

中国近海营养盐结构失衡与磷消耗问题及其生态环境效应的研究进展

冉祥滨¹, 韦钦胜¹, 于志刚²

(1. 自然资源部第一海洋研究所海洋生态研究中心和自然资源部海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东青岛 266061; 2. 中国海洋大学 深海圈层与地球系统前沿科学中心和海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 近海的生态环境问题态势严峻。在机制上, 普遍认为富营养化是导致近海环境恶化的主导因子, 但实际上, 营养盐的结构失衡对近海生态环境问题的产生可能起到了更重要的作用。目前关于营养盐结构失衡的主导因素和机制尚缺乏全面系统的研究。本文基于对已有数据和文献资料的整合分析发现, 由于存在强烈的人类活动影响, 中国近海营养盐结构失衡问题较过去更为突出, 且可能引发潜在“磷消耗”问题, 其影响在某种程度上较传统意义上的磷限制要强, 并进而产生深远的生态环境效应。据此提出, 今后相关的研究应该特别关注河流域-近海环境变化和它们之间的内在关联, 阐明控制近海营养盐浓度、形态、分布和结构的关键生物地球化学过程, 量化近海氮与磷的滞留机制与效率, 揭示浮游植物群落结构变化与营养盐结构失衡和磷消耗的耦合关系及其生态效应等, 最终制定中国入海河流与近海氮磷协同控制的适应性管理措施。

关键词: 近海; 生物地球化学过程; 环境变化; 关键过程; 营养盐结构失衡; 磷消耗

中图分类号: P734; P735 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2023)8-0075-15
DOI: 10.11759/hyxx20210901001

在人类活动增强和气候变化的多重影响下, 全球范围内的近海生态环境发生了明显的变化, 导致赤潮、缺氧与酸化等生态灾害和环境问题频发^[1-5], 严重影响了海洋的资源与环境价值。近海是海上经济活动的主要区域, 事关人类的生存与可持续发展, 且在海洋环境中具有独特的属性。因此, 近海环境问题已成为人们关注的重要议题, 相关研究也是海洋科学和环境科学研究的热点。由于受到多重环境压力的影响, 再加之与全球气候变化相叠加, 近海海洋环境变化、驱动机制和生态环境效应纷繁复杂, 特别是在近些年呈现出新的变化模态, 科学认知近海环境已成为全球海洋治理的难点和焦点。

氮(N)与磷(P)营养盐作为水体重要的生源要素, 不仅是生态系统物质与能量流动的基础, 其生物地球化学过程也是影响碳循环和气候变化的重要一环^[6-7], 并在海洋环境演变过程中扮演着至关重要的角色。人类活动强度的增加导致全球河流氮和磷的通量在 20 世纪分别增加了 90%和 75%^[8-9], 特别是近几十年来河流排放至近海的氮与磷的通量大为提升, 而活性硅(为硅藻等硅质生物生长所必需

的一种重要的生源要素)的通量略有减少^[10]; 与此同时, 地下水中营养盐由陆向海的输送量也有所增加^[8], 且具有较 Redfield 比值^[11]更高的氮与磷(N/P)比值^[12], 这便造成了氮与磷的进一步失衡^[8]以及二者与硅的化学计量学关系的显著变化^[2, 13-14]等营养盐结构失衡问题(N/P 偏离 Redfield 比值的现象^[11])。营养盐结构失衡除导致近海非硅藻类浮游植物生物量(主要是甲藻)的增加^[1, 15], 影响海洋生态系统的稳定^[16-18]与碳循环过程^[19]外, 还可能在化学计量学上产生磷相对于氮的过度消耗^[20], 即近海富营养化现象以及与之相关联的环境问题。尽管营养盐结构失衡并非海洋环境学家和生物学家关注的新的热点问题, 相关科学问题在近几十年来已得到国内外科学家较为广泛和系统的研究, 然而人们对于浮

收稿日期: 2021-09-01; 修回日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(42176048, 41930862, 42149902)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, Nos. 42176048, 41930862, 42149902]

作者简介: 冉祥滨(1980—), 男, 山东夏津人, 研究员, 博士, 主要从事生物地球化学循环方面研究, E-mail: rxb@fio.org.cn

游植物生物量增加和结构变化所可能导致的磷消耗(phosphorus depletion)^[21](生物地球化学过程所导致,具有非稳态的特征,直观的表现输出大于输入)的现象和机制的认识依然不足。

中国近海海域深受人类活动的影响,是全球陆海相互作用中极为典型的陆架海,也是全球海洋环境变化的典型海域^[22-23],其生态系统结构和功能发生了显著变化^[2, 24]。特别是近些年来,中国近海生态环境急剧变化,出现赤潮^[2]、绿潮^[25]、低氧和酸化^[26]等诸多环境问题,成为世界上生态环境较为脆弱的海域之一;在大多海域,尤其是黄河口、长江口和珠江口等海域,氮的含量处于较高水平,且显著高于中国其他区域^[27-28],是近海生态环境保护与修复中亟需重点关注的污染物之一。近年来,国家采取系列举措,旨在解决中国近海突出的污染问题,改善其生态环境;如针对渤海,国家多部委联合印发了《渤海综合治理攻坚战行动计划》(环海洋〔2018〕158号)等系列文件,以应对渤海严峻的环境问题。然而,在中国部分海域氮磷比居高不下的局面并没有得到实质性的改变,部分海域还呈现比值持续升高的趋势,如渤海^[29-30]、黄海^[31-32]和长江口等海域^[22]。

中国近海鲜明的区域特色和严峻的环境问题赋予了其生态环境控制机制研究的典型意义,相关环境问题的研究对于海洋可持续发展与适应性管理亦具有重要价值。然而,长期以来对近海生态环境问题的研究大多围绕污染物通量展开,缺少陆海一体化视角下控制机制—响应方面的综合、系统性研究,既不利于揭示近海海洋环境变异的驱动机制,也不利于制定科学的可持续发展的海洋战略。在前人研究的基础上,本文以陆海相互作用为出发点,紧扣公众关切的近海生态环境问题,深入探究近海营养盐结构的失衡及其机制和生态环境效应,相关工作有望为海洋管理和综合治理等提供新的视角。

1 营养盐结构失衡问题的研究现状

当近海环境系统的营养盐输入大于输出时,其在近海的累积便产生了富营养化,直观地表现为水体氮与磷浓度普遍升高、生态灾害频发等。无疑,入海的陆源污染物负荷增加与结构变化^[8-9]是导致近海环境问题的主控因素,尤其是那些人类活动比较集中且水交换能力相对较弱的近海海域,在其中富营养化又是诸多海洋环境问题产生的根本所在^[5]。

不断增强的人类活动是导致水体富营养化加剧的主要驱动力^[6];氮与磷肥料在陆地上的大量使用和污水排放量的显著增加,使得人类活动产生的氮与磷营养盐负荷较过去明显升高,导致富营养化由河流、湖泊以及地下水传递到近海,并对近海环境造成极大的影响。目前,关于富营养化现象、驱动机制及其环境效应的探讨较为深入^[6, 33-34],特别是对陆源输入的贡献认识尤为深入,但缺少近海氮磷循环与营养盐结构失衡之间的量化关系,关于营养盐由陆向海输送及其近海环境响应方面的陆海一体化的系统研究则更少^[35-36],这使得我们缺少陆海统筹的理论支撑,无法有效地识别驱动近海环境演变的关键过程,进而影响了开展近海环境管理与修复工作的时效。概括而言,国内外开展近海富营养化、营养盐结构及其环境效应的研究主要集中在以下3个方面。

1.1 陆源氮与磷污染物向海输送与营养盐比值变化

陆源物质通过河流向海洋的输送及其对近海环境的影响是环境科学和海洋科学领域的重点研究内容。尽管从区域到全球尺度海洋系统中内部的循环与再生作用是维持海洋系统初级生产的主要氮磷物质来源,但海洋外部稳定的输入是保持这个系统可持续性的重要方面。在氮和磷等生源要素向海洋的输送中,河流的输送通量最高,其次是地下水、大气输送等^[2, 37]。在全球尺度上,河流是海洋中磷的主要外部输入源,占海洋外源总输入量的75%~94%^[38-40];除固氮作用外,河流向海洋输送的氮也是海洋获得外源性氮的主要途径^[8, 41]。在中国近海,河流占海洋外部输入的氮磷比例均高达90%以上^[2],成为控制近海环境演变的主要外部驱动机制。相比过去,社会经济的发展改变了流域的土地利用、河流的形态、水力停留时间等重要过程,进而影响了河流原有的生物地球化学过程^[9, 42-43]。在当前,我们大多关注地向海输送的营养盐通量的变化,对于其比值的变化关注相对前者要少;地球上近300个大河系统中超过半数的河流在不同程度上受到了持续增强的人类活动的影响^[44-45],大多水体呈现出氮磷比升高的趋势^[8, 46],而其中的中国河流则是当今世界受人类活动影响最显著的典型河流体系^[42],如长江氮与磷输送通量在过去100年间分别增加了17倍和6.6倍^[9],氮磷比相比过去显著升高。此外,大气沉降的氮也较过

去大为增加^[37],进一步加剧了陆地水体氮磷比失衡的态势^[47]。由此可见,陆源氮与磷污染物向海输送通量的增加、比例变化成为当前河流的主要特征,其对近海海洋生源要素生物地球化学过程及相关水生态环境的影响正得到国内外科学家越来越多的重视^[48]。

尽管同为富营养化的关键因子,但氮与磷营养盐在来源、循环以及从陆到海的输送过程中存在明显的差异,使得陆地生态系统存在差异化的氮或者磷营养盐限制情况^[46]。陆地水体中溶解态的氮与磷浓度主要由流域水-土/水-岩作用、生态系统构成以及流域特性控制,特别是受到流域日益增强的农业活动的极大影响。流域化肥施用量逐年增加是导致水体中氮浓度升高的主要原因;大多情况下,肥料中的氮元素非常容易溶解于水和顺水输送,当氮肥的使用量超过了生物生长所需要的量时,多余的氮肥会在土地中累积、流向地表水体、渗透到地下水或挥发到大气中,并通过河流、地下水和干/湿沉降等方式影响陆地或海洋的生态系统^[49-50]。而对于环境中的磷而言,由于其存在强的颗粒物-水界面作用(通常由吸附-解吸过程控制),水体搬运作用对它的影响稍低^[51]。上述控制过程的差异是产生高氮磷比的重要因素。

污水排放也是水体中氮与磷浓度升高的重要原因^[52],大约占河流输送负荷的12%(全球尺度)^[8],从土壤流失或由废水携带而增加的氮与磷提高了全球流向海洋的营养盐通量^[8]。在中国长江,污水排放的氮与磷占陆源向海输送的比例与全球河流大致相当,在10%左右(氮与磷分别为9%和11%),低于全国河流的平均值^[2, 9]。不过,流域内不同的区域对氮与磷污染的贡献也不相同,即存在多样化的热点源区(hotspot,指对入海负荷的贡献量占比较多的源或单位面积输出氮与磷通量较高的区域);如在长江流域,中游来自农田中化肥流失的氮与磷贡献比例较高,而下游污水的份额占比较大^[9],这也使得河流输送的氮磷比在通量增加的同时显著升高。

人类活动,如化肥使用和污水排放,也提高了陆地地下水中营养盐由陆向海的输送通量,尤其是氮的通量^[53],使之成为近海乃至全球海洋营养盐收支计算中重要的输入项之一^[54]。不过,在入海营养盐通量估算中数值模型的估算与同位素的结果存在较大的差别^[8, 55]。尽管地下水入海的营养盐通量在数值上存在一定的不确定性,然而大量的观测显示地下水中具有较高的氮磷比^[12, 54],对近海富营养化加剧

及氮磷比失衡的贡献不可忽略。此外,人类活动强度的增加也影响了大气沉降向海输送的营养盐通量和组成^[56];其中,氮的通量增加较快,其相比工业革命前增加了400%^[57],而磷仅为5%~15%^[58];不过,在全球尺度上,大气沉降输送入海的营养盐对海洋初级生产的贡献相对其他外源输入以及大气向海洋贡献的铁而言较低^[56, 59]。

淡水^[60]与海水^[61]养殖作为人类活动影响海洋环境的另一形式,也在某种程度上增加了氮与磷的入海负荷,加剧了近海水体富营养化及营养盐结构失衡的趋势。这一过程中氮与磷来源的贡献及其相关的生物地球化学过程在近些年开始被纳入到近海物质循环研究中^[9, 61]。不过,相比于其他界面过程,这一过程对近海氮与磷负荷的贡献并不大^[2]。相比于其他外源输入,固氮作用对近海氮来源的贡献似乎也不大^[62-64]。

正是由于氮与磷来源不同及生物地球化学循环模式的不同特点,在控制富营养化和削减陆源氮与磷污染向海排放的应用实践过程中,产生了限制氮^[2, 65-66](部分研究是基于河口或近海的氮磷比值及其生态学效应,海洋学家普遍支持此观点,如王修林等提出削减渤海入海氮的负荷^[67])或限制磷^[68-69],亦或氮与磷协同限制^[70-73]等多种观点和模式,并在学界争论不休。在中国,最近的研究开始呼吁限制氮^[74]。究竟是哪一种营养元素或者二者均应受到限制,这取决于当地的人类活动和地理背景,以及不同区域的实际情况,不可一概而论。当然,这一争论问题的出现恰恰说明了陆海一体化研究的必要性和紧迫性,其过程与机理的深入研究理应成为陆海统筹等管理实践的关键科学依据。

1.2 近海富营养化、氮磷滞留与初级生产变化

富营养化是全球性的环境问题。由于人类活动影响的程度不同,世界各地近海富营养化呈现了从轻度到重度等不同的富营养水平,这些富营养化水平的不同往往产生多样化的生态学效应^[75]。大量的研究显示,富营养化会提高近海初级生产水平;如,全球代表性的河流、海湾的数据显示富营养化不同程度上提高了河口、近岸的初级生产力^[76-77]。当然,营养盐浓度变化(部分区域为富营养化)对初级生产的影响也存在明显的区域性差异;在低纬度区域,初级生产因营养盐浓度变化而提高的幅度较低,如南海大约升高了2%~4%^[78];对于高纬度区域,如北

极, 这个升高幅度接近 60%^[79](受极区升高的海洋温度和营养盐输入共同作用); 在渤海, 初级生产升高的幅度大约为 10%^[80]。需关注的是, 初级生产的提高潜在影响海洋生物地球化学过程, 持续变化的生物地球化学过程协同海洋气候变化又可能反作用于生物过程, 使得将来初级生产发生不确定性的变化; 尽管这一过程对于未来海洋环境变化的研究很重要, 但目前的关注还很少; 如, 基于地球系统模式的研究显示未来全球海洋初级生产可能降低 3%~10%^[81], 这一初级生产先升高后降低的曲线变化过程主要受生物地球化学循环过程变化的驱动。

值得注意的是, 氮与磷在水体中的循环过程也明显不同^[51], 这也使得河口生态系统中的氮与磷在向外输送的过程中呈现出不同的变化趋势^[82], 近海的其他区域同样如此。营养盐滞留(nutrient retention)在刻画营养盐跨区域输送的主要手段, 其是指水体中发生的物理、化学与生物的过程, 将营养盐永久地去除或者临时地存储、延缓营养盐在跨区域运输的过程; 这一概念被广泛用于量化河流、湖泊和水库的营养盐输送过程, 近些年开始应用到近海, 如欧洲的波罗的海^[83]。一般而言, 河口、陆架对营养盐的滞留效率满足磷大于氮^[51, 84]。氮与磷滞留效率的差异实质上是由于其滞留机理不同造成的。对于氮而言, 近海的滞留率一般在 20%~30%之间不等^[84-85], 主要滞留机制是脱氮反应和生物转化利用; 脱氮反应受到水体溶氧水平、水体停留时间、磷负荷等因素的影响, 尤其是水体停留时间; 总体而言, 在近海水体

氮循环过程中脱氮反应总量巨大^[64, 86], 是氮去除/滞留的主要过程。对于磷而言, 滞留率在 50%~70%之间不等^[84-85], 主要的滞留机制为颗粒态磷的沉降和生物利用, 这主要是由于颗粒态磷通常是水体磷的主要形式, 而颗粒物输送则受到水动力的显著影响; 在磷限制的水体中, 生物的吸收转化作用对磷酸盐的滞留极为显著^[38], 并提高其他赋存形态磷(如多聚磷酸盐^[20]和有机磷^[87])参与生物地球化学循环的能力, 有机磷的生物可利用性增加以及快速的周转也可在一定程度上补偿磷的限制作用, 特别是远离近岸的开阔海域。在中国近海, 磷是水体主要的限制性因子^[14, 88-89], 上述提到的近海初级生产升高的趋势将可能提高磷向沉积物的埋藏通量, 使得河口-近海体系磷限制进一步加强, 甚至是磷耗竭, 后者将可能导致高的浮游生物数量难以维持。最近有关黄渤海氮与磷收支的模式研究显示, 氮在水体中呈积累趋势, 而磷的外部输入却低于输出(即呈现“消耗/耗竭”的特征)^[64], 这一现象也被最近的研究证实^[90]; 黄河口沉积物中由表至下逐渐变小的有机氮和总磷、有机氮和有机磷的物质的量的比或许可以从一个侧面支持了上述磷消耗的猜想(图 1), 值得进一步的关注。尽管目前有关富营养化趋势下近海氮与磷滞留、累积与耦合循环的机制研究在逐渐地增多, 但缺少氮与磷不同滞留机制的研究, 对近海磷埋藏与浮游植物种群变动响应机制机理及其生态环境效应方面的研究则更少, 这一研究的不足在中国近海尤为突出。

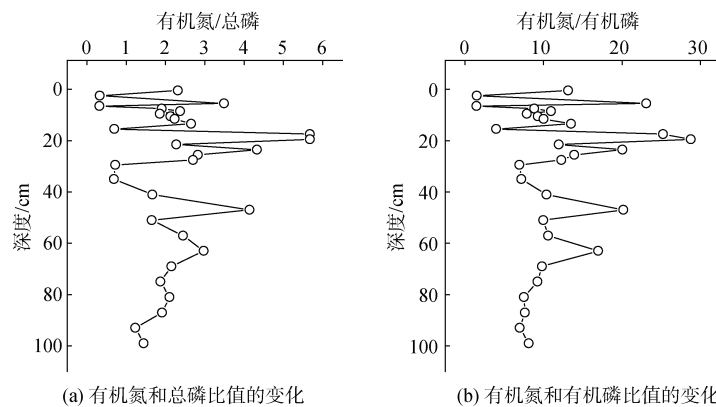


图 1 黄河口沉积物中有机氮与总磷和有机磷的物质的量的比变化^[91]

Fig. 1 Ratios of organic nitrogen to total phosphorus (a) and organic nitrogen to phosphorus (b) in the core of the Yellow River estuary^[91]

氮与磷在水体中之所以存在不同的滞留效率, 主要是由于二者的化学活性/特性与生物利用机制不

同造成的^[38, 92]。如中国近海多呈现磷限制的特点, 这在一定程度上应与磷易吸附在颗粒物表面及其沉积

作用有关。在维持浮游植物生长的过程中，相对于氮在水体中的易获取性，磷往往表现出“吝啬”的一面，氮与磷这种不同的生物地球化学循环特性实际上维持了初级生产的相对稳定，减少了浮游藻类旺发的可能性，即有利于维持生态系统的稳定。富营养化，尤其是氮在水体中的积累在一定程度上打破了由磷“吝啬”维持的这种“平衡”，从而导致磷消耗甚至耗竭的现象出现。需说明的是，本文所指的磷消耗在表观上是一种磷限制，其产生既是过量营养盐(尤其是氮)输入及与之相关的富营养化共同作用的结果，也在一定程度上受近海生物地球化学循环过程变化的驱动(主要是浮游植物生物量和种群结构的变化)，可能为富营养化条件下磷限制的新模态，理应成为当前海洋环境需要关注的问题之一。

1.3 营养盐结构失衡与浮游植物种群变动

营养盐结构失衡(偏离 Redfield 比值)是海洋环境和生态研究的热点问题，其往往导致河口、近海生态系统的转变^[93]，这在世界上许多中纬度的近海海域均有出现^[94]，特别是人口较为集中的区域。大多情况下，我们关注河流对于近海营养盐结构失衡的贡献，

如，多瑙河等河流入海营养盐结构变化导致了黑海浮游植物优势种由硅藻向非硅藻(鞭毛藻和颗石藻)转变，藻类还呈现了小型化的趋势^[95]。类似群落变动的情况在人类活动深度影响的圣华金河口(美国加州)^[96]、尼罗河(埃及)^[97]、科罗拉多河(美国)^[98]、长江^[99]、黄河^[100]等主要河流的河口区都有出现，并且从河口扩展到了河口以外的近海。又如，研究显示近 30 a 来，渤海三个海湾和中部的营养盐浓度和结构(N/P 比)均发生了显著的变化(表现为 N/P 比值升高(图 2))^[29-30]，渤海生态系统也较过去^[101]发生了较为明显的变化，在近些年甲藻在生物量中的占比甚至超过了硅藻^[15, 30]，占到了生物量的 60%^[15]，同时出现了抑食金球藻(*Aureococcus anophagefferens*)的褐潮，这显然与包括黄河在内的环渤海流域所输送营养盐的结构变化^[102]有关，还可能驱动渤海中部低氧^[103]和酸化^[14, 104]的产生。可见，浮游植物群落结构转变的特征在中国近海海域是十分独特和鲜明的。由于生物有机体内氮、磷循环机制的不同，浮游植物结构与生物量的变化很可能会进一步加剧营养盐失衡问题。然而，这一过程的驱动机制及其生态效应还需要更多的研究来揭示。

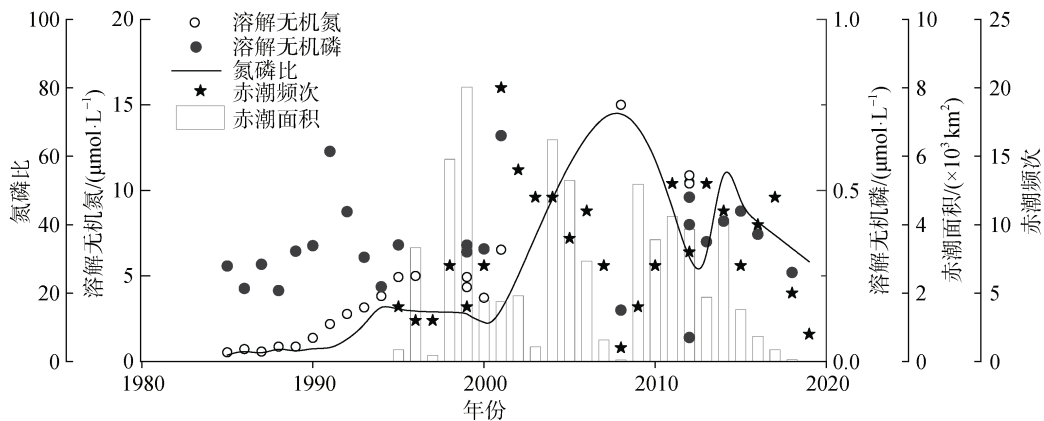


图 2 渤海营养盐浓度、比值长期变化与有害赤潮(HABs)爆发频率的关系^[64, 91, 102, 105]

Fig. 2 Long-term changes in nutrients, stoichiometric ratios, and occurrences of harmful algae blooms^[64, 91, 102, 105]

浮游植物群落结构变化在一定程度上可认为是对于低磷和高氮磷比的水环境采取的适应策略，且不同的区域呈现出较为显著的差异。近些年来，河流输入到近海的营养盐通量和组成较过去发生了显著的变化^[8]，一旦近海绝对的营养盐浓度限制状况被日益变化的陆源输入所打破，无疑会引起河口和近岸海域生物量及其组成的显著变化。中国近海硅藻和甲藻是主要的类群^[106]，而硅藻在低磷和高氮磷比环境中不占优势^[87, 107]。因此，营养盐结构失衡必然引

起浮游植物群落结构向有利于甲藻生物量增加的趋势发展，由此改变水体氮磷的循环过程。一个针对渤海变化合理的解释是：渤海生态系统的转变不仅仅受陆源输送的营养盐通量升高的影响，还受到水体内部营养盐结构相对外部输入失衡的胁迫，导致浮游植物生物量和群落结构响应陆源输入变化的同时甲藻不断增加，这一过程提高了水体向沉积物中磷的埋藏量(图 1)，并进一步加剧了营养盐的失衡。相比于黄河(升高大约 12 倍)、海河(相对稳定)等主要环

渤海河流, 渤海氮磷比升高(升高约 15 倍)的幅度要大些^[30], 也可以说明磷埋藏量相对于氮在比例上是增加的。同样, 最新的研究还显示类似磷消耗的情况在黄海和东海都存在^[90], 即中国近海可能存在普遍的磷消耗问题, 值得关注。

除种群变化外, 浮游植物还往往通过调整它的生化组成来适应低磷和高氮磷比的环境^[20, 108], 使得它们体内的元素组成偏离 Redfield 比值(106C/16N/1P^[11, 109-110]); 如中国常见的两种微微型浮游植物聚球藻(*Synechococcus*)和原绿球藻(*Prochlorococcus*)^[110]在磷限制下可以出现 N/P 比介于(59~109)/1 的高值情况^[110]。此外, 水体磷限制(主要是无机磷酸盐)情况下其他赋存形态的磷参与物质循环的程度可能提高, 这在前面已经提到。不过, 由于有机磷形态和组成复杂多样, 目前对于其参与生物地球化学循环的主要过程的量化还较少。可见, 浮游植物对于水环境的自我调整和适应机制无疑将影响磷的生物地球化学过程^[111], 进而改变其在水体中循环和沉积物内埋藏的规律等。

诸多研究还显示, 营养盐失衡还会导致有害赤潮暴发频率与面积的增加^[2, 112], 以及优势种的变迁。Wang 等^[2]的研究显示, 营养盐输送通量居高不下的当前, 当河流输送的氮与磷营养盐比值(总氮与总磷的摩尔比)高于 25~30 的阈值时(其中, 渤海和黄海为 25, 东海和南海为 30), 中国近海赤潮暴发的频率和面积将大为增加。与过去相比, 当前中国河流输送的营养盐的氮磷比明显高于这一阈值, 这无疑增加了近海赤潮发生的风险。与此同时, 世界范围内许多区域河流输送的氮磷比都有升高的趋势^[113], 而低磷和高氮磷比的海洋环境更适合甲藻的快速生长^[114]。上述营养盐输入与比值的变化还可能导致浮游植物优势种的改变; 再以渤海为例, 其优势种由 1990 年前硅藻门的角毛藻(*Chaetoceros*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)等转变为 2000 年后的硅藻门的舟形藻(*Navicula*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)与海线藻(*Thalassionema*)和甲藻门的角藻(*Tripos*)等联合占优^[15], 即“硅藻占优”至“硅甲藻联合为主”的转变; 同时, 赤潮发生特征也由偶发发展到多发与有毒阶段, 且种类随时间变化明显^[115]。这表明渤海的浮游植物群落组成、优势种变化等可能与富营养化程度特别是营养盐结构失衡等密切相关, 其响应过程还将不断催生磷消耗的问题。图 2 显示有害赤潮暴发频率与 N/P 比值存在正

相关关系, 这也从侧面证实上述假设。当然, 除营养盐比值外, 营养盐的形态也可能影响上述种群变化, 如氨氮相对于其他无机氮比例的变化以及有机氮、有机磷相对于总氮、总磷比例的变化也是推动近海浮游植物种群变化的“推手”, 如在东海, 持续暴发的东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)赤潮还可能与水体有机磷浓度升高有关^[116]。然而, 相关的研究主要是依据培养实验^[93], 还需要更多的现场数据来验证。同样, 在南海近岸赤潮的优势种也从束毛藻(*Trichodesmium erythraeum*)转变为球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)^[117], 后者可能与水体氨氮、尿素等含量变化有关。除近岸水域外, 南海营养盐的供给还受到多尺度物理过程的影响^[118], 其营养盐结构失衡与浮游植物种群变动的相关研究较中国其他海域少。

可见, 水文、水化学环境背景场是影响环境质量状况和水生生态的重要因素, 其变化将首要对近海浮游植物的结构和功能产生长期的生态学效应, 并对水体生态系统产生深远影响, 特别是由此导致生态灾害事件频发, 将对近海资源产生不利的影响。如前所述, 氮、磷有着不同的生物地球化学循环过程, 近海浮游植物响应陆源输入变化及其相关联的生物地球化学过程是产生磷消耗这一环境问题的重要因素(图 3)。因此, 开展以氮与磷营养盐由陆向海输送及其海洋过程响应为基础的研究, 特别是导致近海氮磷营养盐结构失衡加剧的生物地球化学机制的研究, 将为近海环境变化和重要生物资源保护等提供重要科学依据, 丰富和提升人们对环境变化的系统认知。

2 中国近海相关工作的切入点

近海环境的演变最终将引起与之相关的氮与磷埋藏的变化以及浮游植物种群变动。中国近海海洋环境与浮游植物群落结构变化现象是十分独特的, 显著区别于邻近的韩国和日本^[119]; 受人类活动的影响, 流域-近海的氮与磷物质输送过程-循环正在发生改变, 而作为物质之“汇”的边缘海必将通过调节系统的状态以响应这种变化, 从而对近海氮与磷埋藏格局产生影响, 如近海磷消耗乃至耗竭的现象。以上这些过程变化将导致近海磷的沉积环境发生怎样的变化, 以及以何种方式、在多大程度上影响近海环境健康与稳定正在成为一个广受关注的科学问题, 但相关研究仍较匮乏, 亟待加强。因此, 从海洋环境

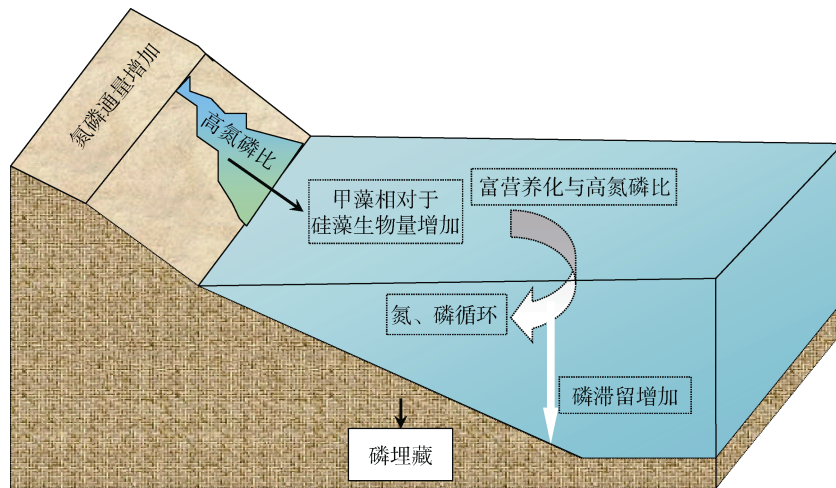


图3 营养盐结构失衡与磷消耗示意图

Fig. 3 Stoichiometric imbalance in nutrient and phosphorus depletion

演变的角度, 陆地对紧邻的海洋影响不容忽视, 应加强陆海一体化研究, 做出科学合理的“以海统陆”的决策, 科学规划流域污染物入海通量和组成^[120]。这便要求沿海省份和大河流域各行政单元尽可能通过优化化肥使用、改进污水处理、优化养殖活动等有效措施降低陆源污染物入海通量。不过, 当前近乎于“一刀切”的减排举措可能无法改变氮磷比失衡的环境问题。由此不难理解, 在过去 20 a, 尽管渤海的环境治理行动取得了阶段性的进展, 但渤海生态环境恶化的趋势依旧严峻(如, 近海富营养化海域面积和程度继续扩大, 氮磷比持续升高^[121]), 且有新的环境问题出现(由 2000 年前的氮限制向当前的磷限制转变, 出现了抑食金球藻(*Aureococcus anophagefferens*)褐潮^[102, 122])。类似美国切萨皮克湾(Chesapeake Bay, 世界上富营养化程度最高的海湾^[6])差异化的陆源氮与磷削减实践^[123-124]或可为氮与磷减排提供参考。同样, 欧洲的陆地营养盐管理策略降低了河流营养盐输送通量, 改善了其近海海洋环境, 使得波罗的海浮游植物的优势种出现了从硅藻到甲藻再到硅藻的转变^[125]。从目前有限的数据分析来看, 应优先削减输入到近海的氮营养盐通量, 以减少其生态灾害发生的频率和面积。不过, 上述问题的科学回答需要明确氮与磷驱动近海环境演变的机制以及陆地氮与磷的热点源区、组成与输送路径等, 因地制宜地制定不同区域差异化的“氮与磷配额”, 有针对性地开展氮与磷减排工作。值得说明的是, 最新的基于网格化的环境评估模型-营养盐数值模式 (integrated model to assess the global environment - global nutri-

ent model, IMAGE-GNM)^[9]对长江氮与磷的溯源研究, 对于污染物来源的源地解析、管控和陆海统筹等具有很好的借鉴意义; 同时, 最近 Wang 等^[102]基于 IMAGE-GNM 与海洋 3D 模式(D-flow flexible mesh)的耦合是一次新的尝试, 初步揭示了中国近海赤潮发生的新模态, 给出了削减陆源氮和磷的比例, 初步回答了中国海洋环境治理应该限制氮、还是限制磷抑或协同限制氮和磷排放的问题, 为今后相关研究提供了重要手段。

值得注意的是渤海水体磷的浓度持续走低^[29](图 2), 沉积物中磷的埋藏却呈升高的趋势^[126], 这应与环渤海陆源氮与磷输送变化及其不同的生物地球化学过程直接相关, 这也从多个侧面支持了上述“磷消耗(耗竭)”的猜想。同样有限的数据^[25, 31-32, 90, 127]也显示磷消耗的问题在黄海与东海等中国近海都存在, 特别是南黄海在近些年因浒苔绿潮的频发其营养盐结构变化备受关注^[25, 127-128]。因此应高度重视“磷消耗/耗竭”所可能引发的潜在生态灾害和环境问题。此外, 近海的水动力结构极为复杂^[129], 地球化学背景场的区域性差异显著, 不同区域的生态环境演变规律和磷消耗的变率并不完全一致^[30, 104], 在其中近海区域内物质通量的急剧变化、结构失衡及其环境效应最为引人注目^[14, 80], 是开展海洋环境管理有效的切入点。

不过, 面对如此广阔的区域, 仅仅依靠沿海省市的努力, 中国近海的生态环境无法得到根本的改善, 急需陆地(通过流域延深的区域)-海洋的“一体化联动”。目前针对近海生态环境的研究多关注于

大河^[27, 130-131]及其河口区和典型海湾等子区域或子系统,很少涉及到陆-海区域的综合研究,陆海一体化的营养盐输送、循环等过程的综合研究更为有限,亦缺乏以此为基础的适应性管理对策的探讨。2021年3月12日,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》^[132](简称“纲要”)对外公布,“纲要”明确提出加快推进重点海域综合治理,构建流域-河口-近岸海域污染防治联动机制。可见,开展陆海一体化的研究正是“纲要”提出的“打造可持续海洋生态环境”所亟需的。

综上所述,人类活动深刻影响着近海的生态环境。入海营养盐的大量排放以及营养盐结构失衡已导致近海生态系统结构和功能发生了明显的变化,也产生了“磷消耗”的环境问题,从而造成了近海水体营养盐结构的进一步失衡,并可能引发近海生态环境不确定性或灾难性的变化,需要进一步深入研究。在上述问题中,对入海河流域内氮与磷产生的热点区域进行溯源,定量估算流域-近海系统的物质输送通量、循环与收支,揭示其生态响应,对于准确和深入认识近海生态环境变化是十分必要的。相关研究工作的深入开展将有助于深入阐释人类活动对近海环境的影响及其生态效应,为实现可持续的海洋生态环境提供科学基础。需要指出的是,前述三方面的主要研究内容并未涉及到全球变化的影响。事实上,气候变化也可能通过影响近海环流从而进一步影响区域的富营养化进程,或通过水体升温加剧富营养化过程^[106, 114]。不过,对于近海这一紧邻陆地的浅海而言,人类活动应该是影响其环境变化的主要控制因素,这也恰恰是《渤海综合治理攻坚战行动计划》等系列治理文件出台的根本原因。

3 结语和展望

人类活动深刻影响近海的生态环境。中国近海营养盐结构失衡较过去更为突出,可能引发潜在的磷消耗问题,而这一问题不能简单地视作磷限制;入海营养盐通量和结构的变化是导致近海营养盐结构失衡的外部因素,近海浮游植物对陆源输入变化的响应及其相关联的生物地球化学过程是产生磷消耗这一环境问题的内部因素,从而造成近海水体营养盐结构的进一步失衡,并可能带来近海生态环境不确定性或灾难性的变化,需要进一步深入研究。在上述问题中,对入海河流域氮与磷产生的热点区进

行溯源,定量评估河流域-近海系统的物质输送、循环与收支及其生态学响应,对于准确和深入认识近海营养盐结构失衡等生态环境变化是十分必要的。

毫无疑问,人类活动导致的氮磷失衡是全球性的生态环境问题^[133-134],势必会对海洋物质循环和生态系统稳定产生深远的影响,其中近海磷消耗及其生态系统响应应该得到重视。长期以来,中国学科划分过细,陆地与海洋学科间的交叉融合不足。但地球系统科学下的海洋环境问题是一个“大科学”,环境问题的复杂性使其无法通过单一学科的观测与研究或有限区域的观测与研究得以解决,而是需要多学科、不同领域间的深度交叉。近年来,随着科技投入的增大、科研条件的改善和对外合作交流的加强,中国海洋科学的观测与研究正在走向深入,但不同学科间的深度融合依然不足,也缺少应对海洋环境问题的国家战略。在全球变化大环境下,中国需要及早布局,有效应对;这就要求海洋科学观测与研究必须创新模式,通过跨领域、跨学科的交叉,力争在陆海耦合机制和环境演变方面取得理论上的突破。同时,我们也应该注意到中国海域广阔,不同海区存在显著不同的生态环境特征。统一的人海河流氮、磷协同控制或许并不合适,无法适用于不同的海域。因此,建议在综合考虑这些典型近海区域背景和环境演变的基础上,开展“因地制宜”的人海河流氮磷协同控制,建立近海水质、入海氮磷通量、生态系统稳定等多控制目标。今后,应坚持“陆海统筹”和“陆海协作”,整体提升陆地-海洋联合观测监测体系的水平和综合研究的能力。基于地球系统多圈层相互作用的理念,以陆地-近海海洋为体系,将历史记录、现代过程和预测预报相结合,开展陆地-河流-近海的耦合研究,将为维持海洋生态系统健康与稳定、促进国家经济社会可持续发展提供有力的科学依据。

参考文献:

- [1] JENNY J P, FRANCUS P, NORMANDEAU A, et al. Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1481-1489.
- [2] WANG J, BOUWMAN A F, LIU X, et al. Harmful algal blooms in Chinese coastal waters will persist due to perturbed nutrient ratios[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021, 8(3): 276-284.
- [3] HEISLER J, GLIBERT P M, BURKHOLDER J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: a scientific

- consensus[J]. *Harmful Algae*, 2008, 8(1): 3-13.
- [4] KEYS M, TILSTONE G, FINDLAY H S, et al. Effects of elevated CO₂ and temperature on phytoplankton community biomass, species composition and photosynthesis during an experimentally induced autumn bloom in the western English Channel[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(10): 3203-3222.
- [5] WALLACE R B, BAUMANN H, GREAR J S, et al. Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 148: 1-13.
- [6] MALONE T C, NEWTON A. The globalization of cultural Eutrophication in the coastal ocean: Causes and consequences[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7(670): 1-30.
- [7] HOUGHTON R A, NASSIKAS A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land-cover change 1850-2015[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, 31: 456-472.
- [8] BEUSEN A H W, BOUWMAN A F, VAN BEEK L P H, et al. Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(8): 2441-2451.
- [9] LIU X, BEUSEN A H W, VAN BEEK L P H, et al. Exploring spatiotemporal changes of the Yangtze River (Changjiang) nitrogen and phosphorus sources, retention and export to the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Water Research*, 2018, 142: 246-255.
- [10] MAAVARA T, D RR H H, VAN CAPPELLEN P. Worldwide retention of nutrient silicon by river damming: From sparse data set to global estimate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(8): 842-855.
- [11] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Scientist* 1958, 46: 205-221.
- [12] LIU J, DU J, WU Y, et al. Nutrient input through submarine groundwater discharge in two major Chinese estuaries: the Pearl River Estuary and the Changjiang River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 203: 17-28.
- [13] RAN X, BOUWMAN A F, YU Z, et al. Implications of eutrophication for biogeochemical processes in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(1): 55-63.
- [14] ZHAI W D, ZHENG L W, LI C L, et al. Changing nutrients, dissolved oxygen and carbonate system in the Bohai and Yellow Seas, China[M]//CHEN C T A, GUO X. *Changing Asia-Pacific Marginal Seas*. Singapore: Springer Singapore, 2020: 121-137.
- [15] LIU D, SHEN X, DI B, et al. Palaeoecological analysis of phytoplankton regime shifts in response to coastal eutrophication[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 475: 1-14.
- [16] LAUFK TTER C, VOGT M, GRUBER N, et al. Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models[J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(23): 6955-6984.
- [17] XING L, ZHAO M, ZHANG T, et al. Ecosystem responses to anthropogenic and natural forcing over the last 100 years in the coastal areas of the East China Sea[J]. *The Holocene*, 2016, 26: 669-677.
- [18] GLIBERT P M, ICARUS A J, ARTIOLI Y, et al. Vulnerability of coastal ecosystems to changes in harmful algal bloom distribution in response to climate change: Projections based on model analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3845-3858.
- [19] BAUER J E, CAI W J, RAYMOND P A, et al. The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 61-70.
- [20] MARTIN P, DYHRMAN S T, LOMAS M W, et al. Accumulation and enhanced cycling of polyphosphate by Sargasso Sea plankton in response to low phosphorus[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(22): 8089-8094.
- [21] WU J, SUNDA W, BOYLE E, et al. Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean[J]. *Science*, 2000, 289: 759-762.
- [22] WANG B, XIN M, WEI Q, et al. A historical overview of coastal eutrophication in the China Seas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 136: 394-400.
- [23] BOUWMAN L, BEUSEN A M, GLIBERT P M, et al. Mariculture: significant and expanding cause of coastal nutrient enrichment[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 044026.
- [24] ZHOU M J, SHEN Z L, YU R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [25] ZHANG Y, HE P, LI H, et al. *Ulva prolifera* green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China[J]. *National Science Review*, 2019, 6(4): 825-838.
- [26] WEI Q, WANG B, YU Z, et al. Mechanisms leading to the frequent occurrences of hypoxia and a preliminary analysis of the associated acidification off the Changjiang estuary in summer[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(2): 360.
- [27] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 渤黄东海生源要素的生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- SONG Jinming, LI Xuegang, YUAN Huamao, et al. *Biogeochemistry of biogenic elements in the Bohai Sea*

- the Yellow Sea and the East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [28] 俞志明, 沈志良, 陈亚瞿, 等. 长江口水域富营养化[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
YU Zhiming, SHEN Zhiliang, CHEN Yaqu, et al. Eutrophication in the Changjiang estuary[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [29] WANG J, YU Z, WEI Q, et al. Long-term nutrient variations in the Bohai Sea over the past 40 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 703-722.
- [30] XIN M, WANG B, XIE L, et al. Long-term changes in nutrient regimes and their ecological effects in the Bohai Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 562-573.
- [31] YANG F, WEI Q, CHEN H, et al. Long-term variations and influence factors of nutrients in the western North Yellow Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 1026-1034.
- [32] WEI Q, YAO Q, WANG B, et al. Long-term variation of nutrients in the southern Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 111: 184-196.
- [33] JESSEN C, BEDNARZ V, RIX L, et al. Marine eutrophication[M]// ARMON R, HÄNNINEN O. *Environmental indicators*. Dordrecht: Springer, 2015: 177-203.
- [34] RABALAIS N N, TURNER R E, D AZ R J, et al. Global change and eutrophication of coastal waters[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2009, 66: 1528-1537.
- [35] LIU Y, LU M, YANG H, et al. Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts[J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 534-552.
- [36] BOUWMAN A F, BIERKENS M F P, GRIFFIOEN J, et al. Nutrient dynamics, transfer and retention along the aquatic continuum from land to ocean: towards integration of ecological and biogeochemical models[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(1): 1-22.
- [37] GAO Y, ZHOU F, CIAIS P, et al. Human activities aggravate nitrogen-deposition pollution to inland water over China[J]. *National Science Review*, 2019, 7(2): 430-440.
- [38] RUTTENBERG K C. Phosphorus Cycle[M]// COCHRAN J K, BOKUNIEWICZ H J, YAGER P L. *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)*. Oxford: Academic Press, 2019: 447-460.
- [39] BENITEZ-NELSON C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(1): 109-135.
- [40] TYRRELL T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production[J]. *Nature*, 1999, 400(6744): 525-531.
- [41] YAN W, MAYORGA E, LI X, et al. Increasing anthropogenic nitrogen inputs and riverine DIN exports from the Changjiang River basin under changing human pressures[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): GB0A06.
- [42] LI L, NI J, CHANG F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers[J]. *Science Bulletin*, 2019, 65(1): 62-69.
- [43] MAAVARA T, LAUERWALD R, REGNIER P, et al. Global perturbation of organic carbon cycling by river damming[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15347.
- [44] LEHNER B, LIERMANN C R, REVENGA C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [45] HOWARTH R, SWANEY D, BILLEN G, et al. Nitrogen fluxes from the landscape are controlled by net anthropogenic nitrogen inputs and by climate[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(1): 37-43.
- [46] DU E, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [47] ZHU J, WANG Q, HE N, et al. Imbalanced atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in China: Implications for nutrient limitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1605-1616.
- [48] BENNEKOM A J, SALOMONS W. Pathways of nutrients and organic matter from land to ocean through rivers[M]. 1980: 33-51.
- [49] MAHOWALD N, JICKELLS T D, BAKER A R, et al. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(4): GB4026.
- [50] KANAKIDOU M, DUCE R A, PROSPERO J M, et al. Atmospheric fluxes of organic N and P to the global ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(3): GB3026.
- [51] BURSON A, STOMP M, AKIL L, et al. Unbalanced reduction of nutrient loads has created an offshore gradient from phosphorus to nitrogen limitation in the North Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 2016, 61: 869-888.
- [52] VAN METER K J, BASU N B, VEENSTRA J J, et al. The nitrogen legacy: emerging evidence of nitrogen accumulation in anthropogenic landscapes[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 035014.
- [53] BEUSEN A H W, SLOMP C P, BOUWMAN A F. Global land-ocean linkage: direct inputs of nitrogen to coastal waters via submarine groundwater discharge[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(3): 034035.

- [54] SANTOS I R, CHEN X, LECHER A L, et al. Submarine groundwater discharge impacts on coastal nutrient biogeochemistry[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(5): 307-323.
- [55] CHO H-M, KIM G, KWON E Y, et al. Radium tracing nutrient inputs through submarine groundwater discharge in the global ocean[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 2439.
- [56] MYRIOKEFALITAKIS S, GR GER M, HIERONYMUS J, et al. An explicit estimate of the atmospheric nutrient impact on global oceanic productivity[J]. *Ocean Science*, 2020, 16(5): 1183-1205.
- [57] SHI Z, HERBERT R. The Importance of atmospheric nutrients in the earth system[J]. *EOS Transactions of the American Geophysical Union*, 2016, 97: EO044133.
- [58] MAHOWALD N, JICKELLS T D, BAKER A R, et al. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations and deposition rates, and anthropogenic impacts[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(4): GB4026.
- [59] OKIN G S, BAKER A R, TEGEN I, et al. Impacts of atmospheric nutrient deposition on marine productivity: Roles of nitrogen, phosphorus, and iron[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(2): GB2022.
- [60] WANG J, BOUWMAN A F, BEUSEN A H W, et al. Comment on “Multi-scale modeling of nutrient pollution in the rivers of China”[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(3): 2043-2045.
- [61] WU W, LIU J, BOUWMAN A F, et al. Exploring oxygen dynamics and depletion in an intensive bivalve production area in the coastal sea off Rushan Bay, China[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2020, 649: 53-65.
- [62] WANG R, LI X, HOU L, et al. Nitrogen fixation in surface sediments of the East China Sea: Occurrence and environmental implications[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137: 542-548.
- [63] LI D, JING H, ZHANG R, et al. Heterotrophic diazotrophs in a eutrophic temperate bay (Jiaozhou Bay) broadens the domain of N₂ fixation in China's coastal waters[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 242: 106778.
- [64] 赵晨英, 臧家业, 刘军, 等. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 2115-2127.
ZHAO Chenying, ZANG Jiaye, LIU Jun, et al. Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(7): 2115-2127.
- [65] HOWARTH R W, MARINO R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades[J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1, part2): 364-376.
- [66] WOODLAND R J, THOMSON J R, MAC NALLY R, et al. Nitrogen loads explain primary productivity in estuaries at the ecosystem scale[J]. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(5): 1751-1762.
- [67] 王修林, 崔正国, 李克强, 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(自然科学版)*, 2008(4): 109-112, 116.
WANG Xiulin, CUI Zhengguo, LI Keqiang, et al. Study on the gross control of DIN environmental capacity in the peripheral zone of the Bohai Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008(4): 109-112, 116.
- [68] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, et al. Reducing phosphorus to curb Lake eutrophication is a success[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 8923-8929.
- [69] SCHINDLER D W, HECKY R E, FINDLAY D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [70] PAERL H W. Controlling eutrophication along the freshwater-marine continuum: dual nutrient (N and P) reductions are essential[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, 32(4): 593-601.
- [71] CONLEY D J, PAERL H W, HOWARTH R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014-1015.
- [72] DODDS W K, SMITH V H. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in streams[J]. *Inland Waters*, 2016, 6(2): 155-164.
- [73] PAERL H W, SCOTT J T, MCCARTHY M J, et al. It takes two to tango: when and where dual nutrient (N & P) reductions are needed to protect lakes and downstream ecosystems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20): 10805-10813.
- [74] YU C, HUANG X, CHEN H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567(7749): 516-520.
- [75] SCAVIA D, BRICKER S B. Coastal eutrophication assessment in the United States[M]//MARTINELLI L A, HOWARTH R W. *Nitrogen cycling in the Americas: natural and anthropogenic influences and controls*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006: 187-208.
- [76] JUSTIĆ D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41-46.
- [77] EVANS M A, SCAVIA D. Exploring estuarine eutrop-

- hication sensitivity to nutrient loading[J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(2): 569-578.
- [78] LIN I, LIU W T, WU C C, et al. New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(13): 1718.
- [79] LEWIS K M, VAN DIJKEN G L, ARRIGO K R. Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production[J]. *Science*, 2020, 369(6500): 198-202.
- [80] LIU J, ZANG J, WANG H, et al. Changes in the distribution and preservation of silica in the Bohai Sea due to changing terrestrial inputs[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 166: 1-9.
- [81] MORA C, WEI C L, ROLLO A, et al. Biotic and human vulnerability to projected changes in ocean biogeochemistry over the 21st Century[J]. *PLOS Biology*, 2013, 11(10): e1001682.
- [82] METSON G S, LIN J, HARRISON J A, et al. Where have all the nutrients gone? Long-term decoupling of inputs and outputs in the Willamette River watershed, Oregon, United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(10): e2020JG005792.
- [83] ASMALA E, CARSTENSEN J, CONLEY D J, et al. Efficiency of the coastal filter: Nitrogen and phosphorus removal in the Baltic Sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 2017, 62(S1): S222-S238.
- [84] LENHART H-J, MILLS D K, BARETTA-BEKKER H, et al. Predicting the consequences of nutrient reduction on the eutrophication status of the North Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 81(1): 148-170.
- [85] PASSY P, GYPENS N, BILLEN G, et al. A model reconstruction of riverine nutrient fluxes and eutrophication in the Belgian Coastal Zone since 1984[J]. *Journal of Marine Systems*, 2013, 128: 106-122.
- [86] WANG W, YU Z, WU Z, et al. Rates of nitrification and nitrate assimilation in the Changjiang River estuary and adjacent waters based on the nitrogen isotope dilution method[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 163: 35-43.
- [87] LI J, GLIBERT P M, ZHOU M, et al. Relationships between nitrogen and phosphorus forms and ratios and the development of dinoflagellate blooms in the East China Sea[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 383: 11-26.
- [88] YANG B, SONG G D, LIU S M, et al. Phosphorus recycling and burial in core sediments of the East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2017, 192: 59-72.
- [89] LIU S M. Response of nutrient transports to water-sediment regulation events in the Huanghe basin and its impact on the biogeochemistry of the Bohai[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 141: 59-70.
- [90] MOON J Y, LEE K, LIM W A, et al. Anthropogenic nitrogen is changing the East China and Yellow seas from being N deficient to being P deficient[J]. *Limnology and Oceanography*, 2021, 66(3): 914-924.
- [91] 李梦露. 磷观渤海: 由陆向海磷的分布与通量和收支及其海洋生态环境效应研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所, 2021.
- LI Menglu. *Insighting into the Bohai Sea from the phosphorus dimension: A study of fluxes and budget of phosphorus from land to sea with implications for the marine environmental evolution*[D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2021.
- [92] GRANTZ E M, HAGGARD B E, SCOTT J T. Stoichiometric imbalance in rates of nitrogen and phosphorus retention, storage, and recycling can perpetuate nitrogen deficiency in highly-productive reservoirs[J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(6): 2203-2216.
- [93] MEYER J, L SCHER C R, NEULINGER S C, et al. Changing nutrient stoichiometry affects phytoplankton production, DOP accumulation and dinitrogen fixation – a mesocosm experiment in the eastern tropical North Atlantic[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(3): 781-794.
- [94] ANDERSEN T, CARSTENSEN J, HERNANDEZ-GARCIA A E, et al. Ecological thresholds and regime shifts: approaches to identification[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(1): 49-57.
- [95] LUDWIG W, DUMONT E, MEYBECK M, et al. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades?[J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 80(3/4): 199-217.
- [96] GLIBERT P M. Long-term changes in nutrient loading and stoichiometry and their relationships with changes in the food web and dominant pelagic fish species in the San Francisco Estuary, California[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2010, 18(2): 211-232.
- [97] RAM REZ-ROMERO E, MOLINERO J C, SOMMER U, et al. Phytoplankton size changes and diversity loss in the southwestern Mediterranean Sea in relation to long-term hydrographic variability[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 235: 106574.
- [98] BRUSCA R C, ÁLVAREZ-BORREGO S, HASTINGS P A, et al. Colorado River flow and biological productivity in the Northern Gulf of California, Mexico[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 164: 1-30.
- [99] WANG Y, XU H, LI M. Long-term changes in phytoplankton communities in China's Yangtze Estuary driven by altered riverine fluxes and rising sea surface

- temperature[J]. *Geomorphology*, 2021, 376: 107566.
- [100]ZHANG J, LI F, LV Q, et al. Impact of the Water-Sediment Regulation Scheme on the phytoplankton community in the Yellow River estuary[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126291.
- [101]于志刚, 米铁柱, 谢宝东, 等. 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*, 2000, 19(1): 15-19.
- YU Zhigang, MI Tiezhu, XIE Baodong, et al. Changes of the environmental parameters and their relationship in recent twenty years in the Bohai Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(1): 15-19.
- [102]WANG H, BOUWMAN A F, VAN GILS J, et al. Hind-casting harmful algal bloom risk due to land-based nutrient pollution in the Eastern Chinese coastal seas[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119669.
- [103]WEI Q, WANG B, YAO Q, et al. Spatiotemporal variations in the summer hypoxia in the Bohai Sea (China) and controlling mechanisms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 138: 125-134.
- [104]ZHAI W D, ZHAO H D, SU J L, et al. Emergence of summertime hypoxia and concurrent carbonate mineral suppression in the central Bohai Sea, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(9): 2768-2785.
- [105]WANG H, RAN X, BOUWMAN L, et al. Competitive advantages of HAB species under changing environmental conditions in the coastal waters of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2023, 259: 104991.
- [106]XIAO X, AGUST S, PAN Y, et al. Warming amplifies the frequency of harmful algal blooms with eutrophication in Chinese coastal waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(22): 13031-13041.
- [107]LIANG Y, ZHANG G, WAN A, et al. Nutrient- limitation induced diatom-dinoflagellate shift of spring phytoplankton community in an offshore shellfish farming area[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 141: 1-8.
- [108]DEVRIES T. New directions for ocean nutrients[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(1): 15-16.
- [109]REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of sea-water[M]//HILLS M N. The sea. New York: Wiley and Sons, 1963: 12-37.
- [110]BERTILSSON S, BERGLUND O, KARL D M, et al. Elemental composition of marine *Prochlorococcus* and *Synechococcus*: Implications for the ecological stoichiometry of the sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(5): 1721-1731.
- [111]WEBER T S, DEUTSCH C. Ocean nutrient ratios governed by plankton biogeography[J]. *Nature*, 2010, 467(7315): 550-554.
- [112]GLIBERT P, BURFORD M. Globally changing nutrient loads and harmful algal blooms: recent advances, new paradigms, and continuing challenges[J]. *Oceanography (Washington DC)*, 2017, 30(1): 58-69.
- [113]ROMERO E, LUDWIG W, SADAQUI M, et al. The Mediterranean region as a paradigm of the global decoupling of N and P between soils and freshwaters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2021, 35: e2020GB006874.
- [114]XIAO W, LIU X, IRWIN A J, et al. Warming and eutrophication combine to restructure diatoms and dinoflagellates[J]. *Water Research*, 2018, 128: 206-216.
- [115]宋南奇, 王诺, 吴暖, 等. 基于 GIS 的我国渤海 1952~2016 年赤潮时空分布[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1142-1148.
- SONG Nanqi, WANG Nuo, WU Nuan, et al. Temporal and spatial distribution of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952~2016 based on GIS[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3): 1142-1148.
- [116]OU L, HUANG X, HUANG B, et al. Growth and competition for different forms of organic phosphorus by the dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* with the dinoflagellate *Alexandrium catenella* and the diatom *Skeletonema costatum* s.l.[J]. *Hydrobiologia*, 2015, 754(1): 29-41.
- [117]LIU C, TANG D. Spatial and temporal variations in algal blooms in the coastal waters of the western South China Sea[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2012, 6(3): 239-247.
- [118]LI Q P, WANG Y, DONG Y, et al. Modeling long-term change of planktonic ecosystems in the northern South China Sea and the upstream Kuroshio Current[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(6): 3913-3936.
- [119]SAKAMOTO S, LIM W A, LU D, et al. Harmful algal blooms and associated fisheries damage in East Asia: Current status and trends in China, Japan, Korea and Russia[J]. *Harmful Algae*, 2021, 102: 101787.
- [120]LIU Y, ENGEL B A, FLANAGAN D C, et al. A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality: Needs and opportunities[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 601/602: 580-593.
- [121]WANG Y, LIU D, XIAO W, et al. Coastal eutrophication in China: Trend, sources, and ecological effects[J]. *Harmful Algae*, 2021, 107: 102058.
- [122]OU L, CAI Y, JIN W, et al. Understanding the nitrogen uptake and assimilation of the Chinese strain of *Aureococcus anophagefferens* (Pelagophyceae)[J]. *Algal Research*, 2018, 34: 182-190.
- [123]D'ELIA C F, BIDJERANO M, WHEELER T B. Chap-

- ter 17 - Population Growth, Nutrient Enrichment, and Science-Based Policy in the Chesapeake Bay Watershed[M]//WOLANSKI E, DAY J W, ELLIOTT M, et al. Coasts and Estuaries. Amsterdam: Elsevier, 2019: 293-310.
- [124]LEFCHECK J S, ORTH R J, DENNISON W C, et al. Long-term nutrient reductions lead to the unprecedented recovery of a temperate coastal region[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(14): 3658-3662.
- [125]WASMUND N, TUIMALA J, SUIKKANEN S, et al. Long-term trends in phytoplankton composition in the western and central Baltic Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2011, 87(2): 145-159.
- [126]江辉煌, 刘素美. 渤海沉积物中磷的分布与埋藏通量[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 125-132.
JIANG Huihuang, LIU Sumei. Distribution and burial flux of phosphorus in sediments of the Bohai Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 125-132.
- [127]LI H, ZHANG Y, HAN X, et al. Growth responses of *Ulva prolifera* to inorganic and organic nutrients: Implications for macroalgal blooms in the southern Yellow Sea, China[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 26498.
- [128]ZHANG X, SONG Y, LIU D, et al. Macroalgal blooms favor heterotrophic diazotrophic bacteria in nitrogen-rich and phosphorus-limited coastal surface waters in the Yellow Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 75-81.
- [129]WU D, WAN X, BAO X, et al. Comparison of summer thermohaline field and circulation structure of the Bohai Sea between 1958 and 2000[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(4): 363-369.
- [130]谷文艳, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 黄河下游溶解态营养盐季节变化及入海通量研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(3): 74-79, 86.
GU Wenyan, CHEN Hongtao, YAO Qingzhen, et al. Seasonal variation and fluxes of dissolved nutrients in the lower reaches of the Huanghe[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(3): 74-79, 86.
- [131]吴念, 刘素美, 张桂玲. 黄河下游调水调沙与暴雨事件对营养盐输出通量的影响[J]. 海洋学报, 2017, 39(6): 114-128.
WU Nian, LIU Sumei, ZHANG Guiling. Impacts of water-sediment regulation and rainstorm events on nutrient transports in the lower Huanghe River[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(6): 114-128.
- [132]中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[M]. 北京: 人民出版社, 2021.
The State Council of the People's Republic of China. The outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035[M]. Beijing: People Press, 2021.
- [133]PEÑUELAS J, POULTER B, SARDANS J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2934.
- [134]DUHAMEL S, DIAZ J M, ADAMS J C, et al. Phosphorus as an integral component of global marine biogeochemistry[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(6): 359-368.

Stoichiometric imbalance in the rates of nutrient and phosphorus depletion in coastal China with implications for the ecological environment

RAN Xiang-bin¹, WEI Qin-sheng¹, YU Zhi-gang²

(1. Research Center for Marine Ecology and Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology of Ministry of Natural Resources, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, and Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Sep. 1, 2021

Key words: marginal seas; biogeochemical process; environmental change; major process; nutrient stoichiometric imbalance; phosphorus depletion

Abstract: Recently, anthropogenic nitrogen (N) and phosphorus (P) loadings in coastal seas have significantly increased, seriously impacting the environmental evolution of coastal areas, thereby gaining the widespread attention of scientists and local governments. In addition to the elevated abundances of N and P in the coastal zones, the stoichiometric imbalance of these nutrients could play an important role in stimulating environmental changes. However, the detailed influence of terrestrial N and P and their unbalanced nutrient ratios on marine ecosystems has been poorly documented. In this study, terrestrial nutrient inputs were analyzed from rivers, submarine freshwater and groundwater discharge, atmospheric deposition, water–sediment benthic flux, and water exchange to coastal seas. We reviewed the key biogeochemical processes controlling N and P transport and retention in the coastal areas, highlighted the unbalanced nutrient and P depletion, and explored the ecological influence of imbalanced N and P structures on the ecosystem. In the future, a multiapproach strategy is required to identify the contributions of different interfaces on the N and P concentrations, forms, and distributions. Additionally, a theoretical framework for reducing N and P loadings should be developed based on the land–sea coordination. Within this context, studying the response of terrestrial N and P in the coastal sea would improve the understanding of regional ecological patterns and provide a scientific foundation for marine ecological research and management. Addressing these scientific problems would offer a key basis for preventing and controlling environmental issues in coastal seas.

(本文编辑: 杨 悦)