

Bio-Argo 浮标观测北大西洋色素与颗粒物的季节分布^①

邢小罡^{②*} 邱国强^{**} 王海黎^{③**}

(* 中国海洋大学 物理海洋教育部重点实验室 青岛 266003)

(** 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门 361005)

摘 要 通过一台 Bio-Argo 浮标在北大西洋(冰岛附近)运行近 2 年(2008 年 6 月 - 2010 年 5 月)获得的观测数据,分析与研究了该海区叶绿素 a 浓度([Chla])、颗粒物后向散射($b_{bp}(532)$)和光束衰减系数($c_p(660)$)的季节变化及其生物光学关系。研究表明,北大西洋生物光学参量存在明显夏高冬低的季节分布,其中表层 [Chla] 最高超过 2mg m^{-3} ,最低仅为 0.05mg m^{-3} ; $c_p(660)$ 的季节变化更明显,幅度超过 2 个数量级; $b_{bp}(532)$ 则存在一个明显的背景值,约为 0.00065 m^{-1} ,可能是一种非藻类颗粒物的存在或是来源于仪器的测量误差; [Chla]、 $c_p(660)$ 以及 $b_{bp}(532)$ 之间均呈良好的指数相关关系,但在后向散射的高值区 ($>0.004\text{ m}^{-1}$),生物光学关系减弱,可能是由于北大西洋的夏季浮游植物种群的变化。

关键词 Bio-Argo 浮标,北大西洋,叶绿素 a 浓度,颗粒物后向散射系数,颗粒物光束衰减系数

0 引 言

自然水体中颗粒物的固有光学特性 (inherent optical properties, IOPs) 及其与叶绿素 a 浓度 ([Chla]) 之间的生物光学关系,一直是过去 30 年海洋光学与水色遥感科学的研究热点^[1-8]。浮游植物是海洋生态系统的重要初级生产者,叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,也是表征浮游植物生物量的重要指标^[9]和估算海洋初级生产力的必要参数^[10]。自然水体中颗粒物的固有光学量与叶绿素 a 浓度的现场观测可为海洋生态学、生物地球化学以及全球碳循环的研究提供重要信息。对现场观测数据进行深入分析,发现新的海洋现象,深入理解海洋生态过程与生物地球化学过程将是未来的研究热点。本研究利用 Bio-Argo 浮标在北大西洋海区进行观测获得的数据,详细分析了颗粒物与色素的垂向与季节分布及其生物光学关系,取得了有意义的结果。

1 研究背景

自然水体中颗粒物的固有光学特性主要包括吸收系数 (absorption coefficient, a)、散射系数 (scattering coefficient, b)、光束衰减系数 (beam attenuation coefficient, c) 以及后向散射系数 (particulate back-scattering coefficient, b_b)。其中,颗粒物的光束衰减系数 c_p 在海洋生物光学上通常作为颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 的替代性参数,通过 c_p 反演得到 POC 浓度的生物光学算法已经成为现场观测 POC 的主要途径^[11-13];而海洋水色则主要由后向散射系数来决定,它是半分析遥感算法的重要反演产品,也是卫星遥感 POC 算法的主要参数^[14-16]。

然而,目前海洋光学的现场观测大都依赖于船载走航和锚系浮标的传统方式。船载走航数据虽能覆盖一定海区,但其时间分辨率明显不足;锚系浮标虽能进行长期连续观测,但缺乏空间分辨率。在过

① 国家自然科学基金(41206028,41076114,41023007),近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学)访问学者基金(MELRS1220)和海洋公益性行业科研专项(201005030)资助项目。

② 男,1982 年生,博士,副教授;研究方向:海洋光学,水色遥感,海洋生物地球化学;E-mail: xing@ouc.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: hwang@xmu.edu.cn

(收稿日期:2013-04-01)

去 20 年的时间里,遥感技术的发展和水质卫星的出现已大大提升了我们在大时空尺度上对生物光学参数的观测能力^[16,17],但其观测深度仅局限于海表面,且有效观测数据受云层和光照的影响很大。在云量较多的海域和冬季的高纬度海区,其时空分辨率都大大降低了。

最近,一种新型的海洋自主观测平台——生物光学剖面浮标(Bio-Argo)的出现,为海洋光学和生物地球化学的现场观测带来了革命性的技术飞跃。它可以在大洋水体中进行长期的自动化观测,覆盖从昼夜、到季节以至年际的连续时间尺度,且具有很高的垂向分辨率,不仅有效解决了传统观测方式长期存在的采样过疏与时空分辨率不足的问题,而且它获得的数据也是卫星遥感数据的必要补充^[18,19]。

本研究的目的是,通过一台在北大西洋海域工作近两年的 Bio-Argo 浮标观测的生物光学数据,细致描述该海区叶绿素 a 浓度以及颗粒物后向散射系数和光束衰减系数的垂向分布、季节变化,特别是研究各生物光学参数之间的关系,以揭示其生物地球化学规律。此外,还将结合浮标数据简要讨论北大西洋春季藻华的发生机制。

2 材料与方法

2008 年 6 月,法国滨海自由城海洋学实验室(Laboratoire d’océanographie de Villefranche, France)在北大西洋冰岛南部投放了一台 Bio-Argo 浮标(编号“NAT_IB_B03”),在 2 年时间内(于 2010 年 5 月结束观测)共采集了 123 组水文与生物光学剖面数据^[19],每 4~10d 观测一次,水文参数自 1000m 处、生物光学参数自 400m 处开始观测至海表面,垂向分辨率 1m。浮标运行轨迹及观测位置如图 1 所示。首次观测位置位于冰岛南部(20°S,59°N),该浮标在冰岛海盆(Iceland Basin)停留大约 1 年时间,于

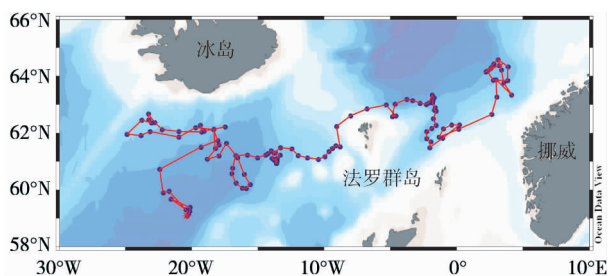


图 1 用于本文研究的 Bio-Argo 浮标在北大西洋(冰岛附近)运行轨迹和观测位置

2009 年 5 月开始随流向东北方向移动,8 月自法罗群岛(Faroe Islands)北部进入挪威海,并在挪威海又观测了近 1 年的时间。

该浮标上携带有美国 Wetlabs 公司生产的 Eco-Puck 传感器(用于观测叶绿素 a 荧光、黄色物质荧光与 532nm 后向散射系数)和 C-Rover 透射计(用于观测 660nm 光束衰减系数)以及加拿大 Satlantic 公司生产的 OC4 辐射计(用于观测 412、490、555nm 下行辐照度)。

叶绿素荧光数据首先经过偏移校正(offset correction),偏移量取为每次剖面观测的最小值(一般出现在 350~400m),再经过淬灭校正(用以校正海表面叶绿素荧光的淬灭效应)^[20],最后通过协同处理(combined treatment)方法校正为叶绿素 a 浓度([Chla],单位 mg m^{-3})^[21]。660nm 光束衰减系数也需进行偏移校正,同时去除了纯海水的衰减系数(常数)和(由于颗粒物沉降在传感器表面而产生的)仪器观测误差,得到颗粒物衰减系数($c_p(660)$,单位 m^{-1})。此外,混合层深度(Mixed Layer Depth, MLD)通过密度剖面计算。为去除海洋表层(<10m)密度的昼夜波动,以 10m 处的密度值作为参考值,密度增加的阈值选择为 0.03kg m^{-3} ^[22]。

3 结果与分析

3.1 叶绿素与颗粒物的季节变化

在 Bio-Argo 浮标出现之前,在大洋一类水体中进行生物光学参数的季节变化研究非常稀少,利用船载平台的观测方式仅能在短时间(1~2 周)内进行连续剖面观测,缺乏季节性变化特征^[23];月航次观测数据虽然可用于研究季节尺度的研究,但观测数据离散,难以细致描绘生物光学参数的变化过程^[8]。2004 年,Boss 等^[24,25]首次通过一台 Bio-Argo 浮标在西北大西洋(30~50°S,45~55°N)长期观测了[Chla]与 $b_{bp}(440)$ 的季节变化,本文所用的 Bio-Argo 浮标在观测参数上又有所丰富,增加了更适用于表征颗粒有机碳(POC)含量的 $c_p(660)$ 数据。

叶绿素 a 浓度[Chla]、颗粒物后向散射系数 $b_{bp}(532)$ 、颗粒物光束衰减系数 $c_p(660)$ 的垂向与季节变化如图 2 所示,其中黑色实线代表混合层深度 MLD。从图中可以看出,三种生物光学参数的变化趋势是一致的:从垂向分布来看,观测值都在表层最高,混合层内一般变化不大,而在混合层之下迅速降低;从季节变化来看,夏季(6~9 月)混合层最浅

($<50\text{m}$), 生物光学量较高, 冬季(1–3月)混合层最深, 生物光学量达到全年最低值, 特别是在 2008

年 12 月–2009 年 3 月间, 混合层深度已超过生物光学剖面的最大观测深度(400m)。

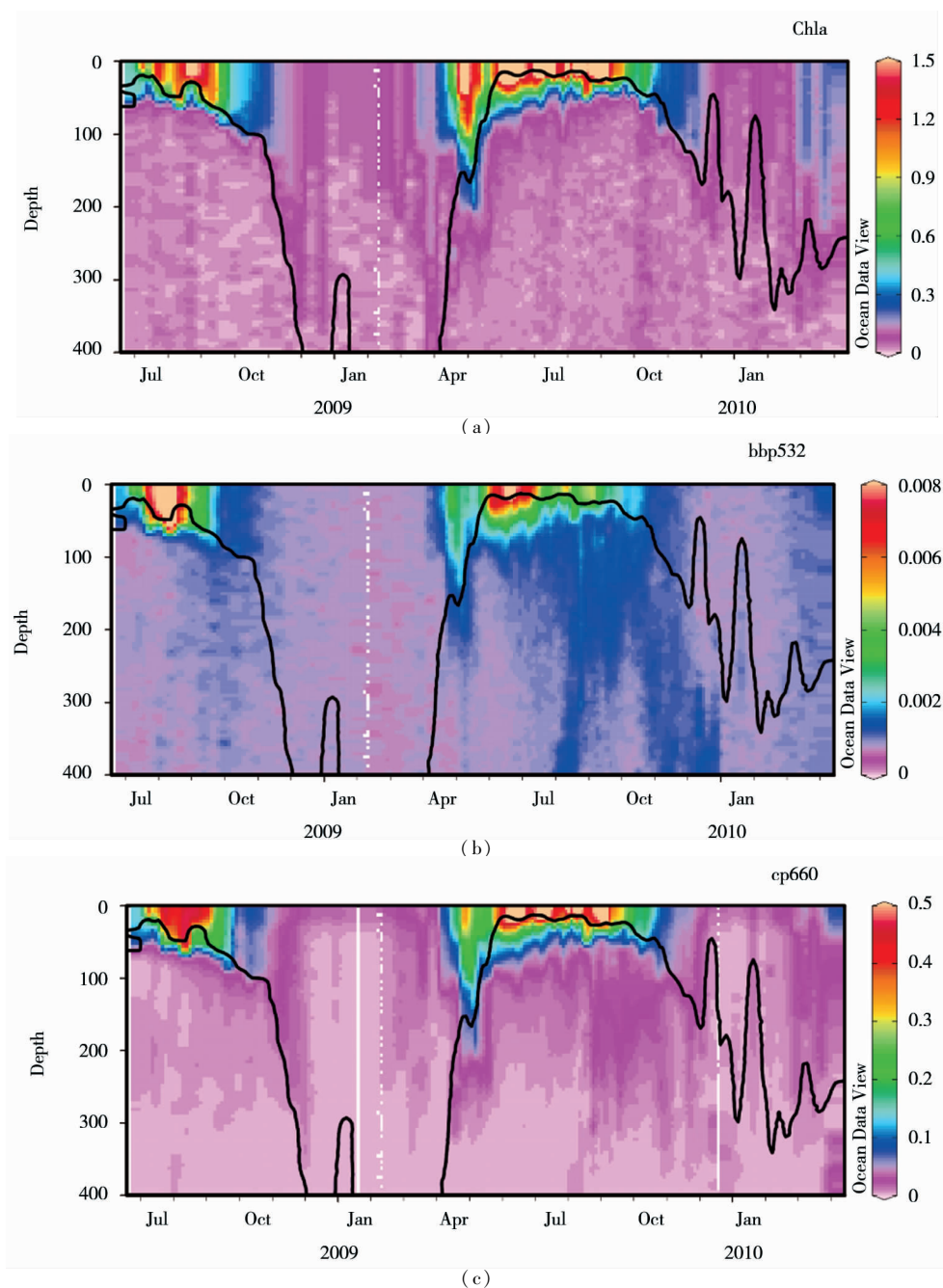


图 2 叶绿素 a 浓度(单位 mg m^{-3}) (a) 532nm 颗粒物后向散射系数(单位 m^{-1}) (b) 和 660nm 颗粒物光束衰减系数(单位 m^{-1}) (c) 的时间序列(图中黑线代表混合层深度)

虽然三种生物光学参量的垂向分布特征与季节变化趋势是基本一致的,但也存在一些细微的差别。例如,在 2008 年夏季,混合层内的 $[\text{Chla}]$ 和 $c_p(660)$ 在 7–9 月份均很高,但 $b_{bp}(532)$ 仅在 8 月份较高,9 月份即开始下降;由于强烈的混合作用,冬季混合层内的 $[\text{Chla}]$ 和 $b_{bp}(532)$ 基本达到均一分布,但表层 $c_p(660)$ 则明显高于深层值;从 2009 年 4 月开始,北

大西洋进入春季藻华期,此时混合层内 $[\text{Chla}]$ 和 $c_p(660)$ 显著增加, $b_{bp}(532)$ 虽亦有增长,但增幅并不明显,到 6 月才开始大幅增加;与 2008 年的情况相同, $b_{bp}(532)$ 似乎比 $[\text{Chla}]$ 和 $c_p(660)$ 的藻华期要短一些,7 月即开始降低,而 $[\text{Chla}]$ 和 $c_p(660)$ 的高值则持续到 9 月。

由于三种生物光学参量在混合层内基本均一的

分布特征,图 3 显示了混合层内的平均值与表层值的时间序列(表层值取为 10m 内的平均值,下标用 surf 表示;混合层平均值下标用 ML 表示),这里为显示方便,将 $b_{bp}(532)$ 的数值放大了 10 倍。为去除中尺度过程的影响和某些观测误差,图中所有混合层平均值和表层值都经过了 3 点移动平均滤波处理。此外,混合层深度也经过滤波处理并绘制在图 3(a)中。可以看出,混合层深度在 2 月达到最深,其中 2009 年 2 月混合层深度(MLD)甚至超过 600m,2010 年 2 月也达到 300m,最大混合层的差别主要来源于海区差异,2009 年 2 月浮标尚停留在冰岛海盆,而 1 年之后已进入挪威海。然而,对于生物光学参量的混合层平均值,这种海区的差异很小。从变化趋势来看, $[Chla]_{ML}$ 和 $c_p(660)_{ML}$ 更为相似:

两者均从 2008 年 9 月开始降低,直至 2009 年 1 月达到最低值(叶绿素 a 浓度约为 0.025mg m^{-3} ,衰减系数约为 0.0025m^{-1}),降幅约为 2 个数量级;随后立即增长,在 4 月出现一个爆发期,一个月内就增长了大约 10 倍;5 月末 6 月初,衰减系数又有一次显著增加,而叶绿素的增长不大;从 6 月至 8 月的 3 个月间, $[Chla]_{ML}$ 和 $c_p(660)_{ML}$ 未见明显变化,直到 9 月开始出现生物量的消退,从 9 月至 1 月间叶绿素 a 浓度与衰减系数持续减小,降幅超过 2 个数量级,最终在 1 月达到全年最低,完成一次季节性循环。与叶绿素 a 浓度和衰减系数的大幅升降相比, $b_{bp}(532)_{ML}$ 的全年变化仅有一个数量级的改变,不过,这可能是由于后向散射系数背景值的存在导致的(详见 3.2 和 4.1 节)。

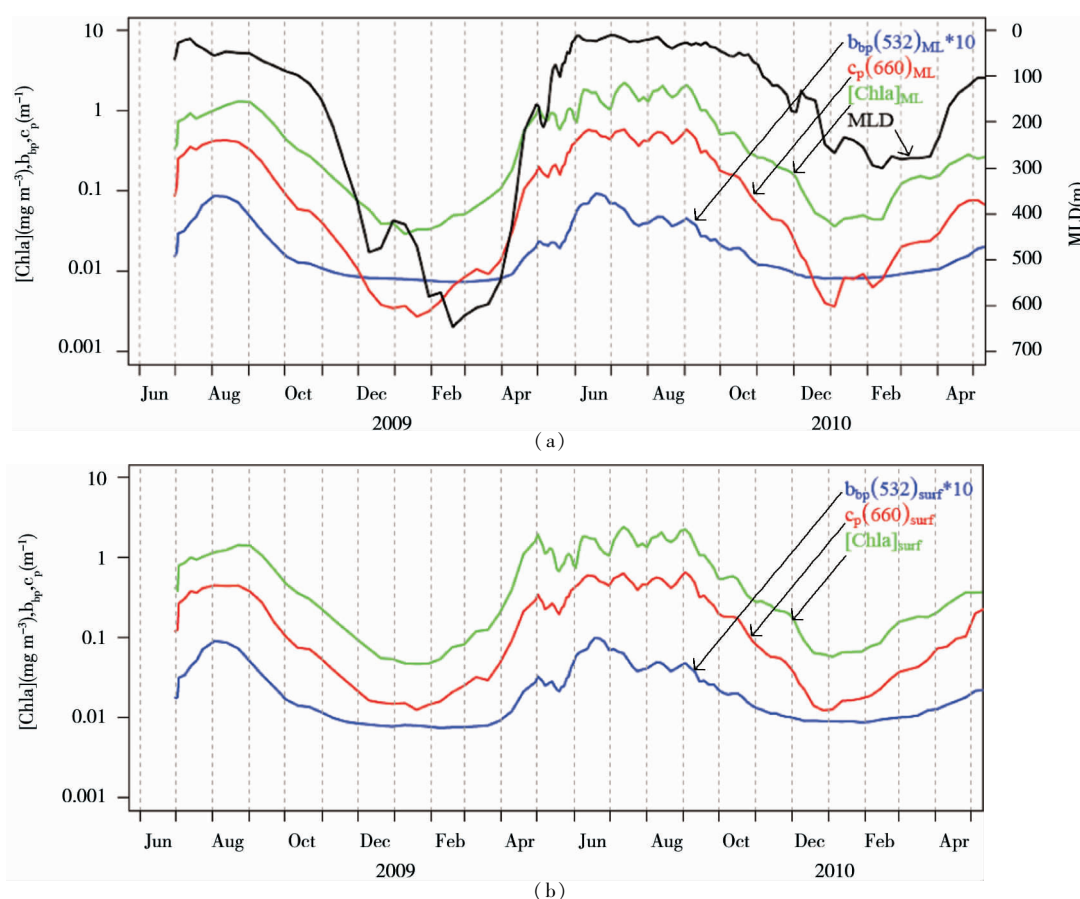


图 3 混合层内平均(a)和表层(b)的叶绿素 a 浓度(单位 mg m^{-3})、10 倍的 532nm 颗粒物后向散射系数(单位 m^{-1})、660nm 颗粒物光束衰减系数(单位 m^{-1})以及混合层深度的时间序列

比较图 3(a)与 3(b)可以发现,表层值与混合层平均值的季节变化完全一致。在数值上, $b_{bp}(532)_{surf}$ 与 $b_{bp}(532)_{ML}$ 基本相同,说明颗粒物后向散射系数在整个混合层内变化不大,基本呈均一分布(与图 2(b)一致); $[Chla]_{surf}$ 和 $c_p(660)_{surf}$ 在夏

季与混合层平均值基本相同,但在冬季则明显增高。其中, $[Chla]_{surf}$ 在 1 月达到最低 0.05mg m^{-3} ,约为混合层平均值的 2 倍; $c_p(660)_{surf}$ 最低为 0.015m^{-1} ,比混合层平均值高了 5 倍。由于 $[Chla]$ 和 $c_p(660)$ 均是表征浮游植物(特别是大型浮游植物)生物量

的主要参量,上述结果说明浮游植物主要出现在表层,而在冬季尤为明显,这主要是由于浮游植物的生长特性决定的。

3.2 叶绿素 a 与颗粒物的生物光学关系

颗粒物固有光学量变化的一阶近似通常是由水体中主要的光学物质浓度来决定的,而在大洋一类水体中,浮游植物及其共变碎屑是(除海水之外)最主要的吸收和散射物质。利用涵盖各种营养水平的全球大洋观测数据,人们逐步建立了颗粒物衰减、吸收以及后向散射系数与叶绿素 a 浓度之间的统计关

系^[3,4,26]。然而,对于全球数据建立的生物光学关系仅能用于描述和理解两者间的平均变化趋势。在局地海域,由于浮游植物种群、生理状态的不同,固有光学量还受到颗粒物组成(折射系数)以及粒径分布的影响,生物光学关系也随之发生改变^[26]。因此,在局地海区建立的生物光学关系不仅更能反映该海区藻种群落的光学特性,而其季节分布与海区差异还有助于更深入地理解生物地球化学过程其及变化规律。

图 4 绘制了 $[Chla]$ 、 $b_{bp}(532)$ 以及 $c_p(660)$ 之间

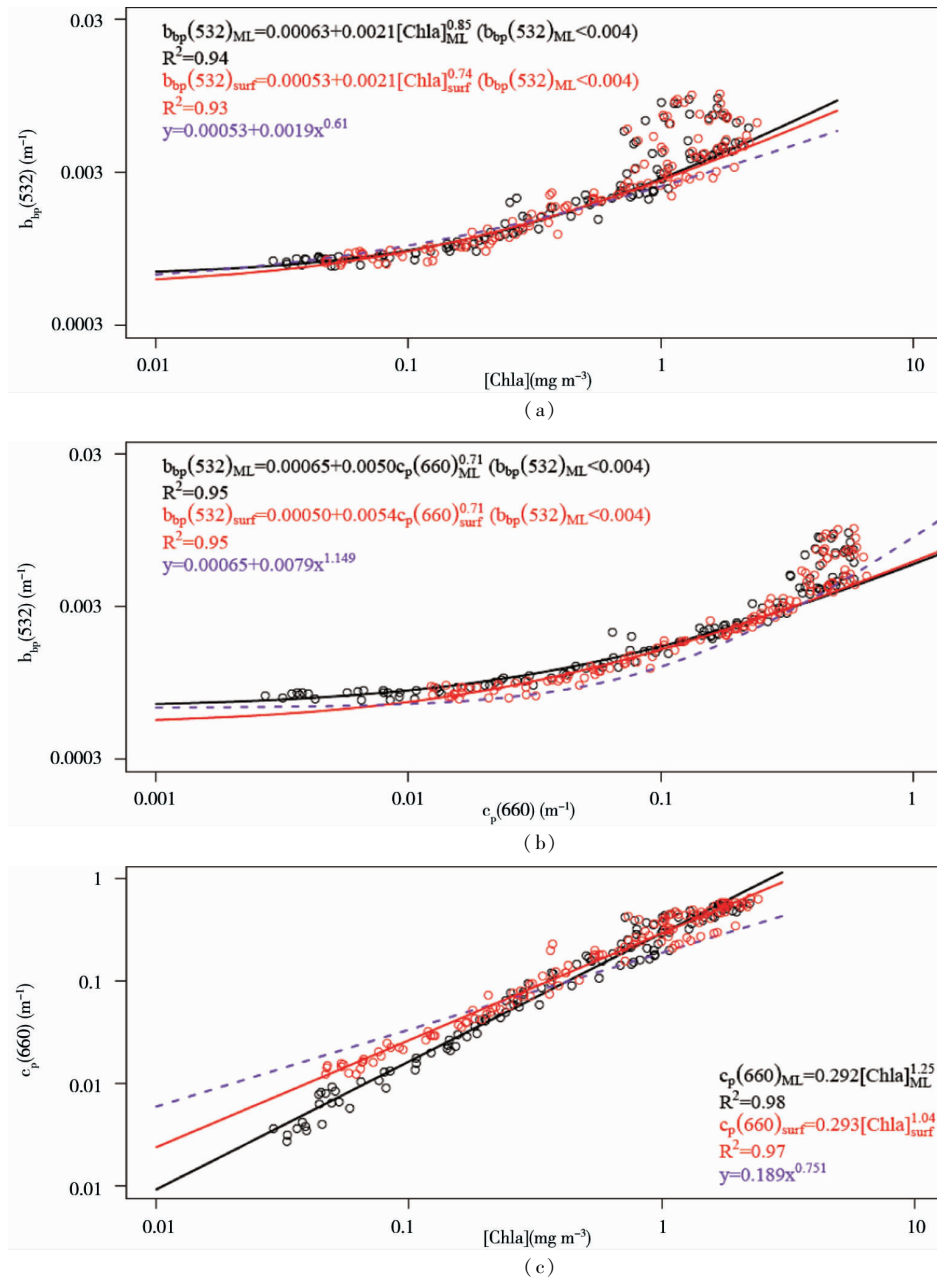


图 4 混合层内平均以及表层 $[Chla]$ 与 $b_{bp}(532)$ 的散点分布图 (a)、混合层内平均以及表层 $c_p(660)$ 与 $b_{bp}(532)$ 的散点分布图 (b)、混合层内平均以及表层 $[Chla]$ 与 $c_p(660)$ 的散点分布图 (c) 的时间序列 (图中黑线代表混合层平均的生物光学量回归关系, 浅色线代表表层生物光学量的回归关系, 虚线为参考线)

的散点图,黑色圆圈代表混合层内平均值,浅色圆圈代表表层值,与之对应的,黑色和浅色实线分别代表混合层内平均值和表层值的回归关系。对于 $[Chla]$ 和 $b_{bp}(532)$ 的关系(图 4(a)),混合层与表层的散点分布非常接近,细微的差别仅为:(1)冬季 $b_{bp}(532)$ 变化不大,而 $[Chla]_{ML}$ 稍低于 $[Chla]_{surf}$,可达 0.025mg m^{-3} 附近;(2)夏季在叶绿素 a 浓度的高值区($[Chla] > 1\text{mg m}^{-3}$),表层 $b_{bp}(532)$ 稍低于混合层内平均值。 $[Chla]$ 和 $b_{bp}(532)$ 的变化关系主要表现为:(1) $b_{bp}(532)$ 在叶绿素 a 浓度的低值区($[Chla] < 0.1\text{mg m}^{-3}$)基本不变($\sim 0.007\text{m}^{-1}$),说明颗粒物后向散射系数存在一个明显的背景值($b_{bp}(532)_{BG}$),这将在两者的相关关系中表现为一个正截距。关于后向散射的背景值,之前已有相关的解释与讨论,这里我们假设它是由于暗电流值的漂移^[27,28]或一些不随浮游植物共变的颗粒物的存在^[29,30],具体相关的讨论见 4.1 节。无论是上述何种原因,我们都需要在两者相关关系的回归分析中将其作为一个常数值减去,以得到后向散射系数中随浮游植物共变的部分与叶绿素 a 浓度之间的生物光学关系。(2)在后向散射系数的低值区($b_{bp}(532) < 0.004\text{m}^{-1}$),两者的相关性很高($R^2 > 0.93$)。由于 $b_{bp}(532)_{BG}$ 的存在,本文采用了一个复合函数的形式进行两者的回归分析,得到的相关关系分别为:

$$b_{bp}(532)_{ML} = 0.00063 + 0.0021 [Chla]_{ML}^{0.85} \\ (b_{bp}(532)_{ML} < 0.004\text{m}^{-1}) (R^2 = 0.94) \quad (4)$$

$$b_{bp}(532)_{surf} = 0.00053 + 0.0021 [Chla]_{surf}^{0.74} \\ (b_{bp}(532)_{surf} < 0.004\text{m}^{-1}) (R^2 = 0.93) \quad (5)$$

可以看出,混合层与表层的相关关系很接近,仅在截距与指数上存在细微差别,而截距 $b_{bp}(532)_{BG}$ 的差别与 $[Chla]_{ML}$ 比 $[Chla]_{surf}$ 最小值更低有关。图 4(a)中的参考曲线($y = 0.00053 + 0.0019x^{0.61}$)是将本文回归得到的表层 $b_{bp}(532)_{BG}$ (0.00053)与 Huot 等在南太平洋观测的两者相关关系^[6]叠加构成的,有利于在考虑背景值存在的情况下与之前的观测结果进行比较。从图中可以看出,北大西洋的回归关系与南太平洋非常接近。(3)此外,在后向散射的高值区($b_{bp}(532) > 0.004\text{m}^{-1}$),两者的相关性降低,且 $b_{bp}(532)$ 的值均高于在低值区建立的回归关系,可能是由于在春季藻华期时,水体的颗粒物组成、粒径分布发生了较大的变化,导致后向散射系数的增大。

图 4(b)显示的是 $c_p(660)$ 与 $b_{bp}(532)$ 之间的关系图,与图 4(a)类似,两者混合层与表层的散点分布也很接近,唯一的差别也出现在低值区: $c_p(660)_{ML}$ 的最小值大大低于 $c_p(660)_{surf}$ 的最小值。从 $c_p(660)$ 与 $b_{bp}(532)$ 的相关关系来看, $b_{bp}(532)_{BG}$ 与图 3(a)类似,两者也在后向散射的低值区($< 0.004\text{m}^{-1}$)相关性很好,利用与前文一致的回归方法,相关关系分别为:

$$b_{bp}(532)_{ML} = 0.00065 + 0.0050 c_p(660)_{ML}^{0.71} \\ (b_{bp}(532)_{ML} < 0.004\text{m}^{-1}) (R^2 = 0.95) \quad (6)$$

$$b_{bp}(532)_{surf} = 0.00050 + 0.0054 c_p(660)_{surf}^{0.71} \\ (b_{bp}(532)_{surf} < 0.004\text{m}^{-1}) (R^2 = 0.95) \quad (7)$$

与式(4)、(5)类似, $c_p(660)$ 与 $b_{bp}(532)$ 在混合层与表层的关系非常接近,仅后向散射背景值有一定差别,比较式(4)、(5)中的 $b_{bp}(532)_{BG}$ 可以看出,背景值的回归结果与 $[Chla]$ 或 $c_p(660)$ 的最小值有很大的关系,由于 $c_p(660)_{ML}$ 最小达到 0.0025m^{-1} ,导致计算的后向散射背景值最大(0.00065),也更接近真实的 $b_{bp}(532)_{BG}$ 。与上文类似,图 4(b)中的参考曲线($y = 0.00065 + 0.0079x^{1.149}$)也取为背景值与 Antoine 等在地中海观测的 $b_{bp}(555)$ 与 $c_p(660)$ 的相关关系^[8]叠加构成,可以看到,北大西洋的回归关系与地中海的结果还是比较接近的。

最后, $[Chla]$ 与 $c_p(660)$ 的关系显示于图 4(c)中,两者的相关性非常高($R^2 > 0.97$)。采用简单的指数回归得到:

$$c_p(660)_{ML} = 0.292 [Chla]_{ML}^{1.25} (R^2 = 0.98) \quad (6)$$

$$c_p(660)_{surf} = 0.293 [Chla]_{surf}^{1.04} (R^2 = 0.97) \quad (7)$$

值得注意的是,两者在混合层与表层的相关关系的系数相同,但在指数上存在比较明显的差异,式(7)中指数 1.04 非常接近于 1,表明两者在表层基本呈线性关系。参考曲线($y = 0.189x^{0.751}$)是由 Loisel 和 Morel^[3]通过全球大洋水体(包括太平洋、大西洋、地中海)的观测数据获得的,从图中可以看出,这一结果与北大西洋的回归关系明显不同。造成这种差异的原因可能是由于 $[Chla]$ 与 $c_p(660)$ 的变化关系在时间与空间尺度上不同导致的,具体讨论见 4.2 节。

4 讨论

4.1 颗粒物后向散射系数的背景值

关于颗粒物后向散射系数的背景值,目前存在

两种可能的解释。其中一个可能性是非藻类颗粒物的存在,各种与浮游植物不存在共变关系的非藻类颗粒(如异养细菌、碎屑、病毒以及成矿粒子)的后向散射系数构成了这一背景值^[31]。Behrenfeld等^[29]通过卫星观测数据发现,在后向散射与叶绿素 a 浓度的相关关系中,存在一个不变的后向散射背景值。当表层叶绿素 a 浓度小于 0.14 mg m^{-3} 时, $b_{bp}(440)$ 不发生改变,维持在 0.0012 m^{-1} 。Boss 和 Behrenfeld^[25]在处理 Bio-Argo 浮标观测的 $b_{bp}(440)$ 数据时,也认为后向散射存在背景值,不过该值取为 0.00035 m^{-1} ,是通过 $b_{bp}(440)$ 剖面数据在 200 ~ 300m 的中值决定的。最近的一个证明来自于 Brewin 的后向散射模型^[30],该模型将颗粒物后向散射系数分成各种粒径组分,分别描述大型浮游植物 ($>20 \mu\text{m}$)、小型浮游植物 ($<20 \mu\text{m}$) 以及非藻类颗粒的光谱特性。模型结果显示,非藻类颗粒物后向散射系数是一个确实存在的常数 ($b_{bp}(470)_{BG}$ 约为 $0.00068 \sim 0.00076 \text{ m}^{-1}$, $b_{bp}(526)_{BG}$ 约为 $0.00054 \sim 0.00063 \text{ m}^{-1}$),并且通过计算其后向散射斜率发现该背景值来源于亚微米级颗粒。不过,这一假设目前仍然存在争议,如 Huot 等^[6]在太平洋贫营养海区的观测数据中,并没有在叶绿素 a 浓度的低值区发现这一背景值的存在。

另一个可能性则是仪器的观测误差。Dall' Olmo 等^[27]通过比较分别装载在水下剖面观测系统和船上流通式 (flow-through) 观测系统中两个相同的后向散射传感器观测的数据发现,两者在低值区并不趋向于 0,而是在剖面观测系统中的后向散射数据中存在一个明显的正截距,作者认为这是由于该系统中的后向散射数据可能存在暗电流的漂移导致的。

此外, Martinez-Vincente 等^[28]在比较流式细胞仪 (flow cytometry) 测量得到的浮游植物碳含量与 $b_{bp}(470)$ 时,也发现后向散射背景值的存在, $b_{bp}(470)_{BG}$ 约为 0.00076 m^{-1} ,然而该文对背景值的来源并未做出肯定的结论,也认为上述两种可能性都存在。不过,比较本文数据与上述结果可以发现,北大西洋 Bio-Argo 数据分析得到的背景值与 Brewin^[30]和 Martinez-Vincente^[28]的结果非常接近,且上述所有背景值的量级基本上是一致的。不过,仅由后向散射的数据,本文很难确定这一背景值的产生是由于非藻类颗粒物的存在还是由于仪器的暗电流漂移,我们还需要更多实验室与模型数据的佐证。

4.2 颗粒物光束衰减系数与叶绿素 a 浓度关系的生理学意义

由于 $c_p(660)$ 可看作是 POC 的替代性参数(两者存在线性关系)^[11-13],假设在局地海区 POC 与浮游植物的碳含量之间的比值变化不大,由此可以将 $c_p(660)$ 与 $[Chla]$ 的比值看作是浮游植物细胞内的碳含量与叶绿素 a 比值 ($C:Chla$) 的替代性参数,而后者表征了浮游植物的生理状态和光适应能力^[29]。

利用式(6)、(7)的回归结果,我们可以得到:

$$c_p(660)_{ML}/[Chla]_{ML} = 0.292 [Chla]_{ML}^{0.25} \quad (8)$$

$$c_p(660)_{surf}/[Chla]_{surf} = 0.293 [Chla]_{surf}^{0.04} \quad (9)$$

基于前文的讨论,我们可以得到的结论是:在表层, $C:Chla$ 的关系变化不大,而对于混合层内的平均值, $C:Chla$ 将与 $[Chla]$ 成正相关关系。结合图 3(a)可知, $C:Chla$ 的变化也将与 $[Chla]$ 一致,存在冬低夏高的季节性特征。基于经典的浮游植物生理学模型,在营养盐充足的情况下, $C:Chla$ 的比值将线性相关于光照强度^[32]。因此,式(8)表征的 $C:Chla$ 季节性特征是由光照的变化以及浮游植物的光适应性决定的。在前文中,我们已发现本文回归的 $c_p(660)$ 与 $[Chla]$ 的关系与 Loisel 和 Morel^[3]结果的差别主要来自于斜率。不仅如此, Voss 等^[33]在北大西洋、马尾藻海、墨西哥湾以及东北太平洋的观测结果为: $c_p(490) = 0.314 [Chla]^{0.57}$, Loisel 等^[7]在地中海的观测结果为: $c_p(660) = 0.499 [Chla]^{0.77}$ 。在上述两个关系以及 Loisel 和 Morel^[3]的结果中,回归斜率均小于 1。如果将上述回归关系改写成式(8)的形式,我们将发现 $c_p(660)$ 与 $[Chla]$ 的比值将负相关于叶绿素 a 浓度,从而得出与本文截然相反的结论。然而,需要注意的是,之前的观测结果均是来源于船载走航的传统方式,获得的生物光学关系反映的是空间分布特征;而本文利用的是在固定海区长期观测的数据,其生物光学关系反映的则是时间分布特征,两者存在本质的区别。从空间分布来看,叶绿素 a 浓度的高值一般出现在富营养海区,而低值则分布在贫营养海区(如在地中海^[7])。由浮游植物生理学模型可知, $C:Chla$ 与营养盐水平成负相关^[32],因而导致 $C:Chla$ 在空间分布上与 $[Chla]$ 会出现负相关关系。而从时间分布来看,同一海区的 $C:Chla$ 会受到光照和营养盐的共同影响。夏季一般混合层较浅、营养盐输入较少,但光照较强、生物所需光照充足、适宜浮游植物的生长、生物量较高 ($[Chla]$ 较高);冬季混合层加深、营养盐输入较高,

但光照较弱、浮游植物生物量一般较低($[Chla]$ 较低)。由于 $C:Chla$ 与光照呈正相关,与营养盐水平成负相关^[32],因此呈夏高冬低的特征,从而与 $[Chla]$ 的出现正相关关系。

4.3 北大西洋春季藻华的发生机制

生物光学参量在混合层内的垂向积分值通过混合层内的平均值与混合层深度的乘积得到,显示于图 5 中。可以看出,叶绿素 a 浓度与衰减系数的积分值与其均值的时间分布特征比较类似,最低值也

出现在 1 月左右,不过峰值存在一定差别, $\Sigma[Chla]_{ML}$ 和 $\Sigma c_p(660)_{ML}$ 在 2009 年 4–5 月最高,而 $[Chla]_{ML}$ 与 $c_p(660)_{ML}$ 此时仍然在上升,并从 6 月至 9 月间一直保持在较高的生物量水平上。值得注意的是,未去除背景值的 $\Sigma b_{bp}(532)_{ML}$ 在冬季出现异常的增加,而去除了背景值(取为 0.00065)后,后向散射系数的积分值与叶绿素 a 以及衰减系数的季节变化基本一致。

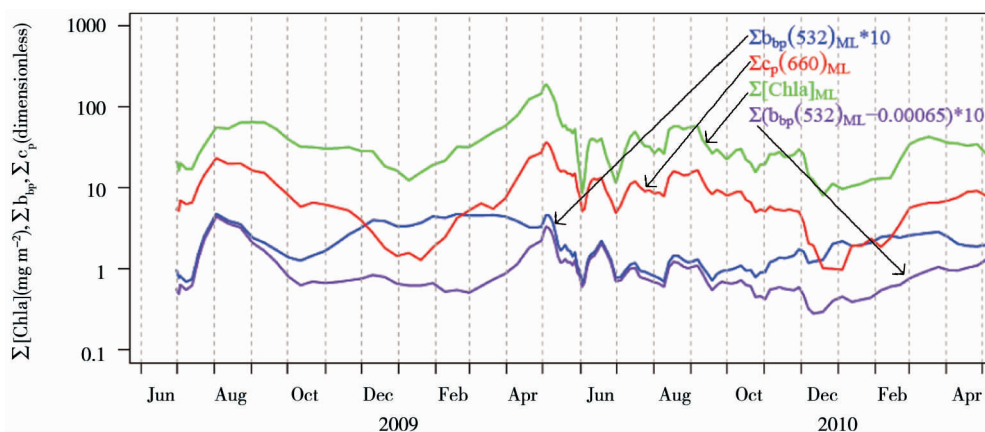


图 5 混合层内积分的叶绿素 a 浓度(单位 $mg\ m^{-2}$)、10 倍的 532nm 颗粒物后向散射系数(单位 dimensionless)、660nm 颗粒物光束衰减系数(单位 dimensionless)以及 10 倍的去背景值后 532nm 颗粒物后向散射系数的时间序列

早在 19 世纪,人们就已开始研究北大西洋的春季藻华现象,且关于驱动其发生的物理-生态机制仍是目前的研究热点。Sverdrup 于 1953 年提出的经典理论^[34]认为,藻华的成因是由于混合层深度浅于临界深度时导致的,这一假说被称为“Sverdrup 临界深度假说”。最近,Behrenfeld^[35]通过卫星数据发现,北大西洋的春季藻华开始于冬季(1 月),此时表层光照降至最低,混合层深度尚在持续加深。从每年 1 月开始,水柱内总生物量就开始持续增加,并在春季大幅上涨直至春末夏初(5–6 月)结束。基于这一发现,作者提出了一个新的理论用于解释北大西洋的藻华成因——“稀释-再耦合假说(Dilution-Recoupling Hypothesis)”。这一假说认为北大西洋冬季混合层的加深,稀释了浮游植物在混合层内的分布,从而破坏了浮游植物与浮游动物已良好耦合的捕食关系,浮游植物生物量从而可以在冬季就开始增加,而到第二年春季,随着混合层变浅,浮游植物与浮游动物又重新建立起耦合关系(再耦合)。Boss 和 Behrenfeld^[25]利用一台 Bio-Argo 浮标上观测

的叶绿素 a 浓度与后向散射系数数据,现场验证了该假说,浮游植物的生物量确实在 1 月份达到最低并立即开始增加,直到 6 月份结束。

本文通过 Bio-Argo 浮标在北大西洋的观测数据,再次验证了这一理论。而且,三种生物光学参量(叶绿素 a 浓度、颗粒物光束衰减系数以及后向散射系数)都证明,其积分值在 1 月达到全年最低,并立即增加,而混合层深度要等到 2 月份才达到全年最低。

5 结 论

自然水体中颗粒物的固有光学量与叶绿素 a 浓度的现场观测为海洋生态学、生物地球化学以及全球碳循环的研究提供了重要的信息,生物光学关系的局地与季节变化及其内在的物理-生态耦合过程也是目前海洋光学的主要发展方向。

本文利用一台 Bio-Argo 浮标在北大西洋海区进行了 2 年的观测得到的数据,详细分析了颗粒物与

色素的垂向与季节分布及其生物光学关系,并通过回归分析获得了经验公式,最后讨论了后向散射系数的背景值、 $c_p(660)$ 与 $[Chla]$ 关系的生理学意义以及北大西洋春季藻华的发生机制。可以看出,目前在生物光学关系的研究中仍然存在一些尚未解决的问题与争议,因而我们需要通过更多的实验室和现场实验,更深入地研究浮游植物的光学特性及其在不同时间尺度(昼夜、季节、年纪尺度等)中的变化规律。Bio-Argo 浮标的出现无疑为我们提供了一个强有力的现场观测工具。对其数据进行深入的分析,发现新的海洋现象和深入理解海洋生态过程与生物地球化学过程,将是未来的研究热点与发展趋势。

参考文献

- [1] Gordon H R, Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A review. Springer-Verlag, New York(USA), 1983
- [2] Morel A, Bricaud A. Inherent optical properties of algal cells, including picoplankton. Theoretical and experimental results. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.*, 1986, 214: 521-559
- [3] Loisel H, Morel A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: a re-examination. *Limnol. Oceanogr.*, 1998, 43: 847-857
- [4] Bricaud A, Morel A, Babin M, et al. Variations of light absorption by suspended particles with the chlorophyll a concentration in oceanic(Case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103: 31033-31044
- [5] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106, 7763-7780
- [6] Huot Y, Morel A, Twardowski M S, et al. Particle optical backscattering along a chlorophyll gradient in the upper layer of the eastern South Pacific Ocean. *Biogeosciences*, 2008, 5: 495-507
- [7] Loisel H, Vantrepotte V, Norkvist K, et al. Characterization of the bio-optical anomaly and diurnal variability of particulate matter, as seen from scattering and backscattering coefficients, in ultra-oligotrophic eddies of the Mediterranean Sea. *Biogeosciences*, 2011, 8: 3295-3317
- [8] Antoine D, Siegel D A, Kostadinov T, et al. Variability in optical particle backscattering in three contrasting bio-optical oceanic regimes. *Limnol. Oceanogr.*, 2011, 56: 955-973
- [9] Boyce D G, Lewis M R, Worm B. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 2010, 466, 591-596
- [10] Behrenfeld M J, Falkowski P G. A consumer's guide to phytoplankton primary productivity models. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, 42: 1479-1491
- [11] 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. Geophys. Res.*, 1999, 104: 3401-3422
- [12] Bishop J K B. Transmissometer measurement of POC. *Deep-Sea Res. I*, 1999, 46: 353-369
- [13] Bishop J K B, Davis R E, Sherman J T. Robotic observation of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 2002, 298: 817-821
- [14] Loisel H, Bosc E, Stramski D, et al. Seasonal variability of the backscattering coefficients in the Mediterranean Sea based on Satellite SeaWiFS imagery. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28: 4203-4206
- [15] 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. *Biogeosciences*, 2008, 5: 171-201
- [16] Vantrepotte V, Loisel H, Mélin F, et al. Global particulate matter pool temporal variability over the SeaWiFS period (1997-2007). *Geophys. Res. Lett.*, 2011, 38: L02605
- [17] Loisel H, Nicolas J M, Sciandra A, et al. Spectral dependency of optical backscattering by marine particles from satellite remote sensing of the global ocean. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: C09024
- [18] Claustre H. IOCCG report N° 11: Bio-Optical sensors on Argo floats. Dartmouth: International Ocean-Color Coordinating Group, 2011
- [19] 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. *海洋环境科学*, 2012, 31: 733-739
- [20] Xing X, Claustre H, Blain S, et al. Quenching correction for in vivo chlorophyll fluorescence acquired by autonomous platforms: A case study with instrumented elephant seals in the Kerguelen region (Southern Ocean). *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 2012, 10: 483-495
- [21] Xing X, Morel A, Claustre H, et al. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorimetry from autonomous profiling Bio-Argo floats: Chlorophyll a retrieval. *J. Geophys. Res.*, 2011, 116: C06020
- [22] De Boyer Montegut C, Madec G, Fischer A S, et al. Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: C12003
- [23] Gardner W D, Walsh I D, Richardson M J. Biophysical forcing of particle production and distribution during a

- spring bloom in the North Atlantic. *Deep-Sea Res II*, 1993, 40: 171-195
- [24] 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. *Limnol Oceanogr*, 2008, 53: 2112-2122
- [25] Boss E, Behrenfeld M. In situ evaluation of the initiation of the North Atlantic phytoplankton bloom. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L18603
- [26] Westberry T K, Dall' Olmo G, Boss E, et al. Coherence of particulate beam attenuation and backscattering coefficients in diverse open ocean environments. *Optics Express*, 2010, 18: 15419-15425
- [27] Dall' Olmo G, Boss E, Behrenfeld M J, et al. Particulate optical scattering coefficients along an Atlantic Meridional Transect. *Optics Express*, 2012, 20: 21532-21551
- [28] Martinez-Vicente V, Dall' Olmo G, Tarran G, et al. Optical backscattering is correlated with phytoplankton carbon across the Atlantic Ocean. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(6): 1154-1158
- [29] Behrenfeld M J, Boss E, Siegel D A, et al. Carbon based ocean productivity and phytoplankton physiology from space. *Global Biogeochem Cycles*, 2005, 19: GB1006
- [30] Brewin R J W, Dall' Olmo G, Sathyendranath S, et al. Particle backscattering as a function of chlorophyll and phytoplankton size structure in the open-ocean. *Optics Express*, 2012, 20: 17632-17652
- [31] Stramski D and Kiefer D A. Light scattering by microorganisms in the open ocean. *Prog Oceanogr*, 1991, 28: 343-383
- [32] Geider R J, MacIntyre H L, and Kana T. A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. *Limnol Oceanogr*, 1998, 43: 679-694
- [33] Voss K J. A spectral model of the beam attenuation coefficient in the ocean and coastal areas. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37: 501-509
- [34] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil International pour l' Exploration de la Mer*, 1953, 18: 287-295
- [35] Behrenfeld M J. Abandoning Sverdrup' s Critical Depth Hypothesis on phytoplankton blooms. *Ecology*, 2010, 91: 977-989

Seasonal distributions of pigment and particle in the North Atlantic observed by a Bio-Argo float

Xing XiaoGang^{* **}, Qiu GuoQiang^{**}, Wang HaiLi^{**}

(^{*} Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003)

(^{**} State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract

Based on the in situ dataset observed by a Bio-Argo float deployed in the North Atlantic (near Iceland) from Jun. 2008 to May 2010, the seasonal variations of chlorophyll-a concentration ($[Chla]$), particulate backscattering ($b_{bp}(532)$), beam attenuation coefficient ($c_p(660)$), as well as the bio-optical relationships between them in the sea area, were studied and analyzed. The results showed that, there existed very obvious seasonality for all the three bio-optical properties, higher in summer and lower in winter. The $[Chla]$ at surface varied from 0.05 to 2 $mg\ m^{-3}$, the $c_p(660)$ had a more strong seasonal fluctuation over 2 order of magnitude, and the $b_{bp}(532)$ had an obvious background value ($\sim 0.00065\ m^{-1}$), owing to either the presence of non-algal particles or the uncertainties of instrument. The mutual relationships between the $[Chla]$, $c_p(660)$ and $b_{bp}(532)$, were fitted well by a power function, but in the region of relatively strong backscattering ($b_{bp}(532) > 0.004\ m^{-1}$), their correlations declined, perhaps owing to the change of algal community in summer.

Key words: Bio-Argo float, North Atlantic, chlorophyll-a concentration, particulate backscattering coefficient, particulate beam attenuation coefficient