

学校编码: 10384
学号: 31120111151344

密级_____

廈門大學

硕士学位论文

南黄海光学特性研究

Optical properties in the southern Yellow Sea

吴弘

指导教师姓名: 王海黎 教授级高级工程师

专业名称: 海洋物理

论文提交日期: 2014年5月

论文答辩时间: 2014年5月

2014年5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

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.2 研究现状.....	2
1.3 研究目标及内容.....	4
1.3.1 研究目标.....	4
1.3.2 论文结构.....	5
第 2 章 数据与方法.....	6
2.1 研究区域背景.....	6
2.2 数据来源.....	7
2.3 海水固有光学特性数据及处理方法.....	9
2.3.1 吸收系数.....	10
2.3.2 体积散射函数与后向散射系数.....	11
2.3.3 Sigma 校正及海水散射温盐校正.....	13
2.4 海水表观光学特性数据及处理方法.....	15
2.4.1 离水辐亮度.....	16
2.4.2 遥感反射比.....	17
2.4.3 漫衰减系数.....	17
2.5 海水生物化学数据及处理方法.....	18
2.5.1 叶绿素 a 浓度.....	18
2.5.2 颗粒有机碳浓度.....	18
第 3 章 南黄海的固有及表观光学特性.....	19
3.1 南黄海的固有光学特性.....	19
3.1.1 后向散射系数.....	19
3.1.2 吸收系数.....	22
3.2 南黄海的表观光学特性.....	24

3.2.1 遥感反射比	24
3.2.2 漫衰减系数	25
3.3 固有与表观光学特性之间的关系	26
3.3.1 遥感反射比与吸收系数、后向散射系数之间的关系	26
3.3.2 漫衰减系数与遥感反射比之间的关系	28
3.3.3 漫衰减系数与吸收系数、后向散射系数之间的关系	29
第 4 章 南黄海光学特性的算法应用及其环境意义	33
4.1 叶绿素 a 浓度与光学特性的关系分析	33
4.1.1 浮游植物吸收光谱的生物光学模型	33
4.1.2 叶绿素 a 浓度的经验统计算法	35
4.2 POC 浓度与光学特性的关系分析	38
4.2.1 基于遥感反射比蓝绿波段比值的 POC 反演	38
4.2.2 基于遥感反射比单波段算法的 POC 反演	40
4.3 水文条件与光学特性的关系分析	41
4.3.1 南黄海温度分布	41
4.3.2 南黄海盐度分布	42
4.3.3 南黄海浊度分布	43
4.3.4 南黄海后向散射系数与水文条件关系分析	44
4.4 南黄海光学特性的区域化环境意义分析	47
第 5 章 总结与展望	50
5.1 论文小结	50
5.2 未来工作展望	51
参考文献	52
致谢	57

Contents

Abstract (in Chinese)	I
Abstract (in English)	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance of the researchs	1
1.2 Overview of the researchs	2
1.3 Target and contents of the researchs	4
1.3.1 Target of the researchs	4
1.3.2 Structure of thesis writing	5
Chapter 2 Data and Methods	6
2.1 Background of studied area	6
2.2 Data source	7
2.3 IOPs of seawater and data processing methods	9
2.3.1 Absorption coefficient	10
2.3.2 Volume scattering function and back scattering coefficient	11
2.3.3 Sigma correction and seawater thermohaline correction	13
2.4 AOPs of seawater and data processing methods	15
2.4.1 Water-leaving radiance	16
2.4.2 Remote-sensing reflectance	17
2.4.3 Diffuse attenuation coefficient	17
2.5 The biochemistry data of seawater and processing methods	18
2.5.1 Concentration of Chl-a	18
2.5.2 Concentration of POC	18
Chapter 3 IOPs and AOPs in the southern Yellow Sea	19
3.1 IOPs in the southern Yellow Sea	19
3.1.1 Back scattering coefficient	19
3.1.2 Absorption coefficient	22
3.2 AOPs in the southern Yellow Sea	24
3.2.1 Remote-sensing reflectance	24
3.2.2 Diffuse attenuation coefficient	25
3.3 Relationship between IOPs and AOPs	26
3.3.1 Relationship between remote-sensing reflectance and absorption	

coefficient, back scattering coefficient	26
3.3.2 Relationship between diffuse attenuation coefficient and remote-sensing reflectance	28
3.3.3 Relationship between diffuse attenuation coefficient and absorption coefficient, back scattering coefficient	29
Chapter 4 Application of algorithms of the optical properties in the southern Yellow Sea and the environment significance	33
4.1 Relationship between the concentration of Chl-a and optical properties.....	33
4.1.1 Photobiology model of phytoplankton absorption spectra	33
4.1.2 Empirical statistical algorithms of the concentration of Chl-a	35
4.2 Relationship between the concentration of POC and optical properties.....	38
4.2.1 Derive POC from the B-G band ratios of remote-sensing reflectance..	38
4.2.2 Derive POC from the single-wavelength algorithms of remote-sensing reflectance	40
4.3 Relationship between hydrologic condition and optical properties.....	41
4.3.1 Temperature distribution in the southern Yellow Sea.....	41
4.3.2 Salinity distribution in the southern Yellow Sea	42
4.3.3 Turbidity distribution in the southern Yellow Sea.....	43
4.3.4 Relationship between hydrologic condition and back scattering coefficient in the southern Yellow Sea	44
4.4 Environmental significance of the regionalization of optical properties in the southern Yellow Sea	47
Chapter 5 Conclusion and prospective	50
5.1 Conclusion.....	50
5.2 Prospective	51
References	52
Acknowledgement.....	57

摘要

光学技术在海洋科学应用中不断发展,中国海典型 II 类水体由于其水体浑浊与成分复杂性,成为海洋光学研究中的前沿和难点。论文以 2013 年夏季在南黄海现场测量的光学数据为基础,研究其固有及表观光学特性,探讨生物光学算法在南黄海对叶绿素 a、POC 浓度反演的可行性与适用性,以及南黄海光学特性的区域化环境意义。

首先,根据仪器特性和最新研究成果对航次采集的海洋固有及表观光学数据进行处理,包括:吸收系数(a-Sphere 仪器测量数据及样品定量滤膜技术 QFT);后向散射系数(HS-6 仪器测量数据的 Sigma 校正及海水散射温盐校正);离水辐亮度(C-OPS 仪器测量数据计算);遥感反射比(C-OPS 仪器测量数据计算);漫衰减系数(C-OPS 仪器测量数据计算推导)。以及海水生物化学数据处理,如叶绿素 a 浓度(荧光光度法)、POC 浓度(元素分析法)等。

在数据处理的基础上,找出南黄海海底再悬浮特征区域(123~125°E, 32~34°N),分析南黄海表层水清浊过渡情况(近岸到远岸),并推测长江口东海特征水团的入侵。对各光学量进行关系研究,发现遥感反射比 $R_{rs}(\lambda)$ 与吸收系数 a 、后向散射系数 b_b 分波段拟合效果较好,且绿光波段拟合相关系数最高。在漫衰减系数 $K_d 490$ 的算法上进行经验统计算法和半分析算法的分析对比,结果表明对于较清洁水体,经验统计算法反演性能较好,对于 $K_d 490$ 全范围, QAA 算法较为精准。

接着,在反演叶绿素 a 浓度的浮游植物吸收光谱生物光学模型中,发现 Bricaud 的 440 nm 波段和 Carder 的 675 nm 波段的算法高估了叶绿素 a 的浓度;经验统计算法方面,数据结果表明 OC4 算法不适用于南黄海水域,建立基于 Clark 模型的南黄海叶绿素 a 浓度与 MBR 的反演算法。基于遥感反射比蓝绿波段比值的 POC 反演,在南黄海 II 类水体依然有较高的适用率,但单波长两步经验算法并不适用。研究后向散射系数与水文条件的关系,发现 b_b 的变化与温盐跃层存在良好关系。

最后,根据南黄海水文、水团、海流、陆源、海底沉积等因素,在空间分布上将南黄海分为五个区域:长江口冲淡水区、黄海暖流区、南黄海冷水团区、青

岛冷水团区以及苏北浅滩区。并对各个区域的光学特性进行定性定量分析。

关键词： 固有光学特性；表观光学特性；南黄海；算法；环境意义

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Optical technology has a continuous development in marine science application. Typical Case II water in China sea is turbid and its composition is complex, it has become the frontiers and difficulties in marine optics research. This thesis is based on field measurement optical data of the southern Yellow Sea in summer of 2013, has researched inherent and apparent optical properties, explored the feasibility and applicability of photobiology optics algorithm inverting concentration of chlorophyll a (Chl-a) and Particulate Organic Carbon (POC), and discussed the regional environmental significances of optical properties in the southern Yellow Sea.

Firstly, we processed the inherent and apparent optical data collected in this cruise basing on behavior of instruments and recent research achievements. The data contains: absorption coefficient (a-Sphere; water sample dealt with QFT); backscattering coefficient (HS6); water-leaving radiance (C-OPS); remote-sensing reflectance (C-OPS); diffuse attenuation coefficient (C-OPS). As well as seawater biochemistry data, such as concentration of Chl-a, concentration of POC and so on.

According to the result of data processing, we found out the characteristic region (123~125°E, 32~34°N) of seabed resuspension in the southern Yellow Sea, analyze the pure and turbid transition of the southern Yellow Sea surface water, and speculate the characteristic water mass invasion at the mouth of the Yangtze River in the East Sea. After the study of the relationship between different optical quantities, we found the relationship between remote-sensing reflectance and the ratio of backscattering coefficient to the sum of absorption and backscattering coefficient have a good effect, and the green light has the highest fitting correlation coefficient. The contrast diffuse attenuation coefficient at 490 nm wavelength (K_d490) derived from empirical statistical algorithm and a quasi-analytical algorithm indicated that empirical statistical algorithm have a better performance for cleaner water, quasi-analytical algorithm have a more accurate calculation of the range of K_d490 .

Then, in the phytoplankton absorption spectra photobiology model deriving concentration of Chl-a we found the relationship between phytoplankton absorption coefficient at 675 nm wavelength and Chl-a is better than 443 nm wavelength; when it comes to empirical statistical algorithm, the data result indicated that OC4 algorithm is not suitable for the southern Yellow Sea, then we established Chl-a algorithm in the

southern Yellow Sea derived from maximum band ratio (MBR) basing on Clark Model. POC deriving algorithm which based on the B-G band ratio of remote-sensing reflectance is still applicable in the southern Yellow Sea Case II water, while single-wavelength two-step empirical algorithm is not applicable. In the study of the relationship between backscattering coefficient and hydrologic condition we found that change in backscattering coefficient and thermocline or halocline have good relationship.

Finally, according to hydrologic condition, water mass, sea current, terrestrial source, sea-bottom deposit and other factors, the southern Yellow Sea is divided into five districts in the spatial distribution: Yangtze Delta plume, Yellow Sea warm current area, the southern Yellow Sea cold water mass area, Qingdao cold water mass area and north Jiangsu shallow area. And then qualitative and quantitative analysis of the optical characteristics of each area were discussed.

Key words: Inherent optical properties; Apparent optical properties; The southern Yellow Sea; Algorithms; Environment significances.

第1章 绪论

1.1 选题背景及研究意义

当今, 光学技术在海洋科学应用中不断发展, 海洋光学对于海洋物理过程、生物过程、化学过程和地质过程等研究都具有非常大的价值, 发挥着重要作用。测量及解释海水的光学特性, 已经并且仍将是海洋学的一个富有挑战性的研究方向。海水的光学特性, 分为固有光学特性和表观光学特性, 单纯研究海水的表观光学特性, 对于海水光学性质的整体研究, 具有局限性。同时研究表观光学特性和固有光学特性, 并建立区域性两者之间的关系, 结合海水的温度、盐度、浊度等水文测量数据, 能够很好的获得水下光场的分布特征, 评价区域性水体特点, 为我国海洋卫星遥感数据处理和产品开发打下基础。

为了定量描述水下光场, 我们需要测量和描述水体介质中光的传输特性。固有光学特性中最基本的参数是吸收系数、散射系数(体积散射函数)。其中, 后向散射光谱是影响海洋反射特性的关键性因素[Stramski D. et al., 2004; James M. S. et al., 2005]。它在很大程度上描述了向下辐射光场是如何转变为向上辐射光场的。因此后向散射是海洋遥感(包括主动方式和被动方式, 即人工源方法和太阳源方法)最重要的部分之一[Twardowski M. S et al., 2007]。

表观光学特性中, 离水遥感反射比是海洋水色遥感的基础物理量, 从光学上表现了水体成分。现场精确测量离水遥感反射比将有助于光学算法的开发和卫星遥感的辐射校正以及卫星数据的真实性检验。

海水按其光学性质的不同可划分为 I 类水体(Case 1 Waters)和 II 类水体(Case 2 Waters)。II 类水体主要位于近岸、河口等位置, 这些水域受陆源物质输入影响较大, 其光学特性主要由悬浮物、黄色物质决定[Morel A. and Prieur L., 1977; Gordon H. R. and Morel A., 1983]。人类的海洋活动范围主要在近岸, 因此 II 类水体与人类的关系最为密切, 受人类活动的影响也最为强烈。然而 II 类水体的海水成分与光学特性都比 I 类水体复杂的多, II 类水体水域的水色遥感和反演一直是海洋水色遥感的难点和热点。如果能从现场实测数据中对 II 类水体水域的光学特性进行研究, 并探讨其光学特性在生态环境以及生物地球化学研究中的表现, 建

立良好的对应关系,则可能可以拓展海洋光学在生态环境及生物地球化学科学中的应用方向,使其成为更加完善与实用的海洋科学研究方法与工具。推广到我国甚至世界的近岸 II 类水体的光学特性研究中,为人类的海洋活动提供便利。

南黄海位于江苏省东侧,近岸处包含苏北浅滩及长江口,大量泥沙随内陆河流输入海洋,近岸是典型的 II 类水体海域,海水浑浊度高。水体光学特性差异较大,物质成分复杂。因此,对南黄海水域 II 类水体光学特性进行研究,有助于加强海洋生态动力学的研究,对更好的了解海洋环境变化对生态系统的影响起关键性作用。

1.2 研究现状

当今,由于传感器设计的飞速发展和各种自动采样平台的成功研发,加上海洋光学建模方面的巨大进展,给光和海洋及其边界之间的相互作用的机理研究提供了丰富的资源和途径,是海洋学界一个前所未有的机会。而这些发展,决定了海洋中对光的研究方法。

美国最著名并且富有成效的海洋光学性质研究中心 Scripps 研究所的海洋能见度实验室,对海洋光学最大的贡献是对体积散射函数(VSF)的测量[Petzold T.J., 1972],并被认为是最权威的结果。20 世纪 70 年代末,商业化的现场海洋光学测量仪器开始出现,之后这些商业化仪器发展的基础,是建立在 Scripps 研究所的海洋能见度实验室所做的基础性工作上的[Smith R. C. and Tyler J. E., 1967]。

水体光谱特性的研究包括两个方面:表观光学特性和固有光学特性。现场表观光谱的测量从方法上可以分为两类:剖面测量法(Profiling Method)和水表面以上(Above-water Method)测量法。两种方法相对独立,使用范围具有互补性,因为这两种测量方法的误差源及信号过程不一样。剖面法是由水下光场测量外推得到水体表面信号,同时可以更好地刻画出水体光场垂直变化,采用的仪器昂贵,且操作布放复杂;表面法是采用与陆地光谱测量近似的仪器。

固有光学量的研究上,海水的总吸收系数是影响水体光场分布的主要参数,一直是重点研究的水体固有光学量之一,在海洋学的许多方面有着重要作用。Lee 等人根据大量的实测数据,建立了在 440 nm 波段的总吸收系数和遥感反射比的经验关系[Lee Z. P. et al., 1996]。HE 等人根据 Hydrolight 数值模拟提出了基于高

光谱半分析模型适合东中国海的海水总吸收系数和遥感反射比之间的经验关系 [He M. X. et al., 2000]。王晓梅等人利用现场实测的表观光学量和固有光学量数据, 得到我国黄海、东海近岸 II 类水体多个波段的总吸收系数的统计反演模式 [王晓梅等, 2006]。2002 年 Lee 等人提出了准分析算法(QAA) [Lee Z. P. et al., 2002], 是一种有广泛应用前景的海水固有光学特性反演算法, 目前已被 SeaWiFS 数据处理软件包(SeaDAS 4.8)采纳并作为其业务化算法之一。胡连波等人利用黄海现场测量的海洋光学数据集测试 QAA 在黄海的适用性, 对 QAA 进行了修正, 用浮游植物的光谱模型代替 QAA 算法中黄色物质和碎屑的吸收光谱模型 [胡连波和刘智深, 2007]。另一个重要的固有光学量是散射, 宋庆君等人通过对黄海、东海海区的水体固有光学量的测量数据, 得到水体总后向散射系数与水体总散射系数的关系为乘幂关系, 颗粒物后向散射系数随光谱变化的指数在高低浑浊度水体有很大差异 [宋庆君和唐军武, 2006]。鉴于意大利 Zibordi G. 等人在 ADRIATIC Sea 北部获得表观光学及固有光学基础数据, 建立了效果较好的区域性模型 [Berthon J. F. et al., 2002]。汪小勇等人于 2003 年在黄东海建立了水下遥感反射比 r_{rs} 、后向散射系数 b_b 和水体吸收系数 a 之间的区域性、季节性的表观和固有光学特性之间的经验模型 [汪小勇等, 2004]。

漫衰减系数是重要的表观光学量, Smith and Baker 根据辐射传递理论得到纯水的漫衰减系数是纯水的吸收系数和后向散射系数之和, 并由此根据实际测量的纯水的漫衰减系数导出了纯水的吸收系数 [Smith R. C. and Baker K. S., 1981]。Gordon 研究了太阳天顶角对自然水体漫反射性的影响 [Gordon H. R., 1989]。Lee 等人基于辐射传递方程和 Hydrolight 数值模拟建立了水体不同深度不同太阳天顶角下, 漫衰减系数和吸收系数与后向散射系数之间的关系表达式 [Lee Z. P. et al., 2005]。Lee 等人提出, 首先通过准分析算法由遥感反射比反演吸收系数和后向散射系数, 再由此及边界条件计算漫衰减系数。

国内叶绿素光谱特征及其遥感信息提取方面也开展了许多研究。潘德炉等开展了大量的叶绿素遥感探测研究 [潘德炉等, 1989; 2004]。唐军武和李铜基等人在黄渤海开展 II 类水体光谱测量及叶绿素浓度的反演研究 [李铜基等, 2002]。颗粒有机碳 POC 方面, Stramski 等人于 2008 年建立了南太平洋东部和大西洋东部的光学反演算法 [Stramski D. et al., 2008]。

生物光学算法方面, Morel 和 Gordon 总结了三种基于现场光学要素解译海

洋水色数据的方法[Morel A., 1980; Gordon H. R. et al., 1988]: 分析法、半分析法和经验统计法。

分析法是基于生物光学模型和辐射传输理论来描述水体组分浓度与水体光谱之间的关系, 虽然分析法可以同时反演得到多种水体组分浓度, 但由于海水组分复杂, 后向散射特性与吸收特性关系难以解析, 因此分析法较难实现。具有代表性的分析法有 Morel 等的三组分模式[Morel A. and Berthon J. F., 1989]和 Ahn Yu-Hwan 的分析模式[Ahn Yu-Hwan., 1999]。

半分析法基于结合经验方程和辐射传输模型来实现水体组分反演, 模型较为简单, 对特定 II 类水体反演结果精度较高, 然而, 对数据准确性具有严格的要求, 当受到其他未知因素影响时, 反演精度将会严重降低。具有代表性的半分析法有 Lee 等的光学浅水模型[Lee Z. P. et al., 1998]、Lee 等的 QAA 模型[Lee Z. P. et al., 2002]和 Carder 等为 MODIS 发展的反演模式[Carder K. L. et al., 1999(a)]等。

经验统计法是基于实测数据, 建立水体光学性质与水体组分浓度之间的定量关系, 经过统计相关分析, 根据相关系数、平均相对误差等参数的大小, 建立经验模型。经验统计模式种类繁多, 包含从简单的线性模型到复杂的神经网络算法等。经验统计法建立和操作较为简单, 但本质上具有区域局限性, 当水体组分复杂或时空变化性强烈时, 反演准确度不高, 且对误差难以进行分析和评估。

1.3 研究目标及内容

1.3.1 研究目标

2013 年国家自然科学基金船时项目渤海夏季共享航次在南黄海设计了 42 个站位, 覆盖面积广, 包含了较清洁、浑浊和非常浑浊的水域。期间, 在天气及海况良好的情况下, 获取了较完整的光学及水文现场实测数据。这些现场实测数据, 经过处理和建立关联, 能对南黄海的光学特性进行系统性的研究, 并探讨光学特性在生态与生物地球化学研究中的表现与作用。

本文旨在通过对南黄海固有及表观光学特性的研究分析, 探讨南黄海的光学特性与生态、生物地球化学研究之间的关系, 为 II 类水体光学特性研究做一定的贡献, 以便未来对南黄海以及其他 II 类水体水域的光学与环境的进一步研究。

1.3.2 论文结构

本论文由5章组成，各章内容如下：

第1章为绪论，介绍研究背景、意义、现状及目标内容。

第2章为数据与方法，阐述研究区域背景、数据来源，简要介绍固有及表观光学特性参数与测量仪器，并对数据处理方法进行介绍。

第3章重点探讨南黄海的固有及表观光学特性，及其两者之间的关系，并分析其缘由及物理意义。

第4章主要讨论南黄海光学特性的算法应用及其环境意义，即在生态中的影响，与在生物地球化学中的表现，并对站位进行区域化分析讨论。

第5章为总结与展望，总结本论文的主要结论并提出尚未解决的科学问题以及继续研究的方向，以便未来进一步的研究与探讨。

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.

廈門大學博碩士論文摘要庫