

光学遥感大气校正研究进展

亓雪勇¹, 田庆久^{1,2}

(1 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2 中国科学院中国遥感卫星地面站, 北京 100086)

摘要: 大气校正是光学遥感信息定量化研究中必不可少的一步, 将各种大气校正方法归纳为基于图像特征的相对校正法、基于地面线性回归模型法、基于大气辐射传输模型法和复合模型法4类, 详细分析了每一类方法的优缺点、适用范围或影响因素, 并对大气校正的未来发展做了几点思考。

关键词: 光学遥感; 大气校正; 影响因素

中图分类号: P 407.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-070X(2005)04-0001-06

0 引言

大气校正是遥感信息定量化过程中不可缺少的一个重要环节, 这是由于空中遥感器在获取信息过程中受到大气分子、气溶胶和云粒子等大气成份吸收与散射的影响, 使其获取的遥感信息中带有一定的非目标地物的成像信息, 数据预处理的精度达不到定量分析的高度。消除这些大气影响的处理, 称为大气校正。自从获得地球的第一景数字影像开始, 科学家就对影像的大气校正产生了浓厚的兴趣^[1]。遥感影像的大气校正始于20世纪70年代, 经过30多a的发展, 产生了许多的大气校正方法, 大致可以归纳为基于图像特征的相对校正法、基于地面线性回归模型法、基于大气辐射传输模型法和复合模型法4种。

1 基于图像特征的相对校正法

在没有条件进行地面同步测量的情况下, 借用统计方法进行图像相对反射率转换。从理论上讲, 基于图像特征的大气校正方法都不需要进行实际地面光谱及大气环境参数的测量, 而是直接从图像特征本身出发消除大气影响, 进行反射率反演, 基本属于数据归一化的范畴。大气校正是相当复杂的, 但在许多遥感应用中, 往往不一定需要绝对的辐射校正, 这种基于图像的相对校正就能满足其要求。

Kaufman 提出的暗目标法^[2]是假设整幅图像的大气散射影响均一, 把“清水”当作暗目标(dark object, 反射率为0), 直接把暗目标的像元值取代大气程辐射; Kruse 提出的内在平均相对反射率模型 IARR(Internal Average Relative Reflectance)^[3]则是计算整幅影像的光谱平均值作为参考光谱, 再计算每个像元的光谱曲线与平均光谱曲线的比值, 得到相对反射率影像, 以消除大气影响, 其不足之处在于当图像某些位置出现强吸收特征时, 参考光谱受其影响而偏低, 导致其它不具备上述吸收特征的地物光谱出现与该吸收特性相对应的假反射峰, 使计算结果出现误差, 因此, 在某些地区, 如植被覆盖较强的地区, 由于叶绿素吸收的影响, 不适合使用这种模型; 平面场模型 FF(Flat Field)已广泛应用于遥感数据处理中^[4,5], 它是在 IARR 模型基础上发展起来的, 该模型要求像幅内存在具有非吸收特征的一定面积的地理平台单元, 并求出该地理平台单元中像元的平均光谱, 然后对图像中每一像元的光谱都除以该地理平台单元平均光谱值, 从而进行光谱重建, 这种模型克服了 IARR 模型易受像幅内吸收特征影响而出现假反射峰的弱点, 而且计算量更小, 其不足之处在于选取光谱地理平台单元时, 会引入人为的误差, 而且需要对研究区内地物光谱有一定的先验了解, 当选取具有不同反射率等级的地理平台单元时, 会引出不同处理结果, 当研究区位于山区或其它地形起伏较大的复杂地区时, 选择地理平台单元较为困难; Green 与 Craig 提出的对数参差修正模型

LRC(Log Residual Correction)^[6]对太阳辐射衰减、大气影响及地形因子所带来的偏差都有所消除。此外,基于遥感影像波段间数学运算的植被指数如 *NDVI*(归一化植被指数)、*ARVI*(大气阻抗植被指数) 等,可部分校正大气程辐射和因大气路径长度不同而产生的变形差异^[7,8]。

2 基于地面线性回归经验模型法

该方法是一个比较简便的定标算法,国内外已多次成功地利用该模型进行遥感定标实验^[9,10]。它首先假设地面目标的反射率与传感器探测的信号之间具有线性关系,通过获取遥感影像上特定地物的灰度值及其成像时相应的地面目标反射光谱的测量值,建立两者之间的线性回归方程式,在此基础上对整幅遥感影像进行辐射校正。该方法数学和物理意义明确,计算简单,但必须以大量野外光谱测量为前提,因此成本较高,对野外工作依赖性强,且对地面定标点的要求比较严格。

3 基于大气辐射传输模型法

3.1 各种大气辐射传输模型

1972 年,Turner 与 Spencer 提出的通过模拟大气—地表系统来评估大气影响的方法^[11],可作为最早的大气辐射传输模型之一,当时研究的重点在于消除大气对影像对比度的影响。20 世纪 80 年代,许多学者对卫星影像的大气校正研究做了大量工作,在模拟地—气过程的能力上有了很大提高,发展了一系列辐射传输模型,包括 LOWTRAN 系列模型和 5S 模型。LOWTRAN 系列是计算大气透过率及辐射的软件包,由美国空军地球物理实验室用 Fortran 语言编写^[12]。目前流行的是 1989 年 2 月公布的 LOWTRAN 7 版本。它以 20 cm^{-1} 的光谱分辨率的单参数模式计算 $0 \text{ cm}^{-1} \sim 50\,000 \text{ cm}^{-1}$ ($0.02 \mu\text{m} \sim \infty$) 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、太阳直接辐照度。LOWTRAN 7 增加了多次散射的计算及新的带模式、臭氧和氧气在紫外波段的吸收参数。程序考虑了连续吸收、分子、气溶胶、云、雨的散射和吸收、地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响。Tanre 等^[13]提出的 5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型是在假设均一地表的前提下,描述了非朗伯反射地表情况下的大气影响理论。

自 1990 年以来,许多的辐射传输模型被用于大气校正算法中,涌现出一大批新的大气校正模型,其中一些算法使用了近似方法^[14~16],有的方法使用一些先进的数学算法提高计算速度^[17],试图寻找精度与速度的最佳平衡点。其中最著名的辐射传输模型是 MODTRAN 和 6S。MODTRAN^[18]是 LOWTRAN 的改进模型,它将光谱分辨率从 LOWTRAN 的 20 cm^{-1} 提高到 2 cm^{-1} ,主要改进包括发展了一种 2 cm^{-1} 的光谱分辨率的分子吸收的算法并更新了对分子吸收的气压温度关系的处理,同时维持 LOWTRAN 7 的基本程序和使用结构。

许多大气校正模型就是在 MODTRAN 的基础上发展起来的,如 ACORN(Atmospheric CORrection Now)和 FLAASH(Fast Line - of - Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)模型。ACORN^[19]是由 ImSpec LLC 公司开发的用于大气校正的商业化软件包,可以对 $350 \text{ nm} \sim 2\,500 \text{ nm}$ 之间的高光谱与多光谱数据进行大气校正,它利用 MODTRAN 4 模拟大气吸收以及分子和气溶胶的散射效应,并形成一系列查找表(look - up - tables),利用查找表逐像元估算水汽含量。ACORN 的一个主要特点在于它利用全光谱拟合解决了水汽与植被表面液态水重叠吸收的问题^[20]。FLAASH^[21]模型是由光谱科技公司(Spectral Science Inc.)、美国空气动力研究实验室(AFRL)与波谱信息技术应用中心(SITAC)联合开发的大气校正软件包,它工作的波段范围在 $400 \text{ nm} \sim 2\,500 \text{ nm}$ 之间。FLAASH 同样利用 MODTRAN 4 生成一系列的大气参数查找表,其最大特点在于考虑了邻边效应^[20]。

6S 是在 5S 的基础上发展而来的,该模型采用了最新近似(state of the art)和逐次散射 SOS(successive orders of scattering)算法来计算散射和吸收,考虑了地表的非朗伯特性,在计算透过率时加入了 3 种新气体(CH_4 , N_2O , CO),提高了瑞利散射与气溶胶散射的计算精度^[22]。另一个优秀的大气校正模型是 ATREM(Atmospheric REMoval)^[23],它是科罗拉多大学开发的大气校正软件包。ATREM 利用 Malkmus 窄波段模型^[24]计算 7 种大气气体(H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 N_2O 、 CO 、 CH_4 、 O_2)的透过率,利用 3 波段比值技术计算每个像元的水汽含量,利用 6S 辐射传输模型模拟大气的散射过程,产生的最终结果包括一幅水汽含量图像和大气校正过后的反射率影像。

高光谱遥感将影像的光谱分辨率提高到纳米级,多种气体重叠吸收及一些稀有气体会对最终反

演的反射率产生较大影响,因此高光谱影像的大气校正应考虑这些影响。HITRAN(High Resolution Transmission)分子吸收库^[25]也是美国空军地球物理实验室组织编辑的高分辨率大气吸收参数数据库,最初于1973年推出,并经多次补充,现已发展到HITRAN 2004版本,它包括了大气光谱传输中最重要的39种气体分子及其同位素从 $10^{-6} \sim 22\ 656\ \text{cm}^{-1}$ 波数(波长 $0.44 \sim 10^{10}\ \mu\text{m}$)范围共999 363根谱线的线参数,根据这些线参数就可以计算合成大气分子的透过、吸收光谱,可以满足高光谱遥感影像大气校正的需要。Zheng Qu等人的HATCH(The High Accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral Data Model)模型^[26]就是专门针对高光谱数据开发的,它基于HITRAN 2000利用关联k方法^[27]精确计算了大气强吸收带的透过率,很好地解决了水汽与 CO_2 和 CH_4 吸收带重叠的问题,提高了大气校正的精度。

3.2 影响大气辐射传输模型结果的主要因素

大气辐射传输模型的校正结果主要取决于大气参数获取、地表特性假设和大气辐射传输理论的选择及精度^[27]。大气参数的随机性和非均匀分布,加大了对大气参数的精确测定与计算的难度或产生较大误差。尤其是对那些在大气散射中起决定作用的气溶胶含量,以及那些在大气吸收中起决定作用的水汽和气体成分含量的精确探测和估算相当困难,因而进行实时实地的遥感大气校正是非常困难的。基于这方面考虑,许多用于大气模拟和大气校正的软件系统中提供了一系列大气模式供用户选择、修改和参考,如6S中提供了6种大气模式和6种气溶胶模式以及一些用户自定义模式。对地表特性进行假设是求解大气—地表这一耦合系统中辐射传输问题的关键,模拟的真实性与否直接决定了大气校正最终结果的精度。一般而言,地表模拟越真实,问题求解难度越大。大气传输理论的选择是决定遥感大气校正结果的又一个关键因素,简化的理论将带来较差的精度,而复杂的理论则将消耗大量机时,因此在结果精度和处理时间上需作出较好的权衡,这也是研究者一直致力解决的问题。

3.2.1 大气参数的影响

大气辐射传输模型中用到的大气参数包括气温、气压、水汽含量、臭氧含量、能见度、水平气象视距、灰尘颗粒度等,这些参数用于计算辐射传输方程中大气的吸收透过率与散射透过率,以及气溶胶光学厚度,因此输入大气参数的精度直接影响大气校正的最终结果。同步实地观测可以为大气校正提供

所需的大气参数,如笔者曾利用地物光谱仪测算气溶胶光学厚度^[28],但同步实地观测需耗费大量人力物力,且对历史数据无能为力。为此,6S和MODTRAN中提供了一系列既定参数供用户选择,这些参数是对大量观测数据统计分析得到的,旨在模拟遥感器过境时的大气状况,必然与实际的大气状况存在差距,这是影响大气辐射传输模型校正精度的重要原因,因此基于图像自身反演大气参数必将成为研究重点之一。

3.2.2 地表特性假设

太阳辐射在到达传感器之前,曾经过大气和地表的多次散射和衰减,因此对遥感影像中的大气影响进行校正必须考虑地表的反射特性。对地表特性的假设可以分为零反射地表假设和非零反射地表假设,其中非零反射地表假设又分为朗伯体假设和非朗伯体假设。

零反射地表是对地表—大气耦合系统辐射传输问题的简化,它假设地表反射率为零,传感器接收到的辐射全部来自大气。通过零反射地表假设,可以求解大气程辐射,从而将遥感图像中来自地表的辐射和来自大气的辐射分离,使遥感大气校正模型得以大大简化。

在早期的研究中通常假设地表为朗伯体,并将其作为大气下垫面的边界条件代入大气辐射传输方程,求解遥感影像中存在的大气影响,并进行校正。这一假设从一定程度上简化了大气辐射传输求解的难度,对一些二向反射特性不明显的地表状况,如海面,该假设得到较好的满足,所进行的大气校正也能得到令人满意的结果。但是朗伯体反射地表仅仅是一个理想化的假设,而非朗伯体反射才是地表的真实状况。如果考虑地表二向反射分布函数(BRDF)和大气BRDF之间的耦合,则朗伯体假设条件下的大气校正精度是有局限的,最早研究这一效应的是Tanre等人^[29],目前在6S模型中已较好地考虑了BRDF的耦合效应。实际上,非朗伯体大气校正是一个十分复杂的问题,要进行大气校正必须知道地表的BRDF,而通常在大气校正前地表的二向反射率是未知的,这就形成大气校正环的问题,目前的主要思路是通过迭代的方法来解决^[30]。

3.2.3 大气辐射传输理论的选择

大气辐射传输模型必然考虑辐射在地表—大气系统中的传输过程,辐射传输理论是对这个过程的模拟,模拟得越准确,大气校正的精度就越高,但传输理论就越复杂,辐射方程的求解就越困难。目前

大部分辐射传输模型假定大气在水平方向是均一的,大大简化了辐射方程的求解难度,而实际对流层的大气受地表影响很大,大片海洋陆地的存在,地理纬度的不同,直接影响着大气温度和水汽含量,造成水平方向气象要素分布不均一。也有部分学者致力于三维辐射传输理论的研究,如 Warren Wiscombe^[31]在研究云中的辐射传输时,指出了一维辐射传输模型存在的问题,提出利用三维辐射传输模型进行模拟,取得了较好结果。Yuri Knyazikhin^[32]指出植被冠层与云中的辐射传输存在共性,二者在水平与垂直方向都不是均一的,因此它们的三维特征(雨滴与叶片的分布函数、云和冠层的结构)对光子的传输有重要影响。辐射传输方程的求解方法是影响大气辐射传输理论发展的一个重要因素,其精度直接影响大气校正的最终结果。目前常用的算法有离散纵标方法(Discrete Ordinates Methods)^[33]、蒙特卡罗方法(Monte Carlo Method)^[34]、有限误差技术(Finite-difference Techniques)^[35]、加倍法(Doubling and Adding)^[36]等。

离散纵标方法将辐射传输方程中的散射相函数用勒让德多项式展开,即用求和式代替方程中的积分式,进而将原有的积分微分方程转化为微分方程组,最终通过边界条件的代入,求解辐射在几个特定方向(由高斯点决定)上的解析解。

蒙特卡罗方法是一种概率统计方法,它不涉及辐射传输方程,而直接模拟辐射传输实际过程,较之离散纵标法精确,但运算复杂,需耗费大量机时,因此常常用它作为验证其它方法所得结果的手段。

还有其它一些方法并不是直接求解辐射传输方程,而是从物理角度寻求反射场和透射场及相函数的关系,并在这些关系中引入传输方程,同样可以解决辐射传输问题。这些方法都基于不变原理,即在半无限大气层上加上一层相同性质的薄大气层将不会引起整个大气层的反射率变化。加倍法与有限误差方法就属于这种方法。

加倍法的实质是,如果有两气层的反射率和透射率已知的話,则由该两气层叠合的气层反射率和透射率可以通过计算两气层之间的来回反射而得到。如果两气层完全相同则称为加倍法,否则称为累加法。

有限误差方法利用离散角度产生两个一次微分方程,对离散光学厚度进行积分,产生辐射场对称与反对称角的递归关系,这种方法比加倍法速度更快,而且在大气光学厚度较大时能保持较高精度^[35]。

4 大气校正的复合模型法

近年来还出现了一些复合模型方法,如 Clark 等^[37]将 ATREM 与经验线性方法相结合,通过计算每个像元的归一化因子并应用到 ATREM 校正后的影像,以此校正 ATREM 的模型误差;Goetz 等^[38]将地面实测光谱与 MODTRAN 相结合提出了与经验线性法类似的模型;闵祥军等^[39]利用地面实测得到的大气参数并结合 6S 辐射传输模型对 MAIS 影像进行大气校正;田庆久等^[40]在 DOS(Dark Object Subtraction)方法的基础上,合理分析假设暗体反射率值,并结合 LOWTRAN-7、6S 和 MODTRAN-3 大气辐射传输模型对 SPOT 影像进行大气校正。这些方法对地面目标的要求没有经验线性法那么高,而且弥补了利用单一方法进行校正的不足。

5 光学遥感大气校正未来发展的思考

(1)基于影像自身的大气参数反演。由于实时的大气参数获取有许多不确定因素,而且成本很高,因此从影像本身反演大气参数将成为一个研究重点。如 Gao B. C. 利用大气水汽吸收波段与大气窗口波段的比值与大气水汽含量的关系来求解水汽含量^[23],Kaufman 利用 MODIS 2.1 μm 通道通过探测地表暗目标反演气溶胶光学厚度^[41]。

(2)复杂地表条件下的大气校正。在复杂地表条件下,地形对大气校正有着重要影响,但是由于进行地形校正会改变太阳—地面—传感器的几何关系,从而改变像元接收的太阳辐射,因此,一些学者建议在地形校正前进行大气校正^[42],也有学者提出将大气校正与地形校正同时进行^[43],实现大气校正与地形校正的耦合。Richter 提出的 ATCOR(Atmospheric and Topographic Correction for Airborne Scanner Data)模型^[44]就代表了未来的一个发展方向。

(3)交叉辐射影响的考虑。遥感影像中大气散射和吸收影响的研究大都基于地表均一的假设进行的,由于地表反射存在事实上的不均一性,非观测点上反射辐射经过大气散射而被传感器接收,即遥感影像上每个像元亮度都包含来自背景像元反射辐射的贡献。由地表非均一性对遥感影像造成的影响称为交叉辐射影响。Kaufman 的研究结果表明交叉辐射的影响依赖于传感器的空间分辨率^[42];牛铮指

出,大气交叉辐射影响不仅与大气光学厚度、遥感影像分辨率等因子有关,而且与遥感器观测角度有关^[45]。

(4)随着电子技术的发展,计算机的运算速度有了很大提高,因此,在辐射传输的模拟精度与运算时间的权衡上,越来越多的模型与方法将更倾向于提高模拟的精度而较少考虑运算耗时问题。

(5)随着高光谱遥感的发展,海量数据的获取与处理对大气校正提出了新的挑战,促使大气校正向着工程化的方向发展,以满足快速批量对遥感数据进行大气校正的要求。

尽管光学遥感大气校正方面的成果很多,各种模型层出不穷,但没有一个是可普遍应用的。因此,在对遥感影像进行大气校正时,要根据研究目的、要求以及研究区的特点,选择适当的大气校正方法。对于热红外遥感,由于热红外辐射与大气的相互作用与可见光、近红外不一样,因而其大气校正方法也不相同。大气校正方法正向自动化、模块化、实用化及工程化的方向发展,相信随着对大气校正方法的不断探索和改进,必将会加快遥感信息量化的发展步伐。

参考文献

- [1] Brian Cairns , Barbara E Carlson , Ruoxian Ying , et al. Atmospheric Correction and Its Application to an Analysis of Hyperion Data [J]. IEEE Trans. Geo. Remote Sens. , 2003 , 41 : 1232 - 1245.
- [2] Kaufman Y M , Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Correction to Visible and Near - Infrared Satellite Imagery [J]. Int. J. Remote Sens. , 1988 , 30 : 231 - 248.
- [3] Kruse F A. Use of Airborne Imaging Spectrometer Data to Map Minerals Associated with Hydrothermally Altered Rocks in the Northern Grapevine Mountains , Nevada and California [J]. Remote Sens. Environ. , 1988 , 24 : 31 - 51.
- [4] Rast M S , Hook J , Elvidge C D. An Evaluation of Techniques for the Extraction of Mineral Absorption Features from High Spectral Resolution Remote Sensing Data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , 1991 , 57 (10) : 1303 - 1309.
- [5] Crowley J K Rowan. Evaluation of Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Data [A]. Proceedings of the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop [C]. JPL Publication , 1988.
- [6] Green A A , Craig M D. Analysis of Aircraft Spectrometer Data with Logarithmic Residuals [A]. Proceedings of the Airborne Imaging Spectrometer Workshop [C]. JPL Publication , 1985.
- [7] 田庆久 , 闵祥军. 植被指数研究进展 [J]. 地球科学进展 , 1998 , 13 (4) : 327 - 333.
- [8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京 : 科学出版社 , 2003. 万方数据
- [9] Roberts D A , Amaguchi Y Y. Calibration of Airborne Imaging Spectrometer Data to Percent Reflectance Using Field Spectral Measurements [A]. Proceedings of the Nineteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment [C]. Ann ARBOR , MICHIGAN , 1985.
- [10] Conel J E. Calibration of Data Using Ground - based Spectral Reflectance Measurements [A]. Proceedings of Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop [C]. JPL Publication , 1988.
- [11] Turner R E , Spencer M M. Atmospheric model for correction of spacecraft data [A]. In Proc. 8th Int. Symp. Remote Sensing of the Environment [C]. Ann Arbor , MI , 1972 : 895 - 934.
- [12] 吴北婴. 大气辐射传输实用算法 [M]. 北京 : 气象出版社 , 1998.
- [13] Tanre D , Deroo C , Dahaut P , et al. Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum : The 5S code [J]. Int. J. Remote Sens. , 1990 , 11 : 659 - 668.
- [14] Gao B - C , Heidebrecht K B , Goetz A F H. Derivation of Scaled Surface Reflectances from AVIRIS Data [J]. Remote Sens. Environ. , 1993 , 44 : 145 - 163.
- [15] Haan J F de , Hovenier J W , Kokke J M M , et al. Removal of atmospheric influences on Satellite Borne imagery : A radiative transfer approach [J]. Remote Sens. Environ. , 1991 , 37 : 1 - 21.
- [16] Richter R. A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm [J]. Int. J. Remote Sens. , 1996 , 17 : 1201 - 1214.
- [17] Qu Z , Goetz A F H , Heidebrecht K B. High Accuracy Atmosphere Correction for Hyperspectral data (HATCH) [A]. In Summaries of the 9th Annu. JPL Earth Science Workshop [C]. 2000 , 1.
- [18] Berk A , Bernstein L S , Anderson G P , et al. MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS [J]. Remote Sens. Environ. , 1998 , 65 : 367 - 375.
- [19] <http://www.imspec.com/page4.html>
- [20] Kruse F A. Comparison of ATREM , ACORN , and FLAASH Atmospheric Corrections Using Low - altitude AVIRIS Data of Boulder , CO [A]. In proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop [C]. Jet Propulsion Laboratory , Pasadena , CA , 2004.
- [21] Adler - Golden S M , Matthew M W , Bernstein , et al. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN 4 [A]. SPIE Proc. Imaging Spectrometry [C]. 1999 , 3753 : 61 - 69.
- [22] Vermote E , et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S) 6S User Guide Version 2 [Z]. 1997 : 5.
- [23] Gao B , Goetz A F H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data [J]. Journal of Geophysical Research , 1990 , 95 (4) : 3549 - 3564.
- [24] Malkmus W. Random Lorentz band model with exponential - tailed S line intensity distribution function [J]. J. Opt. Soc. Am. , 1967 , 57 : 323 - 329.
- [25] Rothman L S , Jacquemart D , Barbe A , et al. The HITRAN 2004 Molecular Spectroscopic Database [EB/OL]. <http://cfa-www.harvard.edu/hitran/> , 2005 - 02 - 04.
- [26] Zheng Qu , Bruce C Kindel , Alexander F H Goetz. The High Accuracy Atmospheric Correction for Hyperspectral Data (HATCH) Mode [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,

- 2003 , 41 (6) :1223 - 1231.
- [27] 牛 铮. 光学遥感大气订正总体思路与最新进展[J]. 遥感技术与应用 , 1998 , 13 (1) :50 - 55.
- [28] 亓雪勇, 田庆久. 利用地物光谱仪测算大气气溶胶光学厚度[J]. 遥感信息 , 2004 , (4) :16 - 18.
- [29] Tanre D , Herman M , Deschamps P Y. Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties[J]. Appl. Opt. , 1983 , 21 :733 - 741.
- [30] 胡宝新, 李小文, 朱重光. 一种大气订正的方法 BRDF——大气订正环[J]. 环境遥感 , 1996 , 11 (2) :151 - 160.
- [31] Warren Wiscombe. Three - Dimensional Radiative Transfer in Clouds[EB/OL]. http://www.ipam.ucla.edu/publications/tr2004/tr2004_4921.ppt.
- [32] Yuri Knyazikhin , Alexander Marshak , Ranga B Myneni. Three - Dimensional Radiative Transfer in Vegetation Canopies[EB/OL]. <http://nature.berkeley.edu/biometlab/espm129/pdf/Lecture%2010%20espm%20129.pdf>.
- [33] Barichello L B , Garcia R D M , Siewert C E. Particular solutions for the discrete - ordinates method[J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer , 2000 , 64 :219 - 226.
- [34] Oikarinen L , Sivhola E , Kyrola E. Multiple scattering radiance in limb viewing geometry[J]. J. Geophys. Res. , 1999 , 104 :31261 - 31275.
- [35] Barkstrom B R. A finite difference method of solving anisotropic scattering problems[J]. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer , 1976 , 16 :725 - 739.
- [36] Haan J F de , Bosma P B , Hovenier J W. The adding method for multiple scattering of polarized light[J]. Astron. Astrophys. , 1987 , 183 :371 - 391.
- [37] Clark R N , Swayze G A. Mapping minerals , amorphous materials , environmental materials , vegetation , water , ice , and snow , and other materials : The USGS Tricorder Algorithm[A]. Summaries of the 5th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop[C]. JPL Publication , 1995.
- [38] Goetz A F H , Heidebreth K B , Kindell B , et al. Using Ground Spectral Irradiance for Model Correction of AVIRIS Data[A]. AVIRIS 1998 Proceedings[C]. JPL , California , 1998.
- [39] 闵祥军, 朱永豪, 朱振海, 等. MAIS 图像大气订正及其在岩矿制图中的应用[J]. 遥感技术与应用 , 1996 , 14(2) :1 - 9.
- [40] 田庆久, 郑兰芬, 童庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法[J]. 应用气象学报 , 1998 , 9 (4) :456 - 461.
- [41] Yoram J Kaufman , Andrew E Wald , Lorraine A Remer , et al. The MODIS 2.1 μm channel - correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosols[J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing , 1997 , 35(5) :1286 - 1298.
- [42] Kaufman Y J. Atmospheric Effect on Spatial Resolution of Surface Imagery[J]. Appl. Opt. , 1984 , 23 :3400 - 3408.
- [43] Meyer P , Itten K I , Kellenbenberger T , et al. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment[J]. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. , 1993 , 48 :17 - 28.
- [44] Richter R. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery[J]. Int. J. Remote Sens. , 1997 , 18 :1099 - 1111.
- [45] 牛 铮. 斜视角度下大气交叉辐射影响分析[J]. 遥感学报 , 1997 , 1 (2) :88 - 93.

THE ADVANCES IN THE STUDY OF ATMOSPHERIC CORRECTION FOR OPTICAL REMOTE SENSING

QI Xue - yong¹ , TIAN Qing - jiu^{1 2}

(1. International Institute for Earth System Science , Nanjing University , Nanjing 210093 , China ; 2. The Remote Sensing Satellite Ground Station , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100086 , China)

Abstract : It is indicated that atmospheric correction for optical remote sensing is absolutely necessary for quantitative remote sensing. The atmospheric correction methods can be grouped into four types , namely , relative correction based on image information , linear regression based on ground spectra , radiative transfer models and composite models. Their advantages and disadvantages as well as their adaptability or effective factors are analyzed in this paper. Some thoughts on the future development of atmospheric correction for optical remote sensing are also put forward in the end of this paper.

Key words : Optical remote sensing ; Atmospheric correction ; Effective factors

第一作者简介: 亓雪勇(1982 -) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学遥感大气校正与地表参数反演。

(责任编辑: 肖继春)