

江苏近岸海域富营养化特征研究

陆昕雨^{1,2}, 彭模², 周超凡², 赵永刚², 姜龙^{1,3,4}

(1.河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098; 2.江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019; 3.河海大学 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 江苏 南京 210098; 4.河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:近年来, 江苏近岸海域水质不佳, 赤潮、绿潮等生态灾害屡屡发生, 富营养化是其潜在原因之一。本文对该海域 2019 年和 2020 年春、夏、秋季航次监测的无机氮 (DIN)、活性磷酸盐 (SRP)、叶绿素 *a* (Chl *a*) 等水质参数进行了空间分析, 采用指数评价法量化了该海域的富营养化程度, 并基于统计分析研究了该海域的富营养化特征。结果表明: 江苏近岸海域 DIN 浓度和 SRP 浓度总体呈现近岸高、远岸低的分布特征, 营养盐浓度与盐度呈显著负相关关系; 在降水量和径流量更大的夏季, 营养盐浓度和 Chl *a* 浓度比春季和秋季更高; 丰水年 (2020 年) 相较于平水年 (2019 年), 该海域的氮磷比和富营养化程度均更高。因此, 陆源输入对江苏近岸海域的富营养化程度有至关重要的影响, 加强对入海河流的监测和排污治理是缓解该海域富营养化的关键。

关键词:江苏近海; 营养盐; 富营养化; 时空分布; 陆源输入

中图分类号:X55

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2022)05-0745-08

Eutrophication characteristics in the Jiangsu coastal waters

LU Xin-yu^{1,2}, PENG Mo², ZHOU Chao-fan², ZHAO Yong-gang², JIANG Long^{1,3,4}

(1.College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019, China; 3.Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4.Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In recent years, water quality degradation in the Jiangsu coastal waters has led to frequent harmful algal blooms known as the red and green tides. Eutrophication is considered as one of the potential causes. In order to study eutrophication characteristics in this region, the monitored water quality parameters such as dissolved inorganic nitrogen (DIN), soluble reactive phosphorus (SRP), and chlorophyll *a* in 2019 and 2020 were analyzed spatially and integrated as various eutrophication indices. Results indicate that DIN and SRP concentrations in the Jiangsu coastal waters were relatively high nearshore and significantly negatively correlated with salinity. Due to higher precipitation and river runoff, nutrient and chlorophyll *a* concentrations were higher in summer than in spring and fall, and in the wet (2020) than normal (2019) year. Based on these findings, we conclude that the terrestrial input likely exerts a major control on eutrophication of the Jiangsu coastal sea. Monitoring and load management of the riverine pollution are key to water quality improvement in

收稿日期:2021-09-24, 修订日期:2022-01-14

基金项目:国家自然科学基金青年项目(42106027); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20200517); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200201013); 2020 年度江苏省生态环境科研课题(2020010, 2020009); 江苏省地方标准《江苏省离岸式海洋环境在线监测站点建设技术规范》

作者简介:陆昕雨(1998—), 女, 云南昆明人, 硕士研究生, 主要从事海洋生态环境方向研究, E-mail: 201611010018@hhu.edu.cn

通讯作者:姜龙(1988—), 男, 山东莱州人, 副教授, 博士, 主要从事海洋生态动力学研究, E-mail: ljiang@hhu.edu.cn

this region.

Key words: Jiangsu coastal waters; nutrients; eutrophication; spatiotemporal variability; terrestrial input

Nixon^[1]将富营养化定义为生态系统中有有机物迅速富集的现象,其最常见的原因是人类活动造成的无机氮和无机磷的过量输入。20世纪以来,富营养化成为全球河口和近海生态系统健康的主要威胁之一^[2]。富营养化可能导致有害藻类暴发、水体缺氧、水质恶化、食物网和生态系统退化等后果^[3]。近40年来,我国近海赤潮、绿潮等生态灾害频发,渤海、长江口和珠江口的缺氧事件多发,这些现象与富营养化密不可分^[4]。因此,对富营养化的监测和研究是保护近海生态系统、建设海洋生态文明的重中之重。

对于特定的富营养化近海生态系统,研究其富营养化的范围、程度、分布特征和变化规律是揭示富营养化形成机制的关键,也是制定水质改善措施的前提。目前,水体富营养化的程度主要用指数评价法来量化和横向比较,常见的评价方法有单因子标准指数法、富营养化指数法、有机污染评价指数法^[5]和营养状态质量指数法^[6]等。不同指数方法使用的水质参数不同,而不同水质参数的变化机制和影响因素存在差异。例如,水体中无机氮多以溶解态存在和转移,而无机磷扩散迁移的主要形态为吸附态^[7]。因此,了解无机氮和活性磷酸盐的时空分布特征和比例变化,是对综合指数法研究富营养化机制的重要补充。

近年来,我国近海富营养化的研究逐渐增多。大多数研究表明^[2,8],陆源输入占近海营养盐总来源的比重较大,但其他源头也不可忽视。以南黄海为例,河流输入、大气沉降和沉积物释放是南黄海营养盐的主要来源^[9],而沿岸流和上升流等物理过程同样影响营养盐的输运^[10]。

历年《中国海洋生态环境状况公报》显示,位于南黄海西部的江苏近岸海域水质较差,绿潮频发,是研究富营养化特征的典型区域^[11]。该海域营养盐的来源主要为径流输入,包括长江冲淡水和以灌河、射阳河为代表的江苏本地河流输入^[12]。此外,地下水也可能是该海域重要的营养盐来源^[13],海源输入可能影响该海域的营养盐分布^[14]。近

年来,随着苏北浅滩绿潮溯源工作的开展,针对江苏近岸海域营养盐的航次调查逐渐增多^[8,15-17]。然而,此类调查往往受绿潮发生位置和季节的影响,存在调查区域不固定、调查时间不连续等问题^[15]。

本研究通过分析江苏近岸海域2019年和2020年春、夏、秋3个季节的监测数据,定量评价了该海域富营养化的程度和范围,并研究了营养盐浓度和比例的空间分布以及季节、年际变化。通过以上分析,本研究期望刻画出江苏近岸海域的富营养化特征,为污染治理和水质改善提供思路。

1 材料与方法

1.1 调查时间及站位

本研究数据来自江苏省环境监测中心于2019年和2020年春(5月)、夏(7月)、秋(10月)季在江苏近岸海域(119.10°E—122.36°E, 31.51°N—35.27°N, 图1)开展的6个调查航次。2019年和2020年航次分别有70个和77个调查站位。按照历史数据,图1标识了江苏省入海径流量最大的3条河流,分别为射阳河、新洋港和灌河。3条河流2015年至2017年平均入海径流量分别为252.85 m³/s、153.31 m³/s和127.79 m³/s(江苏省水文水资源勘测局数据)。

1.2 调查要素和方法

本研究用于分析的水质参数包括温度、盐度、pH、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、硝酸盐(NO₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、铵盐(NH₄-N)、活性磷酸盐(soluble reactive phosphorus, SRP)、悬浮物(total suspended particulate, TSP)、叶绿素a(Chl a)和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)。其中,NO₃-N、NO₂-N和NH₄-N的浓度总和为无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)。航次中水文观测、水样采集和保存以及DIN、SRP等水质参数分析按照《近岸海域环境监测技术规范》(HJ 442—2008)和《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)执行。

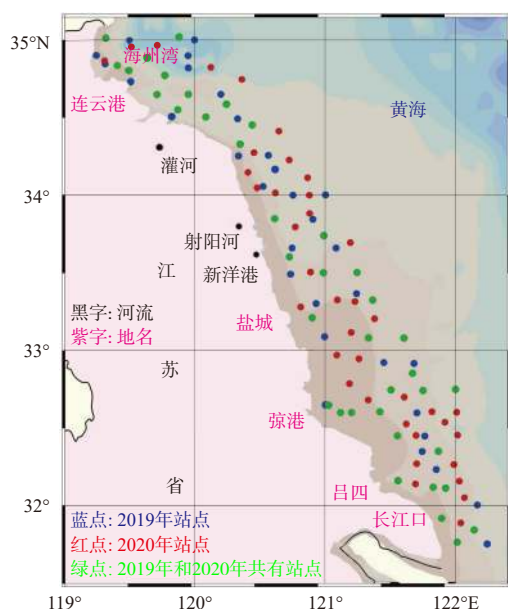


图1 调查站点分布

Fig. 1 Distribution of survey sites

1.3 富营养化的指数评价法

参考王朝晖等^[6]和Liu等^[5]的研究,本研究采用营养状态质量指数(NQI)和富营养化指数(E)评价海域的富营养化状态,其计算方法如下。

(1) 营养状态质量指数(NQI)

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

式中: C_{COD} 、 C_{DIN} 、 C_{SRP} 和 $C_{Chl a}$ 代表实测的水体 $COD(mg/L)$ 、 $DIN(mmol/L)$ 、 $SRP(mmol/L)$ 和 $Chl a(\mu g/L)$ 浓度; CS_{COD} 、 CS_{DIN} 、 CS_{SRP} 和 $CS_{Chl a}$ 代表其对应的标准浓度值,分别为 $3 mg/L$ 、 $0.02 mmol/L$ 、 $0.008 mmol/L$ 和 $5 \mu g/L$ 。富营养化状态根据如下标准判断, $NQI < 2$ 为贫营养状态; $2 \leq NQI \leq 3$ 为中营养状态; $NQI > 3$ 为富营养状态。

(2) 富营养化指数(E)

$$E = \frac{C_{COD} \times C_{DIN} \times C_{SRP}}{10.20} \times 10^6$$

根据富营养化指数(E), 水体富营养化水平可划分为5个等级: $E < 1.00$ 为贫营养状态; $1.00 \leq E < 2.00$ 为轻度富营养状态; $2.00 \leq E < 5.00$ 为中度富营养状态; $5.00 \leq E < 15.00$ 为重度富营养状态; $E \geq 15.00$ 为严重富营养状态。

1.4 数据处理和分析

采用 Ocean Data View 软件绘制 DIN 浓度、 SRP 浓度、氮磷比(C_{DIN}/C_{SRP})、 NQI 和 E 的空间

分布图。由于本地区潮致混合作用较强, 各水层营养盐分布相似, 故本文仅采用表层数据进行分析。在计算氮磷比时, 为方便与 Redfield 比(浮游植物适宜的 C_{DIN}/C_{SRP} 等于 16)相比较, 将 C_{DIN}/C_{SRP} 除以 16 后取以 10 为底的对数, 得到氮磷比参数 $NP(NP = \log_{10} \frac{C_{DIN}}{16 \times C_{SRP}})$ 。当 $C_{DIN}/C_{SRP} > 16$ 时, $NP > 0$, 代表相对磷限制; 而当 $C_{DIN}/C_{SRP} < 16$ 时, $NP < 0$, 代表相对氮限制。采用 SPSS Statistics 26 对水质参数进行相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 营养盐浓度和 $Chl a$ 浓度的时空分布

2019 年春、夏、秋季 DIN 、 SRP 和 $Chl a$ 浓度的高值大多出现在入海河流河口附近海域(如灌河口、射阳河口、新洋港入海口和长江口附近海域)以及对流扩散能力较弱的半封闭海湾(如弶港附近海域和海州湾等), 具体见图 2—图 4。2020 年春、夏、秋季的 DIN 和 SRP 浓度空间分布特征与 2019 年相似, 总体呈现近岸高、远岸低的特点。2020 年监测数据表明, 江苏近岸水体 DIN 浓度普遍较高, SRP 浓度的高值主要出现在射阳河口、新洋港入海口、长江口和弶港附近海域(图 2 和图 3)。 $Chl a$ 的分布存在较大的空间差异, 海州湾和灌河口附近海域的 $Chl a$ 浓度普遍较高; 除海州湾外, $Chl a$ 浓度在江苏南部沿海较高, 且 $Chl a$ 浓度的高值区总体呈斑块化分布(图 4)。值得注意的是, $Chl a$ 与营养盐浓度的高值区分布并不完全对应(图 2—图 4), 侧面说明了浮游植物生长繁殖可能受包括营养盐在内的多种环境因子的共同调控。

2019 年和 2020 年营养盐和 $Chl a$ 浓度的时空分布显示, 全年浓度的最高值大多出现在夏季近岸海域。以灌河口为例, 该海域 2019 年和 2020 年夏季的 DIN 、 SRP 和 $Chl a$ 浓度明显高于春、秋两季(图 2—图 4), 但夏季外海的 DIN 和 SRP 浓度往往低于春、秋两季。因此, 该海域近岸到外海的营养盐浓度梯度在夏季达到最大(图 2 和图 3)。

相较于 2019 年, 2020 年的 DIN 和 SRP 浓度明显上升, 且 2020 年营养盐浓度偏高的海域面积明显增加(图 2 和图 3)。2020 年 $Chl a$ 浓度高

于 2019 年,特别在春、秋两季(图 4)。这些现象很可能与 2020 年的降水量较 2019 年更高有关。

2.2 氮磷比的时空分布

江苏近岸海域总体偏向于磷限制状态,磷限

制的程度有较强的空间差异性。例如,2019 年春季,海州湾存在较强的磷限制,海州湾东南部的 C_{DIN} / C_{SRP} 接近 Redfield 比值,其余海域磷限制的程度都比海州湾更轻(图 5a);2019 年夏季,

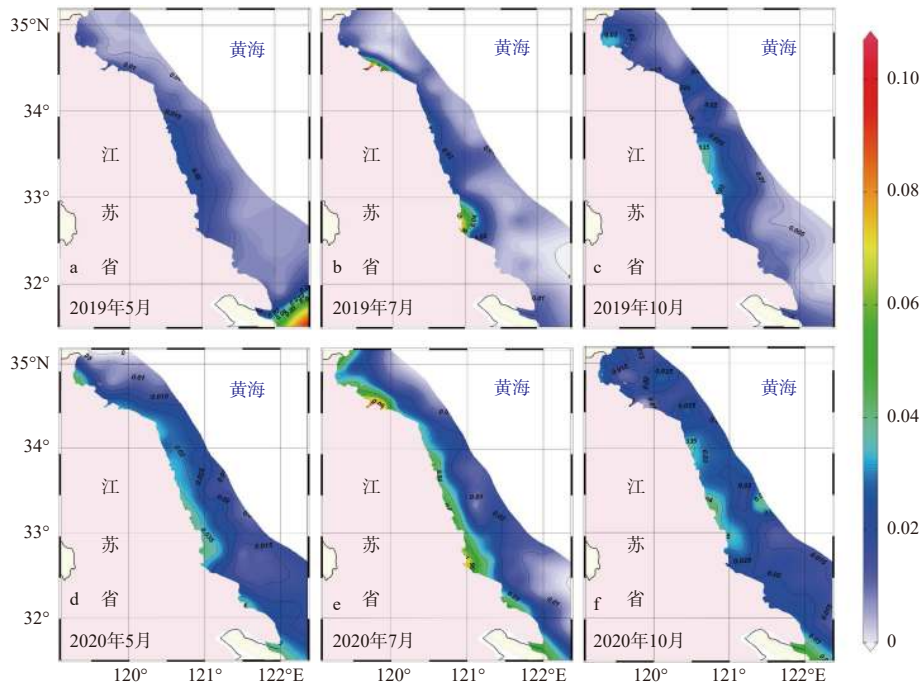


图 2 表层 DIN 浓度(mmol/L)时空分布
Fig. 2 Spatiotemporal distribution of surface DIN (mmol/L)

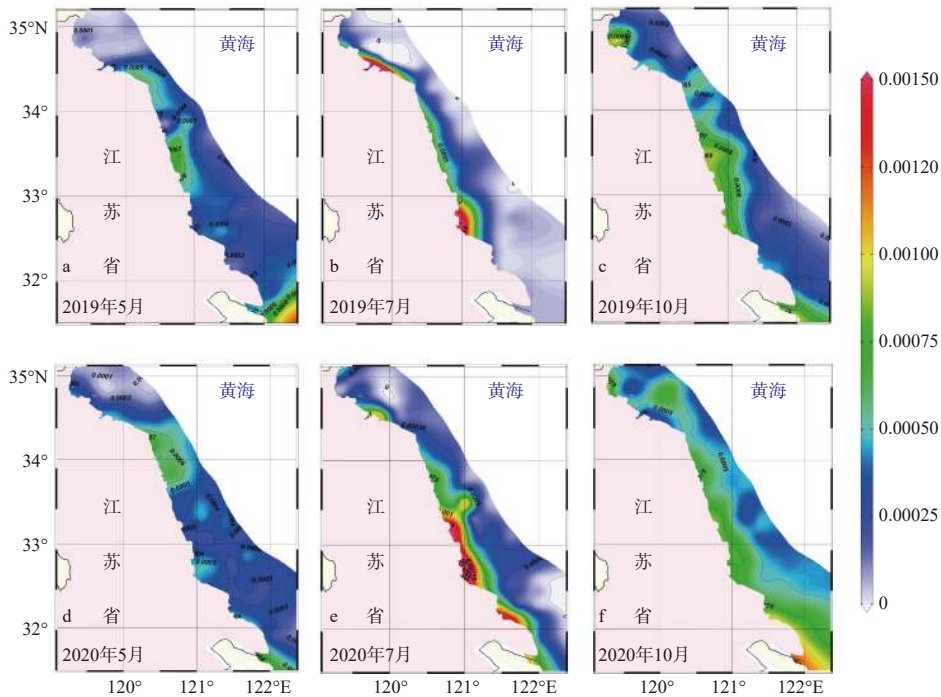
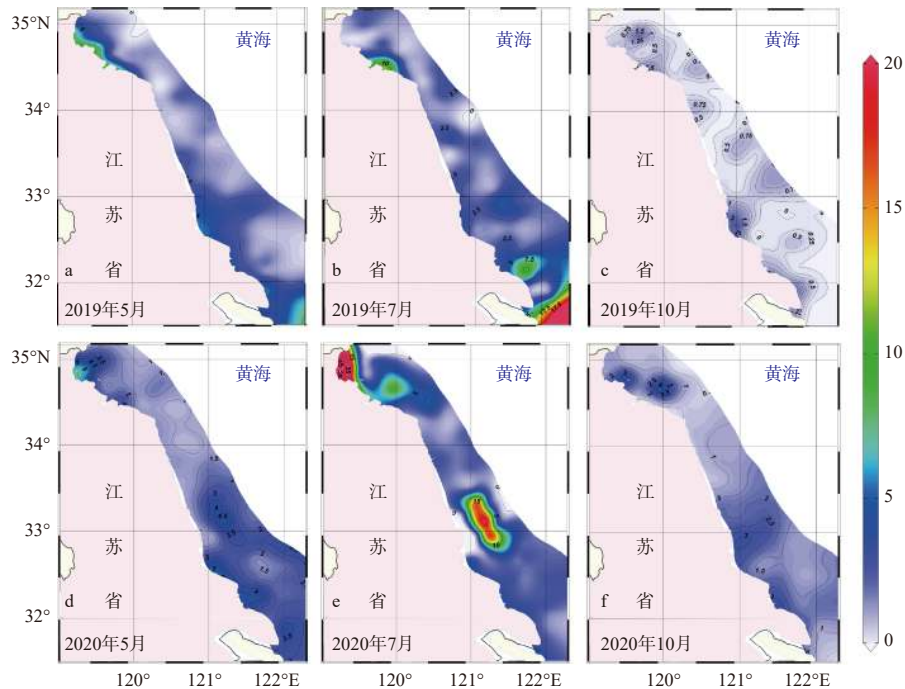


图 3 表层 SRP 浓度(mmol/L)时空分布
Fig. 3 Spatiotemporal distribution of surface SRP (mmol/L)

图4 表层 Chl *a* 浓度($\mu\text{g/L}$)时空分布Fig. 4 Spatiotemporal distribution of surface Chl *a* ($\mu\text{g/L}$)

江苏近岸海域磷限制的程度从近岸到外海逐渐增强,但这一趋势在其他时期并不明显(图5)。总体而言,夏季的磷限制程度强于春、秋两季;在降水量更高的2020年,江苏近岸海域的氮磷比较2019年更高。

2.3 水质参数之间的相关关系

在所有航次调查中,DIN和SRP浓度都呈显著正相关关系($r > 0.56, p < 0.01$),表明江苏近岸海域的氮、磷污染有共同的来源和去向,空间分布也存在相似性(图2和图3)。盐度与Chl *a* ($r < -0.28, p < 0.01$)、DIN ($r < -0.56, p < 0.01$)、SRP ($r < -0.41, p < 0.01$)、COD浓度 ($r < -0.24, p < 0.01$)都呈负相关关系,表明营养盐和有机污染物的浓度与淡水输入有密不可分的联系。除2019年春季Chl *a*与DIN浓度存在显著的相关关系($r = 0.37, p < 0.01$)外,Chl *a*浓度与营养盐浓度、 $C_{\text{DIN}}/C_{\text{SRP}}$ 、TSP浓度、温度之间没有显著的相关关系。上述结果表明,江苏近岸海域浮游植物的生长繁殖可能受多种环境因子的共同调控,而并非受限于某单一因子。在除2020年秋季之外的航次调查中,Chl *a*与COD浓度都呈显著的正相关关系($r > 0.26, p < 0.01$),侧面说明浮游植物的丰度与人为因素造成的污染密切相

关。pH和DO浓度的数据显示,江苏近岸海域并未出现明显的海水酸化和缺氧情况,并且二者与其他环境因子之间缺乏普遍的相关关系。

2.4 富营养化指数的时空分布

两个富营养化指数(*NQI*和*E*)的空间分布显示,富营养化水平从近岸到外海逐渐降低,外缘海域大多处于贫营养状态。处于富营养状态的站点多位于主要河口区(如灌河口、射阳河口、新洋港入海口和长江口)和对流扩散能力较弱的半封闭海湾(如弶港附近海域、海州湾)。但是,海域中呈现重度富营养状态的站点在不同调查中并不完全一致(图6和图7)。

与营养盐浓度相似,*NQI*和*E*一般在夏季达到最高。相较于2019年,2020年处于中营养至富营养状态的海域面积明显增加,富营养化程度加重(图6和图7)。

2.5 讨论

江苏近岸海域营养盐浓度和富营养化程度较高,而外海偏低,这一分布模式与本区域的其他营养盐调查结果相似^[11,15-18]。然而,此前针对该海域营养盐的大多数调查的调查区域不固定,部分调查未覆盖离岸较近的浅滩海域,而且,这些调查多集中于浒苔大量繁殖的春末^[17],很少涉

及营养盐浓度较高的夏季。本研究能在一定程度上弥补这些不足。另外,本研究发现了几个营养盐和 Chl *a* 浓度较高的富营养化高发区域:灌河口、射阳河口、新洋港入海口、长江口等河口区以及海州湾和弥港等海域(图 1)。其中,河口区主要受径流输入影响,海域污染严重;而海州湾和弥港海域水体交换能力弱,不利于海域内污染物的自净^[19]。江苏省河网复杂,入海河流众多

(超过 50 条),而且河流多受水闸控制,排水(污)的时间和总量有较大差别。这些现象可能导致同一时间不同海区营养盐的陆源输入量不同,造成整个海域富营养化水平的空间差异较大。近岸水体营养盐浓度高值区的分布以及盐度与营养盐、Chl *a*、COD 浓度之间的显著负相关关系均表明,陆源输入可能是造成本海域富营养化的主要原因。

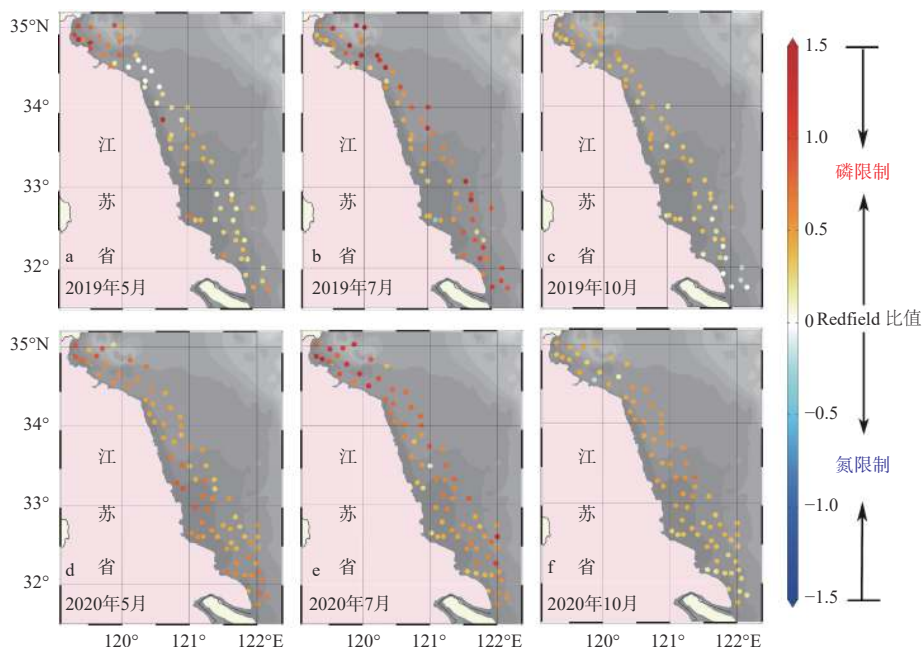


图 5 氮磷比参数 NP 的时空分布

Fig. 5 Spatiotemporal distribution of surface dimensionless parameter NP

江苏省夏季降水偏多,地表径流量在夏季达到一年中的最大值。陆源输入在很大程度上造成了夏季江苏近岸海域营养盐浓度和富营养化水平的上升(图 2、图 3、图 6 和图 7)。因此,尽管绿潮灾害多发生于春季,但对江苏近岸海域富营养化的研究应偏重于夏季。江苏近岸海域营养盐浓度的季节变化规律不同于某些受河流影响较小的陆架海区,如荷兰的东斯海尔德海湾(Eastern Scheldt)。该海湾的营养盐在初级生产力较弱的冬季累积,在春季藻华暴发后达到一年中的最低浓度,并在初级生产力较强的夏季维持较低的水平^[20]。世界上很多河流径流量的季节变化也不同于长江和江苏省入海河流。例如,由于冰雪融水的汇入,美国密西西比河(Mississippi River)和切萨皮克湾(Chesapeake Bay)的径流量

和河口区营养盐浓度在春季最高^[21-22]。此外,夏季江苏外海浮游植物丰度较高(图 4),初级生产力较强,消耗了海域中大量的营养盐,而且,夏季南黄海深水区层化较强,底层营养盐难以靠垂向混合补充到表层^[23]。这两个因素都导致了夏季江苏外海营养盐浓度偏低。同时,受陆源输入影响,夏季近岸营养盐浓度较高,本海域形成了一年最大的从外海到近岸的营养盐浓度梯度。因此,陆源输入和外海环境共同控制夏季江苏近岸海域营养盐浓度的分布。

江苏近岸海域 2020 年的富营养化程度远高于 2019 年,这可能与降水量和径流量密切相关。根据我国长江水利委员会的数据,2019 年和 2020 年长江大通站的年平均径流量分别约为 29600 m³/s 和 37600 m³/s, 2020 年年平均径流量

较2019年增加了27.0%。《江苏省水资源公报》数据显示,2020年为丰水年,该年度全省降水量比2019年增加54.7%,比多年平均值偏高22.8%。因为降水量和径流量的增加,2020年江苏近岸

处于重度富营养状态的海域面积增大,营养盐高浓度等值线明显向外延伸(图2、图3、图6和图7)。另外,江苏近岸海域2020年的 C_{DIN}/C_{SRP} 总体较2019年增加(图5d—图5f),这可能

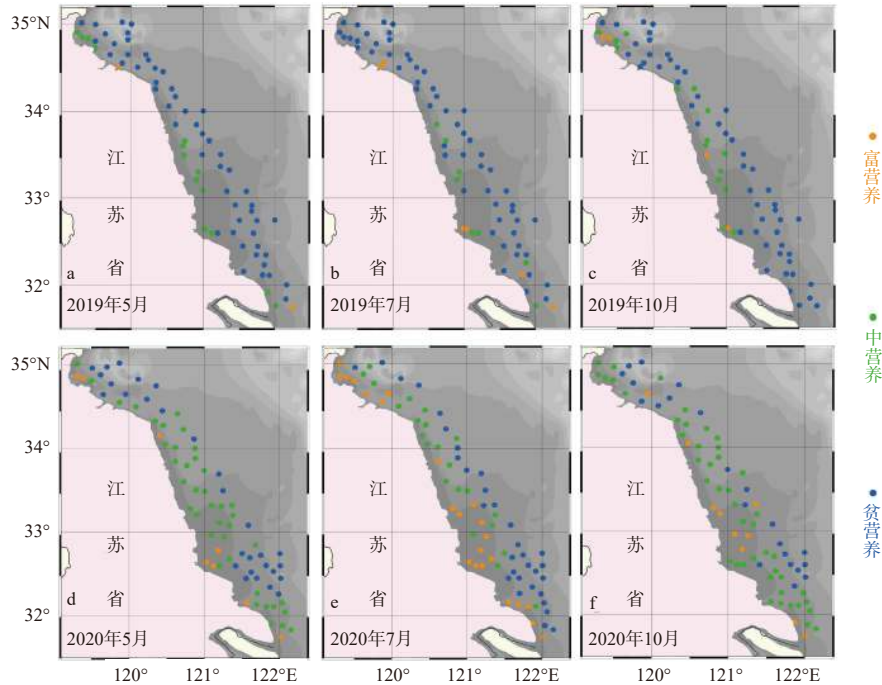


图6 NQI 时空分布

Fig. 6 Spatiotemporal distribution of surface dimensionless parameter NQI

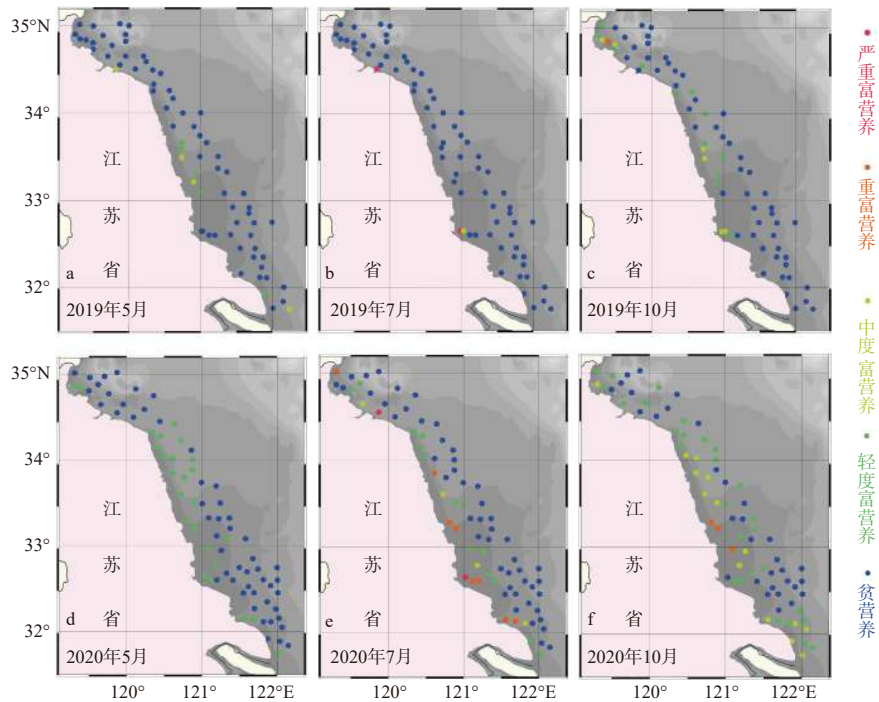


图7 E 时空分布

Fig. 7 Spatiotemporal distribution of surface dimensionless parameter E

与大多数河流中氮磷比较高有关^[24]。

除陆源输入外,影响江苏近岸海域富营养化程度的因素还包括大气沉降、底泥释放和南黄海环流等,这些因素对江苏近岸海域水质的影响值得进一步研究。

3 结论

(1)在江苏近岸海域,DIN、SRP 浓度和富营养化程度从近岸到远海逐渐降低。在地表径流较大的夏季和降水量偏高的 2020 年,该海域呈现更高的 Chl *a* 浓度、氮磷比和富营养化程度。以上结果表明,陆源输入是造成江苏近岸海域富营养化的重要原因。

(2)江苏近岸海域富营养化程度的空间差异很大。本研究根据营养盐浓度和富营养化指数的空间分布特征发现,富营养化高发的区域为受径流影响较大的河口区(如灌河口、射阳河口、新洋港入海口和长江口)以及水体交换能力较差的海湾(如琼港海域和海州湾)。这些海域的水质监测、研究和管控值得重视。

参考文献:

- [1] NIXON S W. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns[J]. *Ophelia*, 1995, 41(1): 199-219.
- [2] WANG Y J, LIU D Y, XIAO W P, et al. Coastal eutrophication in China: Trend, sources, and ecological effects[J]. *Harmful Algae*, 2021, 107: 102058.
- [3] SMITH V H, SCHINDLER D W. Eutrophication science: where do we go from here?[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(4): 201-207.
- [4] 张海霞. 2017年长江口及邻近海域的营养盐—分布、调控及富营养化生态效应趋势评估[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] GARNIER J, BILLEN G, LASSALETTA L, et al. Hydromorphology of coastal zone and structure of watershed agro-food system are main determinants of coastal eutrophication[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(2): 023005.
- [8] ZHANG H B, SU R G, SHI X Y, et al. Role of nutrients in the development of floating green tides in the Southern Yellow Sea, China, in 2017[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111197.
- [9] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1122-1126.
- [10] JIANG Z B, CHEN J F, ZHOU F, et al. Controlling factors of summer phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 101: 71-84.
- [11] CHEN Y N, SONG D H, LI K, et al. Hydro-biogeochemical modeling of the early-stage outbreak of green tide (*Ulva prolifera*) driven by land-based nutrient loads in the Jiangsu coast[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 153: 111028.
- [12] 王 艳, 魏爱泓, 张 丽, 等. 苏北灌河口邻近海域氮、磷污染物环境容量研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2015, 45(6): 78-84.
- [13] ZHAO S B, XU B C, YAO Q Z, et al. Nutrient-rich submarine groundwater discharge fuels the largest green tide in the world[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144845.
- [14] WEI Q S, WANG B D, YAO Q Z, et al. Hydro-biogeochemical processes and their implications for *Ulva prolifera* blooms and expansion in the world's largest green tide occurrence region (Yellow Sea, China)[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 645: 257-266.
- [15] LI H M, ZHANG Y Y, TANG H J, et al. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occurrence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2017, 63: 164-172.
- [16] SHI X Y, QI M Y, TANG H J, et al. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 36-43.
- [17] 董明帆, 杨福霞, 简慧敏, 等. 苏北浅滩绿潮爆发早期营养盐的水平分布[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2018, 48(11): 93-99.
- [18] 潘 俊, 于 非, 魏传杰, 等. 南黄海绿潮暴发与硝酸盐及水文环境因子的关系[J]. *海洋与湖泊*, 2018, 49(5): 1031-1037.
- [19] 周家艳, 田 颖, 李 冰. 南黄海近岸水环境健康分区及污染控制对策研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2016 (1): 30-36.
- [20] JIANG L, GERKEMA T, KROMKAMP J C, et al. Drivers of the spatial phytoplankton gradient in estuarine-coastal systems: generic implications of a case study in a Dutch tidal bay[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17(16): 4135-4152.
- [21] JIANG L, XIA M. Modeling investigation of the nutrient and phytoplankton variability in the Chesapeake Bay outflow plume[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 162: 290-302.
- [22] LOHRENZ S E, FAHNENSTIEL G L, REDALJE D G, et al. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 155: 45-54.
- [23] WEI Q S, WANG B D, FU M Z, et al. Spatiotemporal variability of physical-biogeochemical processes and intrinsic correlations in the semi-enclosed South Yellow Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(10): 11-26.
- [24] 宋金明, 袁华茂, 李学刚, 等. 胶州湾的生态环境演变与营养盐变化的关系[J]. *海洋科学*, 2020, 44(8): 106-117.