

文章编号: 1007-4619(2005)04-0446-06

# 基于环境因素的沿岸水域叶绿素遥感探测研究

丁晓英, 陈晓翔

(中山大学 遥感中心, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 海洋叶绿素的调查一直是海洋生物资源与海洋生态学的研究重点。遥感技术是海洋叶绿素调查的有力工具。利用遥感光谱信号探测海水叶绿素在大洋水体(一类水体)中十分成功,但在沿岸水体(二类水体)的精度却不高,主要是由于悬浮泥沙、黄色物质等的干扰太大。从叶绿素的生存条件入手,提出了利用海水叶绿素环境生存因子作为辅助因素的方法建立叶绿素遥感探测模型。并以珠江口海域作为研究对象展开试验,结果表明,环境因子的引用,使模型的误差从32.48%降为17.96%,精度大大提高,从而证明该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 遥感; 叶绿素; 环境因子; 二类水体

中图分类号: P71/TP79 文献标识码: A

## 1 引 言

叶绿素是衡量海洋初级生产力的重要指标。利用遥感技术进行海洋叶绿素的探测对海洋生态系统中初级生产力、海洋-大气系统中碳循环等的研究具有重要意义。

到目前为止,对海洋叶绿素遥感探测的研究仍集中在对海洋叶绿素的光谱分析及新一代传感器的研制上。利用光谱分析的方法探测叶绿素浓度相对低的清洁大洋水(一类水体)十分成功,而对沿岸水(二类水体)的监测精度却不高。主要原因跟水中悬浮泥沙、黄色物质等的干扰有关。有必要引进新思路、新算法,建立针对沿岸水体有效的叶绿素遥感反演算法。为此,本文从叶绿素的生存条件入手,提出将与叶绿素生长相关的环境因子引入遥感估算模型。并以珠江口沿岸水域作为研究对象,进行了模型的可行性研究,建立了以海洋叶绿素环境生存因子为辅助因素的沿岸水域叶绿素遥感探测模型,取得了令人满意的效果。

## 2 遥感探测海水表层叶绿素浓度

### 2.1 叶绿素光谱辐射原理

叶绿素具有特定的吸收和反射光谱特征,海洋

表层叶绿素遥感主要是利用从水体中反射出来的带有叶绿素含量信息的可见光进行探测。当太阳可见光从水面进入水体之后,叶绿素会对可见光产生反射作用,在440nm处存在一个强烈的吸收谷,520nm处出现节点,即该处的辐射值不随叶绿素a浓度而变化,550nm处出现辐射反射峰,同时叶绿素在可见光的照射下会激发685nm中心波长的荧光峰<sup>[1]</sup>。不同浓度的叶绿素和离水反射作用及荧光辐射作用之间存在规律性和相关性。遥感就是利用叶绿素这种反射光谱、荧光辐射光谱特性,获取海面叶绿素的信息。

### 2.2 海洋叶绿素遥感光谱信号的易干扰性

遥感技术是一种光谱信号间接探测目标物的技术。传感器接收到的海洋遥感光谱信号实际上是多种信号的复合体,它包括了大气、海面、海水以及海底各个不同层次的光谱信号。实际接收到的遥感光谱信号中叶绿素的光谱信号仅占其中的一小部分。而在近岸水域,由于来自悬浮泥沙、流场以及水面的干扰信号强度大,使得遥感光谱信号与叶绿素光谱信号之间的不等效性更为显著<sup>[2]</sup>。在这种情况下,无论遥感光谱信号能否探测到叶绿素含量高峰值的水深深度,但仅由遥感光谱信号建立的叶绿素估算模型难以有很高的精度。

收稿日期: 2003-06-16, 修订日期: 2004-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(40071063)资助项目; 985工程"GIS遥感的地质应用科技创新平台(105203200400006)资助项目。

作者简介: 丁晓英(1977—),女,硕士研究生,广东潮州人,从事河口环境遥感研究,发表论文4篇。

### 3 基于环境因素的叶绿素遥感探测模型

#### 3.1 浮游植物的影响因素

海水中的叶绿素是浮游植物吸收阳光能量,将二氧化碳和水进行光合作用的主要色素,因此叶绿素的含量是海水浮游植物生物量的指标。

海洋浮游植物的生长与多种海洋生态环境因素有关,最基本的因子包括光照、营养盐、水温、海流、盐度等。光能是浮游植物进行光合作用的首要条件,光照量的多寡直接影响着植物光合作用速率大小及其过程。水温直接影响叶绿素光合作用的速度,一般而言,水温高,光合作用强,水温低,光合作用弱。营养盐和二氧化碳直接参与光合作用,营养盐丰富则浮游植物充分利用光能形成较高的生产力,反之,营养盐欠缺则初级生产力偏低<sup>[3-6]</sup>。其它一些因子,如透明度、盐度、pH值及溶解氧也是影响海洋初级生产力大小的重要因素。因此,各环境因子可作为海洋初级生产力的间接指标,是研究海洋叶绿素需要考虑的重要因素。

陆地遥感的经验表明:引入适当的空间形态数据及其它辅助数据,可使目标物的提取精度提高10%—20%<sup>[7]</sup>。

基于以上考虑,笔者提出将环境因子引入叶绿素遥感探测模型,建立新的沿岸水体叶绿素遥感信

息提取模型,以期改善模型精度。

#### 3.2 基于环境因素的叶绿素遥感探测模型的建立

##### 3.2.1 建模数据的获取

表层海水叶绿素浓度数据以及各环境因子数据,采用香港科技大学提供的1999年7月珠江口海域巡测数据。共获站点数据27个,其中18个用于建模,9个用于模型验证。

卫星影像数据:由于天气原因,无法找到与实测数据同步清晰的SeaWiFS卫星影像数据。根据所获取实测数据时的水动力条件,选取了与当时实测水动力条件最接近的1999-08-17的卫星影像,以此代表在实测时段珠江水体所反映的光谱特性。

##### 3.2.2 影响叶绿素生长的主要环境因子

由于不同的海域受径流、地形、周边环境等的影响,各因子所起的作用并不相同,因此,需根据当地实际情况寻找影响该区域浮游植物(叶绿素)的主要环境因子。

从所获的珠江口海域资料中加以整理,得到 $\text{NO}_3$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{PO}_4$ 、 $\text{SiO}_4$ 、COD、DO、盐度(Sal)、温度(TEMP)等9个环境因子的资料。为了找出与叶绿素浓度分布有密切关系的环境因素,笔者采用皮尔逊(Pearson)公式,对上述9个环境因子和叶绿素浓度之间的关系进行相关分析。分析结果见表1。

表1 珠江口域海洋叶绿素与各环境因子相关系数表

Table 1 The correlation coefficient of chlorophyll and environment factors in Pearl River estuary

	Chl. a	$\text{NO}_3$	$\text{NO}_2$	$\text{NH}_3$	$\text{PO}_4$	$\text{SiO}_4$	COD	DO	TEMP	Sal
Chl. a Pearson Correlation	1.000	-0.759 **	0.277	-0.207	-0.589 **	-0.233	-0.415	0.817 **	-0.366	0.680 **
Sig.	0.00	0.000	0.237	0.381	0.006	0.324	0.069	0.000	0.113	0.001

注:表中 Pearson Correlation——为 Pearson 相关系数; Sig.——为显著性水平; Chl. a——表叶绿素 a; \*\*——表显著水平为 0.01 的。

从表1可知,与叶绿素的相关系数最大的环境因子为:硝酸盐( $\text{NO}_3$ )、磷酸盐( $\text{PO}_4$ )、溶解氧(DO)、盐度(Sal),相关系数分别为-0.759, -0.589, 0.817, 0.680。即在珠江口海域,环境因子硝酸盐、磷酸盐、溶解氧和盐度与海洋叶绿素分布密切相关。为此,选用 $\text{NO}_3$ 、 $\text{PO}_4$ 、DO、Sal 4个环境因子参与叶绿素遥感信息提取模型的建模研究。

##### 3.2.3 叶绿素遥感参数的选取

由叶绿素的光谱原理知道,对叶绿素最为敏感的波长为440nm、550nm、685nm。但在近岸水体中,对离水辐射有贡献的水色因子除了叶绿素外,还有黄色物质、悬浮泥沙等。选择叶绿素遥感参

数时,应考虑黄色物质和泥沙的影响,选择受它们干扰小的波段。研究表明,黄色物质的吸收光谱曲线随波长的增加而呈近指数减少,在黄色波段吸收最小;悬浮泥沙的后向散射较强,随泥沙含量的增加,光谱反射比也增加,水体混浊度的灵敏波长是620nm<sup>[8]</sup>。基于以上考虑,本文从SeaWiFS卫星的谱段中选用670nm、555nm、510nm、490nm这4个波段,采用比值增强的方法,组成了11种波段比值组合,并对各比值组合和叶绿素浓度之间进行相关分析。分析结果表明,比值组合 $(L_{w555} \cdot L_{w670}) / (L_{w490} \cdot L_{w510})$ 与叶绿素浓度值之间具有较大的相关性,相关系数为0.743。因此,本文选用

$C_r = (L_{w555} \cdot L_{w670}) / (L_{w490} \cdot L_{w510})$  作为本次研究的叶绿素遥感系数。

### 3.2.4 叶绿素遥感定量模型

为了建立提取叶绿素信息的遥感模型, 首先需确定叶绿素遥感参数、环境因子、叶绿素浓度的最佳组合。由以上所选的叶绿素遥感参数( $C_r$ )和环境因子与叶绿素浓度值可进行多种组合。各模型组合列于表 2。分别以叶绿素浓度值、叶绿素浓度对数值作为因变量, 叶绿素遥感参数  $C_r$ 、环境因子作为自变量, 利用最小二乘法进行线性回归分析, 得到各模型相关系数表, 见表 2。

表 2 各模型组合相关系数结果表

Table 2 The correlation coefficient of model

组合号	组合	因变量	
		Chl.	lg( Chl. )
1	$C_r$	0.743	0.748
2	lg( $C_r$ )	0.639	0.642
3	$C_r$ - $PO_4$	0.774	0.714
4	lg( $C_r$ )- $PO_4$	0.708	0.662
5	$C_r$ - $NO_3$	0.863	0.808
6	lg( $C_r$ )- $NO_3$	0.845	0.801
7	$C_r$ -DO	0.911	0.840
8	lg( $C_r$ )-DO	0.904	0.840
9	$C_r$ -Sal	0.905	0.856
10	lg( $C_r$ )-Sal	0.883	0.847
11	$C_r$ - $PO_4$ - $NO_3$	0.887	0.874
12	lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$	0.873	0.871
13	$C_r$ - $PO_4$ -DO	0.912	0.842
14	lg( $C_r$ )- $PO_4$ -DO	0.905	0.841
15	$C_r$ -DO-Sal	0.931	0.869
16	lg( $C_r$ )-DO-Sal	0.923	0.868
17	$C_r$ -DO- $NO_3$	0.922	0.851
18	lg( $C_r$ )-DO- $NO_3$	0.918	0.853
19	$C_r$ - $PO_4$ - $NO_3$ -DO	0.929	0.892
20	lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$ -DO	0.925	0.893
21	$C_r$ - $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal	0.937	0.917
22	lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal	0.931	0.938
23	$C_r$ - $PO_4$ -DO-Sal	0.935	0.897
24	lg( $C_r$ )- $PO_4$ -DO-Sal	0.926	0.891
25	$C_r$ - $NO_3$ -DO-Sal	0.931	0.869
26	lg( $C_r$ )- $NO_3$ -DO-Sal	0.924	0.868

注: Chl. 表叶绿素浓度值( $\mu\text{g/L}$ ); lg( Chl. )表叶绿素浓度的对数值。

分析结果表明(1)当仅以叶绿素遥感参数  $C_r$ , 分别与叶绿素值、叶绿素的对数值进行模型拟合时, 相关系数最高为 0.743, 最低为 0.638。加入环境因子后, 模型的相关系数变高。其中相关系数最高的

为 0.937, 且大部分模型组合的相关系数均大于 0.8。环境因子的引入提高了模型的拟合度。(2)在所有组合中, 引入 DO, Sal,  $PO_4$ ,  $NO_3$  的组合的相关系数最高。为此, 选用引入 DO, Sal,  $PO_4$ ,  $NO_3$  的组合用于建模。由于引入 DO, Sal,  $PO_4$ ,  $NO_3$  4 个环境因子的组合有 4 组, 分别为( $C_r$ - $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal-Chl.) (  $C_r$ - $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal-lg( Chl. ) ), ( lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal-Chl. ) ( lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal-lg( Chl. ) )。这里选用相关系数最大的组合( lg( $C_r$ )- $PO_4$ - $NO_3$ -DO-Sal-lg( Chl. ) )作为提取叶绿素信息的最佳组合。同时, 为了便于对比, 选用了组合( $C_r$ -lg( Chl. ) )作为利用单光谱分析提取叶绿素信息的最佳组合。

根据所选组合, 以实测资料和遥感光谱资料, 用最小二乘法进行拟合, 得到了以下叶绿素信息提取模型。

(1) 仅用光谱数据建立的模型

$$C = 10^{(0.483 * C_r - 0.345)}$$

(2) 引入环境因子数据后的模型

$$C = 10^{(0.711 * \lg(C_r) + 0.565 * P - 0.0081 * N + 0.01846 * Sal + 0.08844 * DO - 0.0732)}$$

式中  $C$ ——表叶绿素浓度, 单位为  $\mu\text{g/L}$ ; DO——表溶解氧, Sal——表盐度,  $N$ ——表  $NO_3$ ,  $P$ ——表  $PO_4$ 。

### 3.3 SeaWiFS 资料的处理

SeaWiFS 资料的处理主要包括几何纠正和大气校正。几何纠正就是按照一定的地图投影规则对卫星图像的几何畸变进行纠正处理, 使之能与地图匹配, 并符合人们的读图习惯。大气校正是去除大气辐射的干扰, 获得准确的海面离水辐射率。由于海水的光谱信号很弱, 在卫星传感器所接收到的辐射能量中, 大部分来自大气干扰, 来自海水的离水辐射仅占 3%—15%。因此, 对 SeaWiFS 资料的大气校正显得尤为重要, 是海洋水色遥感的关键。这里, 我们采用邻近水域“清水”法进行大气校正处理<sup>[9]</sup>。

### 3.4 海洋叶绿素信息的提取和精度验证

叶绿素遥感探测模型的计算需要相关的环境因子数据(DO, Sal,  $PO_4$ ,  $NO_3$ )。由于在实际应用中无法获取大面积的该实测环境因子数据, 而目前遥感技术尚无法直接探测海水中的各主要环境因子含量, 因此, 如何在模型中引入该环境因子数据(DO, Sal,  $PO_4$ ,  $NO_3$ )是模型应用需先解决的首要问题。

这里, 笔者改进珠江口水域生态模型计算所得的各环境要素数据作为模型中环境因子的数据, 参与模型的运算。该生态模型由“广东省百项工

程——珠江口水环境模型”课题组林卫强等提供, 该生态模型经验证具有较高的模拟精度, 能够用于研究珠江口水环境状况<sup>[10]</sup>。

在此基础上, 利用本文的基于环境因素的叶绿素遥感模型对珠江口进行了提取海水叶绿素信息的

计算。

为了检验模型的提取精度, 我们取 9 个验证样点的实测叶绿素浓度值与根据模型所提取的叶绿素值进行比较, 见表 3。

表 3 遥感模型估算值与实测叶绿素浓度值对比

Table 3 The comparison of estimated and measured chlorophyll concentration

样点号	实测值/( $\mu\text{g/L}$ )	Model-1 计算值/( $\mu\text{g/L}$ )	相对误差/%	Model-2 计算值/( $\mu\text{g/L}$ )	相对误差/%
1	2.00	3.77	88.54	1.80	-9.78
2	1.80	2.45	36.11	1.71	-4.91
3	2.00	1.79	-10.75	1.32	-34.21
4	2.40	2.42	0.73	2.20	-8.44
5	1.10	1.74	58.53	1.26	14.63
6	2.20	1.53	-30.58	1.48	-32.67
7	2.80	1.50	-46.36	3.26	16.30
8	1.80	1.91	6.06	2.01	11.91
9	7.90	6.74	-14.68	5.62	-28.83

由表 3 可看出, 引入环境因子的模型( Model-2 )其估算结果要比纯光谱模型( Model-1 )更接近于实测的叶绿素浓度值, 引入环境因子和模型( Model-2 )估算的最大相对误差为 32.67%, 平均相对误差为 17.96%。而用纯光谱模型( Model-1 )估算的最大相对误差为 88.54%, 平均相对误差为 32.48%。这说明在针对二类水体的叶绿素浓度遥感估算模型中, 引入与叶绿素分布密切相关的环境因子有助于改善模型精度。

利用引入环境因子的模型对 SeaWiFS 资料进行信息提取获得了珠江口海域叶绿素浓度分布图( 图 1 )。将遥感探测的叶绿素浓度分布图与香港科技大学在同期海上巡测获得的叶绿素浓度分布图( 图

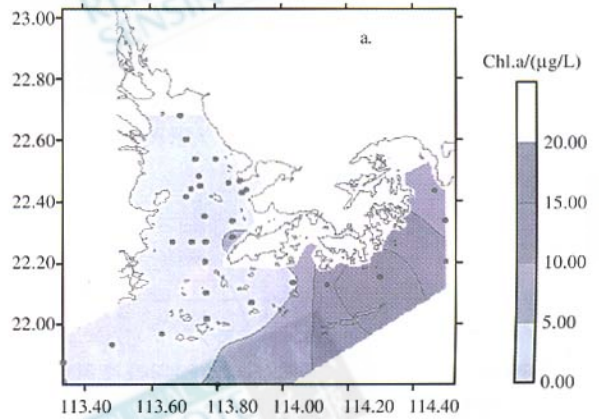


图 2 珠江口海域实测的叶绿素分布图

Fig.2 The distribution map of sea truth chlorophyll concentration in the Pearl River estuary measured

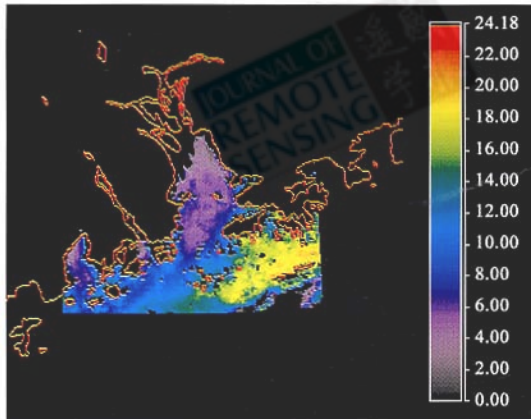


图 1 用 SeaWiFS 提取的叶绿素分布图

Fig.1 The distribution map of retrieved chlorophyll Concentration in the Pearl River estuary from SeaWiFS data

2)比较, 二者分布特征比较吻合, 在口门附近水域和伶仃洋水域叶绿素浓度较低, 为叶绿素低值区; 在大濠岛—香港岛南面、大濠岛—万山列岛连线的东部和担杆列岛北面的水域, 形成叶绿素的高值区。

## 4 结 论

本次研究建立的基于环境因素的叶绿素探测模型, 在对珠江口叶绿素信息的提取中取得了较理想的效果, 模型估算的平均相对误差为 17.96%。该精度明显高于利用纯光谱分析法建立模型的精度, 纯光谱数据遥感探测模型的平均相对误差为

32.48%。证明了环境因子的引入可改善模型精度 15% 左右,与陆地遥感的经验吻合,即:引入适当的空间形态数据及其它辅助数据,可使目标物的提取精度提高 10%—20%<sup>[7]</sup>。

利用基于环境因素建立的叶绿素遥感模型所获取的叶绿素浓度分布特征与同期的实测资料比较吻合,表明了基于环境因素建立叶绿素遥感探测模型的可行性。随着高光谱遥感(如 MODIS)在海洋领域的应用研究深入展开,本模型中所需的环境因素亦有可能通过遥感的方式获取,因此,直接通过遥感的方式建立也是有可能的。

由于叶绿素分布的区域性和季节性,决定了沿岸水体叶绿素的浓度分布必然是随区域和时间的不同而有所不同。本文提出的估算模型由于只是针对珠江口沿岸水体建立的,因此,简单地将本模型应用于其它河口海域不一定可靠。

在本次研究中,所采用的大气校正算法并不能解决薄云的干扰问题,表现为图 1 中珠江口门附近海域为一片黑色区域(0 值);而笔者在建模过程中对叶绿素遥感参数及各环境因子对叶绿素浓度影响的敏感度考虑尚不充分,这将在今后的研究中进一步探讨解决。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Li G S, Shao Y B. Remote Sensing of Oceanic Primary Productivity and Its GIS Estimation Model[ J ]. *Journal of Acta Geographica Sinica*, 1998, **56**( 6 ):546—552. [ 李国胜,邵宇宾. 海洋初级生产力遥感与 GIS 评估模型研究[ J ]. 地理学报, 1998, **53**( 6 ) 546—552. ]
- [ 2 ] Chen X X, Li T F, Ying D G. An Approach to Improve Primary Productivity Remote Sensing Surveys of Bays[ J ]. *Journal of Tropic Oceanology*, 1995, **14**( 4 ) 32—36. [ 陈晓翔,李铁芳,英登耿. 改善港湾初级生产力遥感探测方法的探讨[ J ]. 热带海洋, 1995, **14**( 4 ) 32—36. ]
- [ 3 ] Wang Z S. Nutrients and Its Effects on Phytoplankton in Sea Water[ J ]. *Journal of Yancheng Institute of Technology*, 2001, **14**( 2 ):40—49. [ 王资生. 海水营养盐及其对浮游植物的影响[ J ]. 盐城工学院学报, 2001, **14**( 2 ) 40—49. ]
- [ 4 ] Wang X L, Zhang L, Han X R, et al. Effect of Nutrient on Marine Phytoplankton Growth: Study on Mathematic Model[ J ]. *Journal of Advances in Marine Science*, 2002, **20**( 3 ) 96—101. [ 王修林,张蕾,韩秀荣等. 营养盐对海洋浮游植物生长的影响——数学模型研究[ J ]. 海洋科学进展, 2002, **20**( 3 ) 96—101. ]
- [ 5 ] Cui Y, Chen B J, Ma S S. Correlation of Phytoplankton and its Environmental Factors in Rushan Bay[ J ]. *Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**( 6 ) 935—938. [ 崔毅,陈碧鹃,马绍赛. 乳山湾浮游植物与环境因子的相关关系研究[ J ]. 应用生态学报, 2000, **11**( 6 ) 935—938. ]
- [ 6 ] Luo D L. Study on the Distribution of Dissolved Oxygen in Shenhu Bay and Its Relationship with Phytoplankton and Suspended Matter[ J ]. *Journal of Marine Science Bulletin*, 2002, **21**( 1 ) 31—36. [ 罗冬莲. 深沪湾溶解氧的分布及其与浮游植物悬浮物的相关性研究[ J ]. 海洋通报, 2002, **21**( 1 ) 31—36. ]
- [ 7 ] Yan S Y, Zheng L Z, Wu G X, et al. The Study on Remote Sensing Technical System In China[ M ]. Beijing: The Chinese Science Technology Publishing House, 1990. [ 阎守邕,郑立中,武国祥等. 中国遥感技术系统的软科学研究[ M ]. 北京:中国科学技术出版社, 1990. ]
- [ 8 ] International Ocean Color Coordinating Group. Status and Plans for Satellite Ocean-Colour Missions: Considerations for Complementary Missions[ R ]. IOCCG Project Office, Report No. 2, 1999.
- [ 9 ] Ding X Y, Chen X X. The Improvement of the SeaDAS Atmospheric Correction Algorithm[ A ]. The Papers of The Fifth Guangdong Conference on RS&GIS, 2002. [ 丁晓英,陈晓翔. 对 SeaDAS 大气校正算法的改进[ A ]. 第五届广东省遥感与地理信息系统年会论文集, 2002. ]
- [ 10 ] Lin W Q. Three Dimensional Water Environmental Mathematic Model Development & The Application In the Pearl River Estuary [ D ]. 2002. [ 林卫强. 三维水体环境数学模型的开发及其在珠江口的应用[ D ]. 中山大学博士学位论文, 2003. ]

## The Study of Chlorophyll Detection in Coastal Waters Based on Environmental Factors

DING Xiao-ying , CHEN Xiao-xiang

( Remote Sensing Center , Zhongshan University , Guangzhou 510275 , China )

**Abstract :** The investigation on ocean chlorophyll always is an emphasis of the study in ocean biological resource and marine ecology. And the remote sensing technology is a powerful tool in chlorophyll detection. Up to now , there has been considerable success in optical remote sensing of chlorophyll in ocase waters. In contrast , chlorophyll retrieval in coastal waters , where the optical properties of inorganic suspended matter and colored dissolved organic matter ( CDOM ) must also be considered , is still a matter of intense research activity. From the analysis of the living environment of chlorophyll , a new thought that the estimation of chlorophyll concentration using remote sensing based on environment factors , is proposed. The authors chose Pearl River as test area and created a new model of estimation of chlorophyll concentration based on environment factors. Finally , through analyzing the operational precision of the new model , the average relative error of the model based on environment factors is 17.96% , and the common spectral mode is 32.48% . It is proven that joining environment factors in chlorophyll retrieval algorithm can improve the precision of chlorophyll.

**Key words :** remote sensing ; chlorophyll ; environment factors ; coastal water