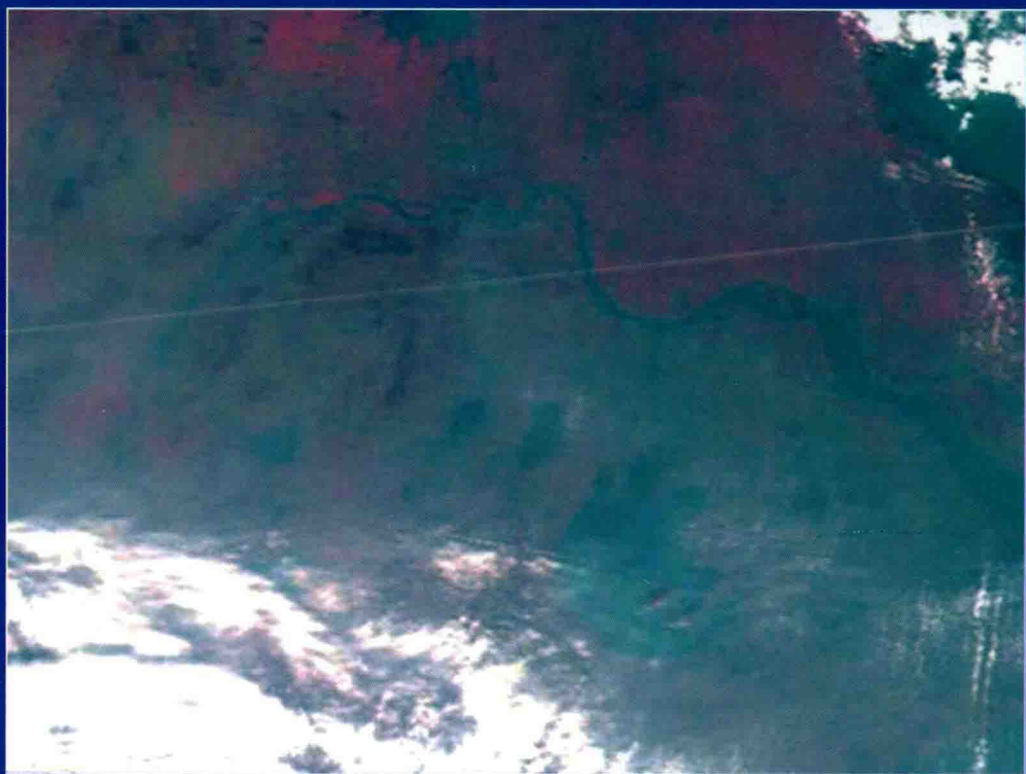


大气气溶胶反演及其 污染环境监测遥感

查勇 贺军亮 程峰 李越 著



科学出版社

大气气溶胶反演及其 污染环境监测遥感

查 勇 贺军亮 程 峰 李 越 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是作者对有关大气气溶胶反演及其污染环境监测遥感研究进展的总结,共分7章,主要包括地基和卫星遥感气溶胶反演技术与方法,云对气溶胶卫星遥感的影响及其消减方法,大气污染气溶胶颗粒物浓度估算,基于MODIS数据的霾及其等级遥感检测,以及区域气溶胶污染变化监测及其影响分析等内容。

本书可供大气气溶胶、地理环境遥感与生态环境保护等领域的科研人员和相关专业的研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大气气溶胶反演及其污染环境监测遥感 / 查勇等著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-060850-5

I. ①大… II. ①查… III. ①遥感技术—应用—气溶胶—污染防治—大气监测 IV. ①X513

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第048107号

责任编辑: 周丹 沈旭 石宏杰 / 责任校对: 杜子昂
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第一版 开本: 720 × 1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 318 000

定价: 149.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着我国社会经济持续发展,城市化进程不断加快,工业生产、化石燃料燃烧等排放产生大量大气气溶胶粒子,对区域和全球气候、大气环境及公众健康产生了重要的影响。当前,气溶胶及其污染环境研究已成为气候变化和大气环境等相关研究领域的热点问题之一。

气溶胶通过散射和吸收太阳辐射,干扰地球的辐射平衡,对气候产生重要的影响。此外,气溶胶颗粒物还影响近地表的空气环境质量,造成人们心肺功能下降,诱发哮喘、支气管炎等呼吸系统疾病,危害人类生存和身体健康。近年来,以灰霾天气为代表的大气污染现象越来越严重,大气环境污染问题已成为影响城市和区域可持续发展及国际环境外交的重要因素。

传统的气溶胶及其污染环境研究方法主要是基于地面设点的物理或者化学分析测量,但随着遥感技术的发展,其作为科学、快速、大范围的监测手段,在大气研究中被广泛应用。

目前,卫星遥感反演气溶胶已取得丰富的研究成果,发展了多种气溶胶反演算法。针对海洋上空气溶胶的反演方法比较成熟,如利用改进的甚高分辨率辐射计(AVHRR)反演海洋上空气溶胶光学厚度早在20世纪70年代就已经实现业务化。陆地上空气溶胶光学厚度卫星遥感反演方法主要包括暗像元法、结构函数法、深蓝算法、偏振算法和多角度算法等。以上气溶胶反演方法各具优缺点,适用范围也有所不同。总体上,基于太阳后向散射的气溶胶遥感反演,都是依据气溶胶引起的表现反射率变化来反演气溶胶的。除了进行气溶胶特性的反演研究外,利用反演的气溶胶等遥感数据与地面实测及模拟数据相结合进行大气气溶胶颗粒物浓度的估算、霾及其等级检测,以及气溶胶污染监测等研究,有助于全面掌握大气气溶胶的区域分布及其变化规律,为气溶胶大气污染防治提供科学依据和技术支撑。

本书是对作者及其所指导的研究生[贺军亮(石家庄学院)、程峰(云南师范大学)、李越、黄建龙、陈骁强、沈丹、张倩倩、王强、包青、李倩楠、张芳芳、刘松等]多年从事大气气溶胶遥感研究工作的成果集成。第1章主要介绍大气气溶胶的基本概念、气溶胶的物理性质与光学性质、大气辐射传输模型、气溶胶遥感反演的基本原理及方法、气溶胶污染遥感监测等。第2章介绍太阳光度计、激光雷达等地基遥感手段在气溶胶光学特性及组分反演中的应用。第3章研究

MODIS、HJ-1、GOCI、PARASOL 等多种卫星遥感数据的气溶胶反演技术与方法。第 4 章分析云对气溶胶卫星遥感的影响并发展消减云影响的气溶胶光学厚度反演方法。第 5 章利用激光雷达、MODIS AOD 产品等数据及霾优化变换和归一化灰霾指数对大气气溶胶颗粒物浓度进行估算。第 6 章探讨 MODIS 卫星遥感数据与地面实测数据相结合的霾及其等级遥感检测分析方法。第 7 章阐述区域气溶胶污染变化监测及气溶胶域外输入影响的后向轨迹分析。

本书所涉内容的研究过程中，得到了地图学与地理信息系统国家重点学科、虚拟地理环境教育部重点实验室和南京师范大学地理科学学院及作者家属的大力支持与帮助。其中，部分内容得到国家自然科学基金项目“长三角地区气溶胶污染特征与形成机制研究”(No. 41671428)的资助。同时，本书由虚拟地理环境教育部重点实验室和江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心资助出版，在此一并表示感谢。

大气气溶胶研究所涉及的内容众多，本书仅反映了作者有关大气气溶胶反演及其污染环境监测遥感方面的有限研究成果，加之作者水平所限，疏漏和不足之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

查 勇

2018 年秋于南京师范大学仙林校区

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 气溶胶概念、来源及分类	1
1.2 气溶胶物理性质和光学性质	2
1.2.1 气溶胶物理性质	2
1.2.2 气溶胶光学性质	4
1.3 大气辐射传输模型	5
1.3.1 6S 辐射传输模型	5
1.3.2 LOWTRAN	7
1.3.3 MODTRAN	7
1.3.4 FASCODE	8
1.4 气溶胶遥感反演基本原理	8
1.5 气溶胶遥感反演方法	9
1.5.1 地基遥感反演方法	9
1.5.2 卫星遥感反演方法	10
1.6 气溶胶污染遥感监测	13
第 2 章 地基遥感气溶胶反演	16
2.1 概述	16
2.2 太阳光度计反演气溶胶	17
2.2.1 AOD 反演	17
2.2.2 Angstrom 参数反演	20
2.2.3 气溶胶组分反演	22
2.3 激光雷达反演气溶胶	25
2.3.1 Mie 散射激光雷达方程及其求解	26
2.3.2 基于动态雷达比的气溶胶反演	28
第 3 章 卫星遥感气溶胶反演	31
3.1 概述	31
3.2 MODIS 双星数据协同反演 AOD	31
3.2.1 模型与算法	32

3.2.2	气溶胶类型分析与确定	36
3.2.3	反演结果验证	37
3.3	像元分解 MODIS 数据反演气溶胶光学厚度	39
3.3.1	像元分解	39
3.3.2	地表反射率确定	41
3.3.3	反演结果验证	43
3.4	HJ-1 卫星 CCD 数据反演 AOD	47
3.4.1	基于 MODIS 的各月地面反射率和 BRDF 数据获取	47
3.4.2	HJ-1 卫星 CCD 观测角度下的地面反射率获取	48
3.4.3	MODIS 地面反射率到 HJ-1 卫星 CCD 地面反射率转换	49
3.4.4	反演结果验证	50
3.5	GOCI 卫星数据反演气溶胶光学厚度	52
3.5.1	地表反射率的确定	52
3.5.2	查找表的构建	57
3.5.3	反演结果验证	60
3.6	多角度偏振数据反演气溶胶组分及光学厚度	64
3.6.1	PARASOL 数据预处理	65
3.6.2	查找表的构建	66
3.6.3	自定义气溶胶类型	66
3.6.4	反演步骤	70
3.6.5	反演结果验证	71
第 4 章	云对气溶胶卫星遥感的影响及其消减方法	74
4.1	概述	74
4.2	AOD 随云参数变化的统计特征	75
4.2.1	MODIS AOD 反演值随云参数的变化特征	75
4.2.2	MODIS AOD 反演误差随云参数的变化特征	81
4.2.3	考虑云影响的 MODIS AOD 反演产品误差修正模型	84
4.3	消减云影响的波段比值法	85
4.3.1	云邻近效应影响的简化模型	85
4.3.2	基于模拟分析确定云影响消减因子	87
4.3.3	基于波段比值消减法的 AOD 反演与验证	98
4.4	消减云影响的程辐射法	114
4.4.1	程辐射值的确定方法	114
4.4.2	基于程辐射消减法的 AOD 反演模型	118
4.4.3	反演分析与验证	126

第 5 章 大气污染气溶胶颗粒物浓度估算	145
5.1 概述	145
5.2 利用地基激光雷达估算 $PM_{2.5}$	145
5.2.1 $PM_{2.5}$ 质量浓度相关因子分析	146
5.2.2 基于多元回归分析模型估算 $PM_{2.5}$	150
5.2.3 基于随机森林模型估算 $PM_{2.5}$	155
5.2.4 模型对比分析	156
5.3 利用 MODIS AOD 产品估算 PM_{10}	158
5.3.1 按季节建立 PM_{10} 估算模型	158
5.3.2 按聚类建立 PM_{10} 估算模型	160
5.4 利用霾优化变换估算 PM_{10}	164
5.4.1 霾优化变换原理	164
5.4.2 晴空线及 θ_c 的确定	165
5.4.3 AOD 及典型地表覆被对 H _{OT} 影响的模拟分析	166
5.4.4 H _{OT} 估算 PM_{10} 模型建立	168
5.5 利用归一化灰霾指数估算 PM_{10}	169
5.5.1 灰霾日与非灰霾日土地覆被光谱变化	169
5.5.2 NDHI 的构建	170
5.5.3 NDHI 估算 PM_{10} 模型建立	173
第 6 章 基于 MODIS 数据的霾及其等级检测	175
6.1 概述	175
6.2 霾检测指标与标准	175
6.3 霾检测指标的遥感估算	177
6.3.1 数据与处理	177
6.3.2 能见度遥感估算	178
6.3.3 相对湿度遥感估算	180
6.4 霾及其等级遥感检测分析	181
第 7 章 区域气溶胶污染变化监测及其影响分析	186
7.1 概述	186
7.2 气溶胶时空变化特征分析	187
7.2.1 AOD 的变化	187
7.2.2 气溶胶组分的变化	192
7.2.3 气溶胶的垂直变化	196
7.3 气溶胶变化的气象因子影响分析	209
7.3.1 数据与方法	210

7.3.2	气象数据分析	211
7.3.3	气溶胶与气象因子关系分析	216
7.3.4	气溶胶变化的气象因子综合影响分析	219
7.4	气溶胶域外输入影响的后向轨迹分析	221
7.4.1	数据与方法	222
7.4.2	气溶胶输入路径分析	224
7.4.3	气溶胶潜在输入区域分析	227
7.4.4	气溶胶域外输入相对贡献分析	229
参考文献		231

第1章 绪 论

1.1 气溶胶概念、来源及分类

大气气溶胶是指由固体和液体颗粒组成的悬浮在大气中的组合体系，具有一定的稳定性，沉降速度小，尺度在 $0.001\sim 100\mu\text{m}$ 。其来源较为复杂，主要有自然源和人工源两大类。人工源主要是由人类活动所产生，如煤和石油等化石燃料的燃烧、工业生产过程中的排放及汽车尾气排放到大气中的大量烟粒等；自然源为自然现象所产生，包括土壤和岩石的风化，森林火灾与火山爆发，海洋上的浪花碎沫等。虽然气溶胶在大气中的含量较少，但其分布范围很广且具有复杂的物理、化学变化，能对区域和全球气候、大气环境及公众健康产生重要的影响，是陆地-大气-海洋系统中的一个重要组成成分（周秀骥等，1991）。

气溶胶对气候产生的影响主要可分为直接辐射效应和间接辐射效应两方面。其中直接辐射效应通过散射、吸收短波及长波的辐射直接对地气系统产生辐射强迫；间接辐射效应则是云在形成的过程中，气溶胶影响云的生成、演化及消散过程，改变云滴大小、光学特性和微物理结构，进而影响云的生命周期及降水效率（Haywood and Boucher, 2000）。另外气溶胶还能改变大气化学过程进而影响温室气体分布及浓度变化。

此外，大气气溶胶也是空气中的主要污染物，能够引起诸多的空气质量问题，进而影响人们的生产、生活及健康。一方面气溶胶浓度的增加能降低近地表大气的能见度，影响人们出行及交通安全；另一方面气溶胶中的可吸入气溶胶颗粒能够携带大量有毒物质，进入人体后会对人类健康造成一定伤害，最为明显的是导致心肺疾病发病率的提高。因此，对气溶胶性质的研究显得尤为重要。

目前，气溶胶的分类方法尚不统一，但不同性质的气溶胶，其来源、尺度、成分及谱分布等都随时空变化有很大的差异。同时，不同性质、种类的气溶胶，其光学特性也有所不同。气溶胶按其来源可分为一次气溶胶（以微粒形式直接从发生源进入大气）和二次气溶胶（在大气中由一次污染物转化而生成）。按粒径大小和沉降能力，气溶胶又可分为总悬浮颗粒物（total suspended particulates, TSP）、飘尘、降尘、可吸入颗粒物和细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 。其中，总悬浮颗粒物是指能悬浮在空气中的，空气动力学当量直径小于 $100\mu\text{m}$ 的颗粒物，是分散在大气中的各种粒子的总称；飘尘是能在大气中长期漂浮的悬浮物质，可远距离输送，粒径一般小

于 $10\mu\text{m}$ ；降尘是直径大于 $30\mu\text{m}$ 的粒子，由于自身的重力沉降较快；可吸入颗粒物 (PM_{10}) 直径在 $10\mu\text{m}$ 以下，可进入人体呼吸系统的支气管区；细颗粒物可到达人体呼吸系统的肺泡区，其直径小于 $2.5\mu\text{m}$ (陈良富等, 2011)。

1983年，国际气象与大气物理协会 (International Association of Meteorology and Atmospheric Physics, IAMAP) 提出了大气气溶胶的标准辐射大气 (standard radiation atmosphere, SRA) 模型，按成分将气溶胶分为 6 种，即水溶性粒子、沙尘性粒子、海洋性粒子 (由海浪溅沫形成，可看做 30% 的海盐和 70% 的水)、煤烟、火山灰和 75% 硫酸液滴 (World Meteorological Organization, 1983)。前四种成分主要分布在对流层中，其按一定的体积分数可组成不同的气溶胶模型。

1.2 气溶胶物理性质和光学性质

1.2.1 气溶胶物理性质

1. 气溶胶粒径

大气气溶胶习惯上指在大气中悬浮着的各种固体和液体粒子，其形状多种多样，可以是近乎球形，如液态雾珠等，也可以是片状、针状及其他不规则形状。气溶胶粒子的尺度一般用粒径来表示。

当被测物体为球形时，所测粒径是它的实际直径。而对于非球形粒子，其粒径就是与之有相同物理性质的球形粒子的直径，即等效粒径。等效粒径一般有空气动力学当量直径、迁移率当量直径、质量当量直径、表面当量直径、扩散当量直径等。其中最常用的一种是空气动力学当量直径，表示与不规则粒子有着相同沉降速率的单位密度 ($1000\text{kg}/\text{m}^3$ 或 $1\text{g}/\text{cm}^3$) 的球形粒子的直径。根据粒径尺度的不同，气溶胶粒子可分为以下 3 种。

1) 爱根核

直径小于 $0.05\mu\text{m}$ 的粒子，数密度随高度增加而迅速减小，主要来源于地面，起凝结核的作用。其中具有吸湿性的尘粒只要过饱和度达 $0.5\% \sim 2.0\%$ ，就可使水汽凝为液水。

2) 大核

直径大于 $0.05\mu\text{m}$ ，小于 $2\mu\text{m}$ 的粒子，比爱根核稍大，一般只要过饱和度达到 0.5% ，就可使水汽凝结。

3) 巨核

直径大于 $2\mu\text{m}$ 的粒子，又称巨粒子或者粗粒子，主要来源于地面尘土、火山灰、燃烧及工业排放物、植物粒子等，有一定的沉降速度。广义的巨核包括云、雨滴等液态粒子，狭义的巨核是指云凝结核中尺度最大的那一部分。

2. 气溶胶粒子尺度谱分布

气溶胶粒子尺度谱分布有两种形式,即离散分布和连续分布。但实际测量数据总是离散的,为了方便处理和表述,常转化成连续的,即用一个连续的函数 $n(r)$ 来表示尺度分布,称为谱分布函数,用来描述气溶胶粒子数随半径 r 变化,且有

$$\int_0^{\infty} n(r) dr = N \quad (1-1)$$

谱分布函数 $n(r)$ 通常可以写作粒子数谱分布的形式 dN/dr , 表示每单位体积内每单位粒子半径间隔内的粒子个数,也可以写成体积分布的形式 $dV/d \ln r$, 表示每单位体积内每单位粒子半径间隔内的粒子体积。两者之间存在如下的转换关系 (Dubovik and King, 2000):

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{4}{3} \pi r^4 \frac{dN}{dr} \quad (1-2)$$

最常见的连续性粒子谱分布函数有荣格 (Junge) 谱、伽马 (Gamma) 谱、对数正态 (log-normal) 谱和双对数正态 (bimodal log-normal) 谱。

1) 荣格谱

20 世纪中期, Junge (1958)^{*} 在大量观测的基础上, 提出用负指数函数来描述气溶胶谱分布:

$$\frac{dN}{dr} = 0.4343 C r^{-v-1} \quad (1-3)$$

式中, C 为与气溶胶浓度有关的常数, 指数 v 一般在 2~4。荣格谱分布可以近似描述干净大气中半径在 0.1~2.0 μm 的气溶胶粒子的分布, 而对于其他类型的气溶胶误差较大。

2) 伽马谱

伽马谱的形式为

$$n(r) = \frac{1}{ab\Gamma\left(\frac{1-2b}{b}\right)} \left(\frac{r}{ab}\right)^{(1-3b)/b} \cdot \exp\left(-\frac{r}{ab}\right) \quad (1-4)$$

式中, a 、 b 为常数; Γ 为伽马函数。

1969 年, Deirmendjian (1969) 提出了修正的伽马分布函数, 主要用来表示环境气溶胶粒子的粒径分布, 表达式为

$$n(r) = ar^{\gamma} \exp(-br^{\beta}) \quad (1-5)$$

式中, 参数 a 、 b 、 γ 、 β 都为正实数 (γ 为整数)。

3) 对数正态谱

对数正态谱常用于描述气溶胶粒子的粒径分布, 表达式为

$$n(r) = \frac{C}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-6)$$

式中, C 为归一化粒子数常数; σ 为标准偏差; r_m 为平均半径。

4) 双对数正态谱

上述三种气溶胶谱分布函数均为单峰分布, 但实际上气溶胶粒径的分布往往存在两个或者更多比较密集的区域, 因此可以采用两个对数正态分布的叠加来描述气溶胶的“双峰”尺度分布特征, 形式如下:

$$n(r) = \sum_{i=1}^2 \frac{C_i}{r\sigma_i\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_{m,i})^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (1-7)$$

式中, $i=1, 2$ 分别为粗模态和细模态的气溶胶。

3. Angstrom 指数

在大气稳定的情况下, 气溶胶粒子谱遵循荣格谱分布, 具体关系如下:

$$\tau_a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (1-8)$$

式中, $\tau_a(\lambda)$ 为对应波长 λ 的气溶胶光学厚度; β 为大气浑浊度系数; α 为 Angstrom 波长指数, 用来描述气溶胶粒子的大小, 一般在 0~2。气溶胶粒子越大, α 的值就越小。

4. 复折射指数

复折射指数 m 是计算气溶胶光学特性的重要参数, 由构成粒子的化学组成决定, 不同化学组成的气溶胶的复折射指数差异较大。复折射指数主要由实部和虚部两部分组成, 可表示为

$$m = n_r - n_i i \quad (1-9)$$

式中, n_r 为实部, 是真空中电磁波波速与在此介质中的波速之比, 决定气溶胶粒子的散射能力; n_i 为虚部, 决定气溶胶粒子的吸收能力。一般来说, 除了吸收能力较强的煤烟性粒子外, 其他气溶胶粒子的虚部都很小。

1.2.2 气溶胶光学性质

1. 气溶胶光学厚度

气溶胶光学厚度 τ_a (aerosol optical depth, AOD) 一般指整层气溶胶消光系数在垂直方向上的积分, 用来描述气溶胶对光的衰减作用, 公式表示为

$$\tau_a = \int_0^z k(z) dz \quad (1-10)$$

式中, $k(z)$ 为消光系数。

2. 散射相函数

散射相函数 p (scattering phase function) 表示某入射方向 Ω' 的电磁波被散射到方向 Ω 的比例, 是一个量纲为一的参数, 且满足归一化条件:

$$\frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} p(\Omega, \Omega') d\Omega = 1 \quad (1-11)$$

3. 不对称因子

不对称因子 g 反映了粒子前向散射和后向散射的相对强度, 其值在 $-1 \sim 1$, 定义为散射相函数的一阶矩 [式 (1-12)]。瑞利散射具有前向和后向散射对称的特性, 因此 $g=0$, 而对 Mie 散射 (米散射) 来说, 粒子半径越大, 前向散射的衍射峰越尖锐, g 越大。

$$g = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 p(\cos\theta) \cos\theta d\cos\theta \quad (1-12)$$

4. 单次散射反照率

单次散射反照率 ω (single scattering albedo, SSA) 是散射系数 σ_s 与消光系数 σ_e 的比值 [式 (1-13)], 反映了粒子散射能力的强弱。当 $\omega=0$ 时, 表示粒子只吸收不散射; 当 $\omega=1$ 时, 表示粒子只散射不吸收。

$$\omega = \sigma_s / \sigma_e \quad (1-13)$$

1.3 大气辐射传输模型

大气辐射传输模型是基于大气辐射传输方程, 模拟太阳辐射在地气系统中一系列的传输过程并计算卫星传感器理论接收到的辐射亮度的模型。目前, 国内外学者已经对其进行了大量研究, 发展了一系列辐射传输模型和软件, 如 6S 辐射传输模型、LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE 等。

1.3.1 6S 辐射传输模型

6S (second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) 辐射传输模型

(以下简称 6S 模型)是由法国大气光学实验室和美国马里兰大学地理系开发的,目前被广泛应用于大气辐射传输模拟。6S 模型适用于可见光—短波红外(0.25~4.0 μm)范畴,光谱分辨率从 5nm 提高到了 2.5nm,它能够模拟机载观测、设置目标高程、解释二向性反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)作用和临近效应,增加了两种吸收气体(CO、N₂O)的计算并且采用连续阶算法计算散射作用以提高精度。此外,6S 模型还考虑了非朗伯地面情形的计算及星下点的观测计算等(Vermote et al, 1997)。6S 模型的输入参数主要由以下 8 个部分组成。

1) 几何路径参数

6S 模型既可以使用常用卫星类型的简化输入参数,也可以自定义几何路径参数。相对于地面点,该参数主要用来确定太阳、地物与卫星传感器的几何关系,一般使用太阳天顶角、卫星天顶角、相对方位角等来描述。

2) 大气模式

6S 模型定义了大气的基本成分及温湿廓线。6S 模型引用了 LOWTRAN 模式中的大气模式,包括:无气溶胶大气模式、热带大气模式、近极地冬季大气模式、近极地夏季大气模式、中纬度冬季大气模式、中纬度夏季大气模式及美国 62 标准大气模式 7 种大气模式。另外也可以使用自定义大气模式,输入实测探空资料,模拟更为实际和准确的大气模式。

3) 气溶胶模式

6S 模型中气溶胶模式由气溶胶模型和气溶胶浓度两部分组成。气溶胶模型包括 7 种标准模式类型,分别是无气溶胶类型、大陆型气溶胶类型、城市型气溶胶类型、海洋型气溶胶类型、沙漠气溶胶背景的 Shettle 模式气溶胶类型、生物燃烧型气溶胶类型及平流层气溶胶类型,另外还有 6 种由实测探空数据生成的自定义类型。

4) 地面高度

6S 模型中目标高度参数是观测目标的海拔,单位为 km。当输入的值大于或等于 0 时表示观测目标与海平面等高,输入的值小于 0 时其绝对值表示目标地物的实际高度。

5) 传感器高度

6S 模型中传感器高程有卫星观测、地面观测、飞机观测 3 种设置方式,其中输入值-1000 表示卫星测量,0 表示地面观测,-100~0 表示飞机观测,其绝对值代表飞机相对于目标的高度(km)。

6) 光谱条件

6S 模型提供了 MODIS、TM、POLDER、AVHRR(advanced very high resolution radiometer)等传感器的标准定义光谱响应函数。另外,用户也可以自定义光谱响应函数,输入以 2.5nm 为间隔的传感器的光谱范围和过滤函数,也可以自行输入

波段上下范围等。

7) 地面特性

6S 模型中将地表分为均一和非均一两种反射率类型。在均一地表情况下, 又分为无方向效应和有方向效应两种类别, 无方向效应表示地表为均一的朗伯地面反射体, 有方向性效应则考虑了地表与大气的双向反射特性。6S 模型提供了 9 种较成熟的 BRDF 模式, 用户也可以自定义 BRDF。

8) 表观反射率

6S 模型有正向和反向两种运算方式。正向运算是在地表反射率、大气模式、气溶胶类型和浓度等参数确定的情况下来计算传感器接收到的表观反射率或辐射能量, 而反向运算是假设地表为朗伯体, 在表观反射率、大气模式、气溶胶类型和浓度等参数已知的条件下, 计算得到地表反射率, 这个过程也是大气校正的过程。

1.3.2 LOWTRAN

LOWTRAN 是由美国空军地球物理实验室开发的低分辨率大气辐射传输模式, 原意为“低谱分辨率大气透过率计算程序”, 适用于从紫外线、可见光、红外线到微波乃至更宽的电磁波谱范围内, 包括云、雾、雨等多种大气状况的大气透过率及背景辐射。LOWTRAN7 版本增加了多次散射计算, 是目前普遍使用的版本(陈述彭等, 1998)。它以 20cm^{-1} 的光谱分辨率的单参数带模式计算 $0\sim 50000\text{cm}^{-1}$ 的大气透过率、大气背景辐射、单次散射的阳光和月光辐射亮度、太阳直射辐照度, 大致可分为以下 3 个部分。

(1) 大气模式输入。包括大气温度、气压、密度的垂直廓线、水汽、臭氧、甲烷、一氧化碳和一氧化二氮的混合比垂直廓线及其他 13 种微量气体的垂直廓线, 城乡大气气溶胶、雾、沙尘、火山灰、云、雨的廓线和辐射参量, 如消光系数、吸收系数、非对称因子的光谱分布及地外太阳光谱。

(2) 探测几何路径、大气折射及吸收气体含量。

(3) 光谱透过率计算及大气太阳背景辐射计算(包括或不包括多次散射)。

1.3.3 MODTRAN

MODTRAN 为中等光谱分辨率大气透过率及辐射传输算法和计算模型, 是 LOWTRAN 的改进模型, 适用于可见光—热红外 ($0.38\sim 1000\mu\text{m}$) 范畴, 考虑了几种典型地物的二向反射性, 采用正演方法, 即已知地面信息来获得遥感器所接收到的辐射信息(赵英时, 2013)。与 LOWTRAN 相比, MODTRAN 将分

子吸收计算改进为 2cm^{-1} 的光谱分辨率和在 1cm^{-1} 光谱间隔上进行计算。在计算分子透过率的方法上, MODTRAN 采用的带模式使用了 3 个与温度相关的参数, 即吸收系数、线密度参数和平均线宽, 使之更精确地服从分子跃迁的温度和压力关系 (能级粒子数和 Voigt 线型), 而且可以计算热红外的辐射亮度、辐照度等。

1.3.4 FASCODE

FASCODE 是一个以完全的逐线比尔-朗伯 (Beer-Lambert) 算法计算大气透过率和辐射的软件。通过对每一层分子吸收、散射效应及一些连续吸收的计算, FASCODE 提供了“精确”透过率计算的处理, 并且考虑了非局地热力平衡状态的处理, 原则上其应用高度不受限制。因此, FASCODE 通常用作评估遥感系统或参数化带模型的基准软件。

1.4 气溶胶遥感反演基本原理

卫星遥感反演气溶胶主要是利用卫星传感器探测的大气顶部的反射率, 即表观反射率, 可以表示为 (Kaufman et al., 1997a)。

$$\rho^* = \frac{\pi L^*}{\mu_0 F_0} \quad (1-14)$$

式中, ρ^* 为表观反射率; L^* 为卫星传感器获取的辐射亮度; μ_0 为太阳天顶角的余弦; F_0 为大气上界的太阳辐射通量密度。

假设下垫面为均匀的朗伯面, 大气在垂直方向上变化均匀, 则表观反射率 ρ^* 和地表反射率 ρ 之间的关系可以表示为

$$\rho^*(\theta, \vartheta, \phi) = \rho_a(\theta, \vartheta, \phi) + \frac{T(\theta)T(\vartheta)\rho(\theta, \vartheta, \phi)}{1 - \rho(\theta, \vartheta, \phi)S} \quad (1-15)$$

式 (1-15) 表示理想情况下的大气辐射传输方程, 其中 θ 、 ϑ 、 ϕ 分别为太阳天顶角、卫星天顶角及相对方位角 (太阳方位角与卫星方位角差的绝对值); $\rho_a(\theta, \vartheta, \phi)$ 为大气路径辐射等效反射率 (即路径辐射); $T(\theta)$ 和 $T(\vartheta)$ 分别为向下和向上的整层大气透过率; $\rho(\theta, \vartheta, \phi)$ 为朗伯面的地表反射率; S 为大气后向散射比, 也叫作大气下界的半球反射率; $1 - \rho(\theta, \vartheta, \phi)S$ 为地表与大气层的多次散射作用。由式 (1-15) 可知, 已知大气参数 ρ_a 、 $T(\theta)T(\vartheta)$ 、 S 的情况下, 可以由 ρ^* 计算得出 ρ , 这也就是大气校正的过程。

在单次散射近似中, ρ_a 与 τ_a 、气溶胶散射相函数 $P_a(\theta, \vartheta, \phi)$ 和单次散射反照率 ω_0 存在一定的比例关系, 它们之间的关系可以表示为