

· 专题:双清论坛“全球海洋治理与合作的关键科学问题” ·

## 全球变化下的海洋浮游生物群落与元素循环： 从 GEOTRACES 到 BioGeoSCAPES 计划\*

洪海征 倪 靛 刘天任 柳 欣 蔡毅华 史大林\*\*

厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102

**[摘要]** 地球的生命支持系统依赖于生物地球化学循环,海洋在其中扮演着极其重要的角色。海洋浮游生物的代谢反应是碳、氮、铁等元素海洋生物地球化学循环的重要驱动力。揭示海洋浮游生物群落动态变化的调控机制及其如何响应环境变化,对于认识和预测全球变化下的海洋生产力以及元素生物地球化学循环的演变至关重要。基于“海洋痕量元素及同位素生物地球化学循环(GEOTRACES)”、Tara Oceans 等研究计划的成功实施,近年来国际学界正在积极策划发起“全球变化下的海洋生物代谢与营养元素循环(BioGeoSCAPES)”研究计划,旨在从全球尺度上系统揭示并量化海洋浮游生物如何响应适应气候变化,阐明其与元素生物地球化学循环的互作关系。

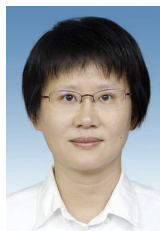
**[关键词]** 海洋浮游生物;生物地球化学循环;营养元素;全球气候变化

生物地球化学循环促使物质(元素)在大气圈、水圈、生物圈和岩石圈之间流动,构成了地球生命的维持系统,海洋在其中扮演着举足轻重的角色<sup>[1]</sup>。海洋浮游生物(细菌、古菌、病毒,浮游植物、浮游动物等)是海洋生态系统中数量最多、分布最广、多样性最高的生命体,在物质迁移转化和能量传递中发挥着不可替代的作用<sup>[2,3]</sup>。海洋环境中生物体内以及个体、种群、群落、生态系统之间发生的生物化学反应与过程,包括光能自养、化能自养、固氮、呼吸、硝化、反硝化等,改变重要元素(碳、氮、磷、硫、铁、锌、铜等)的形态和组成(无机态、有机态、溶解态、颗粒态等),驱动元素循环<sup>[4-6]</sup>;反之,元素地球化学循环可调控浮游生物的活性、群落组成及彼此间的互作关系。海洋浮游生物群落与元素循环相互作用,塑造海洋环境,改变大气成分,与地球系统协同演化,维持地球宜居性<sup>[7]</sup>。

因此,厘清海洋浮游生物群落动态变化的调控机制,揭示并量化其驱动的生物地球化学循环,进而建立模型来评估和预测其对环境变化的响应及效应,不仅对认识海洋如何维持地球宜居性具有重要



**史大林** 厦门大学教授,近海海洋环境科学国家重点实验室主任,国家杰出青年科学基金项目获得者,国家自然科学基金创新研究群体项目负责人,国际研究计划 GEOTRACES 科学指导委员会委员。致力于海洋生物地球化学与全球变化研究,研究成果以第一或通讯作者发表在 *Science*、*Science Advances*、*Nature Communications*、*PNAS* 等期刊,获教育部自然科学奖一等奖、科学探索奖等奖项。



**洪海征** 厦门大学教授,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,主要从事气候变化和人类活动影响下海洋生理生态研究。以第一或通讯作者在 *Science*、*Nature Communications* 等期刊发表学术论文 30 余篇,成果入选“2017 年度中国海洋与湖沼十大科技进展”。

意义,也是应对全球变化所亟需解决的重大命题。这将成为海洋科学领域的前沿科学问题与挑战,也可为制定有效的政策决策和管理方法提供坚实的科学基础<sup>[8]</sup>。

本文回顾 21 世纪初以来国际海洋学界在海洋

收稿日期:2024-12-01;修回日期:2024-12-15

\* 本文根据国家自然科学基金委员会第 366 期“双清论坛”讨论的内容整理。

\*\* 通信作者,Email: dshi@xmu.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42421004)、国家重点研发计划项目(2023YFF0805004)的资助。

生物地球化学和海洋浮游生物研究领域开展的具有广泛且深远影响的“海洋痕量元素及同位素生物地球化学循环(GEOTRACES)”、Tara Oceans 以及 Bio-GO-SHIP 等国际计划,并介绍正在策划发起中的学科交叉性突出、综合性更强的“全球变化下的海洋生物代谢与营养元素循环(BioGeoSCAPES)”计划,以吸引更多不同学科方向的科学家参与其中,联合开展跨学科协同研究,为应对全球气候变化提供科学支撑。

## 1 痕量元素及同位素海洋生物地球化学循环(GEOTRACES)国际研究计划

氮、磷、铁、锌和硫等是海洋生物的必须营养元素,支撑并调控着海洋初级生产力及生态系统的结构和功能。其中,铁、锌、铜等一系列痕量元素虽然在开阔大洋的表层海水中的浓度极低(通常小于 $1\sim 2\text{ nmol/L}$ )<sup>[6]</sup>,但作为蛋白质的重要组成或酶的活性中心,它们参与了几乎所有关键的生化反应和能量转化传递过程,例如无机碳利用、光合作用、固氮作用、硝化作用、反硝化、氧化还原、营养盐摄取与同化等,发挥着不可或缺的调控作用<sup>[6, 9, 10]</sup>。为了深化对全球海洋环境中营养元素,尤其是痕量元素及同位素生物地球化学循环的理解,包括中国在内的全球 35 个国家和地区共同参与了 GEOTRACES 国际研究计划。该计划于 2010 年正式开启,聚焦三大研究主题:(1) 海—气、海—陆、沉积物—水及洋壳等界面的通量和过程;(2) 海洋内部的吸收、再生、埋藏和循环;(3) 古海洋学过程的表征指标。GEOTRACES 计划旨在通过全球尺度的观测、数据集成与模式研究,解析直接或间接调控海洋生产力的关键痕量元素及同位素的分布特征、主要过程与循环通量,并揭示其对环境变化的响应<sup>[11]</sup>。截至 2023 年 7 月,GEOTRACES 计划已完成 89 个航次、3 362 个采样站位的观测和研究(图 1),采样站位分布在太平洋、大西洋、南大洋、印度洋及北冰洋等全球主要海域<sup>[12]</sup>,集成并发布了包括铁(Fe)、锌(Zn)、镉(Cd)、铜(Cu)等生源金属,以及铝(Al)、锰(Mn)、Nd、<sup>230</sup>Th 等金属示踪物在内的痕量元素及同位素含量和分布数据集<sup>[13, 14]</sup>。经过国际海洋学界二十多年的共同努力,GEOTRACES 计划在痕量元素及同位素的大气圈—水圈—岩石圈界面交换、大洋内循环和全球变化等领域内取得了诸多重要突破,显著扩展了对全球海洋尺度上痕量元素及同位素分布模式及调控机制的认识,并为海洋生物地球化学循

环研究提供了高质量的数据基础与监测方法支持。2019 至 2021 年,我国科学家在西北太平洋先后组织实施春季、夏季、冬季 3 个 GEOTRACES 认证的航次调查,系统揭示了西北太平洋副热带流涡区、北赤道流、黑潮等海区海水中铁等痕量元素及同位素的时空格局,探讨了痕量元素及常量营养盐对浮游植物群落初级生产和生物固氮等关键生物地球化学过程的调控机理,取得了可喜的进展<sup>[15-18]</sup>。

海洋生源痕量元素的循环过程高度依赖于生物介导。GEOTRACES 计划尽管提供了大量不同海域全水深的痕量元素及同位素观测数据,但是仅涵盖叶绿素等十分有限的基础生物参数的观测。由于缺乏系统的生物采样和分析,目前对于生源痕量元素在原位如何被海洋浮游生物吸收利用并参与生物反应知之甚少;反之,浮游生物如何改变元素的形态和组成,进而驱动元素循环,也存在明显的研究空白。这些局限性阻碍了对痕量元素生物地球化学与浮游生物互作关系的深入理解和认知。此外,预计到本世纪末,海洋氧含量、温度、pH 值、风尘输入等都将发生显著变化<sup>[19, 20]</sup>,这将对浮游生物的丰度、组成和功能活性以及元素的形态、浓度和通量都将产生不同程度的影响。因此,需要开展跨学科的综合观测、多时空尺度及特定区域的重复采样,同时结合针对性的实验室研究和数值模型模拟,才能深化对痕量元素生物地球化学循环及其与浮游生态系统相互作用的认知。

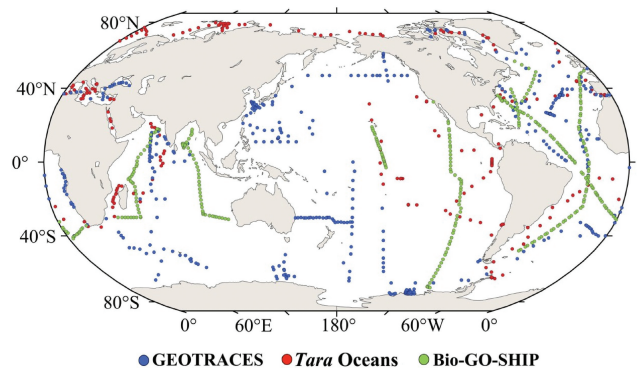


图 1 GEOTRACES、Tara Oceans 和 Bio-GO-SHIP 国际计划公开的数据站点分布地图(站点数据分别来自 GEOTRACES<sup>[12]</sup>、Tara Oceans<sup>[21]</sup>和 Bio-GO-SHIP<sup>[22]</sup>数据库)

## 2 海洋生物组学国际研究计划——Tara Oceans 和 Bio-GO-SHIP

Tara Oceans 和 Bio-GO-SHIP 是两个致力于将传统海洋探索方法与生物组学新兴技术相结合的

研究计划,旨在探究环境参数与浮游生物多样性、丰度及分布之间的关联,并深入揭示海洋浮游生物在生物地球化学循环中的关键作用。

*Tara Oceans* 是基于“全球海洋取样探险 (Global Ocean Sampling Expedition, GOS)”发展而来的研究计划。GOS 作为首个应用基因测序技术探索全球海洋浮游生物多样性的先驱项目,于 2004 至 2010 年期间实施,并于 2017 年重启,研究范围拓展至附生于海洋塑料上的浮游生物<sup>[23-25]</sup>。*Tara Oceans* 于 2009 至 2013 年间开展全球采样,覆盖 210 个站点和 3 个水层(表层、叶绿素最大层和弱光层,深至 1 000 米),依据 GOS 的采样准则采集的浮游生物样本涵盖从病毒(小于几百纳米)到较大的浮游生物(达几毫米)<sup>[21, 26]</sup>。该计划利用高通量 DNA 测序获取浮游生物的元条形码、宏基因组和宏转录组等分子生物学数据,并将其与温度、盐度、硝酸盐、磷酸盐和碳酸盐浓度等常规环境参数相结合,综合探究海洋浮游生物多样性、功能基因分布与环境因素之间的关系,取得的研究成果主要包括以下三个方面:(1) 揭示海洋浮游生物(尤其是海洋微生物)的生物地理分布、功能和群落结构;(2) 探讨海洋病毒多样性以及病毒与宿主微生物之间的相互关系;(3) 解析海洋浮游生物之间竞争、协作和共生等相互作用及其机理<sup>[27, 28]</sup>。为了促进数据共享与利用,*Tara Oceans* 构建了一个开放在线平台,允许用户上传核酸或者氨基酸序列快速获取这些序列在自然海区中的分布及对应站点的环境参数,方便非生物信息学专业背景的研究人员获取浮游生物宏组学信息<sup>[22, 29]</sup>。

Bio-GO-SHIP 是基于“全球海洋船基水文调查计划 (Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program, GO-SHIP)”的海洋生态系统观测项目。GO-SHIP 计划每年对全球海区进行观测,核心参数包括海水温度、盐度、硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐、溶解无机碳 (Dissolved Inorganic Carbon, DIC) 和溶解氧浓度及碱度,部分航次还测量铁等痕量金属、溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC)、溶解有机氮 (Dissolved Organic Nitrogen, DON)、氨、二甲基硫 (Dimethyl sulfide, DMS) 及叶绿素等参数。此外,GO-SHIP 计划还针对部分海区开展为期 2 至 3 年的短期监测项目,以了解海区的短期变化<sup>[30, 31]</sup>。Bio-GO-SHIP 在 GO-SHIP 计划的基础上引入高质量校准的组学分析、浮游生物成像、颗粒化学和光学分析等技术,以获取

浮游生物群落粒径组成、分子多样性和生物丰度等参数。截至目前,Bio-GO-SHIP 已构建了一套高时空分辨率的海洋表层水体宏基因组数据集,包含的 971 个数据主要分布于大西洋、太平洋和印度洋海盆。进一步,该项目计划将生物参数与 GO-SHIP 核心参数相结合,建立海洋浮游生物特征和生物多样性与生态系统化学和动力环境之间的机制性关联,探讨生物过程对生物地球化学循环的影响<sup>[32-36]</sup>。

尽管 *Tara Oceans* 和 Bio-GO-SHIP 计划在推进海洋科学相关研究方面取得了显著成就,但两者均存在若干局限。*Tara Oceans* 计划的部分化学参数(如铁、氨、POC 和 PIC 浓度)为模型预测值而非实际观测值;部分站位数据不完整,例如,硝酸盐数据在约 30% 站位的表层水体中缺失,而在叶绿素最大层则仅有 50% 的站位可获取该数据<sup>[37]</sup>。此外,*Tara Oceans* 的采样点主要分布于沿岸海域,对开阔海域的覆盖不足(图 1)。相比之下,Bio-GO-SHIP 计划的化学参数均为实际测量值,但其核心参数未包含与浮游生物密切相关的基础指标(如叶绿素和铁等)。同时,该计划的核酸数据以 16S/18S 等元条形码数据为主,宏基因数据较少,比较难探究浮游生物功能基因在自然海区的表达与分布。此外,Bio-GO-SHIP 聚焦于特定调查断面,空间覆盖十分有限(图 1)。因此,*Tara Oceans* 和 Bio-GO-SHIP 中的生物相关参数有限且无法与生物地球化学分析充分结合,更重要的是获得的宏组学和核酸条形码数据无法量化,这在一定程度上阻碍了其在全球生物地球化学模型中的综合应用,限制了模拟和预测研究的开展。

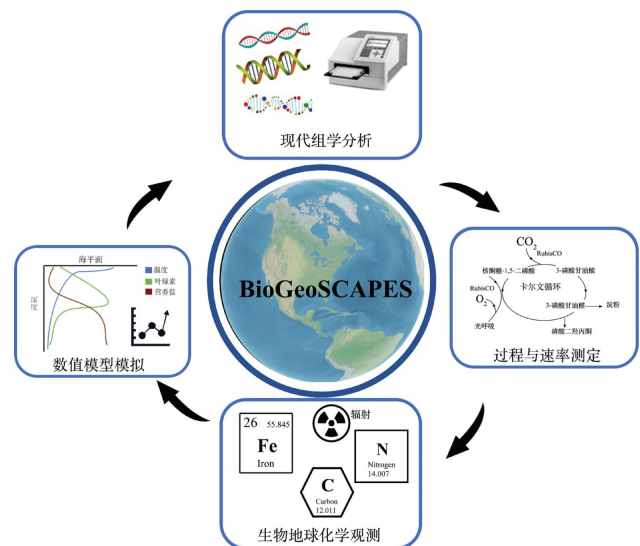


图 2 BioGeoSCAPES 计划的四个研究方向

为了解决上述研究中的不足,各国科学家已经着手发起新的国际海洋生物地球化学循环研究计划。2018 年在美国马萨诸塞州伍兹霍尔举行的科学策划国际工作组会议上,提出了通过协同观测并互校“组学”和化学参数以评估全球海洋浮游生态系统和营养元素循环的科学概念,为拟发起的研究计划起名为 BioGeoSCAPES,并探讨了国际合作的基本框架<sup>[40]</sup>;2023 年举行的 BioGeoSCAPES 科学计划国际研讨会决定在 2020—2030 年中期启动实施该计划。BioGeoSCAPES 计划将汇集来自世界各国的科学家,以坚实的标准化和相互校准工作为基础,将各种生物(包括核酸、蛋白、代谢组学)、化学(常量营养盐、痕量营养盐、有机质)、物理参数采样测量与实验室实验和模型模拟相结合,旨在理解海洋浮游生态系统与生物地球化学循环的互作关系,以及如何响应并反馈全球变化(图 2)<sup>[8]</sup>。

### 3.2 研究主题和研究内容

BioGeoSCAPES 研究计划拟创建首个全球尺度海洋浮游生物关键反应过程及其驱动因子的剖面图,并揭示它们与营养元素海洋生物地球化学循环的关联和反馈。基于此,BioGeoSCAPES 还计划综合新的生物组学数据建立新的海洋生态系统模型,以评估全球变化下关键海洋浮游生物的脆弱性和面临的风险<sup>[33, 41]</sup>。BioGeoSCAPES 计划与联合国海洋计划的目标高度一致,研究涵盖多重压力对海洋的影响、海洋生态系统和渔业、海洋与气候的相互作用以及加强全球海洋观测系统以监测生态系统健康等重要议题<sup>[42, 43]</sup>。

如图 2 所示,BioGeoSCAPES 计划的科学逻辑是以揭示海洋浮游生物新陈代谢和元素循环的时空格局为切入点,系统量化浮游生物生化反应和生态过程以及元素生物地球化学循环的速率,进而在阐明浮游生物新陈代谢与元素地球化学循环的耦合关系和机制的基础上预测未来变化。因此,BioGeoSCAPES 计划可概括为三个关键词:状态、速率和归宿,其主要研究内容为:

(1) 状态研究 (STATES): 通过对特定海区的时间序列观测或多次重复采样,揭示海洋浮游生物和营养元素的“状态”,为理解其动态变化机制和对全球变化的响应提供数据积累。主要研究内容包括:1) 厘清光能自养生物、化能自养生物、异养生物、混合营养生物、固氮生物、病毒、后生生物的丰度和时空分布,对营养元素特别是生源痕量元素的吸

收利用和需求,以及受环境因子(包括营养元素)的调控状况、功能基因的表达和酶活性、对环境的适应和进化等;2) 采用标准化的方法测量常量营养盐(特别是在低浓度范围)和痕量元素的浓度和形态;3) 分析有机质(包括浮游生物主要代谢物)的浓度、组成、形态和官能团。

(2) 速率研究 (RATES): 将海洋浮游生物生物反应速率与营养元素生物地球化学循环联系起来,在海洋浮游生物生态系统与生物地球化学循环之间建立概念框架。主要研究内容包括:1) 测量初级生产速率、颗粒有机碳和溶解有机碳的产生速率、营养元素特别是痕量营养元素的吸收利用速率、微生物矿化速率、呼吸速率、物质的生物转化速率、营养元素和氧通量等关键生物反应速率和物质通量;2) 揭示浮游生物生理功能(特别是转运蛋白和酶)在上述重要生物反应速率中的作用,及其受环境因子的调控;3) 综合分析组学、生理和速率数据,采用生理功能作为桥梁构建模型框架,降低物种多样性带来的复杂度。

(3) 归宿研究 (FATES): 评估和预测全球变化对海洋浮游生态系统结构功能和其驱动的元素循环的影响。主要研究内容包括:1) 以实验室实验为基础探讨关键物种对单因子和多因子环境变化的响应机制和适应策略;2) 整合现场和实验室速率测量和过程研究,采用新的技术手段,融入组学等新数据,建立数值模型;3) 利用机器学习和人工智能等方法结合模型模拟,评估海洋浮游生物系统和生物地球化学循环对全球变化多因子改变的响应。

近年来,在多个国家科学家的持续努力推动下,BioGeoSCAPES 计划的启动准备工作正在顺利开展,中国学者也积极参与其中。2019 年 10 月,BioGeoSCAPES 国际研究计划中国策划研讨会在厦门举行,来自厦门大学、中国海洋大学、中国科学院南海海洋研究所、自然资源部第二海洋研究所、台湾“中央”研究院、香港科技大学等 11 家科研院所的近 30 位专家学者参加了会议。参会的中国学者经过讨论,对 BioGeoSCAPES 计划的初步研究目标和愿景提出了反馈意见与建议,并针对中国在该计划中可能的贡献、扮演的角色等问题集思广益、深入探讨。2024 年 5 月,中国学者作为 BioGeoSCAPES 计划国际执行委员会(International Implementation Committee)委员,与国际同行合作起草 BioGeoSCAPES 计划的研究计划书<sup>[44]</sup>;同年 7 月,中国学者参与发起成立

了国际海洋研究科学委员会 (Scientific Committee on Oceanic Research, SCOR) 第 170 工作组, 旨在号召学界关注并共同开展以 BioGeoSCAPES 计划为主题的研究<sup>[45]</sup>。BioGeoSCAPES 将在 2020—2030 年中期正式启动, 相信这个多学科交叉的综合性计划将会对地球生命的支持系统带来突破性的新理解。

#### 4 总结与展望

随着社会经济的快速发展, 人类活动打破了地球系统的原有平衡状态, 导致全球气候变化, 对包括海洋浮游生物群落在内的地球生物圈造成了深远的影响。尽管海洋浮游生物是地球宜居性的重要缔造者, 但是我们对它们的认知仍然十分有限, 包括其生物地理分布、生化反应类型和活性及其调控机制等; 对它们如何驱动生物地球化学循环更是知之甚少。此外, 人类活动和气候变化叠加给海洋环境带来了多重并发的影响 (例如富营养化、酸化、暖化、缺氧、海冰减少、生态系统变化和污染等), 预计现存的海洋栖息地在未来 10 至 15 年内可能会发生显著变化<sup>[46-50]</sup>。这对解析海洋浮游生物群落与元素循环的相互作用提出了新的挑战。在已有的 GEOTRACES、Tara Oceans 和 Bio-GO-SHIP 等国际大计划的基础之上, BioGeoSCAPES 项目将利用现代组学新技术和生物地球化学能力, 将浮游生态系统与生物地球化学循环相联系, 结合数据分析和海洋生物地球化学模型, 深入了解海洋浮游生物如何适应不断变化的环境, 并评估其对全球生物地球化学循环的影响。这个高度强调学科交叉的国际新计划倡议各国不同领域的科学家积极参与, 共同应对全球气候变化提供战略性支持。

#### 参 考 文 献

- [1] Dontsova K, Balogh-brunstand Z, Roux GL. Biogeochemical Cycles: Ecological Drivers and Environmental Impact. John Wiley & Sons, 2020.
- [2] Moran MA. The global ocean microbiome. *Science*, 2015, 350(6266): aac8455.
- [3] Paoli L, Ruscheweyh HJ, Forneris CC, et al. Biosynthetic potential of the global ocean microbiome. *Nature*, 2022, 607(7917): 111—118.
- [4] Baltar F, Bayer B, Bednarsek N, et al. Towards integrating evolution, metabolism, and climate change studies of marine ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(11): 1022—1033.
- [5] Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237—240.
- [6] Morel FMM, Price NM. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans. *Science*, 2003, 300(5621): 944—947.
- [7] Hutchins DA, Boyd PW. Marine phytoplankton and the changing ocean iron cycle. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1072—1079.
- [8] BioGeoSCAPES. BioGeoSCAPES. [2024-12-01]. <http://www.biogeoscapes.org>.
- [9] Lohan MC, Tagliabue A. Oceanic micronutrients: trace metals that are essential for marine life. *Elements*, 2018, 14(6): 385—390.
- [10] Sunda WG. Feedback interactions between trace metal nutrients and phytoplankton in the ocean. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 204.
- [11] Anderson RF. GEOTRACES: accelerating research on the marine biogeochemical cycles of trace elements and their isotopes. *Annual Review of Marine Science*, 2020, 12: 49—85.
- [12] webodv. Welcome to the GEOTRACES webODV. [2024-12-01]. <https://geotraces.webodv.awi.de/>.
- [13] Bruland KW, Middag R, Lohan MC. Controls of trace metals in seawater. *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2014: 19—51.
- [14] Lam PJ, Anderson RF. GEOTRACES: the marine biogeochemical cycle of trace elements and their isotopes. *Elements*, 2018, 14(6): 377—378.
- [15] Wen ZZ, Browning TJ, Cai YH, et al. Nutrient regulation of biological nitrogen fixation across the tropical western North Pacific. *Science Advances*, 2022, 8(5): eabl7564.
- [16] Wen ZZ, Browning TJ, Dai RB, et al. The response of diazotrophs to nutrient amendment in the South China Sea and western North Pacific. *Biogeosciences*, 2022, 19(22): 5237—5250.
- [17] Browning TJ, Liu X, Zhang RF, et al. Nutrient co-limitation in the subtropical Northwest Pacific. *Limnology and Oceanography Letters*, 2022, 7(1): 52—61.
- [18] Dai MH, Luo YW, Achterberg EP, et al. Upper ocean biogeochemistry of the oligotrophic North Pacific subtropical gyre: from nutrient sources to carbon export. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(3): e2022RG000800.
- [19] Schmidtko S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 2017, 542(7641): 335—339.

- [20] Kwiatkowski L, Torres O, Bopp L, et al. Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences*, 2020, 17(13): 3439–3470.
- [21] Ocean Atlas. Tara Oceans. [2024-12-01]. <https://tara-oceans.mio.osupytheas.fr/>.
- [22] Vernet C, Lecubin J, Sánchez P, et al. The Ocean Gene Atlas v2. 0: online exploration of the biogeography and phylogeny of plankton genes. *Nucleic Acids Research*, 2022, 50(W1): W516–W526.
- [23] Rusch DB, Halpern AL, Sutton G, et al. The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: northwest Atlantic through eastern tropical Pacific. *PLoS Biology*, 2007, 5(3): e77.
- [24] Yooseph S, Sutton G, Rusch DB, et al. The Sorcerer II Global Ocean Sampling expedition: expanding the universe of protein families. *PLoS Biology*, 2007, 5(3): e16.
- [25] Williamson SJ, Rusch DB, Yooseph S, et al. The Sorcerer II Global Ocean Sampling Expedition: metagenomic characterization of viruses within aquatic microbial samples. *PLoS One*, 2008, 3(1): e1456.
- [26] Vernet C, Henry N, Lecubin J, et al. The Ocean barcode atlas: a web service to explore the biodiversity and biogeography of marine organisms. *Molecular Ecology Resources*, 2021, 21(4): 1347–1358.
- [27] Zhang HJ, Ning K. The *Tara* oceans project: new opportunities and greater challenges ahead. *Genomics, Proteomics & Bioinformatics*, 2015, 13(5): 275–277.
- [28] Sunagawa S, Acinas SG, Bork P, et al. *Tara* Oceans: towards global ocean ecosystems biology. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(8): 428–445.
- [29] Villar E, Vannier T, Vernet C, et al. The Ocean Gene Atlas: exploring the biogeography of plankton genes online. *Nucleic Acids Research*, 2018, 46(W1): W289–W295.
- [30] Twining BS, Rauschenberg S, Baer SE, et al. A nutrient limitation mosaic in the eastern tropical Indian Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2019, 166: 125–140.
- [31] GO-SHIP. The global ocean ship-based hydrographic investigations program. [2024-12-01]. <http://go-ship.org/index.html>.
- [32] Clayton S, Alexander H, Graff JR, et al. Bio-GO-SHIP: the time is right to establish global repeat sections of ocean biology. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 8: 767443.
- [33] Ustuck LJ, Larkin AA, Martiny AC. Global scale phylogeography of functional traits and microdiversity in *Prochlorococcus*. *BioRxiv: the Preprint Server for Biology*, 2023: 2023.01.24.525399.
- [34] Garcia CA, Hagstrom GI, Larkin AA, et al. Linking regional shifts in microbial genome adaptation with surface ocean biogeochemistry. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2020, 375(1798): 20190254.
- [35] Brock ML, Larkin AA, Raes EJ, et al. Bacterial biogeography of the Indian Ocean. *Limnology and Oceanography*, 2024, 69(1): 67–80.
- [36] Larkin AA, Garcia CA, Garcia N, et al. High spatial resolution global ocean metagenomes from Bio-GO-SHIP repeat hydrography transects. *Scientific Data*, 2021, 8(1): 107.
- [37] Expedition PTO. Registry of all samples from the Tara Oceans Expedition (2009-2013). *Pangaea*, 2016, 10: 1594.
- [38] Levine NM, Leles SG. Marine plankton metabolisms revealed. *Nature Microbiology*, 2021, 6(2): 147–148.
- [39] Alessandro T. ‘Oceans are hugely complex’: modelling marine microbes is key to climate forecasts. *Nature*, 2023, 623(7986): 250–252.
- [40] Maldonado MT, Marchetti A, Saito MA, et al. Biogeoscapes: Ocean Metabolism and Nutrient Cycles on a Changing Planet. *Zenodo*, 2018.
- [41] Tagliabue A, Barrier N, Du Pontavice H, et al. An iron cycle cascade governs the response of equatorial Pacific ecosystems to climate change. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6168–6179.
- [42] Nations U. United Nations convention on the Law of the Sea. *Law of the Sea Bulletin*, 2017, 2016(91): 1–14.
- [43] Lee KH, Noh J, Khim JS. The Blue Economy and the United Nations’ sustainable development goals: challenges and opportunities. *Environment International*, 2020, 137: 105528.
- [44] BioGeoScapes. Meet the BioGeoScapes Community. [2024-12-01]. <https://biogeoscapes.org/BIOGEOCAPES-COMMUNITY/>.
- [45] SCOR Working Group 170. Physiology and Rates in Microbial Oceanography (PRIMO). [2024-12-01]. <https://scor-int.org/group/physiology-and-rates-in-microbial-oceanography-primo/>.
- [46] Doney SC. The growing human footprint on coastal and open-ocean biogeochemistry. *Science*, 2010, 328(5985): 1512–1516.

- [47] Dutkiewicz S, Scott JR, Follows MJ. Winners and losers: ecological and biogeochemical changes in a warming ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 2013, 27(2): 463–477.
- [48] Sharma R. Environmental issues of deep-sea mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2015, 11: 204–211.
- [49] Lannuzel D, Tedesco L, van Leeuwe M, et al. The future of Arctic Sea-ice biogeochemistry and ice-associated ecosystems. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 983–992.
- [50] Doney S, Balch W, Fabry V, et al. Ocean acidification: a critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanography*, 2009, 22(4): 16–25.

## Marine Plankton Community and Nutrient Cycling Under Global Change: From GEOTRACES to BioGeoSCAPES Programs

Haizheng Hong    Jing Ni    Tianren Liu    Xin Liu    Yihua Cai    Dalin Shi\*

*State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102*

**Abstract** The Earth's life support system relies on its biogeochemical cycles, with the ocean playing a pivotal role. The metabolic activities of marine plankton are key drivers of the marine biogeochemical cycles of elements such as carbon, nitrogen and iron. Understanding the regulatory mechanisms that govern dynamic changes in marine plankton communities and their responses to environmental shifts is critical for understanding and predicting changes in ocean productivity and elemental biogeochemical cycles under global climate change. Building on insights gained from international initiatives such as GEOTRACES (Marine Biogeochemical Cycles of Trace Elements and Isotopes) and *Tara* Oceans, an international community effort has been underway to launch a new global research program, BioGeoSCAPES: Ocean Metabolism and Nutrient Cycles on a Changing Planet. This initiative aims to systematically identify and quantify, on a global scale, how marine plankton respond and adapt to a changing climate and to elucidate their interactions with elemental biogeochemical cycles.

**Keywords** marine plankton; biogeochemical cycles; nutrient; global climate change

(责任编辑 陈鹤 张强)

---

\* Corresponding Author, Email: dshi@xmu.edu.cn