

## 结合NCEP再分析资料优化的6S模式大气校正方法

王雪丹, 王玉峰\*, 刘凯, 彭志青, 刘晶晶, 狄慧鸽, 宋跃辉, 华灯鑫

西安理工大学机械与精密仪器工程学院激光雷达大气遥感研究中心, 陕西 西安 710048

**摘要** 以我国高光谱遥感卫星——环境1号卫星为例,开展结合NCEP再分析资料辅助优化的6S大气校正方法的分析。首先,考虑到高光谱图像缺少标准反射率产品的问题,利用最优化估计方法构建高光谱反射率曲线,并作为标准曲线,用于大气校正结果的验证。其次,基于6S大气校正理论,开展了大气校正的敏感性分析,确定了气溶胶光学厚度的敏感因素以及气溶胶类型、大气模式和大气湿度对大气校正系数的敏感性。在此基础上,提出了NCEP再分析资料辅助优化的6S大气校正方法,利用NCEP再分析资料提供的大气温湿度廓线、水平能见度反演的550 nm气溶胶光学厚度等数据资料,优化6S模式的输入参数,得到准确的大气校正系数 $X_a$ 、 $X_b$ 和 $X_c$ ,获得大气校正后的不同地物反射光谱曲线。最后,选取西安作为试验区,以水体为例,进行波谱曲线对比,利用标准曲线对校正结果进行精度评价。对比分析结果表明,NCEP再分析资料辅助优化的6S模式校正的地面反射率结果明显优于6S的大气校正结果,与标准曲线具有一致的反射率变化趋势,二者的相关系数达到0.8596,标准差低于0.0685,各波段地面反射率逐像元误差的平均值和标准差接近0.02,反映了利用NCEP辅助数据优化的6S模式对大气校正有着明显的改善作用,可提高6S大气校正的地物反射率反演精度。

**关键词** 大气光学; 高光谱图像; 大气校正; 6S; 气溶胶; NCEP

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS231514

## 1 引言

随着成像光谱技术的发展,高光谱成像作为一项新的遥感技术,续写和完善了光学成像从全色经多光谱到高光谱的全部图像信息链。因此,高光谱遥感成像技术在植被定量遥感、遥感智能解译、天空一体化综合监测等领域发挥了越来越重要作用<sup>[1-4]</sup>。

定量遥感的应用是基于表面参数的定量反演,大气校正是定量分析地表参数的前提,定量反演必须从大气-陆地混合信号中提取有用的可见信息<sup>[5]</sup>。利用高光谱遥感图像进行定量分析,首先需要获得地物真实的光谱特性,它需要消除辐射传输过程中大气对遥感图像的影响。但是,不同于全色和多光谱图像,高光谱图像具有高光谱分辨率和多光谱通道,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,针对高光谱遥感图像大气校正的研究变得越来越重要<sup>[6]</sup>。

国内外的研究人员陆续提出了多种大气校正方法。早先,普遍采用基于统计学模式的方法,主要有经验线性法、内部平均法、平场域法和对数残差法等<sup>[7-10]</sup>。1994年,Ben-Dor等<sup>[11]</sup>采用统计学模式法对光谱通道

的数据进行大气校正,使用3个参数即目标面积比(TAR)、相对于原始数据集的子集大小(SSR)和校正质量比(CQR)分析了校正效果。2002年,中国科学院遥感应用研究所提出一种平场域自动搜索(AFFF)方法,并将其用于对业务化运行航天高光谱数据进行大气校正<sup>[12]</sup>。随着辐射传输模式的不断发展,辐射传输法已成为大气校正的主流方法,国内外众多科研工作者先后利用LOWTRAN、MODTRAN、ATREM、ACORN、FLAASH、6S等辐射传输模式开展大气校正方法研究<sup>[13-15]</sup>。2010年,Proud等<sup>[16]</sup>对SEVIRI数据进行大气校正,优化大气校正方法,并与6S模式校正结果进行对比。2015年,Bassani等<sup>[17]</sup>利用气溶胶的局部微物理特性,从HICO大气数据中准确检索高光谱离水反射率,发现气溶胶微观物理特性可提高大气校正的准确性。2021年,Jha等<sup>[18]</sup>开发了一种基于开源6S RT代码的柔性大气补偿技术(FACT),对高光谱(AVIRIS-NG和Hyperion)和多光谱(Landsat-8 OLI和WorldView-3)遥感数据进行了大气校正,显著提高了校正精度。2021年,Zhou等<sup>[19]</sup>利用MODIS产品和30 m ASTER全球数字高程模式数据调整相关参数,搭建了利用这些辅助数据优化的6S

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-10-25; 录用日期: 2023-11-06; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(U1733202)、陕西省创新能力支撑计划(2020-TD014)、陕西省农业科技创新驱动项目(NYKJ-2022-XA-011)

通信作者: \*wangyufeng@xaut.edu.cn

模式,不同程度地提高了各波段的精度。2022年,Zhang等<sup>[20]</sup>在6S辐射传输模式的基础上搭建了水陆边界临近效应修正模式WL-AE,提高了6S辐射传输模式在水陆边界的大气校正精度。可见,以6S模式为主的大气校正方法和校正精度一直备受关注。随着高光谱遥感技术的发展,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<sup>[21-22]</sup>。我国目前已发射多颗高光谱成像传感器载荷,如环境1号卫星、高分5号、资源卫星等,这些卫星在农业遥感、林业遥感、环境监测等领域发挥着越来越重要的作用,针对这些高光谱遥感卫星的大气校正技术在不断发展中。

本文针对高光谱遥感成像的大气校正技术,以我国高光谱遥感卫星——环境1号卫星(以下简称“HJ-1A星”)为例,开展结合NCEP再分析资料辅助优化的6S大气校正方法分析,以提高6S模式对高光谱遥感数据的大气校正精度。基于6S大气校正理论,对大气校正的敏感性进行分析,获得不同输入参数对大气校正系数的敏感性结果。在此基础上,采用NCEP作为辅助数据优化的6S模式进行大气校正,获得大气校正后不同地物的反射光谱曲线。为了验证结果,使用相同位置的相近日期的一景Landsat数据,利用最优化估计方法构建高光谱反射率曲线,对大气校正结果进行比较和分析,证明了NCEP辅助数据优化的6S模式对大气校正效果具有改善作用。

## 2 大气校正理论、方法和评价

### 2.1 大气校正理论

大气校正是一种将遥感影像数据转换为地面反射率的方法。由于遥感图像的成像过程具有复杂性,传感器接收的电磁波能量与目标本身辐射的能量是不一致的。传感器输出的能量包含由太阳位置和角度条

件、大气条件、地形影响和传感器本身的性能所引起的失真,这些失真不是地面目标本身的辐射,因此需要对这些因素进行校正或者消除。在考虑大气作用下,传感器接收的反射辐射能量<sup>[13]</sup> $L_{\text{sensor}}$ 表示为

$$L_{\text{sensor}} = L_{\text{path}} + L_{\text{reflected}} + L_{\text{adjacency}}, \quad (1)$$

式中: $L_{\text{path}}$ 表示太阳光经大气衰减后照射到地面,经地面反射后,又经大气第二次衰减进入传感器的能量; $L_{\text{reflected}}$ 为大气散射、反射和辐射的能量; $L_{\text{adjacency}}$ 为地面本身辐射的能量经大气后进入传感器的能量。

大气校正的主要步骤包括:辐射定标、大气辐射传输过程模拟和地面反射率估算。首先,进行辐射定标。将原始遥感数据转化为能量单位,确定每个波段的实际辐射值,转化公式<sup>[13]</sup>为

$$R_{\text{radiance}} = G_{\text{gain}} \cdot g_{\text{DN}} + d_{\text{offset}} \quad (2)$$

式中: $G_{\text{gain}}$ 为传感器增益; $g_{\text{DN}}$ 为原始的图像灰度值; $d_{\text{offset}}$ 为传感器偏移。然后,进行大气校正,即根据地球大气的特性和观测条件,模拟大气辐射传输过程,通过现有的大气校正方法去除大气散射和吸收产生的影响,估算出地面反射率。

一般情况下,大气校正的精度受到很多因素的影响,包括大气参数的准确性、气溶胶物理特性和地理环境等,因此,需要根据具体场景和需求选择合适的校正方法和参数,以获得准确的地面反射率信息。

### 2.2 基于辐射传输的大气校正方法

利用基于电磁波在大气中的辐射传输原理所建立的模式对遥感图像进行大气校正的方法,被称为基于辐射传输的大气校正方法。其中,6S辐射传输模式可用来模拟光束在太阳-地面目标-传感器的传输过程中所受到的大气影响,因此,6S辐射传输模式常被用来进行大气校正。基于6S辐射传输模式的大气校正原理<sup>[13]</sup>可表示为

$$\rho_{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = t_g(\theta_s, \theta_v) \left\{ \rho_a(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + \left[ \exp\left(\frac{-\tau}{\mu_s}\right) + t_d(\theta_s) \right] \frac{\rho_{\text{su}} t_d(\theta_v)}{1 - \rho_e S} \right\}, \quad (3)$$

式中: $\rho_{\text{TOA}}$ 、 $\rho_a$ 、 $\rho_{\text{su}}$ 、 $\rho_e$ 分别表示大气顶反射率、大气反射率、地面反射率和均匀反射率; $\Delta\phi$ 为太阳方位与传感器方位的夹角; $t_g$ 为气体的总透射率,其考虑了不同气体的吸收; $\tau$ 表示大气光学厚度; $t_d(\theta_s)$ 和 $t_d(\theta_v)$ 表示大气漫透射率; $S$ 为大气球形反照率; $1 - \rho_e S$ 表示考虑了地表与大气之间的多次散射。

经6S模式模拟运行后,可得到辐照度、透射率等一系列大气参数,通过对这些参数的处理可以得到大气校正系数<sup>[12]</sup> $X_a$ 、 $X_b$ 和 $X_c$ ,相应的表达式为

$$X_a = \frac{\pi \cdot d \cdot e \cdot f}{\cos\left(\frac{z \cdot \pi}{180}\right) \cdot g \cdot h}, \quad (4)$$

$$X_b = \frac{i \cdot h}{g \cdot f}, \quad (5)$$

$$X_c = j, \quad (6)$$

式中: $d$ 为函数滤波器; $e$ 为太阳光谱; $f$ 为向上的总散射率; $z$ 为太阳天顶角; $g$ 为总透射率; $h$ 为向下的总散射率; $i$ 为垂直辐照度; $j$ 为总的球面反照率。

根据大气校正系数可计算得到大气校正后的地面反射率<sup>[13]</sup> $R_{\text{ACR}}$ ,表示为

$$R_{\text{ACR}} = \frac{k \cdot X_a + X_b}{1 + (k \cdot X_a + X_b) \cdot X_c}, \quad (7)$$

式中: $k$ 为原始图像经过辐射定标后得到的辐射值。

### 2.3 评价方法

校正后的地面反射率结果,可通过其与标准反射率产品的相关系数、相对误差、光谱角、决定系数、均方根误差等指标进行评价。相关系数用来度量两个变量间的线性关系,一般用字母 $r$ 表示,即

$$r(X, Y) = \frac{E_{\text{Cov}}(X, Y)}{\sqrt{E_{\text{Var}}[X] \cdot E_{\text{Var}}[Y]}}, \quad (8)$$

式中:  $E_{\text{Cov}}(X, Y)$  为  $X$  与  $Y$  的协方差;  $E_{\text{Var}}[X]$  为  $X$  的方差;  $E_{\text{Var}}[Y]$  为  $Y$  的方差。

光谱角的定义为两条光谱之间的夹角, 通过计算两个向量间的夹角来度量光谱间的相似性, 夹角越小, 两条光谱越相似, 其计算公式为

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_b} t_i}{\left( \sum_{i=1}^{n_b} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \sum_{i=1}^{n_b} u_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \right], \quad (9)$$

式中:  $n_b$  表示波段数目;  $t_i$  和  $u_i$  分别表示第  $i$  条测试光谱和参考光谱。

决定系数是用来衡量回归模型对数据拟合程度的指标, 表征趋势线的可靠性, 愈接近 1 表示拟合程度愈高, 其计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (10)$$

式中:  $y_i$  表示真实值;  $\hat{y}_i$  表示观测值;  $\bar{y}$  表示平均值。

均方根误差是预测值与真实值偏差的平方与观测次数  $n$  比值的平方根, 用来衡量观测值与真实值之间的误差, 其计算公式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}. \quad (11)$$

### 3 最优化估计获得标准反射率曲线

一般来说, 在反射率数据验证方面, 可与卫星标准产品或者标准波谱库进行比较。但是, 在标准波谱库中, 水体的光谱曲线易受到地区、海拔、河水含沙量、叶绿素含量等因素的影响, 植被的光谱曲线又与品种有关, 同时还存在背景条件不匹配等问题; 在卫星标准产品方面, Landsat、MODIS 等卫星虽可提供多光谱的数据产品, 但存在光谱数据少的局限性。本文主要以我国高光谱遥感 HJ-1A 星为例进行大气校正方法的研究。HJ-1A 星由两颗光学卫星和一颗合成孔径雷达卫星组成, 配备了宽覆盖 CCD 相机、红外多光谱扫描仪、高光谱成像光谱仪、合成孔径雷达等多种类型的先进传感器。其中, 高光谱成像仪共设置有 115 个波段, 波段范围为 450~950 nm, 平均光谱分辨率为 5 nm, 空间分辨率为 100 m。

目前, 还没有高光谱遥感卫星的标准光谱曲线以及标准产品。本文以 HJ-1A 星和 Landsat 标准产品为基础, 使用最优化估计与最优化模拟结合的方法来构建高光谱曲线。最优化估计是指通过寻找最优解来确定一个或多个参数的值, 使得目标函数达到最小值或

最大值<sup>[23]</sup>。其原理是通过优化算法迭代地调整参数值, 使目标函数尽可能地接近真实观测值。在本文中, 使用最优化估计确定大气校正系数  $X_a$ 、 $X_b$  和  $X_c$ 。由于 HJ-1A 星的高光谱图像光谱范围为 450~950 nm, Landsat 卫星的光谱范围为 430~2290 nm, 其 C1 标准产品仅能提供 7 个波段的反射率值, 这 7 个波段分别为 433~453 nm、450~515 nm、525~600 nm、630~680 nm、845~885 nm、1560~1651 nm 和 2100~2300 nm。因此, 考虑到 HJ-1A 星和 Landsat 卫星的光谱范围和分辨率, 首先提取 4 个波段 (482.6、561.3、654.6、864.6 nm) 的高光谱图像辐亮度和 Landsat C1 产品数据的地面反射率, 然后通过二者的重采样和波段匹配, 使用拟牛顿法求解 4 组点的无约束最小值。

在上述基础上, 使用最优化估计模拟方法来构建 450~950 nm 波段的高光谱反射率标准曲线。最优化模拟通过对系统进行建模和仿真, 获得不同参数组合下的系统性能指标, 并通过对指标的评估和优化, 找到最优化的参数组合。通常采用随机搜索、遗传算法等方法来实现最优化模拟。本文使用最优化估计得到的大气校正系数, 结合光谱响应函数来构建最优化模拟系统, 并采用随机搜索方法进行模拟, 从而得到模拟曲线。

最优化估计和最优化模拟的具体步骤如下: 1) 对 HJ-1A 星高光谱图像进行垂直条纹去除等预处理; 2) 基于 Landsat 和 HJ-1A 星的波段匹配, 对高光谱图像进行重采样, 使其与 Landsat 波段对应; 3) 进行最优化估计, 提取 4 个波段 (482.6、561.3、654.6、864.6 nm) 的高光谱图像辐亮度和 Landsat C1 产品数据的地面反射率, 根据式 (7) 通过最优化估计方法求解 4 组点的无约束最小值; 4) 对 4 组最优化的最小值进行对比, 选取误差最小的一组作为大气校正系数 ( $X_{a2}$ 、 $X_{b2}$ 、 $X_{c2}$ ); 5) 基于大气校正系数对原始高光谱图像的辐亮度进行运算, 利用最优化模拟方法得到模拟曲线, 并将其作为标准反射率曲线。最优化估计和最优化模拟的流程如图 1 所示。

在最优化模拟中, 主要涉及边界条件和参数选择等设置, 这些参数对模拟结果产生不同的影响。边界条件是指模拟区域的边界特征, 不准确的边界条件可能导致模拟光谱数据漂移, 本文采用地面反射率的范围作为边界条件, 避免了数据漂移的问题。不同的算法参数也会对模拟结果产生偏移, 本文忽略了运算速度, 采用较高的学习率和较大的迭代次数, 以确保结果的准确性。

通过上述方法模拟得到 115 个波段的反射率, 它们构成光谱范围为 450~950 nm 的反射率标准曲线。图 2 所示为水体、植被、道路、建筑物 4 种地物的标准反射率曲线, 同时给出在 4 个波段上 Landsat C1 产品反射率值 (红色点)。可以看出, 4 个波长处的 C1 产品数据均在模拟的标准曲线上, 说明模拟结果可靠。

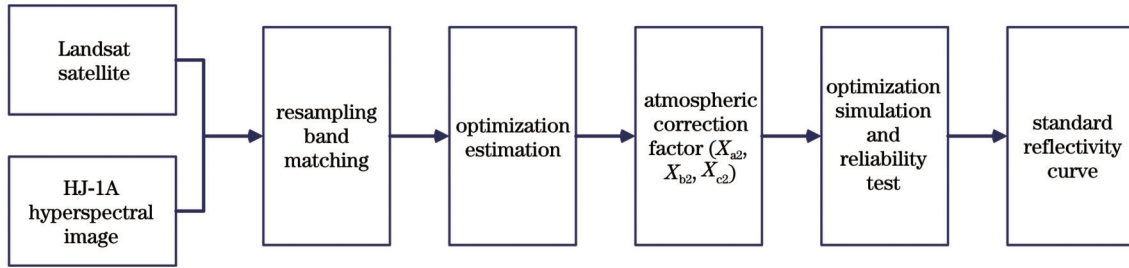


图 1 最优化估计和最优化模拟流程图

Fig. 1 Flowchart of optimization estimation and optimization simulation

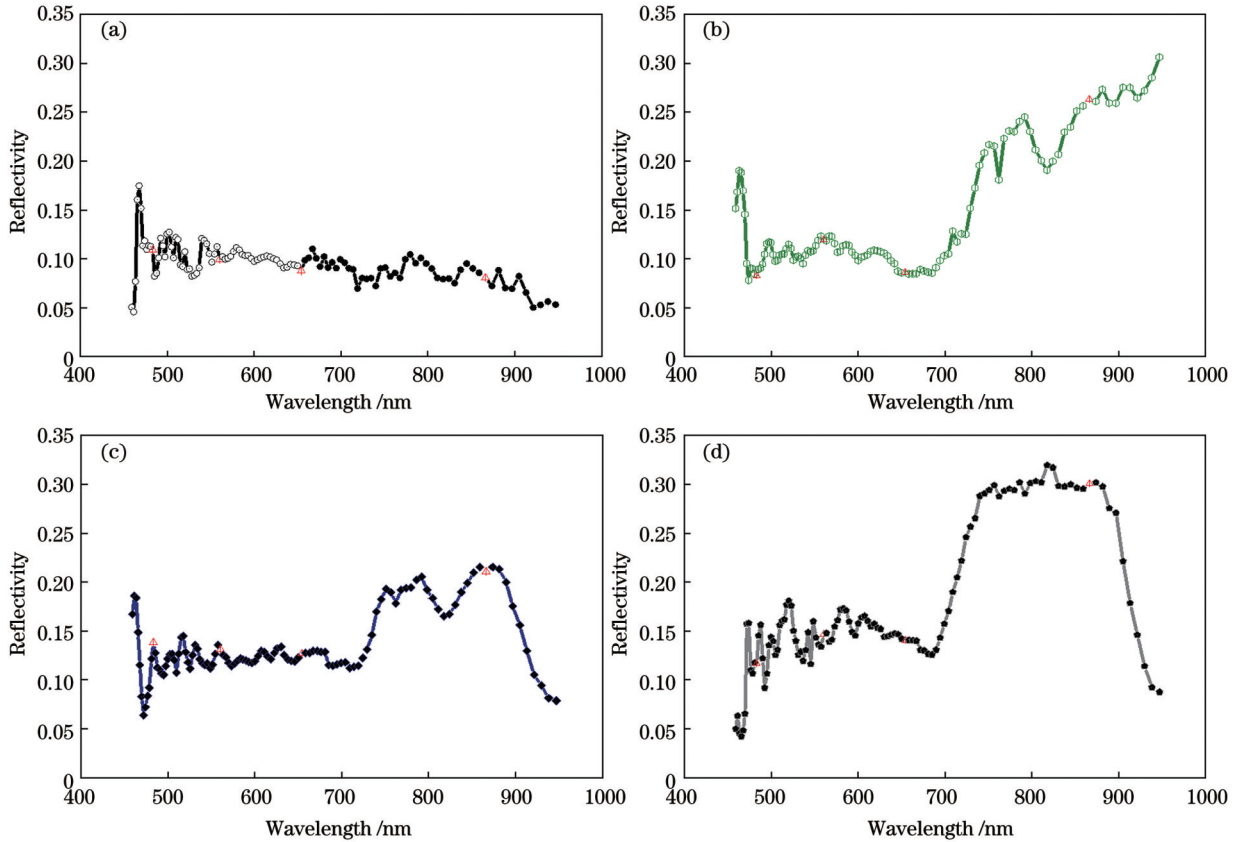


图 2 最优化估计得到的 4 种地物标准反射率曲线。(a) 水体；(b) 植被；(c) 道路；(d) 建筑物

Fig. 2 Standard reflectivity curves of four surface objects obtained by optimization estimation. (a) Water; (b) vegetation; (c) road; (d) building

#### 4 6S 大气校正的敏感性分析

首先,利用 6S 模式和 FLAASH 模式进行大气校正效果的对比和分析。为了避免因输入参数不同而影响大气校正的效果,两个模式均设置为相同的气溶胶类型和大气模式等参数。图 3 给出了利用 6S 模式和 FLAASH 模式获得的 4 种典型地物大气校正光谱曲线,分别对应于水体、植被、道路和建筑物。图 3(a)所示为经 6S 模式和 FLAASH 模式大气校正得到的水体反射光谱曲线,同时给出模拟的标准反射率曲线。可以看出,在 450~550 nm 范围内,经 6S 模式大气校正后的水体反射率数据与标准反射率具有较好的一致

性。使用误差棒表示的相对误差在 10% 范围内,在 550~700 nm 波段,相对误差增大,但其值波动小,由误差棒显示波动范围为 15%,而在大于 700 nm 的波段,二者的相对误差逐渐增大。对于其他地物,也得到了类似的结果,如图 3(b)~(d)所示。相较于 FLAASH 模式,经 6S 模式校正得到的在 400~1000 nm 范围内的反射率曲线更接近于 C1 产品的标准反射率曲线。其中,道路的光谱曲线在 875~940 nm 范围误差较大,可能是由道路与陆地的邻近效应造成的。可见,6S 和 FLAASH 两种大气校正模式均取得一定的校正效果,且 6S 模式的校正效果优于 FLAASH,但与标准数据仍存在相对误差。

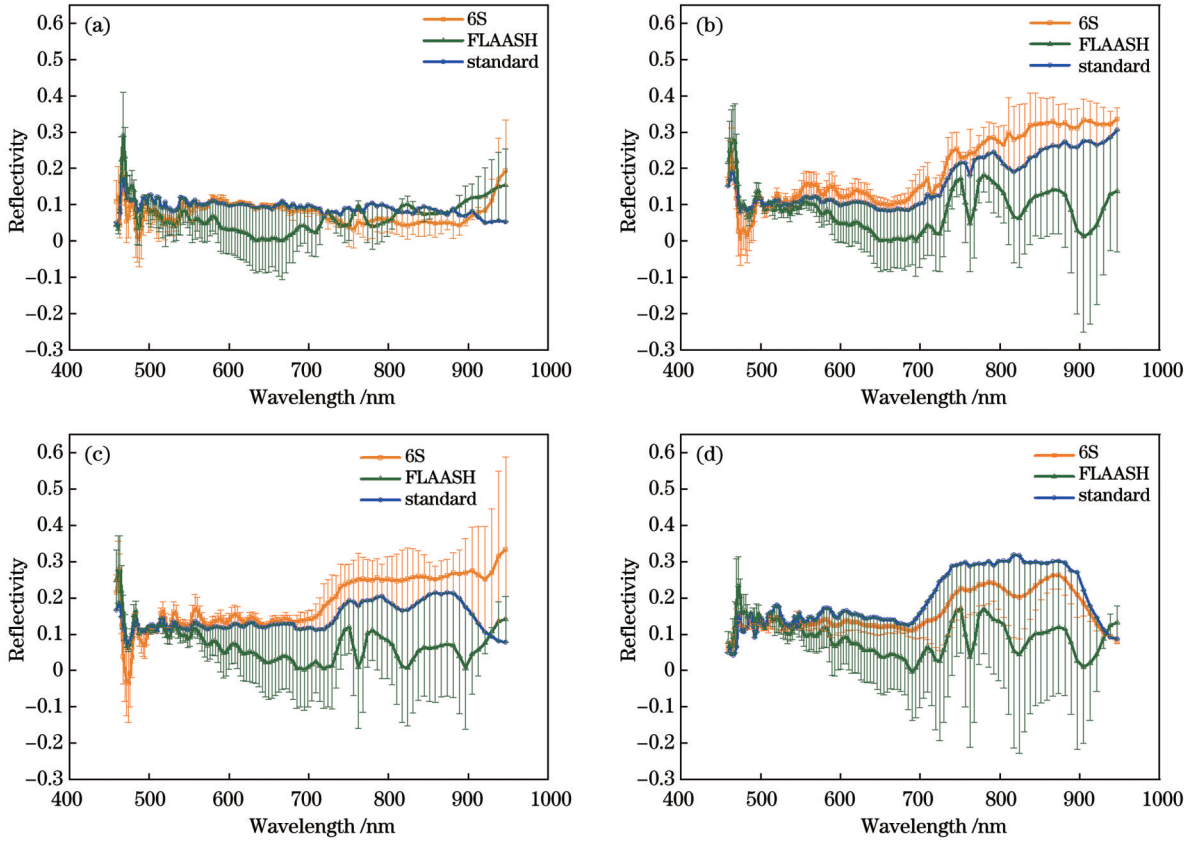


图 3 6S 与 FLAASH 大气校正模式的光谱曲线对比。(a) 水体; (b) 植被; (c) 道路; (d) 建筑物

Fig. 3 Comparisons of spectral curves of 6S and FLAASH atmospheric correction modes. (a) Water; (b) vegetation; (c) road; (d) building

为了提高 6S 模式的大气校正效果,对大气输入参数进行敏感性分析。根据 6S 模式,几何参数、目标和传感器的高程参数、大气模式、气溶胶类型、光谱条件等参数都会影响大气校正的结果,因此,本文分别从 550 nm 气溶胶光学厚度、气溶胶类型、大气模式、大气湿度廓线等方面进行敏感性分析。

图 4 给出了大气校正系数  $X_a$ 、 $X_b$ 、 $X_c$  随 550 nm 气溶胶光学厚度的变化趋势。图 4(a) 显示,校正系数  $X_a$  与 550 nm 气溶胶光学厚度之间呈现指数增长趋

势,当光学厚度增长至 2.0 时,校正系数  $X_a$  由 0.1 逐渐增大至 1.8 左右。图 4(b) 则给出了校正系数  $X_b$  和  $X_c$  随光学厚度的变化关系,可以看出,随着光学厚度的增大, $X_b$  也呈现了指数增长的变化趋势,但是校正系数  $X_c$  却出现不同的变化趋势,当气溶胶厚度小于 1.0 时, $X_c$  随着光学厚度的增大逐渐增大,而后逐渐趋于平缓。可见,校正系数  $X_a$  对气溶胶光学厚度最敏感,校正系数  $X_c$  则极不敏感。通过式(3)与式(4)分析气溶胶光学厚度对地面反射率的校正影响。图 5 展示了

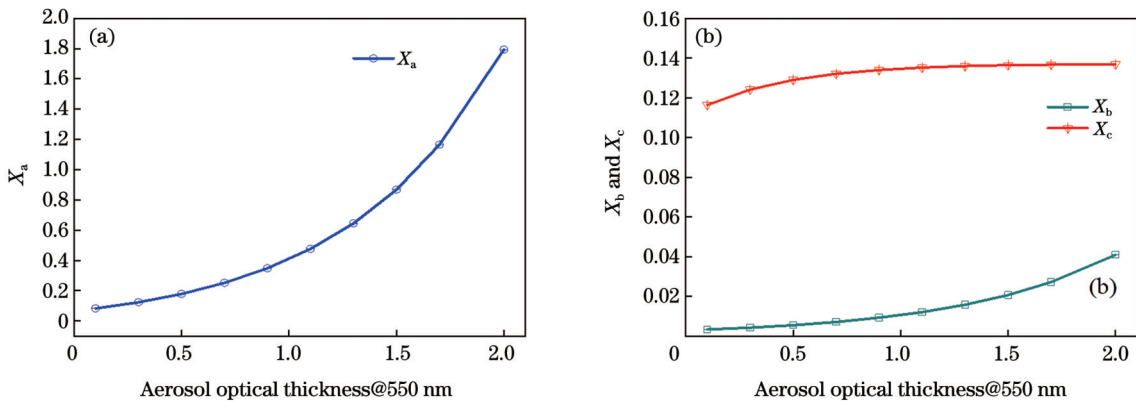


图 4 550 nm 气溶胶光学厚度对校正系数的影响。(a)  $X_a$ ; (b)  $X_b$  和  $X_c$

Fig. 4 Effect of aerosol optical thickness at 550 nm on correction coefficients. (a)  $X_a$ ; (b)  $X_b$  and  $X_c$

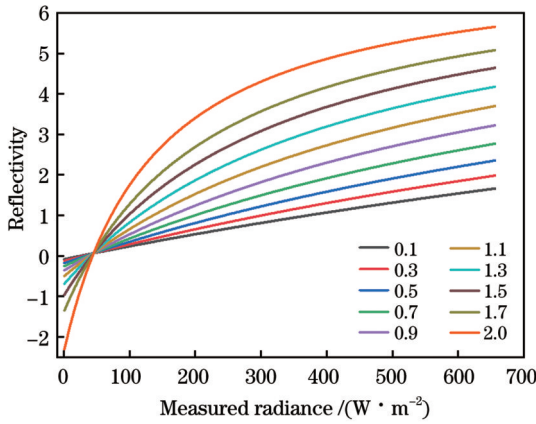


图 5 550 nm 气溶胶光学厚度对校正曲线的影响

Fig. 5 Effect of aerosol optical thickness at 550 nm on correction curves

不同 550 nm 气溶胶光学厚度下原始辐射  $g_{DN}$  与校正后地面反射率的曲线关系。可以看出,在不同的光学厚度下,由校正系数  $X_a$ 、 $X_b$  和  $X_c$  得到的地面反射率不同。当  $g_{DN}$  小于 50 时,地面反射率与 550 nm 气溶胶光学厚度的变化呈反比关系;当  $g_{DN}$  大于 50 时,地面反射率随着 550 nm 气溶胶光学厚度的增加而增大。可见,550 nm 气溶胶光学厚度对校正反射率结果产生了重要影响。

针对不同的气溶胶类型,利用 6S 模式得到的大气校正系数也不尽相同,结果如图 6 所示。图 6(a) 所示为 7 种气溶胶类型下的校正系数  $X_a$  的结果,可以看到:城市型气溶胶 (urban) 对应的  $X_a$  值最大,为 0.00543;空气 (no aerosol) 对应的  $X_a$  值最小,为 0.0029。图 6(b) 所示为不同气溶胶类型下的校正系数  $X_b$  和  $X_c$  的变化结果,不同气溶胶类型对应的校正系数  $X_b$  变化范围较大,为 0.065~0.18,其中:空气对应的  $X_b$  值最小,为 0.06586;城市型气溶胶对应的  $X_b$

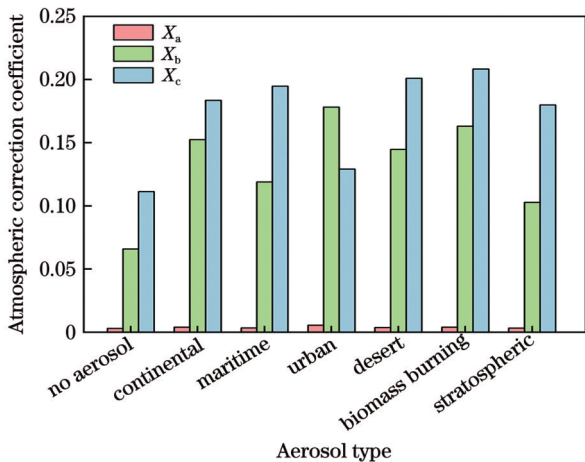


图 6 不同气溶胶类型下的大气校正系数

Fig. 6 Atmospheric correction coefficients under different aerosol types

值最大,为 0.17808。气溶胶类型对  $X_c$  的影响也一样,生物燃烧型 (biomass burning) 气溶胶对应的  $X_c$  值最大,为 0.20822。可见,气溶胶类型对大气校正系数也有着显著影响。

图 7 展示了不同气溶胶类型下原始辐射值与校正后地面反射率的曲线关系。可以看出,城市型气溶胶得到的大气校正系数显著区别于其他类型气溶胶,对于相同的原始辐射值,使用城市型气溶胶进行大气校正后的辐射值远高于其他类型气溶胶的校正结果,使用平流层型气溶胶进行大气校正后的辐射值则最低。可见,气溶胶类型的选取对大气校正的地面反射率也有影响。

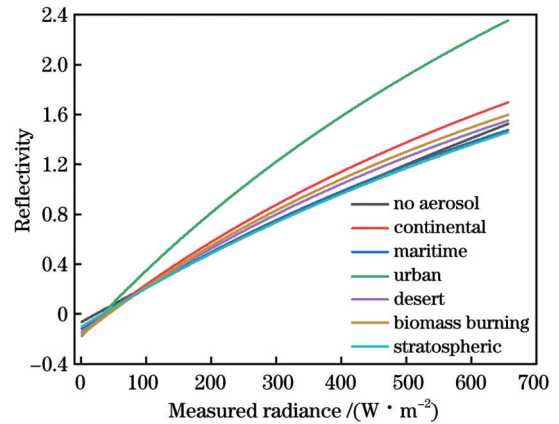


图 7 不同气溶胶类型对校正曲线的影响

Fig. 7 Effect of aerosol types on correction curves

图 8 展示了不同大气模式、温度廓线以及相对湿度廓线下大气校正系数的变化。以 6S 模式自带的中纬度夏季、中纬度冬季等 7 种大气模式为例进行说明,发现这 7 种模式均对大气校正系数有显著影响,其中,大气模式的影响最大,对  $X_c$  的影响最为显著。如图 8(a) 所示,不同温度廓线下  $X_a$  的变化范围为 0.00521~0.00561,不同相对湿度廓线下  $X_a$  的变化范围为 0.00528~0.0059;如图 8(b) 所示,不同温度廓线下  $X_b$  的变化范围为 0.17006~0.18249,不同湿度廓线下  $X_b$  的变化范围为 0.17808~0.18622。图 8(c) 所示为大气温湿度对  $X_c$  校正系数的影响,  $X_c$  在不同温度廓线下的变化范围为 0.12526~0.13028,在不同湿度廓线下的变化范围为 0.12752~0.13233。可见,相对湿度廓线对  $X_a$ 、 $X_b$  的影响显著于大于温度廓线产生的影响。因此,在利用 6S 模式进行大气校正时,550 nm 气溶胶光学厚度、气溶胶类型、大气温湿度廓线等输入参数均对大气校正系数  $X_a$ 、 $X_b$ 、 $X_c$  产生影响,从而影响大气校正的地面反射率结果,其中气溶胶光学厚度是最为敏感的输入参数,气溶胶类型和大气相对湿度廓线也是较为重要的影响参数。

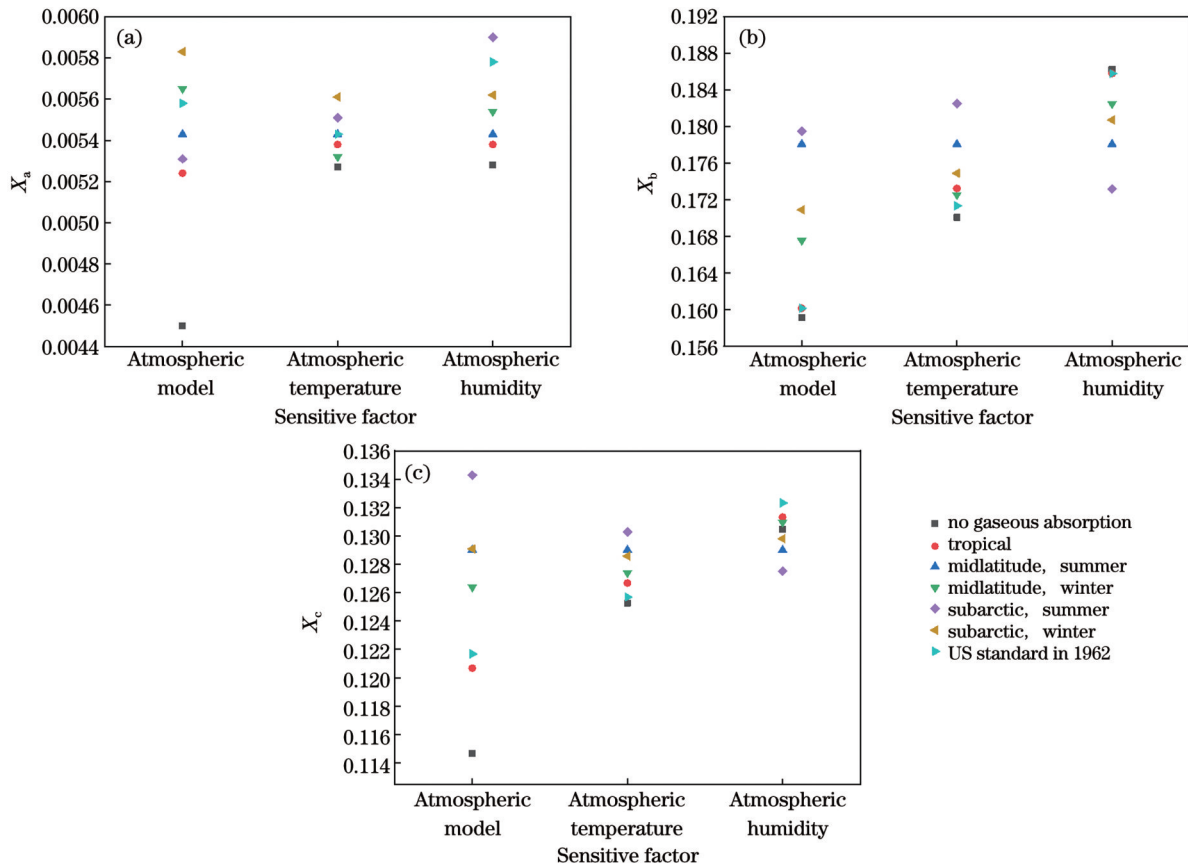


图 8 不同敏感因子下的大气校正系数。(a)  $X_a$ ; (b)  $X_b$ ; (c)  $X_c$ 。

Fig. 8 Atmospheric correction coefficients under different sensitive factors. (a)  $X_a$ ; (b)  $X_b$ ; (c)  $X_c$ 。

## 5 6S 模式结合 NCEP 大气校正改善效果

### 5.1 6S 模式结合 NCEP 的大气校正优化与评价

为了提高 6S 模式的大气校正效果,采用 NCEP 作为辅助数据优化的 6S 模式进行大气校正。NCEP 是基于美国国家环境预报中心的耦合大气海洋模式开发的再分析数据集,提供了每天 4 个时刻全球范围内的气象和气候变量,已被广泛应用于气候研究、大气科学和环境模拟等领域。在已有 6S 模式运用的基础上,结合当日水平能见度反演的 550 nm 气溶胶光学厚度以及 NCEP 再分析资料提供的大气温湿度廓线来改善大气校正效果。

NCEP/NCAR 再分析数据集是由美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心联合开发的完整的再分析资料集,可提供每天 6:00、12:00、18:00、24:00 这 4 个时刻的大气参数。HJ-1A 星过境西安的时间约为 9:36, HJ-1A 星的重访周期为 4 d。考虑到目前卫星重访周期和时间,很难获得完全吻合的时间匹配数据。在实际运用中,针对 Landsat、MODIS、长光卫星等卫星数据产品,可使用同一天的大气数据(如 MODIS)进行大气校正,认为满足时空匹配要求。因此,本文采用 NCEP 时间最相近的数据作为 6S 模

式的辅助输入数据进行大气校正。以 HJ-1A 星高光光谱图像的西安影像为实验区,选取 2021 年 8 月 1 日 9 时 36 分的图像,按照时空匹配原则,提取 NCEP 再分析数据在 12:00 的大气温度、压力和相对湿度廓线,如图 9 所示。图 9 分别展示了 6S 模式自带的中纬度夏季大气温湿度廓线和 Landsat 产生 C1 产品所使用的温湿度廓线。可以看出,与 6S 模式自带的廓线相比, NCEP 提供的大气温度和相对湿度廓线在对流层高度范围内存在一定的差异,但二者提供的压力垂直廓线基本一致。

利用 NCEP 提供的大气温度和相对湿度廓线,结合相近时刻的水平能见度反演得到 550 nm 气溶胶光学厚度,并将其作为 6S 模式的大气参数,探究利用 NCEP 辅助数据优化的 6S 模式进行大气校正的改善效果。图 10 所示为结合 NCEP 再分析资料辅助优化的 6S 大气校正流程。将利用 NCEP 辅助优化的 6S 校正结果与利用 6S 的直接校正结果进行比较,同时与基于 Landsat 标准产品的标准反射率曲线进行比对以及光谱一致性分析,以评价和验证大气校正的效果。

利用水平能见度仪反演得到的 550 nm 气溶胶光学厚度,是通过水平能见度和粒子密度及气溶胶消光系数计算得到的,其公式<sup>[13]</sup>为

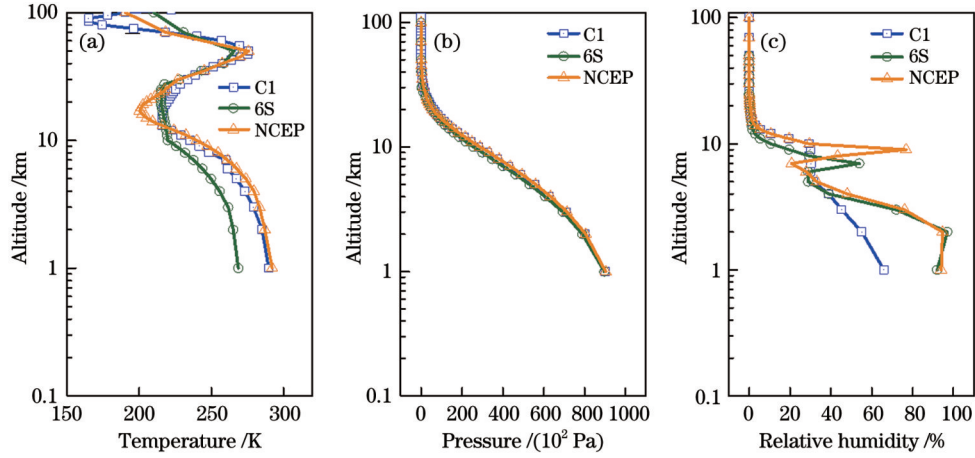


图9 2021年8月1日NCEP提供的大气温度、压力和湿度廓线。(a)大气温度;(b)压力;(c)湿度

Fig. 9 Atmospheric profiles of temperature, pressure, and humidity on August 1, 2021 by NCEP. (a) Temperature; (b) pressure; (c) humidity

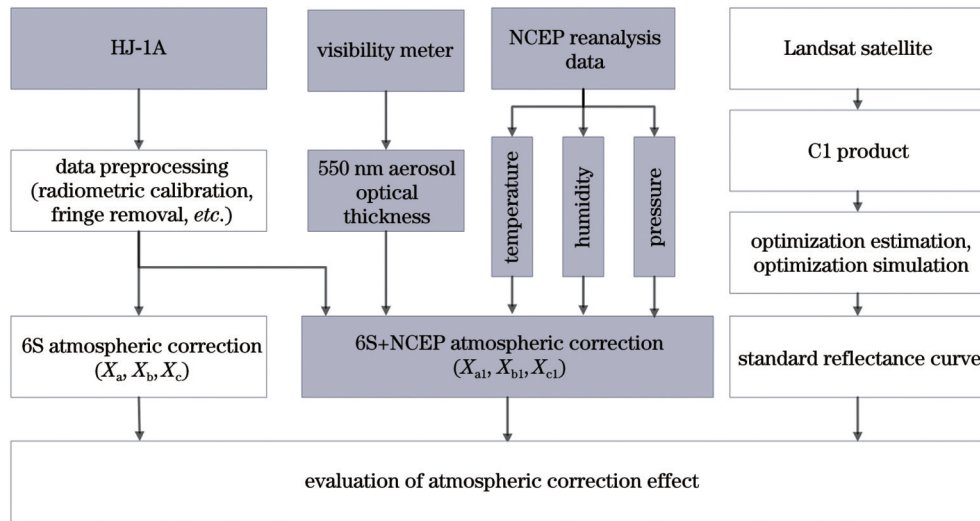


图10 大气校正流程框图

Fig. 10 Flowchart of atmospheric correction

$$\tau_{550} = \int_0^{+\infty} K_{550}(z) dz, \quad (12)$$

式中:  $K$  为气溶胶消光系数, 它与粒子数密度  $N$  有关。

$$K_{550}(z) = \sigma_{550} \cdot 10^{-3} \cdot N(z), \quad (13)$$

式中:  $\sigma_{550}$  为校正参数, 一般取值为 0.056032; 粒子数密度  $N(z)$  的单位为  $\text{cm}^{-3}$ , 其与水平能见度的关系为

$$N(z) = \frac{a(z)}{d_{\text{vis}}} + b(z), \quad (14)$$

式中:  $a(z)$  和  $b(z)$  均为系数。在 6S 模式中, 选取 23 km 和 5 km 这两种标准能见度的粒子数密度分布得到  $a(z)$  和  $b(z)$ , 通过插值的方法获得不同能见度下的粒子数密度, 再结合式 (12) 和式 (13) 得到气溶胶光学厚度。

结合 NCEP 辅助资料得到校正后的水体反射率校正光谱曲线, 如图 11 所示。图 11(a) 所示为原始的反射光谱, 图 11(b) 所示为 NCEP 辅助优化的 6S 模式校

正反射光谱曲线, 同时给出了直接利用 6S 模式的校正反射光谱和标准反射光谱曲线, 其中红色三角形为 Landsat C1 标准产品数据中 4 个波长处的反射率值。可以看出, 与 6S 模式比较, 结合 NCEP 的 6S (6S+NCEP) 模式的校正光谱在曲线走势以及数值上更接近标准反射率曲线。图 11(c) 所示为反射率相对误差。在 450~550 nm 波长范围内, 6S+NCEP 模式校正得到的反射率校正效果得到明显改善, 绝对误差由 6S 模式的 0~0.15 降至 0~0.03; 在 500~700 nm 范围内, 6S+NCEP 模式的反射率与 6S 模式的结果基本一致, 绝对误差范围为 0~0.02; 在 700~950 nm 光谱范围内, 6S+NCEP 模式的反射率结果也明显优于 6S 模式, 绝对误差范围由 6S 模式的 0~0.15 降至 0~0.02。

图 12 所示为大气校正前后水体反射率的相关性分析结果。图 12(a) 所示为直接利用 6S 模式的大气校正后结果, 所获得的水体反射率与标准反射率的决定



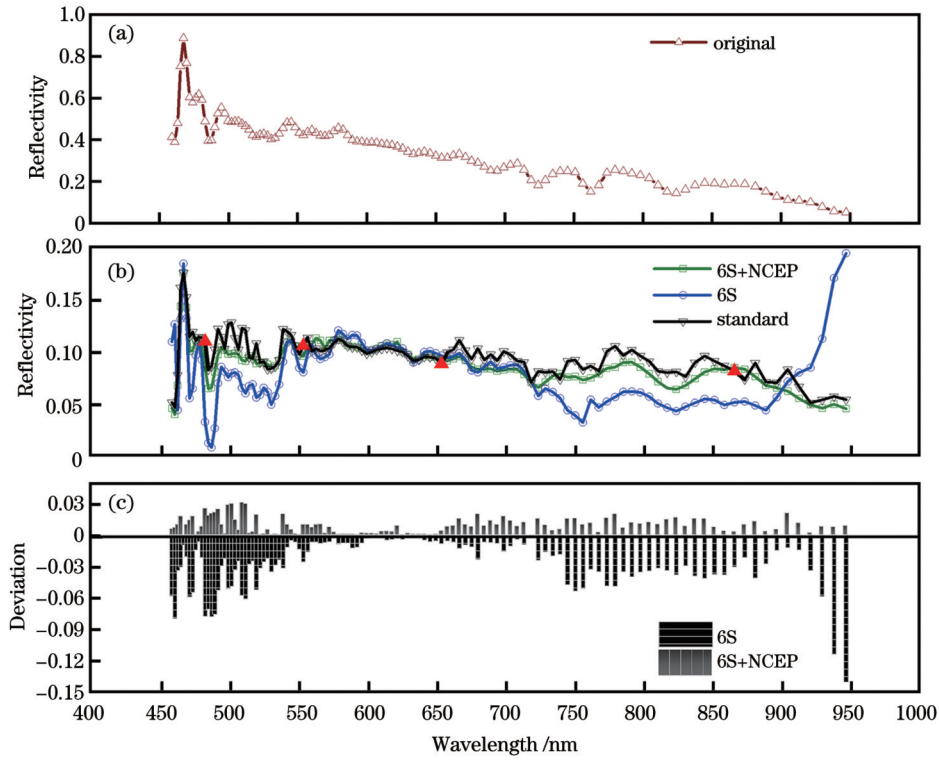


图 11 大气校正前后水体光谱曲线比较。(a)原始反射光谱;(b)校正后的反射光谱;(c)反射率相对误差

Fig. 11 Comparisons of water spectra before and after atmospheric correction. (a) Original reflection spectrum; (b) reflection spectrum after atmospheric correction; (c) relative error of reflectivity

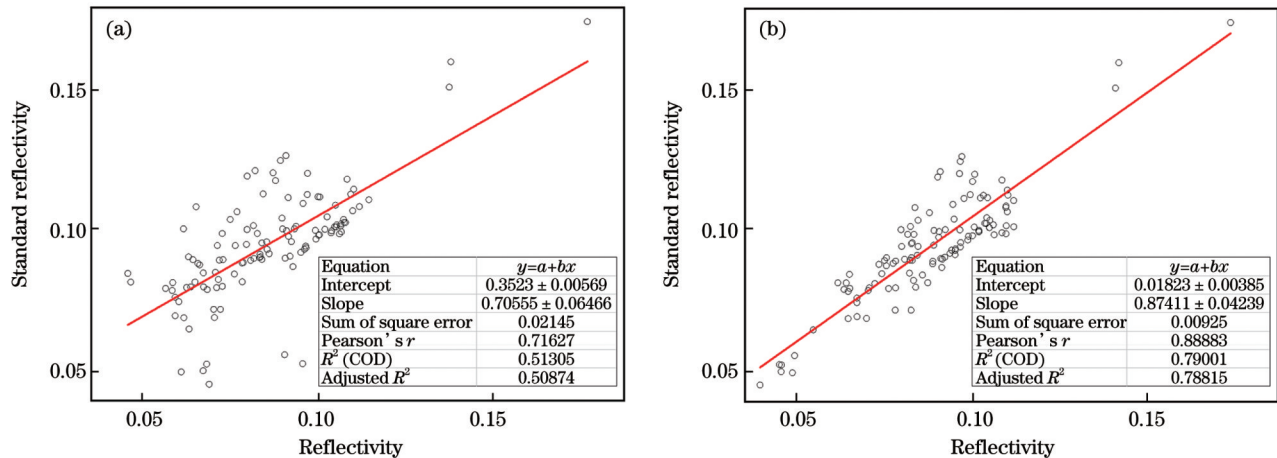


图 12 大气校正前后水体反射率相关性分析。(a)6S模式;(b)6S+NCEP模式

Fig. 12 Correlation analysis of water spectra before and after atmospheric correction. (a) 6S mode; (b) 6S+NCEP mode

系数为 0.51,均方根误差为 0.136。从图 12(b)所示的 6S+NCEP 模式的校正结果可以看出,辅助优化校正后的反射率与标准反射率之间的决定系数明显提高,约为 0.78,均方根误差显著降低,仅为 0.098,反映出 6S 模式结合 NCEP 的辅助优化校正可提高对大气校正的精度。

在进行地面反射率的一致性分析时,对 6S+NCEP 校正光谱与标准光谱曲线进行逐像元相关性分析,结果如图 13 所示。6S+NCEP 模式的地面反射率光谱曲线与标准光谱曲线的均值都在 0.02 左右,表明

两种数据中大部分区域的地面反射率大致相同;标准差均小于其值域分布范围,说明其分布集中、波动程度小。进一步地,分别选取第 12、51、96 波段对 6S+NCEP 模式的地面反射率光谱曲线与标准光谱曲线进行差值计算,相应差值图的相关统计信息变化趋势如图 14 所示。在第 12 波段,6S+NCEP 的反射光谱与标准反射光谱的平均相关系数为 0.85956,标准差为 0.06479,表现为极显著相关;在第 51 波段,6S+NCEP 的反射光谱与标准反射光谱的平均相关系数为 0.96963,标准差为 0.01273,表现为显著相关;对于第

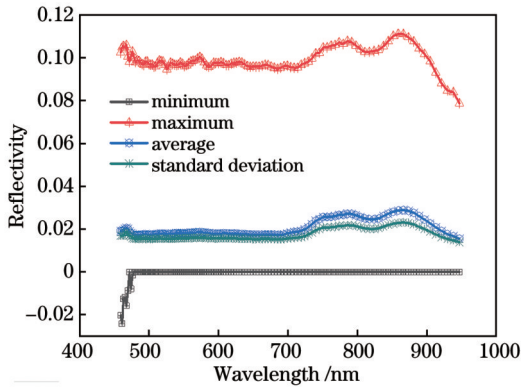


图 13 6S+NCEP 校正光谱与标准曲线的逐像元误差  
Fig. 13 Pixel-by-pixel error of 6S+NCEP correction spectra and standard curves

96 波段, 6S+NCEP 的反射光谱与标准反射光谱的平均相关系数为 0.8814, 标准差为 0.06847, 表现为显著

相关。从相关系数及其空间差异来看, 两种数据的反射光谱变化一致性好, 从相关系数及其空间差异来看, 两种光谱数据的一致性很高。

另外, 采用光谱角进行验证。以 C1 为标准光谱, 以 6S、6S+NCEP 模式的校正光谱为比较光谱, 计算得到的 6S 模式的光谱角为 47.327972, 6S+NCEP 的光谱角为 44.971423, 可见 6S+NCEP 的光谱角较小, 说明其与标准数据最接近, 此种方法的大气校正效果最好。综上, 采用 NCEP 辅助数据优化 6S 大气校正的地面反射率结果明显优于 6S 模式的大气校正结果, 与地面反射率标准曲线具有较好的一致性, 3 个特征波段的平均相关系数均高于 0.85, 标准差均小于 0.07, 各波段的地面反射率逐像元误差的平均值和标准差都接近 0.02, 表明利用 NCEP 辅助数据优化的 6S 模式对大气校正有改善作用, 可提高 6S 大气校正的地物反射率反演精度。

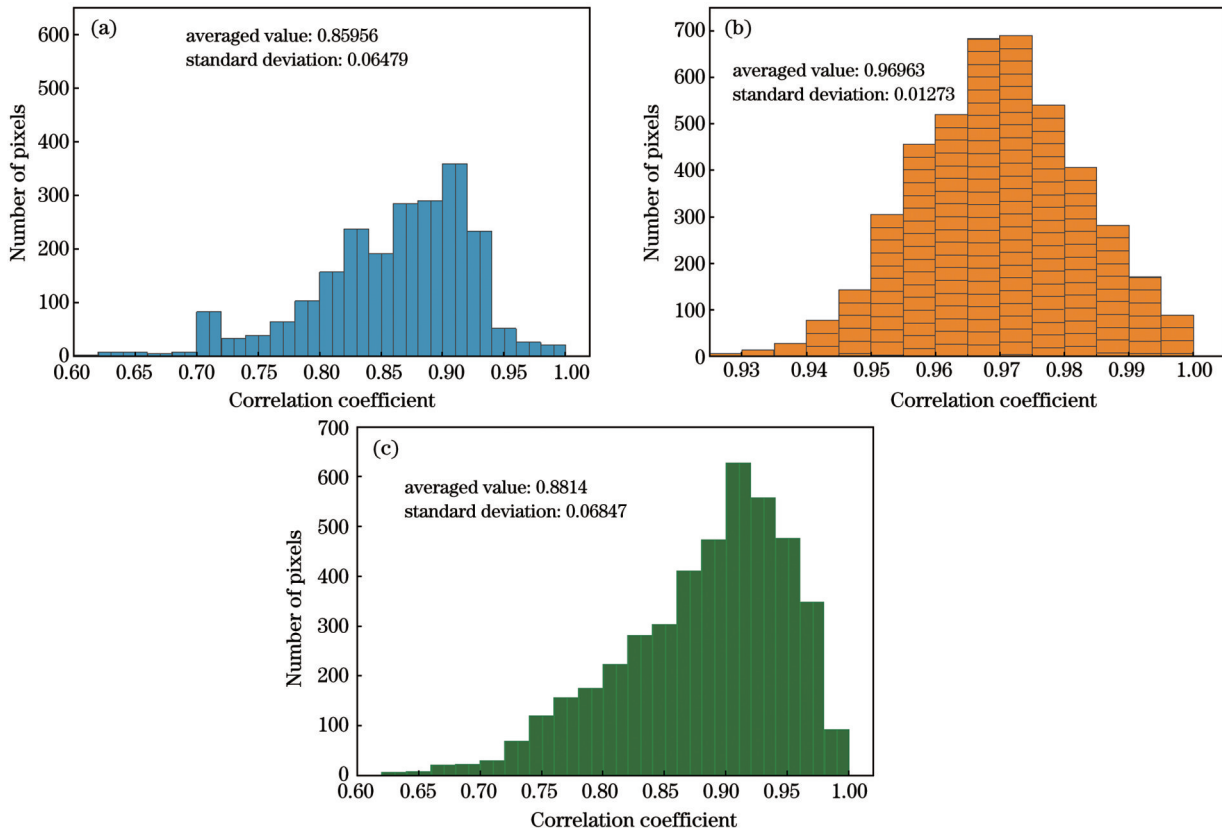


图 14 第 12、51、96 波段的相关性统计图。(a) 第 12 波段; (b) 第 51 波段; (c) 第 96 波段  
Fig. 14 Correlation charts for bands 12, 51, and 96. (a) Band 12; (b) band 51; (c) band 96

### 5.2 校正优化的输入参数贡献和影响分析

针对上述实际数据的验证, 分析大气温湿度和气溶胶光学厚度这两种输入参数对大气校正优化的贡献和影响。在其他参数不变的情况下, 分别讨论了大气温湿度、气溶胶光学厚度对反射率结果的影响, 通过分析第 12、51、96 这 3 个特征波段的地面反射率及全波段的反射率平均值来反映所提方法对结果的改善程度。图 15(a) 所示为不同校正方法得到的水体反射率结

果, 图 15(b) 所示为所提方法对结果的改善程度。以第 12 波段为例, 直接利用 6S 模式得到的水体反射率为 0.0317。当结合 AOD 后 6S 大气校正的水体反射率为 0.0556, 反射率改善程度为 46.05%; 当结合 NCEP 后 6S 大气校正的反射率结果为 0.0648, 改善程度为 63.7%。利用 AOD 的 6S 校正对第 51 波段的改善程度为 31.8%, 对第 96 波段的改善程度为 47.6%, 对结果的全波段改善程度平均值为 39.1%。NCEP 对第 51

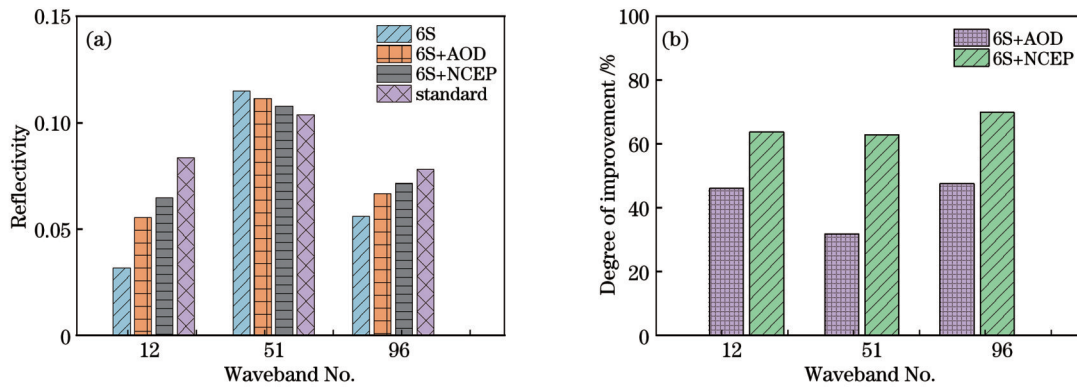


图 15 第 12、51、96 波段改善程度。(a) 水体反射率; (b) 改善程度

Fig. 15 Reflectivity and degree of improvement for bands 12, 51, and 96. (a) Water reflectivity; (b) degree of improvement

波段的改善程度为 62.9%，对第 96 波段的改善程度为 69.9%，对全波段的改善程度平均值为 65.7%。

另外，气溶胶光学厚度是通过水平能见度反演得到的，它自身的反演误差也会对反射率产生影响。本次仿真中使用的水平能见度为 13 km，对应的 550 nm 气溶胶光学厚度为 0.359。结合 NCEP 提供的温湿度参数，具体分析气溶胶光学厚度对反演结果的误差影

响。以水体为例，讨论水体在第 12、56、96 波段这 3 个波段的反射率。如图 16 所示，当光学厚度误差为 5%、10% 和 15% 时，第 12 波段水体反射率的误差分别为 2.9%、5.2%、6.8%，第 51 波段水体反射率的误差分别为 4.9%、7.9%、10.1%，第 96 波段水体反射率的误差分别为 3.5%、5.8%、9.6%，反映出气溶胶光学厚度对反射率结果的影响较小。

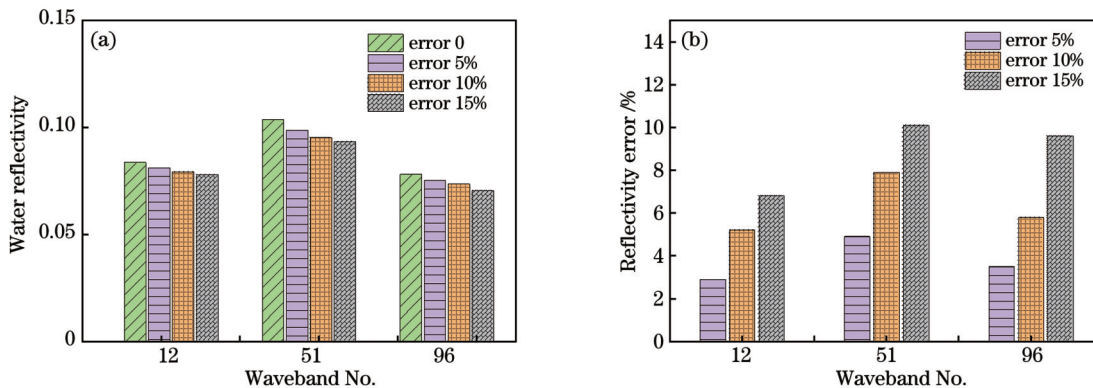


图 16 气溶胶光学厚度对反演结果的误差影响图。(a) 水体反射率; (b) 反射率误差

Fig. 16 Effect of aerosol optical thickness on the error of inversion results. (a) Water reflectivity; (b) reflectivity error

## 6 结 论

针对高光谱遥感成像的大气校正技术，以我国高光谱遥感卫星——HJ-1A 星为例，开展结合 NCEP 再分析资料辅助优化的 6S 大气校正方法的分析。首先，基于 6S 大气校正理论，对大气校正的敏感性进行分析，确定气溶胶光学厚度的最敏感因素以及气溶胶类型、大气模式和大气温湿度对大气校正系数的敏感性。然后，提出一种采用 NCEP 作为辅助数据优化的 6S 模式校正方法，利用 NCEP 再分析资料提供的大气温湿度廓线、550 nm 气溶胶光学厚度等数据资料，优化 6S 模式的输入参数，得到准确的大气校正系数  $X_a$ 、 $X_b$  和  $X_c$ ，获得大气校正后的不同地物反射光谱曲线。在对校正结果的分析 and 验证方面，基于 Landsat 的反射率产品，利用最优化估计模拟得到高光谱反射率曲线，将其

作为反射率标准曲线，并从相关性、差值统计分析以及光谱角等方面进行结果评价和精度分析。结果表明：NCEP 数据优化的 6S 模式大气校正得到的地物反射率曲线与标准曲线的绝对误差远低于 6S 模式，各波段的绝对误差也小于 6S 模式；3 个特征波段的相关性系数均高于 0.85，标准差均小于 0.07，各波段地面反射率逐像元误差的平均值和标准差都接近 0.02；NCEP 数据优化的 6S 模式大气校正得到的地物反射率曲线与标准曲线的决定系数为 0.78，高于直接利用 6S 模式得到的地物反射率曲线与标准曲线的决定系数 0.51，说明经过 NCEP 数据优化的 6S 模式对图像进行大气校正得到的高光谱图像反射率与 Landsat 模拟数据具有较好的一致性，相对于 6S 模式的校正效果更加明显；同时，NCEP 辅助数据优化 6S 模式的光谱角小于 6S 模式，降低了 2.3565，说明 NCEP 辅助数据优化 6S 模

式校正的光谱曲线更接近于标准数据。综上所述,针对高光谱图像,利用NCEP辅助数据优化6S模式进行大气校正的方法可有效改善大气校正效果。

本研究主要利用NCEP辅助优化的6S大气校正方法对西安局地的地面反射率进行了大气校正效果的评价和分析。在针对局地的大气校正技术研究中,还可以结合激光雷达遥感提供的大气气溶胶类型、温度和湿度等廓线资料,提高大气校正精度。

在对全球范围大气的校正中,往往会遇到时间匹配的问题,同时还要考虑地理差异和极端天气差异的影响。由于地球表面的气象条件在全球范围内存在较大的空间和季节变化,使用全球统一的NCEP再分析资料可能无法完全适应各种地理区域和季节变化的要求。为了克服这些局限性,可以通过区域自适应校正,不断改进优化模型和验证方法,以提高遥感数据的质量和应用的可靠性。除此之外,还可以结合ERA5和MERRA2等具有高分辨率的再分析资料开展西安局地乃至全球范围的大气校正和应用研究。

#### 参 考 文 献

- [1] 郭业才,曹佳露,韩莹莹,等.基于光谱匹配降维和特征融合的高光谱目标跟踪[J].光学学报,2023,43(20):2012002.  
Guo Y C, Cao J L, Han Y Y, et al. Hyperspectral target tracking based on spectral matching dimensionality reduction and feature fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(20): 2012002.
- [2] 张舒宁,张浩,张兵,等.一种适合高光谱卫星云识别的Fmask改进算法[J].光学学报,2023,43(24):2428009.  
Zhang S N, Zhang H, Zhang B, et al. An improved Fmask algorithm for cloud detection applied to hyperspectral satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 2428009.
- [3] Mou L C, Bruzzone L, Zhu X X. Learning spectral-spatial-temporal features via a recurrent convolutional neural network for change detection in multispectral imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 57(2): 924-935.
- [4] 李勇,金秋雨,赵怀慈,等.基于改进残差密集网络的高光谱重建[J].光学学报,2021,41(7):0730001.  
Li Y, Jin Q Y, Zhao H C, et al. Hyperspectral image reconstruction based on improved residual dense network[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0730001.
- [5] Yu X J, Yan Q, Liu Z J. Atmospheric correction of HJ-1A multi-spectral and hyper-spectral images[C]//2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, October 16-18, 2010, Yantai, China. New York: IEEE Press, 2010: 2125-2129.
- [6] Liang S L, Fang H L. An improved atmospheric correction algorithm for hyperspectral remotely sensed imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(2): 112-117.
- [7] Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, et al. Status of atmospheric correction using a MODTRAN4-based algorithm[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4049: 199-207.
- [8] Wan Z. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)[EB/OL]. [2023-04-05]. [https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod11.pdf](https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf).
- [9] Lyapustin A I, Wang Y J, Laszlo I, et al. Multi-angle implementation of atmospheric correction for MODIS (MAIAC): 3. Atmospheric correction[J]. Remote Sensing of

- Environment, 2012, 127: 385-393.
- [10] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, et al. MODIS Collection 5 global land cover: algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 168-182.
- [11] Ben-Dor E, Kruse F A. The relationship between the size of spatial subsets of GER 63 channel scanner data and the quality of the internal average relative reflectance (IARR) atmospheric correction technique[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(3): 683-690.
- [12] Zhang X, Zhang B, Geng X R, et al. Automatic flat field algorithm for hyperspectral image calibration[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5286: 636-639.
- [13] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector (6SV) [EB/OL]. [2024-01-02]. [https://salsa.umd.edu/files/6S/6S\\_Manual\\_Part\\_1.pdf](https://salsa.umd.edu/files/6S/6S_Manual_Part_1.pdf).
- [14] 阿布都瓦斯提·吾拉木,秦其明,朱黎江.基于6S模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J].北京大学学报(自然科学版),2004,40(4):611-618.  
Ghulam A, Qin Q M, Zhu L J. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis, 2004, 40(4): 611-618.
- [15] 宋晓宇,王纪华,刘良云,等.基于高光谱遥感影像的大气纠正:用AVIRIS数据评价大气纠正模块FLAASH[J].遥感技术与应用,2005,20(4):393-398.  
Song X Y, Wang J H, Liu L Y, et al. Atmospheric correction of hyper-spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2005, 20(4): 393-398.
- [16] Proud S R, Rasmussen M O, Fensholt R, et al. Improving the SMAC atmospheric correction code by analysis of Meteorat Second Generation NDVI and surface reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8): 1687-1698.
- [17] Bassani C, Manzo C, Braga F, et al. The impact of the microphysical properties of aerosol on the atmospheric correction of hyperspectral data in coastal waters[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(3): 1593-1604.
- [18] Jha S S, Manohar Kumar C V S S, Nidamanuri R R. Flexible atmospheric compensation technique (FACT): a 6S based atmospheric correction scheme for remote sensing data[J]. Geocarto International, 2021, 36(1): 28-46.
- [19] Zhou X C, Liu X P, Wang X Q, et al. Evaluation of surface reflectance products based on optimized 6S model using synchronous in situ measurements[J]. Remote Sensing, 2021, 14(1): 83.
- [20] Zhang H W, Ma Y, Zhang J Y, et al. Atmospheric correction model for water-land boundary adjacency effects in landsat-8 multispectral images and its impact on bathymetric remote sensing[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4769.
- [21] Zhou Q, Wang S, Liu N F, et al. Towards operational atmospheric correction of airborne hyperspectral imaging spectroscopy: algorithm evaluation, key parameter analysis, and machine learning emulators[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 196: 386-401.
- [22] Farid Q, Gregory D. Atmospheric correction of vegetation reflectance with simulation-trained deep learning for ground-based hyperspectral remote sensing[J]. Plant Methods, 2023, 19(1): 74.
- [23] 夏远梅,赵克全.多目标优化范数量化模型最优值的误差估计[J].系统科学与数学,2023,43(9):2319-2327.  
Xia Y M, Zhao K Q. Error estimation of optimal value of norm scalarization model for multi-objective optimization problems[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(9): 2319-2327.

# Optimized 6S Model Atmospheric Correction Method Combined with NCEP Reanalysis Data

Wang Xuedan, Wang Yufeng\*, Liu Kai, Peng Zhiqing, Liu Jingjing, Di Huige, Song Yuehui,  
Hua Dengxin

*Laser Radar Center of Remote Sensing of Atmosphere, School of Mechanical and Instrument Engineering,  
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China*

## Abstract

**Objective** Unlike panchromatic and multispectral images, hyperspectral images have a high spectral resolution that causes more difficult atmospheric correction. Additionally, the atmospheric correction methods and correction accuracy based on the 6S model have been catching attention. China has launched several hyperspectral imaging sensor payloads, such as Environment 1 satellite, Gaofen 5, and resource satellites. Meanwhile, these satellites play an increasingly important position in agricultural remote sensing, forestry remote sensing, environmental monitoring and other fields, and the atmospheric correction technology for these hyperspectral remote sensing satellites is constantly developing. Taking China's hyperspectral remote sensing satellite Environment 1 satellite as an example, we carry out an optimized 6S atmospheric correction method combined with NCEP reanalysis data to improve 6S atmospheric correction accuracy.

**Methods** First, considering the lack of standard reflectance products for hyperspectral images, the hyperspectral reflectance curve is constructed by the optimization estimation method and is regarded as the standard curve to verify the atmospheric correction results. Secondly, based on 6S atmospheric correction theory, we carry out sensitivity analysis and determine the most sensitive factors of aerosol optical thickness and the sensitivity of the aerosol model, atmospheric model, and atmospheric temperature and humidity to atmospheric correction coefficient. On this basis, an optimized 6S atmospheric correction method combined with NCEP reanalysis data is proposed. The aerosol optical thickness at 550 nm, atmospheric temperature and humidity profiles, and other data provided by NCEP are adopted to optimize the input parameters of the 6S model. Meanwhile, accurate atmospheric correction coefficients  $X_a$ ,  $X_b$ , and  $X_c$  can be obtained, and the reflectance spectral curves of different ground objects are thus obtained after optimized atmospheric correction. Finally, by choosing Xi'an as the test area, the spectral curve of the water body is compared, and the accuracy of the correction results is evaluated via the standard curve.

**Results and Discussions** The reflectance results by the 6S model and NCEP are significantly better than those by the 6S model. Compared with the standard curve, they have the same trend in spectral reflectance, and the correlation coefficient between them can reach 0.8596 with a standard deviation lower than 0.0685 (Fig. 13). The average and standard deviations of pixel-by-pixel error of ground reflectance in each band are close to 0.02, which demonstrates that the optimized 6S model with NCEP data has obvious improvement on the atmospheric correction.

**Conclusions** The absolute error of the reflectance curve and the standard curve obtained by the atmospheric correction of the 6S model optimized by the NCEP data is much lower than that of the 6S model, and the average absolute error of each band is also less than that of the 6S model. The correlation coefficients of the three characteristic bands are higher than 0.85, the standard deviation is less than 0.07, and the mean and standard deviations of the ground reflectance per pixel error in each band are close to 0.02. Additionally, the determination coefficient between the ground object reflectance curve and the standard curve obtained by 6S+NCEP data reaches 0.78, which is higher than that by the 6S model. Meanwhile, the spectral angle of the optimized 6S model is reduced by 2.3565 and less than that of the 6S model, which indicates that the corrected spectral curve of the optimized 6S model is closer to the standard data. In conclusion, the atmospheric correction method in the 6S model of NCEP-assisted data optimization for HSI hyperspectral images can effectively improve the atmospheric correction effect.

**Key words** atmospheric optics; hyperspectral image; atmospheric correction; 6S; aerosols; NCEP