

# 曹妃甸近海营养盐和叶绿素 *a* 的时空分布及其影响因素研究

刘西汉<sup>1,2,3,4</sup>, 王玉珏<sup>1</sup>, 石雅君<sup>1</sup>, 刘东艳<sup>1,5</sup>, 王艳霞<sup>3,4</sup>,  
田海兰<sup>3,4</sup>, 程林<sup>3,4</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 河北省科学院地理科学研究所 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心, 河北石家庄 050011; 4. 河北省科学院地理科学研究所 河北海岸带生态与环境联合实验室, 河北石家庄 050011; 5. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 本文通过 2014 年 5 月、2013 年 8 月在曹妃甸周边海域分别实施春季、夏季航次, 分析了营养盐和叶绿素 *a* (Chl *a*) 的时空分布特征、影响因素及其与温度、盐度、化学耗氧量 (COD)、悬浮颗粒物 (SPM) 的关系, 评估了水体营养状态和营养盐限制状况, 并且结合历史资料探讨了围填海前后营养状况的变化情况。结果表明: 调查海域无机氮 (DIN)、磷酸盐 (DIP) 和硅酸盐 (DSi) 受到河流输入和沉积物释放作用的显著影响, 其高值区主要出现在曹妃甸两侧的近岸海域; 营养状态质量指数 (*NQI*) 在 1.07 ~ 2.23 之间, 处于贫营养或中营养状态; 营养盐限制状况具有季节差异, 春季主要为 Si 限制, 夏季主要为 P 限制; Chl *a* 在春季的高值区主要分布在东侧远岸海域和东北侧内湾海域, 与盐度、P 和 Si 密切相关, 其夏季高值区出现在龟头和内湾附近海域, 与 P 和 Si 关系紧密。结合历史资料的比较表明春季 DIN、*NQI* 和 Chl *a* 在西侧海域有所降低, 在东侧海域有所升高, 这是由于围填海后潮流变化的空间差异造成了营养盐的重新分布, 而夏季各断面多为 DIN 和 *NQI* 降低而 Chl *a* 升高, 表明营养盐被浮游植物充分利用, 需要结合浮游植物群落进一步分析围填海的影响。

**关键词:** 曹妃甸; 营养盐; 叶绿素 *a*; 时空分布; 围填海

中图分类号: Q948.8 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)01-0089-10

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2020.01.013

## Spatial and temporal distribution of nutrients and chlorophyll *a* and their influential factors in Caofeidian coastal waters

LIU Xi-han<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Yu-jue<sup>1</sup>, SHI Ya-jun<sup>1</sup>, LIU Dong-yan<sup>1,5</sup>, WANG Yan-xia<sup>3,4</sup>,  
TIAN Hai-lan<sup>3,4</sup>, CHENG Lin<sup>3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hebei Engineering Research Center for Geographic Information Application, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 4. Co-Laboratory of Ecology and Environment of Hebei Coastal Zone, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 5. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Based on two cruises respectively carried out in May 2014 and August 2013 in Caofeidian coastal waters,

收稿日期: 2018-06-14, 修订日期: 2018-08-27

基金项目: 河北省科学院两院合作项目 (161304, J181601); 河北省科学院高层次人才资助项目 (2016022577-43); 中国科学院院地合作项目 (13001001); 国家自然科学基金 (41776126, 41676117)

作者简介: 刘西汉 (1987-) 男, 河北邢台人, 助理研究员, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: xihan\_ouc@126.com

通讯作者: 王玉珏, 副研究员, 主要从事藻类营养盐生理生态学研究, E-mail: yjwang@yic.ac.cn

temporal and spatial distributions of nutrients and chlorophyll *a* (Chl *a*), their influential factors and correlations with water temperature, salinity, chemical oxygen demand (COD) and suspended particle matter (SPM) were analyzed in this study. Trophic status and nutrient limitation were assessed, and changes of trophic status after land reclamation were discussed. The results showed dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphate (DIP) and dissolved silicate (DSi) were mainly affected by riverine inputs and sediment release with high values ordinarily occurred in inshore waters. Nutrient quality index (N<sub>QI</sub>) ranged from 1.07 to 2.23, indicating their oligotrophic or mesotrophic status. Nutrient limitations showed seasonal variations, which were Si limitation in spring and P limitation in summer. The high values of Chl *a* in spring were observed in eastern offshore waters and the northeastern bay, which was related to salinity, P and Si, while those in summer occurred near Caofeidian foreland and the northeastern bay, which was mainly related to P and Si. The comparison between historical data and this study revealed that in spring DIN, N<sub>QI</sub> and Chl *a* decreased in western sea areas and increased in eastern sea areas, which was possibly related to nutrients redistribution induced by spatial variations of tidal changes after reclamation, while in summer DIN and N<sub>QI</sub> decreased and Chl *a* increased in most study areas, suggesting nutrients were largely consumed by phytoplankton and influence of reclamation should be further discussed basing on phytoplankton community.

**Key words:** Caofeidian; nutrients; Chl *a*; distribution; reclamation

营养盐是海洋生态系统的重要组成部分,是评价海水营养状态的重要指标,其浓度、组成和时空分布可影响海水水质,改变浮游植物的生物量和群落结构,与赤潮、绿潮等生态灾害紧密相关<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着我国沿海地区经济的快速发展和人类活动强度的增加,大量营养盐从陆地输入海洋,造成近海营养盐浓度和结构的变化。以渤海为例,过去几十年中 DIN 浓度增加了约 5 倍, DIP 和 DSi 浓度下降了约 30% 和 60%,造成了赤潮频发、海洋生态系统失衡、渔业资源衰退等生态问题<sup>[2]</sup>。面对严峻的海洋环境保护形势,国家“十三五”规划提出“深入实施以海洋生态系统为基础的综合管理,推进海洋主体功能区建设,优化近岸海域空间布局,科学控制开发强度。严格控制围填海规模,加强海岸带保护与修复”的要求,将近海水环境的综合治理列为下一步的重点工作。

曹妃甸位于渤海湾北部,自 2004 年开始实施围填海,到 2011 年完成造陆面积 274.7 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>,此后围填活动基本停止,进入消化利用已有土地的阶段。围填海对近海富营养化具有不可忽视的影响,其作用往往是首先改变水动力环境,导致营养物质的转移和扩散发生改变,从而间接地改变水体营养状态<sup>[4]</sup>。例如,日本有明海(Ariake Sea)围填海之后,潮流流速下降了 10%~30%,河流输入的营养盐在海湾表层水体汇集, DIN 浓度甚至超过 40 μmol/L,藻华出现频次也急剧上升<sup>[5]</sup>。曹妃甸围填海之后,周边海域水动力环境已经发生了诸多变化,并且具有一定的空间差异:

甸头西侧海域潮流流速增加 2%~5%,东南侧海域略有降低,幅度在 2%~5% 之间,东北侧海域降低幅度最为显著,甚至超过 10%<sup>[6-7]</sup>。潮流流速的上述变化可能导致营养盐的空间格局发生改变,尤其是东北侧海域潮流流速的显著降低会造成营养盐难以向外输运,从而影响富营养化程度。然而,目前围绕曹妃甸海域开展的研究较少,尤其是围填海之后其营养盐、Chl *a* 等的空间分布特征、相互关系及其影响因素尚模糊不清,这也给讨论围填海对生态环境的影响带来了困难。

本研究通过 2013—2014 年间在曹妃甸海域春季、夏季两个航次的开展,对温度、盐度、COD、SPM、营养盐、Chl *a* 等生化因子的空间分布特征进行了分析,采用营养状态质量指数法评价了营养状态,基于营养盐结构讨论了营养盐限制情况,通过主成分分析法探讨了 Chl *a* 与环境因子之间的关系,并通过与历史资料的对比,讨论了围填海对海区营养状况的影响。研究结果对近海水环境治理以及围填海区域的补偿性环境整治具有重要的意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与站位布设

曹妃甸在 2004 年围填海实施之前是一离岸约 18 km 的沙岛,长约 8 km,宽约 0.4~0.7 km,沙岛北侧为平均水深约 1.5 m 的浅滩,南侧为最大水深可达 41 m 的潮汐深槽<sup>[8]</sup>,围填海之后北侧浅滩成为陆地,东北侧海域成为一个内湾(图 1)。曹妃甸海域的潮流以往复流为主,平均涨潮流速

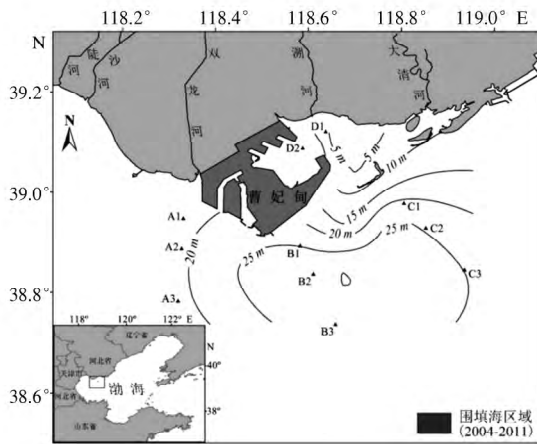


图 1 研究区域水深及采样站位

Fig. 1 Sampling sites and bathymetry of study area

为 0.36 ~ 0.56 m/s, 落潮为 0.24 ~ 0.44 m/s, 潮汐残余流速一般低于 0.10 m/s, 部分区域可达 0.20 m/s, 南侧深槽区是潮汐动力最强的海域<sup>[8]</sup>。近岸水体的悬浮泥沙含量明显大于外海, 西侧海域大于东侧海域。风浪是影响海域悬浮泥沙含量的主要原因, 风浪波高一般为 0.7 ~ 1.1 m<sup>[8]</sup>。

本研究于 2013 年 8 月和 2014 年 5 月在曹妃甸近岸海域 (118.319°E—118.936°E, 38.738°N—39.122°N) 先后实施了夏季、春季航次, 共布设 11 个采样站位 (图 1), 具体为: 参考 2004 年开展的《河北省海洋资源调查与评价》<sup>[9]</sup> 在曹妃甸西侧、南侧和东侧布设 A、B、C3 个断面, 每个断面设置 3 个采样站位, 此外在曹妃甸东北侧的内湾海域增设 D1 和 D2 站位。

### 1.2 样品采集与分析

本次调查使用 5 L 卡盖式采水器 (国家海洋技术中心) 采集海水。温度 (*T*) 和盐度 (*S*) 采用 YSI 6920 型多参数水质分析仪现场测定。将 500 mL 海水样品置于 -20℃ 下冷冻保存, 用于 COD 测定; 将 3 L 海水等分为 3 个平行样, 用 GF/F 滤膜进行现场过滤, 滤膜于 -20℃ 下避光冷冻保存, 用于 Chl *a* 测定, 结果取平均值; 取 300 ~ 500 mL 水样用 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤, 滤膜和滤液均置于 -20℃ 下冷冻保存, 滤膜用于测定 SPM, 滤液用于测定营养盐。测定过程主要参照《海洋监测规范》进行, COD 采用碱性高锰酸钾法, Chl *a* 采用分光光度法, SPM 采用称重法, 溶解无机氮 (DIN)、磷酸盐 (DIP) 和硅酸盐 (DSi) 由连续流动分析仪 (AA3, Seal, UK) 测定, 其中 DIN 为氨氮 (NH<sub>4</sub>-N)、硝态氮 (NO<sub>3</sub>-N) 和亚硝氮

(NO<sub>2</sub>-N) 三者浓度之和。

### 1.3 数据分析

营养盐限制情况参考 Justic 等提出的标准阈值<sup>[10]</sup> (表 1)。营养状态评价采用营养状态质量指数法<sup>[11]</sup>:

$$NQI = \frac{C_{COD}}{CS_{COD}} + \frac{C_{DIN}}{CS_{DIN}} + \frac{C_{DIP}}{CS_{DIP}} + \frac{C_{Chl\ a}}{CS_{Chl\ a}}$$

其中:  $C_{COD}$ 、 $C_{DIN}$ 、 $C_{DIP}$  和  $C_{Chl\ a}$  代表实测值,  $CS_{COD}$ 、 $CS_{DIN}$ 、 $CS_{DIP}$  和  $CS_{Chl\ a}$  代表标准值, 分别为 3 mg/L、0.3 mg/L、0.03 mg/L 和 5 μg/L。NQI < 2, 为贫营养状态; NQI 在 2 ~ 3 之间, 为中营养状态; NQI > 3, 为富营养状态。环境因子的空间等值线分布图采用 Surfer 12.0 绘制。环境因子之间关系的分析采用主成分分析法 (principal component analysis, PCA)。由于研究海域水深较浅, 垂直变化较小, 空间分布、营养状态评价和 PCA 分析主要针对表层海水进行。

表 1 营养盐限制因素标准<sup>[10]</sup>

Tab. 1 The limitation criterion of nutrients<sup>[10]</sup>

营养盐限制因子	绝对限制	相对限制		
		DIN/DIP	DSi/DIN	DSi/DIP
N 限制	DIN < 1 μmol/L	< 10	> 1	
P 限制	DIP < 0.1 μmol/L	> 22		> 22
Si 限制	DSi < 2 μmol/L		< 1	< 10

## 2 结果与讨论

### 2.1 温盐、SPM 和 COD 的时空分布特征

受大陆季风气候影响, 研究海域春季和夏季的海水温度、盐度具有明显差异 (图 2)。春季, 表层海水的温度范围为 12.95℃ ~ 17.30℃, 近岸浅水区水温较高, 远岸深水区水温较低。表层海水盐度范围为 31.15 ~ 31.71, 从西向东盐度逐渐升高, 表明春季河流的淡水输入主要影响西侧海域, 而东侧海域受外海影响更强。夏季, 水温范围为 17.72℃ ~ 27.08℃, 依然为近岸高、远岸低。盐度范围为 27.41 ~ 29.09, 其空间分布与春季存在较大差异, 表现为从北部近岸向南部远岸逐渐升高。曹妃甸地区的降水主要集中在夏季, 因此夏季河流输入的影响比春季更明显, 对曹妃甸两侧的近岸海域均具有不可忽视的影响。

春季 SPM 浓度范围为 1.32 ~ 19.32 mg/L, 夏季 SPM 浓度范围为 7.00 ~ 41.67 mg/L, 均体现为近岸高、远岸低的分布特点 (图 3), 这种分布格局

一方面是由于近岸海域水深较浅,容易受到波浪的搅拌作用而造成沉积物再悬浮<sup>[7]</sup>,另一方面也与河流输沙有关,周边河流夏季入海水量远远大

于春季<sup>[12]</sup>,带来了较多的泥沙使得研究区夏季SPM浓度高于春季,且近岸高、远岸低的分布规律更显著。

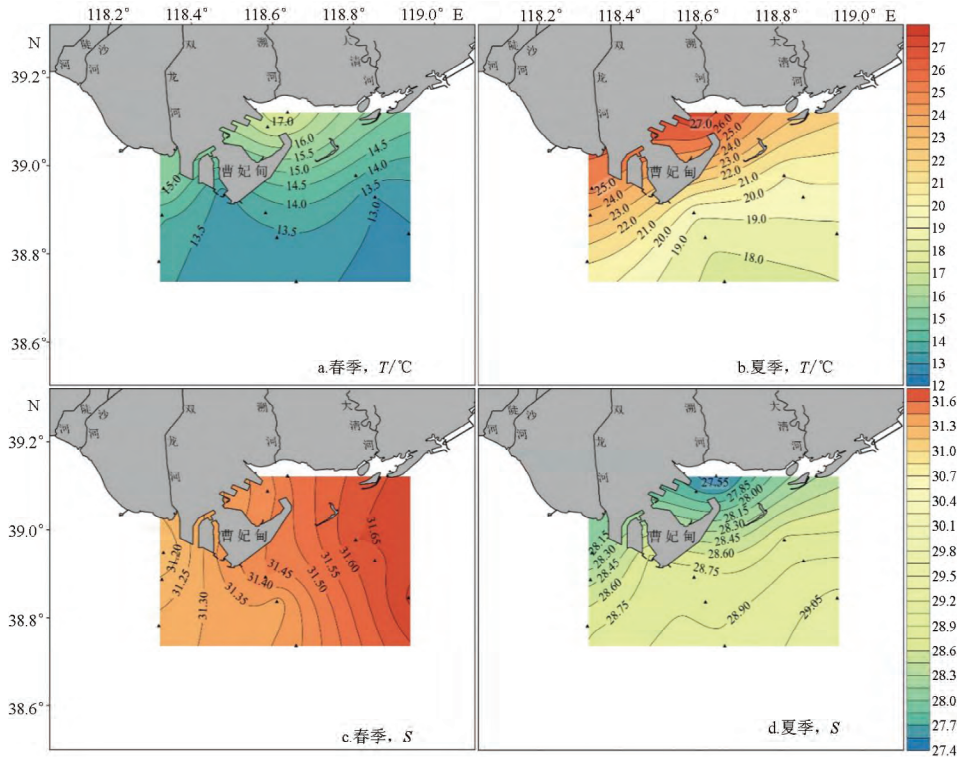


图2 曹妃甸海域温盐的时空分布特征

Fig. 2 Temporal and spatial variations of temperature and salinity in Caofeidian coastal waters

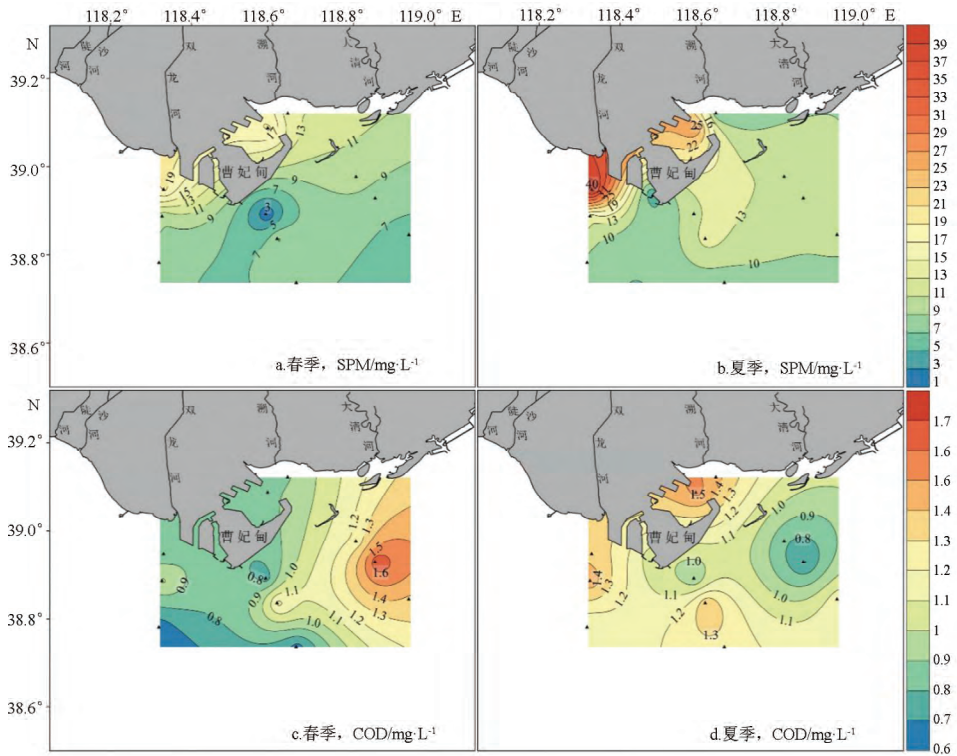


图3 曹妃甸海域 SPM 和 COD 的时空分布特征

Fig. 3 Temporal and spatial variations of SPM and COD in Caofeidian coastal waters

春季 COD 浓度范围为 0.64 ~ 1.67 mg/L, 夏季 COD 浓度范围与春季相差不大, 为 0.69 ~ 1.53 mg/L, 而同处渤海湾的天津、沧州等富营养海域的 COD 浓度往往可达到 2 mg/L 以上<sup>[13]</sup>, 这在一定程度上体现出曹妃甸海域的营养水平并不高。研究区 COD 的空间分布在不同季节间差别较大, 春季为东部浓度较高, 西部较低(图 3), 这与盐度的空间分布具有一定的相似性(图 2), 夏季为近岸、南侧以及西侧海域浓度较高, 东侧海域浓度较低(图 3), 意味着河流并不是影响 COD 空间分布格局的主导因素, 生物等其他因素也具有不可忽视的影响。

### 2.2 营养盐的时空分布及影响因素

如图 4 所示, 春季 DIN 浓度范围为 6.36 ~ 13.25  $\mu\text{mol/L}$ , 高值多出现在 D1、D2 和 A1 等近岸站点, 位于南侧海域的 B3 站点浓度也较高。DIP 浓度范围为 0.13 ~ 0.16  $\mu\text{mol/L}$ , DSi 浓度范围为 0.71 ~ 2.62  $\mu\text{mol/L}$ , 两者空间分布较为相似, 高值区主要分布在西侧海域, 内湾海域浓度也较高。夏季, DIN 浓度范围为 1.01 ~ 19.39  $\mu\text{mol/L}$ , 高值主要分布在曹妃甸西侧的近岸站点, 向东南方向浓度逐渐降低。DIP 和 DSi 浓度范围分别为 0.09 ~ 0.11  $\mu\text{mol/L}$  和 0.90 ~ 9.52  $\mu\text{mol/L}$ , 曹妃甸西侧海域浓度最高, 东侧海域次之, 内湾和南侧部分海域浓度较低。

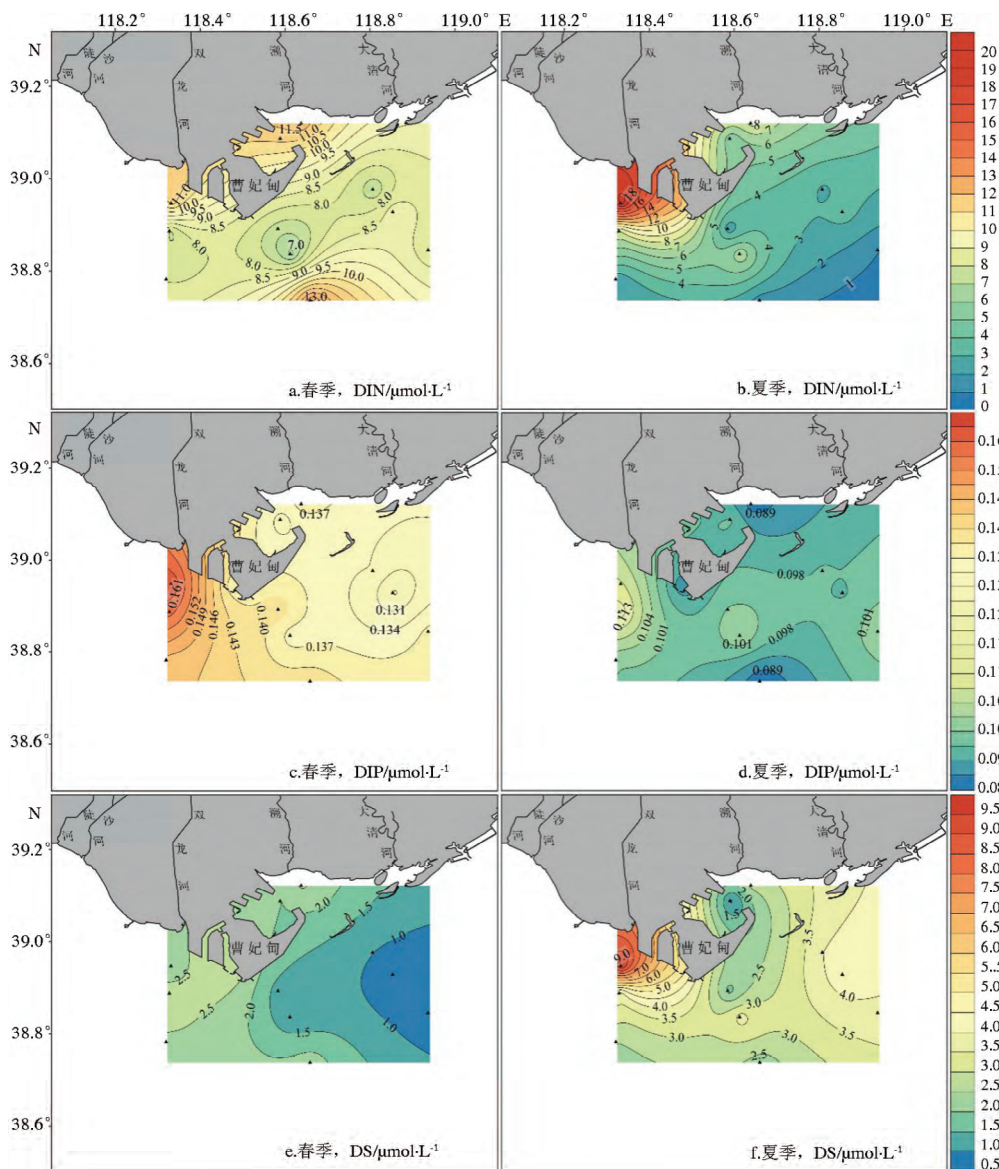


图 4 曹妃甸海域营养盐的时空分布特征

Fig. 4 Temporal and spatial variations of nutrients in Caofeidian coastal waters

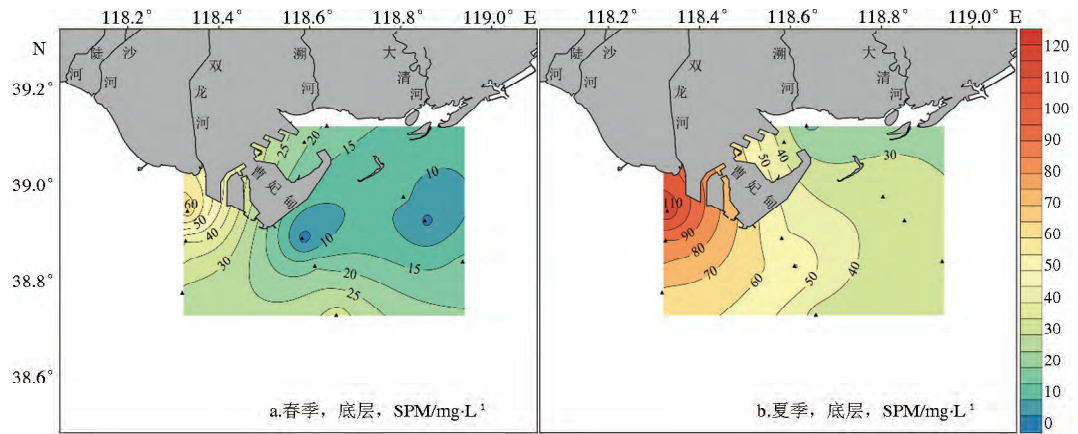


图5 曹妃甸海域底层水体 SPM 的时空分布特征

Fig. 5 Temporal and spatial variations of SPM in bottom waters of Caofeidian

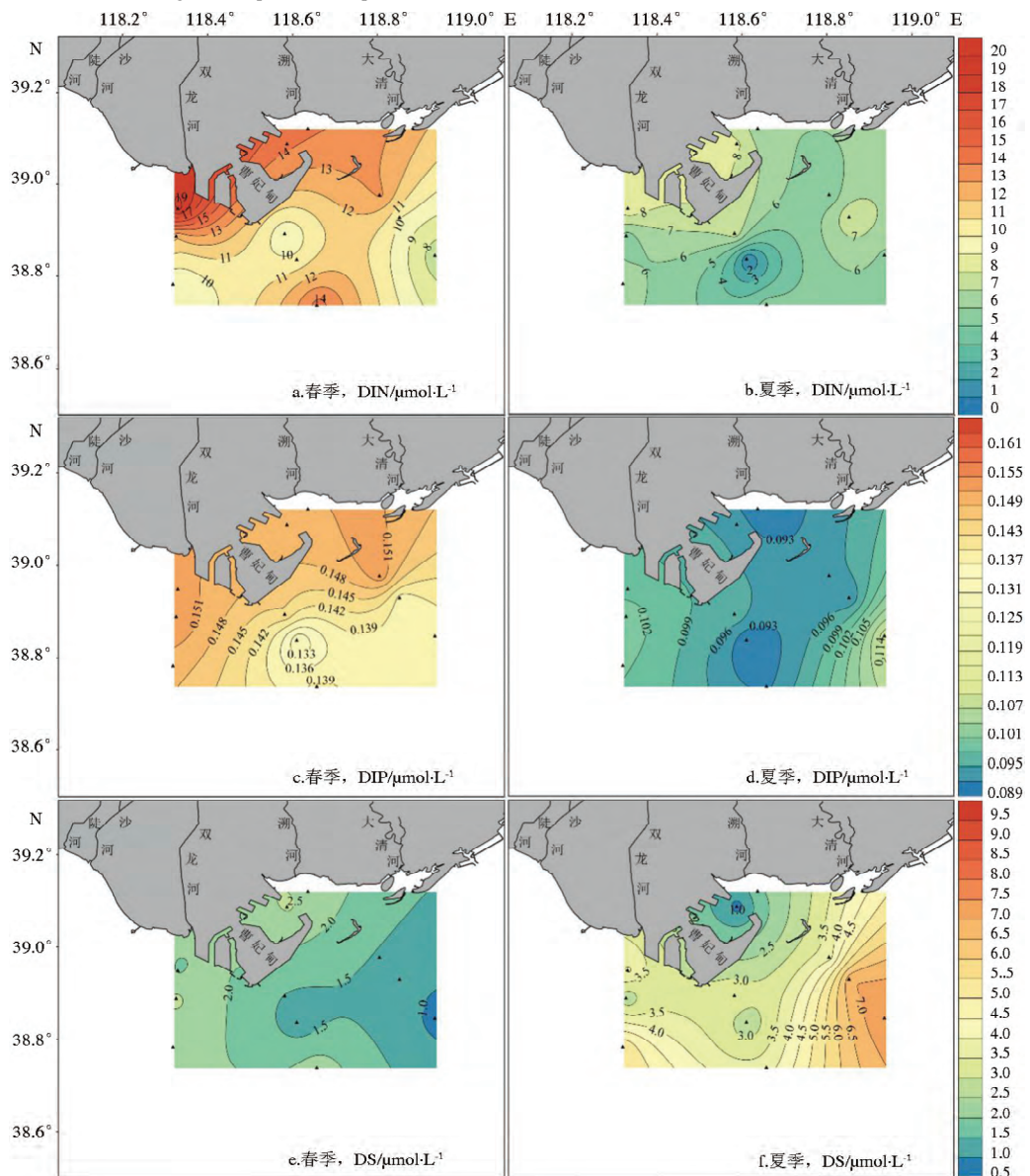


图6 曹妃甸海域底层水体营养盐的时空分布特征

Fig. 6 Temporal and spatial variations of nutrients in bottom waters of Caofeidian

近海营养盐的空间分布受河流输入、沉积物释放、大气沉降等多种因素的影响。曹妃甸周边地区无大型河流,但部分河口受 N、P 污染极其严重。沙河、陡河和双龙河是唐山市重点监测的入海排污河流,附近海域水质通常较差<sup>[13]</sup>。曹妃甸西侧双龙河口附近海域在夏季出现的 DIN 和 DSi 的高值区(图 4),即反映了双龙河输入带来的影响。部分河口虽然距曹妃甸较远,但在海流的作用下也可对研究海域带来一定影响。位于天津的海河口是渤海湾受 N、P 污染最为严重的河口之一,其 TN 和 TP 浓度分别可达到 405  $\mu\text{mol/L}$  和 7  $\mu\text{mol/L}$ ,超过 V 类水质标准<sup>[14]</sup>。秦延文等认为渤海湾西北角存在一顺时针沿岸余流<sup>[15]</sup>,海河、沙河和陡河输入的营养物质会在此余流作用下向东移动,从而对曹妃甸西侧海域的 DIN 和 DIP 高浓度现象具有一定贡献。曹妃甸东北侧海域在围填海之后形成一个内湾,溯河输入的营养物质较难交换到外部海域,这样就使得此处海域也出现 DIN 和 DIP 的高值区。根据《北海区海洋环境公报》,曹妃甸东西两侧的近岸海域水质较差,而南侧开阔海域的水质通常可以达到 I 类海水标准<sup>[16]</sup>,这与本研究中 DIN 和 DIP 的空间分布规律较为吻合(图 4)。

沉积物的释放作用对上层水体营养盐也具有一定贡献<sup>[17]</sup>,在此结合底层水体的 SPM(图 5)和营养盐(图 6)进行分析。曹妃甸两侧近岸的浅水

区受风浪的搅拌作用,沉积物再悬浮作用较强,悬浮泥沙含量甚至可达外侧海域的数倍<sup>[8]</sup>,在本研究中表现为西侧海域是 SPM 的高值区,且底层明显高于表层(图 3,图 5),这促进了营养盐从沉积物释放进入上层水体。春季,曹妃甸西侧海域的 DIN 受沉积物释放影响最为显著,底层浓度接近表层浓度的两倍,然而对于 DIP 和 DSi 而言,表层和底层基本没有差别。根据 Liu 等研究,渤海水体中仅有 8% 的 DIP 来自于沉积物<sup>[17]</sup>,因此沉积物释放特征十分容易受到其他因素的干扰。本研究中 DIP 高值区通常不出现在 SPM 浓度最高的 A1 站位,而是 A2 站位,即表明可能受到更西侧海域的影响<sup>[15]</sup>;渤海水体中高达 60% 的 DSi 来自于沉积物<sup>[17]</sup>,但春季调查海域普遍处于 Si 限制状态,沉积物释放的 Si 可以迅速被浮游植物利用,这可能是造成 DSi 没有出现表底差别的原因。夏季,河流输入对营养盐的空间分布占主导地位,沉积物释放的影响相对较弱,只在东侧海域有所体现。

浮游植物生长对营养盐的消耗作用也不可忽视,例如夏季内湾海域受到溯河输入影响,然而其 DIN、DIP 和 DSi 浓度均不高。此处为 Chl *a* 的高值区(图 7),意味着浮游植物对营养盐产生了强的消耗作用,导致营养盐浓度较低,而曹妃甸西侧的高营养盐和相对低的 Chl *a* 浓度可能与高浓度 SPM 减弱光照而影响了浮游植物生长有关。

表 2 曹妃甸近海营养盐比例及营养状态质量指数评价结果

Tab. 2 The nutrient ratios and *NQI* in Caofeidian coastal waters

站位	春季				夏季			
	N/P	Si/N	Si/P	<i>NQI</i>	N/P	Si/N	Si/P	<i>NQI</i>
A1	68.36	0.21	14.13	1.46	175.88	0.49	86.35	2.13
A2	46.72	0.35	16.49	1.39	69.32	0.48	33.02	1.55
A3	53.74	0.31	16.65	1.29	22.85	1.08	24.67	1.38
B1	50.95	0.17	8.76	1.07	23.17	0.78	18.13	1.73
B2	47.03	0.17	8.12	1.26	65.73	0.55	35.84	1.63
B3	93.14	0.17	16.03	1.54	16.09	1.57	25.19	1.08
C1	53.07	0.14	7.43	1.69	28.78	1.42	40.85	1.46
C2	69.81	0.08	5.56	1.91	35.72	1.25	44.54	1.16
C3	58.35	0.09	5.23	2.23	9.81	3.77	36.96	1.18
D1	85.61	0.22	18.58	1.80	92.33	0.32	29.68	1.59
D2	84.01	0.18	15.03	2.01	53.21	0.17	9.19	1.82
平均	64.62	0.19	12.00	1.60	53.90	1.08	34.95	1.52

### 2.3 海域营养状况评价

为综合考虑营养盐和浮游植物生长对海域营

养状态的影响,本文选取 *NQI* 指数<sup>[11]</sup>对曹妃甸表层水体的营养状况进行评价。此次调查中 *NQI*

范围为 1.07 ~ 2.23 ,大部分站位为贫营养状态 ,只有少数站位属于中营养状态 ,没有出现富营养现象(表 2) 。春季 *NQI* 值范围为 1.07 ~ 2.23 ,较高值出现在 C 和 D 断面 ,其中 C3 和 D2 的 *NQI* 值分别为 2.23 和 2.01 ,属于中营养状态。夏季 *NQI* 值比春季略低 ,其范围为 1.08 ~ 2.13 ,较高值出现在 A 和 D 断面 ,其中 A1 站位 *NQI* 值最高 ,达到 2.13 ,为中营养状态。《北海区海洋环境公报》的富营养化评价结果与本研究相似 ,同样表明曹妃甸大部分海域的富营养化程度较为轻微<sup>[16]</sup>。本次调查结果虽然表明海河、沙河、陡河、双龙河和溯河等会对研究海域造成一定影响 ,但由于多为小型河流或者距离较远 ,其影响仅限于近岸地区 ,曹妃甸南侧和东侧的大片开阔海域受到河流输入的影响十分有限 ,加上潮流较强 ,河流输入的营养盐可以较快地输运至外海 ,造成了研究区整体上 DIN 和 DIP 的浓度均不高。然而需要关注的是 ,两侧近岸站位营养状态相对较高 ,部分年份甚至可以达到重度富营养程度<sup>[16]</sup> ,这是由其容易受到河流输入以及水体交换能力较弱的特点决定的。因此 ,两侧的近岸海域需要在以后的环境监测、水

环境治理、藻华灾害防治等方面给予更多关注。

营养盐浓度和比例是评价近海营养状态的重要指标。曹妃甸海域的 N/P 通常大于 10 ,不存在 N 限制的情况(表 2) 。春季曹妃甸东侧海域 DSi 浓度低于 2  $\mu\text{mol/L}$ (图 4) ,处于 Si 的绝对限制状态 ,其他海域没有出现营养盐限制情况。夏季几乎全部海域 N/P 和 Si/P 均高于 22 ,这表明研究区处于 P 的相对限制状态 ,其中内湾和南侧海域 DIP 浓度低于 0.1  $\mu\text{mol/L}$  ,为 P 的绝对限制。营养盐限制因子的季节差异与周边河流的入海水量有一定关系 ,沙河、陡河、双龙河和溯河等的夏季流量可达春季的 4 ~ 7 倍<sup>[12]</sup> ,因此对近海 DSi 的补充作用也就相对更强 ,缓解了 Si 限制的状况。从调查期间的浮游植物群落来看 ,虽然 Chl *a* 浓度在季节之间相差不大 ,但浮游植物丰度在夏季显著高于春季。这表明夏季相对充足的 DSi 为浮游植物生长提供了充分的物质保障 ,从而出现了夏季浮游植物丰度远高于春季的情况 ,而浮游植物的快速增殖消耗掉水体中大量 DIP ,导致 DIP 较为不足 ,使得夏季研究海域的 P 限制状况较为显著。

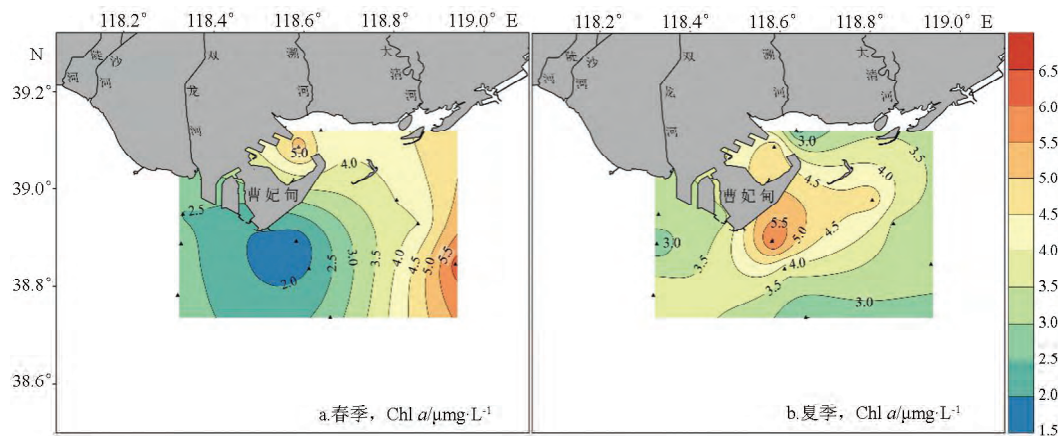


图7 曹妃甸海域 Chl *a* 的时空分布特征

Fig. 7 Temporal and spatial variations of Chl *a* in Caofeidian coastal waters

#### 2.4 Chl *a* 的时空分布及与环境因子之间的关系

如图 7 所示 ,春季 Chl *a* 浓度范围为 1.68 ~ 6.25  $\mu\text{g/L}$  ,从甸头向东西两侧浓度逐渐升高 ,内湾海域浓度也较高 ,夏季 Chl *a* 浓度范围为 2.35 ~ 6.09  $\mu\text{g/L}$  ,高值区包括曹妃甸前沿以及内湾部分海域。Chl *a* 的空间分布与温度、盐度、营养盐等多种环境因子有关 ,PCA 分析结果表明春季 Chl *a* 与温度的关系不明显 ,与盐度有正相关关系(图 8) 。渤海湾的浮游植物种类多是广温广盐种 ,但不同种

类与温度、盐度的关系十分复杂 ,随着浮游植物优势种的变化 ,Chl *a* 与温度、盐度的关系也有所差异 ,因此需要在物种水平上做进一步分析。DIN 与 Chl *a* 的相关性较弱 ,与 N 过剩的营养状态是相符的。DIP、DSi 与 Chl *a* 之间的负相关性与浮游植物生长消耗大量的 DIP 和 DSi 有关。4 个断面较好地分离开来 ,A 断面具有较高浓度的 DIP 和 DSi ,而 B 断面(B1、B2) 营养盐浓度通常较低 ,C 断面盐度和 Chl *a* 浓度较高 ,D1 和 D2 站位的 DIN 和 DSi 浓度



较高, 这显示出调查海域东西之间存在着显著差异。夏季 *Chl a* 与温度、盐度的关系均可忽略不计, 而与 *DIP*、*DSi* 具有明显的负相关关系(图 8), 这同样是浮游植物的利用造成的, 与研究区的 *P* 限制状态相符。近岸站点与远岸站点较好地分离开来, *B*、

*C* 断面等远岸站位往往具有较高的盐度以及较低浓度的营养盐, 近岸的 *A1*、*A2* 站位营养盐浓度较高, *D1*、*D2* 站位盐度较低且 *Chl a* 浓度较高, 这证明了渤海淡水输入的影响以及浮游植物生长对营养盐的消耗作用。

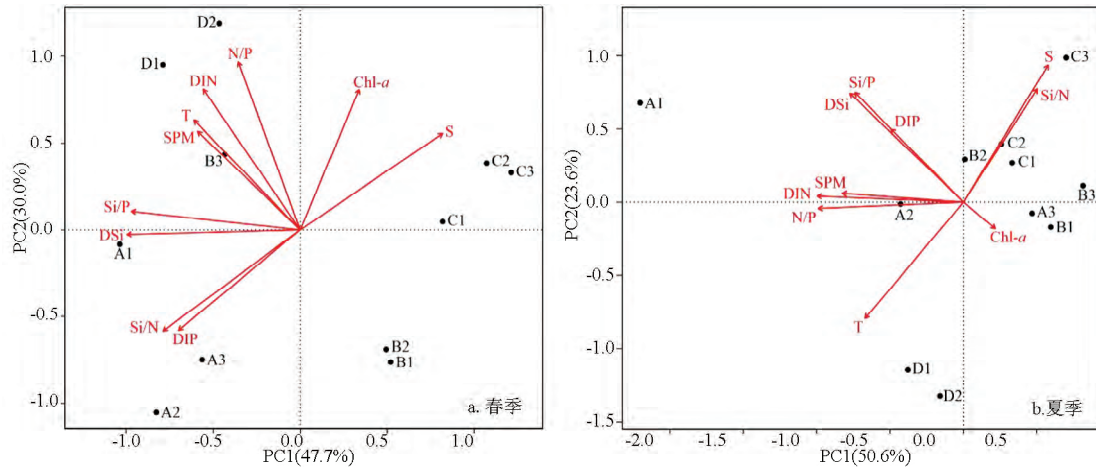


图 8 曹妃甸海域 *Chl a* 与环境因子的 PCA 分析

Fig. 8 PCA ordination between *Chl a* and environment variables in Caofeidian coastal waters

### 2.5 营养状况在围填海前后的变化情况

索安宁等基于 2004 年和 2007 年曹妃甸海域调查资料的分析结果表明 *DIN* 和 *DIP* 在围填海后明显升高, 水质状况出现恶化趋势<sup>[18]</sup>。近年来, 水动力环境的相关研究进一步表明围填海后水动力环境的变化具有空间差异, 西侧海域的潮流流速增加了 2% ~ 5%, 而东南侧海域潮流流速降低了 2% ~ 5% 之间, 内湾海域降低幅度甚至在 10% 以上<sup>[6-7]</sup>。戚健文等甚至认为甸头前沿海域潮流流速增大 10% ~ 40%, 东部前沿海域流速减

小约 10% ~ 20%<sup>[19]</sup>。潮流变化的空间差异意味着营养盐的重新分布, 因此曹妃甸海域营养状态的变化应不仅仅是整体加重的趋势<sup>[18]</sup>, 也存在着空间上的差异。如表 3 所示, 本次调查的 *DIP* 浓度相对于 2004 年进一步降低, 这延续了渤海湾 *DIP* 在 20 世纪 80 年代和 90 年代的降低趋势。*DIN*、*NQI* 和 *Chl a* 等 3 个参数的变化因季节而有所不同。春季, 从整个海域来看, 3 个参数变化不大, 这与索安宁等研究<sup>[18]</sup>中出现的恶化不同, 这可能与调查季节和站位的不同或营养盐的年际变

表 3 曹妃甸海域围填海后营养状态的变化

Tab. 3 Changes of trophic status in Caofeidian coastal waters after reclamation

断面	年份	春季				夏季			
		<i>DIN</i>	<i>DIP</i>	<i>Chl a</i>	<i>NQI</i>	<i>DIN</i>	<i>DIP</i>	<i>Chl a</i>	<i>NQI</i>
西侧海域 (A 断面)	2004	14.82	0.24	3.69	2.08	23.77	0.50	3.05	2.74
	本研究	8.85	0.16	2.64	1.38	9.89	0.11	3.32	1.69
	变化率	-40.28%	-33.33%	-28.46%	-33.65%	-58.39%	-78.00%	8.85%	-38.32%
南侧海域 (B 断面)	2004	5.09	0.23	3.19	1.45	7.67	0.15	1.95	1.36
	本研究	8.95	0.15	2.16	1.29	3.53	0.11	4.09	1.48
	变化率	75.83%	-34.78%	-32.29%	-11.03%	-53.98%	-26.67%	109.74%	8.82%
东侧海域 (C 断面)	2004	5.48	0.19	2.53	1.16	12.89	0.17	3.23	1.94
	本研究	8.02	0.14	4.77	1.94	2.44	0.10	3.74	1.26
	变化率	46.35%	-26.32%	88.54%	67.42%	-81.07%	-41.18%	15.79%	-35.05%
研究海域 (A、B、C 断面)	2004	8.04	0.21	3.14	1.56	14.51	0.26	2.74	2.01
	本研究	8.61	0.14	3.19	1.54	5.29	0.10	3.72	1.48
	变化率	7.09%	-33.33%	1.59%	-1.28%	-63.54%	-61.54%	35.77%	-26.37%

化有关。从空间上看, DIN、*NQI* 和 *Chl a* 在不同断面上的变化差别很大, 即西侧断面均有所降低, 东侧断面均有所升高。围填海后, 水动力环境的变化具有空间差异应是造成这一现象的重要原因。从海河、陡河、沙河和双龙河等河流输入的营养盐主要影响西侧海域, 由于研究海域以东西方向的往复流为主<sup>[8]</sup>, 西侧海域的潮流流速加快有助于营养盐向其他海域运输, 而东侧海域潮流流速的减慢使得营养盐更易在此存留, 这造成了营养盐空间格局的变化, 最终出现了西侧海域营养状态减弱, 东侧海域营养状态加重的现象。夏季, 整个研究海域或不同断面的 DIN 和 *NQI* 多有所降低, 而 *Chl a* 均有所升高, 这不能证明营养状态的减弱, 而是表明营养盐已经被浮游植物充分利用, 无机形态转化为有机形态, 因此围填海的影响需要结合浮游植物群落结构的变化做进一步分析。DSi 的历史资料十分有限, 2004 年调查<sup>[9]</sup> 未涉及 DSi, 因此本研究无法按照区域比较 DSi 的变化趋势, 只能对其平均浓度进行分析。Wang 等在渤海的研究表明曹妃甸海域 2002 年夏季 DSi 浓度约为 9  $\mu\text{mol/L}$ <sup>[20]</sup>, 本研究中夏季 DSi 浓度为 5  $\mu\text{mol/L}$ , 下降幅度超过 40%, 这与渤海范围内 DSi 持续降低的趋势相同, 与周边河流入海水量的减少有关<sup>[2]</sup>。

### 3 结论

(1) 曹妃甸海域营养盐的空间分布主要受河流输入和沉积物释放作用的影响, 高值区分布在西侧以及内湾等近岸海域, 远岸海域营养盐浓度通常较低。

(2) 研究海域的 *NQI* 范围在 1.07 ~ 2.23 之间, 属于贫营养或中营养状态, 其中两侧近岸海域 *NQI* 相对较高。营养盐限制具有季节差异, 春季主要为 Si 限制, 夏季主要为 P 限制。

(3) *Chl a* 在春季的高值区主要分布在东侧远岸海域和东北侧内湾海域, 与盐度、P 和 Si 的关系较为密切; *Chl a* 在夏季的高值区主要出现在甸头和内湾附近海域, 与 P 和 Si 的关系相对较强。

(4) 围填海前后的营养状态具有一定差别: 春季, 西侧海域的 DIN、*NQI* 和 *Chl a* 有所降低, 而东侧海域有所升高, 这与围填海后潮流流速的变化具有空间差异而使得营养盐重新分布有关; 夏季, DIN 和 *NQI* 有所降低, 而 *Chl a* 有所升高, 表明营养盐被浮游植物充分利用, 围填海的影响需要结合浮游植物群落做进一步分析。

### 参考文献:

- [1] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡, 1998, 17(1): 64-70.
- [2] NING X R, LIN C L, SU J L, 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: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(11/12): 1079-1091.
- [3] 吴越, 杨文波, 王琳, 等. 曹妃甸填海造地时空分布遥感监测及其影响初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2013(1): 153-158.
- [4] 林磊, 刘东艳, 刘哲, 等. 围填海对海洋水动力与生态环境的影响[J]. 海洋学报, 2016, 38(8): 1-11.
- [5] TSUTSUMI H. Critical events in the Ariake Bay ecosystem: clam population collapse, red tides, and hypoxic bottom water[J]. Plankton and Benthos Research, 2006, 1(1): 3-25.
- [6] LU Y J, JI R Y, ZUO L Q. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the CaoFeidian sea area, China's Bohai Bay[J]. Coastal Engineering, 2009, 56(8): 831-843.
- [7] KUANG C P, CHEN S Y, ZHANG Y, et al. Morphological model based on next generation circulation solver II: application to CaoFeidian, Bohai Bay, China[J]. Coastal Engineering, 2012, 59(1): 14-27.
- [8] 季荣耀, 陆永军, 左利钦. 渤海湾曹妃甸深槽形成机制及稳定性分析[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 348-355.
- [9] 河北省国土资源利用规划院. 河北省海洋资源调查与评价专题报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [10] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(1): 41-46.
- [11] 王朝晖, 齐雨藻, 李锦蓉, 等. 大亚湾养殖区营养盐状况分析与评价[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 25-28.
- [12] 顾杰, 钱从锐, 梁慧迪, 等. 曹妃甸海域化学需氧量(COD)的季节性分布特征[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 578-583.
- [13] LIU S G, LOU S, KUANG C P, et al. Water quality assessment by pollution-index method in the coastal waters of Hebei Province in western Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(10): 2220-2229.
- [14] LIU C, WANG Z Y, He Y. Water pollution in the river mouths around Bohai Bay[J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 18(4): 326-332.
- [15] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 渤海湾岸线变化(2003—2011年)对近岸海域水质的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2149-2159.
- [16] 国家海洋局北海分局. 2010—2015年北海区海洋环境公报[R]. 青岛: 国家海洋局北海分局, 2011-2016.
- [17] LIU S M, ZHANG J, JIANG W S. Pore water nutrient regeneration in shallow coastal Bohai Sea, China[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59(3): 377-385.
- [18] 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价[J]. 中国环境监测, 2012, 28(2): 105-111.
- [19] 戚健文, 匡翠萍, 蒋茗韬, 等. 曹妃甸港口工程进展及其三维潮流场响应特征研究[J]. 水动力学研究与进展, 2014, 29A(3): 346-354.
- [20] WANG X L, CUI Z G, GUO Q, et al. Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(1): 177-183.