

海洋和大气光学

青岛海洋大学出版社

海洋和大气光学

海洋和大气光学

海洋和大气光学

〔苏〕 K·C·希夫林 主编

李 武
张 欣 梅 译
戚 贻 让 校

青岛海洋大学出版社

内 容 摘 要

本书是在苏联多年海洋光学工作基础上完成的。书中系统地论述了海洋光学的基本内容和研究海洋的光学方法,阐述了海洋光学的最新成就和发展方向,介绍了有关的大气光学问题。全书共五章,前三章是海洋光学研究的基本内容,后两章介绍了各大洋的光学调查研究结果及云和总辐射的统计特性。本书可供海洋学、物理光学和遥感技术应用的科技人员及有关大专院校师生阅读。

ОПТИКА ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ

Издательство «Наука», Москва, 1981.

海 洋 和 大 气 光 学

[苏] К.С.希夫林 主编

李 武 张欣梅 译

戚贻让 校

*

青岛海洋大学出版社出版

(青岛市鱼山路5号)

新华书店发行

山东新华印刷厂德州厂印刷

*

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

32开(850×1168毫米) 9.375印张 235千字

印数1—1000

ISBN 7-81026-115-0/P·13

定价: 6.50元

绪 论

当前,海洋光学和海洋上空大气光学在各个方面都得到了发展。研究的内容不仅包括海洋光学的传统问题,也包括一些新问题。分析与悬浮物和溶解物这类因素有关的各种海水的光学性质;分析由于多次散射和吸收,海洋中天然光源和人造光源形成的光场;分析海洋与大气分界面上光的变换过程等都属于前者。用于探测海洋和海洋上空大气的各种间接的光学方法的研究属于较新的研究内容,其中包括卫星方法的研究和海洋与大气之间辐射相互作用的研究。当然,在确定海洋-大气活动层系统动力学的整个过程中,把最后的这个研究方向当作辐射研究部分。这些研究与最近几年发展起来的大气和海洋中环流的数学模型研究有关。

当前,海洋光学研究的发展很迅速。因此,在一些最令人感兴趣的研究方向上写一些评论文章和大篇幅综合著作具有重要的意义。本书就是这一类评述文章和综合著作的汇编。书中涉及的内容有:探讨由多种因素所确定的海水光学性质的形成问题;研究定向短脉冲辐照海洋时在海水中产生的光场结构;讨论海水中光学测量的方法问题;介绍世界各大洋中光学考察研究的结果。此外,还根据人造地球卫星资料作出世界大洋上空云团分布的统计分析,并估计了与云团变化相联系的总辐射通量的变化。

本书中的综述评论文章都是各位作者的原著。

最后,我希望所发表的资料能引起所有研究海洋光学、大气光学和其他相近问题的人们的兴趣。

R.C.希夫林

目 录

绪论

第一章 海水光学特性的现代概念	(1)
引言	(1)
1.1. 海水的旋光性成分	(3)
1.1.1. 溶解物质	(4)
1.1.2. 悬浮体	(7)
1.1.3. 浮游植物色素	(10)
1.2. 纯水和纯海水的光学特性	(13)
1.2.1. 纯水	(13)
1.2.2. 纯净海水	(19)
1.3. 海水的吸收特性	(22)
1.3.1. 海水吸收光谱的特点	(23)
1.3.2. 吸收的统计特性	(26)
1.3.3. 不同因素在吸收中的作用	(29)
1.4. 海水的光散射特性	(35)
1.4.1. 散射在数量上的易变性	(36)
1.4.2. 散射光的角分布	(37)
1.4.3. 散射的统计特性	(41)
1.4.4. 海水光散射的物理模型	(45)
1.4.5. 散射的谱关系	(51)
1.4.6. 散射的偏振特性	(52)
第二章 海水中脉冲光源的光场	(74)
引言	(74)
2.1. 海洋中非稳定光场的实验研究方法	(77)

2.1.1.	问题的提出。研究方法的选择·····	(77)
2.1.2.	介质的初级水光学特性对非稳定光场时空 结构的影响·····	(80)
2.1.3.	利用非稳定光场的对称特性以减少测量 工作·····	(81)
2.1.4.	根据实验资料确定格林函数。对仪器时间 特性的估计·····	(83)
2.2.	用于实验研究的仪器设备·····	(84)
2.2.1.	脉冲辐射源——激光·····	(84)
2.2.2.	接收记录仪器·····	(86)
2.2.3.	用于实验研究的综合装置框图·····	(89)
2.2.4.	测量方法。误差·····	(93)
2.3.	实验研究结果·····	(95)
2.3.1.	在光轴范围内亮度的时空分布·····	(95)
2.3.2.	在远离光轴一侧的非稳定光场结构·····	(100)
2.3.3.	非稳定光场的偏振·····	(104)
2.3.4.	讨论·····	(113)
2.4.	结论·····	(116)
第三章 海洋光学测量的基本原理和某些水光度学 计算 ·····		(124)
引言·····		(124)
3.1.	海洋中光辐射场的某些参数·····	(127)
3.2.	水光学特性·····	(133)
3.2.1.	固有的(初级的)水光学特性·····	(133)
3.2.2.	海洋光场参数的变化特性(次级特性)·····	(135)
3.2.3.	有效水光学特性·····	(139)
3.2.4.	深层状态下的光学特性·····	(143)
3.2.5.	综合水光学特性·····	(144)

3.3. 水光度学测量的基本方法.....	(145)
3.3.1. 海水固有(初级)光学特性的实验室测量 和直接测量.....	(149)
3.3.2. 海洋光场参数的测量和次级水光学特性的 计算.....	(161)
3.3.3. 根据测得的光场参数所计算的量的误差	(165)
3.3.4. 光学特性的遥测方法.....	(167)
3.4. 水光度学计算.....	(169)
3.4.1. 辐射传输方程的某些近似解.....	(173)
3.4.2. 各水光学特性之间的关系.....	(180)
3.4.3. 某些水光度学的计算.....	(185)
第四章 在大西洋、印度洋和太平洋的光学调查研究 ...	(206)
第五章 世界大洋各水域上空云团和总辐射的统计特性	(247)
引言.....	(247)
5.1. 世界大洋上空云团的季节—地理分布的分析...	(249)
5.1.1. 原始资料.....	(249)
5.1.2. 原始资料的处理方法.....	(250)
5.1.3. 结果分析.....	(250)
5.1.4. 某些图幅上云量分布的近似法.....	(255)
5.1.5. 相关分析.....	(257)
5.1.6. 大范围水域上空的云量分布.....	(259)
5.1.7. 比较不同著作中平均云量的可能性.....	(259)
5.1.8. 几点意见.....	(260)
5.2. 云的光学模型.....	(261)
5.2.1. 局部光学特性.....	(262)
5.2.2. 光学厚度.....	(264)
5.2.3. 近红外区的透射函数.....	(266)
5.2.4. 云的贮水量和云的光学厚度之间的关系	(267)

5.3.	无云时海洋表面附近的总辐射·····	(268)
5.4.	浓密云层条件下的总辐射·····	(270)
5.4.1.	可见光谱区中相对的辐射输入量·····	(270)
5.4.2.	红外光谱区的相对输入量·····	(271)
5.4.3.	统计特性的计算·····	(272)
5.5.	碎云。不同云型和云量条件下的总辐射特性··	(276)
5.6.	结果讨论·····	(276)

第一章 海水光学特性的现代概念

О.В.科佩列维奇, К.С.希夫林

引 言

本章的目的是叙述海水光学特性知识的现状。我们只讨论近紫外、可见光及近红外光谱区域。所研究的问题基本上是与水光学有关的问题,但毫无疑问,这些问题对其他海洋学科也是重要的。可列举一系列原因来说明研究海水光学特性的必要性。其中主要有两条:第一,海水的光学特性决定着自然光和人造光源的光在海水中的辐射传播,它们作为参量列入辐射传输方程。透入大洋深处的太阳光的光通量、光谱成分和偏振状态等参量,都与水下能见度、水下通讯及光定位的距离和质量有关。第二个原因是非光学海洋研究有利用海水光学特性的可能性。海水光学特性与海水所含物质有关,并携带着有关它们的定性和定量构成的信息。

研究物质的光学方法较之现阶段所用的非光学方法具有很多重要的优点,为了海洋学的研究需要,对光学方法作深入研究具有重要的实际意义。近几年来,人们对光学方法特别感兴趣,这与远距离的海洋研究方法的深入发展有关。这些方法是空间海洋学(космическая океанология)*的基础。补充一点,在文献[1]中已详细讨论过在海洋学中利用远距离研究方法的一般问题,而在文献[2]中简述了空间海洋学状况。在本章中,我们要详细分析海水光学特性的主要研究成果,但不介绍这些工作的研究方法。实际上,研究方法在这里是很重要的,为了不使其完全受

* 此词按我国的习惯用法,译作“空间海洋学”——译者

到忽视，我们在这里作一些说明。

海水是个复杂的物理、化学、生物系统。它含有溶解物质、悬浮体和很多各种各样的活有机体。由于悬浮体和海水的各种不均匀性，使得光被强烈散射，也就是说，海水是混浊介质。可是，与通常的混浊介质相比，无论是海水中所发生现象的特性，还是对它们的研究方法，都具有一系列特点。海水中的某些物质，如活性有机体或黄色物质（海洋中生物微粒的分解物）是在一定的浓度及温度范围内存在于水中的。当企图把它们分离出来并在纯的状态下进行研究时，这些组成物就分解并死亡了。因此我们力求在现场研究海水的光学特性，也就是直接在海洋中进行研究。

海洋中的某些光学现象（例如生物发光等）在测量时就发生了很大变化，因此我们常常不能有把握地说，在没有测量装置干扰时，即在自然条件下，这些现象是怎样发生的。

光学特性的变化范围很大，可达2—3个数量级，为了在整个范围内有足够的测量精度，需要付出很大的努力。一方面，仪器的基座不应该太大，以保证光源和接收器之间的刚性联系；另一方面，它们应该足够大，以便能观测到光束的衰减（例如测量透明度）。

人们花费了很大的努力来解决所有这些仪器的测量方法问题。下面我们实际上不谈这些问题，而只介绍那些最必需的，即为理解所讨论问题的实质所需要的最少的内容。

在此计划内我们想指出研究方法方面的几个重要成果，它们与近几年的研究有关。首先，进行了专门的综合性光学考察航行。这里应当指出“门捷列夫”号的航行：1971年在大西洋和太平洋的第5次航行〔3〕，1973年在印度洋的第10次航行〔4〕；“勇士”号1977年在印度洋、红海及地中海的第61次航行。在这些考察中实际上对水光学各个方面同时进行了研究，与此同时，还

研究了决定海水光学特性及其空间分布的因素（水文学和水动力学，海水的和空气的悬浮体、溶解的有机物质、浮游植物的色素）。根据这些航行所获得的资料，得到了海水光学性质、它们与海水中所含物质的关系以及其时空变化方面的更完整的概念，在某些情况下，这在定性上都是新的概念。

其次，深水光学仪器综合体的建立是海洋光学最重要的技术成果，该综合设备能够在大洋的最深处进行测量〔5〕。可按照拟定的计划，在3小时内同时自动记录时间、温度、深度、光谱衰减系数 ϵ （从385至565纳米）、给定方向的散射系数 $\sigma(\gamma)$

（ $\lambda = 436$ 纳米，角度范围 $\gamma = 6^\circ - 90^\circ$ ）、背景光（天空光和生物发光）。综合体已成功地应用于大西洋和地中海不同海区的9次海洋学考察航行中。

可惜现在还缺少专门介绍海水光学特性的专著。不过，在水光学和海洋学的书中或多或少地探讨过这个问题〔3, 4, 6—12〕。

1.1 海水的旋光性成分

海水的光学特性与它的成分有关。如果不研究含有小气泡的最上层海水，并且对湍流效应也不是特别感兴趣，则海水的光学特性由3种因素（即3种旋光性成分）所确定：1）纯水，2）溶解物质，3）悬浮体。海水的光学特性（吸收系数、散射系数、衰减系数、散射特征曲线等〔13〕），可看作是它的旋光性成分特性的迭加。

溶解物质和悬浮物质成分种类繁多：有无机盐、溶解的有机化合物、活性海洋浮游动植物、细菌、碎屑和矿物颗粒，在海水的光学特性中，所列举的每一种因素各自以某种方式显示其作用，然而准确地计算它们不仅根本不可能，而且从实用的观点也不需要。原因在于，这些因素对海水光学特性的贡献并非相同。

研究这个问题的首要任务之一是找出主要因素，采用适当的理想化，建立实际可接受的海水光学特性的物理模式，并作出可行性的估计。

在本节中，我们研究有关海水旋光性成分的浓度及其特性。

先从对海水的本身研究开始。海水在大洋中所处的物理条件如下：压力 1—1100 个大气压，温度 -4°C 至 $+36^{\circ}\text{C}$ 。在此范围内，水的光学特性变化较小，我们以后再研究这种变化。海水光学特性的主要易变性是由溶解物质和悬浮体的易变性引起的。

1.1.1 溶解物质

海水中含有溶解的无机盐、气体、有机化合物。海水中的气体含量极少，尽管它们对海洋生物学和海洋地质化学有重要作用^[14]，但在海水光学特性方面实际上不显示其影响。无机盐和有机化合物影响海水的光学特性，在紫色和紫外部分它们的影响最大。

在海水中溶解物质的主要成分是无机盐，如 NaCl 、 KCl 、 MgCl 、 MgSO_4 、 CaSO_4 等，在大洋中，它们的平均含量约为 35 克/升。溶解的有机物质的浓度大约小 4 个数量级，通常不超过几毫克/升^[15, 16]。然而，有机化合物对海水光学特性的影响

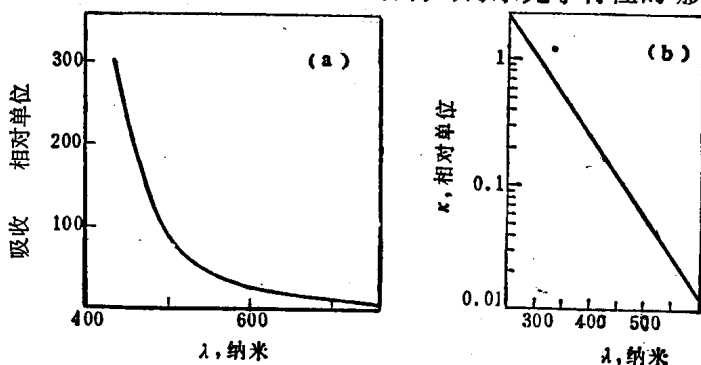


图1.1 黄色物质的吸收光谱

a——线性坐标^[18], b——半对数坐标^[6]

比无机盐要强得多。

对特别使人感兴趣的那部分溶解有机物,文献[17]称之为“黄色物质”(Gelbstoff)。“黄色物质”这个名称是因其本身的光学吸收特性而得名,其光谱曲线示于图1.1a。由图中可见,黄色物质的吸收在短波段急剧增大,这就使得它呈黄色。海水中黄色物质可由两个途径产生:来源于大陆(主要是江河携带)和直接在海水中由海洋浮游动植物有机体的化学递降的结果。看来,在沿岸水域的黄色物质主要为第一途径产生的(表明黄色物质含量的短波吸收随着含盐度的增加迅速减少[18]),而在开阔海域无疑当地的黄色物质占优势。虽然黄色物质的准确化学成分还不清楚,但现在已经有足够可靠的证据来区分“海洋”和“大陆”的腐殖质[19]。这是因为,海水内实际上没有木质胶,而它在土壤腐殖质的形成中起重要作用[18]。在文献[20]中提出了臆想的海水腐殖质结构形式。它的“结构块”是海洋中很多主要的生物合成分子,如氨基酸、糖、氨基糖和脂肪酸类。想必在结构内还含有类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚。

如果在半对数坐标中画出黄色物质的吸收光谱曲线,那么它将是直线(图1.1b)。因此黄色物质的吸收光谱关系可近似为 $K_{黄}(\lambda) = e^{-\mu \lambda}$ 。系数 μ 对于图1.1b的直线大约相当于0.0151/纳米。为了进行比较,我们根据物质吸收光谱的测量数据估计了 $K_{黄}(\lambda)$ 的值,这些测量是在“门捷列夫”号第10次和第14次航行中用实验室吸收测量仪“波浪”进行的[21]。采用了印度洋和太平洋上层100米内3种类型水〔贫瘠水、中等营养水和富营养水(≤ 100 米)及深层水(> 100 米)]的物质吸收光谱的平均值[22]。对于表层水,黄色物质的吸收是海水中物质吸收系数测量值与浮游植物色素吸收系数计算值(根据叶绿素a浓度的测量值,利用表1.2所给出的 $K_{色素}(\lambda)$ 值)之差。对深层水,与纯水的吸收相比,全部逾量部分被归因于黄色物质。对于波长390,

410, 430, 450, 470及490纳米, 根据 $\ln K_{\text{黄}}(\lambda)$ 的值, 用最小二乘法计算了系数 μ , 得出了下列 μ 值 (单位 1/纳米):

表1.1 不同类型水的系数 μ

水的类型	水样数目	μ (1/纳米)
贫瘠水	33	0.0146
中等营养水	28	0.0140
富营养水	8	0.0148
印度洋	24	0.0164
太平洋	79	0.0174

这些结果表明, 对差别很大的水, 其 μ 值彼此很一致, 并接近于上面所引用的值0.015 (1/纳米)。从表1.1中可以看出, 当从表层水过渡到深层水时, μ 值有所增加, 但这种增加太小了。显然, 对黄色物质吸收的光谱关系, 完全可用公式 $K_{\text{黄}}(\lambda) = e^{-0.015\lambda}$ 来表示。

当前, 在海洋学实践中, 缺少分离黄色物质和确定其浓度的方法。因此, 我们将根据它的光学行为来表明黄色物质的含量, 这恰好是波长为390纳米时黄色物质吸收系数值 $K_{\text{黄}}(390)$ (把逾量吸收与浮游植物色素吸收之差作为该吸收系数值)。重要的问题是要查明黄色物质与溶解有机物总量之间的关系 (通常以溶解的有机碳的浓度 $C_{\text{溶解有机碳}}$ 描述), 以及这些量与大洋中其他溶解有机物的成分, 也就是荧光物质之间的关系[18, 23, 24]。后者同样是一种吸收成分, 现在还不能用化学方法把它分离出来, 只根据荧光强度来推测它的含量。在“门捷列夫”号第10次航行中, 我们计算了 $K_{\text{物质}}(390)$ 与 $C_{\text{溶解有机碳}}$ (依据41个水样) 之间的相关系数, 以及 $K_{\text{物质}}(390)$ 与溶解的碳水化合物 (根据59个水样) 浓度之间的相关系数。所得到的值为0.39和0.29, 这些数值证实所研

究的量之间存在着重要联系（以0.98的机率），然而低的相关系数数值表明这个关系是不紧密的。可以假设黄色物质仅占溶解有机物总量中不大的一部分。发荧光的成分本身也仅是黄色物质中的一部分（所有发荧光的都吸收，但不是全部具有吸收特性的都能发荧光）。荧光强度通常随着深度的增加而增加（只是荧光物富产区除外〔26〕，如果 $K_{\text{黄}}$ （390）也随着深度而增加，那么也是很弱的。因此在大洋内黄色物质中，荧光成分的相对部分沿垂直方向增加是典型的。也就是说，溶解有机物的比较稳固的组成部分随着深度而聚集在一起。在波罗的海，从近岸海水过渡到远离海岸的海水时，文献〔18〕的作者观察到了类似情况——当远离海岸时，荧光/吸收的比率随着盐度的增加而增加。

1.1.2 悬浮体

海水中的悬浮体种类繁多，有被河流和风携带入海的陆源粒子，有浮游植物细胞，有细菌，有火山甚至来自宇宙的颗粒，有浮游植物的机体和浮游动物的残骸腐烂后的碎屑。悬浮体所引起的散射光，取决于悬浮粒子的数量、大小、折射率及粒子的形状和取向。从光学的观点出发，主要感兴趣的粒径范围是从百分之几微米至几十微米。更细小的粒子是一种向真正的溶解物质过渡的物质。这些颗粒太小了，对海水的光学特性没有多大影响；很粗的粒子数量很少，因此它们的影响也可忽略不计。

我们现有的关于悬浮体浓度方面的知识不是很可靠，不同作者的资料常常是互相矛盾的，原因在于缺少可靠的测量方法。

海洋地质学中所采用的常规方法是在显微镜下计数粒子。这种方法仅对直径超过1微米的粒子适用〔27—30〕。获取悬浮体样品时，在过滤水的过程中也造成失真。

近几年来，借助于“库尔特”计数器获得了比较可信赖的资料。这是一种现代化高灵敏度的仪器。测量方法是根据粒子穿过小孔时电场的变化，这种变化与粒子的体积成比例，与其电阻率

无关。粒子的电阻总是比海水的电阻大得多。在此仪器中，所统计的粒子尺寸的下限是0.2微米左右。该仪器能够得到粒子按体积的分布 dN/dv ，或者是累积曲线 $N(v)$ 。通常将粒子看作是等价的球体，并把粒子按体积的分布转化为按半径的分布。

毫无疑问，海洋内悬浮体浓度的变化范围是很宽的。根据文献[31]，它的平均值是0.8—2.5毫克/升。文献[32]的作者指出，对于开阔海域的表层水，其值为0.05—0.5毫克/升（近岸处其值可提高1—2个数量级）。至于按粒子数的浓度值 N （厘米⁻³），悬殊就更大了。然而在同一条件下，不同研究者的数据看来是一致的。在不同区域及不同时间粒子按粒径的分布近似于纽格(Юнге)型分布： $n(r) = Ar^{-v}$ ， $v = 3 - 5$ 。用“库尔特”计数器测得半径大于0.5微米的粒子总数为 $10^5 - 10^8$ 升⁻¹[33—36]。显微镜下计数粒子所给出的浓度值要低得多（ $10^4 - 10^6$ 升⁻¹）[37]。在文献[38]中，讨论了这种浓度值降低的可能原因。光学方法测量的结果与“库尔特”计数器的数据一致[38, 39]。

半径小于0.5微米的粒子按大小分布的资料很少。在文献[104]中利用电子显微镜研究的结果证明， $v = 2.65$ 的纽格型分布对于这种微小粒子也是正确的，半径在0.01—1微米范围内的粒子总浓度为 $5 \times 10^8 - 10^{10}$ 升⁻¹。

海水中的悬浮体是具有不同折射率的粒子的集合。矿物粒子的相对折射率为1.13—1.25，有机粒子的相对折射率为1.02—1.05。很多浮游植物的细胞有硬的外膜，这就使情况复杂化了。硅藻是最大的浮游植物群，它的外膜是硅质的。球菌的外膜是石灰质的。然而，这些外膜的折射率与细胞本身的折射率差别不很大：硅藻的相对折射率为1.08。球菌的为1.17。

实际上，我们对海水悬浮粒子的复数折射率中决定吸收的虚部值知道得不多。看来，陆源成分和骨骼残渣只有很弱的非选择吸收，悬浮体的颜色基本上是与浮游植物的色素和铁化合物杂质