

中国东部近海典型海域氮磷比分布格局及 潜在磷限制特征分析*

郭术津^{1,2} 孙晓霞^{1,2} 王楠² 金鑫² 孙妍² 贾贞^{3,4}
王雯^{3,4} 孙松^{1,2①}

(1. 中国科学院海洋研究所 山东胶州湾海洋生态系统国家野外科学观测研究站 山东青岛 266071; 2. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室 山东省海洋生物多样性与资源可持续利用重点实验室 山东青岛 266071; 3. 自然资源部第一海洋研究所 山东青岛 266061; 4. 国家自然科学基金青岛海洋科学资料共享服务中心 山东青岛 266061)

摘要 为评估中国近海营养盐结构特征及潜在营养限制状况, 基于国家自然科学基金委共享航次调查数据, 系统分析了渤海中部、黄海、东海陆架区及长江口海域表层水体溶解无机氮、磷酸盐及其摩尔比(N/P)的空间分布和年际变化特征, 并结合历史观测资料开展长期变化对比分析。结果表明, 渤海中部与黄海在 2015 年和 2017 年大部分海域 N/P 比较高, 普遍显著高于 Redfield 比值(16:1), 反映出明显的氮磷结构失衡及潜在磷限制倾向; 东海陆架区多数年份也表现出较高 N/P 比, 仅在外陆架及黑潮入侵影响区域出现相对较低的 N/P 比, 指示局部海域可能存在潜在氮限制; 长江口海域常年维持高 N/P 比(>64:1), 显示其潜在磷限制倾向较其他海区更为显著。历史资料对比结果显示, 渤海中部和黄海的 N/P 比长期变化均呈现“先升高、后降低”的趋势, 峰值分别出现在 2008 年和 2005 年, 近 20 年来两海域总体处于较高 N/P 比的状态。本研究揭示了中国近海普遍存在的、具有显著区域差异的潜在磷限制格局及其长期演变特征, 为近海营养盐协同调控与生态环境管理提供了重要科学依据。

关键词 N/P 比; 营养盐结构; 潜在营养限制; 空间变化; 年际变化; 中国近海

中图分类号 Q948.8 **doi:** 10.11693/hyhz20260200036

近年来, 受流域人类活动增强和气候变化的共同影响, 近岸海域营养盐输入结构发生了显著改变, 导致富营养化加剧、赤潮频发以及生态系统稳定性下降等一系列环境问题(Rabalais *et al.*, 2009)。其中, 氮、磷等关键营养元素供给失衡被认为是驱动近海生态系统结构与功能变化的重要因素之一(Randolph-Flagg *et al.*, 2023)。中国近海是全球受人类活动影响最显著的海域之一, 长期承受高强度陆源输入和复杂区域海洋过程的共同作用, 其营养盐结构变化及生态响应应具有明显的区域典型性和研究代表性。

在影响近海生态系统变化的多种营养要素中, 磷

是海洋初级生产和生物地球化学循环的重要生源要素, 其供应状况能够显著影响浮游植物生长、群落组成以及海洋碳循环过程。作为细胞能量代谢、遗传信息传递和膜结构构建所必需的元素, 磷在海洋中主要以无机磷酸盐形式参与生物利用, 其可获得性对海洋生态系统结构与功能具有重要调控作用(Martiny *et al.*, 2019; Randolph-Flagg *et al.*, 2023)。在边缘海等受陆源输入和人类活动强烈影响的区域, 磷的变化不仅关系到初级生产力水平, 还可能通过影响氮固定、浮游植物群落演替和颗粒有机碳输出等过程, 对生态系统稳定性及区域碳循环产生深远影响(Deutsch *et al.*,

*国家自然科学基金委员会共享航次计划项目, 42349301 号(航次编号: NORC2024-301); 中国科学院海洋研究所自主部署项目, IOCASZZX201 号; 国家自然科学基金项目, 42530412 号, 32371619 号。郭术津, 副研究员, E-mail: shujin135@qdio.ac.cn

① 通信作者: 孙松, 研究员, E-mail: sunsong@qdio.ac.cn

收稿日期: 2026-02-09, 收修稿日期: 2026-04-05

2012)。

海洋营养盐结构通常可借助经典 Redfield 化学计量比($C:N:P=106:16:1$)进行表征, 该比例被广泛作为认识海洋浮游植物平均营养需求和环境化学计量失衡的重要参照(Ptacnik *et al.*, 2010)。其中, 溶解无机氮与磷酸盐摩尔比(N/P)是刻画海水氮磷配置关系的常用指标。一般而言, 当环境中 N/P 显著高于 16 时, 指示环境中存在潜在磷限制倾向; 反之, 当 N/P 低于 16 时, 则可能反映潜在氮限制特征。需要注意的是, N/P 比本质上反映的是营养盐结构特征和潜在限制风险, 不等同于生态学意义上的实际营养限制状态。尽管如此, N/P 比仍是揭示区域营养盐失衡格局、比较不同海域营养环境差异以及识别长期变化趋势的重要指标。全球观测结果表明, 海洋中 N/P 比存在显著的地理差异: 在副热带寡营养海区, 如北大西洋萨加索海, 表层无机磷浓度可低至 0.2~1.0 nmol/L, N/P 比高达 20~32; 而在北太平洋水域, N/P 比通常低于 16 (Wu *et al.*, 2000)。此外, 中高纬度季节性高生产力海域和上升流区的 N/P 比普遍接近或略低于 Redfield 比, 表明氮和磷供应较为平衡。总体来看, 海洋 N/P 比具有显著空间异质性, 其分布格局受河流输入、大气沉降、水团交换、生物吸收与再生等多种过程共同调控(Downing, 1997; Tanioka *et al.*, 2022)。

历史研究表明, 自 20 世纪 80 年代以来, 受流域氮负荷增加、磷输入相对下降以及区域水文过程变化等因素影响, 中国近海营养盐结构发生了显著改变, 普遍表现为溶解无机氮升高、磷酸盐下降和 N/P 比增加的趋势(Wang *et al.*, 2018)。例如, 渤海在 1978~2016 年 40 年间 DIN 浓度显著上升, 而磷酸盐(PO_4^{3-})持续下降, N/P 比在 2000 年后普遍超过 30, 反映出由早期的氮限制向磷限制的演化, 并伴随浮游植物群落由硅藻向甲藻转变的趋势(于志刚等, 2000; Wang *et al.*, 2019)。类似地, 在黄海和东海, 受黄河、长江等河流输入及大气沉降的共同影响, 溶解无机氮浓度自 20 世纪 80、90 年代起持续上升, 而磷酸盐逐步下降, 使得 N/P 比升高(王保栋, 2003; 高生泉等, 2004; Yang *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023)。这种长期的氮磷结构失衡不仅改变了浮游植物群落组成(孙军等, 2002; 孙晓霞等, 2011; Jiang *et al.*, 2014; Xiao *et al.*, 2018), 也加剧了富营养化和生态系统不稳定性(于仁成等, 2020)。不过, 现有研究多集中于单一海域、局部断面或特定时期, 对于渤海、黄海、东海陆架区及长江口等典型海域的营养盐结构差异及其近十年来

的变化, 仍缺乏统一数据支撑下的系统比较。特别是, 在前期普遍观察到高 N/P 比背景之后, 中国近海营养盐结构是否发生新的调整、潜在磷限制趋势是否持续以及不同海区之间是否存在明显分化, 仍有待进一步评估。

基于此, 本研究利用国家自然科学基金委共享航次调查数据, 对渤海中部、黄海、东海陆架区及长江口等典型海域表层水体溶解无机氮、磷酸盐及 N/P 比的空间分布与年际变化特征进行分析, 并结合历史观测资料探讨其长期演变趋势。研究重点在于: 揭示中国近海典型海域营养盐结构的区域差异, 识别高 N/P 比背景下潜在磷限制趋势的空间格局及变化特征, 并从区域海洋过程与陆源输入共同作用的角度加以讨论。研究结果有助于深化对中国近海营养盐结构演变的认识, 并为近海生态系统健康评估和营养盐管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域与数据来源

本研究所用数据均来源于 2015~2023 年间国家自然科学基金委共享航次的现场观测(图 1)。研究区域涵盖渤海中部、黄海、东海陆架区及长江口海域。其中, 渤、黄海数据选取自 2015、2017 年夏季航次的表层样品(图 1a, 1b); 东海陆架区数据来自 2017、2018、2019、2020、2021 和 2022 年春季航次的表层样品(图 1c); 长江口数据则取自 2016、2018、2019、2020、2021 和 2023 年夏季航次的表层样品(图 1d)(附表 1)。

1.2 营养盐采集与分析方法

水样采集后立即通过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤。滤膜在使用前经 1:1 000 盐酸溶液浸泡 24 h, 并用 Milli-Q 纯水冲洗至中性。所得滤液装入 100 mL 聚乙烯瓶中(聚乙烯瓶预先用 1:5 盐酸溶液浸泡 24 h 以上, 并用 Milli-Q 水洗至中性), 在 -20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻保存, 用于营养盐测定。样品在实验室使用 QUATTRO 型营养盐自动分析仪进行测定, 分析方法遵循《国家海洋监测规范》(GB17378.4—2007) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008)中关于海水营养盐的标准操作程序。采用国家海洋局标准物质中心提供的营养盐标准系列作为外标进行质量控制。各营养盐指标的检测限分别为: 硝酸盐(NO_3^--N) 0.02 $\mu\text{mol/L}$, 亚硝酸盐(NO_2^--N) 0.02 $\mu\text{mol/L}$, 铵盐(NH_4^+-N) 0.03 $\mu\text{mol/L}$, 磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$) 0.01 $\mu\text{mol/L}$ 。

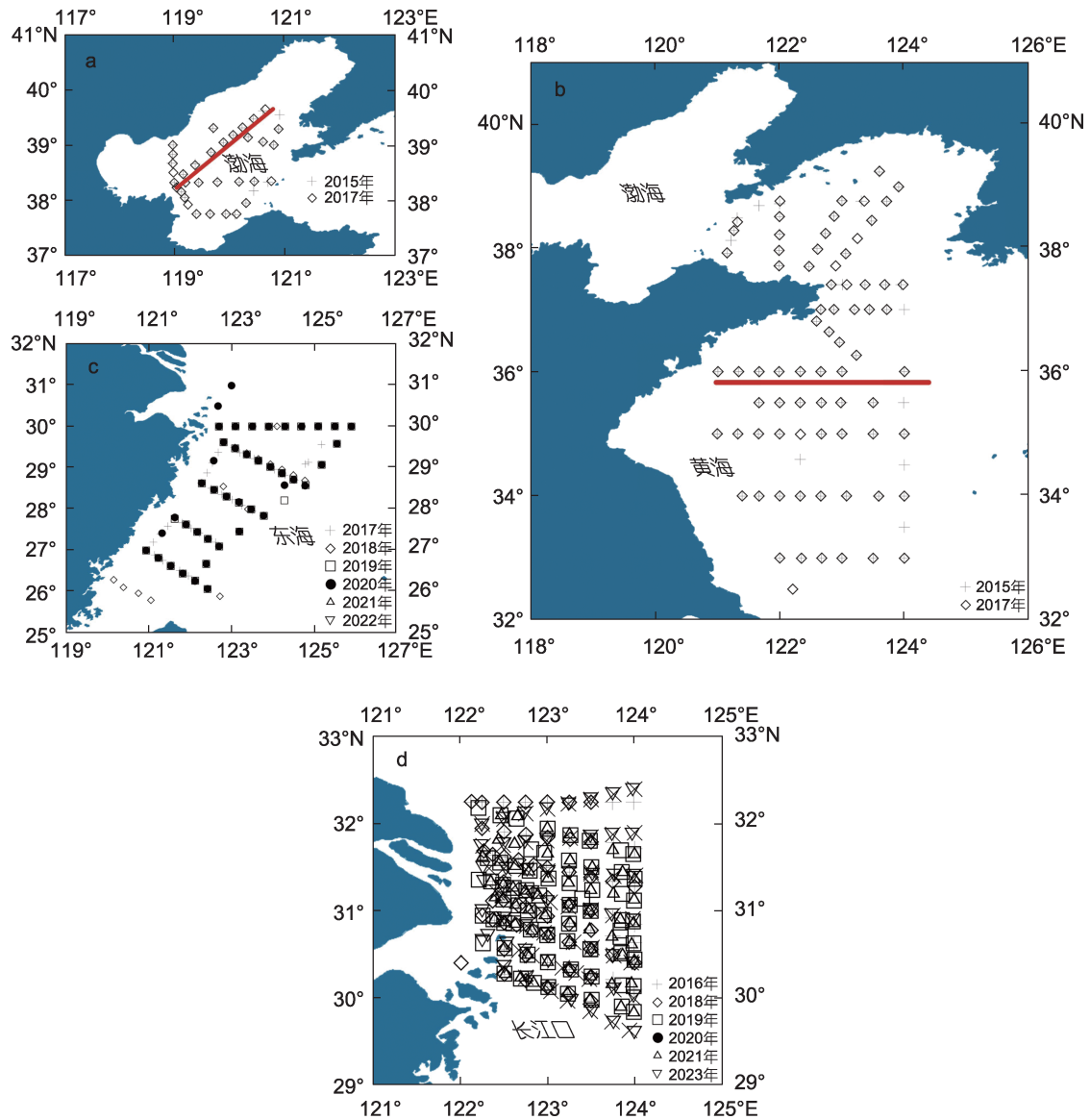


图1 不同海区 DIN 和磷酸盐的采样站位分布图

Fig.1 Sampling stations for dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) across different sea areas

注: a. 渤海中部; b. 黄海; c. 东海陆架区; d. 长江口。红线表示用于历史资料对比的常规断面位置

溶解无机氮(DIN)的浓度按以下公式计算:

$$\text{DIN} = \text{NO}_3^- - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NH}_4^+ - \text{N} \quad (1)$$

1.3 数据处理与分析方法

营养盐数据经质量控制后用于后续分析。溶解无机氮(DIN)与磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)的摩尔浓度比(N/P)用于判定营养盐限制类型,当 N/P 比高于 Redfield 比 (16:1)时表示磷限制,而低于该比值则指示氮限制。

为了与历史观测资料进行对比,分别选取了渤海和黄海各一条具有较好历史资料基础的典型断面(图 1a、图 1b 中红线所示),对其表层数据进行平均分析,并与相应断面的历史同期数据进行比较。其中,渤海

中部断面为基金委共享航次历次调查采用的常规断面之一,具有较好的连续观测基础,其历史数据引用自 Wang 等(2019);黄海断面位于 36°N ,该断面也具有较好的历史观测基础,其历史数据来源于李丹丹(2020)。通过同断面、同期的数据对比,可用于评估近年来营养盐结构及 N/P 比的变化趋势。绘图采样 Golden Software Surfer 11 和 Origin 2022 完成。

2 结果与讨论

2.1 各海区 N/P 比值

渤海中部表层 N/P 比值呈显著空间差异(图 2)。

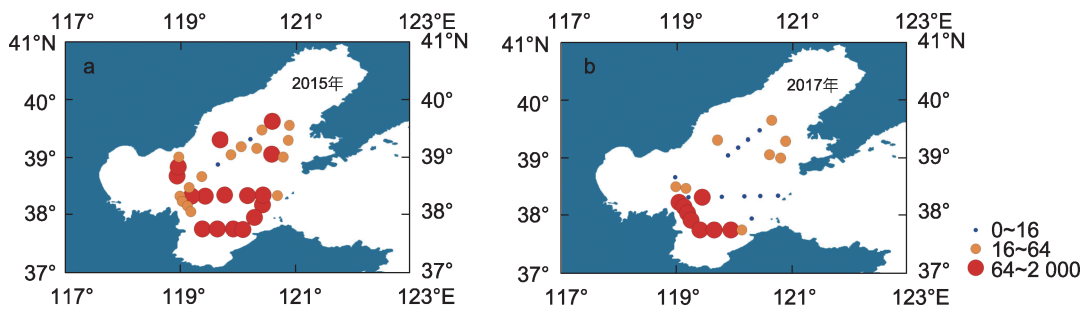


图2 渤海夏季表层 N/P 比的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of surface N/P ratios in the Bohai Sea during summer for selected years

注: a. 2015 年; b. 2017 年

2015 年, 大部分站位的 N/P 比高于 16 : 1, 其中约有一半站位超过 64 : 1; 只有少数(2 个)站位低于 16 : 1, 表明当时渤海表层普遍处于高 N/P 比背景下(图 2a)。到 2017 年, N/P 比低于 16 : 1 的站位明显增多, 主要分布在渤海中部海域, 而莱州湾附近仍维持较高值(>64 : 1), 渤海北部部分站位的 N/P 比仍高于 16 : 1 (图 2b)。从数值上看, 2015 年 N/P 比范围为 11~1 160, 平均值($\pm$ 标准差)为 150 ± 255 ; 2017 年介于 7~1 116, 平均值为 126 ± 253 。总体来看, 渤海中部夏季表层营养盐结构以高 N/P 比为主要特征, 并呈现较强的潜在磷限制趋势; 与 2015 年相比, 2017 年渤海中部海域高 N/P 比特征有所减弱, 表明该区域潜在磷限制倾向有

所缓和。

黄海表层 N/P 比同样呈现出显著空间差异(图 3)。2015 年, 大部分站位的 N/P 比均高于 16 : 1, 其中约 50% 的站位超过 64 : 1, 主要集中在黄海南部、山东近岸及渤海海峡附近海域, 仅有少数站位低于 16 : 1 (图 3a)。到 2017 年, N/P 比低于 16 : 1 的站位明显增多, 且主要分布在北黄海海域(图 3b)。从数值上看, 2015 年 N/P 比范围为 6~830, 平均值($\pm$ 标准差)为 72 ± 114 ; 2017 年介于 4~265, 平均值为 31 ± 39 。总体而言, 黄海的表层营养盐结构以高 N/P 比为主要特征, 并呈现较强的潜在磷限制趋势; 与 2015 年相比, 2017 年潜在磷限制倾向有所缓解。

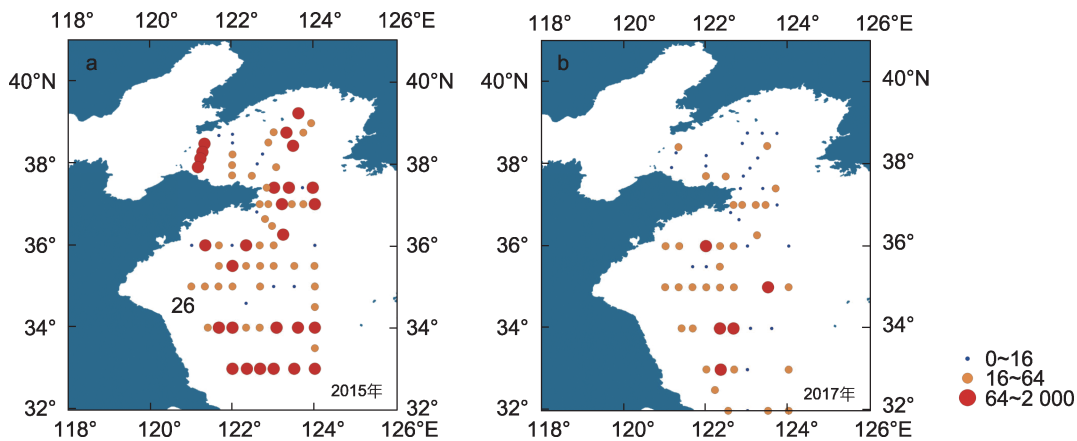


图3 黄海夏季表层 N/P 比的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of surface N/P ratios in the Yellow Sea during summer for selected years

注: a. 2015 年; b. 2017 年

东海表层 N/P 比分布情况见图 4。2017 年, 东海绝大部分站位的 N/P 比高于 16 : 1, 其中部分近岸及陆架中部站位超过 64 : 1, 仅在外海区域出现少量低于 16 : 1 的站位, 整体呈现高 N/P 比的特征(图 4a)。2018 年, 该格局发生明显变化, 仅浙江外海及长江口邻近海域的 N/P 比仍高于 16 : 1, 而大部分外海站位

降至 16 以下(图 4b)。2019、2021 和 2022 年, 东海表层 N/P 比总体呈现近岸和陆架中部高、外海较低的空间分布格局: 近岸及中部站位普遍大于 16 : 1, 而外海部分区域低于 16 : 1 (图 4c, 4e, 4f)。相比之下, 2020 年的分布特征较为特殊, 绝大多数站位的 N/P 比均低于 16 : 1, 仅在长江口邻近海域出现少量高于 16 : 1 的

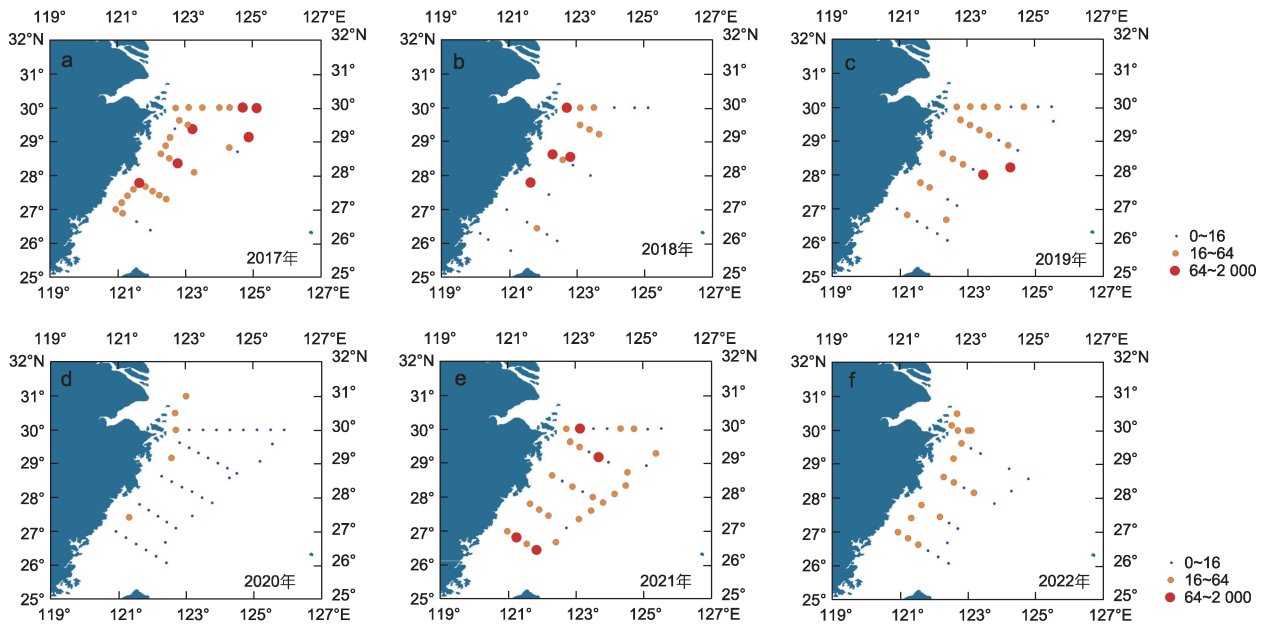


图4 不同年份东海陆架区春季表层 N/P 比的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of surface N/P ratios in the continental East China Sea during spring for different years

注: a. 2017 年; b. 2018 年; c. 2019 年; d. 2020 年; e. 2021 年; f. 2022 年

站位(图 4d)。从数值上看, 2017、2018 和 2019 年的 N/P 比分别介于 8~242 (平均 60 ± 62)、5~100 (平均 30 ± 30) 和 5~102 (平均 30 ± 23)。2020 年的 N/P 比显著降低, 范围为 4~29, 平均值仅 8 ± 6 。2021 和 2022 年则有所回升, 分别介于 4~330 (平均 41 ± 57) 和 5~39 (平均 18 ± 11)。总体来看, 东海春季表层 N/P 比在近岸区域持续保持较高水平, 而外海区域则波动显著。

与渤海、黄海和东海相比, 长江口海域常年表现出显著的高 N/P 比特征(图 5)。2016、2018、2019、2020、2021 和 2023 年间, 长江口表层海水的 N/P 比在大部分站位均超过 64 : 1, 部分站位介于 16 : 1~64 : 1, 仅有极少数站位低于 16 : 1。从数值上看, 2016、2018 和 2019 年的 N/P 比范围分别为 165~476 (平均 165 ± 114)、29~916 (平均 89 ± 128) 和 5~2 560 (平均 123 ± 362); 2020、2021 和 2023 年的范围分别为 6~705 (平均 201 ± 203)、17~752 (平均 218 ± 168) 和 33~2 540 (平均 314 ± 451)。可以看出, 尽管各年份间存在一定波动, 但整体上 N/P 比长期处于高水平, 且部分年份(尤其是 2021 和 2023 年)出现极高值, 显示出潜在磷限制特征在长江口及其邻近海域的持续强化。

总体来看, 4 个海区(渤海中部、黄海、东海陆架区和长江口)的表层 N/P 比普遍高于 16 : 1 (图 2~图 5), 表明中国近海整体呈现以潜在磷限制为主的营养盐结构特征。这一格局与近几十年来流域农业施肥强

度增加、生活及工业污水排放中氮负荷持续偏高密切相关(Wang *et al.*, 2020)。在陆源输入过程中, 氮素相较磷素更容易通过地表径流进入近岸海域, 而磷在流域内易被土壤吸附或通过水库拦截滞留, 从而导致入海 N/P 比升高(Yao *et al.*, 2014)。这种“氮相对过剩、磷相对匮乏”的结构性失衡, 使得中国近海长期处于潜在磷限制背景之下。不过, 不同海区内部及海区之间的营养盐结构存在差异。例如, 在渤海中部, N/P 比相对较低, 局部可能出现潜在氮限制特征(图 2b), 这可能与半封闭海盆中水体交换缓慢、沉积物再矿化及内源磷释放有关(Liang *et al.*, 2022)。北黄海部分海域也存在类似现象(图 3a, 3b)。东海的空间差异更为显著: 近岸受长江冲淡水与陆源输入控制, 表现为高 N/P 比、潜在磷限制; 而在外陆架及黑潮入侵影响区, N/P 比显著降低, 呈现一定程度的潜在氮限制状态(图 4)。这种跨陆架梯度变化体现了陆源输入与黑潮水之间的耦合作用(Zhong *et al.*, 2025)。这也表明, 对“氮限制”或“磷限制”的判断应理解为区域平均意义上的总体特征, 并不能代表整个海域在所有空间尺度上的状况。

4 个海区的 N/P 比值比较见图 6。可以看出, 不同海域之间的 N/P 比差异显著。对各海域全部观测值进行平均后可知, 渤海中部的平均 N/P 比为 139 ± 255 , 黄海为 54 ± 92 , 东海为 30 ± 41 , 而长江口最高, 达 179 ± 282 。总体来看, 各海区的潜在磷限制特征强度

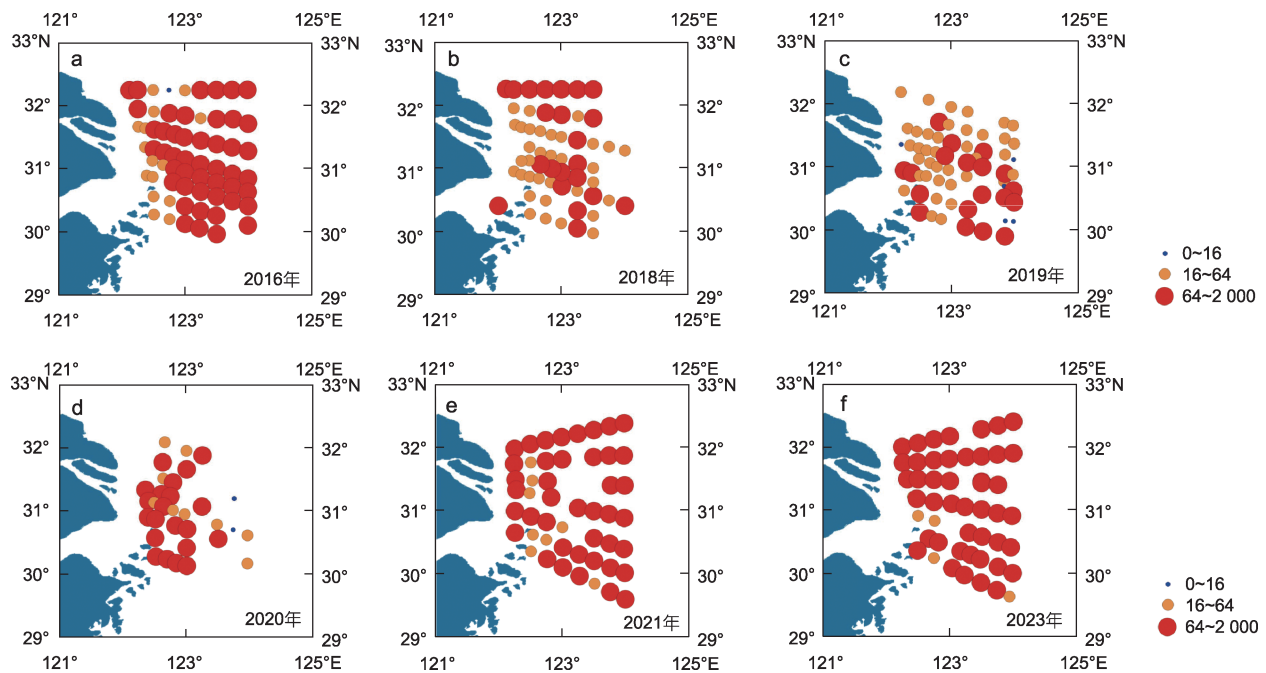


图5 不同年份长江口夏季表层 N/P 比的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of surface N/P ratios in the Changjiang (Yangtze River) Estuary during summer for different years

注: a. 2016 年; b. 2018 年; c. 2019 年; d. 2020 年; e. 2021 年; f. 2023 年

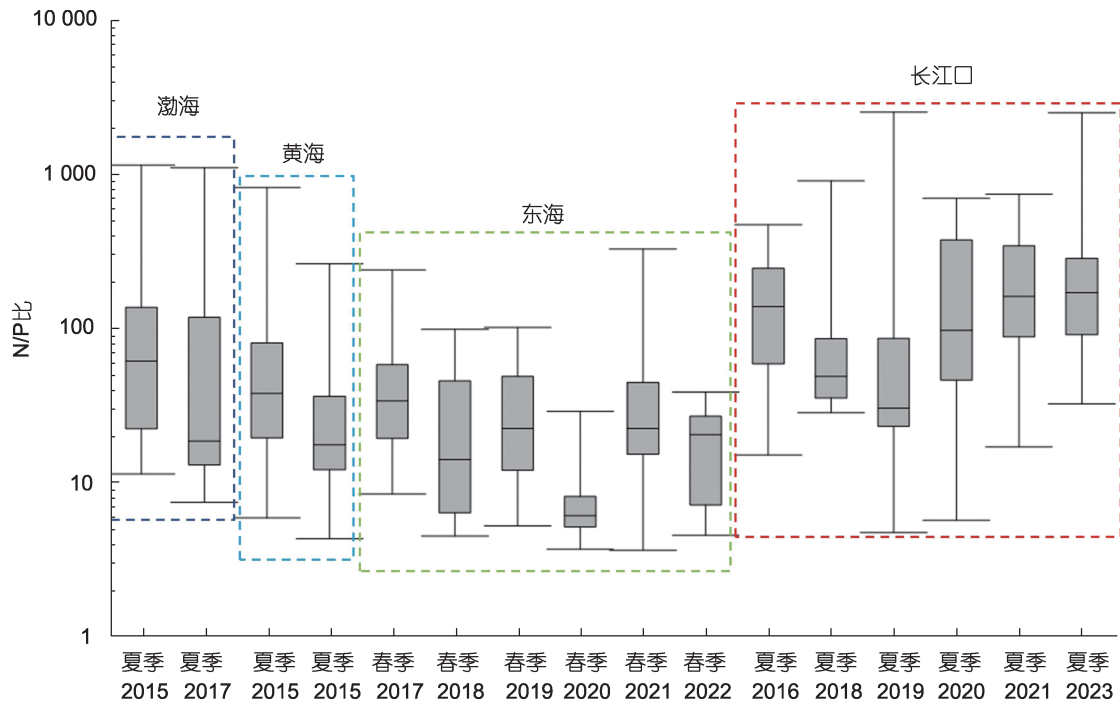


图6 各海区 N/P 比的箱式图

Fig.6 Box-and-whisker plots of N/P ratios across different seas

注: 箱体中线表示中位数, 箱体上下边界分别表示第 25 百分位数和第 75 百分位数, 须线代表第 5 百分位数和第 95 百分位数。

东海站位主要分布于陆架区, 长江口站位主要分布于河口及邻近海域

呈现出长江口>渤海中部>黄海>东海的递减趋势。长江口海域受长江冲淡水输入影响明显, 长期处于高 N/P 比的潜在磷限制状态(Liu *et al*, 2022; Shi *et al*, 2026);

渤海作为半封闭型水域, 受黄河输入与径流变化的影响显著, 潜在磷限制特征亦较强(Wang *et al*, 2019; Yang *et al*, 2023a); 黄海和东海虽然整体仍以磷限制

为主,但受外海水团交换、上升流及黑潮分支入侵等过程的影响,营养盐结构更为复杂,磷限制特征相对较弱(Yang *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2023; Zhong *et al.*, 2025)。总体来看,中国近海各海区营养盐结构的演变具有区域差异性。这种差异与各海区所受的主要控制因素不同有关。未来需要结合多源观测数据,综合考虑河流输入、海气沉降、水团交换等多重因素对中国近海营养盐结构的影响。

2.2 各海区 DIN 和磷酸盐浓度

各海区表层 DIN 平均浓度如图 7 所示。总体来看,不同年份间各海域表层 DIN 浓度的变化幅度较为有限。渤海中部的 DIN 平均浓度在 2015 年夏季为 $(5.50 \pm 4.62) \mu\text{mol/L}$, 在 2017 年为 $(5.26 \pm 5.52) \mu\text{mol/L}$ (图 7a)。黄海的 DIN 平均浓度在 2015 年为 $(5.45 \pm 5.09) \mu\text{mol/L}$, 2017 年为 $(2.24 \pm 2.47) \mu\text{mol/L}$ (图 7b)。东海的年际变化较为显著, 2020 年 DIN 浓度最高

$[(8.38 \pm 5.82) \mu\text{mol/L}]$, 2018 年最低 $[(3.30 \pm 4.62) \mu\text{mol/L}]$ (图 7c)。长江口区域的 DIN 平均浓度在 2016~2019 年间呈下降趋势, 随后缓慢回升, 最高值出现在 2016 年 $[(30.94 \pm 18.89) \mu\text{mol/L}]$, 最低为 2019 年 $[(10.67 \pm 10.78) \mu\text{mol/L}]$ (图 7d)。

表层磷酸盐平均浓度见图 8。总体来看, 渤海中部和黄河的磷酸盐浓度在 2015 年和 2017 年较低(图 8a, 8b)。渤海中部的磷酸盐平均浓度在 2015 年和 2017 年分别为 $(0.12 \pm 0.09) \mu\text{mol/L}$ 和 $(0.18 \pm 0.21) \mu\text{mol/L}$ 。黄海的 2015 年和 2017 年平均值分别为 $(0.12 \pm 0.06) \mu\text{mol/L}$ 和 $(0.11 \pm 0.12) \mu\text{mol/L}$ 。相比之下, 东海和长江口的磷酸盐较高(图 8c, 8d)。东海的磷酸盐平均浓度在 2018 年最低 $[(0.15 \pm 0.05) \mu\text{mol/L}]$, 2022 年最高 $[(0.39 \pm 0.09) \mu\text{mol/L}]$ 。长江口海域的 2018 年出现最高值 $[(0.42 \pm 0.47) \mu\text{mol/L}]$, 而 2022 年降至最低 $[(0.11 \pm 0.13) \mu\text{mol/L}]$ 。

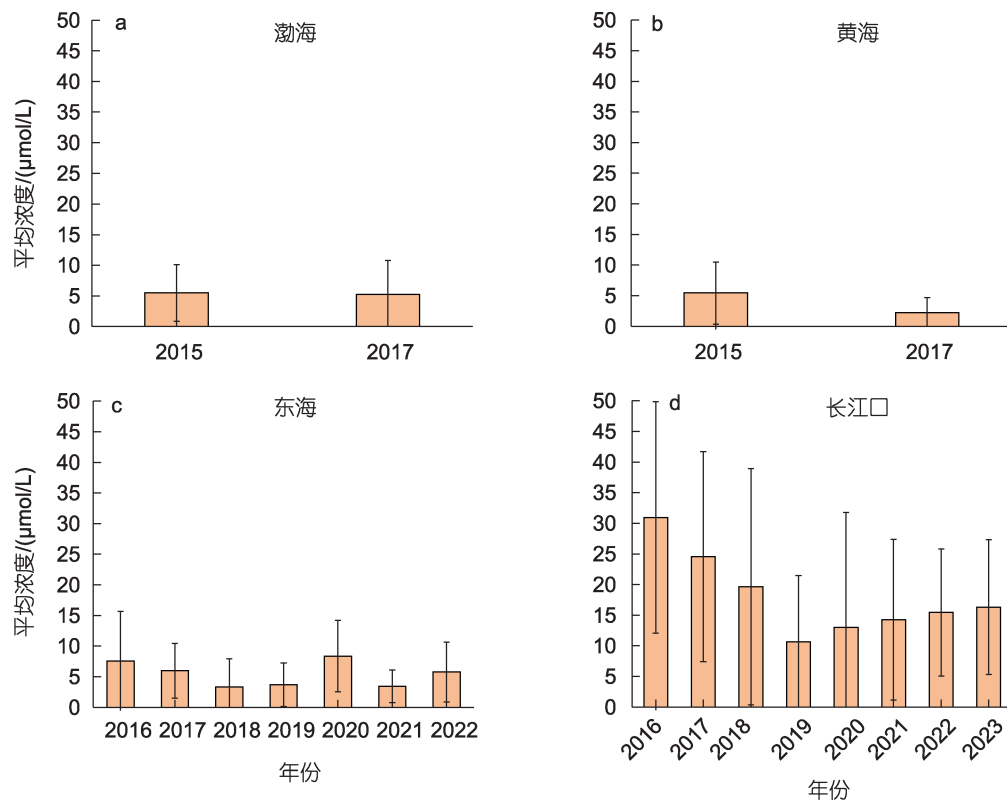


图 7 各海区不同年份 DIN 平均浓度($\mu\text{mol/L}$)的变化

Fig.7 Interannual variations in mean concentrations ($\mu\text{mol/L}$) of dissolved inorganic nitrogen (DIN) across different sea areas

注: a. 渤海中部夏季; b. 黄海夏季; c. 东海春季; d. 长江口夏季

2.3 N/P 比长期变化

渤海中部和黄海夏季标准断面表层 N/P 比的长期变化如图 9 所示。渤海方面, 自 1990~2008 年, 标准断面的 N/P 比总体呈显著上升趋势, 由早期略高于

16 : 1 的水平逐步升高至 101 : 1, 表明该海域在此期间高 N/P 比特征持续增强。2008 年之后, N/P 比开始下降, 表明其高 N/P 比背景有所减弱(图 9a)。黄海 36°N 断面的变化趋势与渤海基本一致。2000~2017

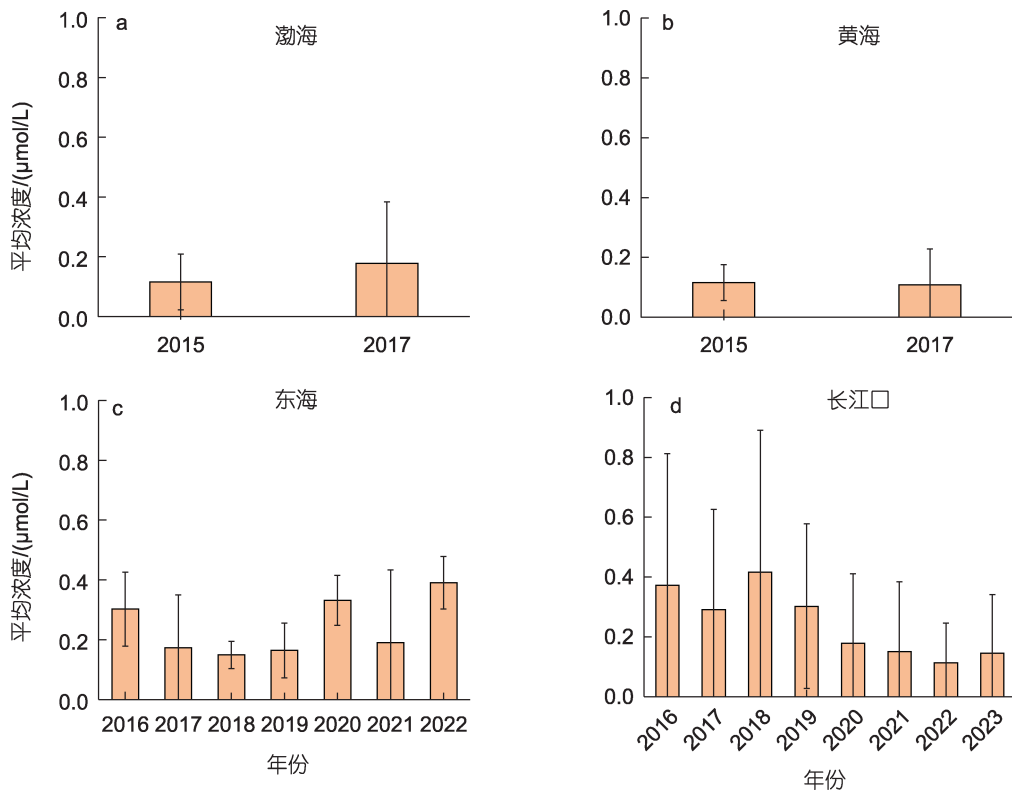


图 8 各海区不同年份磷酸盐平均浓度的变化

Fig.8 Interannual variations in mean phosphate concentrations ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) across different sea areas
 注: a. 渤海中部夏季; b. 黄海夏季; c. 东海春季; d. 长江口夏季

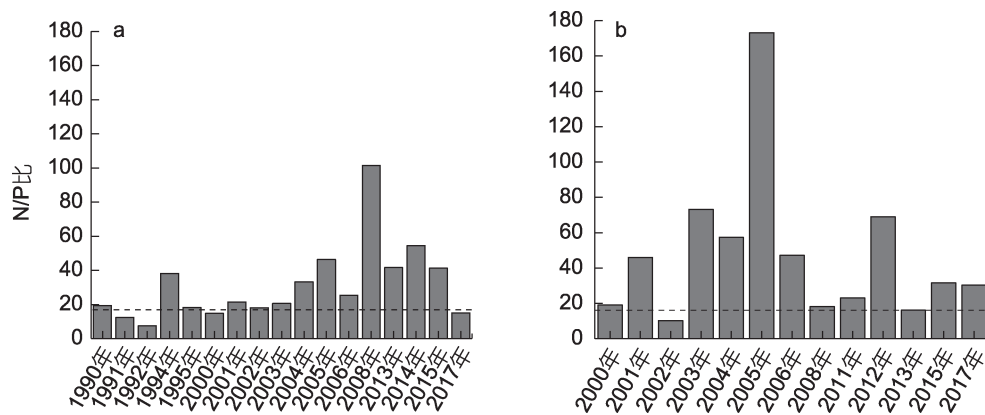


图 9 渤、黄海夏季标准断面表层 N/P 比值的长期变化

Fig.9 Long-term variations in surface N/P ratios along standard transects during summer in the Bohai Sea and Yellow Sea
 注: a. 渤海中部; b. 黄海。虚线代表 N/P 比为 16 : 1

年间, 黄海表层 N/P 比经历了“先升高、后降低”的变化过程: 2000 年 N/P 比略高于 16 : 1, 至 2005 年升至峰值 173 : 1, 随后呈下降趋势, 但在 2015 年和 2017 年仍高于 16 : 1 (图 9b)。这表明, 相较于峰值时期, 2015 年和 2017 年黄海的高 N/P 比特征虽有所减弱, 但潜在磷限制特征仍然存在。总体而言, 渤海中部和黄海长期处于高 N/P 比背景下, 反映出典型的富氮贫

磷营养盐结构格局, 这与沿岸人类活动增强和陆源氮输入过剩密切相关。研究发现, 1970~2010 年间, 中国近海外源氮输入显著增加, 渤海和东海的总氮输入分别由 1.0 和 1.3 Tg N/yr 增至 4.1 和 5.5 Tg N/yr, 其中河流输入是最重要的氮来源, 污水排放、养殖活动及大气氮沉降的贡献也明显上升(Wang *et al.*, 2020)。另外, 以长江为例, 长江下游 DIN 通量在 1970~2000 年

快速增加, 而磷酸盐通量在 2010 年后呈下降趋势; 此外, 进入黄海河流和大气沉降的 N/P 比分别约为 106 : 1 和 84 : 1, 这表明主要河流的外源输入本身具有较高的 N/P 比特征(Chen *et al*, 2023)。值得注意的是, N/P 比在高峰期之后的下降趋势, 主要反映的是近十余年来营养盐结构的阶段性调整, 还没有扭转前期外源氮长期累积对高 N/P 比格局形成的作用。其下降可能与流域及沿海地区近十几年实施的氮减排和污水治理措施有关(Wang *et al*, 2023; Yang *et al*, 2023b), 例如农业施肥结构调整、污水处理设施的建设及排放标准的提高等(Wang *et al*, 2019; Chen *et al*, 2023)。总体上, 渤海中部和黄海仍以较高的 N/P 比和潜在磷限制为主要特征, 未来在沿海的富营养化治理工作中应重视氮、磷协同调控。

3 结论

本研究基于国家自然科学基金委共享航次调查数据, 系统分析了渤海中部、黄海、东海和长江口等典型海域表层水体 N/P 比的空间分布特征及其年际变化, 并结合历史观测资料进行了综合比较。主要结论如下:

(1) 总体来看, 中国近海表层水体普遍表现出较高的 N/P 比特征, 各海区 N/P 比整体明显高于 Redfield 比(16 : 1), 反映出陆源氮输入相对过剩、磷相对不足的普遍格局。不同海区之间的潜在磷限制特征存在差异, 其中长江口最为突出, 渤海中部和黄海较强, 东海陆架区相对较弱。

(2) 潜在磷限制特征在海区内部存在明显空间变异。渤海中部和黄海整体表现为较高 N/P 比背景, 但在部分海域出现局部潜在氮限制特征; 东海陆架区大部分区域以较高 N/P 比和潜在磷限制特征为主, 而在陆架外侧受黑潮入侵影响的区域则可能出现潜在氮限制特征; 长江口海域常年维持高 N/P 比, 其潜在磷限制程度显著高于其他海区。

(3) 与历史资料对比结果表明, 渤海中部和黄海的 N/P 比长期均表现出“先升高、后降低”的趋势。但总体上, 两海域仍维持较高的 N/P 比水平, 并表现出潜在磷限制的特征。

致谢 本研究的数据及样品采集得到国家自然科学基金委员会共享航次计划项目(项目批准号: 41449901、41649901、41649902、41749902、41849902、41949902、42049902、42149902、41549903、41749903、41849903、41949903、

42049903、42249903)的资助。这些航次(航次编号: NORC2015-01、NORC2017-01、NORC2017-02、NORC2018-02、NORC2019-02、NORC2020-02、NORC2021-02、NORC2022-02+NORC2022-301、NORC2016-03、NORC2018-03、NORC2019-03、NORC2020-03、NORC2021-03、NORC2023-03)分别由“东方红 2”、“向阳红 18”、“润江 1”、“创新二”、“科学三号”、“浙渔科 2”和“博海科”号科考船实施, 在此一并致谢。感谢刘保华研究员、庄志猛研究员和魏皓教授在本研究过程中提供的宝贵建议与指导。谨致谢忱。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参 考 文 献

- 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等, 2020. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. 海洋与湖沼, 51(4): 768-788.
- 于志刚, 米铁柱, 谢宝东, 等, 2000. 二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系[J]. 海洋环境科学, 19(1): 15-19.
- 王保栋, 2003. 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, 14(7): 1122-1126.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2008. 海洋调查规范 第 4 部分: 海水化学要素调查: GB/T 12763.4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社: 71.
- 孙军, 刘东艳, 杨世民, 等, 2002. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 33(5): 461-471.
- 孙晓霞, 孙松, 吴玉霖, 等, 2011. 胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化[J]. 海洋与湖沼, 42(5): 639-646.
- 李丹丹, 2020. 南黄海西部营养盐的时空变化及其控制机制[D]. 青岛: 中国海洋大学: 42-45.
- 高生泉, 林以安, 金明明, 等, 2004. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 22(4): 38-50.
- CHEN X N, WEI Q S, JIAN H M, *et al*, 2023. Long-term variation in nutrients in the South Yellow Sea in response to anthropogenic inputs [J]. Marine Pollution Bulletin, 192: 115039.
- DEUTSCH C, WEBER T, 2012. Nutrient ratios as a tracer and driver of ocean biogeochemistry [J]. Annual Review of Marine Science, 4: 113-141.
- DOWNING J A, 1997. Marine nitrogen: Phosphorus stoichiometry and the global N: P cycle [J]. Biogeochemistry, 37(3): 237-252.
- JIANG Z B, LIU J J, CHEN J F, *et al*, 2014. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years [J]. Water Research, 54: 1-11.
- LIANG W, WANG Y, LIU S M, *et al*, 2022. Nutrient dynamics and coupling with biological processes and physical conditions in the Bohai Sea [J]. Frontiers in Marine Science, 9: 1025502.
- LIU J, YAO Q Z, MI T Z, *et al*, 2022. Change of the long-term nitrogen and phosphorus in the Changjiang (Yangtze) River

- Estuary [J]. *Frontiers in Marine Science*, 9: 885311.
- MARTINY A C, LOMAS M W, FU W W, *et al*, 2019. Biogeochemical controls of surface ocean phosphate [J]. *Science Advances*, 5(8): eaax0341.
- PTACNIK R, ANDERSEN T, TAMMINEN T, 2010. Performance of the Redfield ratio and a family of nutrient limitation indicators as thresholds for phytoplankton N vs. P limitation [J]. *Ecosystems*, 13(8): 1201-1214.
- RABALAIS N N, TURNER R E, DÍAZ R J, *et al*, 2009. Global change and eutrophication of coastal waters [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7): 1528-1537.
- RANDOLPH-FLAGG N G, ELY T, SOM S M, *et al*, 2023. Phosphate availability and implications for life on ocean worlds [J]. *Nature Communications*, 14(1): 2388.
- SHI M J, ZHONG X S, LV Z Q, *et al*, 2026. Tracking phosphorus dynamics in the Changjiang Estuary: Causes and implications [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 160: 755-764.
- TANIOKA T, GARCIA C A, LARKIN A A, *et al*, 2022. Global patterns and predictors of C: N: P in marine ecosystems [J]. *Communications Earth & Environment*, 3(1): 271.
- WANG J J, BEUSEN A H W, LIU X C, *et al*, 2020. Spatially explicit inventory of sources of nitrogen inputs to the Yellow Sea, East China Sea, and South China Sea for the period 1970-2010 [J]. *Earth's Future*, 8(10): e2020EF001516.
- WANG Y, GAO L, MING Y, *et al*, 2023. Recent declines in nutrient concentrations and fluxes in the lower Changjiang River [J]. *Estuaries and Coasts*, 46(6): 1475-1493.
- WANG B D, XIN M, WEI Q S, *et al*, 2018. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 394-400.
- WANG J J, YU Z G, WEI Q S, *et al*, 2019. Long-term nutrient variations in the Bohai Sea over the past 40 years [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(1): 703-722.
- WU J F, SUNDA W, BOYLE E A, *et al*, 2000. Phosphate depletion in the Western North Atlantic Ocean [J]. *Science*, 289(5480): 759-762.
- XIAO W P, LIU X, IRWIN A J, *et al*, 2018. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates [J]. *Water Research*, 128: 206-216.
- YANG F X, WEI Q S, CHEN H T, *et al*, 2018. Long-term variations and influence factors of nutrients in the western North Yellow Sea, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 135: 1026-1034.
- YANG F X, YU Z G, BOUWMAN A F, *et al*, 2023a. Human-driven long-term disconnect of nutrient inputs to the Yellow River basin and river export to the Bohai Sea [J]. *Journal of Hydrology*, 618: 129279.
- YANG H F, ZHU Q Y, LIU J A, *et al*, 2023b. Historic changes in nutrient fluxes from the Yangtze River to the sea: Recent response to catchment regulation and potential linkage to maritime red tides [J]. *Journal of Hydrology*, 617: 129024.
- YAO Q Z, YU Z G, LI L L, *et al*, 2014. Transformation and source of nutrients in the Changjiang Estuary [J]. *Science China Chemistry*, 57(5): 779-790.
- ZHONG X S, LIU J M, SHI M J, *et al*, 2025. Nutrient dynamics in the East China Sea: Seasonal changes, budget, and ecological impacts [J]. *Progress in Oceanography*, 234: 103463.

ANALYSIS OF N/P RATIO DISTRIBUTION AND POTENTIAL PHOSPHORUS LIMITATION IN THE COASTAL SEAS OF EASTERN CHINA

GUO Shu-Jin^{1,2}, SUN Xiao-Xia^{1,2}, WANG Nan², JIN Xin², SUN Yan², JIA Zhen^{3,4}, WANG Wen^{3,4}, SUN Song^{1,2}

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Shandong Province Key Laboratory of Marine Biodiversity and Bio-resource Sustainable Utilization, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. Qingdao Marine Science Data Sharing Service Center, National Natural Science Foundation of China, Qingdao 266061, China)

Abstract To elucidate recent changes in nutrient structure and potential phosphorus limitation in China's coastal seas, this study analyzed the spatial distribution and interannual variability of dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (PO_4^{3-}), and their molar ratio (N/P) in surface waters of the central Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea, and the Changjiang River Estuary, using cruise data from National Natural Science Foundation of China shared surveys, and compared these with historical observations. The results indicate that in 2015 and 2017, most areas of the central Bohai Sea and Yellow Sea exhibited elevated N/P ratios, generally exceeding the Redfield ratio (16 : 1), reflecting pronounced nutrient imbalance and a tendency toward phosphorus limitation. In most years, the East China Sea also exhibited elevated N/P ratios; however, lower values were observed in parts of the outer shelf and in regions influenced by Kuroshio intrusion, suggesting possible nitrogen limitation in these areas. The Changjiang River Estuary maintained persistently high N/P ratios (>64 : 1), indicating stronger phosphorus limitation compared with other regions. Comparison with

historical data revealed that N/P ratios in the central Bohai and Yellow Seas exhibited a long-term pattern of “initial increase followed by decline”, with peak values occurring around 2008 and 2005, respectively, suggesting that both seas have remained in a persistently high N/P state. Overall, nutrient imbalance is widespread in China’s coastal seas, although pronounced interregional and intraregional differences exist, reflecting the combined influence of land-based inputs and regional oceanographic processes. These findings provide a scientific basis for understanding the evolution of nutrient structure and the associated risk of nutrient limitation in China’s coastal seas.

Key words N/P ratio; nutrient structure; nutrient limitation; spatial variability; interannual variability; coastal seas of China

附表 1 各海区基金委共享航次数据信息

Appendix Tab.1 Information on NSFC shared cruise data in different sea areas

海区	年份	季节	站位数
渤海中部	2015	夏季	33
	2017	夏季	33
黄海	2015	夏季	77
	2017	夏季	77
东海	2017	春季	42
	2018	春季	39
	2019	春季	39
	2020	春季	43
	2021	春季	42
	2022	春季	43
长江口	2016	夏季	65
	2018	夏季	56
	2019	夏季	71
	2020	夏季	65
	2021	夏季	54
	2023	夏季	53