

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220085

渤海中部溶解氧浓度年际变化特征分析

刘 千, 孙 群

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘 要: 溶解氧(dissolved oxygen, DO)是海洋生物生存不可缺少的要素. 随着近岸低氧区对海洋生态系统影响的加剧, 研究渤海 DO 浓度的变化特征和主要影响因素对研究渤海生态环境有着重要意义. 对 1978—2018 年渤海中部断面表层、底层 DO 浓度的观测资料进行分析, 分析结果表明: 渤海中部 DO 浓度存在显著季节变化, 冬季、春季较大, 秋季次之, 夏季最小, 夏季表层、底层 DO 浓度平均值分别为 7.64 mg/L 和 6.83 mg/L. 表层 DO 浓度气候态平均值较底层更高, 但相邻季节间的浓度差小于底层. 在年际变化上, 冬季 DO 浓度表层与底层一致, 没有明显的变化趋势; 夏季 DO 浓度表层与底层不一致, 夏季表层 DO 浓度没有明显的变化趋势, 而底层 DO 浓度显著下降, 平均下降速率为 0.06 mg/(L·a), 断面南北两个洼地 DO 浓度降低程度更显著, 下降速率均达到 0.08 mg/(L·a). 渤海 8 月 DO 浓度表层与底层差异的年际变化为浓度差异增大, 底层 DO 浓度低值范围扩大. 1998 年后底层 DO 浓度更低. 渤海中部表层与底层 DO 浓度的差异主要受表层与底层温差的影响. 多元线性回归分析表明, 渤海中部 DO 浓度夏季年际变化与底层溶解无机氮(DIN)浓度存在一定相关性, 而冬季受温度影响较大.

关键词: 渤海; 溶解氧; 年际变化; 因素分析; 多元线性回归

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2022)05-0015-09

Interannual Variations of Dissolved Oxygen Concentration in the Central Bohai Sea

LIU Qian, SUN Qun

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Dissolved oxygen (DO) is an indispensable element to the survival of marine organisms. With the increasing influence of coastal hypoxic zone on marine ecosystems, it is of great significance to study the changes and main influencing factors of dissolved oxygen concentration in the Bohai Sea for the study of the Bohai Sea's ecological environment. The observation data of DO on the cross-section surface and bottom layer of the central Bohai Sea was investigated from 1978 to 2018, and the study results revealed that the concentration of DO in the central Bohai Sea changed significantly seasonally, with the largest concentration in winter and spring, followed by autumn and the smallest concentration in summer, and the mean values in summer layer and bottom layer were 7.64 mg/L and 6.83 mg/L respectively. The annual mean climatology of concentration of DO in the surface layer was higher than that in bottom layer, but the concentration difference of seasonal variation was less than that in bottom layer. In terms of interannual variation, in winter the concentration at the surface and bottom of concentration of DO was consistent and there was no obvious trend of change; in summer the concentration at the surface and bottom of concentration of DO was inconsistent, the surface concentration of DO had no obvious trend of change, while the concentration of DO in bottom layer decreased significantly, with an average descent rate of about 0.06 mg/(L·a). The decreases rate of concentration of DO was more significant in the two troughs located in the north and south of the section, with the decreasing rate of 0.08 mg/(L·a). In August, the interannual variation of concentration of DO in the Bohai Sea was that the difference between surface and bottom concentration of DO increased, the range of low concentration

收稿日期: 2022-03-28; 修回日期: 2022-06-09

基金项目: 天津市自然科学基金项目(19JCZDJC40600)

作者简介: 刘 千(1994—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生; 通信作者: 孙 群, 副研究员, sunqun@tust.edu.cn

of DO values at the bottom expanded, and the concentration of DO at the bottom was lower after 1998. The difference in concentration of DO concentration between the surface and bottom layers in the central Bohai Sea was mainly affected by temperature difference between surface and bottom. Multiple linear regression analysis showed that concentration of DO was correlated with the concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the bottom layer in summer, while it was greatly affected by temperature in winter.

Key words: Bohai Sea; dissolved oxygen; interannual variation; factor analysis; multiple linear regression

溶解氧(dissolved oxygen, DO)在海洋生态系统中十分重要,海水中绝大多数生命活动都与其密切相关,DO浓度的下降会导致海洋生产力、生物多样性和生物地球化学循环的重大变化^[1-4]。水体中的DO分布受控于复杂的生物地球化学过程^[5]。浮游植物的光合作用释放氧气,提高水体中DO浓度,浮游植物死亡时,有机质降解会消耗水体中的DO^[6]。近几十年来,全球河口和陆架海区的DO低值的程度和范围已经扩大^[3,7]。DO浓度的降低与海洋污染物的大量排放以及营养物质的增加有关^[8-9]。另外,全球温度升高使海水中氧气的溶解度下降,加快了底层的耗氧速率,水体层化现象减弱了表层与底层的海水交换,减少了从大气进入海洋内部氧气的数量^[3,10],使海水中DO浓度降低。渤海是我国重要的半封闭陆架海,黄河口到辽东湾湾顶断面的地形呈南北不对称的“w”形,夏季存在南、北两个中心冷水结构。温度、DO浓度、pH适中的渤海,是温带海洋生物生存的良好环境,许多大小河流为其输入营养盐,维持并促进着生物的繁殖与生长^[11]。随着全球气候变暖和人类开发活动的加剧,渤海的环境演变日益复杂,海域生态研究显得越来越重要^[12]。

许多学者对渤海DO浓度的年际变化与影响机制进行描述和探究。俎婷婷等^[13]指出渤海中部断面1979—1999年冬季、夏季DO浓度呈降低的趋势。李伯志等^[1]指出1978—1999年渤海冬季DO浓度降低程度比夏季更显著。钱思萌^[6]指出1978—1999年渤海3个DO低值区典型站位的夏季DO浓度呈波动下降的趋势。1978—2014年渤海中部断面夏季底层DO浓度的年际变化呈降低趋势^[14],渤海夏季出现缺氧现象,在2011年和2014年夏季出现底层低氧区^[15-16]。影响渤海DO浓度年际变化的因素很复杂,其浓度低值可能与底层有机质在层化环境下累积引起的底层耗氧增加有关^[16-19]。钱思萌^[6]通过计算夏季水体中DO的收支情况,指出平流作用和表层与底层的海水交换会造成DO的水平或垂向扩散,进而引起DO浓度的变化。Zhai等^[20]认为,藻华和海洋养殖产生的生物颗粒的增加,必然会提高渤海次表层生物群

落呼吸速率,这是导致渤海夏季DO浓度急剧下降的可能原因。另外,Wei等^[21]认为渤海浮游植物群落结构的变化也会导致渤海DO浓度呈下降的趋势。石强^[14]推测夏季渤海DO浓度年际变化的主要影响因素是其需氧量,冬季DO浓度年际变化可能受温度和盐度变化的影响。底层低氧还会引发底层酸化环境的形成,与底层矿化分解作用、季节性层化等因素继续影响渤海DO浓度的变化^[16],破坏渤海生态环境并影响海洋生物的栖息。近年来渤海的DO浓度逐渐引起关注,许多学者对渤海DO浓度的长期变化以及影响因素进行了分析与讨论,但在更长时间序列的年际变化以及表层与底层DO浓度差的年际变化上未曾进行过细致描述,同时近年来渤海受人类活动的影响日益增加,富营养化现象逐步加剧,DO可能存在持续降低的趋势,进而引发季节性低氧现象,给渤海生态环境带来负面影响。因此,本文选用时间跨度更长的数据分析渤海DO浓度的变化,揭示1978—2018年渤海DO浓度季节和年际变化规律,并采用一元和多元线性回归分析得到影响DO浓度年际变化的因素,旨在增进对渤海生态系统特征及其影响因素的认识,为渤海沿岸地区的经济活动提供决策依据。

1 数据和方法

1.1 站位水样的数据

观测站位及渤海水深分布如图1所示。

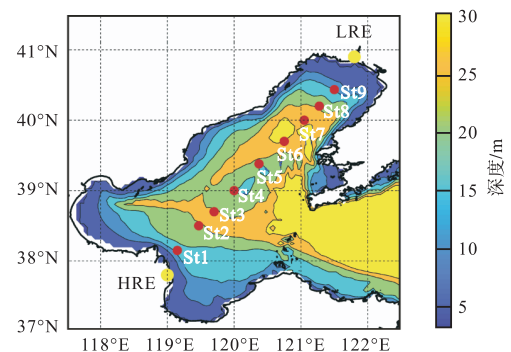


图1 观测站位及渤海水深分布

Fig. 1 Distributions of observation stations and the topography of Bohai Sea

本文使用原国家海洋局 1978—2018 年获得的常规断面观测数据,数据包括温度、DO 浓度、磷酸盐浓度、硅酸盐浓度、硝酸盐浓度、亚硝酸盐浓度、铵盐浓度等.参照 GB 17378.4—2007《海洋监测规范 第 4 部分:海水分析》,DO 浓度的单位使用 mg/L ^[22].硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐的总和称为溶解无机氮(DIN).图 1 中黄点分别表示黄河口(HRE)和辽河口(LRE),红点分别代表站位 St1—St9.研究对象为渤

海中部断面,该断面地理范围为 38.00°N — 40.50°N 、 119.00°E — 121.65°E .观测站位由断面西南(黄河口附近)向东北(辽河口附近)依次分布,依据各站位水深和位置对站位进行划分:St1 和 St8、St9 分别位于黄河和辽河入海口的河口位置,St4、St5 为中部浅滩,St2、St3 和 St5、St6、St7 分别位于断面南部和北部的洼地海区.各站位信息和测量次数见表 1.

表 1 代表站位信息和测量次数

Tab. 1 Information of representative stations and measurement times

站位编号	纬度范围	经度范围	测量最大水深/m	测量次数
St1	38.00°N — 38.30°N	119.00°E — 119.30°E	22	259
St2	38.40°N — 38.60°N	119.35°E — 119.55°E	28	176
St3	38.60°N — 38.75°N	119.60°E — 119.80°E	27	178
St4	38.75°N — 39.10°N	119.90°E — 120.20°E	23	249
St5	39.25°N — 39.40°N	120.20°E — 120.55°E	22	178
St6	39.55°N — 39.85°N	120.60°E — 120.90°E	31	176
St7	39.90°N — 40.10°N	120.90°E — 121.20°E	31	166
St8	40.20°N — 40.35°N	121.20°E — 121.35°E	26	153
St9	40.38°N — 40.50°N	121.38°E — 121.65°E	19	142

实测数据时间跨度大,数据质量存在差异,在分析之前对数据进行质量控制^[1,19],剔除数据中大于 3 倍方差的异常值,表层 DO 浓度数据剩余 1 673 个,底层 DO 浓度数据剩余 1 680 个.

本文利用 St1—St9 站位的年平均数据分析 DO 浓度和海水温度的季节变化特征,分别以 2 月和 8 月代表冬季和夏季,以 3—5 月代表春季,9—11 月代表秋季.用插值法将观测值处理为垂向 1 m 平均的数据,并绘制出断面图.用线性回归方法拟合表层、底层冬季和夏季 DO 浓度年际变化趋势.

1.2 影响因素的数据

使用 2000—2018 年黄海、东海局地校正表层叶绿素 a(Chl a)浓度数据^[23-24],分辨率为 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$.风速、降水量和径流量数据为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA5 全球逐月再分析数据,风速、降水量和径流量的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

1.3 统计方法

年际尺度变化利用线性回归拟合的方法进行分析,采用多元线性回归的方法对影响因素进行分析.多元线性回归是找出最能代表自变量与因变量之间关系的数学表达式^[25-26].设因变量为 y , k 个自变量为 x_1, x_2, \dots, x_k ,多元线性回归的模型一般形式为 $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$, β_0 为回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数.随机误差项 $\varepsilon_i (i=1, 2, \dots, n)$ 服

从数学期望(E)为 0、方差(s^2)为 σ^2 的标准正态分布,即 $E(\varepsilon_i) = 0, s^2(\varepsilon_i) = \sigma^2$,其中 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 相互独立.

建立多元线性回归模型,先要对所需变量进行显著性分析,当解释变量与 DO 浓度的显著性水平小于 0.05 时可信度高;逐步引入解释变量,剔除对 DO 浓度无显著贡献的项,直至决定系数(R^2)最大时,运算结束.本文以 DO 浓度为因变量,以径流量、降水量、风速、Chl a 浓度、溶解无机氮(DIN)浓度、硅酸盐浓度、磷酸盐浓度、表层与底层的温差、底层温度为自变量,利用 MATLAB 软件中的多元线性回归分析,明确了 DO 浓度与各相关因素的关系,找出 DO 浓度年际变化与物理变量、生物化学变量之间的关系.

2 结果与讨论

2.1 DO 浓度季节变化特征

渤海 DO 浓度与水温多年均值的季节变化曲线如图 2 所示. DO 浓度在冬季、春季较大(均值分别为 11.43 mg/L 和 9.70 mg/L),夏季最小,夏季和秋初的表层、底层 DO 浓度有差异,其他季节表层、底层 DO 浓度相近,夏季表层、底层 DO 浓度多年均值分别为 7.64 mg/L 和 6.83 mg/L .表层 DO 浓度多年均值较底层高,8 月表层、底层垂向的浓度差最大,为 1.30 mg/L .季节间 DO 浓度差为底层大于表层,表层从春季到夏季 DO 浓度降低,浓度差为 2.06 mg/L ,底

层从春季到夏季 DO 浓度降低, 浓度差为 3.50 mg/L. 温度的季节变化表现为夏季、秋季高, 冬季、春季低, 夏季表层与底层温差较大, 即渤海夏季垂向的温度存在层化现象^[27]. DO 浓度与温度呈反向变化, 二者为负相关关系^[28], 夏季温度升高, 氧气的溶解度下降, 表层 DO 浓度降低. 6—8 月表层、底层 DO 浓度差大, 这是由于上层浮游植物光合作用加上表层海水与

空气接触使 DO 得到补充; 底层 DO 浓度低是由于夏季水温升高, 浮游生物、底栖生物的残骸或外壳等组成的碎屑颗粒在底层矿化分解消耗了氧气; 温跃层的存在使得上层的氧气不能向下补充^[13], 因而表层与底层差异大. 夏季 DO 浓度表层与底层的差异与温跃层和淡水输入量有关^[14].

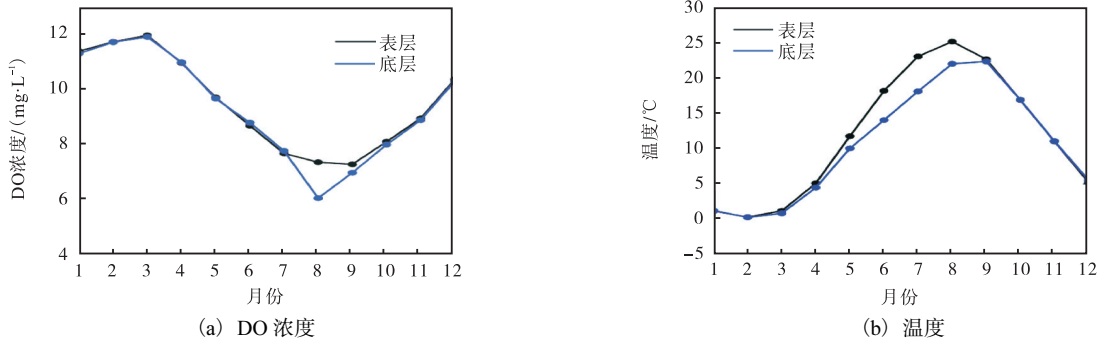


图 2 DO 浓度与温度多年均值的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of annual average values of DO concentration and temperature

2.2 DO 浓度年际变化特征

本文分析了 1978—2018 年冬、夏两季 DO 浓度和表层与底层 DO 浓度差异的年际变化特征. 夏季表层与底层 DO 浓度变化不一致, 分析了表、底两层

DO 浓度的变化; 冬季表层与底层变化一致, 只探讨了表层 DO 浓度的变化. St1—St9 站位夏季表层 DO 浓度年际变化特征如图 3 所示.

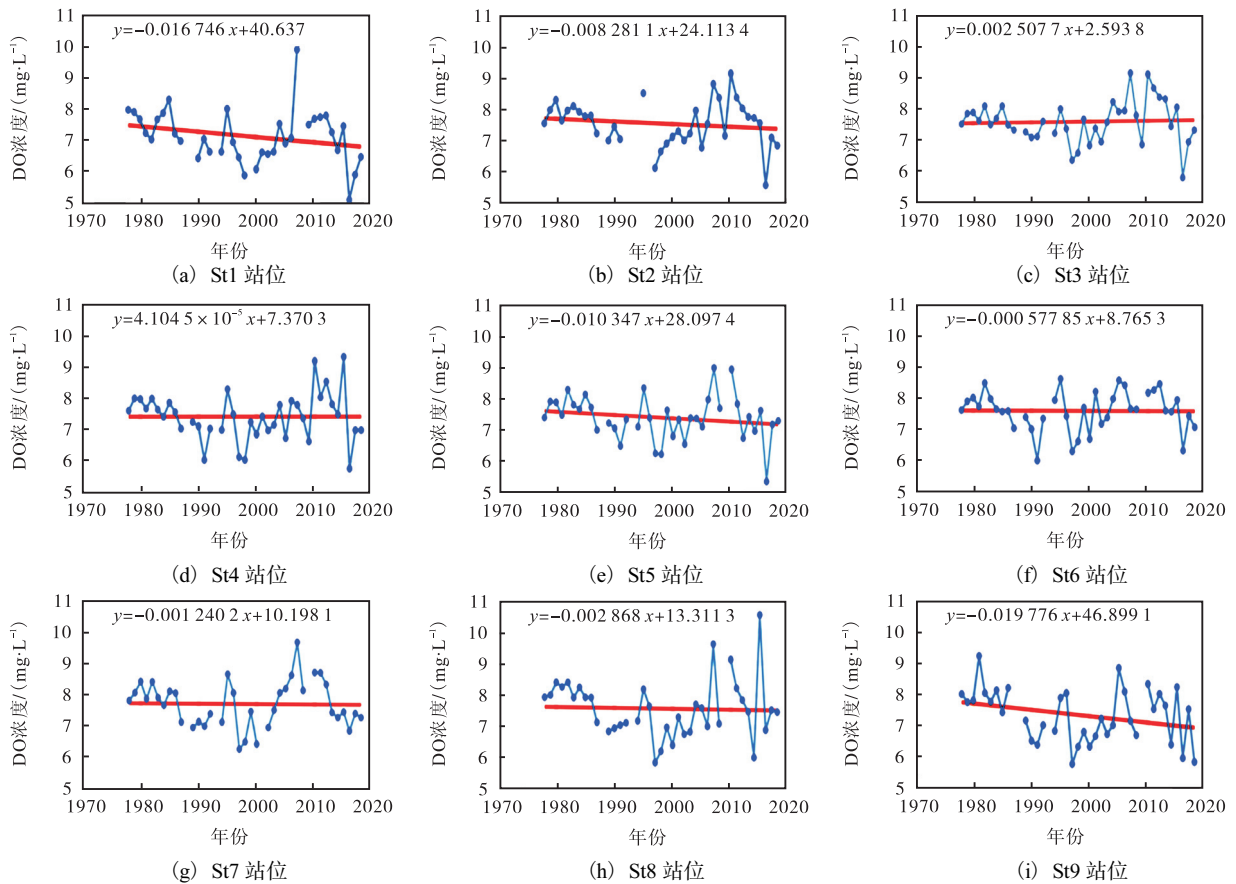


图 3 St1—St9 站位夏季表层 DO 浓度年际变化特征

Fig. 3 Interannual variations of summertime surface layer concentration of DO from St1 to St9 stations in the Bohai Sea

夏季表层各站 DO 浓度无明显变化趋势, 多年 DO 浓度范围为 5.65 ~ 10.50 mg/L, 多年夏季表层 DO 浓度均值为 7.49 mg/L. 河口附近的 St1、St9 站位 DO 浓度较其他站位偏低.

整体而言, 1978—2018 年间夏季表层 DO 浓度存在高一低一高的年际变化特征. 第一时段为 1978—1986 年, DO 浓度偏高, 均值为 7.89 mg/L, DO 浓度的高值与这一时期温度偏低有关. 第二时段为 1987—2003 年, 除了 1995 年浓度有所升高外, 其他年份 DO 浓度偏低, 均值为 7.09 mg/L. 第三时段为 2004—2015 年, DO 浓度偏高, 均值为 7.84 mg/L.

St1—St9 站位夏季底层 DO 浓度年际变化特征如图 4 所示. 夏季底层各站位 DO 浓度呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), 各站位间下降速率存在空间差异. 中部两个洼地附近的 St2、St3 站位以及 St5—St7 站位

下降显著, 靠近河口的 St1、St9 站位的 DO 浓度较高, 下降速率也较慢, 河口附近和中部浅滩的多年 DO 浓度稳定、起伏较小, 辽河口较黄河口起伏更小, 中部浅滩的 St4 站位下降少且浓度较高.

夏季底层 DO 浓度变化范围为 2.27 ~ 9.23 mg/L, 多年均值为 5.99 mg/L, 中部洼地附近的站位均值较小. 对应表层 DO 浓度高一低一高变化特征的 3 个时段, 底层 DO 浓度呈现出高一低一更低的年际变化特征. 第一时段为 1978—1986 年, DO 浓度较高, 均值为 7.73 mg/L, 此时底层温度较低, 说明 DO 浓度和温度之间为负相关关系^[6]. 第二时段为 1987—2003 年, DO 浓度较低, 均值为 6.65 mg/L, 较 1978—1986 年下降明显. 第三时段为 2004—2015 年, 底层 DO 浓度更低, 均值为 5.73 mg/L.

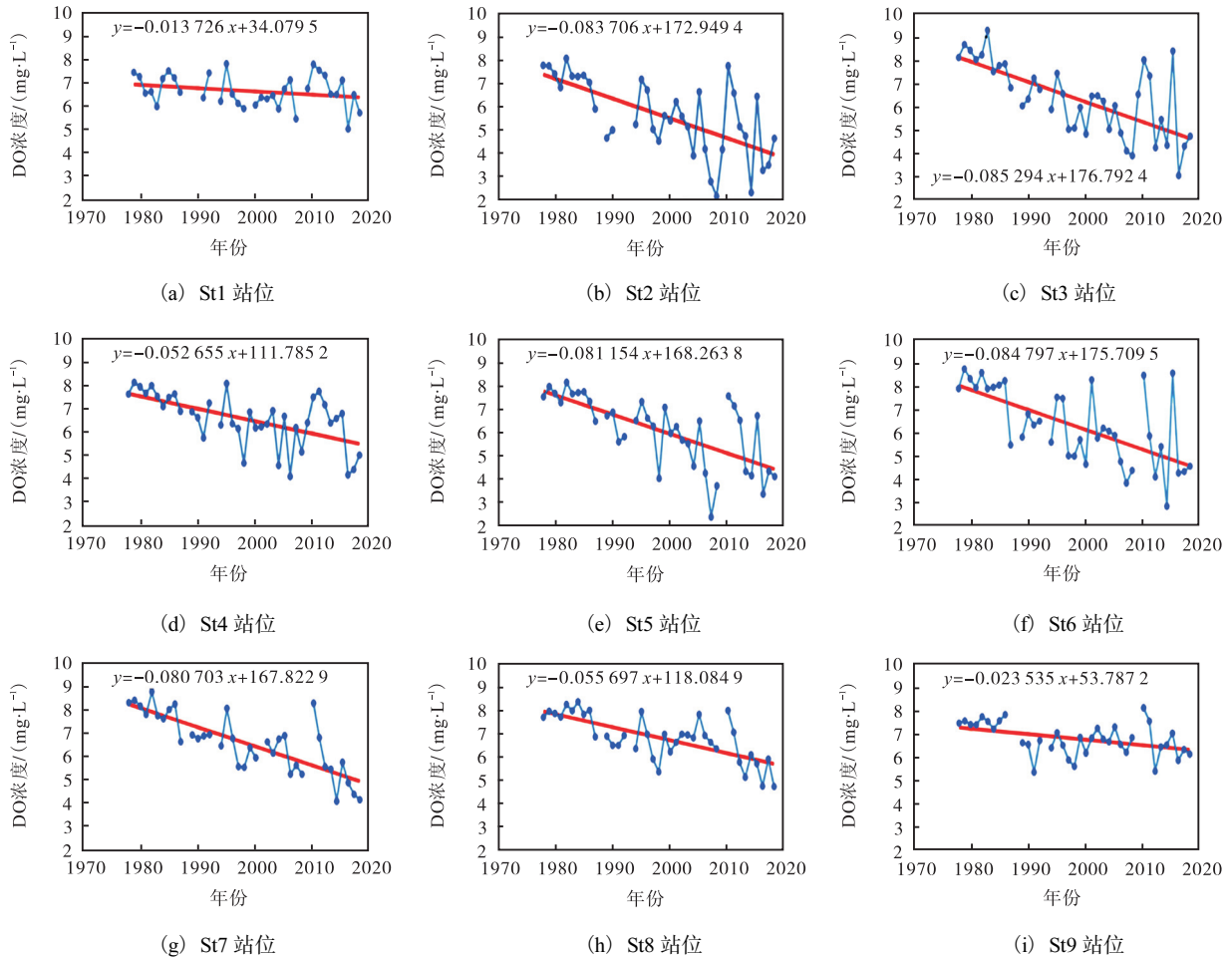


图 4 St1—St9 站位夏季底层 DO 浓度年际变化特征

Fig. 4 Interannual variations of summertime bottom layer concentration of DO from St1 to St9 stations in the Bohai Sea

St1—St9 站位冬季表层 DO 浓度年际变化特征如图 5 所示, 冬季表层 DO 浓度年际变化无趋势, 冬季 DO 浓度多年变化范围为 8.82 ~ 12.69 mg/L, 均值

为 11.67 mg/L.

渤海中部 8 月每 10 年 DO 平均浓度剖面分析如图 6 所示.

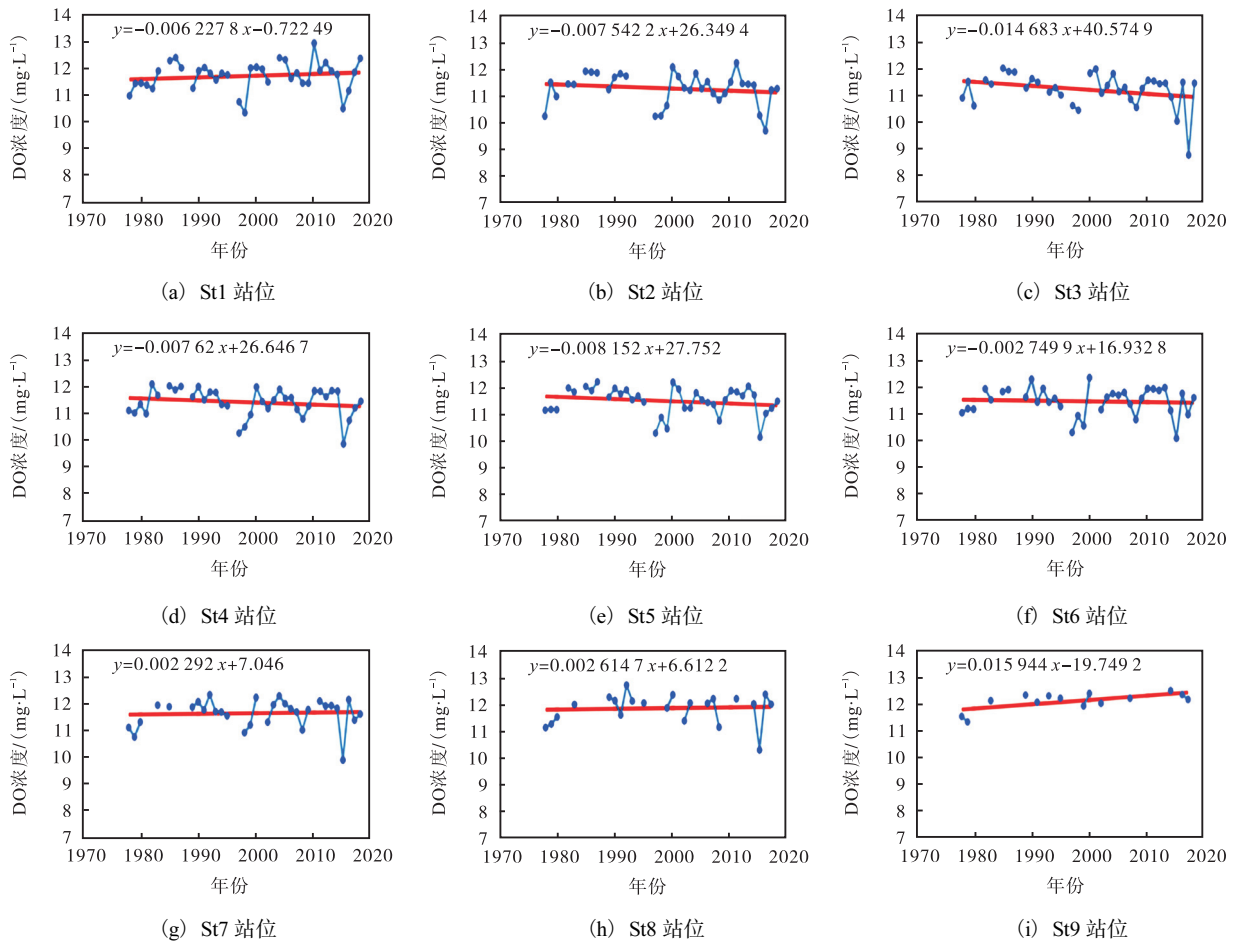


图5 St1—St9 站位冬季表层 DO 浓度年际变化特征

Fig. 5 Interannual variations of wintertime surface layer concentration of DO from St1 to St9 in the Bohai Sea

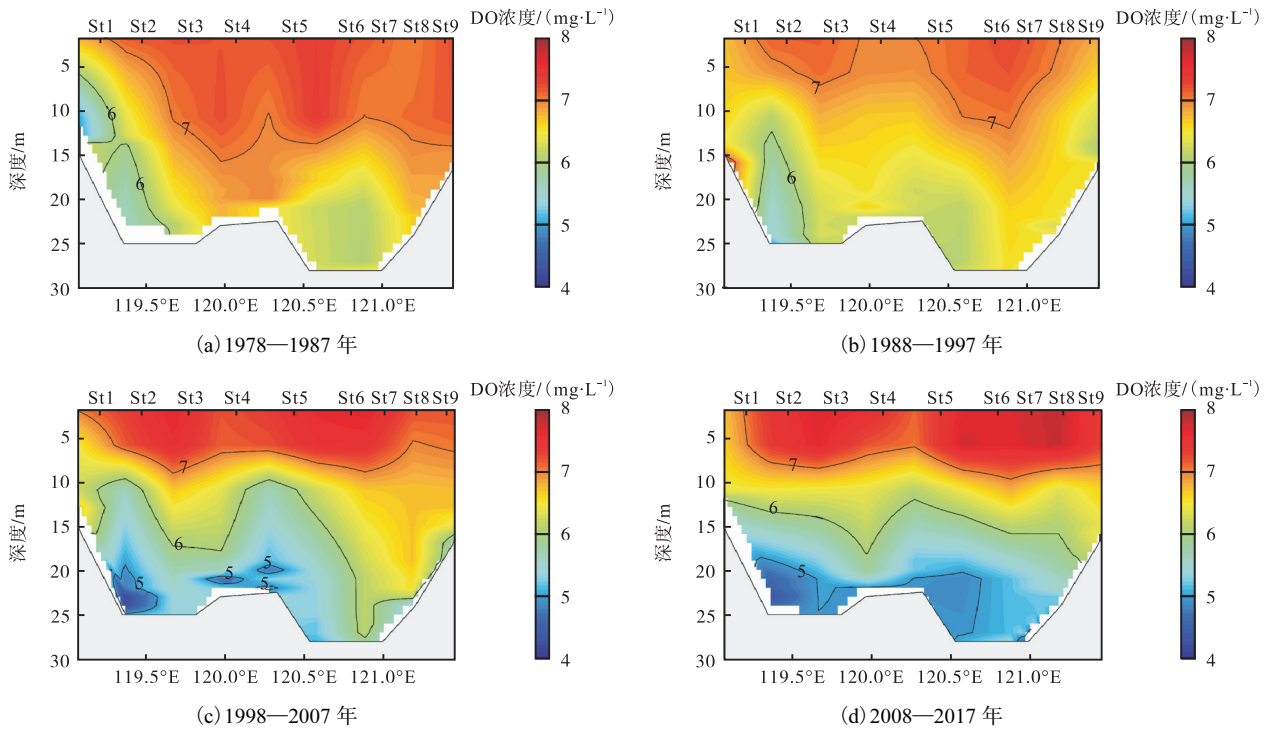


图6 8月每10年 DO 平均浓度剖面分布

Fig. 6 Distributions of ten-year average concentration of DO along the section in August

渤海中部 8 月 DO 平均浓度随着海水深度的增加而降低, DO 平均浓度低值的范围也在扩大, 1998 年之后的底层 DO 平均浓度更低. 1978—2017 年渤海夏季底层 DO 平均浓度降低了 1.52 mg/L, 1978—1987 年表层、底层 DO 平均浓度都较高且差异小, 表层与底层浓度差为 0.7 mg/L. 1988—1997 年表层 DO 平均浓度较低, 表层与底层浓度差异最小. 1998—2017 年底层 DO 平均浓度降低且表层与底层浓度差异变大, DO 浓度低值的范围扩大.

2.3 影响因素分析

对图 6 中 8 月每 10 年 DO 浓度均值剖面进行分析, 结果表明表层与底层 DO 浓度差异有明显的年际变化, 表现为表层浓度的上升和底层浓度的下降; 同时, 表层与底层温差大的站位 DO 浓度差异大, 随着表层与底层温差的增大, 底层 DO 浓度低值更低, 缺氧的形成主要是一个垂直过程^[29]. 翟惟东等^[16]认为底层 DO 浓度低值的出现与季节性层化现象阻滞海气交换有关; 张华等^[17]认为 2014 年底层 DO 浓度与底层双中心冷水结构基本一致, 渤海的温跃层出现在 6~12 m, 在温跃层以上 DO 浓度较高, 在温跃层以下 DO 浓度迅速下降. 渤海夏季断面出现底层 DO 浓度降低和表层 DO 浓度升高的年际变化, 且 DO 浓度降低的速率大于升高的速率^[30].

选择 3 个典型站位分别代表南部洼地 (St2)、中部浅滩 (St4) 和北部洼地 (St6), 使用 2000—2018 年的温度、Chl a 浓度、降水量、径流量、风速、DIN 浓度、硅酸盐浓度和磷酸盐浓度数据; 为了找出影响渤海夏季 DO 浓度年际变化的主要因素, 进行一元和多元线性回归分析, 讨论渤海 DO 浓度年际变化的影响因素.

在夏季底层, St2 站位底层 DIN 浓度影响 DO 浓度年际变化的 42% ($R^2 = 0.42, P < 0.05$), 如果将硅酸盐浓度、磷酸盐浓度、降水量、黄河径流量考虑在内则能解释 DO 浓度年际变化的 70% ($R^2 = 0.70, P < 0.05$); St4 站位底层温度可以解释 DO 浓度年际变化的 33% ($R^2 = 0.33, P < 0.05$), 考虑径流量之后可以解释 39% ($R^2 = 0.39, P < 0.05$); St6 站位底层 DIN 浓度影响 DO 浓度年际变化的 39% ($R^2 = 0.39, P < 0.05$), 增加风速、硅酸盐浓度、表层与底层温差和底层温度后可以解释其变化的 60% ($R^2 = 0.60, P < 0.05$).

在夏季表层, 将 St2 站位表层径流量、降水量、风速、Chl a 浓度、DIN 浓度、硅酸盐浓度以及磷酸盐浓度考虑在内, 则能解释 81% 的 DO 浓度年际变化

($R^2 = 0.81, P < 0.05$); 将 St1 站位表层径流量、DIN 浓度、Chl a 浓度、硅酸盐浓度和磷酸盐浓度考虑在内则有 79% 得到解释 ($R^2 = 0.79, P < 0.05$); St6 站位表层 Chl a 浓度影响 DO 浓度年际变化的 33% ($R^2 = 0.33, P < 0.05$); St5 站位表层黄河径流量和 Chl a 浓度影响 DO 浓度变化的 42% ($R^2 = 0.42, P < 0.05$). 表层 DO 浓度年际变化的影响因素有空间差异性, 各变量在靠近黄河口处更能解释 DO 浓度的年际变化; 在靠近辽河口的 St9 站位, 上述变量则不能很好地解释 DO 浓度的年际变化.

夏季水体耗氧是海洋 DO 的重要消耗项, 包括硝化作用耗氧、浮游动物呼吸耗氧以及碎屑矿化耗氧. 底层水体耗氧的增加被证实与海洋生物量的增加引起的生物群落呼吸速率提高有关. 水体中的 DIN 作为重要的海洋有机质来源, 它的变化与 DO 浓度的变化密切相关^[6,19-21]. 20 世纪下半叶, 河流营养物质负荷增加, 刺激了有机物质的生产, 当有机物质沉积到底层时, 消耗氧气的速率比通过分层水柱进行垂直混合所下降的速率要快^[31]. 底层水温低、透光性差, 浮游植物消耗少, 有机物分解较快产生了更多的无机盐, 加上温跃层的阻挡, 营养盐在此处积累^[13], 底层持续性耗氧就会引发低氧^[16]. 2014 年夏季底层低氧区核心存在两个明显的 TOC (总有机碳) 和 TON (总有机氮) 高值区, 这些区域的有机质积累与 DO 浓度的降低有关, 同时渤海有机质主要受海洋和陆源输入的共同作用^[17]. 夏季水体中营养盐的增加刺激了浮游植物的生长, 随着浮游植物的增加底层碎屑导致的底层耗氧也不断增加^[32-33]. 渤海表层水体中 Chl a、磷酸盐高值区与低氧区部分重合^[18], 富营养化带来的表层水体高浓度的 Chl a 也通过增加底层耗氧物质影响底层 DO 浓度^[17-18]. 渤海水体富营养化状况主要取决于江河入海的 N、P 营养盐入海总量, 并与黄河径流量的变化有关^[34].

黄河径流量对 DO 浓度年际变化有影响, 黄河径流量会影响渤海营养盐浓度的变化, 通过对浮游植物生物量造成影响, 进而间接影响到水体耗氧和底泥耗氧, 影响 DO 浓度分布的年际差异^[6]. 石强^[14]认为黄河口附近站位 DO 浓度年际变化与黄河径流量的变化有滞后相关关系. 黄河入海径流量减少时, 使该区域外源输入的有机质减少, 从而分解无机物消耗的氧气量也减少, 海水中 DO 浓度增加^[13]. 渤海营养盐的高值区主要出现在黄河入海口, 受黄河冲淡水的影响显著, 此外靠近黄河口站位表层 DO 浓度高于底层,

黄河冲淡水对 DO 浓度有影响^[2]。

St1—St9 站位表层 2 月温度与 DO 浓度、Chl a 浓度与 DO 浓度的相关系数如图 7 所示。2 月表层 DO 浓度与海水温度呈负相关关系, St2、St9 之外的站位相关系数的绝对值均大于 0.6。冬季表层多年的 DO 饱和度均在 99% 以上, 接近饱和状态。

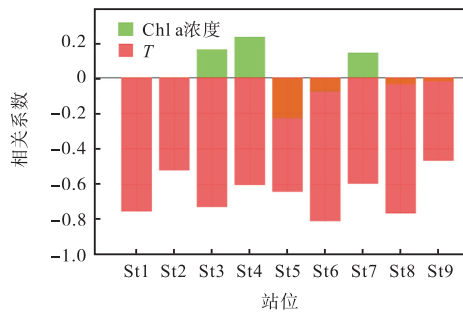


图 7 St1—St9 站位表层 2 月温度与 DO 浓度、Chl a 浓度与 DO 浓度的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between temperature in February at surface layer from St1 to St9 stations and DO concentration, Chl a concentration and DO concentration

冬季 DO 浓度的年际变化与温度影响 DO 饱和度的关系有关。石强等^[30]指出冬季水温模态的变化是影响渤海冬季 DO 浓度年际变化的主要因素, 冬季海水垂向均匀混合且大部分表层水体 DO 饱和度接近 100%, 此时 DO 浓度主要受控于水体中的温度和盐度^[35-36]。DO 饱和度与水温呈负相关关系, 随着温度的降低, DO 饱和度总体呈现升高趋势, 冬季水温低时 DO 溶解度大、饱和度高^[37]; 温度低时 DO 溶解度大、浓度高, 温度高时 DO 溶解度小、浓度低^[38]。中国海洋灾害公报显示 2009 年属于渤海海冰偏重年份^[39], 2010 年的高值可能与 DO 浓度受底层温度影响较大有关。

3 结 论

渤海 DO 浓度季节变化为冬季、春季较大, 秋季次之, 夏季最小, 表层 DO 浓度多年均值较底层更高, 但季节间变化幅度小于底层, 夏季表层、底层 DO 浓度有差异, 表层浓度高、底层浓度低, DO 浓度季节变化与温度呈负相关关系。

在年际变化上, 夏季底层 DO 浓度显著下降, 南北两个洼地降低程度更显著, 下降速率均为 0.08 mg/(L·a), 变化范围为 2.27~9.23 mg/L, 多年均值为 5.99 mg/L, 底层夏季 DO 浓度在 1978—2018 年

变化大致分为两个时间阶段, 1986 年前浓度偏高, 1987 年开始浓度呈下降趋势。夏季表层 DO 浓度无明显变化趋势, 浓度范围为 5.65~10.50 mg/L, 夏季表层多年 DO 浓度均值为 7.49 mg/L。在靠近河口的 St1、St9 站位有下降的趋势。1978—1986 年和 2004—2015 年 DO 浓度偏高, 1987—2003 年偏低。冬季, 表层与底层浓度较一致, 多年无明显变化趋势。夏季 DO 浓度表层与底层差异的年际变化特征为差异越来越大, 底层低值中心 DO 浓度越来越低, 低值的范围也在扩大。

多元线性回归分析表明, 夏季底层 DO 浓度年际变化与底层 DIN 浓度有一定相关性, 表层 DO 浓度年际变化的影响因素有空间差异性, 表层 DO 浓度受黄河口处径流量影响较大, 靠近辽河口所受影响较小。冬季受温度影响较大。

参考文献:

- [1] 李伯志, 赵亮, 魏诗晏. 渤海和北黄海溶解氧与营养盐年际变化特征[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(4): 45-55.
- [2] 王丽莎, 张传松, 王颢, 等. 夏季黄渤海生源要素的平面分布特征[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 361-366.
- [3] BREITBURG D, LEVIN L A, OSCHLIES A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters[J]. Science, 2018, 359(6371): 7240.
- [4] ZHAI F G, LIU Z Z, LI P L, et al. 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, 2021, 126(5): 1-62.
- [5] 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[J]. 科学通报, 2009, 54(11): 1591-1599.
- [6] 钱思萌. 渤海中部低氧现象的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [7] HAGY J D, BOYNTON W R, KEEFE C W, et al. Hypoxia in Chesapeake Bay, 1950-2001: long-term change in relation to nutrient loading and river flow[J]. Estuaries, 2004, 27(4): 634-658.
- [8] 孟春霞, 邓春梅, 姚鹏, 等. 小清河口及邻近海域的溶解氧[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(3): 25-28.
- [9] ZHANG H, CHENG W C, CHEN Y R, et al. Controls on the interannual variability of hypoxia in a subtropical embayment and its adjacent waters in the Guangdong coastal upwelling system, northern South China Sea[J]. Ocean dynamics, 2018, 68(8): 923-938.

- [10] HELLY J J, LEVIN L A. Global distribution of naturally occurring marine hypoxia on continental margins[J]. Deep sea research part I :oceanographic research papers, 2004, 51(9): 1159–1168.
- [11] 崔毅,陈碧鹃,任胜民,等. 渤海水域生物理化环境现状研究[J]. 中国水产科学, 1996, 3(2): 1–12.
- [12] 石强. 渤海冬季温盐年际变化时空模态与气候响应[J]. 海洋通报, 2013, 32(5): 505–513.
- [13] 俎婷婷,鲍献文,谢骏,等. 渤海中部断面环境要素分布及其变化趋势[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(6): 889–894.
- [14] 石强. 渤海夏季溶解氧与表观耗氧量年际变化时空模态[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(2): 243–255.
- [15] ZHAO H D, KAO S J, ZHAI W D, et al. Effects of stratification, organic matter remineralization and bathymetry on summertime oxygen distribution in the Bohai Sea, China[J]. Continental shelf research, 2017, 134: 15–25.
- [16] 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[J]. 科学通报, 2012, 57(9): 753–758.
- [17] 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[J]. 科学通报, 2016, 61(14): 1612–1620.
- [18] 江涛,徐勇,刘传霞,等. 渤海中部海域低氧区的发生记录[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 1–6.
- [19] 吴金浩,王年斌,张玉凤,等. 夏季大连湾溶解氧分布变化特征及其与营养盐的关系[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 66–71.
- [20] ZHAI W D, ZHAO H D, SU J L, et al. Emergence of summertime hypoxia and concurrent carbonate mineral suppression in the central Bohai Sea, China[J]. Journal of geophysical research: biogeosciences, 2019, 124(9): 2768–2785.
- [21] WEI H, ZHAO L, ZHANG H Y, et al. Summer hypoxia in Bohai Sea caused by changes in phytoplankton community[J]. Anthropocene coasts, 2021, 4(1): 77–86.
- [22] 国家海洋局. 海洋监测规范 第4部分:海水分析:GB 17378.4—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [23] HAO Q, CHAI F, XIU P, et al. Spatial and temporal variation in chlorophyll a concentration in the Eastern China Seas based on a locally modified satellite dataset[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2019, 220: 220–231.
- [24] 王思佳. 黄海二甲基硫浓度年际变化特征[D]. 天津:天津科技大学, 2021.
- [25] 钱莹,方秀男. 多元线性回归模型及实例应用[J]. 中国科技信息, 2022(4): 73–74.
- [26] 张兴旺,王平,许梦国,等. 基于MATLAB多元线性回归优化地压显现综合评价[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4): 33–37.
- [27] 刘浩,潘伟然. 渤海层化结构及潮汐锋面季节变化的数值研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 398–403.
- [28] WEI Q S, WANG B D, YAO Q Z, et al. Spatiotemporal variations in the summer hypoxia in the Bohai Sea (China) and controlling mechanisms[J]. Marine pollution bulletin, 2019, 138: 125–134.
- [29] HETLAND R D, DIMARCO S F. How does the character of oxygen demand control the structure of hypoxia on the Texas-Louisiana continental shelf? [J]. Journal of marine systems, 2008, 70(1/2): 49–62.
- [30] 石强,杨朋金,卜志国. 渤海冬季溶解氧与表观耗氧量年际时空变化[J]. 海洋湖沼通报, 2014(2): 161–168.
- [31] TURNER R E, RABALAIS N N, SWENSON E M, et al. Summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico and its prediction from 1978 to 1995[J]. Marine environmental research, 2005, 59(1): 65–77.
- [32] 赵紫涵. 秦皇岛外海溶解氧的季节变化与机制分析[D]. 天津:天津科技大学, 2020.
- [33] LI Y, SONG G S, MASSICOTTE P, et al. Distribution, seasonality, and fluxes of dissolved organic matter in the Pearl River (Zhujiang) estuary, China[J]. Biogeosciences, 2019, 16(13): 2751–2770.
- [34] 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[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(4): 465–468.
- [35] 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.
- [36] 池连宝,宋秀贤,袁涌铨,等. 夏、冬季黄东海溶解氧的分布特征研究[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1337–1345.
- [37] 丛明琦,宋爱君,赵冉,等. 秦皇岛近岸海域春季表层溶解氧饱和度分析[J]. 现代盐化工, 2019, 46(4): 13–14.
- [38] 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.
- [39] 国家海洋局. 2010年中国海洋灾害公报[R/OL]. (2011–04–22) [2022–02–20]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798014.html.

责任编辑:周建军