

不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光峰(SICF)特性研究

赵冬至, 张丰收, 杜飞, 赵玲, 郭皓

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 采用现场实测和室内培养两种方式测定了甲藻、赤潮异弯藻、海洋蓝绿藻、叉角藻赤潮和新月菱形藻、叉鞭金藻、塔胞藻、扁藻和小球藻等非赤潮藻类光谱曲线, 采用度量太阳激发的叶绿素荧光峰高度的 $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 比值法, 建立了不同藻类 $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 与叶绿素 a 浓度的关系, $R > 0.82$ 。随藻类的不同, $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 与叶绿素 a 的关系发生较大的变化, 其关系方程的系数 a 的变化范围为 0.037—1.135 之间, b 的变化范围为 0.094—0.727 之间。同时建立了不同藻类荧光峰位置与叶绿素 a 浓度的关系, 除海洋蓝绿藻为 0.57 外, R 均大于 0.75。随叶绿素浓度的增加, 浮游植物反射光谱荧光峰的位置向红光方向移动。随藻类不同, 移动的幅度有所差异, 赤潮异弯藻的移动幅度最大, 其它藻类每 10mgm^{-3} 浓度的移动幅度介于 0.1—0.3nm 之间。叉鞭金藻和塔胞藻在实验的浓度范围内未见移动。

关键词: 赤潮, 藻类, 太阳激发的叶绿素荧光, 叶绿素 a

中图分类号: TP79/P71 **文献标识码:** A

1 引言

反射率光谱的红光区对内陆和近岸水体的遥感非常重要。这是因为几个浮游植物叶绿素唯一的光谱特性产生在这个范围内。Neville 和 Gower^[1] 和 Gower^[2] 观测到了天然水体中 685nm 附近的上行辐射率光谱的强峰值。并进行了多种尝试来解释这个峰: 它可能是由于(1)浮游植物色素的荧光^[3]; (2)由 675nm 处的吸收峰引起的异常反射; (3)高叶绿素浓度时藻类和水体混合吸收曲线的极小值^[4]。这个峰通常称为太阳激发的叶绿素荧光峰 (Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence: SICF), 稍后, 这项技术扩展到了航空遥感领域^[5], 在航空遥感的成功应用之后, 欧空局(ESA)和美国航空航天局(NASA)研制了包括探测 SICF 波段在内的星载中分辨率成像光谱仪 MERIS 和 MODIS。

星载叶绿素荧光遥感仪器的诞生极大地促进了近岸水体(二类水体)水色遥感的发展, 加深了海洋生态环境遥认知深度, 但同时也存在一些问题, 其中之一是由于卫星传感器荧光波段设置的局限

性。随叶绿素浓度的增加, 荧光峰的高度和位置会发生变化, Gitelson^[6] 对不同富营养状态水体的研究表明, 荧光峰的高低和位置可作为浮游植物浓度的精确指示器和预测器。辐亮度光谱曲线中 700nm 附近的荧光峰的大小与叶绿素浓度强相关。当叶绿素浓度增加并在 560nm 处达到反射率光谱的最大值时, 基线以上的峰高和反射率比值 $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 增加数倍。 $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 和 $R_{\max\text{red}}/R_{675}$ 能预测不同富营养状态水体的叶绿素浓度, 其叶绿素估算误差低于 3mgm^{-3} 。700nm 附近的荧光峰位置与叶绿素浓度密切相关, 相关系数大于 0.9, 估算误差小于 2nm。赵冬至等阐述了 1998 年渤海叉角藻赤潮光谱荧光峰的变化情况^[7]。但在赤潮过程中, 由于水色组分含量比率的迅速变化, 水体的营养状态也在迅速改变, 同时由于不同类型赤潮藻种细胞大小和色素组成的差异, 其荧光峰的高度和位置与叶绿素 a 浓度的变化关系尚不清楚, 有待了解。

本研究的目的是想通过对不同藻类赤潮反射光谱的分析, 了解不同类型藻类水体太阳激发的叶绿素荧光峰高度和位置变化情况, 以更加深入地解译卫星叶绿素荧光信息, 为赤潮遥感探测算法的建立

收稿日期: 2003-09-27; 修订日期: 2004-05-18

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA636020)

作者简介: 赵冬至(1964—), 男, 博士, 研究员, 博导, 兰州大学自然地理学专业。主要从事赤潮、溢油、水质和海洋生态环境水色卫星遥感与 GIS 相关技术研究, 发表论文近 40 篇, 主编专著 3 本。dzzhao@nmemc.gov.cn。

提供依据。

2 方法

1998—2000 年间,在渤海北部辽东湾海域、黄海北部大连沿岸、辽宁省内陆水域测定了数百条不同类型的污染水体(二类水体),同步测定分析了水样的 COD、溶解氧、营养盐、悬浮物、水温、叶绿素 a , b , c 及浮游植物细胞数,其中近 40 条为赤潮藻类光谱曲线^[8]。2002 年以来,又陆续测定了一些藻类的光谱曲线,同步测试内容增加了叶绿素的荧光法和 HPLC 法的测定结果、浮游植物、黄色物质(CDOM)和悬浮物吸收系数、水体透明度、 K_{PAR} 等参数。除叶绿素 a 的 HPLC 测试方法和吸收系数的测试方法采用 JGOFS 测量规范外,其它参数的测试均采用海洋监测规范。用于本项研究的浮游植物藻类(含部分非赤潮藻类)有扁藻、叉鞭金藻、叉角藻、海洋蓝绿

藻、海洋斜纹藻、甲藻、螺旋藻、塔胞藻、小球藻、夜光藻、整齐圆筛藻和赤潮异弯藻等不同浓度级的光谱反射率曲线。

光谱测量主要采用中国科学院安徽光学精密机械研究所生产的 VF-921B 地物光谱仪,其光谱范围 400—1040nm,光谱分辨率优于 5.4nm (256 元 CCD, 每元 2.7nm),视场角 10° ,动态范围 $\geq 70\text{dB}$,等效噪声辐亮度 $1 \times 10^{-6} \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$ (550nm, 光学积分第 2 档),波长准确性为 1.0nm。仪器由国家海洋技术中心仪器定标实验室进行过绝对辐射严格定标。

海上现场光谱测量选择无风、无云天气,海况小于 3 级。当船舶到达预定站位停稳待航迹消散后,选择向阳甲板,在与太阳方位垂直方向将光谱仪伸至船舷外,每次测量 10 次,同时测量天空光。测量的同时取表层水样以进行水化学和海洋生物学参数分析。除现场实测外,还采用室内培养,室外测量的方法。试验水桶为深 40cm,直径 30cm 的圆桶,内涂

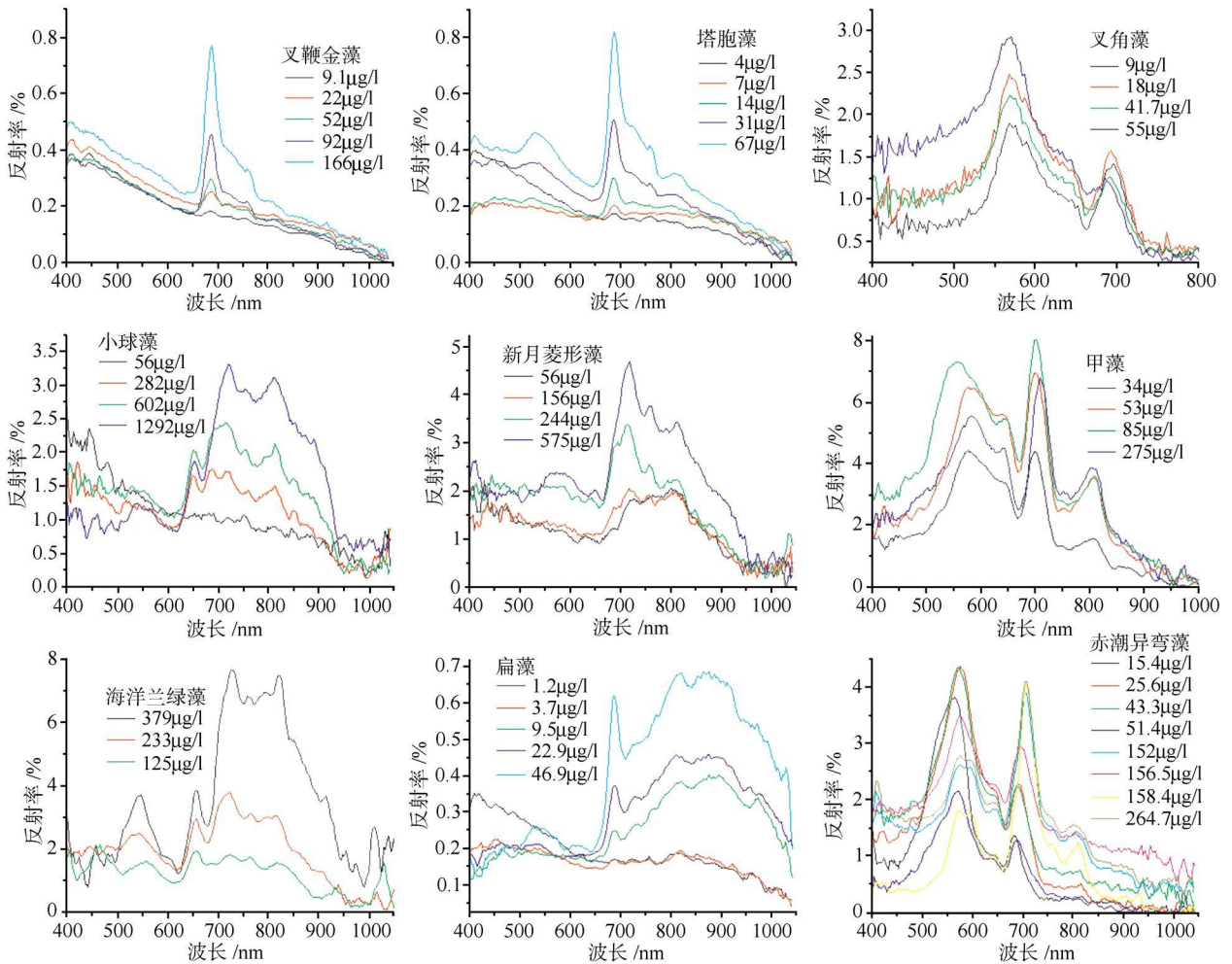


图 1 不同藻类反射率实测光谱曲线

Fig.1 Reflectance spectra of different algae

无光黑漆。试验用水为清洁天然海水,用网布过滤后使用。先将较浓藻液倒入实验桶中,搅匀后测定。测定次数与现场相同。实验光源为天然日光,选择云量为零且风力小于3级的天气条件,实验地点选择在周围无高出的建筑物、无杂散光的楼顶平台。测量时间为10时至14时,光照强度 $600 \times 10^6 \text{Lx}$ 以上,照度变化小于1%(每次测量)。每次测量前先测桶内海水本底光谱值。光谱反射率曲线由水体表面测量的上行辐射率和灰板(反射系数35%)测量得到的下行辐射率相比而来,并剔除天空光的影响。在晴天(太阳天顶角 $30^\circ < \theta_0 < 60^\circ$,云量 $< 20\%$),低海况(风速 $\leq 5 \text{m/s}$),观测角为 40° 时,天空光的值较为稳定。天空光剔除算法参照Mobley(1999)研究成果^[9],同时相关系数依据近红外波段数据和以往经验加以修正。

3 结果与讨论

对水体而言,反射率光谱曲线的几个光谱特征是共同的。560nm附近较宽的最大反射率值是由藻类的低吸收引起的。400—500nm的低反射率是由叶绿素a和CDOM二者共同吸收产生的。同时也观测到了620nm处由phycoyanin吸收产生的斜坡,675nm处由叶绿素a吸收产生的最小值以及650nm处的次峰。在叶绿素浓度小于 3mgm^{-3} 时,在620nm和675nm处仅出现一个肩。快速增加的叶绿素导致620nm和675nm处的反射率值迅速降低,当叶绿素浓度小于 3mgm^{-3} 时,在680nm处仅能看到一个肩型曲线,在叶绿素浓度大于 5mgm^{-3} 时,这个肩型曲线就转换成一个明显的峰。当叶绿素浓度大于 70mgm^{-3} 时,这个峰值增加并达到甚至会超过560nm处的最大值。在如此高的叶绿素浓度下,通常是形成了赤潮。由于赤潮多发生在近岸海域^[10],二类水体的复杂性使得传统的叶绿素蓝绿光比值算法的应用受到很大限制,其估算精度也大大降低^[11]。

图1显示了不同叶绿素浓度各种藻类的实测反射光谱,在高叶绿素浓度即高浮游生物量情况下,其水体的光谱特性除了与其背景水体有显著差别外,不同藻类的反射光谱也有显著的差异。其差异主要在两个方面,首先是在560nm的反射率最大值和675nm叶绿素吸收峰产生的反射率最小值之间,部分藻类会产生一个次反射峰。其次是叶绿素在700nm附近的荧光峰,部分藻类在荧光峰的最大值向红外方向会出现反射率的增高,使其曲线形态不

符合高斯分布。

3.1 SICF 峰高与叶绿素 a 浓度的关系

水体SICF峰高的界定有两种方法,一是计算荧光峰最大的反射率值与荧光峰处波段两侧的两个波段所确定的基线同一波段上的反射率差。MODIS 遥感器荧光波段的设置分别为665.1nm、676.7nm、746.3nm^[12],MERIS的设置分别为665nm、681.25nm和705nm^[13]。本文采用的荧光高度计算的第二种方法是将670nm后的红光波段反射率的最大值(R_{maxred})归一化到560nm处整个光谱曲线的最大值上或 R_{675} 上,即:

$$FLH = R_{\text{maxred}} / R_{560} \text{ 或 } FLH = R_{\text{maxred}} / R_{675}$$

在近岸海域二类水体中,悬浮无机物为主要组分,这些物质成分增加了水体的后向散射,导致反射率增加。然而在赤潮过程中,浮游植物占据了主要成分,其光谱行为较其背景水体有较大的变化,560nm处的反射峰、675nm处的吸收峰和685nm处的荧光峰的大小和位置均发生变化,见图2。因此在荧光高度计算时,本文采用 $R_{\text{maxred}} / R_{560}$ 来检测荧光高度与叶绿素a浓度间的关系。

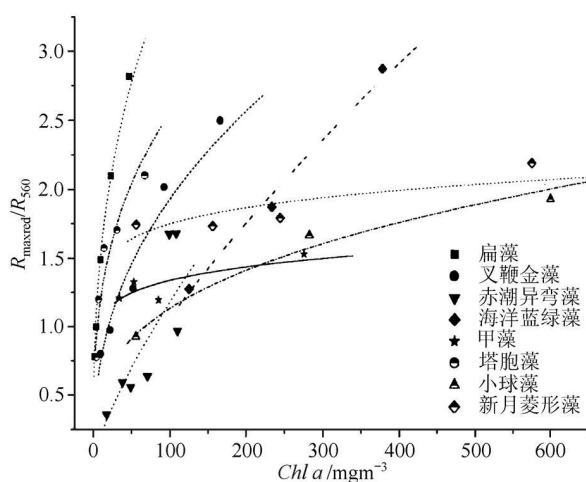


图2 不同藻类荧光峰高度与叶绿素a浓度关系

Fig.2 The peak height, normalized to value of global maximum of reflectance spectra at 560nm, vs. chlorophyll-a concentration measured in various water bodies

在高浓度叶绿素条件下,随藻类的不同, $R_{\text{maxred}} / R_{560}$ 与叶绿素a的关系发生较大的变化,见表1。其关系方程的系数a的变化范围为0.037—1.135之间,b的变化范围为0.094—0.727之间,而Gitelson对不同营养状态水体的分析结果a为0.232,b为0.34。扁藻、叉鞭金藻、赤潮异弯藻和海洋蓝绿藻的荧光变化随叶绿素浓度的增加较快。

表 1 不同藻类荧光峰高度与叶绿素 *a* 浓度统计关系

Table 1 The regression equations of *FLH* in measurements of different algae

	叉鞭金藻	新月菱形藻	小球藻	塔胞藻	甲藻	海洋蓝绿藻	赤潮异弯藻	扁藻
<i>a</i>	0.296	1.135	0.201	0.579	0.831	0.037	0.089	0.678
<i>b</i>	0.408	0.094	0.372	0.322	0.103	0.727	0.523	0.360
<i>R</i>	0.98	0.82	0.98	0.95	0.81	0.99	0.94	0.99
<i>N</i>	5	4	4	5	4	3	7	5
$R_{\max\text{red}}/R_{560} = a * (\text{Chl } a)^b$								

3.2 SICF 位置变化与叶绿素 *a* 浓度的关系

在高叶绿素浓度即赤潮条件下,不同藻类荧光峰的位置变化行为不同。在叶绿素荧光峰增高的同时伴随着叶绿素荧光峰的位置朝更长的波长方向移动,叶绿素浓度为 3mgm^{-3} 时,峰的位置在 $680\text{--}683\text{nm}$ 处,当叶绿素浓度大于 100mgm^{-3} 时,其位置移动到 715nm ^[6],清洁水体、绿色水体的荧光峰位置分别为 682nm 和 686nm ,赤潮水体的则在 703nm 附近^[14], Vos 等^[15]、Kishino 等^[16]、Steward 对 $0\text{--}120\text{mgm}^{-3}$ 富营养水体研究表明,在此范围内,叶绿素 *a* 浓度的变化与荧光峰位置的移动呈指数关系, $\text{peak position} = a(\text{Chl})^b$,其中 *a* 在 $661.7\text{--}666.42\text{nm}$ 之间变化。而 Vasikov 和 Gitelson 对富营养水体,即

尚未形成赤潮的水体的研究表明,二者呈线性关系, $\text{peak position} = a + b\text{Chl } a$, *a* 为 683.51 。

本文对高叶绿素浓度浮游植物藻类水体的分析表明,赤潮水体的荧光峰的位置与叶绿素 *a* 浓度的关系呈非线性,但不同的藻种则显示出不同的光谱行为。尽管叶绿素的浓度波动范围较大,但在实验浓度范围内,叉鞭金藻和塔胞藻的荧光峰位置不随叶绿素浓度的变化而移动,停留在 687.28 的位置上。而其它藻类,则随叶绿素浓度的增加朝长波方向移动, *a* 随藻类不同有显著差异,见表 2,每增加 10mgm^{-3} 叶绿素浓度,2003-07-01 在大连湾实测的赤潮异弯藻赤潮荧光峰的移动幅度为 2.63nm ,扁藻为 0.1nm ,海洋蓝绿藻为 0.2nm ,甲藻为 0.3nm ,小球藻为 0.3nm ,新月菱形藻为 0.3nm 。

表 2 不同藻类荧光峰位移与叶绿素 *a* 浓度统计相关关系

Table 2 The regression equations of *FLH* shifts in measurements of different algae

藻种	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i>	<i>SD</i>	<i>N</i>	<i>Chl a</i> 范围/ mgm^{-3}	位置移动范围/ nm
赤潮异弯藻	699.786	0.219	0.86	5.08	8	17.72—110	683.6—707.9
扁藻	688.479	0.018	0.86	7.64	9	1.2—2119	686.3—721.4
叉鞭金藻					4	22—166	687.28, 未移动
海洋蓝绿藻	718.420	0.012	0.57	3.13	3	125—379	718.7—724.1
甲藻	698.84	0.036	0.98	0.94	4	34—275	700.83—708.96
塔胞藻					4	7—67	687.28, 未移动
小球藻	684.75	0.032	0.90	9.96	4	56—1292	683.6—721.4
新月菱形藻	713.02	0.009	0.75	2.53	3	156—575	713.3—726.8
全部藻种	688.886	0.064	0.66	9.88	27	1.2—600	683.6—724.1
$\text{Peak position} = a + b * \log(\text{Chl } a), \text{nm}$							

4 结 论

浮游植物反射光谱 700nm 附近的荧光峰提供了精确的叶绿素 *a* 浓度信息。而且随浮游植物藻类

的差异,其荧光峰的光谱行为显著不同。

不同藻类之间 $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ 与叶绿素 *a* 的关系发生较大的变化,其关系方程系数 *a* 的变化范围为 $0.037\text{--}1.135$ 之间, *b* 的变化范围为 $0.094\text{--}0.727$ 之间,在相同的叶绿素浓度增加幅度下,各个藻类的

荧光峰增加的幅度不尽相同。扁藻、叉鞭金藻、赤潮异弯藻和海洋蓝绿藻的荧光变化随叶绿素浓度的增加较快。甲藻、新月菱形藻和小球藻的荧光峰高度随叶绿素浓度的增加较为缓慢。

同一种藻类中,随叶绿素浓度的增加,浮游植物反射光谱荧光峰的位置向红光方向移动。随藻类不同,移动的幅度有所差异,赤潮异弯藻的移动幅度最大,其它藻类每 10 mgm^{-3} 浓度的移动幅度介于

0.1—0.3nm 之间,叉鞭金藻和塔胞藻在实验的浓度范围内未见移动。此外由于受实验和现场条件的限制,同一藻类不同叶绿素浓度光谱曲线数量少,可能会对统计结果产生一定的影响。

致谢 本文与光谱数据测定同步的浮游植物的培养、种类的鉴定和数据分析由郭皓和陈红星完成。叶绿素 *a* 的分析由孙育红完成,特此表示感谢。

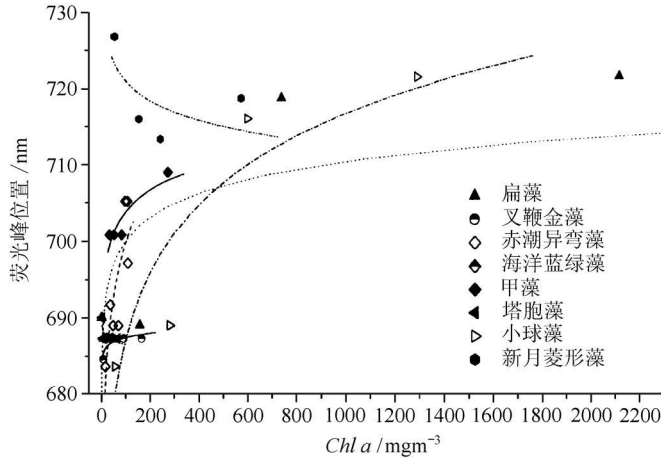


图 3 不同藻类 700nm 附近荧光峰位移与叶绿素 *a* 浓度的关系

Fig.3 The relationship between FLH shift and Chl *a* concentration

参考文献 (References)

[1] Neville R A, Gower J F R. Passive Remote Sensing of Phytoplankton via Chlorophyll-*a* Fluorescence[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**: 3487—3493.

[2] Gower J F R. Observations of in Situ Fluorescence of Chlorophyll *a* in Saavich Inlet [J]. *Boundary-layer Meteorology*, 1980, **18**: 235—248.

[3] Morel A, Prieur, L. Analysis of Variation in Ocean Colors[J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, **22**: 709—722.

[4] Gitelson A A, Kondrat 'ev K Ya. On the Mechanism of Formation of Maximum in the Reflectance Spectra Near 700 nm and Its Application for Remote Monitoring of Water Quality[J]. *Transactions Doklady of USSR Academy of Sciences: Earth Science Sections*, 1991, **306**: 1—4.

[5] Gower J F R, Borstad G A. Mapping of Phytoplankton by Solar-stimulated Fluorescence Using an Imaging Spectrometer[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, **11**: 313—320.

[6] Gitelson, A. The Peak Near 700nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration[J], *Int. J. Remote Sensing*, 1992, **13** (17): 3367—3373.

[7] Zhao D Z, Cong P F. Spectrum Character of Ceratium Furca (Her) Claoariae et lachmann in the Bohai Sea [A]. Research Selection of Monitoring and Assessment of Red Tide in Bohai Sea[C]. Beijing:

Marine Press, 2000. [赵冬至, 从丕福. 渤海叉角藻赤潮的光谱特征研究[A]. 渤海赤潮灾害监测与评估研究文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2000.]

[8] Zhao D Z, Liu Y J. Spectral Character of Polluted Water Bodies in China[M]. Beijing: Marine Press, 2001. [赵冬至, 刘玉机. 中国污染水体光谱特征[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.]

[9] Mobley C D. Estimation of the Remote Sensing Reflectance from Above-surface Measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**: 7442—7455.

[10] Zhao D Z, Zhao L, Zhang F S. Type of Formation, Distribution and Temporal Trend of Red Tides Occurred in the China Sea[J]. *Chinese Journal of Marine Environmental Science*, 2003, **22**, (3): 7—11. [赵冬至, 赵玲, 张丰收. 我国海域赤潮灾害的类型、分布与变化趋势[J]. 海洋环境科学, 2003, **22**(3): 7—11].

[11] Zhao D Z, Du F, Zhao L, et al. On the Reflectance of Algae in Water: Comparison of Chlorophyll Fluorescence Algorithms for Three Ocean Color Sensors [J]. *China High Technology Letters*, 2004, **14** (11) 93—97. [赵冬至, 杜飞, 赵玲等. 基于表面反射率的赤潮卫星荧光光线高度算法比较[J]. 高技术通讯, 2004, **14** (11): 93—97.]

[12] IOCCG. Remote Sensing of Ocean Colour in Costal, and Other Optically-Complex, Water [R]. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, 2000.

[13] Ricard M, Letelier Mark R Abbott, An Analysis of Chlorophyll Fluorescence Algorithms for the Moderate Resolution Imaging Spectrometer

- (MODIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 215—223.
- [14] Gower J F R, Doeffler R, Borstad G A. Interpretation of the 685 nm Peak in Water Leaving Radiance Spectra in Term of Fluorescence, Absorption and Scattering, and Its Observation by MERIS[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, **20** (9): 1771—1786.
- [15] Vos W L, Doneze M, Bueteveld H. On the Reflectance Spectrum of Algae in Water; the Nature of the Peak at 700 nm and Its Shift With Varying Concentration[R]. Communication on Sanitary Engineering and Water Management, Delft, the Netherlands, Technical Report, 1986.
- [16] Kishino M, Sugihara S, Okami N. Theoretical Analysis of the in-situ Fluorescence of Chlorophyll a on the under Water Spectra Irradiance [A]. *Bulletin de la Société Franco-Japonaise d' Océanographie*. 1986, **24**: 130—138.

Interpretation of Sun-induced Fluorescence Peak of Chlorophyll *a* on Reflectance Spectrum of Algal Waters

ZHAO Dong-zhi, ZHANG Feng-shou, DU Fei, ZHAO Ling, Guo Hao

(National Marine Environmental Monitoring Center, SOA, Liaoning, Dalian 116023, China)

Abstract: To investigate the relation of sun-induced fluorescence peak near 700nm with chlorophyll *a* concentration, data set of the reflectance spectra of red tide species such as *Gymnodinium* sp. , *Heterosigma akashiwo*, *Ceratium furca* and other algae for instance *Nitzschia closterium*, *Dicrateria zhanjiangensis* Hu. , *Blue algae* sp. , *Chlorococcum* sp. , *Platymonas helgolandica var tsingtaoensis*, *chlorella* sp. getting from in situ and culture was used. $R_{\max\text{red}}$ normalized to R_{560} was correlated highly with chlorophyll *a* concentration with $R > 0.82$. Along with algae's difference, the coefficient *a* of the relationship of $R_{\max\text{red}}/R_{560}$ with chlorophyll *a* presented big change. The regressions equation in the form of $R_{\max\text{red}}/R_{560} = a (\text{chl } a)^b$ revealed that coefficient *a* varied from 0.037 to 1.135 and *b* varied from 0.094 to 0.727. Simultaneously this work established the relationship of the peak position of algal fluorescence with chlorophyll *a* concentration. All of the Regression coefficients were bigger than 0.75 except *Chlorococcum* sp. with 0.57. The position of phytoplankton's fluorescence peak was shifted to the red light of spectrum. Varied with the species of algae, the shift of peak position was not the same. The *Heterosigma akashiwo* was the biggest, and the shift of peak position of other algae per $10\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ was between 0.1 and 0.3nm. No shift was detected of *Dicrateria zhanjiangensis* Hu. and *Chlorococcum* sp. in the scope of experimenting chlorophyll *a* concentration.

Key words: red tide, algae, sun-induced chlorophyll fluorescence (SICF), chlorophyll *a*