

应用 6S 模式对 EOS-MODIS 可见光到中红外波段的大气订正*

张杰¹⁾²⁾ 王介民³⁾ 郭 锐¹⁾²⁾

¹⁾ (中国气象局兰州干旱气象研究所,兰州 730020)

²⁾ (甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,兰州 730020)

³⁾ (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000)

摘 要

应用 6S 辐射传输模式对 MODIS 可见光到中红外波段的反射率进行大气订正,订正过程分两步进行:首先设定地表为朗伯体,再应用二向反射模型 BRDF 进行订正,订正结果与美国 MODIS 研究组应用 MAS 实验结果进行比较表明,两者变化趋势是一致的;经过臭氧、水汽、气溶胶等散射吸收订正,对于一定范围的反射率,大气订正使植被区红光波段反射率 ρ 降低,近红外波段反射率 ρ 增加,蓝光波段反射率 ρ 降低;大气订正后,归一化植被指数 I_{NDV} 较大气订正前有所增加,增加的最大值为 0.104,抗土壤-大气植被指数 I_{EV} 值略有减小,减小的最大值为 0.005。

关键词: 6S 辐射传输模式 EOS-MODIS 大气订正 植被指数

引 言

Terra 是美国最新发射的对地观测极轨卫星,MODIS 是 Terra 卫星的传感器之一,是为研究全球环境的空间和时间序列变化而设置的,可提供每日的全球数据,为研究全球环境变化提供了机会。NASA 不但发展了 MODIS 算法,而且提高了 MODIS 许多波段的分辨率,如可见光到中红外波段,而可见光到中红外光谱遥感为了解生物圈及其动力学变化提供了重要信息。20 世纪 80 年代以来,红外和近红外波段数据(如:AVHRR)被用来研究植被^[1],可见光和中红外数据(如 TM 等)被用来研究土地利用和土地覆盖变化,MODIS 传感器是基于 AVHRR 和 TM 实验基础而设计的,美国应用这些波段已经取得了一些产品,如植被指数、叶面积指数、地表反照率、土地覆盖变化以及积雪覆盖等等^[2]。

要获得地表的准确信息,有必要在遥感研究和应用中尽量削弱大气的影响。常规的大气订正多基于大气辐射传输理论和地面为各向同性的朗伯体假设,应用辐射传输方程进行。然而地面并非朗伯体,许多研究表明,朗伯体假设会产生很大的误差,这是因为大多数地物具有随入射和反射各向异性的反射特性,即地面的二向特性 BRDF。人们通常

* 国家自然科学基金“MODIS 植被指数在西北地区应用研究”项目(40375011)资助。

2003-05-26 收到,2004-04-27 收到再改稿。

在大气相互作用模型中通过计算地面 BRDF 与大气的耦合因子来描述下垫面^[3]。王开存^[4]分别对 NOAA-AVHRR 数据进行不同方式的大气订正,结果表明,先假设下垫面为朗伯体,然后经过一次基于地面各向异性的 BRDF 反演迭代,所获得的地面反射率误差较小;胡宝新等^[5]使用 Rossthoick-lispase 核驱动模型,对 MODIS/MISR 多角度采样进行 BRDF 迭代前后的误差分析,结果表明,反演前误差为 2%~16%,反演后则降到 0.4%~6.2%。因此有必要考虑 BRDF 过程的订正。

6S(Second simulation of satellite signal in the solar spectrum)辐射传输模式不但考虑了气体吸收、分子和气溶胶散射,还考虑了非均匀地表和边界条件的二向反射,在太阳—地物—传感器的光线传输路径中,对光线受大气的影 响进行了不同的描述^[6],其中包括了 9 种较为成熟的描述二向反射的核驱动模型,有物理模型、经验模型和半经验模型,目前应用较多的是 Roujean 半经验模型^[7],它用体散射项和几何散射项两个核函数描述物体表面对入射光和反射光的二向特性。本文应用 6S 模式对 EOS/MODIS 卫星数据进行大气订正,首先设定地表为朗伯体,再应用 Roujean 二向反射模型进行订正。

1 图像数据的采集

本研究选用的 MODIS 资料包括 2001 年 8 月 21 日 12:00(北京时,下同)敦煌—安西绿洲—玉门冲积扇区域的资料,范围为 40.05°~40.55°N,94.45°~97.45°E;2001 年 8 月 13 日到 8 月 29 日(由于阴天缺少 18、21、28 日 3 天的资料)内蒙古五原地区的植被下垫面:A 点位于(41.0648°N,107.2447°E),B 点位于(41.079°N,108.403°E)。选取上述两个区域的主要原因是:敦煌、安西绿洲、玉门冲积扇区域为西北干旱区的 3 个主要绿洲,是研究西北植被变化的主要区域;分析不同天顶角的反射率和植被指数的大气订正需要一个周期的资料,考虑到 MODIS 资料重复周期为 16 d^[8],所以在选取该区域时尽可能挑选了目标区最长的晴空日,经筛选,选取了内蒙古五原地区的植被下垫面。

根据 6S 模式需要,选用一些大气订正的输入参数,包括图像像素点的一些几何参数,如像素经纬度、高度、太阳方位角、太阳天顶角、卫星方位角、卫星天顶角以及未订正的地面反射率等。在遥感处理软件 ENVI 环境下,读取 MODIS 的 hdf 格式文件,并对已定标的 hdf 数据进行地理定位和数据转换处理,得到相应的地表反射率。在订正过程中,气溶胶模式采用大陆气溶胶模式,大气模式为中纬度夏季大气模式。

2 结果分析

2.1 不同卫星天顶角的反射率和植被指数的大气订正

利用 2002 年 8 月 13 日到 8 月 29 日的 MODIS 资料,研究内蒙古五原地区的植被下垫面反射率变化。太阳天顶角 θ_s 变化范围为 24.75°~35.64°,卫星天顶角 θ_v 为 8.71°~64.68°,太阳、卫星天顶角的变化都会引起反射率的变化,为了综合考虑其对反射率的影响,定义一个角度 θ_{sv} ^[4]:

$$\cos \theta_{sv} = \cos \theta_s \cos \theta_v$$

研究中选取的连续数日资料,每日过境的时间很接近,所以这里仅考虑卫星天顶角对反射率变化的影响,后向散射 $\theta_v \in [-60^\circ, 0^\circ]$,前向散射 $\theta_v \in [0^\circ, 60^\circ]$ 。图 1(a)、(c) 分别给出了 A 点和 B 点可见光波段的红光(band 1)、蓝光(band 3)、绿光(band 4)波段大气订正前后的反射率;图 1(b)、(d) 分别给出了 A 点和 B 点大气订正前后近红外到中红外波段(band 2、band 5、band 6、band 7)的反射率;图 1(e)、(f) 分别给出了 A、B 点大气订正前后归一化植被指数 I_{NDV} 的变化特征见图 1。

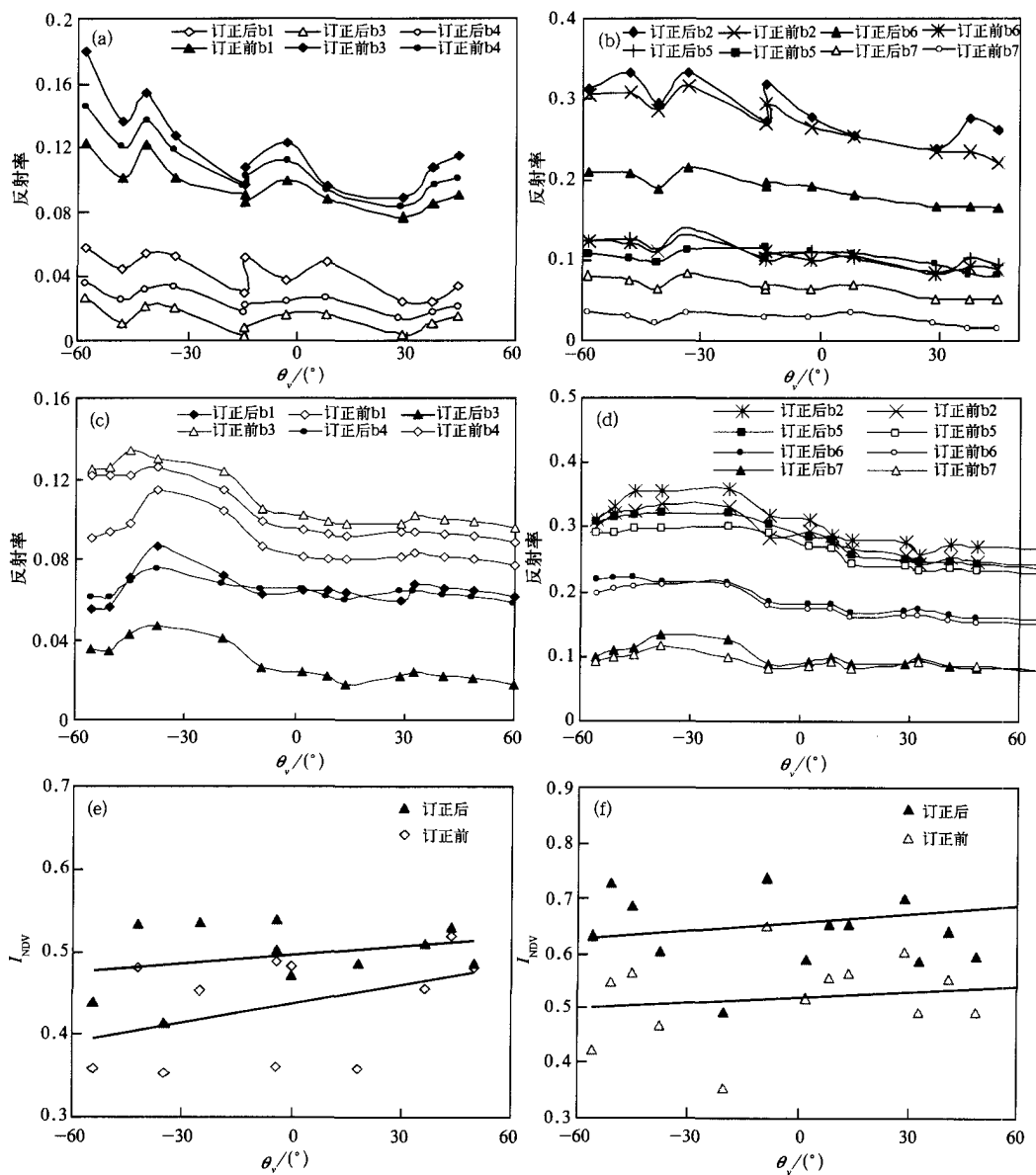


图 1 五原地区大气订正前后各波段的反射率和 I_{NDV} 随卫星天顶角 θ_v 的变化

(a)、(c) 分别为 A 点和 B 点可见光波段大气订正前后的反射率,(b)、(d) 分别为 A 点和 B 点近红外波段大气订正前后的反射率,(e)、(f) 分别为 A 点和 B 点大气订正前后 I_{NDV} 的变化。

从图1可看出,不论是订正前还是订正后,可见光波段的反射率和近红外波段、中红外波段的反射率的变化都比较明显,并随卫星天顶角的变化有相同的变化趋势。在一定波段范围内,对于可见光波段(图1a、c)的反射率,订正后的结果都小于订正前,并且订正后的结果基本趋于一致;对于近红外波段和中红外波段的反射率(图1b、d),订正后的结果都大于订正前,不论订正前后,各个波段随前向和后向散射的变化趋势有一致性的特点,并且订正后的结果基本趋于一致,其前向和后向反射率随角度的变化和 Vermore 等^[9]用 MAS(MODIS Airborne Simulator)实验结果相一致。

不论是订正前还是订正后,归一化植被指数 I_{NDV} 随卫星天顶角的变化也比较明显(图1e、f),订正后 I_{NDV} 较订正前大,并且变化趋势有所减小;对于不同区域,前向散射和后向散射的 I_{NDV} 变化趋势有所不同,对于同一物候期的植物,产生这种变化趋势的原因是各种地表类型因叶冠结构、阴影和背景贡献引起的二向光谱特性,但比值植被指数并不能消除依赖于二向反射率分布函数(BRDF)响应的表面各向异性。大气通过增加远离星下点观测像元的光学路径抵消地面二向反射率分布函数(BRDF)信号。前向散射产生较高的 I_{NDV} 值,后向散射则相反^[8]。如何确定 I_{NDV} 的下垫面真实值,已有文献^[9]等针对 NOAA AVHRR 提出最大 I_{NDV} 合成技术法(MVC)等,但 MVC 在近朗伯体表面的假定条件下工作很好,而在 EOS 时代,地面各向异性和二向反射率对植被指数合成产品的影响因改进了大气修正而更加突出。Meyer 等^[10]认为选取一段时段内的最大 I_{NDV} 值的方法,对无云像元进行累积或平均,将是优于 MVC 方法的一种方法。

2.2 大气订正对植被波段反射率的影响分析

植被指数是业务和研究中比较常用的重要参数,本文对此进行了详细分析。

MODIS 植被指数通常使用红色可见光波段($0.62 \sim 0.67 \mu\text{m}$),近红外光谱波段($0.841 \sim 0.876 \mu\text{m}$)组合设计归一化植被指数 I_{NDV} ,用红色可见光波段($0.62 \sim 0.67 \mu\text{m}$)、近红外光谱波段($0.841 \sim 0.876 \mu\text{m}$)、蓝光波段 B3($0.459 \sim 0.479 \mu\text{m}$)组合计算抗土壤-大气植被指数 I_{EV} 。本文选取 2002 年 8 月 21 日晴空天气的敦煌—安西绿洲—玉门冲积扇的区域,进行可见光反射率 ρ 、近红外波段反射率 ρ 、蓝光波段反射率 ρ 的大气订正,由于图像范围较大,所采集的 ρ 、 ρ 、 ρ 反射率数据分辨率为 500 m,图 2(a)、(b)、(c)分别为 ρ 、 ρ 、 ρ 订正前后的反射率变化。结果表明,大气订正使植被区 ρ 降低,非植被区 ρ 升高;对所有的植被和非植被区,大气订正使 ρ 有所增加, ρ 有所降低。原因是光线在传输过程中,由于大气的作用,使得红色波段的信号加强,订正后在一定程度上减弱了大气的作用,所以植被区 ρ 值有所减小;而近红外信号由于散射和水汽吸收等大气衰减作用而减弱,经过大气订正后削弱了这种衰减作用使 ρ 有所增加。大气订正使空气中水汽、臭氧、气溶胶粒子等对各波段反射率的影响大大降低^[8]。

2.3 大气订正对植被指数的影响分析

植被指数也是遥感的基本地表参数。NOAA 系列卫星将归一化植被指数 I_{NDV} 延续了近 20 年,并为人们了解全球陆地覆盖变化提供了大量信息。新的卫星运转以后,人们最关注的就是对 I_{NDV} 的延续以及能否用更精确的产品代替等问题,所以,对遥感数据的订正首先考虑获取较为准确的地表参数。彩图 3 为 2002 年 8 月 21 日晴空天气状况下,敦煌—安西绿洲—玉门冲积扇大气订正前后植被指数分布。订正前,敦煌绿洲、安西绿洲

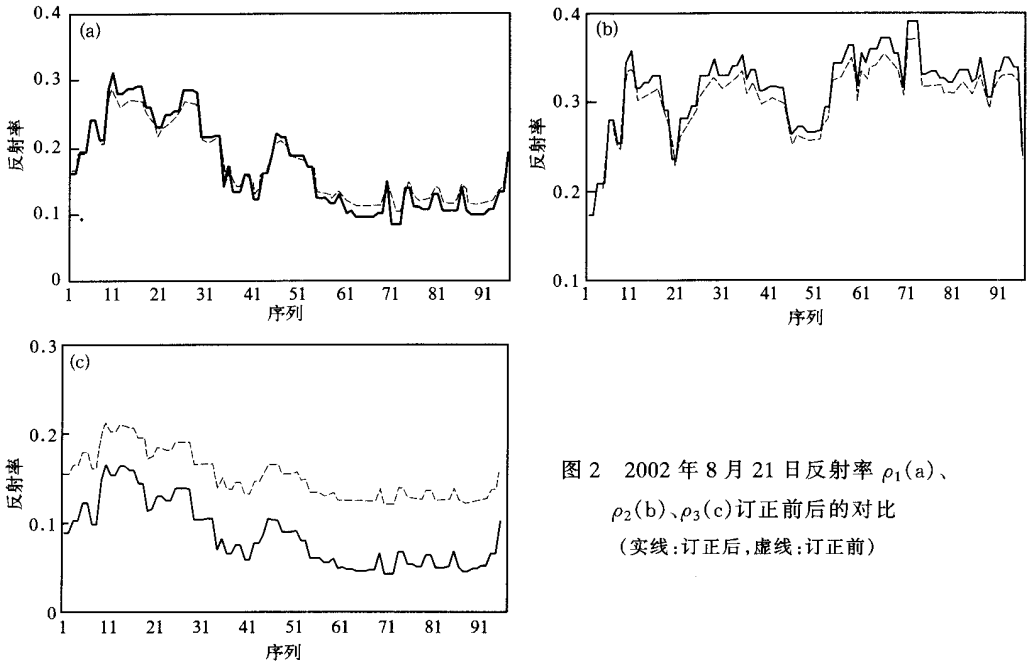


图 2 2002 年 8 月 21 日反射率 ρ_1 (a)、 ρ_2 (b)、 ρ_3 (c) 订正前后的对比 (实线:订正后,虚线:订正前)

和玉门冲积扇的 I_{NDV} 主要分布范围分别为 $0.35 \sim 0.55$ 、 $0.35 \sim 0.55$ 、 $0.15 \sim 0.25$, 订正后 I_{NDV} 值有增加趋势, 大于 0.55 的区域扩大, 其他范围的值也有所增加, 敦煌绿洲和安西绿洲的 I_{NDV} 大部分在 0.45 以上, 玉门冲积扇的 I_{NDV} 在 0.25 以上的区域也有所增加; 大气对 I_{EV} 的影响与 I_{NDV} 相反, 订正前, 敦煌绿洲和安西绿洲区的 I_{EV} 主要分布范围分别为 0.45 以上, 玉门冲积扇区在 $0.15 \sim 0.45$ 之间, 订正后 I_{EV} 值有减少趋势, 敦煌绿洲和安西绿洲区的 I_{EV} 基本小于 0.35 , 而玉门冲积扇区的 I_{EV} 则小于 0.25 。上述结果也说明大气订正前后 I_{NDV} 和 I_{EV} 的变化在空间上有差异, 造成这种差异的原因不但与目标物的属性有关, 而且与卫星观测角度也有关。

为了更直观地比较大气对植被指数获取的影响程度, 对图 3 沿 $40.4^\circ N$ 线取了 97 个点进行分析, 其中, 包括了不同覆盖类型的植被和非植被区特征(如图 4)。图 4a 表明, 大

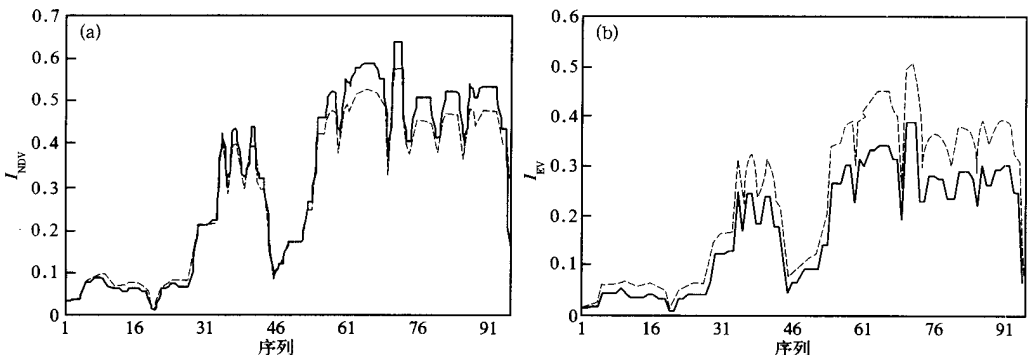


图 4 2002 年 8 月 21 大气订正前后 I_{NDV} (a) 和 I_{EV} (b) (沿 $40.4^\circ N$) 的变化(实线:订正后,虚线:订正前)

气订正使 I_{NDV} 值有所增加,增加幅度在 $0 \sim 0.062$ 之间,植被区变化幅度较裸地大;大气降低了红色和近红外反射信号的对比度, I_{NDV} 信号衰减与大气中气溶胶含量有关,大气越浑浊,衰减越大。研究表明^[10],大气效应对 I_{NDV} 的影响以气溶胶最为严重($0.04 \sim 0.2$),其次是水汽($0.04 \sim 0.08$),再次是瑞利散射($0.02 \sim 0.04$)。图 4b 表明,大气订正使 I_{EV} 值有所降低,降低幅度在 $0 \sim 0.024$ 之间,植被区变化幅度较裸地大。

3 结 论

本研究运用 6S 辐射传输模式对 MODIS 可见光波段到中红外波段进行大气订正,得出如下结果:

(1) 应用 6S 辐射传输模型,分两步进行 MODIS 资料的大气订正,先进行朗伯体表面的大气订正,然后进行 BRDF 订正,并且选用 Roujean 半经验模型作为 BRDF 的核驱动模型。

(2) 不论前向和后向散射,大气订正使可见光波段反射率有所降低,近红外波段和中红外波段反射率有所升高,并且前向反射率较后向反射率呈增加趋势,但总体而言,大气订正后,前向和后向反射率基本趋于一致。

(3) 大气订正使归一化植被指数 I_{NDV} 有所增加,并且 I_{NDV} 随卫星天顶角的变化趋势显著减弱;订正后 I_{EV} 有所降低。

参 考 文 献

- 1 Toker C J, Gatlin J A, Schneider S T. Monitoring vegetation in the Nile delta with NOAA-6 and NOAA-7 AVHRR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1984, **50**(1): 53 ~ 61.
- 2 Justice C O, Vermote E, Townshend J R, et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS); Land remote sensing for global change research. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, **36**(4): 1228 ~ 1249.
- 3 龙飞,赵英时.多角度 NOAA 卫星数据地面 BRDF 反射率的大气订正. *遥感学报*, 2002, **6**(3): 173 ~ 178.
- 4 王开存.对 NOAA/AVHRR 可见光和近红外反射率及 NDVI 资料的订正:[学位论文].兰州:兰州大学,2001.
- 5 胡宝新, Wolfgang W, 李小文,等.表面 BRDF 反射率大气订正的敏感度分析. *遥感学报*, 1997, **1**: 187 ~ 191.
- 6 Vermote E F, Tanre S, Deuze J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, **35**: 325 ~ 368.
- 7 Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D18): 20455 ~ 20468.
- 8 刘玉洁,杨忠东,郭东华,等. MODIS 遥感信息处理原理与算法.北京:科学出版社,2001. 232 ~ 236.
- 9 Vermote E F, Saleous N E, Justice C O, et al. Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation. *Journal of geophysical research*, 1997, **102**(14): 17131 ~ 17141.
- 10 Meyer D, Verstraete M, Pinty B. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. *Remote Sens Rev*, 1995, **12**: 2 ~ 27.

ATMOSPHERIC CORRECTION OF VISIBLE TO MIDDLE-INFRARED OF EOS-MODIS DATA OVER LAND SURFACES BY USING 6S MODEL

Zhang Jie¹⁾²⁾ Wang Jie min³⁾ Guo Ni^{1) 2)}

¹⁾ (Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020)

²⁾ (Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020)

³⁾ (Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

Atmospheric correction of visible to middle-infrared of MODIS data over land surfaces is done by using 6S model. There are two processes of the correction, first, objective is assumed as the Lambertian surface, then bi-directional BRDF model Roujean is operated. Comparing the corrected result with the MODIS airborne simulator (MAS) which MODIS research group using in experiment, the result shows that there is consistency characteristic on their variety trends. The reflectance of near-infrared band ρ and blue band β are falling, but the red spectral band ρ is rising by operating at atmosphere corrected. I_{NDV} is higher and I_{EV} is lower after atmosphere is corrected, the largest value of variety are 0.104 and 0.005.

Key words: 6S model EOS-MODIS Atmospheric correction I_{NDV} I_{EV}

张 杰等：应用6S模式对EOS-MODIS 可见光到中红外波段的大气订正

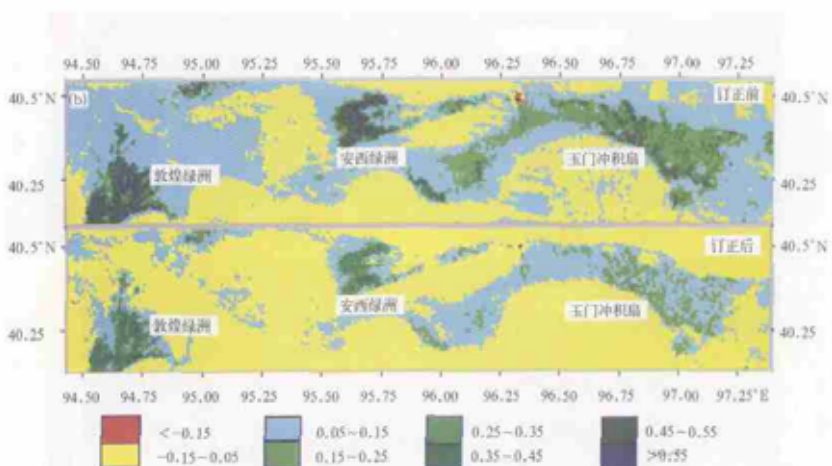
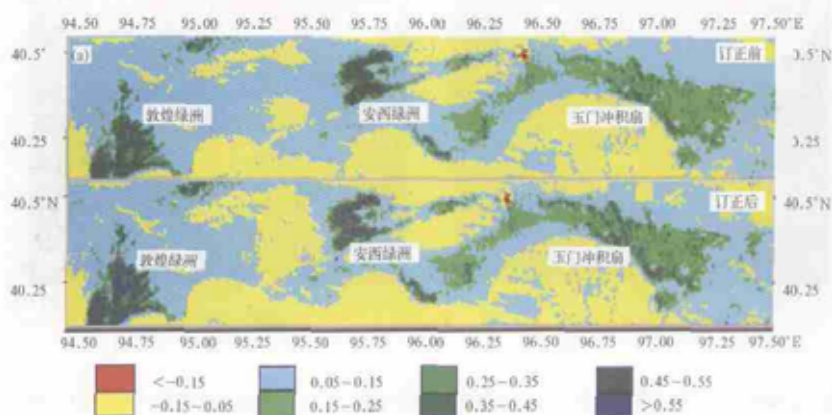


图3 2002年8月21日晴空状况下,敦煌—安西绿洲—玉门冲积扇
大气订正前后 I_{NDVI} (a)和 $I_{0.65}$ (b)对比