

自然水体辐射特性 与数值模拟

[美] Curtis D. Mobley 著 方圣辉 编译

Light and Water
Radiative Transfer in Natural Waters

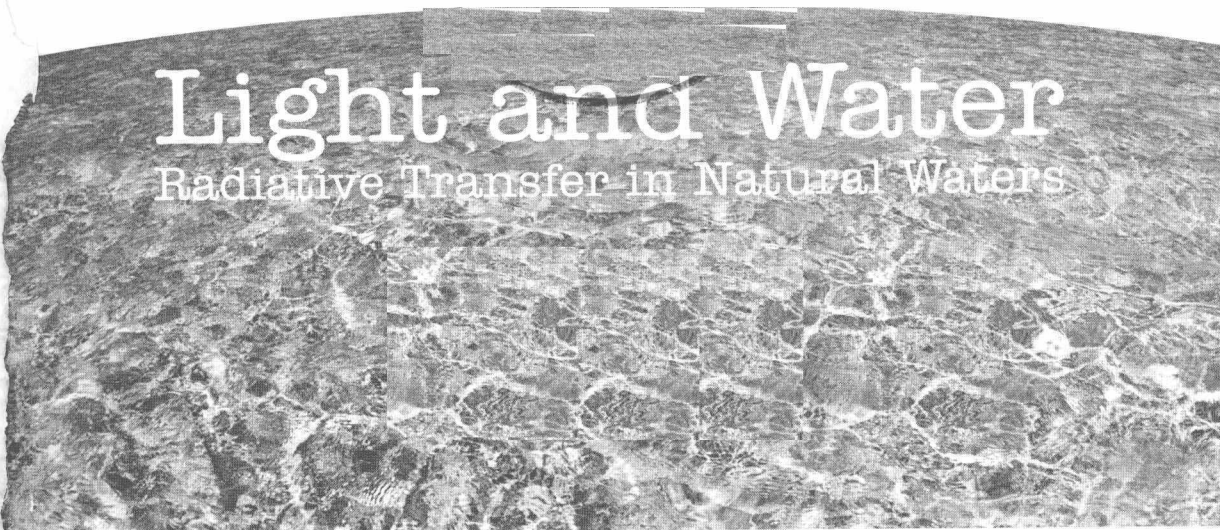


WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

自然水体辐射特性 与数值模拟

[美] Curtis D. Mobley 著
方圣辉 编译



Light and Water
Radiative Transfer in Natural Waters



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

自然水体辐射特性与数值模拟/(美)Curtis D. Mobley 著;方圣辉编译. —武汉:武汉大学出版社,2009.11

ISBN 978-7-307-07355-5

I. 自… II. ①M… ②方… III. 水体—光辐射—数值模拟
IV. O432

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 179753 号

© Curtis D. Mobley

This Chinese Translation of *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters* (ISBN 0-12-502750-8) originally published in English is published by arrangement with Fang Shenghui, the translator, who is granted by the Author the right to edit, translate and publish the title in Wuhan University Press.

《自然水体辐射特性与数值模拟》一书中文版经原书作者授权方圣辉改编、翻译并在武汉大学出版社出版。未经出版者书面允许,不得以任何方式复印或抄袭本书内容。

责任编辑:黄汉平

责任校对:黄添生

版式设计:马 佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:湖北民政印刷厂

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 16.5 字数: 317 千字 插页: 1

版次: 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-07355-5/O · 413 定价: 36.00 元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

本书从自然水体的光学特性及其辐射测量方法入手,定义了水体的固有光学特性和表观光学特性的概念。通过对水体固有光学特性影响因素的分析,用辐射传输理论中的相互作用原理对光子在气-水交界面的活动进行了描述,推导出了相应的反射与透射方程;用蒙特卡罗方法给出了几个辐射传输数值模型的实例和用来描述水体内部辐亮度特性的辐射传输方程的求解方法,同时还介绍了遥感的水色反演问题。

本书适合作为遥感、环境、水文、海洋和气象学相关专业大学本科、研究生教材之用,也可供相关科研工作者参考。

编译者的话

《自然水体辐射特性与数值模拟》是在 Curtis D. Mobley 先生的《light & water》的基础上,经过翻译和改编而成。本书具体包括七章:第一章简要介绍了光的本质以及光的产生和到达地面的过程,说明了方向、立体角、辐亮度、光合有效辐射等的一些辐射测量中的基本概念。第二章在定义水体的固有光学特性和表观光学特性基础上,分析了水体的成分、粒子大小、电磁特性对光学特性的特性,给出了估算这些参量的生物-光学模型。第三章通过辐射传输理论中的相互作用原理对光子在气-水交界面的活动进行了描述,推导了相应的反射与透射方程,最后提出了几个辐射传输数值模型的实例。第四章提出了用来描述水体内部辐亮度特性的辐射传输方程的求解方法,给出了自然水体中辐亮度的多种形式的方程式,最后分析了偏振、拉曼散射、荧光作用等因素对辐射传输方程的影响。第五章分析了辐射传输方程的数值解算中用到的“最一般化”的技术,即蒙特卡罗方法。依次介绍了正向蒙特卡罗方法与反向蒙特卡罗方法解算辐射传输方程的步骤,并评价了这两种方法的优缺点。第六章介绍了水文光学中的反演问题,即通过已知水下光场的辐射测量值来确定水体的固有光学性质,并具体分析了基于四项辐照度的反演、基于平面辐照度的反演以及遥感中的海洋水色反演等问题。第七章通过比较各种模型对水下光场进行了模拟,并且分析了天空光、海面、海底、相函数等因素对水下光场的影响,最后对一类水体进行了完整的水下光场的模拟。为了配合对内容的理解,每章后附有思考题。

在本书出版之际,我要特别感谢作者 Curtis D. Mobley 先生,他不仅给出了对原书改编的建议,还把他近年的研究成果编到本书中。在翻译过程中,他及时解答了我们提出的问题,给予了我们很多的帮助。他严谨、认真对待每个细节的精神值得我学习。另外,特别感谢我的合作者,汪蔓、乐源、湛一夫、周源、舒迟、彭漪等,她(他)们为本书翻译、编写和校对等做了大量的工作。同时还要感谢国内外有关专家给予我们的帮助和指导,感谢武汉大学出版社的编辑任翔、黄汉平等。

由于篇幅的限制,原文的参考文献在编译本中没有列出,请读者谅解。同时,由于我们的水平的原由,对原文的理解和翻译还会存在不足,请读者提出批评指正。

编译者:方圣辉

2009年9月

目 录

第一章 辐射测量	1
1.1 光的本质	2
1.2 太阳光	3
1.3 辐射能量的量测	8
1.4 方向和立体角	10
1.5 辐射测量	14
1.6 光合有效辐射	21
1.7 辐射的物理基础	22
思考题	23
第二章 水体的光学特性	25
2.1 固有光学特性	26
2.2 表观光学特性	30
2.3 自然水体重要的光学要素	35
2.4 粒子大小分布	37
2.5 水的电磁特性	39
2.6 折射率的实部	41
2.7 吸收	44
2.8 散射	54
2.9 光束衰减	77
2.10 漫射衰减和 Jerlov 水体类型	79
2.11 单粒子光学	86
2.12 闭合类型	89
2.13 小结	90
思考题	90
第三章 气-水交界面	92
3.1 相互作用原理	92

3.2 平静的水面	97
3.3 非平静表面与朗伯特底部表面	106
3.4 辐射传输数值模拟实例	109
思考题	118
第四章 光在水中的辐射传输	119
4.1 辐射过程	120
4.2 弹性散射	121
4.3 非弹性散射	125
4.4 真吸收系数、非弹性吸收系数和总吸收系数	126
4.5 总衰减	127
4.6 真发射	128
4.7 辐射传输方程	128
4.8 辐射传输方程的积分形式	132
4.9 辐亮度的一个简单模型	136
4.10 辐照度的散布定律	138
4.11 辐照度传输:双流向方程式	140
4.12 IOP 和 AOP 的关系	149
4.13 偏振	154
4.14 拉曼散射	159
4.15 荧光	166
4.16 生物发光现象	172
4.17 历史回顾	174
思考题	176
第五章 蒙特卡罗方法	179
5.1 正向蒙特卡罗方法	179
5.2 反向蒙特卡罗方法	185
5.3 方差消减技术	190
5.4 小结	192
思考题	193
第六章 反演算法	194
6.1 反演中的问题	194
6.2 辐射传输方程的反演	195

6.3 基于四项辐照度的反演	198
6.4 基于平面辐照度的反演	202
6.5 遥感反演	205
思考题	211
第七章 水下光场模拟与影响因素分析	213
7.1 模型验证	214
7.2 辐射分布的深入研究	220
7.3 天空光的影响	223
7.4 海面的影响	226
7.5 海底的影响	230
7.6 分层的影响	233
7.7 相函数的作用	234
7.8 一类水体的模拟	236
思考题	251
原著部分专业术语翻译对照	252
后 记	254

第一章 辐射测量

辐射测量是关于电磁测量、辐射测量或能量测量等学科的科学。同时,它也是自然水体的辐射传输研究的基础。因此,在本章中,除了介绍辐射测量的基本概念外,还特别讨论了在研究水体辐射中有特别意义的几何辐射的测定。

我们采用的是国际度量衡制的单位,一般称为 SI 单位(国际单位制)。该系统由表 1.1 所示的 7 个基本单位和 2 个补充单位组成。其他量从这些单位中推导出来。在表 1.2 中列举了一些目前需要的推导单位。SI 基本单位和推导单位的详细定义可以在 NBS Special Publication 330(1981)中找到。

表 1.1 SI 基本单位

物理量	基本单位	符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安培	A
温度	开尔文	K
物质质量	摩尔	mol
辐照度	坎德拉	cd
	补充单位	
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 1.2 在辐射传输研究中需要用到的推导单位

物理量	推导单位	符号	定义
光的波长	纳米	nm	10^{-9} m
能量	焦耳	J	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
功率	瓦特	W	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
光子数	爱因斯坦	einst	1 mol 光子 (6.023×10^{23} 个光子)

我们选择的命名和符号一般遵循海洋物理科学国际联合辐射能量委员会(IAPSO)的推荐。该命名被广泛应用于水文光学研究中,我们采用了该推荐以便与其他研究者保持一致。但是,推荐的符号并不都令人满意。特别是它的不完整性和在数学表达上不是很方便。因此,我们在实际应用中偶尔同 IAPSO 的推荐也有些小的背离。

1.1 光的本质

我们知道,光可以想象成由许多具有电磁能量的局部信息包所组成,这些信息包被称为光子,它在真空中的运动速度为 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这些光“粒子”都有一定的线动量和角动量。但是,光子不是古典力学意义上的粒子,与其相关的是波长 λ 和频率 ν ,这些量使光子具有波的性质。

所有的物质和能量都具有波粒二象性是近代物理学的基础,其中光子是典型的例子。因此,光子是粒子也是波,这两个方面对正确地理解光是必要的。当然,如果设计一个实验去探测光属于波的本质(比如用衍射光栅),我们确实可以探测到波的性质(比如波长的测量)。另一方面,如果设计一个实验去探测光属于粒子的本质(比如光电效应中的吸收),那么我们也可以观察到粒子的性质(比如来自于离散单元的光能量)。

同时,粒子还可以被想象成随时间变化的独立的电场和磁场的局部区域。根据麦克斯韦理论,变化的电场产生变化的磁场,反之亦然。电场和磁场之间的变换频率就是光子的频率。关于光的电磁性应用广泛。例如,光的电磁特性是后面讨论的米氏散射理论的基础。然而,光“粒子”的观点也同样适合于辐射传输理论的研究,并且不需要对电磁理论进行深究。

但是,没有实验能表明光子具有任何的内部结构。光子(可能与电子相似)很可能是数学上的点,没有物理大小。注意,如果一个光子具有波长,比如 $\lambda = 1 \text{ m}$,并不意味光“粒子”有 1 m 长;它只表示光子有与 λ 相关的“固有”频率 $\nu (\lambda \equiv c/\nu = 1 \text{ m})$ 。这些话题可以在近代物理学的课本中找到(如 Eisberg 和 Resnick, 1985)。目前,对光的非数学理解和它在自然界中的基础结构可以参见 Feynman(1985)。

光粒子观点很适合于辐射传输理论的研究。但是,光的电磁特性更适用于解决一些特定类型的问题,因此,我们在应用中应把握好时机。

光子的能量 q 与频率 ν 和相应的波长 λ 相关:

$$q = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

其中, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 是普朗克常数。光子的线性动量 p 和角动量 l 的大小分别由下式给出:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.2)$$

$$l = \frac{h}{2\pi} \quad (1.3)$$

例如,一个波长 $\lambda = 550\text{nm} = 550 \times 10^{-9}\text{m}$ (绿光) 的光子辐射能量为:

$$q = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s})(2.998 \times 10^8\text{m} \cdot \text{s}^{-1})}{550 \times 10^{-9}\text{m}} = 3.61 \times 10^{-19}\text{J}$$

线性动量为:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}}{550 \times 10^{-9}\text{m}} = 1.20 \times 10^{-27}\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

角动量为:

$$l = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}}{6.283} = 1.05 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$$

注意,能量和线性动量的大小都取决于波长,而所有光子都有相同的角动量。另外,每个光子都有一定的偏振情况,它与光子电场平面改变的方向有关。

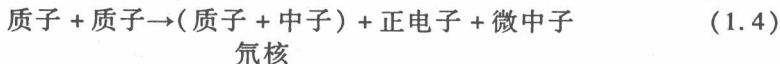
1.2 太 阳 光

本节简要概述了太阳光是如何产生的,并且描述了太阳光到达地面的过程。

1.2.1 太阳能量的产生

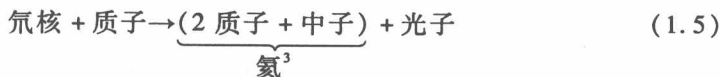
地球上的光主要来源于太阳,所以有必要简要地看看太阳光产生的过程,即我们知道的质子-质子循环。

太阳质心主要是完全被电离的氢和氦的混合物。中心温度大约是 $15 \times 10^6\text{K}$, 密度大约是水的 150 倍。在这些极端的条件下,氢核子或质子偶尔会有足够的能量相互碰撞,从而克服它们的静电排斥,并且通过以下反应而核聚变在一起:

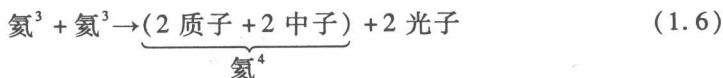


该反应将释放能量。质子和中子的界态称为氦核。正电子除了带的是正电荷,其他都与电子相同。微中子是无电荷、无质量的(或几乎无质量的)能量信息包,它与光子在某些方面是相似的。

氦核能够与质子发生进一步的核聚变,形成氦的同位素:



该反应也产生了获得反应所释放的大部分能量的光子或光粒子,氦³核子又能够在质子-质子循环的最后一步发生核聚变:



为了创造出式(1.6)中的两个氦³,式(1.4)和式(1.5)反应必须每个进行两次。因此,如果计算总的输入,会发现6个质子能够转化成1个氦⁴、2个质子、2个正电子、2个微中子和2个光子输出。正电子很快会遇到电子,经过共有的湮灭,产生2个或更多的光子:



因此,该质子-质子循环网的结果是4个氢原子转化为1个氦原子加上在形成光子和微中子过程中的能量。这些反应中释放的能量是巨大的:大约每千克氢转化产生 $6.4 \times 10^{14} \text{ J}$ 能量。

微中子与物质的相互作用非常微弱,由式(1.4)产生后立即从太阳中逃逸。在以上反应中所产生的各种不同光子都非常活跃(在电磁光谱的 γ 射线区域)。它们与物质的相互作用也非常强烈,因此通过太阳物质, γ 射线反复经历了散射、吸收和重新发射,这些相互作用使得各种光子朝向太阳表面运动,并且光子在它们的相互作用中丢失能量,所以当它们抵达太阳表面并逃逸至太空时,可见光和红外部分在光谱中占主导地位。

另外还有不同于上述的放热的核反应,有关细节可以在关于恒星演变方面的书(比如 Clayton, 1983)中找到。但是,质子-质子循环几乎是所有太阳能量产生的因素。

1.2.2 抵达地球的太阳能

太阳产生的光子离开太阳涌向宇宙的各个方向。根据能量守恒定律,穿过距离太阳中心半径为 R 的虚拟球面时,单位时间内的总能量与 R 的取值无关。但是,由于球面区域面积 $4\pi R^2$ 随着 R^2 增加而增加,单位时间内球面的单位面积上的能量称为辐照度,因此辐照度随着 R^{-2} 的减小而减小。这个简单的结果就是辐照度平方反比定律。

在日地平均距离上,来自所有波长光子的太阳辐照度 E_s 近似为:

$$E_s = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

E_s 通常被称为太阳常数,它的值每分钟以百分之一的速度进行衰减。此外,地球接收到的太阳光辐照度 E_s 在一年中以 $\pm 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 变化,这是因为地球绕太阳运行的轨道是椭圆形的。

从太阳到达地球的光子能量并不全是相等的。如式(1.1)中那样,光子的能量与它的波长成反比。此外,在电磁光谱中,每波长区间的光子数量不是相同的。图1.1表示的是在海洋学感兴趣波长范围内太阳光辐照度 $E_s(\lambda)$ 的分布。 $E_s(\lambda)$ 曲线的骤降是夫琅和费线,是由于太阳外层大气对太阳辐射进行选择吸收造成

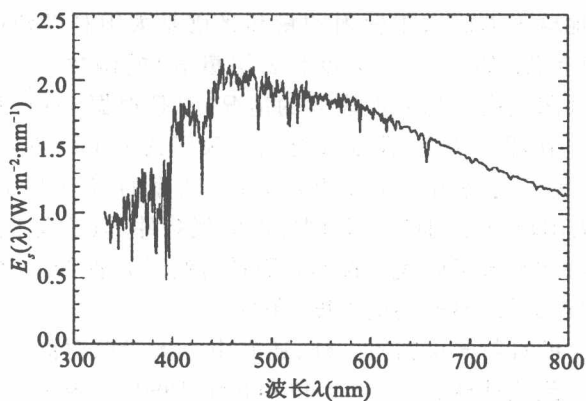


图 1.1 在平均日地距离上测量的太阳光谱辐照度。当 $\lambda \leq 630\text{nm}$ 时,分辨率为 1nm ,当 $\lambda > 630\text{nm}$ 时,分辨率为 2nm 。

的。这些夫琅和费线的宽度一般不超过 0.1nm ,但是它们实际上比图 1.1 显示的要“深”得多(夫琅和费线处的辐照度很小)。因此, $E_s(\lambda)$ 在 1nm 或 2nm 宽的范围内的值通常用平均值表示。例如,在 $\lambda = 486.05\text{nm}$ 和 $\lambda = 486.25\text{nm}$ 谱线中间波长 $\lambda = 486.13\text{nm}$ 的谱线处, $E_s(\lambda)$ 的值下降了 0.2 ;因此,谱线的深度是 0.2 。我们将会在 7.4 节的最后提到夫琅和费线的应用。

但是,光学海洋学者和湖泊学家很少,也没有必要考虑图 1.1 所示的 $E_s(\lambda)$ 随波长变化的情况。一般来说,在波长范围 $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ 内求 $E_s(\lambda)$ 值的平均值是很有效的,这些与在水下测量所使用的光学仪器的波段宽度相关。表 1.3 给出了 E_s 在一些波长范围内的分布。注意,仅仅大约 42% 的太阳能在与水文光学相关的近紫外和可见光波段中。

表 1.3 太阳常数在不同波长范围的分布

波段	波长间隔 (nm)	辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	E_s 分数 (百分比)
紫外及其以外	< 350	62	4.5
近紫外	$350 \sim 400$	57	4.2
可见光	$400 \sim 700$	522	38.2
近红外	$700 \sim 1000$	309	22.6
红外及其以外	> 1000	417	30.5
总和		1367	100

另外,水文光学中需要的不是大气顶层的太阳辐照度,而是实际到达海洋表面的太阳光。到达地球表面的太阳辐射的量和光谱是太阳高度角(也就是时间、季节和高度)和大气条件(如湿度、污染度和云层覆盖)的函数。图 1.2 表示的是不同方向非散射的太阳光束到达海洋表面的情况,它是根据 LOWTRAN 7 大气辐射传输模型预测的。在图 1.2 中,曲线 a 是大气顶层的 $E_s(\lambda)$ 在不同波长范围 $\Delta\lambda$ 的平均值,曲线 b 表示的是当太阳在天顶方向,洁净的海洋大气(水平能见度为 23km)条件下的太阳辐照度,曲线 c 是同样的大气条件,但是太阳高度角为 60° (水平角为 30° , $E_s(\lambda)$ 在与太阳射线垂直的表面进行测量),曲线 d 是 60° 的太阳高度角,非常模糊的海洋大气(5km 的能见度)条件下。

除了图 1.2 中的直射光束辐照度外,还有由于大气散射离开直射光束的大量漫反射辐照度也会到达地球表面(Tran 和 Collins,1990)。表 1.4 给出了具有代表性的漫反射和在不同的大气条件下到达海洋表面的可见光辐照度。

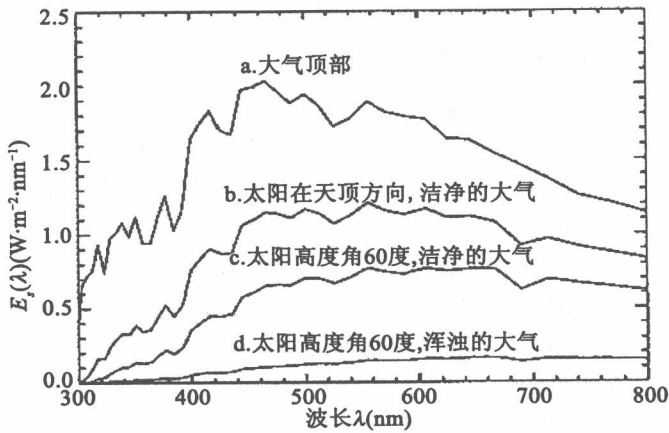


图 1.2 LOWTRAN7(Kneuzys 等,1988)所计算的太阳直射光束的光谱辐照度。曲线 a 给出了大气顶部的 $E_s(\lambda)$;曲线 b~d 给出了对于不同太阳天顶角和大气条件的海平面处 $E_s(\lambda)$ 。

表 1.4 海洋表面可见光波长范围(400~700nm)具有代表性的总辐照度
(直射部分加上漫射部分)

环境	辐照度($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
太阳常数(用作比较)	522
洁净的大气,太阳接近天顶方向	500
洁净的大气,太阳在天顶方向 60°	450

续表

环境	辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
模糊的大气, 太阳在天顶方向 60°	300
模糊的大气, 太阳接近天顶方向	100
多云, 太阳接近天顶方向	10
洁净的大气, 整个月亮接近天顶方向	1×10^{-3}
洁净的大气, 只有星光	3×10^{-6}
有云的晚上	3×10^{-7}
洁净的大气, 只有来自单独的、明亮的星星(第一量级)的光	3×10^{-9}
洁净的大气, 只有来自单独的、明亮的星星(第六量级)的光	3×10^{-11}

表 1.4 表明, 在典型的白天条件下, 海洋表面上的太阳辐照度通常都有几百。热力学第一定律揭示了物体的吸收率与它的温度变化率的关系如下式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_p m} \frac{\partial Q}{\partial t}$$

这里的 T 是温度, t 是时间, c_p 是物体特定的热容量(对海水而言 $c_p = 3900 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), m 是物体的质量, $\partial Q / \partial t$ 是能量吸收率。假设 5% 入射的可见光辐照度被海洋上层 1 米深的水吸收, 对于典型辐照度 $400 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ (即每秒每平方米 $Q = 400 \text{J}$), 我们发现

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{(3900 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})(10^3 \text{kg})} \left(\frac{0.5 \times 400 \text{J}}{1 \text{s}} \right) \approx 5 \times 10^{-6} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$$

每 10 个小时, 依据上面的加热率, 海洋上部每平方米水温会增加:

$$\Delta T \approx (5 \times 10^{-6} \text{K} \cdot \text{s}^{-1})(3.6 \times 10^4 \text{s}) \approx 0.2 \text{K}$$

这从物理海洋学观点来说, 水温有非常显著的变化。如果包括非可见光辐射的贡献, 这种变化会更大。尽管非可见光辐射大部分在非常靠近表面的时候被吸收。我们认为这里计算出增加的热量是对可见光而言的。

地球陆地表面和水体表面的不均匀加热是促使全球海洋和大气循环的基础。太阳光提供光合作用的能量, 它是维持地球生命过程的基础。

估算有多少太阳光传输到海洋是有效的事情。落在每平方米海面上光子的数量 N 可以通过式 (1.1) 被估算出来。再次利用典型辐照度 $400 \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($Q = 400 \text{J}$)。假设“平均”光子的波长为 $\lambda = 550 \text{nm}$, 有:

$$N = \frac{Q}{q} = \frac{Q\lambda}{hc} = \frac{(400 \text{J})(550 \times 10^{-9} \text{m})}{(6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1})} \approx 10^{21}.$$

这些光子每秒传输到一平方米海面的线性动量大小通过式 (1.2) 得出:

$$p = N \frac{h}{\lambda} = \frac{(10^{21})(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})}{(550 \times 10^{-9} \text{ m})} \approx 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

这相当于一立方米的水以 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度流动产生的冲量。因此,太阳光照射到海洋表面所带来的线性冲量同风流动产生的线性冲量相比可以完全忽略。

同样,式(1.3)给出了这些光子可能的最大角冲量:

$$l = N \frac{h}{2\pi} = 10^{21} (1.05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \approx 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

这相当于一颗小沙粒每秒一圈的旋转速度产生的角冲量。该角冲量甚至比最小的湍流漩涡切割水流或打破波浪产生的角冲量还要小得多。另外,这里计算的最大的角冲量是在假设所有的光子都在相同的角冲量的情况下得到的,即只有在光是圆形极化条件下是这样的。对于非偏振的太阳光,角冲量的净传输为 0 (Hecht, 1987)。

因此,照射在海洋表面的太阳光的重要性在于它的能量传输,而不是其动力传输。这与我们的直觉是一致的:太阳光加热是很快的,但它不会造成物体的运动。

关于太阳辐射的介绍并不意味着人造光源(如激光)或其他自然光源(如生物体发光)对水文光学研究不重要。只是,这本书主要关注在感兴趣的区域内,水体表面的光是均匀且是垂直的。在讨论过程中,大量研究的技术都是基于各向同性的假想。太阳光一般适于这种假想,而其他光通常更接近于点源(或甚至更加复杂的光源分布),在那些例子中,对辐射传输需要用到更复杂的数学处理。此外,海洋学家和湖泊学家主要关注的是如水体的加热、浮游植物的繁殖、被动遥感等,只考虑太阳辐射可以更好地从事这些研究。

1.3 辐射能量的测量

普通人眼是敏感的辐射能量探测器,它有非常宽的动态范围(最大与最小探测信号的比率)。但是,精细的水文光学研究需要用更客观的方法去测量辐射能量的流动。目前,有两类主要的探测器去探测和测量辐射能量:即热探测器和量子探测器。在热探测器中,辐射能量被吸收,并且转化为热能,探测器对吸收介质的温度变化作出响应。热探测器包括普通的温度计、热电偶、辐射热测仪和日射强度计等。量子探测器直接反映了入射光子的数量,而不是光子携带的能量的累积总和。量子探测器包括照相胶片和各种光电的、光敏的和光电发射的探测器,后三种探测器统称为光电器设备。

光电器中包含两种不同的物质。入射到光电元件的光在元件的两个不同部分产生不同的电压,从而在电器中形成电流回路,并且电流由电路中的测流计进行测量。当没有光入射到元件时,不会产生不同的电压,因此没有电流。一般来说,入

射到电器元件的光子数量越多,产生的电压就越大,电路中的电流就越大。如电解液中浸入两种相连的电极,并且让电解液被太阳光照射,通过这样的试验,Becquerel 在 1839 年第一次观察到光电效应。

1873 年的试验表明金属硒的电导率随阳光照射而增强。通过构造一个由硒(或相似特性的物质)、电动势(或电池)和一个测流计所组成的电路,该效应可以扩展到测量辐射能量。照射到含有硒的光电导体上的光子数越多,电器的传导率越大,因此电路产生的电流越大。即使没有光入射到电器上也会产生一些暗电流,因为光导物质即使在缺乏光线的情况下也有非零的传导率。

1887 年,Hertz 发现了光电子放射效应(经常称为光电效应)的原始形式,在相同的实验中,他证明了电磁波的存在。基本的光电电器由一个真空管组成,真空管包括一个负电荷电极(阴极,通常由像铯、钠、钾这样的碱金属组成)和一个正电荷电极(阳极)。当光照射到阴极上时,光子驱使电极表面的电子到达阳极,因此在一个由电池、测流计和电动势所组成的串联电路中产生电流;电动势为阴极补充供应电子,从而电极持续产生电压差。理论上来说,没有光入射到阴极上是不会产生电流的,但实际上,由于阴极随机的热运动自发产生电子,因此也会产生暗电流。

光电倍增管(PMT)是一种特殊的光电电器。与一般只含有一个阴极和一个阳极的光电电器不同,它具有一系列的阳极(叫做倍增器电极),并且每一个都具有比以前更高的正电压。阴极的电子通过光线入射被释放出,并被吸引到第一个倍增器电极,当最初的这些电子撞击第一个倍增器电极时,它们的撞击释放多余的电子,然后这些电子被吸引到第二个倍增器电极。与第二个倍增器电极发生碰撞的电子仍然释放更多的电子,然后这些电子被吸引到第三个倍增器电极,如此持续下去。仅通过阴极得到的电子流、电子喷流能够使 PMT 显著增强。商业上用到的 PMT 有多达 15 个倍增器电极,是对光非常敏感的探测器。但是,PMT 对温度非常敏感,且反应随时间变化不稳定(因为由于电子轰击产生的倍增器电极变化),并且操作中需要稳定的高压电源供应。基于这些原因和其他因素,原来很多海洋仪器中使用的 PMT 被使用晶体的探测器所代替。

半导体二极管可以作为光探测器,通常叫做光电二极管。在典型的接合硅光电半导体中,光入射到接合体上,从硅原子释放电子(不是从二极管喷射电子),而带正电荷的硅原子通过晶格被固定在原来的位子上,在这个位子上,被释放的电子可以在电动势的作用下进行移动。当光电二极管被包含在由一系列的电动势和测流计所组成的电路中时,这些电子形成电流。二极管的作用相当于光电导体。注意,光电二极管不像 PMT 那样可以增强光电流,因此与 PMT 相比光电二极管是灵敏度差很多的探测器。但是,光电二极管有很好的稳定性,更容易校准,而且需要很少的能源,并且价格便宜。

当把二极管用作光探测器时,如果二极管两端具有分离光电子和负离子的外