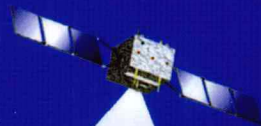




# 水质遥感 原理与应用

陈 军 温珍河 付 军 著  
孙记红 王保军 高晓军



海洋出版社

# 水质遥感

## 原理与应用

编 者 魏增建 曹 强  
副 编 王 强 曹 强

中国水利水电出版社

# 水质遥感原理与应用

陈 军 温珍河 付 军 著  
孙记红 王保军 高晓军

海洋出版社

2011年·北京

**图书在版编目(CIP)数据**

水质遥感原理与应用/陈军等著. —北京:海洋出版社,2011. 8  
ISBN 978 - 7 - 5027 - 8055 - 5

I. ①水… II. 陈… III. ①水质 - 水利遥感 IV. ①X824

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 136039 号

责任编辑:方 菁 江 波

责任印制:刘志恒

**海洋出版社 出版发行**

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:9

字数:200 千字 定价:36.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

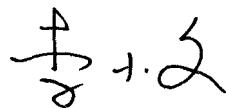
# 序

水环境是构成环境的基本要素之一,是人类社会赖以生存和发展的重要条件,也是受人类干扰和破坏最严重的领域。近年来,随着经济与社会的发展,水污染问题日益严重,水质监测与管理任务变得尤为重要。水质监测的核心内容是监视和评价水资源质量状况及其变化规律,为国家和各级政府合理开发、利用、管理和保护水资源提供科学依据。因此,实时而有效地获取水质信息空间分布状况及其变化趋势,对于改善水体质量和水环境状况都具有十分重要的意义。

本书针对水质遥感的研究现状,围绕水质遥感的几个研究热点和难点,对一些重要概念和理论方法进行了深入的评述与探索,并提出了新的看法和见解。可以使读者对近年来水质遥感的研究现状和发展趋势有所了解,对我国从事水质遥感研究、水环境监测和管理人员都有重要的参考价值。

本书采用理论阐述和实例分析并重的手法,有针对性地选择水质遥感的暗像元大气校正算法、建模方法、尺度效应以及不确定性等问题进行了深入分析和探索。尤其对水质遥感尺度效应问题的提出与探讨,在现有的研究成果中鲜有体现,这也是本书的亮点之一。虽然本书对这些问题的研究仍不够完善,但作为一种探索,是非常有意义的。

作为年轻的一代,作者等人的遥感功底扎实,学术思想活跃,乐于追求和接受新事物,这些特点在本书中都有所体现。本书在写作思路、探讨内容、文风用词等方面都具有独特的风格,有许多新意,值得一读。



中国科学院院士  
2010. 11. 18 于北京

# 前 言

周边的人与环境是我对水质遥感产生浓厚兴趣的主要因素。在接触水质遥感之初,条件非常有限,和绝大多数年轻人一样,实验数据是进行深入研究的主要障碍。无奈之举,给国内外知名学者写信,请求能否提供一套数据验证自己的一个算法或者一个想法,但是得到的答复多数为“不行”。后来通过客座研究生的形式,于2008年8月份获得了第一套水质实验数据。当时还是挺满意的,并且将这套数据反复研究了两年。随着研究的深入,我逐渐发现实际掌握的实验数据远远不能满足自己的研究需要,于是又回到了对数据的渴望和焦虑之中。其实,这就是“困难-克服-新困难”的一个循环过程。不过,大家要坚信:只要有恒心,就能比别人走得更远。

我的硕士指导老师是温珍河研究员,他是一位非常受人尊敬的老师。虽然我的专业是海洋地质,但研究方向是水质遥感,两者几乎是风马牛不相及。温老师非但不反对,反而不断地鼓励与支持我。当时的情况就是“温老师帮了我很多的忙,而我却没有给温老师做过一个完整的课题”。也正是恩师的这份关爱和照顾,才让我逐渐成长起来,借此机会,对恩师说一声:“老师,谢谢您!”

本书是作者近两年研究成果的综合,其内容可分为水质遥感基础及原理,暗像元大气校正算法,水质参数遥感反演的建模,水质遥感尺度的效应和水质遥感的不确定性分析。第1章遥感物理学基础:主要介绍电磁波理论、电磁辐射的基本概念和原理,以及大气对电磁波的影响。第2章水质遥感概述:主要介绍了水质遥感的基本概念、发展史、研究现状与存在的问题。第3章暗像元大气校正算法:主要介绍了暗像元大气校正算法的基本原理,几何校正对暗像元大气校正算法的影响,气溶胶光学厚度分布不均匀对暗像元大气校正算法的影响等。第4章水体参数反演模型:主要介绍了叶绿素a、悬浮泥沙和黄色物质的光学特性和水质参数浓度及水深遥感反演的建模方法。第5章定量模型尺度效应:主要介绍了悬浮泥沙浓度反演模型尺度效应定量表达式的构建方法,基于邻域窗口的方法估算悬浮泥沙浓度反演模型的尺度误差和利用尺度扩展的方法估算悬浮泥沙浓度反演模型的尺度误差。第6章水质遥感的不

确定性分析:主要介绍数据误差对反演精度的影响,基于多观测列方差估算反演模型的误差和基于 Kalman 算法的多模型融合。

本书的一个主要特点是在水质遥感中探讨尺度效应问题。遥感中的尺度效应主要是在理想状态下获取的反演模型在像元尺度下将产生尺度不适用现象。在这方面,对我影响较大的是李小文院士关于热红外尺度效应方面的观点和见解,正是这种启发,让我感觉到,水质遥感也会存在尺度效应,并且有必要对其进行深入的研究与探讨。也正是基于这点,特别邀请了李院士给本书写序,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点甚至错误,诚挚欢迎读者和同行专家批评指正。作为 1:100 万大连幅海洋区域地质调查项目(CZH200800501)的成果之一,全体作者致谢课题组成员在成书过程中给予的帮助,特别致谢张志珣研究员、李日辉研究员以及祁江豪同学给予本书的支持。

陈军 cjun@cgs.cn

2010.12.20

青岛海洋地质研究所

# 目 次

<b>第 1 章 遥感物理学基础</b> .....	(1)
1.1 电磁波与电磁辐射 .....	(1)
1.1.1 电磁波的波粒二象性 .....	(1)
1.1.2 黑体辐射 .....	(1)
1.1.3 Stephen-Boltzman 定律 .....	(2)
1.1.4 Wien 位移定律 .....	(3)
1.1.5 Kirchhoff 定律 .....	(3)
1.2 电磁波谱 .....	(4)
1.2.1 紫外线 .....	(4)
1.2.2 可见光 .....	(5)
1.2.3 红外线 .....	(5)
1.2.4 微波 .....	(5)
1.3 大气对电磁波的影响 .....	(5)
1.3.1 大气概述 .....	(5)
1.3.2 大气的散射作用 .....	(6)
1.3.3 大气的吸收作用 .....	(8)
1.3.4 大气窗口 .....	(8)
<b>第 2 章 水质遥感概述</b> .....	(10)
2.1 光学遥感辐射度学参数 .....	(10)
2.1.1 辐射度量参数 .....	(10)
2.1.2 Lambertian 余弦定理 .....	(12)
2.1.3 Bouguer-Lambertian 定律 .....	(13)
2.2 水质遥感机理 .....	(13)
2.3 水环境遥感的发展 .....	(14)
2.4 水环境遥感的研究现状 .....	(17)
2.4.1 水质浓度反演模型 .....	(17)
2.4.2 水体深度反演模型 .....	(18)
2.4.3 大气校正 .....	(20)
2.4.4 底质影响校正 .....	(22)
2.4.5 二向性反射分布函数 .....	(23)



2.4.6 尺度效应 .....	(24)
2.5 水色遥感传感器和平台 .....	(26)
2.5.1 NOAA 系列卫星 .....	(26)
2.5.2 Landsat 陆地卫星 .....	(27)
2.5.3 SeaWiFS 卫星 .....	(27)
2.5.4 MODIS 卫星 .....	(28)
2.6 实例数据与区域 .....	(30)
<b>第3章 暗像元大气校正算法 .....</b>	<b>(32)</b>
3.1 概述 .....	(32)
3.2 基于辐射传输的离水反射率反演算法 .....	(32)
3.2.1 基于清澈水体的大气校正算法 .....	(33)
3.2.2 基于同步光谱测量的大气校正方法 .....	(34)
3.3 几何校正对大气校正算法精度的影响 .....	(34)
3.3.1 几何校正对气溶胶光学厚度估算的影响 .....	(34)
3.3.2 几何校正对离水辐亮度反演精度的影响 .....	(35)
3.4 插值算法对暗像元影响的通用模型 .....	(35)
3.4.1 最邻近插值算法对暗像元值影响的误差模型 .....	(35)
3.4.2 双线性插值算法对暗像元值影响的误差模型 .....	(36)
3.4.3 三次卷积插值算法对暗像元值影响的误差模型 .....	(36)
3.5 实例计算与分析 .....	(37)
3.5.1 几何校正对离水辐亮度反演精度的影响 .....	(37)
3.5.2 分区暗像元大气校正算法 .....	(41)
3.5.3 不均匀气溶胶光学厚度对大气校正的影响 .....	(43)
3.5.4 三种插值算法对 CBERS 影像的暗像元的影响 .....	(47)
<b>第4章 水体参数反演模型 .....</b>	<b>(51)</b>
4.1 水体的物质成分 .....	(51)
4.2 水质参数的光学特征 .....	(51)
4.2.1 清洁水体 .....	(52)
4.2.2 可溶有机物质 .....	(53)
4.2.3 悬浮泥沙 .....	(55)
4.2.4 叶绿素 a .....	(56)
4.3 水质浓度反演模型的构建 .....	(58)
4.3.1 经验模型 .....	(58)
4.3.2 半分析模型 .....	(60)
4.3.3 物理模型 .....	(61)

4.3.4 三要素综合反演模型 .....	(62)
4.4 水深反演模型的构建 .....	(62)
4.4.1 水深反演机理 .....	(62)
4.4.2 水深反演模型 .....	(63)
4.5 实例计算 .....	(65)
4.5.1 经验反演模型 .....	(65)
4.5.2 基于四波段的半分析算法 .....	(67)
<b>第5章 定量模型尺度效应 .....</b>	<b>(73)</b>
5.1 尺度效应问题 .....	(73)
5.1.1 尺度的概念 .....	(73)
5.1.2 自然科学和社会科学中的尺度问题 .....	(73)
5.1.3 遥感信息尺度问题 .....	(75)
5.1.4 遥感模型的尺度问题 .....	(75)
5.2 不同尺度遥感信息之间的转换 .....	(76)
5.3 遥感应用中合适空间分辨率的选取 .....	(77)
5.4 衡量尺度效应三要素 .....	(78)
5.5 悬浮泥沙定量模式的尺度效应 .....	(79)
5.5.1 遥感不均一像元反射率 .....	(79)
5.5.2 反演模型不均一像元尺度误差的存在性 .....	(80)
5.6 悬浮泥沙浓度定量模型尺度三要素及纠正 .....	(81)
5.6.1 尺度效应纠正 .....	(81)
5.6.2 两类不同浓度概念 .....	(82)
5.6.3 定量模型尺度三要素 .....	(82)
5.7 基于8邻域方法估算悬浮泥沙定量模型尺度误差 .....	(83)
5.7.1 不均匀像元定量模式尺度效应 .....	(83)
5.7.2 基于8邻域估算泥沙像元内分布方差 .....	(84)
5.7.3 太湖悬浮泥沙浓度分布方差 .....	(84)
5.7.4 几种常用经验模型的尺度误差 .....	(86)
5.7.5 结论与探讨 .....	(87)
5.8 基于尺度扩展的方法估算悬浮泥沙尺度误差 .....	(88)
5.8.1 研究方法 .....	(88)
5.8.2 计算与分析 .....	(90)
5.8.3 结论与探讨 .....	(95)
<b>第6章 水色遥感的不确定性分析 .....</b>	<b>(97)</b>
6.1 误差和模型误差 .....	(97)

6.1.1	基本概念	(97)
6.1.2	模型误差	(97)
6.1.3	误差的分类	(98)
6.2	误差传递原理	(98)
6.3	遥感信息中的不确定来源	(99)
6.3.1	遥感数据获取阶段	(100)
6.3.2	遥感数据处理阶段	(100)
6.3.3	遥感数据分析阶段	(100)
6.3.4	遥感数据转换阶段	(101)
6.4	水质浓度反演的误差带模型	(101)
6.5	基于多观测列方差估算反演误差	(102)
6.5.1	独立样本多观测列算法	(102)
6.5.2	三观测方程解的稳定性	(103)
6.5.3	非独立样本多观测列算法	(107)
6.6	基于 Kalman 算法的多模型融合	(107)
6.6.1	独立样本 Kalman 滤波算法	(107)
6.6.2	非独立样本 Kalman 滤波算法	(108)
6.7	实例计算与分析	(109)
6.7.1	反演模型的误差评估和多模型融合	(109)
6.7.2	基于带模型评估叶绿素 a 浓度反演精度	(114)
6.7.3	基于数值方法模拟观测误差对水色遥感模型参数的影响	(116)
6.7.4	遥感数据误差对地表参数定量反演可靠性的影响	(121)
<b>参考文献</b>		(125)

# 第 1 章 遥感物理学基础

## 1.1 电磁波与电磁辐射

### 1.1.1 电磁波的波粒二象性

麦克斯韦的电磁场理论认为:变化的电场周围产生变化的磁场,变化的磁场周围会产生变化的电场,它们互相套环,以能量形式沿着直线以光速向远方传播。电磁波的传播不依赖任何介质,可在真空中传播。电磁波的波段范围很广,但本质是相似的,都遵循基本的波动理论,只是由于频率的不同而显示出不同的特性。电磁波包括无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线、 $\gamma$  射线等。可见光只是电磁波波谱中很小的一部分。

关于电磁波有几个重要的参数变量:频率( $\nu$ )和波长( $\lambda$ ),电磁波在真空中的传播速度为  $3 \times 10^8$  m/s,即真空中的光速  $c$ :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1.1)$$

电磁能量具有波粒二象性,电磁波也称电磁辐射。这种情形下,电磁波是由离散的光量子组成,电磁波的物质成分为不停地运动着的、密集的、量子化的粒子流。德布罗意把粒子和波通过下面的关系联系起来:

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

式中: $E$  为粒子的能量; $h$  为 Planck 常数。

### 1.1.2 黑体辐射

一般情况下,入射到物体的辐射能一部分会被物体吸收并转化为物体的内能,一部分会被反射回到环境中去,剩余部分会穿透物体而射出去。绝对黑体是指对入射的任何波长的电磁波辐射都能够全部吸收的物体。实验室里理想的绝对黑体是用一个带小孔的空腔做成的,空腔由不透明的材料制成,对于辐射只有吸收和反射作用。当从小孔进入的辐射照射到空腔壁上时,大部分光线被吸收,不足 5% 的辐射反射,经过多次反射和吸收作用后,所剩微乎其微的能量将从小孔逃逸,回到环境中去。一般情况下,当吸收和反射作用次数超过 10 次时,即可认为空腔满足绝对黑体的要求。黑色的烟煤其吸收系数接近 99%,因而被认为是最接近绝对黑体的自然物体。恒星和太阳也被近似为黑体辐射源(图 1.1)。

绝对黑体的辐射光谱  $E\lambda, T$  对于研究一切物体的辐射规律具有重要的理论意义。

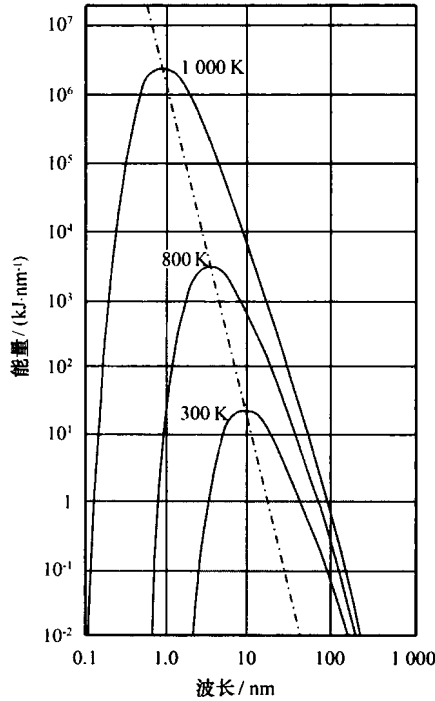


图 1.1 黑体辐射的光谱能量分布

1900年, Planck 引进量子的概念, 提出了 Planck 定律, 成功地从理论上修正了 Rayleigh-Jeans 在短波部分产生“红外灾害”的错误认识。Planck 假定, 黑体以  $h\nu$  为能量单位不连续地发射和吸收频率为  $\nu$  的辐射能量, 而不是经典理论所要求的那样可以连续地发射和吸收辐射能量。能量单位  $h\nu$  称为能量子。基于这个假定, Planck 得到了与实验结果辐射吻合得很好的黑体辐射公式:

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/T} - 1} d\nu \quad (1.3)$$

式中,  $\rho_\nu d\nu$  为黑体内频率  $\nu$  到  $\nu + d\nu$  之间的辐射能量密度;  $k$  为波尔兹曼常数;  $T$  为黑体的绝对温度。

对式(1.3)进行积分计算, 便可得到 Planck 定律的黑体光谱发射度的表达式:

$$M_B(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1.4)$$

式中,  $T$  为热力学温度;  $M_B(T, \lambda)$  为在温度  $T$  下, 波长  $\lambda$  处黑体的光谱发射度;  $c_1$  为第一辐射常数;  $c_2$  为第二辐射常数。

### 1.1.3 Stephen-Boltzman 定律

将式(1.4)对波长  $\lambda$  在  $[0, \infty]$  范围内做定积分得:

$$M_B(T) = \sigma T^4 \quad (1.5)$$

式中,  $\sigma$  叫做 Stephen-Boltzman 常数;  $M_B(T)$  为黑体在温度  $T$  下的总发射度。式(1.5)即为 Stephen-Boltzman 辐射定律。它表明, 在某一热力学温度下, 黑体在全部波长范围内的总发射能量与该热力学温度的 4 次方成正比。

### 1.1.4 Wien 位移定律

对 Planck 公式求导, 并取极值, 即令:

$$\frac{dM_B(\lambda, T)}{d\lambda} = 0 \quad (1.6)$$

将 Planck 公式代入式(1.6)可得 Wien 位移定律:

$$\lambda_{\max} T = b \quad (1.7)$$

式中,  $\lambda_{\max}$  为在温度  $T$  下的黑体辐射峰值波长;  $b$  为常数。由 Wien 位移定律可知, 黑体辐射峰值波长  $\lambda_{\max}$  与热力学温度  $T$  成反比。当温度升高时, 峰值波长变短, 即向短波方向移动。由此可得太阳辐射的最大值出现在  $2\,898.3/6\,000 = 0.48\ \mu\text{m}$ ,  $25^\circ\text{C}$  左右的海水的辐射峰值出现在  $10\ \mu\text{m}$  左右。

图 1.2 为当在海水温度在  $[270\ \text{K}^*, 310\ \text{K}]$  范围内变化时, 不同红外波段的辐射随温度的变化状况。据该图可知: 在海洋温度范围内,  $11\ \mu\text{m}$  左右峰值波长上的红外辐射, 与温度几乎成直线关系。因此, 如果波段选择在  $11\ \mu\text{m}$  作为地面温度反演的波长, 不仅传感器接收到的信号强较强, 有利于提高信噪比, 而且其图像灰度将与温度梯度有很好的统计关系。

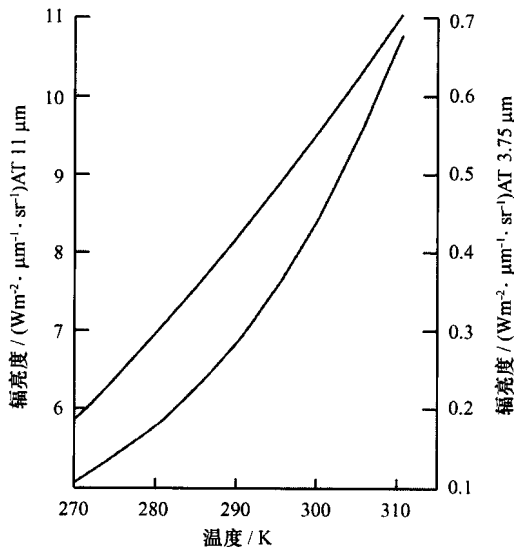


图 1.2 某一波长的红外辐射随黑体温度的变化

\*  $1\ \text{K} = 1^\circ\text{C} + 273.15 = 274.15^\circ\text{C}$

### 1.1.5 Kirchhoff 定律

Kirchhoff 发现,在任一给定温度下,辐射通量密度与吸收率之比对任何材料都是一个常数,并等于该温度下黑体的辐射通量密度,即:

$$\frac{E'}{a} = E \quad (1.8)$$

式中, $E'$ 为辐射通量密度; $a$ 为材料的吸收系数; $E$ 为该温度下黑体的辐射通量密度。Kirchhoff 定律是描述物质吸收辐射的速率与反射辐射速率之间的关系。在局部热动态平衡的条件下,物体吸收能量的速率与辐射能量的速度相等,也就是方向性光谱发射率等于方向性光谱吸收率:

$$e(\lambda, \theta, \phi) = a(\lambda, \theta, \phi) \quad (1.9)$$

式中, $e(\lambda, \theta, \phi)$ 为方向性光谱发射率; $a(\lambda, \theta, \phi)$ 方向性光谱吸收率; $\theta$ 和 $\phi$ 为描述电磁波发射或吸收方向的角度参数。由 Kirchhoff 定律可知,如果局部热系统不满足式(1.9)时,则该局部热系统的平衡性将遭破坏,进而导致局部系统升温或者降温,并将在另一个热平衡点达到局部热平衡。

在相同温度下,黑体的发射度与灰体的发射度(简称灰度,或者白体的发射度),存在如下关系:

$$\frac{M(\lambda, T)}{a(\lambda)} = M_B(\lambda, T) \quad (1.10)$$

将式(1.10)代入式(1.9)可得:

$$M(\lambda, T) = e(\lambda, \theta, \phi) M_B(\lambda, T) \quad (1.11)$$

式(1.11)表明:黑体的发射度等于吸收的辐射度,灰体的发射度等于入射的辐射度和灰度的乘积。对于灰体,灰度等于吸收率,也等于发射率。另外,式(1.11)表明,在局部热平衡系统中,除反射的部分以外,所有吸收的能量都被发射出去了,以维持局部热动力平衡。

## 1.2 电磁波谱

按照波长的长短顺序将各种电磁波排列制成的图标称之为电磁波谱。在电磁波谱中,从左到右,波长逐渐增大。从左到右依次排列为宇宙射线、 $\gamma$ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波、其他无线电波和工业用电波。

### 1.2.1 紫外线

紫外线的波长范围为 0.01 ~ 0.38  $\mu\text{m}$ ,并且可以细分为 3 个光谱段:

远紫外——波长范围为 0.01 ~ 0.20  $\mu\text{m}$ ;

中紫外——波长范围为 0.20 ~ 0.30  $\mu\text{m}$ ;

近紫外——波长范围为 0.30 ~ 0.38  $\mu\text{m}$ 。

在大气传输中,紫外线受大气衰减较厉害,在遥感中很少被应用。它一般只用于探测海洋海面石油污染的范围、油膜厚度以及水体中可溶有机物质的吸收系数。

### 1.2.2 可见光

可见光是肉眼可以看见的电磁波,其波长范围为 $0.38 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 。可见光即可以被细分为7色——紫、蓝、青、绿、黄、橙、红,也可以粗分为3色——蓝、绿、红,该3色的波长范围为:

蓝光——波长范围为 $0.38 \sim 0.50 \mu\text{m}$ ;

绿光——波长范围为 $0.50 \sim 0.60 \mu\text{m}$ ;

红光——波长范围为 $0.60 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 。

### 1.2.3 红外线

红外线的波长范围为 $0.76 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ ,并可以细分为4个光谱段:

近红外——波长范围为 $0.76 \sim 3 \mu\text{m}$ ;

中红外——波长范围为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ ;

远红外——波长范围为 $6 \sim 15 \mu\text{m}$ ;

超远红外——波长范围为 $15 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ 。

红外线是遥感中常用的波段之一,使用率仅次于可见光。红外线在云、雾、雨中传播时,受到严重的衰减作用。因此,红外遥感不是全天候遥感,不能在云、雾、雨天气中进行。

### 1.2.4 微波

微波指波长为 $1 \text{ mm} \sim 1 \text{ m}$ 的无线电磁波,并且可细分为3个光谱段:

毫米波——波长范围为 $1 \sim 10 \text{ mm}$ ;

厘米波——波长范围为 $1 \sim 10 \text{ cm}$ ;

分米波——波长范围为 $1 \sim 10 \text{ dm}$ 。

微波具有较强的穿透能力,在云、雾、雨天气里,微波仍然能正常工作,因此,微波遥感是全天候遥感。另外,微波遥感在昼夜里均可进行,因此微波遥感是全天时遥感。

## 1.3 大气对电磁波的影响

### 1.3.1 大气概述

地球的大气层并没有一个确切的界限。只是离地球表面越远空气越稀薄,以至于近似真空地延伸到太空。大气层的厚度可取 $1\,000 \text{ km}$ ,约相当于地球直径的 $1/13$ 。按热力学性质,大气垂直剖面可分为对流层、平流层、中间层和电离层。

对流层的上界往往受纬度、季节等因素影响较大。极低地区,对流层高度仅 $7 \sim$



8 km,而赤道地区则可达 16 ~ 19 km。对流层有明显的上下混合作用,主要的天气现象几乎都集中在该层中。在对流层中,海拔每升高 1 km,温度下降 6.5 K,空气密度和气压也随着高度上升而下降。

平流层的范围为对流层层顶至海拔 50 km 高度处。它包括底部的同温层和随着高度上升温度缓慢上升的暖层。这是因为臭氧吸收紫外光的缘故。层内除季节性的大气运动外,几乎没有什么天气现象。

中间层的范围为 50 ~ 80 km。它们介于上下两个暖层之间,又称为冷层。该层的温度随着海拔高度的增加而递减,其温度的递减速率为 3 K/km。大约在 80 km 处降到最低点—— -95℃,也是整个大气层的最低温度。

电离层,又称增温层,是大气的最外层,海拔高度为 80 ~ 1 000 km。层内空气稀薄,温度很高,可达 1 500 K。因受太阳辐射作用而发生电离现象,无线电波在该层发生全反射现象。

大气成分主要分为可变成分和不可变成分。不可变成分主要包括氮、氧和微量气体元素(二氧化碳、甲烷、氧化氮、臭氧等),这部分成分占大气总量的 99% 以上。可变成分主要包括水汽和悬浮颗粒等,密度不到大气总量的 1%。

### 1.3.2 大气的散射作用

大气散射是电磁波受到大气分子或气溶胶颗粒等作用,而改变传播方向的现象。大气散射的强度取决于颗粒的大小、含量、辐射波长和穿过的大气厚度。根据电磁波波长和颗粒粒径的大小,可以将散射分为三类。

#### 1.3.2.1 Rayleigh 散射

1871 年 Rayleigh 在散射粒子粒径远小于波长的假设条件下,推导出了 Rayleigh 散射定律,并指出该散射具备以下 4 个特征。

- (1) 波长不变,即散射光波长与入射光波长相同。
- (2) 散射强度与波长的 4 次方成反比:

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4} \quad (1.12)$$

式中, $I$  为散射强度(W/Sr)。Rayleigh 散射的特性表明,当白光入射时,波长短的紫光和蓝光比波长长的红光和黄光散射要强烈。波长越短,散射越强,且前向散射与后向散射强度相同。利用该定律可以说明很多日常生活中的散射现象,如天空的蔚蓝色、旭日和夕阳的红色等。在大气中,Rayleigh 散射多发生在 9 ~ 10 km 的晴朗高空,当太阳光与大气相互作用时,其可见光的蓝光要比其他波段的散射强得多,因而天空呈现天蓝色。然而当日出和日落时,太阳离地平线较近,此时的太阳高度角较低,太阳光线穿过很厚的大气层,蓝光和紫光比红光的散射要强烈得多,所以看到的太阳是红色的。

(3) 散射光强度依空间方位角呈哑铃型分布。设入射光是自然光,则在与人射光方向角(习惯上称之为散射角)的方向上,散射强度为: