doi:10.6043/j.issn.0438-0479.201805041

 结 沭 •

BGC-Argo 浮标观测在海洋生物地球化学中的应用

邱国强1,王海黎1*,邢小罡2

(1. 近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学),福建 厦门 361102: 2. 国家海洋局第二海洋研究所卫星海洋环境动力学国家重点实验室,浙江 杭州 310012)

摘要:长期以来观测数据的不足严重制约着海洋生物地球化学过程的研究,随着技术发展,搭载物理、生物与化学多传 感器的生物地球化学剖面浮标(BGC-Argo 浮标)为海洋观测带来了重大改变:通过长期自动化剖面观测,可以覆盖从昼 夜、季节到年际的连续时间尺度;通过阵列式投放可以覆盖从次中尺度、中尺度、海盆到全球的连续空间尺度;高垂向分 辨率的观测数据可以同船载观测和遥感观测相互补充.海量的观测数据有助于各种海洋生物地球化学过程的研究,并 进一步认识、理解与预测海洋生物地球化学循环、生物泵过程以及海洋生态系统.主要综述了 BGC-Argo 的发展背景、科 学目标、主要应用以及目前在南海的应用进展.

关键词:BGC-Argo 浮标;生物地球化学;海洋光学;海洋观测

中图分类号: P 734.2	文献标志码:A	文章编号: 0438-0479(2018)06-0827-14
-----------------------	---------	--

海洋中的生物地球化学过程和物理过程是紧密 耦合在一起的,物理过程决定着海洋生物生存环境、 初级生产、渔业资源、生态结构、生物地球化学循环 等,同时生物地球化学过程在一定程度上也会影响物 理过程,海洋物理强迫及其引起的生物地球化学响应 体现在不同时空尺度上,在时间尺度上从昼夜、天气 (如台风、沙尘暴等)、季节、年际到气候尺度,在空间 尺度上从次中尺度(如锋面、涡丝)、中尺度(如涡旋、 沿岸上升流)、海盆尺度到全球尺度等(图 1)^[1]. 理解 和预测这种耦合关系,需要同步观测大量的生态及物 理数据,传统观测主要通过船载平台或遥感手段实 现,而这两种方式都有一定的局限性[2].船载平台采 样数据精度较高,但是时间分辨率不足,很难描述完 整的季节变化,且在极端天气(如台风)或边缘海区 (如极地)条件下难以实现,此外船载观测时人物力花 费巨大,成本较高.在过去 40 年,海色遥感技术快速 发展,具备了在大时空尺度上对生物地球化学的观测 能力[3]. 典型的海色传感器, 如中等分辨率成像光谱 仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS),空间分辨率可以达到1km;静止轨道海色传

感器(geostationary ocean color imager,GOCI)时间分辨 率可以达到1h^[4];海岸带高光谱成像仪(hyperspectral imager for the coastal ocean, HICO)光谱分辨率达到 5.7 nm,空间分辨率达到 90 m^[5]. 但是海色遥感也存 在很多缺陷:首先,遥感不是直接观测,而是通过遥感 算法计算得到,其算法的建立和验证需要大量现场观 测数据;其次,遥感只能获得海洋表层信息,无法直接 得到剖面数据;再者,海色遥感受云层影响严重,在任 何时刻,70%的海洋表面都被云层覆盖,实际得到的 有效数据较少.这种观测能力的不足制约了人们对海 洋生物地球化学过程的理解,因此还需要发展新的观 测平台.

实时地转海洋学列阵(array for real-time geostrophic oceanography, Argo) 计划是物理海洋学家于 20 世纪 末提出的一个全球海洋观测计划,通过布放3 000套剖 面浮标(也称为 Argo 浮标)组成阵列,实时观测全球 海洋上层 2 000 m 的温盐数据,以提高气候模式的模 拟与预报精度^[6-7]. Argo 计划自实施以来发展迅速,目 前每年新投放浮标达到800套以上,并维持3800套 以上正常运行的状态,每年可获得超过14万组剖面

收稿日期:2018-05-31 录用日期:2018-09-02

Citation: QIU G Q, WANG H L, XING X G. Application of BGC-Argo floats observation to ocean biogeochemistry[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2018, 57(6); 827-840. (in Chinese)



基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB954002);国家自然科学基金(41576100)

^{*} 通信作者:hwang@xmu.edu.cn

引文格式:邱国强,王海黎,邢小罡. BGC-Argo 浮标观测在海洋生物地球化学中的应用[J]. 厦门大学学报(自然科学版),2018, 57(6):827-840.



黄色阴影部分为 BGC-Argo 浮标观测尺度.



Fig. 1 Temporal-spatial scales of physical and biogeochemical processes in the ocean (modified from reference[1])

数据,提供了全球 95%的温度和盐度观测数据,极大 地丰富了海洋观测数据(图 2).随着技术发展,一些微 型、低功耗的物理、生物、化学传感器被研发出来,将 这些传感器加载到 Argo 浮标上,形成能同步观测物 理和生物地球化学参数的生物地球化学剖面浮标 (biogeochemical Argo float, BGC-Argo 浮标), 如图 3 所示,这种新型的海洋自主观测平台为海洋生物地球 化学的现场观测带来了技术上的重大飞跃[2+8].同传 统观测方式相比,BGC-Argo 浮标具有 3 个显著的优 势:1) 可以在船舶不易观测的极端海况(如台风、南极 西风带)和极端海区(极地、冰下)条件下进行自动化 观测:2) 能进行长期观测,覆盖昼夜、天气、季节以至 年际的连续时间尺度;3)具有很高的垂向分辨率,最 高可达 0.2 m. BGC-Argo 浮标同船载平台和遥感观 测手段相互补充,为物理-生物地球化学耦合研究提供 了一个重要的数据来源[2,9-11]. 截至 2018 年 3 月投放 的 BGC-Argo 浮标已经超过 600 套,仍然活跃的数量 为 314 套,主要集中在北大西洋、印度洋和南大洋区 域(图 2),虽然和仅配置物理传感器的核心 Argo 浮标 相比数量仍然较少,但应用前景广泛,是 Argo 计划的 重要组成部分和发展方向.

1 工作原理和科学目标

BGC-Argo 浮标工作原理同核心 Argo 浮标一样, 其上浮和下沉运动通过调节外部油囊体积来实现.当 油从内部油泵压入外部油囊时,浮标因浮力增大开始 上浮;反之油从外部油囊注回时,浮标开始下沉.图 3 显示了浮标的工作流程:浮标平时停留在1000 m等 密度层随深层洋流做中性漂流,达到程序设定时间后 先下沉到2000 m,然后在上升阶段观测数据,当浮标 到达海面时通过卫星将数据传回地面,然后接受新的 指令,再次下沉到1000 m,开始下一个循环.上浮速 率约10 cm/s,剖面观测时间约6 h,最高采样率可高 于0.2 m.观测深度、周期、采样率等参数都可自主设 定,并根据科学任务实时做出调整.

BGC-Argo 浮标的科学目标是为海洋生物地球化 学研究提供大量高垂向分辨率的剖面数据.除了温度 和盐度,BGC-Argo 浮标还可观测一系列生物地球化 学参数,如叶绿素 a(chlorophyll-a, Chl-a)浓度、有色 可溶性有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)荧光、溶解氧含量、硝酸盐浓度、颗粒物后向 散射系数(particulate backward scattering coefficient,





图片来源:http://www.jcommops.org.

图 2 截至 2018 年 3 月活跃的 Argo 浮标 Fig. 2 The active Argo floats at present (March, 2018)



图片来源:http://www.argo.ucsd.edu,http://www.seabird.com.

图 3 BGC-Argo 浮标的工作流程和搭载的传感器 Fig. 3 The workflow chart and sensors of BGC-Argo floats

 b_{bp})、颗粒物衰减系数(particulate beam attenuation coefficient, c_p)、下行辐照度以及 pH 等.海洋光学性 质取决于水体中光学活跃成分的浓度、粒径和种类, 同生物地球化学参数有密切联系.海洋中颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC)浓度同 c_p 和 b_{bp} 都有

很好的统计关系, c_p和 b_{bp}都可用来反演 POC 浓度^[12]. 海洋中浮游植物碳含量(phytoplankton carbon biomass, C_{phy})与海洋初级生产、碳循环、气候变化直 接相关, 其占 POC 浓度的比例在局地海区相对稳 定^[13], 因此在一阶角度上 c_p和 b_{bp}也可用于估算

C_{phy}^[14-16].基于米散射理论, b_{bp}和 c_p反映了两种不同粒 径类型颗粒,粒径较小(<1 μm)的非活性颗粒决定着 $b_{\rm bp}$,而粒径较大(>0.5 μ m)的颗粒决定着 $c_{\rm p}^{[17-18]}$,因 此在二阶角度上, b_b与 c_b的比值携带着颗粒物组分信 息^[19].溶解氧是海洋生态和生物地球化学中的一个重 要参数,可以用来研究海洋通风和环流^[20-21]、海洋新 陈代谢^[22]、海气交换^[23]、溶解氧最小值区(oxygen minimum zones, OMZs) 变异^[24]等. Chl-a、溶解氧、硝 酸盐的浓度、bbn和 cp还可用来估算海洋净初级生产力 (net primary productivity,NPP)和净群落生产力(net community production, NCP) 或输出生产力(export production, EP)^[22,25-26]. NPP 可以由基于 Chl-a 的 VGPM(vertically generalized production model)模 型^[27] 或基于 bbn 的 CbPM (carbon-based production model)模型^[13]估算.NCP可以由硝酸盐吸收率^[28]、氧 气质量平衡模型[26]或生物量累积[25]等方式估算.根 据漂流期间 c。的增长速率可以估算碳通量指数 (carbon flux index),将其与沉积物收集器数据比较, 可直接得到中深层海洋(200~1 000 m)的输出通 量^[29].光学 b_{bn}或 c_n剖面信号经常会出现较大的尖刺 (spike),这些信号与颗粒物的聚集有关,并非传统认 为的噪声,根据这些尖刺信号可以估算颗粒物的沉降 速率[30].颗粒无机碳可以由改装的透射率仪观测的双 折射信号来估算,该类型传感器在 BGC-Argo 浮标上 已有实验[31],将来技术成熟后会拓展 BGC-Argo 浮标 在海洋生物地球化学上的应用.pH 在海洋碳酸盐体 系中占据重要地位,可用于碳酸盐系统的季节变化以 及海洋酸化问题研究^[32-33].此外,BGC-Argo 浮标数据 还可用于标定与验证卫星海色遥感产品,或与遥感数 据结合建立四维时空数据库,也可用于验证与同化海 洋生物地球化学模型.

2 在季节及年际尺度过程的应用

2.1 海洋浮游植物生物光学关系及其生理状态 调整

传统上浮游植物量一直用其细胞内的 Chl-a 浓度 来表征,但是 Chl-a 浓度会随着光照、温度、营养盐等 环境因子变化,并不能很好地反映其生物量.当光照 减弱且营养盐充足时,浮游植物会增加细胞内 Chl-a 浓度来更加有效地利用光能;而当营养盐浓度降低 时,浮游植物会降低细胞内 Chl-a 浓度^[34-35].这种生理 调整导致 Chl-a 浓度与 C_{phy}的比值变化可能跨越一个 量级^[36].已有研究表明, b_{bp}和 c_p都能很好地反映 C_{phy} ^[14,16]. BGC-Argo 浮标能同步观测 Chl-a 浓度和 b_{bp} 或 c_{p} ,这为浮游植物生物光学关系及生理状态调整 的研究提供了非常好的平台.基于投放在北大西洋副 极地海区 2 套 BGC-Argo 浮标的 2 年观测数据,Xing 等^[11]发现海洋上层 Chl-a 浓度、 b_{bp} 和 c_{p} 三者之间有着 非常好的相关性,建立的生物光学关系同前人基于船 载平台观测的结果一致,在季节变化上三者都呈现冬 低夏高的趋势,并且 Chl-a 浓度与 c_{p} 的比值有明显的 光照依赖性,意味着在高纬度区域浮游植物也存在光 适应性现象.基于投放在全球海洋的 105 套 BGC-Argo 浮标观测的 8 500 组剖面数据,Barbieux 等^[37] 分析了不同深度、区域和季节 Chl-a 浓度和 b_{bp} 的关 系,结果表明在高纬度区域二者有着非常好的耦合关 系,在低纬度区域二者的关系较弱,Chl-a 浓度受到海洋 中颗粒物组成和浮游植物光适应性两方面共同调控.

2.2 浮游植物叶绿素垂向分布

研究浮游植物 Chl-a 浓度的垂向分布对估算上层 海洋辐射传输、浮游植物总生物量、初级生产力、碳循 环都有重要意义,此外,建立 Chl-a 浓度垂向分布同表 层 Chl-a 浓度的关系可以拓展遥感应用[38]. 在绝大多 数上层混合较弱的区域,Chl-a浓度的垂向分布是不 均匀的,在50~200 m 处存在一个次表层最大值 (subsurface chlorophyll maximum, SCM)^[10,39]. SCM 的形成和维持是多种机制共同作用的结果,包括表层 的营养盐限制与深层的光照限制在 SCM 深度位置达 到平衡形成的浮游植物最佳的生长环境、生理调整或 物理混合引起的浮游植物迁移或聚集、浮游植物光适 应性、浮游动物捕食等因素,其中光照和营养盐的垂 向分布是最主要的影响因素^[39]. BGC-Argo 浮标能够 测得 Chl-a 浓度剖面数据,同时光学数据 bbp 或 cp 可以 用来估算 C_{phy},还能观测浮游植物生长所需的光照和 硝酸盐浓度,得到的物理数据可以估算上层海洋的垂 向混合状态,因此 BGC-Argo 浮标非常适合浮游植物 的垂向分布研究.基于投放在太平洋副热带海区和地 中海的 4 套 BGC-Argo 浮标观测资料, Mignot 等^[10] 分析了真光层内生态动力机制,结果显示浮游植物具 有光照依赖性,在真光层底部,SCM 深度同等光照线 吻合得非常好,其季节变化主要受光驱动(light driven);在真光层上部,Chl-a浓度总是在冬季增大, 这由浮游植物本身生物量增长和生理响应共同贡献. 此外在光照较强的夏季,SCM 深度较深,接近硝酸盐 跃层,对应的 Chl-a 浓度也较高.

2.3 浮游植物藻华机制

藻华是指浮游植物在某个季节迅速增加的现象,

如北大西洋浮游植物在春季爆发,即著名的春季藻 华[40],而在低纬度区域如南海,藻华通常发生在冬 季[41]. 浮游植物藻华的发生机制到目前仍有较大争 议,主流的理论有经典的临界深度理论(critical depth hypothesis)^[40],基于临界深度理论发展出的临界湍流 层理论(critical turbulence hypothesis)^[42]和稀释再耦 合理论(dilution recoupling hypothesis)^[43].临界深度 理论的基本观点是当混合层深度浅于临界深度时,水 柱内光合作用大于呼吸作用,浮游植物发生累积,其 中,临界深度(critical depth)定义为其上方至海面的 整个水体的碳生产量与消耗量(包括浮游植物的呼吸 作用、沉降和其他消耗项)相等的深度.现场观测发 现,北大西洋春季藻华发生在水体层化之前,并不符 合混合层首先变浅的假设.临界湍流层理论认为基于 温度密度计算的混合层很深,但真正的有效混合深度 (mixing layer)可能较浅.这两种理论都是基于物理过 程(混合或对流)将营养盐带到海洋上层,进而促进浮 游植物增长.稀释再耦合理论则主要考虑了浮游动物 的捕食作用,认为冬季强烈的混合作用改变了浮游生 物在混合层内的垂向分布,打破了浮游植物-浮游动物 的耦合关系,导致浮游植物量在冬季就开始增加[43].

BGC-Argo 浮标同时搭载物理和生物光学传感器,能得到长时间序列的观测数据,便于分析浮游植物的季节变化特征.针对北大西洋春季藻华现象,于2008年在冰岛海盆投放了一套 BGC-Argo 浮标并得到了大量观测数据,发现藻华触发机制为光照增强和上层海洋层化加强,而层化主要是由涡旋引起的^[44].同样是基于 BGC-Argo 浮标的现场观测,Behrenfeld 等^[45]发现水柱积分的 Chl-a 浓度和 *b*_{bp}都是从冬季开始增大,支持稀释再耦合理论的假设.浮游植物藻华机制的争议主要源于观测数据的不充分,当搭载更多传感器(如硝酸盐、湍流)的 BGC-Argo 浮标应用后,这一问题会越来越清晰.

2.4 海洋碳循环

有机碳从上层海洋输运到深层,即生物泵过程 (biological bump),对全球碳循环和气候变化有重要 影响^[46].在稳定的海洋状态下,上层海洋的 EP 等同 于其 NCP.经过空气定标后,溶解氧平均误差可控制 在 0.1%^[47],在风速较小的低纬度海区,氧气平衡方 法为 NCP 最佳测量手段^[26].此方法需要长时间序列 的剖面数据,在海洋连续站已有着很好的应用^[48]. BGC-Argo 浮标突破了时间空间上的限制,极大地拓 展了低纬度海洋 NCP 的观测能力.Yang 等^[26]根据投 放在太平洋不同位置的 BGC-Argo 浮标估算其 NCP, 其中西北副热带区域年累积 NCP 同东太平洋结果相 近,均约为 2 mol/(m² • a),而南太平洋区域年累积 NCP 接近 0,意味着在南太平洋区域上层海洋碳输出通 量可以忽略不计;同遥感估算 NCP 相比,BGC-Argo 浮 标估算的 NCP 在北太平洋偏高,在南太平洋偏低.

2.5 海洋脱氧过程

随着全球变暖,上层海洋层化现象加强,海洋中 溶解氧呈现降低趋势,开阔大洋的脱氧作用 (deoxygenation)不断增强,OMZs范围不断扩大,且 大部分发生在北太平洋和热带海洋的温跃层以 下^[49-50].海洋脱氧加强反硝化作用,会生成温室作用 更强烈的气体 N₂O,同时硝酸盐作为呼吸作用的替代 受体也会被快速消耗,对海洋碳、氮循环和其他生物 地球化学过程产生重大影响^[8,49].模型结果表明,到 21世纪末全球海洋氧储库将降低 1%~7%^[51],对生 物地球化学过程和气候影响甚至体现在千年尺度 上^[52].通过常规船载手段观测和分析 OMZs 的变化是 非常困难的,而 BGC-Argo 浮标能同步观测溶解氧、 硝酸盐和 POC 的浓度,为海洋脱氧的研究提供了一 个非常好的平台.

2.6 海洋通风和模态水

海洋对大气强迫的响应体现在不同的时空尺度 上,在年际尺度上的响应深度可达到主温跃层以下的 中深层.在一些特殊区域(如极地海区),上层海洋因 为温度降低或盐度增大导致密度较大,通过深对流生 成中层水或模态水[53].模态水是温跃层通风的结果, 影响着海洋温盐结构、大洋径向翻转流(meridional overturning circulation, MOC)等物理过程,也影响着 海洋生物地球化学过程,如亚南极水(Subantarctic mode water, SAMW) 和 南 极 中 层 水 (Antarctic intermediate water, AAIW)极大地促进了人为排放 CO₂的吸收^[54],也是中深层水溶解氧的主要来源,调 节着 OMZs 的含氧量^[55],同时也是温跃层营养盐的主 要来源[56].除了常规的温度和盐度,一些化学参数(如 溶解氧和 CDOM)也可以用来示踪中深层水团. 2003 年投放在拉布拉多海的一套 BGC-Argo 浮标观测到 溶解氧的季节变化,在强烈通风阶段上层1400m内 溶解氧总量增加17 mol/m²,海洋如同做了一个"深呼 吸"^[20].船载观测大西洋、太平洋和印度洋的 CDOM 垂向分布结果表明,大洋径向 CDOM 垂向分布除受 生物地球化学过程(如异养活动和光漂白)影响外,主 要受到 MOC 制约,证实 CDOM 可示踪中层水团、主 温跃层、深层海洋环流^[57].在全球海洋变暖的背景下,

海洋通风和 MOC 也变得更加复杂^[58],BGC-Argo 浮标能同时观测物理(温度、盐度)和化学(溶解氧、CDOM)变量,能为研究此问题提供更为完善的现场观测数据.

3 在天气尺度或中尺度过程的应用

3.1 大气沉降过程

开阔大洋对全球海洋生产力的贡献超过 75%[59], 来自底层的营养盐并不能维持上层海洋初级生产活 动^[60],大气沉降过程包括沙尘暴和火山爆发等,是营 养盐一个非常重要的来源[61-63]. 大气沉降不仅带来了 浮游植物生长必需的营养盐,还带来了痕量元素 铁[61,64]. 铁能提高浮游植物的硝酸盐吸收效率[65], 尤 其是在高营养盐低叶绿素(high nutrient low chlorophyll,HNLC)海区加铁能极大地促进浮游植物 的生长[61]. 2001 年 4 月,投放在北太平洋的 2 套 BGC-Argo 浮标观测到沙尘暴过后上层海洋生产力增加的 现象,但是只持续了2周,比通常认为的时间要短得 多,此外 Chl-a 浓度增加了 20% 而 POC 浓度增大了 1 倍,浮游植物的光合作用效率提高很多,这是其他观 测方式很难观测到的现象[9]. 在全球变暖趋势下,上 层海洋层化加强会抑制垂向混合,降低底层营养盐对 上层的补充,大气沉降作用会逐渐显著[66].目前海洋 对大气沉降活动的响应研究主要依靠卫星遥感,船载 观测记录非常稀少,在 BGC-Argo 浮标出现之前,船 载观测甚至从未获取到大气沉降的时间序列数据. BGC-Argo 浮标具备在局地海区进行长时间连续剖面 观测的能力,且观测频率可随时调整,这种垂向连续 观测能力与灵活的观测模式将会大大增加对大气沉 降现场观测的机会,特别是可用于量化大气沉降过程 对海洋生态系统的影响深度、对垂向总生物量的影响 程度,以及影响的时间尺度.

3.2 台风过程

台风会带来强烈的垂向混合、上升流和夹卷,加深 混合层,降低海表面温度,还会引起近惯性震荡,对海洋 物质、热量和能量交换有较大影响^[67].台风把底层的营 养盐带到真光层内,可促进浮游植物光合作用,提高 了 Chl-a 浓度、NPP 和固碳能力^[68].2000 年 7 月中等 强度台风 Kai-Tak 经过南海后,表层 Chl-a 浓度增加 30 倍,大约固碳0.8 Mt,约占南海年新生产力的 2%~ 4%^[69].另一方面,很多研究发现台风并不一定引起浮 游植物增长.Hu 等^[70]发现台风 Dennis 经过墨西哥湾 北部后,在浅水区域表层 Chl-a 浓度增大,但在深水区 域表层 Chl-a 浓度几乎没有变化. Lin 等[71] 总结了西 北太平洋 2003 年全年 11 个台风的影响,发现只有 2 个台风引起了浮游植物增长,不是每个台风都能将底 层营养盐有效地输运到上层,其输运能力取决于上层 海洋的层化状态、台风强度及移动速度等,认为西北 太平洋台风对全球海洋固碳的贡献非常小. 台风对海 洋生物地球化学的影响体现在很多方面,不仅是浮游 植物,还包括上层海洋溶解无机碳[72]、海气界面气体 交换(如氧气)^[73]以及渔业资源^[74].受到观测手段限 制,对台风过程引起的生物地球化学变化的认识仍然 不够充分,尤其是台风经过时的即时响应, Argo 浮标 能在任何天气状况下工作,目前已有大量研究利用核 心 Argo 浮标数据分析台风引起的物理响应^[75-76]. 搭 载多传感器的 BGC-Argo 浮标不仅能记录台风引起 的物理响应,还能同时观测生物地球化学响应. Chacko 等^[77] 通过一个投放在孟加拉湾的 BGC-Argo 浮标观测到 2014 年热带气旋 Hudhud 过境时 Chl-a 浓度垂向分布的变化过程,发现卫星遥感观测到的表 层 Chl-a 浓度升高现象实际包含了两个同步过程: 1) 次表层 Chl-a 被混合作用夹卷到表层的物理过程, 2) 表层营养盐的补充从而促进浮游植物生长的生态 过程.随着浮标投放量的逐渐增多,未来对于台风事 件的海洋学研究将主要依赖于 BGC-Argo 浮标平台, 其海量的观测数据不仅可用于证实(或证伪)基于卫 星遥感和数值模式的研究结论,还可能发现新的海洋 学现象,从垂向分布的角度更全面地量化台风引起的 海洋生态响应,并可用于台风模型的参数优化.

3.3 中尺度涡过程

中尺度涡是海洋环流中普遍存在的现象,影响着 上层海洋的温盐结构和环流特征,通过对营养盐的垂 向输运影响着上层海洋生物地球化学过程^[78-81].基于 遥感数据分析,中尺度涡对表层 Chl-a 的影响机制可 概括为4类:涡旋抽吸(eddy pumping)、涡旋-埃克曼 抽吸(eddy-Ekman pumping)、涡旋水平输运(eddy advection)和次中尺度抽吸(sub-mesoscale pumping)^[80]. 涡旋抽吸为涡旋运动引起的内部升降流,气旋涡将底 层营养盐带入真光层促进浮游植物增长,反气旋涡则 会抑制浮游植物增长^[79],因此涡旋抽吸被认为是最重 要的动力过程,其引起的垂向流速普遍认为要高于涡 旋-埃克曼抽吸引起的流速^[81-82].涡旋水平输运由涡旋 旋转运动造成,导致表层 Chl-a 浓度分布不均勾^[78,80]. 次中尺度抽吸主要是非线性过程造成的,会引起很大 的垂向速度,对表层 Chl-a 浓度也有重要影响^[83].中 尺度涡的动力过程非常复杂,之前的大多数研究都依 赖于遥感表层的 Chl-a 浓度,缺乏必要的垂向剖面观 测,各个动力机制对生物地球化学的影响也有很大争 议. 投放在北大西洋的一套 BGC-Argo 浮标捕捉到了 一个反气旋涡,表层的 Chl-a 浓度和 bhn 只有微弱的增 加,但是垂向积分的 bhn却有着极大的增加,意味着在 这个反气旋涡中有大颗粒物向深层沉降,但是遥感观 测的表层 Chl-a 浓度几乎没有变化,这也说明只有遥 感观测时会漏掉重要的垂向信息^[84].在冬季南印度洋 副热带区域,海色遥感也经常观测到反气旋涡表层 Chl-a浓度增加现象.一套 BGC-Argo 浮标横切了一 个反气旋涡,观测获得了6周的时间序列剖面数据, 结果显示 Chl-a 浓度较高是多个动力过程共同造成 的,主要为水平输运和涡旋深部垂向对流,垂向对流 将次表层 Chl-a 带到表层,同时将底层营养盐带到上 层促进了浮游植物增长^[85].虽然 BGC-Argo 浮标能提 供高垂向分辨率的剖面数据,但单一浮标对于中尺度 过程的观测能力较为有限,主要体现在难以刻画其空 间分布,通过阵列式投放则可以在一定程度上弥补这 一不足,此外,通过与其他海洋观测平台(如生物地球化 学水下滑翔机 BGC-Glider、水下拖体 SeaSoar、海色卫星 遥感数据等)进行数据融合,将完善对中尺度过程的 观测.

4 在昼夜尺度过程的应用

光合作用是向海洋上层输入有机碳的主要过程, 昼夜尺度是其典型的时间尺度.然而,由于观测非常 消耗时间,对生物学过程如此重要的时间尺度在观测 中却经常被忽略.尽管如此,海洋光学参数和生物地 球化学参数的昼夜循环变化在海洋学界形成了共 识^[86].一些现场数据观测到,在一维物理过程为主(无 侧向平流或者生物学尺度大于平流尺度)的站点,光 学方法测得的 POC 浓度显示出明显的昼夜振荡现 象:白天增加,夜晚减少.这种 POC 浓度的昼夜振荡 可以看作是 NCP 的一个指标参数^[87],反映了海洋生 产力的昼夜变化.通过 BGC-Argo 浮标在 1 d 内多次 测量,可以定量计算这一变化率.这种高时间分辨率 的现场观测能更好地理解碳的昼夜变化过程.

5 在海色遥感和海洋模式中的应用

5.1 海色遥感产品验证

海色遥感观测的辐射和反演的生物地球化学数

据需要大量的现场观测数据来评估和验证,目前用于 海色遥感验证的现场数据大都是在船载或锚系浮标 上进行的. 锚系浮标平台虽然可以进行连续观测以 满足高采样频率的要求,增加其与卫星同步数据匹 配的可能性,但对空间的覆盖非常有限;而船载观测 虽然可以达到空间尺度的要求,但是通常覆盖的时 间尺度太短,且观测成本较高.相对于上述两种观测 方式, BGC-Argo 浮标具有明显的优势:首先, BGC-Argo 浮标可设置为卫星过境时进行观测,极大地提高 了数据匹配量:其次,BGC-Argo 浮标可以投放在任意 海区,获得各种天气条件下和各种营养水平海区的 数据,特别是在一些船舶不易到达的高纬度海区以 及远离人类活动的副热带流涡区. BGC-Argo 浮标观 测的遥感反射率同卫星观测数据在 412,443 和488 nm 波段具有良好的一致性,但在 555 nm 两者关系较 弱^[88-89].在南大洋海区,不论采用 BGC-Argo 浮标荧 光法还是船载平台高效液相色谱法(HPLC),测得的 Chl-a浓度都同遥感 OCI (ocean color index) 算法^[90] 计算的 Chl-a 浓度最为接近,证明 OCI 算法可靠性较 高^[91].随着 BGC-Argo 浮标投放量的逐渐增多,未来 可能成为验证海色遥感产品的主要数据来源.

5.2 海洋生物地球化学模式

海洋生物地球化学模型的初始化、边界条件、参 数优化与模型验证都需要现场观测数据支持.海色遥 感提供的 Chl-a 浓度是目前模型验证的重要来源^[92], 但只能进行表层数据的验证;长时间序列连续站(如 BATS 和 HOTS)可提供垂向剖面数据,但时间分辨 率通常只能达到每月1次,用于模型的建立和验证仍 显不足. BGC-Argo 浮标可观测到长时间序列的高垂 向分辨率剖面数据,非常适用于生物地球化学模型的 建立和验证.数据同化可以将数值模型和现场观测有 效地结合,弥补现场观测数据时空分辨率较低的劣 势,极大地发挥现场观测数据的价值,南大洋生物地 球化学模式 (biogeochemical Southern Ocean state estimate, B-SOSE)同化了 BGC-Argo 浮标观测的溶 解氧数据,其性能得到显著改善,如在现场观测数据 较多的区域,能很好地模拟海洋表面 CO2浓度和中层 溶解氧的变化程度^[93]. BGC-Argo 浮标观测的 Chl-a 和硝酸盐数据在生物地球化学模式中已有应用[94].

5.3 上层海洋太阳辐射增温问题

进入到海洋内部的太阳辐射大小和时空变化会 引起上层海洋垂向上的热量结构发生变化,这将会影 响到温跃层厚度和混合层深度,进而影响到上层海洋 动力过程,甚至会通过海气相互作用影响到全球气候 变化^[95-96].太阳辐射在上层海洋的穿透深度和强度受 海洋固有光学性质、云量和太阳高度等环境因素影 响^[97],在开阔大洋可以由 Chl-a浓度垂向分布确 定^[98].受全球变暖影响,低纬度海区层化加强,混合层 内营养盐浓度降低,在年际变化上表层 Chl-a浓度呈 降低趋势^[99],这就意味着更多的太阳辐射会穿透混合 层进入到次表层并对其直接增温.在夏季北极海区, 全球变暖造成陆架边缘海冰融化,由于海水的反照率 远小于海冰,进入海洋的太阳辐射会剧烈增加,同期 的浮游植物藻华造成 Chl-a浓度很高,这会将太阳辐 射能量限制在海洋上层,对海洋上层温度有显著正反 馈影响^[100].搭载辐射计的 BGC-Argo 浮标能提供水 下太阳辐射的直接观测数据,也可用来优化辐射衰减 模型.

6 南海 BGC-Argo 浮标的应用

厦门大学于 2014 年夏季在南海投放了 2 套 BGC-Argo 浮标(型号 SeaBird Navis BGCi,序列号分别为 F347 和 F348),于 2016 年 9 月在南海中央海盆再次 投放了1套 BGC-Argo 浮标(型号 NKE Provor CTS4,序列号为 XMU001b)(图 4). Navis 搭载的传 感器有 CTD(型号 SBE 41CP)、溶解氧传感器(型号 SBE 63)、荧光后向散射计(型号 MCOMS,测量 Chl-a 荧光、CDOM 荧光和 bbn),浮标常规观测周期为 3 d, 对台风或中尺度涡的观测周期调整为1 d. F347 在南 海北部海盆 SEATS 站(18°N,116°E)投放,截至 2016 年 8 月寿命终止共观测到 245 组剖面数据,F348 在南海中央海盆(14°N,116°E)投放,截至 2016 年 7 月寿命终止共观测到 241 组剖面数据,2 套剖面浮标 都得到了2年的长时间剖面观测数据. Provor 搭载的 传感器有 CTD(型号 SBE 41CP)、溶解氧传感器(型号 Aanderaa 4330)、荧光后向散射计(型号 ECO3)、水下 光谱仪(型号 OCR504)和透射率仪(型号 C-Rovor,测 量 $c_{\rm n}$),常规采样周期为 5 d,加密观测时调整为 0.25 d. XMU001b 投放在南海海盆(14.3°N,115.3°E)位置, 截至 2018 年 3 月共观测到 134 组剖面数据,预计可运 行到 2019 年 6 月.

图 5 为南海北部海盆和中央海盆位置的 Navis BGC-Argo 浮标观测的温度和 Chl-a 浓度 2 年时间序 列, Zhang 等^[101]利用这批数据分析了两区域 Chl-a 浓 度的季节变化特征及动力机制:在中央海盆,存在一 个稳定的 SCM 层,深度在 48~96 m,不存在明显季节



变化;受季风影响,混合层有着明显季节变化,冬季最 深达 67 m,但仍浅于 SCM 深度.在南海北部海盆,受 冬季季风影响显著,混合层较深,最深达到 80 m,SCM 层在冬季消失.SCM 受到营养盐跃层的影响,营养盐 跃层越浅对应的 SCM 越大.强风混合和垂向对流是 冬季表层 Chl-a浓度较高的主要物理驱动因素.南海 北部海盆比中央海盆风力更强,海表温度更低,垂向 混合和对流比中央海盆位置的大,更多的营养盐被带 到表层.同时高盐度黑潮水入侵,有利于水体垂向对 流及营养盐向上输送.风致混合、垂向对流和黑潮水 入侵等因素共同导致南海北部海盆冬季藻华现象.

Huang 等^[102]利用投放在南海中央海盆的 Navis BGC-Argo 浮标观测溶解氧数据,通过构建上层氧气 物质通量模型,计算得到海洋 NCP. 图 6(a)为高频的 NCP 日变化,总体来说,NCP 季节分布呈现东北季风 盛行时期(11-4月)大于西南季风盛行时期(6-9 月). 其中 NCP 在1月出现峰值, 而夏天出现短暂异养 状态(即 NCP 小于 0).结合 BGC-Argo 浮标观测的表 层 Chl-a 浓度和风速(图 6(b)),发现表层 Chl-a 浓度 同风速有较高的相关性(r=0.45,p<0.01),对应的 NCP同 Chl-a 浓度也有很好的相关性 (r=0.54, p <0.01),NCP 的季节变化主要与风致混合和初级生产 力密切相关,与遥感结果比较,剖面浮标估算的 NCP 与基于遥感 CbPM 算法计算的 NCP 在量值上更为接 近,而 VGPM 算法计算得到的 NCP 则低于剖面浮标 观测,但是两者季节变化趋势一致(r = 0.66, p <0.01)(图 6(c)). 南海中央海盆全年的 NPP 是(2.7± 1.0) mol/(m² • a)(m(C): m(O) = 1.45), 说明寡 营养的海盆虽然出现自养和异养的变化,但是从全年 尺度看仍是个显著的自养系统,这也是南海首次观测



图 5 Navis 观测的南海北部海盆(F347,2014 年 7 月—2016 年 8 月)和南海中央海盆 (F348,2014 年 7 月—2016 年 7 月)温度及 Chl-a 浓度的时间序列

Fig. 5 Time series of temperature and Chl-a concentration observed by Navis floats in the northern (F347, July 2014 to August 2016) and central basins (F348, July 2014 to July 2016) of the South China Sea





Fig. 6 Major daily oxygen fluxes (a), daily Chl-a concentration and wind speed (b), and comparison of monthly cumulative NCP estimated from BGC-Argo float and satellite platform (c) from July 2014 to July 2015(modified from reference[102])

到的高时间分辨率、长时间序列的 NCP 数据,揭示了 BGC-Argo 浮标在南海生物地球化学过程研究中有着 很高的应用价值.

7 展 望

作为一种新的综合性海洋观测工具,BGC-Argo 浮标具有广泛的应用前景,不仅可用于海色遥感卫星 的定标与验证、生物光学算法的改进,而且大大提高 了各种生物地球化学参数的观测能力,可以深入到一 些之前的观测模式无法触及的或关键时间尺度上的 生物地球化学过程.未来的海洋观测将在很大程度上 依靠自动化和远程控制技术.BGC-Argo 浮标将对海 洋的观测能力提升到一个新的高度:从昼夜循环到年 际尺度,从局地海域到全球分布,从海表面到垂向变 化,从物理参数到各种生物地球化学变量,从而构建 起一个综合性的海洋观测数据库.

参考文献:

- [1] DICKEY T D. Emerging ocean observations for interdisciplinary data assimilation systems[J]. Journal of Marine Systems,2003,40(53):5-48.
- [2] 邢小罡,赵冬至,CLAUSTRE H,等. 一种新的海洋生物 地球化学自主观测平台:Bio-Argo 浮标[J]. 海洋环境科 学,2012(5):733-739.
- [3] MCCLAIN C R. A decade of satellite ocean color observations[J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1: 19-42.
- WANG M, AHN J H, JIANG L, et al. Ocean color products from the Korean geostationary ocean color imager (GOCI)
 [J]. Optics Express, 2013, 21(3):3835-3849.
- [5] LUCKE R L, CORSON M, MCGLOTHLIN N R, et al. Hyperspectral imager for the coastal ocean: instrument description and first images[J]. Applied Optics, 2011, 50 (11):1501-1516.
- [6] ROEMMICH D, RISER S, DAVIS R, et al. Autonomous profiling floats: workhorse for broad-scale ocean observations[J]. Mar Technol Soc J, 2004, 38(2):21-29.
- [7] 许建平,朱伯康. ARGO 全球海洋观测网与我国海洋监测 技术的发展[J]. 海洋技术,2001,20(2):15-17.
- [8] JOHNSON K S, BERELSON W M, BOSS E, et al. Observing biogeochemical cycles at global scales with profiling floats and gliders: prospects for a global array [J]. Oceanography, 2009, 22(3): 216-225.
- [9] BISHOP J K B, DAVIS R E, SHERMAN J T. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon

biomass in the North Pacific [J]. Science, 2002, 298 (5594):817-821.

- [10] MIGNOT A, CLAUSTRE H, UITZ J, et al. Understanding the seasonal dynamics of phytoplankton biomass and the deep chlorophyll maximum in oligotrophic environments: a Bio-Argo float investigation[J]. Glob Biogeochem Cycle, 2014,28(8):856-876.
- [11] XING X, CLAUSTRE H, UITZ J, et al. Seasonal variations of bio-optical properties and their interrelationships observed by Bio-Argo floats in the subpolar North Atlantic[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014,119(10):7372-7388.
- [12] STRAMSKI D, REYNOLDS R A, BABIN M, et al. Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans[J]. Biogeosciences,2008,5(1):171-201.
- [13] BEHRENFELD M J, BOSS E, SIEGEL D A, et al. Carbon-based ocean productivity and phytoplankton physiology from space [J]. Glob Biogeochem Cycle, 2005,19(1):GB1006.
- [14] GRAFF J R, WESTBERRY T K, MILLIGAN A J, et al. Analytical phytoplankton carbon measurements spanning diverse ecosystems[J]. Deep-Sea Research Part I,2015,102:16-25.
- [15] MARTINEZ-VICENTE V, DALL'OLMO G, TARRAN G, et al. Optical backscattering is correlated with phytoplankton carbon across the Atlantic Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(6):1154-1158.
- [16] BEHRENFELD M J, BOSS E. The beam attenuation to chlorophyll ratio: an optical index of phytoplankton physiology in the surface ocean? [J]. Deep-Sea Research Part I, 2003, 50(12): 1537-1549.
- [17] MOREL A, AHN Y H. Optics of heterotrophic nanoflagellates and ciliates: a tentative assessment of their scattering role in oceanic waters compared to those of bacterial and algal cells[J]. Journal of Marine Research, 1991,49(1):177-202.
- [18] STRAMSKI D, KIEFER D A. Light scattering by microorganisms in the open ocean [J]. Progress in Oceanography, 1991, 28(4): 343-383.
- [19] TWARDOWSKI M S, BOSS E, MACDONALD J B, et al. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2001,106(C7):14129-14142.

[20] KÖRTZINGER A, SCHIMANSKI J, SEND U, et al.

The ocean takes a deep breath [J]. Science, 2004, 306 (5700):1337.

- [21] CZESCHEL R, STRAMMA L, WELLER R A, et al. Circulation, eddies, oxygen, and nutrient changes in the eastern tropical South Pacific Ocean[J]. Ocean Science, 2015,11(3):455-470.
- [22] MARTZ T R, JOHNSON K S, RISER S C. Ocean metabolism observed with oxygen sensors on profiling floats in the South Pacific[J]. Limnology and Oceanography,2008,53:2094-2111.
- [23] KIHM C, KÖRTZINGER A. Air-sea gas transfer velocity for oxygen derived from float data [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115; C12003.
- [24] ULLOA O, CANFIELD D E, DELONG E F, et al. Microbial oceanography of anoxic oxygen minimum zones[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2012, 109 (40): 15996-16003.
- [25] BOSS E, BEHRENFELD M. In situ evaluation of the initiation of the North Atlantic phytoplankton bloom [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37:L18603.
- [26] YANG B. EMERSON S R. BUSHINSKY S M. Annual net community production in the subtropical Pacific Ocean from *in situ* oxygen measurements on profiling floats[J]. Glob Biogeochem Cycle, 2017, 31(4):728-744.
- [27] BEHRENFELD M J, FALKOWSKI P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models[J]. Limnology and Oceanography, 1997, 42(7):1479-1491.
- [28] MACCREADY P, QUAY P. Biological export flux in the Southern Ocean estimated from a climatological nitrate budget[J]. Deep-Sea Research Part II, 2001, 48 (19/20):4299-4322.
- [29] BISHOP J K B, WOOD T J, DAVIS R E, et al. Robotic observations of enhanced carbon biomass and export at 55°S during SOFeX [J]. Science, 2004, 304 (5669): 417-420.
- [30] BRIGGS N, PERRY M J, CETINIĆ I, et al. Highresolution observations of aggregate flux during a subpolar North Atlantic spring bloom [J]. Deep-Sea Research Part I,2011,58(10):1031-1039.
- BISHOP J K B. Autonomous observations of the ocean biological carbon pump[J]. Oceanography, 2009, 22(2): 182-193.
- [32] WILLIAMS N L, JURANEK L W, FEELY R A, et al. Calculating surface ocean pCO₂ from biogeochemical Argo floats equipped with pH: an uncertainty analysis [J]. Glob Biogeochem Cycle, 2017, 31(3):591-604.
- [33] WILLIAMS N L, JURANEK L W, JOHNSON K S, et al. Empirical algorithms to estimate water column pH in

the Southern Ocean[J]. Geophysical Research Letters, 2016,43(7):3415-3422.

- [34] FALKOWSKI P G, LAROCHE J. Acclimation to spectral irradiance in algae[J]. Journal of Phycology, 1991,27(1):8-14.
- [35] HALSEY K H, MILLIGAN A J, BEHRENFELD M J. Physiological optimization underlies growth rateindependent chlorophyll-specific gross and net primary production[J]. Photosynthesis Research, 2010, 103(2): 125-137.
- [36] SIEGEL D A, BEHRENFELD M J, MARITORENA S, et al. Regional to global assessments of phytoplankton dynamics from the SeaWiFS mission[J]. Remote Sens Environ, 2013, 135:77-91.
- [37] BARBIEUX M, UITZ J, BRICAUD A, et al. Assessing the variability in the relationship between the particulate backscattering coefficient and the chlorophyll a concentration from a global biogeochemical-Argo database[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018,123(2):1229-1250.
- [38] UITZ J, CLAUSTRE H, MOREL A, et al. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: an assessment based on surface chlorophyll[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2006, 111: C08005.
- [39] CULLEN J J. Subsurface chlorophyll maximum layers: enduring enigma or mystery solved? [J]. Annual Review of Marine Science, 2015,7(1):207-239.
- [40] SVERDRUP H U. On Conditions for the vernal blooming of phytoplankton[J]. Journal du Conseil, 1953, 18(3): 287-295.
- [41] NING X, CHAI F, XUE H, et al. Physical-biological oceanographic coupling influencing phytoplankton and primary production in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109; C10005.
- [42] TAYLOR J R, FERRARI R. Shutdown of turbulent convection as a new criterion for the onset of spring phytoplankton blooms [J]. Limnology and Oceanography,2011,56(6):2293-2307.
- [43] BEHRENFELD M J. Abandoning Sverdrup's critical depth hypothesis on phytoplankton blooms[J]. Ecology, 2010,91(4):977-989.
- [44] MAHADEVAN A, D' ASARO E, LEE C, et al. Eddydriven stratification initiates North Atlantic spring phytoplankton blooms [J]. Science, 2012, 337 (6090): 54-58.
- [45] BEHRENFELD M J, DONEY S C, LIMA I, et al. Annual cycles of ecological disturbance and recovery

underlying the subarctic Atlantic spring plankton bloom [J]. Glob Biogeochem Cycle, 2013, 27(2): 526-540.

- [46] LONGHURST A R,GLEN HARRISON W. The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean[J]. Progress in Oceanography, 1989, 22(1):47-123.
- [47] BUSHINSKY S M, EMERSON S R, RISER S C, et al. Accurate oxygen measurements on modified Argo floats using *in situ* air calibrations[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2016, 14(8):491-505.
- [48] EMERSON S. Annual net community production and the biological carbon flux in the ocean [J]. Glob Biogeochem Cycle, 2014, 28(1):14-28.
- [49] KEELING R F,KORTZINGER A,GRUBER N. Ocean deoxygenation in a warming world[J]. Annual Review of Marine Science,2010,2:199-229.
- [50] STRAMMA L, JOHNSON G C, SPRINTALL J, et al. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans
 [J]. Science, 2008, 320(5876):655-658.
- [51] OSCHLIES A, SCHULZ K G, RIEBESELL U, et al. Simulated 21st century's increase in oceanic suboxia by CO₂-enhanced biotic carbon export[J]. Glob Biogeochem Cycle,2008,22(4):GB4008.
- [52] ALTABET M A, HIGGINSON M J, MURRAY D W. The effect of millennial-scale changes in Arabian Sea denitrification on atmospheric CO₂[J]. Nature, 2002, 415 (6868):159-162.
- [53] SUGA T, AOKI Y, SAITO H, et al. Ventilation of the North Pacific subtropical pycnocline and mode water formation[J]. Progress in Oceanography, 2008, 77(4): 285-297.
- [54] SABINE C L, FEELY R A, GRUBER N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO₂ [J]. Science, 2004, 305(5682):367-371.
- [55] MEISSNER K J, GALBRAITH E D, VOLKER C. Denitrification under glacial and interglacial conditions:a physical approach[J]. Paleoceanography, 2005, 20(3): PA3001.
- [56] SARMIENTO J L, GRUBER N, BRZEZINSKI M A, et al. High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity[J]. Nature, 2004, 427 (6969):56-60.
- [57] NELSON N B, SIEGEL D A, CARLSON C A, et al. Tracing global biogeochemical cycles and meridional overturning circulation using chromophoric dissolved organic matter[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(3):L03610.
- [58] LOZIER M S, ROUSSENOV V, REED M S C, et al. http://jxmu.xmu.edu.cn

Opposing decadal changes for the North Atlantic meridional overturning circulation [J]. Nature Geoscience,2010,3(10):728-734.

- [59] PAULY D, CHRISTENSEN V. Primary production required to sustain global fisheries[J]. Nature, 1995, 374 (6519):255-257.
- [60] MCGILLICUDDY D J, ROBINSON A R. Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea [J]. Deep-Sea Research Part I, 1997, 44(8):1427-1450.
- [61] MARTIN J H, GORDON R M. Northeast Pacific iron distributions in relation to phytoplankton productivity
 [J]. Deep-Sea Research Part A,1988,35(2):177-196.
- [62] LIN I I, HU C, LI Y H, et al. Fertilization potential of volcanic dust in the low-nutrient low-chlorophyll western North Pacific subtropical gyre:satellite evidence and laboratory study[J]. Glob Biogeochem Cycle, 2011, 25(1):GB1006.
- [63] LANGMANN B,ZAKSEK K,HORT M, et al. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010,10(8):3891-3899.
- [64] DUARTE C M, DACHS J, LLABRES M, et al. Aerosol inputs enhance new production in the subtropical northeast Atlantic[J]. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences, 2006, 111: G04006.
- [65] TIMMERMANS K R, STOLTE W, DEBAAR H J W. Iron-mediated effects on nitrate reductase in marine phytoplankton [J]. Marine Biology, 1994, 121 (2): 389-396.
- [66] BOPP L,LEVY M,RESPLANDY L,et al. Pathways of anthropogenic carbon subduction in the global ocean[J]. Geophysical Research Letters,2015,42(15):6416-6423.
- [67] PRICE J F. Upper ocean response to a hurricane[J]. Journal of Physical Oceanography, 1981, 11 (2): 153-175.
- [68] SISWANTO E, MORIMOTO A, KOJIMA S. Enhancement of phytoplankton primary productivity in the southern East China Sea following episodic typhoon passage[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(11): L11603.
- [69] 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.
- [70] HU C, MULLER-KARGER F E. Response of sea surface properties to Hurricane Dennis in the eastern Gulf of Mexico[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(7): L07606.
- [71] LIN I I. Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North

Pacific subtropical ocean [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117: C03039.

- [72] SUN Q Y, TANG D L, LEGENDRE L, et al. Enhanced sea-air CO₂ exchange influenced by a tropical depression in the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(10):6792-6804.
- [73] LIN J, TANG D, ALPERS W, et al. Response of dissolved oxygen and related marine ecological parameters to a tropical cyclone in the South China Sea[J]. Advances in Space Research, 2014, 53(7):1081-1091.
- [74] YU J, TANG D L, CHEN G B, et al. The positive effects of typhoons on the fish CPUE in the South China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2014, 84:1-12.
- [75] LIN I I, WU C C, PUN I F, et al. Upper-ocean thermal structure and the western north pacific category 5 typhoons. Part I: ocean features and the category 5 typhoons' intensification[J]. Monthly Weather Review, 2008,136(9):3288-3306.
- [76] PARK J J, KWON Y O, PRICE J F. Argo array observation of ocean heat content changes induced by tropical cyclones in the North Pacific [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116; C12025.
- [77] CHACKO N. Chlorophyll bloom in response to tropical cyclone Hudhud in the Bay of Bengal: Bio-Argo subsurface observations[J]. Deep-Sea Research Part I, 2017,124:66-72.
- [78] CHELTON D B, GAUBE P, SCHLAX M G, et al. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll [J]. Science, 2011, 334 (6054): 328-332.
- [79] MCGILLICUDDY D J, ROBINSON A R, SIEGEL D A, et al. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea[J]. Nature, 1998, 394(6690):263-266.
- [80] SIEGEL D A, PETERSON P, MCGILLICUDDY D J, et al. Bio-optical footprints created by mesoscale eddies in the Sargasso Sea [J]. Geophysical Research Letters, 2011,38(13):L13608.
- [81] GAUBE P, CHELTON D B, STRUTTON P G, et al. Satellite observations of chlorophyll, phytoplankton biomass, and Ekman pumping in nonlinear mesoscale eddies[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013,118(12):6349-6370.
- [82] GAUBE P, CHELTON D B, SAMELSON R M, et al. Satellite observations of mesoscale eddy-induced Ekman pumping[J]. Journal of Physical Oceanography, 2015, 45 (1):104-132.
- [83] LEVY M, FERRARI R, FRANKS P J S, et al. Bringing physics to life at the submesoscale [J]. Geophysical

Research Letters, 2012, 39: L14602.

- [84] BOSS E, SWIFT D, TAYLOR L, et al. Observations of pigment and particle distributions in the western North Atlantic from an autonomous float and ocean color satellite[J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(5): 2112-2122.
- [85] DUFOIS F, HARDMAN-MOUNTFORD N J, FERNA-NDES M, et al. Observational insights into chlorophyll distributions of subtropical South Indian Ocean eddies [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44 (7): 3255-3264.
- [86] CLAUSTRE H, MOREL A, BABIN M, et al. Variability in particle attenuation and chlorophyll fluorescence in the tropical Pacific: scales, patterns, and biogeochemical implications [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104 (C2): 3401-3422.
- [87] CLAUSTRE H, HUOT Y, OBERNOSTERER I, et al. Gross community production and metabolic balance in the South Pacific Gyre, using a non intrusive bio-optical method[J]. Biogeosciences, 2008, 5(2): 463-474.
- [88] GERBI G P, BOSS E, WERDELL P J, et al. Validation of ocean color remote sensing reflectance using autonomous floats[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2016, 33(11):2331-2352.
- [89] WOJTASIEWICZ B, HARDMAN-MOUNTFORD N J, ANTOINE D, et al. Use of bio-optical profiling float data in validation of ocean colour satellite products in a remote ocean region [J]. Remote Sens Environ, 2018, 209:275-290.
- [90] HU C, LEE Z, FRANZ B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on threeband reflectance difference [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2012, 117: C01011.
- [91] HAËNTJENS N, BOSS E, TALLEY L D. Revisiting ocean color algorithms for chlorophyll a and particulate organic carbon in the Southern Ocean using biogeochemical floats [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans,2017,122(8):6583-6593.
- [92] DONEY S C, LIMA I, MOORE J K, et al. Skill metrics for confronting global upper ocean ecosystem-biogeochemistry models against field and remote sensing data[J]. Journal of Marine Systems, 2009, 76(1):95-112.
- [93] VERDY A, MAZLOFF M R. A data assimilating model for estimating Southern Ocean biogeochemistry [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(9): 6968-6988.
- [94] COSSARINI G, D'ORTENZIO F, MARIOTTI L, et al. Development of a multi-data assimilation scheme to

integrate Bio-Argo floats data with ocean colour satellite data into the CMEMS MFC-Biogeochemistry[C]//EGU General Assembly Conference, [S. l.]:EGU,2017.

- [95] CHANG G C, DICKEY T D. Coastal ocean optical influences on solar transmission and radiant heating rate [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109:C01020.
- [96] MURTUGUDDE R, BEAUCHAMP J, MCCLAIN C R, et al. Effects of penetrative radiation on the upper tropical ocean circulation[J]. Journal of Climate, 2002, 15(5):470-486.
- [97] OHLMANN J C, SIEGEL D A. Ocean radiant heating. Part II: parameterizing solar radiation transmission through the upper ocean [J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30(8):1849-1865.
- [98] MOREL A, HUOT Y, GENTILI B, et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective

of a multi-sensor approach [J]. Remote Sens Environ, 2007,111(1):69-88.

- [99] GREGG W W, CASEY N W, MCCLAIN C R. Recent trends in global ocean chlorophyll [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32:L03606.
- [100] LENGAIGNE M, MADEC G, BOPP L, et al. Biophysical feedbacks in the Arctic Ocean using an earth system model[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36:L21602.
- [101] ZHANG W Z, WANG H, CHAI F, et al. Physical drivers of chlorophyll variability in the open South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 121(9): 7123-7140.
- [102] HUANG Y, YANG B, CHEN B, et al. Net community production in the South China Sea Basin estimated from in situ O₂ measurements on an Argo profiling float[J]. Deep-Sea Research Part I,2018,131:54-61.

Application of BGC-Argo Floats Observation to Ocean Biogeochemistry

QIU Guoqiang¹, WANG Haili^{1*}, XING Xiaogang²

(1. State Key Laboratory of Marine Environment Science (Xiamen University), Xiamen 361102, China;
2. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics,
Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Ocean biogeochemical research has been limited by insufficient observation data for a long time. With the development of technology, the biogeochemical Argo (BGC-Argo) floats bring evolutionary change to ocean observation, through equipping diverse physical, biological, and chemical sensors on Argo floats. Thanks to its capability of autonomous profiling observation in the open ocean, BGC-Argo floats cover continuous temporal scales (from diurnal, seasonal, to interannual). Through an array deployment, BGC-Argo floats would cover continuous spatial scales (from sub-meso, meso, basin, to global). With high vertical resolution, BGC-Argo floats not only supplement the data gap between ship-based and satellite-based platforms, but also provide large amounts of data that have contributed to various biogeochemical research, and further understanding, comprehension and prediction of ocean biogeochemical cycles, biological pumping and ecosystems. This paper reviews the backgrounds, scientific objectives, and application studies of BGC-Argo floats, and especially its application in the South China Sea.

Key words: BGC-Argo floats; biogeochemistry; ocean optics; ocean observation