

# 浮游植物光吸收特性研究

## Advances in the studies on light absorption properties of phytoplankton

吴璟瑜, 商少凌, 洪华生, 李 炎

(厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

中图分类号: P71

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2006)06-0077-05

伴随着海洋水色卫星遥感技术的推进, 海洋生物光学日益成为一个引人瞩目的交叉学科生长点, 国内学者业已注意到这一发展趋势并提出了近期应加强研究的核心问题<sup>[1]</sup>。而浮游植物作为水体中的主要光能利用者、初级生产者, 其光吸收特性自然成为海洋生物光学中甚为关键的问题之一。浮游植物光吸收特性通常以浮游植物吸收系数( $a_{ph}$  或  $a$ )表示, 作者就近年来浮游植物吸收系数的研究进展及其应用进行综述。

### 1 研究现状

#### 1.1 测定方法

由于水体中浮游植物的浓度通常不高, 直接测量的吸收信号弱, 再则如何有效地将浮游植物吸收与其他颗粒分离存在困难, 对浮游植物吸收的测定方法有很多的探索。常用的实验室测定浮游植物吸收的方法有3种。第一, 用GF/F滤膜富集一定体积水样颗粒物, 用带有积分球的分光光度计测定样品膜相对于空白膜的吸收, 计算获取总颗粒吸收系数( $a_p$ ), 然后用有机溶剂(一般为甲醇)或氧化剂(NaClO溶液)去除有机部分(假设主要为浮游植物色素), 再次测定样品膜, 计算得到非色素颗粒吸收系数( $a_d$ ), 总颗粒吸收系数与非色素颗粒吸收系数的差异归为浮游植物吸收系数( $a_{ph}$ )<sup>[2, 3]</sup>。这种方法间接测定浮游植物吸收, 能反映活体细胞的吸收特征, 在浮游植物为主要颗粒物质的水体有很好的效果, 是国际通用标准法, 但仍存在一些问题, 如: 滤膜富集造成的光路扩大效应的校正(校正), 试剂对色素的选择性去除(如甲醇不能去除水溶性的藻胆蛋白, NaClO溶液则可)。第二种方法测定总颗粒吸收的方式相同, 但在假设非色素颗粒吸收光谱类指数函数递减的前提下, 用统计或模式而非化学的手段将浮游植物吸收与非色素颗粒吸收分离<sup>[4, 5]</sup>。显然, 这种方法

操作相较简单, 但统计或模式的应用具有区域性。第三种方法, 在HPLC测定色素的基础上进行光谱重组<sup>[6]</sup>: 即用单位浓度色素的吸收系数乘以对应色素的浓度, 获取该色素的吸收, 最终将不同的色素吸收相加。这种方法可以将不同色素对吸收的贡献分开, 但通常能识别的色素信息有限, 且实际上其采用的是萃取出的溶液状态下的单位色素的吸收系数, 虽然进行了光谱调整, 活体细胞状态下的色素吸收(in vivo)与溶解状态下的色素吸收(in vitro)的差异仍无法估计; 另外, 其认为单位色素的吸收系数恒定, 这与实际观测的结果不符。还有其他非实验室测定方法, 如用AC-9进行现场观测<sup>[7, 8]</sup>, 但无法将浮游植物与其他成分的吸收分离; 用遥感反射率反演水体成分的吸收<sup>[9, 10]</sup>, 但必须建立在经验的基础上。

可以说, 为了更真实反映浮游植物活体细胞的状态, 浮游植物吸收的获取只能通过总颗粒吸收的测定, 再考虑与非色素颗粒分离。但在低生物含量、高降解产物的深层海水和高有机污染物的二类水体, 试剂去除色素的同时可能包括非色素有机部分, 从而造成对浮游植物吸收的高估; 模式分离法也只能将非色素有机颗粒和无机颗粒吸收混在一起。作者所在的实验室对我国二类水体颗粒吸收的研究发现, 特别是在低叶绿素含量的季节, 甲醇萃取所得的浮游植物吸收很可能更多来源于其他有机颗粒物质的贡献(未发表数据)。国内水体的特殊性使人们有必要更为细致

收稿日期: 2005-03-20; 修回日期: 2006-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40376031); 国家863计划资助项目(2002AA639540); 国家自然科学基金重点基金资助项目(40331004)。

作者简介: 吴璟瑜(1978-), 女, 福建云霄人, 博士研究生, 主要从事海洋生物光学研究, 电话: 0592-2186871, E-mail: wjy@xmu.edu.cn

分离颗粒吸收的不同组分,进一步确定非色素有机颗粒成分及其吸收光谱特征,才能导出相对准确的浮游植物吸收光谱。

### 1.2 色素打包效应

大量的观测结果表明,浮游植物吸收在光谱和大小上均存在很大的变动。环境因素如光线、营养盐等会影响藻类细胞的状态而最终影响吸收光谱,不同的藻类则明显存异,但无论如何,吸收光谱的变动最终都可归因于色素组成及打包效应的差异:色素组成直接决定光谱谱型,打包效应影响色素对光的吸收效率。在色素组成和打包效应影响分析中,常用的方法是对浮游植物吸收光谱进行高斯分解:根据主要色素——叶绿素和类胡萝卜素的吸收峰位置,将浮游植物吸收光谱分成 11 或 13 个高斯带,获取不同色素在活体细胞的吸收系数,进而结合色素的信息分析<sup>[11-13]</sup>。Hoepffner 和 Sathyendranath<sup>[11]</sup> 实验分析结果显示,各高斯带的峰高和对应的色素的浓度存在线性关系,且没有种类差异,也即单位浓度色素在活体细胞的吸收系数恒定。但更多数的结果表明,单位浓度色素对光的吸收系数存在变动,影响因素是色素打包效应。打包效应因子定义为相同量的色素在活体细胞状态下和在溶液状态下的吸收比值,理想值为 1(没有打包效应),与细胞内色素的成分、浓度及细胞的粒径有关<sup>[14,15]</sup>。一般认为,贫营养水体的藻类细胞较小,打包效应影响小;中、高营养的藻类细胞大,打包效应影响也大;在水体垂直结构上,因为光适应性,表层藻类细胞内色素浓度相对深层的藻类细胞内色素浓度低,打包效应影响也较小<sup>[3,16]</sup>。在对浮游植物吸收光谱进行高斯分解后,Stuart 等<sup>[12]</sup>、Lorenz 等<sup>[13]</sup>用函数拟合各高斯带峰高和对应色素浓度的关系,然后外推获取理想存在的单位色素在活体细胞的吸收系数最大值(没有打包效应),进而衡量样品色素打包效应大小;同时,结合色素信息,对色素组成及打包效应对浮游植物吸收光谱变动的影 响进行评估,二者得出相似的结论:打包效应是更为主要的影响因子。

### 1.3 浮游植物吸收系数与叶绿素 a 关系模式

受色素组成和打包效应的影响,浮游植物吸收与叶绿素 a 浓度的关系多数为非线性。

Prieur 和 Sathyendranath<sup>[17]</sup>、Bricaud 等<sup>[18]</sup>、曹文熙等<sup>[19]</sup>用幂函数拟合二者的关系:

$$a_{ph}(\lambda) = A[\text{chl}a]^\beta \dots\dots\dots (1)$$

其中,  $\lambda$  表示波长,  $A$ 、 $B$  为两拟合参数。

Cleveland 等<sup>[20]</sup>采用多项式拟合:

$$a_{ph}(\lambda) = A[\text{chl}a]^2 + B[\text{chl}a] \dots\dots\dots (2)$$

Sathyendranath 和 Platt<sup>[21]</sup>、Lutz 等<sup>[22]</sup>、Stuart 等<sup>[12]</sup>采用直角双曲线函数 (rectangular hyperbola function):

$$a_{ph}(\lambda) = \frac{A[\text{chl}a]}{B + [\text{chl}a]} \dots\dots\dots (3)$$

相对的,直角双曲线函数能够较好地体现浮游植物比叶绿素 a 吸收系数  $a_{ph}^*$  (chlorophyll a-specific absorption coefficient of phytoplankton) 的变化特征:

$$a_{ph}^* = a_{ph}(\lambda) / [\text{chl}a] = \frac{A}{B + [\text{chl}a]} \dots\dots\dots (4)$$

叶绿素 a 浓度很低时,打包效应影响通常很小,  $a_{ph}^*$  接近于最大值 ( $A/B$ ); 叶绿素 a 浓度很高时,打包效应影响通常很大,  $a_{ph}^*$  趋近于零。

### 1.4 紫外吸收特征与机理

浮游植物吸收的另一个研究热点与某些藻类的紫外吸收特征及其化学成分、控制机理有关。许多研究者发现,一些藻类,如硅藻、蓝藻、原甲藻等,含有或会分泌特殊的强 UV(紫外)吸收物质,如 MAA (mycosporine-like amino acid)、Scytonemin 等<sup>[23-26]</sup>。MAA 在 310 ~ 360 nm 有强吸收峰,但多数成分不能确定。光照实验表明 UV-A (315 ~ 400 nm) 辐射对类 MAA 物质有强诱导作用<sup>[27]</sup>, UV-B (280 ~ 315 nm) 的作用则有不同的报道<sup>[25,28]</sup>。尽管多数成分未知,一般认为,MAA 等物质是生物抗强光、自我保护的结果。Kahru 和 Mitchell 发现<sup>[29]</sup>,南 California 发生 dinoflagellate *Lingulodinium polyedra* 赤潮时,遥感反射率  $R_{rs}$  (340 或 380 nm) 与  $R_{rs}$  (412 或 443 nm) 的比明显低于基线调查中的一般情况,可能由于这种藻内含的或分泌的 MAA 物质导致水体 340 ~ 400 nm 的吸收升高,从而降低了此波段遥感反射率,提出用带有紫外通道的卫星区分这类藻种与其他藻种赤潮的可能性;在 2002 年东海 dinoflagellate *Prorocentrum dentatum* 水华也发现类似的现象。遗憾的是至今对藻类紫外吸收的研究多集中在生理、机理上,很少有从遥感应用的角度综合测试各种光学参数。而类 MAA 物质的进一步分离所产生的特定物质的吸收光谱信息及成分鉴定可能是分辨藻种的有效辅助手段<sup>[30]</sup>。

## 2 应用

### 2.1 海洋初级生产力生物光学模式的必备参数

光合作用是一个将光能转化为化学能的过程,浮游植物对光的吸收能力必然影响其合成效率,浮游植物吸收系数是海洋初级生产力生物光学模式的必要参数<sup>[31,32]</sup>。Lewis 等<sup>[33]</sup>实验结果显示,PE 曲线(光

合作用-辐照度曲线)的初始斜率<sup>B</sup>(最大光利用系数)是初级生产力的最大潜在影响因子,而<sup>B</sup>由光合作用最大量子产率<sub>m</sub>和浮游植物比叶绿素a吸收系数 $a_{ph}^*$ 所决定( $B = m \cdot a_{ph}^*$ )。Babin等<sup>[34]</sup>在St. Lawrence河口研究也证实,浮游植物比叶绿素a吸收系数的变动会很大影响初级生产力的估算,用恒定常数表示浮游植物比叶绿素a吸收系数,在贫营养水体造成的误差可高达24%。

## 2.2 海洋热通量及气候的影响因子

大量研究表明,浮游植物的生长会影响水体的垂直热结构,改变混合层深度,提高海表温度(SST)<sup>[35~39]</sup>,通过海气相互作用,最终可达到对整个气候的调节<sup>[40]</sup>;甚至在海冰中,微型藻类的大量存在会很大改变海冰的温度,加快其融化速度<sup>[41]</sup>。而浮游植物对海洋环境的加热作用归结于其对太阳辐射的吸收并大部分以热的形式释放,因此在海洋热通量的计算或气候模式中,浮游植物对光吸收能力的表征——浮游植物吸收系数是不可缺少的参数。

## 2.3 水色遥感的基础

在大洋水体,水色遥感经验算法对叶绿素的估算已取得较满意的结果<sup>[42]</sup>,但在光学特征复杂的近岸水体、河口区域,受其他水色成分的干扰,经验算法会高估实际值。基于辐射传输模式的半分析算法同时考虑多种水色成分的贡献<sup>[43, 44]</sup>,可以更为准确地估算水体生物量,另外可导出其他水色成分如有色溶解有机物质(CDOM)的信息,半分析算法是二类水体遥感的有效途径。半分析算法要求准确测定浮游植物的吸收光谱,建立浮游植物吸收系数与叶绿素a浓度的经验关系式;而只有在实测数据的基础上,寻找浮游植物吸收光谱与不同色素的关系,才可能推动现在的单一叶绿素a遥感走向多色素遥感。

## 3 展望

从20世纪80年代浮游植物光吸收特性的研究引起关注,迄今发展20余年,对大洋水体以及浮游植物单一种类的认识已相对成熟,近海复杂多变的生物光学域将是研究的热点。

首先是不同来源的吸收信号分离的问题。现有的规范方法,仅将颗粒吸收简单地分成浮游植物吸收与非色素颗粒吸收两部分,而一方面,近海往往含有高浓度的非色素有机颗粒,很容易造成对浮游植物吸收的高估,另一方面,近海生物多样性高,不同色素结构下的浮游植物吸收研究特性差异尚不清楚,因此有效分离非色素有机颗粒吸收并确定其吸收特征,细化不同色素的吸收,而非仅仅考虑叶绿素a的

影响,将成为饶富意趣的问题,更可以为实现从单一的叶绿素a遥感向多色素信号提取奠定基础。但需要指出的是,冲击这一问题,存在较高的难度,必须充分借助日益先进的化学手段。

其次是紫外强吸收物质的组成、吸收特征变化以及控制机理的问题。近海深受赤潮困扰,某些藻类具有的紫外强吸收特性可提供藻类判别的辅助依据,对未来的赤潮遥感监测会有很大的帮助,相信对这一特定物质的细致研究将是一个重要的发展趋势。我国拥有漫长的海岸线,近海港湾众多,随着经济的飞速发展,大量污染物排入海,富营养化、赤潮灾害严重,必然很大程度上呈现污染水体生物光学域的特征。从作者所在的研究组以及国内同行取得的有限的浮游植物吸收特性数据看<sup>[19]</sup>,在珠江口、厦门西海域等水体中可能有较多非色素有机物质的存在;部分海区也观测到水华期浮游植物在UV区的强吸收现象。作者认为,我国很有必要着重在分离方法、紫外吸收物质两方面切实加强中国近海浮游植物吸收特性的研究,力争在海洋生物光学领域取得具有原创性的成果。

### 参考文献:

- [1] 曹文熙, 黄良民. 海洋生物-光学研究进展与展望[J]. 自然科学进展, 2004, 14: 20-27.
- [2] Kishino M, Takahashi N, Ichimura S. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea [J]. *Bull Mar Sci*, 1985, 37: 634-642.
- [3] NASA Technical Memorandum 2000-209966. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation [S].
- [4] Bricaud A, Stramski D. Spectral absorption coefficients of living phytoplankton and nonalgal biogenous matter: A comparison between the Peru upwelling and the Sargasso Sea [J]. *Limnol Oceanogr*, 1990, 35(3): 562-582.
- [5] Roesler C S, Perry M J. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters [J]. *Limnol Oceanogr*, 1989, 34(8): 1510-1523.
- [6] Bidigare R R, Ondrusek M E, Morrow J H, et al. In vivo absorption properties of algal pigments [J]. *Proc SPIE Ocean Opt X*, 1990, 1302: 290-302.
- [7] DSa E J, Miller R L. Bio-optical properties in waters influenced by the Mississippi River during low flow conditions [J]. *Remote Sens Environ*, 2003, 84: 538-549.
- [8] Mc Kee D, Cunningham A, Slater J, et al. Inherent

- and apparent optical properties in coastal waters: a study of the Clyde Sea in early summer [J]. **Estuar Coast and Shelf Sci**, 2003, 56: 369-376.
- [9] Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Inherent optical properties of the Irish Sea determined from underwater irradiance measurements [J]. **Estuar Coast and Shelf Sci**, 1996, 43: 433-447.
- [10] Lee Z P, Carder K L. Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote sensing reflectance [J]. **Remote Sens Environ**, 2004, 89: 361-368.
- [11] Hoepffner N, Sathyendranath S. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton [J]. **Mar Eco Prog Ser**, 1991, 73: 11-23.
- [12] Stuart V, Sathyendranath S, Platt T, *et al.* Pigments and species composition of natural phytoplankton populations: effect on the absorption spectra [J]. **J of Plankton Res**, 1998, 20: 187-217.
- [13] Lohrenz S, Weidemann A D, Tuel M. Phytoplankton spectral absorption as influenced by community size structure and pigment composition [J]. **J Plankton Res**, 2003, 25(1): 35-61.
- [14] van de Hulst H C. Light Scattering by Small PAarticles [M]. New York: Wiley J, 1957.
- [15] Morel A, Bricaud A. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton [J]. **Deep Sea Res**, 1981, 28A(11): 1 375-1 393.
- [16] Allali K, Bricaud A, Claustre H. Spatial variations in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific [J]. **J Geophys Res**, 1997, 102: 12 413-12 423.
- [17] Prieur L, Sathyendranath S. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials [J]. **Limnol Oceanogr**, 1981, 26: 671-689.
- [18] Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization [J]. **J Geophys Res**, 1995, 100(C7): 13 321-13 332.
- [19] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式 [J]. **科学通报**, 2003, 48: 1 876-1 882.
- [20] Cleveland J S. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll a concentration [J]. **J Geophys Res**, 1995, 100 (C7): 13 333-13 344.
- [21] Sathyendranath S, Platt T. The spectral irradiance field at the surface and in the interior of the ocean model for applications in oceanography and remote sensing [J]. **J Geophys Res**, 1988, 93: 9 270-9 280.
- [22] Lutz V A, Sathyendranath S, Head E J H. Absorption coefficient of phytoplankton: regional variations in the North Atlantic [J]. **Mar Ecol Prog Ser**, 1996, 135: 197-213.
- [23] Grniger A, Sinha R P. Photoprotective compounds in cyanobacteria, phytoplankton and macroalgae-a database [J]. **J Photochem Photobiol B: Biol**, 2000, 58: 115-122.
- [24] Rozema J, Bjrn L O, Bornman J F, *et al.* The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems-an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds [J]. **J Photochem Photobiol B: Biol**, 2002, 66: 2-12.
- [25] Sinha R P, Klisch M, Gr niger A, *et al.* Ultraviolet-absorbing/ screening substances in cyanobacteria, phytoplankton and macroalgae [J]. **J Photochem Photobiol B: Biol**, 1998, 47: 83-94.
- [26] Zudaire L, Roy S. Photoprotection and long-term acclimation to UV radiation in the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* [J]. **J Photochem Photobiol B: Biol**, 2001, 62: 26-34.
- [27] Carreto J I, Carignan M O, Daleo G, *et al.* Occurrence of mycosporine-like amino acids in the red tide dinoflagellate *Alexandrium excavatum*: UV-Protective compounds? [J]. **J Plankton Res**, 1990, 12: 909-921.
- [28] Klisch M, Hä der D-P. Mycosporine-like amino acids in the marine dinoflagellate *Gymnodinium dorsum*: induction by ultraviolet irradiation [J]. **J Photochem Photobiol B: Biol**, 1999, 55: 178-182.
- [29] Kahru M, Mitchell B G. Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and dissolved organic matter concentration in the California Current [J]. **J Geophys Res**, 2001, 106: 2517-2529.
- [30] Carreto J I, Carignan M O, Montoya N G. Comparative studies on mycosporine-like amino acids paralytic shellfish toxins and pigment profiles of the toxic dinoflagellates *Alexandrium tamarense*, *A. catenella* and *A. minutum* [J]. **Mar Ecol Prog Ser**, 2001, 223: 49-60.
- [31] Bidigare R R, Prezelin B B, Smith R C. Bio-optical models and the problems of scaling [A]. Falkowski P G, Woodhead A D. Primary Productivity and Biogeochemical cycles in the Sea [C]. New York: Ple-

- num Press, 1992. 175-212.
- [32] Morel A, Antoine D, Babin M, *et al.* Measured and modeled primary production in the northeast Atlantic (EUMELI JOGFS program): the impact of natural variations in the photosynthetic parameters on model predictive skill [J]. **Deep Sea Res I**, 1996, **43**(8): 1 273-1 304.
- [33] Lewis M R, Warnock R E, Platt T. Absorption and photosynthetic absorption spectra for natural phytoplankton populations: Implication for production in the open ocean [J]. **Limnol Oceanogr**, 1985, **30**: 794-806.
- [34] Babin M, Theriault J C, Legendre L, *et al.* Variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimates of primary production [J]. **Limnol Oceanogr**, 1993, **38**: 154-177.
- [35] Bissett W P, Schofield O, Glenn S, *et al.* Resolving the impacts and feedbacks of ocean optics on upper oceanecology [J]. **Oceanography**, 2001, **14**: 30-53.
- [36] Morel A, Antoine D. Heating rate within the upper ocean in relation to its bio-optical state [J]. **J Phys Oceanogr**, 1994, **24**: 1 652-1 665.
- [37] Nakamoto S, Prasanna Kumar S, Oberhuber J M, *et al.* Chlorophyll modulation of mixed layer thermodynamics in a mixed-layer isopycnal general circulation model an example from Arabian Sea and equatorial Pacific [J]. **Proc Indian Acad Sci**, 2002, **111**: 339-349.
- [38] Lewis M R, Carr M-E, Feldman G C, *et al.* Influence of penetration solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific [J]. **Nature**, 1990, **347**: 543-546.
- [39] Sathyendranath S, Gouveia A D, Shetye S R, *et al.* Biological control of surface temperature in the Arabian Sea [J]. **Nature**, 1991, **349**: 54-56.
- [40] Timmermann A, Jin F F. Phytoplankton influences on tropical climate [J]. **Geophys Res Lett**, 2002, **29**, doi:10.1029/2002GL015434.
- [41] Zeebe R E, Eicken H, Robinson D, *et al.* Modeling the heating and melting of sea ice through light absorption by microalgae [J]. **J Geophys Res**, 1996, **101**: 1 163-1 181.
- [42] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, *et al.* Ocean color algorithms for SeaWiFS [J]. **J Geophys Res**, 1998, **103**(C11): 24 937-24 953.
- [43] Carder K L, Chen F R, Lee Z P, *et al.* Semianalytic Moderate-Resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures [J]. **J Geophys Res**, 1999, **104**: 5 403-5 421.
- [44] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, *et al.* A semianalytic radiance model of ocean color [J]. **J Geophys Res**, 1988, **93**: 10 909-10 924.

(本文编辑:张培新)