

脱镁叶绿素对浮游植物吸收特性的影响*

王 林^{1,2} 赵冬至¹ 邢小罡^{1,3} 杨建洪¹ 傅云娜¹

(1. 国家海洋环境监测中心遥感室 大连 116023; 2. 大连海事大学环境科学与工程学院 大连 116026;
3. 中国海洋大学物理海洋研究所 青岛 266100)

提要 根据 2007 年 6 月期间对大连湾的调查数据, 分析了脱镁叶绿素对浮游植物吸收特性的影响。由实测数据及相关文献推断出脱镁叶绿素蓝光和红光吸收峰分别位于 412 和 670nm 波段, 并采用多元线性回归对脱镁叶绿素和叶绿素 *a* 的比吸收系数进行研究。结果表明, 412nm 波段脱镁叶绿素的比吸收系数远大于叶绿素 *a*; 440nm 波段, 叶绿素 *a* 的比吸收系数略大于脱镁叶绿素; 670、675nm 波段, 叶绿素 *a* 的比吸收系数约为脱镁叶绿素的 3 倍。随脱镁叶绿素占色素总浓度比例的增大, 浮游植物吸收曲线上蓝光吸收峰偏离 440nm 波段, 逐渐向 412nm 波段靠近, 并得到蓝光波段吸收峰的高度由脱镁叶绿素浓度决定, 而红光波段吸收峰的高度由叶绿素 *a* 浓度决定。色素浓度与吸收系数进行乘幂函数拟合分析表明, 412、440nm 波段吸收系数与脱镁叶绿素浓度拟合相关性高于叶绿素 *a*, 而 675nm 波段相反。

关键词 脱镁叶绿素, 浮游植物, 叶绿素 *a*, 吸收系数, 比吸收系数

中图分类号 Q948.885.3

浮游植物是海洋表层普遍存在的自由浮动的生物, 与非色素颗粒物、黄色物质统称为水色三要素, 它决定着大洋及近岸水体的生物光学特性。浮游植物吸收特性是水体的固有光学特性之一, 是建立水色遥感半分析算法的前提和基础(Carder *et al*, 1999), 由包裹效应(Bricaud *et al*, 1998)及色素组成(Hoepffner *et al*, 1991)的差异共同决定。包裹效应是相同量的色素在活体细胞状态下(*in vivo*)和在溶液状态下(*in vitro*)的吸收比值, 理想值为 1(没有包裹效应), 与细胞内色素的成分、浓度及细胞的粒径有关(Van de Hulst, 1957; Morel *et al*, 1981)。不同的色素组成对应不同的浮游植物吸收特征: 浮游植物吸收的大小与色素含量的高低直接相关, 浮游植物吸收峰的分布对应不同的色素成分。色素组成因藻种类别而异, 不过所有的浮游植物细胞内都富含叶绿素 *a*(Chl-*a*)。因此, 大部分浮游植物吸收特性均体现出叶绿素 *a* 的吸收特征, 在 440nm、675nm 波段有两个明显的吸收主峰。然而, 对于某些近岸区域而言, 水体富营养化严

重, 浮游植物繁殖迅速, 通常为赤潮灾害的高发区, 新陈代谢加上水质污染造成浮游植物大量衰亡。一般认为, 浮游藻类细胞死亡后, 叶绿素随即游离出来, 游离叶绿素很不稳定, 对光、热较敏感, 在酸性条件下叶绿素分子卟啉环中央的镁离子被两个氢离子置换转化成脱镁叶绿素(Pheo), 它表征了水体中无生命状态的叶绿素含量, 其含量越高说明水质越差。当水体中脱镁叶绿素含量较高时, 浮游植物吸收特性必然发生变化, 给水体生物光学信息的识别带来重要影响。目前, 脱镁叶绿素吸收特性的研究大部分集中于其溶液状态下的分析, 而其存在对浮游植物吸收特性影响的报道较少。国外研究发现, 脱镁叶绿素的存在使浮游植物蓝光吸收峰向短波偏移, 而吸收峰的高度也因脱镁叶绿素和叶绿素 *a* 比吸收系数的不同而发生变化。Bricaud 等(1995)研究发现某些浮游植物吸收曲线蓝光吸收峰位于 420nm 附近, 并指出是由脱镁叶绿素的影响造成; Babin 等(2003)、Stuart 等(2004)同样观察到浮游植物吸收曲线蓝光吸收峰向短

* 908 专项资助项目, 908-02-03-01 号; 国家自然科学基金资助项目, 40876091 号; 海洋公益性行业科研专项资助项目, 2009-Z-02 号。王 林, E-mail: wanglin_811014@163.com

收稿日期: 2008-03-17, 收修改稿日期: 2008-06-02

波偏移,并将这一现象归于脱镁叶绿素的作用结果。Kiefer 等(1982)和 Santhyendranath 等(1987)研究了叶绿素 *a* 及脱镁叶绿素比吸收系数的关系,并发现在整个可见光波段脱镁叶绿素 *a* 的比吸收系数都要大于叶绿素 *a*; Vernet 等(1987)和 Roesler 等(1989)得到蓝光波段脱镁叶绿素的比吸收系数大于叶绿素 *a*; 而 Lorenzen 等(1986)、Cleveland 等(1994)及 Sosik 等(1995)的研究结果与上述结果存在分歧,他们认为红光波段叶绿素 *a* 的比吸收系数大于脱镁叶绿素。国内关于这方面的报道尚未发现。本文研究的目的在于通过大连湾的实测数据分析脱镁叶绿素的存在对浮游植物吸收特性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域、站位与数据

研究区域选择在大连湾。该海湾位于辽东半岛南端,渤海海峡出口北侧,总面积为 224.13km², 沿岸有 130 家工厂,100 多个排污口,每年接纳污水 4.31×10⁸m³, 其中工业污水为 4.13×10⁸ m³, 占总量的 95.8%; 生活污水为 0.18×10⁸ m³, 占总量的 4.2%。其中含有多种污染物质,使该海湾水质下降。此次调查共布设固定站位 4 个,另外包含 3 个临时采样站位。调查于 2007 年 6 月 2 日、6 月 5 日、6 月 11 日、6 月 12 日、6 月 16 日、6 月 29 日进行,水样采集后立即带回实验室进行颗粒物吸收和色素浓度样品的制备与测定,调查期间共获得有效数据点 25 个。本文将叶绿素 *a* 和脱镁叶绿素浓度之和作为色素总浓度(TChl)。

1.2 颗粒物吸收样品的制备与测定

吸收样品制备使用 0.7μm 的 GF/F 玻璃纤维滤膜。首先将 GF/F 滤膜在经 0.2μm 滤膜过滤后的海水中浸泡,然后在低真空度(约 125mm 汞柱)的压力下过滤适宜体积水样,将滤完的滤膜转移到滴有一小滴 0.2μm 滤膜过滤后海水的样品盒中,立即放入液氮生物容器中保存。同时,按相同的操作步骤制作两片空白参比滤膜。

吸收系数的测定使用 Hitachi 公司生产的 U-3010 型紫外可见分光光度计,波段扫描范围设定为 300—890nm,扫描速度为 600nm/min,波谱带宽选择 2nm。测定包括两部分:首先测定滤膜的总颗粒物光学密度,然后将此滤膜置于甲醇中漂白,去除附着在滤膜上

的浮游植物色素,最后测定剩余非色素颗粒物的光学密度。在数据处理中光程放大效应校正采用 Mitchell 等(2000)的方法,并根据获得的总颗粒物光学密度光谱特点和浮游植物在近红外波段吸收可以忽略的假设,选取合适的波段进行近红外波段零值吸收的校正,计算得到总颗粒物吸收系数 $a_p(\lambda)$ 和非色素颗粒物吸收系数 $a_d(\lambda)$, 两者作差得到浮游植物吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ (NASA/TM, 2000)¹⁾。

1.3 色素样品的制备与测定

色素样品制备同样使用 0.7μm 的 GF/F 玻璃纤维滤膜,过滤一定体积的水样,样品膜对折后用锡箔纸包装,保存于液氮生物容器中。

色素浓度的测定使用美国 Turner 公司生产的 TD-700 实验室荧光仪,灵敏度为 20pg/ml。测定前用 10ml 90%丙酮萃取样品膜 24h,离心分离后取上清液测定荧光强度(F_b),再加入 1 滴 10%的盐酸,一分钟后测其酸化后荧光强度(F_a),通过酸化前后荧光差值和标准 Chl-*a* 酸化因子计算 Chl-*a*、脱镁叶绿素浓度(NASA/TM, 2000)¹⁾。Chl-*a* 标准从 Sigma 公司购入。

2 结果与分析

浮游植物吸收特性由包裹效应(与色素浓度的高低有关)及色素组成的差异共同决定。因此,本文首先对采样站点的色素总浓度以及脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度的比值进行统计分析。色素总浓度的变化范围较广,为 2.11—108.18mg/m³, 其中,60% 站点低于 10mg/m³, 其余 40% 零散分布于 10—110mg/m³ 之间。脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值的变化,如图 1 所示,

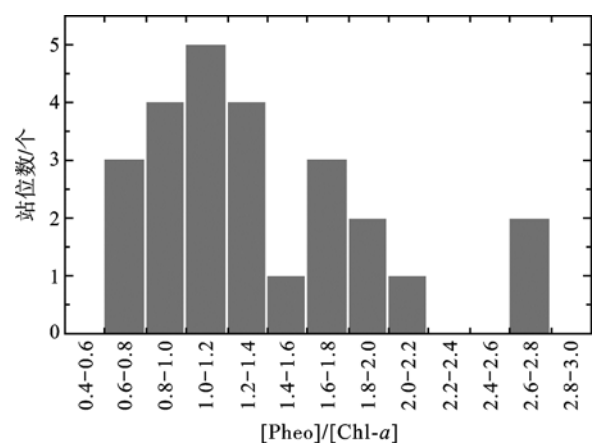


图 1 脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值统计直方图

Fig.1 The histogram of [Pheo]/[Chl-*a*] ratios

1) NASA/TM, 2000-209966. Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation

可以看出该比值分布于 0.6—2.8 之间, 0.6—1.4 范围占较大比例, 约 70% 的站点大于 1, 最大比值可达 2.5 以上, 说明对该海区进行水色遥感的研究中, 脱镁叶绿素是一种不可忽视的干扰色素。

2.1 脱镁叶绿素对浮游植物吸收峰位置的影响

浮游植物活体细胞中叶绿素 *a* 存在两个吸收峰, 分别位于蓝光和红光波段的 440、675nm 处。而关于滞留在滤膜上的脱镁叶绿素吸收峰的位置, 一直没有一致性的观点。Mitchell 等(1988)发现, 死亡硅藻细胞(主要含有脱镁叶绿素)的蓝光吸收峰偏移至 415nm 波段, 红光吸收峰几乎消失; 而 Babin 等(1993)指出, 没有确切证据说明脱镁叶绿素对 415nm 吸收的贡献程度, 所以不能认定脱镁叶绿素蓝光吸收峰位于 415nm 波段。

本文由 DLW-1[#]-070611 站点([Pheo]/[Chl-*a*] = 2.68)的吸收光谱数据得到蓝光和红光波段吸收峰分别为 413nm、674nm, 并结合脱镁叶绿素在 90% 丙酮溶液中吸收峰位于 410、667nm, 推断滤膜上的脱镁叶绿素蓝光和红光波段吸收峰分别位于 410—415nm、667—672nm 之间, 这里分别设定为 412nm、670nm。因此, 脱镁叶绿素比例增大必然会导致浮游植物吸收曲线的蓝光吸收峰偏离 440nm 波段, 逐渐向 412nm 波段靠近, 从脱镁叶绿素、叶绿素 *a* 浓度比值与蓝光吸收峰位置关系图(图 2)上可以看出这一变化趋势; 而脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 的红光波段吸收峰接近, 使得此波段处吸收峰的变化并不明显。

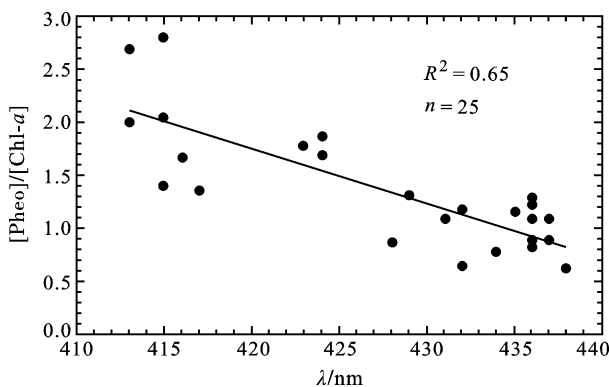


图 2 脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值和蓝光吸收峰波长的关系

Fig.2 Relation between [Pheo]/[Chl-*a*] ratios and absorption peak band in the blue part

2.2 脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 比吸收系数的关系

脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 比吸收系数的定量化问题一直存在分歧。Kiefer 等(1982)研究发现, 蓝光吸

收峰波段叶绿素 *a* 的比吸收系数约为 $0.05\text{m}^2/\text{mg}$ Chl-*a*, 红光吸收峰波段约为 $0.035\text{m}^2/\text{mg}$ Chl-*a*, 而脱镁叶绿素在短波段并没有明显的吸收峰, 随波长减小比吸收系数增大, 其在可见光波段的比吸收系数均大于叶绿素 *a*, 其中, 蓝光吸收峰波段几乎达到 4 倍, 红光吸收峰波段相差相对较小; Santhyendranath 等(1987)研究得到, 蓝光和红光吸收峰波段叶绿素 *a* 的比吸收系数与 Kiefer 等(1982)研究结果相同, 而脱镁叶绿素的比吸收曲线在蓝光波段存在显著吸收峰, 位置与叶绿素 *a* 相同, 比吸收系数是叶绿素 *a* 的 2 倍左右, 约为 $0.11\text{m}^2/\text{mg}$ Pheo, 红光吸收峰波段是叶绿素 *a* 的 1.4 倍左右, 约为 $0.05\text{m}^2/\text{mg}$ Pheo; Sosik 等(1995)得到 675nm 波段叶绿素 *a* 与脱镁叶绿素的比吸收系数分别为 $0.021\text{m}^2/\text{mg}$ Chl-*a*、 $0.008\text{m}^2/\text{mg}$ Pheo。

假设浮游植物吸收不受包裹效应影响, 则吸收系数可表示为色素浓度与其比吸收系数的乘积形式 (Sosik *et al.*, 1995)。与 Sosik 等(1995)的研究方法相同, 本文采用多元线性回归方法拟合得到 412、440、670、675nm 四个吸收峰波段处叶绿素 *a*、脱镁叶绿素的比吸收系数。回归方程表达如下:

$$a_{\text{ph}}(\lambda_0) = a_{\text{Chl-}a}^*(\lambda_0)[\text{Chl-}a] + a_{\text{Pheo}}^*(\lambda_0)[\text{Pheo}] \quad (1)$$

其中, $a_{\text{Chl-}a}^*(\lambda_0)$ 、 $a_{\text{Pheo}}^*(\lambda_0)$ 分别表示 λ_0 波段处叶绿素 *a*、脱镁叶绿素的比吸收系数, 拟合结果如表 1 所示, 可以看出, 412nm 波段, a_{Pheo}^* 远大于 $a_{\text{Chl-}a}^*$; 440nm 波段, $a_{\text{Chl-}a}^*$ 略大于 a_{Pheo}^* ; 670、675nm 波段, $a_{\text{Chl-}a}^*$ 约为 a_{Pheo}^* 的 3 倍。而 $a_{\text{Pheo}}^*(412)$ 约为 $a_{\text{Chl-}a}^*(440)$ 的 2 倍; $a_{\text{Chl-}a}^*(675)$ 约为 $a_{\text{Pheo}}^*(670)$ 的 4 倍。结合叶绿素 *a* 和脱镁叶绿素浓度的高低关系总体考虑可发现, 412、440nm 波段吸收系数以脱镁叶绿素贡献为主, 而 670、675nm 波段吸收系数以叶绿素 *a* 贡献为主。从而进一步说明了浮游植物吸收曲线中蓝光吸收峰位置出现偏移而红光吸收峰却未偏移的缘由。

所有研究中均发现蓝光吸收峰波段脱镁叶绿素的比吸收系数大于叶绿素 *a*, 本文也得到类似结论, 但数值大小远低于文献结果, 原因在于本研究中采用的样品色素浓度较高, 受包裹效应的影响严重, 致使浮游植物吸收系数较小, 进行回归分析时得到的比吸收系数必然会偏小; 然而, 红光吸收峰波段存在较大分歧, 本文研究结论与 Lorenzen 等(1986)、Cleveland 等(1994)以及 Sosik 等(1995)的结论相同, 均发现叶绿素 *a* 比吸收系数大于脱镁叶绿素, 并且在数值上与 Sosik 等(1995)的结果接近。

2.3 脱镁叶绿素对浮游植物吸收峰高度的影响

本文选取 DLW-3[#]-070612、DLW-3[#]-070616 及

DLW-1[#]-070612 三个站点, 分析了脱镁叶绿素含量高对浮游植物吸收峰高度的影响。

从浮游植物吸收曲线(图 3A)可以看出, 三个站点红光波段的吸收峰均位于 675nm 附近, 而蓝光波段的吸收峰都有不同程度的偏移。其中, DLW-1[#]-070612 站点在 410—430nm 波段间吸收强烈但没有出现显著的吸收尖峰, 表明脱镁叶绿素对该波段范围的吸收有重要贡献(Kiefer *et al*, 1982)。结合选取站点色素浓度值, 如表 2 所示, 可以发现吸收曲线中红光波段吸收峰的高低与色素总浓度成正比, 而蓝光波段并没有这种规律, 色素总浓度处于第二位的 DLW-1[#]-070612 站点吸收峰最高。这与两种色素在蓝光和红光波段比吸收系数的大小有关。其中, 红光吸收峰波段叶绿素 *a* 比吸收系数远高于脱镁叶绿素, 该波段吸收峰的高低由叶绿素 *a* 浓度决定, 本质上是与叶绿素 *a* 浓度成正比, 而不是色素总浓度; 对于已偏离 440nm 的蓝光吸收峰波段而言, 叶绿素 *a* 比吸收系数远低于脱镁叶绿素, 吸收峰的高低主要由脱镁叶绿素决定, 与脱镁叶绿素浓度成正比。因而出现了上述曲线特征。

由于研究样品中脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 含量相当, 本文特别选择浮游植物比色素总浓度吸收系数 a_{ph}^* () 进行比吸收分析(Roesler *et al*, 1989)。从浮游植物比色素总浓度吸收曲线(图 3B)可以看出, DLW-3[#]-070616 站点蓝-红波段吸收比值最小, 原因来自两个方面: (1) 色素浓度最高, 所以受包裹效应

的影响最为强烈(Allali *et al*, 1997); (2) 脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值最小, 从而具有较高比吸收系数的脱镁叶绿素在蓝光波段吸收的贡献与其它站点相比最小。DLW-1[#]-070612、DLW-3[#]-070612 两站点蓝-红比值相当, 从表 3 中得到, DLW-1[#]-070612 站点蓝-红波段吸收比值略大于 DLW-3[#]-070612 站点, 主要原因是 DLW-1[#]-070612 站点色素浓度高于 DLW-3[#]-070612 站点, 受到包裹效应的影响强烈, 对蓝-红波段吸收比值的增大有抑制作用, 但该站点脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值大于 DLW-3[#]-070612 站点, 对蓝-红波段吸收比值的增大有促进作用, 出现上述曲线特征说明, 与 DLW-3[#]-070612 站点相比, DLW-1[#]-070612 站点脱镁叶绿素与叶绿素 *a* 浓度比值大对蓝-红波段吸收比值增大的促进作用强于色素浓度高造成包裹效应的抑制作用。

2.4 脱镁叶绿素、叶绿素 *a*、色素总浓度与吸收系数的拟合分析

研究表明, 色素吸收峰波段最能反映色素浓度的信息, 但由于包裹效应的影响, 并非简单的线性关系, 更多是非线性的。Bricaud 等(1995)综合贫营养、中营养和富营养水体的大量数据, 发现浮游植物吸收系数 $a_{ph}(440)$ 和 $[Chl-a]$ 呈幂函数关系; Prieur 等(1981)同样用幂函数拟合二者的关系。由于红光波段脱镁叶绿素的比吸收系数远低于叶绿素 *a*, 并且吸收峰位置基本未出现偏移, 这样, 本文选择 675nm、440nm、412nm 三个波段(未选 670nm)分别与叶绿素

表 1 叶绿素 *a* 及脱镁叶绿素比吸收系数回归结果

Tab.1 Regression results of chlorophyll *a* and pheopigment-specific absorption coefficients

比吸收系数值	$\lambda_0 = 412\text{nm}$	$\lambda_0 = 440\text{nm}$	$\lambda_0 = 670\text{nm}$	$\lambda_0 = 675\text{nm}$
a_{Chl-a}^* ()	0.00468	0.02316	0.01398	0.01595
a_{Pheo}^* ()	0.04439	0.02012	0.00438	0.00516

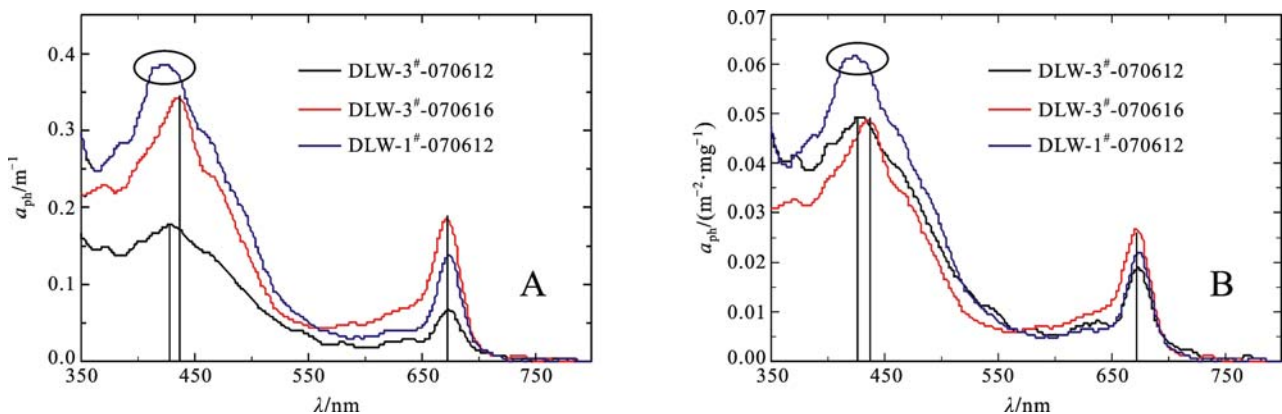


图 3 选择站点浮游植物吸收光谱曲线(A)与比色素总浓度吸收光谱曲线(B)

Fig.3 Phytoplankton absorption spectra (A) and TChl-specific absorption spectra (B) in chosen stations

表 2 选取站点色素浓度统计表

Tab.2 The statistics of pigment concentration in the stations chosen

站位	[Pheo]	[Chl- <i>a</i>]	[TChl]	[Pheo]/[Chl- <i>a</i>]
DLW-3 [#] -070612	2.04366	1.54614	3.5898	1.32178
DLW-3 [#] -070616	3.17016	3.84743	7.01759	0.82397
DLW-1 [#] -070612	4.07489	2.18354	6.25843	1.86619

表 3 选取站点浮游植物吸收系数统计表

Tab.3 The statistics of phytoplankton absorption coefficient in the stations chosen

站位	$\lambda_{\text{blue-max}}$	$a_{\text{ph}}^*(\lambda_{\text{blue-max}})$	$\lambda_{\text{red-max}}$	$a_{\text{ph}}^*(\lambda_{\text{red-max}})$	$a_{\text{ph}}(\lambda_{\text{blue-max}})/a_{\text{ph}}(\lambda_{\text{red-max}})$
DLW-3 [#] -070612	429	0.04927	674	0.01871	2.63263
DLW-3 [#] -070616	436	0.04852	673	0.02650	1.83109
DLW-1 [#] -070612	417	0.06115	674	0.02206	2.77153

a、脱镁叶绿素及色素总浓度进行乘幂关系拟合, 形式如下(Bricaud *et al*, 1998; Hoepffner *et al*, 1991):

$$[C] = P_0 a_{\text{ph}}(\lambda_0)^{P_1} \quad (2)$$

其中, *C* 表示 Pheo、Chl-*a*、TChl, λ_0 表示 675、440、412nm 三个参考波段, P_0 、 P_1 为经验系数。

统计回归结果见表 4, 可以看出, 脱镁叶绿素、叶绿素 *a* 及色素总浓度分别与 675、440、412nm 波段的吸收系数拟合都具有良好的相关性。其中, 脱镁叶绿素浓度与 $a_{\text{ph}}(675)$ 、 $a_{\text{ph}}(440)$ 、 $a_{\text{ph}}(412)$ 的拟合相关性依次升高, 表明脱镁叶绿素对 675、440、412nm 波段吸收系数的贡献依次增大; 而叶绿素 *a* 浓度与 $a_{\text{ph}}(675)$ 、 $a_{\text{ph}}(440)$ 、 $a_{\text{ph}}(412)$ 的拟合相关性恰恰相反, 表明叶绿素 *a* 对 675、440、412nm 波段吸收系数的贡献依次减小; 色素总浓度与 $a_{\text{ph}}(675)$ 、 $a_{\text{ph}}(440)$ 、 $a_{\text{ph}}(412)$ 的拟合相关性呈现出依次降低的趋势, 这与其它附属色素对三个参考波段吸收系数的干扰程度不同有直接关系, 同时也与部分站点色素漂白过程中导致的颗粒损失对蓝光波段吸收系数的影响强于红光波段有关。对于 675nm 波段吸收系数而言, $R^2\{[\text{Chl-}a]—a_{\text{ph}}(675)\} > R^2\{[\text{Pheo}]—a_{\text{ph}}(675)\}$, 大部分站点中, 脱镁叶绿素虽占据总色素的较大比例, 但脱镁叶绿素红光波段的比吸收系数远低于叶绿素 *a*,

其对该波段吸收系数贡献较小, 这样, 叶绿素 *a* 与 $a_{\text{ph}}(675)$ 拟合相关性应该高于脱镁叶绿素; 而 412nm 波段, $R^2\{[\text{Chl-}a]—a_{\text{ph}}(412)\} < R^2\{[\text{Pheo}]—a_{\text{ph}}(412)\}$, 脱镁叶绿素占总色素的比例较大并且 412nm 波段脱镁叶绿素比吸收系数远高于叶绿素 *a*, 使得该波段吸收系数主要来自脱镁叶绿素, 其与 $a_{\text{ph}}(412)$ 拟合相关性必然高于叶绿素 *a*; 值得注意的是 440nm 波段, $R^2\{[\text{Chl-}a]—a_{\text{ph}}(440)\} < R^2\{[\text{Pheo}]—a_{\text{ph}}(440)\}$, 出现这种情况的原因在于, 叶绿素 *a* 与脱镁叶绿素在该波段处的比吸收系数接近, 但研究样品中大部分站点脱镁叶绿素浓度高于叶绿素 *a*, 这样 440nm 波段虽为叶绿素 *a* 吸收峰, 但脱镁叶绿素与 $a_{\text{ph}}(440)$ 的拟合相关性反而更高一些; 总体看来, 色素总浓度与三个吸收峰波段的拟合相关性普遍高于单种色素拟合结果(412nm 波段除外)。

3 结论

(1) 根据 2007 年 6 月大连湾的实测数据, 本文分析了该海区水体中脱镁叶绿素对浮游植物吸收特性的影响。由实测数据及相关文献推断出脱镁叶绿素蓝光和红光吸收峰分别位于 412、670nm 波段。并采用多元线性回归得到 412、440、670、675nm 四个吸收

表 4 脱镁叶绿素、叶绿素 *a*、色素总浓度与 675、440、412nm 波段吸收系数拟合结果Tab.4 The regressed results of [Pheo], [Chl-*a*] and [TChl] as a function of absorption coefficient at 675nm, 440nm and 412nm

吸收系数 (m^{-1})	[Pheo] (mg/m^3)			[Chl- <i>a</i>] (mg/m^3)			[TChl] (mg/m^3)		
	P_0	P_1	R^2	P_0	P_1	R^2	P_0	P_1	R^2
$a_{\text{ph}}(675)$	60.48	1.24	0.83	39.20	1.15	0.87	100.19	1.20	0.90
$a_{\text{ph}}(440)$	21.67	1.18	0.84	14.77	1.05	0.76	36.64	1.12	0.86
$a_{\text{ph}}(412)$	19.63	1.10	0.86	13.32	0.95	0.66	33.27	1.04	0.83

峰波段脱镁叶绿素、叶绿素 a 的比吸收系数 $a^*_{\text{Pheo}}(\lambda_0)$ 、 $a^*_{\text{Chl-}a}(\lambda_0)$, 其中 a^*_{Pheo} 依次为 0.04439、0.02012、0.00438、0.00516 $\text{m}^2/(\text{mg Pheo})$, $a^*_{\text{Chl-}a}$ 依次为 0.00468、0.02316、0.01398、0.01595 $\text{m}^2/(\text{mg Chl-}a)$ 。结合叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度高低关系总体考虑可发现 412、440nm 波段吸收系数以脱镁叶绿素贡献为主, 而 670、675nm 波段吸收系数以叶绿素 a 贡献为主。

(2) 随脱镁叶绿素占色素总浓度比例的增大, 浮游植物吸收曲线上蓝光吸收峰位置偏离 440nm 波段, 逐渐向 412nm 波段靠近, 并得到蓝光波段吸收峰的高度由脱镁叶绿素浓度决定, 而红光波段吸收峰的高度由叶绿素 a 浓度决定。色素浓度与吸收系数乘幂函数拟合分析表明: $a_{\text{ph}}(675)$ 与 $[\text{Chl-}a]$ 相关性高, $R^2 = 0.87$, 表达式为 $[\text{Chl-}a] = 39.20a_{\text{ph}}(675)^{1.15}$; $a_{\text{ph}}(440)$ 与 $[\text{Pheo}]$ 相关性高, $R^2 = 0.84$, 表达式为 $[\text{Pheo}] = 21.67a_{\text{ph}}(440)^{1.18}$; $a_{\text{ph}}(412)$ 与 $[\text{Pheo}]$ 相关性高, $R^2 = 0.86$, 表达式为 $[\text{Pheo}] = 19.63a_{\text{ph}}(412)^{1.10}$ 。此外, 色素总浓度与三个吸收峰波段的拟合相关性普遍高于单种色素拟合结果(412nm 波段除外)。

了解脱镁叶绿素对浮游植物吸收特性的影响, 对确定浮游植物吸收系数, 并进一步建立固有光学特性与表观光学特性之间的反演模型, 以及深入开展生物光学半分析反演算法的研究提供了前提和基础。

参 考 文 献

- Allali K, Bricaud A, Claustre H, 1997. Spatial variations in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific. *J Geophys Res*, 102(C6): 12413—12423
- Babin M, Stramski D, Ferrari G M *et al*, 2003. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *J Geophys Res*, 108(C7): 3211, doi: 10.1029/2001JC000882
- Babin M, Therriault J-C, Legendre L *et al*, 1993. Variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimates of primary production. *Limnol Oceanogr*, 38: 154—177
- Bricaud A, Babin M, Morel A *et al*, 1995. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J Geophys Res*, 100(C7): 13321—13332
- Bricaud A, Morel A, Babin M *et al*, 1998. 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*, 103: 31033—31044
- Carder K L, Chen F R, Lee Z P *et al*, 1999. Semianalytic moderate resolution imaging spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio-optical domains based on nitrate-depletion temperatures. *J Geophys Res*, 104: 5403—5421
- Cleveland J S, Perry M J, 1994. A model for partitioning particulate absorption into phytoplankton and detrital components. *Deep Sea Res, Part I*, 41(1): 197—221
- Hoepffner N, Sathyendranath S, 1991. Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Mar Ecol Prog Ser*, 73: 11—23
- Kiefer D A, SooHoo J B, 1982. Spectral absorption by marine particles of coastal waters of Baja California. *Limnol Oceanogr*, 27(3): 492—499
- Lorenzen C J, Downs J N, 1986. The specific absorption coefficients of chlorophyllide a and pheophorbide a in 90% acetone, and comments on the fluorometric determination of chlorophyll and pheopigments. *Limnol Oceanogr*, 31(2): 449—452
- Mitchell B G, Bricaud A, Carder K *et al*, 2000. Determination of Spectral Absorption Coefficients of Particles, Dissolved Material and Phytoplankton for Discrete Water Samples. In: Fargion G S, Mueller J L ed. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation Revision 2*, NASA's TM-2000-209966, Greenbelt, Maryland, Goddard Space Flight Centre, 125—153
- Mitchell B G, Kiefer D A, 1988. Variability in pigments specific particulate fluorescence and absorption spectra in northeastern Pacific Ocean. *Deep Sea Res*, 35: 665—689
- Morel A, Bricaud A, 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep Sea Res*, 28A(11): 1375—1393
- Prieur L, Sathyendranath H S, 1981. 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. *Limnol Oceanogr*, 26: 671—689
- Roesler C S, Perry M J, Carder K L, 1989. Modeling *in situ* phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters. *Limnol Oceanogr*, 34(8): 1510—1523
- Santhyendranath S, Lazzara L, Prieur L, 1987. Variation in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnol Oceanogr*, 32: 403—415
- Sosik H M, Mitchell B G, 1995. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California

- Current System. Deep-Sea Research (I), 42: 1717—1748
- Stuart Venetia, Ulloa Osvaldo, 2004. Bio-optical characteristics of phytoplankton populations in the upwelling system off the coast of Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77: 87—105
- Van de Hulst H C, 1957. *Light Scattering by Small Particles*. New York: Wiley J
- Vernet M, Lorenzen C J, 1987. The relative abundance of pheophytin *a* in temperate marine waters. *Limnol Oceanogr*, 32: 352—358

THE EFFECTS OF PHEOPHYTIN ON ABSORPTION CHARACTERISTICS OF PHYTOPLANKTON

WANG Lin^{1,2}, ZHAO Dong-Zhi¹, XING Xiao-Gang^{1,3}, YANG Jian-Hong¹, FU Yun-Na¹

(1. *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, 116023*; 2. *College of Environment Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, 116026*; 3. *Institute of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266100*)

Abstract The survey data obtained in the Dalian Bay, June 2007 were studied for the relationship between pheophytin and phytoplankton absorption. This and previous studies have shown that pheophytin absorption peaks appears at 412nm in the violet region of spectrum, and 670nm in the red. The multivariate linear regression analysis on specific absorption coefficients for pheophytin and chlorophyll *a* indicates that the specific absorption coefficients for pheophytin was much larger than chlorophyll *a* at 412nm; slightly larger than pheophytin at 440nm; and about 3 times larger than pheophytin at 670nm and 675nm. While the proportion of pheophytin in total pigment concentration increased, the absorption peak in the blue region of spectrum deviated from 440nm to near 412nm. The absorption peak height in the blue region was mainly influenced by pheophytin concentration, whereas the height in the red was decided more by chlorophyll *a* concentration. Fitting analysis with a power function for the pigment concentration and absorption coefficient showed that the absorption coefficients at 412nm and 440nm exhibited higher correlation with pheophytin concentration than chlorophyll *a*, but contrary at 675nm.

Key words Pheophytin, Phytoplankton, Chlorophyll-*a*, Absorption coefficient, Specific absorption coefficient