Doi:10. 3969/j.issn.0253-4193.2013.02.005

邢小罡,赵冬至,CLAUSTRE Hervé,等.地中海黄色物质次表层极大值的季节变化观测[J].海洋学报,2013,35(2):35-42.

Xing Xiaogang, Zhao Dongzhi, Claustre Hervé, et al. Observations on seasonal variations of colored dissolved organic matter (CDOM) subsurface maximum in the Mediterranean Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese),2013,35(2);35-42.

地中海黄色物质次表层极大值的季节变化观测

邢小罡¹,赵冬至²,CLAUSTRE Hervé³,樊伟⁴

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室,山东 青岛 266003;2. 国家海洋环境监测中心 遥感室,辽宁 大连 116023;3. Laboratoire d'oceanographie de Villefranche, Villefranche sur mer, France 06230;4. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波 动重点实验室,山东 青岛 266071)

摘要:首次通过 2008—2009 年在西北地中海和东地中海海域投放的两台 Bio-Argo 浮标的观测数据, 分析与研究了该海区黄色物质次表层极大值的季节变化规律。研究表明次表层黄色物质在夏季开始 爆发,伴随着叶绿素 a 浓度的逐渐降低;到冬季在强烈的垂向混合作用下结束。且黄色物质极大值的 深度与叶绿素 a 浓度极大值(DCM)的深度基本一致,说明虽然黄色物质与浮游植物之间并不存在直 接联系,但浮游植物的降解是黄色物质的主要来源。文中推测,可能由于该海区浮游植物与微生物的 强耦合,导致了黄色物质与叶绿素 a 之间存在明显的反变关系。

关键词:Bio-Argo;地中海;黄色物质;季节变化;叶绿素 a

中图分类号:P733.3 文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2013)02-0035-08

1 引言

有色可溶性有机物[Colored (or Chromophoric) Dissolved Organic Matter, CDOM],最初被 Kalle 称为 "gelbstoff"^[1],德语意为黄色物质。一些英美科学家 习惯用相应的英语为其命名为"yellow substance"^[2]。 目前文献中普遍使用的科学名称是"Colored (or Chromophoric) Dissolved Organic Matter"或简称为 "CDOM",中文文献一般仍称其为"黄色物质"。

由于其独特的光学特性,黄色物质在海洋光学、 水色遥感、海洋生态学、海洋化学等领域中扮演着非 常重要的角色^[3—9]。黄色物质的吸收波段主要位于 紫外到蓝光的范围。除海水本身的吸收外,表层水体 的吸收特性主要由黄色物质来决定^[6]。通过对全球 卫星数据的分析表明,即使在浮游植物的吸收峰 440 nm 处,黄色物质的吸收系数也约占表层(去除纯海水 吸收之后的)总吸收系数的一半^[10]。因此,黄色物质 不仅是决定水体光学特性和水体类型的主要物质,也 是卫星遥感水体叶绿素 a 浓度与初级生产力的主要 影响因素。不仅如此,黄色物质还吸收了上层海水中 超过 90%的太阳紫外线,对于保护海洋生态系统也 具有非常重要的作用^[11]。

然而目前,对于大洋水体中黄色物质垂向分布及 其季节变化的研究,仍然主要依赖于船载平台获取的 数据。船载观测虽然数据可靠,但通常采样频率比较 低、时空分辨率——特别是时间分辨率——不足,难 以获取黄色物质的连续变化过程,人们对其季节变化 规律和产生机理仍然不甚了解,尤其是对于水色卫星

收稿日期:2012-07-02;修订日期:2012-10-20。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41206028);中国博士后科学基金资助项目(2012M511065);国家自然科学基金创新群体项目(41121064); 海洋公益性行业科研专项(201005030)。

作者简介:邢小罡(1982—),男,山东省青岛市人,讲师,主要研究方向为海洋光学、水色遥感、海洋生物地球化学。E-mail: xing@ouc.edu.cn

无法观测到的次表层极大值的研究非常少见。

1998 年, Nelson 等^[5] 通过马尾藻海 (Sargasso Sea)的月航次数据,首次研究了黄色物质次表层极大 值(Subsurface Yellow substance Maximum, SYM)的 季节变化规律,发现 SYM 在春季和夏季出现、到秋季 消失,大约滞后于藻类水华 2~3个月。而且 SYM 的 深度位于 $50 \sim 100 \text{ m}$,明显浅干叶绿素 a 浓度的次表 层极大值(deep chlorophyll-a maximum, DCM)的深 度(90~120 m),而与上层水体中微生物含量的极大 值深度一致,说明 SYM 与 DCM 并不存在直接的联 系,而与微生物活动有关。此外,有研究发现在太平 洋某些海区的类似深度处也存在黄色物质的次表层 极大值^[12-13],且与无机营养盐和表观耗氧量(apparent oxygen utilization, AOU)存在明显的相关性,表 明 SYM 与微生物的再矿化作用(remineralization)有 关。2005年, Sasaki 等^[14]在日本近海也发现黄色物 质的增长滞后于浮游植物水华。

虽然黄色物质的增加并非与浮游植物直接相 关^[15],但仍然来自源于浮游植物的降解^[16]。从海洋 碳循环的角度来看,贮藏于浮游植物体内的颗粒有机 碳经藻类消亡后通过微生物的再矿化作用最终转化 成溶解有机碳(黄色物质是溶解有机碳的一部分),因 而黄色物质与浮游植物之间仍存在一定联系。

生物光学浮标(Bio-Argo)的出现为目前的海洋 生物光学与生物地球化学现场观测带来了革命性的 技术飞跃。它可以在远离大陆的大洋水体中进行高 频率的连续自动观测,覆盖从昼夜、到季节以至年际 的连续时间尺度,具有独一无二的高垂向分辨率的连 续观测能力,解决了传统走航观测数据长期存在的采 样过疏与时空分辨率不足的问题[17-18]。本文利用两 台法国滨海自由城海洋学实验室 (Laboratoire d'oceanographie de Villefranche, France)开发的 Bio-Argo 浮标在地中海两个海区的观测数据,深入研究 该海域黄色物质剖面的季节特征、特别是其次表层极 大值 SYM 的生消变化规律、以及与同步观测的叶绿 素a浓度的动态变化关系。

2 材料与方法

2008年,法国滨海自由城海洋学实验室的第一 批8台Bio-Argo 浮标投入运行,分别投放至全球4个 海区:地中海(西北地中海浮标投放在法国南海岸和 西班牙东海岸附近,东地中海浮标投放在土耳其南海 岸附近)、北大西洋(冰岛附近)、北太平洋(夏威夷海 洋监测站附近)和南太平洋(复活节岛附近)。本研究 主要基于在地中海观测的两台浮标,分别命名为 "MED NW B02"和"MED LV B06",其运行轨迹如 图 1a,b 所示。"MED_NW_B02"浮标于 2008 年 5 月 投放在西北地中海域法国尼斯外海。在其将近两年 的运行期内,该浮标向西南经过法国南岸的狮子湾 (Gulf of Lion)后进入西班牙东岸的巴利阿里海 (Balearic Sea),并最终停留在巴利阿里海中长达1 a 多的时间。"MED_LV_B06"浮标于 2008 年 6 月投放 在东地中海塞浦路斯(Cyprus)以南海域,共运行了大 约一年半的时间。投放后的9个月内,该浮标一直停 留在 34°N 以南的一个中尺度涡内。之后浮标开始 向北漂流并最终到达塞浦路斯的西海岸。

30°

 32°

土耳其

塞浦路期

34° E



图 1 西北地中海浮标"MED NW B02"(a)和东地中海浮标"MED LV B06"(b)的运行轨迹和观测位置

邢小罡等^[18]已详细介绍了 Bio-Argo 浮标的结构 设计、观测数据、工作模式、传输通讯,以及数据质量控 制等各方面的情况,本文仅对浮标的传感器和数据做 一简单的介绍。除传统的温盐测量外,搭载在 Bio-Argo 浮标上的生物光学传感器还包括:(1)三波段(412 nm、490 nm 和 555 nm)下行辐照度传感器(OC4,加拿 大 Satlantic 公司生产);(2)660 nm 波段透射计(C-Rover,美国 Wetlabs 公司生产);(3)荧光与散射集成探头

(Pucks,Wetlabs 公司生产)分别测量叶绿素 a 荧光、黄 色物质荧光以及 532 nm 后向散射系数。

根据 Xing 等^[19-20]提出的 Bio-Argo 浮标数据处理 方法,叶绿素 a 荧光与黄色物质荧光分别通过下行辐 照度光谱校正为叶绿素 a 浓度([Chl a],单位:mg/m³) 和 412 nm 的黄色物质吸收系数(a_y (412),单位:m⁻¹)。

3 结果与分析

3.1 黄色物质的季节变化特征

如图 2a 和图 2b 所示,412 nm 黄色物质吸收系数的垂向分布与季节变化主要有 3 个明显的特征: (1)夏季表层的光漂白(photobleaching)作用,(2)秋季 的黄色物质次表层极大值 SYM,以及(3)除 SYM 以 外黄色物质浓度随深度逐渐增大。

由于光漂白作用,表层水体黄色物质的季节变化 呈现冬季最高、夏季最低的显著特征。光照会对黄色 物质产生一定程度上的光化学破坏,使其褪色(漂白) 并丧失吸收和荧光特性。不仅如此,光漂白作用随光 照增加而逐渐增强,因而黄色物质在夏季最低 (<0.01 m⁻¹),春秋较高。在冬季,由于此时光漂白 作用最弱,且强混合作用将底层的黄色物质携带入上 混合层,导致冬季表层的黄色物质浓度最高。

在混合层之下,黄色物质浓度随深度逐渐增强, 到 400 m 深度时,西北地中海 412 nm 黄色物质吸收 系数可达 Q 05 m⁻¹以上,东地中海达到 Q 04 m⁻¹左 右。此外,2009 年 3 月之后,东地中海浮标在 200 m 以下记录了到黄色物质的浓度突然增大,最高超过 Q 05 m⁻¹。除此之外,从夏季(7、8 月)到冬季(12、1 月),在混合层之下的次表层水体出现了一个明显的 黄色物质高值区,即为黄色物质的次表层极大值 SYM。西北地中海较高,最高可达 Q 07 m⁻¹,东地中 海最高达到 Q 05 m⁻¹。

3.2 水团对黄色物质的影响

图 3 显示了东地中海浮标"MED_LV_B06"观测 的温盐剖面(0~400 m)时间序列,图中黑线为等密度 线(其上数值为密度超量)。可以看出,当浮标在塞浦 路斯以南海域观测时(2008 年 6 月—2009 年 2 月), 虽然表层温盐参数表现出明显的季节性变化(夏季表 层高温高盐,冬季表层低温低盐),但在 50 m 之下,温 盐变化均非常缓慢,且无季节性特征。到 400 m 深度 时,温度常年维持在 17 ℃左右,盐度在 39.4 左右。 然而,当浮标离开塞浦路斯南部海域的中尺度涡向北 漂流时(2009 年 3 月),浮标观测到一个低温低盐的水 团出现在大约 250~400 m 的水层,温度最低达到 15 ℃以下,盐度则达到 39 以下。

比较图 2b 与图 3 后,我们可以发现,东地中海深 层黄色物质在 2009 年 3 月后异常的增高与该低温低 盐的水团有着密切的联系,时间与深度的变化非常吻 合,表明该水团不仅具有特殊的温盐特性,还携带了 高浓度的黄色物质。而且,这一水团中的黄色物质还 表现出非常良好的保守性,通常称之为"背景黄色物 质(background CDOM)"^[21],与生态参数并不相关,仅 与水文参数相关。

3.3 浮游植物对黄色物质的影响

在真光层之上,黄色物质主要受生态学参数---特别是浮游植物的影响。图 4a 和图 4b 分别显示了 Bio-Argo 浮标同步观测的叶绿素 a 浓度剖面,可以看 出叶绿素a浓度表现出非常明显的季节变化规律。 除冬季外,叶绿素 a 浓度极大值总是在次表层(50~ 100 m),这是由于此时水体层化明显,表层水体的营 养盐较低限制了浮游植物的生长,而中层水体的光照 较低亦限制浮游植物的生长,导致次表层成为最适宜 浮游植物生长的水层,因而出现极大值(deep chlorophyll-a maximum, DCM)。在冬季,由于表层混合作 用的增强,混合层内的叶绿素 a 浓度呈现均匀分布, 混合层之下,叶绿素 a 浓度迅速降低直至为 0。不仅 如此,DCM的深度亦随季节变化:春季随着光照增 强,DCM 逐渐变深,在夏季达到最大深度(西北地中 海可达 80 m,东地中海可达 120 m)。在秋季,随着光 照强度的降低, DCM 逐渐变浅, 直至冬季 DCM 进入 混合层并消失。此外,西北地中海的叶绿素 a 浓度较 高,DCM 最大值超过 1.5 mg/m³,东地中海 DCM 最 高仅 0.4 mg/m³。

比较图 2 与图 4,我们可以发现地中海黄色物质 SYM 的深度与叶绿素 a 浓度的 DCM 深度基本一致, 这与马尾藻海的观测结果不同(在马尾藻海两者相差 大约 30 m^[5])。图 5 显示了黄色物质最大值的深度 (注意这里绘出的是 0~400 m 水层内极大值的位置, 并非代表 SYM 的位置,特别是在东地中海 2009 年 3 月之后)、以及混合层深度和 DCM 的深度。从图 5 可 以看出,在次表层黄色物质暴发的时期——夏季(7、8 月)到冬季(12、1 月),黄色物质的极大值不仅基本与 DCM 的深度一致,且随季节同步变化:夏季最低、秋 季变浅。在东地中海,由于低温低盐水团的影响, SYM 并不明显,黄色物质的最大值也出现在该水团 中(200 m 之下)。



图 2 西北地中海浮标"MED_NW_B02"(a)和东地中海浮标"MED_LV_B06"(b)数据反演的 412 nm 黄色物质吸收系数(单位:m⁻¹)时间序列



此外,在秋末冬初(西北地中海 11、12 月,东地中 海 2009 年 1 月),此时混合层缓慢加深,DCM 的深度 逐渐浅于混合层深度,表明 DCM 开始消失,上层叶绿 素 a 浓度趋于一致。此时 SYM 未立即消失,而出现 在混合层底部并随混合层缓慢变深。此过程大约持 续 1 个月,直至混合层迅速加深后 SYM 完全消失。

SYM 不仅深度与 DCM 一致,且伴随着叶绿素 a 浓度的降低。图 6 绘制了 0~200 m 深度内的平均叶 绿素 a 浓度与平均 412 nm 黄色物质吸收系数。由于 浮标的观测频率基本一致(1 m/s),平均值等效于积 分值(如 Nelson 等^[5]),代表了上层水体(0~200 m) 总浮游植物生物量与总黄色物质浓度。从图中可以 看出,在次表层黄色物质暴发的时期,黄色物质浓度 逐渐增高,且增幅非常明显。在两个海区, a_y (412)的 平均增幅都达到约 0 01 m⁻¹(西北地中海 2008 年从 0 05 增至 0 06 m⁻¹,2009 年从 0 042 5 增至 0 052 5 m⁻¹;东地中海 2008 年从 0 025 增至 0 052 5 m⁻¹;东地中海 2008 年从 0 025 增至 0 052 5 m⁻¹;东地中海 2008 年从 0 042 5 增至 0 052 5 m⁻¹;东地中海 2008 年从 0 042 5 增至 0 052 5

4 讨论

4.1 次表层与表层数据的比较

上文全面分析了两台 Bio-Argo 浮标在地中海次 表层(50~100 m)发现的黄色物质极大值 SYM 的季 节变化以及与叶绿素 a 浓度的动态关系。然而,值得 注意的是,这一次表层现象与表层水体叶绿素 a 与黄 色物质的季节变化特征并不相同。

从图 2 中看出,表层黄色物质的季节变化呈现冬季最高、夏季最低的明显特征。如前文所述,这主要由于两方面作用的影响:夏季的光漂白作用以及冬季的强混合作用。由于光照强度的变化,光漂白作用在夏季最强,相应表层黄色物质达到最低;冬季光照最弱,且存在强烈的垂向混合,导致深层的黄色物质被带入表层水体,致使其浓度达到全年最高。

而从图 4 可以看出,表层叶绿素 a 浓度的季节变 化也呈现出冬季最高、夏季最低的特征,这主要是由 于水体的层结性以及浮游植物的生长特性决定的。 夏季水体混合层较浅,上层水体缺乏营养盐供应且光 照较强,抑制浮游植物的生长,叶绿素 a 浓度偏低,最 大值 DCM 出现在次表层。冬季混合作用加强,表层 水体中的营养盐得到补充,加快了浮游植物的生长, 因而表层叶绿素a浓度增大。

由此看出,表层水体的叶绿素 a 与黄色物质基本 存在一种共变关系(虽然其产生的机理不尽相同),这 与卫星观测的结果基本一致^[22]。表层水体表现出与 次表层完全不同的季节变化特征,次表层 SYM 现象 以及黄色物质与叶绿素 a 的反变关系在表层水体中 并没有呈现,说明在该海区我们无法通过水色遥感卫 星观测到这一次表层现象,这主要与地中海 SYM 所 处深度较深有关。

4.2 地中海与其他海区的比较

此外,本文通过 Bio-Argo 浮标在地中海发现的 SYM 现象与之前人们在世界其他海区的发现与研究 结果也不尽相同。

在北大西洋的马尾藻海,Nelson等^[5]通过月航次 观测发现 SYM 在春季开始出现、到秋季消失;而地中 海 SYM 出现和消失的时间都稍晚于马尾藻海,一般 在夏季才开始出现、直到冬季才伴随着混合作用消 失。虽然马尾藻海与地中海发现的 SYM 深度都位于 50~100 m,但在马尾藻海,DCM 的深度更深,达到 90~120 m;而地中海 DCM 的深度与 SYM 基本一 致,也位于 50~100 m。正是由于马尾藻海 SYM 与 DCM 深度的分离,Nelson 等^[5]由此推断黄色物质与 浮游植物并不存在直接的联系,而与微生物活动有 关。然而,本文发现在地中海,黄色物质与浮游植物 的联系非常紧密,可能是由浮游植物与微生物在该海 区的强耦合关系决定的。

在热带太平洋, Hayase 和 Shinozuka^[13] 通过单次 走航观测也发现了 SYM 现象,其深度位于 300 m 左 右。虽然没有同步的叶绿素 a 浓度观测,但该深度已 远远深于 DCM^[23],说明此处 SYM 与浮游植物并不 存在联系,而与无机营养盐和表观耗氧量相关。

在日本近海的喷火湾(Funka Bay),Sasaki 等^[14] 发现浮游植物水华在春季突然暴发,黄色物质的增长 滞后于叶绿素 a 约 1 个月,并持续大约 2 个月。该海 区黄色物质的增长明显与藻类水华相关,不过其持续 时间很短。但该研究并未对黄色物质的垂向分布做 详细观测与研究,因而无法比较其 SYM 的深度。

在阿拉伯海,Coble 等^[24]通过单次走航的黄色物 质荧光数据发现 SYM 深度位于 20~50 m,其与 DCM 的深度一致,由此认为新产生的黄色物质与浮 游植物有着密切的关系,这一发现与本文在地中海的 观测结果非常相似。



图 4 西北地中海浮标"MED_NW_B02"(a)和东地中海浮标"MED_LV_B06"(b)观测的叶绿素 a 浓度 (单位:mg/m³)时间序列







(红色)与平均 412 nm 黄色物质吸收系数(蓝色)的时间序列

圆圈为实测值,实线为3点移动平均滤波后的平滑曲线

5 结论与展望

由于船载观测数据很难完整地描述某一海区黄 色物质剖面的季节动态变化规律,因而目前对于次表 层黄色物质极大值的观测与研究都相对较少。而通 过 Bio-Argo 浮标上装载的叶绿素 a 与黄色物质荧 光计同步观测数据,可以在一个连续时间尺度内(如 1~2 a)对叶绿素 a 浓度与黄色物质垂向分布进行连 续地观测(如 10 d/次),并进行相关研究与定量分析。

本文首次通过在地中海两个海域投放的 Bio-Argo 浮标观测数据,发现并分析了该海域黄色物质次 表层极大值的季节变化规律,发现上层水体总黄色物 质浓度与浮游植物生物量之间仅在浮游植物的爆发 期出现短暂的正变关系,而在浮游植物的消亡期(特 别是在次表层黄色物质的爆发期)则存在明显的反变 关系,这与卫星观测的表层关系并不一致^[22]。

虽然有研究表明,黄色物质的增加与叶绿素 a 浓度的降低并不存在直接联系,而与微生物的活性相关。然而本文发现,地中海 SYM 的出现不仅伴随着

叶绿素 a 浓度的降低,且位于同一深度处,说明黄色物质与浮游植物的联系非常紧密,可能是由于浮游植物与微生物在该海区存在着非常强的耦合关系,导致 浮游植物一经消亡,即被微生物有效降解和再矿化, 黄色物质浓度随之增加。然而,由于目前 Bio-Argo 浮标上尚未搭载其他辅助参数的传感器,因而无法通 过其他参数进一步分析与研究黄色物质的来源和产 生机理。随着传感器技术的发展,未来将有更多的生 物地球化学参数(溶解氧、硝酸盐、pH 值等)在 Bio-Argo 浮标上进行同步观测,这也将有助于我们进一 步理解与研究黄色物质的次表层极大值现象。

此外,由于浮标随波逐流的特性,当处于强海流 的海区时,浮标的观测点也随之发生显著的变化,导 致其观测数据的时间序列还可能受到海域空间变化 的影响。随着浮标网络的日渐成熟,未来将有更多的 浮标在同一海区投放以进行同步观测,从而有助于我 们更完整地描述与研究世界各海区黄色物质的季节 变化规律。

参考文献:

- [1] Kalle K. Zum problem der meerwasserfarbe[J]. Ann Hydrol Mar mitteilungen, 1938, 66: 1-13.
- [2] Shifrin K S. Physical Optics of Ocean Water (D. Oliver, translator) [M]. American Institute of Physics, New York, 1988.
- [3] Siegel D A, Michaels A F, Sorensen J C, et al. Seasonal variability of light availability and its utilization in the Sargasso Sea[J]. J Geophys Res, 1995, 100: 8695-8713.
- [4] Siegel D A, MichaelS A F. Quantification of non-algal light attenuation in the Sargasso Sea: Implications for biogeochemistry and remote sensing
 [J]. Deep-Sea Res [], 1996, 43: 321-345.
- [5] Nelson N B, Siegel D A, Michaels A F. Seasonal dynamics of colored dissolved material in the Sargasso Sea[J]. Deep-Sea Res I, 1998, 45: 931-957.
- [6] Nelson N B, Siegel D A. Chromophoric DOM in the open ocean [M]// Hansell D A, Carlson C A. Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter. San Diego, CA: Academic Press, 2002:547-578.
- [7] Siegel D A, Maritorena S, Nelson N B, et al. Global distribution and dynamics of colored dissolved and detrital organic materials[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107: 3228, doi:10.1029/2001JC000965.
- [8] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. Chemical Reviews, 2007, 107: 402-418.
- [9] Morel A, Gentili B. A simple band ratio technique to quantify the colored dissolved and detrital organic material from ocean color remotely sensed data [J]. Remote Sens Environ, 2009, 113: 998–1011.
- [10] Swan C M, Siegel D A, Nelson N B, et al. Biogeochemical and hydrographic controls on chromophoric dissolved organic matter distribution in the Pacific Ocean[J]. Deep-Sea Res I, 2009, 56: 2175-2192.
- [11] Zepp R G. Solar ultraviolet radiation and aquatic carbon, nitrogen, sulfur and metals cycles[M]// Helbling E W, Zagarese H. UV Effects in Aquatic Organisms and Ecosystems. Cambridge UK:Royal Society of Chemistry, 2002: 137-183.
- [12] Chen R F, Bada J L. The fluorescence of dissolved organic matter in seawater[J]. Mar Chem, 1992, 37: 191-221.
- [13] Hayase K, Shinozuka N. Vertical distribution of fluorescent organic matter along with AOU and nutrients in the equatorial Central Pacific[J]. Man Chem, 1995, 48: 283-290.
- [14] Sasaki H, Miyamura T, Saitoh S, et al. Seasonal variation of absorption by particles and colored dissolved organic matter (CDOM) in Funka Bay, southwestern Hokkaido, Japan[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 64: 447-458.
- [15] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Production of chromophoric dissolved organic matter fluorescence in marine and estuarine environments: an in-

vestigation into the role of phytoplankton[J]. Mar Chem, 2002, 77: 7-21.

- [16] Hu C, Lee Z, Muller-Karger F E, et al. Ocean color reveals phase shift between marine plants and yellow substance[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3: 262-266.
- [17] Claustre H. IOCCG report N°11: Bio-Optical sensors on Argo floats[M]. Dartmouth: International Ocean-Color Coordinating Group, 2011.
- [18] **邢小罡,赵冬至,**Hervé Claustre,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, 31:733—739.
- [19] 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]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116:C06020, doi:10.1029/2010JC006899.
- [20] Xing X, Morel A, Claustre H, et al. Combined processing and mutual interpretation of radiometry and fluorometry from autonomous profiling Bio-Argo floats: 2. Colored dissolved organic matter absorption retrieval[J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117:C04022. doi:10.1029/ 2011JC007632.
- [21] Nelson N B, Siegel D A, Carlson C A, et al. Hydrography of chromophoric dissolved organic matter in the North Atlantic[J]. Deep-Sea Res [, 2007, 54: 710-731.
- [22] Morel A, Gentili B. The dissolved yellow substance and the shades of blue in the Mediterranean Sea[J]. Biogeosciences, 2009, 6: 2625-2636.
- [23] Cullen J J. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll-a[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1982, 9: 791-803.
- [24] Coble P, Del Castillo C, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon[J]. Deep-Sea Res [],1998, 45: 2195-2223.

Observations on seasonal variations of colored dissolved organic matter (CDOM) subsurface maximum in the Mediterranean Sea

XING Xiaogang¹, ZHAO Dongzhi², CLAUSTRE Hervé³, FAN Wei⁴

 Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3. Laboratoire d'oceanographie de Villefranche, Villefranche sur mer 06230, France;
 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the in situ dataset observed by two Bio-Argo floats deployed in the northwestern and eastern basins of Mediterranean Sea in 2008—2009, this study focuses on the seasonal variations of colored dissolved or-ganic matter (CDOM) subsurface maximum. The research results show that the subsurface CDOM bloom started in summer accompanied by gradual decreasing of chlorophyll-a concentration, and disappeared in winter owing to deep mixing effect. In addition, the depth of subsurface CDOM maximum was always following the depth of deep chlorophyll-a maximum (DCM) during the CDOM bloom period, which suggests that the source of oceanic CDOM is almost certainly the result of phytoplankton degradation, although chlorophyll and CDOM are not correlated directly. It is assumed that a probable strong coupling between phytoplankton and bacteria leads to the obvious contravariance observed between CDOM and chlorophyll-a.

Key words: Bio-Argo; Mediterranean Sea; colored dissolved organic matter (CDOM); seasonal variations; chlorophyll-a