



论 文

HJ-1A/B 卫星 CCD 影像大气订正

王爱春*, 傅俏燕, 闵祥军, 李杏朝, 潘志强, 韩启金

中国资源卫星应用中心, 北京 100094

* 通信作者. E-mail: wangaichun@spacechina.com

收稿日期: 2011-06-03; 接受日期: 2011-08-16

国家重大专项工程 (批准号: 科技 [2006]785 号) 资助项目

摘要 大气订正是遥感信息定量化研究中必不可少的一步, 目前已有一些成熟的方法, 但由于 HJ-1A/B 卫星 CCD 相机波段设置特点, 常规的大气订正方法基本不适合于 HJ-1A/B CCD 影像. 本文在大量分析 HJ-1A/B CCD 影像中不同地物的多种指数基础上, 提出了改进暗目标法实现 HJ-1A/B CCD 影像的大气订正, 该方法采用比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI) 的综合分析法确定暗像元自动提取, 使之适用于环境减灾卫星 CCD 影像数据. 为了客观地验证该方法的精度, 本文选取地表平坦均一的敦煌校正场作为实验区, 通过多次测量卫星过境时的地表反射率进行分析验证.

关键词 HJ-1A/B CCD 暗目标 大气订正 方法验证

1 引言

由于遥感成像对地面物体辐射的探测和收集是在大气中进行的, 大气层是遥感信息传输的必经介质, 电磁波在大气传输过程中会与大气发生一系列的相互作用, 包括大气吸收、折射、吸收与散射、湍流效应等, 从而导致其传输特性发生改变. 因此, 遥感信息必然在不同程度上受到大气的影 响, 造成光学成像系统分辨率的降低、遥感信息的失真、有效可观测时间和区域的减小等, 从而对遥感图像的质量和遥感图像的解译及定量分析产生很大的影响.

环境与灾害监测预报卫星, 要为国家环境保护和灾害预报、抗灾、救灾提供准确、科学的决策依据, 要求对不同地点、不同时间和不同的传感器获取的遥感数据进行比较和应用, 及时掌握灾害的细节及许多具体情况. 采用定性的判断解译无法满足环境污染与灾害监测的要求, 这必然要求定量化, 才能更好地完成环境变化和自然灾害等遥感监测. 对于遥感定量化, 就要详细考虑大气对辐射传输过程的定量影响. 通过对大气光学、物理特性参数的观测研究以及对目标/背景/大气辐射传输综合表征的研究, 对大气的影 响做出准确的订正, 就可以实现地物目标辐射特性真实再现, 达到提高遥感信息质量及定量化应用水平目的. 因此, 从环境减灾卫星影像中消除大气影 响、开展大气订正获取地物真实反射率研究具有重要意义.

遥感影像的大气订正始于 20 世纪 70 年代, 经过 30 多年的发展, 产生了许多的大气订正方法. 其中广泛应用的是暗目标法, 已被成熟应用于 MODIS, TM, ETM/ETM+, AVHRR 和 MERIS 等^[1-4]

影像上,其基本原理是假定待订正遥感图像上存在暗像元区域 (Teillet 等^[5] 归纳出浓密植被、清洁水体和山地阴影可选作暗目标)、地表 Lambert 面反射、大气性质均一的前提下,反射率很小的暗像元由于大气的影响,而使得这些像元的反射率相对增加,可以认为这部分增加的反射率是由于大气路径散射的影响产生的. 利用暗像元值计算出路径散射,获得相应的大气参数气溶胶光学厚度后,并代入适当的大气辐射传输模型,进行大气订正即可得到地表的真实反射率. 这种方法直接、简易,其订正精度可以满足遥感定量化应用的需要,具有较强的实用性.

暗目标法的关键技术主要在于对遥感图像中暗像元的有效确定. Chavez^[6] 根据遥感图像不同波段的直方图,特别是对于可见光波段,从零亮度值对应的像元到非零亮度值对应的像元数量有一个很快的上升,像元数量突然增加处所对应的亮度值就可以当作暗像元值;或者是图像直方图由非零亮度值开始,逐渐随像元个数增高,则非零亮度值开始处对应的亮度值就可以当作暗像元值. 由于图像成像时的大气状况通常存在明显差异,传感器设置不同和各个波段增益也不同,比值突变像元数突增处,可能是地物的边缘处,也可能是水体和其他低辐射地物的混合物,因此大气订正的精度受限.

Holben 等^[7] 提出可以利用中红外波段来确定可见光波段的暗像元. 文献 [1-3] 通过大量的实验发现,可见光波段暗像元的反射率与这些像元在中红外波段反射率存在很好的线性关系, $\rho_{\text{blue}} = 0.25\rho_{2.1\mu\text{m}}$, $\rho_{\text{red}} = 0.5\rho_{2.1\mu\text{m}}$, Kaufman 等^[8] 认为,由于 $2.1\mu\text{m}$ 波长比大部分气溶胶微粒的直径要大,故该波段受气溶胶影响可以忽略,因此在该波段暗物体所对应区域的辐亮度值可以认为和地面反射的辐亮度值相同. 根据这种关系,利用中红外波段发现了可见光波段的暗像元,这种方法比较客观,精度也很好. 可是由于 HJ-1A/B 卫星传感器的波段设置中没有 $2.1\mu\text{m}$ 中红外波段,因此在实践中很难应用此法来进行大气订正.

Kaufman 等^[9] 也采用归一化植被指数 (NDVI) 进行暗目标确认. Huete 等^[10,11] 进一步研究指出 NDVI 的局限性,在植被生长初期,NDVI 将过高估计植被指数,而在植被生长后期则会出现饱和和现象从而降低植被指数,这样不利于作为浓密植被暗目标的提取;同时 NDVI 受土壤背景的影响大,植被非完全覆盖时,土壤背景对其影响很大,且在具体反演时受季节变化等因素的限制.

针对 HJ-1A/B 卫星的具体情况和以上所涉及的问题,本文对 NDVI 确定暗像元进行改进,采用比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI) 的综合分析法确定暗像元自动提取,使之适用于环境减灾卫星 CCD 影像数据,最终实现对 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像的大气订正,并采用多天敦煌实测地表数据进行分析验证.

2 大气订正方法

传感器在成像过程接收到的信息是太阳光、大气及其地表相互作用的总贡献,在忽略电磁波的极化效应,大气为水平方向具有各向同性、垂直方向变化的平面,地表面为平坦的具有各向同性的 Lambert 的假设前提下,基于 Chandrasekhar^[12] 大气辐射传输理论,为太阳辐射经过地气系统衰减最终被传感器接收的过程建立辐射传输模型^[13],其在太阳反射光谱区 ($0.4\sim 3.0\mu\text{m}$) 传感器入瞳处的表观辐射亮度 L_{app} 可表示为

$$L_{\text{app}}(\theta_s, \theta_v) = L_{\text{path}} + \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s) \cdot e^{-\tau/\mu_v}}{\pi} \times \frac{1}{1 - \rho_a \cdot S} \rho_o + \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s) \cdot t_d(\theta_v)}{\pi} \times \frac{1}{1 - \rho_a \cdot S} \rho_a, \quad (1)$$

其中, E_s : 大气外太阳光谱辐照度; L_{path} : 大气路径辐射亮度; ρ_o : 地表真实反射率; ρ_a : 邻接目标地区的反射率; S : 大气球面反照率; τ : 大气光学厚度; θ_s : 太阳天顶角, $\mu_s = \cos \theta_s$; θ_v : 观测天顶角,

$\mu_v = \cos \theta_v$; $t_d(\theta_s)$: 向下方向 (太阳到地面) 的大气漫射散射因子; $t_d(\theta_v)$: 向上方向 (地面到传感器) 的大气透射散射因子; $T(\theta_s) = e^{-\frac{\tau}{\mu_s}} + t_d(\theta_s)$: 向下方向的大气散射透过率。

为了后续处理分析, 将方程 (1) 进行简化, 令 $A = \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s) \cdot e^{-\tau/\mu_v}}{\pi}$, $B = \frac{E_s \cdot \mu_s \cdot T(\theta_s) \cdot t_d(\theta_v)}{\pi}$, 则有

$$L_{\text{app}}(\theta_s, \theta_v) = L_{\text{path}} + \frac{A}{1 - \rho_a \cdot S} \rho_o + \frac{B}{1 - \rho_a \cdot S} \rho_a. \quad (2)$$

基于上述大气辐射传输方程, 本文采用暗目标法对 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像进行大气订正, 其大气订正方法流程如图 1 所示, 具体大气订正步骤大致可分为以下几步: 首先对影像进行预处理得到表观辐亮度和表观反射率图像, 计算植被和水体指数, 采用比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI) 的综合分析法确定暗目标; 其次, 利用确定的暗目标, 通过辐射传输模型建立的查找表确定参数 A, B, S ; 最后, 通过确立的各参数求解大气辐射传输方程, 得到每个像元的地表真实反射率, 并采用实测地表数据进行分析验证。下面将对几个主要步骤详细讨论。

2.1 数据预处理

(1) 表观反射率计算。

大气订正算法中改进暗目标法提取的各指数值是基于表观反射率图像, 为此需要对图像进行预处理。首先, 要将影像的 DN 值转换为表观辐亮度 L_{app} :

$$L_{\text{app}} = \text{Gain} \times \text{DN} + \text{Bias}, \quad (3)$$

式中: Gain 为增益、Bias 为偏移量, 从影像头文件或中国资源卫星应用中心网站^[14]获取。

接着可将传感器入瞳处所接受的表观辐射亮度转换为表观反射率 ρ_{app} :

$$\rho_{\text{app}} = \frac{\pi \cdot L_{\text{app}} \cdot d^2}{\cos \theta_s \cdot E_s}, \quad (4)$$

式中: d 是日—地距离订正因子; E_s 是大气外太阳光谱辐照度; θ_s 是太阳天顶角。这些参数部分可从影像头文件获得, 部分可查中国资源卫星应用中心网站中的相关内容。

(2) 各指数的计算。

通过线性或非线性等组合将遥感数据波段建立的数学关系称为指数。改进暗目标的提取主要是依据比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI)^[16-22] 的综合分析法实现, 其各指数的计算公式如下:

$$\text{RVI} = \frac{R_{\text{nir}}}{R_{\text{red}}}, \quad \text{SAVI} = \frac{R_{\text{nir}} - R_{\text{red}}}{R_{\text{nir}} + R_{\text{red}} + L} (1 + L), \quad \text{NDWI} = \frac{R_{\text{green}} - R_{\text{nir}}}{R_{\text{green}} + R_{\text{nir}}}, \quad (5)$$

其中, R_{green} , R_{red} , R_{nir} 分别为绿波段、红波段、近红外波段的表观反射率; L 为土壤调整因子, 常取 $L = 0.5$ ^[11]。

2.2 查找表建立

对于同一景 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像, HJ-1A/B 卫星过境时间很短大约为几秒, 成像时刻内的大气变化不大, 故可认为是恒定的; 那么, 不同地表反射率经过相同的大气, 在传感器入瞳处的表观辐射亮度不同, 表现为图像上的 DN 值也不同, 但这些不同的 DN 值包含了成像时相同的大气情况即 L_{path} ,

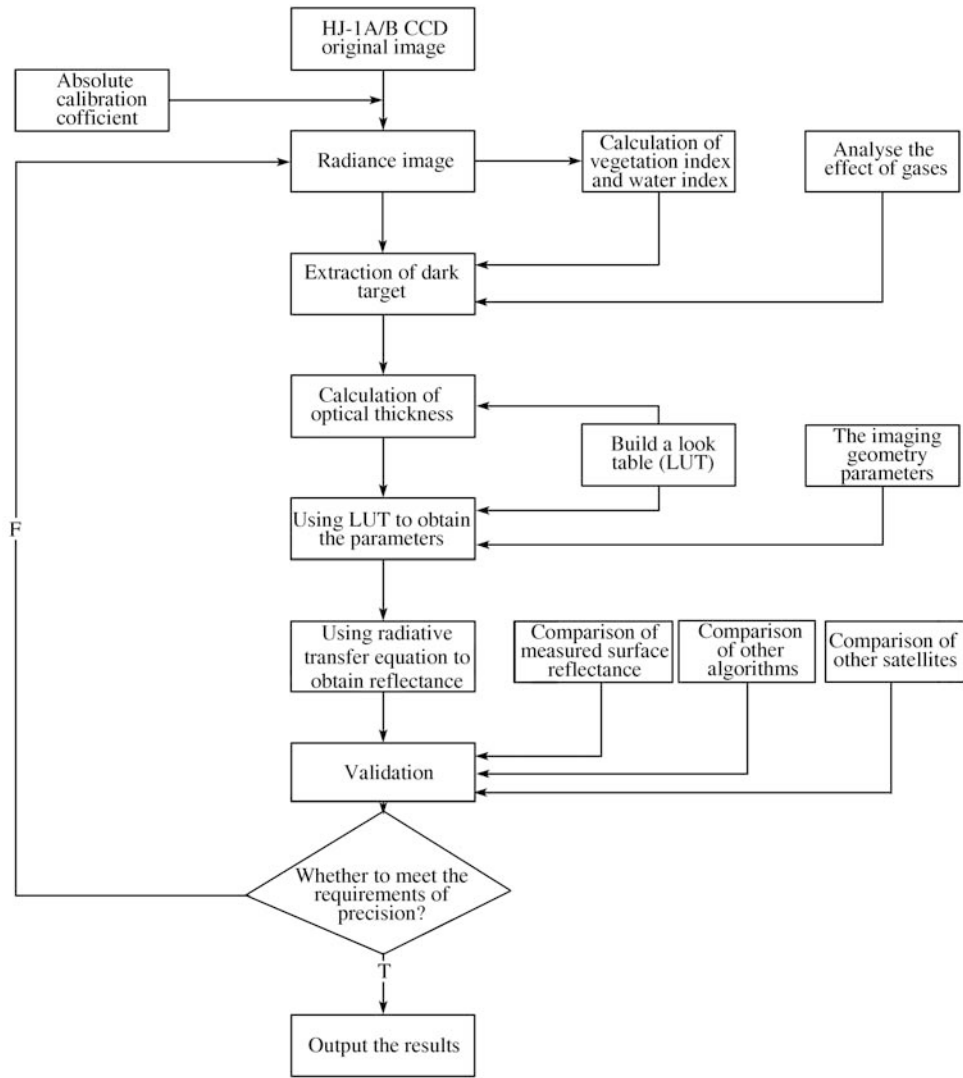


图 1 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像大气订正算法流程

Figure 1 Flow of atmospheric correction for HJ-1A/B CCD

A , B , S , 为此在确定的观测几何和大气状态参数的情况下, 令地表反射率分别为如下情况, 代入大气辐射传输方程 (2) 可得 L_{path} , A , B , S , 其分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_o = \rho_a \Rightarrow L_{\text{path}} = L_0; \\ \rho_o = 1.0, \rho_a = 0 \Rightarrow A = L_{1.0} - L_0; \\ \rho_o = 0, \rho_a = \begin{cases} 0.5 \Rightarrow S = \frac{2L_{0.5} - L_{1.0} + L_0}{L_{1.0} - L_{0.5}} \\ 1.0 \Rightarrow B = (L_{1.0} - L_0)(1 - S); \end{cases} \end{array} \right. \quad (6)$$

其中, L_0 , $L_{0.5}$, $L_{1.0}$ 分别为地表反射率为 0, 0.5 和 1.0 时对应的传感器入瞳处的表观辐射亮度值.

由上可知, 只需要存储对应于特定大气和气溶胶模式下, 以气溶胶光学厚度 τ 、太阳天顶角 θ_s 、观

测方位角 θ_v 和相对方位角 φ_{s-v} 为索引的 L_{path} , A , B , S 的值, 即可求得对应于不同传感器入瞳处的表观辐射亮度下所对应地表真实反射率值.

为此采用 MODTRAN 大气辐射传输模型^[15] 建立以 τ , θ_s , θ_v 和 φ_{s-v} 为索引的查找表, 针对影像的地理位置与季节特点, 各个参数设置如下, 其他值在它们之间线性内插得到:

- 2 个大气模式: 中纬度夏季和中纬度冬季;
- 3 个气溶胶模式: 大陆模式、城市工业模式和沙尘模式;
- 12 气溶胶光学厚度: 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0;
- 10 个太阳天顶角 (单位: 度): 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85;
- 6 个观测天顶角 (单位: 度): 0, 10, 20, 30, 40, 50;
- 10 个相对方位角 (单位: 度): 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180.

2.3 暗目标确定

依据 HJ-1A/B 卫星 CCD 传感器波段设置特点, 本文针对暗目标法在 HJ-1A/B 卫星大气订正应用时存在的问题进行了改进, 采用比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI) 的综合分析法实现暗目标的自动提取.

改进暗目标法的核心思想基于各种指数是对地物光谱特殊性与变化规律的间接反映, 通过多种指数的综合分析、相互补充实现对暗目标的精确提取. 本文通过选取大量不同经纬度、不同时相的 2 级 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像, 在各影像上分别选取了植被、水体和建筑等多种典型地物类型, 对每种地物进行样点采集统计, 计算适合 CCD 波段的 8 种指数: 比值植被指数 (RVI)、归一化差异植被指数 (NDVI)、土壤可调植被指数 (SAVI)、大气阻抗植被指数 (ARVI)、土壤和大气阻抗植被指数 (SARVI)、增强型植被指数 (EVI)、可见光大气阻抗植被指数 (VARI) 和归一化差异水体指数 (NDWI)^[16-22]. 通过对多种典型地物多种指数的综合分析对比, 选用分类性很好的 SAVI 和 NDWI 作为植被和水体与其他地物区别的特征变量; 另外, 当植被覆盖度较高时, RVI 对植被十分敏感, 可以选其作为浓密植被的一个识别依据. 因此本文采用比值植被指数 (RVI)、土壤调整植被指数 (SAVI) 和归一化水体指数 (NDWI) 作为综合分析法, 通过决策树方法逐步实现了对近红外波段清洁水体和蓝光波段浓密植被作为暗目标的自动提取, 决策树判断条件的阈值通过地面调查和不同经纬度、不同时相的大量影像指数统计值的反复实验给出, 植被判断条件阈值选取需满足 $1.0 > T1 > T2 > 0$, $S1 > S2 > 2$, 其中 $T1$ 和 $T2$ 为 SAVI 的变量值, 其 $S1$ 和 $S2$ 为 RVI 的变量值; 水体判断条件阈值选取需满足 $1.0 > K1 > K2 > 0$, $1 > S4 > S3 > 0$, 其中 $K1$ 和 $K2$ 为 NDWI 的变量值, 其 $S3$ 和 $S4$ 为 RVI 的变量值. 另外, 为了保证大气订正的精度, 依据面积大小可为植被和水体设定选取数, 算法初始值设置最小像元数 ≥ 10 (HJ-1A/B 卫星 CCD 影像的分辨率是 30 m, 因此 10 个像元数相当于面积大于 9 km²). 整个改进暗目标自动提取算法流程如图 2.

2.4 气溶胶光学厚度计算

对于低反射率地物 (如近红外波段的水体和蓝光波段的植被), 其所受到的影响主要是气溶胶, 其他因素的影响很小, 因此, 可采用暗目标来反演气溶胶光学厚度. 通过改进暗目标自动提取近红外波段的清洁水体或中等水体和蓝光波段的浓密植被或中等植被的暗目标, 依据查找表可以确定近红外波段和蓝光波段的气溶胶光学厚度, 然后跟据 Ångström 气溶胶光学厚度与波长之间的指数关系 $\tau_i = a\lambda_i^b$,

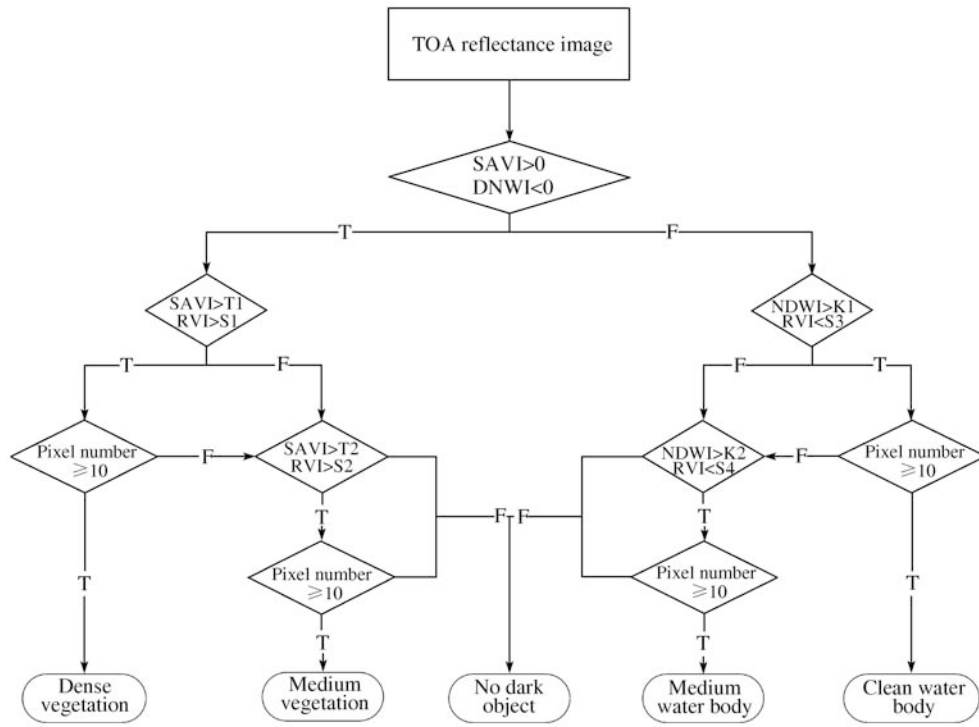


图 2 改进暗目标自动提取算法流程图

Figure 2 Scheme of the steps used in the determination dark object

可以确定出其他波段的气溶胶光学厚度值, 式中 τ_i 和 λ_i 分别为对应波段的气溶胶光学厚度值和中心波长; a 称为大气浑浊度参数, b 表征气溶胶粒子相对大小的参数, b 越大, 粒子尺度越小, 反之亦然. 由蓝光波段和近红外波段的气溶胶光学厚度值可通过 Ångström 公式联立求得 b 为

$$b = \frac{\ln \tau_{\text{blue}} - \ln \tau_{\text{nir}}}{\ln \lambda_{\text{blue}} - \ln \lambda_{\text{nir}}}. \quad (7)$$

将式 (7) 得到的 b 代入 $\tau_i = a\lambda_i^b$ 可得

$$a = \frac{\tau_{\text{blue}}}{\lambda_{\text{blue}}^b} = \frac{\tau_{\text{nir}}}{\lambda_{\text{nir}}^b}, \quad (8)$$

式中 τ_{blue} , λ_{nir} 和 τ_{nir} , λ_{blue} 为对应蓝波段和近红外波段的气溶胶光学厚度值和中心波长.

3 订正结果与精度分析

本文对 HJ-1A/B CCD 影像大气订正的实验区选在敦煌校正场, 整个敦煌场区属戈壁, 面积约为 45 km×30 km(图 3 红色区域, 其像元数约 1500×1000 个), 地表平坦均匀可近似为各向同性的 Lambert 体, 从而保证准确地从图像上找到对应的纯像元, 同时, 为了有效地减小实验时测量误差和其他目标的邻近散射影响对每个样本点进行多次测量, 使验证对比结果更加可靠.

图 3(a) 是由 HJ-1A/B 卫星过敦煌时 CCD 第 4 波段 (近红外波段)、第 3 波段 (红光波段) 和第 2 波段 (绿光波段) 合成的标准假彩色图像. 图 3(b) 是利用前面建立的查找表和改进暗目标法对此幅影像进行大气订正, 得到大气订正后的近红外、红光和绿光波段地面反射率标准假彩色合成图像.

本文主要从下面 3 个方面加以分析.

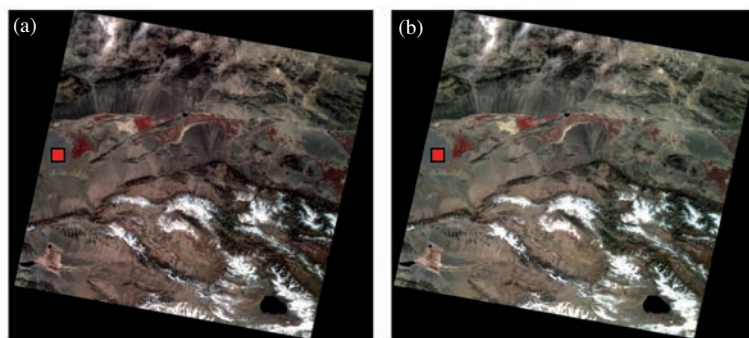


图 3 大气订正前后对比图

Figure 3 Comparison of the original image and the correction image

(a) The original image in Dunhuang; (b) the correction image in Dunhuang

(1) 直方图分析, 从信息量及能量分布特征说明大气订正的有效性:

直方图能够反映图像的信息量及分布特征, 大气订正的结果间接地改变了图像的直方图, 为此, 将大气订正前该图像的各个波段的表观反射率和大气订正后各波段的地表反射率作直方图统计, 分析大气订正对 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像各波段的影像. 图 4 所示为图像各波段大气订正前后反射率的直方图.

大气对 HJ-1A/B 卫星太阳反射波段的影响是短波波段的大气散射较强, 而长波波段的大气散射较弱, 所以大气订正对短波波段比对长波波段更明显, 波长越短, 大气散射作用越强. 另外, 大气对蓝光、绿光和红光波段的影响以散射为主, 吸收较弱, 而对近红外波段的吸收较强, 因此, 大气订正前 3 个波段的反射率应该比表观反射率低, 而近红外波段的反射率比表观反射率高. 由图 4 大气订正前后各波段的反射率对比可以发现, 大气订正结果与大气对 HJ-1A/B 卫星太阳反射波段的影响分析一致, 短波波段的反射率直方图向低反射率方向移动, 而近红外波段的反射率直方图向更高反射率移动, 且蓝光、绿光和红光波段的反射率直方图移动的幅度逐渐减小, 大气订正前后的图像整体视觉效果和反射辐射亮度有明显的变化.

(2) 大气订正反射率与表观反射率曲线比较, 从曲线分布趋势说明大气订正的直观性:

地物反射率曲线是地物固有的反射特性, 它不仅能够反映地物的反射率随波长的变化规律, 而且较为直观地反映出某一特定波长不同地物的反射率差异. 图 5 和 6 是典型地物植被和水体的表观与订正反射率曲线, 通过比较, 可以清晰直观地说明大气订正效果.

植被反射率其特性表现在绿光波段有一个小的反射峰, 两边的蓝波段和红波段有两个吸收带, 在曲线上为凹谷, 在近红外波段形成高反射率. 图 5 中植被表观反射率曲线, 受大气影响在蓝光和绿光波段反射率值较高且数值相差不多, 不能反映植被特性, 而经过大气订正后, 蓝光波段的反射率降低多达 44%, 绿光波段降低多达 11%, 红光波段的反射率升高约 3.3%, 近红外波段反射率值升高约 6.8%, 反射率曲线在绿光波段明显形成小反射峰, 整个反射率曲线与植被反射率特性更为一致.

水体反射率其特性表现在蓝绿波段反射, 其他波段强吸收, 特别是在近红外波段吸收更强. 从图 6 的反射率曲线可知, 经大气订正后的水体反射率都有不同程度的降低, 蓝光波段最大为 37.8%, 其次近红外波段为 19.7%, 红光波段约 11.3%, 绿光波段约 10.8%, 表观反射率最大值出现在蓝光波段, 而订正反射率最大值出现在绿光波段, 这更加接近水体反射率特性.

通过植被和水体两种典型地物表观与订正反射率曲线的比较可知, 表观反射率虽然经过了绝对辐射校正, 但它是地面反射率和大气反射率的总和, 不能反映地物的特性, 而经过大气订正的反射率更能

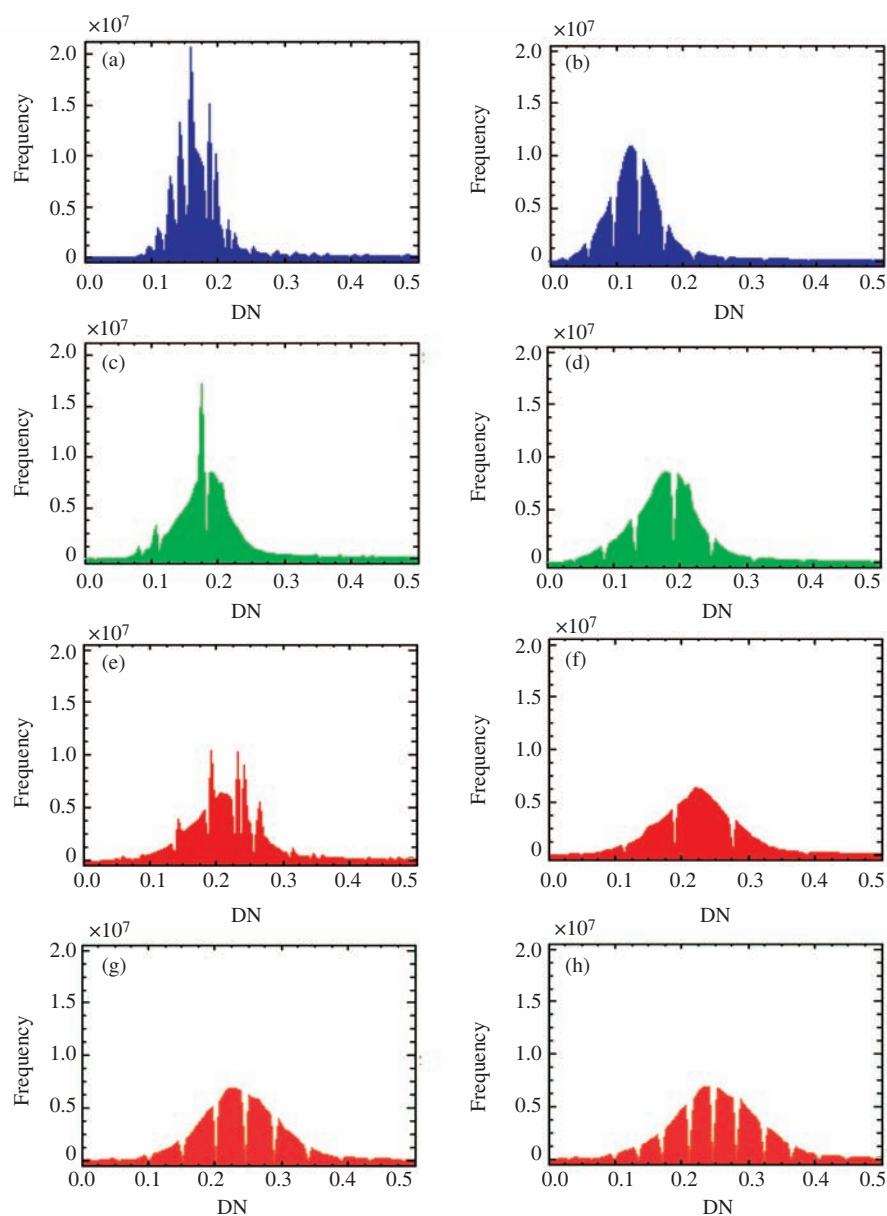


图 4 HJ-1A/B 卫星 CCD 各波段大气订正前后直方图比较

Figure 4 Comparison of the original histograms and the correction histograms for HJ-1A/B CCD

(a) Blue band of the original image; (b) blue band of the correction image; (c) green band of the original image; (d) green band of the correction image; (e) red band of the original image; (f) red band of the correction image; (g) nir band of the original image; (h) nir band of the correction image

真实反映地物的辐射特性.

(3) 大气订正后反射率与实测地表反射率对比, 采用两者相对误差给出大气订正的精度:

为了客观说明大气订正的精度, 本文除了采用敦煌校正场 2008 年 10 月 14 日实地测量数据外, 还分析了 2008 年 10 月 18 日和 20 日的实测数据, 经过数据处理与分析, 将 HJ-1A/B 卫星 CCD 图像的表现反射率、大气订正后地表反射率和实测地表反射率相比较, 其结果差异, 如表 1 和图 7-9.

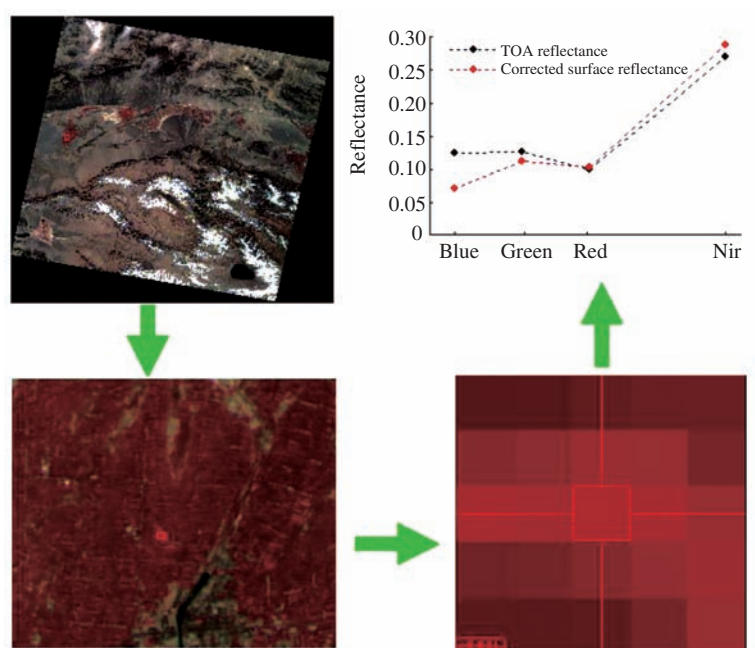


图 5 植被表观与订正反射率曲线

Figure 5 Comparison of the TOA reflectance and the correction reflectance in vegetation

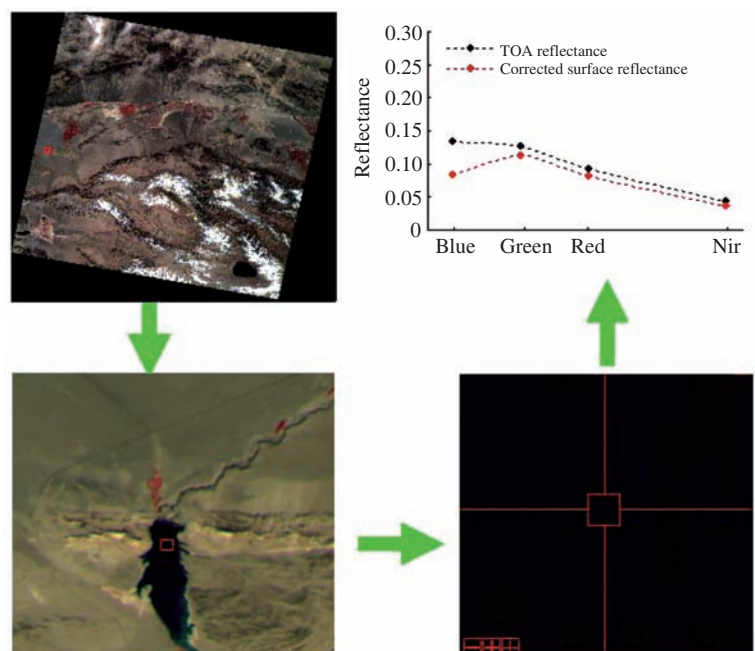


图 6 水体表观与订正反射率曲线

Figure 6 Comparison of the TOA reflectance and the correction reflectance in water

由表 1 和图 7-9 可知: 敦煌校正场地表 (戈壁) 未经大气订正前蓝光、绿光波段反射率数值差别很小, 变化平缓; 经过大气订正后, 蓝光通道的反射率明显降低, 近红外波段的反射率明显升高, 在可见光波段反射率值与实测地表反射率非常接近, 波谱曲线分布趋势相对一致, 且较稳定.

表 1 敦煌校正场订正地表反射率和实测地表反射率对比

Table 1 Results of the TOA reflectance and the correction reflectance in DunHuang¹⁾²⁾

Date	Parameter	Blue	Green	Red	Nir
2008/10/14	TOA reflectance	0.19483	0.19555	0.21358	0.22232
	Measured surface reflectance	0.16433	0.20136	0.22591	0.24083
	Corrected surface reflectance	0.16291	0.19143	0.21662	0.23520
	Difference	0.00142	0.00993	0.00929	0.00563
	Relative error	0.86411	4.93147	4.11226	2.33775
2008/10/18	TOA reflectance	0.18845	0.18810	0.21003	0.22725
	Measured surface reflectance	0.16910	0.20427	0.22300	0.23583
	Corrected surface reflectance	0.17046	0.19912	0.23078	0.24970
	Difference	0.00136	0.00515	0.00778	0.01387
	Relative error	0.80426	2.52117	3.48879	5.88136
2008/10/20	TOA reflectance	0.18628	0.18726	0.20498	0.22157
	Measured surface reflectance	0.17934	0.21535	0.23351	0.24786
	Corrected surface reflectance	0.16352	0.20475	0.23872	0.24854
	Difference	0.01582	0.01060	0.00521	0.00068
	Relative error	8.82123	4.92222	2.23117	0.27435

1) Difference=|Measured surface reflectance – Corrected surface reflectance|;

2) Relative error= $\frac{\text{Difference}}{\text{Measured surface reflectance}} \times 100\%$.

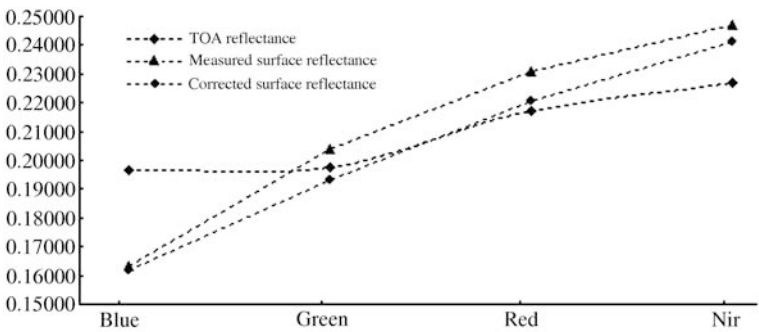


图 7 2008/10/14 敦煌校正场订正地表反射率和实测地表反射率对比

Figure 7 Comparison of the TOA reflectance and the correction reflectance on October 14 2008

未经大气订正前戈壁的表观反射率与实测地表反射率在各个波段差别都较大, 经过大气订正后, 其订正与实测相差不大. 绿光波段和红光波段订正与实测的相对误差均小于 5%, 大气订正效果十分理想; 近红外波段订正与实测的相对误差波动较大, 但也均小于 6%; 蓝光波段在 14 日和 18 日的订正与实测误差小于 1%, 而在 20 日订正与实测误差小于 8%, 可能是当天测量时有云对测量结果造成一定影响.

综上分析, 未经大气订正的图像 DN 值只是进入传感器入瞳处的表观辐射亮度的一种数字转换形式, 不能本质地反映地物的辐射特性. 表观反射率虽然经过了绝对辐射校正, 但它是地面反射率和大

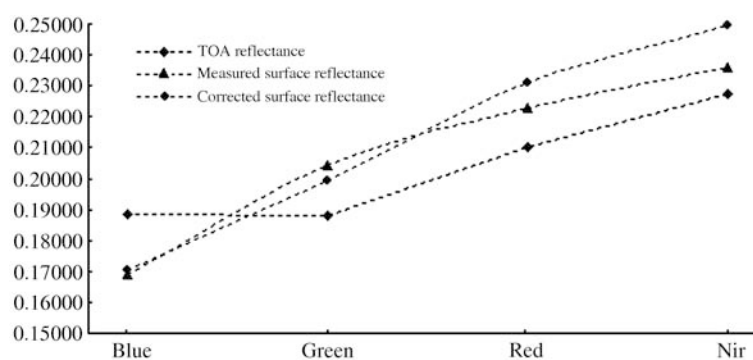


图 8 2008/10/18 敦煌校正场订正地表反射率和实测地表反射率对比

Figure 8 Comparison of the TOA reflectance and the correction reflectance on October 18 2008

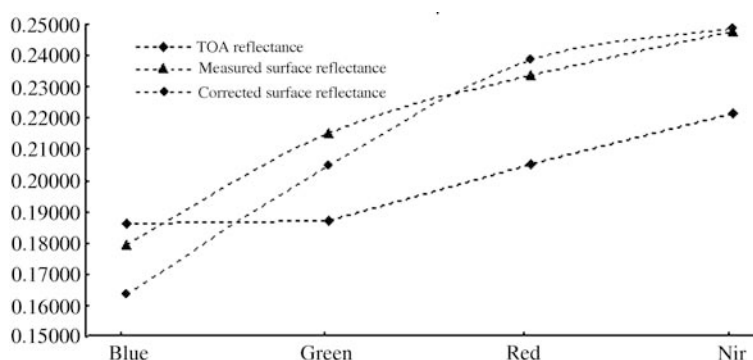


图 9 2008/10/20 敦煌校正场订正地表反射率和实测地表反射率对比

Figure 9 Comparison of the TOA reflectance and the correction reflectance on October 20 2008

为接近实测的地表反射率, 即更接近地表真实反射率, 更能真实反映地物的辐射特性, 算法在绿光和红光通道大气订正效果非常良好, 订正后的结果与地表真实反射率值非常接近, 在其他波段, 经过订正后的反射率与实测地表反射率曲线分布相符合, 这使大气订正后的图像更加适宜在地物识别、定量反演和模拟中应用。

4 结论

大气订正是 HJ-1A/B 卫星数据定量反演的关键, 由于 HJ-1A/B 卫星 CCD 传感器波段设置的特点, 常规的大气订正方法很难直接应用. 本文对暗目标法进行改进, 使之更加适用于 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像数据, 最终实现对 HJ-1A/B 卫星 CCD 影像的大气订正, 并采用多天敦煌实测地表数据进行分析验证. 验证对比分析, 从信息量及能量分布特征说明了大气订正的有效性, 从大气订正反射率与表观反射率曲线的分布趋势说明了大气订正的直观性, 最后从大气订正后反射率与实测地表反射率误差对比说明了大气订正的精确性. 通过多方面的对比分析可知, 文中采用的大气订正方法简便快捷, 大气订正效果理想, 并在 HJ-1A/B 卫星处理系统中试运行。

参考文献

- 1 Kaufman Y J, Wald E A, Remer L A, et al. The MODIS 2.1 μm channel-correction with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 1286–1298
- 2 Liang S, Fallah-Adl H, Kalluri S, et al. An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land. *J Geophys Res*, 1997, 102: 17173–17186
- 3 Ouaidrari H, Vermote E F. Operational atmospheric correction of Landsat TM data. *Remote Sens Environ*, 1999, 70: 4–15
- 4 Saleous N E, Vermote E F, Roger J C. Operational atmospheric correction of AVHRR visible and near infrared data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32: 220–222
- 5 Teillet P M, Fedosejevs G. On the dark target approach to atmospheric correction of remotely sensed data. *Can J Remote Sens*, 1995, 21: 374–387
- 6 Chavez Jr P S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sens Environ*, 1988, 24: 459–479
- 7 Holben B N, Vermote E F, Kaufman Y J, et al. Aerosols retrieval over land from AVHRR data-application for atmospheric correction. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 212–222
- 8 Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery. *Int J Remote Sens*, 1988, 9: 1357–1381
- 9 Kaufman Y J, Tanre D, Holben B N, et al. Atmospheric effects on the NDVI-strategies for its removal. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 1238–1241
- 10 Huete A R, Liu H Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1994, 32: 897–904
- 11 Huete A R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens*, 1988, 51: 138–156
- 12 Chandrasekhar S. Radiative Transfer. London: Oxford University Press, 1950
- 13 Vermote E F. Atmospheric Effect in the Solar Spectrum. Maryland: University of Maryland, 2000
- 14 China Center for Resources Satellite Data and Application. 2010 HJ-1 A/B in-orbit absolute radiometric calibration coefficients. [Http://www.cresda.com/n16/n1100/n1310/138547.html](http://www.cresda.com/n16/n1100/n1310/138547.html)
- 15 Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN4 User's Manual. MA: Air Force Research Laboratory, 1999
- 16 Gutman G G. Vegetation indices from AVHRR: an update and future prospects. *Remote Sens Environ*, 1991, 35: 121–136
- 17 Huete A R, Justice C, Liu H Q. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sens Environ*, 1994, 49: 224–234
- 18 Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 261–270
- 19 Myneni R B, Asrar G. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. *Remote Sens Environ*, 1993, 41: 390–402
- 20 Gao B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid crop water from space. *Remote Sens Environ*, 1996, 58: 257–266
- 21 Li X W, Wang J D, Hu B X, et al. On utilization of prior knowledge in inversion of remote sensing model. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 41: 580–586
- 22 Xu H Q. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) (in Chinese). *J Rem Sens*, 2005, 9: 589–595
- 23 Liang S, Fang H, Chen M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery-part I: methods. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, 39: 2490–2498
- 24 Vermote E F, Saleous N Z, Justice C O. Atmospheric correction of MODIS data in visible to middle infrared: first results. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 97–111
- 25 Vermote E, Tanre D, Deuzé J L, et al. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S). Lille: Laboratory of Atmospheric, 1997

Atmospheric correction for the HJ-1A/B satellite CCD sensor

WANG AiChun*, FU QiaoYan, MIN XiangJun, LI XingChao, PAN ZhiQiang & HAN QiJin

China Center for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

*E-mail: wangaichu@chinaspace.com

Abstract Atmospheric correction is a necessity in quantitative research using remote sensing information. Although several different methods are available, none of them are directly applicable to HJ-1A/B satellite CCD sensors. In this paper, we develop a specific method of atmospheric correction for this sensor by improving on the dark object method using RVI (ratio vegetation index), SAVI (soil adjusted vegetation index) and NDVI (normalized difference vegetation index) indices, and validating the procedure using multiple-day satellite images of Dunhuang, China.

Keywords HJ-1A/B CCD, dark object, atmospheric correction, validation