

# 浙江近岸海域溶解氧的时空分布特征

刘瑞娟, 陈思杨, 余骏, 刘希真, 赵聪蛟, 张晓辉

(浙江省海洋监测预报中心 杭州 310007)

**摘要:**溶解氧是海洋生态系统中重要的生源要素,其含量及分布变化直接或间接影响海洋生命活动。文章以2014—2018年浙江近岸海域海水监测数据为基础,系统分析溶解氧及其饱和度的时空变化特征,并对该海域内低氧现象作了初步探讨。结果表明,浙江近岸海域溶解氧及其饱和度时空变化特征明显。空间跨度分析显示,溶解氧及其饱和度平面分布为不同季节呈现不同的分布特征,垂直分布为表层高于底层,表底层差异在春夏季较大、秋冬季较小,主要与表层光合作用和季节性温盐跃层有关。时间跨度分析显示,表层溶解氧含量最高出现在冬季,最低出现在夏季,主要是受水温和表层光合作用的影响;夏季表层溶解氧含量最高出现在2018年,最低出现在2015年,这可能主要是受海表温度的影响。此外,研究发现近岸海域外侧少量区域出现低氧现象,其潜在风险正在进一步跟踪监测中。

**关键词:**浙江近岸海域;溶解氧;时空分布;低氧

中图分类号:P734.2;P76

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2023)04-0013-08

## Spatial and Temporal Distribution of Dissolved Oxygen in Zhejiang Coastal Area

LIU Ruijuan, CHEN Siyang, YU Jun, LIU Xizhen, ZHAO Congjiao, ZHANG Xiaohui

(Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Dissolved oxygen is an important biogenic element in marine ecosystem, and the variation of its content and distribution could affect marine life activities directly or indirectly. In this paper, the spatial and temporal variation characteristics were systematically analyzed and the occurrence of hypoxia was preliminarily discussed based on the seawater field monitoring data in Zhejiang coastal area from 2014 to 2018. The results showed that the spatial and temporal variation characteristics of dissolved oxygen and its saturation were obvious in Zhejiang coastal area. The spatial span analysis showed that the horizontal distribution of dissolved oxygen and its saturation presented different characteristics in different seasons, and the vertical distribution showed that dissolved oxygen and its saturation in the surface layer was higher than that in the

收稿日期:2022-08-24;修订日期:2023-02-10

基金项目:自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室开放研究基金项目(MED202003);浙江省自然资源厅2021年度科技项目(2021-74);浙江省自然资源厅2022年度科技项目(2022-86、2022-88)。

作者简介:刘瑞娟,工程师,博士,研究方向为海洋生态预警监测

通信作者:陈思杨,高级工程师,博士,研究方向为海洋生态预警监测

bottom layer, and the difference between the surface layer and the bottom layer was larger in spring and summer, but smaller in autumn and winter, which was related to surface photosynthesis and seasonal thermohalocline. The time span analysis showed that the highest dissolved oxygen content in surface layer appeared in winter and the lowest in summer, which were affected by water temperature and surface photosynthesis, and the highest dissolved oxygen in surface layer in summer appeared in 2018 and the lowest in 2015, which was mainly caused by sea surface temperature. In addition, hypoxia was also found in some areas outside the coastal area, and its potential risks are being further tracked and monitored.

**Keywords:** Zhejiang coastal area, Dissolved oxygen, Spatial and temporal distribution, Hypoxia

## 0 引言

溶解氧是海洋生态系统中的重要生源要素参数,是海洋生命活动必不可少的物质<sup>[1]</sup>,对海洋生态系统的稳定具有至关重要的作用。海水中溶解氧的变化是各种物理、化学和生物共同作用的结果<sup>[2]</sup>,其饱和度的变化可以表征水体生态环境的变化。在近岸海域,溶解氧及其饱和度的变化受到多种因素的共同影响,包括入海径流、外海洋流、浮游生物光合呼吸作用、有机质的降解等,但在某个区域的主要控制因素可能略有差异,因此分析特定海域溶解氧及其饱和度的影响因素,对于掌握该区域海洋生态环境的变化与生态系统的稳定性具有重要意义。

低氧现象是目前全球海洋领域关注的焦点问题,现在被认为是海洋生态灾害现象,其可以导致海洋生物生境消失、生物死亡、物种组成和群落结构改变、生物多样性降低以及生物竞争加剧等<sup>[3]</sup>,严重威胁海洋生态系统安全。通常水体中溶解氧含量低于 3 mg/L 时称为低氧,低于 2 mg/L 时称为缺氧,这种现象目前多出现在近岸河口区域。国外如墨西哥湾等存在很严重的缺氧现象。国内目前研究较多的是长江口和珠江口外侧海域存在季节性底层低氧现象<sup>[3-4]</sup>。其中,长江口附近低氧主要是由长江入海径流形成温盐跃层阻碍上下层水体交换和底层有机质降解耗氧所导致的<sup>[5-6]</sup>。

浙江是海洋大省,海域面积辽阔,受长江入海径流影响较大,对于浙江近岸海域溶解氧的调查研究可以追溯到 20 世纪 80 年代。樊安德<sup>[7]</sup>对浙江近岸水深浅于 20 m 区域的四季溶解氧分布状况进行报道;王玉衡等<sup>[8]</sup>研究浙南区域春季溶解氧分布状

况,并探讨与其他要素的相互关系;杨庆霄等<sup>[9]</sup>和胡小猛等<sup>[10]</sup>在对黄东海溶解氧的时空分布特征研究中涉及部分浙江海域;卢勇等<sup>[11]</sup>对长江口及邻近海域表层水体溶解氧饱和度的季节变化研究中涉及浙北部分海域;柴小平等<sup>[12]</sup>分析浙江近岸海域春季溶解氧饱和度分布状况及影响因素。而针对浙江近岸全部管辖海域多年多季节的海水溶解氧及其饱和度的变化研究还未见报道。已有研究表明,浙江近岸海域底层也存在低氧区<sup>[13,5]</sup>,并存在明显的季节变化,春末夏初形成,8 月最为严重,秋季减弱,冬季消失<sup>[14-15]</sup>,但对于低氧的多年连续监测报道还较缺乏。本研究基于 2014—2018 年多年多季节的浙江近岸海域溶解氧和相关参数的监测数据,分析浙江近岸海域溶解氧的时空分布特征及其影响因素,并结合资料分析研究区域低氧的年际发生情况及可能原因,对于深入了解浙江近岸海域溶解氧的变化及其对生态系统的影响具有重要意义,同时为预警海洋生态系统的变化提供数据资料支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域为浙江近岸海域,北界从浙沪交界的金丝娘桥起向海延伸至领海外部界线,南界从浙闽交界的虎头鼻经七星岛(星仔岛)南端至 27°N 往东延伸至领海外部界线,面积约 4.4 万 km<sup>2</sup><sup>[16]</sup>。分析数据来源于浙江近岸海域海洋生态环境监测任务,2014—2018 年分别有 299 个、312 个、315 个、344 个和 344 个水质监测站位。选用 2018 年 3 月(冬季)、5 月(春季)、8 月(夏季)和 10 月(秋季)的表底层监测数据进行季节变化和空间变化的分析,选用

2014—2018年8月(夏季)表层监测数据进行年际变化的分析,选用2014—2018年8月(夏季)底层监测数据初步探讨低氧现象出现的情况。

研究区域主要受到浙闽沿岸流和台湾暖流的影响。浙闽沿岸流主要分布在长江口以南的浙闽沿岸区域,由长江和钱塘江的入海径流与海水混合而成,具有低温、低盐、高营养盐的特征。春秋冬季,浙闽沿岸流受东北季风的影响向西南方向流动,影响研究海域,其中冬季影响程度和范围最广,可至50 m等深线的近海一侧,表层最多可达60 m等深线;夏季浙闽沿岸流受东南季风的影响而转为东北流向,只影响浙北海域<sup>[17-18]</sup>。台湾暖流是黑潮的分支,来源于北赤道暖流,自西南流向东北,冬季影响范围有限,位于50 m等深线的外海一侧,在底层最多可达30 m等深线;夏季较强劲,进一步向陆延伸,对浙江近岸海域的影响较大<sup>[17-19]</sup>。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 实验方法

海水样品的采集和分析均严格按照海洋监测规范<sup>[20]</sup>和海洋调查规范<sup>[21]</sup>的相关要求进行。现场使用采水器采集水样,溶解氧水样采集后立即加入氯化锰和碱性碘化钾进行现场固定,待样品瓶内沉淀完全后加酸溶解,再用硫代硫酸钠滴定,根据滴定用量换算溶解氧的含量。温度、盐度和pH值根据现场携带的温度计、盐度计和pH计测定获取。活性磷酸盐、活性硅酸盐、硝酸盐、亚硝酸盐和氨盐等营养盐的水样通过0.45 μm醋酸纤维滤膜过滤后带回实验室,通过分光光度法测定。所有样品的分析测定过程均通过质量控制,符合质量控制要求。

### 1.2.2 计算方法

溶解氧饱和度的计算参考海洋调查规范<sup>[21]</sup>,其计算公式为:

$$r(O) = \frac{\rho(O)}{\rho(O')} \times 100\%$$

式中: $\rho(O)$ 为测得水样的氧浓度; $\rho(O')$ 为在现场水温、盐度下,氧在海水中的饱和浓度。

氧在不同水温、盐度海水中的饱和浓度为:

$$\ln c(O') = A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + A_4(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T/100)^2] + 0.4912$$

式中: $c(O')$ 为在现场水温、盐度下,氧在海水中的饱和浓度; $T$ 为现场的海水热力学温度; $S$ 为现场的海水盐度; $A$ 、 $B$ 为常数,其量值分别为 $A_1 = -173.4292$ 、 $A_2 = 249.6339$ 、 $A_3 = 143.3483$ 、 $A_4 = -21.8492$ 、 $B_1 = -0.033096$ 、 $B_2 = 0.014259$ 、 $B_3 = -0.001700$ 。

其中,单位换算为: $\rho(O) = c(O') \times 16/1000$

### 1.2.3 数据统计分析

本研究利用Excel进行数据统计分析,利用ArcGIS进行反距离插值拟合绘制平面分布图,利用R语言进行多要素相关性分析绘图,利用Origin绘制相关图件。

## 2 结果与讨论

### 2.1 空间分布

#### 2.1.1 水平分布

根据浙江近岸海域表层海水溶解氧含量及饱和度的四季平面分布,各季节呈现不同的分布特征。

冬季,溶解氧含量在浙北和浙南海域存在明显的分界,浙南海域略高,基本在9 mg/L以上,浙北海域略低,基本在8~9 mg/L范围内,小部分外侧海域处于7~8 mg/L区间内。饱和度分布与溶解氧类似,也存在明显的区域差异,浙南海域基本处于100%~110%的饱和状态,而浙北海域均处于未饱和状态,大部分处于80%~90%范围内,杭州湾部分海域甚至低于80%。冬季生物活动较弱,溶解氧含量及饱和度主要受到温度、盐度等物理过程的控制,此时由东北流向西南的浙闽沿岸流影响最为显著,其携带的低温低盐海水控制浙江近岸海域,使浙北海域水温低于浙南海域。另外,杭州湾及附近海域是强潮汐河口区域,强烈的混合作用使溶解氧难以达到平衡状态<sup>[22]</sup>,从而浙南海域溶解氧含量和饱和度高于浙北海域。

春季,杭州湾和舟山以外海域以及温台外侧海域溶解氧含量较高,基本在8 mg/L以上;浙江中部部分近岸海域溶解氧含量较低,整体呈现外侧海域高于近岸的趋势。饱和度分布与溶解氧含量类似,总体上外侧海域高于近岸,大多处于90%~110%范围内,整体呈现近饱和状态,部分外侧海域饱和度高于110%。总体上,外侧海域溶解氧含量和饱

和度高于近岸,这可能与外侧海域浮游植物先开始生长繁殖进行光合作用产生氧气有关。进入春季,浙闽沿岸流逐步退缩,台湾暖流逐渐增强并向北向岸扩展,外侧海域受其影响水温和透明度均较高,海水环境逐渐适宜藻类的生长繁殖,光合作用逐渐增强,产生氧气提高溶解氧含量和饱和度。

夏季,水温最高,受水温影响的溶解氧含量下降,大多海域处于7~8 mg/L范围内,只有小部分海域处于8 mg/L以上,沿岸海湾河口区域如象山港、三门湾和乐清湾处于6~7 mg/L的区间内。除浙北个别站位外,全省大部分海域处于过饱和状态,其中浙南海域饱和度基本高于110%,部分海域甚至高于130%,明显高于浙北海域。夏季溶解氧含量降低,是因为此时季节升温 and 强劲台湾暖流的影响使水温升高;而饱和度明显升高,是因为夏季浮游植物光合作用最强,持续不断产生氧气。浙南海域水温和透明度高于浙北海域,浮游植物生长更为旺盛,因而浙南海域饱和度普遍高于浙北海域。

秋季,溶解氧含量整体呈现为7~8 mg/L的状态,杭州湾区域整体偏高,处于8~9 mg/L的范围内。此外,部分象山港和三门湾等沿岸海湾河口区域的溶解氧含量也较高,只有舟山外侧个别站位处于6~7 mg/L的范围内,研究海域表层溶解氧分布较均匀。绝大部分海域溶解氧饱和度处于100%~110%范围内,总体呈现饱和状态,只有小部分海域处于90%~100%的未饱和状态。总体上,溶解氧含量和饱和度分布相对均匀,可能与秋季影响溶解氧含量分布的因素较单纯有关。此时生物活动减弱,对溶解氧含量影响不显著,同时台湾暖流逐步减弱,浙闽沿岸流开始增强,整个海域温差减小,使溶解氧含量分布较均匀。

### 2.1.2 垂直分布

浙江近岸海域海水溶解氧和饱和度的垂直分布特征如图1所示。不论季节变化,溶解氧平均含量和平均饱和度均是表层高于底层。冬、春、夏、秋季表底层平均溶解氧含量差值分别为0.30 mg/L、0.83 mg/L、1.06 mg/L、0.35 mg/L,平均饱和度的差值分别为4%、12%、19%、1%,可见春夏季表底层溶解氧含量和饱和度差异较大,秋冬季差异相对

较小。春季至夏季表层海水中浮游植物光合作用强烈并产生大量氧气,同时上层海水温度较高,形成温盐跃层,限制水体的垂直交换,影响表层溶解氧向底层传输;此外,上层产生的有机质不断沉降到底层进行降解耗氧,使得表底层溶解氧和饱和度差值变大。秋冬季水体层化减弱,垂直混合作用增强,表层溶解氧可以被携带至底层,使表底层溶解氧和饱和度趋于均衡。

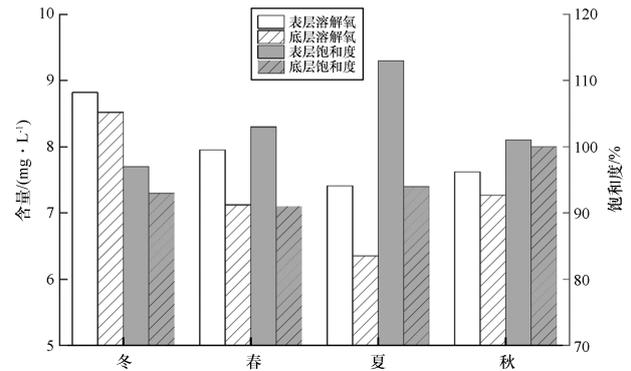


图1 浙江近岸海域表底层溶解氧平均含量和平均饱和度  
Fig.1 Average of dissolved oxygen content and saturation in surface and bottom waters of Zhejiang coastal area

## 2.2 时间分布

### 2.2.1 季节变化

浙江近岸海域表层溶解氧含量、饱和度、温度和盐度的季节变化如图2所示。

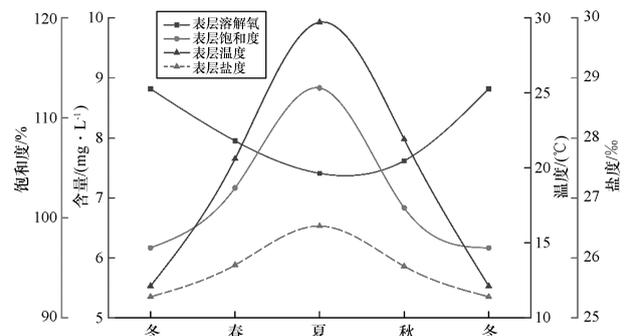


图2 浙江近岸海域表层溶解氧含量、饱和度、温度和盐度的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of surface dissolved oxygen, saturation, temperature and salinity in Zhejiang coastal area

表层溶解氧含量在冬季最高,春秋季次之,夏季最低,与温度、盐度呈现相反的变化规律,饱和度

却与之相反。冬季,生物活动较弱,溶解氧主要受温度、盐度等物理因素的控制,此时受低温低盐的浙闽沿岸流影响,近岸海域温度和盐度均较低,氧气在海水中的溶解度较大,同时由于风力较大,海气交换作用强烈,大气中的氧气可以更多地被寒冷的海水所吸收,溶解氧含量达到全年最高值,表层平均值为 8.82 mg/L,同时由于温盐较低,理论饱和溶解氧含量较高,饱和度较低,平均约为 97%,处于未饱和状态;春季,受温度和生物活动的共同影响,虽然浮游植物开始繁殖进行光合作用产生氧气,但海水温度逐渐上升,氧气溶解度降低,因此相较于冬季,溶解氧含量有所降低,表层平均值为 7.95 mg/L,但饱和度明显升高,表层平均约为 103%,整体处于饱和状态;夏季,海水温度明显升高,浮游植物光合作用达一年中最强,产生大量氧气,但过高的海水温度使氧气溶解度进一步降低,导致过多的氧气自海水中逸出,表层溶解氧含量进一步降低,平均约为 7.41 mg/L,但处于过饱和状态,平均约为 113%;秋季,海水温度逐渐降低,氧气溶解度增大,溶解氧含量进一步升高,表层平均值为 7.62 mg/L,浮游植物产氧减少,饱和度逐步降低,平均约为 101%,处于饱和状态。

2.2.2 年际变化

夏季是浙江近岸海域表层海水溶解氧含量最低但饱和度最高的季节,2014—2018 年浙江近岸海域夏季表层溶解氧含量及其饱和度的变化如图 3 所示。

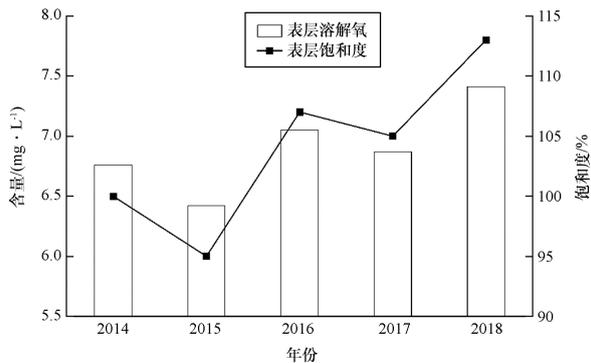


图 3 浙江近岸海域夏季表层溶解氧含量及饱和度的年际变化

Fig.3 Interannual variations of surface dissolved oxygen and saturation in Zhejiang coastal area in summer

表层溶解氧含量的变化范围为 6.42 ~ 7.41 mg/L,饱和度的变化范围为 95%~113%,二者的年际变化趋势一致。2015 年溶解氧含量最低,饱和度最低(95%),处于未饱和状态;2018 年溶解氧含量最高,饱和度最高(113%),处于过饱和状态。

为探讨影响表层溶解氧含量和饱和度年际变化的主要因素,将 5 年浙江近岸海域夏季表层溶解氧含量、饱和度与温度、盐度和各类营养盐进行相关性分析,结果如图 4 所示(DO:溶解氧;DO%:溶解氧饱和度;T:温度;S:盐度;PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>:磷酸盐;SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>:硅酸盐;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>:亚硝酸盐;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:硝酸盐;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>:氨氮;IN:无机氮)。

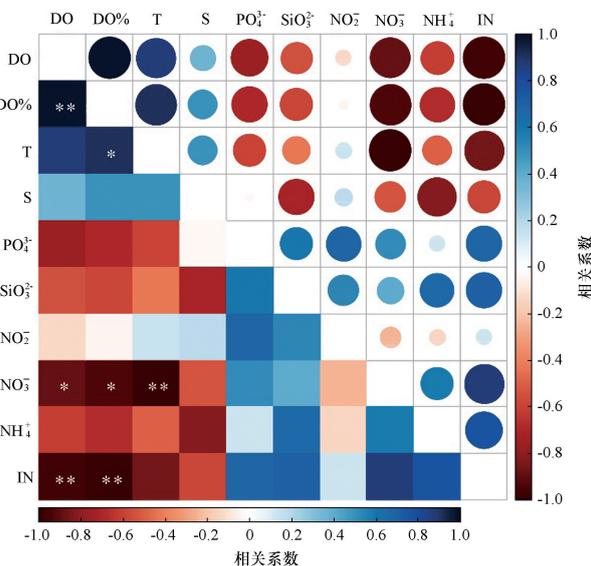


图 4 浙江近岸海域夏季表层溶解氧含量、饱和度、温度、盐度及各类营养盐的相关性

Fig.4 Correlations of surface dissolved oxygen, saturation, temperature, salinity and nutrients in Zhejiang coastal area in summer

溶解氧含量和饱和度呈显著正相关,且二者与温度呈正相关,与硝酸盐和无机氮呈显著负相关。同时,温度与硝酸盐也呈显著负相关,说明表层溶解氧含量及饱和度的年际变化主要与温度和硝酸盐等无机氮有关,温度高时溶解氧含量和饱和度均高,此时硝酸盐等无机氮含量却低。2015 年和 2018 年夏季表层海水温度平均分别约为 28.1℃和 29.7℃,硝酸盐含量平均约为 0.643 mg/L 和 0.566 mg/L。2018 年较 2015 年海水温度高,刺激

浮游植物的光合作用,产生更多的氧气,使溶解氧含量及饱和度升高,同时浮游植物强烈的光合作用消耗更多的硝酸盐等无机氮,使无机氮含量降低。因此,表层海温是影响5年来表层溶解氧含量及饱和度年际变化的主要因素。

### 2.3 低氧现象

夏季和底层是溶解氧含量最低的季节和层次。根据2014—2018年夏季底层溶解氧含量分布,浙江近岸海域底层溶解氧含量的低值区出现在舟山外侧海域,浙南外侧海域偶有分布。仔细观察夏季底层溶解氧含量数据,发现2014年舟山外侧海域有4个站位处于2~3 mg/L范围内,2018年浙南外侧海域有2个站位处于2~3 mg/L范围内,出现低氧现象,其他年份和站位均大于3 mg/L,未表现出低氧乃至缺氧现象。可见,浙江近岸外侧海域底层目前出现低氧现象的站位不多,但仍存在出现低氧现象的潜在风险。

近岸海域底层低氧是多种物理与生物地球化学过程共同作用的结果。据以往研究<sup>[23]</sup>,浙江近海低氧较长江口外海域出现时间更早、持续时间更长。春季底层有机质氧化分解耗氧,而后旺发的浮游植物碎屑分解进一步加剧低氧;夏季水体出现层化,阻碍氧气垂直交换,低氧程度最为严重;至秋季逐渐消失。同时,外海低氧水体即台湾暖流底层水在浙江近海的上升提供较低的背景值也是重要因素之一。在全球气候变暖的背景下,随着大气和海水温度的升高,径流量的改变、热带风暴等极端气候事件、生物代谢作用的改变等是否会进一步加剧低氧现象仍不得而知<sup>[24]</sup>,因此浙江近岸海域底层低氧现象值得进一步关注和研究,目前浙江也正在进一步的跟踪监测。

## 3 结论

本研究基于2014—2018年浙江近岸海域海水溶解氧及相关理化因子的监测数据,研究浙江近岸海域溶解氧含量及饱和度的时空分布及影响因素,并结合资料分析低氧现象,得出3项主要结论。

(1)表层溶解氧含量和饱和度在不同季节呈现不同的平面分布特征。四季溶解氧含量和饱和度均是表层高于底层,表底层的差异在春夏季表现较

大,秋冬季较小,主要是受季节性温盐跃层和表层光合作用产氧的影响。

(2)表层溶解氧含量和饱和度存在明显的季节变化,冬季表层溶解氧含量最高,夏季表层饱和度最高,这主要是受水温和浮游植物光合作用的影响。表层溶解氧含量和饱和度也表现出年际差异,温度是影响这种年际变化的主要因素。

(3)2014年和2018年夏季外侧小部分海域底层出现低氧现象,主要是受底层有机物降解耗氧、水体层化阻碍氧垂直交换和低氧台湾暖流提供较低背景值影响,未来研究海域低氧现象的潜在风险值得进一步关注。

### 参考文献(References):

- [1] 李潇,王晓莉,刘书明,等.天津近岸海域溶解氧含量分布特征及影响因素研究[J].海洋开发与管理,2017,34(8):75-78.  
LI Xiao, WANG Xiaoli, LIU Shuming, et al. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in Tianjin offshore seawater[J]. Ocean Development and Management, 2017, 34(8):75-78.
- [2] 石晓勇,陆茸,张传松,等.长江口邻近海域溶解氧分布特征及主要影响因素[J].中国海洋大学学报,2006,36(2):287-290.  
SHI Xiaoyong, LU Rong, ZHANG Chuansong, et al. Distribution and main influence factors process of dissolved oxygen in the adjacent area of Changjiang estuary in Autumn[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2):287-290.
- [3] 叶丰,黄小平.近岸海域缺氧现状、成因及其生态效应[J].海洋湖沼通报,2010(3):91-99.  
YE Feng, HUANG Xiaoping. The status, causes and ecological effects of coastal hypoxia[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2010(3):91-99.
- [4] 林洪瑛,刘胜,韩舞鹰.珠江口底层海水季节性缺氧现象及其引发CTB的潜在威胁[J].湛江海洋大学学报,2001,21(S1):25-29.  
LIN Hongying, LIU Sheng, HAN Wuying. Potential trigger CTB, from seasonal bottom water hypoxia in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21(S1):25-29.
- [5] 李宏亮,陈建芳,卢勇,等.长江口水体溶解氧的季节变化及底层低氧成因分析[J].海洋学研究,2011,29(3):78-87.  
LI Hongliang, CHEN Jianfang, LU Yong, et al. Seasonal variation of DO and formation mechanism of bottom water hypoxia of Changjiang River Estuary[J]. Journal of Marine Sciences,

- 2011,29(3):78-87.
- [6] ZHU Jianrong,ZHU Zhuoyi,LIN Jun,et al.Distribution of hypoxia and pycnocline off the Changjiang Estuary, China[J]. Journal of Marine Systems,2016,154:28-40.
- [7] 樊安德.浙江沿岸海水中溶解氧的分布变化规律[J].浙江水产学院学报,1986,5(1):61-68.
- FAN Ande.Distribution and variation of dissolved oxygen in the coastal water along Zhejiang shore[J].Journal of Zhejiang College of Fisheries,1986,5(1):61-68.
- [8] 王玉衡,蒋国昌,董恒霖.春季浙江南部海区溶解氧、pH值和营养盐分布特征及相互关系研究[J].海洋学报,1990,12(5):654-660.
- WANG Yuheng,JIANG Guochang,DONG Henglin.Distribution characteristics of dissolved oxygen,pH and nutrients and their relationship in the southern Zhejiang sea in spring[J].Acta Oceanologica Sinica,1990,12(5):654-660.
- [9] 杨庆霄,董娅婕,蒋岳文,等.黄海和东海海域溶解氧的分布特征[J].海洋环境科学,2001,20(3):9-13.
- YANG Qingxiao,DONG Yajie,JIANG Yuewen,et al.Distribution feature and dissolved oxygen in Yellow Sea and East China Sea[J].Marine Environmental Science,2001,20(3):9-13.
- [10] 胡小猛,陈美君.黄东海表层海水溶解氧时空变化规律研究[J].地理与地理信息科学,2004,20(6):40-43.
- HU Xiaomeng,CHEN Meijun.Study on the spatial and temporal changes of dissolved oxygen in the surface water of the Yellow Sea and the East China Sea[J].Geography and Geo-Information Science,2004,20(6):40-43.
- [11] 卢勇,李宏亮,陈建芳,等.长江口及邻近海域表层水体溶解氧饱和度的季节变化和特征[J].海洋学研究,2011,29(3):71-77.
- LU Yong,LI Hongliang,CHEN Jianfang,et al.Seasonal variations of the surface dissolved oxygen saturation in Changjiang River Estuary[J].Journal of Marine Sciences,2011,29(3):71-77.
- [12] 柴小平,魏娜,母清林,等.浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素[J].中国环境监测,2015,31(5):140-144.
- CHAI Xiaoping,WEI Na,MU Qinglin,et al.Distribution and main influencing factors of the surface dissolved saturation of Zhejiang offshore in spring[J].Environmental Monitoring in China,2015,31(5):140-144.
- [13] ZHU Zhuoyi,ZHANG Jing,WU Ying,et al.Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: oxygen depletion and organic matter decomposition[J].Marine Chemistry,2011,125(1-4):108-116.
- [14] WANG Baodong,WEI Qinsheng,CHEN Jianfang,et al. Annual cycle of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J].Marine Environmental Research,2012,77:1-5.
- [15] 池连宝.长江口及邻近海域低氧区的时空变化特征与关键过程研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2019.
- CHI Lianbao.The spatial-temporal distributions and key processes of hypoxia off the Changjiang estuary and its adjacent water[D].Qingdao:Institute of Oceanology,Chinese Academy of Sciences,2019.
- [16] 陈思杨,宋琍琍,刘瑞娟,等.基于 Mann-Kendall 检验的浙江省近岸海域海洋环境变化趋势和对策研究[J].海洋开发与与管理,2018,35(2):54-58.
- CHEN Siyang,SONG Lili,LIU Ruijuan,et al.Trend analysis and countermeasure research on coastal marine environment variation of Zhejiang based on Mann-Kendall Test[J].Ocean Development and Management,2018,35(2):54-58.
- [17] 李鹏,王思荐,李延刚,等.浙江近海夏季流场特征分析[J].海洋学研究,2014,32(3):16-25.
- LI Peng,WANG Sijian,LI Yan'gang,et al.Current conditions in summer in the Zhejiang offshore[J].Journal of Marine Sciences,2014,32(3):16-25.
- [18] 王翠,郭晓峰,方婧,等.闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响[J].应用海洋学学报,2018,37(1):1-8.
- WANG Cui,GUO Xiaofeng,FANG Jing,et al.Characteristics of seasonal spatial expansion of Fujian and Zhejiang coastal current and their bay effects[J].Journal of Applied Oceanography,2018,37(1):1-8.
- [19] 曾定勇,倪晓波,黄大吉.冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J].中国科学:地球科学,2012,42(7):1123-1134.
- ZENG Dingyong,NI Xiaobo,HUANG Daji.Temporal and spatial variability of the Zhe-Min Coastal Current and the Taiwan Warm Current in winter in the southern Zhejiang coastal sea[J].Scientia Sinica Terrae,2012,42(7):1123-1134.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.海洋监测规范:海水分析:GB 17378.4-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of China.Specification for marine monitoring: seawater analysis:GB 17378.4-2007[S].Beijing:Standards Press of China,2007.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.海洋调查规范:海水化学要素调查:GB/T 12763.4-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- General Administration of Quality Supervision,Inspection and

- Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Specifications for oceanographic survey: survey of chemical parameters in seawater: GB/T 12763.4-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [22] 王玉衡, 蒋国昌, 董恒霖. 浙江沿海港湾的水化学研究[J]. 海洋学报, 1988, 10(3): 302-307.
- WANG Yuheng, JIANG Guochang, DONG Henglin. Study on hydrochemistry of Zhejiang coastal harbor[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(3): 302-307.
- [23] 周锋, 钱周奕, 刘安琪, 等. 长江口及邻近海域底层水体低氧物
- 理机制的研究进展[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 22-38.
- ZHOU Feng, QIAN Zhouyi, LIU Anqi, et al. Recent progress on the studies of the physical mechanisms of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 22-38.
- [24] 叶丰, 黄小平. 气候变化对近岸海域缺氧的影响机制研究进展[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(1): 148-152.
- YE Feng, HUANG Xiaoping. Study advance on influence mechanism of climate change on coastal hypoxia[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(1): 148-152.