

由遥感数据获取的地表反照率归一化问题探讨

鲍平勇¹, 张友静², 贡璐³, 竺建平⁴

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098;
3. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 浙江华东水电测绘有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要:以洛河流域为研究区域, 以反照率为研究对象, 根据同时相的 ETM+ 与 MODIS 数据探讨了地表参数的一致性。在对 ETM+ 影像进行地形与大气校正的基础上, 利用窄波段反射率组合方法获取了研究区的地表反照率, 通过 ETM+ 反演的反照率与 MODIS 二向反射函数(BRDF)反演的反照率产品的对比分析得出了两者间的关系。

关键词: 地表反照率; 地形校正; MODIS; ETM+; 归一化

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2007)01-0067-05

地表反照率(albedo)^[1]是区域性蒸散发、枯季径流模拟、旱情监测等遥感应用模型及地表能量平衡研究中的重要参数。随着遥感对地观测和信息处理技术的迅速发展, 利用遥感技术反演区域乃至全球地表反照率这一方法也得了广泛应用。Duguay 等^[2-3]利用遥感影像获取了地表反照率, 陈云浩等^[4]利用遥感进行了我国西北地区反照率反演的研究, 刘三超^[5]在考虑地形等因素的基础上研究了黑河流域反照率分布。

基于 Terra/MODIS 遥感数据, 结合半经验的核驱动线性二向反射(BRDF)函数反演地表反照率是比较成熟的一种方法。美国 MODIS 陆地产品组基于二向反射函数(BRDF)开发了全球地表反照率数据产品(MOD43B1); 王开存等^[6]利用 MODIS 二向反射数据反演了中国地区地表反照率并分析了其分布特征。由于 Terra 卫星是 1999 年发射的, 利用 Terra/MODIS 数据研究地表反照率往往会受到时间尺度的限制。因此, 利用较早遥感数据(如 Landsat-MSS/TM/ETM+ 影像)反演的地表反照率仍具有较大的应用价值。在利用遥感建立区域性蒸散发、土壤缺水等遥感应用模型以及研究地表能量平衡过程时, 反照率的准确反演极其重要。然而, 如何实现不同传感器的数据归一化是地表反照率时空变化研究的关键所在。Duguay 等^[2-7-8]在实测数据的基础上建立了不同传感器窄波段反照率到宽波段反照率的转换公式。尽管利用卫星遥感资料反演地表反照率已是一种比较成熟的方法, 但到目前为止, 反演结果还没有能直接应用于陆面过程模式。其主要原因是, 由卫星资料反演的反照率的精度未能达到模型输入要求。MODIS 反照率数据产品的出现使反照率直接作为应用模型的输入参数成为可能。Zhou^[9]利用 MODIS 反照率产品(MOD43B1)对最新的陆面过程模式 CLM(Common Land Model)反照率进行了对比分析。分析结果表明, 低中纬度地区 MOD43B1 的精度较高, 在 0.02~0.04 之间。Liang 等^[8]的研究虽然得出了 30 m 分辨率的 ETM+ 反照率与 1000 m 分辨率的 MODIS 反照率有很好的相关性的结论, 但没有讨论不同传感器数据的归一化问题, 且地物分类简单, 也未考虑地形影响。

本文以同时相 ETM+ 与 MODIS 数据反演的地表反照率为研究对象, 探讨了 2 种数据之间的归一化问题, 以洛河流域为试验区, 在对 ETM+ 影像完成地形与大气校正的基础上, 利用窄波段反射率组合方法反演了研究区的地表反照率, 并结合地表分类图与 MODIS 二向反射函数(BRDF)反演的反照率(MOD43B1)对研究区 8 种主要地表覆盖类型的反照率进行了对比分析。

1 研究数据及试验区

研究数据包括洛河流域同时相 Landsat7-ETM+ 影像、terra/MODIS 反照率产品(MOD43B3) 1:5 万地形图资料以及数字高程模型(DEM)。其中 ETM+ 和 MODIS 遥感影像成像时间均为 2002 年 4 月 2 日, 遥感影像质量较好, 仅 ETM 图像熊耳山顶有一小面积的厚云, 分类时需将云单独作为一类。经定标、几何校正等数据预

处理后,截取 34.0°N~34.9°N,110.9°E~112.8°E(面积约 1.5 万 km²)的区域作为试验区.试验区位于洛河流域上游,海拔在 300~1700m 之间,地形地貌以低山丘陵为主.

2 ETM+ 反照率的反演及地物信息提取

2.1 ETM+ 影像地形校正

经定标、几何校正等数据预处理后,ETM+ 影像灰度值(DN)已转换为表观大气反射率(大气上界的反射率).但是,表观反射率受大气和地形影响而不能准确反映真实地表反射率.利用 DEM 对遥感影像反射率进行地形校正,可提高大气校正后地表反射率反演的精度^[10].本文利用初级归一化突出地形影响的方法对 ETM+ 影像进行了校正^[11-12].地形校正的基本思路是:首先根据影像的太阳高度角和方位角,通过 DEM 建立去阴影模型并利用该模型来模拟研究区卫星影像拍摄时的坡地阴影分布情况,然后融合 DEM 与 ETM+ 影像并通过如下初级归一化公式剔除地形影响.

$$\rho'_{\lambda} = \rho_{\lambda} + \rho_{\lambda}(\mu_k - X)/\mu_k \tag{1}$$

式中: ρ'_{λ} ——波长为 λ 的光谱通道地形校正后的反射率; λ 为波段中心波长; ρ_{λ} ——原始图像反射率; μ_k ——去阴影模型中像元的平均值; X ——去阴影模型中对应像元的值.

地形校正的目的是减少地形起伏对传感器接收到的 DN 值的影响,提高地物分类精度.研究区受地形影响的主要是林地、裸岩和裸土,提取纯净像元后地形校正前后的反照率如表 1 所示.

由表 1 可知,地形校正明显地减小了阴阳坡同类地物的反照率差异.林地从 0.038 减小到 0.015,裸岩从 0.047 减小到 0.024,裸土从 0.042 减小到 0.021.这说明地形起伏变化引起的反照率差异主要体现在海拔较高山区里的植被、裸岩与裸土 3 类地物上.

表 1 地形校正前后同类地物阴阳坡反照率的对比

Table 1 Comparison of land surface albedo between the southern and northern slopes before and after topographic correction

地表 类型	校正前		校正后	
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
林地	0.181	0.143	0.175	0.160
裸岩	0.245	0.198	0.142	0.118
裸土	0.155	0.113	0.142	0.121

2.2 ETM 影像大气校正及反照率反演

2.2.1 大气辐射校正

利用 MODTRAN4 对大气辐射传输进行模拟后可求得大气校正所需参数,将所求的大气校正参数和经过地形校正的反射率一并代入大气辐射传输公式

$$\rho'_{\lambda} = \rho_a + \frac{\pi(\theta_s)}{1 - \rho_t S} \left[\rho_t e^{-\tau/\mu_v} + \rho_t t_d(\theta_v) \right] \tag{2}$$

式中: ρ_a ——大气的路径辐射项等效反射率; τ ——大气的光学厚度; ρ_t ——目标真实反射率; S ——大气的目标反照率; $\pi(\theta_s)$ ——下行辐射总透过率; $t_d(\theta_v)$ ——散射透过率; $\mu_v = \cos(\theta_v)$; θ_s, θ_v ——太阳和传感器的天顶角.根据式(2)可计算出目标真实反射率.而在实际工作中,一般利用如下简化公式^[5]进行大气校正.

$$L(\mu_v) = L_d(\mu_v) + \frac{\rho_t}{1 - \rho_t S} F_d \pi(\mu_v) \tag{3}$$

式中: $L(\mu_v)$ ——传感器接收的辐射亮度; $L_d(\mu_v)$ ——路径辐射项; F_d ——太阳下行总辐射; $\pi(\mu_v)$ ——传感器与目标之间的透过率.在已知观测条件(太阳和传感器的几何参数、大气廓线和地表反射率等)下设定一组 ρ_t 值以及相应的传感器高度,就可以通过 MODTRAN4 模拟出一组辐射亮度值,将此辐射亮度值代入方程(3)后再经过简单的代数运算可求得大气校正所需要的参数(包括路径辐射项、透过率、大气半球反照率和太阳下行总辐射).将模拟得到的 5 组辐射亮度值和设置的地表反射率、传感器高度代入式(3)得

$$\begin{cases} L_0 = L_1 & \pi(\mu_v) = \frac{L_3 - L_2}{L_5 - L_4} & S = \frac{1 - 2a}{0.2 - 0.2a} \\ a = \frac{L_2 - L_1}{L_3 - L_1} & F_d = \frac{(L_3 - L_1)(1 - 0.2S)}{0.2\pi(\mu_v)} \end{cases} \tag{4}$$

式中 $L_i(i=1, 2, \dots, 5)$ 为第 i 次模拟得到的辐射亮度值.

根据式(3)(4)得到的大气校正参数以及定标后的辐射亮度图像即可得到窄波段目标真实反射率.

2.2.2 连续波谱反照率估算

Duguay 等^[2-3]通过 TM 数据窄波段光谱反射率的组合得到了地表反照率,但采用的 AVHRR 数据较多,且反照率转化关系都是在特定的大气条件和地域基础上建立起来的,缺乏通用性验证. Liang 等^[8]建立了不同遥感器地表反照率估算的通用公式,其中 LANDSAT-TM 反照率反演公式为

$$a = 0.356\rho_1 + 0.130\rho_3 + 0.373\rho_4 + 0.085\rho_5 + 0.072\rho_7 - 0.0018 \tag{5}$$

式中: a ——地表晴空反照率; ρ_i ($i = 1, 2, \dots, 7$)——第 i 波段的反射率. 式(5)适用于不同的大气和地面条件. 本文利用式(5)反演了 ETM+ 地表反照率,结果见图 1(a). 由图 1(a)可知,潮湿裸土和水体反照率较小,而裸岩、居民地、干涸河滩及植被区的反照率较大. 通过分析可知,河滩反照率增加是因为河滩有裸露的卵石,而植被区反照率异常是因为植物在 4 月初的长势很好,近红外波段的反射增加.

2.3 ETM+ 影像土地利用类型信息提取

首先通过地形图研究与遥感影像目视判读的结合,建立试验区地物分类体系——居民地、林地、草地、耕地、水体、河滩、云、裸岩、裸土(云虽单列为一类,但不参与反照率的对比),然后利用分层分类法并结合光谱信息、先验知识逐层提取 ETM+ 影像土地利用类型信息,最后利用决策树合成地表分类图建立混淆矩阵并统计出总体分类精度. 结果表明,总体分类精度达 83.1%.

3 EOS/MODIS 地表反照率反演

MODIS 地表反照率的算法步骤^[13]是 (a) 通过对卫星观测到的大气上界向上辐射的大气订正,将大气上界向上辐射转换成地表向上辐射,根据计算出的地表入射辐射计算出地表反射率; (b) 根据不同视角的晴空观测结果,利用经验的双向反射分布函数模型拟合 BRDF 模型参数,对拟合得到的 BRDF 模型进行积分就可以得到窄波段地表黑空反照率(直射反照率)和白空反照率(散射反照率); (c) 根据太阳辐射光谱和各波段滤波器透过率函数进行反照率的窄波段到宽波段的转换,以求得宽波段直射反照率和散射反照率. 在(c)步转换过程中,应首先进行波段内插和外延^[14],然后再根据反照率的定义进行公式变换. MODIS/AMBRALS 算法对该步进行了简化,得到了变换公式

$$A(\theta) = \sum C_i a(\theta, \lambda_i) \tag{6}$$

式中: $A(\theta)$ ——宽波段反照率; C_i ——变化因子; $a(\theta, \lambda_i)$ ——窄波段反照率. Liang 等^[14]求出了 MODIS 3 个常用宽波段(可见光 $0.3 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、近红外 $0.7 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 、总波段 $0.3 \sim 5.0 \mu\text{m}$)的计算系数. 由式(6)可计算出宽波段的地表黑空、白空反照率. 实际的晴空反照率为^[6]

$$\varrho = (1 - S)\varrho_h + S\varrho_b \tag{7}$$

式中: ϱ ——晴空反照率; ϱ_h ——黑空反照率; ϱ_b ——白空反照率; S ——散射辐射与总辐射的比,简称散射比. 王开存等^[6]通过模拟得出了对 S 有影响的主要因子——汽溶胶与太阳高度角,并根据影像太阳高度角和汽溶胶类型确定以 $S = 0.158$ 作为散射比. 本文通过地表反照率产品(MOD43B1)中 $0.3 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 总波段的黑空、白空反照率的组合得到了最后的晴空反照率,如图 1(b)所示.

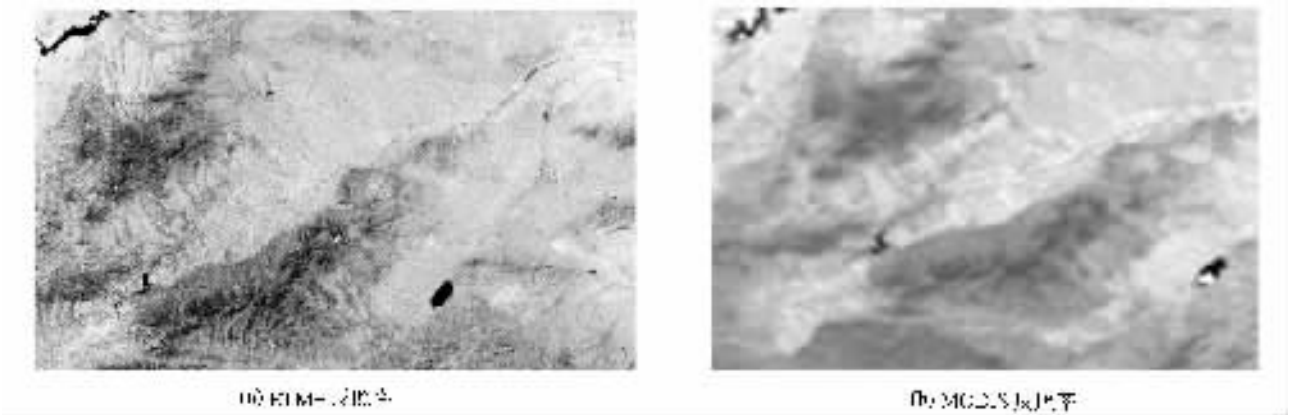


图 1 研究区 ETM+ 和 MODIS 地表反照率空间分布

Fig.1 Spatial distributions of land surface albedo of the studied area obtained from ETM+ and MODIS data

4 对比分析与讨论

由于 MODIS 和 ETM + 的空间分辨率分别为 1 000 m , 30 m ,不能简单地通过找地物特征点的方法对 2 幅图像进行配准.于是,本文首先对 ETM + 进行重采样,分辨率为 510 m ,然后将人工选择的地面特征点与 1 000 m 分辨率的 MODIS 图像进行配准^[15],最后在 ETM + 和 MODIS 反照率产品图上选择了大水面、茂密植被覆盖区和山顶大面积裸土等单一地物各 30 个样本(共计 240 个样本)的反照率.为保证样本内无混合像元,单一地物样本以 1 倍标准差为界限进行选择.各类地物的平均反照率与 MODIS 相应地物的反照率如表 2 所示.

由表 2 可知:各类地物的反照率 ρ 变化趋势吻合很好,均为 $\rho_{裸岩} > \rho_{耕地} > \rho_{河滩} > \rho_{居民地} > \rho_{草地} > \rho_{林地} > \rho_{裸土} > \rho_{水体}$.其中植被覆盖区的反照率大于居民地的反照率,原因是遥感影像成像时耕地、林地、草地等植被长势很好,近红外波段反射能力较强.各类地物的 MODIS 反照率均小于 ETM + 反演的反照率.本文通过两类传感器对应地物反照率的回归分析得出了转换关系

$$\rho_m = 0.9273\rho_e - 0.0025$$

(8)

式(8)定量地描述了基于 LANDSAT7-ETM + 图像并经过精确的地形和大气校正后得到的反照率与 MODIS 半经验的核驱动线性 BRDF 反演的地表反照率产品之间的线性关系.对比 ETM + 反照率和 MODIS 反照率产品(MOD43B3)可知,ETM + 反照率普遍偏高.本文利用式(8)对 ETM + 反照率进行了数据归一化处理,并将由相关软件产生的 300 个随机样本点的反照率与相应的 MODIS 反照率产品值进行了对比.结果表明 89% 的样本点的误差在 0.001 以内,11% 的样本点的误差在 0.001 ~ 0.002 之间,误差较大的样本点对应的主要地物是居民地,其主要原因是 MODIS 分辨率比较低,除大城镇以外的居民地混合像元较多.因此,利用 ETM + 反演地表反照率时,可利用式(8)对地表反照率进行修正,修正后的地表反照率可直接应用于其他遥感应用模型.这既解决了 MODIS 无多角度观测数据的问题,又保证了反照率的精度.

5 结 语

本文首先在地形校正的基础上,利用 MODTRAN 对 ETM + 影像进行大气校正并得到了窄波段地表真实反射率,然后将 ETM + 反演的反照率与基于二向反射模型(BRDF)的 MODIS 反照率产品进行了对比分析并得出了如下结论:

- a. 对空间分辨率较高的遥感影像(如 TM,ETM + 和 MSS)进行地形校正,可提高地表反射率的计算精度^[10]和组合得到的反照率的精度.因为地形校正缩小了地形起伏较大的山区由阴阳坡引起的同类地物反照率差异.
- b. 先利用 1999 年以前的分辨率较高的遥感资料反演得出反照率,再通过式(8)将反演的反照率转换到 MODIS 反照率产品同一水平上,既可保证数据的一致性,又可解决数据的瓶颈问题.
- c. 由于资料有限,本文仅对洛河流域同时相 ETM + 和 MODIS 两类遥感数据反演的反照率进行了对比分析,反演模型的通用性还需经过其他地区的检验来证明.

参考文献:

[1] 王介明,高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题[J]. 遥感技术与应用,2004,19(5):295-300.

[2] DUGUAY C R. Estimating surface reference and albedo from landsat-5 Thematic Mapper over rugged terrain[J]. PE & RS,1992,58:551-558.

表 2 ETM+ 及 MODIS 影像中各类地物样本反照率的比较

Table 2 Comparison of land surface albedo of different landforms obtained from ETM + and MODIS data

地物类型	ETM+ 反照率			MODIS 反照率
	最小值	最大值	平均值	
林地	0.138	0.187	0.170	0.159
耕地	0.190	0.210	0.200	0.184
草地	0.180	0.205	0.189	0.171
水体	0.061	0.068	0.065	0.056
居民地	0.159	0.198	0.190	0.177
河滩	0.184	0.206	0.193	0.179
裸土	0.107	0.157	0.135	0.123
裸岩	0.180	0.244	0.212	0.187

- [3] DENIS J G. Using landsat-5 thematic mapper and digital elevation data to determine the net radiation field of a Mountain Glacier[J]. Remote Sensing of Environment ,1993 43 :315-333.
- [4] 陈云浩,李晓兵,谢锋. 我国西北地区地表反照率的遥感研究[J].地理科学 2001 21(4) 327-333.
- [5] 刘三超. 基于 DEM 的 ETM 图像辐射校正及汉江流域反照率的计算[J].地理科学 2004(3) 9-14.
- [6] 王开存,刘晶森,周秀骥,等. 利用 MODIS 卫星资料反演中国地区晴空地表短波反照率及其特征分析[J].大气科学 2004 , 28(6) 941-949.
- [7] LIANG Shun-lin. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo :I. Formula[J]. Remote Sensing of Enviroment 2001 84 : 25-41.
- [8] LIANG Shun-lin ,CHAD J S ,ANDREW L R ,et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo :II . Validation[J]. Remote Sensing of Environment 2001 ,76 :213-242.
- [9] ZHOU Liang. Comparison of seasonal and spatial variations of albedos from MODIS and common land model[J]. J Geophys Res Atmosphere 2003 ,108 (15) 4488.
- [10] ZHANG Wan-chang ,YAMAGUCHI Y ,OGAW K. Evaluation of the preprocessing of the remotely sensed data on the actual evapotraspiration ,surface soil moisture mapping by an approach using landsat ,DEM and meteorological data[J]. Geocarto Inter 2000 , 15(4) 57-67.
- [11] CIVICO D L. Topographic normalization of landat thematic mapper digital imagery[J]. PE & RS ,1989 55(9) :1303-1309.
- [12] YSUSHI M. Sno-Japanese joint rearch poject HEIFE :Gneral view and result[J]. Journal of Natural Disaster Science 2000 22(1) 45-51.
- [13] 王开存. 用 NOAA/AVHRR 探测地表反射率和 NDVI 的订正及误差分析[J].应用气象学报 2003 ,14(2) ,165-175.
- [14] 张杰,张强,郭妮,等. 应用 EOS-MODIS 卫星资料反演西北干旱绿洲的地表反照率[J].大气科学 2005 29(4) 510-517.
- [15] LIANG Shun-lin ,FANG Hong-liang ,CHEN Ming-zhen ,et al. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products :methods and preliminary results[J]. Remote Sensing of Environment 2003 83 :149-162.

Study on consistency of land surface albedo obtained from ETM + and MODIS

BAO Ping-yong¹ , ZHANG You-jing² , GONG Lu³ , ZHU Jian-ping⁴

(1. College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. College of Water Resources and Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

3. College of Resources and Environment Science , Xinjiang University , Urumqi 830046 , China ;

4. Zhejiang East-China Hydro-power Surveying & Mapping Co. Ltd , Hangzhou 310030 , China)

Abstract :In a case study of Luohe River Basin , the consistency between the land surface parameters obtained from the ETM + and MODIS data of the same phase was discussed. The ETM + data was corrected according to the topographical and atmospheric information , and the land surface albedo of the studied area was obtained by the combination of reflectances of the narrow bands. The land surface albedo obtained from the ETM + data was compared with that obtained from the inversion of MODIS BRDF (bidirectional reflectance distribution function) based on the land surface classification map , and a linear relationship between them was obtained.

Key words :land surface albedo ; topographical correction ; MODIS ; ETM + ; consistency