

东营市近岸海域营养盐时空分布及富营养化评价

高园园, 赵军利, 王乙震, 张世禄

(生态环境部海河流域北海海域生态环境监督管理局生态环境监测与科学研究中心, 天津 300170)

摘要:为深入研究现阶段东营市近岸海域的营养盐状况,本文以东营市管理海域为独立单元,根据东营市近岸海域 2021 年冬季、春季、夏季、秋季 4 个航次 30 个站位的海水水质监测数据,分析了东营市近岸海域中营养盐溶解性无机氮(DIN)和活性磷酸盐(DIP)的时空分布特征,分别应用富营养化指数法及潜在性富营养化评价模式对整个海域的水质富营养化程度进行评价。结果表明,东营市近岸海域冬季、春季、夏季 3 个季节均有 80% 以上的站位 DIN 浓度符合二类海水水质标准,且空间分布整体呈现南部高、北部低的趋势;秋季 DIN 浓度整体较高,符合二类海水水质标准的站位仅占比 6.7%;4 个季节所有站位 DIP 浓度均符合一类海水水质标准,季节变化和空间分布未呈现明显差异;富营养化指数法评价结果显示,东营市近岸海域除秋季富营养化程度较高外,其他季节基本未呈现富营养化状态;潜在性富营养化评价模式分析结果表明,东营市近岸海域的氮磷摩尔比均大于 Redfield 比值(16),总体呈现磷限制状态,秋季尤为凸显,93.3% 的站位为磷限制潜在性富营养状态。研究结果可为掌握东营市近岸海域环境质量时空状况和陆海统筹的环境治理提供科学依据,为深入打好渤海污染防治攻坚战,推进黄河流域生态保护和高质量发展提供技术支撑。

关键词:东营市近岸; 营养盐; 时空分布; 富营养化

中图分类号:X13; X834

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2022)06-0813-08

Spatial and temporal distribution of nutrients and eutrophication evaluation in Dongying inshore

GAO Yuan-yuan, ZHAO Jun-li, WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu

(Center of Eco-environmental Monitoring and Scientific Research, Administration of Ecology and Environment of Haihe River Basin and Beihai Sea Area, Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China, Tianjin 300170, China)

Abstract: To gain deep insight into the existing conditions of nutrients along the coastal sea areas of Dongying, the paper studied specially the sea areas governed by Dongying. Based on the sea water quality monitoring data in spring, summer, autumn and winter from 30 monitoring sites of the coastal sea areas of Dongying, the paper explored the spatial-temporal distribution laws of DIN and DIP in the nutritive salt along the coastal sea areas of Dongying. Eutrophication index method and potential eutrophication evaluation mode were used respectively to evaluate the degree of water quality eutrophication of the entire sea areas. As indicated by the results, the DIN concentration in spring, summer and winter from more than 80% monitoring sites along the coastal sea areas of Dongying was unexceptionally up to Class II sea water quality. Spatially, the DIN concentration in the south was generally higher than that in the north. On the whole, the DIN concentration in autumn tended to be higher

收稿日期:2022-07-11, 修订日期:2022-09-07

基金项目:国家国际科技合作专项基金资助项目(2013DFA71340)

作者简介:高园园(1986—),女,山东德州人,硕士,工程师,流域海域环境监测及评价研究方向, E-mail: gaoyuanyuan216@163.com

通讯作者:王乙震(1986—),男,高级工程师,主要从事流域海域水环境监测技术研究工作, E-mail: Xiaoyiw858@163.com

and only 6.7% monitoring sites met Class II sea water quality. No significant difference in seasonal changes and spatial distribution was noticed. As suggested by eutrophication index evaluation results, the sea water eutrophication along the coastal areas of Dongying tended to be higher in autumn only. According to potential eutrophication evaluation mode, unexceptionally the nitrogen-phosphorus mole ratio along the coastal sea areas of Dongying was greater than the Redfield ratio (16). On the whole, the coastal sea areas were under phosphorus limitation, especially in autumn. About 93.3% monitoring sites were under phosphorus limitation and potentially eutrophic. Research findings of the paper will lay scientific basis for a good understanding of the temporal-spatial conditions of the offshore sea environment and overall land-sea environmental governance of Dongying. Besides, it will give technological supports to pollution prevention of Bohai Sea as well as ecological protection and high-quality development of the Yellow River.

Key words: Dongying inshore; nutrients; spatial and temporal distribution; eutrophication

东营市地理位置为北纬 $36^{\circ}55'$ — $38^{\circ}10'$, 东经 $118^{\circ}07'$ — $119^{\circ}10'$, 濒临渤海, 位于山东半岛与辽东半岛环抱的地理中心, 海岸线长 413 km, 占山东省的 12.4%^[1]。随着黄河三角洲高效生态经济区战略和山东半岛蓝色经济区战略两大国家发展战略的交汇实施, 东营市的区位优势和资源优势尤为凸显, 被誉为石油之城、生态之城和黄河水城^[2-3]。

营养盐作为一项关键性海水水质指标, 是海洋生物生长、发育与繁殖的必要条件, 其浓度水平及结构变化可为反映近岸海域潜在生态环境问题提供重要参考。随着经济社会的快速发展, 人类活动对海洋生态环境的影响不断加大, 近岸海域富营养化程度不断加剧, 生态环境问题日益突出, 严重威胁近岸海洋生态和经济的可持续发展^[4]。近年来, 国内学者已对黄河口邻近海域和莱州湾海域的营养盐空间分布特征及变化趋势开展了一系列研究^[5-9]。研究结果表明, 营养盐比例失衡和富营养化问题正在带来连环式的生态效应, 导致赤潮灾害、底层缺氧、浮游植物群落结构变化等现象。基于东营市的区位重要性, 为深入研究现阶段东营市近岸海域的营养盐状况, 本文以东营市管理海域为独立单元, 根据 2021 年冬季、春季、夏季、秋季 4 个航次 30 个站位的海水水质监测数据, 对东营市近岸海域营养盐时空分布及富营养化状况进行分析评价, 以期掌握东营市近岸海域环境质量时空状况和陆海统筹的环境治理提供科学依据, 为深入打好渤海污染防治攻坚战、推进黄河流域生态保护和高质量发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集和分析

本研究基于 2021 年海洋生态环境监测工作, 调查采样时间为 2021 年 3 月(冬季航次)、4 月—5 月(春季航次)、7 月—8 月(夏季航次)、10 月—11 月(秋季航次), 共选取东营市近岸海域 30 个调查站位(图 1)。监测项目主要包括化学需氧量(COD)、铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)和活性磷酸盐(DIP, 以 PO_4^{3-} 计), 溶解性无机氮(DIN)浓度为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度之和。样品的采集、保存及分装依据《海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3—2007)执行, 采样层次依据水深而定, 其中, 当水深小于 10 m 时, 采集表层样品; 当水深范围为 10~25 m 时, 采集表层和底层样品; 当水深范围为 25~50 m 时, 采集表层、10 m 和底层样品。样品分析依据《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)及《近岸海域环境监测技术规范 第三部分 近岸海域水质监测》(HJ 442.3—2020)执行, 其中, COD 采用碱性高锰酸钾法, 检出限为 0.15 mg/L; $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用次溴酸盐氧化法, 检出限为 0.001 mg/L; $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用盐酸萘乙二胺比色法, 检出限为 0.001 mg/L; $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用锌—镉还原比色法, 检出限为 0.003 mg/L; DIP 采用流动注射比色法, 检出限为 0.001 mg/L。为保证监测数据的有效性和准确性, 对样品检测过程进行质量控制, 例如, 每批次样品开展不少于 5% 的平行样品测定, 用于精密度控制; 开展不少于 5% 的有

证标准物质或加标回收率测定,用于准确度控制。

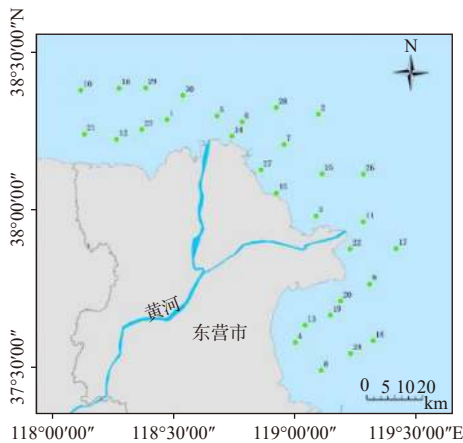


图 1 东营市近岸海域调查站位分布

Fig.1 Distribution of sampling stations in Dongying inshore

1.2 评价方法

1.2.1 富营养化指数法

该方法最早于 1972 年由日本学者冈市友利首次提出^[10-11], 后来国内学者邹景忠等^[12]将其与《渔业水质标准》(GB 11607—89)及《海水水质标准》(GB 3097—1997)等相关标准结合, 形成了多项指标的富营养化指数法, 其计算公式如下:

$$EI = \frac{COD \times DIP \times DIN \times 10^6}{4500} \quad (1)$$

式中: EI 为富营养化状态指数, 无量纲; COD 为化学需氧量浓度 (mg/L); DIN 为无机氮浓度 (mg/L); DIP 为活性磷酸盐浓度 (mg/L)。 $EI \geq 1$ 即为富营养化, 其中, $1 \leq EI \leq 3$ 为轻度富营养化, $3 < EI \leq 9$ 为中度富营养化, $EI > 9$ 为重度富营养化。

1.2.2 潜在性富营养化评价法

郭卫东等人^[13]基于潜在性富营养化概念, 参照我国海水水质标准及有关实验结果, 提出分类分级的潜在性富营养化模式, 具体营养级划分原则如表 1 所示, 其中 N/P 为 DIN 和 DIP 的摩尔比值(下同)。

1.3 数据分析与统计

为便于统计分析, 文中采用的数据均为表层海水数据, 各表征指标空间分布图采用 Arc GIS 10.8 进行空间插值绘制, 数据相关性分析与处理采用 SPSS 26.0 软件。

表 1 潜在性富营养化评价分级

Tab.1 Potential eutrophication assessment and classification

级别	营养级	DIN/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	DIP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	N : P
I	贫营养	<14.28	<0.97	8 ~ 30
II	中度富营养	14.28 ~ 21.41	0.97 ~ 1.45	8 ~ 30
III	富营养	>21.41	>1.45	8 ~ 30
IV _P	磷限制中度富营养	14.28 ~ 21.41	—	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>21.41	—	30 ~ 60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>21.41	—	>60
IV _N	氮限制中度富营养	—	0.97 ~ 1.45	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	—	>1.45	4 ~ 8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>1.45	<4

2 结果与讨论

2.1 营养盐时空分布特征

2.1.1 无机氮的时空分布特征

2021 年东营市近岸海域表层水体 4 个季节的 DIN 浓度结果见表 2。可以看出, 4 个季节 DIN 浓度范围为 0.009 ~ 0.576 mg/L, 其中, 冬季, DIN 浓度变化范围为 0.145 ~ 0.442 mg/L, 平均值为 0.256 mg/L, 最高值出现在 8#站位, 根据《海水水质标准》(GB3097—1997), 符合二类海水水质标准的站位占比为 86.7%; 春季, DIN 浓度变化范围为 0.029 ~ 0.373 mg/L, 平均值为 0.205 mg/L, 最高值出现在 21#站位, 符合二类海水水质标准的站位占比为 83.3%; 夏季, DIN 浓度变化范围为 0.009 ~ 0.474 mg/L, 平均值为 0.201 mg/L, 最高值出现在 8#站位, 符合二类海水水质标准的

表 2 东营市近岸海域 2021 年表层水体中各类营养盐的浓度结果

Tab.2 Concentration of different nutrients in surface water of Dongying inshore in 2021

监测时间	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DIN	DIP
冬季	范围	0.145 ~ 0.442	ND ~ 0.009
	平均值	0.256	0.004
春季	范围	0.029 ~ 0.373	ND ~ 0.010
	平均值	0.205	0.003
夏季	范围	0.009 ~ 0.474	ND ~ 0.010
	平均值	0.201	0.003
秋季	范围	0.199 ~ 0.576	0.001 ~ 0.015
	平均值	0.486	0.006

站位占比与春季一致,为83.3%;秋季,DIN浓度变化范围为0.199~0.576 mg/L,最高值出现在19#站位,平均值为0.486 mg/L,符合二类海水水质标准的站位占比仅为6.7%。从季节分布上看,2021年,东营市近岸海域DIN浓度呈现秋季最高,冬季次之,春季和夏季较低的特征。

由DIN空间分布图(图2)可见,东营市近岸海域冬季DIN浓度整体呈东部和南部高、西部

和北部低的变化趋势,两个高值区分别出现在中东部和南部附近海域。春季,DIN浓度平面分布趋势为研究海域中部和南部高,北部较低,高值区出现在中东部和西南部附近海域。夏季,DIN浓度的平面分布变化趋势不明显,仅在西南部海域出现一个高值区。秋季,DIN浓度分布等值线图呈现大面积高值区,仅在西北部海域呈现低值区。

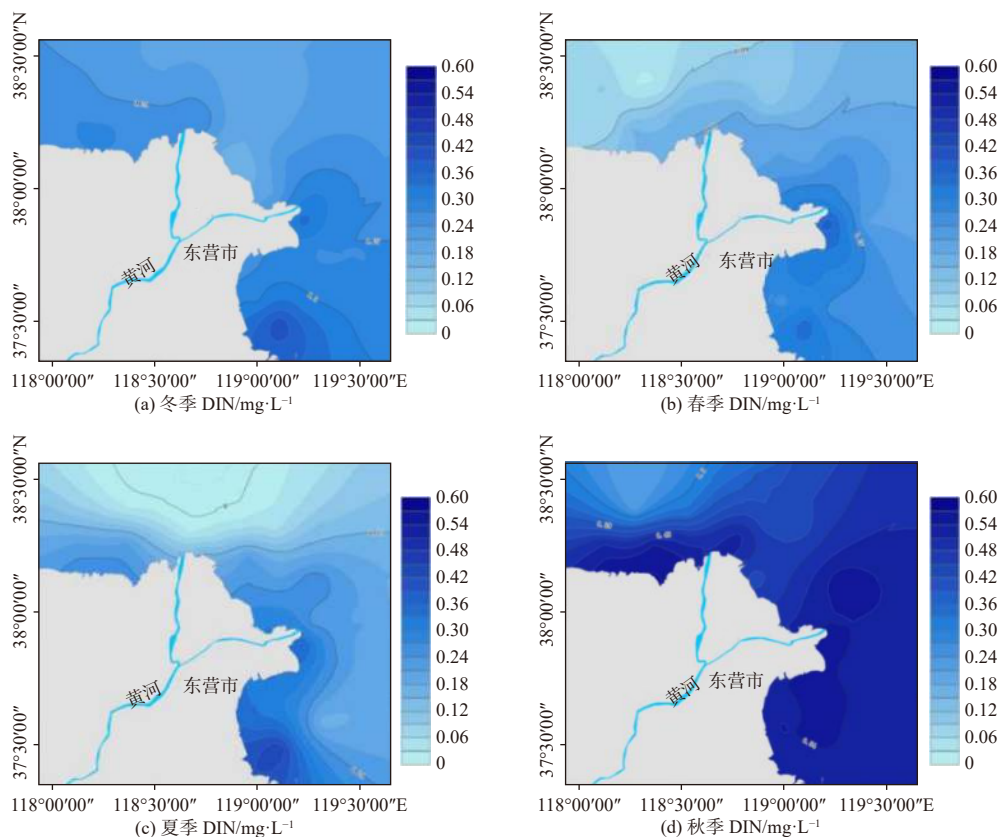


图2 东营市近岸海域2021年4个季节的DIN空间分布

Fig. 2 Distribution of DIN in Dongying inshore in four seasons of 2021

氮是海洋浮游植物生长繁殖所必需的营养元素之一,与海洋初级生产力有着密切关系。浓度过高会导致富营养化;浓度过低又会成为限制因素,影响浮游植物的生长^[14-17]。由上述分析可知,东营近岸海域2021年DIN秋季浓度最高,水质较差。据国家气象科学数据中心资料统计,2021年9月—11月东营市降雨量分别为184.5 mm、134.1 mm、96.2 mm,累计降雨量占全年降雨量的42.8%。另据水利部发布的2021年度《中国河流泥沙公报》统计,2021年9月—11月黄河利津水文站入海径流量分别为54.17亿m³、

111.2亿m³、50.03亿m³,累计入海径流量占全年的48.8%。由此可见,受2021年秋季强降雨过程影响,黄河入海径流量持续维持高位,总氮等主要污染物入海通量大幅增加,导致DIN浓度升高。

2.1.2 活性磷酸盐的时空分布特征

东营市近岸海域表层水体2021年4个季节的DIP浓度结果见表2。可以看出,4个季节DIP的浓度范围为ND~0.015 mg/L(ND表示未检出,下同),以《海水水质标准》(GB3097—1997)为评价依据,所有站位DIP浓度均符合一类海水

水质标准。其中,冬季,DIP浓度变化范围为ND~0.009 mg/L,平均值为0.004 mg/L,最高值出现在10#、18#、29#站位;春季,DIP浓度变化范围为ND~0.010 mg/L,平均值为0.003 mg/L,最高值出现在21#站位;夏季,DIP浓度变化范围为ND~0.010 mg/L,平均值为0.003 mg/L,最高值出现在8#站位;秋季,DIP浓度变化范围为0.001~0.015 mg/L,平均值为0.006 mg/L,最高值

出现在20#站位。从季节分布上看,4个季节DIP浓度未呈现明显差异。

由DIP空间分布图(图3)可见,冬季,DIP浓度在黄河口附近海域出现一个低值区,春季、夏季两个季节DIP浓度整体维持在较低水平,平面分布变化趋势不明显;秋季,DIP浓度在黄河口偏南海域出现一个高值区,但未出现大幅增加趋势,仍满足一类海水水质标准。

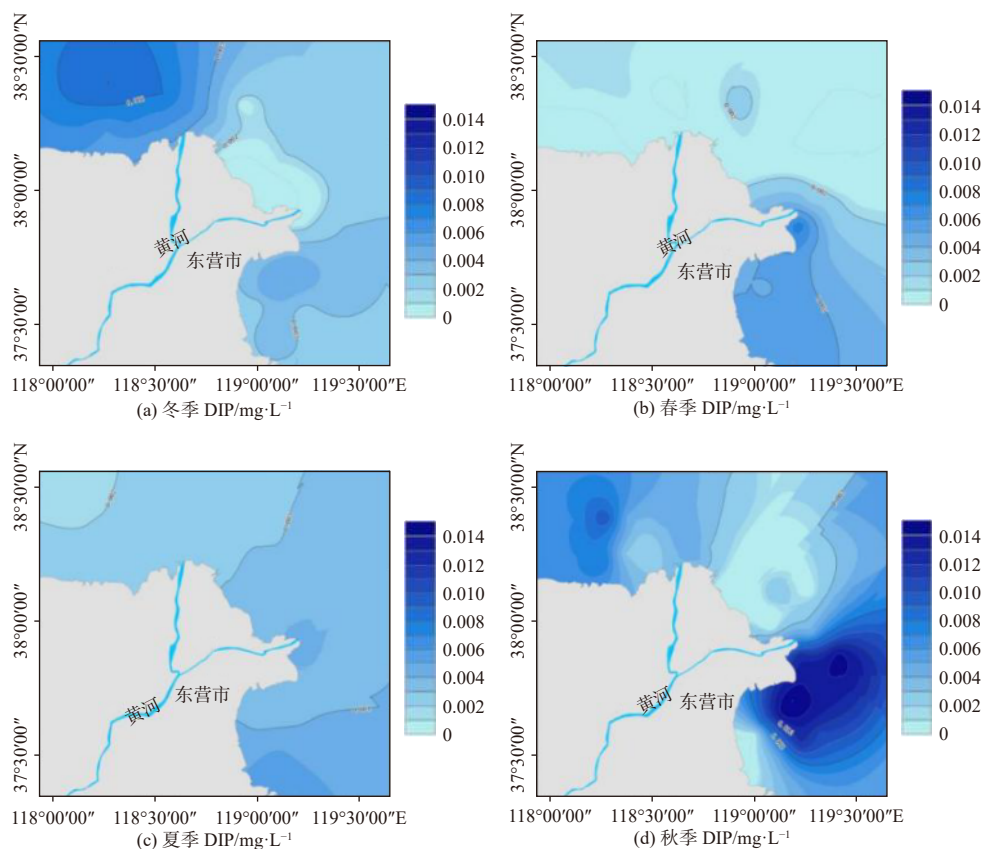


图3 东营市近岸海域2021年4个季节的DIP空间分布

Fig. 3 Distribution of DIP in Dongying inshore in four seasons of 2021

近岸海域的DIP主要来源于陆源性径流输入和海洋生物体的氧化分解^[18-20]。秋季,DIP浓度在黄河口偏南海域出现一个高值区,但DIP浓度未出现大幅增加趋势的原因可能是含磷化肥、洗涤用品等使用量减少,导致陆域DIP入海通量和海域DIP浓度较低^[21]。冬季,DIP浓度在黄河口附近海域出现明显低值区,这可能是由于在陆域入海通量较低的情况下,沉积物成为海水中磷的一个重要来源,而温度是影响沉积物—海水界面溶解态磷酸盐交换的重要因素,冬季气温

低,导致磷酸盐的交换通量较低^[22]。

2.1.3 水质指标相关性分析

为进一步探讨营养盐季节变化产生的原因,本文采用SPSS 26.0软件对营养盐与水温及盐度指标的线性相关性进行了分析。由表3可知,DIN与水温 and 盐度两个指标在夏季和秋季均呈现极显著相关($p<0.01$),表明河流的陆源输入对DIN浓度产生贡献,而这种贡献在丰水期(夏季和秋季)较明显,这与姜会超等的研究结果一致^[23]。DIP与水温 and 盐度两个指标仅在冬季具

有相关性,其中冬季 DIP 与水温显著相关($p<0.05$),与盐度极显著相关($p<0.01$),而在其他季节无显著相关性,这可能是由于 DIP 的补充并非主要来自陆源河流输入,而是以有机物的分解矿化再生为主^[24]。

表 3 营养盐与水温及盐度指标相关性分析
Tab.3 Correlation analysis of nutrients with water temperature and salinity

监测时间	监测指标	水温	盐度
冬季	DIN	-0.039	-0.390
	DIP	0.722*	0.816**
春季	DIN	-0.208	-0.449
	DIP	-0.294	-0.415
夏季	DIN	0.833**	-0.958**
	DIP	0.353	-0.564
秋季	DIN	-0.769**	-0.941**
	DIP	0.239	0.454

注: **表示 $p<0.01$ (极显著相关), *表示 $p<0.05$ (显著相关)

2.2 富营养化评价

2.2.1 富营养化指数评价

本文运用富营养化指数法,对东营市近岸海域 4 个季节的水质状况进行富营养化评价(表 4)。由评价结果可知,冬季 EI 变化范围为 0.06 ~ 0.85,春季 EI 变化范围为 0.01 ~ 0.80,均未出现富营养化。夏季 EI 变化范围为 0.01 ~ 1.80,其中 8# 站位 EI 最高,为 1.80,呈现轻度富营养化,占比 3.3%。秋季 EI 变化范围为 0.13 ~ 4.09,8#、9#、12#、13#、14#、16#、17#、19#、21#、22#、24# 等 11 个站位呈现轻度富营养化,占比 36.7%;20# 站位 EI 为 4.09,呈现中度富营养化,占比 3.3%。可见,2021 年,东营市近岸海域除秋季富营养化程度较高外,其他季节基本未呈现富营养化,该结果与王燕等^[25]对渤海海域富营养化的研究结果一致。

2.2.2 潜在性富营养化程度评价

运用表 1 的评价模式,本文对东营市近岸海域 4 个季节的水质状况进行潜在性富营养化程度评价,N/P 及潜在性富营养化评价结果见图 4。由评价结果分析可见,冬季,东营市近岸海域贫营养状态(I)的站位占比为 20%,磷限制中度富

营养状态(IV_p)的站位占比为 66.7%,磷限制潜在性富营养状态(VI_p)的站位占比为 13.3%;春季,贫营养状态的站位(I)占比为 50%,磷限制中度富营养状态(IV_p)的站位占比为 33.3%,磷限制潜在性富营养状态(VI_p)的站位占比为 16.7%;夏季,贫营养状态(I)的站位占比为 36.7%,磷限

表 4 东营市近岸海域 2021 年表层海水富营养化指数评价结果
Tab.4 The results of EI indexes assessment in surface water of Dongying inshore in 2021

监测时间	EI 范围	站位占比/(%)		
		轻度富营养化	中度富营养化	重度富营养化
冬季	0.06 ~ 0.85	—	—	—
春季	0.01 ~ 0.80	—	—	—
夏季	0.01 ~ 1.80	3.3%	—	—
秋季	0.13 ~ 4.09	36.7%	3.3%	—

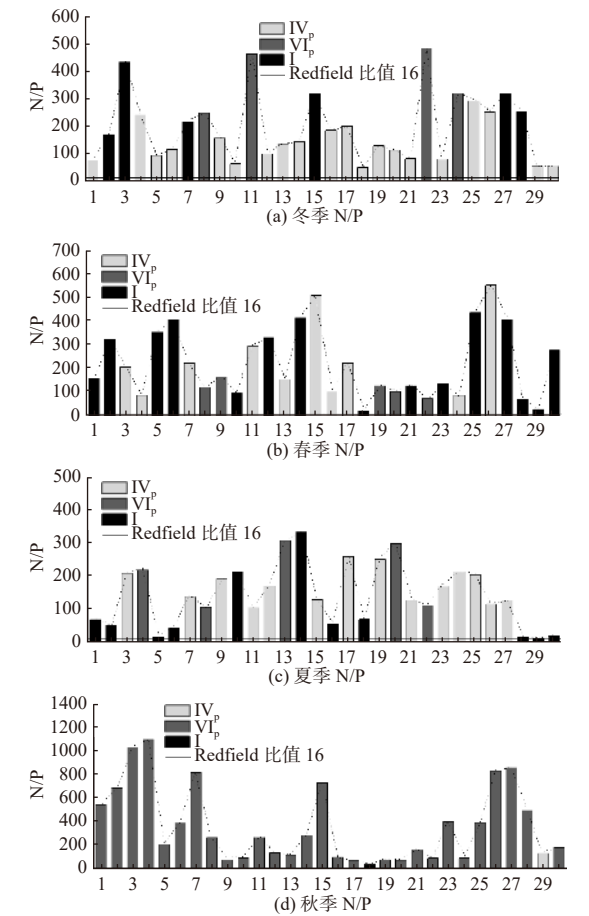


图 4 东营市近岸海域 2021 年表层海水潜在性富营养化评价结果

Fig. 4 The results of potential eutrophication assessment in surface water of Dongying inshore in 2021

制中度富营养状态(IV_p)的站位占比为 46.6%, 磷限制潜在性富营养状态(VI_p)的站位占比为 16.7%; 秋季, 贫营养状态(I)的站位占比为 3.35%, 磷限制中度富营养状态(IV_p)的站位占比为 3.35%, 磷限制潜在性富营养状态(VI_p)的站位占比为 93.3%。

N/P 是衡量氮和磷两种元素对水体富营养化贡献的重要指标。一般浮游植物从海水中摄取的 N/P 为 16 : 1, 偏离过高或过低都可能引起浮游植物的生长受到某一相对低含量元素的限制^[26]。由上述分析可知, 2021 年, 东营市近岸海

域表层水体的 N/P 均大于 Redfield 比值(16), 呈现磷限制状态。结合 4 个季节的 N/P 空间分布(图 5)可见, N/P 在夏季分布未呈现显著差异, 而冬季、春季和秋季均在黄河口附近及其北部海域出现高值区, 秋季尤为凸显, 93% 的站位为磷限制潜在性富营养状态(VI_p)。相关研究表明, 造成 N/P 较高的原因可能为氮肥在农业中大量使用, 而受“磷负荷削减计划”影响, 含磷用品的生产和销售被限制, 陆源磷排放量降低, 从而导致 N/P 升高^[27], 因此, 控制陆域入海氮源污染极为重要。

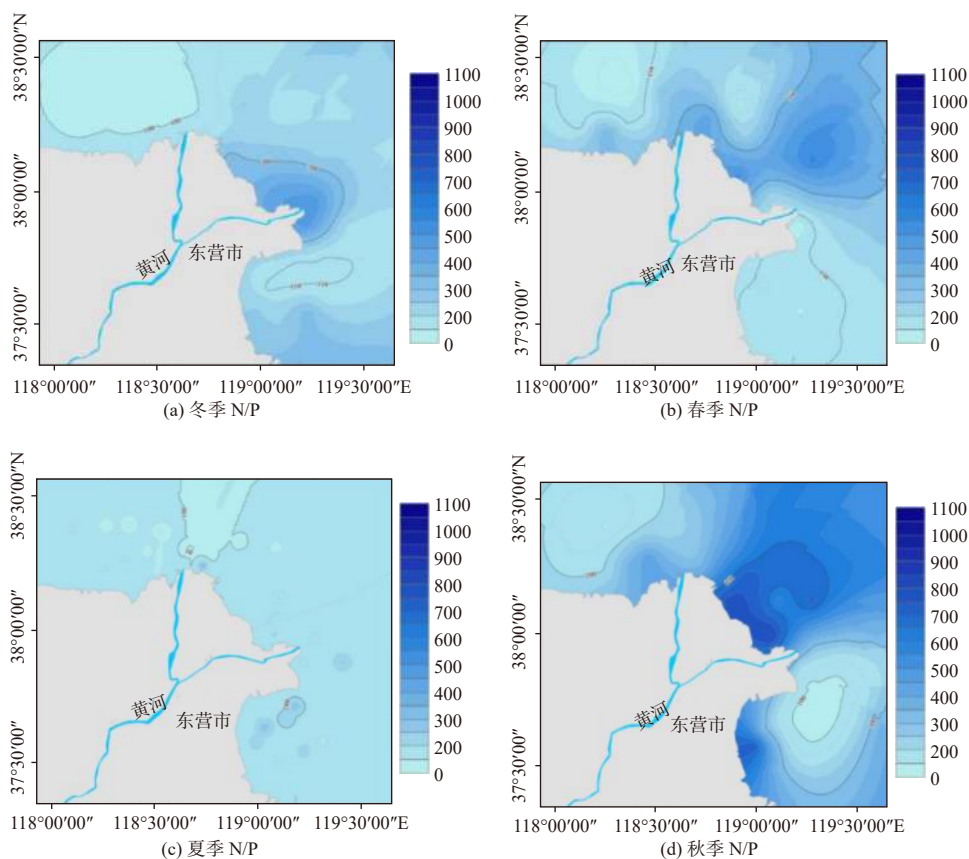


图 5 2021 年东营市近岸海域 4 个季节的 N/P(摩尔比)空间分布

Fig. 5 Distribution of N/P in Dongying inshore in four seasons of 2021

3 结论

(1) 东营市近岸海域表层水体 4 个季节 DIN 的浓度范围为 0.009 ~ 0.576 mg/L, 从季节分布上看, 2021 年东营市近岸海域 DIN 浓度呈现秋季最高, 冬季次之, 春季和夏季较低的特征。冬季、春季、夏季 3 个季节 DIN 符合二类海水水质

标准的站位占比在 80% 以上, 空间分布整体呈现南部高、北部低的趋势; 秋季 DIN 浓度较高, 符合二类海水水质标准的站位占比仅为 6.7%, 浓度分布等值线图呈现大面积高值区, 仅在西北部海域呈现低值区。这主要是由于 2021 年秋季的强降雨过程导致黄河入海径流量持续维持高位, 总氮等主要污染物入海通量大幅增加, 使得

DIN 浓度升高。

(2) 东营市近岸海域 4 个季节 DIP 的浓度范围为 ND ~ 0.015 mg/L, DIP 浓度维持在相对稳定水平, 所有站位 DIP 均符合一类海水水质标准, 季节变化和空间分布未呈现明显差异。含磷化肥、洗涤用品等使用量的减少是陆域 DIP 入海通量和海域 DIP 浓度较低的主要原因。

(3) 东营市近岸海域冬季、春季 EI 均小于 1, 未出现富营养化。夏季一个站位呈现轻度富营养化, 占比 3.3%。秋季 EI 变化范围较大, 11 个站位呈现轻度富营养化, 占比 36.7%, 一个站位呈现中度富营养化, 占比 3.3%。2021 年, 东营市近岸海域除秋季富营养化程度较高外, 其他季节基本未呈现富营养化。

(4) 东营市近岸海域整个水体的 N/P 均大于 Redfield 比值(16), 呈现磷限制状态, 秋季尤为凸显, 93.3% 的站位为磷限制潜在性富营养状态, 且冬季、春季和秋季 N/P 空间分布均在黄河口附近及其北部海域出现高值区, 控制陆域入海氮源污染极为重要。

参考文献:

- [1] 张汉珍, 隋海洋, 曲玉环. 东营市近岸海域海洋环境状况分析[J]. 海洋开发与管理, 2013, 3: 98-100.
- [2] 燕会东. 浅析东营市海洋产业发展政策[J]. 齐鲁渔业, 2009, 26(6): 57-58.
- [3] 刘荣波, 刘龙龙, 冯 京, 等. 东营市近岸海域重金属元素分布特征与环境质量评价[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(8): 64-72.
- [4] ZHOU L M, SUN Y, ZHANG H H, et al. Distribution and characteristics of inorganic nutrients in the surface microlayer and subsurface water of the Bohai and Yellow Seas[J]. Continental Shelf Research, 2018, 168: 1-10.
- [5] 刘义豪, 杨秀兰, 靳 洋, 等. 莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(4): 1-5.
- [6] 刘 霜, 张继民, 冷 宇, 等. 黄河口附近海域营养盐行为及年际变化分析[J]. 海洋通报, 2013, 32(4): 383-388.
- [7] 由丽萍, 赵玉庭, 孙 珊. 2018 年春季和夏季莱州湾营养盐结构及限制特征[J]. 渔业科学进展, 2021, 42(6): 15-23.
- [8] 刘 峰, 李秀启, 董贯仓, 等. 黄河三角洲近岸海域营养盐分布与富营养化评价[J]. 水生态学杂志, 2012, 31(1): 14-19.
- [9] 祝雅轩, 裴绍峰, 张海波, 等. 莱州湾营养盐和富营养化特征与研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 1-9.
- [10] Gangshiyouli. The Pollution of Shallow Sea and the Occurrence of Red Tide, Mechanism of the Occurrence of Red Tide in Inner Bay [R]: Japan Aquatic Resources Protection Association, 1972, 58-76.
- [11] 林晓娟, 高 珊, 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] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学, 1983, 2: 41-54.
- [13] 郭卫东, 章小明. 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.
- [14] 恒清柳, 庞仁松, 周秋伶, 等. 深圳近岸海域氮、磷营养盐变化趋势及其与赤潮发生的关系[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 908-914.
- [15] 唐嘉威. 浙江省近岸海域富营养现状及评价[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2021.
- [16] 康燕玉, 梁君荣, 高亚辉等. 氮、磷比对两种赤潮藻生长特性的影响及藻间竞争作用[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 117-122.
- [17] 孙丕喜, 王宗灵, 战 闰, 等. 胶州湾海水中无机氮的分布与富营养化研究[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 466-471.
- [18] 金 杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(2): 253-261.
- [19] 李 丽, 戚家业, 刘 军, 等. 钱塘江口磷酸盐分布、变化与浮游植物的响应[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(2): 279-289.
- [20] 李俊杰. 大亚湾和胶州湾颗粒磷的分布、输出与转化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [21] 董晓晓, 王立明, 齐延民, 等. 2015 年威海近岸海域营养盐的时空分布特征[J]. 海岸工程, 2018, 37(4): 53-61.
- [22] 陈洪涛, 刘素美, 陈淑珠, 等. 渤海莱州湾沉积物-海水界面磷酸盐的交换通量[J]. 环境化学, 2003, 22(2): 110-114.
- [23] 姜会超, 王玉珏, 李佳蕙, 等. 莱州湾营养盐空间分布特征及年际变化趋势[J]. 海洋通报, 2018, 37(4): 411-423.
- [24] 夏 斌, 张晓理, 崔 毅, 等. 夏季莱州湾及附近水域理化环境及营养现状评价[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(3): 103-111.
- [25] 王 燕, 姚振童, 祝艳君, 等. 2019 年渤海氮磷营养盐季节变化及富营养化状况[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(6): 915-921.
- [26] 郑 重. 海洋浮游生物生态学文集[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1986, 106.
- [27] 王修林, 崔正国, 李富强, 等. 环渤海三省一市溶解态无机氮容量总量控制[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(4): 619-622, 626.