

# 浮游植物类群遥感算法 PHYSAT 在台湾海峡的适用性测试

吴璟瑜<sup>1,2,3</sup> 商少凌<sup>1,3</sup>, 柳欣<sup>4</sup>, 商少平<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学海洋与地球学院 福建 厦门 361102; 3. 厦门大学海洋观测技术研发中心 福建 厦门 361005; 4. 厦门大学环境与生态学院 福建 厦门 361102)

**摘要:** 浮游植物类群遥感是海色遥感的热点问题, 关乎全球变化生态响应研究及有害藻华的辨识。针对目前广泛应用的浮游植物类群遥感全球算法 PHYSAT, 应用台湾海峡夏季表层浮游植物光合色素与 SeaWiFS 同步卫星遥感数据, 探讨其区域适用性。结果显示两种主要类群(硅藻、聚球藻)的遥感光谱异常(Ra)分布交错, 且同一类群的 Ra 不同航次、不同站位的大小值也存在差异, 用 PHYSAT 算法阈值标准均不能得到有效识别。在建立  $nLw^{ref}(\lambda, chl_a)$  台湾海峡区域查找表的基础上, 重新生成硅藻、聚球藻的 Ra, 不同类群 Ra 依旧混杂, 这可能与建立 PHYSAT 算法标准海域和台湾海峡的水体光学组分差异及台湾海峡水体光学组分时空差异, 尤其是颗粒后向散射  $b_{bp}$  的变动有关。采用 K-means、FCM (Fuzzy c-means) 方法对 443 nm 归一化 Ra 进行聚类, 准确率超过 70%。该结果说明在类似台湾海峡区域水体, 浮游植物类群的遥感分辨可能需要更多考虑光谱形上的差异, 而非如 PHYSAT 算法进行量值范围区分。

**关键词:** PHYSAT; 浮游植物类群; 遥感; 台湾海峡; 阈值; 光谱谱形

**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A

作为海洋的初级生产者, 浮游植物在决定全球碳的分配及热收支平衡上扮演举足轻重的角色, 是海洋生物地球化学研究的基本要素。同时, 因浮游植物具有的某些特性, 类群不同, 其在海洋生物地球化学循环过程中体现的具体功能也可能不同。根据浮游植物在生物地球化

---

**收稿日期:** 2018-07-17      **录用日期:** 2018-09-28

**基金项目:** 国家重点研发技术海洋环境安全保障专项(2017YFC1404804); 国家自然科学基金 (41776146); 厦门大学校长基金 (20720180106)

**\*通信作者:** spshang@xmu.edu.cn

学循环中的作用，可以分为不同的功能群，如硅化浮游植物（phytoplankton silicifiers，如硅藻）、固氮浮游植物（phytoplankton N<sub>2</sub>-fixers，如束毛藻(*Trichodesmium*)）、钙化浮游植物（phytoplankton calcifiers，如球石藻(*Coccolithophorids*)）、产 DMS 浮游植物（phytoplankton DMS-producers，如棕囊藻(*Phaeocystis*)）等<sup>[1-2]</sup>。

遥感具有实时、大面、持续观测的特点，在大范围、长序列浮游植物观测方面具有特别的优势。在全球变化大环境下，发展浮游植物类群遥感技术，获取不同浮游植物功能群时空分布及其对气候变化的响应，是水色遥感的一个重要研究内容。遥感信号作为水体吸收和后向散射的综合结果，其光谱特征对于不同浮游植物类群有所差异，在此基础上已有研究者针对某种浮游植物相对高浓度条件下（藻华）提出遥测方法，如球石藻遥感算法<sup>[3-5]</sup>、束毛藻遥感算法<sup>[6-8]</sup>、*K. brevis* 甲藻遥感算法<sup>[9]</sup>和硅藻遥感算法<sup>[10]</sup>。部分研究者开始综合多航次现场浮游植物调查信息和遥感信号，尝试多种浮游植物类群的遥感方法<sup>[11-14]</sup>，其中尤以 PHYSAT 算法最为典型<sup>[11-12]</sup>。

Alvain 等<sup>[11]</sup>通过对北大西洋、赤道太平洋的大量光合色素样品采集，从特征色素/总叶绿素 a 比值提取浮游植物优势种群信息；选取现场观测±1 d、±60 km 的 SeaWiFS 5 个可见光波段的归一化离水辐射率数据 nLw 进行平均，建立不同叶绿素 a (chl<sub>a</sub>) 浓度的 nLw<sup>ref</sup> 查找表，继而通过与现场同步匹配的遥感 nLw 计算遥感光谱异常 Ra ( $Ra = nLw(\lambda) / nLw^{ref}(\lambda, chl_a)$ )，结合优势类群信息，最终得到定鞭藻（Haptophytes）、原绿球藻（*Prochlorococcus*）、聚球藻（*Synechococcus*）和硅藻（Diatoms）四大浮游植物类群在一类水体的 Ra 遥感判别标准，称为 PHYSAT 算法。为了更好地提取南大洋及上升流区硅藻信息，Alvain 等<sup>[12]</sup>将 nLw<sup>ref</sup> 的数据来源延伸至全球范围，Ra 的判别经验阈值略有调整，定鞭藻改为微型真核生物（Nanoecaryotes），并新增对棕囊藻、球石藻水华的判别。PHYSAT 在全球及区域海域浮游植物类群时空分布、敏感海域对气候变化的响应研究中均有应用。在大尺度范围，PHYSAT 提取的浮游植物群落分布特征与其他现场观测研究结果基本相符，如原绿球藻、聚球藻在贫营养热带水体大量存在，北大西洋硅藻水华呈现显著的年际变动；北大西洋涛动指数 NAO、南半球环状模 SAM 显著正位相时，高纬度海域的硅藻优势度异常极其突出，尤其是 SAM 正位相时南大洋的硅藻优势度<sup>[11-12,15-16]</sup>。采用 NOMAD、GeP&CO 全球浮游植物色素数据集对 PHYSAT 在 1997-2006 年的月分布反演结果进行检验，微型真核生物的正确识别率可高达 83%，其次是硅藻（57%），原绿球藻、聚球藻相对容易混淆<sup>[12]</sup>；在 Alvain 等<sup>[17]</sup>硅藻、原绿球藻、聚球藻正确识别率分别上升至 73%、61%、57%。但需要指出的是，以上与现场的比对研究，浮游植物类群遥感均采用月反演结果，仅适用于水团、浮游植物类群结构相对

稳定的开放大洋水体。在我国，有部分学者直接利用 PHYSAT 获取南海浮游植物类群的季节分布特征<sup>[18,19]</sup>，但 PHYSAT 在中国海域的适用性如何，尚属未知。显然，对于相对小尺度的区域海域，PHYSAT 算法的性能缺乏有效评估。由于水体组分差异，虽然  $nLw^{ref}$  可以很大程度去除背景信号（chl<sub>a</sub> 的影响），PHYSAT 对四大类群设定的 Ra 阈值范围，在其他海域是否适用仍有很大的不确定性，有待进一步验证。

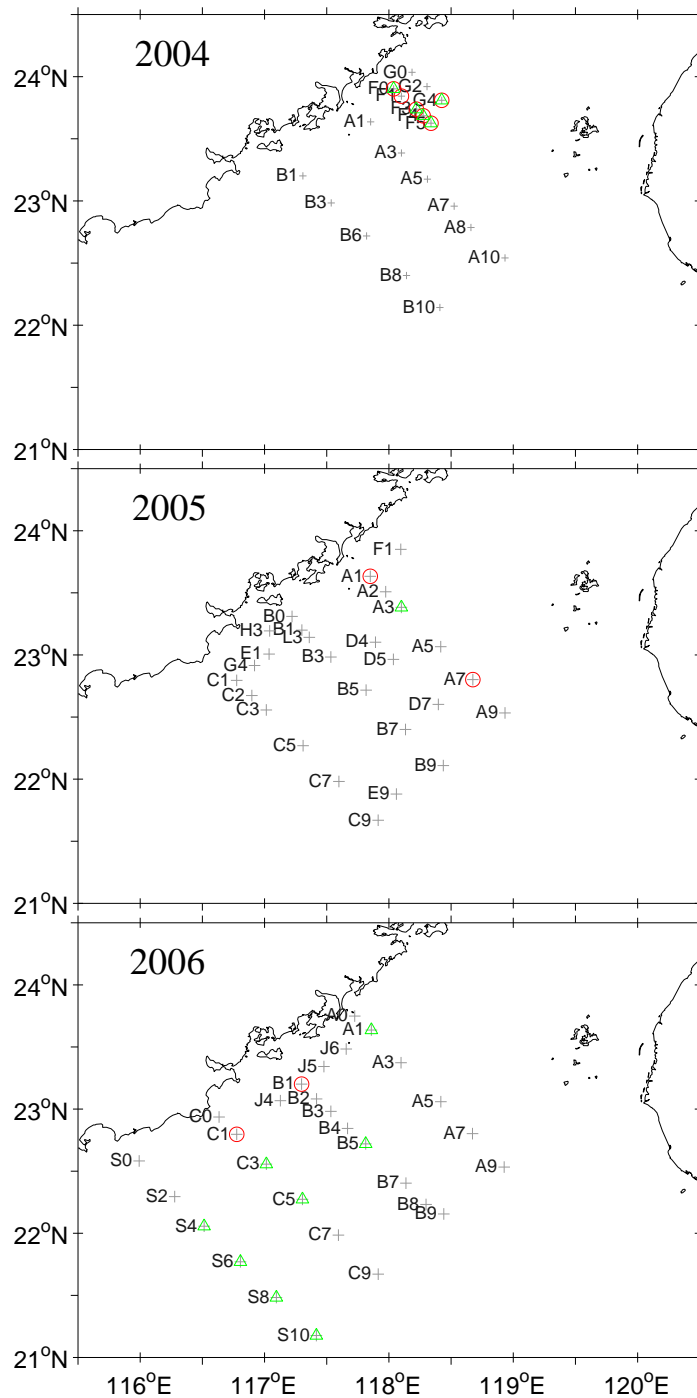
台湾海峡是连接东海、南海的狭长水道。受东亚季风控制，冬季低温的浙闽沿岸水自东南南下，同时还有一支暖水自南海北部北上；夏季西南季风驱动暖水自南海北上。在夏季风及地形的作用下，形成沿岸上升流和浅滩上升流<sup>[20]</sup>。已有研究显示，ENSO 事件可能会通过一定的方式影响东亚季风的强弱，进而影响到台湾海峡的海洋动力环境场，并对台湾海峡的浮游植物生物量及群落结构产生生态效应。强 El Niño 事件期间，台湾海峡冬季表层水体温度明显高于海区气候平均态，区域暖水与冷水面积比值比往年增加了 25%，高叶绿素 a 浓度水体面积减半<sup>[21]</sup>。在西南风较小、上升流较弱的 El Niño 发展期年份，夏季台湾海峡南部叶绿素 a 质量浓度较低，并以蓝藻为主要优势类群(34 %~49 %)<sup>[22-23]</sup>；而在西南风较大、上升流较强的 El Niño 衰亡期年份，则硅藻明显占优势(42 %~65 %)<sup>[22-24]</sup>。

本研究在多个夏季航次现场观测色素数据的基础上，结合 SeaWiFS 同步遥感数据，对 PHYSAT 在台湾海峡浮游植物类群遥感的适用性进行检验，分析导致问题的潜在原因，探讨发展浮游植物类群遥感算法的可能方向。

## 1 方法

### 1.1 浮游植物类群

2004 年 7—8 月、2005 年 7 月、2006 年 6 月在台湾海峡南部进行大面观测，站位分布如图 1 所示。采集水样过滤，样品滤膜保存于液氮中，带至实验室用高效液相色谱法测量浮游植物光合色素。浮游植物光合色素测量具体方法详见 Huang 等<sup>[25]</sup>。



△、○表示该站位有遥感数据匹配且表层优势类群分别为聚球藻、硅藻。

图 1 2004、2005、2006 年 3 个夏季航次台湾海峡浮游植物色素采样站位

Fig. 1 Phytoplankton pigment sampling stations in the Taiwan Strait during summer 2004, 2005 and 2006 cruises

浮游植物类群的确定参考 Alvain 等<sup>[11,12]</sup>: 结合几种特征色素二乙炔基叶绿素 a (dv-chla)、玉米黄素(zeaxanthin)、岩藻黄素(fucoxanthin)、19'-己酰基氧化岩藻黄素(19'-hexanoyloxy-fucoxanthin)、多甲藻素(peridinin)与总叶绿素 a 的比值, 选取原绿球藻、聚球藻、硅藻、微

型真核生物为主要优势类群的表层样品。

浮游植物类群结果与遥感数据匹配站位分布情况详见图 1。由于部分站位有多次采样，可能出现同一站位具有多种浮游植物优势类群（对应不同时间）、同一站位具有多个匹配遥感光谱 Ra 的情况。

## 1.2 遥感数据

在 NASA 网站 (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/L2>) 下载 SeaWiFS L2 1.1 km 分辨率遥感数据。根据现场采样时间、地点，选取匹配遥感数据（时间窗口 $\pm 1$  d；空间窗口 $3\times 3$ ）；根据遥感 chla 和  $nLw^{ref}$  查找表<sup>[11]</sup>，最终计算得到 Ra。其中，chla 小于  $0.04\text{ mg/m}^3$  或大于  $3\text{ mg/m}^3$ ，或气溶胶光学厚度  $aot_{865}$  高于 0.15 的遥感数据，舍弃<sup>[11]</sup>。

## 1.3 聚类

文中对已知硅藻、聚球藻的样品光谱聚类，采用 K-means、FCM（Fuzzy c-means）两种方式。

### 1.3.1 K-means

K-means 算法以类中各样本的加权均值(质心)代表该类，通常以各样本与其质心欧几里德距离总和作为目标函数进行聚类。基本步骤如下：选择 k 个样品作为初始质心，或将所有样品分成 k 个初始类后，将 k 个类的质心作为初始凝聚点；将每个样品归入离他最近的凝聚点所在的类，该类的凝聚点更新为这一类的均值；重复以上步骤，直至所有样品的分配不再有变化<sup>[26]</sup>。

### 1.3.2 FCM

在很多分类问题中，分类对象之间没有明确的界限。模糊目标函数算法为了弥补目标函数法（如 K-means）硬划分所带来的诸多缺陷而引入了软划分的概念，也就是样本按照一定的概率（隶属度）归属于某类。FCM 是其中最重要且应用最广泛的算法。其聚类准则是求  $U$ 、 $V$ ，使得目标函数  $J(U, V)$  取得最小值：

$$J(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ik}^m d_{ik}^2$$

其中， $U = (u_{ik})_{c \times n}$  为隶属度矩阵， $u_{ik}$  表示第 k 个样品  $x_k$  属于第 i 类的隶属度 ( $0 \leq u_{ik} \leq 1$ ,  $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1$ )； $d_{ik} = \|x_k - v_i\|$ ， $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$  为 c 个类的聚类中心<sup>[26]</sup>。

文中 K-means、FCM 的实现均采用 Matlab (2014a) 相应函数及默认设置。

## 2 结果

现场观测期间,原绿球藻、聚球藻、硅藻、微型真核生物为主要优势种群的表层样品共 80 个; 因为云覆盖遥感数据缺失, 或遥感 chl<sub>a</sub>、aot<sub>865</sub> 不符合要求 (详见 1.2 部分说明), 最终匹配上遥感数据的仅 27 个。其中, 原绿球藻、微型真核生物现场与遥感匹配上的样品均只有一个, 其他皆为聚球藻 ( $n=17$ )、硅藻 ( $n=8$ )。

几大浮游植物类群对应的 Ra 光谱分布如图 2 所示。原绿球藻样品的 Ra 光谱整体平缓, 和 PHYSAT 相似 (0.8~1.0, 表 1), 但数值偏低 (0.5~0.6); 微型真核生物 (2.7~3.7) 则大大偏离 PHYSAT (0.4~1.0, 表 1)。聚球藻和硅藻相比, 除了 412 nm 波段, 443, 490, 512, 555 nm 4 个波段 Ra 值差异不大; 硅藻则从 412~510 nm 波段有明显的下倾坡度, 基本趋势为 Ra(412)>Ra(443)>Ra(490)>Ra(510)。这和 PHYSAT 算法里描述的两个类群的光谱谱形特征基本相符。但是, 从量值上看, PHYSAT 算法里四大浮游植物类群的 Ra 经验阈值微型真核生物、原绿球藻、聚球藻和硅藻的 Ra 依次增大 (表 1), 而台湾海峡的聚球藻和硅藻的 Ra 基本混杂在一起, 和 PHYSAT 算法标准有很大差异, 不能通过阈值法分离。严格按照 PHYSAT 算法标准, 8 个硅藻、17 个聚球藻均没有一个被准确识别出, 即这两个主要类群的识别率为零。

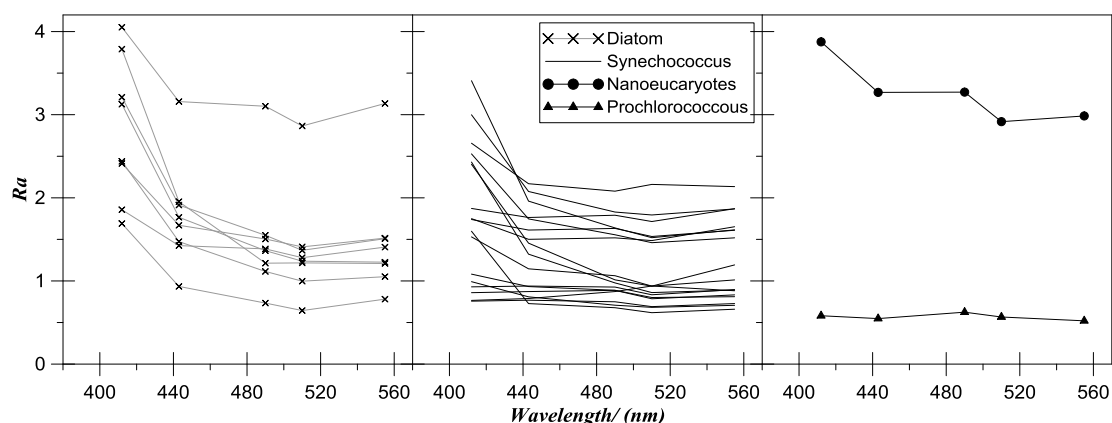


图 2 台湾海峡 4 个类群浮游植物 Ra 光谱分布

Fig. 2 Ra spectra of four phytoplankton groups in the TWS

表 1 PHYSAT 算法遥感判别标准 (Alvain 等<sup>[11]</sup>)

Tab. 1 Ra criteria for a specific plankton group in PHYSAT (Alvain et al. <sup>[11]</sup>)

Ra(412)	Ra(443)	Ra(490)	Ra(510)	Ra(555)	附加条件
---------	---------	---------	---------	---------	------

微型真核生物(下限)	0.4	0.55	0.6	0.6	0.6	Ra(412)<Ra(443)
微型真核生物(上限)	0.8	0.9	0.95	1.0	1.0	Ra(443)<Ra(490)
原绿球藻(下限)	0.8	0.85	0.85	0.85	0.8	
原绿球藻(上限)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
聚球藻(下限)	1.0	0.95	0.9	0.9	0.9	Ra(412)>Ra(443)
聚球藻(上限)	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	Ra(443)>Ra(490)
硅藻(下限)	1.3	1.2	1.1	1.1	1.1	Ra(412)>Ra(490)
硅藻(上限)	2.4	2	1.7	1.6	1.6	Ra(490)>Ra(555)

按航次分开显示, 可见不同年份 Ra 数据有较大差别 (图 3)。2006 年硅藻的 Ra 光谱较为集中, 2004、2005 年的则相对离散。聚球藻样品主要集中在 2004、2006 年 2 个航次, 但这两年的光谱分布范围差别很大: 不考虑 412 nm 波段, 2004 年聚球藻的 Ra 基本落在 1.5~2.2 之间, 远大于 PHYSAT 标准的 0.9~1.2; 2006 年的 Ra 则多数和 PHYSAT 较为接近, 主要落在 0.7~1.0 之间。

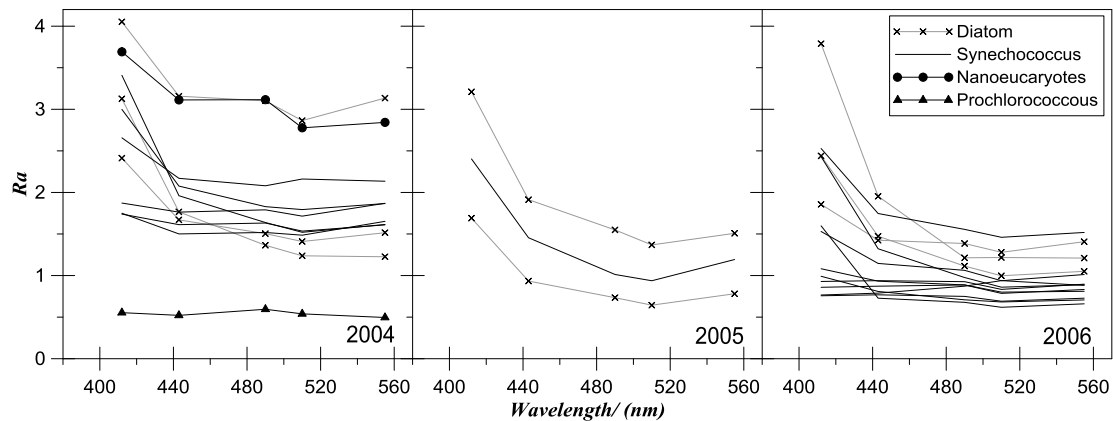


图 3 不同航次 Ra 光谱分布

Fig. 3 Ra spectra of the four phytoplankton groups during summer 2004, 2005 and 2006 in the TWS

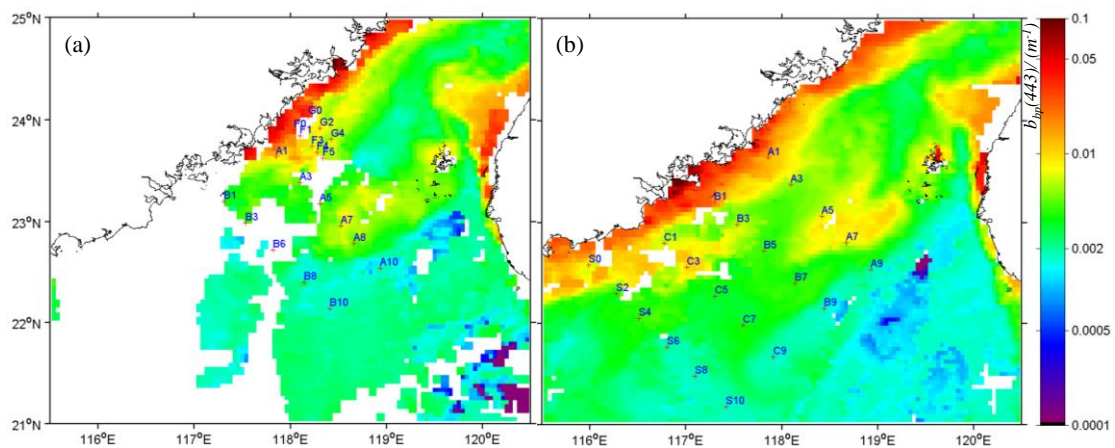
### 3 讨论

由于原绿球藻、微型真核生物现场与遥感匹配上的样品均只有一个, 光谱分布缺乏代表性, 以下问题探讨主要针对聚球藻、硅藻两大类群进行。

### 3.1 PHYSAT 算法问题分析

受天气影响，2004 年夏季航次（主要在 8 月）遥感与现场数据匹配的站位中，硅藻和聚球藻均落在靠北的 F、G 两个断面上，相对近岸；而 2006 年除了 A、B、C 断面部分近岸站位，其他基本落在 S 断面（S4~S10），离岸相对较远（详见图 1）。聚球藻的 Ra 量值与谱形和 PHYSAT 标准较为接近的，均为 2006 年 S 断面的站位，离岸较远，其他近岸站位结果则比 PHYSAT 标准要大很多（图 2、3）；硅藻的 Ra 站位相对集中，基本落在近岸（图 1），443~555 nm 波段 Ra 主要落在 1.0~2.0，结果与 PHYSAT 相近（图 2），较大偏离 PHYSAT 的为特别近岸（2004 年 F0）或相对远岸(2005 年 A7)的站位。

根据辐射传输模型，遥感光谱信号最终取决于水体的吸收、后向散射特性，Ra 不可避免地受水体光学因子变动的影响。Alvain 等<sup>[17]</sup>模拟 CDOM 吸收系数  $a_g$ 、浮游植物比吸收系数  $a^*_{ph}$ 、颗粒后向散射  $b_{bp}$ 、Chla 浓度变化与 Ra 的关系并进行敏感性分析，结果显示  $b_{bp}$  对 Ra 的量值影响最大。2004、2006 年两个航次采样期间的遥感  $b_{bp}(443)$  分布如图 4 所示。2004 年 F、G 断面站位的  $b_{bp}(443)$  基本在  $0.01\text{ m}^{-1}$  以上；2006 年 S 断面离岸站位（S4~S10）则在  $\sim 0.002\text{ m}^{-1}$ ，近岸站位与 2004 年 F、G 断面较为接近 ( $> 0.01\text{ m}^{-1}$ )。2004 年聚球藻的 Ra 量值显著高于 2006 年，2006 年近岸站位 Ra 远高于离岸站位，可能与近岸站位悬浮泥沙含量较高， $b_{bp}$  较大有关。显然，对不同区域、不同时间水体，光学组分可能不同，不同浮游植物类群主导的水体对应的 Ra 很难用阈值设定来简单划分。



(a) 2004 年 8 月 4—11 日；(b) 2006 年 6 月 18—25 日。

图 4 MODIS-Aqua 4 km 8 天平均  $b_{bp}(443)$

Fig. 4 MODIS-Aqua 4 km 8-day  $b_{bp}(443)$  in the TWS

遥感 chla 的不确定性可能也是 Ra 变动、导致 PHYSAT 算法失效的重要影响因素。这



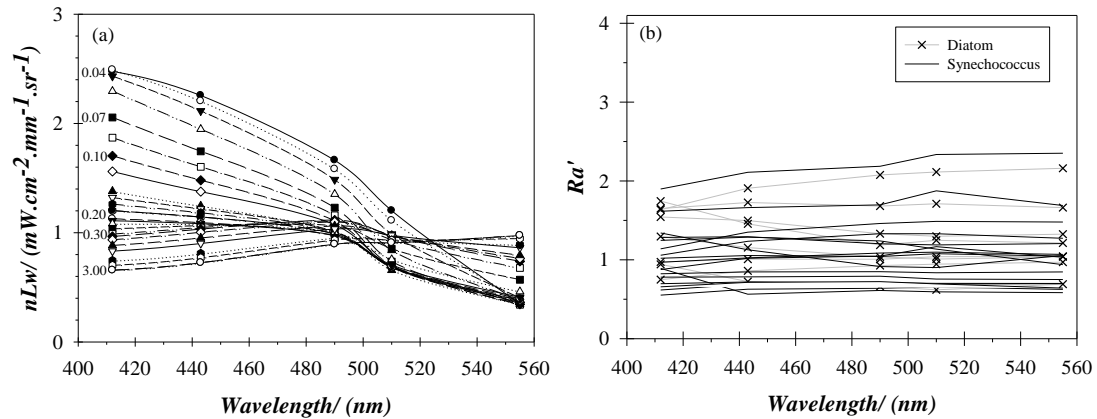
种不确定性主要有两个方面来源。其一,遥感 chla 反演算法。台湾海峡 OC3M 遥感 chla(0.1~10 mg/m<sup>3</sup>) 与实测对比存在高估现象,平均相对误差高达 136%<sup>[28]</sup>。本研究样品的 chla 局限于 0.04~3.0 mg/m<sup>3</sup>,且 80% 的样品低于 1.25 mg/m<sup>3</sup>(对应的平均相对误差为 55.3%),这在很大程度上避开近岸混浊水体,消减 chla 遥感算法对 Ra 的可能影响。其二,遥感与现场数据的匹配。因光照、潮汐等因素的作用,水体中浮游植物 chla 浓度通常存在昼夜差异<sup>[29]</sup>;且研究海域在夏季多上升流,伴随着上升流的发生,浮游植物生物量及群落结构会有所调整<sup>[22]</sup>。受天气、耀斑等影响,台湾海峡遥感数据缺失严重,本研究遥感与现场数据匹配的时间窗口设定为 +/-1 d,当卫星过境与现场采样时间相隔较久,或两天之内水团有较显著异动时,实际 chla 浓度或浮游植物类群则可能与遥感观测到信号出现偏离。

此外,PHYSAT 直接应用卫星遥感数据加以统计,而后以绝对阈值划分的方式分辨不同类群,很可能将卫星数据本身的质量问题带入<sup>[27]</sup>,算法失效的风险较大。

## 3.2 发展 PHYSAT 类算法的可能性

### 3.2.1 PHYSAT 区域算法

当浮游植物或其他水色成分存在显著区域特征时,采用全球通用的  $nLw^{ref}(\lambda, chla)$  将必然导致 Ra 结果的偏离 ( $Ra = nLw(\lambda) / nLw^{ref}(\lambda, chla)$ )。Navarro 等<sup>[30]</sup>在区域遥感叶绿素算法的基础上用地中海海域遥感数据生成  $nLw^{ref}(\lambda, chla)$  查找表,建立适用于地中海的区域 PHYSAT 算法。台湾海峡为联系东、南海的狭长水道,近岸水体不可避免的会受有色溶解有机物质 CDOM 或悬浮泥沙影响,水体成分与大洋水体不同。针对该问题,参考 Alvain 等<sup>[11]</sup>方法,选取航次所在 3 年(2004、2005、2006 年)的夏季(6、7、8 月) SeaWiFS daily 1.1 km 遥感数据(115.5-120.5 E, 21-26 N),生成台湾海峡区域  $nLw^{ref}(\lambda, chla)$  查找表,其中, chla 范围 0.04~3 mg/m<sup>3</sup>,气溶胶光学厚度  $aot_{865}$  小于 0.15,  $nLw_{555} < 1.3 \text{ mW}(\text{cm}^2 \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$ <sup>[11, 30]</sup>。形成的台湾海峡区域  $nLw^{ref}(\lambda, chla)$  查找表及相应的三个航次硅藻、聚球藻 Ra (以 Ra' 表示,区别于全球通用查找表生成的 Ra) 如图 5 所示。尽管硅藻、聚球藻的 Ra' (0.5~2.0) 与图 2 的 Ra (0.7~4.0) 相比变动范围变窄,相对集中,但两种浮游植物类群的 Ra 光谱依旧交错,难以用阈值分离。这可能与台湾海峡近岸河流输入及上升流的作用有关<sup>[20]</sup>。水团的复杂性,导致 CDOM 等非藻类成分的时空分布不均一,且相对浮游植物而言该部分光学信号不可忽略,最终影响 Ra 的分布。



(a)  $nLw^{ref}(\lambda,chl a)$ 台湾海峡区域查找表; (b) 三航次硅藻、聚球藻  $Ra'$ 。

图 5 基于  $nLw^{ref}(\lambda,chl a)$ 区域查找表的台湾海峡三航次硅藻、聚球藻  $Ra$  光谱分布

Fig. 5  $Ra$  spectra based on the regional lookup table of  $nLw^{ref}(\lambda,chl a)$  during summer 2004, 2005 and 2006 in the

TWS

### 3.2.2 $Ra$ 光谱谱形差异

针对 PHYSAT 方法可能存在的缺陷, Ben Mustapha 等<sup>[31]</sup>采用 SOM(self-organizing map) 自组织神经网络算法对  $Ra$  进行聚类。和 PHYSAT 相比, 该算法首先以满足一定条件的大量遥感  $Ra$  作为输入层, 形成  $10 \times 10$  的输出层(神经元); 基于这 100 个神经元, 某种浮游植物类群样品对应的  $Ra$  都可以找到与之最为相近的神经元, 从而很大程度避免 PHYSAT 阈值限制导致的样品不能有效找到归类问题。但 SOM 是一种非监督分类算法<sup>[32]</sup>, 100 个神经元的属性(和浮游植物类群的关系)未知。该研究把 600 多个已知浮游植物类群的  $Ra$  作为标注(labeling)样本, 将其投影至 100 个神经元, 从而确定 4 大浮游植物类群对应的神经元分布。该方法的前提是必须拥有大量数据作为标注样本, 类似本研究遥感与浮游植物类群匹配的样品数少的情况下, 无法检测 SOM 算法是否适用。

本研究中虽然硅藻和聚球藻对应的  $Ra$  严重交错分布, 但聚球藻光谱形状较为平缓, 硅藻光谱则从短波至长波有较明显的下降幅度(图 2)。对这两种类群的  $Ra$  进行 443 nm 归一化, 结果如图 6 所示。聚球藻在 490, 510, 555 nm 波段基本落在 0.8~1.0 之间, 而硅藻多数落在 0.6~0.7 之间, 较低。443 nm 归一化很大程度上消除了不同浮游植物类群  $Ra$  光谱在量值上的差异, 但同时也消除了同一浮游植物类群  $Ra$  在不同航次、不同站位的差别, 突显了各类群在光谱谱形的特性。显然, 聚球藻和硅藻在光谱谱形上有较大差异。

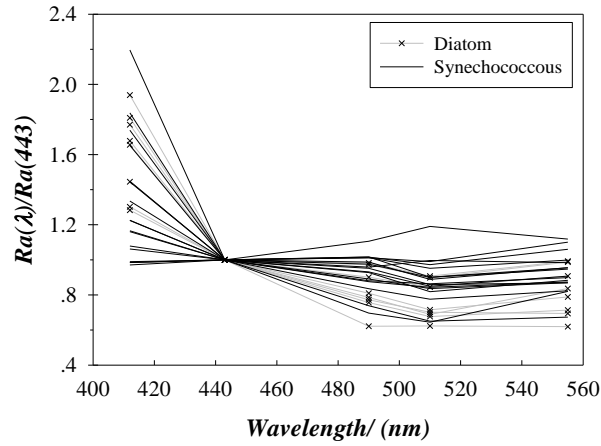


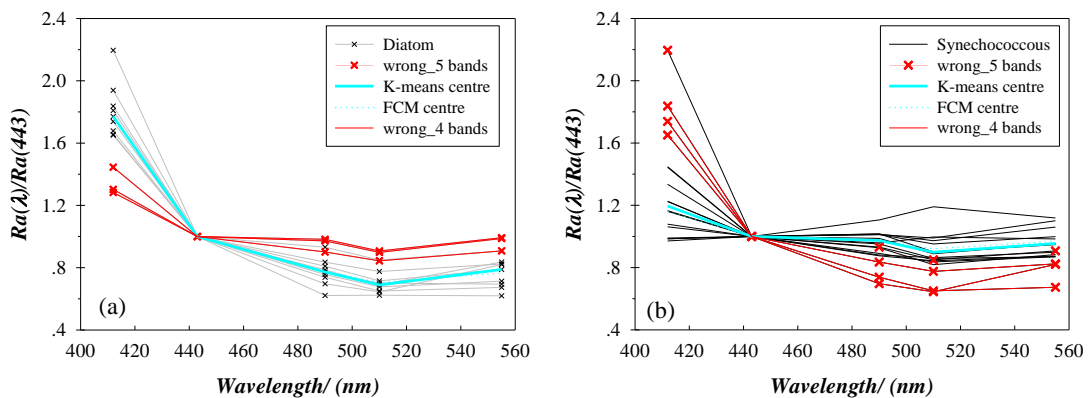
图 6 硅藻和聚球藻 443nm 归一化 Ra 光谱

Fig. 6 Ra spectra of Diatom and *Synechococcus* normalized at 443 nm

表 2 K-means、FCM 聚类结果

Tab. 2 Clustering results by K-means and FCM

	5 波段		4 波段 (不含 412 nm)	
	硅藻	聚球藻	硅藻	聚球藻
硅藻( <i>in situ</i> )	5	3	5	3
聚球藻( <i>in situ</i> )	4	13	3	14
聚类准确率	72%		76%	



(a) 硅藻; (b) 聚球藻。红色×、直线分别表示 5 个、4 个波段 (不含 412 nm) 输入时聚类错误光谱; K-means centre、FCM centre 代表算法形成的该类聚类质心 (5、4 个波段输入生成的质心基本重合)。

图 7 硅藻、聚球藻 443 nm 归一化 Ra 光谱 K-means、FCM 聚类分布图

Fig. 7 K-means and FCM clustering results for diatoms and *synechococcus*, using Ra normalized at 443 nm as

input

依据以上特征,用相对简单的聚类方法 K-means、FCM,尝试通过 443 nm 归一化 Ra 对 25 个样品的浮游植物类群进行聚类(两类,不含两个原绿球藻和微型真核生物样品)。如 PHYSAT 算法,把 5 个波段值全部作为输入,K-means 对两种类群的聚类准确率为 72%,其中硅藻的失误率较高(38%),聚球藻的较好(24%)(表 2;图 7)。FCM 聚类结果和 K-means 完全一致,但相比 K-means,FCM 可以提供样品对不同类别的隶属度参数(结果没有单列),从中看出样品的类群优势是否很凸显,如 2006 年航次 C3、C5 站均被归在同一类(聚球藻),但 C3 对聚球藻和硅藻两类别聚类中心的隶属度分别为 0.58 和 0.42,而 C5 则分别为 0.96 和 0.04,说明 C5 站聚球藻的主导优势比 C3 站更显著。这在实际应用中,可以从时空角度分辨浮游植物优势种群从一类到另一类的过渡与更替,对甄别混合类群水体也具有很大帮助。未来在更多数据积累的基础上,据此结果进一步发展分辨算法的可能性是存在的。

由于大气校正影响,卫星遥感反射率 Rrs 与实测值之间存在一定的偏差。已有卫星定标研究显示,SeaWiFS 的 Rrs 在 412 nm 波段相比其他可见光波段(443、490、510、555 nm),具有较大的不确定性<sup>[33-34]</sup>;在包括台湾海峡的南海东北部水体,MODIS 的 Rrs(412)和实测值也出现了较大偏离<sup>[35]</sup>。另一方面,CDOM、非藻类颗粒在包括 412 nm 的短波段具有强吸收,在高 CDOM、悬浮泥沙的近岸水体尤其对遥感信号有显著影响。以上原因导致 412 nm 波段 Ra 具有很大不确定性,容易被浮游植物之外的因素所干扰<sup>[17]</sup>。基于此,聚类尝试了不含 412 nm 的 4 个波段输入情况,聚类准确率可提高至 76%(表 2)。从图 7 可看出,4 个波段与 5 个波段输入相比,结果减少了对一个聚球藻的错误聚类。该样品 443 nm 归一化 Ra 光谱在 443~555 nm 与聚球藻类的质心极其接近,但因为 412 nm 波段出现较大偏离,以 5 个波段为输入时,被错误的分到硅藻类。可见,后续研究可以考虑应用 412 nm 以外波段,以减免大气校正或非藻类水色成分带入的不确定性影响。

综上所述,即便建立  $nLw^{ref}(\lambda,chl_a)$  台湾海峡区域查找表,生成的不同浮游植物类群 Ra' 依然难以通过阈值划分;基于 443 nm 归一化 Ra,却可以对不同浮游植物类群成功聚类。故而,在去除主要背景信号(chla)影响的条件下,浮游植物类群的分辨可能需要更多依赖于光谱谱形的变化,而非量值差异。在台湾海峡类似区域水体,或许可以通过 Ra 光谱谱形差异,识别主要浮游植物类群信息,从而提取浮游植物类群的时空变动信息及对环境条件的可能响应。

## 4 结论

采用 PHYSAT 算法, 在台湾海峡以硅藻和聚球藻主导的 25 个样品, 基于对应匹配的  $R_a$ , 浮游植物类群信息并不能被有效识别。硅藻和聚球藻两个类群的  $R_a$  相互交错, 且同一类群的  $R_a$  在不同年度、不同站位的分布也有差别; 建立  $nLw^{ref}(\lambda, chl_a)$  台湾海峡区域查找表, 亦未能改变不同浮游植物类群  $R_a$  混杂的趋势。PHYSAT 算法按  $R_a$  阈值及附加光谱特征限制对不同浮游植物类群进行分类, 并不适用于台湾海峡, 这可能与建立 PHYSAT 算法标准的海域和台湾海峡的水体光学特征不尽相同有关。

对  $R_a$  进行 443 nm 归一化, 用 K-means、FCM 聚类均可以较好将两个类群样品分开 (准确率 72%); 舍弃 412 nm 波段, 准确率可高达 76%, 这与短波段易受 CDOM、大气校正影响有关。该结果说明, 浮游植物类群的遥感分辨可能需要更多考虑光谱谱形上的差异, 而不是如 PHYSAT 算法进行量值范围区分。

当然, 受现场采样和遥感数据匹配的限制, 本研究的样品数偏少, 且集中在硅藻和聚球藻两个类群。新增其他类群, 如原绿球藻、微型真核生物类群时, 尤其是原绿球藻和聚球藻同属 pico 级浮游植物, 从  $R_a$  光谱谱形特征上是否可以有效将几种类群浮游植物有效分开, 还有待更多的现场数据支持与验证。

## 参考文献:

- [1] LE QUÉRÉ C, HARRISON S P, PRENTICE I C, et al. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 2016-2040. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01004.x.
- [2] TOTTERDELL I J, ARMSTRONG R A, DRANGE H, et al. Trophic resolution[C]// *Towards a model of ocean biogeochemical processes*. Berlin: Springer Verlag, 1993: 71-92.
- [3] BALCH W M, KILPATRICK K A, TREES C C. The 1991 coccolithophore bloom in the central North Atlantic. 1. Optical properties and factors affecting their distribution[J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(8): 1669-1683.
- [4] BROWN C W, YODER J A. Coccolithophorid blooms in the global ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 7467-7482.
- [5] SHUTLER J D, GRANT M G, MILLER P I, et al. Coccolithophore bloom detection in the north east Atlantic using SeaWiFS: Algorithm description, application and sensitivity analysis[J]. *Remote Sensing of*

Environment, 2010, 114: 1008–1016.

- [6] SUBRAMANIAM A, CARPENTER E J, FALKOWSKI P G. Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp.: II. A reflectance model for remote sensing[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44: 618-627.
- [7] SUBRAMANIAM A, BROWN C W, HOOD R R, et al. Detecting *Trichodesmium* blooms in SeaWiFS imagery[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2002, 49: 107-121.
- [8] WESTBERRY T K, SIEGEL D A, SUBRAMANIAM A. An improved bio-optical model for the remote sensing of *Trichodesmium* spp. blooms[J]. *Journal Geophysical Research*, 2005, 110: C06012, doi:10.1029/2004JC002517.
- [9] CANNIZZARO J P, CARDER K L, CHEN F R, et al. A novel technique for detection of the toxic dinoflagellate, *Karenia brevis*, in the Gulf of Mexico from remotely sensed ocean color data[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 137-158.
- [10] SATHYENDRANATH S, WATTS L, DEVRED E, et al. Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 272: 59-68.
- [11] ALVAIN S, MOULIN C, DANDONNEAU Y, et al. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery[J]. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 1989–2004.
- [12] ALVAIN S, MOULIN C, DANDONNEAU, et al. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22: GB3001.
- [13] HIRATA T, HARDMAN-MOUNTFORD N M, BREWIN R J W, et al. Synoptic relationships between surface Chlorophyll-a and diagnostic pigments specific to phytoplankton functional types[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 311–327. doi:10.5194/bg-8-311-2011.
- [14] PAN X J, WONG G G F, HO T Y, et al. Remote sensing of picophytoplankton distribution in the northern South China Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 162-175.
- [15] ALVAIN S, LE QUÉRÉ C, BOPP L, et al. Rapid climatic driven shifts of diatoms at high latitudes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 132: 195-201.
- [16] MASOTTI I, BELVISO S, ALVAIN S, et al. Spatial and temporal variability of the dimethylsulfide to chlorophyll ratio in the surface ocean: an assessment based on phytoplankton group dominance determined from space[J]. *BIOGEOSCIENCES*, 2010, 7(10): 3215-3237.
- [17] ALVAIN S, LOISEL H, DESSAILLY D. Theoretical analysis of ocean color radiances anomalies and

- implications for phytoplankton groups detection in case 1 waters[J]. *Optics Express*, 2012, 20: 1070 – 1083.
- [18] 李月洋, 孙群, 王磊, 等. 利用PHYSAT方法反演南海浮游植物优势类群分布的季节变化[J]. *天津科技大学学报*, 2015, 30(5): 42-49.
- [19] LIU F F, CHEN C Q. Remote sensing study of the seasonal distribution of phytoplankton groups in the South China Sea[C]// 2012 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany: IEEE, 2012: 2563-2566.
- [20] HONG H, ZHANG C, SHANG S, et al. Interannual variability of summer coastal upwelling in the Taiwan Strait[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29: 479-484.
- [21] SHANG S L, ZHANG C Y, HONG H S, et al. Hydrographic and biological changes in the Taiwan Strait during the 1997-1998 El Niño winter[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L11601.
- [22] 胡俊. 台湾海峡南部浮游植物类群组成及其对上升流的响应研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [23] 王海黎, 洪华生. 近岸海域光合色素的生物标志作用研究I. 台湾海峡特征光合色素的分布及其对浮游植物类群结构的指示[J]. *海洋学报*, 2000, 22(3): 94-102.
- [24] 黄邦钦, 胡俊, 柳欣, 等. 全球气候变化背景下浮游植物群落结构的变动及其对生物泵效率的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2011, 50(2): 402-410.
- [25] HUANG B Q, HU J, XU H Z, et al. Phytoplankton community at warm eddies in the northern South China Sea in winter 2003/2004[J]. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57: 1792-1798.
- [26] 谢中华. *MATLAB统计分析与应用: 40个案例分析*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 1-510.
- [27] WEI J, LEE Z, SHANG S. A system to measure the data quality of spectral remote-sensing reflectance of aquatic environments[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 8189–8207. doi:10.1002/2016JC012126.
- [28] SHANG S, DONG Q, LEE Z, et al. MODIS observed phytoplankton dynamics in the Taiwan Strait: an absorption-based analysis[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 841-850. doi:10.5194/bg-8-841-2011.
- [29] 王磊, 钟超, 柳欣, 等. 夏季南海东北部和东海陆架浮游植物群落结构昼夜变化的比较研究[J]. *海洋学报*, 2013, 35(6): 170-177.
- [30] NAVARRO G, ALVAIN S, VANTREPOTTE V, et al. Identification of dominant phytoplankton functional types in the Mediterranean Sea based on a regionalized remote sensing approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 557-575.
- [31] BEN MUSTAPHA Z, ALVAIN S, JAMET C, et al. Automatic classification of water-leaving radiance anomalies from global SeaWiFS imagery: Application to the detection of phytoplankton groups in open

- ocean waters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146: 97-112.
- [32] KOHONEN T. Essentials of the self-organizing map[J]. *Neural Networks*, 2013, 37: 52–65.
- [33] ANTOINE D, D'ORTENZIO F, HOOKER S B, et al. Assessment of uncertainty in the ocean reflectance determined by three satellite ocean color sensors (MERIS, SeaWiFS and MODIS-A) at an offshore site in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE project)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, C07013. doi:10.1029/2007JC004472.
- [34] BAILEY S W, WERDELL P J. A multi-sensor approach for the on orbit validation of ocean color satellite data products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 12-23.
- [35] SHANG S L, DONG Q, HU C M, et al. On the consistency of MODIS chlorophyll a products in the northern South China Sea[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11: 269-280. doi:10.5194/bg-11-269-2014.

# Test of PHYSAT Method to Detect Phytoplankton Groups from Space in the Taiwan Strait

WU Jingyu<sup>1,2,3</sup>, SHANG Shaoling<sup>1,3</sup>, LIU Xin<sup>4</sup>, SHANG Shaoping<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 3. Research and Development Center for Ocean Observation Technologies, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 4. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** PHYSAT, one of the widely-accepted methods to detect multiple phytoplankton groups from space, was tested in the summer Taiwan Strait (TWS) with 27 match-ups of *in situ* HPLC pigments collected during three cruises and SeaWiFS daily data. Ra (reflectance anomalies) spectra of the two dominated phytoplankton groups (Diatoms and *Synechococcus*) in the TWS were completely mixed. Significantly temporal and spatial variabilities of Ra magnitude were also



observed among samples of a specific phytoplankton group, which may be due to the different bio-optical characteristic in waters, especially particulate backscattering coefficients ( $b_{bp}$ ). Phytoplankton group in the TWS couldn't be identified successfully using Ra with PHYSAT threshold and additional spectral criterial, even Ra based on the regional lookup table of  $nLw^{ref}(\lambda,chl a)$  for TWS. Clustering methods, K-means and FCM (Fuzzy c-means), were applied to the same dataset, with Ra normalized at 443 nm as input parameter. More than 70% of samples were successfully identified. It seems that remote sensing of phytoplankton groups maybe pay more attention to the Ra spectra shape difference rather than magnitude in the regional area such TWS.

**Key words:** PHYSAT; phytoplankton groups; remote sensing; Taiwan Strait; threshold; spectra shape