

# MODIS 遥感数据提取赤潮信息方法与应用 ——以珠江口为例

张涛<sup>1,2</sup>, 苏奋振<sup>1</sup>, 杨晓梅<sup>1</sup>, 孙晓宇<sup>1</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境国家重点实验室, 北京 100101;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:**近年来, 中国沿海近岸二类水体中的赤潮频发, 对海洋环境、社会经济和公众健康都造成较大危害, 因此, 针对近岸二类水体中较小范围赤潮的遥感监测分析有重要意义。本文的工作主要集中在: (1) 分析典型赤潮海水、泥沙浑浊海水、赤潮泥沙混合海水, 以及清洁海水的 MODIS 影像光谱特征; (2) 分析叶绿素 a 法, 温度法, 荧光法和波段比值法, 在近岸小范围赤潮识别应用中的优势和缺点; (3) 提出监督分类的赤潮信息提取方法, 其中典型赤潮样本的选取基于蓝绿波段反射率比值和 MODIS 1, 4, 3 波段。利用本方法, 对珠江口海域 2006 年 2 月赤潮进行了提取, 取得良好的效果。

**关键词:** 赤潮; MODIS; 波段比值法; 监督分类; 珠江口

## 1 引言

赤潮 (red tide) 泛指由于海洋浮游生物的过度繁殖造成海水变色的现象。近年, 国际上将那些直接造成危害的赤潮, 称为有害藻类水华 (harmful algal bloom, HAB), 而把一些无直接危害的赤潮不归到此类<sup>[1]</sup>。在近 30 年以来, 赤潮的发生频度、强度和地理分布都在增加, 欧洲, 北美, 日本, 南美洲都时有赤潮发生, 有毒赤潮种类也在增加。有毒赤潮的发生将危害到海洋野生生物, 海洋渔业生产, 社会经济发展以及公众健康安全。近年来, 我国赤潮发生频度和强度都呈上升趋势。2000 年我国海域共发现赤潮 28 次, 累计面积约 7 800 km<sup>2</sup>, 到 2005 年我国共发现赤潮现象 82 次, 累计面积达 27 070 km<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。

利用不同遥感平台、不同传感器和不同算法, 为赤潮的大范围、快速、同步、高频率探测提供了重要手段<sup>[3]</sup>。

Gower 等用 AVHRR 的 1、2 波段数据探测了 1990 年发生于加拿大西部沿海刺膝沟藻赤潮<sup>[4]</sup>。赵冬至等也用 AVHRR 数据, 针对 1998 年渤海赤潮进行了探测<sup>[5-7]</sup>。但 AVHRR 数据通道少、波段

宽、灵敏度低, 一般不利于赤潮的提取。

SeaWiFS 是继 CZCS 之后的第二代水色传感器, 其信噪比大幅度提高, 且配置了更加合理的波段以进行大气校正。Ahn 等用 SeaWiFS 数据针对亚洲东北部海域赤潮进行了探测, 并提出以赤潮指数来反映赤潮生物的富集程度<sup>[8,9]</sup>。孙强等用 SeaWiFS 的第 3, 4, 5 波段的离水辐射率加减法, 对 1997 年厦门附近海域赤潮进行了探测<sup>[10]</sup>。

另外, Hu 等用 MODIS 荧光数据对 2004 年佛罗里达西南部海域赤潮进行了探测, 研究了 MODIS 荧光数据探测赤潮的方法<sup>[11]</sup>。Cannizzaro 等发展了结合 MODIS 数据和 SeaWiFS 数据的方法, 并在佛罗里达西南部海域赤潮探测中应用<sup>[12]</sup>。王其茂等应用 MODIS 遥感资料, 针对 2002 年 6 月和 2004 年 5 月渤海赤潮进行探测<sup>[13]</sup>, 李继龙等利用 MODIS 遥感数据探测了长江口及邻近海域赤潮<sup>[14]</sup>。

本研究利用已经过大气校正的 MODIS 遥感数据, 分析了典型赤潮海水, 泥沙浑浊海水, 赤潮泥沙混合海水以及清洁海水的 MODIS 影像光谱特征; 剖析了利用 MODIS 第 4 通道和第 3 通道比值提取赤潮信息方法 ( $R4/R3 > Cr$ ) 的优点和缺点。在此

收稿日期: 2008-06-07; 修回日期: 2009-03-12.

基金项目: 国家“973”项目(2006CB701305), 中国科学院知识创新项目(kzcx2-yw-304)资助。

作者简介: 张涛(1983-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要方向是海岸带研究, 遥感、GIS 应用, 时空关联规则与挖掘研究。E-mail: zhangt@reis.ac.cn

基础上,提出了监督分类的赤潮信息提取方法,其中典型赤潮样本的选取基于蓝绿波段反射率比值专题图和 1, 4, 3 波段合成图,对珠江口海域 2006 年 2 月赤潮进行了成功提取。

## 2 MODIS 赤潮信息提取原理与方法

### 2.1 MODIS 传感器主要波段特征

MODIS 是 EOS 系列卫星的主要探测仪器,具有 36 个光谱通道,分布在 0.4 ~ 14 $\mu$ m 的电磁波谱范围内。MODIS 传感器 1, 2 通道的空间分辨率为 250m,第 3 到第 7 通道的空间分辨率为 500m,其余通道为 1 000m,视幅宽度为 2 330km,在对地观测过程中,每日或每两日可获取一次全球观测数据。其较高的光谱分辨率和高的时间分辨率在赤潮监测中有较大优势。

表 1 MODIS 部分通道特征

Tab. 1 Characteristics of certain MODIS channels

通道	波段宽度 ( $\mu$ m)	主要应用	分辨率 (m)	信噪比
1	0.620 ~ 0.670	植被叶绿素吸收	250	128
2	0.841 ~ 0.876	云和植被覆盖	250	201
3	0.459 ~ 0.479	土壤植被差异	500	243
4	0.545 ~ 0.565	绿色植被	500	228
...	...	...	...	...
8	0.405 ~ 0.420	叶绿素	1000	880
9	0.438 ~ 0.448	叶绿素	1000	838
10	0.483 ~ 0.493	叶绿素	1000	802
11	0.526 ~ 0.536	叶绿素	1000	754
...	...	...	...	...
14	0.673 ~ 0.683	叶绿素荧光	1000	1087
...	...	...	...	...
31	10.780 ~ 11.280	云/表面温度	1000	0.05
32	11.770 ~ 12.270	云/表面温度	1000	0.05
...	...	...	...	...

利用 MODIS 遥感数据可以获得每天的海表面温度、海洋水色、荧光等与赤潮信息提取有关的特征信息。表 1 是与赤潮信息提取相关的部分 MODIS 通道的特征。本研究专注于我国近岸二类水体中的赤潮,此类赤潮空间范围相对较小,故主要采用 250m 和 500m 的波段。

### 2.2 MODIS 赤潮信息提取原理

#### (1) 赤潮光谱特征

赤潮信息遥感提取的基本原理在于典型赤潮

海水与典型非赤潮海水(如清洁海水,泥沙含量高的浑浊海水)的光谱差异。针对典型赤潮水体光谱的分析表明,赤潮水体有两个吸收峰和两个反射峰。两个吸收峰,其中一个在 440 ~ 460nm 的蓝光波段,另一个在 650 ~ 670nm 的红光波段;两个反射峰,一个在 560 ~ 580nm 的绿光波段,另一个是 690 ~ 710nm 波段<sup>[15]</sup>。

本研究针对珠江口海域 2006 年 2 月赤潮,通过对 MODIS 遥感数据的分析,提取出典型海水在 MODIS 可见光波段的特征波谱,绘制了波谱曲线,如图 1 所示(典型海水包括:赤潮海水,赤潮泥沙混合海水,泥沙含量高的浑浊海水,清洁海水)。从图中可以看出,清洁海水各波段反射率均很低,最易区分;泥沙含量高的浑浊海水蓝、绿波段反射率均很高,红波段吸收强;典型赤潮海水蓝波段反射率很低,绿波段反射率高,形成强烈反差;赤潮泥沙混合海水蓝波段和绿波段反射率均高于赤潮水,特别蓝波段反射率比赤潮水高。需要重点区分的赤潮海水,浑浊海水和混合水的最大的光谱差异在于蓝波段:赤潮海水蓝波段强烈吸收,反射率最低;浑浊海水蓝波段反射率最高;赤潮泥沙混合水则反射率居中。

通过对典型海水光谱特征的分析,可以发现:赤潮海水绿波段和蓝波段的反射率的强烈反差,可以作为赤潮判断和提取的重要指数。

#### (2) 赤潮信息提取方法

当前的赤潮遥感探测方法主要有叶绿素 a 方法、荧光法、温度法和波段差值比值法。对于叶绿素 a 方法、荧光法和温度法,无论是 SeaWiFS 遥感数据,还是 MODIS 数据,其数据源 1km 空间分辨率,都难以达到近岸小范围赤潮探测的要求。对于波段比值法,MODIS 数据中的第 3, 4 波段比值对赤潮水体有较好的响应,王其茂等<sup>[13]</sup>曾发展了  $R4/R3 > Cr$  的基于反射率比值阈值的赤潮提取方法。

诚然,蓝绿波段反射率比值是识别赤潮的一个重要指数,可以加以利用。然而,文献[13]中基于蓝绿波段反射率比值阈值的赤潮提取方法却存在一定的问题。首先,阈值  $Cr$  的选取纯粹凭借经验,其不同区域有差异,且随时间变化也有差异;其次,比值只能反映值的相对大小,不能反映绝对大小,如 10/5 结果为 2, 2/1 结果也为 2,也就是说在赤潮判别中,相同的比值结果可能

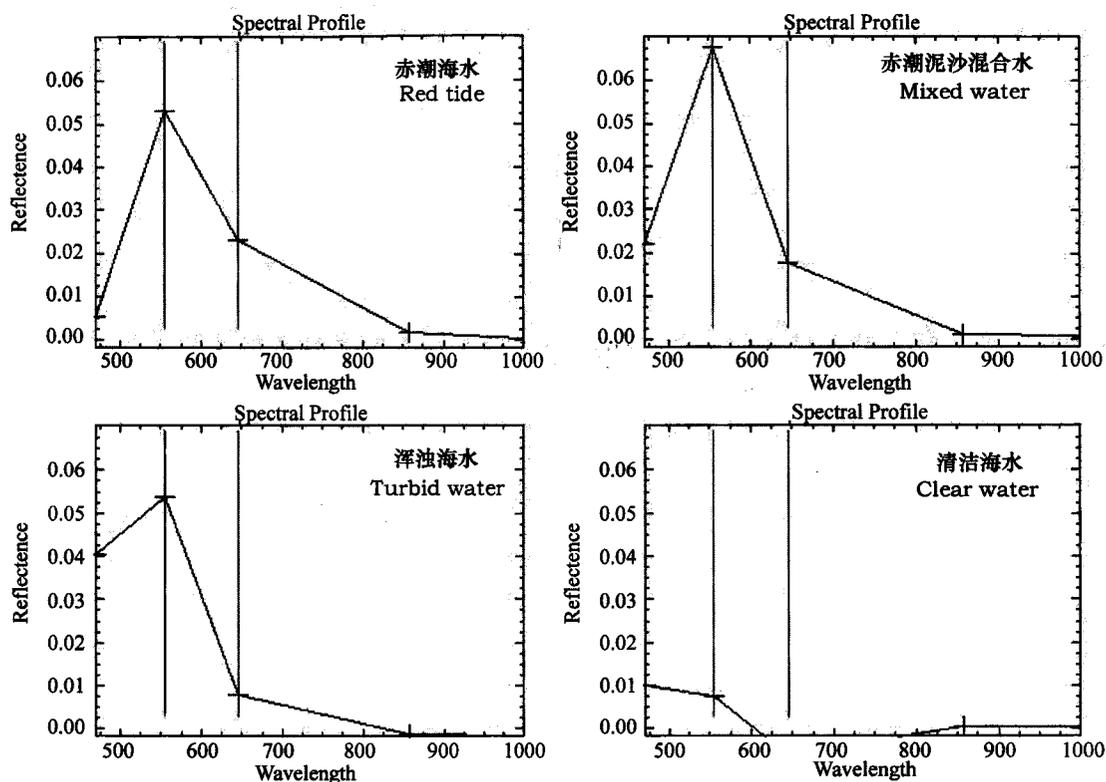


图1 典型海水在MODIS可见光波段光谱剖面曲线(460nm~1000nm)

Fig. 1 Curves of MODIS visible band spectrum of typical kinds of seawater (460nm~1000nm)

对应着完全不同的特征光谱,使赤潮识别产生错误,识别精度降低。

为了突破基于蓝绿波段反射率比值阈值的赤潮提取方法的局限,本文提出新方法来提取赤潮信息。但新方法应基于以下两点原则:首先,新方法必须要利用蓝绿波段反射率比值信息;其次,新方法要尽可能的利用MODIS遥感数据中的高空间分辨率波段信息(与赤潮相关性高主要是MODIS第1,4,3波段)。为此,本文采用监督分类的方法,来提取赤潮信息。其中典型赤潮样本的选取,系基于蓝绿波段反射率比值信息和MODIS第1,4,3波段合成影像;而用来做监督分类的数据采用波段比值与MODIS第1,4,3波段合成的4波段数据。此赤潮提取方法的优势在于将MODIS蓝波段和绿波段反射率的绝对大小和相对大小都考虑入赤潮识别过程,同时能够融入红波段信息和专家判别知识,有利于提高赤潮识别精度。

### 2.3 MODIS 赤潮信息提取的流程

基于上述赤潮提取方法,本文设计了一套提取MODIS遥感数据的赤潮信息的技术流程,如图

2所示。本技术流程全部在ENVI 4.4软件系统中实现。

首先,数据源采用经过大气校正过后的250m和500m分辨率的地表反射率数据(数据来自美国对地观测数据通道(EOS Data Gateway)<sup>[16]</sup>),对500m分辨率的数据,用最近邻方法重采样为250分辨率的数据,与原有250m分辨率数据组合成为250m分辨率的多波段遥感数据。由于MOD09数据采用Sinusoidal投影,珠江口小范围内几何变形很严重,通过重投影将数据重新校正为高斯克吕格投影。另经空间裁剪,获取空间覆盖范围为21.5°N至23°N,113.5°E至115°E的遥感数据,覆盖了整个研究区域。为了突出海洋特征,将陆地掩膜,便可以得到1,4,3波段合成影像,再经过对比度拉伸变换,以突出赤潮区域的颜色异常。通过波段运算,并对波段比结果进行伪彩色可视化,得到波段比结果专题图。然后结合对1,4,3波段合成影像和波段比结果图的目视判别,选取典型赤潮样本,再用监督分类的方法,得到赤潮分布图,可以进一步用于灾害评估。

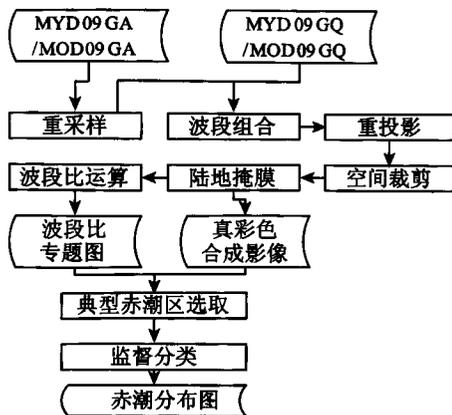


图2 MODIS 影像提取赤潮数据处理流程

Fig. 2 Data process for red tide information extraction with MODIS image

### 3 实验结果与分析

环境监测部门实地观测结果表明, 2006 年 2 月, 珠江口海域发生赤潮, 引起赤潮的藻类为球形棕囊藻, 大致范围是澳门机场到淇澳岛北部沿岸海区, 面积约 300km<sup>2</sup>。应用本研究提出的赤潮信息遥感提取方法, 针对珠江口海域 2006 年 2 月赤潮进行试验, 以下是实验结果及分析。

#### 3.1 1, 4, 3 波段合成影像分析

由于珠江口地区云覆盖较为严重, 少云可用的影像不多, 其中 2006 年 2 月 7 日 Aqua/MODIS 影像效果较好。从经过对比度拉伸的 1, 4, 3 波段反射率合成影像中(图 3-a, b, 其中 b 为 a 中方框区域的局部放大), 可以清楚地看出珠海以东, 淇澳岛东北部海域的浮游植物聚集带。香港以南浅蓝色区域为泥沙含量较高, 但浮游植物含量少的海域。在影像东南角上深蓝色区域为大洋清洁水海域。

#### 3.2 波段比结果与分析

对绿波段和蓝波段反射率数据做比值运算 ( $R_4/R_3$ ), 并用伪彩色颜色对照表对比值运算结果进行可视化, 得到图 3-c 的波段比专题图。从图例可以, 值区间 0~6 区间为蓝色, 值区间 8~12 为绿色, 值区间 14~30 为红色。若以蓝绿波段反射率比值阈值方法 ( $R_4/R_3 > Cr$ ) 提取赤潮信息, 则可将阈值  $Cr$  定为 8, 即  $R_4/R_3 > 8$  为赤潮, 此时

判别出的赤潮基本为图 3-c 中绿色和红色区域。分析结果可以看出, 在实际监测报道的赤潮区域, 即澳门机场到淇澳岛北部海区, 比值结果 ( $R_4/R_3$ ) 均为高值。同时也可以发现, 在实际监测报道中没有赤潮的深圳沿岸海区, 比值结果 ( $R_4/R_3$ ) 也有大量高值。因此, 单靠波段反射率比值阈值方法, 容易把一些比值结果高的非赤潮区域误判成为赤潮区域, 使赤潮识别混入严重噪声。

#### 3.3 赤潮区域提取结果与分析

为了突破基于蓝绿波段反射率比值阈值的赤潮提取方法的局限, 又充分利用其优点, 本文提出用监督分类来提取赤潮信息, 其中典型赤潮样本的选取基于蓝绿波段反射率比值专题图和 1, 4, 3 波段合成图。

首先, 在典型赤潮样本选取过程中, 结合 MODIS 第 1, 4, 3 波段合成影像和波段比值专题图, 选取 ROI (Region of interest) 典型的赤潮区域, 而后进行监督分类。通过多次试验, 发现 MODIS 第 1 至 7 波段, 第 1, 4 和 3 波段与赤潮相关性最高, 对赤潮分类效果最好。因此, 用来做监督分类的数据采用波段比值与 MODIS 第 1, 4, 3 波段合成的 4 波段数据为宜。监督分类的算法, 本文采用最小距离法, 距离参数设为 2 倍标准差。结果分为两类: 赤潮和非赤潮。赤潮分类结果如图 3d 所示, 红色点是赤潮核心区域的提取结果。对分类结果进行统计发现, 赤潮核心区域有 1 277 个点, 以每个像元点是 250m 分辨率计算, 赤潮核心区面积总计约 80km<sup>2</sup>, 实际的赤潮影响范围估计约 330km<sup>2</sup>, 与实际现场监测结果报道相符。

### 4 结语

本文通过分析典型赤潮水体和典型非赤潮水体的 MODIS 光谱特征, 在分析现有赤潮提取方法优缺点的基础上, 提出了基于 MODIS 第 4, 3 波段反射率比值和 1, 4, 3 波段的监督分类方法来提取赤潮信息。从 2006 年 2 月珠江口赤潮的应用情况来看, 本方法提取赤潮结果与实际监测报道结果基本一致。

由于 MODIS 遥感数据具有高时间分辨率, 较高光谱分辨率和信噪比, 还有其较高空间分辨率的第 1 至 7 波段, 能够满足我国近岸小范围内的

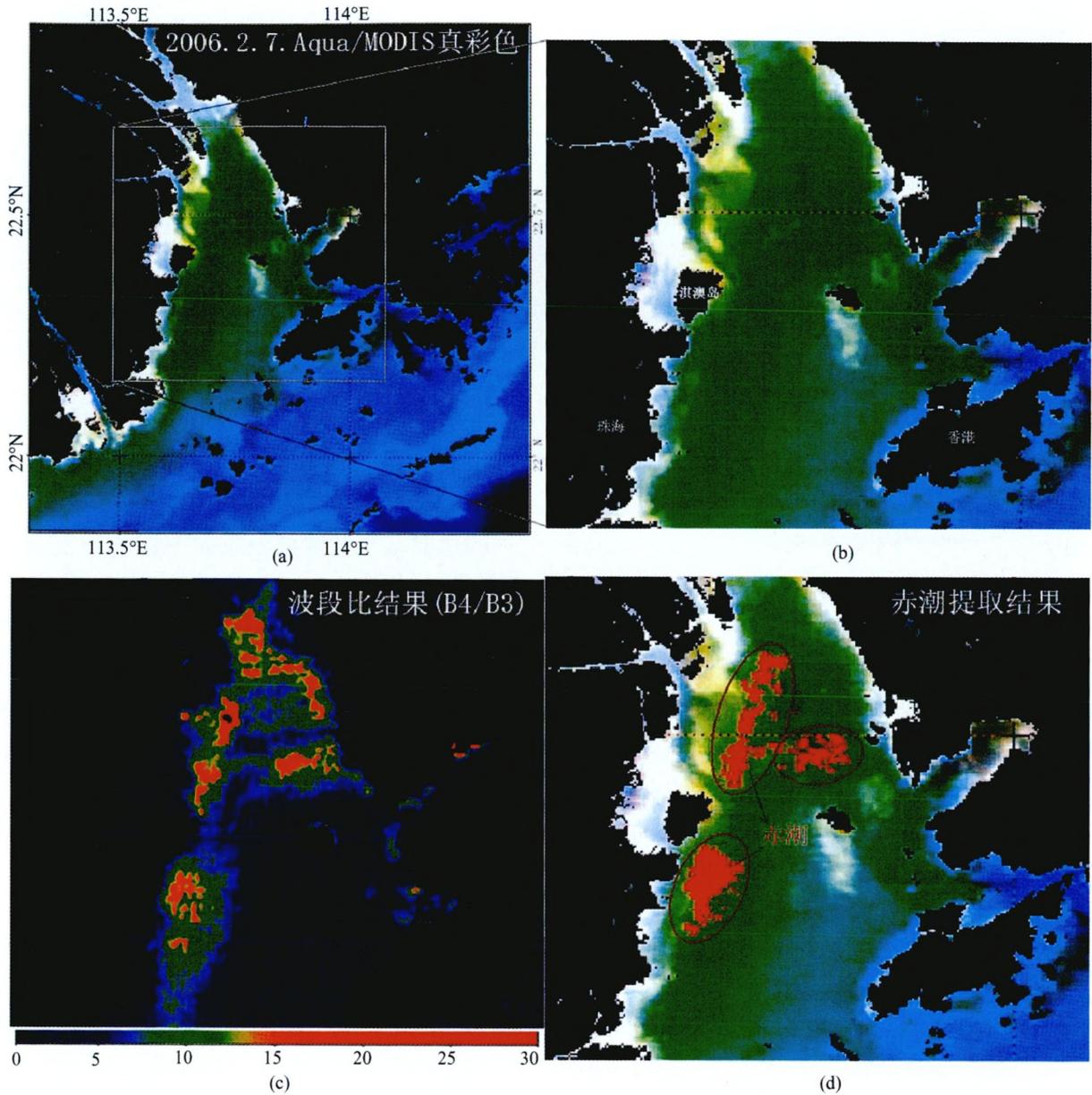


图3 2006年2月7日 Aqua/MODIS 影像分析结果：(a) 珠江口1, 4, 3 波段合成影像，(b) 赤潮区域放大图，(c) 波段比运算结果可视化专题图，(d) 赤潮信息提取结果图

Fig. 3 Data analysis results for MODIS image of February 7th 2006: (a - b) True color images with band 1, 4, 3; (c) Band ratio result with B4/B3; (d) Result of red tide information extraction

赤潮监测需求，发展 MODIS 的赤潮遥感监测方法，很有应用前景。

当然，目前利用 MODIS 数据监测赤潮的方法，也尚有进一步改进的空间。首先，我国的赤潮是多发生在近岸海域，MODIS 数据大气校正对此类水体往往存在较大的偏差，使蓝光波段反射率在近岸水体呈现负值或过低值，这对于应用蓝光波段提取赤潮信息的方法有一定限制；其次，赤潮的发生对于环境因子较为敏感，合适的水温，盐度，氮，磷含量等都是赤潮的诱发条件<sup>[17]</sup>。所以，进一步发展 MODIS 数据的赤潮提取方法，应针对中国沿海二

类水体的 MODIS 数据大气校正方法，以提高赤潮遥感监测的精度。另外，NASA 通用的叶绿素浓度反演经验算法，不适用于中国的近岸二类水体，因此，发展适合于中国近岸二类水体的叶绿素浓度反演算法，将是赤潮信息提取方法的有力补充。

参考文献

[1] 齐雨藻. 中国沿海赤潮. 北京: 科学出版社, 2003, 1-2.  
 [2] 裴相斌. 莫让赤潮成“常事”. 环境经济, 2006, (7): 52-53.  
 [3] 顾德宇, 许德伟, 陈海颖. 赤潮遥感进展与算法研究.

- 遥感技术与应用, 2003, (6): 434 - 440.
- [4] Gower J F R. Red Tide Monitoring Using AVHRR HRPT Imagery from a Local Receiver. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(3): 309 - 318.
- [5] 赵冬至. AVHRR 遥感数据在海表赤潮细胞数探测中的应用. *海洋环境科学*, 2003, (1): 10 - 14, 19.
- [6] 赵冬至, 张丰收, 赵玲. 近岸海域叶绿素和赤潮的 AVHRR 归一化差值探测方法研究. *海洋技术*, 2003, (3): 30 - 33.
- [7] 赵冬至, 张丰收, 赵玲 等. 近岸海域叶绿素和赤潮的 AVHRR 波段比值探测方法研究. *海洋环境科学*, 2003, (4): 9 - 12.
- [8] Ahn Yu-Hwan, Shanmugam Palanisamy. Detecting the Red Tide Algal Blooms from Satellite Ocean Color Observations in Optically Complex Northeast-Asia Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(4): 419 - 437.
- [9] Ahn Yu-Hwan, Shanmugam Palanisamy, Ryu Joo-Hyung et al. Satellite Detection of Harmful Algal Bloom Occurrences in Korean Waters. *Harmful Algae*, 2006, 5(2): 213 - 231.
- [10] 孙强, 杨燕明, 顾德宇 等. SeaWiFS 探测 1997 年闽南赤潮模型研究. *台湾海峡*, 2000, (1): 70 - 73, 127 - 128.
- [11] Hu Chuanmin, Muller-Karger F E, Charles T et al. Red Tide Detection and Tracing Using MODIS Fluorescence Data: A Regional Example in SW Florida Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(3): 311 - 321.
- [12] Cannizzaro J P, Carder K L, Chen F, et al. A Novel Technique for Detection of the Toxic Dinoflagellate, *Karenia Brevis*, in the Gulf of Mexico from Remotely Sensed Ocean Color Data. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(1): 137 - 158.
- [13] 王其茂, 马超飞, 唐军武 等. EOS/MODIS 遥感资料探测海洋赤潮信息方法. *遥感技术与应用*, 2006, (1): 6 - 10.
- [14] 李继龙, 唐援军, 郑嘉淦 等. 利用 MODIS 遥感数据探测长江口及邻近海域赤潮初步研究. *海洋渔业*, 2007, (1): 25 - 30.
- [15] 毛显谋, 黄韦良. 多波段卫星遥感海洋赤潮水华的方法研究. *应用生态学报*, 2003, (7): 1200 - 1202.
- [16] <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/ims/welcome/>.
- [17] 黄韦良, 毛显谋, 张鸿翔 等. 赤潮卫星遥感监测与实时预报. *海洋预报*, 1998, (3): 110 - 115.

## A Method for Detecting Red Tide Information from MODIS Data and Its Application in Pearl River Estuary

ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, SU Fenzhen<sup>1</sup>, YANG Xiaomei<sup>1</sup>, SUN Xiaoyu<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In recent years, the coastal regions of China have frequently experienced algal blooms, which are harmful or otherwise toxic because of their potential threat to human being as well as marine organisms. This article mainly focused on the following aspects: (1) analyzed the MODIS spectral characteristics of four typical kinds of seawater; clear water, turbid water, red tide water and mixed water; (2) analyzed the merits and shortcomings of band ratio method for red tide extraction; (3) proposed a new red tide information extraction method: Supervised Classification method based on Band Ratio (R4/R3) and MODIS band 1, 4 and 3. Based on this method, successful information extraction has been carried out for the Pearl River Estuary algal bloom event in Feb. 2006.

**Key words:** algal bloom; MODIS; band ratio method; supervised classification; Pearl River Estuary