al. *Introduction of the Environmental Dynamics of the Bohai Sea (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 2007 [冯士筌, 张经, 魏皓, 等. 渤海环境动力学导论. 北京: 科学出版社, 2007]
- 14 Li Y, Wolanski E, Zhang H. What processes control the net currents through shallow straits? A review with application to the Bohai Strait, China. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2015, 158: 1–11
- 15 Lin X P, Xie S P, Chen X P, et al. A well-mixed warm water column in the central Bohai Sea in summer: Effects of tidal and surface wave mixing. *J Geophys Res*, 2006, 111: C11017
- 16 Zhou F, Huang D J, Su J L. Numerical simulation of the dual-core structure of the Bohai Sea cold bottom water in summer. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 4520–4528 [周锋, 黄大吉, 苏纪兰. 夏季渤海温跃层下的双中心冷水结构的数值模拟. *科学通报*, 2009, 54: 1591–1599]
- 17 Liu S M, Li L W, Zhang Z N. Inventory of nutrients in the Bohai. *Cont Shelf Res*, 2011, 31: 1790–1797
- 18 Liu H, Yin B. Numerical investigation of nutrient limitations in the Bohai Sea. *Mar Environ Res*, 2010, 70: 308–317
- 19 Wang X, Cui Z, Guo Q, et al. Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China. *Chin J Oceanogr Limnol*, 2009, 27: 177–183
- 20 Liu H, Yin B. Annual cycle of carbon, nitrogen and phosphorus in the Bohai Sea: A model study. *Cont Shelf Res*, 2007, 27: 1399–1407
- 21 Zhang J, Yu Z G, Raabe T, et al. Dynamics of inorganic nutrient species in the Bohai seawaters. *J Mar Syst*, 2004, 44: 189–212
- 22 Zhai W D, Zhao H D, Zheng N, et al. Coastal acidification in summer bottom oxygen-depleted waters in northwestern-northern Bohai Sea from June to August in 2011. *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 1062–1068 [翟惟东, 赵化德, 郑楠, 等. 2011 年夏季渤海西北部、北部近岸海域的底层耗氧与酸化. *科学通报*, 2012, 57: 753–758]

- 23 Zu T T, Bao X W, Xie J, et al. Distribution and variation trends of the environmental factors in the central section of the Bohai Sea (in Chinese). *Period Ocean Univ Chin*, 2005, 35: 889–894 [昝婷婷, 鲍献文, 谢骏, 等. 渤海中部断面环境要素分布及其变化趋势. *中国海洋大学学报(自然科学版)* 2005, 35: 889–894]
- 24 Ning X R, Lin C L, Su J L, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960–1996. *Deep-Sea Res II*, 2010, 57: 1079–1091
- 25 Bao X W, Wan X Q, Wu D X, et al. Hydrologic characteristics of the end summertime in 2000 and early wintertime in 2001 in the Bohai Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2004, 26: 14–24 [鲍献文, 万修全, 吴德星, 等. 2000 年夏末和翌年初冬渤海水文特征. *海洋学报*, 2004, 26: 14–24]
- 26 Wu D X, Wan X Q, Bao X W, et al. Comparison of summer thermohaline field and circulation structure of the Bohai Sea between 1958 and 2000. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 363–369 [吴德星, 万修全, 鲍献文, 等. 渤海 1958 年和 2000 年夏季温盐场及环流结构的比较. *科学通报*, 2004, 49: 287–292]
- 27 Hu L M. Sources and sinks of sedimentary organic matter in the river-dominated continental shelves (in Chinese). Doctor Dissertation. Qingdao: Ocean University of China, 2010 [胡利民. 大河控制性影响下的陆架海沉积有机质的“源-汇”作用. 博士学位论文, 青岛: 中国海洋大学, 2010]
- 28 Bian C, Jiang W, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea. *J Geophys Res-Oceans*, 2013, 118: 5908–5923
- 29 Liu X S, Fan Y, Shi S J, et al. Studies on the species composition and community structure of macrofauna in the Bohai Sea (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2014, 36: 53–66 [刘晓收, 范颖, 史书杰, 等. 渤海大型底栖动物种类组成与群落结构研究. *海洋学报*, 2014, 36: 53–66]
- 30 Shan X J, Jin X S, Li Z Y, et al. Fish community structure and stock dynamics of main releasing fish species in the Bohai Sea (in Chinese). *Prog Fishery Sci*, 2012, 33: 1–9 [单秀娟, 金显仕, 李忠义, 等. 渤海鱼类群落结构及其主要增殖放流鱼类的资源量变化. *渔业科学进展*, 2012, 33: 1–9]
- 31 Zhang Z F, He X, Zhang Z, et al. Eutrophication status, mechanism and its coupling effect with algae blooming in Bohai (in Chinese). *Marine Environ Sci*, 2012, 31: 465–483 [张志锋, 贺欣, 张哲, 等. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性. *海洋环境科学*, 2012, 31: 465–483]
- 32 Wu Z, Yu Z, Song X, et al. The spatial and temporal characteristics of harmful algal blooms in the southwest Bohai Sea. *Cont Shelf Res*, 2013, 59: 10–17

Spatial characteristics and formation mechanisms of bottom hypoxia zone in the Bohai Sea during summer

ZHANG Hua, LI YanFang, TANG Cheng, ZOU Tao, YU Jing & GUO Kai

Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Formation of hypoxia zone in coast seas is a critical factor influencing the health of marine ecosystem and has becoming a focus of ocean science. The Bohai Sea in northeastern China is a semi-enclosed shallow sea receiving tremendous amount of terrestrial input of nutrients and sediments from several large rivers as well as coastal municipalities and has suffered serious eutrophication in the last two decades. Seasonal hypoxia has been reported on some locations in the Bohai Sea but relative few studies have been carried out to reveal its physical and biological mechanisms.

Based on analysis of observation data from cruises conducted in the Bohai Sea in spring (May), summer (August), and autumn (November) of year 2014, this study investigated the spatial characteristics, formation mechanisms of bottom hypoxia zone in the Bohai Sea and its relationship with the seasonal thermocline. The results demonstrated that bottom dissolved oxygen (DO) was > 8 mg/L in Spring and Autumn of the Bohai Sea, but a large zone with low bottom DO appeared in Summer, among which are hypoxia zones (DO <3 mg/L) with a total area approximately 4.2×10^3 km². The hypoxia zone displayed a south-north “dual core” structure and the spatial characteristic is similar to that of the dual-core structure of cold bottom water in summer. The vertical profile of the cross section at the middle of Bohai Sea exhibited clear vertical stratification at the south and north depression basin alongside the ridge in the central Bohai Sea, which caused the decreasing DO and substantial acidification (pH <7.8) of bottom cold water. Regression analysis showed clear positive correlation between DO and water temperature ($r^2=0.91$), DO and pH ($r^2=0.93$), as well as DO and chlorophyll *a* ($r^2=0.70$). The results revealed that inter-annual stratification hinders vertical exchange of oxygen and is the predominant physical mechanism responsible for the depletion of DO in bottom sea water.

To determine chemical mechanisms related to hypoxia, content of total organic carbon (TOC) and total organic nitrogen (TON) in surface sediment (0–5 cm) was analyzed at 99 locations. It revealed that the relatively stable sedimentation environment in the bottom cold water zone has resulted in the substantial higher content of TOC and TON in the surface sediment at the south and north depression basin than other areas. Measured ratios of C/N were in the range of 5–10.5, which indicates that organic matter were from both terrestrial and marine sources. The elevated level of organic matter content in these areas might enhance microbial activities and result in higher oxygen consumption rate in bottom sea water. In addition, mineralization of organic matter can release carbonates and contribute to severe acidification observed in bottom sea water. It is suggested that enhanced terrestrial loading of nitrogen and phosphorus from rivers and coastal cities might be the trigger of hypoxia in the Bohai Sea.

In conclusion, the seasonal stratification in central Bohai Sea and its retardation effect on exchange of DO is the critical physical mechanism for the formation of hypoxia zone. The mineralization of organic matter accumulated in surface sediment is an important driving force causing the low bottom DO and substantial acidification. Appearance of hypoxia zone reflects the dramatic change of the ecosystem in the Bohai Sea and might closely linked with the frequent hazardous algae bloom (HAB) and degradation of fisheries. However, a lack of systematically collected data has impeded the establishment of a clear relationship between eutrophication, spring phytoplankton bloom, summer hypoxia, and continuous degradation of benthic and aquatic ecosystem. Further interdisciplinary studies are warranted to elucidate the coupled physical, chemical, and biological processes that drive the depletion of oxygen and to develop solutions to facilitate the ecological recovery in the Bohai Sea.

Bohai Sea, hypoxia, stratification, organic material, eco-disaster

doi: 10.1360/N972015-00915