

赤潮光谱特征及其形成机制

崔廷伟^{1,2}, 张杰^{2,3}, 马毅^{2,3}, 孙凌²

1 中国海洋大学, 山东 青岛 266003

2 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

3 海洋环境和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061

摘要 采用海面以上光谱测量方法 (Above water method), 利用美国 FieldSpec Dual VNIR 光谱仪测量了丹麦细柱藻、中肋骨条藻、海洋褐胞藻等三种浮游植物赤潮以及红色中缢虫这一原生动物赤潮的离水辐射光谱数据。强调赤潮与正常海水的光谱差异在于 687~728 nm 波段的特征反射峰, 指出了浮游植物赤潮与原生动物赤潮间的显著光谱差异, 并认为可据此进行某些赤潮种类的遥感识别。给出了浮游植物赤潮光谱反射峰、吸收峰成因; 红色中缢虫这一原生动物引起的水色异常, 与其体内的共生藻类及浮游植物色素碎屑有关; 其摄食偏好、与藻类的共生特性研究以及藻类常温下的荧光发射特性研究, 将有助于加深对于红色中缢虫赤潮光谱成因的认识。

主题词 赤潮; 藻类; 红色中缢虫; 光谱; 特征; 荧光

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)05-0884-03

引言

赤潮是海水中的浮游生物在一定条件下过度增殖或聚集致使海水变色的一种生态异常现象。近年来, 我国沿海赤潮灾害的发生呈现出次数增加、规模扩大、有毒赤潮种比例上升等趋势; 赤潮已经成为我国和世界的一大海洋灾害, 引起了各国政府及科学界的高度重视。2001年, 开展了围隔培养实验进行不同优势种赤潮的培养, 辅以实验海域附近的赤潮现场捕获, 以此方式获取了不同优势种赤潮水体的现场遥感反射率光谱数据。本文对于赤潮光谱特征进行了分析研究, 尤其侧重于对于不同种赤潮间光谱差异以及赤潮光谱反射峰、吸收峰成因的探讨。

1 材料与方法

1.1 赤潮光谱数据获取

2001年在辽东湾鲅鱼圈港口海域实施了两期赤潮围隔培养实验, 在两个围隔袋中分别培养出海洋褐胞藻 (*Chattonella marina*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 等三种优势种的赤潮生物; 此外, 在附近海域还捕获多次红色中缢虫 (*Mesodinium*

rubrum) 赤潮。

采用海面以上光谱测量方法 (Above water method), 利用美国 ASD 公司的 FieldSpec Dual VNIR 光谱仪和中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的反射率为 15% 的标准板进行现场光谱数据获取。详细的数据获取方法和步骤参见 Cui 等^[1] 的报道。

1.2 光谱数据处理

遥感反射率可表达如下

$$R_{rs} = [S_{sw} - rS_{sky}] / \rho_p / \pi S_p \quad (1)$$

其中 S_{sw} , S_{sky} , S_p 分别为光谱仪面向水体、天空和标准板时的测量值; r 和 ρ_p 分别为海面菲涅尔反射率和标准板的反射率, 平静海面下 r 取为 2.1%; ρ_p 取自标准板定标文件。

2 结果与分析

将数据处理得到的上述四种赤潮的遥感反射率光谱 (以下简称光谱) 曲线各举一例, 如图 1 所示。

2.1 赤潮与正常海水的光谱差异

从光谱形态上看, 在 400~900 nm 波段区间, 不同种类的赤潮光谱均呈明显的双峰形态分布, 尤其, 位于 687~728 nm 的第二反射峰, 是赤潮水体光谱区别于正常海水光谱的特征反射峰, 这一点已成功地被用于基于航空高光谱遥感的

收稿日期: 2005-04-18, 修订日期: 2005-08-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (2001CB409708) 和国家高技术研究发展计划 (2001AA633080, 2001AA634030) 资助项目

作者简介: 崔廷伟, 1979 年生, 中国海洋大学物理海洋学博士研究生

赤潮检测算法之中^[2]。

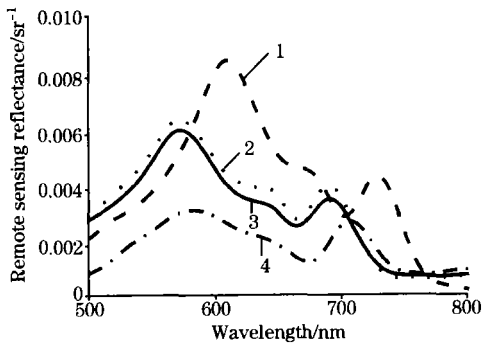


Fig 1 Spectra of different dominant species of red tide

1: *Mesodinium*; 2: *Skeletonema costatum*;
3: *Leptocylindrus danicus*; 4: *Chattonella marina*

2.2 赤潮种类间光谱特征的差异

利用光谱微分方法^[3]提取不同种类赤潮光谱的第二反射峰波长信息，结果如表 1 所示。

Table 1 Wavelength of second reflectance spectral peak of different species of red tide

赤潮种类	第二反射峰波长/ nm
红色中缢虫	724~ 728
海洋褐胞藻	700, 707
中肋骨条藻	687~ 692
丹麦细柱藻	687~ 696

由表可见，红色中缢虫赤潮第二反射峰峰值波长大于 720 nm，与其他三种赤潮光谱具有显著差别，该反射峰在我国近海赤潮光谱研究未见报道。中肋骨条藻与丹麦细柱藻的第二反射峰波长范围基本一致，并且与赵冬至等观测的叉角藻赤潮以及黄韦良等观测的裸甲藻赤潮光谱特征峰范围基本吻合。海洋褐胞藻赤潮光谱数据的数量有限，考虑到现场观测中可能存在的多种影响因素，待该种类赤潮光谱数据丰富后再行确定其第二反射峰波长范围会更有意义。第二反射峰波长信息，可用以将红色中缢虫赤潮与其他种类赤潮区别开来，但进行其他赤潮种类识别时，应谨慎利用这一信息。

一个有趣的现象是：与其他三种浮游植物赤潮光谱相比，红色中缢虫赤潮光谱整体上红移了 20~ 25 nm，而这四种赤潮光谱曲线的第一与第二反射峰之间的波长间隔却基本一致。

2.3 浮游植物赤潮光谱特征的成因

海洋褐胞藻、中肋骨条藻、丹麦细柱藻是三种引发赤潮的浮游植物，我们将其归为一类进行分析。

浮游植物色素(主要为叶绿素、胡萝卜素及其他附属色素)、无机悬浮颗粒物、有色溶解有机物是决定海水光学性质的三大要素，共同影响着海洋的离水辐射信息(如：遥感反射率光谱)，综合考虑这三种水色要素的光谱性质，我们对于实验测定的赤潮光谱反射峰、吸收峰的成因有如下认定。

(1) 相对较高浓度的无机悬浮物是 570~ 585 nm 第一反射峰产生的主要原因，由于其对光的强散射作用湮没了叶绿素在 550 nm 的反射峰，使之无法从光谱曲线中明显地表现出来，较高浓度的无机悬浮物的出现与实验海域在近岸有直接关系。

(2) 藻蓝蛋白(Phycocyanin) 这一附属色素在 615~ 630 nm 的吸收作用形成了 640 nm 波长附近的反射光谱肩峰。

(3) 位于 670 nm 附近的吸收峰源自叶绿素的强吸收作用^[4]。

(4) 赤潮水体光谱第二反射峰，与黄色物质和悬浮泥沙的存在及其含量无关，归因于叶绿素在该波段的荧光特性。以往的海洋光学研究中，一般认为叶绿素的荧光峰在 685 nm^[5]，而近年来的实验观测^[6]与光谱模拟研究均表明^[7]，随着叶绿素 a 浓度的升高，在荧光峰强度增大的同时，荧光出射波长也会随之红移。

(5) 光谱曲线在 800 nm 附近的微小反射峰的产生，是因为纯水在该波段具有吸收的极小值。

2.4 红色中缢虫赤潮光谱特征的成因

红色中缢虫是目前唯一的有报道的能形成赤潮的原生动物，本身无色，以浮游植物为食。不仅如此，有研究表明^[8]，红色中缢虫体内还共生着藻类，这就意味着由红色中缢虫这种原生动物引发的赤潮与色素浓度的异常升高并导致水色异常有关，而这部分色素源于红色中缢虫体内的共生藻类和浮游植物色素碎屑。由于缺乏同步的现场生物观测资料，这种可能性还有待进一步确认。从另一方面来讲，藻类色素是否具备出射波长大于 720 nm 荧光的能力呢？传统的海洋光学理论将叶绿素作为浮游植物的唯一代表性色素，仅考虑该种色素的吸收和荧光特性，难以对于原生动物的赤潮给出合理的解释。所以，有必要从光合作用机制^[9]出发，将藻类的所有光合作用色素作为一个有机体进行综合的考虑。在藻类叶绿体内，光合作用通过光系统 I (PS I) 和光系统 II (PS II) 的协同工作得以进行；我们注意到，有研究表明^[10-12]，褐藻 PS I 复合物的低温荧光发射峰一般位于 720~ 728 nm 之间。如果了解了常温下该藻的荧光发射特性，那么这种推断才可能得以成立。

红色中缢虫的摄食偏好及与藻类的共生特性研究将有助于解释这一现象，此外，这些藻类的光合作用特征尤其是常温下的荧光发射特性是另外一个关键问题。

3 结 论

借助多种方式获取了不同优势种赤潮水体的现场遥感反射率光谱数据。经分析发现，赤潮与正常海水的光谱差异在于 687~ 728 nm 波段的特征反射峰，浮游植物赤潮与原生动物赤潮间具有显著的光谱差异，可据此进行某些赤潮种类的遥感识别。给出了浮游植物赤潮光谱反射峰、吸收峰成因；红色中缢虫这一原生动物引起的水色异常，与其体内的共生藻类及浮游植物色素碎屑有关；其摄食偏好、与藻类的共生特性研究以及藻类常温下的荧光发射特性研究，将有助于加深对于红色中缢虫赤潮光谱成因的认识。

致谢: 作者感谢中国海洋大学物理系郑荣儿教授、国家卫星海洋应用中心唐军武研究员、国家海洋局北海分局张洪

亮高级工程师、中国科学院南海海洋研究所简伟军、厦门大学吴 瑜博士等在成文过程中给予的有益讨论和大力帮助。

参 考 文 献

- [1] CUI Ting-wei, ZHANG Jie, ZHANG Hong-liang, et al(崔廷伟, 张 杰, 张洪亮, 等). SPIE, 2003, 4892: 287.
- [2] MA Yi, ZHANG Jie, CUI Ting-wei(马 毅, 张 杰, 崔廷伟). SPIE, 2003, 4892: 278.
- [3] Rundquist D C, Han L, Schalles F F, et al. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(2): 195.
- [4] ZHU Ya-bin, WU Yan-yan, GONG Wei-sui, et al(朱延彬, 吴燕燕, 龚为穗, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1995, 15(2): 5.
- [5] Gordon H R. Applied Optics, 1979, 18(8): 1161.
- [6] Gitelson A. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367.
- [7] Hoogenboom H J, Dekker A G, Althuis I J A. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(2): 333.
- [8] ZHU Ming-yuan, LI Rui-xiang, WANG Fei(朱明远, 李瑞香, 王 飞). China Red Tide Research(中国赤潮研究). Qingdao: Qingdao Press(青岛: 青岛出版社), 1996. 42.
- [9] MENG Ji-wu, ZHENG Rong-er(孟继武, 郑荣儿). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2002, 22(4): 577.
- [10] LI Ai-fen, CHEN Min, ZHOU Bai-cheng(李爱芬, 陈 敏, 周百成). Chinese Bulletin of Botany(植物学通报), 1999, 16(3): 274.
- [11] LI Ai-fen, CHEN Min, ZHOU Bai-cheng(李爱芬, 陈 敏, 周百成). Chinese Bulletin of Botany(植物学通报), 1999, 16(4): 365.
- [12] LI Ai-fen, CHEN Min, ZHOU Bai-cheng(李爱芬, 陈 敏, 周百成). Marine Sciences(海洋科学), 2000, 24(2): 47.

Study of Red Tide Spectral Characteristics and Its Mechanism

CUI Ting-wei^{1, 2}, ZHANG Jie^{2, 3}, MA Yi^{2, 3}, SUN Ling²

1. Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

3. Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

Abstract *In situ* spectral data of different red tide, whose dominant species are *leptocylindrus danicus*, *chattonella marina*, *skeletonema costatum*, and *mesodinium rubrum*, were acquired by above water method utilizing spectrometer manufactured by FieldSpec Dual VNIR(USA). It is emphasized that the characteristic reflectance peak lying between 687 and 728 nm can be used to distinguish between red tide and normal sea water. Also the spectral discrepancy between different dominant species of red tide is pointed out, which could be utilized to identify certain red tide species by remote sensing technique. Mechanisms of phytoplankton red tide spectra peaks and vales are given. Spectral characteristics of *mesodinium rubrum*, a kind of protozoan, may be related to its symbiotic alga in its body and phytoplankton pigment crumb. So, research on ingestion preference, symbiotic property with algae, and fluorescence emission character of such symbiotic algae under normal temperature may be helpful for the deep understanding of mechanism of *mesodinium rubrum* spectra.

Keywords Red tide; Algae; *Mesodinium rubrum*; Spectra; Characteristics; Fluorescence

(Received Apr. 18, 2005; accepted Aug. 31, 2005)