



大气沉降驱动下的西北太平洋表层海洋铁的分布与生态效应

蔡毅华*, 李佳旭, 张楠, 马莉, 曹清, 曹知勉, 周宽波, 史大林, 陈敏

厦门大学海洋与地球学院, 海洋生物地球化学全国重点实验室, 厦门 361102

* 联系人, E-mail: yihua_cai@xmu.edu.cn

2025-11-24 收稿, 2026-01-10 修回, 2026-01-29 接受, 2026-02-10 网络版发表

国家自然科学基金重大研究计划(92258302)、国家重点研发计划(2023YFF0805001)、国家自然科学基金(42176037, 42576033)、2023年度福建省促进海洋与渔业产业高质量发展专项资金(FJHYF-TH-2023-5)和厦门大学MEL(MELRI2402)资助

摘要 铁是调控海洋初级生产与碳、氮循环的关键痕量营养盐. 本文系统阐述了大气沉降驱动下西北太平洋表层海洋溶解态铁(dFe)的分布格局、沉降通量及其生态效应. 结果表明, 该海域dFe总体具有北高南低、西高东低的空间分布格局. 基于长寿命Th同位素(^{230}Th - ^{232}Th)示踪法估算的西北太平洋大气dFe沉降通量为 $4.02\sim44.28\text{ mg}/(\text{m}^2\text{ a})$, 呈现出与dFe类似的空间分布趋势, 且实测值显著高于现有大气模型模拟结果. 大气dFe沉降通量与表层dFe浓度、叶绿素a及净初级生产力之间存在显著正相关关系, 证实了大气dFe输入对表层海洋生物地球化学过程的关键调控作用. 在西北太平洋副热带涡流区, 大气dFe沉降通量的增加缓解了固氮生物的铁限制, 通过促进固氮作用引入新氮源, 进而加剧浮游植物对磷酸盐的消耗, 促使氮限制或铁-氮共限制条件向磷限制或氮-磷共限制条件转变. 而在西北太平洋亚北极涡流区, 大气dFe沉降直接缓解了浮游植物的铁限制, 促进了浮游植物的生长, 但这一机制的细节仍需进一步的研究. 未来需整合多平台观测与模型模拟, 加强现场培养实验与同步观测数据的配套整合, 以深化对西北太平洋铁-氮-磷耦合循环及其生态系统响应与气候反馈机制的理解, 进一步阐明铁输入海洋后所引发的生态与气候效应.

关键词 西北太平洋, 溶解态铁, 大气沉降, 生物地球化学, 生态效应

铁(Fe)是海洋浮游植物生长必需的痕量金属, 广泛参与到光合色素合成、固碳/固氮作用、硝化/反硝化作用等与海洋碳、氮循环密切相关的海洋生物地球化学过程之中^[1-3]. Fe的生物可利用性因此被视为驱动地球冰期-间冰期气候旋回的关键因子, 这一假设被高营养盐低叶绿素海区的Fe施肥实验所验证, 即通过Fe施肥可促进海洋吸收大气 CO_2 , 缓解温室效应, 这一证据也支持人工Fe施肥成为潜在的地球增汇手段之一^[4-6]. 大气沉降作为开阔大洋Fe的主要来源, 其时空变异性直接决定了海洋Fe的分布格局和生物生态响应强度, 成为连接海气相互作用与全球气候系统的核心纽带,

也因此作为GEOTRACES(痕量元素及同位素海洋生物地球化学研究)等国际研究计划的核心科学问题而受到多方关注^[7].

然而, 开阔大洋表层海水中Fe的浓度极低, 通常不足 1 nmol kg^{-1} , 这对分析精度提出了极高要求; 同时, 船基采样过程中极易引入船体及周围环境的沾污, 进一步增加了准确定量海水Fe浓度的困难. 因此, 实现对海水Fe浓度的准确测定已成为深入研究海洋中Fe的生物地球化学功能及其生态效应所不可或缺的前提和首要挑战. 近年来, 痕量金属Fe的研究在国际上发展迅速, 美国、日本、荷兰等国已建立起成熟的海洋痕量元素

引用格式: 蔡毅华, 李佳旭, 张楠, 等. 大气沉降驱动下的西北太平洋表层海洋铁的分布与生态效应. 科学通报

Cai Y-H, Li J-X, Zhang N, et al. The distribution and ecological impacts of iron in the surface Northwest Pacific Ocean driven by atmospheric deposition (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-5824](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5824)

低本底洁净采样与分析技术,并积累了全球尺度的数据^[8,9]。相比之下,中国在相当长一段时间内受限于海水痕量元素洁净采样与分析能力,无法有效开展西太平洋及南海等关键海域中Fe等痕量元素的生物地球化学研究,造成相关研究远远落后于国际水平。

2017年,厦门大学海洋学科借鉴全球现有装备并结合“嘉庚号”科考船等国内新一代科考船支撑条件,采用非金属材料防污染设计及轻量模块化设计思路开发了国内首套海水大体积痕量金属采样系统(Trace Element and Isotope Clean Sampling System, TEISS),在“嘉庚号”科考船的支撑下可高效布放并采集洁净海水^[10]。该系统主要由8000 m Vectran 凯氟拉传输电缆及配套绞车,洁净采样温盐深剖面仪(CTD)、环氧树脂全包裹铝合金葵花采水架及Niskin-X采样瓶,两个20英尺洁净集装箱实验室等构成(图1)。这一痕量元素及同位素洁净采样系统经过两次海试,结果可靠并正式入列,成为“嘉庚号”科考船的又一观测利器。此后,TEISS系统于2019年成功应用于中国GEOTRACES计划副热带西北太平洋GP09断面航次调查,并于2020~2025期间进一步支撑了四次西北太平洋科学考察航次的痕量金属调查采样工作,填补了西北太平洋痕量金属数据的空白,为解析西北太平洋生物地球化学循环提供了关键技术支撑。

1 西北太平洋表层海洋铁的分布

西北太平洋是全球动力环境最活跃的海区之一,其强劲的西边界流驱动着北太平洋的大尺度环流系统^[11],并将西北太平洋划分为西北太平洋副热带涡流区(western North Pacific Subtropical Gyre, wNPStG, 10°N~34°N)和西北太平洋亚北极涡流区(western North Pacific Subarctic Gyre, wNPSaG, 41°N~65°N, 图2(a))。wNPStG海域被黑潮延伸体(Kuroshio Extension, KE)、黑潮(Kuroshio Current, KC)和北赤道流(North Equatorial Current, NEC)围绕,具有低营养盐低叶绿素(low nutrient low chlorophyll, LNLC)特性,长期稳定且强烈的水体分层阻碍了深层营养盐的向上运输,真光层上部的营养盐极度匮乏,其表层生物生产力主要受到氮(N)的限制,部分海域受铁/磷(Fe/P)共同限制^[12,13]。wNPSaG海区由KE、亲潮(Oyashio Currents, OC)围绕,与鄂霍次克海及白令海相邻,该海域具有10.0~30.0 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ 的硝酸盐含量,但其叶绿素浓度仍十分低下,为高营养盐低叶绿素海区(high nutrient low chlorophyll, HNLC),铁相对匮乏,其表层生物生产力主要受到Fe的限制^[14,15]。

wNPSaG开阔海域表层溶解铁(dissolved iron, dFe)浓度基本在0.10 nmol kg^{-1} 左右。鄂霍次克海域受到陆架沉积输入的影响,出现dFe的高值,最高为125.7 nmol kg^{-1} (图2(b))。起源于此的富Fe水团,可将陆



图1 厦门大学痕量金属洁净采样系统。(a) Niskin-X采水瓶;(b) 葵花采水架

Figure 1 Trace Element and Isotope Clean Sampling System (TEISS) of Xiamen University. (a) Niskin-X bottles; (b) rosette sampler

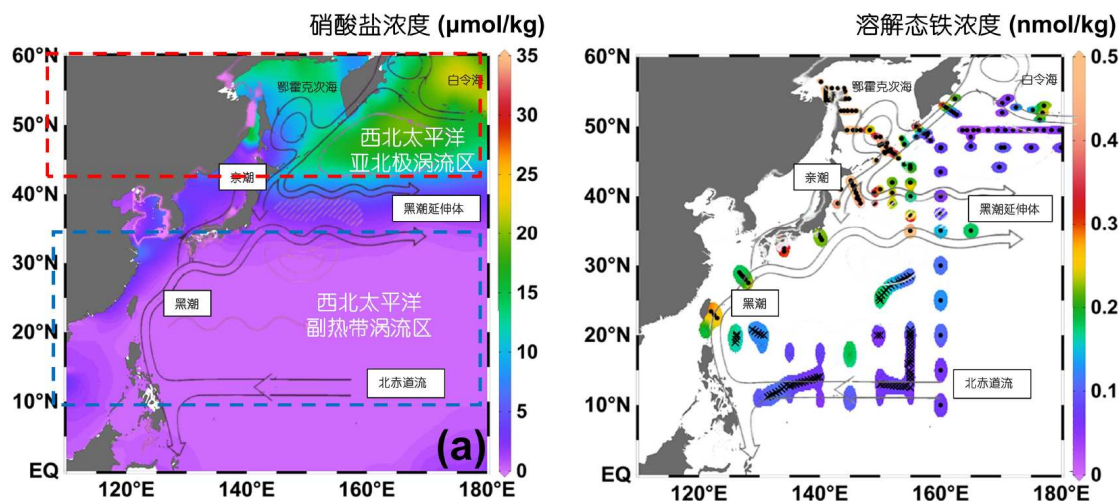


图2 西北太平洋表层硝酸盐($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)浓度分布特征(a)及dFe浓度的分布特征(b)。图(a)数据来源National Centers for Environmental Information(NCEI)的World Ocean Atlas 2023 Data卫星数据。图(b)中符号“x”为厦门大学海洋痕量元素及同位素分析中心所测定数据,符号“●”数据来源文献[9]

Figure 2 Spatial distribution patterns of (a) nitrate ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) concentration and (b) dissolved iron (dFe) concentration in the surface water of Northwest Pacific Ocean. The concentration of nitrate+nitrite in Figure (a) is from World Ocean Atlas 2023 of National Centers for Environmental Information (NCEI). “x” in Figure (b) denotes the data analyzed by the Center of analysis of marine trace elements and isotopes in the Xiamen University; “●” denotes the data from Ref. [9]

架中的Fe输运到整个NPSaG,并呈现出西高东低的分布趋势^[9]。wNPStG海域表层海洋dFe的分布基本符合开阔大洋dFe的分布特征,整体呈现北高南低、西高东低的分布趋势,空间差异显著。受黑潮延伸体以及亲潮的影响,wNPStG北侧边界附近水体呈现dFe浓度的高值,而20°N以南,dFe浓度基本低于0.10 nmol kg⁻¹;西边界受黑潮影响的吕宋海峡、中国台湾岛东部海域、东海东部边界及日本邻近海域同样具有较高的dFe浓度(范围在0.19~0.73 nmol kg⁻¹,平均值为0.42±0.23 nmol kg⁻¹ (1.S.D, n=28, 含文献[9]数据)。总体上,wNPStG开阔海区的dFe浓度范围为0.02~0.43 nmol kg⁻¹,平均值为0.09±0.07 nmol kg⁻¹ (1.S.D, n=88),与前期研究报道的NPStG表层dFe浓度平均值处于同一量级,略低于全球表层海洋dFe平均浓度(0.18±0.07 nmol kg⁻¹)和流涡区平均浓度0.19±0.07 nmol kg⁻¹ [16,17]。

海洋表层dFe的含量受到多种过程影响,包括大气沉降、陆架沉积物输入、水团运动、垂向扩散、生物利用等^[2]。在wNPSaG,经历早期成岩转化的沉积物是表层dFe的重要输入源,陆源输入较强的边缘海如鄂霍次克海和白令海输出的沉积物源Fe可被北太平洋中层水携带而影响整个西北太平洋海盆^[9]。而在wNPStG,受岛屿效应的影响和输入,在黑潮流经路径上也展现出dFe浓度的高值^[9];同时,开阔海域表层dFe

浓度普遍较低,并呈现自西向东以及自北向南逐渐降低的趋势,与大气粉尘沉降通量以及大气dFe沉降通量的空间分布一致^[18,19],反映大气沉降可能是wNPStG表层dFe浓度的主控因素。尽管在wNPStG也发现深海热液活动可释放dFe进入深海,但其对表层海洋的贡献尚不明确^[20]。Ma等人^[21]模拟了dFe在北太平洋表层的输送机制,提出在NPStG海域,洋流驱动的水平输送与大气沉降是Fe输送到透光层的主要途径,其净通量分别为9.81及5.11 Gg a⁻¹;在NPSaG,大气沉降和垂直平流则是透光层Fe的主要来源,其净通量分别为2.88及1.82 Gg a⁻¹,而水平输运(净通量为0.77 Gg a⁻¹)则是Fe输出的一个重要途径。这部分输出的去向很可能是NPStG,反映了NPSaG和NPStG之间的物质联系,但其输运细节,如输运途径、机制及准确通量与时间演化过程仍不明确。显而易见,大气沉降是北太平洋Fe的重要来源。同时,北太平洋西侧的陆架、岛屿也为Fe的水平输送提供关键的物质来源。在NPSaG,Nishioka等人^[22]报道了东库页岛流(East Sakhalin Current)向西北太平洋输运0.90~1.28 Gg a⁻¹的Fe。而通过高密陆架水携带的颗粒态和溶解态Fe输出通量可能远高于此^[9,23],但其准确通量尚无测算。在NPStG西边界上的岛屿和陆架沉积物输出的Fe通量也同样没有准确数据。

2 西北太平洋铁的大气沉降特征

大气沉降具有巨大的时空变异性,受撒哈拉粉尘、东亚粉尘以及西亚粉尘影响,北大西洋、西北太平洋及北印度洋具有远高于全球海洋平均水平的大气Fe沉降通量^[24,25]. 由于缺乏大气dFe沉降通量的直接观测数据,目前在西北太平洋的相关研究试图采用大气沉降模型来评估其对海洋生物地球化学与生态系统的影响^[26,27]. 但是,大气沉降模型十分依赖直接观测数据进行校验,而西北太平洋大气dFe沉降通量的直接观测数据十分稀疏,放大了大气沉降模型的不确定性^[28-30]. 近年来,随着GEOTRACES(海洋痕量金属及其同位素生物地球化学)国际计划的开展,痕量元素及同位素海洋地球化学研究不断深入,促进了各类海洋学过程的地球化学示踪研究,其中就包括应用长寿命Th同位素(^{230}Th - ^{232}Th)来示踪开阔大洋的大气dFe沉降通量^[31,32]. 在水柱中,基于 ^{232}Th 和 ^{230}Th 的异源性(^{232}Th 通过大气沉降进入开阔大洋,而 ^{230}Th 主要由水柱中的母体 ^{234}U 以恒定速率原位衰变生产)及相同的颗粒活性与停留时间(图3(a)),可通过水柱中 ^{230}Th 的贮量与生产速率来准确计算Th的停留时间(图3(b)),进而结合水柱中 ^{232}Th 的储量计算出大气 ^{232}Th 的沉降通量,再通过气溶胶中 ^{232}Th 、Fe的含量和溶解度估算出大气dFe沉降通量(图3(c, d))^[19,32]. 开阔大洋表层水柱中Th的停留时间接近1年,十分适用于年际乃至季节尺度上大气dFe沉降通量的观测^[32,33],结合调查海区的高分辨率采水可较大程度提升大气dFe沉降通量直接观测的时空分辨率.

长寿命Th同位素示踪法在时空分辨率上的优点使其成为开阔大洋大气dFe沉降通量研究的重要观测手段^[19,31-35].

海洋沉积物中长寿命Th同位素已广泛应用于海洋粉尘沉降通量的估算^[36-38]. Kienast等人^[36]基于沉积物 ^{230}Th - ^{232}Th 生成了全球大气粉尘沉降分布图,其空间格局和通量数值与全球大气沉降模型非常相似,支持沉积物中 ^{230}Th - ^{232}Th 作为粉尘沉降通量代用指标的应用. 在西北太平洋的4个站位, Hayes等人^[32]和 Serno等人^[39]分别利用海水和沉积物 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法获得大气dFe沉降通量,两者十分一致(图4(b)),进一步证明海洋沉积物 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法所估算的大气dFe沉降通量具有较好的准确性和可信度. 因此,本研究将整合西太平洋海水及沉积物 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法得到的大气dFe沉降通量数据以扩大观测数据的空间覆盖率(图4(a)).

总体上,基于海水和沉积物 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法获得的西北太平洋大气dFe沉降通量与船基气溶胶直接观测值较为接近,但明显高于大气沉降模型输出的通量^[19,28,29,32,39-43](图4(c)). 与 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法通常获得年际尺度的大气沉降通量不同,气溶胶直接观测得到的是采样瞬时的沉降数据,两者观测时间尺度的不同可能是造成所获得大气沉降通量略有差异的主要原因;此外,西北太平洋气溶胶直接观测的空间覆盖率较低,造成样品代表性不足也可能进一步加大两者的差异. 与 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法及气溶胶直接观测相比,大气沉降模型产生的大气dFe沉降通量处于一个较低的范围

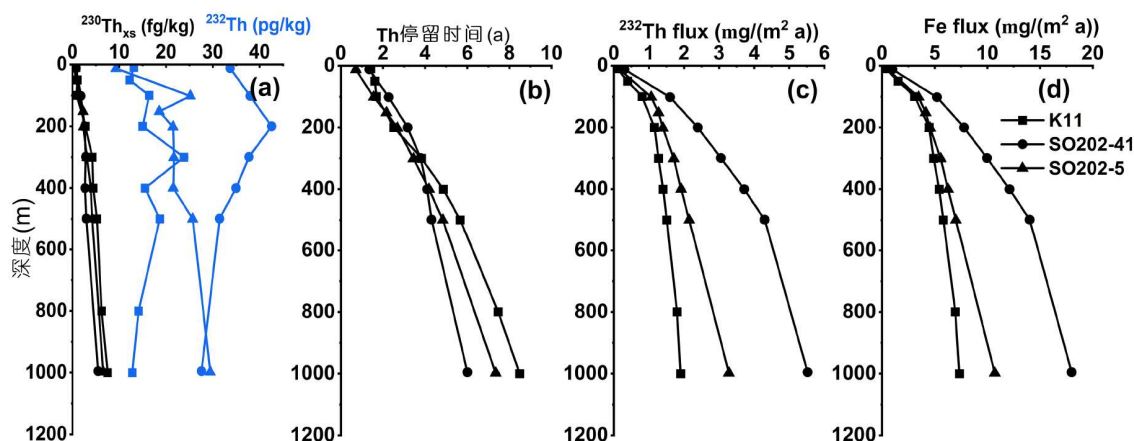


图3 基于海水长寿命Th同位素含量计算大气dFe沉降通量(K11、SO202-41和SO202-5坐标如图4橙色圆圈所示). (a) 海水中 ^{230}Th 和 ^{232}Th 的剖面图; (b) 海水中Th的停留时间; (c) 大气 ^{232}Th 的沉降通量; (d) 大气dFe的沉降通量. 数据来自文献^[19,32]

Figure 3 Estimation of atmospheric dissolved iron (dFe) deposition flux based on long-lived thorium (Th) isotope concentrations in seawater (The stations K11, SO202-41 and SO202-5 are shown in the orange circles in Figure 4(a)). (a) Profiles of ^{230}Th and ^{232}Th in seawater; (b) residence time of Th in seawater; (c) atmospheric deposition flux of ^{232}Th ; (d) atmospheric deposition flux of dissolved Fe. Data is from Refs. ^[19,32]

(图4(c)). 大气沉降模拟十分依赖气溶胶直接观测数据的校验, 但西北太平洋气溶胶直接观测数据稀疏, 造成大气沉降模型的不确定性提升, 分布格局粗糙, 极值被平滑. 另一方面, 气溶胶直接观测中Fe的溶解度是影响dFe沉降通量测算的一个重要因素, 目前模型计算多采用纯水中的溶解度, 而忽略海水有机配体对Fe的络合作用^[44], 同时气溶胶观测历史数据中人为源气溶胶占比较低, 随着人类活动的加剧, 人为源气溶胶输入增加, 且人为源气溶胶中Fe的溶解度较岩源矿物高一个数量级^[30]. 这些因素都造成大气沉降模型数据被低估. Pavia等人^[35]在南太平洋副热带流涡区内的研究也证实大气沉降模型由于缺乏观测数据的约束会将大气dFe沉降通量低估1~2个数量级. 这一现象同样出现在西北太平洋, ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法观测的dFe通量和大气沉降模型值虽表现出显著的相关性, 但其回归斜率远高于1(图4(d)), 表明大气沉降模型对dFe大气沉降通量的低估. 相比于气溶胶观测和模型模拟, ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法更多的是年际乃至季节尺度上大气沉降通量的观测, 其测算的大气dFe沉降通量可在较为统一的时间尺度上进行比较并展示出精细的空间变化, 在大西洋、西北太平洋上都可清晰捕捉到粉尘的输入信号及其空间变化特征, 因此具有良好的应用推广前景^[19,33,34].

基于 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法估算的西北太平洋大气dFe沉降通量为 $4.02\sim 44.28\text{ mg}/(\text{m}^2\text{a})$, 整体呈现出西高东低、北高南低的空间分布趋势, 在 40°N 附近出现极大值^[19,32,39](图4(a)). 这一空间变化趋势整体上与大气沉降模型吻合, 梯度变化明显. 与其他海域基于 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法估算的大气dFe沉降通量相比, 西北太平洋在全球海洋中处于中间水平, 高于南太平洋、赤道太平洋及ALOHA站, 低于南大洋的Kerguelen Plateau, 同时也高于分别利用Al示踪法和气溶胶直接观测得到的南印度洋和北冰洋的大气dFe沉降通量^[33~35,45~49](表1). 将西北太平洋分为低纬($10^\circ\text{N}\sim 34^\circ\text{N}$, wNPStG)、中纬($34^\circ\text{N}\sim 41^\circ\text{N}$)及高纬($41^\circ\text{N}\sim 60^\circ\text{N}$, wNPSaG)三个区域, 它们的大气dFe沉降通量分别为 9.95 ± 2.62 、 13.11 ± 4.68 和 $9.68\pm 4.31\text{ mg}/(\text{m}^2\text{a})$. 由于低纬北部的个别数据点在采样时疑似受到局地输入或湿沉降的贡献, 导致观测到高达 $44.28\text{ mg}/(\text{m}^2\text{a})$ 的大气dFe沉降通量. 如不考虑该数据点, 低纬海区的大气dFe沉降通量进一步校正为 $7.49\pm 2.62\text{ mg}/(\text{m}^2\text{a})$, 低于中、高纬海区, 符合大气沉降模型的空间变化趋势. 结合每个区域的面积及大气dFe沉降通量平均值, 可估算得到西北太平洋低纬、中纬

及高纬海区接受到大气dFe的沉降量分别为 0.15 ± 0.04 、 0.032 ± 0.012 及 $0.033\pm 0.015\text{ Tg a}^{-1}$, 相比中、高纬度海区, 低纬海区由于其广大的面积而接收更多的大气dFe沉降. 总体上, 通过大气沉降输送到整个西北太平洋的dFe通量为 $0.21\pm 0.04\text{ Tg a}^{-1}$, 是大气沉降模型模拟值($0.0065\pm 0.0038\text{ Tg a}^{-1}$)的30倍之高^[29], 甚至是基于大气沉降模型得到的整个北太平洋大气dFe沉降通量的20倍^[21], 再次说明大气沉降模型可能会过分低估西北太平洋的大气dFe沉降通量. 同时, 西北太平洋大气dFe沉降通量也是全球海底热液输入Fe通量(0.05 Tg a^{-1})^[50]的4.2倍, 反映了大气沉降对于西北太平洋Fe循环的重要性. 目前研究已表明西北太平洋大气dFe沉降与表层海水Fe浓度、固氮速率及生物生产力都有着空间上的一致性, 并调控着生物生产力限制因子的时空转换^[12,19,51]. 然而, 西北太平洋的大气dFe沉降通量研究数据零散、不确定度大, 阻碍了对大气dFe沉降的生物地球化学效应的研究. 未来建议利用长寿命Th同位素示踪法获取准确的大气dFe沉降通量, 加大观测的时空覆盖率, 揭示西北太平洋大气dFe沉降通量的时空分布精细特征, 为评估西北太平洋海区的碳氮铁循环及营养盐限制条件对大气Fe沉降的响应提供关键数据支撑.

3 西北太平洋固氮作用及初级生产力的限制因子

海洋浮游植物的生长通常受到一种或多种营养盐可利用性的限制. 受营养盐供应的调控, 这种限制呈现出明显的区域差异. 西北太平洋的营养盐限制因子由高纬向低纬呈现出由Fe限制向N限制及N-Fe共限制转换的空间格局(图5(a)). wNPSaG是典型的HNLC海区^[22], 早期开展的营养盐添加实验证实, Fe的生物可利用性调控着该海区浮游植物生长^[57,58]. Fe限制直接影响浮游植物对N、P等营养元素的吸收与代谢效率, 并抑制其光合作用能力, 从而解释了在高营养盐背景下仍出现低叶绿素浓度的现象^[59]. 然而, 早期培养实验过程中人工添加的dFe会迅速转化为颗粒Fe, 降低了Fe的生物可利用性, 进而低估了Fe对浮游植物生长的促进作用^[60]. wNPStG是典型的寡营养海域, 其表层水体中营养盐浓度常年处于极低水平^[61]. 营养盐添加实验结果表明, 该区域浮游植物生长主要受到N限制, 而Fe和P则作为次级限制性营养盐, 也共同调节初级生产过程^[12,13]. 在北赤道流影响的海域, 大气dFe沉降通量较低, 导致表层水体中铁氮比(Fe:N)偏低, 从而形成了N-

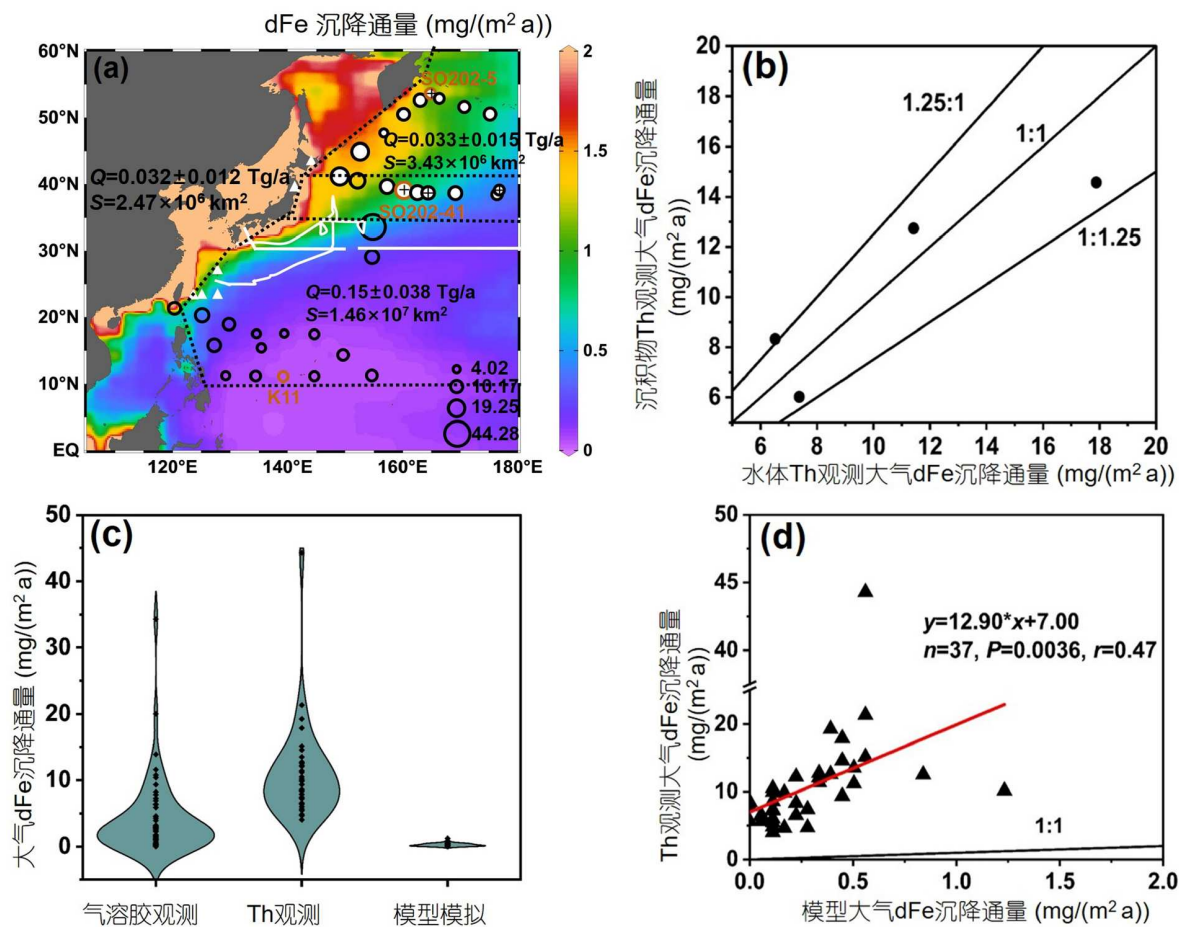


图 4 西北太平洋大气dFe沉降通量的空间分布(a), 水体和沉积物Th观测大气dFe沉降通量(b), 气溶胶观测、Th观测和模型模拟得到的大气dFe沉降通量的对比(c), 以及模型和Th观测得到的大气dFe沉降通量的对比(d). (a) 空心圆和实心圆分别表示基于水体或沉积物样品得到大气dFe沉降通量的站, “+”号表示同时基于水体和沉积物样品获得大气dFe沉降通量的站, 白色线或三角形代表气溶胶采样路线图或站, 黑色虚线将西北太平洋按纬度分为低纬、中纬及高纬三个区域, 底图的大气dFe沉降通量数据来源于文献[29]. (b) 沉积物大气dFe沉降通量是基于 ^{230}Th - ^{232}Th 示踪法计算的粉尘通量与地壳中Fe的含量(3.5%)及Fe的溶解度(20%)之积计算. (c) 气溶胶中dFe沉降通量是基于气溶胶中总Fe沉降通量和气溶胶中Fe溶解度(4%)之积计算. 水体Th观测大气dFe沉降通量的数据来源于文献[19,32]. 沉积物Th观测大气dFe沉降通量的数据来源于文献[39]. 气溶胶观测数据来源于文献[28,40–43]

Figure 4 Spatial distribution of atmospheric deposition flux of dissolved iron (dFe) in the northwest Pacific Ocean (a), atmospheric dFe deposition flux derived from Th observation in seawater and sediments (b), a comparison of atmospheric dFe deposition fluxes derived from aerosol observation, Th observation, and model simulations (c), and a comparison of atmospheric dFe deposition fluxes derived from model simulations and Th observation (d). In (a), open circle and solid circle denote the stations with atmospheric dFe deposition flux derived from Th observation in seawater and sediments, respectively; “+” denotes the stations with observation of both seawater and sediments; white line and triangle denotes the aerosol sampling tracks or stations; black dash lines separate the northwest Pacific Ocean into high latitude, mid-latitude, and low latitude areas; the model-derived atmospheric dFe deposition flux [29] is also shown as background. In (b), atmospheric dFe deposition flux derived from the Th observation in sediments is estimated by the dust deposition flux and the Fe content (3.5%) and solubility (20%) in the continental crust. In (c), atmospheric dFe deposition flux derived from the aerosol observation is estimated by multiply the aerosol Fe deposition flux by the aerosol Fe solubility (4%). The Th observation derived atmospheric dFe deposition flux is from Refs. [19,32] for seawater samples and from Ref. [39] for sediment samples. The aerosol observation data is from Refs. [28,40–43]

Fe共同限制浮游植物生长的特有现象^[12]. 这种共限制机制在东北太平洋副热带环流区也有发现^[53]. 相比之下, 在地中海东部和北大西洋副热带环流等区域, 大气dFe沉降供应显著, 而P供应有限, P的生物可利用性可能会下降到使其成为与N共同或序列限制的水平^[54,62].

固氮作用是海洋中新氮的主要来源. 鉴于N是wNPStG浮游植物生长的主要限制性营养元素, 因此固氮作用对于wNPStG的初级生产力具有关键的调控作用. 以往的观测与模型研究表明, 西北太平洋海域的固氮速率存在显著的空间异质性^[27,51]. 具体而言, 20°N

表 1 大气粉尘沉降通量及dFe沉降通量的比较

Table 1 A comparison of the atmospheric deposition flux and dFe flux

研究区域	方法	粉尘沉降通量(g/(m ² a))	dFe沉降通量(mg/(m ² a))	参考文献
南太平洋		0.04~0.12	0.20~6.40	[35]
ALOHA			2.24~5.04	[45]
赤道太平洋		0.50~0.60	4~5	[46]
西北太平洋	²³⁰ Th- ²³² Th示踪法	0.58~3.13	4.02~44.28	本研究
北大西洋		0.4~19.2		[33]
南大西洋		0.2~0.7		[33]
西南大西洋		0.41~2.64		[34]
南大洋Kerguelen Plateau		2.56~295.65	85.62~138.99	[47]
南印度洋	Al示踪法	0.060~0.69	0.095~1.12	[48]
北冰洋	气溶胶直接观测		0.0026~0.009	[49]

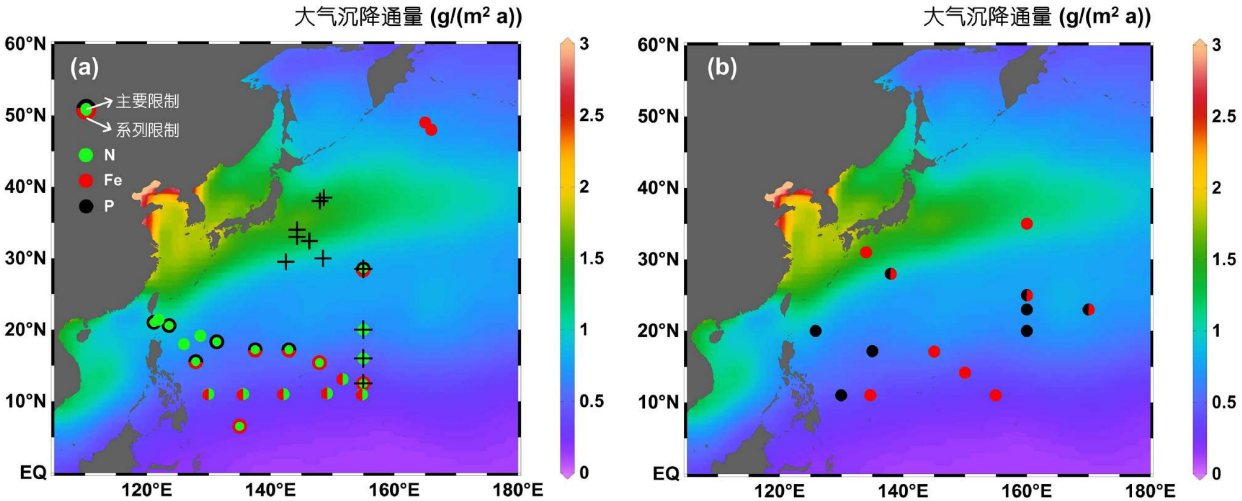


图 5 西北太平洋(a)浮游植物生长及(b)固氮作用的营养盐限制因子。“+”表示浮游植物生长对气溶胶添加实验有显著响应的站点。两图中的背景是由模型导出的粉尘沉降通量^[52]。营养盐添加实验和气溶胶添加实验数据来自文献^[13,53~56]

Figure 5 Nutrient limiting factors for (a) phytoplankton growth and (b) nitrogen fixation in the Northwest Pacific Ocean. “+” denotes the stations with significant response of phytoplankton growth to the aerosol addition experiments. The background in the two figures is the model-derived dust deposition flux^[52]. The data of nutrient addition experiments and aerosol addition experiments are obtained from Refs. ^[13,53~56]

~25°N之间的海域为固氮热点海区，固氮速率较高，可达约10 nmol N/(L d)；而在该纬度带以北和以南的区域，固氮速率迅速降低至接近于0 nmol N/(L d)，显示出明显的纬度梯度分布特征。Fe是固氮酶的关键辅酶因子，因此固氮生物对其具有较高的需求^[63]。同时P浓度过低也会抑制细胞生长，从而限制生物固氮^[64]。营养盐添加实验进一步揭示，西北太平洋生物固氮主要受Fe和P的限制^[51,65](图5(b))。该营养盐限制条件的空间格局与表层dFe及大气Fe沉降通量的空间分布十分类似

(图2(b), 4(a))，即具有高表层dFe浓度及大气dFe沉降通量的太平洋北侧与西侧海区出现P限制，而东侧与南侧海区等低大气dFe沉降通量及表层dFe浓度则以Fe限制为主，说明大气dFe沉降不仅调控固氮速率的高低，还可控制固氮作用限制因子的转换。Fe:N被证实是调控固氮作用的关键因子，在Fe: N较低条件下，固氮过程主要受Fe可利用性的限制；而在Fe:N较高时，则转为受P限制；当Fe:N处于某一阈值附近时，固氮生物可能受到Fe-P的共同限制^[51]。一般认为，固氮作用的Fe-P共

限制难以存在, 因为限制性因子会从Fe限制快速转化为P限制^[51]. 但是, 在一些高Fe供应的海区, 如南海东北部和北大西洋, 只有在同时添加Fe和P的条件下固氮速率才会显著增加, 这被认为是非固氮浮游植物的存在扩大了Fe-P共限制的范围边界^[51,66,67]. 另一方面, P的可利用性决定了固氮速率的上限, 即使在Fe供应充足的情况下, P的缺乏仍会显著抑制生物固氮^[51].

大气沉降是西北太平洋表层海洋中Fe等痕量元素的重要外部来源, 对该海域初级生产过程和生物固氮作用具有关键的调控功能^[68]. 基于长期观测数据, Meng等人^[69]发现春季大气粉尘输入可显著促进西北太平洋浮游植物生物量的增长, 并进一步诱发大范围的生态系统响应. 在N限制较为突出的北太平洋海域, 粉尘沉降不仅直接输入含N营养盐促进浮游植物生长, 更重要的是释放Fe元素, 缓解Fe对固氮作用的限制, 从而推动浮游植物生长从N限制转向P限制状态^[70]. 西北太平洋的气溶胶添加实验进一步证实, 粉尘与人为气溶胶均能显著提升wNPStG表层的叶绿素a浓度(图5(a)), 表明这两类气溶胶均可作为浮游植物提供生物可利用性营养盐, 缓解该海域普遍存在的N和Fe限制^[13,55,56]. 尽管目前尚缺乏直接的气溶胶刺激生物固氮的实验证据, 但副热带海区固氮作用的东西向地理分异与大气粉尘沉降通量的变化趋势一致, 间接支持大气沉降对生物固氮的促进作用^[26]. 类似地, 在北大西洋的研究也揭示了撒哈拉沙漠粉尘沉降对浮游植物生长和固氮的刺激效应^[66]. 此外, Wang等人^[19]在低纬度西北太平洋的研究表明, 大气粉尘及Fe沉降通量与海洋表层dFe的浓度、初级生产力及生物固氮的空间变化趋势高度一致, 进一步证实大气Fe输入对该海域初级生产和生物固氮过程具有重要调控作用. 尽管当前关于西北太平洋大气沉降对海洋初级生产和生物固氮的调控机制研究仍相对有限, 但现有证据已初步揭示其在海洋生物地球化学循环中的关键地位, 未来研究需进一步量化其生态效应并揭示相关过程机制.

4 大气铁沉降的生态效应

NPStG是全球最大的寡营养海洋生态系统连续体^[61]. 现场调查表明亚洲粉尘的沉降是北太平洋中部ALOHA站表层Fe的主要来源, 并调控着其营养盐限制条件的转换^[16,71], 这印证了甲板添加培养实验的结果^[12,13]. 作为NPStG的重要组成, wNPStG的初级生产和生物地球化学同样受到大气dFe输入的重大影响. 利

用长寿命Th同位素示踪法得到的西北太平洋大气dFe沉降通量(图4(a))与表层dFe浓度(图2(a))之间呈现显著正相关关系^[19](图6(a)). 这一实测数据揭示了表层水中dFe浓度受控于大气沉降输入的机制, 也从机制上解释了在北大西洋等其他开阔大洋及地中海等边缘海广泛报道的大气沉降模型数据与表层dFe浓度分布之间存在的一致性^[24,72,73].

大部分LNLC海区的初级生产受到N限制, 大气沉降对海洋表层Fe的补充将可能促进生物固氮作用, 缓解N限制水平, 同时消耗P, 导致生物生产力的限制性营养盐从N向P转变^[70]. 这一现象也在wNPStG再次复现. 在大气dFe沉降较低的海区, 固氮作用及浮游植物的生长分别主要受Fe限制和N-Fe共限制^[12,51]. 随着大气dFe沉降通量自东向西及自南向北逐渐增加(图4(a)), 此时同步观测到浮游植物生长从N限制或N-Fe共限制向N-P顺序限制转变(图5(a)), 固氮作用也一样从Fe限制向P限制转变(图5(b)). 同时, 大气dFe沉降通量也观测到与采样期间的叶绿素浓度以及净初级生产力(NPP)存在良好的正相关关系(图6(b, c)), 这定量说明当粉尘携带的Fe输入海洋后, 直接缓解了固氮生物的Fe限制, 增强其固氮酶活性, 从而刺激固氮速率, 引入的N刺激了海区浮游植物的生长, 进一步提升了NPP. 较高的大气dFe输入通过促进固氮作用缓解N限制, 同时消耗P, 导致营养盐限制条件从N限制向P限制转变, 进而影响生态系统结构及功能. 尽管存在陆架沉积物的贡献, 在wNPSaG及中纬度海区也同样观测到大气dFe沉降通量与NPP或Chl. a的显著正相关(图6(b, c)). 该海区的沉积物贡献与大气沉降存在类似的空间分布^[9], 因此该相关性可能是二者共同作用的结果, 后续需要在准确定量沉积物源Fe输入通量与大气dFe沉降通量的基础上进一步精准界定二者的生态效应与反馈机制.

基于大气粉尘沉降模型, Wen等人^[51]发现wNPStG低纬度海区Fe的大气沉降决定了营养盐匮乏层中Fe:N供应比例的空间变化, 进而调控了固氮作用的空间变化. Browning等人^[74]在南太平洋的甲板培养实验也证明Fe:N浓度比例调控着副热带涡流区生物生产力的营养盐限制条件. 在西北太平洋同样观察到了Fe:N的空间变异性. 由于低纬度西北太平洋Fe浓度主要受控于Fe的沉降通量, 在N并未呈现明显空间差异的背景下, 随着大气dFe沉降通量的增加, Fe:N逐渐增加; 而中高纬海区, Fe的沉降通量和N浓度均随纬度逐渐升高, 加

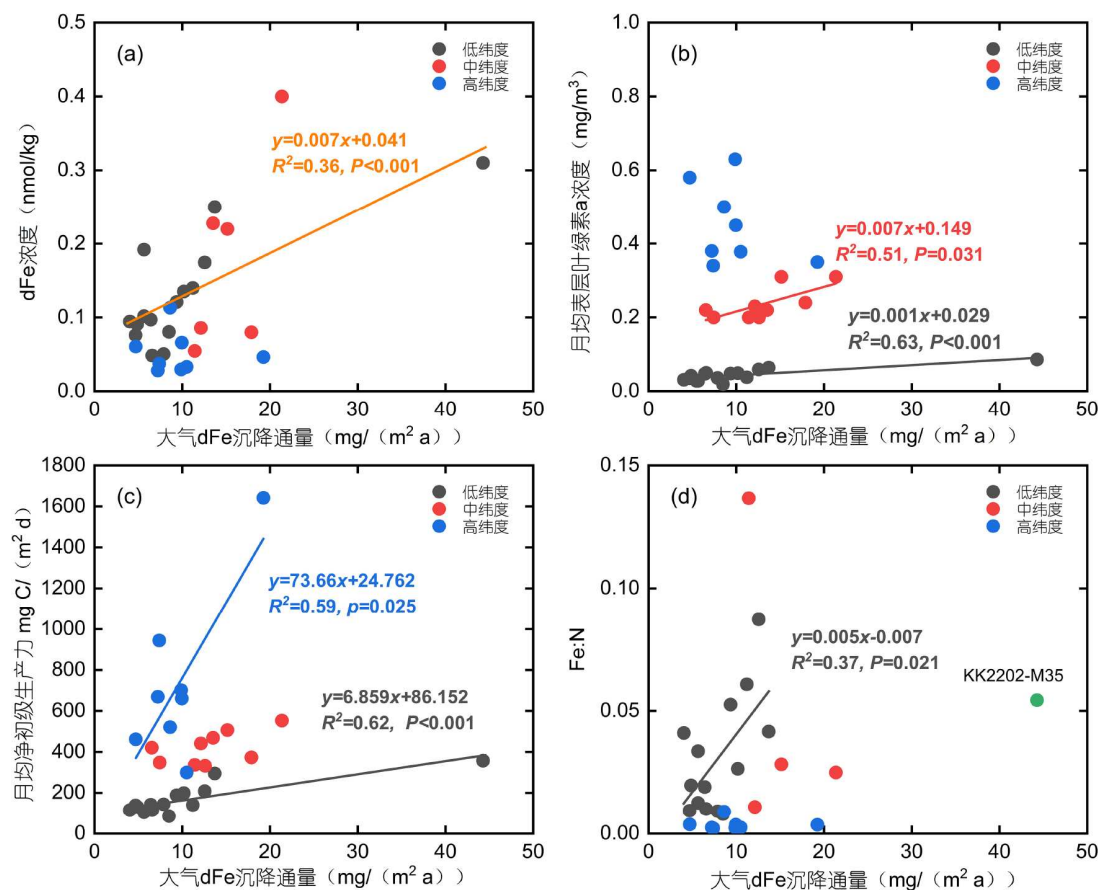


图6 西北太平洋铁沉降通量与表层dFe浓度(a)、月均表层叶绿素a浓度(b)、月均净初级生产力(c), 以及Fe:N(d)的相关性。黑色、红色、蓝色分别代表低、中、高纬度站点。(a)中黄色的拟合线基于所有站点数据。低、中、高纬度铁沉降数据部分来源于文献[19,32]; (a)中dFe数据部分来源于文献[19]; (b)中卫星Chl. a数据来源于<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>; (c)中NPP数据来源于<https://orca.science.oregonstate.edu/index.php>; (d)中Fe:N数据来源于文献[19,32]。各采样点卫星Chl. a数据及NPP数据为采样期间的月平均值

Figure 6 Correlations between atmospheric dFe deposition flux and (a) surface dFe concentration, (b) monthly mean surface chlorophyll *a* concentration, (c) monthly mean net primary productivity, or (d) Fe:N ratio during the sampling period in the Northwest Pacific Ocean. Black, red, and blue denote the low latitude, mid-latitude, and high latitude stations, respectively. The correlation line in (a) is based on the whole dataset. Part of atmospheric dFe deposition flux for low, middle, and high latitudes is collected from Refs. [19,32]; part of dFe data in (a) is from Ref. [19]. The chlorophyll *a* concentration in (b) is from <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>; NPP in (c) is from and <https://orca.science.oregonstate.edu/index.php>; Fe:N ratio in (d) is from Refs. [19,32]. The chlorophyll *a* concentration data and NPP data of each sampling station are the monthly average values during the sampling period

上陆架的输送, Fe:N通常处在一个较低水平上, 并未随着Fe的沉降通量显著增加(图6(d))。Fe:N的变化与前述基于叶绿素与生物生产力的变化特征十分一致, 再次支持wNPSaG大气沉降控制生物生产力从N限制及N-Fe共限制向N-P共限制转变的机制以及wNPSaG仍然存在Fe限制的可能性。

现场的培养实验和生物地球化学观测为上述两种模式提供了直接证据。在低纬度海区, 现场培养实验表明, 添加纳摩尔级别的Fe即可刺激固氮作用^[51], 同时, 该海区P浓度通常维持在 $\sim 0.1 \mu\text{mol L}^{-1}$ 或更低的水平^[75,76], Fe:N控制着固氮作用的水平以及Fe限制与P限

制之间的转换^[50](图4(b)); 同时浮游植物生长也在低大气沉降条件下的N-Fe共限制与较高大气沉降条件下的N-P共限制之间转换^[12,13](图4(a))。相反, 在中纬度海区, 现场培养实验证实虽然添加Fe能迅速刺激硅藻等浮游植物的生长, 并快速消耗水体中的P^[57], 但这可能导致严重的P限制。中纬度海区表层水的N:P比值远低于Redfield比值, 且碱性磷酸酶活性显著升高^[13], 这些都是P胁迫的典型信号。目前关于西北太平洋浮游植物生长及固氮作用限制因子的研究多集中在中低纬度海区, 而高纬度海区的现场培养试验数据仍较为缺乏, 且鲜有与现场观测结果进行交叉验证的报道。未来需进一

步关注高纬度海区限制因子的空间变化机制, 尤其应量化高纬度海区通过陆架输入和水体交换所输送的Fe通量. 通过加强现场培养实验与同步观测数据的配套整合, 有望深入揭示西北太平洋浮游植物生长及固碳固氮作用的限制机制, 同时进一步阐明Fe输入海洋后所引发的生态效应.

5 结论与展望

西北太平洋是全球物质循环与气候响应的关键海区, 通过研究其表层海水中铁的分布格局、源汇过程与生态效应, 可深刻揭示大气沉降-海洋生物地球化学循环-生态系统响应之间的耦合机制. 铁作为限制海洋初级生产与固氮作用的关键痕量营养盐, 其大气沉降通量的时空变异是理解海气相互作用与海洋碳氮循环的核心环节. 早期受限于洁净采样与分析技术, 我国在西太平洋的痕量金属研究长期滞后, 无法获取高精度数据以支撑机制解析. 随着厦门大学研发的国内首套痕量金属洁净采样系统在“嘉庚号”科考船上的应用, 尤其是中国GEOTRACES航次的实施, 我国已逐步填补了西太平洋铁循环观测的空白, 实现了从“能力缺失”到“系统观测”的跨越. 当前研究已明确揭示大气沉降是西北太平洋表层dFe的主要来源, 其通量呈现“西高东低、北高南低”的空间异质性, 直接控制了dFe的分布格局. 在中高纬HNLC海区, 铁是初级生产力的主要限制因子; 而在低纬度LNLC海域, Fe与N、P构成复杂的共限制或顺序限制体系. 其中, 大气铁沉降通过调节元素计量比(如Fe:N)驱动了营养盐限制类型的转化.

然而, 目前有关西北太平洋大气铁沉降通量的直接观测数据仍然匮乏, 导致现有大气沉降模型因缺乏现场数据的校验而存在较大不确定性, 难以准确刻画其时空动态. 未来通过长寿命Th同位素示踪技术的应用, 可获取西北太平洋大气铁沉降通量的准确数据, 增加数据的空间覆盖率与分辨率, 从而为校验大气沉降模型, 获取该区域高精度与高时空分辨率的大气铁沉降通量提供关键技术支撑. 此外, 关于西北太平洋痕量金属铁的分布、源汇过程、调控因子及生态效应的研究也才起步, 现有研究多基于零散航次观测, 数据的时空覆盖度不足, 限制了西北太平洋这一关键海区生态系统响应机制的集成分析与长期演变规律的解读, 对Fe-N-P等多元素耦合机制及复合限制的生态响应过程理解尚浅. 建议国内相关团队后续结合GEOTRACES计划、BioGeoScape计划、SOLAS等大型国际研究计划, 开展卫星观测、船基观测、生物培养实验, 构建高分辨率、高精度数据集, 深入探究西北太平洋痕量金属生物地球化学与生态系统响应及气候变迁的耦合机制. 另外, 未来需重点拓展边缘海-大洋交互带, 深海沟及海山系统以及大气沉降关键输运通道的研究, 厘清西北太平洋痕量金属的源汇过程; 深入开展固氮速率与生物生产力的Fe-N-P共限制机制、铁形态与生物可利用性及气候反馈机制的研究; 同时着力开展国际合作, 牵头或深度参与大型国际联合科考计划, 建设高水平的船基及空天基观测平台与采样分析技术平台, 开展高质量的海洋痕量元素及其同位素生物地球化学研究, 旨在成为全球海洋科学网络中的关键枢纽, 贡献中国智慧, 共享发展成果.

致谢 感谢厦门大学海洋与地球学院同位素海洋化学实验室郑敏芳、陈梦雅, 厦门大学海洋生物地球化学全国重点实验室黄勇明、陈耀瑾、杨俊波, 以及厦门大学“嘉庚号”科考船在样品采集及分析上的帮助.

参考文献

- 1 Morel F M M, Price N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science*, 2003, 300: 944–947
- 2 Tagliabue A, Bowie A R, Boyd P W, et al. The integral role of iron in ocean biogeochemistry. *Nature*, 2017, 543: 51–59
- 3 Li S, Liu L, Suo Y, et al. Carbon Tectonics: a new paradigm for Earth system science (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 309–338 [李三忠, 刘丽军, 索艳慧, 等. 碳构造: 一个地球系统科学新范式. 科学通报, 2023, 68: 309–338]
- 4 Martin J H. Glacial-interglacial CO₂ change: the Iron Hypothesis. *Paleoceanography*, 1990, 5: 1–13
- 5 Loveley M R, Marcantonio F, Wisler M M, et al. Millennial-scale iron fertilization of the eastern equatorial Pacific over the past 100,000 years. *Nat Geosci*, 2017, 10: 760–764
- 6 Jiang H B, Hutchins D A, Zhang H R, et al. Complexities of regulating climate by promoting marine primary production with ocean iron fertilization. *Earth-Sci Rev*, 2024, 249: 104675

- 7 Anderson R, Mawji E, Cutter G, et al. GEOTRACES: changing the way we explore ocean chemistry. *Oceanography*, 2014, 27: 50–61
- 8 Achterberg E P, Steigenberger S, Marsay C M, et al. Iron biogeochemistry in the high latitude North Atlantic Ocean. *Sci Rep*, 2018, 8: 1283
- 9 Nishioka J, Obata H, Ogawa H, et al. Subpolar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 12665–12673
- 10 Huang Y M, Zhou K B, Chen Y J, et al. Advances and prospect of sampling techniques and analytical methods for trace elements in the ocean: progress of trace element platform construction in Xiamen University (in Chinese). *Environ Sci*, 2022, 43: 4858–4868 [黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 等. 海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展. *环境科学*, 2022, 43: 4858–4868]
- 11 Qiu B. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. San Diego: Academic Press, 2001. 1413–1425
- 12 Browning T J, Liu X, Zhang R, et al. Nutrient co-limitation in the subtropical Northwest Pacific. *Limnol Oceanogr Lett*, 2022, 7: 52–61
- 13 Yuan Z, Browning T J, Zhang R, et al. Potential drivers and consequences of regional phosphate depletion in the western subtropical North Pacific. *Limnol Oceanogr Lett*, 2023, 8: 509–518
- 14 Martin J H, Fitzwater S E. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic. *Nature*, 1988, 331: 341–343
- 15 Nishioka J, Obata H. Dissolved iron distribution in the western and central subarctic Pacific: HNLC water formation and biogeochemical processes. *Limnol Oceanogr*, 2017, 62: 2004–2022
- 16 Fitzsimmons J N, Hayes C T, Al-Subiai S N, et al. Daily to decadal variability of size-fractionated iron and iron-binding ligands at the Hawaii Ocean Time-series Station ALOHA. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 171: 303–324
- 17 Huang Y, Tagliabue A, Cassar N. Data-driven modeling of dissolved iron in the global ocean. *Front Mar Sci*, 2022, 9: 837183
- 18 Tan S C, Yao X, Gao H W, et al. Variability in the correlation between Asian dust storms and chlorophyll a concentration from the north to equatorial Pacific. *PLoS One*, 2013, 8: e57656
- 19 Wang X, Zhang X, Yang W, et al. Dust deposition and iron cycling in the tropical western North Pacific based on thorium supply. *Glob Planet Change*, 2025, 247: 104740
- 20 Li Y, Bo G, Cai Y, et al. Removal of dissolved arsenic from deep seawater around hydrothermal vents and seamounts. *Earth Planet Sci Lett*, 2025, 660: 119351
- 21 Ma W, Zhao Z, Wang T, et al. Contrasting supply dynamics of dissolved iron and nitrate shape the biogeography of nutrient-limiting conditions in the north Pacific. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL111335
- 22 Nishioka J, Obata H, Hirawake T, et al. A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production. *J Oceanogr*, 2021, 77: 561–587
- 23 Lam P J, Bishop J K B. The continental margin is a key source of iron to the HNLC North Pacific Ocean. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L07608
- 24 Mahowald N M, Engelstaedter S, Luo C, et al. Atmospheric iron deposition: global distribution, variability, and human perturbations. *Annu Rev Mar Sci*, 2009, 1: 245–278
- 25 Zan J, Fang X, Ning W, et al. The dynamic links between Central Asian dust emission, Tibetan cryosphere, Pacific productivity and global climate changes (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 4704–4715 [咎金波, 方小敏, 宁文晓, 等. 中亚黄土粉尘与冰冻圈演化、太平洋生产力和全球变化的联系. *科学通报*, 2024, 69: 4704–4715]
- 26 Horii S, Takahashi K, Shiozaki T, et al. East-west variabilities of N₂ fixation activity in the subtropical north Pacific ocean in summer: potential field evidence of the phosphorus and iron co-limitation in the western area. *J Geophys Res Oceans*, 2023, 128: e2022JC019249
- 27 Yu X, Wen Z, Jiang R, et al. Assessing N₂ fixation flux and its controlling factors in the (sub)tropical western North Pacific through high-resolution observations. *Limnol Oceanogr Lett*, 2024, 9: 716–724
- 28 Buck C S, Landing W M, Resing J. Pacific Ocean aerosols: deposition and solubility of iron, aluminum, and other trace elements. *Mar Chem*, 2013, 157: 117–130
- 29 Chien C, Mackey K R M, Dutkiewicz S, et al. Effects of African dust deposition on phytoplankton in the western tropical Atlantic Ocean off Barbados. *Glob Biogeochem Cycle*, 2016, 30: 716–734
- 30 Lin Y, Chen J, Ho T, et al. Atmospheric iron deposition in the northwestern Pacific Ocean and its adjacent marginal seas: the importance of coal burning. *Glob Biogeochem Cycle*, 2015, 29: 138–159
- 31 Anderson R F, Cheng H, Edwards R L, et al. How well can we quantify dust deposition to the ocean? *Phil Trans R Soc A*, 2016, 374: 20150285
- 32 Hayes C T, Anderson R F, Fleisher M Q, et al. Quantifying lithogenic inputs to the North Pacific Ocean using the long-lived thorium isotopes. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 383: 16–25
- 33 Hsieh Y T, Henderson G M, Thomas A L. Combining seawater ²³²Th and ²³⁰Th concentrations to determine dust fluxes to the surface ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 312: 280–290
- 34 Deng F, Thomas A L, Rijkenberg M J A, et al. Controls on seawater ²³¹Pa, ²³⁰Th and ²³²Th concentrations along the flow paths of deep waters in the Southwest Atlantic. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 390: 93–102
- 35 Pavia F J, Anderson R F, Winckler G, et al. Atmospheric dust inputs, iron cycling, and biogeochemical connections in the South Pacific Ocean

- from thorium isotopes. *Glob Biogeochem Cycle*, 2020, 34: e2020GB006562
- 36 Kienast S S, Winckler G, Lippold J, et al. Tracing dust input to the global ocean using thorium isotopes in marine sediments: ThoroMap. *Glob Biogeochem Cycle*, 2016, 30: 1526–1541
 - 37 McGee D, Marcantonio F, Lynch-Stieglitz J. Deglacial changes in dust flux in the eastern equatorial Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 257: 215–230
 - 38 Winckler G, Anderson R F, Fleisher M Q, et al. Covariant glacial-interglacial dust fluxes in the equatorial Pacific and Antarctica. *Science*, 2008, 320: 93–96
 - 39 Serno S, Winckler G, Anderson R F, et al. Eolian dust input to the subarctic North Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 387: 252–263
 - 40 Yang T, Chen Y, Zhou S, et al. Solubilities and deposition fluxes of atmospheric Fe and Cu over the Northwest Pacific and its marginal seas. *Atmos Environ*, 2020, 239: 117763
 - 41 Wang B S, Ho T Y. Aerosol Fe cycling in the surface water of the Northwestern Pacific Ocean. *Prog Oceanogr*, 2020, 183: 102291
 - 42 Zhang T, Liu J, Xiang Y, et al. Quantifying anthropogenic emission of iron in marine aerosol in the Northwest Pacific with shipborne online measurements. *Sci Total Environ*, 2024, 912: 169158
 - 43 Okubo A, Takeda S, Obata H. Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan. *Atmos Res*, 2013, 129–130: 20–32
 - 44 Perron M M G, Strzelec M, Gault-Ringold M, et al. Assessment of leaching protocols to determine the solubility of trace metals in aerosols. *Talanta*, 2019, 208: 120377
 - 45 Hayes C T, Fitzsimmons J N, Boyle E A, et al. Thorium isotopes tracing the iron cycle at the Hawaii Ocean Time-series Station ALOHA. *Geochim Cosmochim Acta*, 2015, 169: 1–16
 - 46 Lopez G I, Marcantonio F, Lyle M, et al. Dissolved and particulate ^{230}Th – ^{232}Th in the Central Equatorial Pacific Ocean: evidence for far-field transport of the East Pacific Rise hydrothermal plume. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 431: 87–95
 - 47 Pérez-Tribouillier H, Noble T L, Townsend A T, et al. Quantifying lithogenic inputs to the southern ocean using long-lived thorium isotopes. *Front Mar Sci*, 2020, 7: 207
 - 48 Grand M M, Measures C I, Hatta M, et al. The impact of circulation and dust deposition in controlling the distributions of dissolved Fe and Al in the south Indian subtropical gyre. *Mar Chem*, 2015, 176: 110–125
 - 49 Gao Y, Marsay C M, Yu S, et al. Particle-size variability of aerosol iron and impact on iron solubility and dry deposition fluxes to the Arctic Ocean. *Sci Rep*, 2019, 9: 16653
 - 50 Tagliabue A, Bopp L, Dutay J C, et al. Hydrothermal contribution to the oceanic dissolved iron inventory. *Nat Geosci*, 2010, 3: 252–256
 - 51 Wen Z, Browning T J, Cai Y, et al. Nutrient regulation of biological nitrogen fixation across the tropical western North Pacific. *Sci Adv*, 2022, 8: eabl7564
 - 52 Mahowald N M, Baker A R, Bergametti G, et al. Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean. *Glob Biogeochem Cycle*, 2005, 19: 2004GB002402
 - 53 Browning T J, Moore C M. Global analysis of ocean phytoplankton nutrient limitation reveals high prevalence of co-limitation. *Nat Commun*, 2023, 14: 5014
 - 54 Yuan Z, Achterberg E P, Engel A, et al. Switches between nitrogen limitation and nitrogen-phosphorus co-limitation in the subtropical North Atlantic Ocean. *Limnol Oceanogr*, 2024, 69: 1005–1013
 - 55 Zhang C, Gao H, Yao X, et al. Phytoplankton growth response to Asian dust addition in the northwest Pacific Ocean versus the Yellow Sea. *Biogeosciences*, 2018, 15: 749–765
 - 56 Zhang C, He J, Yao X, et al. Dynamics of phytoplankton and nutrient uptake following dust additions in the northwest Pacific. *Sci Total Environ*, 2020, 739: 139999
 - 57 Tsuda A, Takeda S, Saito H, et al. A mesoscale iron enrichment in the western subarctic Pacific induces a large centric diatom bloom. *Science*, 2003, 300: 958–961
 - 58 Tsuda A, Takeda S, Saito H, et al. Evidence for the grazing hypothesis: grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEEDS II). *J Oceanogr*, 2007, 63: 983–994
 - 59 Sunda W G. Trace metal interactions with marine phytoplankton. *Biol Oceanogr*, 1989, 6: 411–442
 - 60 Nishioka J, Ono T, Saito H, et al. Iron supply to the western subarctic Pacific: importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *J Geophys Res*, 2007, 112: 2006JC004055
 - 61 Dai M, Luo Y, Achterberg E P, et al. Upper ocean biogeochemistry of the oligotrophic north Pacific subtropical gyre: from nutrient sources to carbon export. *Rev Geophys*, 2023, 61: e2022RG000800
 - 62 Thingstad T F, Krom M D, Mantoura R F C, et al. Nature of phosphorus limitation in the ultraoligotrophic eastern Mediterranean. *Science*, 2005, 309: 1068–1071

- 63 Berman-Frank I, Cullen J T, Shaked Y, et al. Iron availability, cellular iron quotas, and nitrogen fixation in *Trichodesmium*. [Limnol Oceanogr](#), 2001, 46: 1249–1260
- 64 Zhang F, Wen Z, Wang S, et al. Phosphate limitation intensifies negative effects of ocean acidification on globally important nitrogen fixing cyanobacterium. [Nat Commun](#), 2022, 13: 6730
- 65 Tanita I, Shiozaki T, Kodama T, et al. Regionally variable responses of nitrogen fixation to iron and phosphorus enrichment in the Pacific Ocean. [J Geophys Res BioGeosci](#), 2021, 126: e2021JG006542
- 66 Mills M M, Ridame C, Davey M, et al. Iron and phosphorus co-limit nitrogen fixation in the eastern tropical North Atlantic. [Nature](#), 2004, 429: 292–294
- 67 Snow J T, Schlosser C, Woodward E M S, et al. Environmental controls on the biogeography of diazotrophy and *Trichodesmium* in the Atlantic Ocean. [Glob Biogeochem Cycle](#), 2015, 29: 865–884
- 68 Li T G, Xiong Z F, Qin B B, et al. Carbon sources and sinks in the western tropical Pacific during glacial cycles: processes, mechanisms and effects (in Chinese). [Chin Sci Bull](#), 2024, 69: 1742–1758 [李铁刚, 熊志方, 秦秉斌, 等. 冰期旋回中热带西太平洋碳源汇过程、机理与效应. [科学通报](#), 2024, 69: 1742–1758]
- 69 Meng X, Yao F, Zhang J, et al. Impact of dust deposition on phytoplankton biomass in the Northwestern Pacific: a long-term study from 1998 to 2020. [Sci Total Environ](#), 2022, 813: 152536
- 70 Moore C M, Mills M M, Arrigo K R, et al. Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. [Nat Geosci](#), 2013, 6: 701–710
- 71 Letelier R M, Björkman K M, Church M J, et al. Climate-driven oscillation of phosphorus and iron limitation in the North Pacific Subtropical Gyre. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2019, 116: 12720–12728
- 72 Jickells T D, An Z S, Andersen K K, et al. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. [Science](#), 2005, 308: 67–71
- 73 Ellwood M J, Bowie A R, Baker A, et al. Insights into the biogeochemical cycling of iron, nitrate, and phosphate across a 5,300 km south Pacific zonal section (153°E–150°W). [Glob Biogeochem Cycle](#), 2018, 32: 187–207
- 74 Browning T J, Achterberg E P, Rapp I, et al. Nutrient co-limitation at the boundary of an oceanic gyre. [Nature](#), 2017, 551: 242–246
- 75 Talley L D, Pickard G L, Emery W J, et al. Descriptive Physical Oceanography: An Introduction. New York: Academic Press, 2011. 303–362
- 76 Martiny A C, Lomas M W, Fu W, et al. Biogeochemical controls of surface ocean phosphate. [Sci Adv](#), 2019, 5: eaax0341

Summary for “大气沉降驱动下的西北太平洋表层海洋铁的分布与生态效应”

The distribution and ecological impacts of iron in the surface Northwest Pacific Ocean driven by atmospheric deposition

Yi-Hua Cai^{*}, Jia-Xu Li, Nan Zhang, Li Ma, Qing Cao, Zhi-Mian Cao, Kuan-Bo Zhou, Da-Lin Shi & Min Chen

State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102 China

^{*} Corresponding author, E-mail: yihua_cai@xmu.edu.cn

Iron (Fe) is a key micronutrient that controls marine primary productivity and plays a vital role in the biogeochemical cycling of carbon (C) and nitrogen (N). As a result, its availability in the surface ocean is frequently a limiting factor for biological processes, particularly in regions such as the Northwest Pacific Ocean. Atmospheric deposition is a major external source of Fe for the ocean and significantly influences the distribution of dissolved iron (dFe) within, thereby regulating marine biogeochemical cycling. Despite its importance, the spatial variability and ecological impacts of atmospheric dFe deposition remain underexplored, particularly in the Northwest Pacific, where large-scale atmospheric inputs of Fe from desert dust and anthropogenic sources complicate nutrient dynamics. Therefore, this study comprehensively investigated the atmospheric deposition-driven distribution, fluxes, and ecological effects of dFe in the surface waters of the Northwest Pacific. Long-lived thorium isotopes ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) were utilized as tracers to estimate the atmospheric dFe deposition flux, which ranged from 4.02 to 44.28 mg/(m² a). The spatial distribution of these fluxes clearly decreased from west to east and north to south. Notably, the $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ -based estimates were higher than the predictions obtained using existing atmospheric deposition models, suggesting that current models underestimate the contribution of atmospheric dFe deposition in this region. Furthermore, strong positive correlations between the atmospheric dFe deposition flux and surface ocean dFe concentrations, chlorophyll a levels, and net primary productivity (NPP) were observed, emphasizing the critical role of atmospheric Fe inputs in regulating marine biogeochemical processes. In the western North Pacific Subtropical Gyre, increased atmospheric dFe deposition alleviated the Fe limitation on N-fixing organisms, thereby stimulating N fixation and introducing new N sources. This cascade of biogeochemical responses shifted the nutrient limitation condition from N limitation or Fe–N co-limitation to phosphorus (P) limitation or N–P co-limitation. By contrast, in the western North Pacific Subarctic Gyre, atmospheric dFe deposition alleviated the Fe limitation on phytoplankton growth, reflecting its direct influence on phytoplankton dynamics in Fe-limited regions. The results of this study underscore the complexity of nutrient dynamics in the Northwest Pacific, where atmospheric dFe inputs drive changes in nutrient stoichiometry and NPP. Our findings emphasize that the spatial variation of atmospheric dFe deposition not only regulates the availability of Fe but also plays a crucial role in determining the nutrient limitations on marine ecosystems. Indeed, the shift from N to P limitation in response to increased atmospheric Fe input has critical implications for various characteristics of marine food webs, including nitrogen fixation, primary productivity, and biogeochemical cycling. Overall, the results of this study enhance our understanding of the essential role that atmospheric dFe deposition plays in shaping marine biogeochemical cycles in the Northwest Pacific. However, the ecological and climate feedback mechanisms triggered by these inputs require further investigation. Future research should integrate multi-platform observational data with model simulations and field incubation experiments to refine our understanding of Fe–N–P coupling, ecological responses to atmospheric dFe deposition, and the broader climate feedback mechanisms associated with Fe inputs to this vital oceanic region.

Northwest Pacific Ocean, dissolved iron, atmospheric deposition, biogeochemistry, ecological impacts

doi: [10.1360/CSB-2025-5824](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5824)