

廖名稳, 裴绍峰, 段云莹, 等. 江苏盐城近海富营养化评价与径流输入的影响[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(9): 26-36.

LIAO Mingwen, PEI Shaofeng, DUAN Yunying, et al. Evaluation of eutrophication and impact of river runoff along the coastal zone of Yancheng City, Jiangsu Province[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(9): 26-36.

江苏盐城近海富营养化评价与径流输入的影响

廖名稳^{1,2,3,4}, 裴绍峰^{3,4,5*}, 段云莹^{3,4}, 李赛赛^{3,4}, 朱志强^{3,4},
何磊^{3,4}, 谢柳娟^{3,4}, 侯国华^{3,4}, 王锦^{3,4}, 叶思源^{3,4,5}

(1 中国地质科学院, 北京 100037; 2 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3 青岛海洋地质研究所生态地质与气候变化实验室, 青岛 266237; 4 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266237;

5 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061)

摘要:依据 2018 年江苏盐城近岸海域的营养盐和化学需氧量 (COD) 等调查数据, 采用单因子污染指数法、营养盐结构和限制性分析、富营养化状态指数法等对水域营养盐状况与富营养化特征进行了系统分析和评价。同时, 对近岸 4 条主要河流的溶解无机氮 (DIN)、溶解无机磷 (DIP) 和 COD 入海通量进行了估算, 并探讨了陆源输入对近岸海域的影响。结果表明, 该区水体 DIN 和 DIP 含量劣于第Ⅲ类海水水质标准的站位占比分别为 90% 和 71%, 但 COD 污染并不显著, 78% 的调查站位水体 COD 符合或优于国家Ⅰ类海水水质标准。水体营养盐与 COD 含量的空间分布趋势相似, 表现为近岸高、离岸低、河口与港口局部区域异常高。调查区富营养化极为严重, 98% 的调查站位富营养化状态指数 (E) ≥ 1 , 重度富营养化 ($E > 10$) 的站位占比约 30%。水体 N/P 平均为 34, 远高于 Redfield 比值, 氮磷比例严重失衡, 藻类生长可能会受到磷的潜在限制。经估算, 近岸 4 条主要河流年 DIN、DIP 和 COD 的入海总量分别为 12 901、484 和 33 077 t, 为近岸海域污染物的主要来源; 且各项污染物丰水季通量约为枯水季 2 倍; 丰水季河流水体 N/P 比平均约为 24.7, N 污染较为严重, 可能是造成夏季近岸海域氮磷比例失衡的重要原因之一。

关键词:江苏盐城; 富营养化; 营养盐; 径流输入; 营养盐比值

中图分类号: P734; X55

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.011

0 引言

氮、磷等营养盐是海洋浮游植物生长和繁殖的重要生源要素, 也是海洋生态环境评估和地球生物化学研究的重点关注对象。随着人类社会和经济的快速发展, 近海生态系统中营养盐的含量在最近

几十年内持续升高, 造成局部海域水质恶化。据 2018 年《中国海洋生态环境状况公报》报道, 中国近岸海域水质污染主要超标因子为无机氮和活性磷酸盐^[1], 而近海营养盐主要源于陆源输入、开阔海域的物质交换、沉积物释放、大气沉降等几种方式^[2]。研究表明, 过量的营养盐输入不仅会加剧河口富营养化程度, 还可能引发赤潮、绿潮、缺氧和低氧区等一系列近海生态灾害, 给沿海居民生活和经济发展带来严重威胁^[3-7]。因此, 查明营养盐污染状况和来源、开展精确的海水富营养化评价^[8]已成为海域污染防治、蓝色海湾治理和沿海城市建设发展的关键^[9]。

江苏盐城是中国沿海经济发展和长江经济带辐射的交汇点, 全市河渠纵横, 号称百河之城, 沿岸有射阳港、大丰港等国家一类开放口岸, 其近海属

收稿日期: 2022-01-16

资助项目: 国家自然科学基金(41306175); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金课题资助(MGE2021KG12); 市南区科技发展资金(2013-14-007-JY); 中国地质调查局项目“江苏滨海湿地多圈层交互带综合地质调查”(DD20189503)

作者简介: 廖名稳(1994—), 男, 硕士, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: 641168940@qq.com

* 通讯作者: 裴绍峰(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: peishaofeng@gmail.com

于南黄海陆缘海^[10]。近年来,随着沿海地区工业、水产养殖和农业的持续发展,盐城近岸海域污染状况日趋严重,富营养化压力不断加大,有害藻华灾害频发^[11-12]。据统计,江苏近海已连续 15 年爆发浒苔灾害,2021 年更是达到迄今为止的最大规模,已造成重大经济损失,同时干扰了沿海水产养殖和居民生活^[13]。然而,以往虽对江苏近岸海域营养盐含量和分布开展了初步的调查研究^[14-15],但目前对该海域营养盐对藻类的限制状况、氮磷比例和污染来源、富营养化水平尚缺乏最新的认识。鉴于此,本研究对盐城近岸海域营养盐含量、空间分布、氮磷比例及其对藻类的限制特征进行了系统研究,对水体富营养化状况和水质进行了综合评价;同时对研究区主要的人海河流污染物通量进行了估算,以期为该海域的浒苔治理、富营养化防控等提供数据支撑和理论参考。

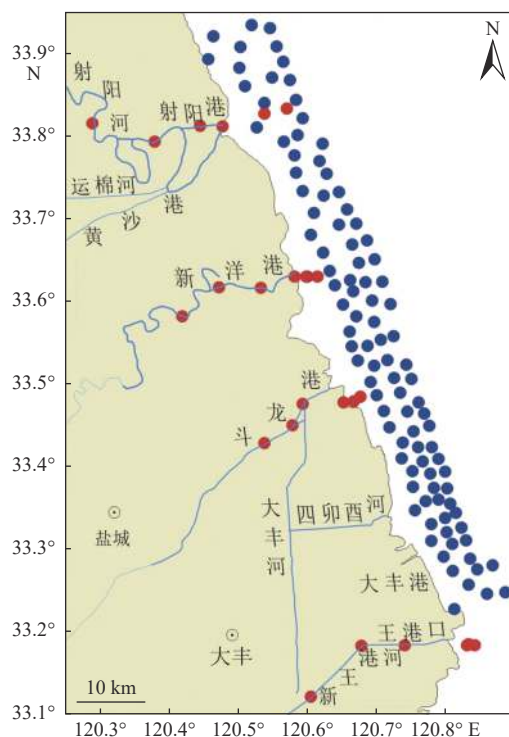
1 调查区域和研究方法

1.1 调查区域、样品采集和分析方法

本研究于 2018 年夏季搭载青岛海洋地质研究所江苏滨海调查航次开展了走航调查,在江苏近岸海域(120.44°—120.8°E, 33.1°—33.95°N)布设 101 个站位(图 1 蓝色站位);为探讨陆域河流物质输入对近海的影响,也针对调查海域沿岸的射阳河、新洋港河、斗龙港河、新王港河等 4 条主要入海河流的营养盐含量进在丰水季和枯水季分别进行系统调查,在每条河流的中下游分别设置 6 个站位(图 1 红色站位)。

本调查依据《海洋监测规范》第 3 部分^[16]进行,使用卡盖式采水器采集海水并获取营养盐、叶绿素等样品。现场获取的水样经 Whatman GF/F 滤膜(预先经 450 °C 高温灼烧 6 h)过滤后装入高密度聚乙烯瓶(预先用 1:10 盐酸浸泡 24 h 后洗净烘干),置于冰柜冷冻保存,待后期实验室内分析。同时对取样站点的海况与各项水文参数进行实测和记录,主要包括温度(T)、盐度(S)、密度、电导率、悬浮颗粒物(SPM)、天气状况等。另用高密度聚乙烯瓶取 100 mL 水样并冷冻保存,以用于后期化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)的测定。

营养盐样品使用荷兰制造的 Skalar San++ 营养盐流动分析仪测定,其中铵盐(NH₄-N)使用靛酚兰法测定,亚硝酸盐(NO₂-N)使用重氮偶氮法测定,硝



蓝色点表示近岸海域站位,红色点表示河流和河口的站位

图 1 江苏盐城近岸海域与入海河流调查站位分布图

Fig.1 Sampling stations and four major inflowing rivers along the coast of Yancheng City, Jiangsu Province

酸盐(NO₃-N)以铜-镉还原法测定,磷酸盐(PO₄-P)使用磷钼蓝法测定,硅酸盐(SiO₃-Si)以硅钼蓝法测定^[17]。NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、SiO₃-Si 的检出限分别为 0.04、0.02、0.02、0.02、0.03 μmol/L。溶解无机氮(DIN)=NH₄-N+NO₂-N+NO₃-N。COD 是衡量水中有机物质含量多少的重要指标,本研究 COD 样品使用碱性高锰酸钾法测定^[18]。

1.2 数据分析和评价方法

1.2.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法^[19]采用单一参数作为评价指标,通过直接分析水质状况与评价标准之间的关系,客观地反映水体的污染程度。其计算公式为:

$$P_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{S_i} \quad (1)$$

式中: $P_{i,j}$ 为以 i 类水质要求作为参数在 j 点上的污染指数;

$C_{i,j}$ 为以 i 类水质要求作为参数时在 j 点的实测浓度, mg/L;

S_i 为单项因子在 i 类水质要求中的标准值, mg/L。

本文主要用该方法研究调查海域 COD 的超标

情况,以《海水水质标准 [GB 3097—1997]》^[20] 中的 I、II、III、IV 类水质要求进行评价, COD 含量标准分别为 2、3、4、5 mg/L。当 $P_{ij} > 1$ 时,视为超出 i 类水质标准,此时 P_{ij} 值越大,表示污染越严重;当 $P_{ij} \leq 1$ 时,说明水体符合 i 类水质要求。

1.2.2 营养盐结构和限制因素评价

海水环境中适宜的营养盐比例有利于浮游植物的生长和繁殖,当营养盐结构组成和含量发生变化时会对浮游植物的生长及群落结构产生一定的影响,进而引发赤潮、绿潮等海洋生态灾害^[21-23]。氮、磷、硅营养盐的含量以及三者之间的摩尔浓度比值常被用来评价营养盐的结构和比例失衡情况^[24]。LAWS 等^[25] 与 NELSON 等^[26] 通过研究浮游植物对每种营养盐吸收的动力学特征确定了一系列吸收阈值: $\text{DIN}=1 \mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P}=0.03 \mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}=2 \mu\text{mol/L}$ (硅藻),并以此作为评价标准,当某种营养盐含量低于此阈值则评价为绝对限制(表 1);如果含量高于阈值,则根据 JUSTIC 和 DORTCH 等^[27-28] 建立的关于浮游植物吸收不同营养盐的化学计量比值关系进行营养盐潜在性限制分析(表 1)。

表 1 营养盐限制因素判定参考值^[29]

Table 1 Criteria of nutrient stoichiometric limitation^[29]

营养盐 限制因子	绝对限制	潜在限制		
		N/P	Si/N	Si/P
N限制	$\text{DIN} < 1 \mu\text{mol/L}$	< 10	> 1	
P限制	$\text{DIP} < 0.1 \mu\text{mol/L}$	> 22		> 22
Si限制	$\text{DSi} < 2 \mu\text{mol/L}$		< 1	< 10

1.2.3 富营状态指数法与潜在性富营养化评价模式

海洋富营养化指水体中由于营养物质过度增加,并导致生态系统有机质增多、区域低氧、藻华爆发等一些异常改变的过程^[30];因其机理较为复杂,一般较难用单一的物理、化学或生物学指标来判别。本调查借鉴富营养状态指数法(Eutrophication index method, EIM)进行评价,该方法由冈市友利^[31] 在 1972 年首次提出,后经邹景忠等^[32] 结合中国海域实际情况对原式进行了优化。富营养状态指数公式如下:

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}}}{4500} \times 10^6 \quad (2)$$

式中: E 为富营养化指数;

C_{COD} 、 C_{DIN} 、 C_{DIP} 分别为水体中 COD、DIN、溶解无机磷(DIP)的浓度, mg/L。

当富营养状态指数 $E \geq 1$ 时,一般认为存在富营养化问题, E 值越高表示富营养化水平越高。

浮游植物生长过程中对氮和磷的吸收比例遵循 Redfield 比值($\text{N:P}=16:1$)^[33-34],这必然导致水体中的一部分氮或一部分磷相对过剩,分别对应磷限制或氮限制的状况。富营养状态指数法虽然可对水域的营养盐污染状况进行评价,但却无法充分地体现出浮游植物生长过程中所导致的水体营养盐动态变化和对浮游植物的绝对限制或潜在限制状况。这就导致在评价过程中相对过剩的营养盐会使得所评价海域的富营养化水平升高,然而实际上这些过剩的营养盐并未被浮游植物生长所吸收,也未对海域产生实质性的影响^[35-36]。因此,我们需要对这类存在营养盐限制的水体作潜在性富营养化评估,从而更好地了解水体营养盐结构及其对藻类生长的影响。

本研究将参照郭卫东等^[35] 提出的潜在性富营养化评价模式(Potential Eutrophication Assessment Model, PEAM)并结合中国海水水质标准^[20],以 DIN 和 DIP 作为主要参数,对研究海域进行潜在性富营养化状况进行评价,具体评价方法见表 2。

1.2.4 河流营养盐入海通量计算

营养盐入海通量按公式: $Q = q \times c \times 100$ 计算。式中: Q 为入海通量, t/a;

Q 为某一时期(月、季或年)的径流量, 亿 m^3/a ;

c 为某一营养盐浓度, mg/L。

计算中使用的河流通量引自孙丽萍^[37],来源于江苏水文局。

2 结果与讨论

2.1 研究区营养盐分布状况

水体 DIN 浓度的分布呈近岸高、离岸低的特征,并在射阳港、新洋港、斗龙港、四卯西河口和近海区域出现显著高值区(图 2),以射阳港近海水域最为显著。水体 DIN 含量最高可达 $123.11 \mu\text{mol/L}$,最低为 $13.72 \mu\text{mol/L}$,平均为 $(38.24 \pm 12.01) \mu\text{mol/L}$ 。DIN 主要组分为 $\text{NO}_3\text{-N}$,占 81%。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 高值区主要分布在近岸水域,最高含量可达 $43.49 \mu\text{mol/L}$,平均为 $(31.31 \pm 5.09) \mu\text{mol/L}$ 。DIN 中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量较低,分别占 13% 与 6%;二者在研究区也存在 3~4 个较为显著的高值区(如图 2 所示),同样分布在射阳港、新洋港、斗龙港和四卯西河口附近海域。其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 高值区以射阳港附近最为显著,最高含量可达 $86.19 \mu\text{mol/L}$,平均含量为 $(5.30 \pm$

表 2 潜在性富营养化评价表^[35]
Table 2 Criteria of potential eutrophication assessment^[35]

级别	营养级	DIN/(mg/L)	DIP/(mg/L)	N:P/摩尔比
I	贫营养	<0.2	<0.030	8~30
II	中度营养	0.2~0.3	0.030~0.045	8~30
III	富营养	>0.3	>0.045	8~30
IV _P	磷限制中度营养	0.2~0.3	-	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>0.3	-	30~60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>0.3	-	>60
IV _N	氮限制中度营养	-	0.030~0.045	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	-	>0.045	4~8
VI _N	氮限制潜在性富营养	-	>0.045	<4

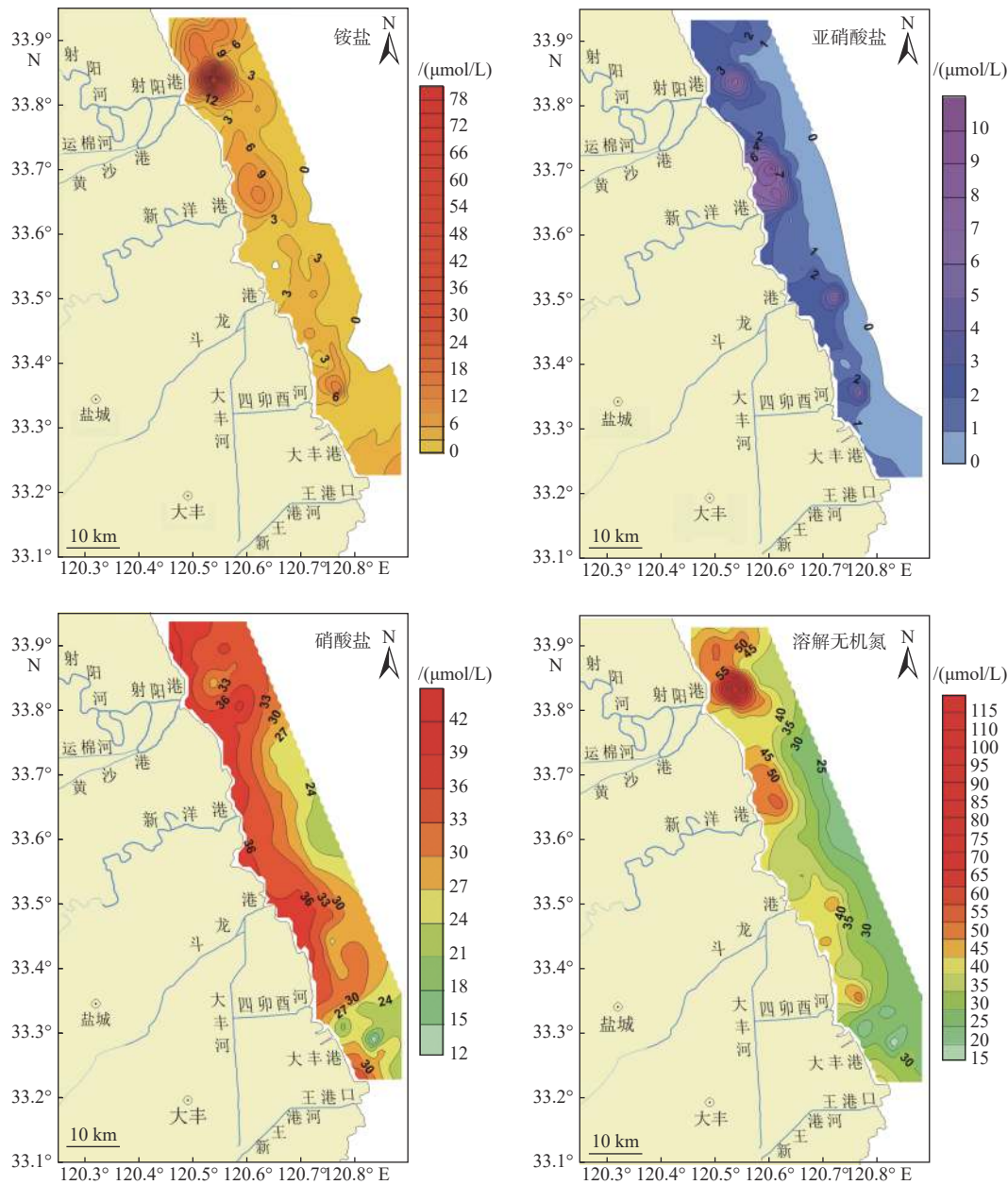


图 2 江苏盐城近岸海域氮不同组分的分布状况

Fig.2 Distributions of various nitrogen species in coastal waters of Yancheng City, Jiangsu Province

9.04)μmol/L; 而 NO₂-N 最高含量仅为 10.61 μmol/L, 平均值为(1.63±1.97)μmol/L。调查水域中 DIN 浓
度超过Ⅲ类海水水质标准的站点占比高达 90%, 超过Ⅳ类海水水质标准的站点占比 53.47%, 可见氮污

染比较严重,海水水质不容乐观。

调查水域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的分布特征与 DIN 及其组分的分布特征较为类似,高值区分布在射阳港、新洋港、斗龙港和四卯酉河口附近海域(图 3)。与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 DIN 分布趋势差异之处在于, $\text{PO}_4\text{-P}$ 并未在射阳港附近形成异常高值中心,射阳港近海 $\text{PO}_4\text{-P}$ 最高

含量仅为 $2.31 \mu\text{mol/L}$, 稍高于调查区平均值(1.18 ± 0.38) $\mu\text{mol/L}$, 含量介于 $0.17 \sim 2.30 \mu\text{mol/L}$ 。水质分析结果表明, 调查区约有 71.28% 站位水样中的磷酸盐含量超过国家海水水质 III 类标准, 约 23.76% 的站位超过 IV 类标准, 可见, 磷酸盐也存在较为严重的污染。

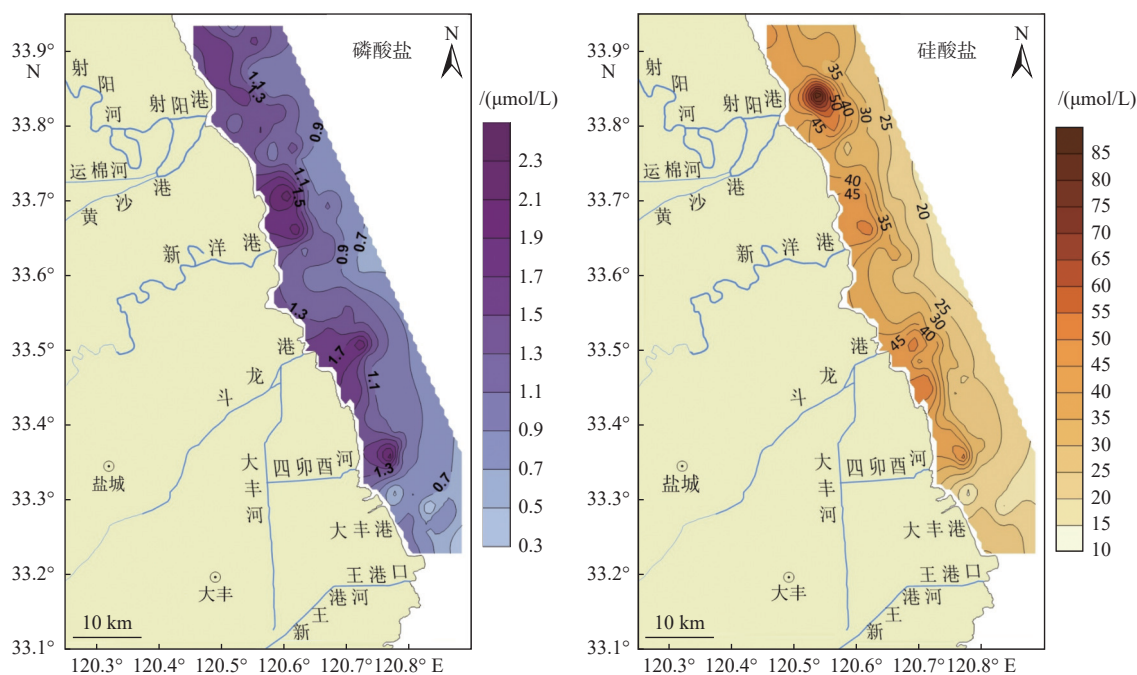


图 3 江苏盐城近岸海域磷酸盐、硅酸盐分布状况

Fig. 3 Distributions of phosphate and silicate in coastal waters of Yancheng City, Jiangsu Province

调查水域中射阳港附近形成硅酸盐异常高值区, 浓度范围为 $12.59 \sim 89.37 \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $(33.07 \pm 10.45) \mu\text{mol/L}$, 显然, 硅酸盐平均含量和最低含量均远高于浮游植物(尤其硅藻)吸收所需的最低阈值 $2 \mu\text{mol/L}$ [26], 足以支撑浮游植物的正常生长和繁殖。此外, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在调查水域同样呈现从近岸向远海递减的趋势, 表明河流排污、港口和水产养殖等人类活动对于近海营养盐含量升高和分布特征具有显著影响 [37]。

与该区历史调查数据 [38-41] 相比, 本调查结果显示各项营养盐平均含量均高于历次调查结果(表 3)。从取样站位设置角度来看, 本航次为局部海域调查, 所覆盖的经纬度有限, 所设站位离陆地(尤其河口、港口等)较近, 海水营养盐含量可能受到陆源输入的影响较大。此外, 该区近年来沿岸工业、水产养殖、农业和生活污染物排放加剧, 也在一定程度上提升了近海水体氮、磷营养盐水平 [7]。在充足的营养盐支持下, 当温度、光照等其他环境因子适宜时, 水体中浮游植物将具备快速繁衍和生长的条件, 这

或许是近年来在该区频繁发生浒苔灾害的重要原因之一 [40,42-43]。

2.2 营养盐比例失衡及限制状况探讨

对调查区的营养盐比值进行分析后发现, 该水域 N/P 比值范围为 $23 \sim 95$, 平均为 34.18 ± 10.41 , 均高于浮游植物生长所需的最低阈值(Redfield 比值 $16:1$ [33-34]) 的 2 倍以上, 最高可达 Redfield 比值的 6 倍, N、P 营养盐比例严重失衡。而 Si/P 比值范围为 $20 \sim 79$, 平均为 29.19 ± 7.98 , 也较正常比值偏差较大。可见, 该区营养盐比值整体处于失衡状态, 尤其以射阳港和大丰港外海域最为显著(图 4)。针对研究区营养盐限制状况, 利用浮游植物生长阈值 [25-26] 对研究区氮、磷、硅进行绝对限制评价, 对超出阈值的站位则使用潜在限制标准进行评价。

统计结果表明, 研究区所有站位均未出现营养盐绝对限制情况, 且 DIN、DIP 和溶解无机硅酸盐(DISI)的浓度都远高于浮游植物生长绝对限制阈值 [29], 其中研究区 DIP 和 DISi 浓度的最低值均在

表 3 研究区营养盐历史调查数据汇总及对比

Table 3 Summary and comparison of historical data of nutrients in the study area

/(μmol/L)					
项目	海区	调查时间	表层水		数据来源
			平均值	变化范围	
NO ₃ -N	122°—123°E33°N以南	2006年夏季	—	0.20~15.00	文献[41]
	120.5°—123°E33.5°—36°N	2008年夏季	1.32	0.02~10.22	文献[39]
	120.5°—122.2°E32.3°—34°N	2010年夏季	14.57	4.52~37.13	文献[38]
	119.25°—122.17°E31.75°—35.13°N	2014年夏季	23.7	5.61~59.6	文献[14]
	120.44°—120.8°E33.1°—33.95°N	2018年夏季	31.31	9.87~43.49	本研究
NH ₄ -N	同上	2006年夏季	—	—	文献[41]
		2008年夏季	4.28	0.50~10.00	文献[39]
		2010年夏季	—	—	文献[38]
		2014年夏季	1.77	0.47~6.48	文献[14]
		2018年夏季	5.30	0.09~86.19	本研究
NO ₂ -N	同上	2006年夏季	—	—	文献[41]
		2008年夏季	0.18	0.02~1.03	文献[39]
		2010年夏季	—	—	文献[38]
		2014年夏季	1.50	0.05~7.50	文献[14]
		2018年夏季	1.63	0.19~10.61	本研究
PO ₄ -P	同上	2006年夏季	—	0.10~0.30	文献[41]
		2008年夏季	0.02	0.02~0.07	文献[39]
		2010年夏季	0.56	0.21~1.29	文献[38]
		2014年夏季	0.42	0.16~1.36	文献[14]
		2018年夏季	1.18	0.17~2.31	本研究
SiO ₃ -Si	同上	2006年夏季	—	1.00~5.00	文献[41]
		2008年夏季	1.82	0.02~5.15	文献[39]
		2010年夏季	10.65	1.83~21.06	文献[38]
		2014年夏季	11.96	1.76~24.39	文献[14]
		2018年夏季	33.07	12.59~89.37	本研究

注：“—”表示文献中未列出数据。

限制阈值的 5 倍以上, 而 DIN 浓度的最低值则是限制阈值的 13.7 倍, 这表明调查海域营养盐含量整体处于较高的水平。但就营养盐的潜在限制而言, 以往研究^[44]认为, 夏季南黄海西南部广泛存在磷潜在限制情况, 这与本次调查结果取得的结论基本一致。本研究的潜在限制分析结果显示, DIN 和 DISi 的潜在限制站位数为 0 个, 但 DIP 的潜在限制情况比较严重, 约有 96% 的站位 N/P 和 Si/P 比值均>22, 浮游植物生长受到磷酸盐的潜在限制。由此可见, 江苏近岸海域营养盐结构虽然存在较为严重的比例失衡, 但由于其各项营养盐含量的绝对值水平较高, 在浮游植物快速繁殖的初期并不会限制浮游植物的生长, 甚至高含量的 DIN、DIP 和 DISi 会加速浮游藻类的爆发, 引发赤潮、绿潮等有害藻华现象。

2.3 海域 COD 分布状况和单因子评价

调查海区 COD 浓度较低, 浓度范围为 0.91~5.2 mg/L, 最高值是最低值的 5.7 倍, 平均含量为 (1.69±0.74)mg/L。COD 单因子污染指数评价结果(表 4)显示: 调查海域 COD 污染状况并不显著, 符合或高于国家 I 类海水水质标准站位占比达到 78.21%, III 类及 III 类以上水质占比达到了 97.02%, 整体情况良好, 与艾洋漪等^[45]2015 年在附近海域调查结果(平均含量 1.57 mg/L)相近, 无明显恶化趋势。整个调查区域 COD 分布表现为近岸高、离岸低, 且在河口、港口附近出现异常高值中心, 例如, 在射阳河口出现含量高达 5.21 mg/L 的异常高值中心; 在斗龙港与四卯西河口中间位置形成高值区, 最高可达 2.64 mg/L(图 5)。这种分布趋势与 DIN、

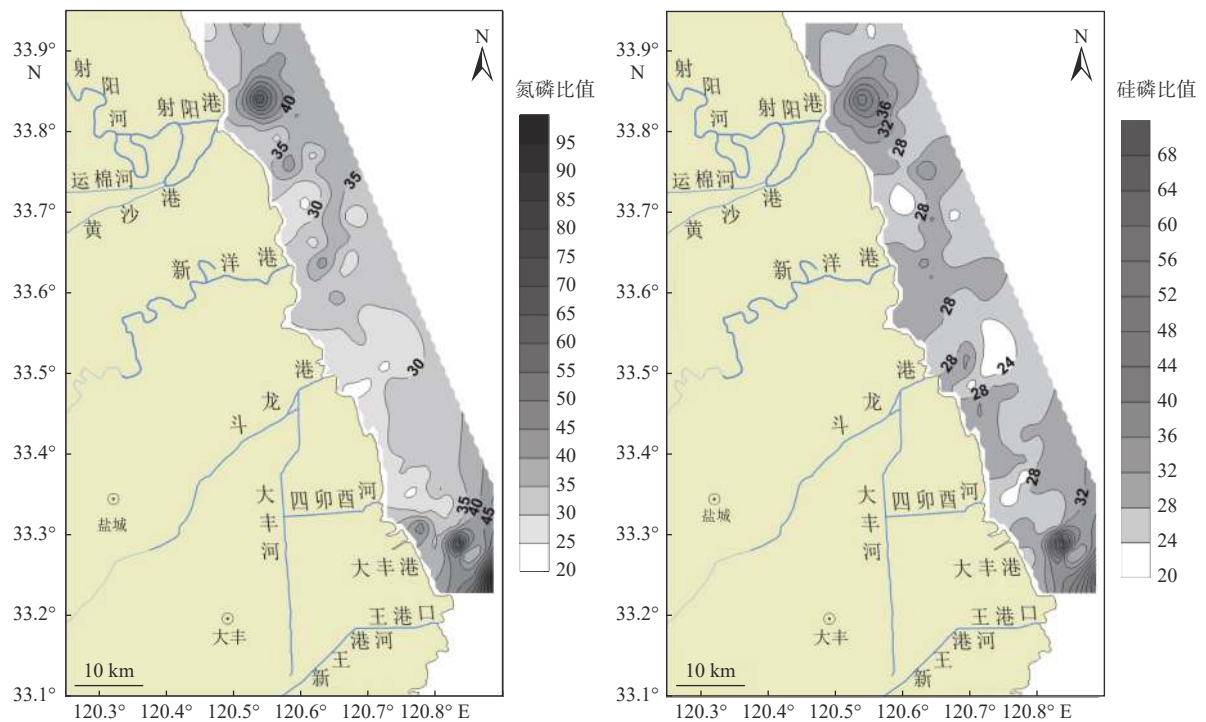


图 4 江苏盐城近岸海域营养盐比例失衡状况

Fig.4 Imbalance of nutrient ratios in coastal waters of Yancheng City, Jiangsu Province

表 4 COD 单因子污染指数 ($P_{i,j}$) 评价结果

Table 4 Evaluation results of COD pollution index ($P_{i,j}$)

海水水质标准	I 类	II 类	III 类	IV 类	超IV类
站位占比/%	78.21	16.83	1.98	1.98	0.99
指数范围	0.45~0.99	0.68~0.99	0.86~0.91	0.82~0.86	-
均值±标准差	0.69±0.14	0.79±0.09	0.89±0.03	0.84±0.24	-

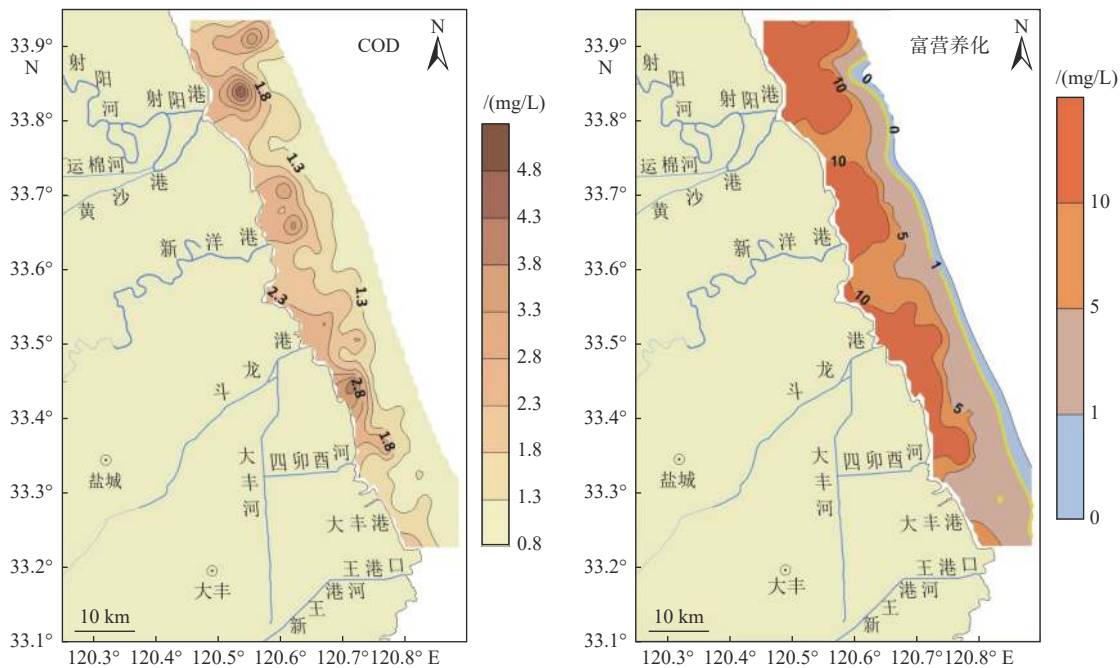


图 5 江苏盐城近岸海域 COD 与富营养化指数分布图

Fig.5 Distribution of COD and eutrophication index in coastal waters of Yancheng, Jiangsu Province

DIP 较为类似,可见,近海 COD 污染物可能主要来源于陆地输入、海水养殖污染和港口污染等。沈永明^[46]在对江苏近岸海域营养盐类污染进行调查过程中也发现了类似规律。

2.4 富营养化综合评价与分析

本文采用 2 种富营养化评价方法对研究区进行了评价,评价结果汇总在表 5 中。富营养状态指数法评价结果表明,研究区富营养状态指数分布介于 0.34~111.78,均值为 10.11 ± 13.77 ,表明该水域整体处于严重的富营养化状态。本文对调查海域富营养化水平进行了详细分区和站位分类(见表 5): $E < 1$,为非富营养化; $1 < E \leq 5$,为轻度富营养化; $5 < E \leq 10$ 为中度富营养化; $E > 10$ 为重度富营养化。研究区约有 29.7% 的站位 $E > 10$,表明此类水域污染物含量较高,水域处于重度富营养化水平;而处于中度和轻度富营养化水平的站位占比约为 29.7% 和 38.6%,仅有 2% 的站位处于非富营养化状态。研究区重度富营养化区域在空间上的分布状况(图 5):整体上大致呈近岸高、离岸低的特点,特别在射阳港、新洋港、斗龙港和四卯西河口及其附近海域富营养化水平较高,这与 DIN、DIP、COD 空间分布特征比较类似。可见,近岸水域富营养化水平受到陆源输入,尤其是河流、港口的输入影响较为显著。

表 5 针对江苏盐城近岸海域进行 2 种富营养化评价的统计结果

Table 5 Statistical results of two eutrophication evaluation methods in coastal waters of Yancheng City, Jiangsu Province

评价方法	评价结果分级	站位占比/%
EIM	非富营养化(<1)	2.00
	轻度富营养化($1 \sim 5$)	38.60
	中度富营养化($5 \sim 10$)	29.70
	重度富营养化(>10)	29.70
PEAM	III	12.87
	IV _P	2.97
	V _P	70.29
	VI _P	1.98
	无等级	11.88

潜在富营养化评价模式(PEAM)评价结果表明,处于Ⅲ级(富营养)的站位比例为 12.87%,未出现Ⅰ、Ⅱ级站位,且不存在氮限制站位;海域潜在富营养状态比较单一,75.24% 的站位处于 P 限制状态,以“磷中等限制潜在性富营养”状态为主,占比达

70.29%,这与郭卫东等^[35]对中国近岸海域富营养化特征的评价基本一致,而 IV_P、VI_P 占比仅为 2.97% 与 1.98%。对比丁言者^[47]2012 年调查结果,研究区富营养状态空间分布无明显变化,仍然表现为近岸海域富营养化严重,离岸海域较为轻微,但其富营养化结构发生了较大的改变,富营养化站位比例由 80% 下降到了 12.87%,同时,出现了以“磷中等限制潜在性富营养”为主的富营养化状况,富营养化结构的变化无疑会对该海域的浮游植物群落结构以及渔业生产等造成一定影响。

研究显示,江苏盐城近海 COD 整体处于较低的水平,污染程度较低,而 DIN 和 DIP 的水平近年来出现上升趋势,尤其是 DIN 浓度,远超历年同期水平,表明江苏近岸海域富营养化加重主要由于 DIN 含量不断增加所致。与此同时,研究区的氮、磷含量相差悬殊,出现广泛的“磷中等限制潜在性富营养”情况。污染物空间分布特征(图 2、3)上明显存在高浓度营养盐从河口扩散向远海现象,由此判断河流输入很可能是导致该区域水体富营养化程度加剧的主要原因。

2.5 径流输入对调查海域水质污染的影响

河流和海洋在河口处交汇,来自陆地的大量营养物质随河流输入河口进而扩散入大海。工业革命以来,由于人类活动的影响(主要是施用化肥)全球大部分河口和近岸水域由原来的寡营养变为中等营养或富营养化,如我国的长江口^[48]、珠江口等。入海河流的水质状况和污染物输送通量作为陆地对海洋影响的热点问题已受到了各国科学家的重视^[2,49-50]。本研究在 2018 年夏季丰水季和冬季枯水季对研究区 4 条主要入海河流营养盐通量分别进行了调查,计算结果见表 6。

经计算,全年 DIN 输入总量为 12 901 t,其中丰水季总量为 8 867 t,枯水季为 4 034 t,不足丰水季的一半;DIP 全年总量为 484 t,其中枯水季为 126 t,丰水季为 358 t,约是枯水季的 3 倍;COD 全年输入总量为 33 077 t,丰水季总量为 22 494 t,枯水季为 10 583 t,相差接近 1 倍。单条河流 DIP 总量季节性差异的比值范围为 2.3~3.2, DIN 总量季节性差异比值范围为 2.0~2.7,而 COD 总量的季节性差异比值范围均在 2 左右,这与各条河流在丰水季、枯水季径流量的比值(约为 2)十分接近。由此看来,河流输入营养盐通量整体表现为丰水季>枯水季,受径流量的影响较大。

表 6 江苏盐城近岸 4 条河流丰、枯水季 DIN、DIP、COD 通量计算结果

Table 6 Estimated fluxes of DIN, DIP, and COD from four rivers into the coast of Yancheng City, Jiangsu Province

河流名称	径流量/亿m ³	流域面积/km ²	DIP通量/(t/a)		DIN通量/(t/a)		COD通量/(t/a)		
			范围	均值	范围	均值	范围	均值	
丰水季	射阳河	26.66	4036	115~177	146	2 355~5 496	3 925	7 598~14 192	10 895
	新洋港	12.95	2478	74~116	95	1 310~3 452	2 381	4 813~7 032	5 922
	斗龙港	7.3	4428	44~70	57	854~1 698	1 276	2 107~3 614	2 860
	新王港	5.63	596	47~73	60	1 015~1 555	1 285	2 665~2 969	2 817
	总和	52.54	11 538	-	358	-	8 867	-	22 494
枯水季	射阳河	14.54	4 036	37~66	51	1 347~2 336	1 841	3 218~6 955	5 087
	新洋港	7.06	2 478	27~37	32	967~1 211	1 089	2 495~3 066	2 780
	斗龙港	3.98	4 428	17~31	24	343~595	469	1 002~1 861	1 431
	新王港	3.07	596	17~21	19	518~752	635	1 124~1 446	1 285
	总和	28.65	11 538	-	126	-	4 034	-	10 583

根据《地表水环境质量标准 [GB 3838—2002]》^[51], 研究区内所有河流全年 COD 含量均可达一类水质以上, 无机氮的污染则较为严重, 4 条河流氮全年处于超Ⅲ类水质状态, 其中新王港河污染最为严重, 全年处于劣Ⅴ类水质状态, 其他 3 条河流存在季节性变化, 水质表现为枯水季好, 丰水季差。流域磷的污染状况稍好, 全年都达到二类水质标准。针对污染最严重的射阳河流域, 本研究对其主要污染物进行了初步的溯源分析, 发现该河流的营养盐主要来源于生活污染、农业污染以及工业污染^[52]。生活污染源包括生活污水和生活垃圾 2 部分, 其中生活污水所占比例约为 90%, 皆排入射阳河中; 农业面源包括种植业、畜禽养殖业、水产养殖业 3 部分, 污染物主要是肥料、动物粪便等; 工业方面主要是不经过污水处理的废水直排。另外, 随着近年来港口的发展, 其带来的污染也越来越多^[53]。

丰水季河流输入水体中 N/P 比值为 24.7, 反映了河流氮、磷比例失衡, 这与调查区域海水氮磷比例失衡的问题较为相似。由此推测, 河流输入为盐城近海带来了丰沛的营养物质, 从而引起了海域富营养化问题; 同时, 由于河流携带的营养物质中 N/P 比值较大, 也造成了研究海域内出现以磷限制为特征的营养盐比例失衡问题。

3 结论

(1) 江苏盐城近岸海域 DIN、DIP、COD 等污染物分布受陆源输入影响, 呈现由近岸向离岸方向逐渐降低的趋势, 并在河口及港口出现异常高值中心; DISi 受到陆地河流输入的影响, 也呈相同分布趋势。

(2) 研究区富营养化状况十分严重, 98% 的站

位存在富营养化现象(其中 29.7% 处于重度富营养化水平), 仅有 2% 的站位处于非富营养化状态。同时, 调查海域的氮磷营养盐结构失衡, N/P 比平均为 34.18 ± 10.41 , 受磷的潜在限制作用明显, 表现为受磷中等限制的潜在富营养化。

(3) 受流域农业、工业及生活用水排放等因素的影响, 调查区 4 条河流均存在不同程度的营养盐污染情况, 其中 DIN 为主要污染物。各项污染物含量在丰水季、枯水季差异较为明显, 表现为丰水季 > 枯水季。严重的营养盐污染对近岸海域的水质造成了极大的威胁, 直接影响了该区域海洋浮游植物和各种藻类的正常生长, 可能是该区域浒苔连年爆发的因素之一。同时, 径流输入营养物质中 N/P 比较高, 丰水季可达 24.7, 这也是造成近岸海域出现严重氮磷比例失衡现象的重要原因之一。

参考文献:

- [1] 劳齐斌, 刘国强, 高劲松, 等. 钦州湾养殖区营养盐分布特征及富营养化状况研究[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(3): 407-416.
- [2] DIAZ R J, ROSENBERG R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. Science, 2008, 321(5891): 926-929.
- [3] YAN X L, XU M N, WAN X S, et al. Dual isotope measurements reveal zoning of nitrate processing in the summer Changjiang (Yangtze) River plume[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(24): 12-289.
- [4] 周名江, 朱明远. 我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 21(7): 673-679, 2, 3.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2018年中国海洋生态环境状况公报 [EB/OL]. [2022-1-4]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/tpxw/201905/t20190529_704840.shtml.
- [6] 刘亚林, 刘洁生, 俞志明, 等. 陆源输入营养盐对赤潮形成的影

- 响[J]. *海洋科学*, 2006, 30(6): 66-72.
- [7] 王菊英, 郑楠, 马德毅. 近海生态系统的人为营养盐输入及其控制对策浅析[J]. *海洋学报*, 2020, 42(6): 1-8.
- [8] 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.
- [9] 曹飞凤, 代可, 陶琦茹, 等. 杭州湾近岸海域污染状况分析及治理对策研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(10): 60-69.
- [10] 魏传杰. 南黄海水文环境季节变化与湍流混合研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
- [11] 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. *海洋与湖泊*, 2020, 51(4): 768-788.
- [12] 林森杰, 姬南京, 罗昊. 海洋有害藻华研究进展[J]. *海洋与湖泊*, 2019, 50(3): 495-510.
- [13] 孙瑜, 陈瑜. 浒苔绿潮成黄海海域常态化生态灾害[N]. 2021-07-08(003).
- [14] 张艾芹, 王辉煌, 顾正平, 等. 江苏近岸海域表层海水中营养盐组成、分布及季节变化特征[J]. *海洋湖泊通报*, 2018: 49-59.
- [15] 张丽君. 江苏北部近岸海域营养盐的时空分布与富营养化特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- [16] 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第3部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] 裴绍峰, 沈志良. 长江口上升流区营养盐的分布及其通量的初步估算[J]. *海洋科学*, 2008, 32(9): 64-70, 75.
- [18] 祝陈坚. 海水分析化学实验[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006.
- [19] 周爱国, 蔡鹤生. 地质环境质量评价理论与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. GB 3097—1997 海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [21] ANDERSON D M, CEMBELLA A D, HALLEGRAEFF G M, et al. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 143-176.
- [22] LIANG Z Y, WU S F, CHEN H L, et al. A probabilistic method to enhance understanding of nutrient limitation dynamics of phytoplankton[J]. *Ecological Modelling*, 2018, 368: 404-410.
- [23] WEI Q S, WANG B D, YAO Q Z, et al. Physical-biogeochemical interactions and potential effects on phytoplankton and *Ulva* proliferata in the coastal waters off Qingdao (Yellow Sea, China) [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(2): 11-23.
- [24] 张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 等. 初夏渤海湾营养盐结构特征及其限制状况分析[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3524-3530.
- [25] LAWS E A, PEI S F, BIENFANG P. Phosphate-limited growth of the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* (Bacillariophyceae): evidence of non-monod growth kinetics1 [J]. *Journal of Phycology*, 2013, 49(2): 241-247.
- [26] NELSON D M, BRZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf Stream warm-core rings[J]. *Marine Ecology Progress*, 1990, 62(3): 283-292.
- [27] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(3): 339-356.
- [28] DORTCH Q, WHITLEDGE T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? [J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(11): 1293-1309.
- [29] 张莹, 王玉珏, 王跃启, 等. 2013年夏季渤海环境因子与叶绿素a的空间分布特征及相关性分析[J]. *海洋通报*, 2016, 35(5): 571-578.
- [30] 俞志明, 沈志良. 长江口水域富营养化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [31] 冈市友利. 浅海的污染与赤潮的发生, 内湾赤潮的发生机制[R]. 日本水产资源保护协会, 1972: 58-76.
- [32] 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): 45-58.
- [33] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. *The Sea*, 1963, 2: 26-77.
- [34] GRUBER N, DEUTSCH C A. Redfield's evolving legacy[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12): 853-855.
- [35] 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(1): 64-70.
- [36] 魏潇, 李凡, 马元庆, 等. 2014年山东近岸海域海水氮磷营养盐含量特征及富营养化评价[J]. *海洋湖泊通报*, 2019, 170(5): 105-111.
- [37] 孙丽萍. 江苏省污染物入海通量测算及与水质响应关系研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [38] 高嵩, 石晓勇, 王婷. 浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2204-2209.
- [39] 王婷, 石晓勇, 张传松, 等. 2008年黄海浒苔绿潮爆发区营养盐浓度变化及分布特征[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 578-582.
- [40] 张海波, 刘珂, 苏荣国, 等. 2018年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律与营养盐相互关系探究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(8): 30-39.
- [41] 韦钦胜, 刘璐, 战闰, 等. 夏季南黄海水化学要素的分布特征及影响因素[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(1): 82-88.
- [42] 于仁成, 刘东艳. 我国近海藻华灾害现状、演变趋势与应对策略[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1167-1174.
- [43] 王宗灵, 傅明珠, 周健, 等. 黄海浒苔绿潮防灾减灾现状与早期防控展望[J]. *海洋学报*, 2020, 42(8): 1-11.
- [44] 洪华生. 中国区域海洋学, 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [45] 艾洋洋, 徐敏, 丁言者, 等. 大丰近岸海域水质污染特征及来源[J]. *南京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(4): 153-161.
- [46] 沈永明. 江苏近岸海域营养盐类污染分布特征与评价[J]. *生态环境学报*. 2010: 6-10.
- [47] 丁言者. 江苏近岸海域水质变化特征研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.

- [48] PEI S F, SHEN Z L, LAWS E A. Nutrient dynamics in the upwelling area of Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. Journal of Coastal Research, 2009, 25(3): 569-580.
- [49] KAWABATA Z, HIRANO Y. Growth pattern and cellular nitrogen and phosphorus contents of the dinoflagellate *Peridinium penardii* (Lemm.) Lemm. causing a freshwater red tide in a reservoir[J]. *Hydrobiologia*, 1995, 312(2): 115-120.
- [50] ALVAREZ-SALGADO X A, ROSÓN G, PÉREZ F, et al. Nitrogen cycling in an estuarine upwelling system, the Ria de Arousa (NW Spain). I. Short-time-scale patterns of hydrodynamic and biogeochemical circulation[J]. *Marine Ecology Progress*, 1996, 135(1/3): 259-273.
- [51] 中华人民共和国生态环境部. GB 3838—2002地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [52] 吴云波, 杨浩明. 射阳河水环境综合整治对策研究与分析[J]. *污染防治技术*, 2011, 48-51, 72.
- [53] 齐童, 刘瑞志, 李捷, 等. 射阳河近海段水环境质量分析及评价[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 119-125.

Evaluation of eutrophication and impact of river runoff along the coastal zone of Yancheng City, Jiangsu Province

LIAO Mingwen^{1,2,3,4}, PEI Shaofeng^{3,4,5*}, DUAN Yuning^{3,4}, LI Saisai^{3,4}, ZHU Zhiqiang^{3,4}, HE Lei^{3,4}, XIE Liujuan^{3,4}, HOU Guohua^{3,4}, WANG Jin^{3,4}, YE Siyuan^{3,4,5}

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 10037, China; 2 China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3 Laboratory of Ecogeology and Climate Change, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266237, China;

4 Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeology, China Geological Survey, Qingdao 266237;

5 Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on *in-situ* investigation of water nutrients and chemical oxygen demand (COD) along the coast of Yancheng City, Jiangsu Province in 2018, nutrient concentrations, compositions, and spatial distributions were analyzed using single factor pollution index, nutrient ratios, and nutrient limitation. The related eutrophication status was evaluated using eutrophication state index. Meantime, the fluxes of dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorus (DIP), and COD discharged into coast from four local rivers were calculated, and their impacts on the coast were discussed. Results show that DIN and DIP contents in 90% and 71% of sampling stations, respectively, were higher than the Class III seawater quality standard of China, showing apparent DIN and DIP pollutions. Comparatively, COD pollution was not significant because COD contents in 78% of sampling stations were below the Class I seawater quality standard. Spatial distribution patterns of water nutrient and COD were similar, and their contents decreased from nearshore to offshore in general, but increased sharply in some estuaries and ports. The eutrophication in the study area was very serious, because sampling stations with eutrophication state index ($E \geq 1$) accounted for 98%, and stations with severe eutrophication ($E > 10$) accounted for about 30%. Water N/P ratios were about 34 on average, much higher than the Redfield ratio, implying nutrient composition was seriously unbalanced, and algal growth might be potentially limited by phosphorus. Annual fluxes of DIN, DIP, and COD from four inflowing rivers into the coast were estimated to be 12 901, 484, and 33 077 t, respectively, which were the main pollutant sources of coastal waters. In addition, their fluxes in the wet season were about twice higher than those in the dry season, and N/P ratios of river runoff in the wet season were 24.7 in average, suggesting the serious N pollution, which was possibly the major reason for the imbalance of nitrogen and phosphorus in the coastal waters.

Key words: Yancheng City, Jiangsu Province; eutrophication; nutrient; river runoff; nutrient ratio