

王艺超, 刘小艳, 宋贵生, 等. 夏季黄海不同水团溶解有机物分布特征[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 145–155, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.014

Wang Yichao, Liu Xiaoyan, Song Guisheng, et al. Distribution of dissolved organic matter in different water masses in the Yellow Sea in summer[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 145–155, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.014

夏季黄海不同水团溶解有机物分布特征

王艺超¹, 刘小艳¹, 宋贵生^{2*}, Xie Huixiang^{1,3}

(1. 天津科技大学 海洋与环境学院, 天津 300457; 2. 天津大学 海洋科学与技术学院, 天津 300072; 3. 加拿大魁北克大学里姆斯基分校 海洋科学研究所, 魁北克 里姆斯基 G5L 3A1)

摘要: 依据 2017 年 8—9 月对黄海海域溶解有机物 (DOM) 的调查, 探讨了夏季黄海海水中溶解有机碳 (DOC) 和有色溶解有机物 (CDOM) 的空间分布特征。在表层海水中, 受陆源影响较大的近岸海域 CDOM 含量相对较高, 北黄海冷水团区域由于水产养殖的饵料引起 DOC 浓度升高, 且该部分 DOC 以无色为主。DOC 浓度随深度逐渐降低, 而 CDOM 逐渐升高, 该特征在冷水团区域更为显著, 因此 DOC 和 CDOM 在冷水团区域的表底差异远大于浅水区的非冷水团区域。陆源输入和初级生产是引起表层 DOC 升高的主要原因, 而光漂白则引起 CDOM 降低, 同时光漂白还导致表层水体中 CDOM 分子量和芳香性低于底层。底层溶解氧饱和度在冷水团为 80%~93%, 均表现为弱不饱和状态。层化不仅阻碍了 O₂ 向底层水体输送, 还抑制了 DOC 和 CDOM 的垂向混合, 这是引起冷水团区域表底层 DOC 和 CDOM 差异较大的主要原因。

关键词: 黄海冷水团; 缺氧; 溶解有机碳; 有色溶解有机物

中图分类号: P734.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)12-0145-11

1 引言

溶解有机物 (DOM) 是海洋最大的有机碳储库^[1-3], 在海洋碳循环过程中扮演着重要角色^[4], 对全球碳循环和气候变化都具有重要意义^[5]。海水中 DOM 的来源可分为外部来源和内部来源: 外部来源有大气沉降和河流输入^[6-7], 而内部来源主要包括浮游植物细胞释放的光合产物、浮游动物摄食导致浮游植物细胞受损并使可溶性组分进入水体、浮游动物/植物排泄物的溶解和浮游生物遗体的腐解等^[8-11]。海水中 DOM 转化路径包括微生物降解和非生物过程: 微生物降解指海洋原核生物和真核生物摄取 DOM 将其作为营养物质和电子供体^[12-15]; 非生物过程包括光化学降解、吸附于有机颗粒物、凝聚成致密颗粒物等过

程^[16-19]。

黄海的水团主要有沿岸水团、南黄海高盐水团和黄海中央水团 3 类最基本的水团。其中, 黄海中央水团分布在黄海中央水下洼地区域, 黄海冷水团是其典型的水团^[20]。研究显示, 夏季黄海冷水团的物理、化学性质与其他水团存在着明显的差异。黄海冷水团温差大、盐差小 (1.0 左右), 以低温 ($\leq 10^{\circ}\text{C}$)、高盐 (≥ 32) 为主要标识^[20-22]。夏季黄海冷水团存在显著的缺氧和酸化现象^[23-26], 对水生生物产生较大的环境胁迫^[26-28]。在夏、秋季节, 冷水团内部营养盐浓度逐月增加^[29-30], 上层水体有机碎屑沉降矿化是导致该现象的主要原因, 且同时引起水体 pH 的降低, 因此冷水团 pH 与营养盐呈显著负相关^[31]。研究发现, 冷水团区域表层沉积物中总有机碳 (TOC) 与总氮 (TN) 含量

收稿日期: 2018-12-25; 修订日期: 2019-03-01。

基金项目: 国家科技部重点研发计划 (2016YFC1401602); 国家自然科学基金 (41606098); 天津市自然科学基金 (16JCQNJC08000)。

作者简介: 王艺超 (1993—), 男, 四川省盐源县人, 主要研究方向为海洋有机生物地球化学。E-mail: yichao.wang@outlook.com

* 通信作者: 宋贵生, 副教授, 主要从事海洋有机生物地球化学与近海低氧、酸化形成机制研究。E-mail: guisheng.song@tju.edu.cn

具有很好的同源性,并且受水柱中生物活动的影响较大^[32]。目前为止,关于黄海 DOM 的多数研究主要集中在表、底层水体的水平分布,以及典型断面的垂直剖面结构^[33-36],但是关于 DOM 丰度与光学性质在夏季黄海冷水团与其他水团中的异同的研究还相对缺乏。本论文基于 2017 年夏季现场调查数据,分析黄海 DOM 分布与光学特性,比较冷水团与非冷水团区域 DOM 丰度与性质差异,探讨 DOM 不同源汇对冷水团区域表、底层水体 DOM 丰度与光学特性的影响。本研究将对进一步认识冷水团对海洋碳循环的影响提供新的认识。

2 材料和方法

2.1 研究区域概况

黄海是陆架边缘海,位于中国大陆和朝鲜半岛之间,面积约 $38 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均水深 44 m,最大深度位于韩国济州岛北侧,可达 140 m。山东半岛顶端的成山角与朝鲜半岛长山串之间的连线,将黄海区分为北黄海和南黄海两个部分。北黄海位于山东半岛和辽东半岛之间,东邻朝鲜,西经渤海海峡与渤海相通;南黄海与东海相邻,二者以长江口北岸的启东嘴与韩国济州岛西南连线为界(图 1)。受东亚季风的影响,黄海水团活动强烈,受渤海沿岸流、黄海沿岸流、朝鲜沿岸流、长江冲淡水,及来自东海的台湾暖流、黑潮、对马暖流等的综合作用^[37]。夏季,黄海的水文特征主要表现为冬季冷却过程残余下来的低温冷水($\leq 10^\circ\text{C}$)大致盘踞在 50 m 等深线以下的黄海低洼海区^[38-39]。在有的年份中,黄海冷水团分裂为两个部分,分别位于北黄海和南黄海,其中,北黄海冷水团的西、北边界较为稳定,平均位置分别位于 $121^\circ 25' \text{E}$ 与 $38^\circ 45' \text{N}$,最大变动距离均为 30 海里左右,而南黄海冷水团的边界年际差异较大^[40]。

2.2 样品采集与预处理

搭乘国家自然科学基金委渤海共享航次(“东方红 2”号船),于 2017 年 8—9 月对黄海进行综合调查,共采集 38 个站位海水样品(图 1,表 1)。现场海水温盐由 CTD 多通道采水器采集(美国 Seabird 公司,型号 SBE911+),海水样品采用 CTD 采水器上安装的 12 L Niskin 采水瓶采集,依据不同站位水深,分别采集 3~4 个不同深度样品(表 1)。样品采集后,首先依据 Winkler 法采集溶解氧(DO)样品并固定、分析,每个样品采集 3 个平行样,相对分析误差小于 3%。其中,溶解氧饱和度(DO%)通过实测 DO 浓度除以大气平衡 DO 浓度计算得出,而大气平衡 DO 浓度则通过

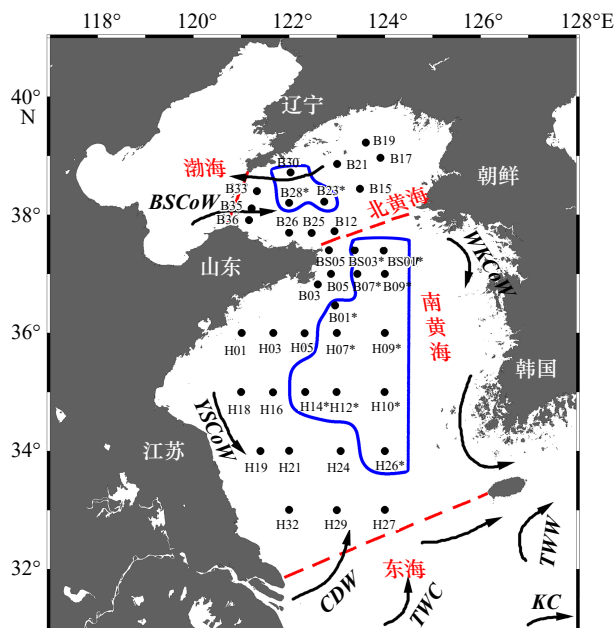


图 1 2017 年夏季黄海水团分布(站位详细信息见表 1)

Fig. 1 Map of sampling stations and current system in the Yellow Sea in summer 2017 (see Tab. 1 for detailed sampling information)

红色虚线表示渤海、北黄海、南黄海以及东海之间的分界线,蓝色实线区域显示黄海冷水团区域。字母缩写分别代表:渤海沿岸流(BSCoW)、黄海沿岸流(YSCoW)、朝鲜沿岸流(WKCoW)、长江冲淡水(CDW)、台湾暖流(TWC)、黑潮(KC)、对马暖流(TWW)

The red dashed lines represent the boundaries between different geographic areas as indicated in the map, while the blue solid lines show the Yellow Sea Cold Water Mass areas. Currents are: the Bohai Sea Coastal Water (BSCoW), the Yellow Sea Coastal Water (YSCoW), the Western Korea Coastal Water (WKCoW), the Changjiang Diluted Water (CDW), the Taiwan Warm Current (TWC), the Kuroshi Current (KC), and the Tsushima Warm Water (TWW)

亨利定律计算^[41],并通过大气平衡 DO 浓度与实测 DO 浓度的差减计算出表观耗氧量(AOU)。剩余海水样品转移至 1 L 透明玻璃瓶中,并立即使用 47 mm (0.2 μm 孔径)聚醚砜滤膜(美国 PALL 公司)过滤,滤液转移到 20 mL 和 100 mL 透明玻璃瓶,分别用于溶解有机碳(DOC)浓度和有色溶解有机物(CDOM)吸收光谱分析。样品瓶使用前在 450°C 下焙烧 4~5 h, Milli-Q 水和样品分别润洗 2~3 遍。所用螺纹塑料盖配有聚四氟乙烯衬垫,且样品保存过程中,保持玻璃瓶竖直摆放,避免样品接触衬垫和瓶盖,以尽量减小容器本身所带来的测定误差。DOC 样品采集后,立即加入 250 μL 2 mol/L HCl(德国 Merck 公司)酸化,抑制微生物活动。所有样品于 4°C 冷藏避光保存,航次结束后带回陆地实验室尽快分析测定。

表 1 2017年夏季黄海海区各站位采样时间、经纬度、水深以及采样深度

Tab. 1 Sampling date, coordinates, water depth and sampling depths of each station in the Yellow Sea in summer 2017

| 站位 | 调查时间 | 经纬度 | 水深/m | 采样深度/m |
|-------|-------|---------------------|------|-----------------------|
| 南黄海 | | | | |
| H01 | 8月29日 | 35.999°N, 121.009°E | 30.4 | 3.0, 14.9, 24.8 |
| H03 | 8月29日 | 36.000°N, 121.668°E | 36.0 | 3.9, 11.9, 19.8, 32.8 |
| H05 | 8月30日 | 35.997°N, 122.327°E | 52.0 | 3.6, 11.9, 20.9, 48.6 |
| H07* | 8月31日 | 36.002°N, 122.999°E | 71.0 | 4.0, 22.8, 34.7, 68.0 |
| H09* | 9月1日 | 36.002°N, 124.000°E | 76.0 | 4.0, 19.8, 31.8, 73.4 |
| H10* | 9月2日 | 35.000°N, 123.996°E | 80.0 | 4.0, 19.9, 39.7, 78.3 |
| H12* | 9月2日 | 35.001°N, 122.994°E | 73.0 | 4.1, 19.8, 39.7, 71.2 |
| H14* | 9月2日 | 34.999°N, 122.337°E | 60.5 | 4.0, 19.9, 30.8, 57.4 |
| H16 | 9月2日 | 34.998°N, 121.663°E | 45.0 | 3.8, 15.9, 29.7, 42.8 |
| H18 | 9月3日 | 35.000°N, 120.998°E | 36.5 | 4.0, 10.0, 17.8, 34.6 |
| H19 | 9月3日 | 34.001°N, 121.402°E | 17.5 | 2.8, 9.0, 15.8 |
| H21 | 9月3日 | 34.006°N, 122.000°E | 18.5 | 2.9, 8.9, 16.9 |
| H24 | 9月3日 | 34.000°N, 123.081°E | 68.0 | 3.0, 14.9, 27.8, 66.2 |
| H26* | 9月4日 | 34.002°N, 124.001°E | 78.5 | 3.0, 14.8, 29.7, 77.2 |
| H27 | 9月4日 | 33.005°N, 124.001°E | 50.0 | 3.6, 14.9, 29.7, 47.2 |
| H29 | 9月4日 | 33.000°N, 122.999°E | 32.0 | 4.0, 12.9, 26.8 |
| H32 | 9月4日 | 33.005°N, 121.999°E | 18.0 | 3.0, 8.9, 14.9 |
| B01* | 9月9日 | 36.466°N, 122.962°E | 60.0 | 3.0, 13.9, 29.8, 58.4 |
| B03 | 9月9日 | 36.823°N, 122.601°E | 36.0 | 2.7, 17.9, 33.6 |
| B05 | 9月9日 | 36.998°N, 122.876°E | 30.0 | 2.8, 13.9, 27.5 |
| B07* | 9月9日 | 37.001°N, 123.426°E | 72.0 | 3.2, 21.8, 35.8, 70.1 |
| B09* | 9月9日 | 36.999°N, 124.001°E | 75.0 | 3.1, 20.8, 37.7, 72.3 |
| BS01* | 9月10日 | 37.394°N, 123.978°E | 70.0 | 2.9, 21.8, 35.7, 68.3 |
| BS03* | 9月10日 | 37.401°N, 123.372°E | 75.0 | 3.1, 25.8, 36.8, 69.4 |
| BS05 | 9月10日 | 37.400°N, 122.833°E | 37.0 | 3.0, 19.9, 33.7 |
| 北黄海 | | | | |
| B12 | 9月10日 | 37.721°N, 122.952°E | 65.0 | 3.1, 22.9, 32.8, 63.1 |
| B15 | 9月10日 | 38.440°N, 123.482°E | 66.0 | 2.7, 19.9, 33.8, 63.2 |
| B17 | 9月11日 | 38.966°N, 123.911°E | 53.5 | 3.1, 14.9, 27.8, 51.4 |
| B19 | 9月11日 | 39.220°N, 123.602°E | 36.0 | 2.9, 18.9, 34.4 |
| B21 | 9月11日 | 38.862°N, 123.003°E | 52.4 | 1.9, 11.9, 22.9, 49.6 |
| B23* | 9月11日 | 38.222°N, 122.738°E | 52.0 | 4.0, 12.0, 25.8, 49.4 |
| B25 | 9月11日 | 37.693°N, 122.472°E | 28.0 | 3.1, 14.9, 26.4 |
| B26 | 9月12日 | 37.699°N, 122.003°E | 23.0 | 3.1, 11.9, 20.9 |

续表1

| 站位 | 调查时间 | 经纬度 | 水深/m | 采样深度/m |
|------|-------|---------------------|------|-----------------------|
| B28* | 9月12日 | 38.201°N, 121.999°E | 54.0 | 3.1, 14.9, 29.8, 50.6 |
| B33 | 9月12日 | 38.402°N, 121.326°E | 50.0 | 3.2, 11.9, 21.9, 47.4 |
| B35 | 9月12日 | 38.107°N, 121.217°E | 30.0 | 2.9, 14.9, 27.7 |
| B36 | 9月12日 | 37.909°N, 121.163°E | 21.0 | 2.1, 9.9, 17.7 |

注: *表示该站位位于黄海冷水团。

2.3 样品测定及数据处理

2.3.1 DOC 浓度测定

DOC 浓度的测定采用高温催化氧化法使用日本岛津 TOC-L_{CPH} 总有机碳分析仪进行测定, 每次进样量为 200 μL , 每个样品测定次数为 3~4 次, 取 3 次相近的结果计算其平均值, 保证测定样品的相对标准偏差小于 2%。测定前, 用不同浓度的邻苯二甲酸氢钾溶液标定仪器; 测定过程中, 每 10 个样品间, 插入低浓度 DOC 和深海 DOC 标样(迈阿密大学 Hansell 博士实验室提供, 低浓度 DOC 标样: 1~2 $\mu\text{mol/L}$; 深海 DOC 标样: 42~45 $\mu\text{mol/L}$), 以保证测定结果的准确性(低浓度 DOC 测定结果为 (2.32 ± 0.06) $\mu\text{mol/L}$, 深海 DOC 测定结果为 (43.6 ± 1.5) $\mu\text{mol/L}$)。

2.3.2 CDOM 吸收光谱测定

样品测量前, 置于暗处升至室温。采用日本岛津 UV-2550 双通道紫外-可见分光光度计进行测定, 配有 10 cm 的石英比色皿, 以 Milli-Q 水作为参比, 扫描波长范围 200~800 nm, 扫描间隔 1 nm。根据仪器得到的样品的吸光度值, 利用下式计算得到吸收系数 $a(\lambda)$ ^[42-43]:

$$a(\lambda) = 2.303 \times A(\lambda) / L, \quad (1)$$

式中, $A(\lambda)$ 为仪器测定的吸光度; L 为比色皿光程(单位, m)。所有波长处的 $A(\lambda)$ 通过减去 683~687 nm 处的平均吸光度来消除仪器的基线漂移和散射等影响^[44]。

3 结果与讨论

3.1 夏季黄海基本物理、化学特征

为方便后文讨论, 将南、北黄海调查站位依据所在位置以及底层水的温盐情况划分为冷水团和非冷水团。其中, 冷水团的划分参阅文献 [37], 以 10 $^{\circ}\text{C}$ 等温线为界。因此, 黄海调查站位可划分为 4 组: 南黄海冷水团, 南黄海非冷水团, 北黄海冷水团和北黄海非冷水团。为简化描述, 冷水团区域调查站位的表层水体也以冷水团标识, 如南黄海冷水团区域表层水体。黄海各区域表、底层水体的温度、盐度与 DO% 的变化范围及平均值见表 2。

总体而言, 夏季黄海表层水温高于底层, 南黄海高于北黄海(表 2); 此外, 南、北黄海冷水团区域表层水体与底层水体平均温差分别为 16.7 $^{\circ}\text{C}$ 和 16.6 $^{\circ}\text{C}$, 显著高于非冷水团区域的相应值(5.9 $^{\circ}\text{C}$ 和 5.4 $^{\circ}\text{C}$)。南、北黄海冷水团区域底层水体最低温度分别位于 H14 站位(7.4 $^{\circ}\text{C}$)和 B28 站位(6.6 $^{\circ}\text{C}$)。黄海的盐度表现为表层水体低于底层, 南黄海总体略高于北黄海(表 2); 南、北黄海冷水团区域底层水体的平均盐度均超过 32。就黄海表、底层盐度差异而言, 南、北黄海冷水团区域水体盐度增量分别为 0.7 和 0.6, 略高于

表 2 2017 年夏季黄海海区温度、盐度、溶解氧饱和度的变化范围及平均值

Tab. 2 Ranges and means of temperature, salinity, and dissolved oxygen saturation degree in the Yellow Sea in summer 2017

| 层次 | 海区 | 区域 | 水温/ $^{\circ}\text{C}$ | 盐度 | DO/% |
|----|-----|------|---|-------------------------------|------------------------------|
| 表层 | 南黄海 | 冷水团 | 24.1~25.9 $n=11$ (25.1 \pm 0.7) | 31.3~32.0 (31.7 \pm 0.2) | 111%~114% (112% \pm 1%) |
| | | 非冷水团 | 23.1~27.1 $n=14$ (24.9 \pm 1.1) | 30.0~31.7 (31.3 \pm 0.5) | 100%~123% (112% \pm 5%) |
| | 北黄海 | 冷水团 | 24.3~24.6 $n=3$ (24.5 \pm 0.2) | 31.5~31.8 (31.7 \pm 0.1) | 112%~114% (113% \pm 1%) |
| | | 非冷水团 | 22.6~24.9 $n=10$ (23.9 \pm 0.7) | 31.5~31.9 (31.6 \pm 0.1) | 109%~132% (115% \pm 6%) |
| 底层 | 南黄海 | 冷水团 | 7.4~9.6 $n=11$ (8.4 \pm 0.5) | 32.2~32.9 (32.4 \pm 0.2) | 81%~93% (86% \pm 5%) |
| | | 非冷水团 | 10.4~27.1 $n=14$ (19.0 \pm 5.6) | 31.1~32.9 (31.9 \pm 0.5) | 15%~113% (90% \pm 23%) |
| | 北黄海 | 冷水团 | 6.6~9.0 $n=3$ (7.9 \pm 1.0) | 32.2~32.3 (32.3 \pm 0.1) | 80%~91% (86% \pm 5%) |
| | | 非冷水团 | 10.4~23.7 $n=10$ (18.5 \pm 4.9) | 31.5~32.2 (31.9 \pm 0.3) | 85%~108% (97% \pm 8%) |

注: n 表示采样点数量; 括号内数据代表平均值 \pm 标准偏差。

非冷水团区域相应值(0.6和0.3)。黄海表层水体DO%为100%~132%,高于底层水体(15%~113%)(表2);其中,底层水体DO%最低值位于长江口附近的H29站位(15%),该区域也是典型的夏季低氧区^[45-47]。冷水团区域底层水体DO均呈现弱不饱和状态(DO%:80%~93%),如果剔除受到长江冲淡水影响的H29站位,非冷水团区域底层水体DO%为85%~113%,冷水团区域平均DO%较非冷水团区域低11%(表2),这与翟惟东^[26]研究中的分布趋势基本一致。总的来说,南、北黄海的冷水团区域底层水体较非冷水团区域底层水体的显著特征是高盐和低DO%。

3.2 黄海表、底层DOC和 a_{330} 分布特征

黄海DOC含量表现为表层水体高于底层水体,南黄海低于北黄海(图2),与王毅梦等^[48]研究结果一致。北黄海受到陆地径流和人类活动影响同时(水产养殖业、工农业及城市污水排放等),该海区营养盐水平也较高,丰富的营养盐使得初级生产力较高^[49],进一步提高DOC浓度。相对来说,南黄海与外海交换更加充分,受低营养盐的东海水的“冲淡”作用^[50],初级生产力较低,因此DOC浓度较北黄海低。DOC在南、北黄海又有各自的分布特征:在南黄海表层水体,冷水团区域DOC[(136±10) μmol/L]与非冷水团区域相当[(138±19) μmol/L],无显著空间差异;在北黄海表层水体,DOC在冷水团区域平均浓度比非冷水团区域高15 μmol/L(图2),这是由于北黄海冷水团区域位于水产养殖区及其邻近海区^[24],在水产养殖过程中,不断投放富含营养物质的饵料与化学药剂的使用等因素在沿岸流作用下^[51-52],对维持该区域表层海水中较高水平的DOC含量[(158±26) μmol/L]具有重要贡献。在黄海底层水体,DOC在冷水团区域的浓度比非冷水团区域低10 μmol/L左右(图2)。

与DOC不同, a_{330} (CDOM在330 nm处吸收系数,代表CDOM含量)在研究区域底层水体的含量均显著高于表层水体(图2),表、底层水体 a_{330} 范围分别为0.33~0.99 m⁻¹、0.45~1.06 m⁻¹。表层水体由于太阳辐射,CDOM发生光漂白反应,导致CDOM吸光度的损失^[53];另外,有机物从海水表层向底层输送的过程中,微生物可将其转化为CDOM^[54-58],是导致底层水体CDOM含量较高的另一原因。在表层海水中,无论南、北黄海, a_{330} 在离岸较近的非冷水团区域高于冷水团区域,表明近岸海域CDOM受陆源输入影响显著。南黄海冷水团区域底层海水 a_{330} 的含量低于非冷水团区域,而北黄海冷水团区域底层海水中 a_{330} [(0.81±0.02) m⁻¹]与非冷水团区域[(0.81±0.15) m⁻¹]相当(图2)。值得注意的是,在北黄海表层海水中,

虽然冷水团区域DOC含量显著高于非冷水团区域,但冷水团区域水体 a_{330} 却显著低于非冷水团,这表明由饵料投放等因素贡献的DOC对CDOM影响甚微,即以无色DOC为主。

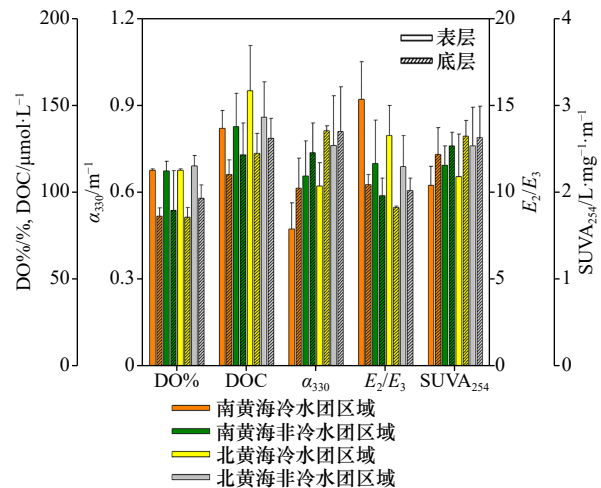


图2 2017年夏季黄海表层与底层DO%、DOC、 a_{330} 、 E_2/E_3 和SUVA₂₅₄平均值

Fig. 2 Mean values of DO%, DOC, a_{330} , E_2/E_3 , and SUVA₂₅₄ in surface and bottom waters in the Yellow Sea in summer 2017

误差棒表示一个标准偏差

Error bars indicate one standard deviation

3.3 黄海DOM的光学特性

E_2/E_3 是CDOM吸收光谱在250 nm和365 nm吸收系数的比值,即 a_{250}/a_{365} ,该值越大则分子量越小^[59-60];SUVA₂₅₄定义为CDOM吸收光谱在254 nm的吸收系数与DOC浓度的比值(单位:L/(mg·m))。 E_2/E_3 和比紫外吸光度SUVA₂₅₄可分别用来指示CDOM分子量和DOM芳香性。DOM的芳香性随SUVA₂₅₄增大而增大^[61]。 E_2/E_3 和SUVA₂₅₄的主要区别在于 E_2/E_3 与CDOM分子量密切相关^[60],仅表达CDOM的一个特性,而SUVA₂₅₄则主要表征DOM的芳香性,考虑的是整个DOM库。

黄海各区域海水 E_2/E_3 均表现为表层高于底层(图2),主要由表层水体CDOM经光漂白作用降解为小分子有机物所致^[60-63]。在表层海水中,南、北黄海冷水团区域 E_2/E_3 显著高于非冷水团区域,这与周倩倩^[34]研究结果一致。这再次表明CDOM在近岸非冷水团区域受陆源输入大分子有机物的影响较大。而在远岸冷水团区域,一方面主要受海源的影响;另一方面,该区域水体颗粒物相对较少,浊度较低,CDOM光漂白程度更高,导致该区域CDOM分子量进一步降低。在非冷水团区域, E_2/E_3 南北差异较小(分别为11.7±2.5和11.5±1.8),而南黄海冷水团区域

表层水体 E_2/E_3 (15.3 ± 2.2) 比北黄海冷水团区域 (13.3 ± 1.7) 高 15%, 即南黄海冷水团区域水体的分子量更小。原因可能是北黄海冷水团区域受水产养殖等污染较重水体的影响, 而南黄海冷水团区域与来自东海的水体交换充分。在黄海底层海水中, 南、北黄海 E_2/E_3 差别不大 (分别为 10.1 ± 0.9 和 9.9 ± 0.8), 原因可能是南、北黄海冷水团都是冬季混合冷却后残留的水体, 水体性质差异相对较小。此外, 各区域底层水体 E_2/E_3 均值变化差异也显著小于表层 (图 2)。

与 E_2/E_3 相反, 表层水体 $SUVA_{254}$ 低于底层水体 (图 2), 这说明底层水体 DOM 芳香性更大。在表层水体中, 南、北黄海非冷水团区域 $SUVA_{254}$ 均高于冷水团区域。在底层水体中, $SUVA_{254}$ 区域分布相对复杂: 南黄海总体低于北黄海; 在南黄海, 冷水团区域低于非冷水团区域, 而北黄海冷水团区域与非冷水团区域相当。

3.4 DOM 垂直分布特征

不同区域海水温度、盐度、DO% 和 DOM 参数的

垂直剖面如图 3 所示。在离岸较近的非冷水团区域, 因水体较浅, 大部分站位垂直混合均匀, 因此 DO 在整个水柱中基本呈饱和与过饱和状态, 表、底层水体的 DOM 差异较小; 而在冷水团区域 (如 H09 和 B30 站), 水体较深, 在 20~40 m 出现强烈的温盐跃层, 底层水体 DO% 呈现不饱和状态, 跃层的屏障作用也阻碍了 DOM 的垂向交换。DOC 和 E_2/E_3 随深度逐渐降低, 而 a_{330} 、 $SUVA_{254}$ 随之递增, 这表明 CDOM 含量及分子量、DOM 芳香性均随之增加。在冷水团区域, DOC 随深度降低速率显著高于非冷水团区域, 同时 a_{330} 升高速率也在冷水团区域高, 即冷水团区域 DOM 具有更显著的垂向变化, 其源汇特征见 3.5 节。总的来说, 冷水团与非冷水团站位的显著区别在于具有更强的跃层, 并且 DO%、DOC、 a_{330} 、 E_2/E_3 、 $SUVA_{254}$ 的垂直变化幅度也显著大于非冷水团站位。

3.5 冷水团与非冷水团区域 DOM 垂向差异

为研究冷水团区域与非冷水团区域 DOM 丰度与 CDOM 光学特性的垂向差异, 先将各站位表层水

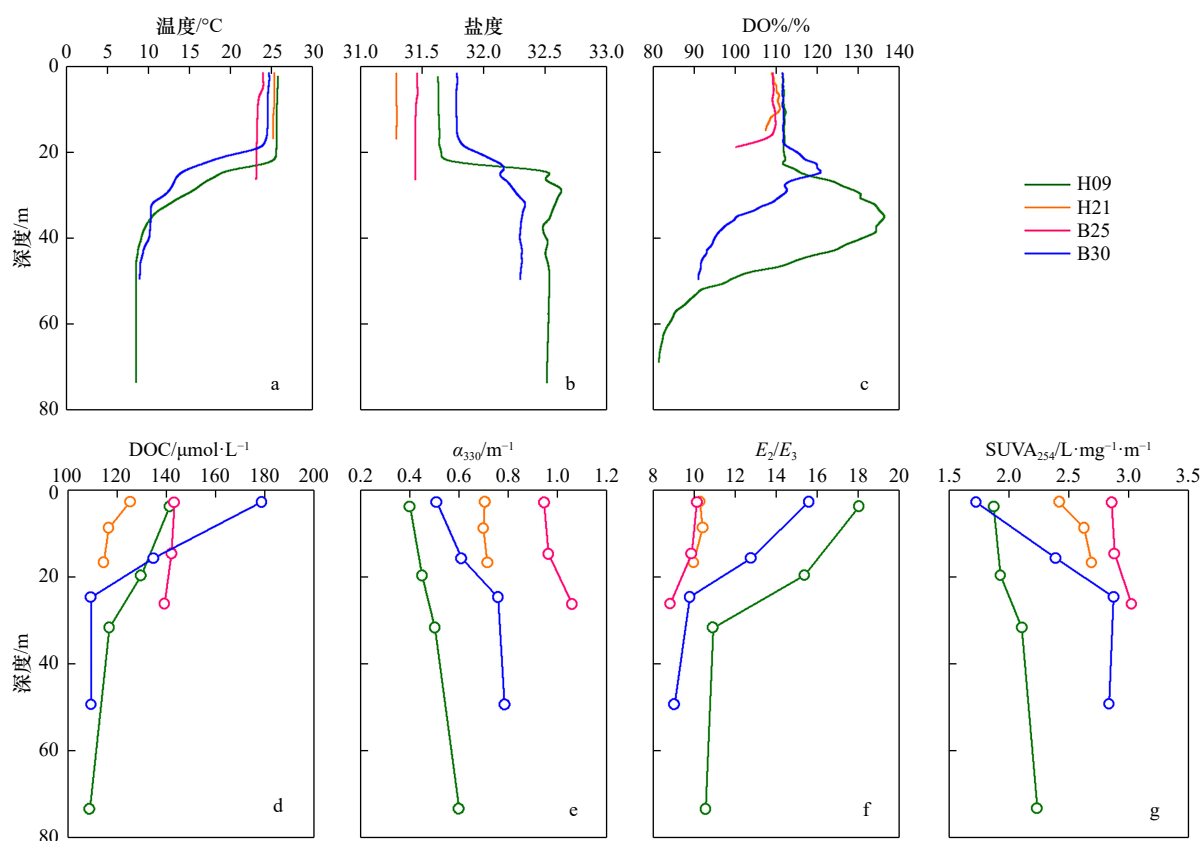


图 3 2017 年夏季黄海典型站位温度、盐度、DO%、DOC、 a_{330} 、 E_2/E_3 和 $SUVA_{254}$ 垂直分布

Fig. 3 Vertical distributions of temperature, salinity, DO%, DOC, a_{330} , E_2/E_3 and $SUVA_{254}$ at typical stations in the Yellow Sea in summer 2017

H09、B30: 南、北黄海典型冷水团站位; H21、B25: 南、北黄海典型非冷水团站位

Stations H09 and B30 are located inside the South and North Yellow Sea Cold Water Masses, and stations H21 and B25 are located outside the South and North Yellow Sea Cold Water Masses

体与底层水体的 DOC、 a_{330} 、 E_2/E_3 、 $SUVA_{254}$ 作差,再分区域求平均值,即 ΔDOC 、 Δa_{330} 、 $\Delta(E_2/E_3)$ 、 $\Delta SUVA_{254}$ 。为方便讨论,以上参数均以绝对值表示。如图 4 所示,南、北黄海冷水团区域 ΔDOC 、 Δa_{330} 、 $\Delta(E_2/E_3)$ 、 $\Delta SUVA_{254}$ 以及底层水体 AOU 均显著大于非冷水团区域。

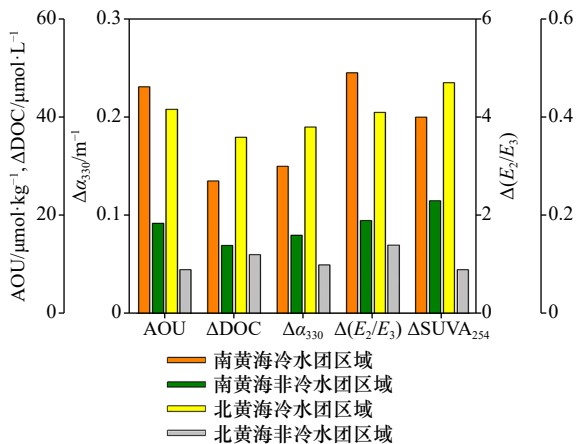


图 4 2017 年夏季黄海底层 AOU 以及表底层 DOC、 a_{330} 、 $\Delta(E_2/E_3)$ 和 $SUVA_{254}$ 差值

Fig. 4 AOU in bottom water and differences in DOC, a_{330} , $\Delta(E_2/E_3)$, and $SUVA_{254}$ between surface and bottom waters in the Yellow Sea in summer 2017

ΔDOC 、 $\Delta(E_2/E_3)$ 为表层的值减去底层的值, Δa_{330} 、 ΔSUVA_{254} 为底层的值减去表层的值
 ΔDOC and $\Delta(E_2/E_3)$ are surface water values minus bottom water values, while Δa_{330} and ΔSUVA_{254} are bottom water values minus surface water values

冷水团区域底层水体 AOU ($45 \mu\text{mol}/\text{kg}$) 是非冷水团区域 ($15 \mu\text{mol}/\text{kg}$) 的 3 倍(图 4)。研究表明,颗粒有机碳(POC)由上层水体向下沉降过程中,不断降解耗氧,一部分生成 CO_2 , 导致水体酸化^[46, 64], 另一部分发生不完全降解,生成 DOC 或 CDOM 分子^[56-58]。冷水团区域水体层化(图 3)阻碍了水体的垂直交换,底层水体 DO 无法得到迅速补充^[65-67], 导致该区域底层水体 AOU 显著高于层化较弱的近岸非冷水团区域。

在冬季,因水体垂直对流混合均匀^[68-70]。因此在早春水柱层化前,DOC 和 CDOM 的垂直分布预计也是一致的。则夏季各区域 ΔDOC 、 Δa_{330} 差异主要受以下几个因素的控制:(1)表层水体的陆源输入、光合生产、人类活动、微生物和光化学降解,(2)底层水体有机物的耗氧降解。与冬季相比,夏季的特点是生产力高,光合作用强;太阳辐射强,其光降解和光漂白高等。结合各区域表层水体 DOC 和 a_{330} 分布特征(见 3.2 节),说明表层的不同区域 DOC 净产量基本一

致,而 a_{330} 受陆源输送和光漂白程度影响,在近岸的非冷水团区域明显高于远岸水体。然而 ΔDOC 和 Δa_{330} 在冷水团区域显著高于非冷水团区域。结合该区域高 AOU 的特点(图 4),表明冷水团区域底层水体 DOC 表现为净损失。即 DOC 的矿化速率(DOC 转化为 CO_2 的速率)大于 POC 转化为 DOC 的速率。而在有机物降解过程中,CDOM 表现为净生产,在北黄海冷水团区域底层水体尤为显著(图 2)。上层水体沉降的 POC 降解为 DOC、CDOM 的同时,底层水体的无色 DOC 也可转化为 CDOM^[55],且 CDOM 更难以被微生物降解^[71]。北黄海 CDOM 源汇与南黄海相同,而 DOC 的区别在于北黄海冷水团区域表层水体受到水产养殖的影响,导致该区域表层水体 DOC 的净输入高于非冷水团区域水体。此外,非冷水团区域水体较强的垂直混合也进一步削弱了表、底层 DOC 与 a_{330} 的差异。

冷水团区域 $\Delta(E_2/E_3)$ 和 ΔSUVA_{254} 显著高于非冷水团区域,原因可能是其表层水体具有较高 E_2/E_3 和较低 $SUVA_{254}$ 。此外, ΔSUVA_{254} 也可能受表底层深度差异的影响。假设该研究区域 CDOM 分子量遵循 Lou 和 Xie^[60] 研究所得与 E_2/E_3 关系,则黄海底层水体分子量 [(0.58 ± 0.05) kDa] 高出表层 [(0.51 ± 0.07) kDa] 14%,南、北黄海冷水团区域表层 (0.10 kDa) 与底层水体分子量 (0.13 kDa) 的差异同样显著高于非冷水团区域(相应值分别为 0.05 kDa 和 0.04 kDa)。此外,在分子量不断增大过程中,DOM 分子芳香性也逐渐增加。

4 结论

冷水团是夏季黄海水域的典型水文特征,近年来该区域的夏秋季节性缺氧、酸化问题受到广泛关注^[24-26]。层化与有机物降解是该区域缺氧与酸化的主要形成因素。本论文初步研究了 DOM 在夏季黄海不同水团中丰度与性质的分布特征及影响因素。研究表明,在表层水体中,北黄海冷水团区域由于水产养殖的饵料显著增加了水体 DOC 含量,而该部分 DOC 以无色为主,因此 CDOM 并无明显提高。DOC 和 CDOM 随深度分别呈现降低和增加趋势,与之相伴的是 CDOM 分子量和 DOM 芳香性随深度逐渐增加,该垂直分布特征在冷水团区域尤为显著。造成该结果的主要原因为夏季表层光合作用与陆源输入大量 DOC,然而 CDOM 在表层发生显著的光漂白^[53, 63],导致表层水体 a_{330} 较低。底层水体中,冷水团区域 DOC 显著低于离岸较近的非冷水团区域, a_{330} 分布特征与之类似。一方面,近岸水体水层较浅,层

化较弱, 水体垂向混合明显, 引起底层 DOC 升高和 a_{330} 降低, 而冷水团水体较深, 强烈的层化阻碍了 DOM 垂向迁移; 另一方面, 冷水团区域 DOC 一方面可由表层沉降的 POC 转化产生, 另一方面也可发生耗氧降解, 生成 CO_2 , 而在该降解与转化过程中, 伴随着有色 DOC(即 CDOM)的产生, 是引起冷水团内部 DOC 较低和 CDOM 较高的又一原因。水体中 C 不同赋存形态(即 CO_2 、DOC 和 POC)在不同季节的变化

特征是将来深入探讨冷水团 DOM 的源汇以及对该区域缺氧、酸化贡献的核心问题。

致谢: 感谢国家自然科学基金委渤海海洋学综合科学考察航次(NORC2017-01)提供现场调查船时; 感谢“东方红 2”号船长及全体船员、航次首席科学家以及各课题组同行在调查、采样期间给予的帮助; 感谢天津大学魏皓教授课题组提供温盐数据。

参考文献:

- [1] Hedges J I. Global biogeochemical cycles: progress and problems[J]. *Marine Chemistry*, 1992, 39(1/3): 67–93.
- [2] Hansell D A, Carlson C A. Deep-ocean gradients in the concentration of dissolved organic carbon[J]. *Nature*, 1998, 395(6699): 263–266.
- [3] Hansell D A, Carlson C A, Repeta D J, et al. Dissolved organic matter in the ocean: a controversy stimulates new insights[J]. *Oceanography*, 2009, 22(4): 202–211.
- [4] Ducklow R B H. The Black Sea: ecology and oceanography by Yuri I Sorokin[J]. *The Quarterly Review of Biology*, 2002, 77(4): 475–476.
- [5] Sipler R E, Bronk D A. Dynamics of dissolved organic nitrogen[M]//Hansell D A, Carlson C A. *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Amsterdam: Academic Press, 2015: 127–232.
- [6] Cornell S, Randell A, Jickells T. Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans[J]. *Nature*, 1995, 376(6537): 243–246.
- [7] Opsahl S, Benner R. Distribution and cycling of terrigenous dissolved organic matter in the ocean[J]. *Nature*, 1997, 386(6624): 480–482.
- [8] Johannes R E, Webb K L. Release of dissolved amino acids by marine zooplankton[J]. *Science*, 1965, 150(3692): 76–77.
- [9] Fogg G E. The ecological significance of extracellular products of phytoplankton photosynthesis[J]. *Botanica Marina*, 1983, 26(1): 3–14.
- [10] Gobler C J, Hutchins D A, Fisher N S, et al. Release and bioavailability of C, N, P, Se, and Fe following viral lysis of a marine chryso-phyte[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(7): 1492–1504.
- [11] Myklestad S M. Dissolved organic carbon from phytoplankton[M]//Wangersky P J. *Marine Chemistry*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 111–148.
- [12] Teira E, Reinthaler T, Pernthaler A, et al. Combining catalyzed reporter deposition-fluorescence in situ hybridization and microautoradiography to detect substrate utilization by bacteria and archaea in the deep ocean[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(7): 4411–4414.
- [13] Reinthaler T, van Aken H, Veth C, et al. Prokaryotic respiration and production in the meso- and bathypelagic realm of the eastern and western North Atlantic basin[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(3): 1262–1273.
- [14] Manahan D T, Richardson K. Competition studies on the uptake of dissolved organic nutrients by bivalve larvae (*Mytilus edulis*) and marine bacteria[J]. *Marine Biology*, 1983, 75(2/3): 241–247.
- [15] First M R, Hollibaugh J T. The model high molecular weight DOC compound, dextran, is ingested by the benthic ciliate *Uronema marinum* but does not supplement ciliate growth[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2009, 57(1): 79–87.
- [16] Moran M A, Zepp R G. Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(6): 1307–1316.
- [17] Druffel E R M, Griffin S, Bauer J E, et al. Distribution of particulate organic carbon and radiocarbon in the water column from the upper slope to the abyssal NE Pacific Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1998, 45(4/5): 667–687.
- [18] Stubbins A, Niggemann J, Dittmar T. Photo-lability of deep ocean dissolved black carbon[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(5): 1661–1670.
- [19] Song Guisheng, Li Yijie, Hu Suzheng, et al. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yangtze River estuary: kinetics and effects of temperature, pH, and salinity[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2017, 19(6): 861–873.
- [20] 管秉贤. 黄海冷水团的水温变化以及环流特征的初步分析[J]. *海洋与湖沼*, 1963, 5(4): 255–284.
Guan Bingxian. A preliminary study of the temperature variations and the characteristics of the circulation of the cold water mass of the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(4): 255–284.
- [21] 林金祥, 宋万先. 黄海冷水团的基本特征[J]. *海洋研究*, 1981, 4: 1–13.
Lin Jinxiang, Song Wanxian. Basic characteristics of the Yellow Sea Cold Water Mass[J]. *Marine Research*, 1981, 4: 1–13.
- [22] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2000.
Li Fengqi, Su Yusong. *Analyses of Water Masses in Oceans*[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2000.
- [23] 王保栋, 王桂云, 郑昌洙, 等. 南黄海溶解氧的垂直分布特性[J]. *海洋学报*, 1999, 21(5): 72–77.
Wang Baodong, Wang Guiyun, Chung C S, et al. Features in vertical profiles of dissolved oxygen in the southern Huanghai Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 1999, 21(5): 72–77.
- [24] Zhai W D, Zheng N, Huo C, et al. Subsurface pH and carbonate saturation state of aragonite on the Chinese side of the North Yellow Sea:

- seasonal variations and controls[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(4): 1103–1123.
- [25] Xu Xuemei, Zang Kunpeng, Huo Cheng, et al. Aragonite saturation state and dynamic mechanism in the southern Yellow Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1): 142–150.
- [26] 翟惟东. 黄海的季节性酸化现象及其调控[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 61(6): 647–658.
Zhai Weidong. Exploring seasonal acidification in the Yellow Sea[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2018, 61(6): 647–658.
- [27] Waldbusser G G, Voigt E P, Bergschneider H, et al. Biocalcification in the eastern oyster (*Crassostrea virginica*) in relation to long-term trends in Chesapeake Bay pH[J]. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34(2): 221–231.
- [28] Ekstrom J A, Suatoni L, Cooley S R, et al. Vulnerability and adaptation of US shellfisheries to ocean acidification[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 207–214.
- [29] 刁焕祥, 沈志良. 黄海冷水域水化学要素的垂直分布特性[J]. 海洋科学集刊, 1985(25): 41–51.
Diao Huanxiang, Shen Zhiliang. The vertical distribution of the chemical factors in the Yellow Sea Cold Water[J]. *Studia Marina Sinica*, 1985(25): 41–51.
- [30] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 47–54.
Wang Baodong. Characteristics of variations and interrelations of biogenic elements in the Huanghai Sea Cold Water Mass[J]. *Haiyang Xuebao*, 2000, 22(6): 47–54.
- [31] 朱栾, Bellerby R. 夏季黄海海水碳酸盐体系特征[J]. 海洋科学, 2017, 41(12): 66–74.
Zhu Luan, Bellerby R. Summer characteristics of carbonate system in the Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(12): 66–74.
- [32] 韦钦胜, 王保栋. 南黄海冷水团海域及西部近岸区表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征及其生态学指示意义[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1697–1707.
Wei Qinsheng, Wang Baodong. Distributions of carbon, nitrogen and phosphorus in the surface sediments and their ecological implications in the areas of cold water mass and off the western coast of the southern Yellow Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(7): 1697–1707.
- [33] 赵军杰, 张婧, 杨桂朋. 秋季东、黄海有色溶解有机物(CDOM)的光学特性研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(6): 818–823.
Zhao Junjie, Zhang Jing, Yang Guipeng. Optical properties of the colored dissolved organic matter in the Yellow Sea and the East China Sea in autumn[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(6): 818–823.
- [34] 周倩倩. 黄渤海夏秋季有色溶解有机物(CDOM)的分布特征及季节变化的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Zhou Qianqian. The study on distribution and seasonal changes of chromophoric dissolved organic matter in summer and autumn in the Bohai Sea and the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [35] 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 等. 渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1198–1208.
Liu Zhaobing, Liang Wenjian, Qin Liping, et al. Distribution and seasonal variations of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Bohai Sea and the north Yellow Sea[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(3): 1198–1208.
- [36] 朱青青, 张婧, 杨桂朋. 冬季黄渤海有色溶解有机物的光学特性研究[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(8): 77–88.
Zhu Qingqing, Zhang Jing, Yang Guipeng. Optical properties of the chromophoric dissolved organic matter in the Bohai Sea and the Yellow Sea in winter[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2018, 48(8): 77–88.
- [37] Chen C T A. Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 78(3): 394–410.
- [38] 赫崇本, 汪圆祥, 雷宗友, 等. 黄海冷水团的形成及其性质的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1959, 2(1): 11–15.
He Chongben, Wang Yuanxiang, Lei Zongyou, et al. A preliminary study of the formation of Yellow Sea Cold Mass and its properties[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1959, 2(1): 11–15.
- [39] Kondo M. Oceanographic investigations of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea. I. Characteristics of the mean temperature and salinity distributions measured at 50 m and near the bottom[J]. *Bulletin of the Seikai Regional Fisheries Research Laboratory*, 1985, 62: 19–66.
- [40] 翁学传, 张以恩, 王从敏, 等. 黄海冷水团的变化特征[J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(4): 368–379.
Weng Xuechuan, Zhang Yiken, Wang Congmin, et al. The variational characteristics of the Huanghai Sea (Yellow Sea) Cold Water Mass[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 368–379.
- [41] Riley J P, Skirrow G. *Chemical Oceanography*[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1975, 1: 417.
- [42] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains[J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, 26(1): 43–53.
- [43] Hu Chuanmin, Muller-Karger F E, Zepp R G. Absorbance, absorption coefficient, and apparent quantum yield: a comment on common ambiguity in the use of these optical concepts[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, 47(4): 1261–1267.
- [44] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C7): 3211.
- [45] 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[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 64(4): 399–408.
- [46] Wang Hongjie, Dai Minhan, Liu Jinwen, et al. Eutrophication-driven hypoxia in the East China Sea off the Changjiang Estuary[J]. *Envir-*

- onmental Science & Technology, 2016, 50(5): 2255–2263.
- [47] Zhang Haiyan, Zhao Liang, Sun Yao, et al. Contribution of sediment oxygen demand to hypoxia development off the Changjiang Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 192: 149–157.
- [48] 王毅梦, 吴冠伟, 杨桂朋, 等. 夏季黄、渤海溶解碳水化合物浓度的分布[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(2): 227–234.
Wang Yimeng, Wu Guanwei, Yang Guipeng, et al. Distributions of dissolved carbohydrates in the Bohai Sea and the Yellow Sea during summer[J]. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(2): 227–234.
- [49] 高爽, 李正炎. 北黄海夏、冬季叶绿素和初级生产力的空间分布和季节变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(4): 604–610.
Gao Shuang, Li Zhengyan. Spatial and seasonal variation of chlorophyll and primary productivity in summer and winter in the northern Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 604–610.
- [50] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 109–118.
Zheng Guoxia, Song Jinming, Dai Jicui, et al. Distributions of chlorophyll- a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(3): 109–118.
- [51] 蔡惠文, 卓丽飞, 吴常文. 海水养殖污染负荷评估研究[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2014, 33(6): 558–567.
Cai Huiwen, Zhuo Lifei, Wu Changwen. Review of waste loadings generation from marine aquaculture[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2014, 33(6): 558–567.
- [52] 唐启升, 韩冬, 毛玉泽, 等. 中国水产养殖种类组成、不投饵率和营养级[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 729–758.
Tang Qisheng, Han Dong, Mao Yuze, et al. Species composition, non-fed rate and trophic level of Chinese aquaculture[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(4): 729–758.
- [53] del Vecchio R, Blough N V. Photobleaching of chromophoric dissolved organic matter in natural waters: kinetics and modeling[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 78(4): 231–253.
- [54] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an investigation into the role of phytoplankton[J]. *Marine Chemistry*, 2002, 77(1): 7–21.
- [55] Nelson N B, Carlson C A, Steinberg D K. Production of chromophoric dissolved organic matter by Sargasso Sea microbes[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(1/4): 273–287.
- [56] Yamashita Y, Tanoue E. Production of bio-refractory fluorescent dissolved organic matter in the ocean interior[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(9): 579–582.
- [57] Jørgensen L, Stedmon C A, Kragh T, et al. Global trends in the fluorescence characteristics and distribution of marine dissolved organic matter[J]. *Marine Chemistry*, 2011, 126(1/4): 139–148.
- [58] Nelson N B, Siegel D A. The global distribution and dynamics of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 447–476.
- [59] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, 337(2): 133–149.
- [60] Lou Tao, Xie Huixiang. Photochemical alteration of the molecular weight of dissolved organic matter[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(11): 2333–2342.
- [61] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, et al. Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(20): 4702–4708.
- [62] Bertilsson S, Tranvik L J. Photochemical transformation of dissolved organic matter in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(4): 753–762.
- [63] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 955–969.
- [64] Su Jianzhong, Dai Minhan, He Biyan, et al. Tracing the origin of the oxygen-consuming organic matter in the hypoxic zone in a large eutrophic estuary: the lower reach of the Pearl River Estuary, China[J]. *Biogeosciences*, 2017, 14(18): 4085–4099.
- [65] Diaz R J. Overview of hypoxia around the world[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 275–281.
- [66] Rabouille C, Conley D J, Dai M H, et al. Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: the Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhône rivers[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1527–1537.
- [67] Kemp W M, Testa J M, Conley D J, et al. Temporal responses of coastal hypoxia to nutrient loading and physical controls[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(12): 2985–3008.
- [68] 李繁华, 刘爱菊, 赵松鹤, 等. 山东近海水文状况[M]. 济南: 山东省地图出版社, 1989.
Li Fanhua, Liu Aiju, Zhao Songhe, et al. Shandong Coastal Waters[M]. Ji'nan: Shandong Province Map Press, 1989.
- [69] Lee Y C, Qin Y S, Liu R Y. Yellow Sea Atlas[M]. Seoul: Ho Yong Publishing Co., 1998.
- [70] 郭炳火, 黄振宗, 李培英, 等. 中国近海及邻近海域海洋环境[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
Guo Binghuo, Huang Zhengzong, Li Peiying, et al. Marine Environment of China Seas and its Adjacent Sea Area[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [71] Lønborg C, Álvarez-Salgado X A, Davidson K, et al. Assessing the microbial bioavailability and degradation rate constants of dissolved organic matter by fluorescence spectroscopy in the coastal upwelling system of the Ría de Vigo[J]. *Marine Chemistry*, 2010, 119(1/4): 121–129.

Distribution of dissolved organic matter in different water masses in the Yellow Sea in summer

Wang Yichao¹, Liu Xiaoyan¹, Song Guisheng², Xie Huixiang^{1,3}

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Institute of Marine Sciences of Rimouski, University of Quebec at Rimouski, Quebec G5L 3A1, Canada)

Abstract: Based on the investigation of dissolved organic matter (DOM) in the Yellow Sea from August to September 2017, the spatial distributions of dissolved organic carbon (DOC) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM) were studied in the Yellow Sea. In surface seawater, CDOM was higher in the nearshore water, which might be caused by the relatively significant influence by the river input, while colorless DOC concentration in the north Yellow Sea Cold Water (YSCW) area was enhanced by aquaculture. The DOC concentration decreased along depth in the water column, but an inverse trend for CDOM, especially in the YSCW area. Terrestrial DOC input and primary production were mainly responsible for the surface DOC enhancement, while photobleaching induced the decrease of CDOM. Additionally, photobleaching also decreased the molecular weight and aromaticity of CDOM in surface water. In the YSCW, O₂ was slightly unsaturated, with the saturation degree of 80%–93%. In this area, strong stratification prevented the vertical diffusion of O₂ to bottom water. Additionally, stratification could also restrain the vertical mixing of DOC and CDOM, which was mainly responsible for the large difference of DOC and CDOM between surface and bottom waters.

Key words: Yellow Sea Cold Water; low oxygen; dissolved organic carbon; chromophoric dissolved organic matter