

大气辐射校正软件 LEDAPS 与 FLAASH 对比研究

张鹏^{1,2},王学强¹ (1. 兰州大学资源环境学院,甘肃兰州 730000;2. 中国人民解放军 61206 部队,北京 100042)

摘要 针对 LEDAPS 与 FLAASH 2 种大气辐射校正软件,从其算法原理、结果的视觉效果以及典型地物的光谱特征等方面进行了对比研究,并利用 MODIS 相关产品分别对 2 种模型反演的地表反射率及由其反演得到的 *NDVI* 结果进行了评价。结果表明,2 种软件操作简便,地表反射率反演的精度较高,均能在一定程度上消除大气影响;LEDAPS 反演的地表反射率结果相对 FLAASH 的结果视觉效果较好;根据 MODIS *NDVI* 产品对反演获得且升尺度后的红光、近红外波段反射率和 *NDVI* 结果评价表明,2 种模型校正结果与 MODIS 数据产品相关性较好,均具有相同的变化趋势,2 种模型的反演结果均具有较高的精度,且 LEDAPS 的反演结果精度更高。

关键词 LEDAPS;FLAASH;大气校正;地表反射率

中图分类号 S127 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)10-03105-04

A Comparison Study of Atmospheric Correction Models with LEDAPS and FLAASH
ZHANG Peng et al (College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract LEDAPS and FLAASH are two of atmospheric correction models which are popular with easy-to-operate. In order to assess the performance of eliminating the atmospheric impact more objectively, we focused on the difference between LEDAPS and FLAASH through comparison of their algorithms, visual inspection of their results and the spectral characteristics of typical surface features before and after correction. We chose MODIS products (eg. surface reflectance, *NDVI*) as reference to evaluate the results respectively. The results indicate that these two models could eliminate the atmosphere effect with high precision and are easy to realize. Compared with FLAASH, the results of LEDAPS are more in line with actual situation in visually. With the results being up scaling, both of them are under similar variation tendency and highly correlated with MODIS *NDVI* products. The accuracy of their results is high that both of them could be adopted, additionally, LEDAPS may be more suitable.

Key words LEDAPS; FLAASH; Atmospheric correction; Surface reflectance

地表反射率反演模型是定量遥感研究的重要组成部分,根据其模型建立特点可将其分为基于图像本身相对校正法(如暗目标法、直方图匹配法等)、统计学线性回归法及大气辐射传输模型法^[1-2]。基于图像本身相对校正法忽略了整景影像对应大气条件随空间的变化及多次散射的影响^[3];统计学线性回归法模型建立相对简单,精度在小区域内可满足要求;基于大气辐射传输模型的反演方法是基于物理模型的绝对辐射校正,通过模拟太阳辐射传输过程建立模型,如 LOWTRAN、MODTRAN、6S、FLAASH 等,反演精度相对较高,稳健性较好,其最大的缺点是需求大量实时大气数据。

集成于 ENVI 的 FLAASH 因其简单易操作、相对高精度的特点而被广泛应用和研究,结果表明其校正结果精度较高,但在植被反射率反演上有所不足^[4-5]。LEDAPS(Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System)是 NASA 针对 LEDAPS 项目发展的反射率反演软件,该软件以 6S 大气辐射传输模型理论为基础,采用大量的实时大气观测数据,结果精度较高^[6]。笔者在此针对 2 种软件进行对比分析,发现其优缺点及适用性,对于相关研究工作中选择合适大气校正软件提供依据。

1 资料与方法

1.1 软件原理

1.1.1 FLAASH 的原理。FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)基于 MODTRAN4+辐射传输模型,具有适用范围广、精度高、易操作的特点。可处理多种高光谱数据(如 HyMAP、AVIRIS、HYDICE、HYPERION、

Probe-1、CASI 和 AISA 等)和多光谱数据(ASTER、AVHRR、GeoEye-1、IKONOS、IRS、QuickBird 及 SPOT 等),波段范围 0.4~2.5 μm,涵盖可见光、近红外及短波红外波段;采用基于图像本身的暗目标法求能见度及利用标准 MORTRAN 大气模式、气溶胶类型替代实时大气状况,使 FLAASH 应用更加灵活^[7];引入大气点扩散函数有效消除了邻域效应。该软件基于像素级的校正,将地表描述为平面(或近似平面)朗伯表面,以像元辐射亮度公式 $L = \left(\frac{A\rho_s}{1-\rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + (L_a)$ 表示,式中,右边前 2 项为太阳辐射传输中地表与大气共同作用的结果(直射与散射部分),右边第 3 项为大气分子和气溶胶作用的结果。其中, L 为传感器处像元接收到的总辐射亮度; ρ 为像素表面反射率; S 为大气球面反照率; L_a 为大气后向散射辐射率(大气程辐射); A 、 B 为取决于大气条件和几何条件的 2 个独立系数; ρ_e 为像素周围平均表面反射率。

FLAASH 大气校正的基本过程如图 1 所示。首先要获得大气参数,包括大气模式、大气水汽含量、气溶胶类型、能见度等。软件中提供了 6 种标准 MORTRAN 大气模式和 5 种气溶胶类型;水汽反演采用波段比值法,一般选用 1.13 μm 处水汽吸收波段与邻近波段的比值与相应的水汽柱密度值建立查找表,用于逐像元的水汽反演;此外,在 FLAASH 中每种大气模式对应一个固定的水汽含量值,针对不包含水汽反演波段的影像(如 Landsat、SPOT 等),则依据其大气模式确定水汽含量。能见度是大气气溶胶特性的重要参数,利用能见度及特定的气溶胶类型可获得气溶胶光学厚度、消光系数等参数^[8]。FLAASH 利用 Kaufman 等提出的暗像元法^[9]获取能见度信息。Kaufman 等认为由于 2.1 μm 波长大于大多数气溶胶类型,因此此处太阳辐射受气溶胶影响可以忽

作者简介 张鹏(1987-),男,河北隆尧人,硕士研究生,研究方向:定量遥感。
收稿日期 2014-02-10

略,经大量试验表明对于影像上的较暗像元,在特定波段存在相对固定的比值关系 $\rho_{0.06} = \rho_{2.1}/2^{[9]}$ 。在 FLAASH 中,将满足 $2.1 \mu\text{m}$ 处地表反射率 ≤ 0.10 像元视为暗像元,之后采用探索方法对这些暗像元进行研究区平均能见度反演^[10]。

通过以上大气参数及传感器飞行高度、研究区平均海拔

等数据,则可以由 MODTRAN 估算出 A 、 B 、 S 及 L_a 等参数,将其结合空间加权卷积函数在不考虑邻域效应情况下求出

$$\rho_e^{[11-12]}, \text{从而获得反射率 } L_e = \frac{(A+B)\rho_e}{1-\rho_e S} + L_a。$$

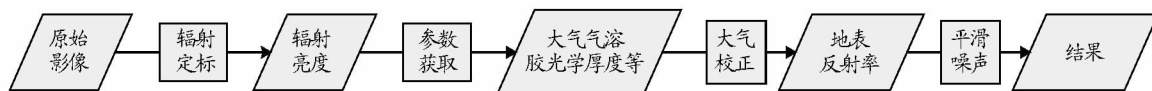


图1 FLAASH 大气校正流程

1.1.2 LEDAPS 的原理。LEDAPS 大气校正软件基于 6S 辐射传输模型,适用于 TM/ETM+ 数据可见光、近红外及短波红外波段反射率的反演,可获得有效的气溶胶分布数据^[13]。LEDAPS 的气溶胶光学厚度的反演同样基于暗像元法,但在寻找暗像元前考虑了邻域效应,并采用样条插值算法获得气溶胶的空间分布状况。LEDAPS 大气校正软件假设气溶胶类型为大陆型,将地表视为平面朗伯体,其表观反射率可表示为^[12]: $\rho_{TOA} = T_{g(O_3, O_2, CO_2, NO_2, CH_4)} \times [\rho_{R+A} + T_{R+A} \frac{T_{g(H_2O)} \rho_s}{(1 - S_{R+A} \rho_s)}]$,式中, ρ_s 为地表反射率; T_g 为气体吸收率; ρ_{R+A} 为气体分子与气溶胶分子作用产生的程辐射; T_{R+A} 为大气散射透过率; S_{R+A} 为大气球面反照率。

氧气和臭氧导致的散射和吸收校正相对简单,因为其在空间和时间上相对稳定。水蒸气对于 TM/ETM+ 数据的近红外波段影响严重,但无法从 TM/ETM+ 影像中获得相关信息反演水汽含量,为此,该程序所需的此部分大气参数(如水汽含量、地表温度、臭氧数据、地形数据及气压数据)采用实测数据。其中,臭氧数据由搭载于 Nimbus-7、Meteor-3 及地球观测平台上的臭氧总量绘图系统(TOMS)获取,备用数据由 NOAA 的 TOVS(Tiros Operational Vertical Sounder,泰罗斯应用垂直测深仪)提供;气压、水汽柱及大气温度数据由美国国家海洋和大气局(NOAA)的国家环境预报中心(NCEP)提供。由于 Landsat TM/ETM+ 数据具有较高的空间分辨率,对于一般的非均匀地表其邻域效应是相当大的,在处理中必须考虑这一点。在大气校正模型中,很重要的参数是气溶胶信息,准确获得气溶胶厚度,对于透射率、程辐射等大气参数的精度提高有重要意义。但大气校正较难的部分也是估算气溶胶的影响,且气溶胶分布的不均匀性,使得问题更加复杂。LEDAPS 提出了一个自动从图像本身获取气溶胶分布的新算法,通过影像升尺度确定 1 km 空间分辨率的气溶胶数据再进行插值,有效解决了由 Landsat TM/ETM+ 数据较高的空间分辨率所导致的一般非均匀地表存在的邻域效应。

LEDAPS 软件运行环境为 Linux,其通过命令行输入来进行操作,处理数据步骤可分解为以下步骤:①获取入射太阳辐射和遥感传感器的几何参数。从 Landsat 的元文件中读取地表反射率反演中所需要的基本参数信息,包括传感器类型、太阳高度角、影像目标海拔高度等。②利用实测辅助数据(如水汽含量、地表温度、臭氧数据、地形数据及气压数据)和几何数据基于 6S 模型生成查找表。③计算表观反射率。

根据影像元文件信息,由影像进行辐射定标及计算大气层顶表观反射率,及热红外波段亮温数据文件。④掩模处理。利用查找表,在设定气溶胶光学厚度为 $0.01 \mu\text{m}$ 的情况下进行表观反射率的初步大气校正,以结果为原始数据进行云、水、阴影、雪的掩模,以消除其在气溶胶光学厚度反演及大气纠正中的影响。⑤气溶胶光学厚度反演。为消除区域异质性与水等区域的影像,LEDAPS 将影像在掩模基础上进行升尺度,再采用 Kaufman 等提出的暗像元法^[9],确定暗像元所在位置,以 6S 模型为基础生成查找表,确定暗像元处的气溶胶光学厚度,对影像整个区域进行插值,获得整个区域的气溶胶光学厚度。⑥大气校正。利用气溶胶光学厚度数据、查找表、表观反射率数据生成 LEDAPS 地表反射率数据。

1.2 研究区概况及数据资料 研究区位于甘肃、宁夏回族自治区、内蒙古自治区交界处,属于旱/半干旱地区过渡带,整体年降水量较少,植被覆盖率较低;黄河自甘肃入、宁夏出,西南至东北从研究区横穿而过。研究区实际经纬度范围为 $103^\circ 44' 56.94'' \sim 106^\circ 10' 25.20'' \text{E}$, $36^\circ 32' 24.40'' \sim 38^\circ 24' 47.01'' \text{N}$ 。按照 Landsat 5 TM 数轨道和行幅,编号为 130/034,对应的 MODIS 地表反射率产品中的分幅编号为 h26v05 左上半部。为了获取较好的植被信息,选取植被生长较为旺盛的 6 月下旬,即 2009 年 6 月 22 日 Landsat-5 TM 影像作为试验数据。

1.3 研究方法 分别利用 LEDAPS、FLAASH 大气校正软件对原影像进行反射率反演,目视解译选取水稻、人工林、河流 3 种地物,分别统计各类地物在 Landsat-5 TM 各个波段(除热红外波段外)中的大气层顶反射率和 2 种大气校正结果反射率。MODIS 反射率数据产品包含 7 个波段,与 Landsat-5 TM 数据波段相对应,两者对应波段波谱范围相差不大,因此,在此以 MODIS 数据产品为参考,对 2 种大气校正的结果进行评价分析。归一化植被指数能够较好地反映植被的生长状况和指示物候变化,因此,选择红光、近红外波段进行分析,对结果在植被参数的应用上具有一定意义。

MODIS 数据与 TM 数据在空间分辨率上相差较大,为此,应首先将 2 种结果所产生红光波段、近红外波段进行升尺度,使其与 MODIS 数据具有相同的空间分辨率,并保证像元——对应;其次,根据地表反射率反演得到 $NDVI$;最后,统计升尺度后 2 种红光、近红外、 $NDVI$ 与 MODIS 产品参考值之间的相关关系、均方根误差、影像差值的均值以及差值的标准差。

2 案例分析

将 FLAASH 软件校正结果(图 3a)、LEDAPS 软件校正结果(图 3b)与原 DN 值影像(图 2a)以及表观反射率(图 2b)相比分析发现,2 种结果均在一定程度削弱了大气影响,图像整体对比度均有所增加,纹理更加清晰,地物间可分性增加,更加有利于目视判别;相较之下,FLAASH 大气校正结果与大气层顶表观反射率目视效果相差较小,LEDAPS 大气校正结果与表观反射率差别较大,各地物间光谱差异更加突出。

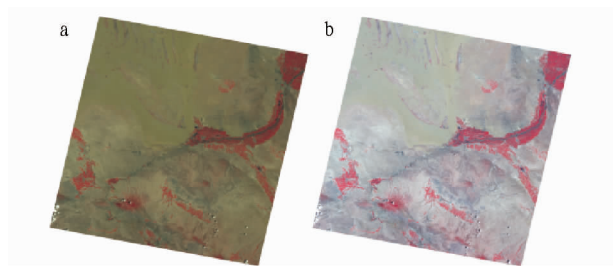


图 2 原 DN 值影像(a)和表观反射率(b)

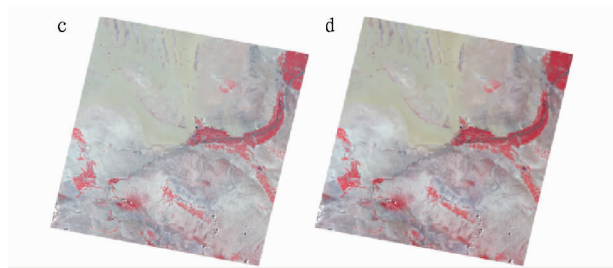


图 3 FLAASH(a)和 LEDAPS(b)大气校正结果

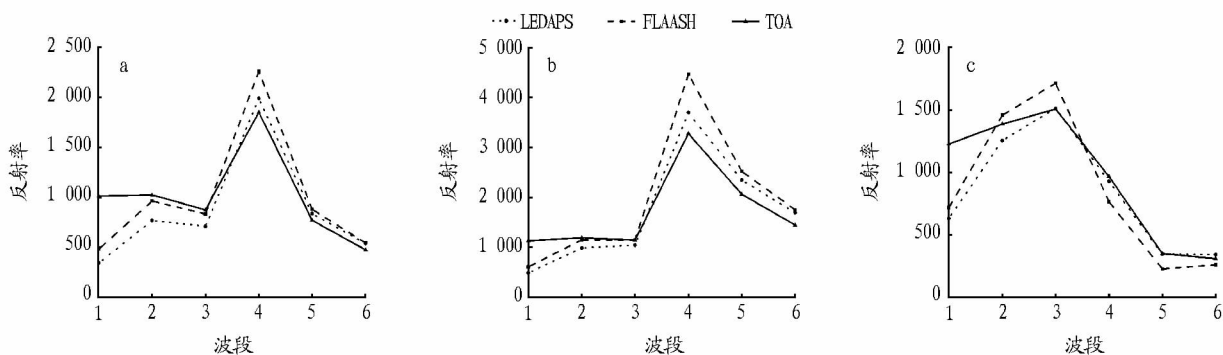


图 4 水稻田(a)、人工林地(b)、河流(c)典型地物大气校正前后波谱曲线对比(放大因子=10 000)

种软件的反演结果进行评价分析。其中, $B = \sum_{i=1}^n (T_r^i - M_r^i) / n$ 、 $S = \text{Std}(T_r - M_r)$, 式中, T_r 、 M_r 分别代表 TM、MODIS 影像反射率, n 为像元总数, i 是像元位置。

经 FLAASH 与 LEDAPS 校正后,将红光波段反射率与 MODIS 红光波段反射率对比分析(图 5a₁、图 5a₂),LEDAPS 校正结果与 MODIS 数据间的判定系数高于 FLAASH,且 LEDAPS 校正后与 MODIS 之间的均方根误差、 B 值绝对值、 S 值均小于 FLAASH,表明经 LEDAPS 大气校正的红光波段与 MODIS 数据有更高的相关性,差异性以及差异的变化程度较小。将 2 种软件校正后的近红外波段与 MODIS 对应波段的反射率对比(图 5b₁、b₂),结果显示 FLAASH 校正结果的相关系数大于 LEDAPS 大气校正结果,但 FLAASH 校正结果的均方根误差、 B 值绝对值均大于 LEDAPS,表明 LEDAPS 大气校

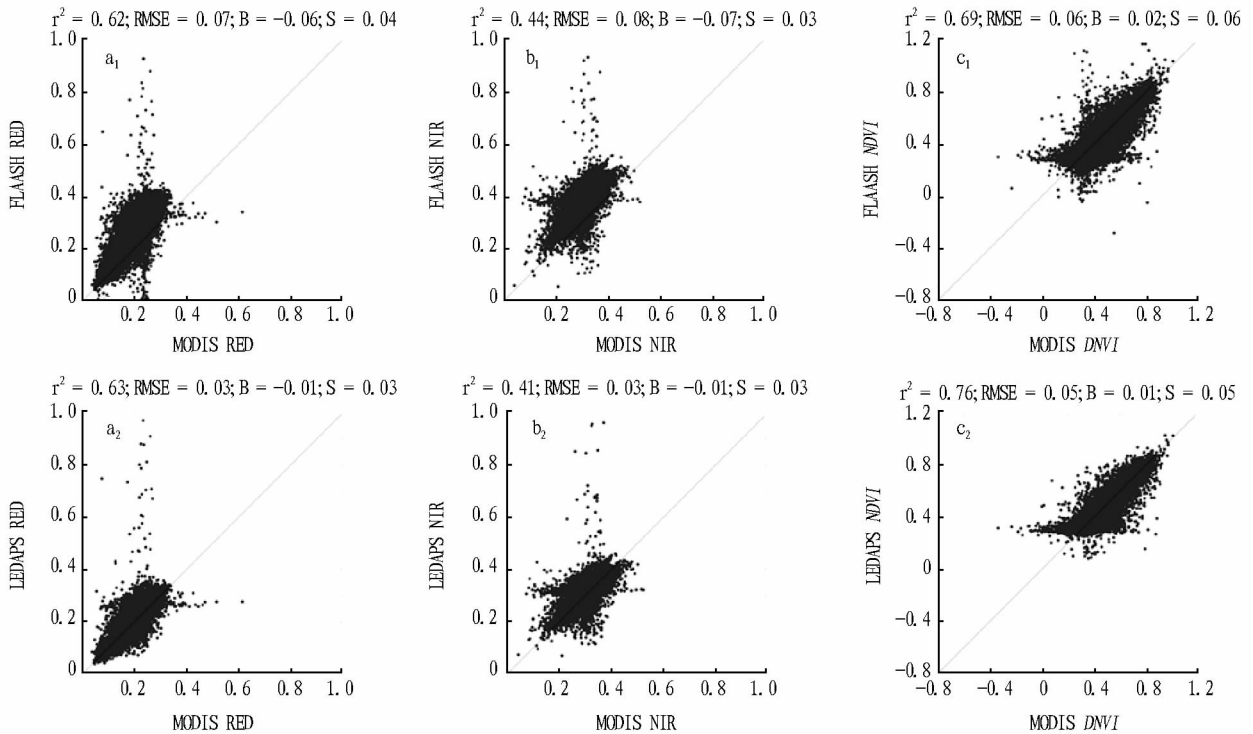
2.1 典型地物光谱信息对比 分析图 4 可以发现,在 2 种软件校正的结果(LEDAPS、FLAASH)中,水稻和人工林反射率在可见光波段较大气层顶反射率(TOA)均有所下降,且变化幅度递减,主要是因为可见光波段大气影响以散射为主,致使影像反射率较真实值大,而瑞利散射对蓝光波段影响最大,随波长增大而减小,因此致使大气校正前后的差值按照蓝光、绿光、红光的顺序逐渐减小;在近红外及短波红外波段有所升高,变化值递减,是因为在近红外、短波红外以吸收影响为主,大气校正消除了吸收的影响致使校正后的值大于校正前,且由于近红外、短波红外附近的 2 个水汽吸收带影响,使在第 4、5 波段变化明显;同时,校正前后,2 种植被(水稻、人工林)在可见光波段具有明显的吸收谷,校正后 2 种校正结果有较好的一致性。在河流反射率结果对比中,2 种软件校正后的蓝光波段反射率变小,LEDAPS 校正后的绿光与红光波段反射率结果相比之前变小,FLAASH 校正结果相反;2 种软件在近红外波段的校正结果均有不同程度变小,FLAASH 校正结果在中红外波段变小,而 LEDAPS 校正结果稍有增大。

2.2 与 MODIS 产品结果对比 大气校正结果与 MODIS 产品数据之间的相关系数是两者相关程度的直接表现,相关系数的平方称为判定系数(R^2),判定系数越大,两者之间相关关系越密切;整景影像所有像元差值的平均值(B)反映了两者之间差异的平均状况;所有像元差值的标准差(S)则反映了 2 种之间差异性的离散情况。在此利用以上几个指标对 2

正结果与 MODIS 数据在空间分布上更为集中,差异性较小。 $NDVI$ 值的对比结果显示(图 5c₁、c₂),LEDAPS 的校正结果在几个统计量上均优于 FLAASH 校正的结果;且判定系数较之红光、近红外波段均有提高,这主要是因为 $NDVI$ 可以消除不同传感器所获数据由于太阳高度角、卫星观测角及地形等引起的反射率变化影响。将 FLAASH、LEDAPS 大气校正的结果对比(图 6),两者相关程度较高,其近红外波段相关性远高于红光波段与 $NDVI$;FLAASH 校正后的红光、近红外波段反射率整体大于 LEDAPS 校正结果; $NDVI$ 值大部分集中于 1:1 线附近,有部分值 FLAASH 处理结果较大。

3 结论

对 FLAASH、LEDAPS 2 种大气校正软件的原理、反演过程进行了论述,并以 MODIS 数据产品为参考值,就其结果进



注: a_1 、 b_1 、 c_1 为 FLAASH 大气校正结果; a_2 、 b_2 、 c_2 为 LEDAPS 大气校正结果。

图5 2种软件大气校正所得的红光(a)、近红外(b)、NDVI(c)与相应MODIS产品对比

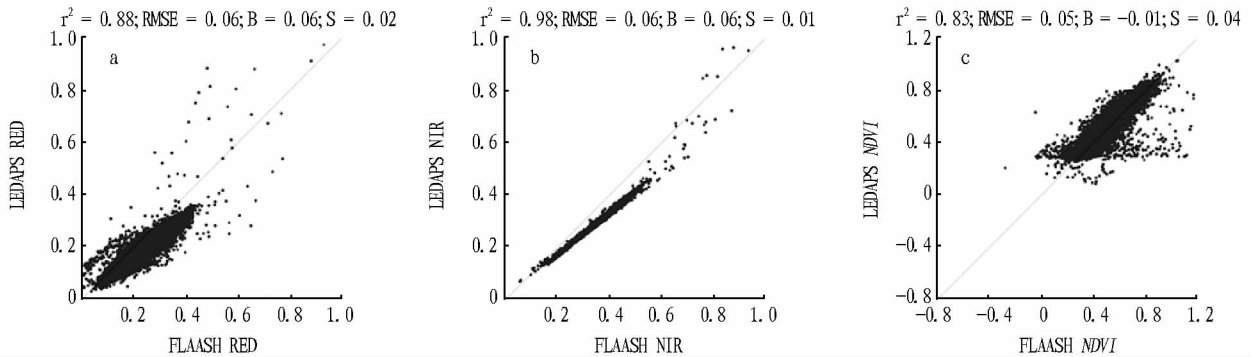


图6 2种软件大气校正所得红光(a)、近红外(a)、NDVI(c)对比

行了评价分析。结果表明,2种软件均能在一定程度上消除大气散射引起可见光反射率的增加及吸收效应引起的红外波段反射率的减小;2种校正结果所得NDVI与MODISNDVI数据产品比较,其相关性较好,具有相同的变化趋势,对于植被信息的提取均具有较好的效果;基于LEDAPS校正的结果与MODIS数据产品相关性更高,可能与两者大气校正均基于6S大气辐射传输模型有关,这对基于Landsat数据与MODIS数据的相关研究具有指导意义。

参考文献

- [1] HADJIMITSIS D G, PAPADAVID C, AGAPIOU A, et al. Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2010, 10(1): 89–95.
- [2] 郝建亭, 杨武年, 李玉霞, 等. 基于FLAASH的多光谱影像大气校正应用研究[J]. 遥感信息, 2008(1): 78–81.
- [3] LIANG S, FANG H, CHEN M. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery. I. Methods [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2001, 39(11): 2490–2498.
- [4] 范文义, 孙晓芳, 王岩, 等. 基于两种辐射传输模型的遥感数据大气校正及结果对比分析[J]. 东北林业大学学报, 2009(7): 121–124.

- [5] 罗彩莲, 陈杰, 乐通潮. 基于FLAASH模型的Landsat ETM+卫星影像大气校正[J]. 防护林科技, 2008(5): 46–48.
- [6] WOLFE R, MASEK J, SALEOUS N, et al. LEDAPS: mapping North American disturbance from the Landsat record [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS04. Proceedings. 2004 IEEE International. IEEE, 2004.
- [7] KRUSE F A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO [C]//13th JPL Airborne Geoscience Workshop, 2004.
- [8] 韩永, 饶瑞中, 王英俭. 利用大气能见度获取多波长气溶胶光学特性[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 265–269.
- [9] KAUFMAN Y J, WALD A E, REMER L A, et al. The MODIS 2.1- μm channel – correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1997, 35(5): 1286–1298.
- [10] 李旭文, 牛志春, 王经顺, 等. 遥感影像反演区域能见度及其与地面空气质量监测数据一致性研究[J]. 环境监测管理和技术, 2011(1): 20–27.
- [11] 杨校军, 陈雨时, 张晔. FLAASH模型输入参数对校正结果的影响[J]. 遥感信息, 2009(6): 32–37.
- [12] 韩念龙, 刘闯, 许旭. 基于FLAASH的CBERS-02B星CCD影像大气校正[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(4): 2051–2053.
- [13] VERMOTE E, SALEOUS N. LEDAPS surface reflectance product description [M]. College Park: University of Maryland Department of Geography, 2007.