

学校编码: 10384

密级_____

学号: 22620061152364

廈門大學

硕士学位论文

不同水体近红外反射峰与叶绿素 a 含量的
关系研究

On the relationship between the NIR peak of the Reflectance Spectrum and
Concentrations of Chlorophyll a in Various Waters

杨 敏

指导教师姓名: 商少凌 教授

专业名称: 环境科学

论文提交日期: 2009 年 07 月

论文答辩时间: 2009 年 07 月

2009 年 09 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

水色遥感是大尺度连续实时探测叶绿素 a 浓度的重要技术手段,然而对于发生水华/赤潮、叶绿素 a 极高的水体,传统的蓝绿波段反演算法往往不能奏效,人们为此发展了荧光高度 (FLH) 法,试图利用阳光激发的浮游植物荧光发射信号实现叶绿素 a 的精确反演。近来的研究表明当叶绿素 a 含量达到一定程度或者是出现类似陆生植被的特征时,荧光峰被掩盖,出现向长波方向移动的红边峰,无论何者,本研究统称为近红外反射峰(简便起见以下称红峰)。该峰与叶绿素之间的关系是否存在着一定的变化规律,尚不清楚,澄清这一问题,是有效利用 FLH 法的基本保障。为此,本研究选取淡水水体(厦门大学芙蓉湖、水库)、半咸水水体(筲箕湖)、赤潮/水华水体(包括两次连江赤潮追踪事件、2004-2005 年厦门西海域水华事件),分别调查研究不同水体红峰和叶绿素 a 的变化特征以及二者的关系。

2007 年 8 月-2008 年 9 月,两个淡水池(芙蓉湖、水库)在叶绿素浓度 $6\sim 322\text{ mg/m}^3$ 的范围, R_{rs} 光谱出现显著的红峰,中心位置在 $700\sim 715\text{ nm}$ 之间,较之通常的荧光峰中心(683 nm)向长波方向偏离。该峰在厦大水库始终出现在 700 nm ,但在芙蓉湖存在时间变化,随着叶绿素浓度的增加,由 705 nm 红移到 715 nm 。由此仿 MODIS 荧光高度 (FLH) 的定义,定义该峰的高度(简称为 REH),对于水库和芙蓉湖中心波段分别确定为 700 和 710 nm 。REH 与叶绿素浓度呈现显著对数相关, R^2 达 0.79 ,水库为线性相关, R^2 为 0.74 。可见对于高散射的淡水藻华水体,可以并且需要通过改进 FLH 的波段选择,基于更长波段处的红峰的高度探测叶绿素浓度。

2008 年 11 月-12 月调查期间,筲箕湖叶绿素 a 浓度变化范围为 $0.31\sim 2.06\text{ mg/m}^3$ 。CDOM 吸收 $a_g(355)$ 变化范围为 $0.63\sim 2.14\text{ m}^{-1}$,其和叶绿素 a 浓度之间无相关性。利用 MODIS FLH 的三个波段(665.1 nm , 676.7 nm , 746.3 nm)得到 FLH 和叶绿素 a 浓度之间无相关性,即使将有泥沙影响的 645 nm 波段进行校正,得到的 CFLH 和叶绿素 a 浓度仅仅呈现微弱的相关性,说明对于受泥沙和底质影响或是比较浅的水体,FLH 法可能是无效的。

2003 年 6 月、2008 年 5 月爆发的两次赤潮追踪调查表明,叶绿素 a 浓度变

化范围为 1~132 mg/m³。对于前者, 红峰中心在 689 nm 左右, 后者在 704 nm 左右, 分别计算峰高, 其与叶绿素 a 浓度之间呈现显著相关 ($R^2 > 0.8$)。厦门西海域爆发的水华事件中, 2004 年 5-6 月叶绿素 a 浓度变化范围为 3.34~35.23 mg/m³, 2005 年 6 月在 10.35~62.84 mg/m³ 之间; 红峰中心 690 nm 左右, 峰高与叶绿素 a 浓度呈现线性相关 (R^2 为 0.50)。

此外, 对芙蓉湖和水库的研究表明, 红峰及叶绿素 a 浓度存在时间变化。季节尺度上, 芙蓉湖叶绿素 a 浓度冬春季高 (最高可达 322 mg/m³)、夏秋季较低, 红峰 R_{rs} 值在 0.0065~0.016 sr⁻¹ 之间, 与叶绿素 a 浓度变化一致, 基本呈现冬春季高、夏秋季低的规律, 中心波段位置则在不同季节随着叶绿素 a 浓度增加从 705 nm 向长波 715 nm 偏移; 水库叶绿素 a 浓度全年变化小, 在 22~40 mg/m³ 之间; 红峰位置大多数时间均稳定在 700 nm 处, 峰高 R_{rs} 值则在 0.0027~0.0091 sr⁻¹ 之间变动, 除 2008 春季高度上升至 0.006 sr⁻¹ 以上, 其他三个季节均小于 0.0045 sr⁻¹。日变化尺度上, 仅有两天的数据, 从有限的数据看, 尚无定规可循。

总之, 对于本研究涉及的各种类型沿岸/内陆水体, 多数情况下, 目前的 MODIS 荧光高度产品不可能奏效, 红峰的波段偏离 676.7 nm, 需要调整到 700 nm 波段左右, 甚至更趋红外的波段, 方可实现赤潮/水华的有效探测。诚然, 本研究采集的数据有限, 更多的研究将是必要的。

关键词: 叶绿素 a 浓度; 近红外反射峰; 遥感反射率; 荧光高度 (FLH); 红边高度 (REH); 有色溶解有机物质

Abstract

Pioneering studies showed a linear correlation between chlorophyll-a concentration (Chl) and natural fluorescence. FLH (fluorescence line height) was thus designed to measure the solar-stimulated fluorescence of phytoplankton and then to retrieve Chl. However, while the current MODIS bands used to estimate FLH were 665.1 nm, 676.7 nm and 746.3 nm, more and more investigations revealed that when Chl was high reflection peaks centered around 700 nm, rather than the normal Chl fluorescence peak of 683 nm, occurred. This presented challenges to the application of FLH in monitoring harmful algae blooms (HAB).

In order to get a better understand of the red-shifted reflection peaks and their correlation with Chl, remote sensing reflectance (R_{rs}) and concurrent chlorophyll-a (Chl) concentration were measured for various waters.

For Furong pool and Xiamen University reservoir, during most of the time (for Chl ranging between 6 to 322 mg/m^3), the measured R_{rs} spectra showed a prominent secondary peak in the far-red region of the spectrum. This was not from fluorescence alone, but appeared to be caused by the so-called red edge. Following the estimation of MODIS FLH, we defined a red edge height (REH). It was found that REH was highly correlated with Chl. In the Furong pool, $\text{REH}=0.0016\lg(\text{chl})-7.8\times 10^{-6}$ ($R^2=0.79$, $n=41$), and in the XMU reservoir, $\text{REH}=0.0001\text{chl}+0.0002$ ($R^2=0.74$, $n=32$).

For two HAB events occurred in Huangqi bay, Fujian, red peak bands were in 689 nm~704 nm. Again REH showed a correlation with Chl (Chl ranged 1~132 mg/m^3 , $R^2=0.8$). However, for blooms occurred in Xiamen Bay, Fujian, red peaks occurred around 690 nm for Chl ranged between 3 and 63 mg/m^3 . A linear correlation between FLH and Chl showed but not as significant as that in Huangqi Bay ($R^2=0.50$).

For Yundang lagoon in Xiamen, it appeared that FLH was not well correlated with Chl. This might be resulted from the influence of bottom reflection.

Our results suggested that the red edge might provide a good tool for research and managers to study and monitor algal blooms in waters where there were dense suspensions of algal cells. The current FLH products might be hard to be directly used for bloom monitoring. However, more intensive studies are required.

Keywords : Fluorescence line height; red edge; Chlorophyll; remote sensing reflectance; inland waters; bloom

厦门大学博硕士论文摘要库

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 前言	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 蓝绿比值法.....	3
1.2.2 叶绿素 a 荧光遥感算法.....	5
1.3 研究中存在的问题	7
1.4 研究目标与内容	7
第二章 数据与测定方法	9
2.1 遥感反射率的观测	9
2.2 叶绿素 a 的测定	11
2.3 CDOM 吸收系数的测定.....	11
第三章 厦门两淡水水库水体结果	13
3.1 研究区域概况	13
3.2 采样与方法	14
3.3 结果与讨论	15
3.3.1 水体性质.....	15
3.3.2 两个淡水水体遥感反射率 R_{rs} 特征	18
3.4 红边高度 (REH) 的定义.....	19
3.5 两淡水池红边高度和叶绿素 a 浓度之间的相关性	20
3.6 两水库不同季节近红外峰和叶绿素 a 变化特征	23
3.6.1 芙蓉湖不同季节叶绿素 a 浓度、近红外峰的变化特征.....	23
3.6.2 水库不同季节叶绿素 a、近红外峰的变化特征.....	25
3.7 两水库近红外峰和叶绿素 a 浓度日变化特征	26
3.7.1 芙蓉湖日变化特征.....	26

3.7.2 水库日变化特征.....	28
3.8 小结	31
第四章 半咸水水体—筲箕湖（纳潮泻湖）结果	33
4.1 筲箕湖简介	33
4.2 采样与方法	34
4.3 筲箕湖水体光谱变化特征	35
4.4 筲箕湖叶绿素 a 浓度以及 CDOM 吸收变化特征.....	36
4.5 筲箕湖叶绿素 a 浓度与 FLH 的相关性	38
4.6 总结.....	41
第五章 近海赤潮/水华-福建连江黄岐与厦门西海域结果	42
5.1 引言.....	42
5.2 采样与方法	44
5.3 黄岐赤潮	47
5.3.1 2003 年 6 月黄岐赤潮.....	47
5.3.2 2008 年 5 月赤潮追踪观测.....	50
5.3.3 讨论.....	56
5.4 厦门西海域水华	59
5.4.1 水华事件的基本状况（2004-2005 年）	59
5.4.2 两次水华的遥感反射率 R_{rs} 特征变化	61
5.4.3 两次水华的荧光高度与叶绿素 a 浓度相关性.....	62
5.5 总结.....	64
第六章 总结与展望	65
6.1 论文主要成果	65
6.2 存在问题和今后的发展方向	68
参考文献.....	69
三年来发表及完成的论文	77
致谢.....	78

Contents

Chapter 1 Research Significance.....	1
1.1 International Overview of Researches	1
1.2 Overview of Studies on Chlorophyll Algorithms	3
1.2.1 Blue/Green ratio Algorithms.....	3
1.2.2 Chlorophyll Fluorescence Algorithms of Remote Sensing	5
1.3 Proposed Study.....	7
1.4 Research Object and Content	7
Chapter 2 Methodology and Calculation Methods	9
2.1 Measurement of Reflectance of Remote Sensing R_{rs}	9
2.2 Measurement of Chlorophyll-a Concentration	11
2.3 Measurement of Absorption Coefficients of CDOM	11
Chapter 3 The Result of Two Fresh Reservoir Water	13
3.1 Background of Furong Pool and the XMU Reservoir.....	13
3.2 Sampling and Methods	14
3.3 Results and Discussions	15
3.3.1 Property of water bodies	15
3.3.2 Characteristics of R_{rs} in Furong Pool and the XMU Reservoir	18
3.4 Definition of Red Edge Height(REH).....	19
3.5 Relationship of Chlorophyll-a Concentration With REH in Furong Pool and the XMU Reservoir.....	20
3.6 Seasonal Changes of Chlorophyll-a Concentration and NIR peak in Two Reservoir	23
3.6.1 Variation of Chlorophyll-a Concentration and Near Infrad Peak in Furong Pool.....	23
3.6.2 Variation of Chlorophyll-a Concentration and Near Infrad Peak in the XMU Reservoir.....	25
3.7 Diurnal Changes of Chlorophyll-a Concentration and NIR peak in Two	

Reservoir	26
3.7.1 Diurnal Changes in Furong Pool.....	26
3.7.2 Diurnal Changes in the XMU Reservoir.....	28
3.8 Summary.....	31
Chapter 4 The Result of Half Salty Water-YunDang Lagoon	33
4.1 Background of YunDang Lagoon.....	33
4.2 Sampling and Methods	34
4.3 Variation Characteristics of Spectrum in YunDang Lagoon	35
4.4 Variation Characteristics of Chlorophyll-a Concentration and CDOM in YunDang Lagoon	36
4.5 Relationship of Chlorophyll-a Concentration With FLH in YunDang Lagoon.....	38
4.6 Summary.....	41
Chapter 5 The Result of Red Tide/Bloom Water of Offshore.....	42
5.1 Introduction.....	42
5.2 Sampling and Methods	44
5.3 Red Tide in Huangqi Bey	47
5.3.1 Red Tide of Huangqi in June, 2003	47
5.3.2 Tracing Observation of Red Tide in May, 2008.....	50
5.3.3 Discussion	56
5.4 Bloom in the Western Xiamen Bay	59
5.4.1 Background(2004-2005).....	59
5.4.2 Characteristics of Rrs in Two Year.....	61
5.4.3 Relationship of Chlorophyll-a Concentration With FLH in Two Year ...	62
5.5 Summary.....	63
Chapter 6 Concluding Remarks.....	65
6.1 Summary.....	65
6.2 Questions to be Addressed in the Future.....	68

References	69
Publications	77
Acknowledgement	78

厦门大学博硕士论文摘要库

第一章 前言

摘要 本章重点介绍叶绿素遥感的研究意义及国内外叶绿素经验遥感算法的研究现状和存在问题，提出本论文的设想。

1.1 研究意义

叶绿素a是浮游植物的主要色素，在光合作用中发挥着重要的生理功能。虽然叶绿素的种类不同，但浮游藻类中都含有叶绿素a。因此，叶绿素a含量的高低与该水体中藻类的种类、数量等密切相关，是浮游植物现存量的重要指标（尹球等，2004；段洪涛等，2005）。叶绿素a浓度及其时空变化反映了水体中浮游植物的丰度及其生物量的变化规律，同时也反映了该水域水体生态环境的变化规律，对叶绿素a浓度时空分布进行研究，能够更好地了解水体生态环境的时空变化特征。

同时，叶绿素a浓度是评价水质和有机污染以及衡量水体营养状态评价和富营养化评价的重要参数，其含量大小在一定程度上反映了水体富营养化的程度（李云梅等，2006）。当水体发生营养化且其他条件适宜时，浮游植物发生爆发性增殖，表现出很高的叶绿素a浓度。另一方面，赤潮爆发时，浮游植物的大量繁殖，会消耗水体中的溶解氧，不仅造成鱼贝大量死亡，有些有毒藻类还会对人类健康存在潜在威胁。这不仅给水产养殖业、滨海旅游业等造成巨大经济损失，而且还会对水体环境造成极大破坏。因此，赤潮的监测和治理愈来愈受到重视。叶绿素a值作为判断赤潮发生的主要参数（Hu et al., 2005），对叶绿素a的研究，对赤潮监测有极其重要的作用。

此外，叶绿素a浓度也是估算初级生产力的基本参数，尤其是海洋初级生产力的研究，这有助于了解碳的生物地球化学循环，从而对了解全球的碳循环以及气候变化，对水体生态、全球碳循环研究有重要意义。

综上所述，叶绿素a浓度是一个至关重要的水质参数。因此人们关心如何快速、连续、准确获取这个参数。常规的叶绿素a监测方法是通过采集水样实验室进行分析，得到采样点的叶绿素a浓度，用采样点的叶绿素a浓度代替附近水域叶绿素a浓度或采用地学统计学的方法分析其时空分布（赵辉等，2006；刘瑞民等，

2001)。这种研究方法主要分为两种方式，一种是在预设的水域内布点或者布剖面进行长年累月的观测、分析水样；另一种则通过船只的走航取样调查、分析。这两种方法虽然能够对水质参数做出精确的分析和评价，但是费时、费力，而采集的数据量非常有限，成本高，速度慢。对于实时、大范围、大尺度的周期性观测，尤其是全球尺度的研究，难于依靠传统的人工采样测定方法实现。

而水色遥感技术的出现，在全球多年长时间序列水体叶绿素a数据采集、大范围水体信息监测（尤其是海洋）等方面，开始发挥常规调查方法难以替代的优势（丛丕福等，2006）。利用卫星遥感信息进行大范围内水体浮游植物空间分布及动态的定量分析，除了能够在一定程度上弥补水面采样观测时空间隔大且费时费力的缺陷，还能发现一些常规方法难以揭示的污染物排放源、迁移扩散方向、影响范围以及与清洁水混合稀释的特征，有利于查明污染物的来源，也可为布设地面监测点提供科学依据。与常规方法相比，遥感方法具有不可替代的优越性。卫星遥感还以其特有的周期性优势成为在区域乃至全球尺度上持久监测海洋现象的有效手段（焦红波，2006）。

水色遥感技术的原理是通过卫星传感器接收的离水辐射信号来反演获得水体中影响光学性质的组分浓度，进而探测到海洋上层物质成分组成。国内外学者建立了一系列的叶绿素a反演模型和算法，并在不同水域研究中取得了一定的成功(O'Reilly et al., 1998, 2004; Esaias et al., 1998; Carder et al., 1999, 2004; Lee et al., 1998; Ruddick et al., 2001; 唐军武, 田国良, 1997; 詹海刚等, 2000; 曹文熙等, 1999)。然而，由于悬浮物和黄色物质的干扰，尤其是在水色性质复杂的近岸混浊浅水中，叶绿素a的反演仍然存在着很大的问题（IOCCG, 2000; 赵冬至等, 2004）。在各种算法中，尽管半分析算法以辐射传输理论为基础，物理意义明确，但其主要优势在固有光学特性的反演（Lee et al., 2005）。而经验算法简单易行，目前全球业务化的算法就是一种经验算法（详见下）。广泛、深入研究离水辐射信号的特征与叶绿素a浓度变化之间的关系，才有可能发展、提高经验法反演精度。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 蓝绿比值法

经验算法是以实测数据为基础,通过研究水体表观光学量和叶绿素a浓度之间的经验关系,即通过测量水体表面的光谱辐射特征和水体中叶绿素a浓度而建立的算法。经验算法典型模型是基于波段比值的算法,而其中以“蓝绿波段组合比值法”为基础的经验算法反演精度较高,已成为业务化应用的主要算法(O'Reilly et al., 1998; 黄海清, 2004)。

蓝绿比值算法主要是利用水体反射率光谱峰值随着叶绿素a浓度的增大从蓝波段偏移的机理而采用蓝绿波段的比值进行相关分析(Clarke et al., 1970; Gordon et al., 1980)。实践证明,此方法对一类水体是有效的。因为大洋水体的光学特性主要由浮游植物及其伴生物决定,其水体反射光谱分为受弹性散射效应显著影响的蓝光波段和受非弹性过程影响的红光波段,叶绿素a对蓝光波段400~480 nm有吸收效应,其反射率随着叶绿素a浓度的增加而下降;叶绿素a在绿光波段又有散射效应,一般在550 nm附近出现波峰,这一波峰随着叶绿素a浓度的增加而升高;在波长520 nm处光谱值出现“节点”,即该处的反射率不随叶绿素a浓度的含量而变化;通常用其光谱“节点”两侧的波段构成的比值波段组合来反演叶绿素a浓度,以提高估算精度(Aiken et al., 1995; Joint & Groom, 2000)。此外,辐射亮度值直接受制于散射系数和后向散射系数,对于一定的叶绿素a浓度而言,这些量的变化可达到2倍或以上,而光谱比值法可以避开这个影响。另外,比值法可明显减少海洋反射二向性的影响。因此,采用蓝绿比值法可以有效的提取叶绿素a信息。

目前,蓝绿算法有SeaWiFS模型、OCTS模型、Calcofi模型和Morel模型等(毛志华, 2005),其基本关系式为:

$$Chla = A \left[\frac{L_{wn}(\lambda_1)}{L_{wn}(\lambda_2)} \right]^B \quad (1)$$

式中 L_{wn} 是表面离水辐亮度, A和B是经验常数, λ_1 和 λ_2 是不同波段的波长。

NASA利用多年收集的海洋数据,对蓝绿波段比值法进行了比较验证。以下表1是全球尺度上卫星数据MODIS和SeaWiFS的比较(McClain et al., 2000; Bailey,

2006)。从表中也可看出，蓝绿比值法对于全球大洋水体的叶绿素a浓度的反演是成功的。

表1 全球尺度上MODIS和SeaWiFS的验证结果比较

Table 1 Comparison of validation results of MODIS and SeaWiFS
on global scale

传感器	N	r^2	Bias	rms+	实测值范围	卫星反演值范围
MODIS	263	0.780	0.084	0.644	0.039-29.004	0.030-37.837
SeaWiFS	1293	0.796	-0.006	0.657	0.024-32.181	0.030-33.621

(引自丛丕福, 2006)

然而，对于与人类关系最密切、受人类活动影响也较为强烈的近岸、河口等二类水体，由于其受陆源物质排放影响较为严重，水体性质较为复杂。相比一类水体，二类水体中的悬浮泥沙和黄色物质（Colored Dissolved Organic Matter, CDOM）大大增多，而悬浮泥沙的后向散射和黄色物质的强烈吸收直接影响了海水的光学性质，导致反演水色信息的工作变得十分复杂，使蓝绿比值法不再完全适用。加之近岸水体叶绿素浓度较高，经常出现富营养化甚至发生赤潮。在叶绿素浓度极高的海域，蓝光信号降到了探测极限以下，使蓝绿比值法几乎不可用（IOCCG, 2000; 邢小罡等, 2007）。Darecki & Stramski等（2004）在波罗地海的河口区研究发现，叶绿素浓度范围在 $0.3\sim 100\text{ mg/m}^3$ ，用MODIS和SeaWiFS的各种波段比值法反演得到的叶绿素浓度值出现高估的情况，误差大于10倍以上，平均系统误差和随机误差达到150%，有的甚至超过200%。

而Hu等（2005）也利用MODIS OC3和SeaWiFS OC4算法对佛罗里达西南海岸的叶绿素a浓度值进行了计算，研究发现传统的蓝绿比值法在这一复杂水体中甚至不能反映叶绿素a浓度正确的时空分布形态，叶绿素a浓度值时而被高估（可达3-15倍之巨），时而被低估。对于复杂的二类水体和赤潮水体叶绿素a浓度的反演而言，必须寻找一种新的方法，而荧光遥感的出现，为解决这一难题带来了希望。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库