



黄渤海水体光学性质变化及其影响机制

学位论文答辩日期: 2015.5.23

指导教师签字: 张彦录

答辩委员会成员签字: 刘刚

李如平

白文峰

刘中军

孙

李

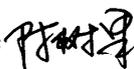
吴东

谨以此论文献给我的导师和家人

-----陈树果

独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得（注：如没有其他需要特别声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期：2015年5月26日

学位论文授权使用授权书

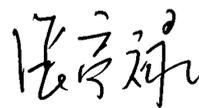
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，并同意以下事项：

1、学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。

2、学校可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同时授权清华大学“中国学术期刊(光盘版)电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》，授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：

导师签字：

签字日期：2015年5月26日

签字日期： 年 月 日
2015 5 26

黄渤海水体光学性质变化及其影响机制

摘要

海洋水体光学性质的变化及其影响机制的研究对于建立高精度的水色遥感反演方法、利用光学手段监测悬浮颗粒物的动态变化、预测水下能见度的变化以及利用光学手段研究短时间尺度的海洋和天气过程对水体的影响具有重要的意义。本研究利用现场广泛测量的光学性质数据，深入认识黄渤海水体光学性质变化的时间（季节）和空间（水平及垂直）分布特征；并结合同步测量的水文及生物地球化学参数等数据所揭示的海洋过程分析了黄渤海水体光学性质季节和空间变化的主要影响机制；然后以影响机制为基础，定量化光学性质变化与水体光学活性组分的关系。在上述研究的基础上，利用在黄渤海广泛测量的光学数据研究了光学性质的光谱依赖性关系，并构建了黄渤海水体光学性质参数化模型。最后利用沙尘暴期间的定点周日测量分析了沙尘暴对水体光学性质的影响。主要研究结果如下：

1. 黄渤海水体光学性质变化主要由潮波所致的底部沉积物再悬浮、水体垂向混合及浮游植物生长的生物过程所影响。具体影响机制如下：春季，水体的垂向混合动力开始降低，层化现象开始出现，层化结构的出现进一步降低了水体的垂向混合动力，使得底部受潮波所致再悬浮的沉积物的上移受限，由于春季具备适宜浮游植物生长所需的条件，浮游植物得以开始大量生长，对于深水区，其上层水体的光学性质主要由浮游植物生长的生物过程所影响，其底层水体主要由潮波所致的底部沉积物的再悬浮过程所影响，对于浅水区，由于水深较浅，同等外部条件下，其垂向混合动力较之深水区较强，层化效应相对也较弱，底层再悬浮的沉积物较之深水区更易上移至上层水体，因此对于浅水区，上层水体的光学性质除受浮游植物生长的生物过程影响外，还受底部沉积物的再悬浮过程所影响。夏季，水体的层化效应得到进一步加强，黄渤海大部分水域的上层水体的光学性质主要由浮游植物生长的生物过程所影响。秋冬季节，水体层化效应减弱，垂向混合作用较强，深度小于 50m 的水体垂向混合慢慢均匀，对于深度大于 50m 的水域，由于水深较深，强混合作用仍不能使得水体上下混合均匀，但强混合作用使得上混合层深度较深，上混合层底部距海底较近，底部再悬浮的沉积物易通过跃层进入上混合层水体，但对于特别深的水体如黄海海槽附近水体，虽然上混合层

底部距海底较近，但由于水深更深，跃层相对较强，底部再悬浮的沉积物依然很难突破跃层进入上混合层，因此对于秋冬季节，除黄海海槽附近水域上层水体的光学性质依然受浮游植物生物过程影响外，大部分水体的光学性质逐渐由底部沉积物的再悬浮过程所影响。

2. 直接引起黄渤海水体光学性质变化的主要光学活性组分是水体中的悬浮颗粒物。光学性质与悬浮颗粒物的关系依赖于悬浮颗粒物的类型，对于后向散射比大于 0.015 的水体，水体中的颗粒物主要以无机颗粒物为主，光学性质与悬浮颗粒物浓度具有较好的相关关系，平均相关系数约为 0.97；对于后向散射比小于 0.009 的水体，水体中的颗粒物主要以浮游植物颗粒为主，其光学性质与叶绿素浓度具有较好的相关关系，平均相关系数约为 0.87。

3. 对于春季南黄海中部上混合层水体，当沙尘暴发生时，沉降于水体的沙尘颗粒对散射的贡献取决于沙尘暴的强度，气溶胶光学厚度约为 2.5 的沙尘暴所引起的沙尘颗粒沉降导致的水体颗粒物散射系数在 532nm 处的增加量约为 0.14 m^{-1} ；此外，沉降于上混合层水体内的沙尘颗粒的沉降速度较快，伴随着沙尘暴的结束，约结束后的 3 个小时内，上混合层水体内的沙尘颗粒便沉降到底层；另外研究结果间接揭示出大气沉降对光学性质变化的影响在无沙尘暴发生时可近似认为 0。

关键词：光学性质；影响机制；黄渤海；光学参数化模型；沙尘暴

Variations and influencing mechanisms in the optical properties of the waters in the Yellow Sea and Bohai Sea

Abstract

Studying the variations of the optical properties of the sea water and its influencing mechanisms is very important for the development of ocean color remote sensing retrieving algorithms with high precision, the research on the transport processes of the suspended particulate matters based on marine optical technique, the development of underwater visibility prediction method and research on the impact of ocean processes and weather processes at short-time scales using optical methods. This research uses the optical properties dataset measured extensively in the Yellow Sea and Bohai Sea (YSBS) to explain the temporal and spatial distribution characteristics of their optical properties; systematically analyzes the influencing mechanisms of the variations of the optical properties in the YSBS in conjunction with synchronously measured chlorophyll concentration, suspended particulate matter characteristics and hydrological data; and develops the parameterized models of inherent optical properties and analyzes the influence of dust storm on the optical properties. The main research results are listed as follows:

1. The variations in the optical properties are mainly influenced by the bottom sediments resuspension which induced by tidal currents and waves' friction force, stratification effect determined by temperature and salinity profiles and vertical mixing function made by wind, and phytoplankton growth process. The detailed influencing mechanisms are listed as follows: in spring, vertical mixing function of the water tends to be weak and the stratification effect emerges. Due to the appearance of stratification effect, vertical mixing function of the water becomes further reduced, which limits moving up of the bottom sediments resuspension that is induced by tidal currents and waves' friction force. Because there exist appropriate conditions needed for phytoplankton to live in spring, phytoplankton starts to grow largely. For the waters with deep depths, the optical properties of the upper layer waters are influenced by the biological process of phytoplankton growth, and the optical properties of the bottom layer waters are influenced by the bottom sediments resuspension process which induced by tidal currents and waves' friction force; for the waters with shallow depths, vertical mixing function is more powerful and stratification effect is weaker than deep water in the same exterior condition, so that the bottom resuspended sediments are easier to move up to upper layer water. Therefore, the optical properties of the upper layer waters are influenced by the biological process of phytoplankton growth in addition to the bottom sediments resuspension process. In summer, stratification effect of water is enhanced and the

optical properties of the majority of the upper layer waters are influenced by the biological process of phytoplankton growth in the YSBS. In autumn and winter, stratification effect of water is weakened and vertical mixing function is enhanced. Because of the powerful vertical mixing function, the depth of the upper mixing layer becomes deeper and the bottom of upper mixing layer is close to the bottom, which makes the bottom resuspended sediments hard to get through the pycnocline to access to the upper mixing layer. Although the upper mixing layer is close to the bottom of sea in some deeper water such as the Yellow Sea Trough, the bottom resuspended sediments are still hard to get through the pycnocline to access to the upper mixing layer because of the strong pycnocline. Therefore, in autumn and winter, the optical properties of the majority of the YSBS waters are influenced by the bottom sediments resuspension process except those of the upper layer waters located in the Yellow Sea Trough which are still influenced by biological process of phytoplankton growth.

2. The suspended particulate matters' characteristics directly dominate the variability of optical properties in the YSBS. The optical properties are mainly controlled by the concentration of suspended particulate matters, and the particle type dominates the detailed response relationship between the concentration of suspended particulate matters and optical properties. For the waters with the backscattering ratio with a value greater than 0.015, the optical properties are highly correlated with the concentration of suspended particulate matters, and the mean correlation coefficient is 0.97; and for the waters with the backscattering ratio with a value less than 0.009, the optical properties are highly correlated with the chlorophyll concentration, and the mean correlation coefficient is 0.87.

3. For the waters located in the central South Yellow Sea, when a dust storm occurs, dust particles deposited from dust storm with aerosol optical depth of nearly 2.5 into water could induce 0.14 m^{-1} change of water optical scattering coefficient at 532nm. The influencing time of dust storm on water optical scattering properties is short and the influence disappears rapidly within about 3 hours after the ending of a dust storm. These results are very helpful for understanding the influencing mechanisms of dust storm on optical properties as well as the distribution pattern of dust particles deposited from dust storm into water by means of optical methods. The results also indicate that the contribution of dust particles deposited from atmosphere on particle scattering properties when no dust storm occurs can be approximately equal to 0.

Keywords: optical properties; influencing mechanisms; Yellow Sea and Bohai Sea; optical parameterized models; dust storm

目录

1 前言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究动态	5
1.3 研究思路及安排	8
2 数据介绍	10
3 黄渤海水体光学性质的时空变化	15
3.1 垂向剖面光学性质的季节变化	15
3.1.1 断面 1 光学性质的季节变化	15
3.1.2 断面 2 光学性质的季节变化	23
3.1.3 断面 3 光学性质的季节变化	31
3.2 表层水体光学性质的季节变化	40
3.2.1 光学性质的季节变化	41
3.2.2 水文及生物地球化学参数变化特征	45
3.2.3 光学性质变化的原因分析	50
3.3 小结	51
4 黄渤海水体光学性质变化的定量化分析	53
4.1 光学性质与悬浮颗粒物的关系	53
4.1.1 后向散射比与悬浮颗粒物构成的关系	54
4.1.2 光学性质与悬浮颗粒物浓度的关系	56
4.2 光学性质参数化模型	60
4.2.1 光学性质的波长依赖性	61
4.2.2 固定波长光学性质参数化模型的建立	69
4.2.3 黄渤海水体的光学性质参数化模型	71
4.3 黄渤海表层水体颗粒物类型的季节性分布	72
4.4 小结	73
5 沙尘暴对水体光学性质的影响	75
5.1 光学性质分析	75
5.1.1 散射系数	75
5.1.2 后向散射比	75
5.1.3 非浮游植物颗粒的散射系数	76
5.2 沙尘暴期间气象条件介绍	77
5.3 沙尘暴期间水体物理和生物特性的变化	79
5.4 沙尘暴期间上混合层水体光学散射性质的周日变化特征	81
5.4.1 颗粒物散射系数的周日变化特征	81
5.4.2 颗粒物后向散射比的周日变化特征	82
5.4.3 非浮游植物颗粒散射系数的周日变化特征	83
5.5 沙尘暴对光学散射性质的影响	84

5.6 小结.....	86
6 总结.....	88
6.1 主要研究结果.....	88
6.2 存在问题及进一步研究.....	90
参考文献.....	91
致谢.....	98
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果.....	99

1 前言

1.1 研究背景及意义

黄渤海, 位于西北太平洋的半封闭大陆架浅海, 是受物理强迫最为强烈的海域之一^[1]。海区悬浮颗粒物含量高, 是世界上悬浮物含量最高的海域之一, 且影响范围广。海区具有复杂的水动力环境, 又受周围两大世界著名河流(黄河及长江)输入的影响, 其水体性质无论在短或长的时间和空间尺度上都有剧烈的变化^[2,3]。首先最为显著的是年度的周期性变化。在冬季的降温及大风的影响下, 上下混合作用强烈, 水体性质上下基本均匀。春季和夏季的增温效应, 导致水体明显的分层效应。对于较短的时间尺度上, 水体不仅在垂直结构上受到风暴、浪、潮汐及坡水的入侵等影响, 同时也受到特殊天气现象输入的影响, 尤其是源于干旱或半干旱地区的亚洲沙尘暴频繁发生于 4 月份^[4,5], 其不仅对我国华北地区产生重要的影响, 同时在大风的影响下, 具有较远的传输距离^[6,7], 对我国近海也具有较大的影响^[8]。统计结果显示, 于 2000 至 2002 年期间, 共发生 42 次沙尘暴天气, 其中 31%影响了黄海^[9]。事实上, 沙尘暴期间大量的沙尘颗粒沉降于黄海, 据 Zhang and Gao 的估测^[9], 每年约 17.9Tg 的沙尘颗粒沉降到黄海中。这些沉降的沙尘颗粒一方面使得水体中无机颗粒物含量增多, 另一方面其所携带的营养成分会对海洋生态系统产生重要影响^[10-12]。水体的混合及层化效应影响到颗粒物在水体中的垂直分布。如强烈混合作用下可影响海底边界层, 使沉积物再悬浮。春季和夏季的水体分层可阻碍水体垂直混合, 导致悬浮体分布层化现象, 同时在海洋上层可形成浮游植物最大层^[1-2], 从而使得水中生源颗粒物比例增加, 而海底边界层由于沉积物的再悬浮可形成一定厚度的雾状层。黄渤海流系复杂, 且有些随季节性变化显著, 海底地形复杂, 使该区域悬浮体输送及水平分布具有很大的时空变化特点。以上这些使得黄渤海在不同季节下悬浮体特性(浓度、构成及粒径)的水平分布有着巨大的差异。

水体的固有光学性质(只依赖于水体介质, 本研究简称为“光学性质”)通常由吸收、散射及后向散射等参数描述, 这些参数是水体中颗粒物特性(含量、构成及粒径)以及可溶有机物(浓度及构成)的函数。鉴于黄渤海水体中颗粒物及可溶有机物分布随时间和空间的变化有很大的不同, 这必然引起水体的光学性

质也随时间和空间有很大的差异。对于黄渤海,研究这些光学性质随时间和空间变化的特征及其影响机制,有着重要的科学价值和应用价值。以下将从四个方面对本研究的科学和应用价值进行论述。

a) 建立和印证高精度的水色遥感反演算法

水色卫星遥感反演目的是从海面遥感反射率光谱中导出相关的生物地球化学参数。其中的方法大体分为三类:解析方法、半解析方法及经验方法。实际上纯解析方法几乎不存在。统计方法只依赖于反演参数与输入参数的统计回归,常用于一类水体中,如叶绿素浓度的反演。目前在近海区域中广泛应用的是半分析方法,它是基于水色的物理机制,但也包含一些统计关系(这些统计关系也称为参数化模型),如光学性质的波长依赖性,有关生物地球化学参数与光学性质的关系等。对于近海区域颗粒物及可溶有机物的组成及相对含量随时间和空间有很大变化,这对光学性质的参数化模型的建立是一严重挑战。如,尽管全球海洋在某些时间和区域,总的悬浮体浓度与光学性质存在很好的相关性,但这些关系也强烈依赖于颗粒物的粒径尺寸、折射率及其它的特性,如形状、内部结构也影响这些关系。另外的一个重要的光学参数单位浓度浮游植物吸收光谱也存在很大的变化,群落结构、海洋环境(营养盐水平、温度及光照)、浓度及粒径尺寸都对它产生影响。

国际社会一直在努力通过各种途径提高反演参数的准确性^[13,14]。最近的研究结果表明,反演出的参数误差重要来源是光学性质的变化(不确定性)^[15-18]。这些光学性质参数化模型的精度在很大程度上决定了反演参数的精度。光学性质的变化源于不同水体中生物地球化学等参数特性的变化,导致水体中生物地球化学等参数特性变化的主要因素包括了复杂海洋过程,如生物过程、地质过程、化学过程及物理过程等。因此,近年来提高反演参数精度的一个重要方向是根据目标海区的特点,系统研究光学性质变化与有关海洋过程的联系,建立以海洋过程为基础的参数化模型,然后将所建立的参数化模型应用于基于半分析的反演算法中^[13,17,18]。

黄渤海区域上表层悬浮体在时空分布上有很大差异,如春季和夏季在较深的水域,上表层中的生源颗粒物(较低的折射率)占有较大的比例,而在冬季水体中生源颗粒物较少,主要是无机颗粒物(较高的折射率)。生源颗粒物与无机颗

粒物的比例具有明显的地域和季节特征。另外，这些颗粒物的粒径分布也有很大差异。因此，从散射特性来看，黄渤海确实有巨大差异。从浮游植物的吸收看，黄渤海的生物群落结构也有明显的地域和季节特征，因此，也可能使得单位浓度叶绿素的吸收光谱也具有明显的地域和季节特点。为了提高水色遥感反演参数的精度，必须建立高精度的参数化模型，这需要建立在对该海区光学性质变化的充分掌握上。

b) 监测近海颗粒物特性的动态变化，为水体中悬浮物运输过程的研究提供新的技术手段

近年来随着水下光学测量技术的发展，有很多商品化的光学性质测量仪器问世。一方面这些测量仪器具有很高的测量精度，另一方面它们的体积紧凑、功耗低、采样率高，可以适合水面及水下的各种测量平台，快速实现对水体性质的三维测量。水体中颗粒物的特性决定了固有光学性质（吸收、散射及后向散射等），固有光学性质是水体中颗粒物特性（含量、构成、折射率及粒径分布）的函数。因此颗粒物特性与光学性质相关性的时空变化反映了类型（来源）的变化，提供了颗粒物动态变化的信息。所以，通过连续观测光学性质及相关海洋环境参数，可以监测水体中悬浮体的动态变化规律^[19-28]。水体光学性质测量技术在研究近海水体悬浮体动态变化过程上有着巨大的潜力。

黄渤海是世界上悬浮体质量浓度最高的海域之一，物源丰富多样，季节性变化明显，影响范围广。海域悬浮物以陆源入海碎屑物质（泥沙）为主要组成部分，同时携带大量营养盐和污染物，在黄渤海广阔的陆架海域扩散、迁移和沉积，对该海域的生态、环境和资源产生深远的影响。对于该海域悬浮泥沙的运输、分布规律及沉积过程，众多国内外学者都做过比较深入的研究^[29,30]。这些研究绝大多数基于传统的技术手段对悬浮体的性质进行测量。这些传统的技术手段虽然具有较高的测量精度，但由于技术的限制，其测量效率及包含的信息量仍不能满足对悬浮体动态变化的研究需求。另外，海洋遥感也已成为海洋表层悬浮体浓度测量的重要手段，但仅限于表层悬浮体浓度的测量，无法得到水下颗粒物性质的分布。因此，本研究的另一目的是通过研究区域内水体光学性质（主要为散射性质）的变化与悬浮体特性的关系以及影响散射性质机制的研究，用于发展通过光学性质测量研究黄渤海悬浮体运输、分布规律及沉积过程的方法。

c) **预测近海水体能见度的时空变化, 提高水下军事行动的能力和近海生态环境监测能力**

水下能见度对于水下军事行动及海洋生态环境监测发挥重要作用。水下光学性质的变化决定了水下能见度的变化。目前有些发达国家正在大力发展基于光学技术的水下目标探测系统, 这些系统的探测能力很大程度上依赖于水体的光学性质。近海中, 在复杂的水动力环境影响下, 光学性质无论是水平分布还是垂直分布随时间会有显著的不同, 这给水中目标的探测带来严峻的挑战。为了提高光学探测系统及反探测的能力, 通常的做法是 (1) 根据水下辐射传输理论及实验研究, 建立水下能见度与水体光学性质的关系^[31,32]; (2) 通过对目标海区水体光学性质变化与影响因素的研究, 建立光学性质与动力学过程及生物过程等耦合模型; (3) 在此基础上对该海域的水下能见度做出预测。

黄渤海的水体性质水平及垂直分布随时间都有很大的变化。冬季的强烈混合效应, 近底层沉积物再悬浮, 使水体更浑浊, 能见度变小, 尤其浅水域; 春夏季悬浮体垂向分布的分层效应, 上表层形成生物分布最大层, 该最大层深度及强度随地域及季节都有很大不同。另外, 海底边界通常存在一沉积物悬浮层(雾状层), 其厚度也随地域及不同的水动力环境而发生变化。这导致水体光学空间分布的时间变化非常复杂。有必要厘清水体光学性质水平和垂直是如何变化的以及变化的驱动因素有哪些。为该区域水下能见度的预测提供关键的基础知识。

d) **研究短时间尺度的过程对水体的影响, 提高对短时间尺度过程所引起的物质运移的认识**

短时间尺度的海洋过程(潮汐、台风及沙尘暴等)对海洋产生着重大的影响, 如沙尘暴, 一方面, 大量的沙尘颗粒沉降于海水中使得水体中无机颗粒物浓度增加; 另一方面这些沉降的沙尘颗粒所携带的营养盐会引起浮游植物的爆发性生长。因此, 这些短时间尺度上的海洋或天气过程对海水中的水体成分有着直接的影响。而传统水体成分的测量方法无法满足研究这种短时间尺度的海洋及天气过程对水体成分变化的影响。光学性质与水体成分具有较好的相关关系, 通过认识这些短时间尺度下的光学性质的响应对于理解水体成分运动及分布具有重要的意义。这就要求充分认识光学性质的变化与水体成分的关系。

1.2 研究动态

海洋水体光学性质变化的研究与仪器技术的进步紧密相关。20世纪30年代至60年代,随着技术的进步,海洋光学仪器由方案设计阶段慢慢的发展到成品的出现,伴随着一些测量水体光学性质(如吸收、散射、衰减、荧光及辐射特性等)的雏形仪器开始出现,海水水体的光学性质变化得到相对深入的研究,其中具有代表性的是Jerlov关于水体的光学分类^[33],然而这些研究主要围绕如何量化光学性质变化进行研究,至于引起这些变化的原因却未定量评估^[34]。随着生物学上研究浮游植物的需要,光学和生物学慢慢的结合起来^[34,35],光学性质与浮游植物的关系得到研究,尤其在20世纪70到80年代,随着关于激光、光电二极管以及光电器件的微型化等新技术的出现,海洋光学仪器进入迅速发展的阶段^[36],特别是1978年第一颗海色卫星CZCS的成功发射,为了建立水色反演算法、印证水色反演产品及辐射标定的需要,很多成熟的商品化仪器开始出现,这些商品化的仪器具有低功耗、高精度及高采样率等优点,在此基础上水体光学性质得到广泛的测量,光学性质的变化与浮游植物及其衍生物和碎屑的联系得到更为深入的研究^[34,37,38,39]。其中,具有代表性的研究如下:

1988年,Morel^[34]研究了光学散射性质与叶绿素浓度的关系。

1995年,Bricaud和Maritorena^[37]研究了世界大洋水体叶绿素特定吸收系数的变化。

2001年,Morel等^[38]利用更为广泛测量的数据重新评估了光学性质与叶绿素浓度的关系。

上述关于光学性质变化的研究主要针对大洋水体。对于大洋水体,其成分较为单一,主要由浮游植物及其衍生物和碎屑构成,因此引起光学性质变化的原因也较为明了,大洋水体光学性质变化的研究也逐渐成熟。

20世纪90年代末,随着对近岸水体重要性意识的逐渐增强,研究重点开始转向近岸水体^[40],几个大的近岸项目相继进行,如:

CMO (Coastal Mixing and Optics) 项目^[41];

COBOP (Coastal Benthic Optical Properties) 项目^[42];

Thin Layers项目^[43];

ECOHAB (Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms) 项目^[44];

COASTLOOC (Coastal Surveillance Through Observation of Ocean Color) 项目^[45];
HyCODE (Hyperspectral Coastal Ocean Dynamics Experiments) 项目^[40]等。

在这些项目中取得了一批重要的研究成果, 这些研究成果不仅深入的调查了光学性质变化与水体成分的关系^[45-49], 而且将水体光学性质的变化与物理、生物、化学及地质过程联系起来^[49-52], 揭示了光学性质的变化对于认识物理、生物、化学及地质海洋学的重要性^[53], 同时也间接揭示出近岸水体光学性质变化的复杂性, 其不仅受到生物过程的影响, 也受到物理、化学、地质过程以及偶尔发生的恶劣天气事件如台风等的影响。其中, 具有代表性的研究如下:

2001年, Sosik等^[47]研究了新英格兰陆架水体光学性质的时空变化; Chang和Dickey^[51]研究了新英格兰陆架水体光学性质从较小的时间尺度(分钟)到较大的时间尺度(季节)的变化及影响机制; Chang等^[52]利用光学性质的变化研究了极端天气事件台风对底部沉积物再悬浮的影响。

2002年, Chang等^[50]研究了纽约湾近岸物理过程对光学性质变化的影响。

2003年, Babin等^[45,46]研究了欧洲各近岸水体浮游植物、非色素颗粒及可溶有机物的吸收系数的变化及散射性质与悬浮颗粒物浓度的关系; Boss等^[48]研究了新泽西近岸水体后向散射比的变化, 并讨论了其在区分颗粒物成分中的应用。

对于不同的近岸水体, 由于地理位置、气候特征、海岸线、海底地形以及陆源输入等的差异, 具有不同的物理、化学、生物、地质及天气过程, 这些差异会导致水体成分时空分布具有较大的差异, 进而使得其光学性质变化的影响机制不尽相同; 即使针对同一近岸水体, 不同局部区域或同一区域在不同时间由于物理、化学、生物、地质及天气过程的差异也同样具有较大的变化。此后(一直到目前), 针对近岸水体光学性质变化的研究得到广泛的开展^[54-61]。一些代表性的研究如下:

2005年, Gallegos等^[54]研究了切萨皮克湾西部近岸罗德岛河口的光学性质变化的影响机制。

2006年, McKee和Cunningham^[55]研究了爱尔兰海不同水体类型下的光学性质与水体组分的关系; Oubelkheir等^[56]深入调查了澳大利亚热带强潮系统下从河口到近岸至大洋水体光学性质变化的差异性。

2009年, Doxaran等^[59]研究了欧洲不同近岸水体颗粒物散射系数的光谱变化。

2010年, Woźniak等^[58]研究了加利福尼亚州因皮里尔滩附近水体光学性质与

颗粒物浓度、成分及粒径的关系。

2012年, Astoreca等^[60]研究了北海南部水体光学性质与悬浮颗粒物浓度、成分及粒径的关系。

我国近海水体光学性质的研究较之国外起步较晚,但近年来有了飞快的发展。取得了一些显著的成果^[62-84]。其中,关于黄渤海的研究主要包括两大方面,分别是颗粒物散射性质及散射性质与颗粒物特性的关系和浮游植物、碎屑及黄色物质吸收性质。

对于颗粒物散射性质及散射性质与颗粒物特性的关系的研究:

2006年,宋庆君和唐军武^[65]分析了黄东海的水体散射及后向散射之间、后向散射光谱及后向散射与悬浮物浓度之间的关系。

2007年,顾艳镇等^[67]分析了渤海水体颗粒物后向散射系数和光束散射系数之间的关系;刘炜等^[68]研究了黄东海悬浮物的后向散射概率和单位散射概率。

2010年,Zhang等^[72]分析了黄东海颗粒物后向散射比的光谱变化特征。

2011年,贺双颜^[80]对黄东海水体散射及后向散射模型进行了研究,并分析了后向散射比的光谱模型;韩冰等^[81]研究了蓬莱近岸海域水体的散射特性。

2013年,李敏敏等^[82]研究了黄东海水体悬浮颗粒物后向散射系数和后向散射比的光谱特征以及空间分布规律。

对于浮游植物、碎屑及黄色物质吸收性质的研究:

2008年,邢小罡等^[70]研究了渤海黄色物质和非浮游植物颗粒的吸收系数吸收系数光谱变化特征。

2010年,王林等^[73]对北黄海中部长海县附近海域浮游植物吸收系数的季节变化特征进行了研究。

2012年,周虹丽等^[76]研究了我国近海非浮游植物颗粒吸收系数光谱斜率与固定波长处吸收系数的关系;朱建华等^[77]分析了我国近海有色可溶有机物对总吸收系数的贡献;叶虎平等^[78]研究了黄东海浮游植物的吸收光谱特征;李铜基^[79]分析了我国近海有色可溶有机物、浮游植物及非浮游植物颗粒吸收系数的分布特征和有色可溶有机物及非浮游植物颗粒光谱斜率变化特征。

上述研究结果反映了黄渤海区域季节的海洋光学性质基本情况,为提高我国近海水色遥感反演产品的精度及其它应用研究发挥了重要作用。但目前的研究仍

不能满足我国有关应用的实际需求。主要的问题体现在如下几个方面：(1) 未能结合剖面分布特征分析特征分析光学性质变化的影响机制；(2) 缺乏结合影响机制分析光学性质变化与生物地球化学组分的关系；(3) 未能对沙尘暴这种在四月份常发生于黄渤海的极端天气的颗粒沉降对光学性质的影响进行研究等。

为了解决这些影响黄渤海相关应用的瓶颈问题，本研究拟对黄渤海水体光学性质的时空分布特征及其影响机制进行系统及深入的分析，重点围绕以下几个方面进行研究：(1) 结合剖面分布分析黄渤海水体光学性质变化；(2) 以影响机制为基础建立光学性质与生物地球化学组分的关系；(3) 以上述研究为基础分析沙尘暴对光学性质的影响。最终使这些研究结果在建立和印证高精度的水色遥感反演算法、海洋光学性质测量用于水下悬浮物输运过程的研究及建立预测近海水下能见度的方法以及利用光学手段研究海洋的短时间尺度过程等方面发挥关键作用。

这里，需要特别提出的是，针对大气颗粒沉降对水体光学性质的影响报道较少，这主要源于现场数据获取的困难性及海洋过程的复杂性。目前，仅 Stramski 和 Woźniak^[85]和 Stramska 等^[86]分析了土壤沙尘样品以及大气沙尘样品悬浮于纯海水中的光谱吸收散射性质。定量的评估沙尘暴这种短暂天气过程对水体光学散射性质的影响目前还尚未见报道。本研究在认清黄渤海水体光学性质变化影响机制的基础上通过调查沙尘暴期间南黄海中部固定站位水体光学散射性质的变化特征来定量分析沙尘暴对水体光学性质的影响。这对于认识沙尘颗粒在水体中的分布状态及对大气颗粒沉降对海洋的影响具有重要的意义。

1.3 研究思路及安排

针对上述研究意义和研究现状，本研究首先利用广泛测量的黄渤海水体光学性质数据分析其季节上的空间（垂向和表层）变化特征，然后利用同步测量的水文、生物、地球、化学及气象参数的时空分布特征所揭示的海洋过程分析其季节上的空间变化机理；然后以变化机理为基础定量化光学性质变化与水体光学活性组分（即影响光学性质变化的水体组分）的关系；最后以上述研究为基础，认识沙尘暴期间水体光学性质周日变化特征，分析沙尘暴过程对水体光学性质周日变化的影响。因此本论文的研究框架如图 1-1 所示。

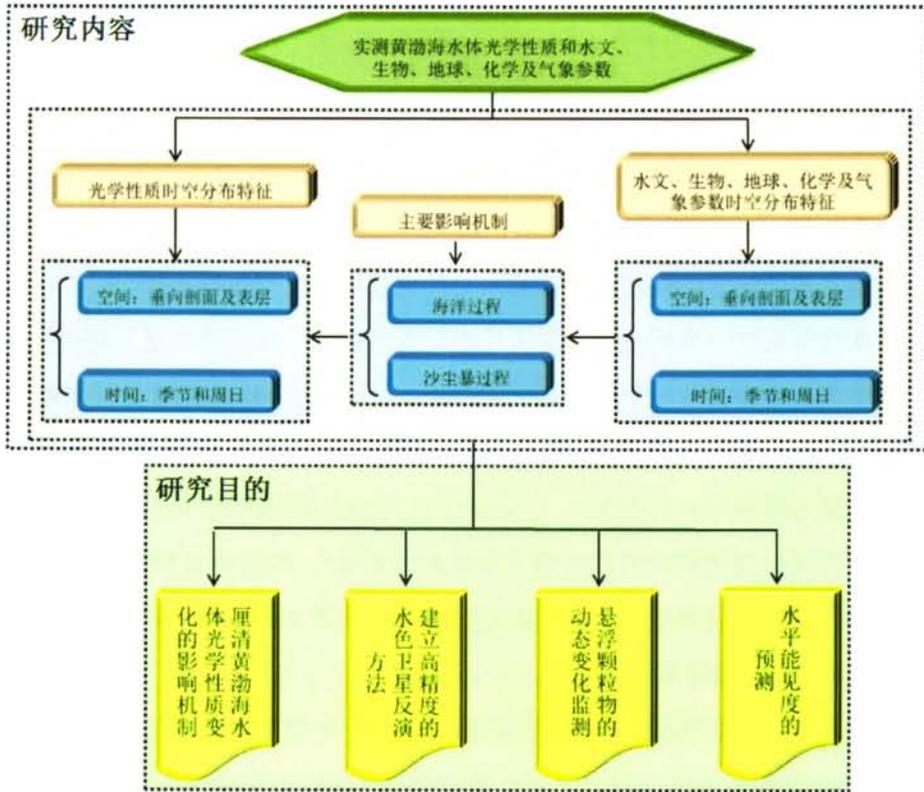


图 1-1 本论文研究框架

根据上述研究框架，本研究共由 6 部分组成，其具体安排如下：

第 1 章，“前言”部分，主要介绍本研究的研究意义、研究目的、当期国内外研究现状（研究动态）以及研究思路安排；

第 2 章，“数据介绍”部分，主要介绍本研究所使用数据的来源及构成；

第 3 章，“黄渤海水体光学性质时空变化”部分，首先利用实测数据构建出黄渤海水体水文及生物地球化学要素及光学性质的时间（季节）及空间（垂向及表层）变化特征；然后结合水体同步测量的水文及生物地球化学要素所反映的海洋过程分析光学性质变化的原因；

第 4 章，“黄渤海水体光学性质变化的定量化分析”部分，主要是以第三章的研究为基础，利用实测的光学活性组分与同步测量的光学性质数据定量化光学性质与光学活性组分的关系；然后以此为基础建立光学性质参数化模型。

第 5 章，“沙尘暴对水体光学性质的影响”部分，主要是利用实测数据分析沙尘暴期间，沙尘颗粒沉降对光学性质周日变化的影响；

第 6 章，“总结”部分，主要是总结本论文的研究结果并给出未来展望。

2 数据介绍

根据上述研究内容和研究目的,本研究主要以现场实际测量数据为基础对黄渤海水体光学性质变化进行研究。过去的十年内,在国家自然科学基金以及其他项目的资助下,针对黄渤海进行了多个航次的实验,广泛获取了不同季节下黄渤海水体垂向剖面的光学性质及相应的水文及生物地球化学参数数据。本节主要围绕针对在这些航次中为解决本研究所提的问题所选取的数据情况进行详细介绍。

本研究所使用的数据主要由两大部分组成,一是用于构建黄渤海水体光学性质季节和空间域的分布特征、研究光学性质变化影响机制以及定量化光学性质变化的数据集(简称为 A 数据集),二是用于研究沙尘暴期间天气过程及海洋过程对光学性质周日变化影响的数据集(简称 B 数据集)。数据集 A 和 B 的数据获取时间、站位数、数据类型、测量参数及测量仪器见表 2-1,两个数据集中的数据站位分布分别见图 2-1 和 2-2 所示。

A 数据集,由春夏秋冬四个航次的数据组成;B 数据集,主要由 2006 年 4 月 SOLAS 航次期间位于南黄海中部水域周日变化连续观测站位 A 的数据和与站位 A 同一季节下的 2014 年春季所测的位于 A 附近的 6 个站位数据构成。其中,对于 A 和 B 数据集中的水文要素温度和盐度,其分别由 Seabird 公司的 SBE19P 型和 SBE911P 型 CTD 测得;对于 A 数据集中的叶绿素浓度数据,其由 Wetlabs 公司的 BB-9 的荧光通道测得,而对于 B 数据集中的 CHL 浓度数据,其由 Wetlabs 公司的 Fluorometer 测得;对于 A 与 B 数据集中的浊度数据,其均由 Seapoint 公司的 Turbidity Meter 测得;对于 A 和 B 数据集中的吸收和散射系数,其均由 Wetlabs 公司的 AC-S 测得,后向散射系数同样由 Wetlabs 公司的 BB-9 测得;对于 B 数据集的风速数据其由船载气象仪测得,而气溶胶光学厚度则由日本 PREDE 公司的 POM01-MKII 全自动天空辐射计所测。

针对上述 A 和 B 数据集中测量参数的具体测量方法及相应的后期数据处理方法详细介绍如下:

对于温度、盐度、叶绿素浓度、浊度、吸收系数、散射系数及后向散射系数,通过将相应测量仪器以同步的方式从表层利用绞车以约 0.15m/s 的速度下放至底层,为防止仪器触底造成仪器损伤,一般参照实际水深,结合海流情况,仪器的实际下放深度约距底留有约 3-5m 的空间,具体深度视海流情况而定。其中需要

后期校正的参数包括叶绿素浓度、吸收系数、散射系数及后向散射系数。对于叶绿素浓度,其利用实验室对现场采集的离散深度处的水样进行精确测量后的值进行校正,关于实验室对现场采集的离散深度处的水样进行叶绿素测量的方法将在下面进行介绍。对于散射系数,其不能由 AC-S 直接测得,而是 AC-S 所测衰减系数及吸收系数之差,针对吸收及衰减系数,AC-S 所测数据不能直接使用,需要经过后期的温度盐度校正,特别对吸收系数还需经过散射校正,具体校正方法在其手册^[87]中进行了详细的介绍,本文在实际处理时采用的是其手册上的第三种散射校正方法。对于后向散射系数,其需要结合 AC-S 所测吸收对其进行路径补偿校正,具体校正方法同样在其手册^[88]中进行了详细的介绍。本文不再赘述。对于上述温度、盐度及浊度剖面数据以及后期校正后的叶绿素浓度、吸收系数、散射系数及后向散射系数剖面数据首先利用小波分析去除海流和波浪产生的噪声,然后在其所测深度内以 0.3m 深度间隔进行插值处理。此外,针对后向散射比的剖面则是将上述后期校正插值后的后向散射系数除以散射系数进行导出。对于这些具有剖面数据的参数的表层数据则依据混合层深度取上混合层深度内 1-5m 深度内的平均值。受气泡的影响,若整个混合层内均无有效值,则该点的表层值忽略不计。

对于离散深度处水样的实验室测量包括悬浮物浓度、叶绿素浓度及光学组分的吸收系数,均是严格按照国际标准^[89,90]在现场对通过 SBE911P 型 CTD 在离散深度处与上述剖面数据所同步采集的水样进行过滤,得到相应样品,进行保存,待航次结束后,在实验室严格执行国际标准进行相应测量。其中,叶绿素浓度及水体组分吸收系数测量的样品采集、保存及后期测量方法在海洋光学规范^[90]中进行了详细的介绍,本文同样不再赘述,只是在颗粒物吸收系数后期数据处理中路径放大因子采用 Tassan^[91]基于近岸水体的研究结果。对于悬浮物浓度,首先将各采集的水样充分摇匀,取出适量,用直径 47mm,孔径 0.45 μm 的微孔醋酸纤维双滤膜(过滤前将所有滤膜在 60 $^{\circ}\text{C}$ 低温下烘干 24h 后,在十万分之一精度的天平上进行称重,并详细记录上层滤膜与下层滤膜的各自的滤膜前重)进行悬浮物抽滤(下层滤膜用于校正),抽滤过程中仔细记录每对滤膜对应的样品编号和样品抽水体积。将所有滤膜 60 $^{\circ}\text{C}$ 低温烘干 24 小时后,在十万分之一精度的天平上进行称重,并详细记录上层滤膜与下层滤膜的各自的滤膜后重。根据每对滤膜在抽

滤前后的重量变化及抽滤体积，计算水样的悬浮物浓度。具体计算公式为：

$$SPM = \frac{(SM_{HZ} - SM_{QZ}) - (XM_{HZ} - XM_{QZ}) \times SM_{QZ} / XM_{QZ}}{V} \text{ mg/L} \quad (2-1)$$

其中，SM 为上膜指悬浮物抽滤膜，XM 为下膜指校正膜，QZ 为前重指抽滤之前滤膜称重质量，HZ 为后重指抽滤之后滤膜质量，V 为抽滤体积。

对于气溶胶光学厚度，其详细的数据测量及处理方法参见贺双颜^[80]，本文同样不再赘述。

表 2-1 本研究所使用的数据集 A 和 B 的数据来源、站位数、数据类型、测量参数及测量仪器。

	测量时间	站位数	数据类型	测量参数	测量仪器	
A 数据集	2014/04/28 - 2014/05/18	120	水文要素	温度、盐度	SBE19P	
			生物地球化学要素	叶绿素浓度	BB-9	
				浊度	Seapoint 浊度计	
			光学性质	吸收、散射系数	AC-S	
				后向散射系数	BB-9	
				水体组分的吸收系数	Cary-100 紫外可见分光光度计	
	2011/06/18 - 2011/06/28	99	水文要素	温度、盐度	SBE19P	
			生物地球化学要素	叶绿素浓度	BB-9	
				悬浮物浓度	天平称重	
			光学性质	浊度	Seapoint 浊度计	
				吸收、散射系数	AC-S	
				后向散射系数	BB-9	
	2013/11/06 - 2013/11/24	84	水文要素	温度、盐度	SBE19P	
				叶绿素浓度	BB-9	
			生物地球化学要素	浊度	Seapoint 浊度计	
				光学性质	吸收、散射系数	AC-S
					后向散射系数	BB-9
	2011/11/21 - 2011/12/06	84	水文要素	温度、盐度	SBE19P	
				叶绿素浓度	BB-9	
				悬浮物浓度	天平称重	
生物地球化学要素			浊度	Seapoint 浊度计		
			光学性质	吸收、散射系数	AC-S	
				后向散射系数	BB-9	
2006/04/23 - 2006/04/24	1	气象要素	风速	船载气象仪		
			气溶胶厚度	POM01-MKII		
		水文要素	温度、盐度	SBE911P		
		生物地球化学要素	浊度	Seapoint 浊度计		
			叶绿素浓度	Fluorometer		
光学性质	散射系数	AC-S				
2014/04/29 - 2014/05/06	6	生物地球化学要素	叶绿素浓度	BB-9		
		光学性质	散射系数	AC-S		

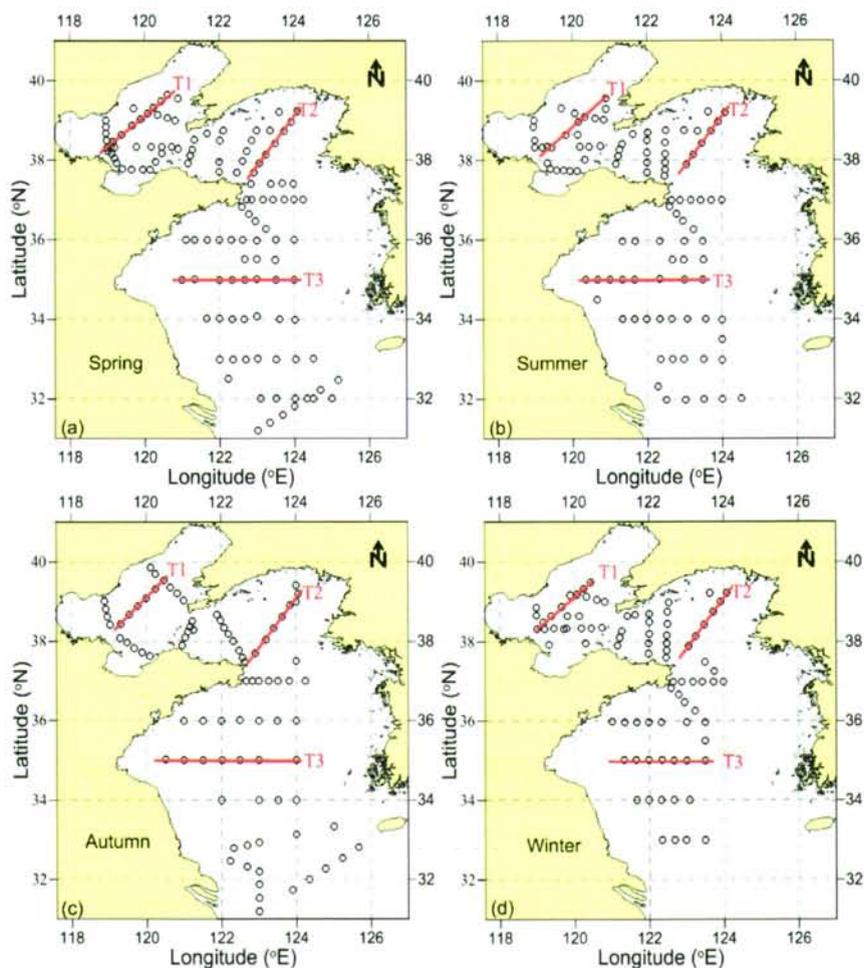


图 2-1 A 数据集的站位分布

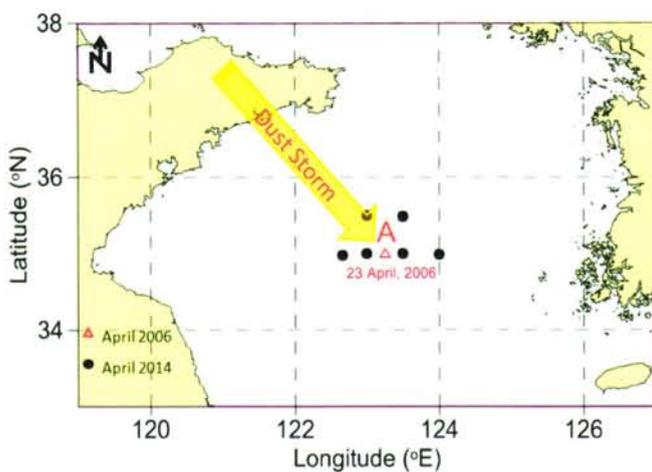


图 2-2 B 数据集的站位分布

3 黄渤海水体光学性质的时空变化

本章主要利用 A 数据集构建黄渤海水体光学性质的季节时间尺度上的空间变化特征，并在此基础上结合同步测量的水文、生物、地球及化学参数数据所揭示的海洋过程分析光学性质变化的主要原因。本章首先对黄渤海水体光学性质在垂向剖面上的季节变化进行分析，然后对海色遥感上最为关心的表层水体的季节变化进行分析。对于垂向剖面上的变化主要选取 3 个典型断面进行分析，这 3 个断面分别是横跨渤海断面 (T1)、北黄海中部成山头至鸭绿江口断面 (T2) 以及南黄海中部 35°N 断面 (T3)，其具体位置如图 2-1 中红线所示。

3.1 垂向剖面光学性质的季节变化

本节主要对黄渤海水体 3 个典型断面处的光学性质在垂向深度上的季节变化进行分析。本节安排如下：对于每个典型断面，首先分析其光学性质的变化特征，然后分析其水文及生物地球化学参数的变化特征及其所揭示的海洋过程，最后利用所揭示的海洋过程分析光学性质变化的原因。

3.1.1 断面 1 光学性质的季节变化

1) 光学性质的变化特征

i) 吸收系数

图 3-1 是断面 1 水体吸收系数在 443nm 处 (a_{nw443}) (注：本论文中的吸收系数指的是除去纯水贡献后的吸收系数，散射及后向散射系数除非特别标明也表示除去纯水贡献后的散射及后向散射系数) 的季节变化特征 (其中，图中的竖直虚线代表实测剖面，下同)。幅值变化：整体相对变化量 (即最大值与最小值之差除以最小值) 为 6.15，其中春季， a_{nw443} 的最小值为 0.27m^{-1} ，最大值为 1.01m^{-1} ，平均值为 0.37m^{-1} ；夏季， a_{nw443} 的最小值为 0.36m^{-1} ，最大值为 1.21m^{-1} ，平均值为 0.67m^{-1} ；秋季， a_{nw443} 的最小值为 0.37m^{-1} ，最大值为 1.23m^{-1} ，平均值为 0.63m^{-1} ；冬季， a_{nw443} 的最小值为 0.51m^{-1} ，最大值为 1.93m^{-1} ，平均值为 0.67m^{-1} (注：由于受地理位置及天气等方面的影响，实际测量并未完全覆盖整个断面，因此，上述数值仅是图示所测区域的一般特征，下同)。垂向结构和整体分布态势：春季，最西端的水体剖面 and 位于 120°E 以东的水体剖面吸收系数的垂向分布存在分层现象，分层结构为 3 层结构，即上均匀层 (幅值最低)、中变化层 (层

厚较小,最大仅约 5m,幅值随深度逐渐增大)和底均匀层(幅值最大),中部(119°E 以东至 120°E 以西)的水体剖面垂向分布均匀,无分层现象,水体的吸收系数在整个断面内最小;夏季,因西部水域无实测数据,无法定量其分布特征,但从 119.4°E 以东的断面分布来看,除在 120.2°E-120.4°E 区域水体垂向剖面吸收系数垂向分布较为均匀无分层现象且幅值最大外,对于其两侧的水体剖面均呈现明显的分层现象,分层同样为 3 层结构,即上均匀层,中变化层,底均匀层,且从上至下吸收系数逐渐变大;秋季,以位于 119.5°E 附近的剖面为中心,从两侧向该中心区域方向吸收系数成递减分布趋势,且分层现象依然存在,且上均匀层不仅幅值变大,厚度也较大;冬季,整个断面内的吸收系数在幅值上明显较其他季节高,且分层不明显。整体上对于断面 1 的吸收系数除夏季在 120.2°E-120.4°E 区域水体垂向剖面吸收系数较大外,呈现出秋冬季节较高,春夏季节较低分布态势。

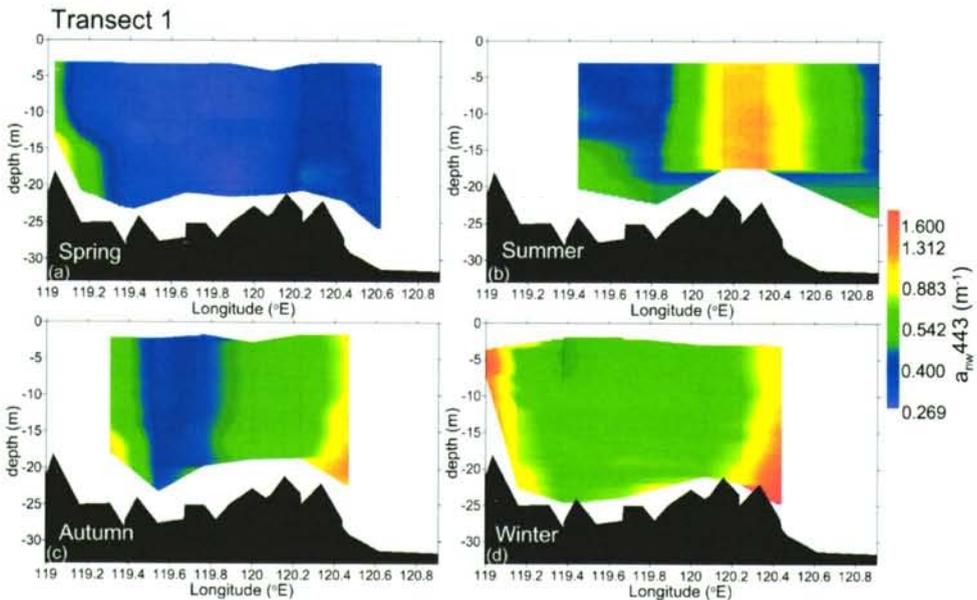


图 3-1 断面 1 吸收系数 a_{nw443} 的季节分布,其中黑色区域的上端所处深度表示实际所测水体深度(下同)

ii) 散射系数

图 3-2 是断面 1 的水体散射系数在 532nm 处 (b_p532) 的季节变化特征。

幅值变化:其整体相对变化量为 16.04,约为吸收系数的 2.6 倍,其中春季, b_p532 的最小值为 $1.39m^{-1}$,最大值为 $12.45m^{-1}$,平均值为 $2.53m^{-1}$;夏季, b_p532 的最小值为 $1.31m^{-1}$,最大值为 $8.71m^{-1}$,平均值为 $3.35m^{-1}$;秋季, b_p532 的最小

值为 3.05m^{-1} , 最大值为 13.52m^{-1} , 平均值为 6.6m^{-1} ; 冬季, b_p532 的最小值为 5m^{-1} , 最大值为 22.32m^{-1} , 平均值为 8.05m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势: 与吸收系数的垂向结构和整体分布态势基本一致。

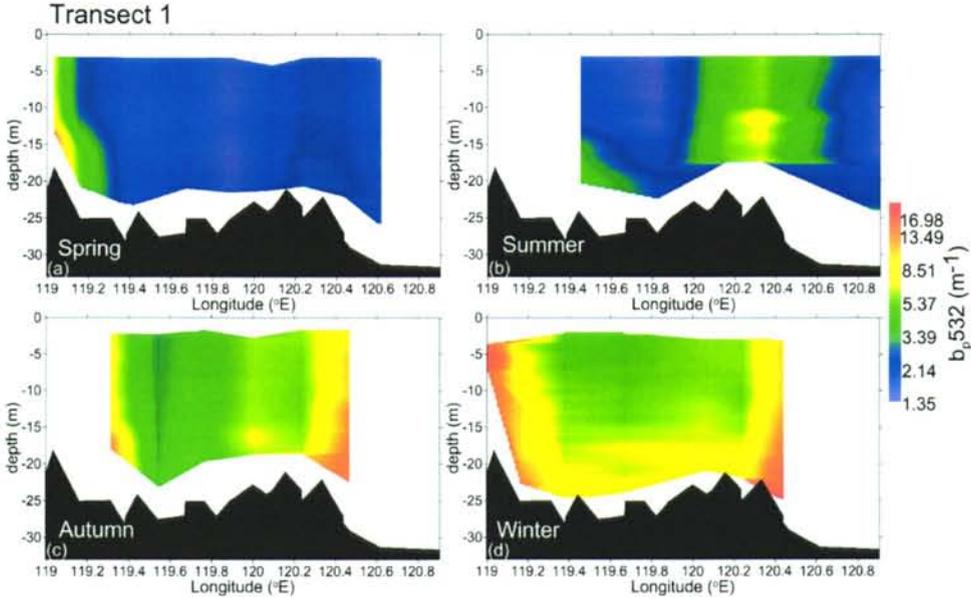
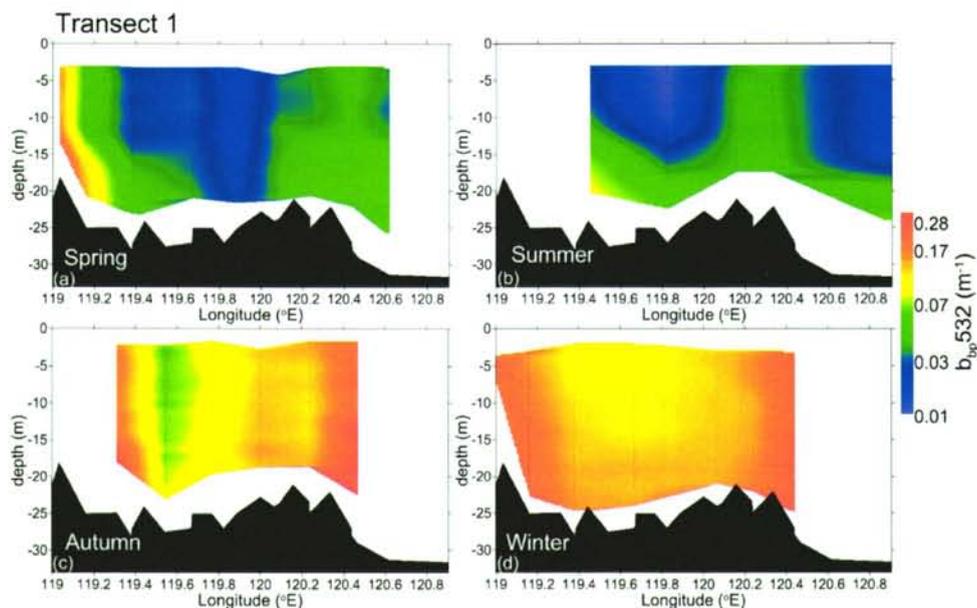


图 3-2 断面 1 散射系数 b_p532 的季节分布

iii) 后向散射系数

图 3-3 是断面 1 的水体后向散射系数在 532nm 处 (b_{bp532}) 的季节变化特征。幅值变化: 其整体相对变化量为 30.8, 接近散射系数的 2 倍, 其中春季, b_{bp532} 的最小值为 0.0147m^{-1} , 最大值为 0.2276m^{-1} , 平均值为 0.0461m^{-1} ; 夏季, b_{bp532} 的最小值为 0.0099m^{-1} , 最大值为 0.0865m^{-1} , 平均值为 0.0333m^{-1} ; 秋季, b_{bp532} 的最小值为 0.0575m^{-1} , 最大值为 0.3148m^{-1} , 平均值为 0.1416m^{-1} ; 冬季, b_{bp532} 的最小值为 0.0989m^{-1} , 最大值为 0.2335m^{-1} , 平均值为 0.1529m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势: 与散射系数及吸收系数基本一致。

图 3-3 断面 1 后向散射系数 $b_{bp,532}$ 的季节分布

iv) 后向散射比

图 3-4 是断面 1 的水体后向散射比在 532nm 处 ($b_{bp,532}/b_p,532$) 的季节变化特征。幅值变化: 春季, 最小值为 0.01m^{-1} , 最大值为 0.026m^{-1} , 平均值为 0.017m^{-1} ; 夏季, 最小值为 0.004m^{-1} , 最大值为 0.024m^{-1} , 平均值为 0.012m^{-1} ; 秋季, 最小值为 0.017m^{-1} , 最大值为 0.027m^{-1} , 平均值为 0.021m^{-1} ; 冬季, 最小值为 0.017m^{-1} , 最大值为 0.027m^{-1} , 平均值为 0.021m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势: 明显不同于吸收、散射及后向散射系数的分布特征, 其中春季, 断面两侧水体的后向散射比均大于 0.018 , 中间区域水体整体较低, 其值约为 0.012 , 靠近两侧的水体 13m 以浅水体的后向散射比较小, 其值约为 0.013 , 而位于约 15m 以下的底层水则具有较大的后向散射比, 值约为 0.018 ; 夏季, 后向散射比的分布形式与春季相似, 只是整体后向散射比的值均低于春季, 尤其在 $120.2^\circ\text{E}-120.4^\circ\text{E}$ 区域附近的水体后向散射比更低 (其值约为 0.008 左右), 这与吸收、散射及后向散射系数在该区域的分布明显不同; 秋季和冬季, 其值在整个断面均较高, 均高于 0.017 。

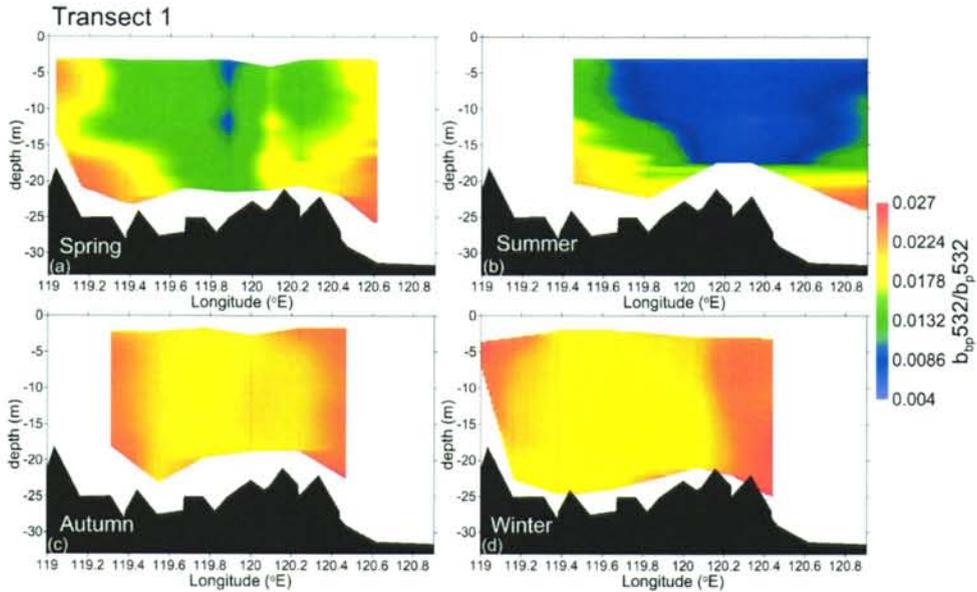


图 3-4 断面 1 后向散射比 b_{bp532}/b_{p532} 的季节分布

2) 水文及生物地球化学参数变化特征

i) 温度及盐度

图 3-5 和 3-6 是断面 1 温度及盐度的季节变化特征。从图中可以看出，对于温度，春季，水温较低，水体平均温度约为 11°C ，水体存在分层现象，但不明显；夏季，随着太阳辐射的增强，水体温度整体较高且分层明显，表层与底层水体温差约为 5°C ，其中位于断面东部（即 120.2°E 以东）水体的上混合层的深度（约为 16.5m ）明显大于 120.2°E 以西水体（约为 11m ）；秋季，随着太阳辐射的减弱及大风天气的频繁发生，水体温度明显降低，且上下混合均匀，剖面无跃层出现；冬季，随着太阳辐射的进一步减弱以及大风过程的进一步频繁发生，水体温度进一步降低，但与春季相比仍略高于春季，这主要是由于此时的冬季正值初冬，水体温度还在进一步降低中。对于盐度，除夏季略有分层外，其余季节垂向分布较为均匀；此外，断面 1 盐度的分布存在一显著特点，即最西部水体剖面的盐度相对偏低，结合图 2-1 所示断面 1 的地理位置可以看出，这主要是受黄河淡水的注入所致。

上述断面 1 温度及盐度的季节变化特征揭示出：对于断面 1，秋季和冬季，水体垂向混合作用较强，整个断面上下混合较为均匀；春季垂向混合作用开始减弱，水体开始出现分层结构；夏季，水体的垂向混合作用进一步降低，跃层也相应的增强；此外，对于断面 1，其西部水体除物理强迫外，四季均受到黄河注入

的影响。

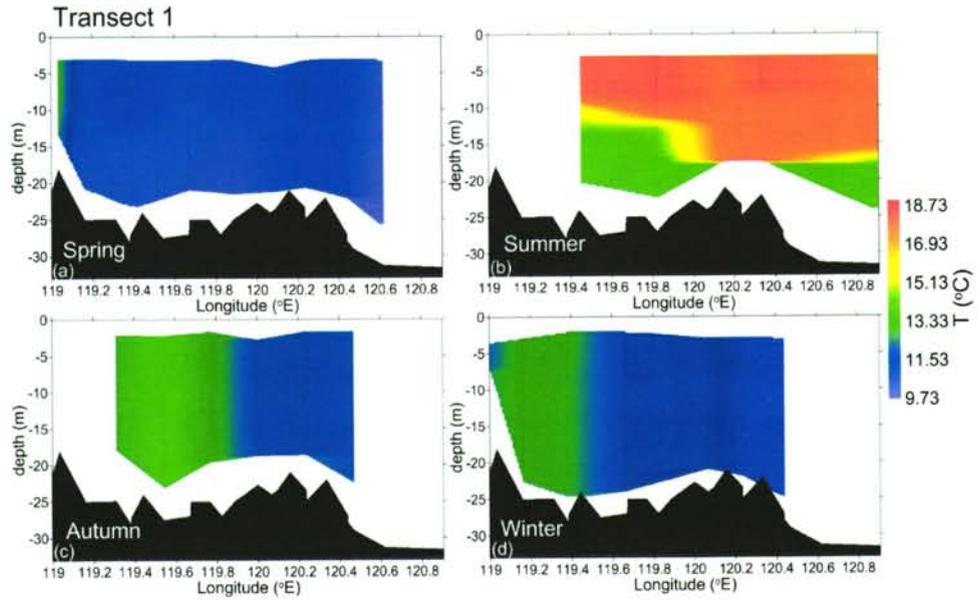


图 3-5 断面 1 温度的季节分布

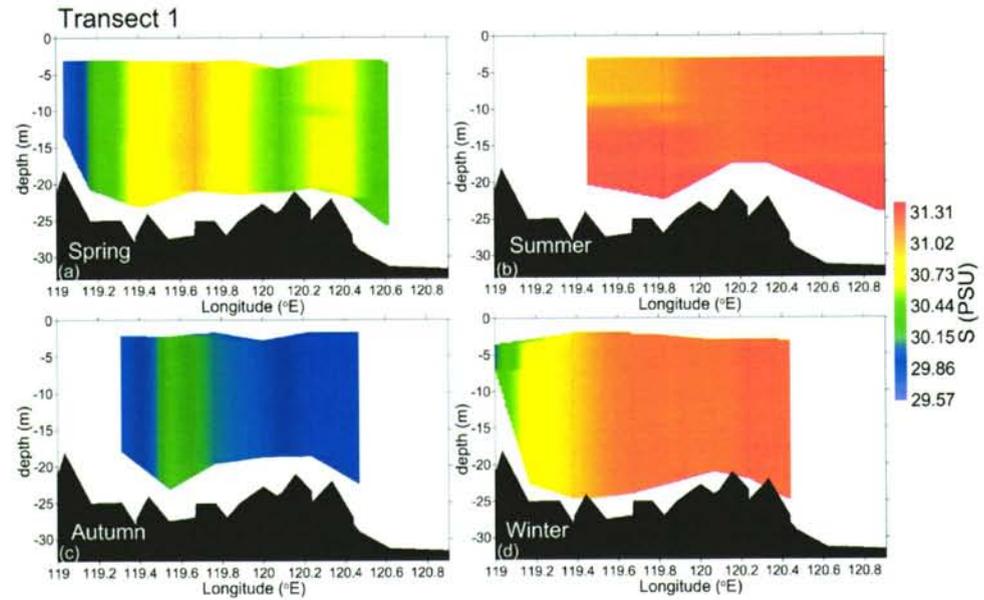


图 3-6 断面 1 盐度的季节分布

ii) 叶绿素浓度

图 3-7 是断面 1 的叶绿素浓度的季节变化特征。可以明显的看出叶绿素浓度变化的季节性差异。其中, 夏季叶绿素浓度最高, 尤其在 120.2°E-120.4°E 区域附近, 其整个所测量层内叶绿素浓度分布较为均匀, 且含量甚高, 其值约为 30 $\mu\text{g/L}$; 春季次之; 对于秋季和冬季, 水体整体生物量较低, 叶绿素浓度在整个断面均低于 1 $\mu\text{g/L}$ 。

上述叶绿素浓度的分布特征揭示出: 浮游植物的生长主要发生在春季和夏季, 秋季和冬季, 受温度及光照的限制, 浮游植物含量较低; 特别在位于 120.2°E-120.4°E 区域附近的水体浮游植物生物量较高, 尤其在夏季, 浮游植物在该区域生长较为迅速。

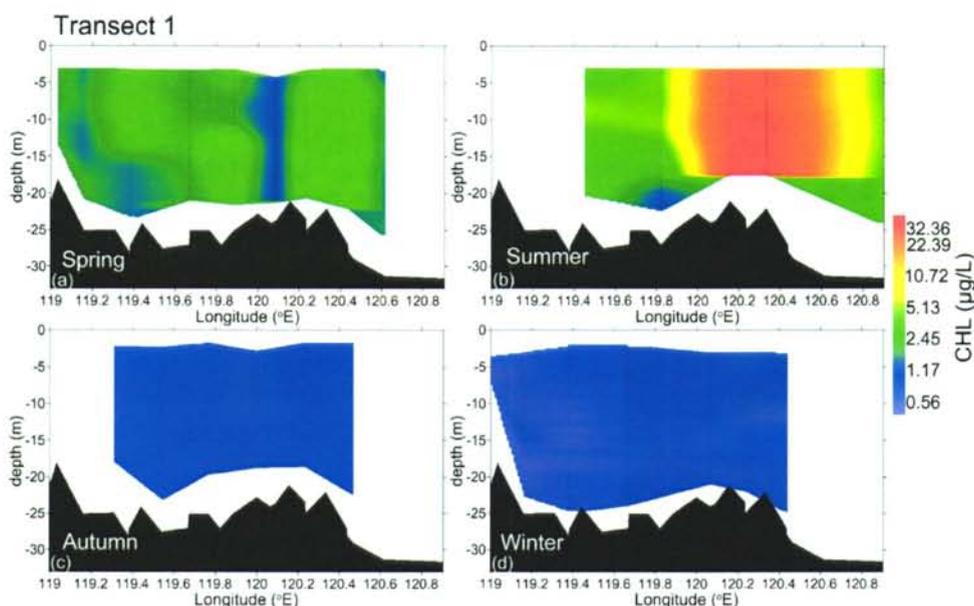


图 3-7 断面 1 叶绿素浓度的季节分布

iii) 浊度

图 3-8 是断面 1 浊度的季节变化特征, 可以看出, 对于秋季和冬季, 整个断面浊度较高, 均在 5FTU 以上, 且各剖面垂向分布较为均匀, 断面两侧浊度明显高于中部水体; 春季, 除靠近黄河口一侧浊度较高外 (与秋冬水平相当), 位于 120°E 以东的水体浊度也较高, 约为 3FTU, 且底层水体高于上表层水体; 夏季除在 120.2°E-120.4°E 区域附近浊度较高外 (约为 4FTU), 其余剖面水体浊度呈现明显的分层现象, 底层水体的浊度 (平均值为 4.5FTU) 明显高于上表层水体浊度

(约为 1.2FTU)。

上述浊度的分布特征表明：断面 1 季节上悬浮物浓度的差异主要源自水体垂向混合动力的季节性差异，秋冬季节，大风及降温导致的垂向混合动力较强，底层沉积物易被带到上层水体；靠近黄河口的悬浮物浓度的较高除受上述的影响外还受到黄河高悬浮物浓度的水体的输入的影响；此外，浮游植物的增长也会导致悬浮物浓度的升高，如夏季在 120.2°E-120.4°E 区域附近浊度较高；对于春夏季的底层水体悬浮物浓度的较大表明虽然跃层的存在阻碍底层水体的向上混合，但潮波所致的底层摩擦力会引起底层沉积物的再悬浮，使得跃层以下的底层水体的悬浮物浓度较高。

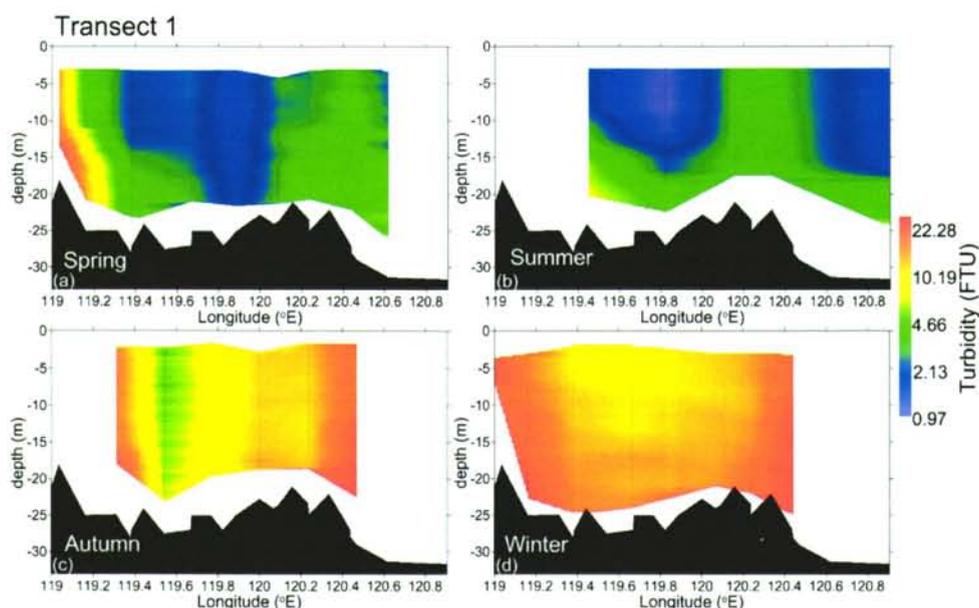


图 3-8 断面 1 浊度的季节分布

3) 光学性质变化的主要原因

由上述水文及生物地球化学要素（温度、盐度、叶绿素浓度及浊度）的分布特征及其反映的海洋过程可以看出，断面 1 光学性质的变化可以做如下解释：夏季，靠近黄河口的水域受到黄河浑浊水体输入的影响，悬浮物浓度较高，因此吸收系数 a_{nw443} 、散射系数 b_p532 及后向散射系数 b_{bp32} 在高的悬浮物浓度影响下均也较高，同时由于黄河输入的淡水中主要由大量的无机泥沙构成，因此后向散射比也较高；而对于远离河口的断面上，受潮波产生的底部摩擦力所致，海底沉积物的再悬浮使得底层水体的悬浮颗粒物浓度较高，因此底层水体的 a_{nw443} 、

b_p532 及 $b_{bp}32$ 均也较高, 同时该断面底层沉积物主要为无机砂质类型, 因此后向散射比也较大, 对于上层水体, 在强跃层的阻碍下, 底部再悬浮的沉积物无法通过跃层进入上层水体, 同时由于该季节浮游植物生长较为良好, 上层水体的浮游植物颗粒较多, 因此上层水体的光学性质主要由浮游植物主导, 浮游植物由于高的水含量, 故其后向散射效率较低, 因此后向散射比较小, 在浮游植物含量高的水域, 相应的 $a_{nw}443$ 、 b_p532 及 $b_{bp}32$ 也较大, 并在浮游植物含量极高的 120.2°E - 120.4°E 区域附近 $a_{nw}443$ 、 b_p532 及 $b_{bp}32$ 也同样显著较高。对于秋冬季节, 伴随着大风降温天气的发生, 水体的垂向混合动力较强, 这一方面使得底部摩擦力增大导致更多的海底沉积物再悬浮, 另一方面使得底层高浓度的沉积物悬浮到上层水体, 再加上靠近黄河口水域继续受河流输入的影响, 因此整个断面在秋冬季节, $a_{nw}443$ 、 b_p532 、 $b_{bp}32$ 及后向散射比均较高, 此外秋冬季节, 浮游植物的生物量较低, 其对光学性质的贡献较小, 较高的 $a_{nw}443$ 、 b_p532 、 $b_{bp}32$ 及后向散射比主要源于非色素颗粒的底层沉积物。春季, 随着气温的回暖以及风力的减弱, 水体的垂向混合动力减弱, 同时跃层开始出现, 这进一步阻止了底层水体的向上运动, 此时浮游植物也开始生长, 除黄河口附近水体受黄河水注入的影响依然较大外, 其余水体的光学性质均明显降低。

3.1.2 断面 2 光学性质的季节变化

1) 光学性质变化特征

i) 吸收系数

图 3-9 是断面 2 的 $a_{nw}443$ 的季节分布特征。幅值变化: 整体相对变化量为 20.17, 其中春季, $a_{nw}443$ 的最小值为 0.12m^{-1} , 最大值为 0.59m^{-1} , 平均值为 0.30m^{-1} ; 夏季, $a_{nw}443$ 的最小值为 0.14m^{-1} , 最大值为 0.57m^{-1} , 平均值为 0.27m^{-1} ; 秋季, $a_{nw}443$ 的最小值为 0.13m^{-1} , 最大值为 2.54m^{-1} , 平均值为 0.31m^{-1} ; 冬季, $a_{nw}443$ 的最小值为 0.16m^{-1} , 最大值为 0.76m^{-1} (这里由于冬季相较于秋季其西部离山东半岛岸边较远, 因此最大值相对较小, 但就同一水域而言, 和秋季水平相当, 下同), 平均值为 0.25m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势: 春季, 除靠近鸭绿江口的水体垂向分布较为均匀且幅值较大外, 其余水体的垂向分布均呈现出如下特征: 不仅在 15m 深度附近出现厚度不等的极大层, 而且对于极大层下方至海底深度内的水体, 其吸收系数随着深度的增加逐渐增大; 夏季, 断面 2 的分布特征同春

季较为相似,只是在 15m 深度处的极大层的厚度较之春季明显变低许多;秋季,极大层消失,除 123.5°E 以东至鸭绿江口的水体垂向分布较为均匀外,对位于 123.5°E 以西至成山头的水域呈现明显的两层结构,即上均匀层和下逐渐增大层,其中对于 30m 以浅水域,从成山头至鸭绿江口并不是呈现连续的递增或递减的变化趋势,而是呈从成山头至 123.2°E 方向逐渐递减,从 123.2°E 至 123.9°E 方向又慢慢的开始增加,123.9°E 至鸭绿江口接着开始降低的分布特征;冬季,除位于 123.25°E 附近的水体垂向上在 23m 以浅的水体的吸收系数相对较高外,整体呈现出从成山头至鸭绿江口逐渐降低的分布特征,尤其对于 35m 以深的水体表现的更为明显;整体上对于断面 2 来说,其吸收系数的幅值在四季相差不大。

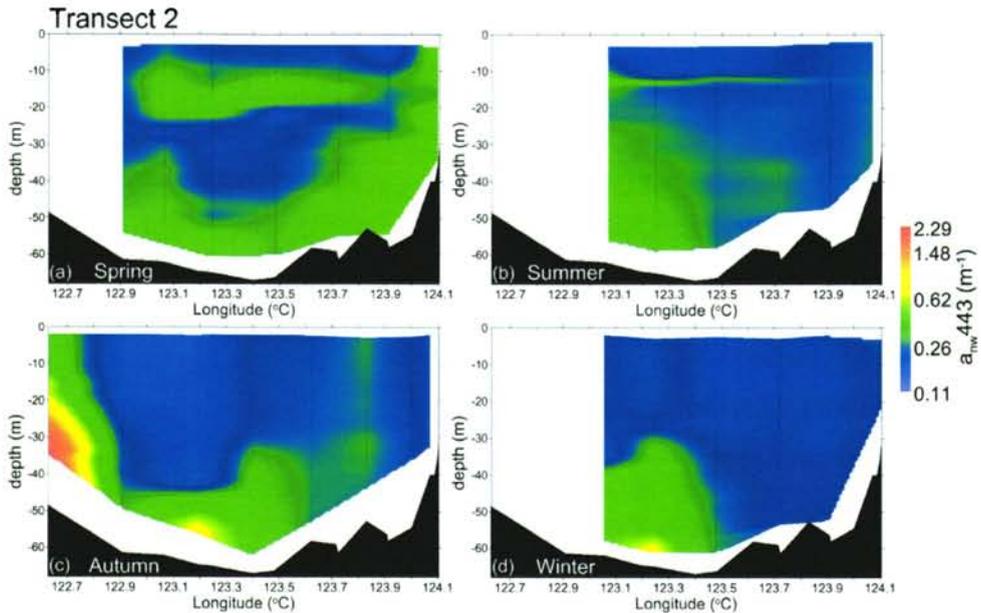


图 3-9 断面 2 的吸收系数 a_{nw443} 的季节分布

ii) 散射系数

图 3-10 是断面 2 散射系数 b_p532 的季节分布特征。幅值变化:整体相对变化量为 226.78,其中春季, b_p532 的最小值为 0.58m^{-1} ,最大值为 3.98m^{-1} ,平均值为 1.59m^{-1} ;夏季, b_p532 的最小值为 0.24m^{-1} ,最大值为 2.55m^{-1} ,平均值为 0.83m^{-1} ;秋季, b_p532 的最小值为 0.16m^{-1} ,最大值为 20.5m^{-1} ,平均值为 1.55m^{-1} ;冬季, b_p532 的最小值为 0.09m^{-1} ,最大值为 3.59m^{-1} ,平均值为 0.64m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势:在春夏季同吸收系数的分布较为相似;秋季除对于 123.4°E 至鸭绿江口方向的变化呈现递减的分布特征与吸收系数不同外,其余分布特征与吸收系

数相似；冬季除位于 123.25°E 附近的水体垂向上在 25m 以浅的水体与吸收系数不同外，其余分布特征同吸收系数相似。

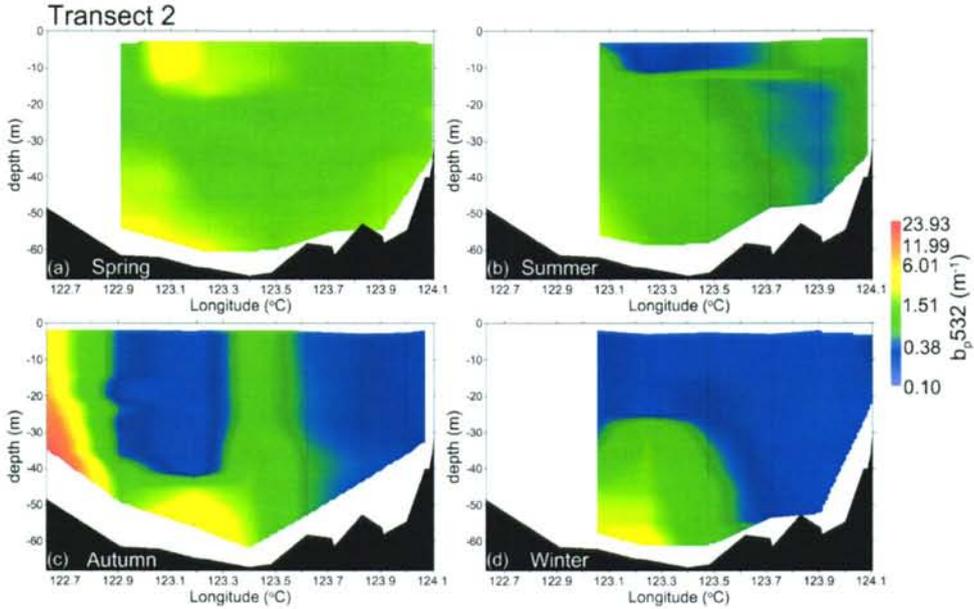


图 3-10 断面 2 的散射系数 b_{p532} 的季节分布

iii) 后向散射系数

图 3-11 是断面 2 的后向散射系数 b_{bp532} 的季节分布特征。幅值变化：整体相对变化量为 367，其中春季， b_{bp532} 的最小值为 0.0041m^{-1} ，最大值为 0.1197m^{-1} ，平均值为 0.0271m^{-1} ；夏季， b_{bp532} 的最小值为 0.0024m^{-1} ，最大值为 0.0693m^{-1} ，平均值为 0.0185m^{-1} ；秋季， b_{bp532} 的最小值为 0.002m^{-1} ，最大值为 0.736m^{-1} ，平均值为 0.04m^{-1} ；冬季， b_{bp532} 的最小值为 0.002m^{-1} ，最大值为 0.124m^{-1} ，平均值为 0.0174m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势：与散射系数的分布特征在四季均较为一致。

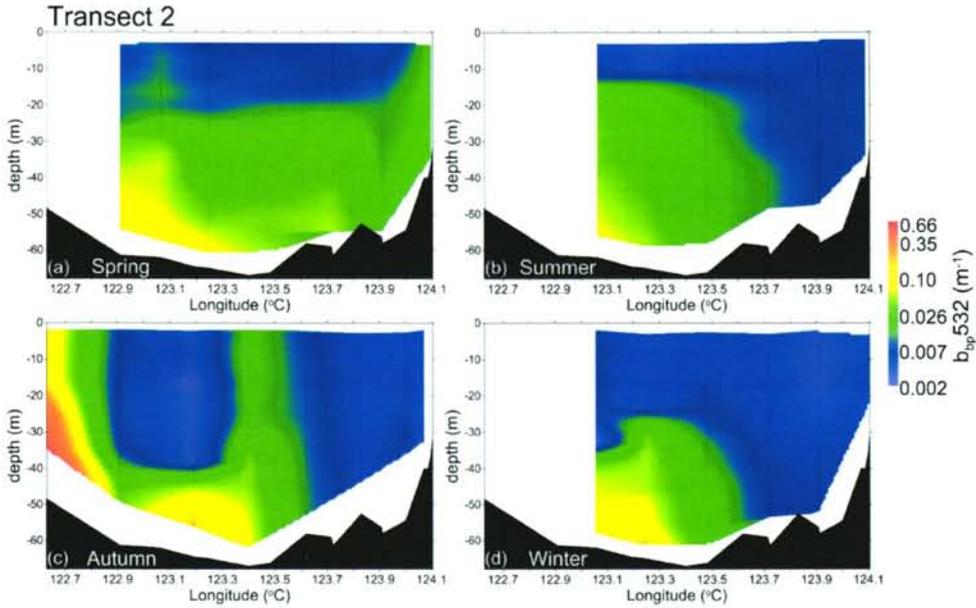


图 3-11 断面 2 的后向散射系数 b_{bp532} 的季节分布

iv) 后向散射比

图 3-12 是断面 2 的后向散射比 b_{bp532}/b_p532 的季节分布特征，春季，其在 20m 以浅水域及 123.9°E 及其以东剖面水域的后向散射比较低，均小于 0.013，其余水域则在 0.02 以上；夏季，15m 以浅水域的后向散射系数均小于 0.013，其余水域则较高，尤其是相应后向散射系数较大的水域，其值接近 0.03；秋季，除 123.2°E 剖面的 15-35m 水深内及 123.8°E 剖面内较低外，其余均高于 0.015；冬季，除位于 123.25°E 附近的水体垂向上在 23m 以浅的水体和靠近鸭绿江口的剖面值较低外，其余水域基本都在 0.015 之上。

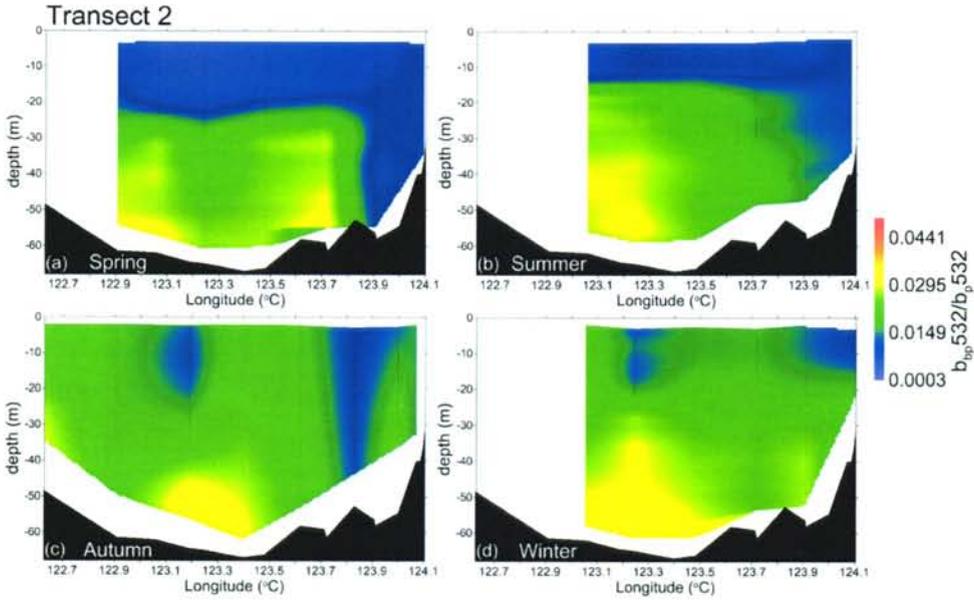


图 3-12 断面 2 的后向散射比 $b_{p,532}/b_{bp,532}$ 的季节分布

2) 水文及生物地球化学参数季节变化特征

i) 温度及盐度

图 3-13 和 3-14 是断面 2 温盐季节和空间分布特征，对于温度，位于 124°E 以西的水体在春夏季呈现明显的分层特征，上层水体水温显著高于底层水体，最大温差发生在夏季，可达 11°C ；位于 124°E 以东的水体全年无跃层，上下分布一致；在秋冬季节，仍有跃层存在，但是上混合层深度与春夏季相比明显较深，最深可达 40m 左右。此外较为特别的是秋季位于 123.4°E 的剖面，其垂向温度分布较为均匀，并且温度值低于周围水体，其值与同期底层水温一致。对于盐度，其与温度的分布趋势较为一致，只是温度高的水域对应着盐度低，温度低的则盐度高，此外分层也不像温度那么明显。同样可以看出秋季位于 123.4°E 的剖面，其垂向盐度分布也较为均匀，并且盐度值高于周围水体，其值与同期底层盐度一致。

上述温盐的季节和空间变化特征揭示出：对于断面 2，秋季和冬季，水体垂向混合作用较强，但不足以使整个垂向剖面内均匀混合，在较深水域仍有分层现象；春季垂向混合作用开始减弱，除靠近鸭绿江口的水域垂向混合仍然较为均匀外，其余水体开始出现分层结构；夏季，水体的垂向混合作用进一步降低，跃层较强，但厚度较小，对于靠近鸭绿江口的水体，垂向混合依然较为均匀；同时，在秋季靠近成山头的水域低盐的特征反映出黄河入海水在秋冬季节的山东半岛

沿岸流的携带下亦流经此地，而靠近鸭绿江口的水体在秋冬季节的低盐特征表明其在秋冬季节也明显受到鸭绿江淡水注入的影响；此外，位于 123.4°E 的剖面温盐分布区特征揭示出此处水域存在上升流^[92]。

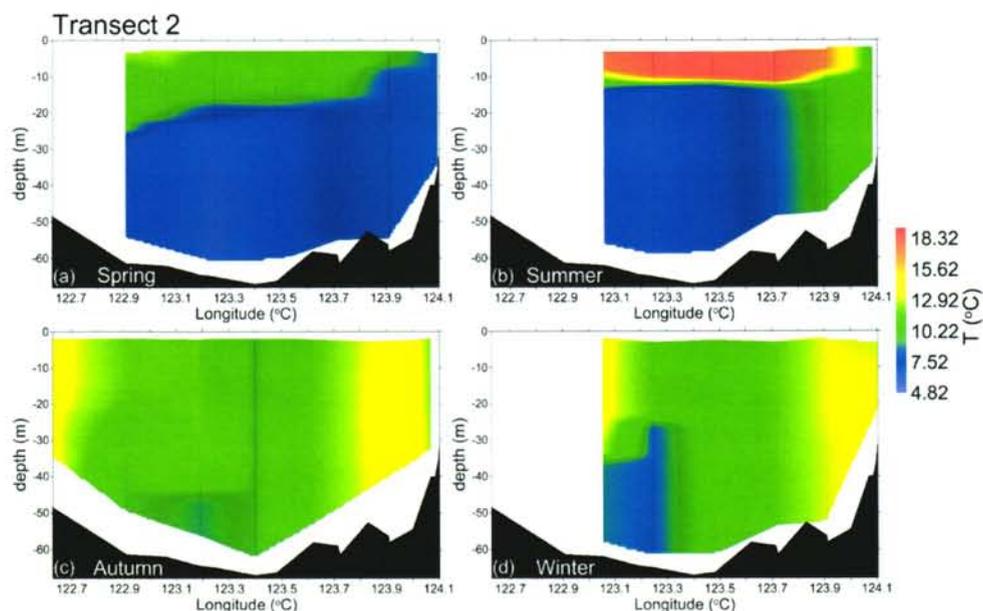


图 3-13 断面 2 的温度的季节分布

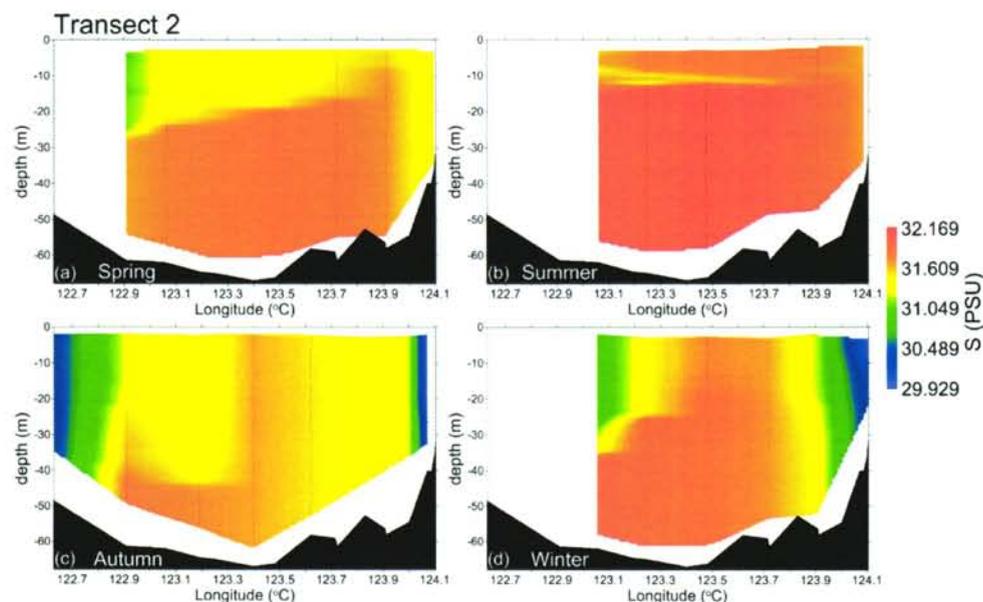


图 3-14 断面 2 的盐度的季节分布

ii) 叶绿素浓度

图 3-15 是断面 2 的叶绿素浓度季节和空间分布特征，其与断面 1 的季节变

化特征明显不同，叶绿素浓度全年均较高，尤其对于 123.5°E 以东水域。春季，叶绿素浓度最高，对于 123.7°E 及其以西水域，叶绿素次表层最大值较为明显，最大值可达 $13\ \mu\text{g/L}$ ，对于 123.7°N 以东水域，位于 8m 已深直到底层，叶绿素浓度含量较高，其值也约为 $13\ \mu\text{g/L}$ ；夏季，叶绿素次表层最大值较弱，仅在断面的西部水域相对较强，并且对于 123.7°E 以东水域，叶绿素浓度较春季有较大程度的降低，约为 $2\ \mu\text{g/L}$ ，与秋冬季水平相当；秋季，除靠近山东半岛的剖面叶绿素浓度整体较低外，其余剖面叶绿素浓度仍较高，尤其是位于 122.9°E 剖面的底层水体及 123.8°E 附近的水体；冬季，对于 123.1°E 及其以东的水域，除在 123.1°E 及其以东到 123.5°E 以西的水域 28m 以深水体的叶绿素浓度较低外，其余水域的叶绿素浓度同夏季水平相当。

上述叶绿素浓度的季节和空间变化特征揭示出：对于断面 2，浮游植物的生长与断面 1 不同，其不仅在春夏季生长较好，其在秋冬季节也表现出较好的生长趋势，尤其对于靠近鸭绿江口的水体，整个垂向深度上叶绿素含量均较高。

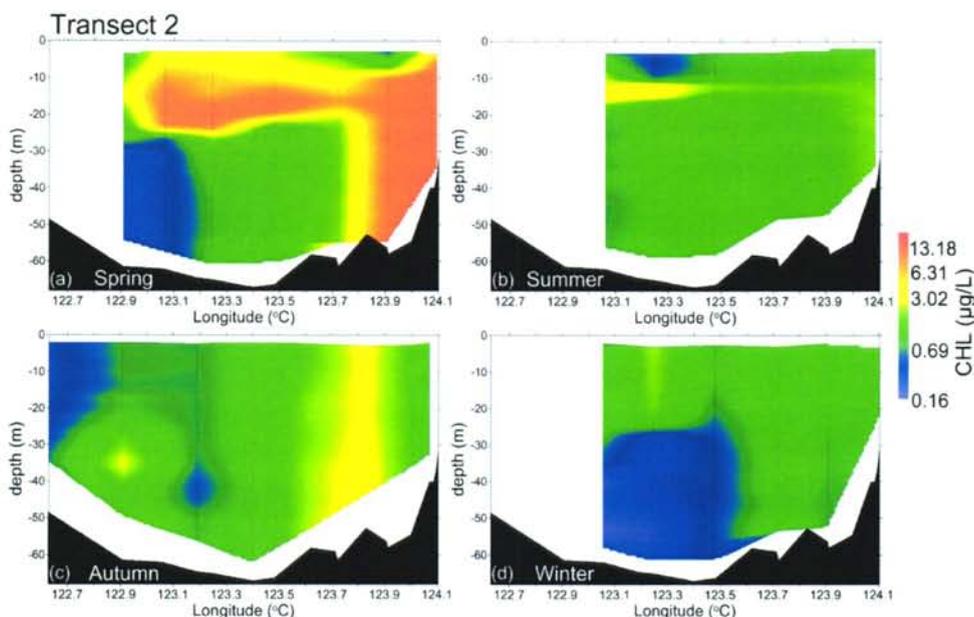


图 3-15 断面 2 的叶绿素浓度的季节分布

iii) 浊度

图 3-16 是断面 2 的浊度季节分布特征，对于 122.9°E 及其以东水域到 123.9°E 及其以西水域，其在四个季节均表现出分层现象，底层水体的浊度明显高于上层水体的浊度，其中，对于 123.4°E 剖面，秋季整个垂向上浊度较高，明显高于周

围水体；对于靠近鸭绿江口的剖面，其浊度垂向分布全年都较为均匀；此外，对于秋季，靠近山东半岛的浊度（约为 13FTU）远高于靠近鸭绿江口的浊度（约为 0.8FTU），冬季同样如此。

上述浊度的分布特征也表明：断面 2 季节上悬浮物浓度的差异主要源自水体垂向混合动力的季节性差异，对于靠近成山头的水体，其水体的垂向混合动力相较于靠近鸭绿江口的水体更强，因此悬浮物浓度较高；对于位于 123.4°E 的剖面，在上升流的作用下，底层再悬浮的沉积颗粒物被带到上表层水体，因此整个垂向剖面悬浮物浓度较高。

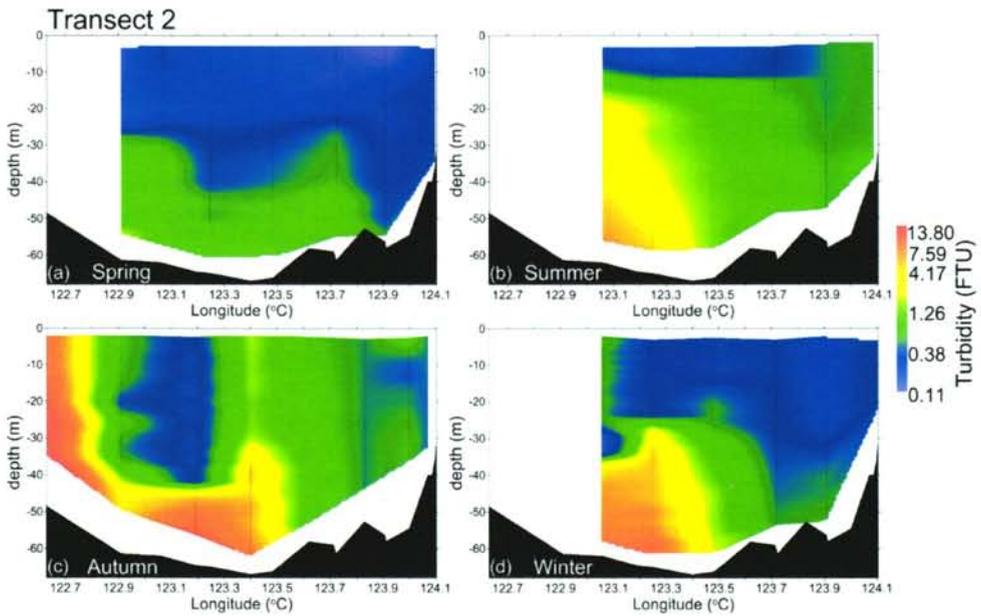


图 3-16 断面 2 浊度的季节分布

3) 光学性质变化的主要原因

由上述水文及生物地球化学要素的分布特征及其反映的海洋过程可以看出，断面 2 光学性质的变化可以作如下类似断面 1 的解释：夏季，整个断面垂向混合作用较弱，较强的层化进一步阻碍底层水体的上移，因此上层水体的颗粒物主要由有机的浮游植物颗粒所构成，使得上混合层内的后向散射比较小，在营养盐及光照的限制下，浮游植物在跃层内生长较好，形成叶绿素浓度的次表层最大值，但叶绿素浓度比起断面 1 夏季的叶绿素浓度却明显较小，在潮波引起的底部沉积物再悬浮的影响下，底质为泥质或砂质的悬浮沉积物的上移导致跃层及其以下水体的后向散射比随深度逐渐增大， b_p532 及 $b_{bp}532$ 也相应随深度逐渐增大，因此

对叶绿素浓度较高的水域表现不是很明显,整体呈现从表层至底层逐渐增大的趋势,对于吸收系数 a_{nw443} 来说,其除在潮波引起的底部沉积物再悬浮的影响下底层值随深度也不断增大外,在叶绿素最大层或跃层内同样表现除极大值分布特征;秋季和冬季,水体混合作用较强,尤其是靠近成山头的水体,由于垂向混合动力相较于靠近鸭绿江的水域更强,同时在山东半岛沿岸流的水平输运下,浑浊的黄河入海水也被携带至此,因此秋冬季节吸收、散射及后向散射系数整体在靠近成山头的水域较大,在远离成山头的水域方向逐渐减小,但对于秋季远离成山头的水域,由于浮游植物生长的差异以及上升流的影响,造成光学性质不是逐渐递减的趋势,在上升流的向上输运作用下,底层沉积物被输送到上层水体,因此位于 123.4°E 的剖面的光学性质较大,同时由于 123.4°E 至鸭绿江口的浮游植物含量较西部水域高,因此在 123.4°E 至鸭绿江口方向,光学性质没有很快的减小到 123.2°E 剖面上混合层的水平,相反,对浮游植物更敏感的吸收系数 a_{nw443} 在 123.8°E 附近水域垂向上受较高的浮游植物含量的影响反而与 123.4°E 上升流区相比更高,同样位于 123.25°E 附近的水体垂向上在 23m 以浅水体的吸收系数相对较高也是浮游植物的生长所致,此外,秋冬季节的后向散射比较小的区域也是有机的浮游植物颗粒的较多导致的,整体上在秋冬季节受底部再悬浮颗粒物的上移及河流的影响,水体的无机颗粒物相对较高,后向散射比相对夏季较高;春季,随着大风天气的减少及气温的回升,水体的垂向混合作用慢慢的减弱,层化效应越为明显,尤其在远离鸭绿江口的水域,层化效应更为明显,底层沉积物很难悬浮至上混合层,光学性质变化的原因与夏季相同,对于靠近鸭绿江口的水域,虽然水体的层化不是那么强烈,但水体的垂向混合动力较弱,且浮游植物含量较高,导致后向散射比较小,吸收系数相对较大。

3.1.3 断面 3 光学性质的季节变化

1) 光学性质变化特征

i) 吸收系数

图 3-17 是断面 3 的 a_{nw443} 的季节分布特征。幅值变化:整体相对变化量为 12.73,其中春季, a_{nw443} 的最小值为 0.051m^{-1} ,最大值为 0.70m^{-1} ,平均值为 0.19m^{-1} ;夏季, a_{nw443} 的最小值为 0.10m^{-1} ,最大值为 0.41m^{-1} ,平均值为 0.21m^{-1} ;秋季, a_{nw443} 的最小值为 0.08m^{-1} ,最大值为 0.51m^{-1} ,平均值为 0.2m^{-1} ;冬季, a_{nw443}

的最小值为 0.12m^{-1} ，最大值为 0.37m^{-1} ，平均值为 0.19m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势：春季，除西部靠近海州湾的水域（即 121.5°E 以西的水域）无分层、垂向分布较为均匀外， 121.5°E 以东的水域呈现明显的分层结构，除底层水体吸收系数最高外，整个剖面上与前几个断面在春夏季的特征一致，均在垂向深度上出现极小值或极大值；夏季，整个断面上（包括 121.5°E 以西的水域）呈现出较为明显的分层结构，其中底层水体较高，上层水体与前几个断面不同，会在垂向深度上连续出现多个极小值和极大值；秋季和冬季的分布特征较为相似，对于 122°E 以西的浅水域，垂向混合都比较均匀，而对于 122°E 以东的深水域，水体呈现出显著的分层结构，其中底层水体的吸收系数较大，约 50m 以浅的水体内吸收系数较小且垂向分布较为均匀；此外，对于秋季 122°E 剖面的吸收系数要高于其西部与其临近的剖面的吸收系数，同时对于冬季 121.75°E 剖面也同样高于其西部与其临近的剖面的吸收系数。

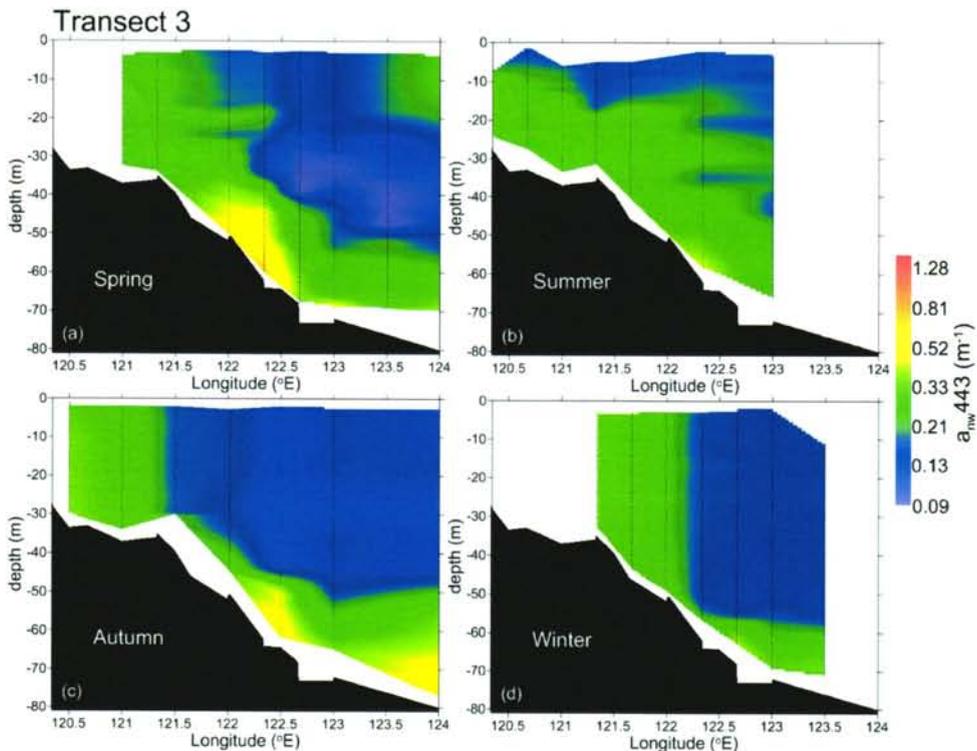


图 3-17 断面 3 的吸收系数 a_{w443} 的季节分布

ii) 散射系数

图 3-18 是断面 3 的散射系数 b_p532 的季节分布特征。幅值变化：整体相对变化量为 147.67，其中春季， b_p532 的最小值为 0.07m^{-1} ，最大值为 5.63m^{-1} ，平均值为 1.16m^{-1} ；夏季， b_p532 的最小值为 0.10m^{-1} ，最大值为 8.99m^{-1} ，平均值为 0.95m^{-1} ；秋季， b_p532 的最小值为 0.03m^{-1} ，最大值为 4.46m^{-1} ，平均值为 1.15m^{-1} ；冬季， b_p532 的最小值为 0.06m^{-1} ，最大值为 3.07m^{-1} ，平均值为 0.63m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势：与吸收系数基本一致。

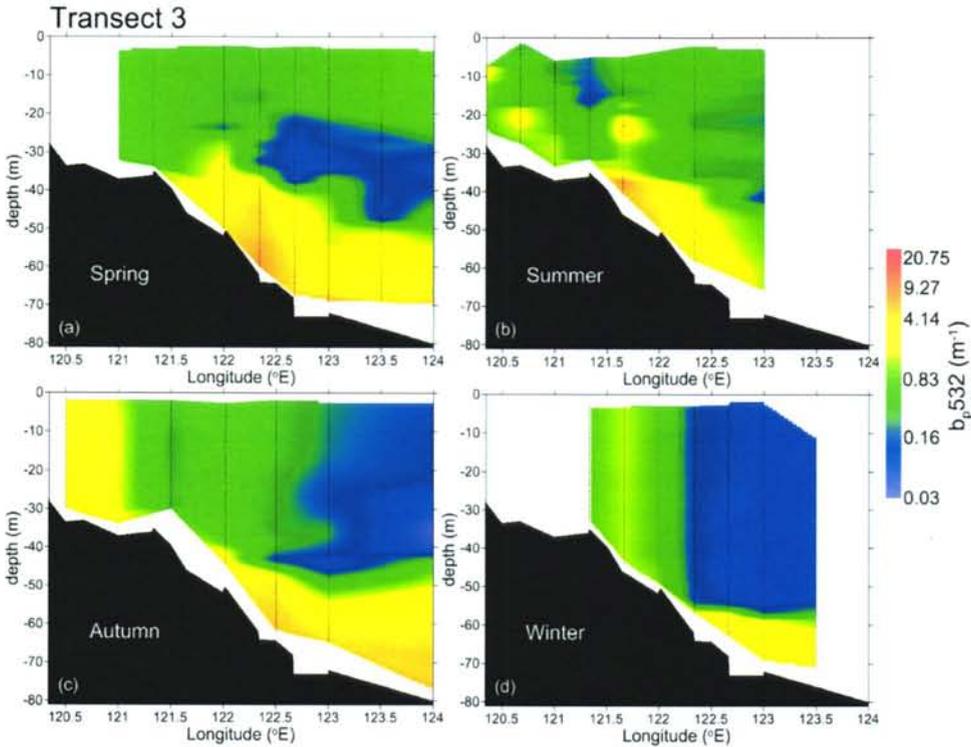
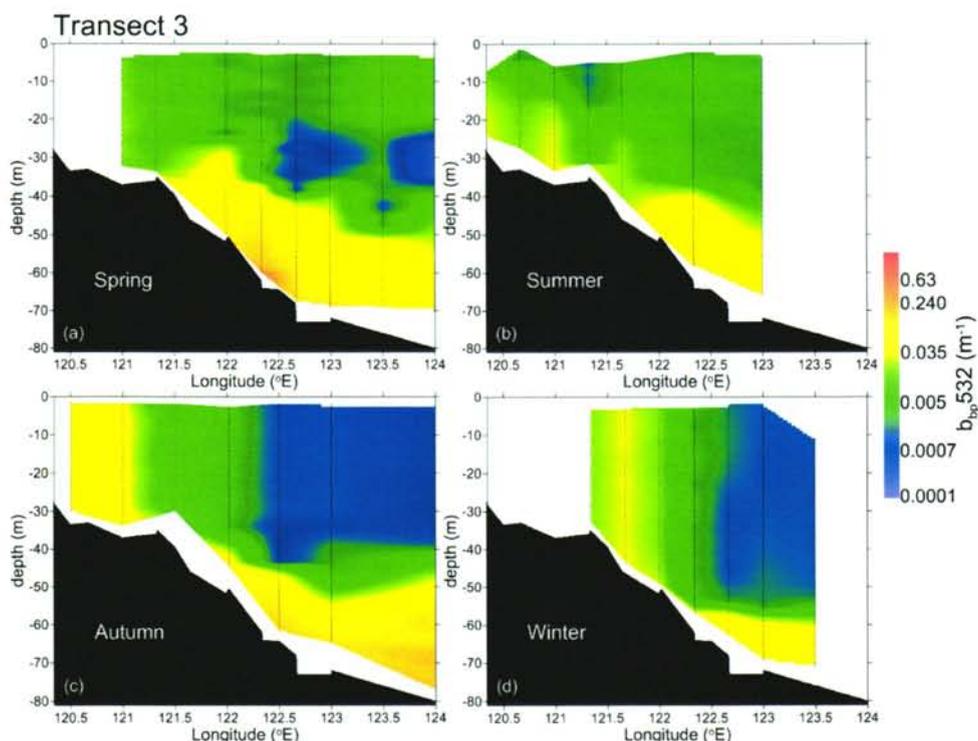


图 3-18 断面 3 的散射系数 b_p532 的季节分布

iii) 后向散射系数

图 3.19 是断面 3 的后向散射系数 $b_{bp}532$ 的季节分布特征。幅值变化：整体相对变化量为 251.2，其中春季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0003m^{-1} ，最大值为 0.2522m^{-1} ，平均值为 0.0238m^{-1} ；夏季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0014m^{-1} ，最大值为 0.0865m^{-1} ，平均值为 0.0164m^{-1} ；秋季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.001m^{-1} ，最大值为 0.1342m^{-1} ，平均值为 0.0257m^{-1} ；冬季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.001m^{-1} ，最大值为 0.0646m^{-1} ，平均值为 0.0137m^{-1} 。垂向结构和整体分布态势：与吸收及散射系数基本一致。

图 3-19 断面 3 的后向散射系数 $b_{bp,532}$ 的季节分布

iv) 后向散射比

图 3-20 是断面 3 的后向散射比 $b_{bp,532}/b_{p,532}$ 的季节分布特征。春季，断面西侧水深小于 40m 的水域，整个垂向上后向散射比较大，其值大于 0.015，水深大于 40m 的水域基本呈现明显的分层结构，上层水体的后向散射比较小，均小于 0.01，底层水体的后向散射比较大，均高于 0.015，最大可达 0.03；夏季，呈现较为明显的分层现象，上层水体较小，下层水体较高；秋季，对于水深小于 40m 的水体，整个垂向上后向散射比较春季明显增大，其值均在 0.02 以上，对于水深大于 40m 的水体，同样呈现明显的分层结构，上层水体的后向散射比均在 0.01 以下，而底层水体的后向散射比则基本均在 0.02 以上；冬季，对于水深小于 55m 的水域，整个剖面上后向散射比较高，均大于 0.02，对于水深大于 55m 的水域，后向散射比分布同样呈现分层结构，上混合层内的后向散射比明显较春季高，但也基本均小于 0.015，底层水体的值同样较高，基本均大于 0.02。

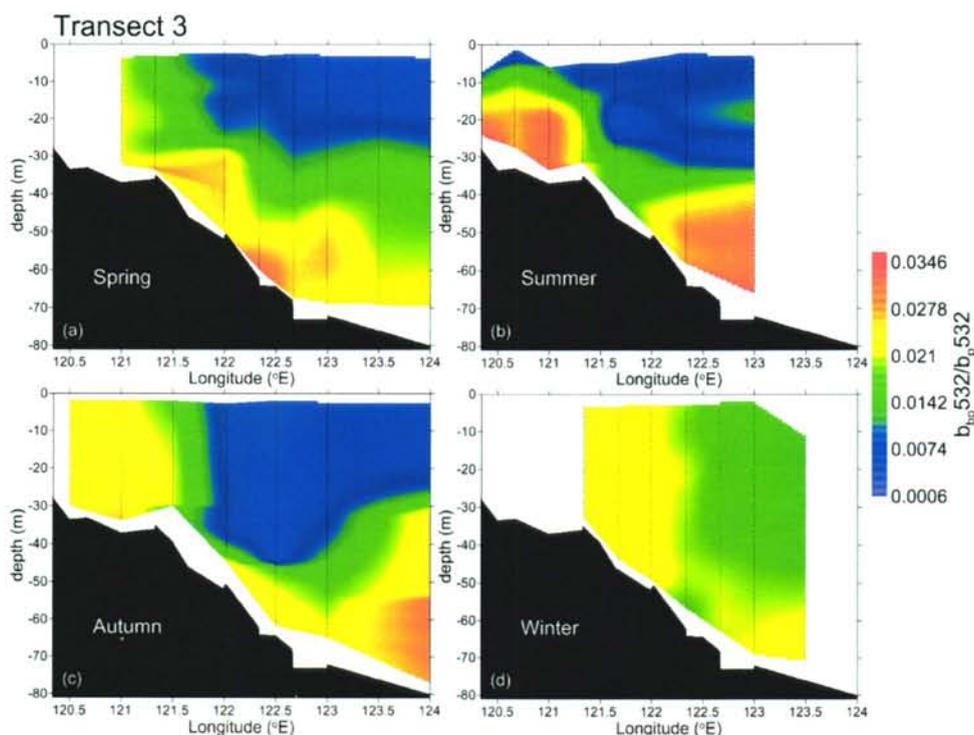


图 3-20 断面 3 的后向散射比 $b_{bp,532}/b_{p,532}$ 的季节分布

2) 水文及生物地球化学参数季节变化特征

i) 温度及盐度

图 3-21 至图 3-22 是断面 3 的温盐的季节分布特征。对于温度，春季，在位于 121.5°E 以西的水域，水体基本无分层，水温垂向分布较为均匀，在位于 121.5°E 以东的水域，水体分层较为明显，上混合层深度约为 20m 左右，上下温差约为 3°C ；夏季，上层水温明显较高，可达 19°C ，在位于 121.5°E 以西的水域，水体出现分层现象，但上混合层深度较浅，小于 10m，同时底层水体水温也明显升高，在位于 121.5°E 以东的水域，上混合层深度较之春季变浅，约为 15m 左右，跃层深度变厚，上混合层与底层水温差较大，约为 12°C ；秋季，对于水体深度小于 50m 的水域，水体分层消失，垂向分布较为均匀，对于深度大于 50m 的水域，水体分层依然明显，同时跃层深度进一步变浅，上混合层深度较深，约是春季的 2 倍，最深可达 50m；冬季，水温分布特征基本与秋季一致，但上混合层深度明显进一步加深，约 55m，同时跃层深度较小。对于盐度，其分布特征与温度类似，只是对于出现分层的水体，上层水体盐度较小，底层水体盐度较大，同时断面西侧盐度明显低于断面东侧水体盐度。

上述温盐的季节和空间变化特征揭示出：对于断面 3，122°E 以西至海州湾方向的水域，由于水深较浅，水体在秋冬季节的垂向混合动力最强，整个垂向深度内水体混合较为均匀；对于 122°E 以东的深水区，夏季的垂向混合作用最弱，春季稍强，秋冬季节最强，但与近岸相比，由于水深较深，仍不能将整个剖面混合均匀。

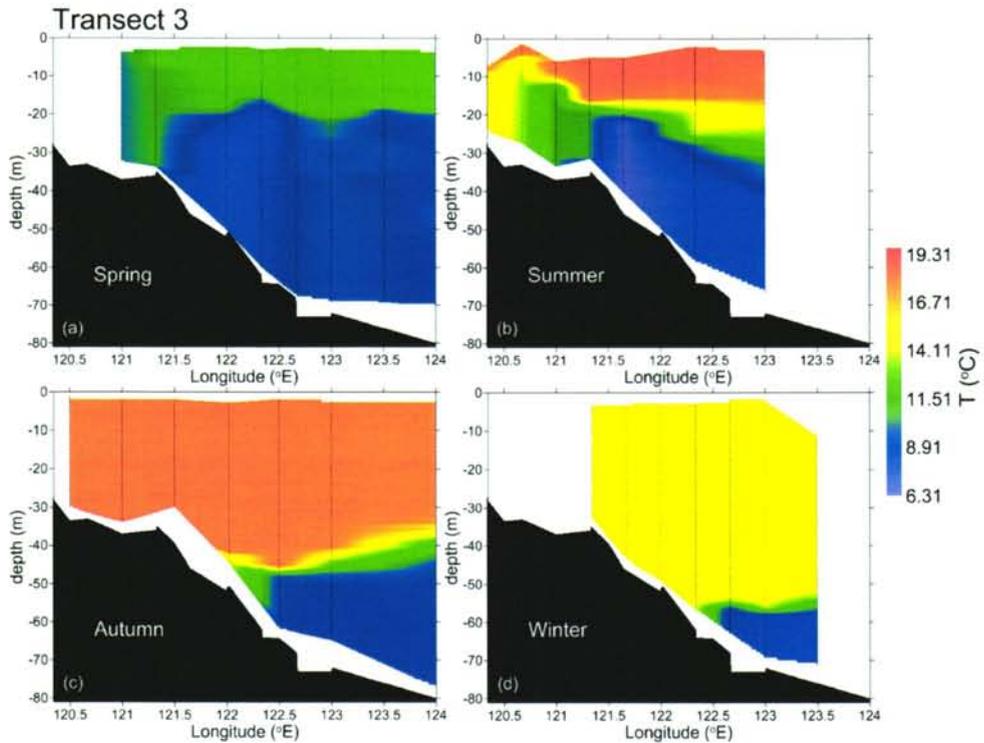


图 3-21 断面 3 的温度的季节分布

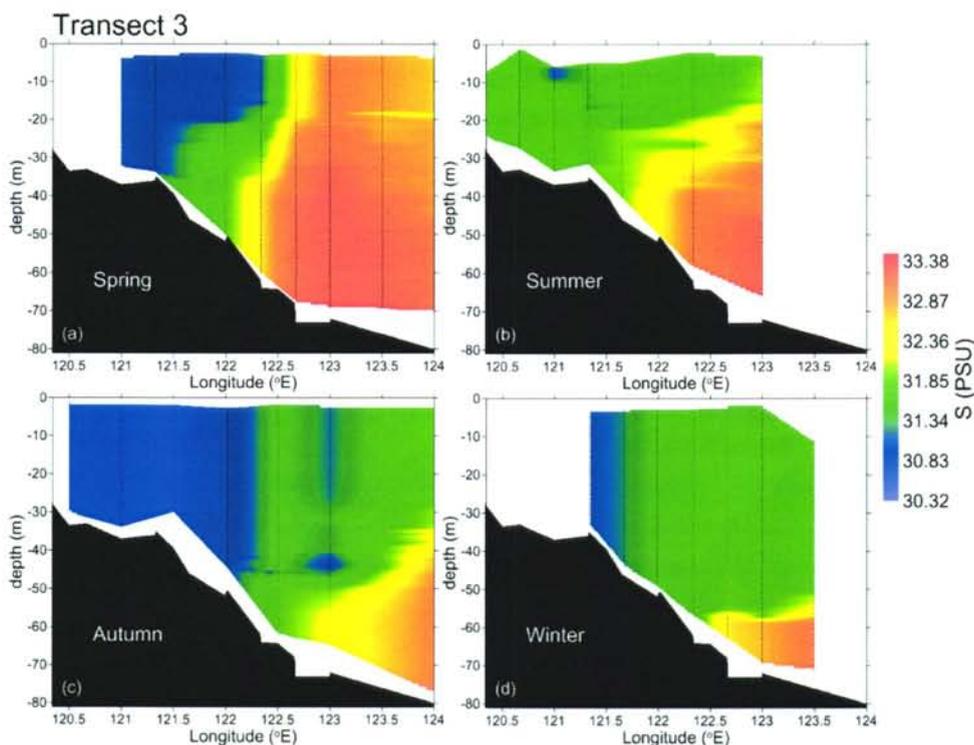


图 3-22 断面 3 的盐度的季节分布

ii) 叶绿素浓度

图 3-23 是断面 3 叶绿素浓度季节变化特征，可以明显的看出，春季和夏季的叶绿素浓度明显高于秋季和冬季。春季，水深小于 40m 的断面西部水域在整个垂向上叶绿素浓度均较高，且分布相对均匀，其浓度值约为 $3 \mu\text{g/L}$ ，对位于 122°E 至 123°E 的水域，30m 以浅水体叶绿素浓度较高，且浓度最大值主要出现在 25m 左右的水体，对位于 123°E 以东的水体，23m 以浅至表层的水体叶绿素浓度均较高，值约为 $3.2 \mu\text{g/L}$ ，其中 122.3°E 以东 40m 以深水体叶绿素浓度最低，浓度值低于 $0.3 \mu\text{g/L}$ ；夏季，整个断面水体的上层（如 10m 以浅）叶绿素浓度含量较春季明显降低，叶绿素浓度的最大值主要出现在中层水体中，尤其对于 122.3°E 以东水体，中层叶绿素浓度较高，约为 $3 \mu\text{g/L}$ ，同样，对于 122.3°E 以东 40m 以深水体叶绿素浓度最低，但要高于春季水平；秋季和冬季，整体叶绿素浓度较低，且在整体上混合层深度内垂向分布较为均匀，平均值约为 $0.65 \mu\text{g/L}$ ，跃层以深的叶绿素浓度最低，浓度值均低于 $0.22 \mu\text{g/L}$ ，其中对于秋季 122°E 剖面 40m 以浅水体，其叶绿素浓度明显高于两侧水体，其浓度值约为 $0.9 \mu\text{g/L}$ 。

上述叶绿素浓度的分布特征揭示出：浮游植物的生长同样主要发生在春夏季，对于夏季，上层水体受营养盐的限制，导致浮游植物在光照和营养盐比较适宜的跃层处生长较好；对于秋冬季节在远岸水体的上混合层内也表现出一定的生长趋势，其中对于秋季，位于 122°E 的剖面上 35m 以浅水域浮游植物生物量明显较周围水体高。

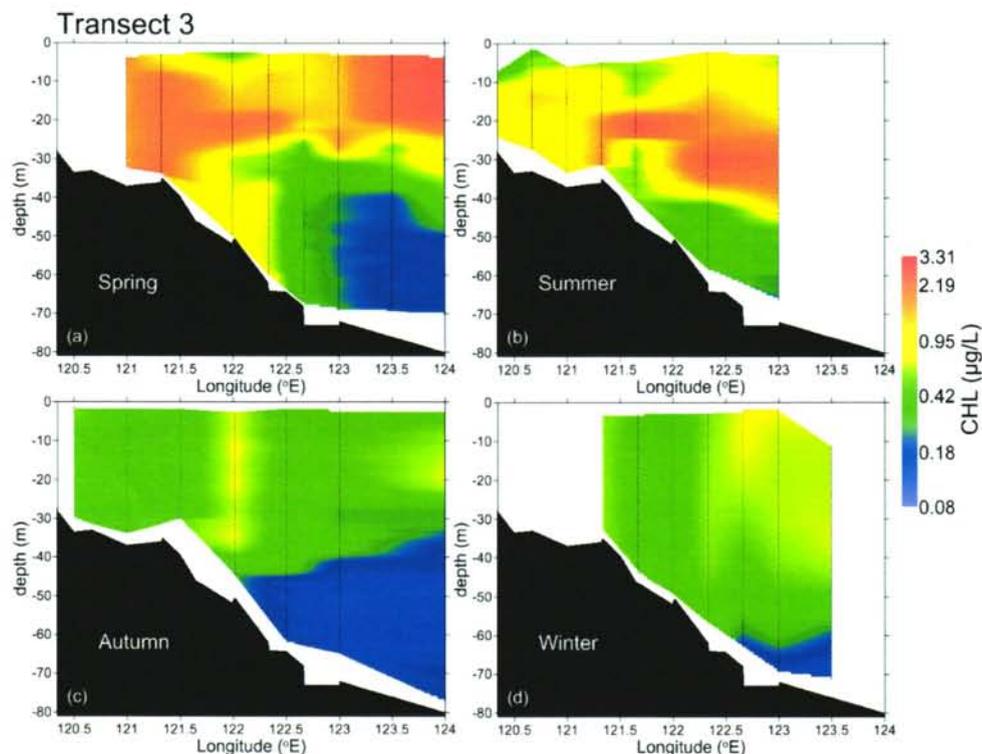


图 3-23 断面 3 的叶绿素浓度的季节分布

iii) 浊度

图 3-24 是断面 3 浊度的季节分布特征。春季，深度小于 40m 的水域浊度的垂向分布较为均匀其值约为 1.5FTU ，对于深度大于 40m 的水域，分层较为明显，底层水体的浊度明显较高，约为 20FTU ，对于叶绿素浓度较高的水体，浊度也相应的表现出较高的值，但远小于底层水体的浊度；夏季，整个断面水体分层结构表现较为明显，底层水体浊度较高，上层水体浊度较低，在叶绿素浓度值较高的中层水体，浊度的响应并不明显；秋季，除 122°E 断面 40m 以浅水体明显高于周围水体以外，整个断面 40m 以浅水域自西向东浊度垂向分布较为均匀，自西向东呈递减趋势， 122.5°E 以东 40m 以浅水域浊度最低，均小于 0.27FTU ，对于

水深大于 45m 的深水域，45m 以深的底层水体的浊度明显较高，约为 20FTU；冬季，对于小于 50m 水深的的水体，垂向分布较为均匀，且浊度明显较秋季高，同样呈现出自西向东递减的趋势，对于深度大于 50m 的水体，上混合层内浊度较小，同秋季一样，均低于 0.27FTU，56m 以深的底层水体则浊度较高。

上述浊度的季节和空间变化特征进一步揭示出：断面 3 靠近海州湾方向的浅水区季节上悬浮物浓度的差异主要源自水体垂向混合动力的季节性差异。对于深水区，上层水体的悬浮物浓度差异主要受浮游植物的生长调控，底层水体则由潮波所致底层沉积物的再悬浮所致；此外，对于秋季 122°E 剖面较之其西侧临近剖面的高主要是该剖面的浮游植物颗粒较多的原因所致，而对于冬季，121.75°E 剖面较之其西侧临近剖面较高主要是由于潮流所致的水体水平运动引起的。

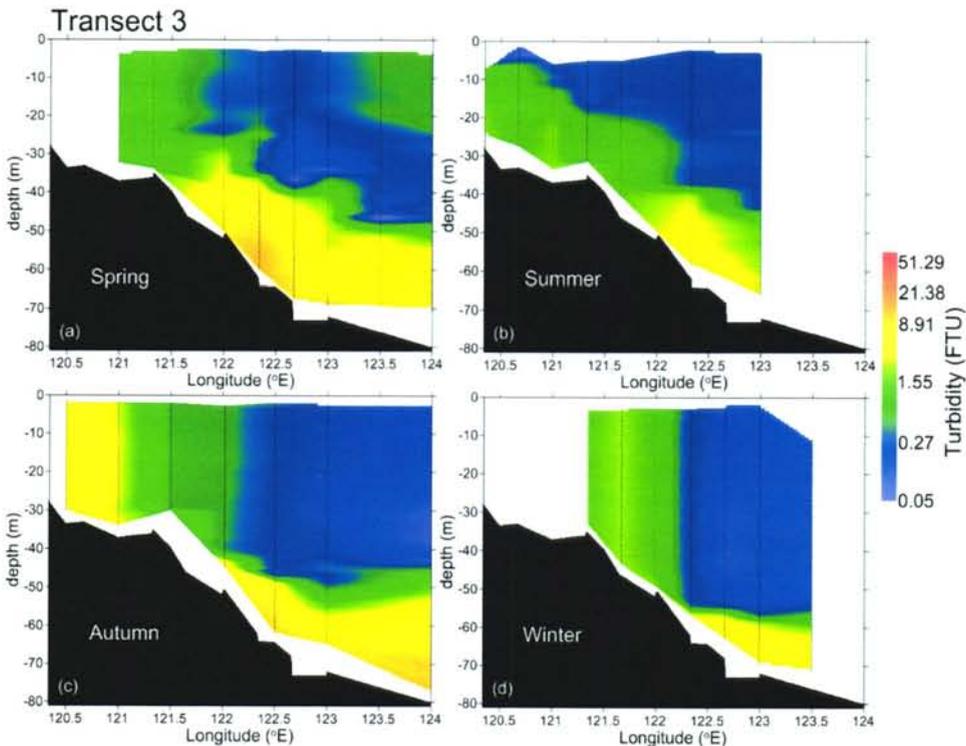


图 3-24 断面 3 的浊度的季节分布

3) 光学性质变化的主要原因

由上述水文及生物地球化学要素的分布特征及其反映的海洋过程可以看出，断面 3 水体光学性质的季节和空间变化可以作如下解释：夏季，水体层化效应显著，较强的跃层阻碍了潮波所致的底层再悬浮的沉积物的上移，使得上混合层内

无机颗粒物较少,同时由于浮游植物的大量生长,上层水体主要以无机颗粒物为主,因此上层水体后向散射比明显较小,其中近岸水体上混合层内的值略高于远岸水体,这主要由于水深较浅,相对垂向混合动力较强,因此更多的无机颗粒物会进入上层水体导致后向散射比相对较大。对于断面 3 在夏季由于较强的水动力环境,使得底层再悬浮的沉积物浓度较高,进而导致吸收散射及后向散射系数在上混合层底以深水体较高,上层水体较大的光学性质以及垂向上多个极小值和极大值的出现主要受浮游植物的影响;秋季和冬季,对于近岸水体由于水体垂向混合动力加强,同时跃层的消失,使得底层沉积物更容易悬浮到上层水体,最终导致近岸水体光学性质明显增高,对于深水区,虽然冬季垂向混合动力强,但不足以使得水体混合均匀,受跃层的阻碍,底层无机颗粒物很难进入上混合层水体,同时浮游植物在秋冬季节生物量较少,因此上混合层内光学性质较小,底层水体光学性质较大,其中,对于秋季 122°E 剖面较之其西侧临近剖面较高主要是该剖面的浮游植物生物量相对较高的原因所致,而对于冬季, 121.75°E 剖面较之其西侧临近剖面较高主要是由于潮流所致的水体水平运动引起的;春季,随着大风的减弱及太阳辐射的增强,近岸水体开始出现层化现象,远岸水体的上混合层深度也变浅,浮游植物得以大量的生长,近岸水体底层主要是底层沉积物的再悬浮引起,而上层水体则是底层再悬浮的沉积物及浮游植物生长造成浮游植物颗粒的增多共同导致,对于远岸水体,底层水体较高光学性质同样由底层再悬浮的沉积物所影响,而对于上层水体则主要由浮游植物颗粒引起。

3.2 表层水体光学性质的季节变化

通过上述黄渤海水体主要断面季节上的变化与海洋过程的联系可以看出:对于黄渤海水体,底层水体的光学性质主要由潮波作用下的海底摩擦导致的底部沉积物的再悬浮所引起,夏季水体层化显著,对于水深区域,底层再悬浮的沉积物很难突破跃层进入上混合层,深水区上混合层水体的光学性质主要受浮游植物的影响,对于近岸浅水区域,虽然层化现象也较为明显,但由于水深较浅,水体的垂向混合作用相对同期的深水区域还是较强,部分底层再悬浮的无机颗粒物也会进入上混合层,因此对于近岸水体其上混合层的光学性质由无机的底层再悬浮的沉积物和有机的浮游植物颗粒共同决定;春季同夏季相似,只是跃层不如夏季强

烈，在近岸浅水，底部再悬浮的沉积物更易进入上层水体；秋冬季节，对于浅水域，由于垂向层化现象的消失以及垂向混合动力的加强，底层再悬浮的沉积物在垂向混合动力下垂向分布较为均匀，水体的光学性质主要由底层再悬浮的沉积物所决定，对于深水域由于水体较深，虽然秋冬季节的垂向混合动力较强，受水深的影响无法使水体上下均匀混合，但会导致上混合层深度加深，由于秋冬季节浮游植物的生产条件受限，水体中浮游植物颗粒较少，在某些水域可能还是仅有浮游植物影响，但在某些水域，还是会有无机颗粒物的存在，这主要与跃层的强度及水体的水平流动有关。此外，上节也揭示出某些水域的光学性质还会受到上升流的影响。因此整体黄渤海的水体呈现出近岸高、远岸低、底层高及上层低的分布特征。

对于海色遥感，重点关注的是表层水体的光学性质的变化，因此本节主要结合上节的研究结果以及水文及生物地球化学参数所反映的水平方向上的海洋过程详细全面的认识黄渤海表层水体光学性质季节上的变化。

3.2.1 光学性质的季节变化

1) 吸收系数

图 3-25 是黄渤海表层水体吸收系数 a_{nw443} 的季节分布特征（其中，图中小黑点代表实测站位位置，下同）。幅值变化：整体相对变化量为 35.43，其中春季， a_{nw443} 的最小值为 $0.07m^{-1}$ ，最大值为 $2.55m^{-1}$ ，平均值为 $0.29m^{-1}$ ；夏季， a_{nw443} 的最小值为 $0.11m^{-1}$ ，最大值为 $1.50m^{-1}$ ，平均值为 $0.33m^{-1}$ ；秋季， a_{nw443} 的最小值为 $0.07m^{-1}$ ，最大值为 $1.57m^{-1}$ ，平均值为 $0.37m^{-1}$ ；冬季， a_{nw443} 的最小值为 $0.08m^{-1}$ ，最大值为 $1.67m^{-1}$ ，平均值为 $0.43m^{-1}$ 。整体分布态势：吸收系数的整体分布特征在四季均与等深线的分布特征大致相似，即水深区域吸收系数低，水浅区域吸收系数高，并且随着夏季、秋季、冬季到春季的季节演替，低值区不断的向深水区收缩到最小再开始向浅水区扩张。

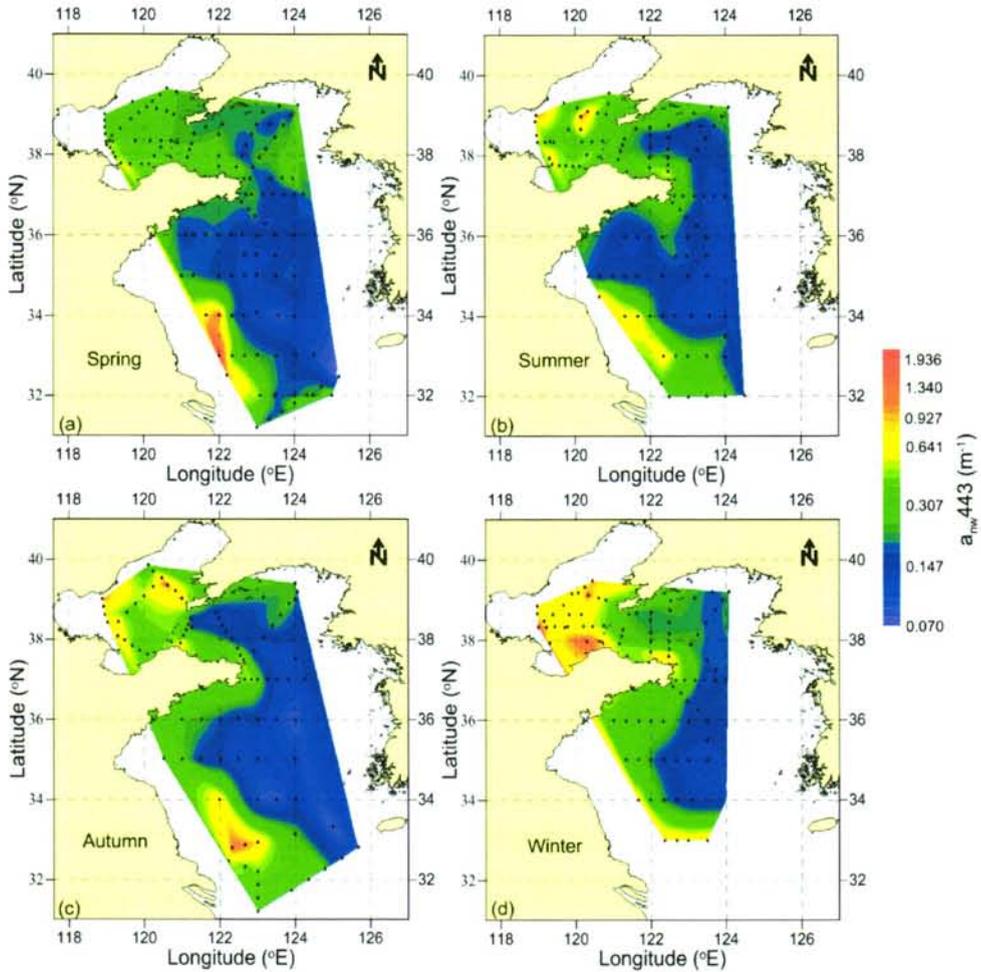


图 3-25 黄渤海表层水体的吸收系数 $a_{nw,443}$ 的季节分布

2) 散射系数

图 3-26 是黄渤海表层水体散射系数 $b_p,532$ 的季节分布特征。幅值变化：整体相对变化量为 311.14，其中春季， $b_p,532$ 的最小值为 0.21m^{-1} ，最大值为 21.85m^{-1} ，平均值为 2.06m^{-1} ；夏季， $b_p,532$ 的最小值为 0.17m^{-1} ，最大值为 10.31m^{-1} ，平均值为 1.71m^{-1} ；秋季， $b_p,532$ 的最小值为 0.14m^{-1} ，最大值为 17.14m^{-1} ，平均值为 3.4m^{-1} ；冬季， $b_p,532$ 的最小值为 0.07m^{-1} ，最大值为 19.9m^{-1} ，平均值为 3.4m^{-1} 。整体分布态势：同吸收系数基本一致。

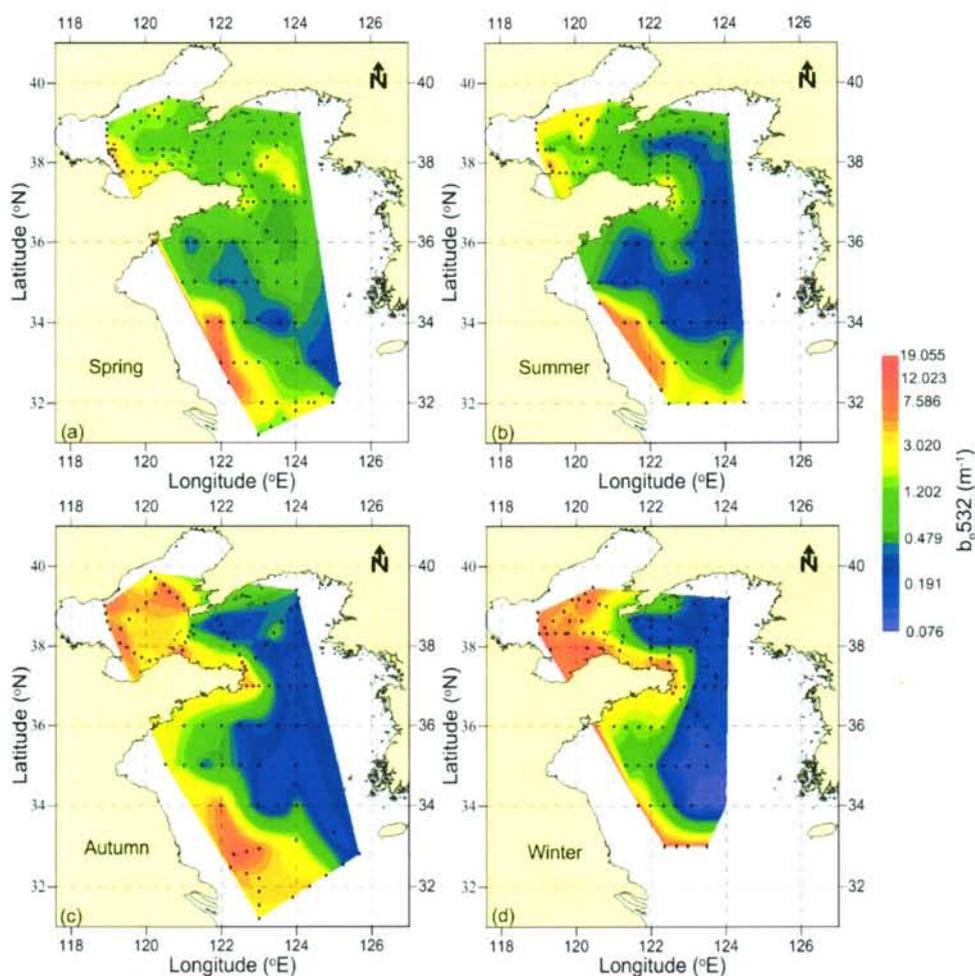


图 3-26 黄渤海表层水体的散射系数 b_p532 的季节分布

3) 后向散射系数

图 3-27 是黄渤海表层水体后向散射系数 $b_{bp}532$ 的季节分布特征。幅值变化：整体相对变化量为 1331.2，其中春季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0013m^{-1} ，最大值为 0.7993m^{-1} ，平均值为 0.042m^{-1} ；夏季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0011m^{-1} ，最大值为 0.2017m^{-1} ，平均值为 0.0232m^{-1} ；秋季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0006m^{-1} ，最大值为 0.4405m^{-1} ，平均值为 0.078m^{-1} ；冬季， $b_{bp}532$ 的最小值为 0.0007m^{-1} ，最大值为 0.2934m^{-1} ，平均值为 0.0714m^{-1} 。整体分布态势：同吸收散射系数基本一致。

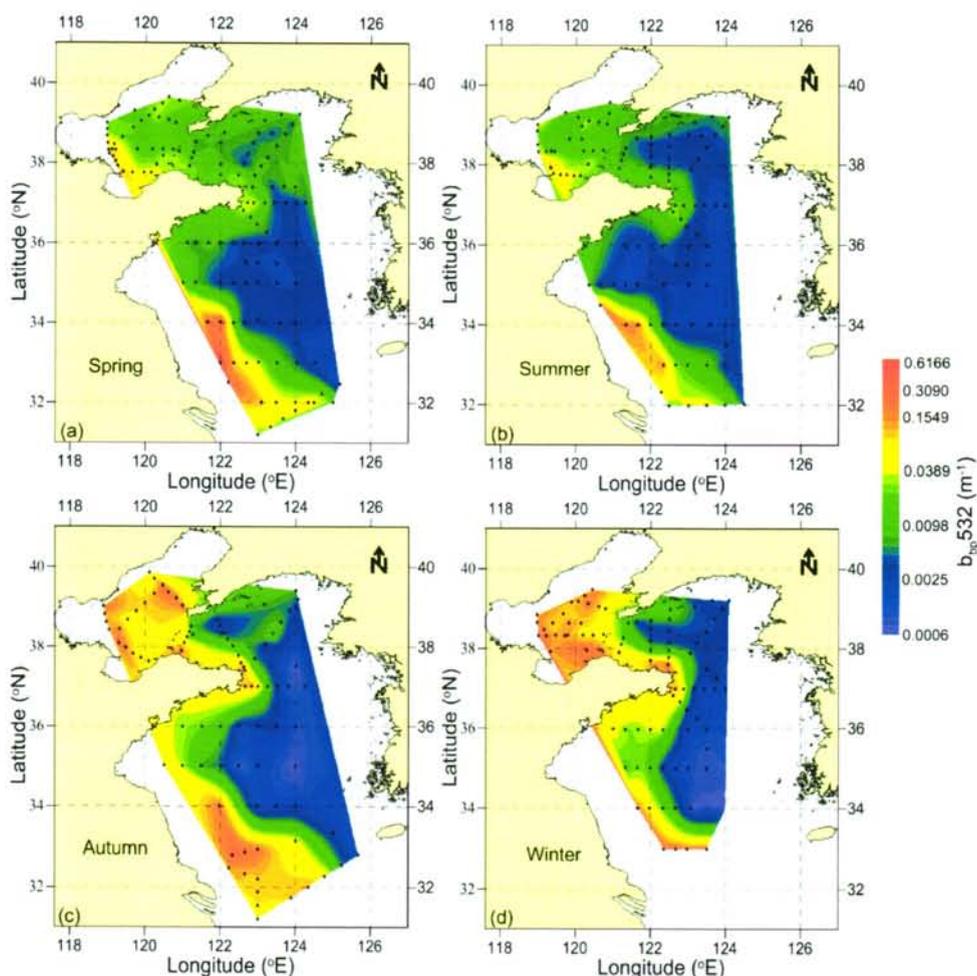


图 3-27 黄渤海表层水体的后向散射系数 b_{bp532} 季节分布

4) 后向散射比

图 3-28 是黄渤海表层水体后向散射比的季节分布特征。对于渤海，其在春秋冬季节后向散射比较大，除春季在渤海中部很小一块区域的表层水体后向散射比小于 0.015 外，其余均大于 0.015，平均值约为 0.02，夏季除渤海中部后向散射比较小（约为 0.011），其余则较大。对于北黄海，春季除靠近沿岸的表层水体后向散射比较大外（值约为 0.019），中部水体的后向散射比均小于 0.012，夏季，除靠近山东半岛的沿岸水体后向散射比较大外（约为 0.017），其余均小于 0.012，秋季，除北黄海东南部水域值较小（低于 0.012）及中部的一小块狭长带较小（低于 0.015），整个北黄海的后向散射比均在 0.015 以上，其中靠近沿岸的可达 0.024，冬季，除 $123^{\circ}E$ 以西水域及北黄海中部的南北向的狭长水域的后向散射比较高外

(大于 0.018)，其余水体均较低（小于 0.012）。对于南黄海，其分布特征与吸收散射及后向散射系数变化特征较为一致。

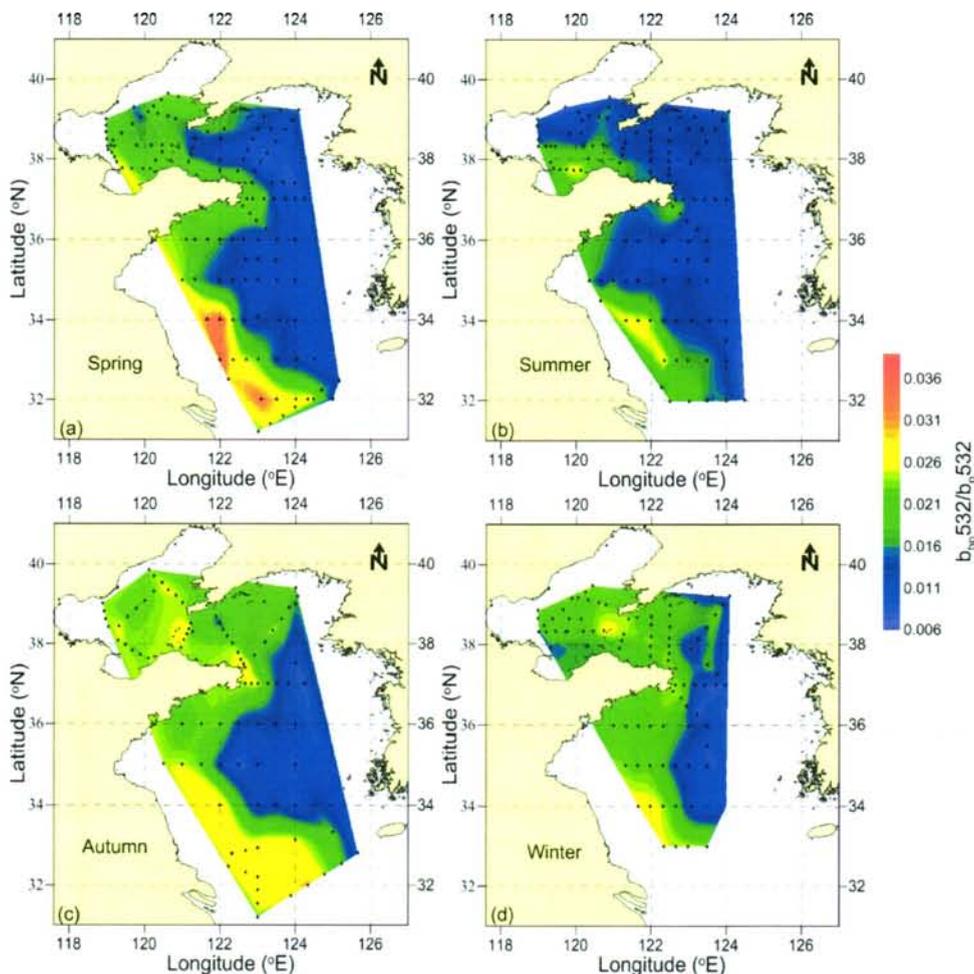


图 3-28 黄渤海表层水体的后向散射比 $b_{p,532}/b_{p,532}$ 的季节分布

3.2.2 水文及生物地球化学参数变化特征

1) 温度及盐度

图 3-29 至图 3-30 是黄渤海表层水体温盐的季节分布特征，对于温度，其季节性变化在春秋冬三季节南北差异较大。春秋冬三个季节，北黄海及渤海温度相对较低，南黄海温度相对较高，这主要与渤海所处的地理位置的气候特征有关，此外，在秋冬季节，温度的分布呈现出一条明显的自黄海到渤海的高温带，并且在成山头至鸭绿江口断面中央水域呈现一明显的低温区；夏季，太阳辐射较强，南北气温均比较热，因此，整体水体表层温度均较高。对于盐度，可以明显的看

出，渤海的盐度在四季当中均较低，尤其在黄河口附近海域，盐度高值区主要位于渤黄海的东南部水域；此外，盐度的分布也呈现出一条自南至北再向西的高盐带，与温度不同的是，这种高盐带在四季均较为明显。

上述温盐的分布特征揭示出如下海洋过程：高温高盐带的出现揭示出高温高盐的黄海暖流自南黄海经北黄海到达渤海的流向，同时也说明黄海暖流在四季均是存在的，只是在春夏季，由于温度的提升，黄海暖流高温的特征无法得以体现；此外，在成山头至鸭绿江口断面中央水域呈现一明显的低温区揭示出该区域存在上升流，这与上节断面 2 的剖面分析结果一致。

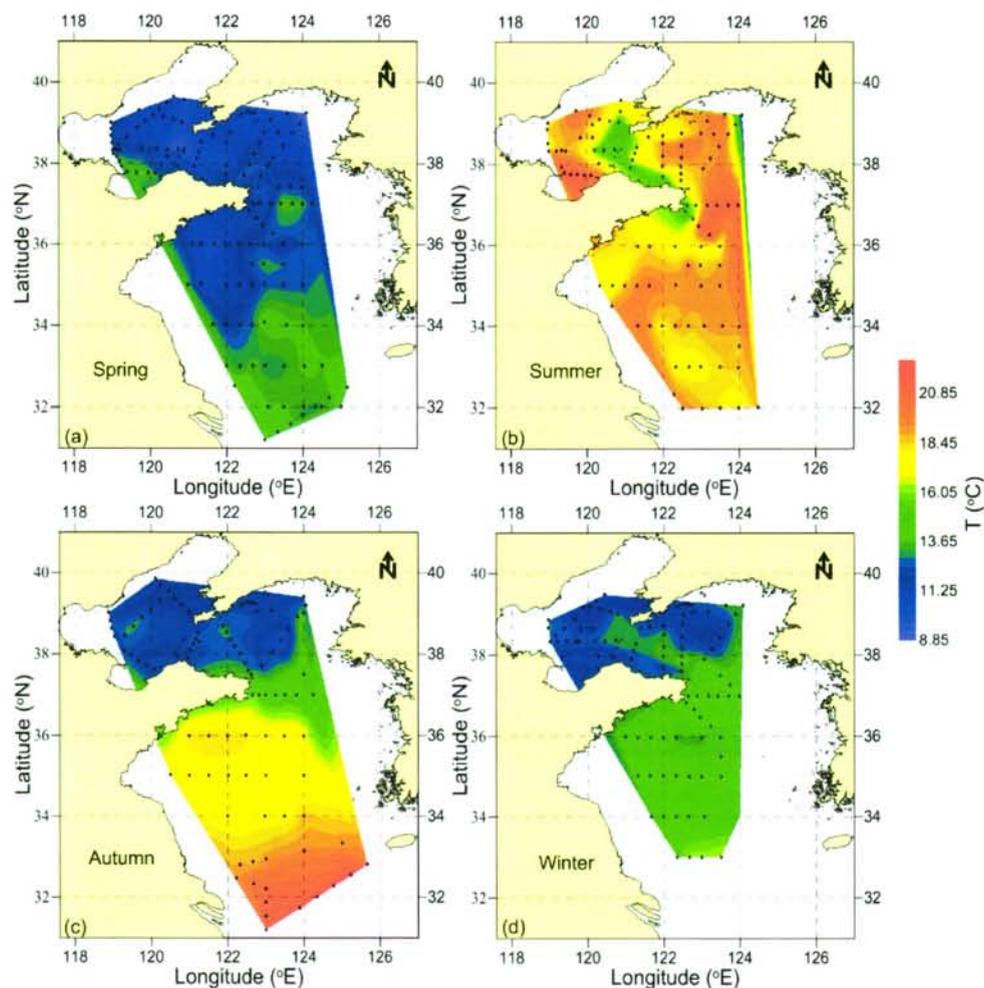


图 3-29 黄渤海表层水体温度的季节分布

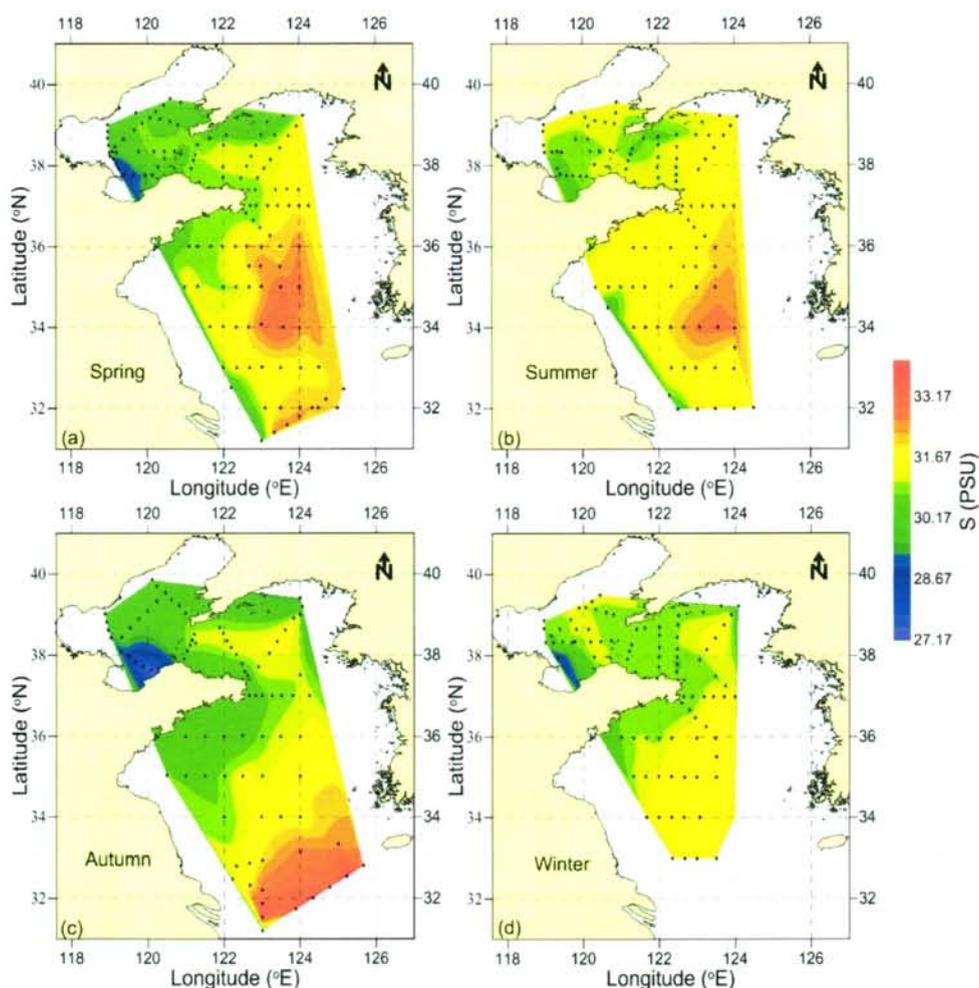


图 3-30 黄渤海表层水体的盐度季节分布

2) 叶绿素浓度

图 3-31 是黄渤海表层水体叶绿素浓度的季节变化特征。整体上渤海水域在春夏季表现出较高的叶绿素含量，春季平均值约为 $2.3 \mu\text{g/L}$ ，夏季高于春季，平均值为 $5 \mu\text{g/L}$ ，并且在渤海湾口外北部水域及渤海中南部水域夏季叶绿素含量较高，可达 $26 \mu\text{g/L}$ 左右，在秋冬季，除北黄海东北部水域叶绿素浓度相对较高外（约为 $1.8 \mu\text{g/L}$ ），整个黄渤海叶绿素含量均较低，其值在 $0.8 \mu\text{g/L}$ 以下；北黄海在春季整体叶绿素浓度均较高，平均值约为 $3 \mu\text{g/L}$ ，在北黄海东南部位于东经 124° 北纬 37.5° 附近水域，叶绿素含量最高约为 $5 \mu\text{g/L}$ ，夏季，除靠近沿岸的水体叶绿素含量较高外，北黄海中部水域叶绿素含量较低，其叶绿素浓度在 $0.8 \mu\text{g/L}$ 以下，其中靠近山东半岛的沿岸水域叶绿素浓度（约为 $4 \mu\text{g/L}$ ）要高于北黄海北

部沿岸水域的叶绿素含量（浓度约为 $2 \mu\text{g/L}$ ）；对于南黄海，春夏季仅在部分水域表现出相对较高的叶绿素含量（约为 $2 \mu\text{g/L}$ ），如春季位于 36°N 的表层水域、位于北纬 35° 和东经 124° 附近水域以及南黄海南部从长江口至济州岛一带水域，和夏季 34°N 以南水域，其余水域叶绿素含量较低，其值均小于 $1 \mu\text{g/L}$ 。

上述叶绿素浓度的变化特征揭示出：浮游植物的生长主要发生在春夏季，秋冬季节除北黄海靠近鸭绿江附近水域浮游植物依然表现出较好的生长趋势外，其余黄渤海水域的浮游植物的生物量较低。

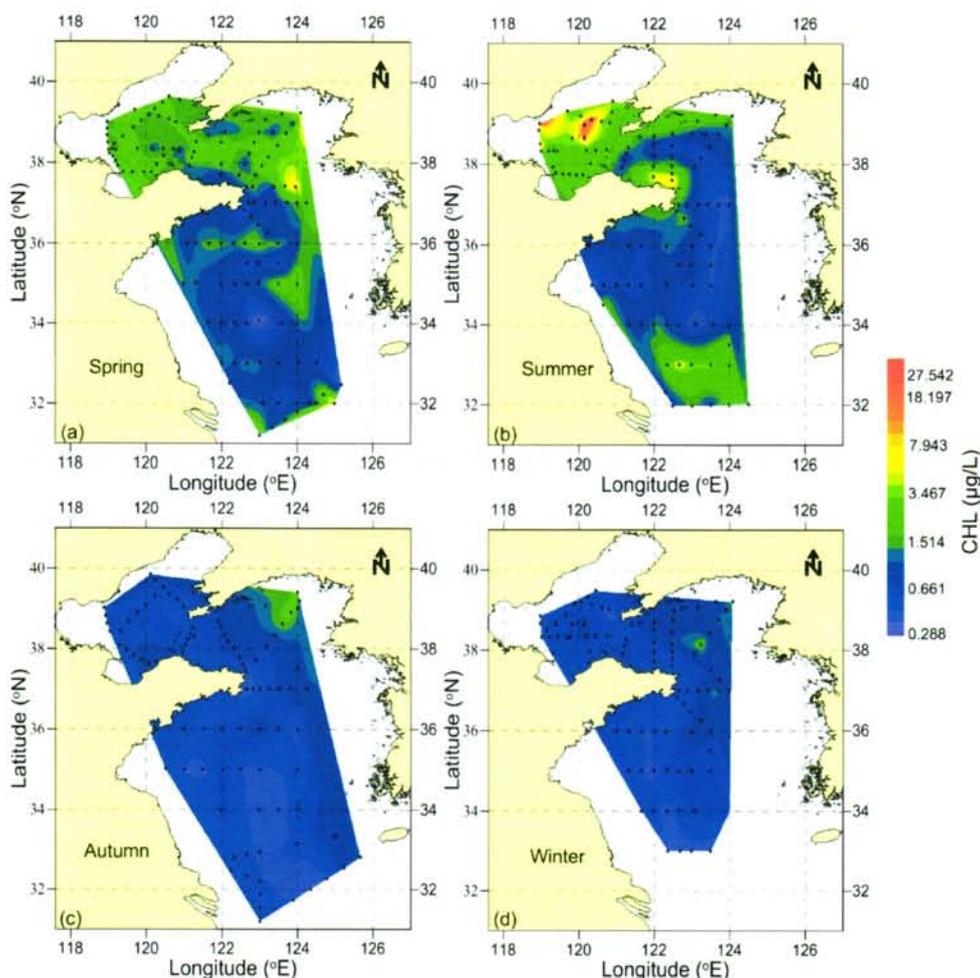


图 3-31 黄渤海表层水体的叶绿素浓度季节分布

3) 浊度

图 3-32 是黄渤海表层水体浊度的季节变化特征。首先，可以明显的看出，对于渤海，其表层水体的浊度在四季均较高，在春夏季，靠近黄河口的水体浊度

最高，春夏季的平均浊度均为 2.8FTU，秋冬季的浊度明显高于春夏季，其在秋冬季的均值均约为 16FTU；对于黄海，除在春季位于 37.5°N 和 124°E 附近水域以及秋季位于成山头至鸭绿江一带水域的中部表层水体浊度较大外（浊度值约为 1.8FTU），其余水域的分布特征在四季均呈现出近岸高、远岸低的分布特征，并且随着夏春秋冬季的变化，小于 0.6FTU 的等值线在不断向深水区收缩。四个季节上整体也呈现出与等深线一致的分布特征。

上述浊度的分布特征揭示出：黄渤海水体悬浮物浓度呈现出“夏储冬输”的分布特征，春季和夏季远岸水体的悬浮物浓度主要与浮游植物的生长有关，近岸水体除与浮游植物的生长有关外，水体的垂向混合导致的局地沉积物再悬浮以及河流的输入也产生重大的影响；秋季和冬季，悬浮物浓度呈现出向远岸深水域扩散的趋势，这主要与秋冬季节较强的垂向混合作用导致底部沉积物的悬浮以及沿岸海流的输运有关。此外，对于秋季北黄海中部较高的悬浮物浓度揭示出上升流所致底层沉积物的上移较为明显。

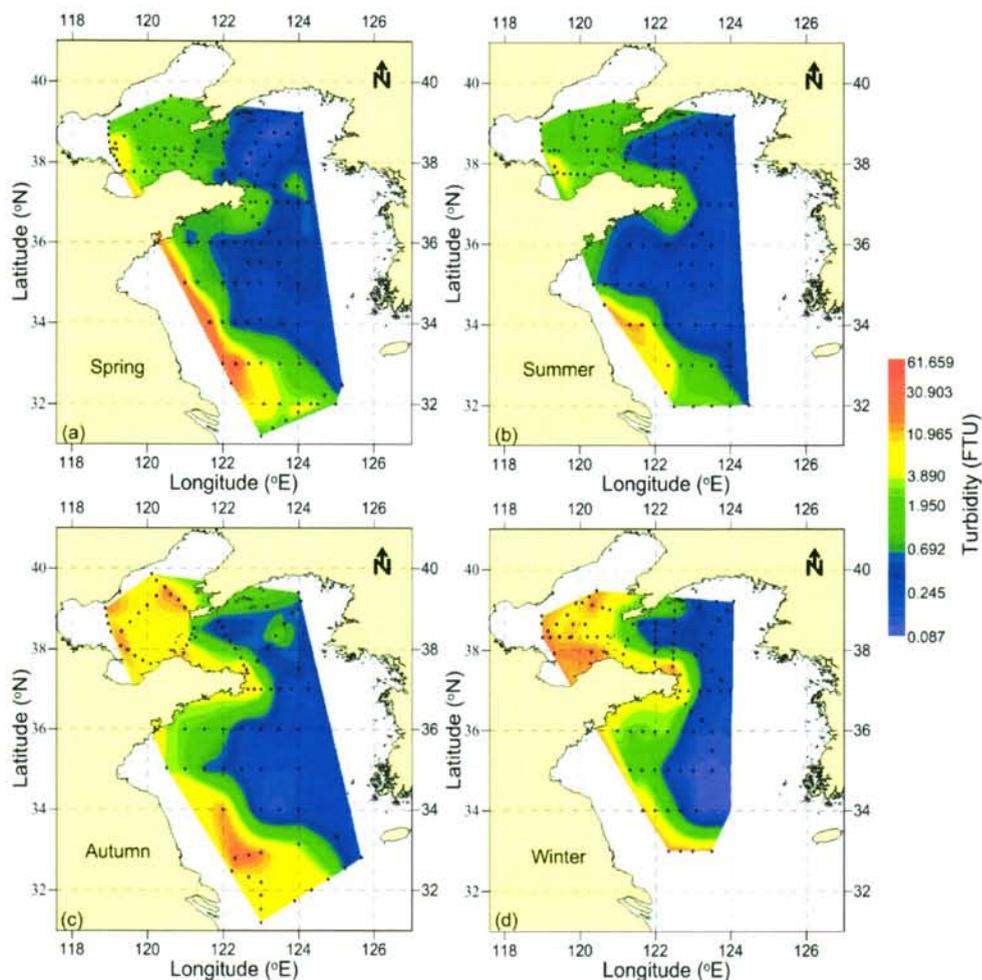


图 3-32 黄渤海表层水体的浊度季节分布

3.2.3 光学性质变化的原因分析

通过对黄渤海表层水体光学性质的变化特征的描述可以看出，黄渤海表层水体光学性质整体上呈现出上述垂向剖面分布变化所揭示的变化特征，即本节开始部分关于黄渤海水体主要断面的光学性质季节和空间的变化总结已经较为明确的揭示出黄渤海表层水体光学性质变化的原因。对于秋季和冬季，除北黄海中南部水域受上升流的影响，光学性质较周围水体较高外，其余水体基本呈现出近岸高、远岸低的分布特征，这些分布特征除前面断面分布所揭示的垂向混合作用的影响外，还与近岸沿岸流的水平输送有关；对于春季和夏季，除具有秋季和冬季的整体特征外，受浮游植物生长的影响，生物量高的水域，其相应的也较大。渤海整体上在四季均较高，这一方面源于黄河的输入（低盐特征的揭示），另一方

面由于渤海水深较浅，水体的垂向混合动力相对较强所致。此外，整体由黄海到渤海在海域中央出现的光学性质低值带，除受水深较深，垂向混合作用较弱的影响外，还受黄海暖流水平运输的影响。

3.3 小结

本章利用 2011 年至 2015 年期间在黄渤海广泛测量的光学性质数据构建了黄渤海水体光学性质时间（季节）和空间（垂向剖面及表层）尺度上的变化特征，并利用同步测量的水文及生物地球化学参数数据所揭示的海洋过程对光学性质的变化进行了解释。其中水文及生物地球化学参数数据主要包括温度、盐度、叶绿素浓度及浊度，光学性质主要包括吸收系数、散射系数、后向散射系数及后向散射比。研究结果总结如下：

1) 黄渤海水体光学性质的季节和空间变化特征

黄渤海水体光学性质在季节时间尺度上呈现出如下的空间分布特征：

幅值变化：对于吸收系数 a_{nw443} 、散射系数 b_p532 及后向散射系数 b_{bp532} ， a_{nw443} 的整体幅值相对变化量最低， b_{bp532} 的幅值相对变化量最高；整体上 b_{bp532} 的相对变化量约是 b_p532 的相对变化量的 4.3 倍，而 b_p532 的相对变化量约是 a_{nw443} 的 8.8 倍。

整体分布态势：春季，水平方向上呈现出近岸高、远岸低的分布特征；垂向剖面深度上，深水区的的光学性质中吸收、散射及后向散射系数呈现出较为明显的分层结构，浅水域的光学性质的垂向分布较为均匀。夏季，黄渤海水体整体除具有水平上的近岸高远岸低的分布特征外，在垂向剖面深度上，深浅水域均呈现出明显的分层结构。秋季和冬季，水平方向上，同样呈现出近岸高、远岸低的分布特征；垂向剖面上深度小于 50m 的水域的垂向分布较为均匀，深度大于 50m 的水域同样呈现出明显的分层结构，且上均匀层深度较深。

2) 黄渤海水体光学性质变化影响机制

黄渤海水体光学性质变化除受潮汐和海流的影响外，主要由潮波所致的底部沉积物再悬浮、水体垂向混合及浮游植物生长的生物过程所影响。具体影响机制如下：春季，随着风力的减弱，水体的垂向混合动力降低，而气温的回暖使得水体的层化现象开始出现，层化结构的出现进一步降低了水体的垂向混合动力，使得底部受潮波所致再悬浮的沉积物的上移受限，由于春季具备适宜浮游植物生长

所需的营养盐和光照，浮游植物得以开始大量生长，对于深水区，其上层水体的光学性质主要由浮游植物生长的生物过程所影响，其底层水体主要由潮波所致的底部沉积物的再悬浮过程所影响，对于浅水区，由于水深较浅，同等外部条件下，其垂向混合动力较之深水区较强，层化效应相对也较弱，底层再悬浮的沉积物较之深水区更易上移至上层水体，因此对于浅水区，上层水体的光学性质除受浮游植物生长的生物过程影响外，还受底部沉积物的再悬浮过程所影响。夏季，随着气温的进一步升高，水体的层化效应得到进一步加强，黄渤海大部分水域的上层水体的光学性质主要由浮游植物生长的生物过程主导。秋冬季节，随着气温的降低，水体层化效应减弱，伴随大风天气的逐渐多发，水体的垂向混合作用较强，深度小于 50m 的水体垂向混合慢慢均匀，对于深度大于 50m 的水域，由于水深较深，强混合作用仍不能使得水体上下混合均匀，但强混合作用使得上混合层深度较深，上混合层底部距海底较近，底部再悬浮的沉积物易通过跃层进入上混合层水体，但对于特别深的水体如黄海海槽附近水体，虽然上混合层底部距海底较近，但由于水深更深，跃层相对较强，底部再悬浮的沉积物依然很难突破跃层进入上混合层，因此对于秋冬季节，除黄海海槽附近水域上层水体依然受浮游植物生物过程影响外，大部分水体逐渐由底部沉积物的再悬浮过程所影响。

4 黄渤海水体光学性质变化的定量化分析

上一章的研究揭示出黄渤海水体光学性质季节上的空间变化除受潮汐和海流的影响外,主要受潮波所致底部沉积物再悬浮、垂向混合以及浮游植物生长三大过程的影响。这些过程对光学性质变化影响的实质是这些过程所导致的水体成分的变化。潮汐、海流、潮波所致底部沉积物再悬浮、垂向混合动力以及浮游植物生长过程所引起的水体成分的变化主要是水体颗粒物特性的变化。因此对于黄渤海水体,影响其光学性质变化的主要水体成分是水体中悬浮颗粒物。本章主要围绕黄渤海水体光学性质变化与水体中悬浮颗粒物特性的定量关系进行研究,然后依此为基础建立光学性质参数化模型,以期本章的研究对高精度遥感反演方法的建立以及利用光学手段对悬浮颗粒物动态变化的监测方面具有重要的应用价值。

4.1 光学性质与悬浮颗粒物的关系

影响黄渤海水体光学性质变化的主要水体成分是悬浮颗粒物,导致悬浮颗粒物变化的过程分别是潮汐、海流、潮波所致底部沉积物再悬浮、垂向混合动力以及浮游植物生长过程,其中潮波所致底部沉积物再悬浮及垂向混合动力过程所产生的悬浮物主要来源是底部沉积的无机泥沙颗粒,而浮游植物生长产生的是高水含量的有机浮游植物颗粒。在这种不同过程产生下的不同类型的悬浮颗粒物的光学特性必然不同,如有机的浮游植物颗粒由于较高的水含量其折射率(指的是相对于水的折射率)较低,而无机的泥沙颗粒由于较低的水含量其折射率较高。因此,常用折射率来判别颗粒物的有机与无机特性。后向散射比作为与折射率密切相关的物理量,其同样与颗粒物的构成具有较高的相关性, Boss 等^[48]利用在新泽西近岸水域的实测数据证实后向散射比能较好的区分有机与无机颗粒物,本文的第三章也揭示出对于浮游植物生物量高的水域后向散射比明显较低,对于底层悬浮沉积物主导的水体,其后向散射比则明显较高。本节主要利用 A 数据集集中同步测量的光学性质数据与悬浮物浓度数据,定量化后向散射比区分再悬浮沉积物及浮游植物颗粒物的能力,然后依此为基础,分别研究不同类型下光学性质与悬浮颗粒物浓度的关系。

4.1.1 后向散射比与悬浮颗粒物构成的关系

图 4-1 是底层水体和春、夏季南黄海中部上混合层水体内的后向散射比的分布直方图，从图中可以明显的看出，二者水体能通过后向散射比有效的区分开，对于上混合层内浮游植物生物量高的水体，其后向散射比均小于 0.011，峰值位于 0.006 附近，底层悬浮沉积物主导的水体的后向散射比均大于 0.015，其峰值为 0.023。这说明后向散射比能有效的区分浮游植物和悬浮沉积物颗粒。

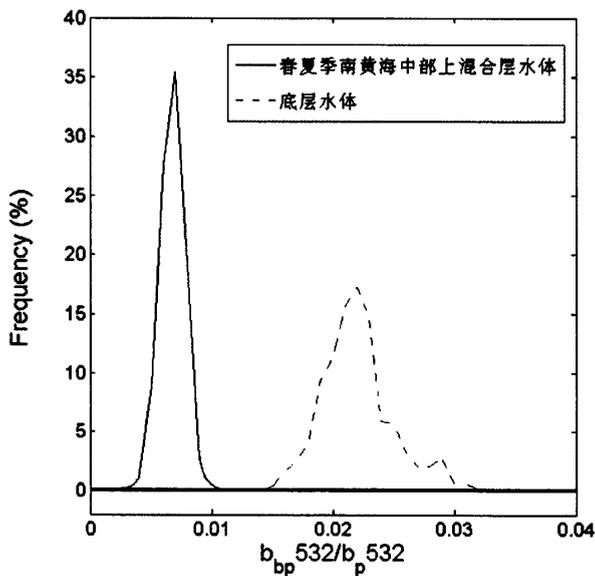


图 4-1 黄渤海底层水体与春夏季南黄海中部上混合层水体后向散射比的分布直方图

为进一步证实后向散射比对浮游植物和悬浮沉积物颗粒的区分能力，本研究采用 Twardowski 等^[93]所建立的颗粒物折射率的估算方法对黄渤海水体的颗粒物进行折射率计算，然后将其与后向散射比进行比对，定量化后向散射比对颗粒物类型的区分能力。

Twardowski 等^[93]所建立的颗粒物折射率的估算方法如下：

对于海水的簇颗粒物折射率，可采用如下公式计算：

$$n_p = 1 + (b_{bp} / b_p)^{0.5377 + 0.4867(\varepsilon - 3)} \left[1.4676 + 2.2950(\varepsilon - 3)^2 + 2.3113(\varepsilon - 3)^4 \right] \quad (4-1)$$

其中 $\varepsilon = \gamma + 3 - \exp(-6\gamma)$ ， γ 为颗粒物衰减系数的光谱斜率即 $c_p(\lambda) = A\lambda^{-\gamma}$ 。

如图 4-2 所示，本研究将典型季节夏季和冬季的所测全部剖面数据以 0.5m 深度间隔进行计算，分别画在基于 Twardowski 等^[93]模型所确立的折射率与后向

散射比及颗粒物衰减光谱斜率关系的等值线图上,其中夏季水体的剖面按照温盐所确立的跃层进行划分,表层指的是上混合层内,中层指的是跃层,底层指的是跃层以下水体,冬季则未分层。可以明显的看出,对于夏季,底层水体的颗粒物的折射率均大于 1.11,平均值约为 1.18,表层水体的折射率基本均小于 1.08,均值约为 1.05,中层水体的折射率则分布比较离散,其值分布于 1.02 至 1.14 之间。对于冬季水体,与夏季的分布特征明显不符,除个别值小于 1.11 外,基本均大于 1.11,平均值约为 1.18。对于折射率大于 1.11 的颗粒物主要由无机颗粒物主导,对于折射率小于 1.1 的颗粒物属于有机颗粒物。因此,图 4-2 明显的反映出夏季浮游植物的生长导致生物颗粒的增多,加上跃层的阻碍,底层再悬浮的沉积物很难进入上混合层,因此对于夏季上层水体的颗粒物主要为浮游植物等有机颗粒物,对于底层水体,其再悬浮的沉积物主要是无机类型的颗粒物主导,而对于中层水体,属于浮游植物与再悬浮沉积物共存的水体,谁占主导取决于水体的动力机制,因此对于中层水体其折射率分布范围较广,有的是无机主导,有的是有机主导,另外,从图 4-2 可以看出,部分上混合层内水体的折射率也较高,其值约为 1.14 附近,这些点主要是位于近岸的浑浊水体内,虽然水体出现分层结构,但由于水深较浅,垂向混合动力相对较强,底部沉积物易再悬浮至上混合层内,加上沿岸海流的影响,水体主要由无机颗粒物主导;对于冬季,由于温度和光照的影响,有机的浮游植物颗粒较少,因此水体主要以再悬浮的沉积物颗粒主导,故其折射率较大,部分点也较小,是由于水深较深,底层无机颗粒物很难再悬浮到上层,浮游植物虽然含量较低,但依然存在。对于图 4-2,如果不考虑夏季中层水体、近岸上混合层水体以及冬季存在层化现象的上混合层内的水体的话,夏季黄渤海远岸深水域的上混合层内的后向散射比均小于 0.009,夏季黄渤海底层水体及冬季除存在层化现象的上混合层水体外的后向散射比基本在 0.015 以上。Boss 等^[48]的分析结果间接揭示出 0.008 和 0.015 可以作为有机颗粒物和无机颗粒物主导的分界点。与本研究的分析结果较为接近。因此,本研究结合上述分析采用 0.009 和 0.015 作为有机颗粒物和无机颗粒物主导的分界点,即后向散射比小于 0.009 的水体可以认为是颗粒物主要由有机的浮游植物颗粒主导,对于后向散射比大于 0.015 的水体可以认为是无机的再悬浮沉积物颗粒主导,当其值处于 0.009 和 0.015 之间可以认为是浮游植物和悬浮沉积物颗粒共同主导。

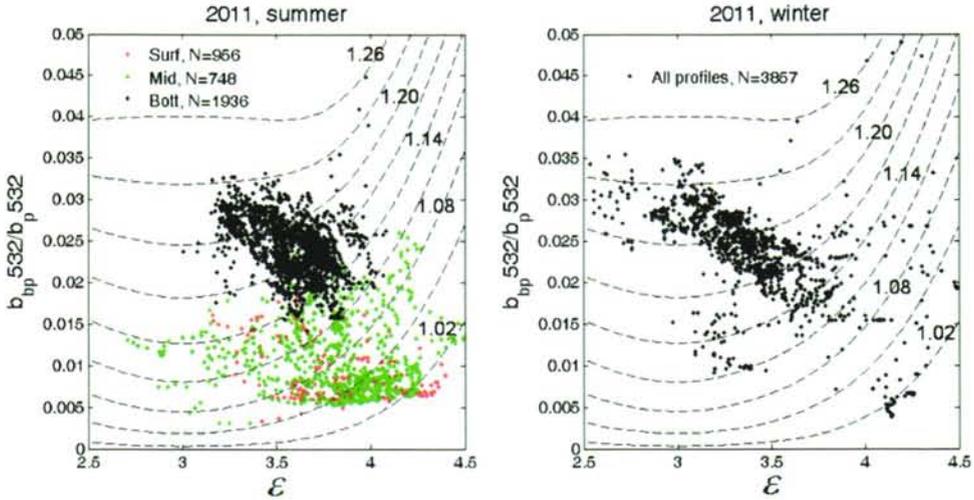


图 4-2 黄渤海水体与夏冬季垂向剖面水体
颗粒物折射率分布图

4.1.2 光学性质与悬浮颗粒物浓度的关系

利用上节的研究结果,本节以后向散射比作为划分颗粒物类型的依据,分别探讨不同颗粒物类型下光学吸收、散射及后向散射系数与悬浮物浓度的关系。其中吸收系数 a_{nw443} 在海洋光学研究中通常不直接与悬浮物建立联系,因为吸收性质除颗粒物的影响外,有色可溶有机物也有贡献,对于散射及后向散射系数,有色可溶有机物的散射贡献极小,常忽略不计,可以认为散射及后向散射系数完全由颗粒物决定。因此,从理论及实际应用意义出发,对于吸收系数,本节主要探讨非浮游植物颗粒的吸收系数 a_d443 与悬浮物浓度的关系。

图 4-3 至图 4-5 分别是当后向散射比分别小于 0.009、大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015 以及大于 0.015 的水体的非色素颗粒吸收系数 a_d443 、散射系数 b_p532 以及后向散射系数 $b_{bp}532$ 与悬浮物浓度的关系。

对于非色素颗粒在 443nm 处的吸收系数 (a_d443),其与悬浮颗粒物浓度的关系随颗粒物类型具有明显的差异。对于有机颗粒主导(后向散射比小于 0.009)的水体,单位悬浮物浓度的吸收系数较大,对于无机颗粒物主导的水体(后向散射比大于 0.015),单位悬浮物浓度的吸收系数较小,而对于混合类型颗粒物的水体(后向散射比大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015),单位悬浮物浓度的吸收系数接近于无机颗粒物主导的水体。

对于散射系数,如图 4-4 所示,对于浮游植物主导的水体,单位质量浓度的

散射较小，对于无机颗粒物主导的水体，单位质量浓度散射较高，对于混合类型的水体，单位质量浓度的散射居中。

对于后向散射系数，如图 4-5 所示，可以明显的看出，对于浮游植物主导的水体，单位质量浓度的后向散射较小，对于无机颗粒物主导的水体，单位质量浓度的后向散射较高，对于混合类型的水体，单位质量浓度的后向散射居中。

上述结果反映出，非色素颗粒的吸收系数 a_{d443} 、散射系数 b_{p532} 与后向散射系数 b_{bp532} 在不同后向散射比下的关系揭示出对于不同颗粒物类型主导的水体，其光学性质与悬浮物浓度的关系则不同。该结果对于利用光学性质反演高精度的悬浮物浓度具有重要的指导意义，即利用光学性质尤其是常用的后向散射系数来反演悬浮物浓度应结合水体颗粒物类型采用相应的模型。（注：出于遥感应用的目的，本章建立模型所使用的数据均是 A 数据集中的相应表层数据）

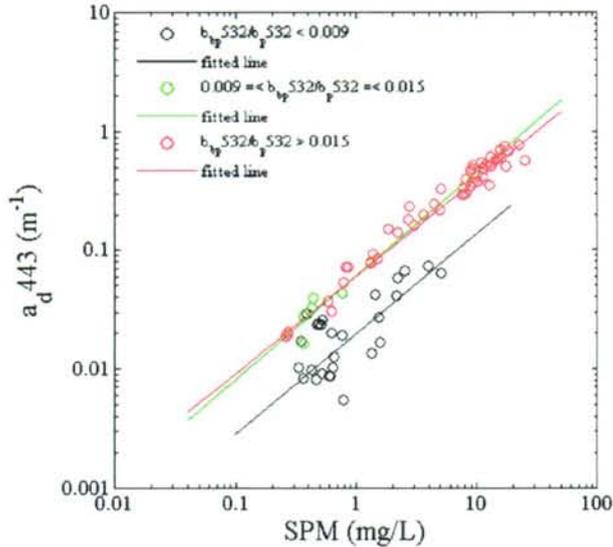


图 4-3 黄渤海后向散射比分别小于 0.009、大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015 以及大于 0.015 的水体的非色素颗粒吸收系数 a_{d443} 与悬浮物浓度的关系

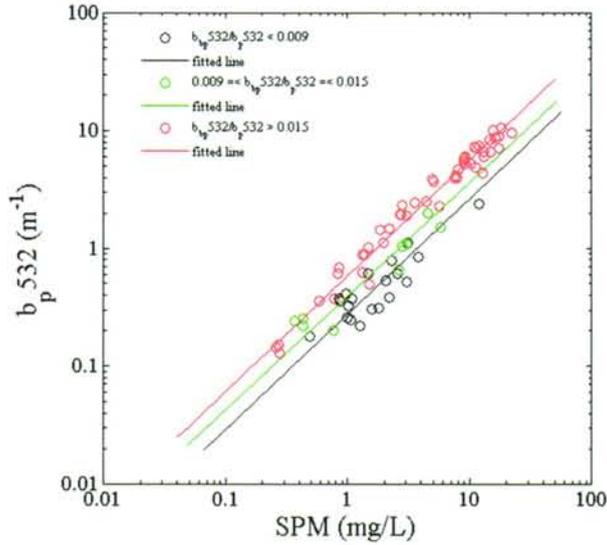


图 4-4 黄渤海后向散射比分别小于 0.009、大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015 以及大于 0.015 的水体的散射系数 b_{p532} 与悬浮物浓度的关系

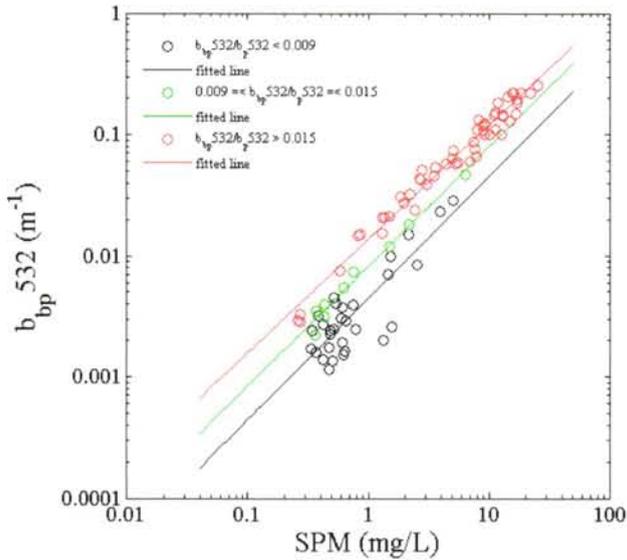


图 4-5 黄渤海后向散射比分别小于 0.009、大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015 以及大于 0.015 的水体的后向散射系数 b_{bp532} 与悬浮物浓度的关系

通过图 4-3 至图 4-5 可以看出，对于后向散射比大于 0.015 的水体，其悬浮物浓度与光学性质的关系离散型较小；而对于后向散射比小于 0.009 的水体，其悬浮物浓度与光学性质的关系较为离散；这主要是由于浮游植物结构较无机颗粒

物的结构更为复杂,不同种类的浮游植物颗粒其细胞结构差异较大所致^[94,95]。因此,对于浮游植物主导的水体,如果直接利用其质量浓度来表征光学性质,则误差较大。通常,对于浮游植物一般采用叶绿素浓度来表征其生物量,下面本研究利用覆盖较为广泛和完整的 A 数据集中的叶绿素浓度及光学性质数据深入认识浮游植物颗粒主导下的光学性质与浮游植物颗粒的关系。

图 4-6 及图 4-7 分别是浮游植物主导水体(即后向散射比小于 0.009 的水体)的 a_{nw443} 、 b_p532 、 $b_{bp}532$ 及 a_d443 与叶绿素浓度的关系。可以看出对于浮游植物主导的水体,其光学性质与叶绿素浓度的相关性较高,均在 0.86 以上,且叶绿素浓度与光学性质之间的关系较悬浮物浓度与光学性质之间的关系显著收敛。这意味着对于浮游植物主导的水体,其光学性质可以通过叶绿素浓度较好的表征。

此外图 4-7 也进一步揭示出,对于黄渤海浮游植物主导的水体,其非色素颗粒主要是伴随浮游植物生长而产生的附属颗粒。

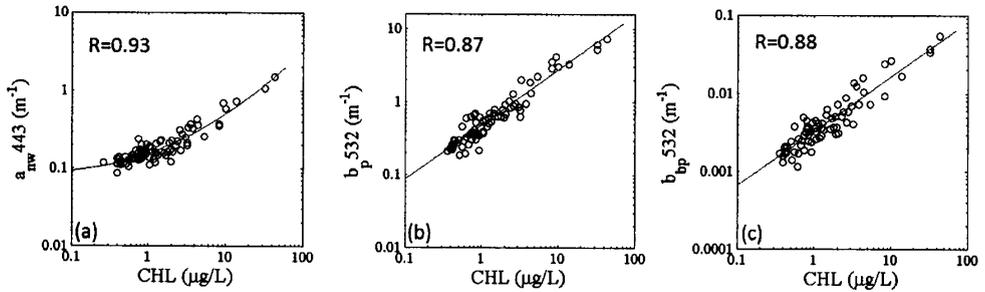


图 4-6 黄渤海浮游植物颗粒主导的水体的光学性质与叶绿素浓度的关系

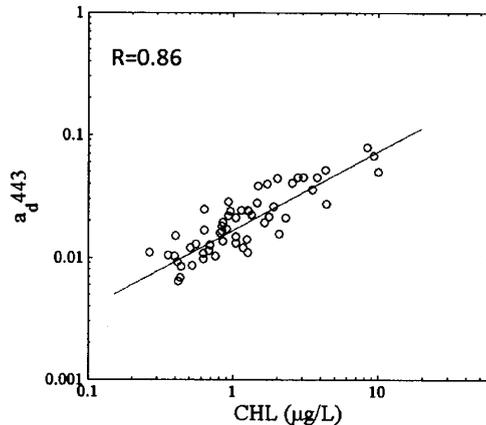


图 4-7 黄渤海浮游植物颗粒主导的水体的非色素颗粒吸收系数 a_d443 与叶绿素浓度的关系

作为对比,图 4-8 是黄渤海无机颗粒物主导的水体(即后向散射比大于 0.015

的水体) 的光学性质与叶绿素浓度的关系, 可以明显的看出, 对于无机颗粒物主导的水体, 光学性质的变化对浮游植物基本无依赖关系, 对比图 4-3 至图 4-5 进一步揭示出, 对于无机颗粒物主导的水体, 影响光学性质变化的主要是悬浮颗粒物的浓度。

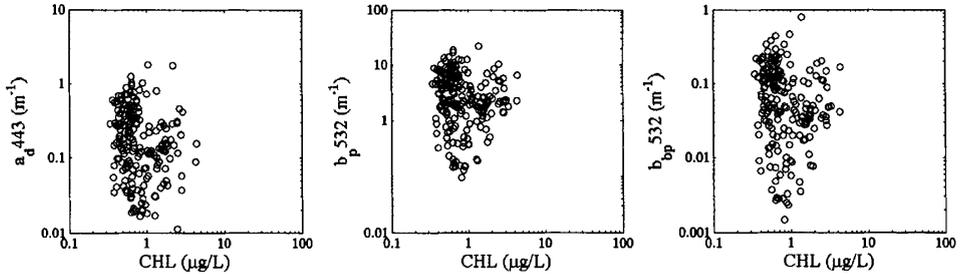


图 4-8 黄渤海无机颗粒物主导的水体的光学性质与叶绿素浓度的关系

4.2 光学性质参数化模型

通过上节的分析可以看出, 后向散射比能有效的区分无机和有机颗粒物, 对于有机颗粒物主导的水体, 水体光学性质与浮游植物的生物量的揭示者叶绿素浓度具有较好的相关关系, 对于无机颗粒物主导的水体, 其光学性质与悬浮物浓度具有较高的相关性。而对于有机和无机混合主导的水体(即后向散射比位于 0.009 与 0.015 之间的水体), 其光学性质取决于无机成分与有机成分的比例, 如果无机成分较高, 则后向散射比会偏大即偏向于 0.015, 如果有机成分的比例较高, 后向散射比则会偏小即偏向于 0.009, 因此可以采取折中的办法, 对于后向散射比偏向于 0.015 的水体, 其光学性质采用后向散射比通过大于 0.015 水体的光学性质与悬浮物浓度的关系来表征, 对于后向散射比偏向于 0.009 的水体, 其光学性质采用后向散射比通过小于 0.009 水体的光学性质与叶绿素浓度的关系来表征。这样针对黄渤海水体固定波长处的光学性质即可根据后向散射比对水体颗粒物类型的划分由相应类型颗粒物的浓度进行确立(对于浮游植物主导的水体, 颗粒物浓度以叶绿素浓度来代替)。

光学性质参数化模型主要由两大部分构成, 分别是光学性质的波长依赖性即光谱特征与固定波长处光学性质的依赖关系和固定波长处光学性质与水体光学活性组分的关系。

其中, 固定波长处固有光学性质与水体光学活性组分的关系主要包括如下:

- i) 浮游植物固定波长处的吸收系数与叶绿素浓度的关系;
- ii) 非浮游植物颗粒固定波长处的光学吸收系数水体组分的关系;
- iii) 固定波长处的颗粒物散射系数及后向散射系数与水体组分的关系。

光学性质的波长依赖性主要包括如下:

- i) 浮游植物光谱吸收系数的波长依赖性;
- ii) 可溶有机物及非浮游植物颗粒的光学吸收系数的斜率变化;
- iii) 颗粒物散射系数及后向散射系数的光谱斜率变化。

上述研究结果表明对于固定波长处固有光学性质与水体光学活性组分的关系中的第二项非浮游植物颗粒固定波长处的光学吸收系数水体组分的关系以及第三项固定波长处的颗粒物散射系数及后向散射系数与水体组分的关系可以依据颗粒物类型进行较好的建立。而对于上述光学性质参数化模型中的其它项已经形成了一般模型(下面将详细介绍),这样以上节关于固定波长光学性质与悬浮颗粒物的关系的为基础,便可实现对整个黄渤海水体光学性质参数化模型的构建。

本节主要利用在黄渤海水体广泛获取的数据探讨这些一般模型在黄渤海水体的适用性及区域性差异,并以这些广泛测量的数据为基础适当对这些一般模型参数进行区域化调谐,然后结合上述以颗粒物类型为基础的固定波长光学性质与悬浮物浓度的关系完成对黄渤海水体高精度光谱参数化模型的建立。

4.2.1 光学性质的波长依赖性

i) 浮游植物光谱吸收系数的波长依赖性

浮游植物光谱吸收系数最明显的特征是在 440nm 和 675nm 处存在两个典型的吸收峰, Lee^[96]基于大量现场测量的浮游植物吸收光谱,利用统计回归建立了以浮游植物光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 与固定波长处 $a_{ph} 440$ 的关系,如公式 4-1 所示; Carder 等^[97]基于大量现场测量的浮游植物吸收光谱,利用统计回归建立了以浮游植物光谱吸收系数 $a_{ph}(\lambda)$ 与固定波长处 $a_{ph} 675$ 的关系,如公式 4-2 所示。

$$a_{ph}(\lambda) = \left[a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \times \ln(a_{ph} 440) \right] \times a_{ph} 440 \quad (4-1)$$

$$a_{ph}(\lambda) = a_0(\lambda) \times \exp \left\{ a_1(\lambda) \times \tanh \left[a_2(\lambda) \times \ln \left(\frac{a_{ph} 675}{a_3(\lambda)} \right) \right] \right\} \times a_{ph} 675 \quad (4-2)$$

公式 4-1 的 a_0 、 a_1 与公式 4-2 的 a_0 、 a_1 、 a_2 和 a_3 分别是依赖于波长的经验系

数，其具体数值见相关文献^[96,97]。

本部分主要利用黄渤海现场广泛测量的浮游植物的光谱吸收系数印证上述两个模型对黄渤海水体的适用性。

图 4-9 是 Lee 模型在 410nm、470nm、490nm 和 550nm 的印证结果，图中红线是 1:1 线，其相关系数的平方 R^2 分别是 0.94、0.98、0.96 及 0.84。图 4-10 是 Carder 模型在 410nm、440nm、490nm 和 550nm 的印证结果，图中红线是 1:1 线，其相关系数的平方 R^2 分别是 0.83、0.90、0.92 及 0.81。可以明显看出，Lee 模型能较好的表征黄渤海水体浮游植物的吸收光谱特征，其中 550nm 相对 410nm、470nm 及 490nm 的相关性稍差主要是因为浮游植物在该波长处的吸收相对其余波长较弱引起的，总体来讲，Lee 模型能较好的适用于黄渤海水体。

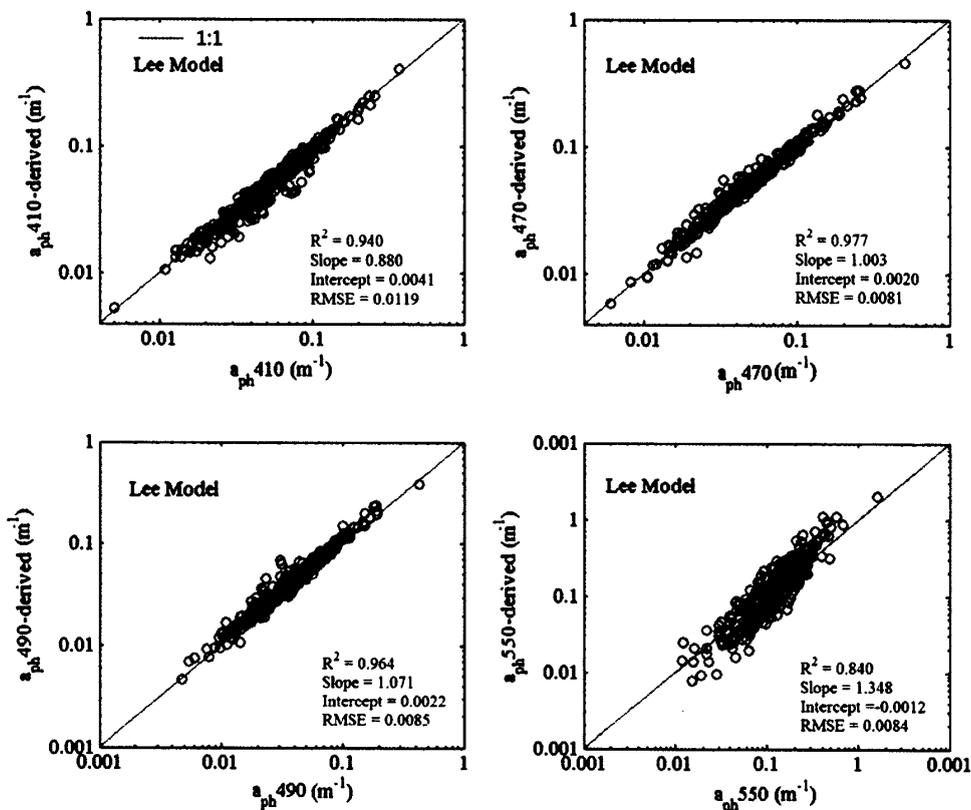


图 4-9 黄渤海水体实测浮游植物光谱 Lee 模型的印证

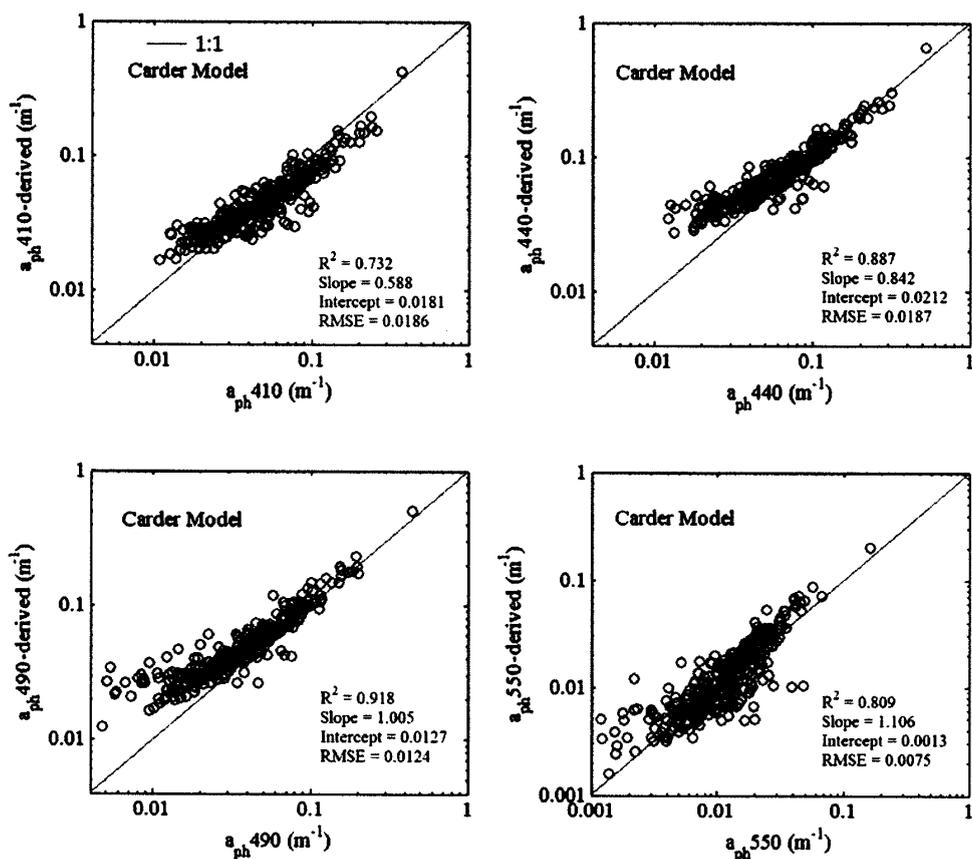


图 4-10 黄渤海水体实测浮游植物光谱 Carder 模型的印证

ii) 有色可溶有机物及非浮游植物颗粒的光学吸收系数的斜率变化

有色可溶有机物及非浮游植物颗粒的吸收光谱均呈现出典型的指数衰减特征，可以较好的用公式 4-3 和 4-4 表示。其中 λ_0 是参考波段， S_g 是可溶有机物光谱衰减斜率， S_d 是非浮游植物颗粒的光谱衰减斜率。研究结果显示， S_g 与 S_d 的变化相对较小，某一海区往往是一固定值，目前的研究结果显示 S_g 与 S_d 的主要分布范围分别位于 0.014-0.019 以及 0.006-0.014，这种变化主要源于可溶有机物成分的差异。本研究主要利用在黄渤海全面测量的有色可溶有机物的吸收光谱及非浮游植物颗粒的吸收光谱调查其变化范围。为了与上节关于固定波长光学性质与悬浮物浓度的关系的研究所用波长相对应，本研究选取 443nm 作为参考波长（443nm 也是常用的典型参考波长），对 400-550nm 波段范围内按照公式 4-3 和 4-4 进行最小二乘法拟合计算 S_g 与 S_d 。图 4-11 和图 4-12 分别是黄渤海水体有色可溶有机物和非浮游植物颗粒的吸收光谱的斜率 S_g 与 S_d 的分布直方图。可以看

出，对于黄渤海水体，其有色可溶有机物的光谱斜率主要集中在 0.014 nm^{-1} - 0.017 nm^{-1} 的范围内，其平均值约为 0.015 nm^{-1} ；而非浮游植物颗粒的光谱斜率主要集中在 0.008 nm^{-1} - 0.01 nm^{-1} 的范围内，其平均值约为 0.009 nm^{-1} ，变化范围较小。基于本研究数据集的 S_g 与 S_d 的分布范围和平均值与李铜基^[76]的结果较为接近，只是 S_g 变化范围相对更小。图 4-13 是 S_g 与 S_d 分别取值为 0.015 nm^{-1} 和 0.009 nm^{-1} 时，公式 4-3 和 4-4 推导的吸收系数与实测吸收系数在两个典型波长 410 和 490nm 处的比较结果，可以看出，选取 0.015 nm^{-1} 和 0.009 nm^{-1} 作为黄渤海水体典型的 S_g 与 S_d 值能较好的对有色可溶有机物的吸收光谱及非浮游植物颗粒的吸收光谱进行推导。

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp[-s_g(\lambda - \lambda_0)] \quad (4-3)$$

$$a_d(\lambda) = a_d(\lambda_0) \exp[-s_d(\lambda - \lambda_0)] \quad (4-4)$$

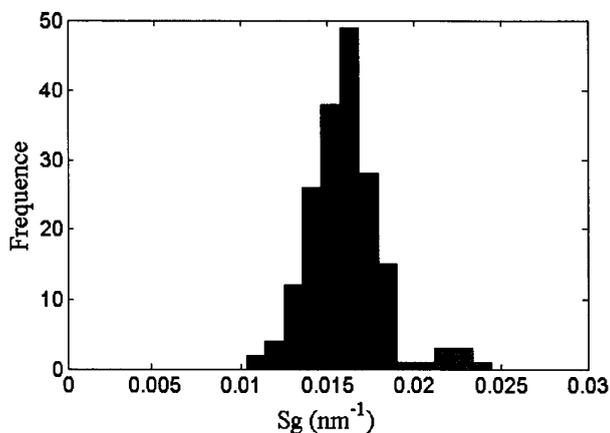


图 4-11 黄渤海水体有色可溶有机物的光谱斜率

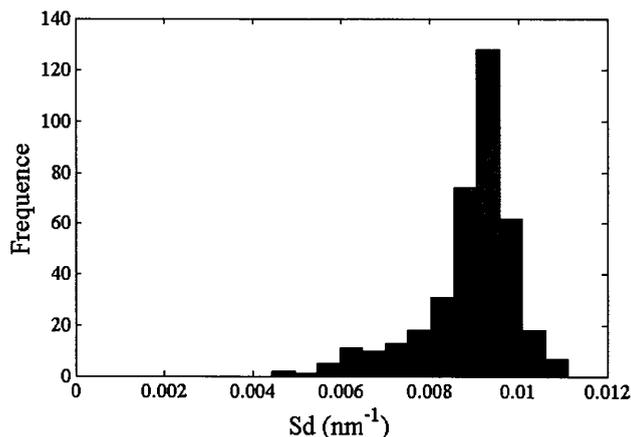


图 4-12 黄渤海水体非浮游植物颗粒光谱斜率

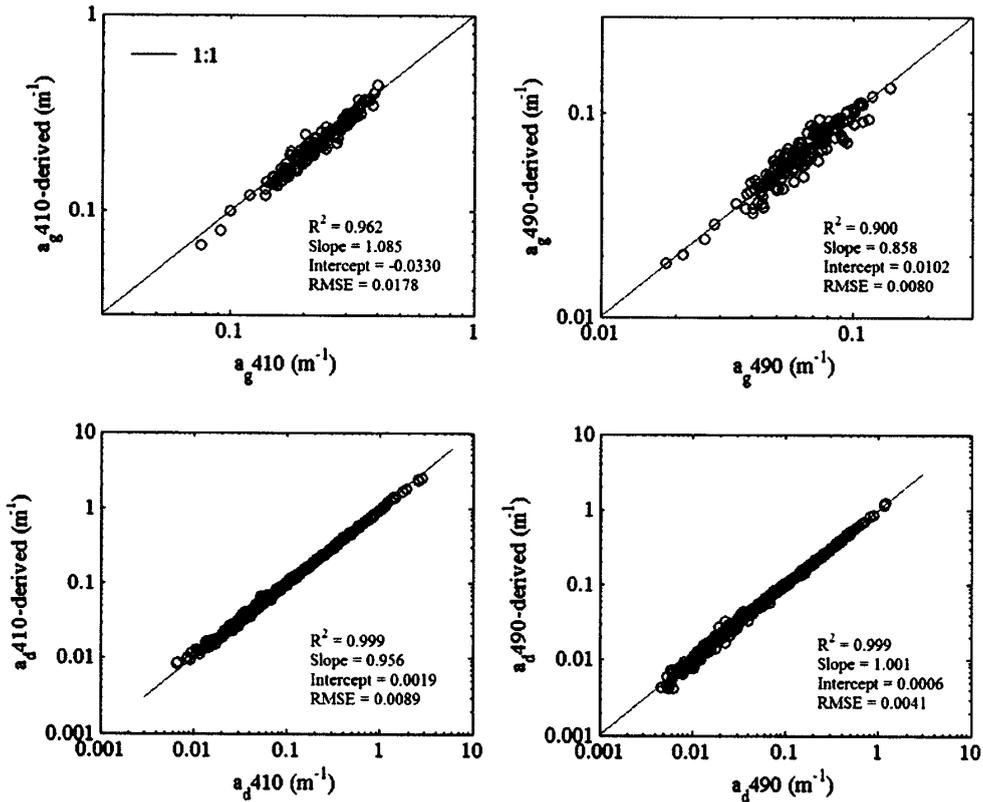


图 4-13 黄渤海水体 S_g 与 S_d 分别取值为 0.015 nm^{-1} 和 0.009 nm^{-1} 时，公式 4-3 和 4-4 推导的吸收系数与实测吸收系数的比较

iii) 颗粒物散射系数及后向散射系数的光谱斜率变化

对于颗粒物，其散射系数的光谱通常用公式 4-5 的一般模型来表示，其中 λ_0 是参考波段， S_s 是颗粒物散射系数的光谱斜率。在此同样为了与上节关于固定波长光学性质与悬浮物浓度的关系的研究所用波长相对应，将参考波长选取为 532nm 。按照公式 4-5 将黄渤海水体的散射光谱在 $400\text{-}650\text{nm}$ 波段范围内进行拟合，图 4-14 是颗粒物散射光谱斜率与 b_{p532} 的关系分布图，可以看出颗粒物散射光谱斜率基本围绕一固定值振荡，没有明显的变化趋势，图 4-15 是颗粒物散射光谱斜率的分布直方图，可以明显的看出，其主要位于 0.1 和 0.5 之间，平均值约为 0.2358 。这与贺双颜^[80]2011 年的研究结果不一致，贺双颜的研究结果显示出对于东中国海水体颗粒物散射光谱斜率 S_s 与固定波长的散射系数存在一定关系。这种差异主要是数据源的不同所致，其所讨论的数据源不仅包含部分黄海水体，大部分站位集中于东海水体，而本文所用数据是主要针对黄渤海四季较为全面的实测值，本文的结果对黄渤海更具代表性。为了检验本研究的拟合结果，

本研究将 S_s 取为平均值 0.2358 所推导的典型波长处的散射与对应波长处的实测值进行比较验证。图 4-16 是 6 个典型波长 410、440、490、510、555、670nm 处推导值与实测值的比较结果，可以明显的看出，所推导的值与原始测量值基本重合与 1:1 等值线上，尤其针对浮游植物的吸收波段 440nm 和 670nm，所推导的值与原始测量值基本重合与 1:1 等值线上，并无异常现象。

上述印证结果进一步揭示出，对于黄渤海水体其颗粒物光谱散射斜率可以通过一固定值较好的表征，因此 0.2358 可以作为黄渤海水体的典型颗粒物光谱散射斜率。

$$b_p(\lambda) = b_p(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{S_s} \quad (4-5)$$

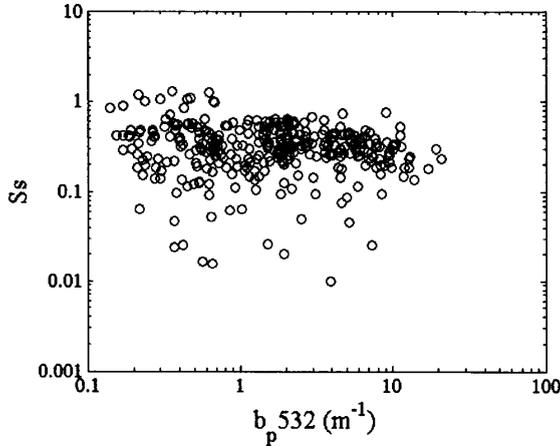


图 4-14 黄渤海水体颗粒物散射系数的光谱斜率 S_s 与固定波长处散射系数的关系

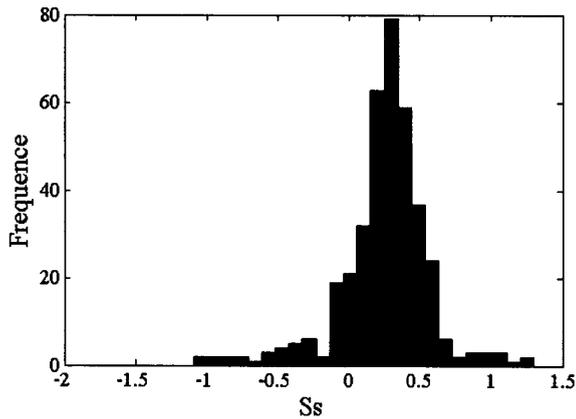


图 4-15 黄渤海水体颗粒物散射系数的光谱斜率 S_s 的分布直方图

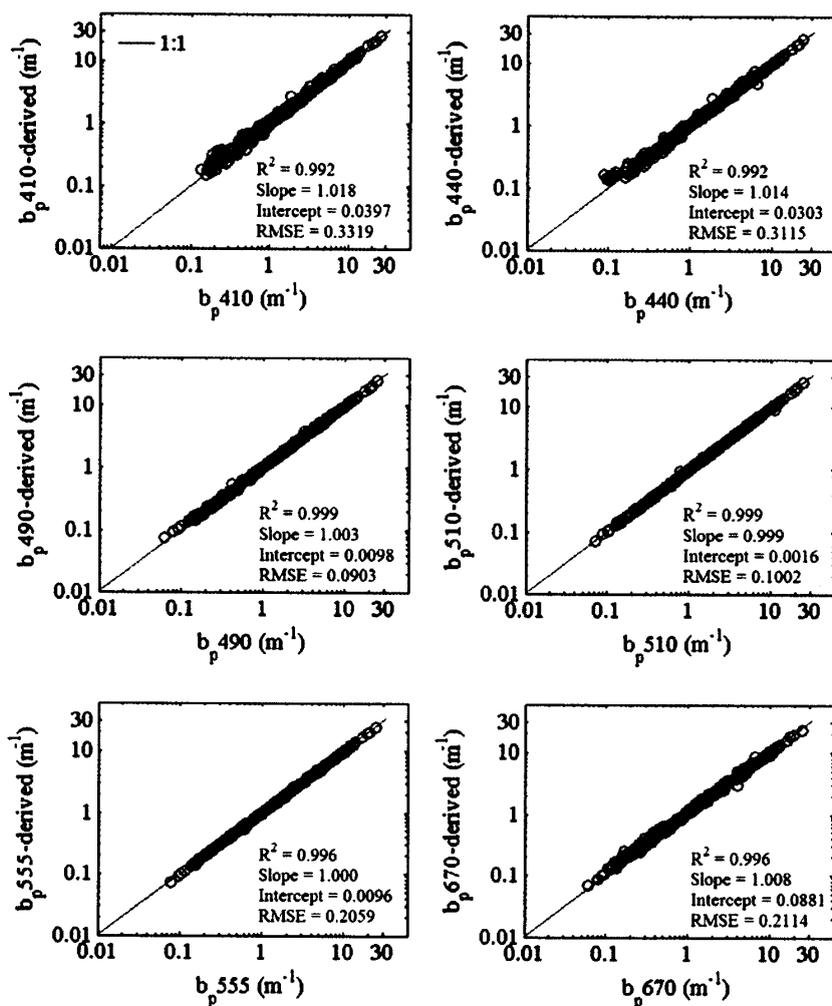


图 4-17 黄渤海水体颗粒物散射系数光谱模型当 S_s 取值 0.2358 的比较结果

对于颗粒物的后向散射系数的光谱通常用公式 4-6 的一般模型来表示, 其中 λ_0 是参考波段, S_{bbp} 是颗粒物散射系数的光谱斜率。由于颗粒物的后向散射系数数值较小, 因此在对颗粒物后向散射光谱直接拟合时, 误差会较大, 而水体总的后向散射系数亦可通过形如公式 4-6 的形式来表达, 如公式 4-7 所示。本研究将所测的后向散射光谱在所测可见光波长范围内利用最小二乘法以 532nm 作为参考波长进行拟合得到水体后向散射光谱的光谱斜率。图 4-16 是水体后向散射的光谱斜率 Y 与 532nm 处散射系数的关系分布, 可以看出, 水体后向散射的光谱斜率 Y 与 532nm 处散射系数具有较高的相关关系, 其相关系数约为 0.94。

$$b_{bp}(\lambda_0) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^{S_{bbp}} \quad (4-6)$$

$$b_b(\lambda) = b_b(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^Y \quad (4-7)$$

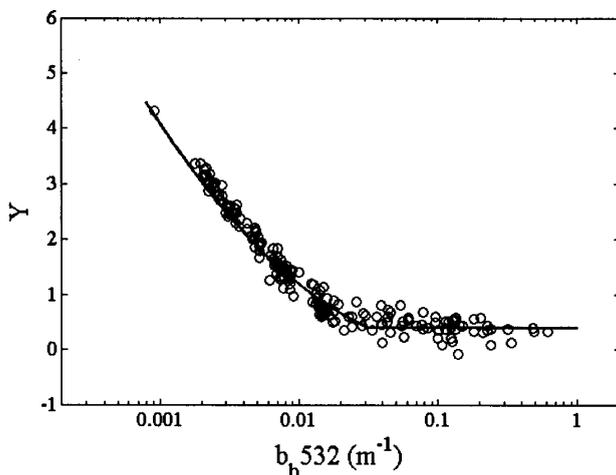


图 4-17 黄渤海水体颗粒物散射系数的光谱斜率 Y 与固定波长处散射系数的关系

通过图 4-17 可以看出，对于后向散射系数小于 0.03 的水体，其光谱斜率随着后向散射系数的增大呈现出单调递减的趋势，对于后向散射系数大于 0.03 的水体，光谱斜率围绕一固定值振荡，这说明对于后向散射系数较大的水体，其后向散射光谱形状较为一致。进一步利用最小二乘法将图 4-14 所反映的函数关系进行拟合，可得到如公式 4-8 所示的水体后向散射的光谱斜率 Y 与 532nm 处散射系数的具体函数关系。

$$Y = \begin{cases} 0.8687(\log_{10} b_{b,532})^2 + 1.445 \log_{10} b_{b,532} + 0.6057, & b_{b,532} \leq 0.03 \\ 0.4, & b_{b,532} > 0.03 \end{cases} \quad (4-8)$$

图 4-18 是黄渤海水体实测后向散射数据与利用公式 4-7 和 4-8 所确立的函数关系以 $b_{b,532}$ 为变量外推的后向散射系数在 412、440、488、595 及 676nm 处的比较。可以明显的看出，以 $b_{b,532}$ 为变量外推的后向散射系数与实测的后向散射系数基本重合于 1:1 等值线上。图 4-18 的比较结果证实了公式 4-7 和公式 4-8 在黄渤海水体应用的可靠性。同时，针对图 4-17，其中红色圆圈代表纯水值，可以看出，所拟合的曲线较好的包含纯水，进一步说明模型的可靠性。

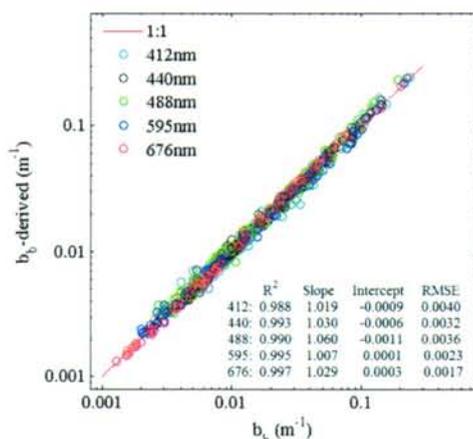


图 4-18 公式 4-7 和 4-8 所揭示的后向散射比光谱参数化模型的检验

4.2.2 固定波长光学性质参数化模型的建立

通过上一小节的研究,本研究利用在黄渤海广泛测量的 A 数据集详细分析了光学性质的光谱依赖性,并建立了相应光谱斜率的典型值以及光谱斜率与固定波长处的定量关系。根据前面关于固定波长处光学性质与悬浮颗粒物浓度关系的研究结果,无机颗粒物主导下,固定波长处光学性质可以通过悬浮物浓度较好的表征,有机浮游植物颗粒主导下,固定波长处光学性质可以通过叶绿素浓度较好的表征,本小节利用最小二乘法,分别对图 4-3 至图 4-5 所揭示的后向散射比大于 0.015 的无机颗粒物主导水体固定波长光学性质与悬浮物浓度的关系以及图 4-6 (b-c)与图 4-7 所揭示的浮游植物颗粒主导的水体的固定波长光学性质与叶绿素浓度的关系在对数坐标系下进行线性拟合,可得具体的函数关系。对于有机与无机颗粒混合的水体,根据本节开始部分所述,可以采用折中的办法,本研究采取无机颗粒物主导的后向散射比下界 0.015 与有机主导的上界 0.009 的平均值作为折中的办法。折中后的后向散射比为 0.012,对于后向散射比位于 0.012 与 0.015 之间的水体,其固定波长处光学性质与悬浮颗粒物的关系采用后向散射比大于 0.015 的水体固定波长处光学性质与悬浮颗粒物浓度的关系;对于后向散射比位于 0.009 与 0.012 之间的水体,其固定波长处光学性质与悬浮颗粒物的关系采用后向散射比小于 0.009 的水体固定波长处光学性质与叶绿素浓度的关系。具体固定波长处光学性质的参数化模型见表 4-2 所示。

表 4-1 黄渤海水体固定波长光学性质参数化模型

条件	函数关系模型	相关系数 R	公式编号
$b_{bp}' < 0.012$	$a_d 443 = 0.017 \times CHL^{0.63}$	0.86	4-9
	$b_p 532 = 0.4856 \times CHL^{0.7485}$	0.87	4-10
	$b_{bp} 532 = 0.0033 \times CHL^{0.6964}$	0.88	4-11
$b_{bp}' \geq 0.012$	$a_d 443 = 0.0571 \times SPM^{0.8174}$	0.94	4-12
	$b_p 532 = 0.5824 \times SPM^{0.9796}$	0.99	4-13
	$b_{bp} 532 = 0.0136 \times SPM^{0.938}$	0.99	4-14

注：CHL 代表叶绿素浓度， $b_{bp}' = b_{bp} 532 / b_p 532$ ，SPM 为悬浮物浓度

根据前面的研究结果，光学性质的参数化模型中固定波长处的光学性质与水体光学活性组分的关系除固定波长 $a_d 443$ 、 $b_p 532$ 及 $b_{bp} 532$ 与悬浮物的关系外，还包括 $a_{ph} 440$ 及 $a_g 443$ 与相应组分的关系，对于 $a_g 443$ ，其主要是与有色可溶有机物浓度的关系，目前对于有色可溶有机物的浓度无法具体量化，常用光吸收来表示，因此 $a_g 443$ 本身就代表有色可溶有机物浓度；至于 $a_{ph} 440$ ，其主要是与叶绿素浓度的关系。下面利用在黄渤海广泛测量的数据调查浮游植物 440nm 处的吸收系数与叶绿素浓度在黄渤海呈现什么样的关系。

图 4-19 是黄渤海水体浮游植物颗粒 440nm 处吸收系数与叶绿素浓度的关系。可以看出，浮游植物的吸收系数与其叶绿素浓度在对数坐标系下呈现较好的线性相关关系，相关系数的平方约为 0.91。Bricaud 等^[39]所构建的浮游植物颗粒在 440nm 处吸收系数与叶绿素浓度关系式作为对比也显示在图 4-17 中，如黑线所示，可以看出 Bricaud 模型对于黄渤海水体不适用，尤其在高叶绿素浓度的水域。本研究采用最小二乘法将图 4-17 中所揭示的黄渤海水体的浮游植物在 440nm 处的吸收系数与叶绿素浓度的关系按照 Bricaud 模型进行系数重新拟合，得到如公式 4-15 的关系，其中幂指数项 0.9963 大于 Bricaud 模型的幂指数项，与丘仲锋^[66]在东海的研究结果较为接近，此外许晓强等^[63]在珠江口的研究结果表明珠江口附近水域的幂指数项要低于 Bricaud 模型的幂指数项，这充分反映出不同海

区浮游植物种群结构的差异导致这种系数的变化。

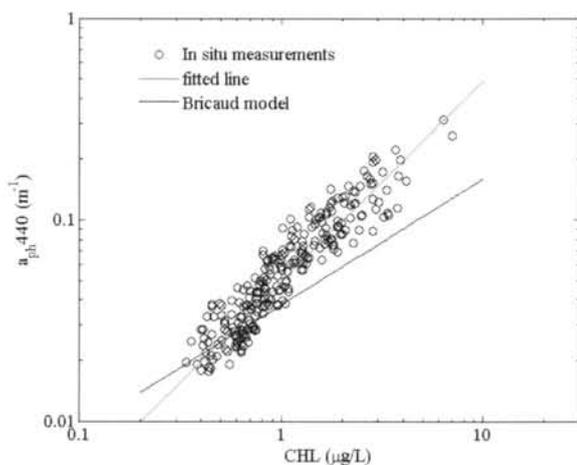


图 4-19 黄渤海水体浮游植物颗粒 440nm 处吸收系数与叶绿素浓度的关系

$$a_{\text{ph } 440} = 0.0494 \times \text{CHL}^{0.9963} \quad (4-15)$$

4.2.3 黄渤海水体的光学性质参数化模型

总结上述对光学性质参数化模型中光学性质光谱的波长依赖性以及固定波长光学性质与水体光学活性组分的关系的研究结果,黄渤海水体光学性质参数化模型可以通过图 4-20 所揭示的流程进行构建。

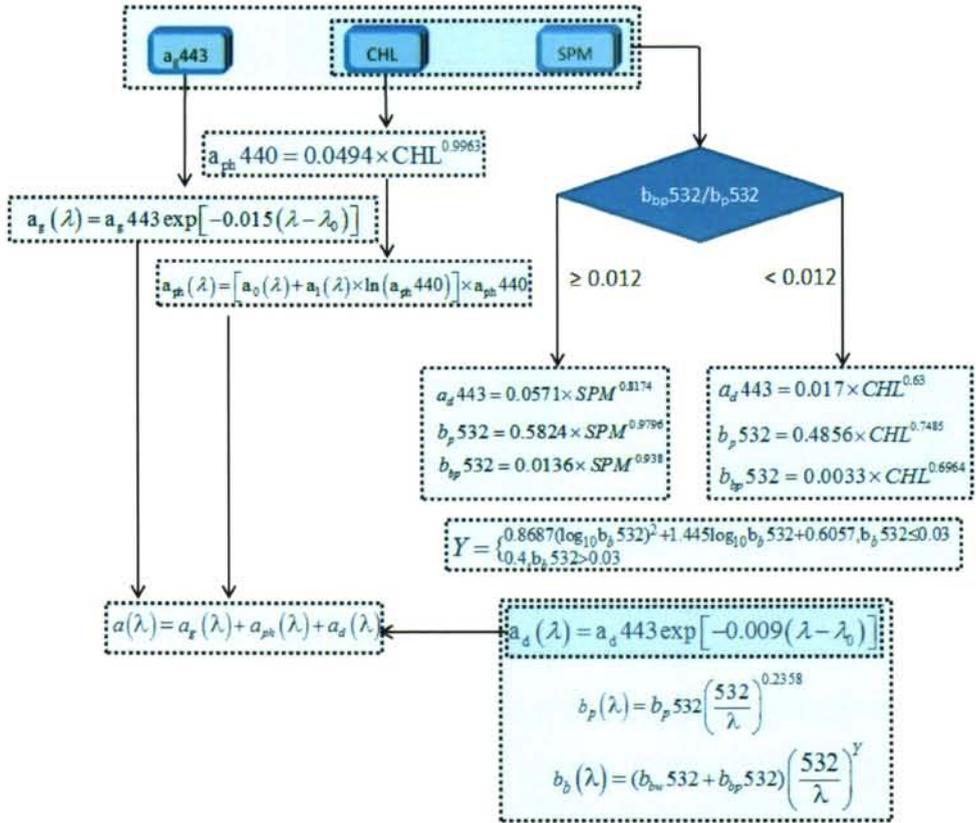


图 4-20 黄渤海水体光学性质参数化流程图

4.3 黄渤海表层水体颗粒物类型的季节性分布

通过上节黄渤海水体光学性质参数化模型建立可以看出，光学性质与水体成分（如叶绿素浓度及悬浮物浓度）之间的关系强烈依赖于水体的颗粒物类型。因此对于黄渤海水体成分的精确的光学遥感反演必须建立在已知水体颗粒物主导类型的基础之上。而目前对于海色遥感来说，水体颗粒物类型的划分仍然是个难题，在将来的研究中，会增加对这方面的探讨。

本研究以实测的四个季节的后向散射比的空间分布特征为基础构建出黄渤海表层水体的颗粒物主导成分的季节性区域分布特征，这对于高精度的海洋水色遥感反演具有重要的指导意义。如图 4-21 所示，其中红线与陆地（本文指中国大陆）之间的水域为无机颗粒物主导的水域，黑线与 124°E 经线内或闭合黑线内的水域为有机颗粒物（浮游植物）主导的水域，红线和黑线之间是浮游植物和无机颗粒混合类型的水体。可以看出，浮游植物主导的水域在夏季面积较广，渤海

中部,北黄海中部至南黄海中部较大区域内均由浮游植物主导,秋季该区域向远岸方向收缩,冬季,几乎消失,到春季慢慢的开始向近岸方向扩散增大。

这里需要说明的是图4-21所揭示的区域仅是依据实测数据所绘制的示意图,其精细结构的时空分布特征需要将来更多更为广泛的实测数据的补充或在开发出成熟的遥感反演算法后基于卫星测量的更为精细的描绘。

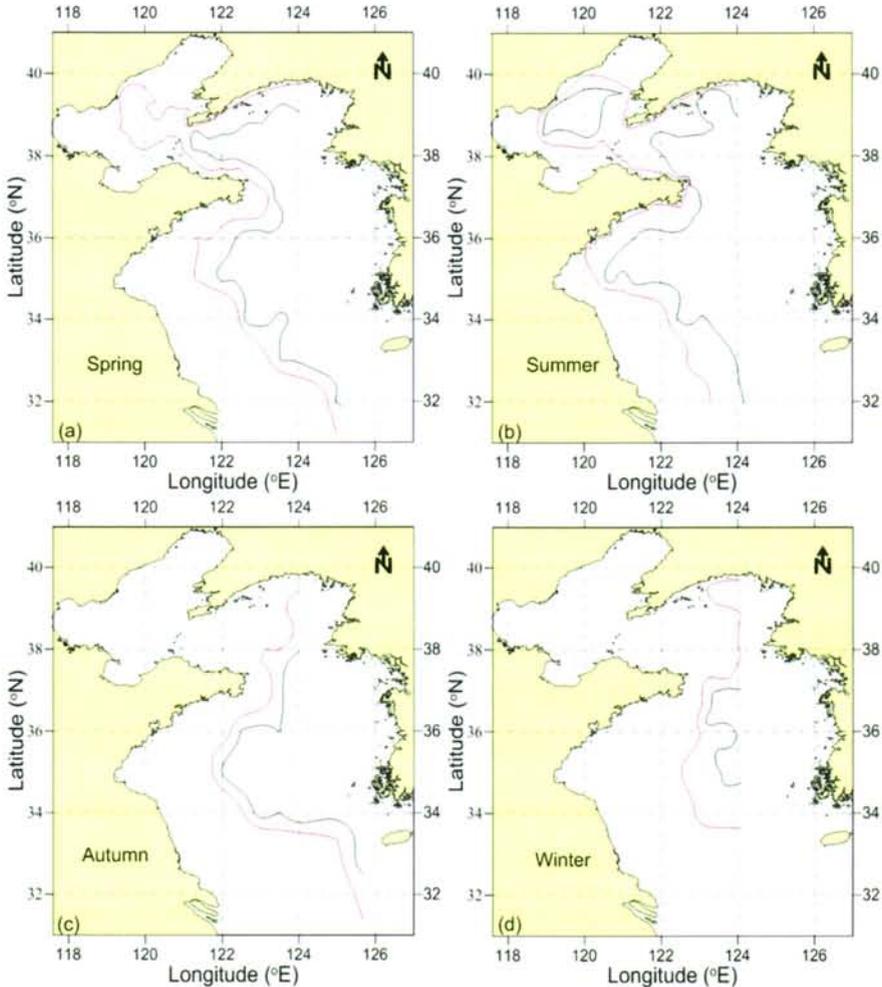


图 4-21 黄渤海表层水体颗粒物类型的季节性区域分布

4.4 小结

本章在上一章的研究基础上得出黄渤海水体光学性质主要由颗粒物主导的结论,然后以实测数据为基础,首先结合颗粒物的折射率定量化后向散射比区分颗粒物类型的能力,依此为基础深入分析了不同类型颗粒物主导下光学性质与颗粒物浓度的关系,最后通过对广泛测量的光学性质数据的光谱依赖性及其固定波长

处光学性质与水体光学活性组分关系的分析,建立了黄渤海水体光学性质参数化模型。具体研究结果如下:

1) 光学性质与悬浮颗粒物的关系

对于黄渤海水体,后向散射比大于 0.015 的水体主要无机颗粒物主导,光学性质与悬浮物浓度具有较好的线性关系(对数坐标系下);后向散射比小于 0.009 的水体主要由浮游植物颗粒主导,其光学性质与叶绿素浓度具有较好的线性关系(对数坐标系下)。

2) 光学性质参数化模型

黄渤海水体光学性质的光谱依赖性具有以下特征:浮游植物吸收光谱依赖性方面,浮游植物的吸收光谱可以通过 440nm 处的吸收系数进行较好的表征;有色可溶有机物及非浮游植物颗粒的吸收光谱斜率方面,有色可溶有机物及非浮游植物的吸收光谱斜率变化范围较小,其中有色可溶有机物的光谱斜率主要集中在 0.014 nm^{-1} - 0.017 nm^{-1} 的范围内,其典型值约为 0.015 nm^{-1} ;而非浮游植物颗粒的光谱斜率主要集中在 0.008 nm^{-1} - 0.01 nm^{-1} 的范围内,其典型值约为 0.009 nm^{-1} ;颗粒物散射系数光谱依赖性方面,对于黄渤海水体,其颗粒物的散射系数光谱斜率变化较小,且与固定波长处颗粒物的散射性质无关,比较结果显示,黄渤海水体的颗粒物散射光谱斜率可以用常量 0.2358 表征;后向散射系数的光谱依赖性方面,后向散射光谱具有较好的光谱依赖性,其光谱斜率与固定波长处的后向散射系数具有较高的相关性,当 532nm 处的后向散射系数小于 0.03 时,后向散射光谱斜率随后向散射系数的增大而减小,当 532nm 处的后向散射系数大于 0.03 时,后向散射光谱斜率基本保持一恒定值。

在固定波长光学性质与水体光学活性组分方面:浮游植物在 440nm 处的吸收系数与叶绿素浓度具有较高的相关性,与 Bricaud 模型相比,单位叶绿素浓度的浮游植物 440nm 处的吸收系数较高,尤其在叶绿素浓度较高的水域,表现出明显的区域化特征;对于固定波长处的非浮游植物颗粒的吸收系数以及散射和后向散射系数,在浮游植物主导的水体,它们可以通过叶绿素浓度较好的表征;对于无机颗粒物主导的水体,它们可以通过悬浮物浓度进行较好的表征。

上述这些研究结果对于建立高精度的遥感反演方法以及利用光学手段对悬浮颗粒物动态变化的监测方面具有重要的帮助和指导意义。

5 沙尘暴对水体光学性质的影响

水体光学性质的变化除受到物理和生物过程的影响外,短时间尺度的海洋过程及天气过程同样会对其产生重要影响。本章以上述对黄渤海水体光学性质变化研究为基础,利用沙尘暴期间定点周日观测数据分析沙尘暴过程对光学性质的变化的影响。

5.1 光学性质分析

第四章的研究揭示出影响水体光学性质变化的主要水体光学活性组分是悬浮颗粒物,因此本研究重点关心的光学参数是与颗粒物特性密切相关的颗粒物的散射系数 (b_p)、后向散射比 (\tilde{b}_{bp}) 以及去除浮游植物散射贡献后的散射系数 (b_d)。本节主要围绕上述光学参数的处理方法进行阐述。

5.1.1 散射系数

水体的吸收和衰减系数(除去纯水的贡献,分别是颗粒物和黄色物质的吸收和衰减之和,简记为 a_{nw} 和 c_{nw})可由高光谱吸收衰减仪直接测量,散射系数则可通过方程 5-1 进一步求出。

$$b_p = c_{nw} - a_{nw} \quad (5-1)$$

5.1.2 后向散射比

对于 2006 年 4 月 SOLAS 航次所获取的光学数据中没有关于后向散射系数的测量。因此,无法直接计算出后向散射比。浊度,从定义上也属于后向散射的范畴,因此其与后向散射系数应具有较高的相关性。图 5-1 是不同颗粒物类型下的后向散射系数与浊度的相关关系,可以看出,二者在对数坐标下具有较高的相关性,其相关系数高达 0.99,基本处于一条直线上,并且这种关系不受颗粒物类型的影响。因此,本章研究中通过浊度导出后向散射系数。利用最小二乘法进行拟合,得到公式 5-2 的二者的定量关系。

$$b_{bp} 532 = 0.01141 \times Tur^{1.022} \quad (5-2)$$

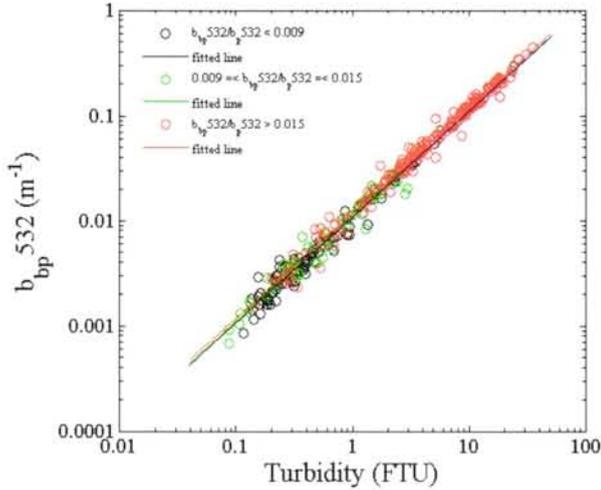


图 5-1 黄渤海后向散射比分别小于 0.009、大于或等于 0.009 且小于或等于 0.015 以及大于 0.015 的水体的后向散射系数 $b_{bp,532}$ 与浊度的关系

利用公式 5-2，可间接求出后向散射比。其推导公式如方程 5-3 所示：

$$\tilde{b}_{bp,532} = \frac{b_{bp,532}}{b_{p,532}} = \frac{0.01141 \times Turbidity^{1.022}}{b_{p,532}} \quad (5-3)$$

5.1.3 非浮游植物颗粒的散射系数

如前所述，春季南黄海中部水域上混合层内的颗粒物是有机的浮游植物颗粒主导。因此，该区域颗粒物的散射性质由浮游植物决定。虽然在上一章已经较好的定义浮游植物的散射贡献，但是浮游植物叶绿素浓度与散射系数的关系相对还是有些离散，这主要是由于浮游植物色素细胞的尺寸与细胞的有机碳含量的差异所致。对于浮游植物，不同种类有着不同的细胞的尺寸与细胞的有机碳含量，因此其对散射的响应关系则不同，即每一种浮游植物有着其特定的散射特性^[94,95]。由于实际测量中针对浮游植物种类的信息没有进行测量，无法具体确定该水域的浮游植物的散射的具体特性，为了使公式 4-10 更适合当地水域的特性，在这里仅选取位于春季黄海中部站位 A 附近的水体的叶绿素浓度与散射系数，重新拟合公式 4-10 的系数，如图 5-2 所示，散射系数 $b_p,532$ 与 CHL 浓度具有较高的相关关系，其相关系数高达 0.995（对数坐标下）。散射系数 $b_p,532$ 与 CHL 浓度极高的相关性反应如下两个事实：第一，进一步反映出南黄海中部上混合层内水体在春季确实由浮游植物主导；第二，站位 A 附近水域的浮游植物的种群结构是一致的。

重新拟合后浮游植物散射系数与叶绿素浓度的关系如公式 5-4 所示。

$$b_p 532 = 0.51 \times CHL^{0.5} \quad (5-4)$$

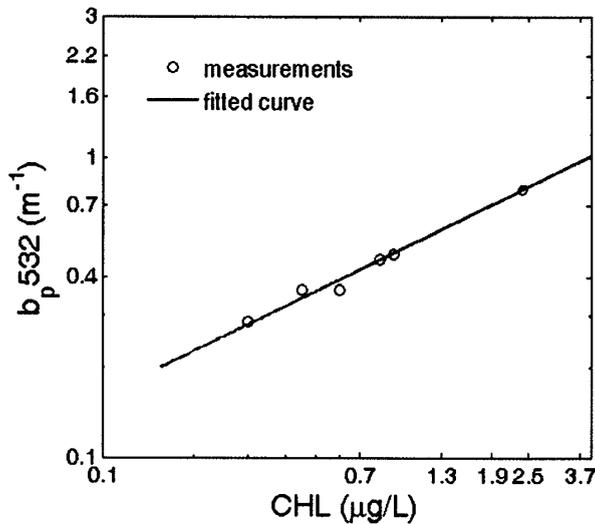


图 5-2 春季南黄海站位 A 附近水体的浮游植物叶绿素浓度与散射系数的关系

为了定量的评估沙尘暴期间沉降于水体中的沙尘颗粒所引起的散射, 利用公式 5-4 所确定的叶绿素浓度与散射系数的关系, 在所测量的总的颗粒物散射中将其减去, 该差值 Δ 定义如公式 5-5 所示, 即为去除浮游植物及其衍生物的散射贡献后的散射系数 ($b_d 532$)。

$$\Delta = b_p 532 - 0.51 \times CHL^{0.5} = b_d 532 \quad (5-5)$$

5.2 沙尘暴期间气象条件介绍

2006 年 4 月 23 日在南黄海中部站位 A (如图 2-2 所示) 作定点连续观测期间 (SOLAS 实验航次), 一次较强的沙尘暴过程经过。关于该沙尘暴的详细描述见 Liu 等^[98]。本节结合现场测量的风速及气溶胶光学厚度数据对该次沙尘暴过程做补充性的详细分析。图 5-3 是在站位 A 所观测的风速及气溶胶光学厚度的日变化特征。其中气溶胶光学厚度数据受天气条件的影响测量较少。

从图 5-3 中可以看出, 在 4 月 23 日上午 09:00 气溶胶的光学厚度较高, 约为 1.7244, 在上午 10:30 持续升高至 2.4628, 在下午 13:55 大幅度的降至 0.4206。风向 (在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间, 风向的最大值是

340°, 最小值是 222°) 反映出在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间风是从西北方向刮来。风是沙尘暴移动的唯一动力源, 因此, 沙尘暴的通过状态可以通过风速的变化并结合气溶胶光学厚度及 Liu 等^[98]的描述较好的推导出。

风速在 4 月 23 日凌晨 03:00 约为 6.1m/s, 在 06:00 时, 增加到 8.2m/s, 在 09:00 时基本不变, 同时气溶胶光学厚度较大, 这意味着沙尘暴的前缘在 06:00 时已经到达站点 A; 在 09:00 至 12:00 期间, 风速急剧增加至约 14m/s 及气溶胶光学厚度也在持续增强, 这意味着沙尘暴越来越强; 在下午 15:00, 风速急剧减小至 5.5m/s, 同时气溶胶光学厚度也骤减, 这意味着该沙尘暴已经过去; 在下午 16:00, 风速又开始增加, 在下午 18:00 持续升高, 在 21:00 又骤降至下午 15:00 的水平, 但这次风速增加明显低于之前的沙尘暴到来时的风速的变化, 这意味着一股弱的沙尘暴的侵袭, 在 21:00 离开, 在 4 月 24 日凌晨 3 点, 风速又开始增大, 直至凌晨 06:00 继续升高, 这次风速的变化与 4 月 23 日 15:00 至 18:00 的变化较为一致, 风速的大小也较为接近, 同样意味着再一次的弱沙尘暴的侵袭。

由此可以看出, 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间, 共有 3 轮沙尘暴侵袭了站点 A, 其中第一轮较强, 其能通过气溶胶光学厚度得到较好的体现, 在接下来的两轮沙尘暴较弱。这里需要特别说明的是, 上述所描述的沙尘暴过程的发生时间和结束时间依赖于实际测量的时间间隔, 更为精细的沙尘暴的变化过程的描述受测量的限制本研究无法详细描绘。

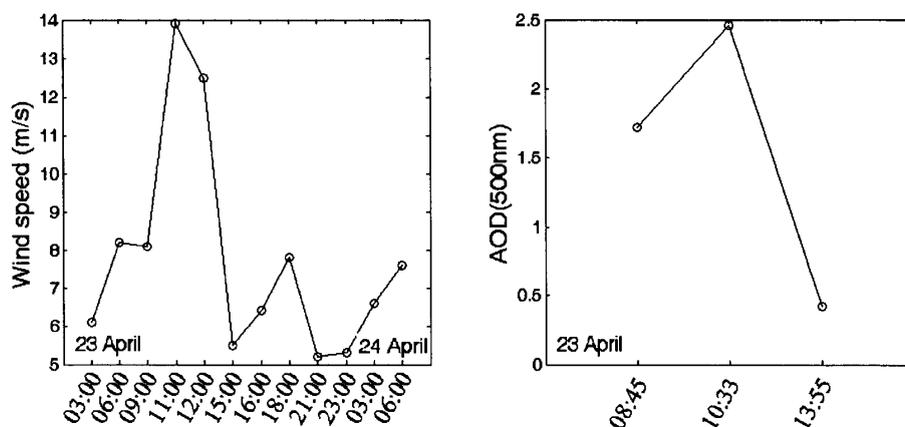


图 5-3 春季南黄海站点 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间风速及气溶胶的周日变化特征

5.3 沙尘暴期间水体物理和生物特性的变化

图 5-4 是站位 A 沙尘暴期间同步测量的温度、盐度、叶绿素浓度及浊度的周日变化特征。对于温度和盐度,在水深 4m 至 50m 内具有较大的日变化特征,而位于 50m 以深的水体的温盐比较稳定,几乎无变化,除在 50m 深度左右呈现不规律的周期性振荡外。特别地,在 4 月 23 日上午 12:00 与 4 月 24 日凌晨 03:00,在上表层水体呈现较为明显的高温高盐特征。对于位于深度 20m 到 50m 的水体,其温度和盐度在 4 月 23 日上午 12:00 开始增加,在接下来的时刻,一致保持持续增高。对于叶绿素浓度,在 50m 以深水体,其值一直较低;对于位于深度 4m 到 30m 的水体内,可以看到叶绿素浓度在周日期间具有显著的变化。在 4 月 23 日上午 12:00 之前,15m 以浅的叶绿素浓度约为 $1.7 \mu\text{g/L}$,并伴随有较弱的次表层最大值的出现,该次表层最大值随着时间深度也在变化;在上午 12:00,位于 8m 至 22m 深度内的水体的叶绿素浓度显著的增加,其平均值约为 $2.1 \mu\text{g/L}$;在下午 15:00,相较于之前时刻,8m 至 22m 深度内的叶绿素浓度略微降低,但在 4m 至 20 深度内叶绿素的垂向分布则非常均匀,其平均值仍然高于上午 12:00 之前的值,同时,相对较强的叶绿素次表层最大值在 24m 深度处清晰可见;在 4 月 23 日下午 18:00,4m 至 13m 内的叶绿素浓度依然较高,其值约为 $2.0 \mu\text{g/L}$,但 13m 至 22m 深度内的值却明显较之前时刻降低;在下午 21:00,17m 深度以浅水体叶绿素浓度垂向分布较为均匀,其值约为 $1.75 \mu\text{g/L}$,同时,在 20m 深度处出现较强的叶绿素浓度次表层最大值,其值约为 $2.0 \mu\text{g/L}$;在接下来的时刻,上混合层内的叶绿素浓度垂向分布都较为均匀,平均值约为 $1.75 \mu\text{g/L}$,除在 4 月 24 日凌晨 06:00 时刻叶绿素浓度略低外(值约为 $1.62 \mu\text{g/L}$),此外叶绿素次表层最大值在这些时刻也基本消失。对于浊度,50m 以深水体的浊度最高,最小值出现在上混合层底至 50m 深度内的中层水体,上混合层水体的浊度高于中层水体,但仍远低于底层水体。从前面的研究可以看出,底层高值主要是潮流作用下所致的底部沉积物的再悬浮,上混合层层水体高于中层水体主要是更多浮游植物颗粒的存在导致的,但从其周日变化特征可以看出,其与上混合层内叶绿素浓度的周日变化特征并不相符。例如,在 4 月 23 日上午 12:00,4m 至 8m 深度的水体叶绿素浓度明显低于 8m 至 22m 深度内的叶绿素浓度,但相同时刻 4m 至 8m 深度的水体浊度却与 8m 至 22m 深度内的浊度在数值上一致。

此外，如前所述，在4月23日夜间24:00、4月24日凌晨03:00和06:00时刻内上混合层内叶绿素浓度的垂向分布较为均匀，而在这些时刻混合层内的浊度的垂向分布则是不均匀的。

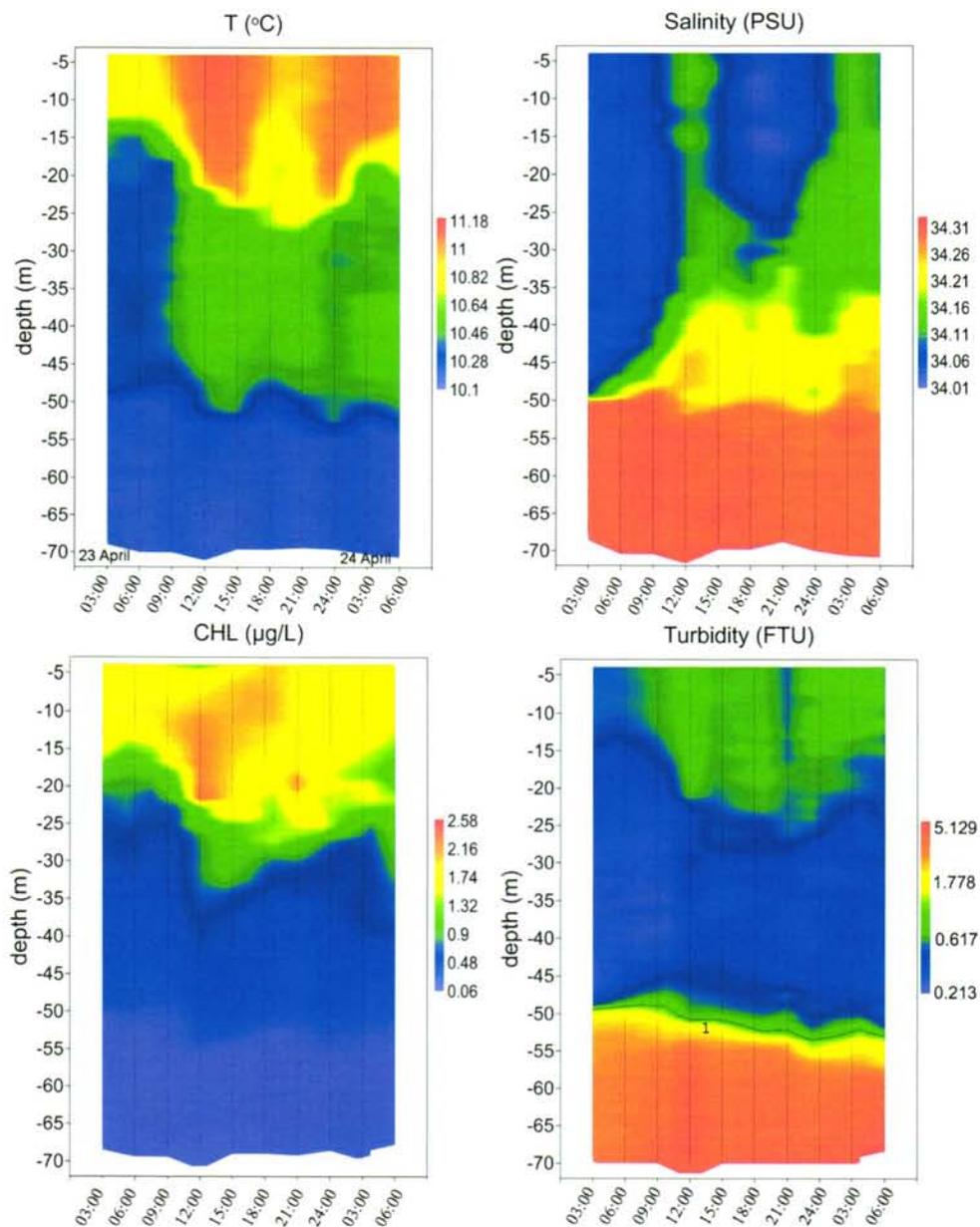


图 5-4 春季南海黄海站点 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间温度、盐度、叶绿素浓度及浊度剖面的周日变化特征

5.4 沙尘暴期间上混合层水体光学散射性质的周日变化特征

如上节所述, 站位 A 水体的周日变化主要发生在上混合层内, 此外由于当时现场测量光学性质的仪器 (高光谱吸收衰减 AC-S) 采用的是电缆直读方式, 受电缆线长度的限制, 最大测量深度仅为 30m 深, 因此本节主要围绕上混合层内光学性质在沙尘暴期间的周日变化特征进行讨论。

5.4.1 颗粒物散射系数的周日变化特征

图 5-5 是站位 A 上混合层水体内颗粒物散射系数 b_p532 的周日变化特征。可以看出, 在整个周日期间, 上混合层水体内颗粒物散射系数具有显著的变化特征。在 4 月 23 日凌晨 03:00, b_p532 在整个混合层内分布较为均匀, 并且其值较低, 约为 0.68 m^{-1} ; 在凌晨 06:00, 4m 至 7m 深度内水体的 b_p532 开始增大, 而 7m 至 11m 深度内的 b_p532 与前一时刻相同; 在上午 09:00, 整个混合层深度内的 b_p532 显著增大, 且垂向分布较为均匀, 其值约为 0.76 m^{-1} ; 在上午 11:00 和 12:00 时刻, 其数值大小及分布与上午 09:00 时刻一致, 除在 11:00 时刻值略微降低以及混合层深度明显加深外; 在下午 15:00, 整个混合层内 b_p532 开始降低, 其值约为 0.71 m^{-1} ; 在下午 16:00, b_p532 较前一时刻略低; 而在下午 18:00, 4m 至 12m 深度内水体的 b_p532 再一次显著增大; 在下午 21:00 时刻, 混合层内的 b_p532 显著的降低, 其值与 4 月 23 日凌晨 03:00 时刻的值相当; 在下午 23:00 时刻, 混合层内 b_p532 与前一时刻相比基本无变化; 在 4 月 24 日凌晨 03:00 时刻, 整个混合层内 b_p532 开始增大, 且呈现不均匀的分布特征, 在 6m、8m、12m 及 14m 深度处, 四个峰值显而易见; 在接下来的时刻, 混合层内 b_p532 的垂向分布仍不均匀, 仅一些弱的峰值可以观察到, 但数值较前一时刻低。

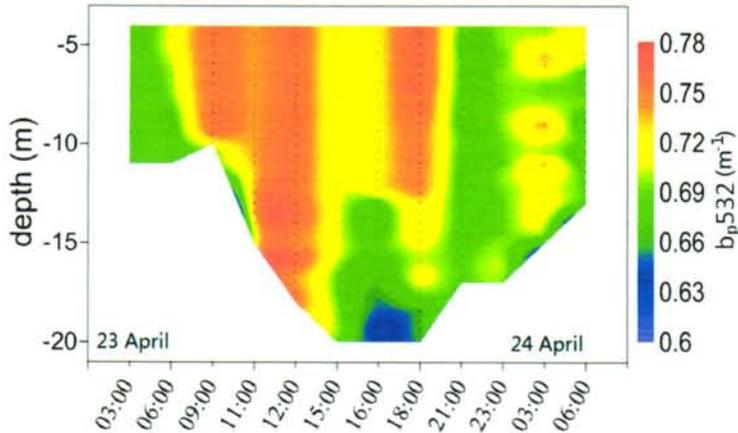


图 5-5 春季南黄海站位 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间上混合层内颗粒物散射系数的周日变化特征

5.4.2 颗粒物后向散射比的周日变化特征

图 5-6 是站位 A 上混合层水体颗粒物后向散射比 \bar{b}_{bp532} 的周日变化。同样，其具有显著的周日变化。在 4 月 23 日凌晨 03:00 时刻，颗粒物的后向散射比校对， \bar{b}_{bp532} 值约为 0.0075；在凌晨 06:00，4m 至 7m 深度内水体的后向散射比增大，7m 至 11m 深度内的值与前一时刻基本相同；在上午 09:00 时刻，整个混合层深度内的后向散射比显著变高，其值约为 0.011；在上午 12:00 时刻，4m 至 11m 深度内水体的 \bar{b}_{bp532} 数值与前一时刻基本相同，然而该时刻的位于 11m 至 17m 深度内的 \bar{b}_{bp532} ，其值明显低于位于 4m 至 11m 深度内水体的 \bar{b}_{bp532} 数值，这与该时刻下散射系数 b_{p532} 的剖面分布特征不一致；在下午 15:00 时刻， \bar{b}_{bp532} 开始降低，其值约为 0.009；在下午 18:00 时刻， \bar{b}_{bp532} 又开始增高，尤其在 12m 至 20m 深度内的水体；在下午 21:00，整个混合层内 \bar{b}_{bp532} 降低至凌晨 03:00 时刻的水平；但在 4 月 24 日 03:00 时刻， \bar{b}_{bp532} 又开始增高，与该时刻的浊度及散射系数一样呈现不均匀的分布特征；在接下来凌晨 06:00 时刻，其值仍较大，垂向剖面分布同样不均匀。

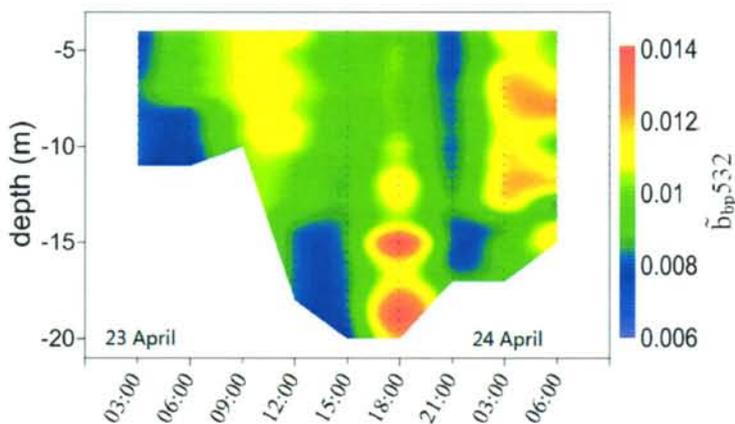


图 5-6 春季南黄海站位 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间上混合层内颗粒物后向散射比的周日变化特征

5.4.3 非浮游植物颗粒散射系数的周日变化特征

图 5-7 是站位 A 上混合层水体内除去浮游植物影响的剩余散射 (b_d) 的变化特征。通过该图可以明显的看出，在 4 月 23 日凌晨 03:00、下午 15:00 及 21:00 时刻，整个上混合层内水体的 b_d 均约等于 0 m^{-1} ；在 4 月 23 日凌晨 06:00 时刻，4m-7m 深度内的 b_d 值约为 0.005 m^{-1} ，7m 至 11m 深度内的值同样约等于 0 m^{-1} ；在 4 月 23 日上午 09:00 和 12:00 时刻，表层 4m 深度处的 b_d 值最高，约为 0.14 m^{-1} ，垂向剖面上随着深度的增加呈递减趋势；在 4 月 23 日下午 18:00、4 月 24 日凌晨 03:00 和 06:00 时刻， b_d 呈现不均匀的垂向分布，其平均值约为 0.05 m^{-1} 。

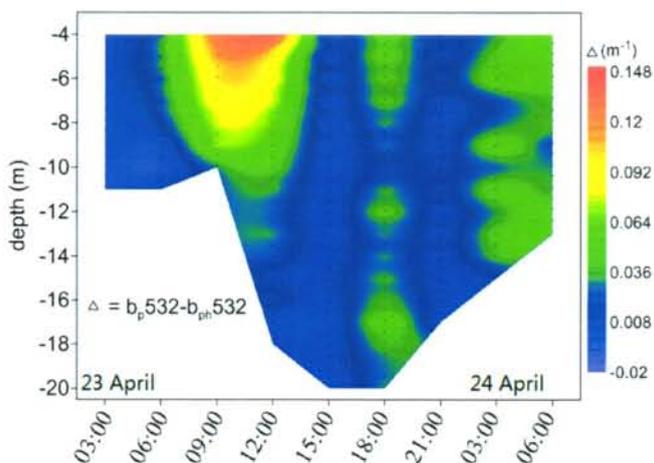


图 5-7 春季南黄海站位 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间上混合层内去除浮游植物及其衍生物影响的散射的周日变化特征

5.5 沙尘暴对光学散射性质的影响

通过上一章节的分析,已经证明后向散射比 \bar{b}_{bp} 能较好的区分颗粒物的类型。 \bar{b}_{bp} 低于 0.009 的水体表明水体中的颗粒物主要由浮游植物颗粒构成, \bar{b}_{bp} 高于 0.015 的水体表明水体中的颗粒物主要由无机的泥沙颗粒构成。

光学散射性质的日变化特征揭示出:当 b_d 的值约等于 0 m^{-1} 的时刻,后向散射比 $\bar{b}_{bp,532}$ 的值均小于 0.009,但当 b_d 值显著大于 0 m^{-1} 的时刻,后向散射比 $\bar{b}_{bp,532}$ 的值均大于 0.01。大于 0.01 的 $\bar{b}_{bp,532}$ 意味着水体含有无机颗粒物,而对于南黄海中部上混合层水体通过前面的分析可以看出,在春季,其上层水体主要由有机的浮游植物颗粒主导,那么无机颗粒物从何处来?什么原因导致无机颗粒物的出现?影响水体中无机颗粒物的出现的共有三个动力因素,分别是底层沉积物的向上再悬浮、潮汐和海流、以及大气中的沙尘沉降。同样,通过第三章和第四章已经表明潮汐和海流不会导致南黄海中部上层水体的无机颗粒物的引入。因此对于无机颗粒物的出现要么是即时的天气(如大风)导致底层无机颗粒物的上移或者是沙尘暴到来时沙尘颗粒的沉降。以下主要围绕这两个动力因素来分析无机颗粒物出现的原因。

通过 5.3 节关于水体温盐的周日变化特征可以揭示出:站位 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间,水体的运动为水平方向上的运动,其垂向混合动力较弱。虽然在 4 月 23 日上午 12:00 时刻,盐度的垂向剖面分布特征较之前时刻相比感觉好像是底部高盐水体的抬升,同时,该时刻的风速较大(风速约为 13 m/s),因此容易误认为是大风导致的水体垂向混合作用增强使得底层水体的上移引起盐度的抬升。如果假设大风导致的水体垂向混合作用增强使得底层水体的上移引起盐度的抬升成立的话,那么,在底层冷水入侵的情况下,位于 50m 深度以上的水体的温度应该较之前时刻更低。事实上,该时刻在 50m 深度以上的水体的水温比之前时刻要高(见图 5-4),此外,从浊度的剖面分布可以看出,50m 深度附近浊度值为 1 的等值线在整个周日期间较为稳定,而且还有稍许的随时间下降的趋势。因此,上述假设不成立。同理,由于 50m 深度以浅水体的盐度较上一时刻在增大,因此上层水体的下沉同样不可能。因此,温盐垂向变化特征揭示了水体的运动为水平运动。这样,底层无机颗粒物的上移这个因素也可以排除。因此,无机颗粒物的引入是由来自沙尘暴的沙尘颗粒沉降所致。

通过上述对于散射性质尤其是 b_d 的周日变化特征的描述容易发现 b_d 的周日变化与沙尘暴发生的时刻具有较高的一致性,即在沙尘暴发生的时刻, b_d 均显著大于 0 m^{-1} ,在沙尘暴到来之前以及消失的时刻, b_d 均约等于 0 m^{-1} 。图 5-8 是站点 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间上混合层内 6m 深度处 b_d 的周日变化与风速周日变化的相关性。这种高度的一致性进一步揭示了 b_d 的值确实是沉降于水体的沙尘颗粒的散射,同时也进一步反映了公式 5-3 所确立的关系是可靠的间接反映了前面关于沙尘暴过程的描述是准确的。

结合叶绿素浓度的周日变化所反映的生物过程,光学散射性质的日变化可以合理的作如下解释:

在第一轮沙尘暴来袭之前,由于没有沙尘颗粒的沉降, b_d 约等于 0 m^{-1} ,散射系数由浮游植物颗粒所决定,相应的 \tilde{b}_{bp532} 的值较低,小于 0.009;伴随着第一轮沙尘暴的来袭,由于沙尘颗粒的沉降,表层 4m 至 8m 深度内水体的 b_d 的值开始增加,同样的深度内, b_p532 与 \tilde{b}_{bp532} 也开始增大;随着沙尘暴不断的增强,当峰值在 4 月 23 日上午 12:00 到来时,随着沉降沙尘颗粒的增多, b_d 的值得到显著的增大,尤其在 4m 至 8m 深度内,表层最大值可达 0.14 m^{-1} ,并且随着深度的增加 b_d 的值在降低,在 4m 至 8m 的深度内, \tilde{b}_{bp532} 也都大于 0.01,上混合层内 10m 以深的水体 \tilde{b}_{bp532} 也较之前时刻增大,相对 10m 以浅较小,对于 b_p532 ,其值在混合层内的分布于 b_d 和 \tilde{b}_{bp532} 不同,其在整个混合层深度内均较大,且垂向分布较为均匀,通过前面关于叶绿素浓度的周日变化特征描述们可以看出,该时刻 10m 至 20m 深度内的叶绿素浓度较高,因此在较多浮游植物颗粒的影响下,上混合层内 10m 以深的水体后向散射比较其上层水体低,散射系数则也较大;伴随着第一轮沙尘暴的结束,在 4 月 23 日下午 15:00,由于无沙尘颗粒的沉降,之前沉降在上混合层内的沙尘颗粒也沉降到底层,此时的 b_d 值又恢复到起初的约等于 0 m^{-1} 的值,相应的水体的光学散射性质又恢复到主要由浮游植物颗粒控制的状态,因此 \tilde{b}_{bp532} 也相应的小于 0.009, b_p532 随之降低,但仍高于之前凌晨 03:00 时刻的值,主要是由于该时刻的叶绿素浓度要比之前凌晨 03:00 时刻的值高;当第二轮沙尘暴来袭时,在 4 月 23 日下午 18:00 时刻, b_d 值又开始增大,但此时其数值相较于第一轮沙尘暴的来袭所导致的 b_d 值较小,主要是由于该次沙尘暴的强度明显弱于第一轮,相应的 \tilde{b}_{bp532} 也增大至 0.01 以上, b_p532 也随之增大;当第二轮沙尘暴消失时,在 4 月 23 日下午 21:00 时刻, b_d 值又恢复

到约等于 0 m^{-1} 的值, $\bar{b}_{\text{p}532}$ 也相应的小于 0.009, $b_{\text{p}532}$ 也随之降低; 同样, 当第三轮弱的沙尘暴来袭时, 在 4 月 24 日凌晨 03:00 和 06:00 时刻, b_{d} 、 $\bar{b}_{\text{p}532}$ 及 $b_{\text{p}532}$ 的变化同第二轮沙尘暴来袭时的变化特征一致。此外, 由上混合层内 b_{d} 的剖面分布还可以看出, 当沙尘暴发生时, 上混合层内 b_{d} 的剖面分布是不均匀的, 这主要由于大气中的沙尘颗粒的分布是不均匀的^[99], 因此沙尘颗粒的沉降也是不均匀的, 最终导致 b_{d} 的剖面分布是不均匀的。

这里需要一提的是, 在 4 月 23 日上午 12:00、下午 15:00 以及 18:00 时刻, 叶绿素浓度相较于其他时刻较高, 且都发生在第一轮沙尘暴来袭后。至于叶绿素浓度的升高是由于携带营养盐的沙尘颗粒的沉降所致还是浮游植物自身的日变化决定的, 由于同期关于该区域浮游植物的日变化信息的缺少而无法判定。

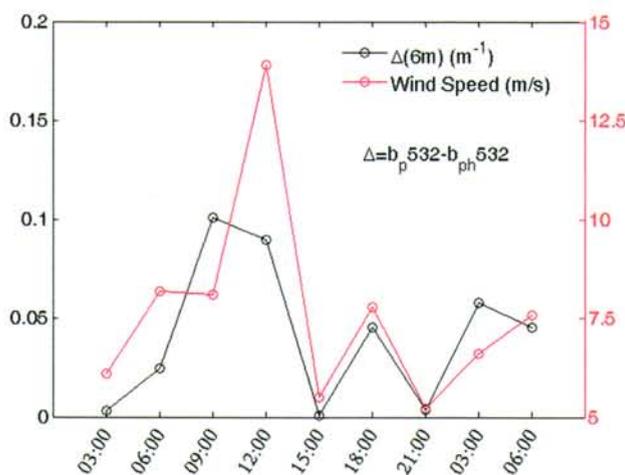


图 5-8 春季南黄海站位 A 在 4 月 23 日凌晨 03:00 至 4 月 24 日凌晨 06:00 期间上混合层内 6m 深度处沙尘颗粒引起散射的周日变化与风速周日变化的相关性

5.6 小结

本节利用 2006 年 4 月在南黄海中部沙尘暴期间实测的气象、水文、生物及光学数据, 详细分析了沙尘暴对水体光学散射性质的影响。分析结果显示, 对于春季南黄海中部上混合层水体, 当沙尘暴发生时, 沙尘颗粒的沉降能显著的引起光学性质的变化。在去除浮游植物的散射贡献后, 源于沙尘暴的沉降的沙尘颗粒所引起的光学散射系数能被较好的展示。基于本章的研究, 可以得到如下几条结论:

- 1) 大气中的沉降的沙尘颗粒在无沙尘暴发生时对散射的影响可近似认为 0;
- 2) 沙尘暴期间大气中沉降于水体的沙尘颗粒对散射的贡献取决于沙尘暴的强度, 气溶胶光学厚度约为 2.5 的沙尘暴所引起的沙尘颗粒沉降导致的水体散射系数在 532nm 处的增加量约为 0.14 m^{-1} ; 同时上混合层水体中沉降的沙尘颗粒在沙尘暴结束后的大约 3 个小时内便沉降到底层, 对上混合层水体散射的影响也随即消失;
- 3) 沙尘暴发生时, 由于大气中沙尘颗粒的分布的不均匀性, 沙尘颗粒的沉降是不均匀的。

6 总结

6.1 主要研究结果

本论文利用 2011 年至 2015 年期间所获取的春夏秋冬四个季节的黄渤海水体光学性质（吸收、散射、后向散射及后向散射比）数据分析了黄渤海水体光学性质变化特征，并利用同步测量的水文及生物地球化学参数（温度、盐度、叶绿素浓度、浊度、悬浮泥沙浓度）数据所揭示的海洋过程揭示了光学性质变化的影响机制。然后以影响机制为基础，定量化光学性质变化与水体光学活性组分的关系。在上述研究的基础上，利用在黄渤海广泛测量的光学数据调查了光学性质的光谱依赖性关系，并构建了黄渤海水体光学性质参数化模型。最后利用沙尘暴期间的定点周日测量分析了沙尘暴过程影响下的小尺度的周日变化特征。本论文的主要研究结果如下：

1) 黄渤海水体光学性质变化

黄渤海水体光学性质在季节时间尺度上呈现出如下的空间分布特征方面：春季，水平方向上呈现出近岸高、远岸低的分布特征；垂向剖面深度上，深水区的光学性质中吸收、散射及后向散射系数呈现出较为明显的分层结构，浅水域的光学性质的垂向分布较为均匀。夏季，黄渤海水体整体除具有水平上的近岸高远岸低的分布特征外，在垂向剖面深度上，深浅水域均呈现出明显的分层结构。秋季和冬季，水平方向上，同样呈现出近岸高、远岸低的分布特征；垂向剖面上深度小于 50m 的水域的垂向分布较为均匀，深度大于 50m 的水域同样呈现出明显的分层结构，且上均匀层深度较深。

黄渤海水体光学性质变化影响机制方面：黄渤海水体光学性质的变化除受潮汐和海流的影响外主要由潮波所致底部沉积物再悬浮、水体垂向混合和浮游植物生长的生物过程所影响。

2) 黄渤海水体光学性质变化的定量化研究

光学性质与悬浮颗粒物的关系方面：对于黄渤海水体，后向散射比大于 0.015 的水体主要无机颗粒物主导，光学性质与悬浮物浓度具有较好的线性关系（对数坐标系下）；后向散射比小于 0.009 的水体主要由浮游植物颗粒主导，其光学性质与叶绿素浓度具有较好的线性关系（对数坐标系下）。

光学性质参数化模型方面：浮游植物吸收光谱依赖性方面，浮游植物的吸收光谱可以通过 440nm 处的吸收系数进行较好的表征；有色可溶有机物及非浮游植物颗粒的吸收光谱斜率方面，有色可溶有机物及非浮游植物的吸收光谱斜率变化范围较小，其中有色可溶有机物的光谱斜率主要集中在 0.014 nm^{-1} - 0.017 nm^{-1} 的范围内，其平均值约为 0.015 nm^{-1} ；而非浮游植物颗粒的光谱斜率主要集中在 0.008 nm^{-1} - 0.01 nm^{-1} 的范围内，其平均值约为 0.009 nm^{-1} ，评估结果显示， 0.015 nm^{-1} 和 0.009 nm^{-1} 可以作为黄渤海水体的有色可溶有机物及非浮游植物的吸收光谱斜率的典型值进行使用；颗粒物散射系数光谱依赖性方面，对于黄渤海水体，其颗粒物的散射系数光谱斜率变化较小，且与固定波长处颗粒物的散射性质无关，比较结果显示，黄渤海水体的颗粒物散射光谱斜率可以用常量 0.2358 表征；后向散射系数的光谱依赖性方面，后向散射光谱具有较好的光谱依赖性，其光谱斜率与固定波长处的后向散射系数具有较高的相关性，当 532nm 处的后向散射系数小于 0.03 时，后向散射光谱斜率随后向散射系数的增大而减小，当 532nm 处的后向散射系数大于 0.03 时，后向散射光谱斜率基本保持一恒定值，比较结果显示，后向散射光谱可以通过固定波长处的后向散射系数进行较好的构建。浮游植物在 440nm 处的吸收系数与叶绿素浓度具有较高的相关性，与 Bricaud 模型相比，单位叶绿素浓度的浮游植物 440nm 处的吸收系数较高，尤其在叶绿素浓度较高的水域，表现出明显的区域化特征；对于固定波长处的非浮游植物颗粒的吸收系数以及散射和后向散射系数，在浮游植物主导的水体，它们可以通过叶绿素浓度较好的表征；对于无机颗粒物主导的水体，它们可以通过悬浮物浓度进行较好的表征。

3) 沙尘暴对水体光学性质的影响

研究结果显示，对于春季南黄海中部上混合层水体，当沙尘暴发生时，沙尘颗粒的沉降能显著的引起光学散射性质的变化，沉降于水体的沙尘颗粒对散射的贡献取决于沙尘暴的强度，气溶胶光学厚度约为 2.5 的沙尘暴所引起的沙尘颗粒沉降导致的水体散射系数在 532nm 处的增加量约为 0.14 m^{-1} ；此外，沉降于上混合层水体内沉降的沙尘颗粒的沉降速度较快，在沙尘暴的结束后的大约 3 个小时内，其便会沉降到底层；另外研究结果间接揭示出大气沉降对光学性质变化的影响在无沙尘暴发生时对散射的影响可近似认为 0。

上述这些研究结果对于建立高精度的遥感反演方法、利用光学手段监测悬浮物的动态变化以及水平能见度预测方面具有重要的意义。其中沙尘暴对光学性质变化的影响研究对于认识大气颗粒沉降过程以及利用光学手段监视沙尘颗粒在水体中的分布状态具有重要的意义。

6.2 存在问题及进一步研究

虽然本论文在黄渤海水体光学性质变化的影响机制方面取得了一些研究成果,同时在沙尘暴对水体光学性质影响方面也取得了一些进展。但仍有许多不足之处,主要体现在以下几个方面:

1) 首先在研究季节变化特征方面,所利用的实测数据由于航次执行时间的限制,在冬季特征的代表性方面稍差,因为对于黄渤海,其冬季月份为12、1及2月,因此其代表性的月份应该是1月,而本论文用到的冬季数据是在12月初刚入冬的时候获取的,因此针对冬季的光学性质变化特征在将来需要结合实测进行补充。

2) 其次在浮游植物颗粒主导水体所建立的光学性质与浮游植物生物量的代表叶绿素浓度的关系方面,虽然关系较好,但由于浮游植物种类不同其细胞尺寸及细胞内有机碳含量的差异造成每种浮游植物有着自己特定的光学特性,在将来的研究中应结合黄渤海水体的浮游植物的类型分布建立更高精度的特定的浮游植物主导水体中光学性质与其叶绿素浓度的关系模型。

3) 在沙尘暴的研究方面,本研究只是对沙尘暴期间沉降的无机沙尘颗粒所引起的散射贡献进行了研究,关于叶绿素浓度的增大是否与沉降的沙尘颗粒所携带的营养盐导致的浮游植物的增长还是其浮游植物自身的变化所引起的在将来可以增加对相应区域无沙尘暴期间相应季节的浮游植物的周日变化的观测来进行研究。

4) 在研究黄渤海水体光学性质的小尺度(时间尺度上)的变化方面,本研究的研究结果主要基于大面上的分布特征,潮流、生物过程及短暂的气候(如台风)对光学性质的影响在将来的研究中应通过定点连续观测的手段进行研究。

5) 在悬浮颗粒物粒径对光学性质的影响方面,本研究暂未考虑悬浮颗粒物的粒径对光学性质的影响,这一点在将来会增加相应的研究。

参考文献

- [1] 苏纪兰. 中国近海水体. 北京: 海洋出版社, 2005
- [2] 乔方利. 中国区域海洋学-海洋物理学. 北京: 海洋出版社, 2012
- [3] 李家彪. 中国区域海洋学-海洋地质学. 北京: 海洋出版社, 2012
- [4] Qian, W. H., L. S. Quan, and S. Y. Shi. Variations of the dust storm in China and its climatic control, *J. Clim.*, 2002, 15(10), 1216–1229
- [5] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE - Asia: 2. Model simulation and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2003, 108(D9)
- [6] Merrill J T, Uematsu M, Bleck R. Meteorological analysis of long range transport of mineral aerosols over the North Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 1989, 94(D6): 8584-8598
- [7] Kim B G, Park S U. Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(18): 3191-3201
- [8] Tan S C, Shi G Y, Wang H. Long-range transport of spring dust storms in Inner Mongolia and impact on the China seas. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 299-308
- [9] Kai Z, Huiwang G. The characteristics of Asian-dust storms during 2000–2002: From the source to the sea. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(39): 9136-9145
- [10] Bishop J K B, Davis R E, Sherman J T. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific. *Science*, 2002, 298(5594): 817-821
- [11] Gao Y, Fan S M, Sarmiento J L. Aeolian iron input to the ocean through precipitation scavenging: A modeling perspective and its implication for natural iron fertilization in the ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2003, 108(D7)
- [12] Shi J H, Gao H W, Zhang J, et al. Examination of causative link between a spring bloom and dry/wet deposition of Asian dust in the Yellow Sea, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2012, 117(D17)
- [13] Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications, in Reports of the International Ocean-Colour. IOCCG report5 2006
- [14] Werdell J. Global Bio - optical Algorithms for Ocean Color Satellite Applications: Inherent Optical Properties Algorithm Workshop at Ocean Optics XIX; Barga, Italy, 3–4 October 2008. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2009, 90(1): 4-4
- [15] Brewin R J W, Sathyendranath S, Müller D, et al. The Ocean Colour Climate Change Initiative: III. A round-robin comparison on in-water bio-optical algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 2013
- [16] Lee Z P, Arnone R, Hu C, et al. Uncertainties of optical parameters and their propagations in an analytical ocean color inversion algorithm. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 369-381

- [17] Szeto M, Werdell P J, Moore T S, et al. Are the world's oceans optically different. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2011, 116(C7)
- [18] Werdell P J, Franz B A, Bailey S W, et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied optics*, 2013, 52(10): 2019-2037
- [19] Astoreca R, Doxaran D, Ruddick K, et al. Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea. *Continental shelf research*, 2012, 35: 117-128
- [20] Boss E, Pegau W S, Lee M, et al. Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2004, 109(C1)
- [21] Boss E, Taylor L, Gilbert S, et al. Comparison of inherent optical properties as a surrogate for particulate matter concentration in coastal waters. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2009, 7(11): 803-810
- [22] Chami M, Shybanov E B, Churilova T Y, et al. Optical properties of the particles in the Crimea coastal waters (Black Sea). *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2005, 110(C11)
- [23] Chang G C, Dickey T D, Schofield O M, et al. Nearshore physical processes and bio - optical properties in the New York Bight. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C9): 16-1-16-16
- [24] Gardner W D, Blakey J C, Walsh I D, et al. Optics, particles, stratification, and storms on the New England continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C5): 9473-9497
- [25] Loisel H, Mériaux X, Berthon J F, et al. Investigation of the optical backscattering to scattering ratio of marine particles in relation to their biogeochemical composition in the eastern English Channel and southern North Sea. *Limnology and Oceanography*, 2007, 52(2): 739-752
- [26] Snyder W A, Arnone R A, Davis C O, et al. Optical scattering and backscattering by organic and inorganic particulates in US coastal waters. *Applied Optics*, 2008, 47(5): 666-677
- [27] Sullivan J M, Twardowski M S, Donaghay P L, et al. Use of optical scattering to discriminate particle types in coastal waters. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1667-1680
- [28] Woźniak S B, Stramski D, Stramska M, et al. Optical variability of seawater in relation to particle concentration, composition, and size distribution in the nearshore marine environment at Imperial Beach, California. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C8)
- [29] 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等. 南黄海海水中悬浮体的研究. *海洋与湖沼*, 1989, 20(2):101-111
- [30] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局. *海洋学报*, 1992, 14(2):81-90
- [31] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance. *Journal of*

- Geophysical Research, 2007, 112(C06003): 1-15
- [32] Zaneveld J R, Pegau W. Robust underwater visibility parameter. *Optics Express*, 2003, 11(23): 2997-3009
- [33] Jerlov N G. *Optical studies of ocean waters*. Elanders boktr, 1957
- [34] Morel A. Optical modeling of the upper ocean in relation to its biogenous matter content (case I waters). *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 1988, 93(C9): 10749-10768
- [35] Tyler J E. Report on the second meeting of the joint group of experts on photosynthetic radiant energy. UNESCO Tech. Paper. *Mar Sci*, 1966, 2: 1-11
- [36] Spinrad R W. Optical oceanography: the state of the science. *Oceanography*, 1988, 1(1): 22-23
- [37] Morel A, Maritorena S. Bio - optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2001, 106(C4): 7163-7180
- [38] Bricaud, A., Babin, M., Morel, A., & Claustre, H. Variability in the chlorophyll - specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 1995, 100(C7), 13321-13332
- [39] Bricaud, A., Morel, A., Babin, M., Allali, K., & Claustre, H. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio - optical models. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 1998, 103(C13), 31033-31044
- [40] Dickey T D. Studies of coastal ocean dynamics and processes using emerging optical technologies. *OCEANOGRAPHY-WASHINGTON DC-OCEANOGRAPHY SOCIETY-*, 2004, 17(2): 09-10
- [41] Dickey T D, Williams A J. Interdisciplinary ocean process studies on the New England shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2001, 106(C5): 9427-9434
- [42] Ackleson, S. G. Light in shallow waters: A brief research review. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(2), 323-328
- [43] *Oceanography*, volume 11(1), 1998, Special Issue: Focus on Thin Layers
- [44] Walsh J J, Weisberg R H, Dieterle D A, et al. Phytoplankton response to intrusions of slope water on the West Florida Shelf: Models and observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2003, 108(C6)
- [45] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, et al. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2003, 108(C7)
- [46] Babin M, Morel A, Fournier-Sicre V, et al. Light scattering properties of marine particles in coastal and open ocean waters as related to the particle mass concentration. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(2): 843-859

- [47] Sosik H M, Green R E, Olson R J. Optical variability in coastal waters of the Northwest Atlantic. *Ocean Optics XIV*. 1998: 1-14
- [48] Boss E, Pegau W S, Lee M, et al. Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2004, 109(C1)
- [49] Sosik H M, Green R E, Pegau W S, et al. Temporal and vertical variability in optical properties of New England shelf waters during late summer and spring. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2001, 106(C5): 9455-9472
- [50] Chang G C, Dickey T D, Schofield O M, et al. Nearshore physical processes and bio - optical properties in the New York Bight. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2002, 107(C9): 16-1-16-16
- [51] Chang, G. C., & Dickey, T. D. Optical and physical variability on timescales from minutes to the seasonal cycle on the New England shelf: July 1996 to June 1997. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2001, 106(C5), 9435-9453
- [52] Chang, G. C., Dickey, T. D., & Williams, A. J. Sediment resuspension over a continental shelf during Hurricanes Edouard and Hortense. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2001, 106(C5), 9517-9531
- [53] Chang, G., Dickey, T., Jiang, S., Manov, D., & Spada, F. Optical methods for interdisciplinary research in the coastal ocean. *Deep-Sea Res*, 2003, 1(36), 211-222
- [54] Gallegos, C. L., Jordan, T. E., Hines, A. H., & Weller, D. E. Temporal variability of optical properties in a shallow, eutrophic estuary: Seasonal and interannual variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 64(2), 156-170
- [55] McKee, D., & Cunningham, A. Identification and characterisation of two optical water types in the Irish Sea from in situ inherent optical properties and seawater constituents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(1), 305-316
- [56] Oubelkheir, K., Clementson, L. A., Webster, I. T., Ford, P. W., Dekker, A. G., Radke, L. C., & Daniel, P. Using inherent optical properties to investigate biogeochemical dynamics in a tropical macrotidal coastal system. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2006, 111(C7)
- [57] D'Sa, E. J., Miller, R. L., & McKee, B. A. Suspended particulate matter dynamics in coastal waters from ocean color: Application to the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23)
- [58] Woźniak, S. B., Stramski, D., Stramska, M., Reynolds, R. A., Wright, V. M., Miksic, E. Y., ... & Cieplak, A. M. Optical variability of seawater in relation to particle concentration, composition, and size distribution in the nearshore marine environment at Imperial Beach, California. *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)*, 2010, 115(C8)
- [59] Doxaran, D., Ruddick, K., McKee, D., Gentili, B., Tailliez, D., Chami, M., & Babin, M. Spectral variations of light scattering by marine particles in coastal waters, from the visible to

- the near infrared. *Limnology and oceanography*, 2009, 54(4), 1257-1271
- [60] Astoreca, R., Doxaran, D. A. V. I. D., Ruddick, K., Rousseau, V., & Lancelot, C. Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea. *Continental shelf research*, 2012, 35, 117-128
- [61] Vantrepotte, V., Loisel, H., Dessailly, D., & Mériaux, X. Optical classification of contrasted coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123, 306-323
- [62] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物吸收光谱及其区域模式. *科学通报*. 2003, 48(17): 1876-1882
- [63] 许小强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系. *热带海洋学报*, 2004, 23:63-71.
- [64] 汪小勇, 李铜基, 杨安安. 黄东海海区表观光学特性和固有光学特性春季模式研究. *海洋技术*, 2005, 23(4): 123-126
- [65] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究. *海洋学报*, 2006, 28(4): 56-63.
- [66] 丘仲锋. 东海赤潮高发区水色遥感算法及赤潮遥感监测研究 :[博士学位论文]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006
- [67] 顾艳镇, 刘玉光, 刘亚豪, 等. 渤海海区颗粒物的后向散射系数和光束散射系数统计关系研究. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2007, 2
- [68] 刘炜, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区总悬浮物散射特性研究. *海洋技术*, 2007, 26(2): 42-46
- [69] 崔廷伟, 张杰, 马毅, 等. 渤海近岸水体后向散射系数反演模型. *光学学报*, 2008, 28(11): 2041-2045
- [70] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 渤海非色素颗粒物和黄色物质的吸收特性研究. *海洋环境科学*, 2009, 27(6): 595-598
- [71] 雷辉惠, 潘德炉, 陶邦一, 等. 东海典型水体的黄色物质光谱吸收及分布特征. *海洋学报*, 2009, 31(2): 57-62
- [72] Zhang M, Tang J, Song Q, et al. Backscattering ratio variation and its implications for studying particle composition: A case study in Yellow and East China seas. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C12).
- [73] 王林, 赵冬至, 杨建洪, 等. 北黄海浮游植物吸收系数的季节性变化研究. *海洋环境科学*, 2010, 29(1): 60-65
- [74] 朱伟健, 沈芳, 洪官林. 长江口及邻近海域有色溶解有机物(CDOM)的光学特性. *环境科学*, 2010, 31(10):2292-2298
- [75] 周虹丽, 朱建华, 李铜基, 等. 中国近海典型海区黄色物质含量年际变化分析. *海洋技术*, 2012, 31(003): 60-63
- [76] 周虹丽, 朱建华, 李铜基, 等. 中国近海非色素颗粒物的光学特性. *热带海洋学报*, 2012, 31(6): 57-61

- [77] 朱建华, 周虹丽, 李铜基, 等. 中国近海黄色物质吸收光谱特征分析. 光学技术, 2012, 38(3): 295-299
- [78] 叶虎平, 朱建华, 李铜基, 等. 黄东海浮游植物吸收光谱分类研究. 海洋技术, 2012, 31(4): 50-54
- [79] 李铜基. 中国近海海洋-海洋光学特性与遥感. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [80] 贺双颜. 东中国海大气气溶胶模型和海水后向散射模型:[博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012
- [81] 韩冰, 李铜基, 朱建华. 近海海洋水体光散射特性研究—以蓬莱近岸海域为例. 海洋技术, 2012, 30(4): 74-81
- [82] 李敏敏, 李铜基, 朱建华, 等. 黄东海海区悬浮颗粒物后向散射系数和后向散射比的空间分布规律研究. 海洋技术, 2013, 32(1):50-55
- [83] 余小龙, 沈芳, 张晋芳. 影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究. 环境科学, 2013, 34(5): 1745-1753
- [84] 汪小勇, 李铜基, 周虹丽, 等. 中国近海海洋光学特性及其分布. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 1: 017
- [85] Stramski D, Woźniak S B, Flatau P J. Optical properties of Asian mineral dust suspended in seawater. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49(3): 749-755
- [86] Stramska M, Stramski D, Cichocka M, et al. Effects of atmospheric particles from Southern California on the optical properties of seawater. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2008, 113(C8)
- [87] WET Labs, Inc. (2009). AC Meter Protocol Document, Revision P. www.wetlabs.com
- [88] WET Labs, Inc. (2010). Scattering Meter ECO BB-9 User's Guide, Revision K. www.wetlabs.com
- [89] Mueller, J. L., Bidigare, R. R., Trees, C., Balch, W. M., Dore, J., Drapeau, D. T., ... & Perl, J. (2003). Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 5, volume V: Biogeochemical and bio-optical measurements and data analysis protocols. NASA tech. memo, 211621, 36.
- [90] Mueller, J. L., Fargion, G. S., McClain, C. R., Pegau, S., Zaneveld, J. R. V., Mitchell, B. G., ... & Stramska, M. (2003). Ocean optics protocols for satellite ocean color sensor validation, revision 4, volume IV: Inherent optical properties: Instruments, characterizations, field measurements and data analysis protocols.
- [91] Tassan, S., Ferrari, G. M., Bricaud, A., & Babin, M. (2000). Variability of the amplification factor of light absorption by filter-retained aquatic particles in the coastal environment. *Journal of Plankton Research*, 22(4), 659-668.
- [92] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究:[博士学位论文]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.

- [93] Twardowski M S, Boss E, Macdonald J B, et al. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [94] Morel, A. Chlorophyll-specific scattering coefficient of phytoplankton. A simplified theoretical approach, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1987, 34(7), 1093-1105
- [95] Zhou, W., G. Wang, Z. Sun, W. Cao, Z. Xu, S. Hu, and J. Zhao. Variations in the optical scattering properties of phytoplankton cultures, *Optics express*, 2012, 20(10), 11189-11206
- [96] Lee Z. Visible-infrared Remote-Sensing Model. University of South Florida, 1994
- [97] Carder, K. L., Chen, F. R., Lee, Z. P., Hawes, S. K., & Kamykowski, D. Semianalytic Moderate - Resolution Imaging Spectrometer algorithms for chlorophyll a and absorption with bio - optical domains based on nitrate - depletion temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 1999, 104(C3), 5403-5421
- [98] Liu Y, Yang D, Chen W, et al. Measurements of Asian dust optical properties over the Yellow Sea of China by shipboard and ground - based photometers, along with satellite remote sensing: A case study of the passage of a frontal system during April 2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2010, 115(D7)
- [99] Herman, B. M., R. S. Browning, and J. J. De Luisi. Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of atmospheric dust by remote sensing: The diffuse-direct radiation method, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1975, 32(5), 918-925

致谢

本论文的完成得益于以下的帮助，我在此表示诚挚的谢意。

首先感谢的是我的导师张亭禄教授，张老师严谨的治学态度使我终身受益，在张老师身边 6 年的学习中，潜移默化的培养了我严格和踏实的品质。正是在张老师对大的论文框架的把握下，本论文才得以完成；此外，也正是在张老师的宝贵建议下，本论文的质量才得以有较大的提高。

感谢国家自然科学基金委，正是在国家自然科学基金委的资助下(基金课题号为：41276041, 40876005 和 60638020)，才有机会到现场获取较为广泛和宝贵的数据资料，国家自然科学基金委的资助是本论文完成的前提条件。

感谢陈文忠老师对气溶胶光学厚度数据的提供，感谢石金辉老师对 2006 年 4 月水文及叶绿素浓度数据的提供，感谢王厚杰老师对 2011 年两个航次悬浮物浓度数据的提供。正是由于他们对相关数据的提供，才使得本论文的内容更加丰富。

感谢张国朋、王建国、孙昆鹏师弟及刘秋菊学妹在论文完成中提供的协助。最后，感谢出海期间所有为采集数据和后期处理数据辛苦付出的人。

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1984年6月16日出生于安徽省界首市。

2005年9月考入西安邮电大学(原名:西安邮电学院)信息控制系自动化专业,2009年7月本科毕业并获取工学学士学位。

2009年9月考入中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系海洋信息探测与处理专业,2011年9月直接攻读博士学位,转为博士生。

2011年9月至今,在中国海洋大学信息科学与工程学院海洋技术系海洋信息探测与处理专业攻读博士学位。

在学期间发表的学术论文与研究成果

1. **Chen, S. G., T. L. Zhang, and L. B. Hu.** Evaluation of the NIR-SWIR Atmospheric Correction Algorithm for MODIS-Aqua over the Eastern China Seas. *International Journal of Remote Sensing*, **2014**, 35 (11-12): 4239-4251. doi:10.1080/01431161.2014.916051. (SCI)
2. **Chen, S. G., and T. L. Zhang.** An improved cloud masking algorithm for MODIS ocean colour data processing. *Remote Sensing Letters*, **2015**, 6(3), 218-227. doi : 10.1080/2150704X.2015.1026955 (SCI)
3. **Chen, S. G., and T. L. Zhang.** Evaluation of a QAA-based algorithm using MODIS land bands data for retrieval of IOPs in the Eastern China Seas. *Optics Express*, **2015**, 23 (11), 13953-13971. doi: 10.1364/OE.23.013953. (SCI)
4. 胡静雯, **陈树果**, 张亭禄, 张国朋, 利用 MODIS 卫星遥感数据监测东中国海浊度的时空分布. *海洋环境科学*, 2015。(已接收)
5. 张国朋, 张亭禄, **陈树果**, 王建国, 秋季和春季黄渤海黄色物质空间分布特征. *海洋与湖沼*, 2015。(已接收)
6. 张学海, 张亭禄, & **陈树果**. 简化紫外辐射模型在基于 OMI 卫星传感器反演西太平洋海面紫外辐射中的应用. *遥感技术与应用*, **2014**, 29, 6.
7. 田林, 张亭禄, **陈树果**, & 王晓菲. 卫星遥感融合中通量守恒重采样方法与其它常用方法的比较. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, **2014**, 6.
8. 姚晴晴, **陈树果**, & 张亭禄. 由 Hyper-TSRB 数据估算海面遥感反射比的方法比较. *海洋技术学报*, **2012**, 31, 2.
9. 张亭禄, 徐青娜, **陈树果**, 邱国强, & 胡连波. 海水吸收光谱测量方法比较—定量滤膜技术和现场测量方法. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, **2011**, 7, 164-169.