

海洋工程影响下连云港徐圩海域 海洋水环境变化

邵 帅¹, 张爱军², 张晶晶³, 胡亚斌², 王以斌^{2*}, 臧家业²

(1. 连云港市环境监测监控中心, 江苏 连云港 222000; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;
3. 鲁东大学滨海生态高等研究院, 山东 烟台 264025)

摘 要:徐圩港区建设是连云港的重点海洋工程。基于2009—2016年的海洋环境监测数据,分析了其建设前后的海洋环境变化,探讨了大型海洋工程建设对区域海洋环境的长期累积影响。结果表明:2009—2016年研究海域表层海水年平均温度逐渐上升,无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)的质量浓度也有明显上升趋势,且2013—2016年间DIN质量浓度年均值已超过二类海水水质标准,而盐度逐渐下降,溶解氧(dissolved oxygen, DO)和叶绿素 a (chlorophyll a , Chl- a)质量浓度亦呈下降趋势;营养状态评估显示水域富营养化指数均在轻度富营养化以上,其中2011年和2015—2016年为中等富营养化,营养状态指数均为中等营养状态,有机污染指数自2011年后均为轻度污染等级;相关性分析显示化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、DIN和活性磷酸盐(dissolved inorganic phosphorus, DIP)的质量浓度存在显著正相关关系,且在海洋工程建设之前各水环境要素间的相关性较建设期间显著;工程建设使得海域Chl- a 质量浓度明显降低及对营养盐的依赖性降低。所以徐圩港区围填海施工对于海洋水环境的影响是明显且持久的,建设期间环境要素变化剧烈,水体富营养化程度较高。

关键词:徐圩港区;围填海;海洋环境;水体富营养化;水体营养状态

中图分类号:X55; P753

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)03-0232-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.03.008

引用格式:SHAO S, ZHANG A J, ZHANG J J, et al. Variations of marine environment in the Xuwei coastal waters of Lianyungang under the influence of marine engineering[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(3): 232-241. 邵帅, 张爱军, 张晶晶, 等. 海洋工程影响下连云港徐圩海域海洋水环境变化[J]. 海岸工程, 2021, 40(3): 232-241.

近年来,伴随着海洋经济的不断发展,我国海洋开发力度不断增强,围填海活动频繁。比如江苏省连云港市在1985—2016年围填海累计近830 km²,约占其陆域面积的10.9%,如此大规模的围填海,导致沿海的岸线形态和近岸潮流场已明显发生改变^[1],滨海湿地和海洋资源退化严重^[2]。伴随着沿岸河流和陆源排污入海的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、氨氮、总磷等污染物不断增多,连云港海洋环境污染日趋严重,近海富营养化程度较高^[3-4],亦导致赤潮、浒苔“绿潮”等生态灾害频发^[5-6],海洋综合承载类型已为“超载”类型,达到“重警”预警等级^[7]。因此,对该海域海洋环境的保护、治理与修复已刻不容缓。

徐圩新区位于连云港东南部沿海,是新兴的石化产业基地。为推动徐圩新区石化产业园产品的输出,2010年底开工建设徐圩港区,将其作为连云港“一体三翼”港口建设的重要组成部分,2016年底建设完成防波堤等主体工程,形成现状岸线,后期堆场及码头等工程将在防波堤形成的港池内继续建设。徐圩港区堆场、泊位及其防波堤、航道等建设周期长,围填海面积大(约49.5 km²),已属于“特大型”海洋工程范畴,对区域的海洋生态环境和海洋资源而言,港区围填海占用滨海湿地、破坏生物栖息地、改变区域潮流及水动力环境^[8],其对生态环境的破坏性和持续影响持久且深远。

收稿日期:2021-02-23

作者简介:邵 帅(1986—),男,工程师,主要从事海洋环境监测方面研究。E-mail: 363831969@qq.com

* **通信作者:**王以斌(1983—),男,工程师,博士,主要从事海洋生态环境方面研究。E-mail: wangyibin@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

为明确该工程对海洋生态环境的影响和长期累积效应,将研究 2009—2016 年间徐圩港区周边海域的海洋调查数据,分析该海域在徐圩港区建设前后的海洋环境变化,探讨海洋工程建设对海洋环境的影响,进而阐明海域环境变化的控制因素和影响要素,以为该海域海洋资源与生态环境管理、海洋开发利用决策和海洋生态修复策略制定提供重要的科学依据和数据支持。

1 材料和方法

1.1 研究海域范围

连云港徐圩港区 2010 年底开工建设,至 2016 年底完成防波堤建设,形成现状岸线和港池。研究海域在 2009—2017 年的岸线变化及主要海洋工程概况如图 1 所示,可知 2016 年底港区现状形成后没有继续大规模填海。2009—2016 年间在研究海域进行了 24 个季节航次的海洋环境调查,其中 2009 年 5 月至 2010 年 1 月调查了连续 4 个季节,2011 年 2 月至 2012 年 11 月调查了连续 8 个季节,2013 年 8 月至 2016 年 5 月调查了连续 12 个季节。

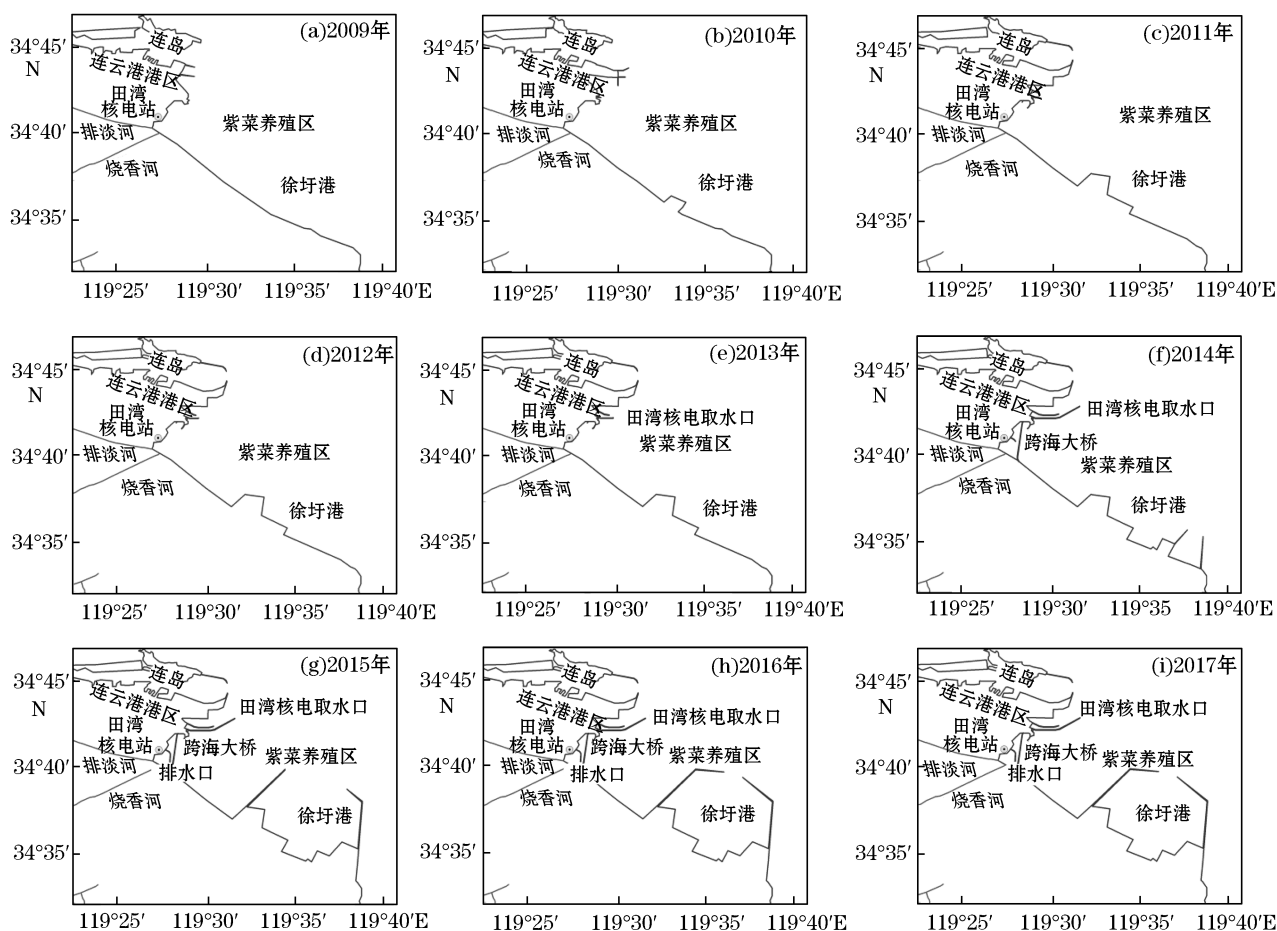


图 1 研究海域 2009—2017 年海岸线变迁及海洋开发活动示意图

Fig.1 A sketch map of the coastline changes and marine exploitation activities in the study area from 2009 to 2017

1.2 研究要素与分析方法

调查要素包括水温(θ)、盐度(S)和溶解氧(dissolved oxygen, DO)、化学需氧量(chemical oxygen de-

mand,COD)、无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)、活性磷酸盐(dissolved inorganic phosphorus, DIP)、悬浮物(suspended solids, SS)、叶绿素 *a* (chlorophyll *a*, Chl-*a*)、石油类(Oil)的质量浓度等。利用 Origin 17.0 软件绘制各水环境要素年变化图,利用 SPSS 18.0 软件分析要素之间的相关性。

采用富营养化指数法^[9]评估海域的富营养化程度,富营养化状态指数(*E*)的计算方法^[9]为

$$E = \frac{\rho_{\text{COD}} \times \rho_{\text{DIN}} \times \rho_{\text{DIP}}}{4\ 500} \times 10^6, \tag{1}$$

式中: ρ_{COD} 、 ρ_{DIN} 和 ρ_{DIP} 为海水中 COD、DIN 和 DIP 的质量浓度实测值,单位为 mg/L。当 $E \geq 1$ 时,水体为富营养化,其中,当 $1 \leq E \leq 3$ 时,水体为轻度富营养化,当 $3 < E \leq 9$ 时,水体为中度富营养化,当 $E > 9$ 时,水体为重度富营养化。

采用营养状态质量指数法^[10]评估海域的富营养化程度和营养状态水平,营养状态质量指数(nutrient quality index, NQI)计算式^[10]为

$$\text{NQI} = \frac{\rho_{\text{COD}}}{\rho'_{\text{COD}}} + \frac{\rho_{\text{DIN}}}{\rho'_{\text{DIN}}} + \frac{\rho_{\text{DIP}}}{\rho'_{\text{DIP}}} + \frac{\rho_{\text{Chl-}a}}{\rho'_{\text{Chl-}a}}, \tag{2}$$

式中: ρ_{COD} 、 ρ_{DIN} 、 ρ_{DIP} 和 $\rho_{\text{Chl-}a}$ 为海水中 COD、DIN、DIP 和 Chl-*a* 的质量浓度实测值; ρ'_{COD} 、 ρ'_{DIN} 、 ρ'_{DIP} 和 $\rho'_{\text{Chl-}a}$ 均为一类海水标准值,分别为 3.0 mg/L、0.3 mg/L、0.03 mg/L 和 5 μg/L。当 $\text{NQI} \leq 2$ 时,水体营养等级为 I 级,为贫营养化状态;当 $2 < \text{NQI} \leq 3$ 时,水体营养等级为 II 级,为中等营养化状态;当 $\text{NQI} > 3$ 时,水体营养等级为 III 级,为富营养化状态。

采用有机污染综合指数法^[11]评价海域的有机污染状况,有机污染指数(*A*)的计算公式^[11]为

$$A = \frac{\rho_{\text{COD}}}{\rho'_{\text{COD}}} + \frac{\rho_{\text{N}}}{\rho'_{\text{N}}} + \frac{\rho_{\text{P}}}{\rho'_{\text{P}}} - \frac{\rho_{\text{DO}}}{\rho'_{\text{DO}}}, \tag{3}$$

式中: ρ_{COD} 、 ρ_{N} 、 ρ_{P} 和 ρ_{DO} 分别为海水 COD、DIN、DIP 和 DO 的质量浓度实测值; ρ'_{COD} 、 ρ'_{N} 、 ρ'_{P} 和 ρ'_{DO} 均为一类海水标准值,分别为 2.0 mg/L、0.2 mg/L、0.015 mg/L 和 6.0 mg/L。当 $A \leq 0$ 时,水质良好;当 $0 < A \leq 1$ 时,水质较好;当 $1 < A \leq 2$ 时,水体开始受到有机污染;当 $2 < A \leq 3$ 时,水体轻度有机污染;当 $3 < A \leq 4$ 时,水体中度有机污染;当 $4 < A \leq 5$ 时,水体重度有机污染。

2 结果与分析

2.1 海洋水环境状况及年际变化

以年度为单位(每一年度时间段内均含有完整的 4 个季节,年均值为 4 个季节调查结果的均值)对 2009—2016 年连云港徐圩海域主要水环境参数进行统计,结果见表 1,主要水环境要素的年变化见图 2。

表 1 2009—2016 年连云港徐圩海域主要水环境要素调查结果

Table 1 The main water environmental elements investigated in the Xuwei coastal waters of Lianyungang from 2009 to 2016

时 间	$\theta/^\circ\text{C}$	<i>S</i>	$\rho_{\text{DO}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{COD}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{DIN}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{DIP}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{SS}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{Oil}}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho_{\text{Chl-}a}/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	站 位 数
2009-05—2010-01	14.54	30.23	8.81	1.51	0.15	0.019	74.59	0.051	3.20	20
2011-02—2011-11	16.73	31.03	8.44	1.91	0.29	0.024	48.56	0.021	0.62	15
2012-02—2012-11	16.19	29.07	8.71	2.28	0.26	0.021	47.22	0.017	1.58	15
2013-08—2014-05	16.40	29.50	8.00	1.40	0.32	0.023	69.22	0.012	1.50	15
2014-08—2015-05	16.76	28.51	8.06	1.49	0.31	0.019	50.36	0.024	1.77	15
2015-08—2016-05	18.17	29.06	8.01	1.86	0.37	0.020	33.16	0.021	1.41	27

由表 1 和图 2 可知,连云港徐圩海域 2009—2016 年主要水环境要素在年际间均存在明显变化。DO、Chl-*a* 和 Oil 的质量浓度(图 2c、图 2i、图 2h)和盐度(图 2b)年均值呈现下降趋势,水温(图 2a)和 DIN(图 2e)的质量浓度呈现明显的上升趋势,而 COD(图 2d)和 DIP(图 2f)质量浓度的年际变化虽呈现波动性,但没有明显的趋势性。2009—2016 年研究海域内水温的年均值已升高了约 2 °C。2015—2016 年度的 DIN 质量浓度年均值已达 2009—2010 年度的 2 倍,且自 2013 年开始 DIN 质量浓度年均值已超过二类海水水质标准值(0.3 mg/L)。DIP 质量浓度年均值在 2009—2010 年升高后基本维持稳定;COD 的质量浓度年均值在 2013

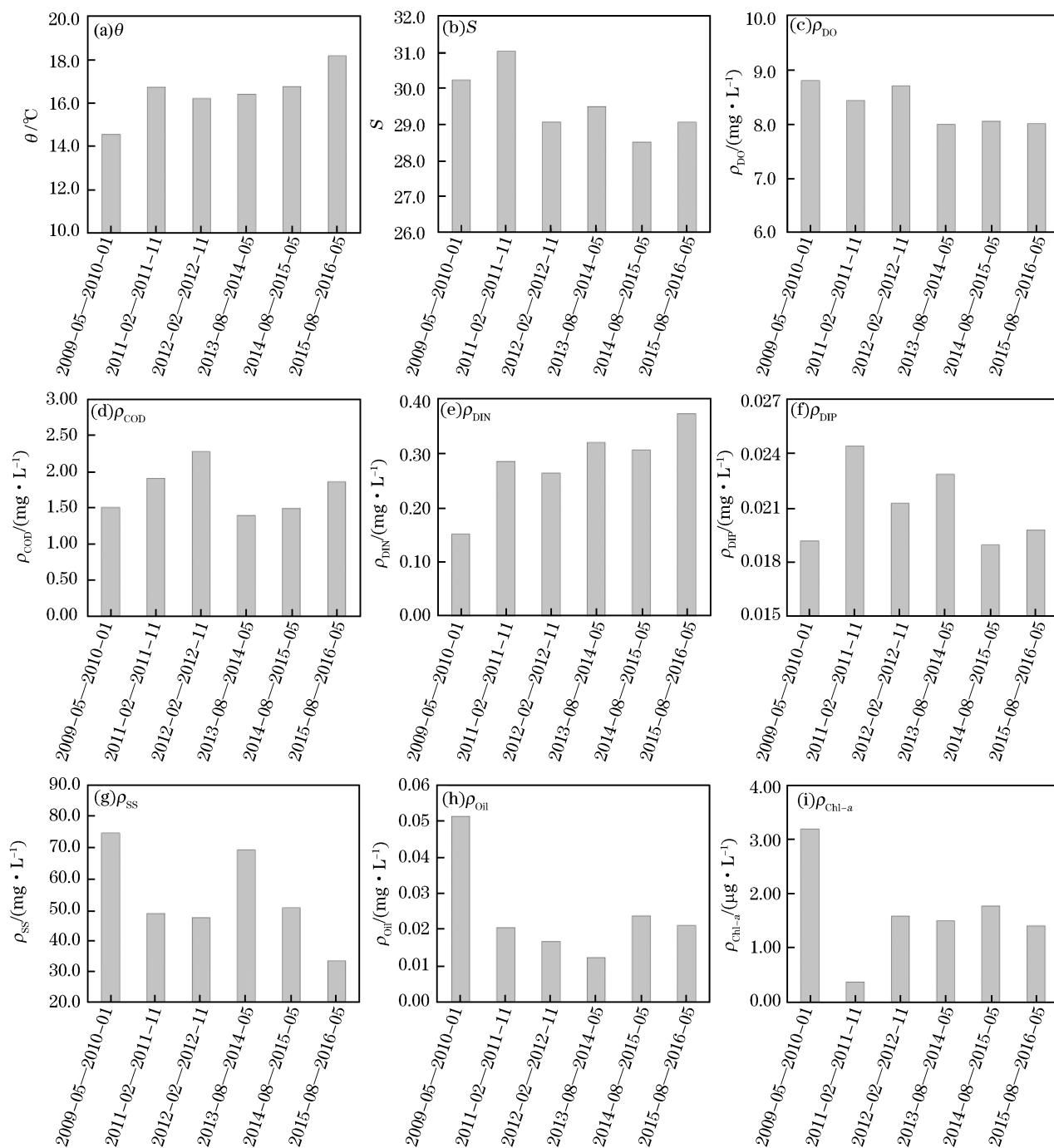


图 2 连云港徐圩海域 2009—2016 年各水质要素的年变化

Fig.2 The annual variations of water quality elements in the Xuwei coastal waters of Lianyungang from 2009 to 2016

年之前有明显增加趋势,其后大幅降低后趋于稳定。DO 质量浓度年均值呈现波动性下降,趋势明显;盐度年均值经历 2009—2011 年的升高后呈现大幅下降,且下降趋势明显;Chl-*a* 质量浓度年均值在 2009—2010 年较高,但 2011 年呈断崖式下降,下降了约 80%,其后缓慢回升趋于稳定但质量浓度较低;油类质量浓度年均值在 2009—2010 年较高,其他 5 个年度的年均值均较低;SS 质量浓度在 2009—2010 年和 2013—2014 年年均值较高,其他年份较低。

综合分析表明,从 2009—2010 年度到 2011—2012 年度各要素均有明显的转折点。本文将根据海域内主要海洋工程的施工及运行情况分析其与海洋环境变化的关系。

2.2 水环境的营养状态评估

富营养化指数(E)和营养状态质量指数(NQI)反映了海域内 COD、DIN、DIP 质量浓度和 Chl-*a* 质量浓度之间的关系,与有机污染指数(A)结合分析可综合反映水体的营养状态。3 种指数对营养状态评估结果的年变化见图 3。

由图 3 可知,自 2009—2011 年,研究海域的海水营养状态呈急剧富营养化, E 和 A 均有明显增幅。 E 从 2009 年的 1.3 急剧增加至 2011 年的 3.8,达中度富营养化状态; A 从 1.3 增至 2.6,达到轻度有机污染状态;NQI 增幅不明显,从 2.3 增至 2.5,这表明海域为中等营养化状态。2011—2016 年, E 在 2011 年达到高值($E=3.8$)后呈下降趋势,于 2013 年和 2015 年分别降至 1.7 和 1.9,说明水体为轻度富营养化状态;但在 2015—2016 年 E 又急剧上升至 4.3,水体又变为中度富营养化状态。NQI 的结果表明 2009—2016 年间该海域均为中等营养化状态($2<NQI\leq 3$); A 指数略有波动,但一直是 $A>2$,表明该海域在此时间段内均为轻度有机污染状态。这 3 个指数的年际变化说明研究海域水体已呈现中度富营养化和轻度污染状态。此外,该海域 E 和 A 的转折点与水环境参数的年际变化区间与趋势一致,亦说明了围填海等海洋开发利用活动对海洋生态环境的巨大影响。

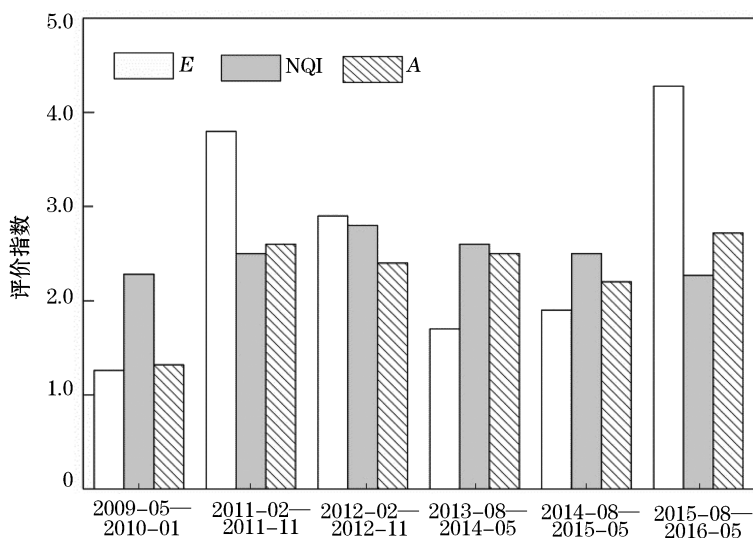


图3 连云港徐圩附近海域 2009—2016 年海水营养状态的年变化

Fig.3 The annual variations of the water nutritional status in the waters near the Xuwei coastal waters of Lianyungang from 2009 to 2016

综合 3 种指数的评价结果,自 2011 年以来,研究海域处于轻度到中度富营养化、中等营养化和轻度有机污染的状态,并且 2009 年度至 2011 年度增幅显著。李亚丽等^[4]研究显示连云港海域 2012—2013 年处于富营养化状态,且程度较严重;杨华等^[12]研究表明徐圩海域 2012—2013 年处于富营养状态,氮磷

比失衡,营养状态为磷限制型;张晓昱等^[13]研究显示海州湾紫菜增养殖区 2012 年富营养化程度最高,此后有所缓解。这些结论均与本研究结果一致,表明该海域内的外源干扰因素对于海洋水体的富营养化具有明显的影响。

2.3 水环境要素的相关性

鉴于徐圩港区自 2010 年后开始围填海施工,因此本文将数据分为环境本底期数据(2009—2010 年)和建设期数据(2011—2016 年),分别对其进行相关性分析,结果如所示。

由表 2 可知:水温(θ)与 COD、DIN、DIP 和 Chl- a 的质量浓度呈显著正相关关系($P<0.01$),而水温与盐度(S)和 DO、SS、Oil 的质量浓度呈显著负相关($P<0.01$),表明水温在控制海水各要素的变化中具有重要的作用。温盐的显著负相关关系表明低温季节盐度高,高温季节盐度低,说明了夏季较多的降雨和陆源淡水输入对海域盐度的影响。水温与 DO 质量浓度的显著负相关关系亦说明季节变化引起水温变化与 DO 质量浓度变化之间的关系,其变化规律符合北温带夏季水温高、DO 质量浓度低,冬季水温低、DO 质量浓度高的特点^[4]。盐度与 DO、SS、Oil 的质量浓度呈显著正相关,与 DIN、DIP、Chl- a 的质量浓度呈显著负相关,同样说明当夏季随着降雨带来的大量淡水输入后降低了海水盐度,以及淡水输入携带氮磷营养盐对海水营养盐的影响以及对浮游植物生长的贡献;同时,水温与 COD、DIN、DIP 的质量浓度的显著正相关性说明陆源 COD 和氮磷的输入量在夏季是最多的。水温与 Oil 质量浓度的显著负相关、盐度与 Oil 质量浓度的正相关以及水温与盐度之间的关系,表明冬季海域内 Oil 的质量浓度较高,说明低温季节(秋冬季)作为紫菜养殖生产季节,养殖业船舶高密度作业以及频繁发生的油污泄漏对海洋环境的影响^[4]。DIN 与 DIP 的质量浓度呈显著正相关,同时二者与盐度呈显著负相关,表明二者分布和来源具有一致性,即主要随陆域淡水输入进入海洋。DO 质量浓度与 COD、DIN、DIP、Chl- a 的质量浓度呈显著负相关,表明 DO 与富营养化的指标之间存在显著负相关关系,说明近海水体的富营养化促进了海域的低氧现象的产生^[14]。Chl- a 质量浓度与水温呈显著正相关,与 COD、DIN、DIP 的质量浓度呈显著正相关关系,Chl- a 质量浓度与盐度和 DO、SS、Oil 的质量浓度呈显著负相关,表明了水温和营养盐对浮游植物生长的正向促进作用以及悬浮物、Oil 等对其生长的抑制。SS 与 Oil 的质量浓度的显著正相关也表明养殖活动和海洋工程施工船舶作业造成的扰动对海水 SS 质量浓度的影响以及因船舶含有污水排放及燃油泄漏导致的油污染^[4]。

表 2 连云港徐圩海域 2009—2010 年海洋水环境要素的相关性

Table 2 Correlations among the water enviromental elements in the Xuwei coastal waters of Lianyungang from 2009 to 2010

要 素	θ	S	ρ_{DO}	ρ_{COD}	ρ_{DIN}	ρ_{DIP}	ρ_{SS}	ρ_{Oil}	ρ_{Chl-a}
θ	1								
S	-0.72 **	1							
ρ_{DO}	-0.82 **	0.41 **	1						
ρ_{COD}	0.48 **	-0.18	-0.50 **	1					
ρ_{DIN}	0.43 **	-0.35 **	-0.63 **	0.16	1				
ρ_{DIP}	0.51 **	-0.43 **	-0.48 **	0.24 *	0.41 **	1			
ρ_{SS}	-0.33 **	0.36 **	0.03	0.05	0.33 **	-0.10	1		
ρ_{Oil}	-0.69 **	0.41 **	0.47 **	-0.39 **	-0.03	-0.29 **	0.40 **	1	
ρ_{Chl-a}	0.86 **	-0.56 **	-0.62 **	0.42 **	0.29 **	0.39 **	-0.30 **	-0.74 **	1

注:**表示显著性水平为 0.01;*表示显著性水平为 0.05

港区建设期的水环境要素相关性分析(表 3)表明:水温同样在控制各要素的变化中具有重要作用,但各要素之间的相关性已不如建设期之前显著。水温与 DO 质量浓度的相关性依然显著,表明二者之间是自然

存在的关系,与工程等没有显著关联。盐度与 COD、DIN、DIP 的质量浓度呈显著负相关,且 COD、DIN、DIP 三者的质量浓度之间存在显著正相关,表明它们具有共同的来源,即陆源淡水的输入。此外 SS 质量浓度与 DIN 和 DIP 的质量浓度之间存在显著正相关,表明海洋工程建设加剧了海水中 SS 的质量浓度,使其吸附的氮磷营养盐释放增加了海域内的氮磷质量浓度。Chl-*a* 与 DIN 的质量浓度已由建设期之前的显著正相关变为显著负相关,同时与 DIP 质量浓度没有明显的相关关系,这表明海域内 Chl-*a* 质量浓度及其对应的浮游植物的生物量和生长过程对营养盐的依赖性发生了转变;此外结合建设期间 Chl-*a* 质量浓度大幅降低的结果,表明建设期的工程施工使得海域浮游生物量明显减少。

表 3 连云港徐圩海域 2011—2016 年海洋水环境要素相关性

Table 3 Correlations among the water enviromental elements in the Xuwei coastal waters of Lianyungang from 2011 to 2016

要 素	θ	S	ρ_{DO}	ρ_{COD}	ρ_{DIN}	ρ_{DIP}	ρ_{SS}	ρ_{Oil}	ρ_{Chl-a}
θ	1								
S	-0.29 **	1							
ρ_{DO}	-0.94 **	0.35 **	1						
ρ_{COD}	0.13 **	-0.26 **	-0.06	1					
ρ_{DIN}	-0.16 **	-0.53 **	0.07	0.27 **	1				
ρ_{DIP}	-0.08	-0.26 **	0.02	0.24 **	0.54 **	1			
ρ_{SS}	-0.33 **	0.05	0.27 **	0.01	0.16 **	0.16 **	1		
ρ_{Oil}	0.06	0.14 **	-0.06	0.11 *	-0.04	0.00	0.01	1	
ρ_{Chl-a}	0.40 **	0.03	-0.32 **	0.16 **	-0.30 **	-0.08	-0.04	0.05	1

注: ** 表示显著性水平为 0.01; * 表示显著性水平为 0.05

2.4 环境变化与海洋开发利用的关系

研究期间该区域内的海洋工程除了徐圩港区的围填海及航道深挖清淤施工(建设期:2010—2016 年)外,还有田湾核电的取水明渠施工和温排水(2011—2016 年)、连云港港区的围填海(2009—2012 年)、连云港跨海大桥工程施工(2013—2014 年)以及近海大面积的紫菜养殖(2009—2016 年)等,这些海洋开发利用活动在时空范围内所产生的叠加与累积效应,对当地海洋生态环境影响明显,不仅会导致水环境的变化,还会引起浮游生物、底栖生物等生境质量的显著下降和种群结构的演替^[8,15]。

主要水环境要素的年变化趋势显示 2011—2012 年是变化的拐点,这一时期正是徐圩港区围填海的开始,也与连云港港区围填海以及田湾核电取水明渠的施工期重叠。海域内 Chl-*a* 质量浓度急剧下降,与围填海施工产生的扰动有明显的关系,施工引起 SS 质量浓度的增加,导致浮游植物生物量的降低,从而引起 Chl-*a* 质量浓度下降;SS 与 Oil 的质量浓度的显著正相关关系亦说明围填海工程建设期间产生的大量 SS 和工程船舶机械等产生的油污等对海域有明显影响;同时,拐点年份的富营养化和有机污染程度是最严重的。水温年均值的升高可能受到了核电温排水的影响,因为徐圩港区围堰和防波堤建成后,影响了近岸的潮流流向和流速^[1,16],使得温排水的扩散受到了影响,温升不能及时传递到外海,所以提升了徐圩港区北侧海域的水温。由连云港港区与徐圩港区之间海域(田湾核电温排水影响区域)在 2009—2016 年间冬季和夏季水温的累年均值空间分布(图 4)可明显看出区域内温度梯度的变化;DIN 的升高与陆源输入有直接关系,围填海的建设导致 SS 吸附的 DIN 释放对其增加也有影响;同时,DIN 的空间分布也表明了陆源输入和围填海建设对海域 DIN 质量浓度的增加影响显著^[4]。盐度的降低与海域降水和淡水输入有密切关系,也符合连云港海

域盐度变化的大趋势^[17];此外,DO 质量浓度的降低与水温的升高还与沿海水体的富营养化密切相关^[14]。显然,研究海域环境的变化既与海域开发利用有明显关系,亦与陆源输入有关,连云港海洋主管部门的监测结果显示陆源输入携带的 COD、氨氮和磷酸盐对近岸海域水体污染严重,且逐年上升^①。

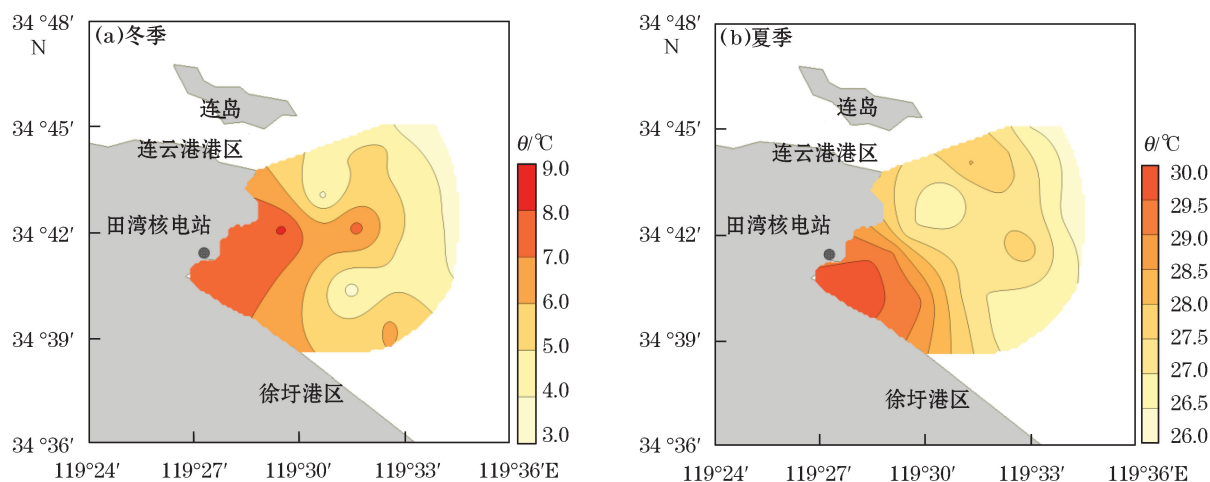


图4 田湾核电温排水影响区域 2009—2016 年的冬、夏季多年水温空间分布

Fig.4 Spatial distributions of years water temperature in winter and summer in the area influenced by the warm water discharge from the Tianwan Nuclear Power Station during 2009 to 2016

此外,2011—2014 年大规模围填海阶段海域内的浮游植物以耐污藻种中肋骨条藻和拟菱形藻占据绝对优势种,多样性指数降至较低水平;而后随着围填海施工减少,其他优势种出现(该数据另文发表),这也表明围填海对海洋生态环境有显著负面影响。研究显示连云港的赤潮多爆发于连岛及连云港港区周边海域^[5],本文研究海域自 2008 年以来未有赤潮爆发记录,然而 2017 年在排淡河至徐圩埭子口附近(即环绕徐圩港区近岸海域)爆发了中肋骨条藻和链状裸甲藻赤潮^[18],这或许是上述工程的生态环境累积效应所导致。

综上所述,连云港海域的海洋工程和养殖等海洋开发利用活动显著影响了当地的海洋环境,尤其是围填海施工对于水环境要素的影响十分显著,此时间段内海域富营养化最严重,生态环境生境质量明显下降。应警惕海域内围填海施工等导致水环境富营养化带来的潜在的赤潮和浒苔等生物灾害风险。

3 结 论

本文研究了 2009—2016 年间徐圩港区建设前后海洋水环境变化特征和趋势,利用富营养化状态指数(E)、营养状态质量指数(NQI)和有机污染指数(A)三种营养状态指数阐述了海域的营养状态及其年际变化,分析了水环境要素之间的相关性,探讨了海洋工程建设对区域海洋环境的影响,结果表明:

①2009—2016 年间,研究海域表层海水年平均水温呈上升趋势,盐度逐渐下降;DIN 质量浓度明显上升,2013 年后其年均值已超过二类海水水质标准;DO 和 Chl- a 的质量浓度呈波动下降趋势。

②海域处于富营养化和有机污染的状态;指数 E 显示 2011 年和 2015—2016 年度为中等富营养化状态,NQI 显示该时期内海域均为中等营养化状态,指数 A 表明自 2011 年后海域均为轻度有机污染等级。

③相关性分析显示 COD、DIN、DIP 的质量浓度存在显著正相关;徐圩港区建设之前水环境要素之间的相关性较其建设期间显著;工程建设使得海域 Chl- a 质量浓度明显降低、其与营养盐的相关关系明显改变。

①连云港市海洋与渔业局. 2016 年连云港市海洋环境质量公报. 2017.

连云港徐圩港区及周边海洋工程显著影响了近岸海洋环境,工程建设期影响最显著,导致海域水环境变化剧烈、富营养化明显、生境质量下降,应警惕海洋工程引起海洋环境变化及富营养化带来的潜在生物灾害风险。

参考文献(References):

- [1] LIU H, YU Z Y, ZHANG H, et al. Effect of engineering on the topographic evolution at Lianyungang sea areas[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(1): 6-11. 刘红, 虞志英, 张华, 等. 连云港工程建设对周边海域地形影响分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(1): 6-11.
- [2] LI Y, ZHU X, SUN X, et al. Landscape effects of environmental impact on bay-area wetlands under rapid urban expansion and development policy: a case study of Lianyungang, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 94(3/4): 218-227.
- [3] LI Y L, XU M, LI P F, et al. Seasonal variations of eutrophication and the influential factors in the adjacent water of Lianyungang[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 116-123. 李亚丽, 徐敏, 李鹏飞, 等. 连云港近岸海域富营养化水平的季节性变化及其影响因素[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2014, 37(3): 116-123.
- [4] WANG Y B, SHAO S, MA Y X, et al. Nutritional status and temporal spatial variations research in the Lianyungang coastal area[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3899-3909. 王以斌, 邵帅, 马永星, 等. 连云港近海海洋环境营养状态时空变化研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(10): 3899-3909.
- [5] GAO Q Q, CAO B, YANG B, et al. Characteristics of the red tide in the sea area of Jiangsu[J]. Marine Science Bulletin, 2017, 36(2): 217-221, 229. 高清清, 曹兵, 杨波, 等. 江苏海域赤潮分布特征研究[J]. 海洋通报, 2017, 36(2): 217-221, 229.
- [6] GAO S, FAN S L, HAN X R, et al. Relations of *Enteromorpha prolifera* blooms with temperature, salinity, dissolved oxygen and pH in the Southern Yellow Sea[J]. China Environmental Science, 2014, 34(1): 213-218. 高嵩, 范士亮, 韩秀荣, 等. 浒苔绿潮与南黄海近岸海域水质的关系[J]. 中国环境科学, 2014, 34(1): 213-218.
- [7] ZHANG X Y, YUAN G W, JIAO X M, et al. Assessment of marine resource and environmental carrying capacity in Lianyungang City [J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(4): 537-544. 张晓昱, 袁广旺, 矫新明, 等. 连云港市海洋资源环境承载力评估研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(4): 537-544.
- [8] ZHANG Q F, JIN Y D, LI X B, et al. Progress in the impact of reclamation projects on offshore marine environment[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(4): 454-461. 张秋丰, 靳玉丹, 李希彬, 等. 围填海工程对近岸海域海洋环境影响的研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 454-461.
- [9] HUANG Y N, WU M M. Application of eutrophication index in the coastal waters of China[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(2): 316-320. 黄亚楠, 吴孟孟. 富营养化指数法在中国近岸海域的应用[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(2): 316-320.
- [10] CHU F, LIU X B, LIU Z G, et al. Eutrophication assessment and principal component analysis of the Tianjin coastal waters[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 107-112. 褚帆, 刘宪斌, 刘占广, 等. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 107-112.
- [11] LIN X J, GAO S, ZHANG T Y, et al. Research progress and application status of eutrophication evaluation method of seawater[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 373-384. 林晓娟, 高姗, 仇天宇, 等. 海水富营养化评价方法的研究进展与应用现状[J]. 地球科学进展, 2018, 33(4): 373-384.
- [12] YANG H, JIANG H H, WAN Y, et al. Study on the characteristics of nutrients and eutrophication assessment of the northern waters near Guanhe estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(1): 155-161. 杨华, 江辉煌, 万晔, 等. 灌河口北部海域氮磷营养盐分布及富营养化评价[J]. 海洋湖沼通报, 2015(1): 155-161.
- [13] ZHANG X Y, YUAN G W, MAO C Z, et al. Assessment of environment quality in important *Porphyra yezoensis* mariculture zones of Jiangsu province[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2017, 26(4): 78-83. 张晓昱, 袁广旺, 毛成贵, 等. 江苏重点紫菜增殖区环境质量状况评价[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2017, 26(4): 78-83.
- [14] BREITBURG D, LEVIN L A, OSCHLIES A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters[J]. Science, 2018, 359(6371), eaam7240. Doi:10.11261/science.aam7240.
- [15] DUAN H, ZHANG H, HUANG Q, et al. Characterization and environmental impact analysis of sea land reclamation activities in China [J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 130: 128-137.
- [16] ZHANG W, LIU R, QIAN W, et al. Influence of large-scale coastal engineering on hydrodynamics and sediment transport[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(1): 1-7. 张玮, 刘燃, 钱伟, 等. 大型海岸工程对水流和泥沙运动的影响研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 1-7.

- [17] LIU F C, LIU J T, GUO Y Y. Multifractal analysis of Lianyungang coastal sea surface temperature and salinity variety[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2011(3): 157-162. 刘付程, 刘吉堂, 郭衍游. 连云港海域表层海水温度、盐度变化的多重分形分析[J]. 海洋湖沼通报, 2011(3): 157-162.
- [18] State Oceanic Administration. China marine disaster bulletin of 2017[EB/OL]. (2018-04-23)[2021-05-05]. http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619_1798021.html. 国家海洋局. 2017 年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2018-04-23)[2021-05-05]. <http://gc.mnr.gov.cn/201806/t20180619-1798021.html>.

Variations of Marine Environment in the Xuwei Coastal Waters of Lianyungang Under the Influence of Marine Engineering

SHAO Shuai¹, ZHANG Ai-jun², ZHANG Jing-jing³, HU Ya-bin², WANG Yi-bin², ZANG Jia-ye²

(1. *Environmental Monitoring and Control Center of Lianyungang*, Lianyungang 222000, China;

2. *First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China;

3. *Institute for Advanced Study of Coastal Ecology, Ludong University*, Yantai 264025, China)

Abstract: Construction of the Xuwei Port is one of the important marine projects in Lianyungang. Based on the data collected from 2009 to 2016, the variations of marine environment before and after the port construction are analyzed and the long-term and cumulative influences of the large-scale marine engineering constructions on the regional marine environment are discussed. The results show that in the waters studied from 2009 to 2016 the mean annual temperature of the surface water increased gradually and the concentration of dissolved inorganic nitrogen (DIN) tended also to increase significantly, with the annual average value of the DIN concentration being over the Class II Seawater Quality Standard in the years from 2013 to 2016, whereas the salinity decreased gradually and the concentrations of dissolved oxygen (DO) and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) showed also a decrease trend. The assessment of nutritional status indicated that the eutrophication indexes in the study waters were all above the mild eutrophication, with a status of medium-eutrophication being in 2011 and from 2015 to 2016. The indexes of organic pollution were all in a level of light pollution in the years after 2011. The correlation analysis shows that there existed significant positive correlations among the concentrations of COD, DIN and DIP and the correlations among the water environmental factors are more significant before the port construction than during the port construction. The engineering construction caused the significant reductions in the Chl-*a* concentration and in the dependency on nutritional salts as well. It is therefore concluded that the reclamation in the Xuwei Port area could exert obvious and long-lasting impact on the marine water environment, the environmental elements in the study waters could be changed severely during the port construction and the eutrophication degree of the water could become higher.

Key words: Xuwei Port area; reclamation; marine environment; water eutrophication; water nutritional status

Received: February 23, 2021