



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20170342

渤海和北黄海溶解氧与营养盐年际变化特征

李伯志, 赵 亮, 魏诗晏

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘 要: 基于收集的 1975—1999 年间渤海与北黄海现场实测数据, 分析溶解氧(DO)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)的年际变化特征. 结果表明: 在这 25 年间, 渤海和北黄海溶解氧浓度均呈降低趋势, 冬季年际降低程度比夏季明显, 且冬季溶解氧与温度负相关性较夏季更显著. 溶解氧最显著变化是夏季北黄海中部海域底层高值区逐渐缩小, 至 20 世纪 90 年代全部低于 6.0 mL/L. 除夏季渤海北部和北黄海底层磷酸盐在 20 世纪 80—90 年代表现为升高趋势外, 夏季研究海域内磷酸盐和硅酸盐浓度表现为波动性降低趋势, 且在 20 世纪 80 年代中期(1984—1987 年)下降到历史性最低水平; 冬季研究海域内磷酸盐浓度表现为波动状态, 硅酸盐却有着显著降低趋势.

关键词: 渤海; 北黄海; 溶解氧; 营养盐; 年际变化

中图分类号: P734

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2019)04-0045-11

Inter-annual Variations of Dissolved Oxygen and Nutrients in the Bohai Sea and the North Yellow Sea

LI Bozhi, ZHAO Liang, WEI Shiyan

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

Abstract: Based on *in situ* observation of the Bohai Sea (BS) and the North Yellow Sea (NYS) from 1975 to 2000, the inter-annual variations in the concentration of dissolved oxygen (DO), phosphate, and silicate were analyzed. The results showed that DO concentration exhibited a decreasing trend during the last 25 years, and the trend in winter was stronger than in summer. Furthermore, there was a significant negative correlation between DO concentration and the sea water temperature, which was stronger in winter than in summer. It is noteworthy that the area with higher DO concentration shrank gradually and the concentration at the bottom of the central part of NYS in summer was below 6.0 mL/L in the 1990s. During the last 25 years, phosphate and silicate concentration exhibited great inter-annual fluctuations, excepted in the north regions of BS and in the bottom layer of NYS during summer. Moreover, the concentration of phosphate and silicate reached historically lowest value in the summer of mid-1980 s (1984–1987). In winter, phosphate concentration fluctuated, while silicate concentration showed a significant decrease.

Key words: Bohai Sea; North Yellow Sea; dissolved oxygen; nutrients; inter-annual variations

溶解氧作为海水水质指标之一, 在海洋生态系统中扮演重要角色. 海洋中生物生产和有机质分解都会影响海水中溶解氧含量, 而溶解氧含量变化反过来又会影响海洋生物. 海水中营养盐水平影响浮游植物初级生产水平, 是浮游植物物质吸收和能量代谢的重要来源, 也是量化海水富营养化的重要指标之一.

渤海和北黄海作为高生产力海区, 其溶解氧与营养盐时空变化特征备受关注. 崔毅等^[1-2]分析 1959—1992 年的现场观测数据, 指出渤海溶解氧年际差异不大, 基本稳定维持在 6.0 mL/L 左右. 姐婷婷等^[3]根据 1979—1999 年间渤海中部断面溶解氧和营养盐调查资料, 指出这 21 年间渤海夏季和冬季溶解氧质量

收稿日期: 2017-12-21; 修回日期: 2018-04-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601301, 2016YFC1401602); 中国科学院战略性先导科技专项专刊(A 类)资助项目(XDA11020305)

作者简介: 李伯志(1990—), 男, 广东高州人, 硕士研究生; 通信作者: 赵 亮, 教授, zhaoliang@ouc.edu.cn

浓度均呈现缓慢降低的趋势,夏季磷酸盐和硅酸盐浓度存在下降的趋势,而冬季则没有明显升高或降低趋势.王丽莎等^[4]分析夏季黄渤海生源要素平面分布特征,指出营养盐呈现近岸高、外海低的特征,营养盐受到河口径流量影响.近些年来,学者们研究了海水营养盐的结构,指出渤海营养盐朝着磷酸盐和硅酸盐相对缺乏的趋势演变^[5-8].总体而言,对于渤海营养盐和溶解氧的研究,以季节变化和平面分布特征研究为主,长时间时空变化特征分析较少.

对黄海的溶解氧和营养盐的研究则主要集中在南黄海,如 36°N 断面. Lin 等^[9]分析南黄海溶解氧的变化特征,指出在 1976—2000 年间溶解氧、磷酸盐和硅酸盐呈现降低趋势.高磊等^[10]也指出,在 20 世纪 50—90 年代期间,南黄海磷酸盐和硅酸盐均存在降低的趋势. Li 等^[11]和 Wei 等^[12]发现在 20 世纪 90 年代中期之前,磷酸盐和硅酸盐浓度存在降低趋势,此后逐渐升高.刘春利等^[13]通过分析黄海表层溶解氧时空分布,指出表层溶解氧与温度、营养盐浓度存在负相关关系.还有学者通过分析特定季节的观测数据来讨论营养盐和溶解氧的空间分布特征^[14-17],但是对北黄海溶解氧与营养盐年际变化特征的研究较少.

本文基于收集的 1975—1999 年间渤海和北黄海溶解氧、磷酸盐和硅酸盐现场观测数据,分析不同层次溶解氧和营养盐(下文中营养盐是指磷酸盐和硅酸盐,不包括硝酸盐)分布特征和变化规律,重点关注其年际变化,旨在了解该海域营养状况和浮游植物的群落结构变化,为当地生态环境保护和可持续发展提供基础数据支持.

1 数据来源及处理方法

1.1 研究海域的站点分布

本文研究海域范围为 37.0°N ~ 41.0°N, 117.0°E ~ 124.5°E, 包括整个渤海和北黄海海域(图 1).数据来自国家海洋局北海分局的常规断面观测,包括温度(*T*)、盐度(*S*)、溶解氧(*DO*)、磷酸盐(*PO₄-P*)和硅酸盐(*SiO₃-Si*)浓度,观测时间为 1975—1999 年,图 1 给出各个站点观测总次数分布,各个站点观测总次数在 10~275 次,其中渤海有 3 个站点观测次数超过 150 次,其余多数站点观测次数在 50~100 次.北黄海有 4 个站点观测次数超过 200 次,其余站点观测次数在 100~150 次.在渤海和北黄海各选取观测次数较多的 3 个站点(图 1 黑色圆圈所示),作为

渤海和北黄海的代表.代表站点的观测数据包括其周边 0.25°范围内全部数据,其观测次数统计结果见表 1.根据研究海域气候特征,选取数据相对较多的 8 月和 2 月分别代表夏季和冬季,用以分析夏、冬季溶解氧和营养盐的变化特征.

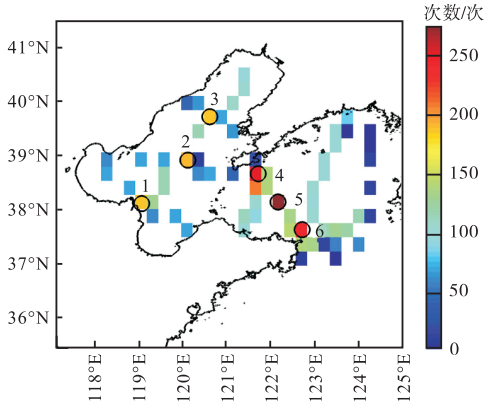


图 1 观测站点及各站点观测次数分布
Fig. 1 Distribution of observation points

表 1 代表站点观测年份和次数

Tab. 1 The number and years at the observation points

站点编号	有数据年份	次数/次
1	1978—1999 年	190
2	1978—1999 年	193
3	1978—1999 年	189
4	1976—1999 年	254
5	1976—1999 年	277
6	1976—1999 年	245

1.2 数据处理

实测数据时间跨度较大,数据质量和格式存在差异,故在数据分析前,参考 WOA (World Ocean Atlas) 采用的质量控制方法对观测数据进行预处理^[18]:

(1) 剔除无效的站点.以 ETOPO5 (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.html>) 地形资料为参考,剔除超过研究海域范围和观测位置明显有误的站点数据.

(2) 溶解氧及营养盐数据异常处理.依据前人研究结果^[19-21],预设实测数据的可信范围,这里设置溶解氧浓度范围为 0~15.0 mL/L、磷酸盐浓度范围为 0~1.5 μmol/L、硅酸盐浓度范围为 0~40.0 μmol/L,研究海域内超出设定范围的数据视为异常数据,予以剔除.

(3) 数据插值.将预处理数据插值到标准层,即 2 m、5 m、10 m、30 m 和底层.由于文章篇幅有限,本文主要讨论表层(2 m)和底层.

(4) 在对数据进行年际变化分析时,首先计算其

标准差, 若实测数值与年平均值的差超过 3 倍标准差, 则视为异常数据, 予以剔除。

在整个研究期(1975—1999 年), 利用月平均数据分析溶解氧和营养盐年际变化特征时, 采用最小二乘法^[22-23]进行线性趋势分析。为分析溶解氧和营养盐空间分布的年代间差异, 将研究期划分为 3 个时间段: 以 1975—1979 年平均为 20 世纪 70 年代, 站点总数为 59 个; 1980—1989 年平均为 20 世纪 80 年代, 站点总数为 64 个; 1990—1999 年平均为 20 世纪 90 年代, 站点总数为 25 个。每个站点都包括周边

0.25°范围内的全部数据。

2 分析与讨论

2.1 溶解氧和温度的年际变化

渤海和北黄海夏季和冬季溶解氧浓度和温度年际变化分别如图 2、图 3 所示, 图中直线代表相应颜色的站点数据线性拟合曲线, 红线代表海域内 3 个站点的平均值的拟合结果。

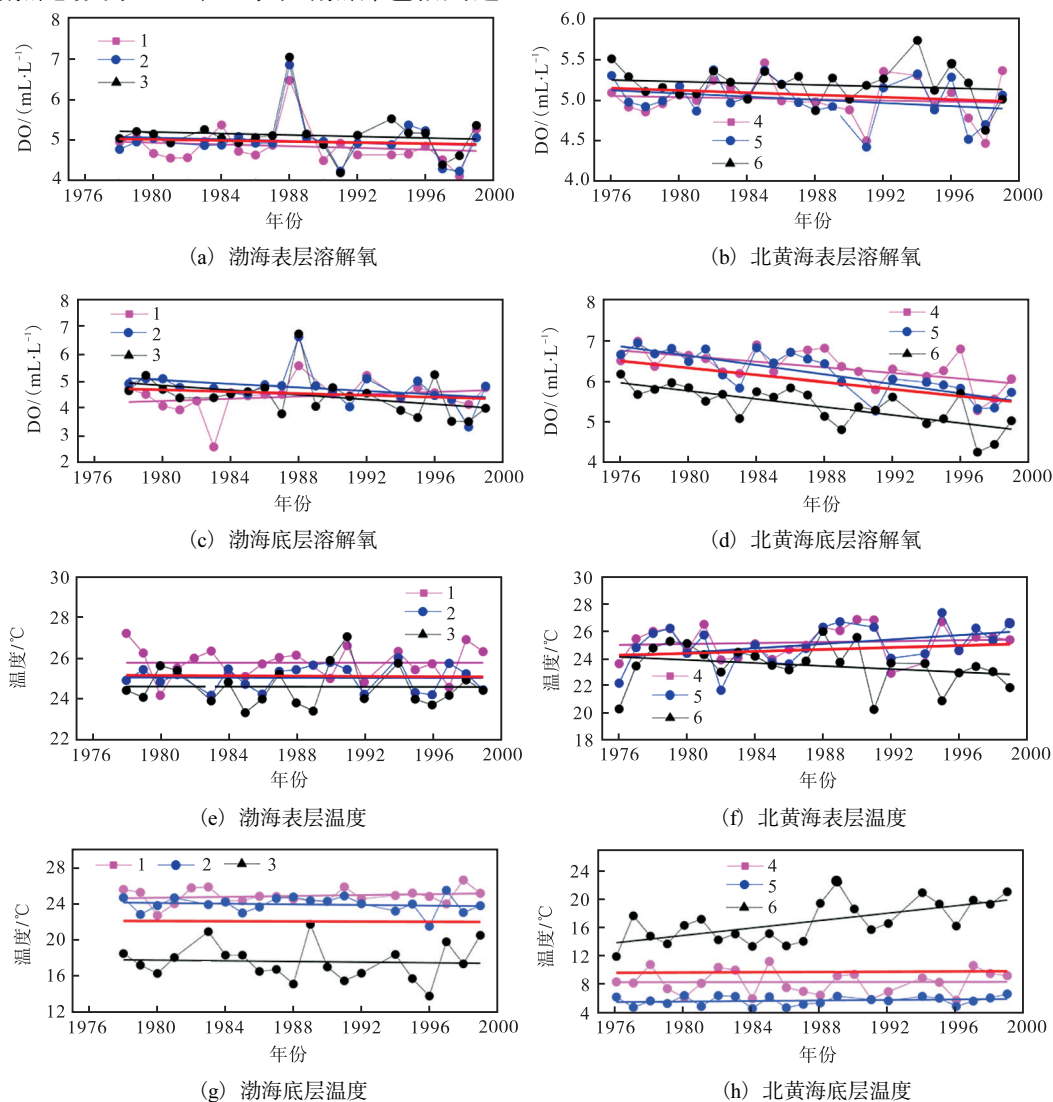


图 2 渤海和北黄海夏季溶解氧浓度和温度年际变化

Fig. 2 Inter-annual variations of DO and temperature in summer in the Bohai Sea (BS) and the North Yellow Sea (NYS)

1975—1999 年这 25 年来, 研究海域在冬季垂向混合均匀, 表层和底层温盐变化一致, 渤海和北黄海温度的均值分别为 0.40 °C 和 3.13 °C; 盐度分别是 31.20 和 31.99。夏季, 渤海和北黄海的海水温度存在垂向差异, 明显高于冬季。渤海的表层和底层变化范

围分别为 20.10 ~ 27.87 °C、12.49 ~ 27.03 °C, 表层和底层盐度的变化范围为 22.13 ~ 32.49; 北黄海的表层和底层变化范围是 18.35 ~ 27.79 °C、4.44 ~ 24.17 °C, 表层和底层盐度的变化范围为 19.85 ~ 33.09。1975—1999 年间, 夏季渤海表层和底层的溶解氧浓度变化

不大,除 1988 年外,整体在 4.50 ~ 5.50 mL/L 范围内波动性降低;夏季北黄海表层溶解氧浓度略有降低,而底层则呈现显著降低的趋势,3 个站位平均浓度从 1976 年的 6.40 mL/L 下降到 1999 年的 5.54 mL/L,北黄海整体下降率为 0.037 mL/(L·a). 相比于夏季,渤海和北黄海冬季表、底层的溶解氧浓度均显著降低. 渤海和北黄海的表层溶解氧下降率分别为

0.032 mL/(L·a) 和 0.025 mL/(L·a), 由于冬季海水混合作用较强,底层与表层的溶解氧浓度几乎相同,其年际变化趋势也基本一致. 俎婷婷等^[3]分析 1979—1999 年间渤海溶解氧的长期变化,指出无论冬、夏季,溶解氧浓度总体都呈现降低趋势,这与本文的结果基本一致.

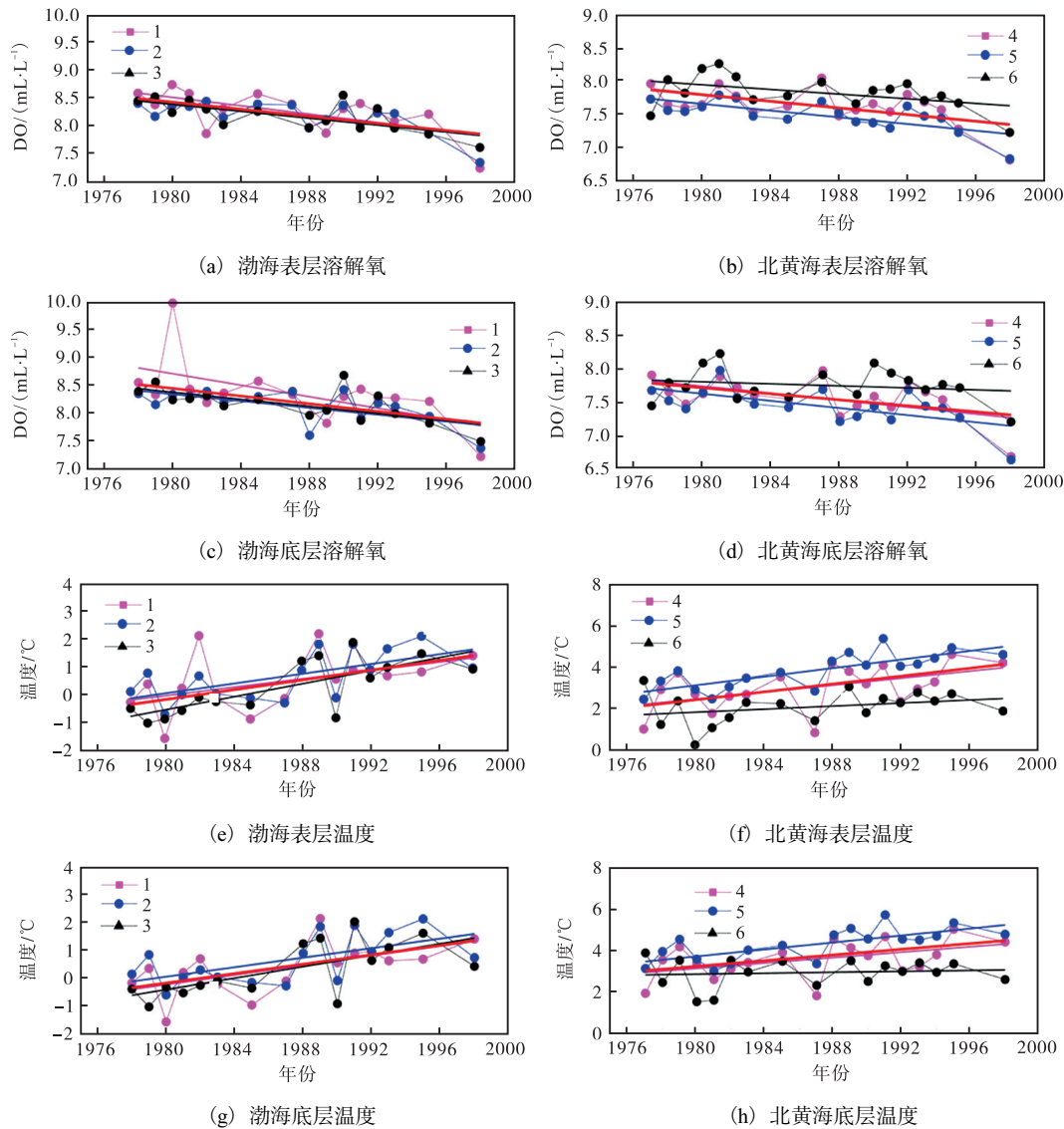


图3 渤海与北黄海冬季溶解氧浓度和温度年际变化

Fig. 3 Inter-annual variations of DO and temperature in winter in BS and NYS

北黄海夏季底层温度、冬季表层和底层温度都表现为增加趋势(图 2(h), 图 3(f)、(h)), 渤海冬季表层和底层温度也表现出明显增加趋势(图 3(e)、(g)). 气体在海水中溶解度受温度影响显著, 结合溶解氧和海水温度变化曲线, 可以看到溶解氧和温度存在负相关关系(表 2). 除渤海夏季溶解氧与温度的相关性较低外, 渤海冬季溶解氧和北黄海全年溶解氧与海水温

度相关性较高, 绝对值均超过 0.60, 说明温度是影响渤海和黄海溶解氧浓度的重要因素. 对比不同季节温度与溶解氧的相关性, 发现在研究海域冬季相关性比夏季的更高, 表明冬季海水温度对溶解氧浓度的影响要强于夏季海水温度对溶解氧浓度的影响, 原因是冬季浮游植物大量减少, 海水温度成为影响溶解氧浓度的主要因素^[24]. 当然, 温度并非是影响海水中溶解

氧浓度的唯一因素, 比如在辽东湾南部(站点 3), 夏季底层温度明显比渤海其他站位低, 但其溶解氧浓度与渤海其他海区相当. 浮游植物的光合作用、有机质的分解、氨氮硝化作用和底泥耗氧同样影响水体中溶解氧浓度^[25-27]. 夏季较高的生产力为底层带来丰富的有机物, 增加溶解氧的消耗, 同时低氧区表层水体温度较高, 形成高温水团, 造成较强的水体温度层结^[28], 层化限制了表层富氧水向下补充, 造成渤海夏季底层溶解氧低, 也是底层溶解氧与温度相关性差的原因之一.

总之, 造成溶解氧浓度的降低的原因: 一方面是海水温度的升高^[29-31], 另一方面是浮游植物数量的降低和浮游动物数量的增加^[32].

表 2 溶解氧与海水温度的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient between DO and temperature

位置	相关系数	
	夏季	冬季
渤海表层	-0.22	-0.68
渤海底层	-0.03	-0.67
北黄海表层	-0.61	-0.83
北黄海底层	-0.74	-0.78

2.2 营养盐的年际变化

渤海和北黄海夏季和冬季磷酸盐和硅酸盐浓度年际变化分别如图 4、图 5 所示, 图中直线代表相应颜色的站点数据线性拟合曲线, 红线代表海域内 3 个站点的平均值的拟合结果.

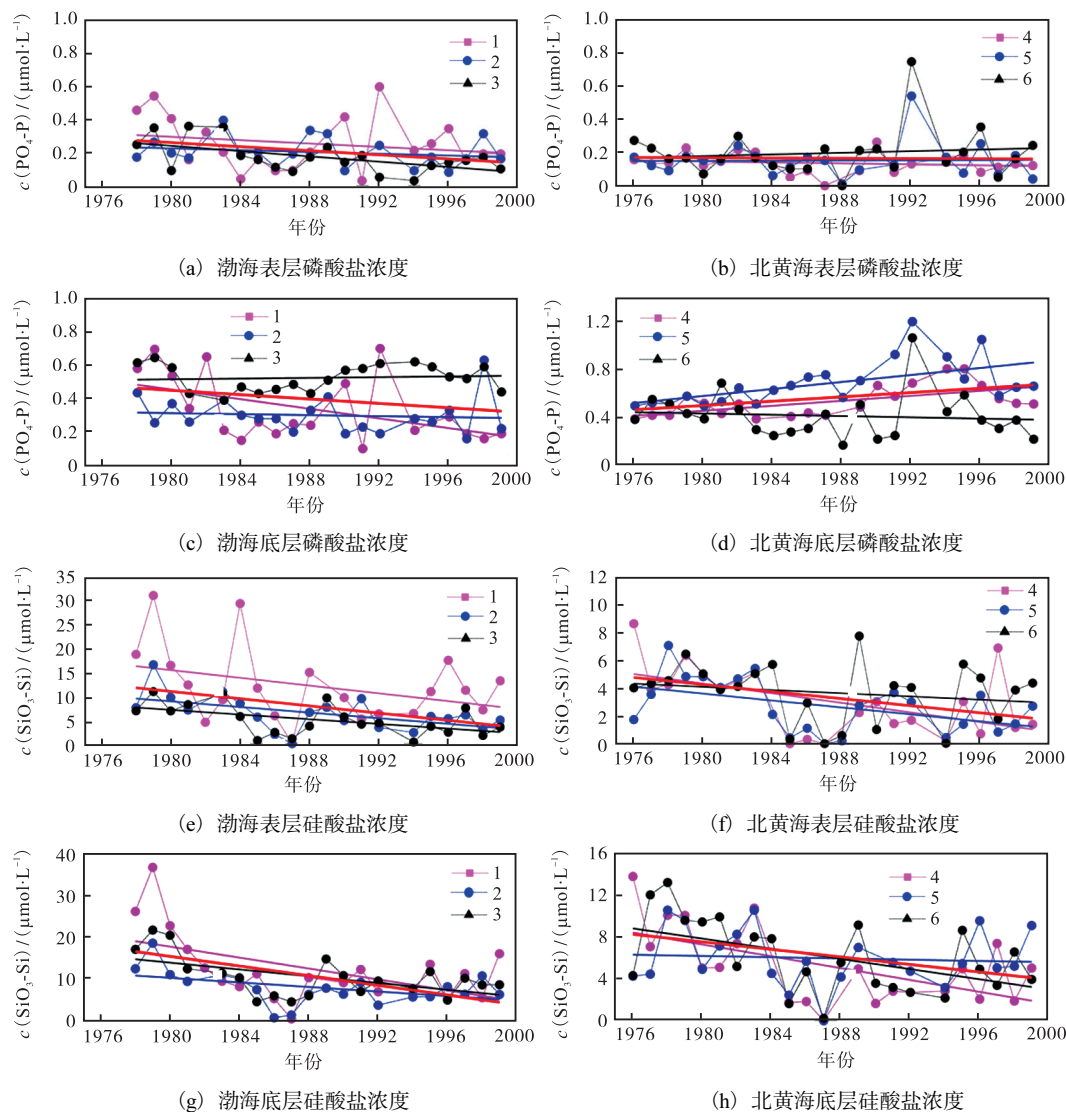


图 4 渤海和北黄海夏季磷酸盐和硅酸盐浓度年际变化

Fig. 4 Inter-annual variations of $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in summer in BS and NYS

在 20 世纪 70—80 年代中期, 夏季渤海的磷酸盐浓度出现波动性降低, 表层和底层浓度分别降至

$0.1 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 以下, 硅酸盐同样表现为波动性降低, 在 20 世纪 80 年代中期降低到接近零水

平. 此后,直到 20 世纪 90 年代末,渤海的磷酸盐和硅酸盐浓度分别在 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{mol/L}$ 、 $8.0 \sim 12.0 \mu\text{mol/L}$ 的范围内波动(图 5(a)、(c)、(e)、(g)). 在 1975—1999 年间,线性拟合结果显示:渤海硅酸盐表现为一致的降低趋势,较磷酸盐的变化趋势明显,两者表层的降低率分别为 0.410 、 $0.006 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$. 然而,辽东湾南部(站点 3)底层磷酸盐浓度却呈现上升趋势,尤其在 20 世纪 90 年代,磷酸盐浓度达到 $0.65 \mu\text{mol/L}$ (图 4(c)),这与该站点处于渤海中部洼地有关,石强^[33]指出“凹”地形有利于浓度较高的磷酸盐水体储存. 在北黄海,夏季表层

和底层的磷酸盐呈现不同变化特征:在这 25 年间,表层磷酸盐浓度在 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{mol/L}$ 范围内波动,整体稳定,但底层却表现为升高的趋势,尤其在辽东半岛南部(站点 4)和北黄海中部海域(站点 5),其磷酸盐浓度在 20 世纪 90 年代较高,平均浓度超过 $0.6 \mu\text{mol/L}$ (图 4(d)). 北黄海硅酸盐浓度整体表现为弱的降低趋势,特别在 20 世纪 80 年代中期有显著降低,降到这 25 年来的最低水平,低于 $2.0 \mu\text{mol/L}$;20 世纪 90 年代后,略有增加,硅酸盐浓度在 $2.0 \sim 8.0 \mu\text{mol/L}$ 内波动.

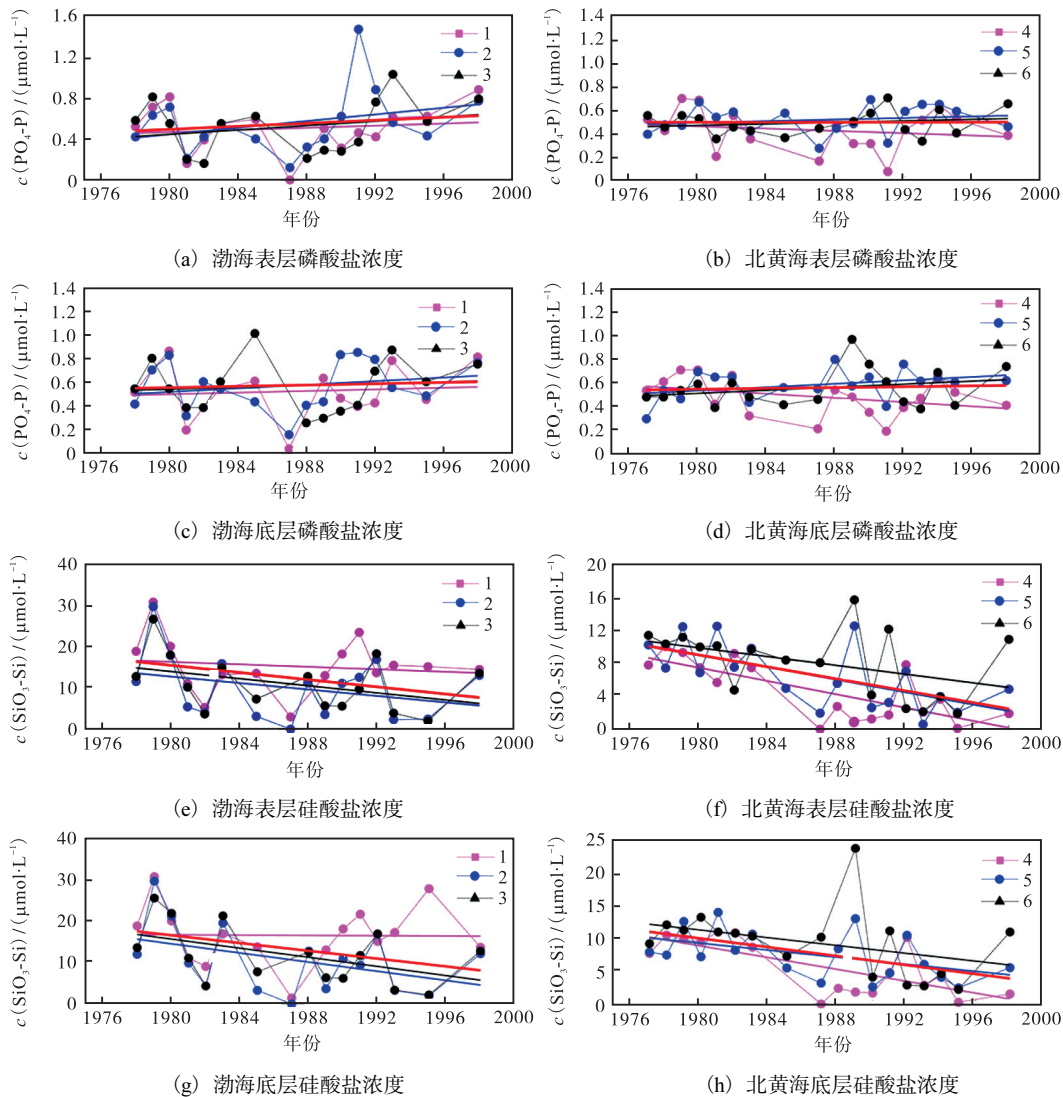


图 5 渤海和北黄海冬季磷酸盐和硅酸盐浓度年际变化

Fig. 5 Inter-annual variations of $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in winter in BS and NYS

冬季,在 20 世纪 70—80 年代渤海磷酸盐浓度呈现波动性下降,在 20 世纪 80 年代中期(1987 年)下降到最低水平,表层的下降率为 $0.029 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$;而在 20 世纪 80 年代中期以后,磷酸盐浓度出现波动性

上升,到 20 世纪 90 年代末升高到 $0.7 \mu\text{mol/L}$,表层浓度升高率 $0.054 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$,而硅酸盐浓度表现为弱的减小趋势,年际间波动较大(图 5(e)、(g)). 冬季北黄海磷酸盐浓度表现为波动性变化,整体相对稳

定,没有明显变化趋势(图 5(b)、(d));但硅酸盐却呈现出明显降低趋势,特别是在 20 世纪 80 年代中期(1984—1987 年),研究海域内硅酸盐浓度显著降低. 在 20 世纪 80 年代中期以后,硅酸盐浓度年际变化幅度明显,在 20 世纪 90 年代,海域内营养盐虽然存在波动,但整体浓度比 20 世纪 70 年代的低(图 5(f)、(h)). 造成研究海域营养盐浓度年际变化的原因错综复杂,沿岸入海径流变化、浮游生物群落结构变化、人类活动等均可能对研究海域营养盐变化产生影响. 结合所查阅资料和文献,本文认为:一方面,20 世纪 80 年代以来沿海经济迅速发展,研究海域沿岸大型工厂、养殖业兴起,以及大量含氮化肥随径流入海而造成海水中无机氮的增加,使得浮游植物对磷酸盐和硅酸盐的消耗增加,营养盐结构发生变化,N/P

比值几乎呈直线大幅上升^[6, 34]. 另一方面,马柱国^[35]和孔岩等^[36]研究指出,从 20 世纪 80 年代开始黄河径流量出现降低趋势. 在 20 世纪 80—90 年代中国北方河流发生严重断流,尤其在 20 世纪 90 年代黄河断流天数高达 119 d(1995 年),径流量减少带来的营养盐输入降低,可以部分解释 20 世纪 90 年代渤海和北黄海营养盐要比 20 世纪 70 年代偏低^[37-38]. 此外,20 世纪 80 年代以来,入海的硝酸盐浓度增加直接提高了浮游植物初级生产力,大量沉降的有机碎屑发生氧化分解反应,造成底层溶解氧浓度的降低,这与以往研究结果^[26, 39]一致.

2.3 溶解氧的空间分布年代间差异

渤海和北黄海溶解氧空间分布年代间差异如图 6 所示.

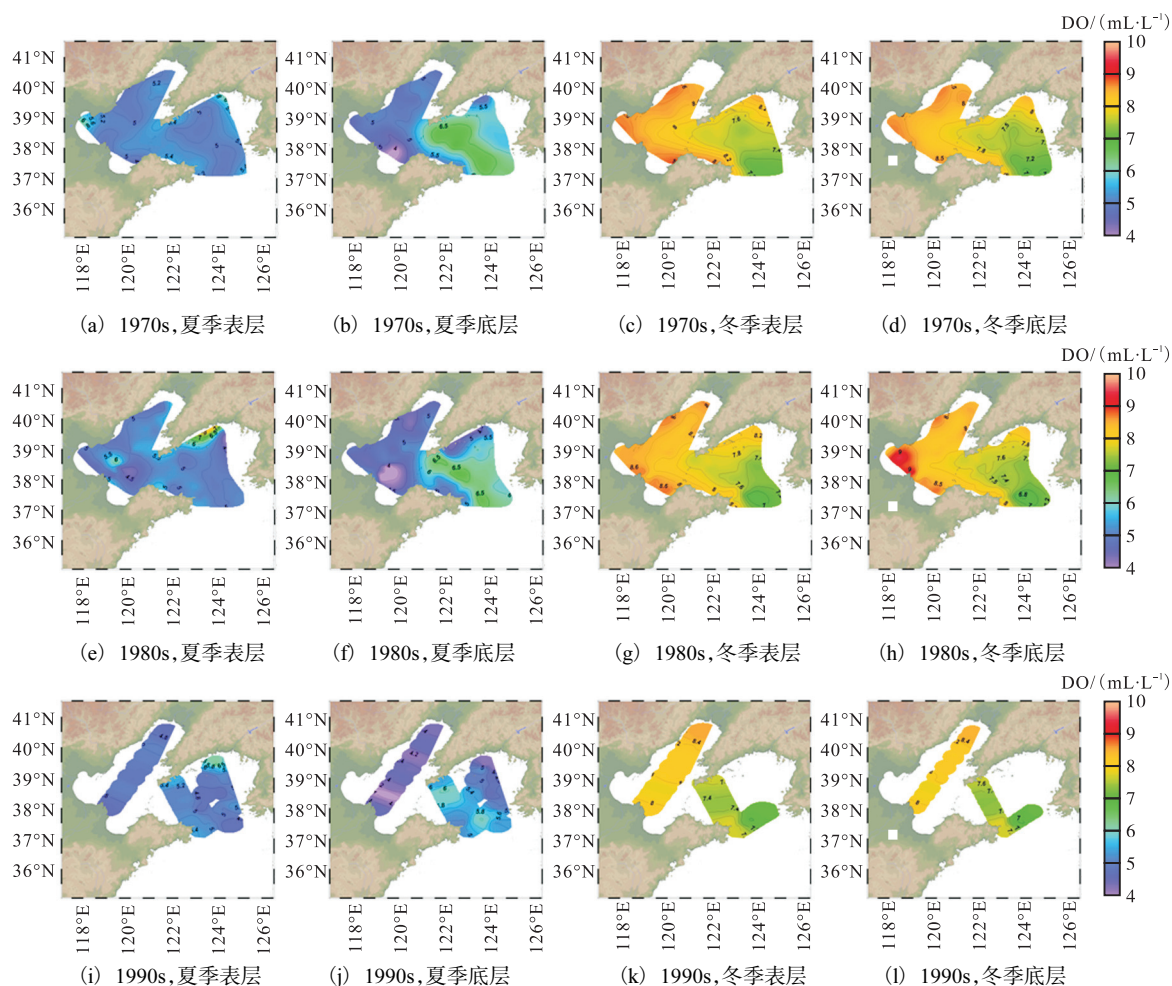


图 6 渤海和北黄海溶解氧空间分布年代间差异

Fig. 6 Inter-decadal variations of horizontal distribution of DO in BS and NYS

从空间分布来看:25 年间夏季整个渤海表层的溶解氧浓度呈现轻度降低趋势,从 20 世纪 70 年代 5.5 mL/L 降低到 20 世纪 90 年代的 5.0 mL/L,三大海湾间(渤海湾、莱州湾和辽东湾)没有明显差异;北黄

海北部海域表层溶解氧浓度在 20 世纪 80 和 90 年代相比 20 世纪 70 年代高,20 世纪 80 年代平均浓度超过 6.0 mL/L,而北黄海其他海区表层溶解氧浓度在 20 世纪 70—90 年代则基本维持在 4.8~5.5 mL/L 范

围(图 6(a)、(e)、(i)). 夏季渤海中部底层溶解氧浓度 20 世纪 90 年代相比 20 世纪 80 年代降低明显, 从 5.0 mL/L 降到 4.4 mL/L; 20 世纪 70—80 年代北黄海北部底层溶解氧低值范围增大, 在中部和南部变化不明显, 到 20 世纪 90 年代整体显著降低, 北黄海底层平均浓度从 20 世纪 80 年代的 6.40 mL/L 降低到 20 世纪 90 年代的 5.54 mL/L(图 6(b)、(f)、(j)).

冬季渤海和北黄海溶解氧浓度整体表现为降低的趋势, 特别是 20 世纪 80—90 年代降低明显, 渤海南部海域(渤海湾和莱州湾)降低程度要比渤海北部海区(辽东湾)的明显, 从 20 世纪 70—90 年代的表层降幅分别为 0.6 mL/L、0.2 mL/L, 而北黄海表层的降幅为 0.4 mL/L. 除 20 世纪 80 年代渤海湾底层溶解氧出现高值外, 研究海域内底层与表层的溶解氧浓度变化趋势基本一致(图 6(c)—(d)、(g)—(h)、(k)—(l)). 在 1975—1999 年间, 研究海域中溶解氧最显著的变化是夏季北黄海中部海域底层高值区(浓度超过 6.5 mL/L)逐渐缩小, 直至 20 世纪 90 年代完全消失.

2.4 营养盐的空间分布年代间差异

渤海和北黄海磷酸盐空间分布年代间差异如图 7 所示. 夏季渤海湾和辽东湾表层的磷酸盐浓度在 20 世纪 70—80 年代降低较为明显, 降幅约为 $0.2 \mu\text{mol/L}$, 在 20 世纪 80—90 年代浓度基本维持稳定, 而渤海其他海区磷酸盐浓度在这 25 年间相对稳定, 维持在 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 左右; 夏季北黄海表层的磷酸盐浓度较低, 20 世纪 70—90 年代都保持在 $0.2 \sim 0.3 \mu\text{mol/L}$ (图 7(a)、(e)、(i)). 对于底层, 夏季渤海湾底层的磷酸盐浓度显著下降, 从 20 世纪 70 年代的 $0.6 \mu\text{mol/L}$ 降低到 20 世纪 90 年代的 $0.2 \mu\text{mol/L}$ 左右, 且在 20 世纪 70—80 年代的降低最明显; 而渤海中部磷酸盐浓度基本不变, 维持在 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{mol/L}$ 范围内; 在北黄海中部、南部海区夏季底层的磷酸盐浓度呈现升高趋势, 从 20 世纪 70 年代的 $0.5 \mu\text{mol/L}$ 逐渐增加到 20 世纪 90 年代末的 $0.9 \mu\text{mol/L}$, 而在北黄海北部底层磷酸盐浓度基本保持在 $0.3 \mu\text{mol/L}$ (图 7(b)、(f)、(j)).

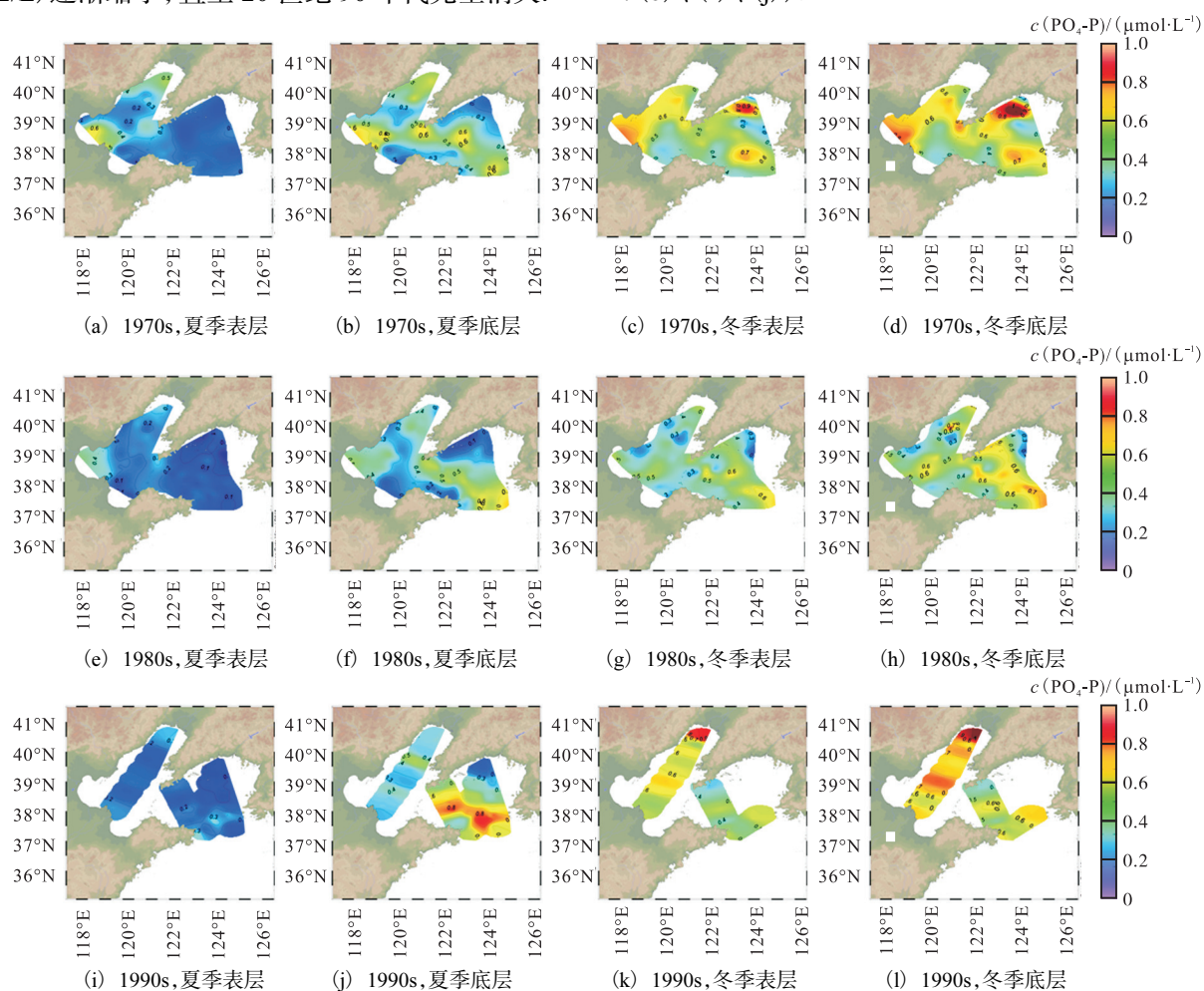


图 7 渤海和北黄海磷酸盐空间分布年代间差异

Fig. 7 Inter-decadal variations of horizontal distribution of $\text{PO}_4\text{-P}$ in BS and NYS

冬季渤海磷酸盐浓度, 除莱州湾和其北侧海区外, 其他海区呈现“先降低, 后升高”的趋势. 在 20 世纪 70 年代, 冬季渤海表层磷酸盐浓度整体高于 $0.5 \mu\text{mol/L}$, 在 20 世纪 80 年代, 降至约 $0.3 \mu\text{mol/L}$, 而到 20 世纪 90 年代, 磷酸盐浓度普遍升至 $0.6 \mu\text{mol/L}$, 甚至在辽东湾北部, 高于 $1.0 \mu\text{mol/L}$ (图 7(c)、(g)、(k)). 渤海底层变化情况与表层基本一致. 冬季北黄海的北部海域 (123.5°E , 39.0°N) 磷酸盐浓度从 20 世纪 70 年代中期的 $1.0 \mu\text{mol/L}$ 降低到 20

世纪 80 年代的 $0.5 \mu\text{mol/L}$, 而北黄海其他海域年际变化不大, 基本在 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{mol/L}$ 的范围内波动 (图 7(d)、(h)、(l)). 在这 25 年间, 夏季渤海磷酸盐变化在 20 世纪 70—80 年代最显著, 而北黄海表、底层磷酸盐的显著变化则发生在 20 世纪 80—90 年代. 冬季表现为“先降低, 后升高”, 辽东湾变化最显著.

渤海和北黄海硅酸盐空间分布年代间差异如图 8 所示.

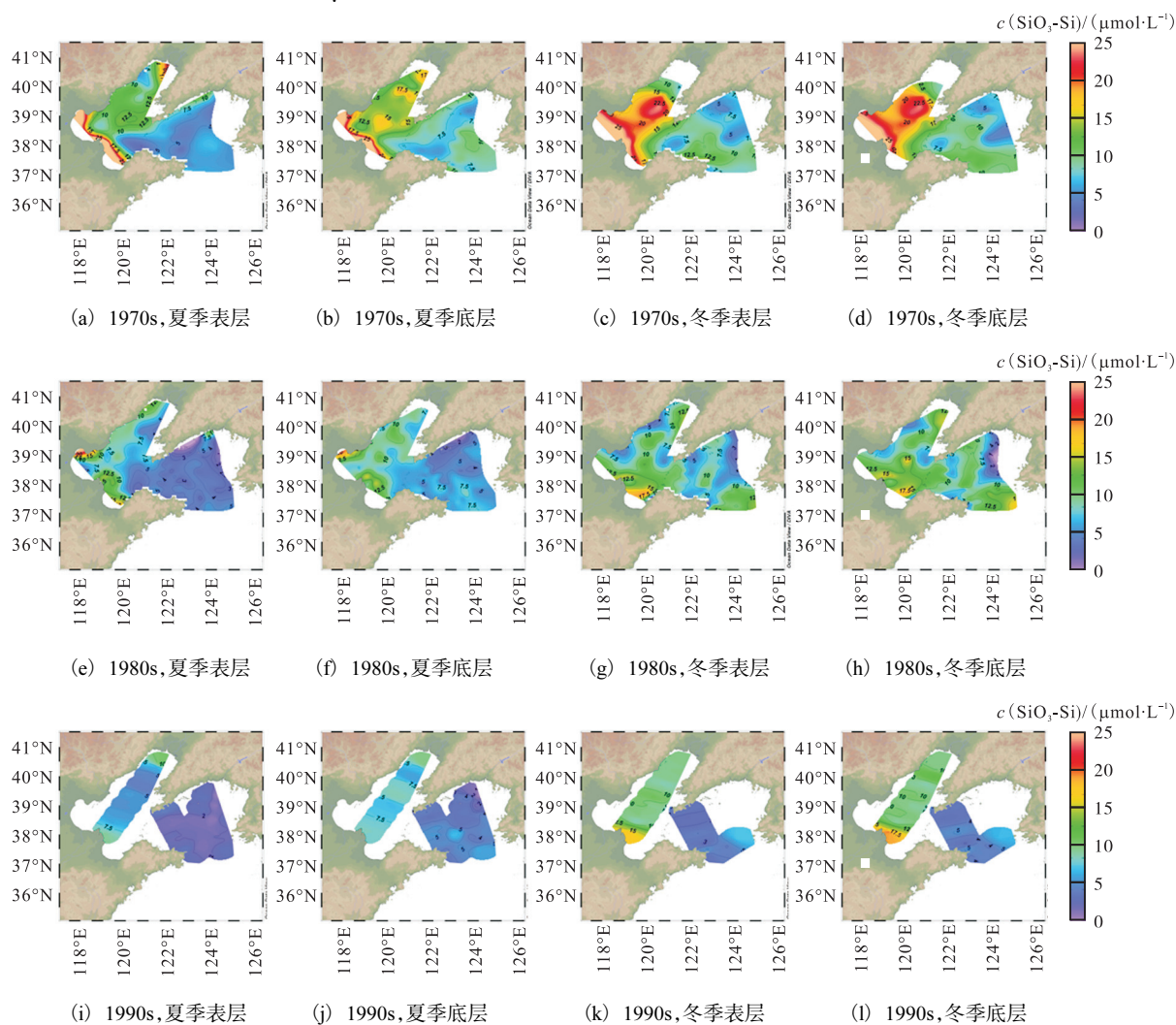


图 8 渤海和北黄海硅酸盐空间分布年代间差异

Fig. 8 Inter-decadal variations of horizontal distribution of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ in BS and NYS

由图 8 可知: 在 20 世纪 70 年代, 夏季渤海近岸海域, 硅酸盐浓度非常高, 如海河附近海域硅酸盐浓度高达 $25.0 \mu\text{mol/L}$, 黄河口附近海域硅酸盐浓度高达 $30.0 \mu\text{mol/L}$, 辽河口附近海域硅酸盐浓度也可达到 $20.0 \mu\text{mol/L}$ (图 8(a)); 到 20 世纪 80 年代, 莱州湾和辽东湾硅酸盐浓度降低到 $12.0 \sim 15.0 \mu\text{mol/L}$, 而渤海湾内的海河口附近海域成为渤海硅酸盐浓度最高

的海区, 硅酸盐浓度为 $20.0 \mu\text{mol/L}$; 到 20 世纪 90 年代, 可以看到整个渤海中部硅酸盐浓度不高, 平均浓度仅为 $5.6 \mu\text{mol/L}$. 对于北黄海来说, 在 20 世纪 70 年代夏季北部海域存在高值区, 硅酸盐浓度超过 $10.0 \mu\text{mol/L}$, 20 世纪 80 年代北黄海硅酸盐浓度整体下降, 平均浓度为 $4.0 \mu\text{mol/L}$, 至 20 世纪 90 年代, 进一步降低到 $2.1 \mu\text{mol/L}$ (图 8(a)、(e)、(i)). 底层硅酸

硅酸浓度高于表层,但变化规律与表层基本一致。

冬季硅酸盐表、底分布和变化基本一致,渤海湾和渤海中部海区硅酸盐浓度在20世纪70年代较高,平均浓度超过 $20.0\text{ }\mu\text{mol/L}$,到20世纪80年代快速降低至 $10.0\sim 12.5\text{ }\mu\text{mol/L}$,而直到20世纪90年代,硅酸盐浓度依然维持在 $10.0\text{ }\mu\text{mol/L}$ 水平(图8(c)、(g)、(k))。在北黄海,相比20世纪70年代,20世纪80年代硅酸盐分布相似,浓度略有降低,20世纪90年代显著降低。在25年间,渤海和北黄海硅酸盐波动较大,表现出明显的降低趋势。

3 结 语

本文利用渤海和北黄海1975—1999年溶解氧和营养盐的历史数据,分析溶解氧与营养盐年际变化特征和空间分布年代间差异,研究结果表明:在25年间,渤海和北黄海溶解氧整体上呈现降低趋势,且冬季降低程度要比夏季明显,冬季溶解氧受温度影响比夏季更为显著。海水温度升高是造成研究海域内溶解氧浓度降低的主要因素之一。渤海和北黄海的夏季表层磷酸盐和硅酸盐浓度在这25年间逐渐降低,且在20世纪80年代中期(1984—1987年)出现显著性降低,几乎降至零水平;底层磷酸盐浓度除渤海北部和北黄海出现升高趋势外,其他海域表现为降低趋势。冬季的营养盐在20世纪80年代中期出现最低值,表、底层变化基本一致。入海径流量的减少是硅酸盐浓度降低的主要原因,而沿海人类活动加剧造成无机氮的增加。

目前,本文只是研究渤海与北黄海溶解氧与营养盐年际变化特征和规律。今后,将对溶解氧和营养盐影响机制进行深入研究。

参考文献:

- [1] 崔毅,宋云利,杨琴芳,等. 渤海浮游植物与理化环境关系初探[J]. 海洋环境科学,1992,11(3):56-59.
- [2] 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(2):1-12.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Liu H, Yin B. Numerical investigation of nutrient limitations in the Bohai Sea[J]. Marine Environmental Research, 2010, 70(3/4):308-317.
- [6] 蒋红,崔毅,陈碧鹃,等. 渤海近20年来营养盐变化趋势研究[J]. 渔业科学进展,2005,26(6):61-67.
- [7] 阚文静,张秋丰,石海明,等. 近年来渤海湾营养盐变化趋势研究[J]. 海洋环境科学,2010,29(2):238-241.
- [8] 谢琳萍,孙霞,王保栋,等. 渤黄海营养盐结构及其潜在限制作用的时空分布[J]. 海洋科学,2012,36(9):45-53.
- [9] Lin C, Ning X, Su J, et al. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976-2000[J]. Journal of Marine Systems, 2005, 55(3/4):223-234.
- [10] 高磊,李道季. 黄、东海西部营养盐浓度近几十年来的变化[J]. 海洋科学,2009,33(5):64-69.
- [11] Li H M, Zhang C S, Han X R, et al. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: Sources and seaward gradients[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2014, 163:44-55.
- [12] Wei Q, Yao Q, Wang B, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea[J]. Continental Shelf Research, 2015, 111:184-196.
- [13] 刘春利,葛长宇,张玉娟,等. 黄海表层溶解氧时空分布特征[J]. 海洋环境科学,2017,36(2):255-260.
- [14] 吴强明. 黄、渤海溶解态营养盐研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2001.
- [15] 张辉,石晓勇,张传松,等. 北黄海营养盐结构及限制作用时空分布特征分析[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39(4):773-780.
- [16] 石晓勇,臧璐,张传松,等. 北黄海典型断面生源要素四季变化的研究[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39(4):757-766.
- [17] 臧璐. 北黄海生源要素的季节特征及冷水团对其影响的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [18] Levitus S. Climatological Atlas of the World Ocean: NOAA Professional Paper 13[R]. Rockville, MD.: U. S. Department of Commerce, 1982.
- [19] 王晓宇,杨红生,孙金生,等. 天津近岸海域氮磷营养盐分布及富营养化评价[J]. 海洋科学,2011,35(9):56-61.
- [20] 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.
- [21] Wang B D, Wang X L, Zhan R. Nutrient conditions in the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2003, 58(1):127-136.

- [22] 李岫, 仵彦卿, 范海梅. 高维空间插值在海洋环境数据预处理中的应用[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 729–733.
- [23] 叶丰, 黄小平, 刘庆霞. 2010年夏季珠江口海域溶解氧的分布特征和海气交换通量[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 44–49.
- [24] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [25] 张竹琦. 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[J]. 海洋通报, 1990(4): 22–26.
- [26] 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: 自然科学版, 2006, 36(2): 287–290.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Lin C, Su J, Xu B, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem[J]. Progress in Oceanography, 2001, 49(1): 7–19.
- [30] Ning X, Lin C, Su J, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960–1996[J]. Deep-Sea Research Part II, 2010, 57(11): 1079–1091.
- [31] 方国洪, 王凯, 郭丰义, 等. 近30年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 515–523.
- [32] 于志刚, 米铁柱, 谢宝东, 等. 二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(1): 15–19.
- [33] 石强. 渤海夏季海水磷酸盐年际时空演变[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 395–402.
- [34] 洪华生. 中国区域海洋学: 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [35] 马柱国. 黄河径流量的历史演变规律及成因[J]. 地球物理学报, 2005, 48(6): 1270–1275.
- [36] 孔岩, 王红, 任立良. 黄河入海径流变化及影响因素[J]. 地理研究, 2012, 31(11): 1981–1990.
- [37] 巩瑶. 黄河下游利津站营养盐输送规律及影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [38] 王修林, 李克强. 渤海主要化学污染物海洋环境容量[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [39] 罗琳, 李适宇, 厉红梅. 夏季珠江口水域溶解氧的特征及影响因素[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2005, 44(6): 118–122.

责任编辑: 周建军

(上接第44页)

- [6] 董俊霞, 杨志捧. 抗静电织物的设计与开发[J]. 棉纺织技术, 2007, 35(5): 57–59.
- [7] 伏广伟, 贺显伟, 陈颖. 导电纤维与纺织品及其抗静电性能测试[J]. 纺织导报, 2007(6): 112–114.
- [8] 王少伟, 乐珮珮, 张昆, 等. 导电 TiO_2 在聚酰胺中分散性的研究[J]. 化工新型材料, 2014(7): 51–53.
- [9] Wang H Y, Wang G W, Zheng C L, et al. Synthesis of acid dyes containing polyetheramine moieties and their low-temperature dyeing properties on wool fiber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(6): 45793–45801.
- [10] 王洪燕, 潘福奎, 张守斌. 羊毛纤维结构和细化方法概述[J]. 现代纺织技术, 2009, 17(1): 55–58.
- [11] Wang X C, Liu J, Zhang S J, et al. Flexible conductive polyaniline-silica/polypropylene composite membrane[J]. Synthetic Metals, 2012, 162(15/16): 1459–1463.
- [12] 景遐斌, 王利祥, 王献红, 等. 导电聚苯胺的合成、结构、性能和应用[J]. 高分子学报, 2005, 5(5): 655–660.
- [13] Huang J, Virji S, Weiller B H, et al. Polyaniline nanofibers: Facile synthesis and chemical sensors[J]. Journal of the American Chemical Society, 2003, 125(2): 314–315.
- [14] 邵春霞, 张丽华, 苏玲. 原位吸附聚合法在制备聚苯胺导电复合材料中的应用[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2014, 12(1): 27–31.
- [15] Hu X Z, Wang X C, Liu J, et al. Fabrication of mesoporous dendritic silica nanofibers by using dendritic polyaniline templates[J]. Materials Chemistry & Physics, 2012, 137(1): 17–21.
- [16] Parel M M P, Gillado A V, Herrera M U. Morphology and electrical conductivity of polyaniline coating on acetate film[J]. Surfaces & Interfaces, 2018, 10: 74–77.
- [17] Wang X, Li Y, Zhao Y, et al. Synthesis of PANI nanostructures with various morphologies from fibers to micromats to disks doped with salicylic acid[J]. Synthetic Metals, 2010, 160(17): 2008–2014.
- [18] 赵玮婷. 导电高分子聚苯胺的合成与掺杂及其对导电性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2005.

责任编辑: 周建军