

doi: 10.6046/zrzyyg.2021371

引用格式: 孔卓,杨海涛,郑逢杰,等. 高光谱遥感图像大气校正研究进展[J]. 自然资源遥感,2022,34(4):1-10. (Kong Z, Yang H T, Zheng F J, et al. Research advances in atmospheric correction of hyperspectral remote sensing images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 1-10.)

高光谱遥感图像大气校正研究进展

孔 卓, 杨海涛, 郑逢杰, 李 扬, 齐 济, 朱沁雨, 杨忠霖

(航天工程大学航天信息学院, 北京 101416)

摘要: 大气校正 是高光谱遥感图像预处理的重要步骤之一, 大气校正的精度在一定程度上决定了高光谱遥感应用的程度。首先, 分析了大气对辐射传输的影响, 并对大气中气溶胶光学厚度和水汽的反演方法作了总结, 说明了影响高光谱遥感图像质量的主要大气因素; 其次, 通过阐明辐射传输方程的推导过程及相关参数的作用机理, 从理论上对大气的影响进行了论证, 说明了高光谱大气校正的主要内容; 然后, 总结了近年来形成的高光谱大气校正方法, 包括基于经验统计的方法和基于辐射传输的方法, 并对高光谱大气校正的研究进展与发展趋势进行分析; 最后, 对高光谱遥感图像大气校正的未来发展进行了展望, 为高光谱遥感的工程应用与研究提供参考。

关键词: 高光谱遥感; 大气校正; 辐射传输方程; 辐射传输模型; 人工神经网络

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)04-0001-10

0 引言

20 世纪 80 年代以来, 随着成像光谱技术的出现与发展, 高光谱成像成为了继全色、彩色摄影及多光谱成像后的一项新的遥感技术^[1]。高光谱遥感将地物目标的图像特征与光谱特征有机地结合了起来, 为地物的精确定量分析与特征提取提供了可能^[2]。遥感采集的信息主要为目标反射或发射的电磁波辐射, 然而, 由于受到大气的影响, 辐射在由地物回传到遥感传感器的过程中发生变化, 导致高光谱图像记录的地物光谱信息与真实信息不一致^[3], 严重阻碍了高光谱遥感的应用。所以, 为了恢复和获取地物真实的光谱特性, 必须消除电磁辐射传输过程中大气对遥感图像的影响^[4], 这个过程便是大气校正。不同于全色和多光谱图像的一个或几个光谱通道, 高光谱图像光谱分辨率可以达到纳米级, 每个像元的光谱通道数可以达到数百甚至上千个^[5], 这导致了高光谱遥感受到大气的影响更加严重, 大气校正难度也更大。因此, 为了使高光谱遥感图像记录的光谱信息更好地反映地物光谱特征, 促进高光谱遥感的工程应用与研究, 有必要对高光谱遥感图像的

大气校正过程进行总结。

本文讨论了高光谱遥感图像成像过程中大气的影响, 并用辐射传输方程加以论证, 系统梳理了高光谱遥感图像大气校正方法, 并重点介绍了高光谱遥感图像大气校正的研究进展与发展趋势, 最后对高光谱遥感图像的未来发展进行了展望, 为高光谱遥感图像大气校正的研究及工程应用提供参考。

1 大气对辐射传输的影响

作为一种非直接接触对目标特性进行探测的技术, 高光谱遥感主要使用光谱成像仪从高空或外层空间实现目标信息的获取。经过几十年的发展, 航空高光谱遥感已成业务化^[6], 随着太空技术的进步, 航天遥感技术也取得了重大进展, 并逐渐成为了高光谱遥感的主要观测手段。近年来, 国内外发射了多颗高光谱遥感卫星(如表 1 所示), 为地面应用提供了大量观测数据。但无论哪种平台, 在电磁波到达探测仪器的过程中, 总会受到大气的影响, 如图 1 所示, 图中 a 为目标直接反射的太阳辐射; b 为程辐射散射分量; c 为程辐射直射分量; d 为目标自发射辐射; e 为大气自发射辐射; f 为地面反射的大气自发射辐射。

收稿日期: 2021-11-05; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 基础加强计划重点基础研究项目(编号: 2020-JCJQ-ZD-152-12-04)资助。

第一作者: 孔 卓(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事高光谱遥感方面的研究。Email: kz951525758@163.com。

通信作者: 杨海涛(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事航天遥感等方面的研究。Email: yanghtt@126.com。

表 1 国内外部分星载高光谱成像仪技术指标

Tab.1 Technical indicators of some spaceborne hyperspectral imagers at home and abroad

时间	卫星	光谱成像仪	国家	轨道高度/km	光谱范围/ μm	谱段数	光谱分辨率/nm	空间分辨率/m	幅宽/km
2000 年	EO-1	Hyperion	美国	705	0.40~2.50	242	10	30	7.7
2001 年	PROBA-1	CHRIS	ESA	615	0.40~1.05	62	11	17/34	13
2008 年	HJ-1A	HSI	中国	649	0.45~1.05	115	5	100	50
2008 年	IMS-1	HYSI	印度	—	0.40~0.95	64	10	506	129.5
2016 年	Resurs-P3	GSA	俄罗斯	477	0.40~1.10	216	5~10	25~30	30
2018 年	GF-5	AHSI	中国	705	0.45~2.50	330	5/10	30	60
2018 年	ISS	DESI	德国	397	0.40~1.00	235	2.5	30	—
2019 年	ZY-1-02D	HSI	中国	778	0.40~2.50	166	10/20	30	60
2019 年	HysIS	HysIS	印度	636	0.40~2.50	326	10	30	30
2021 年	GF-5-02	AHSI	中国	705	0.45~2.50	330	5/10	30	60

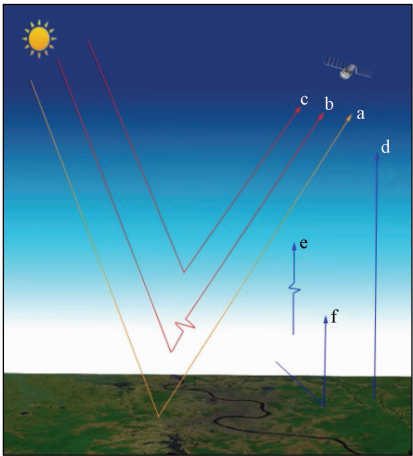


图 1 辐射传输过程示意图

Fig.1 Radiative transfer process

太阳辐射的传输经过了太阳-大气-目标-大气-传感器的过程,太阳辐射在传输过程中 2 次经过大气^[7],大气对太阳辐射主要有 2 方面的影响:一是大气的吸收及散射作用削减了到达地面及从地面反射与发射的传回传感器的辐射能量;二是大气直接反射并传回传感器的太阳辐射增加了无关辐射能量^[3]。大气的吸收、散射和反射作用对生成的高光谱图像造成了 2 个方面的影响:一是导致了图像亮度和对比度的下降,影响遥感图像的判读;二是导致传入传感器入瞳处的光谱曲线发生畸变,严重阻碍了地物的定量分析与识别。图像亮度和对比度的下降可以通过为像元值添加增益、调整图像直方图等方法进行改善,而光谱信息却不能随意更改,只能通过大气校正方法进行改善,使所获得的光谱曲线最大程度上接近真实光谱曲线。

此外,大气的不同成分也会对辐射产生不同的影响,如图 2 所示。大气中的主要成分包括大气分子(氮、氧、氮、甲烷、水汽和二氧化碳等)和气溶胶(尘埃和烟雾等)^[8],因此大气校正主要是进行大气分子散射(也称瑞利散射)和气溶胶散射(也称米氏散射)校正。

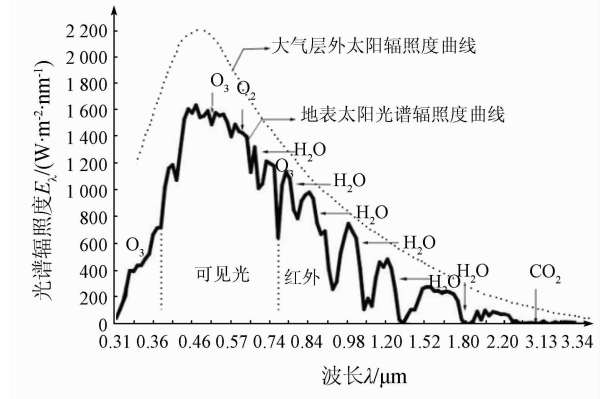


图 2 不同大气分子成分对辐射传输的影响

Fig.2 Effects of different atmospheric molecular components on radiative transfer

除水蒸气等少数成分外,大气中的分子成分非常稳定,可以根据辐射传输理论,使用各种纬度和区域模型相对容易地解释瑞利散射,精确推导出瑞利散射反射率^[9]。与大气分子不同,气溶胶存在不稳定的时空变化。因此,要消除大气的畸变效应,最重要的是要知道气溶胶和水汽分布,这主要通过气溶胶光学厚度(aerosol optical thickness, AOD)和水汽含量进行表示。

1.1 AOD

AOD 是评价气溶胶性质的重要指标,它是气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分^[10]。气溶胶具有较高的时空异变性,航天遥感是目前大范围获取和分析气溶胶变化的唯一手段^[11],针对不同卫星传感器,研究人员开发了多种 AOD 反演算法,常见的有偏振反演^[11]、暗目标法^[12]、结构函数法^[13]和深蓝算法^[14]等。

在这些 AOD 反演算法的基础上,目前形成了多种 AOD 产品,如 MODIS AOD 产品、Himawari-8 AOD 产品和风云卫星 AOD 产品等,并已建立起了全球气溶胶监测网络 AERONET,可通过这些方式获取研究区域对应时刻的 AOD 大小。使用最广泛的是 MODIS AOD 产品,可提供 470 nm 和 550 nm 的

AOD 反演结果。其中 MOD 04 产品采用暗目标法和深蓝算法实现 AOD 反演,提供分辨率 3 km 和 10 km 的 2 种产品,最新发布的多角度大气校正气溶胶产品 (multi-angle implementation of atmospheric correction, MAIAC),空间分辨率为 1 km,反演精度更高,MODIS 气溶胶产品均可通过 NCCS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) 获取。

1.2 水汽含量

水蒸气是大气中最重要的成分之一,但其会严重影响卫星传感器记录的信号。与大多数大气气体的含量不同,大气中的水蒸气含量 (water vapor content, WV) 在时间和空间上变化很大。确定 WV 最常用的方法是波段比值法^[15],即假设吸收带内外大气和表面除水蒸气外的其余参数相同,将吸收带内和吸收带外较小距离的信号进行比较,从而确定 WV。吸收带一般使用 820 nm, 940 nm 或 1 130 nm

处的水吸收区域。与 AOD 类似,目前也形成了多种水汽含量产品,比较典型的是 MODIS 05 产品。

2 辐射传输方程

遥感获取的地面目标电磁波特性主要指地表反射率,为了保证对遥感图像进行正确地分析和解释,图像像元的反射率值必须准确地反映地表反射率值^[16]。若无大气的影 响,遥感传感器处的表观反射率应等于地表反射率,但在实际过程中,如上所述,电磁波在到达传感器之前经历了太阳-大气-目标-大气-传感器的过程,最终到达传感器入瞳处的电磁辐射可由辐射传输方程表示。辐射传输方程有多种表示方法,为充分反映高光谱遥感的特点,本文使用 Schott^[17] 的表示方法为:

$$L_{\lambda} = \frac{\cos\sigma}{\pi} E_{s\lambda} r(\lambda) \tau_1(\lambda) \tau_2(\lambda) + L_{T\lambda} \varepsilon(\lambda) \tau_2(\lambda) + L_{us\lambda} + L_{ua\lambda} + [F(L_{ds\lambda} + L_{da\lambda}) + (1 - F)(L_{bs\lambda} + L_{ba\lambda})] r(\lambda) \tau_2(\lambda) \tag{1}$$

式中: L_{λ} 为 λ 波长下传感器入瞳处的辐射总量; $\cos\sigma$ 为太阳入射角的余弦; $E_{s\lambda}$ 为 λ 波长下地外太阳辐照度; $r(\lambda)$ 为目标光谱反射率; $\tau_1(\lambda)$ 为太阳-目标过程中的大气传输影响; $\tau_2(\lambda)$ 为目标-传感器过程中的大气传输影响; $L_{T\lambda}$ 为黑体在温度为 T (单位开尔文, K) 时的光谱辐射; $\varepsilon(\lambda)$ 为目标光谱发射率; $L_{us\lambda} + L_{ua\lambda}$ 为太阳和大气的上行辐射之和; $L_{ds\lambda} + L_{da\lambda}$ 为太阳和大气的下行辐射之和; $L_{bs\lambda} + L_{ba\lambda}$ 为背景反射和自发射的辐射之和; F 为形状因子。

对于开放区域的不透明物体, $F = 1$, $\varepsilon(\lambda) = 1 - r(\lambda)$ 。令

$$L_{DS\lambda} = \frac{\cos\sigma}{\pi} E_{s\lambda} \tau_1(\lambda) + L_{ds\lambda} \tag{2}$$

式中 $L_{DS\lambda}$ 为太阳到达地面的总辐射。

于是式(1)可变为:

$$L_{\lambda} = \{ (L_{DS\lambda} + L_{da\lambda}) r(\lambda) + L_{T\lambda} [1 - r(\lambda)] \} \tau_2(\lambda) + L_{us\lambda} + L_{ua\lambda} \tag{3}$$

由式(3)可知,入瞳处的辐射总量来源主要包括: ①太阳到达地面并回传到传感器的辐射 $L_{DS\lambda}$ (图 1 中 a); ②未到达地面,被大气散射后进入传感器的太阳辐射 $L_{us\lambda}$ (图 1 中 b 和 c); ③目标自发射辐射 $L_{T\lambda}$ (图 1 中 d); ④大气自发射和散射的大气自发射的辐射 $L_{ua\lambda}$ (图 1 中 e); ⑤大气下行自发射辐射 $L_{da\lambda}$ (图 1 中 f)。

若将等式左边用反射率表示,则式(3)为:

式中 $\tilde{r}(\lambda)$ 为遥感传感器入瞳处的表观反射率。

若无大气影响,则 $\tilde{r}(\lambda)$ 变为:

$$\tilde{r}(\lambda) = \frac{L_{\lambda} - L_{T\lambda}}{\cos\sigma E_{s\lambda} / \pi - L_{T\lambda}} \tag{5}$$

式中 $\tilde{r}(\lambda)$ 为真实地表反射率。

观察式(4)——(5)可知,为获取真实地表反射率,必须采取一定方法获取大气参数信息,消除大气的影 响。

由辐射传输方程可知,大气校正主要针对 2 个不同波段范围进行的,一类是以太阳辐射为主的短波可见光波段,此时传感器入瞳处的辐射主要以①和②为主,大气散射以瑞利散射为主,米氏散射也会产生一定的影响;另一类是以地面热辐射为主的长波热红外波段,此时传感器入瞳处的辐射主要以③——⑤为主,大气散射以米氏散射为主; 2 个波段的分界部分,2 类辐射都要考虑^[18]。此外,当图像空间分辨率小于 1 km 时,还应考虑邻近效应的影响。

3 高光谱大气校正方法

随着高光谱遥感技术的发展,研究人员又陆续

提出了多种不同的大气校正方法,根据计算过程是否需要考虑大气传输的物理机制可分为 2 类:基于经验统计的方法以及基于辐射传输的方法。近年来也出现了一些将经验统计与辐射传输模型相结合的方法,这种方法往往是对计算效率和准确率的折中,可以做到比经验统计的方法更准确,比基于辐射传输的方法更有效率,在特定场合下能够发挥出更好的效果^[19]。

正确选择和应用大气校正方法,可以提高光谱反射率和参数反演的精度,国内外学者针对不同高光谱传感器进行了大量研究^[20-23],为在进行大气校正时选择更为合适的方法提供了参考。如何设计出一种快速、精确、自动化的大气校正方法,仍值得深入研究。

3.1 基于经验统计的方法

基于经验统计的大气校正方法一般借助先验知识或实测数据,直接从图像本身进行分析和校正,如内部平均法(internal average reflectance, IAR)^[24]、平场域法(flat field correction, FFC)^[25]、暗目标法(dark object subtraction, DOS)^[26]、伪不变目标法(pseudo invariant feature, PIF)^[27]、经验线性法(empirical line method, ELM)^[28]、快速大气校正(quick atmospheric correction, QUAC)^[29]等。由于计算过程不需考虑大气参数的影响和辐射传输的作用,这种方法计算效率高,并且能够从现场测量中获得足够的信息,因此能够精确地进行计算。

3.1.1 IAR 和 FFC

IAR 和 FFC 是发展较早的高光谱大气校正方法,这 2 种方法均采用了比辐射率的方法来计算地表反射率^[30],因此是一种相对大气校正方法。主要原理为假设图像上存在某区域,该区域的平均辐射可以代表太阳光谱辐射,将图像逐像元与该平均值进行比值计算,得到的数值即可作为该图像辐射校正的相对估计。IAR 选取整幅图像作为求取平均光谱的区域,FFC 则是选择图像上一块明亮、光谱变化平缓的区域。当所选区域能够较好地表示太阳光谱辐射时,如缺少植被的干旱地区,这种方法精度较高。此外,由于不需获取实测数据,这种方法效率较高。然而,求得的反射率是一种相对反射率,因此总体而言精度较低。当对图像的大气校正精度要求不高时,可使用这种方法进行地表反射率的简单估计。

3.1.2 DOS

DOS 发展于 20 世纪 80 年代,最早用于多光谱图像的大气校正中,至今仍是一种比较流行的大气校正方法。这种方法假设图像上存在一些反射率为 0 的暗目标,由于大气反射作用产生的程辐射导致

了图像上记录的这些暗目标辐射值的增加,由此可通过这些暗目标得到程辐射,并计算得到其他大气校正参数完成校正。所以,暗目标的选择对校正结果有较大影响,研究表明,可选取浓密植被、清洁水体或阴影区域作为暗目标,DOS 已广泛应用于水色遥感的大气校正中。但由于没有计算下行辐射,对于一些低发射率材料的校正会产生较大问题^[31]。

近年来,DOS 得到不断改进,以更好地适用于高光谱图像的大气校正中。赵祥等^[32]充分利用高光谱图像波段数量多的特性,使用多波段线性回归与插值的方法对常规 DOS 进行了改正,有效实现了高光谱图像的大气校正;郑求根等^[33]采用 DOS 对水体 Hyperion 高光谱图像进行了大气校正,基本恢复了水体原有光谱曲线,表明在缺失同步大气参数的前提下,DOS 是一种有效的大气校正方法。

3.1.3 PIF, ELM 和 QUAC

PIF, ELM 和 QUAC 都是通过构建参考数据间的线性回归关系实现大气校正。PIF 通过发掘多幅不同时相的遥感图像上特征点与参考影像特征点反射率的关系建立线性方程,由此求解校正系数。ELM 则是通过现场测量地物反射率,构建实测数据与图像数据光谱反射率间的线性回归关系实现大气校正。QUAC 是 ENVI 软件自带的一种快速大气校正模块,能够根据图像中不同地物的光谱信息构建线性回归方程,完成图像的快速大气校正。3 种方法对特征点的选择也有一定的区别,PIF 一般选择反射率稳定、地理意义明确的地物点作为特征点,ELM 是选择多个反射差异大的地物作为特征点,QUAC 需要多种地物进行回归分析。因此地物种类越多,QUAC 校正效果越好。

这 3 种方法能够充分发掘图像数据间的关系,因此校正精度较高。但这类方法也有一定的不足,如特征点的选择主观性较大,这可能会导致校正后的反射光谱中出现不真实的吸收特征。此外,通过选取特征点构建的线性回归方程一般只能对该幅图像所在区域有效,同一线性回归方程用于其他地区的校正效果可能并不好,因此这类方法也被称为基于场景的大气校正方法。

近年来,这类方法也取得了一些进展,伊丕源等^[34]分析了航空高光谱影像中时间因子对 ELM 和大气辐射传输法反演结果的影响,并在 PIF 的基础上加入时间因子,提出了顾及时间因子的航空高光谱影像相对辐射归一化校正方法,有效地消除时间因子变化对反射率反演带来的影响;Wang 等^[35]使用 9 种不同灰度等级的参考面板构建了与小型无人机高光谱图像间的经验线性方程,不需经过辐射定

标,直接将图像的 DN 值转换为反射率,并与实测数据进行了比对,发现两者差异较小。

3.1.4 其他经验统计方法

除以上常见的经验统计方法外,也有学者发展了一些其他的大气校正方法,如对数残差法^[36]、直方图匹配法^[37]、大气阻抗植被指数法^[38]和全景回归法^[39]等,这些方法也都有各自的优缺点,在特定场合下大气校正效果较好,同样能够满足高光谱大气校正的一般需要。

表 2 常见辐射传输模型
Tab.2 Common adiative transfer models

模型	介绍
6S	6S 是 5S 的改进版本,它将大气 - 地表系统耦合在大范围的大气、光谱和几何条件下,有效模拟了太阳辐射。采用连续散射阶算法,改善了散射效应的计算。并将大气进行分层,每层通过迭代辐射传输方程进行计算,可计算 0.24 ~ 4.0 μm 的地表反射率
MODTRAN	MODTRAN 是对 LOWTRAN 的改进模型,它几乎考虑了大气中所有大气分子、气溶胶及云的吸收和散射效应,并对分子吸收算法进行了改进,将光谱分辨率提高到了 1 nm,可以计算波数为 0.2 μm 至无穷大的大气透射率和辐射。6S 与 MODTRAN 是构成其他大部分辐射传输模型的基本模型,这 2 种模型模拟了辐射传输的物理机制,精度较高,但模拟不可能完全准确,且不能实现对光谱的打磨等后处理
ATREM	ATREM 是开发最早的高光谱大气辐射传输模型之一,它在 Malkmus 窄带模型推导大气透射光谱的基础上创建水汽查找表,并结合三波段比值法得到每个像元的水汽含量。采用 6S 代码模拟大气散射作用,最终结果是逐像元估计的水汽含量图及辐射校正图。目前已停止支持使用。ATREM 由于没有考虑邻近效应的影响,因此在雾霾和高对比度杂波环境中不太准确
HATCH	HATCH 是在 ATREM 基础上的一种改进模型,主要改进包括采用 k - 相关方法从高分辨率透射分子吸收数据库 (HITRAN) 推导大气透射,使用了一个快速辐射传输方程求解器,并改进了水汽反演的三波段比值法,同时,它采用了光谱重校准方法,使得计算精度得到了提高。但与 ATREM 一样,HATCH 同样没有考虑邻近效应的影响
ACORN	ACORN 移植了 MODTRAN 的代码,使用 MODTRAN 生成水汽查找表,然后根据高光谱数据进行最小二乘拟合。ACORN 的一个关键改进是进行了全光谱拟合,以解决地表植被中水蒸气和液态水吸收重叠的问题。但 ACORN 在计算过程中同样没有考虑邻近效应
FLAASH	FLAASH 也是在 MODTRAN 基础上开发的辐射传输模型,它利用图像数据与大气特性,以物理方法精确推算地表反射率,并在计算过程中考虑了邻近效应的影响,同时能够校正倾斜观测导致的误差,计算精度得到了很大提升,目前已集成于 ENVI 软件中,已在高光谱遥感中得到了广泛的应用。但 FLAASH 计算结果中可能会出现负反射率,且不能进行有效改善
ATCOR	ATCOR 使用了 MODTRAN 的辐射传输代码和 HITRAN 数据库,能够很好地处理邻近效应,ATCOR3 及之后版本可支持高光谱图像运算,在机载高光谱的大气校正中应用较为广泛,而在卫星遥感中适用于处理中小视场卫星图像

基于辐射传输的方法最关键的步骤是为辐射传输模型设置合适的大气参数,合适的大气参数能够较为合理地反映辐射在传输过程中的吸收和散射过程,从而使求得的反射率更加接近真实地表反射率。这种方法计算量较大,计算更为复杂,因此精确度较高。然而,基于辐射传输的方法也有一定的局限性。辐射传输模型一般使用内置参数库,模拟得到的成像时刻大气与地表参数与真实状况是有一定区别的,因此难以描述动态变化的大气参数、邻近效应和非均匀的陆地表面效应,有时大气校正效果并不是很好^[48]。若要更加合理地模拟辐射传输过程,需同步进行观测与反演相关参数,再输入辐射传输模型,这大大增加了工作量。不过随着传感器性能的提升,基于辐射传输的方法近年来得到了快速发展。

辐射传输模型能够满足高光谱大气校正的一般需求,得到一张高光谱图像大气校正时所需的参数,但若要对其他图像进行校正,往往需要重新计算大

3.2 基于辐射传输的方法

基于辐射传输的方法充分考虑了大气及其他因素(如邻近效应、云雨等)在辐射传输中的影响,是一种利用电磁波在大气中的辐射传输原理建立起来的模型对遥感图像进行大气校正的方法^[40]。目前常用的辐射传输模型包括 6S^[41], MODTRAN^[42], ATREM^[43], HATCH^[44], ACORN^[45], FLAASH^[46] 和 ATCOR^[47] 等以及在这些辐射模型基础上开发的各种卫星专用的大气辐射校正模型(表 2)。

气参数,效率较低。此外,部分辐射传输模型在对整幅图像进行校正时往往采用同一套参数,而同一图像的不同像元间参数可能有变化,对于大面积图像更是如此,因此往往也不能实现逐像元的高精度校正。为提高大气校正的效率与精度,常用做法是采用查找表法,即通过设置多个不同条件和数值的输入参数,多次调用辐射传输模型,形成一个包含各种输入情况的大气参数查找表,从而在大气校正时直接从所建立的查找表中搜索需要的参数即可。郭飞^[49]采用大气预处理微分吸收法和 DOS,通过并行调用 MODTRAN 先后建立水汽、能见度以及反射率,完成了高光谱图像的逐像元校正;佘袁勇等^[50]基于 6S 模型构建查找表,使用 MODIS 星上反射率数据反演气溶胶模式,采用循环迭代方式实现 AOD 与 WV 的协同反演,并对 Hyperion 高光谱图像进行大气校正,结果表明该方法切实有效。

查找表法节省了运行辐射传输模型的时间,却

增加了存储空间,并且针对不同传感器建立的查找表相互的适用性也较差。在此基础上,一些学者就如何设计低存储和高通用的查找表进行了研究。胡顺石等^[51]多次调用 MODTRAN4.0 模型,建立了一个 6 维通用大气查找表,查找表光谱分辨率为 1 nm,采用二进制文件方式存储查找表,使用多维反距离加权插值方法对输入参数进行插值,最大化地减少磁盘存储空间,实现查找表数据快速随机读取,与 MODTRAN4.0 模型计算结果(真值)相比,误差仅为 $\pm 1.0\%$ 左右。

4 研究进展与发展趋势

4.1 构建大气校正统计模型

随着高光谱传感器运行时间的积累,传回地面的高光谱图像也不断增多,并且覆盖了各个地区与各个时间段,如果能够对已积累且经大气校正后的图像数据进行分析,建立统计模型,或形成相关数据参考库,则可得到大气效应及大气成分随时空的变化规律,总结出表观辐射随大气变化而产生的改变,从而有效完成图像的大气校正,提高校正的效率。

一些研究人员目前开发了相关算法,如用于 MODIS 数据处理的深蓝算法^[52]和贝叶斯气溶胶反演算法^[53]。Kuter 等^[54]将数据挖掘中的多元自适应回归样条(multivariate adaptive regression splines, MARS)和凸多元自适应回归样条(conic multivariate adaptive regression splines, CMARS)方法首次应用到了大气校正,使用 MODIS 数据完成模型训练,发现其可以作为一种很好的大气校正替代方法;Thompson 等^[55]使用最优估计理论构造不确定性概率模型实现了 VSWIR 成像光谱仪数据的大气校正,不确定模型将辐射测量中的噪声和检索过程中的未知因素结合起来,一定程度上平衡了测量数据和先验知识的作用,大气校正反射率误差仅为 1%。

通过构建统计模型,先前已积累的数据得到了充分运用,并能从这些数据中归纳出与大气参数的关系,从而可以运用统计模型实现自动大气校正,与此同时,随着传回地面的高光谱图像不断增多,图像所覆盖的区域、时间及大气状况也越来越多,由此所形成的统计模型也将随之不断完善,从而也将使得大气校正的精度不断提高,因此是一种有效的大气校正方法。

4.2 基于图像自身信息实现大气校正

由于先期积累的大量数据会占用较多的存储空间,并且需要定时进行更新,如果不借助,或最小程度借助其他信息,而只依靠图像自身信息,则能够实

现高效率、自动化且较高精度的大气校正。此外,有时地表参数的反演只需要图像中几个波段的辐射信息,若能借助其他波段完成所需波段的校正,则也能充分发挥高光谱图像的作用。

近年来针对这方面的研究,一些学者也取得了一定成果。Katse 等^[9]利用光谱曲线不同波段反射率间的关系,开发了一种鲁棒大气校正增强算法(robust atmospheric correction enhancement, RACE),该算法的关键是提出了一种估算 400 nm 表观反射率的单波长方法,借助图像自身信息完成其他谱段的校正,无需预先积累大量的数据库,即可自动反演各种下垫面的反射率;Wei 等^[56]则考虑了光谱曲线形状对反射率的影响,提出了一种基于光谱曲线形状估算近岸海域和内陆水体蓝光波段反射率的算法,该算法采用 480 nm、550 nm 和 670 nm 3 个波段反射率确定光谱形状,进而估算得到 440 nm 波段反射率,结果表明在适用条件下,反射率精度得到了提高;Gossn 等^[57]针对短波红外波段进行主成分分析,利用实测数据与 MODIS 和 VIIRS 图像进行匹配训练,将短波红外波段中的大气信号与近红外和可见光波段的信号联系起来,获得了更高质量的反射率。

这种方法几乎不需依靠除图像自身信息外的其他参数,能够充分发掘图像已有信息间的关系,利用不同波段受大气影响不同的特点,反演出大气参数,归纳出各个波段数值间的关系,消除大气的影响,自动高效地完成高光谱图像或高光谱图像某些波段的大气校正,因此这种方法工程应用性更强,这也是大气校正方法的一个发展趋势。

4.3 基于神经网络的大气校正

大气校正可以看作对辐射的非线性逼近,查找表本质上属于穷举法,但由于预设的参数个数有限,实际运用过程中需通过插值得到相应的所需值,仍比较麻烦。如果能够通过某些方法输入参数直接得到结果,则可大大提高大气校正的效率和自动化,神经网络为解决这类问题提供了思路。神经网络,尤其是深度学习的发展极大促进了图像和数据处理的精度与效率。已有学者将神经网络运用到大气校正中。Schroeder 等^[58]构造了一个 3 层神经网络用于 MREIS 图像的反射率反演;刘安伟^[59]应用 6S 大气辐射传输模型获取模拟数据,之后构建 BP 神经网络完成训练得到反演模型,逐波段实现了高光谱图像的大气辐射校正。

与经典机器学习方法相比,深度神经网络由于层数更深,能够提取到数据间更多的特征,更好地表述数据的非线性关系,近几年,随着深度学习的发展,也已有学者开始将深度学习方法运用于高光谱

图像的大气校正中。比较典型的有 Xu 等^[60] 使用 MODTRAN 模型进行了数十万次高光谱模拟,用于训练深度学习大气校正网络,并在长波红外波段进行了模拟,结果表明,与原始 MODTRAN 模拟相比,该方法计算效率高,且误差较低;Sun 等^[31] 基于 MODTRAN,提出了一种时序深度神经网络,用于在不同仰角下的多扫描高光谱数据进行自动大气校正,所构造的网络具有实时提供精确大气校正和目标检测的能力;Pyo 等^[61] 构造了一个自编码器深度神经网络,采用自编码器网络对高光谱图像进行了特征提取与降维,然后采用神经网络完成大气校正,并与支持向量机进行了对比,发现神经网络性能明显优于支持向量机。

将神经网络运用于高光谱大气校正,促进了物理模型与智能模型相融合,利用神经网络尤其是深度学习,能够充分、深入地发掘物理模型不同参数间隐藏的关系,更好地总结出所需参数与物理模型各参数间的非线性关系,从而运用这种关系表征出大气效应的影响,实现大气校正,现有研究已表明,神经网络在高光谱定量遥感的应用上具有巨大潜力。

从本质上看,这3种发展趋势都是对高光谱相关数据进行深入挖掘,进而总结规律,帮助实现高光谱图像的大气校正,但偏重点有所不同。基于统计模型的大气校正着重于对历史数据的统计分析,基于自身数据的大气校正则更关注高光谱图像本身的信息,而基于神经网络的大气校正主要是挖掘出大气模型或实测数据与校正图像间的非线性关系。3种发展趋势也都各有优缺点,基于统计模型的大气校正由于历史数据不断在增加,需要对模型进行定期更新才能保证精度的不断提升,另外2种则相对固定,同时,大量的历史数据也将占用较多存储空间,但随着模型的不断完善,校正效果也将越来越好;基于自身数据的大气校正由于其他参考数据更少,因此校正更加自动高效,同时能够完成特定波段的大气校正,无需对整个光谱曲线进行校正,但校正精度还需继续提高;基于神经网络的大气校正模型精度主要依赖于所构建的神经网络的好坏,相比于其他2种发展趋势,这种方法更为复杂,找到一个普适性较强的神经网络更为费时费力,但由于其能得到数据间更深层的关系,一个成功构建的神经网络将能实现更为快速高效、高精度的大气校正。

5 结论与展望

作为高光谱遥感图像预处理的重要环节之一,大气校正充分消除了大气对辐射传输的影响,将高

光谱图像记录的辐射信息恢复为地物辐射信息,为促进生态保护、精准农业、矿产探测、环境监测、海洋开发和军事行动等方面的发展发挥了重要作用。随着高光谱遥感的发展,高光谱大气校正也亟需新的突破。

1)高精度、高效率、自动化大气校正方法。随着图像光谱段数量越来越多,空间分辨率越来越高,对高光谱图像的需求也越来越多,传统的大气校正方法已无法满足相关需求,发展高精度、高效率、自动化的大气校正方法是必然趋势。目前研究人员针对不同的影响因素,如时间、海拔、邻近效应、观测角度和辐射定标等进行了相应的研究,并将这些影响因素充分考虑到高光谱图像的大气校正中,大幅提高了大气校正的精度,但考虑参数的增加导致了算法复杂性的增加,效率也因此有所降低。并行运算可以提高运行速度,但针对高光谱的数百条通道进行逐像元校正效果有待进一步观察。基于图像自身信息的大气校正和融合经验统计与辐射传输模型法构建神经网络的大气校正方法能够实现高效率、自动化的大气校正,但目前的研究较少。因此,如何设计出一种高精度、高效率、自动化的大气校正方法还需进一步努力。

2)大气校正方法通用化发展。现有研究表明,针对不同时刻不同地区的高光谱图像,同一大气校正方法效果会有所差异,即使针对同一图像,在对不同地物进行大气校正时,校正效果也会有所不同^[62],面向大范围观测的高光谱遥感图像,由于覆盖地物种类繁多,为实现地物的精确定量反演与识别,需提高大气校正方法的通用化。通用化大气校正方法的实现,能够充分发挥卫星遥感大范围观测的特点,对推动高光谱遥感的应用具有重大意义。

3)图像采集同步获取大气参数。目前的 AOD 和 WV 反演方法可以有效获得相关参数,但在计算过程中需与待校正图像进行空间匹配,或需要额外参数代入辐射传输方程进行求解,如能在卫星平台搭载相关仪器,在获取图像的同时同步获取大气参数,则可更为准确地实现大气校正。大气同步校正仪的出现解决了这个难题。目前已有的大气同步校正仪,如 EO-1 卫星搭载的 LEISA Atmospheric Corrector (LAC), WorldView-3 搭载的 CAVIS (clouds, aerosols, water vapor, ice and snow), 以及我国高分辨率多模综合成像卫星,简称“高分多模卫星”(GFDM)搭载的偏振大气同步校正仪 (synchronization monitoring atmospheric corrector, SMAC) 主要用于校正多光谱和高空间分辨率卫星,应用于高光谱卫星的相对较少,大气同步校正仪已显示出其良好

的性能,也为应用于高光谱图像奠定了基础。

4)大气校正与参数反演协同推进。高光谱大气校正的根本任务是为高光谱遥感的应用服务,大气校正归根到底是为地表参量反演、识别、分类等应用做准备的。若能同步开展大气校正与参数反演,则可大幅提升应用效率。目前有 2 种解决方案:一是将大气校正与参数反演相融合,直接从高光谱原始图像反演地表参量^[63],这种方法效率更高,但精度有待进一步提高;二是构造大气校正-参量反演一体化网络^[61],这种方法可用于某类参数的反演,但若要进行其他参数的反演,则需对网络重新调整和训练,通用性较差。如何将大气校正融入参数反演的过程中,值得进一步思考。

参考文献 (References):

- [1] 陶伟. 基于 Hyperion 高光谱数据的城市地物识别与分类研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
Tao W. Urban feature identification and classification based on Hyperion hyperspectral remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [2] Sedaghat A, Mokhtarzade M, Ebadi H. Uniform robust scale-invariant feature matching for optical remote sensing images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4516-4527.
- [3] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004: 8-9, 161-162.
Zhao Y S. The principle and method of analysis of remote sensing application[M]. Beijing: Science Press, 2004: 8-9, 161-162.
- [4] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感——原理、技术与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 67-69.
Tong Q X, Zhang B, Zheng L F. Hyperspectral remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 67-69.
- [5] Schaepman M E, Ustin S L, Plaza A J, et al. Earth system science related imaging spectroscopy: An assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(s1): 123-137.
- [6] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2001: 8-9.
Mei A X, Peng W L, Qin Q M, et al. Introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 8-9.
- [7] 周婷婷. 遥感影像辐射校正研究与应用[D]. 福州:福建师范大学, 2010.
Zhou T T. Research and applications of remote sensing radiometric correction[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010.
- [8] Goetz A, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. Science, 1985, 228(4704): 1147-1153.
- [9] Katse V I L, Prikhach A S, Zege E P, et al. A robust atmospheric correction procedure for determination of spectral reflectance of terrestrial surfaces from satellite spectral measurements[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1831.
- [10] 王浩天, 汪源, 袁强强. 2008—2016 年 MODIS 多角度大气校正气溶胶产品在中国的时空分布及变化趋势[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 1-12.
Wang H T, Wang Y, Yuan Q Q. Validation and spatiotemporal analysis of MODIS multi-angle atmospheric calibration aerosol products in China from 2008 to 2016[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 1-12.
- [11] 黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 等. 高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(4): 454-461.
Huang H L, Ti R F, Zhang D Y, et al. Inversion of aerosol optical depth over land from directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(4): 454-461.
- [12] Levy R C, Remer L A, Mattoo S, et al. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112: D13211.
- [13] Diner D J, Martonchik J V, Kahn R A, et al. Using angular and spectral shape similarity constraints to improve MISR aerosol and surface retrievals over land[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(2): 155-171.
- [14] 王中挺, 厉青, 王桥, 等. 利用深蓝算法从 HJ-1 数据反演陆地气溶胶[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 596-610.
Wang Z T, Li Q, Wang Q, et al. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 596-610.
- [15] Schlaepfer D, Borel C C, Keller J, et al. Atmospheric precorrected differential absorption technique to retrieve columnar water vapor[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 353-366.
- [16] Suomalainen J, Oliveira R A, Hakala T, et al. Direct reflectance transformation methodology for drone-based hyperspectral imaging[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 266: 112691.
- [17] Schott J R. Remote sensing: The image chain approach[M]. Oxford University Press on Demand, 2007: 42-56.
- [18] 毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中透过率计算[J]. 测绘与空间地理信息, 2004(4): 1-3.
Mao K B, Qin Z H. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2004(4): 1-3.
- [19] Ran W A, Jagab C, Rm A, et al. Errors associated with atmospheric correction methods for airborne imaging spectroscopy: Implications for vegetation indices and plant traits[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 265: 112663.
- [20] Kruse F A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO[C]//Proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop. Pasadena: JPL Publication, 2004.
- [21] Pathak V N, Pandya M R, Shah D B, et al. Inter comparison of atmospheric correction models - SACRS2, FLAASH and 6SV using resourcesat-2 AWiFS data[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014: 881-884.
- [22] 吴晓明. 地基 Headwall 高谱影像大气校正方法[J]. 空间科学学报, 2019, 39(4): 537-543.
Wu X M. Atmospheric correction method for ground-based Headwall hyperspectral imagery[J]. Chinese Journal of Space Science,

- 2019,39(4):537–543.
- [23] 刘梓钦,赵世湖,裴亮,等. GF-5 卫星高光谱数据大气校正反射率精度评价[J]. 遥感信息,2021,36(3):93–98.
Liu Z Q,Zhao S H,Pei L,et al. Precision evaluation on atmospheric correction reflectance of GF-5 satellite hyperspectral data[J]. Remote Sensing Information,2021,36(3):93–98.
- [24] 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 Sensing of Environment,1988,24(1):31–51.
- [25] Roberts D A,Yamaguchi Y,Lyon R. Comparison of various techniques for calibration of AIS data[C]//Proceedings of 2nd AIS workshop,Pasadena;JPL Publication 86–35,1986:21–30.
- [26] Teillet P M,Fedosejevs G. On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,1995,21(4):374–387.
- [27] Hall F G,Strebel D E,Nickeson J E,et al. Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multirate, multisensor images[J]. Remote Sensing of Environment,1991,35(1):11–27.
- [28] Conel J E,Green R O,Vane G,et al. AIS-2 radiometry and a comparison of methods for the recovery of ground reflectance[C]//Proceedings of the 3rd, Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop. Pasadena,CA;JPL Publication 87–30,1987:18–47.
- [29] Bernstein L S,Ratkowski A J. Validation of the quick atmospheric correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2005,5806:668–678.
- [30] Ientilucci E J,Adler-Golden S. Atmospheric compensation of hyperspectral data: An overview and review of in-scene and physics-based approaches[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine,2019,7(2):31–50.
- [31] Sun J,Xu F,Cervone G,et al. Automatic atmospheric correction for shortwave hyperspectral remote sensing data using a time-dependent deep neural network[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2021,174:117–131.
- [32] 赵祥,梁顺林,刘素红,等. 高光谱遥感数据的改正暗目标大气校正方法研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2007(12):1653–1659.
Zhao X,Liang S L,Liu S H,et al. Correction of hyperspectral remote sensing data atmospheric correction method for dark targets[J]. Science in China(Series D),2007(12):1653–1659.
- [33] 郑求根,权文婷. 基于暗像元的 Hyperion 高光谱影像大气校正[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(10):2710–2713.
Zheng Q G,Quan W T. Application of dark pixels atmospheric correction algorithm to Hyperion images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(10):2710–2713.
- [34] 伊丕源,刘原麟,武鼎,等. 顾及时间因子的航空高光谱影像辐射归一化校正[J]. 科学技术与工程,2021,21(20):8342–8349.
Yi P Y,Liu Y L,Wu D,et al. Impact analysis of time variation in atmospheric correction of airborne hyperspectral imagery[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(20):8342–8349.
- [35] Wang C,Myint S W. A simplified empirical line method of radiometric calibration for small unmanned aircraft systems-based remote sensing[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2015,8(5):1876–1885.
- [36] 董连凤. 高光谱影像预处理技术研究[D]. 西安: 长安大学,2007.
Dong L F. Study on the hyperspectral image preprocessing[D]. Xi'an: Chang'an University,2007.
- [37] Hadjit H,Oukebdane A,Belbachir A H. Atmospheric correction of earth-observation remote sensing images by Monte Carlo method[J]. Journal of Earth System Science,2013,122(5):1219–1235.
- [38] Kaufman Y J,Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,1988,9(8):1357–1381.
- [39] Xian G,Homer C. Updating the 2001 national land cover database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods[J]. Remote Sensing of Environment,2010,114(8):1676–1686.
- [40] 郑伟,曾志远. 遥感图像大气校正方法综述[J]. 遥感信息,2004(4):66–70.
Zheng W,Zeng Z Y. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images[J]. Remote Sensing Information,2004(4):66–70.
- [41] Zoran M,Stefan S. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials,2006,8(1):247–251.
- [42] Adler-Golden S M,Matthew M W,Bernstein L S,et al. Atmospheric correction for shortwave spectral imagery based on MODTRAN4[C]//Proceedings of SPIE. Denver: The International Society for Optical Engineering,1999:61–69.
- [43] Gao B C,Heidebrecht K B,Goetz A. Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data[J]. Remote Sensing of Environment,1993,44(2–3):165–178.
- [44] Zheng Q,Bruce C K,Alexander F H G. The high accuracy atmospheric correction for hyperspectral data (HATCH) model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(6):1223–1231.
- [45] Craig J M. Performance assessment of ACORN atmospheric correction algorithm[C]//Proceedings of SPIE. Orlando: The International Society for Optical Engineering,2002:438–449.
- [46] Cooley T,Anderson G P,Felde G W,et al. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation[C]//Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS). IEEE,2002:1414–1418.
- [47] Balthazar V,Vanacker V,Lambin E F. Evaluation and parameterization of ATCOR3 topographic correction method for forest cover mapping in mountain areas[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation,2012,18:436–450.
- [48] Santini F,Palombo A. Physically based approach for combined atmospheric and topographic corrections[J]. Remote Sensing,2019,11(10):1218.
- [49] 郭飞. 基于 MODTRAN 的高光谱快速大气校正方法[J]. 现代电子技术,2015,38(10):23–27.
Guo F. A fast hyperspectral atmospheric correction method based on MODTRAN[J]. Modern Electronics Technique,2015,38(10):

- 23–27.
- [50] 佃袁勇,方圣辉,徐永荣.一种协同反演气溶胶与水汽含量的高光谱图像大气校正算法[J].国土资源遥感,2015,27(2):22–28. doi:10.6046/gtzyyg.2015.02.04.
- Dian Y Y, Fang S H, Xu Y R. An atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery with collaborative retrieval of aerosol optical thickness and water vapor content[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2): 22–28. doi:10.6046/gtzyyg.2015.02.04.
- [51] 胡顺石,张立福,余晓君,等.遥感影像大气校正通用查找表的设计与插值算法[J].遥感学报,2014,18(1):45–60.
- Hu S S, Zhang L F, She X J, et al. Design and interpolation of a general look-up table for remote sensing image atmospheric correction[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(1): 45–60.
- [52] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen, et al. Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: The second generation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(16): 9296–9315.
- [53] Lipponen A, Mielonen T, Pitknen M R A, et al. Bayesian dark target algorithm for MODIS AOD retrieval over land[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(3): 1–27.
- [54] Kuter S, Weber G W, Akyürek Z, et al. Inversion of top of atmospheric reflectance values by conic multivariate adaptive regression splines[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2015, 23(4): 651–669.
- [55] Thompson D R, Vijay N, Green R O, et al. Optimal estimation for imaging spectrometer atmospheric correction[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 216: 355–373.
- [56] Wei J, Yu X, Lee Z, et al. Improving low-quality satellite remote sensing reflectance at blue bands over coastal and inland waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 250: 112029.
- [57] Gossn J I, Frouin R, Dogliotti A I. Atmospheric correction of satellite optical imagery over the Río de la Plata highly turbid waters using a SWIR-based principal component decomposition technique[J]. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1050.
- [58] Schroeder T, Behnert I, Schaale M, et al. Atmospheric correction algorithm for MERIS above case-2 waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(7/8): 1469–1486.
- [59] 刘安伟.基于高光谱影像的大气参数反演和大气校正[D].西安:西安科技大学,2016.
- Liu A W. Atmospheric parameter inversion and atmospheric radiative correction based on hyperspectral image[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [60] Xu F, Cervone G, Franch G, et al. Multiple geometry atmospheric correction for image spectroscopy using deep learning[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2020, 14(2): 024518.
- [61] Pyo J C, Duan H, Ligaray M, et al. An integrative remote sensing application of stacked autoencoder for atmospheric correction and cyanobacteria estimation using hyperspectral imagery[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1073.
- [62] Vanonckelen S, Lhermitte S, Rompaey A V. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 24(1): 9–21.
- [63] Zhang H, Yuan Y, Xu Y, et al. Remote sensing method for detecting green tide using HJ-1 CCD top-of-atmosphere reflectance [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 102: 102371.

Research advances in atmospheric correction of hyperspectral remote sensing images

KONG Zhuo, YANG Haitao, ZHENG Fengjie, LI Yang, QI Ji, ZHU Qinyu, YANG Zhonglin

(School of Space Information, University of Space Engineering, Beijing 101416, China)

Abstract: Atmospheric correction is an important preprocessing step for hyperspectral remote sensing images. The atmospheric correction quality determines the application degree of hyperspectral remote sensing to a certain extent. First, this study analyzed the influence of the atmosphere on radiative transfer and summarized the inversion methods of aerosol optical thickness and water vapor in the atmosphere, indicating the main atmospheric factors affecting the quality of hyperspectral remote sensing images. Then, the influence of the atmosphere was demonstrated theoretically by clarifying the derivation process of the radiative transfer equation and the action mechanism of relevant parameters, indicating the main aspects of hyperspectral atmospheric correction. Furthermore, this study summarized the hyperspectral atmospheric correction methods formed in recent years, including methods based on empirical statistics and radiative transfer, and analyzed the study advances and development trends of hyperspectral atmospheric correction. Finally, this study forecasted the development of atmospheric correction of hyperspectral remote sensing images. This study will provide a certain reference for the engineering application and study of hyperspectral remote sensing.

Keywords: hyperspectral remote sensing; atmospheric correction; radiative transfer equation; radiative transfer model; artificial neural network

(责任编辑:李瑜)