

ASTER 与 Landsat ETM+ 植被指数的交互比较

徐涵秋, 张铁军

福州大学环境与资源学院, 福州大学遥感信息工程研究所, 福建 福州 350108

摘要 在中尺度对地观测系统中, Landsat 和 ASTER 数据无疑是使用得最多的遥感影像数据, 但是长期以来二者植被指数之间的定量关系并不清楚。因此, 利用三对同日过空的 Landsat ETM+ 和 ASTER 影像来考察二者植被指数(NDVI, SAVI)之间的定量关系, 重点查明二者之间的差异。通过将 ETM+ 与 ASTER 影像的多光谱波段的灰度值转换成传感器处反射率, 并对其进行回归分析来求出二者植被指数之间的定量关系和转换方程。研究发现, 尽管 ETM+ 与 ASTER 的植被指数之间具有显著的线性正相关关系, 但是二者在光谱响应函数上的不同造成 ASTER 影像的植被指数信号总体上弱于 ETM+ 的植被指数信号。利用所求的转换方程对两种传感器的植被指数进行互为转换, 其转换的精度较高, RMSE 都小于 0.04。

关键词 NDVI; SAVI; 交互比较; ASTER; ETM+; 光谱响应函数

中图分类号: TP751; O433 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)071902-06

引言

20 世纪末以来, 许多搭载新型传感器的卫星相继升空。这些新型传感器的数据不仅可以单独使用, 而且还可以互为补充, 这给遥感界引入了一个新的研究热点, 即不同传感器数据之间的交互比较^[1]。其中, 基于不同传感器同步影像之间的交互定标(cross calibration)是最常用的方法^[2-6]。交互定标不同于替代定标(vicarious calibration), 因为它不是利用地面辐射校正场地数据对卫星传感器定标, 而是利用不同传感器的同步影像来进行交互定标。它可以是利用某个已定标的传感器数据对另一未定标的传感器数据进行定标, 也可以是两种已经定标的传感器数据之间的交互比较。后者也被称之为 tandem cross calibration^[4], 其目的在于查明两种传感器数据之间的定量关系。本文所要进行的比较就属于后者。

不同传感器之间的交互比较除了可以采用相应波段之间的逐一对比外^[2-6], 还可以利用指数波段间的运算来综合对比。由于植被在全球生态系统中起着非常重要的作用, 各种传感器数据都有大量植被应用的实例, 因此不同传感器植被指数之间的对比最为普遍。Steven 等利用光谱仪实测的地面数据模拟出 AVHRR, ATSR-2, Landsat, SPOT, IRS, IKONOS, SeaWiFS 等十几种传感器的各个波段的光谱数据, 然后再基于由它们生成的植被指数对各种传感器数据进行了比较, 最后获得了各种传感器 NDVI 指数的互为转换方程^[7]。

Thenkabail 基于影像的传感器处反射率(at sensor reflectance)对 IKONOS 与 ETM+ 影像的 NDVI 指数的关系进行了研究, 建立了两者 NDVI 指数之间的关系方程^[8]。Goward 等基于传感器处反射率将 ETM+ 与 IKONOS 的多光谱影像进行了比较, 并发现了 IKONOS 影像获取的植被指数信号要弱于 ETM+^[9]。Soudani 比较了 ETM+, SPOT 和 IKONOS 三种影像基于传感器处反射率的各种植被指数(NDVI, SAVI, ARVI)。结果也表明, ETM+ 与 SPOT 的植被指数值都高于 IKONOS 的植被指数值^[10]; 刘良明等对比了 MODIS 和 AVHRR 的 NDVI 指数, 结果发现前者对植被信息的响应比后者更敏感^[11]。van Leeuwen 等的研究发现 MODIS 影像反演的 NDVI 值要高于 AVHRR 影像的 NDVI 值^[12]; 陈拉等的研究也发现, MODIS 和 TM 的 NDVI 值都比 AVHRR 高^[13]。Miura 等对 MODIS 与 ASTER 数据的比较表明, 两者可见光近红外波段的地表反射率和植被指数间均存在很好的一致性^[14]。

从现有研究来看, ASTER 和 Landsat ETM+ 传感器植被指数之间的比较迄今仍未开展, 二者之间的定量关系并不清楚。因此, 本文拟对 ASTER 和 ETM+ 的两种主要植被指数 NDVI 和 SAVI 进行交互比较, 查明二者之间的定量关系, 求出二者之间的转换方程。由于 Landsat 和 ASTER 是中尺度植被遥感最重要的数据源, 再加上 ETM+ 的扫描线纠正器(SLC)出了故障, TM 数据的质量又日益退化, 迫切需要可替补的遥感数据源, 因此开展 ASTER 和 ETM+ 植被

收稿日期: 2010-09-25, 修订日期: 2010-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371107)和福建省自然科学基金项目(200J0132)资助

作者简介: 徐涵秋, 1955 年生, 福州大学环境与资源学院教授 e-mail: hxu@fzu.edu.cn; fdy@public.fz.fj.cn

指数的比较研究, 不仅具有重要的科学意义, 还具有重要的现实意义。

1 实验方法

1.1 数据源

Landsat ETM+ 与 ASTER 都是 1999 年发射的传感器, 二者在许多方面很接近。就植被指数所涉及的红光和近红外波段而言, ASTER 的分辨率为 15 m, 高于 ETM+ 的 30 m, 因此其监测地球表面变化细节的能力要优于 ETM+。但 Landsat 系列卫星有很长的发射历史, ETM+ 有很好的定标系统^[3, 4], 因此, 将 ASTER 与已准确定标的 ETM+ 数据进行植被指数的互为比较, 将有利于二者植被监测结果的互为补充和比较。

保证两种传感器数据交互比较研究成功的最关键条件就是两种传感器必须同时观测同一目标区域, 因此必须采用两种传感器对于同一目标区域的同日过空影像对。同时还要尽量选择二者传感器视角小, 太阳高度角和方位角都接近的影像对, 以确保不同传感器影像中对应地物光谱特征的一致性^[6]。另外, 为了避免实验结果的偶然性, 交互比较不能仅基于一组影像对和一个实验区。据此, 本次研究选用了满足以上条件的三对同日过空、但地点不同的 ETM+ 与 ASTER

的影像对, 见图 1 和表 1。三对影像中取两对作为实验影像, 另一对不参与实验, 留做结果验证影像, 以客观验证比较结果的准确性。对于每一对 ETM+ 与 ASTER 影像对, 均以 ASTER 为基准影像, ETM+ 影像与其配准。采用二次多项式进行坐标转换, 选择能保持原有灰度值的最近邻法进行象元重采样, 均方根误差(RMSE) 小于 0.25 个象元。

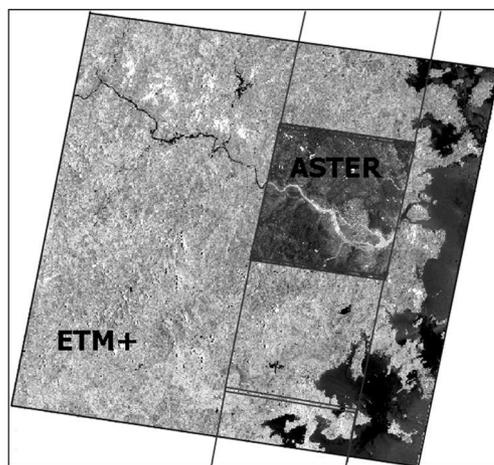


Fig 1 A synchronous image pair of Landsat ETM+ and ASTER of Fuzhou scene (5-23-2001)

Table 1 Tandem image pairs used for cross comparison between ASTER and ETM+

影像对	传感器	日期	时间	太阳高度角	太阳方位角	传感器视角	用途
福州	ETM+	2001-05-23	10:22	66.70	98.27	0	验证
	ASTER		10:48	75.21	108.57	2.863	
福州	ETM+	2001-10-14	10:20	49.51	144.43	0	实验
	ASTER		10:51	53.30	157.43	2.863	
厦门	ETM+	2003-03-10	10:21	49.90	132.20	0	实验
	ASTER		10:49	53.86	140.53	-5.699	

1.2 实验区选择

首先在 ASTER 和 ETM+ 影像上选取地点、大小相同的实验区, 实验区的选择遵循下列原则^[4]: 面积不宜太大; 地形差异不宜太明显, 以避免复杂的大气条件; 选择的地点要有典型性, 要有一定的光谱波长覆盖范围, 既要有高亮度的

地物, 又要有低反射率的地物, 以在较宽的光谱波长范围里全面检查两种传感器植被指数的关系。据此, 本文在两对实验影像对中选了 9 块实验区(共计 199, 200 个象元), 分别包含了植被、耕地、草地、建筑用地、沙地、裸土等地类, 部分实验区见图 2。

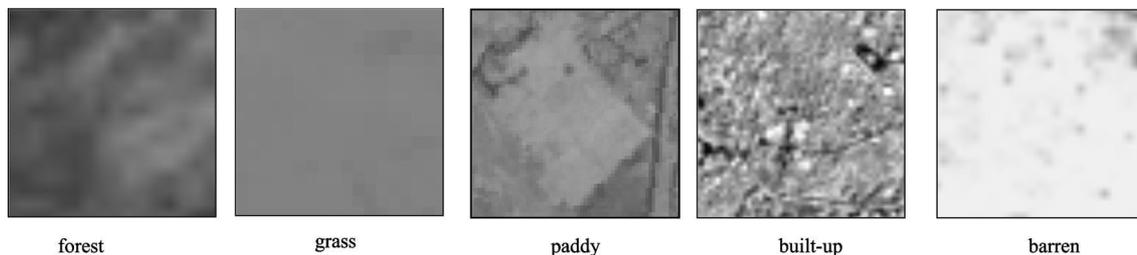


Fig 2 Some of test sites common to the used ASTER and ETM+ tandem image pairs

1.3 辐射校正

卫星传感器所接收到的目标地物的反射或辐射电磁波能量会受到太阳高度、地形及大气条件等因素的影响而导致光谱信号的失真。因此, 经常要对遥感影像进行辐射校正。由

于目前所购买的遥感数据都已转换为 DN 值, 而不同传感器系统在进行 DN 值转换时所采用的算法不一致, 导致不同传感器之间的对比不能基于原始的 DN 值。另外, 不同传感器之间由于光谱波段和波长之间设计不同, 使得如果仅将

DN 值反演成传感器处辐射值还可能给对比结果带来不确定性,因此还必须进一步将其反演成传感器处反射率。

本文采用 Landsat 和 ASTER 官方网站手册提供的模型来进行辐射校正^[15, 16],这些模型通过影像的正规化处理来使不同影像之间的辐射信号相互一致。经过正规化处理后的多传感器、多时相遥感影像可以大大减少因日照、地形和大气效应带来的噪声^[2]。这些模型是不同传感器交互比较研究所采用的主要模型^[4, 8, 9, 17, 18]。通过该模型可将影像的 DN 值转换为传感器处的反射率。

徐涵秋将这项技术归纳为两大类,并分别称之为日照差异校正模型(ICM)和日照大气综合校正模型(IACM)^[19]。二者的不同在于后者进一步引进了 Chavez 的 COST 模型^[20]来进行大气校正。由于本次采用的全部是两种传感器的同日影像对,它们过空时间的差距仅为 30 min 左右,见表 1,因此大气影响可以基本忽略^[4, 18]。加上指数的比值运算又会抵消一部分大气影响,所以本次对比研究采用 ICM 模型进行辐射校正。该模型通过将原始影像的 DN 值转换成传感器处反射率来将这些影像之间的日地距离和太阳天顶角方面的不同进行正规化。其中对于 ETM+ 影像的 ICM 公式为^[15]

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot (Q_{\lambda} \cdot \text{gain}_{\lambda} + \text{bias}_{\lambda}) \cdot d^2}{ES UN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad (1)$$

式中: ρ_{λ} 为象元在传感器处的反射率; Q_{λ} 是波段 λ 的象元 DN 值; gain_{λ} 和 bias_{λ} 是传感器的定标增益值和偏置值; $ES UN_{\lambda}$ 为大气顶部的平均太阳辐照度; d 为日-地天文单位距离; θ_s 为太阳天顶角。这些参数都可以从影像的头文件中或参考文献^[15]中获得。

对于 ASTER 影像,其 ICM 公式^[16]为

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot (Q_{\lambda} - 1) \cdot UCC_{\lambda} \cdot d^2}{ES UN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad (2)$$

式中: UCC_{λ} 为单位转换系数,其余变量同式(1),它们同样可以从影像的头文件或参考文献^[16]中获得。

利用以上公式获得了 ETM+ 与 ASTER 影像经 ICM 模型纠正的传感器处反射率,并计算各波段反射率的统计特征参数(动态范围、均值、标准差)。表 2 是两种传感器与植被指数有关的红光与近红外波段的统计值。

Table 2 Comparison of Red and NIR bands between ASTER and ETM+ data

波段	ETM+			ASTER		
	动态范围	均值	标准差	动态范围	均值	标准差
Red	0 278 3	0 108 8	0 041 8	0 252 6	0 114 0	0 041 0
NIR	0 347 1	0 183 0	0 070 5	0 291 2	0 179 7	0 057 8

1.4 植被指数计算

1.4.1 NDVI 指数

归一化植被指数 NDVI 是应用最广泛的植被指数,其计算公式如下

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}} \quad (3)$$

式中, ρ_{NIR} 和 ρ_{red} 分别为近红外波段和红光波段的传感器处反射率。

1.4.2 SAVI 指数

Huete 提出了土壤调节植被指数 SAVI^[21],该指数通过引入土壤调节因子 l 来克服 NDVI 受土壤背景噪声影响的问题,其公式为

$$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{red})(1 + l)}{\rho_{NIR} + \rho_{red} + l} \quad (4)$$

式中, l 的值介于 0~1 之间,通常选择 0.5 可以较好地减弱土壤噪声的影响^[21]。

1.5 ETM+ 与 ASTER 植被指数转换方程

根据式(3)和(4)分别反演出 ETM+ 与 ASTER 的 NDVI 和 SAVI 指数影像,并将两种传感器对应的植被指数影像的象元值投影到二维特征空间上,然后对二者的关系进行回归分析,求出二者植被指数之间的转换方程[图 3(a), (b)]。进一步计算 ASTER 和 ETM+ 两种植被指数影像的动态范围、均值、标准差以及两种传感器指数之间的 RMSE(表 3),然后,分别用 ASTER 指数影像减去 ETM+ 指数影像,获得各指数的差值影像,并将差值影像与 ETM+ 对应的指数影像投影到二维特征空间上[图 3(c), (d)]。

1.6 转换方程验证

本文利用未参与实验的 2001-5-23 福州幅 ETM+ 与 ASTER 影像来对图 3(a)和(b)中所求得的 ETM+ 与 ASTER 两指数的转换关系方程进行验证。首先将 ASTER 影像的植被指数利用图 3(a)中的关系方程模拟成与 ETM+ 影像对应的植被指数影像(下称模拟影像);然后将模拟影像与对应的 ETM+ 指数影像(下称实际影像)进行比较。

在模拟和实际影像对上随机选取 9 370 个象元作为验证样本,然后将模拟影像与实际影像的验证样本象元值投影到二维特征空间,通过计算各对应指数的 RMSE 来评价转换方程的模拟精度。图 3(e)和(f)中各植被指数的实际值与模拟值的散点都基本沿 1:1 线对称分布,其 RMSE 很小,只有 0.039 2(NDVI)和 0.023 9(SAVI),说明所求的模拟转换方程具有很高的精度。二者中又以 SAVI 的 RMSE 更小,精度更高。这主要得益于 SAVI 转换方程的拟合程度好于 NDVI,其 R^2 值更高。

ETM+ 转换为 ASTER 植被指数的验证同样获得很高的精度,其 RMSE 分别为 0.039 1(NDVI)和 0.023 7(SAVI)(限于篇幅,图略)。

2 结果与讨论

以上实验结果(如图 3 和表 3)发现 ETM+ 与 ASTER 影像对应指数间存在以下关系:

(1) ETM+ 与 ASTER 影像这两种植被指数的均值、标准差的差异都不大, RMSE 都较小, R^2 值都大于 0.93,说明两种传感器的植被指数非常近似。

(2) ETM+ 两个植被指数的统计特征值全部大于 ASTER 对应指数的统计特征值,这说明 ETM+ 植被指数获得的植被信息要比 ASTER 丰富。图 3(a)和(b)中 ASTER 转换为 ETM+ 植被指数的方程的斜率都大于 1,而 ETM+ 转换为 ASTER 植被指数的方程的斜率都小于 1,这也说明了

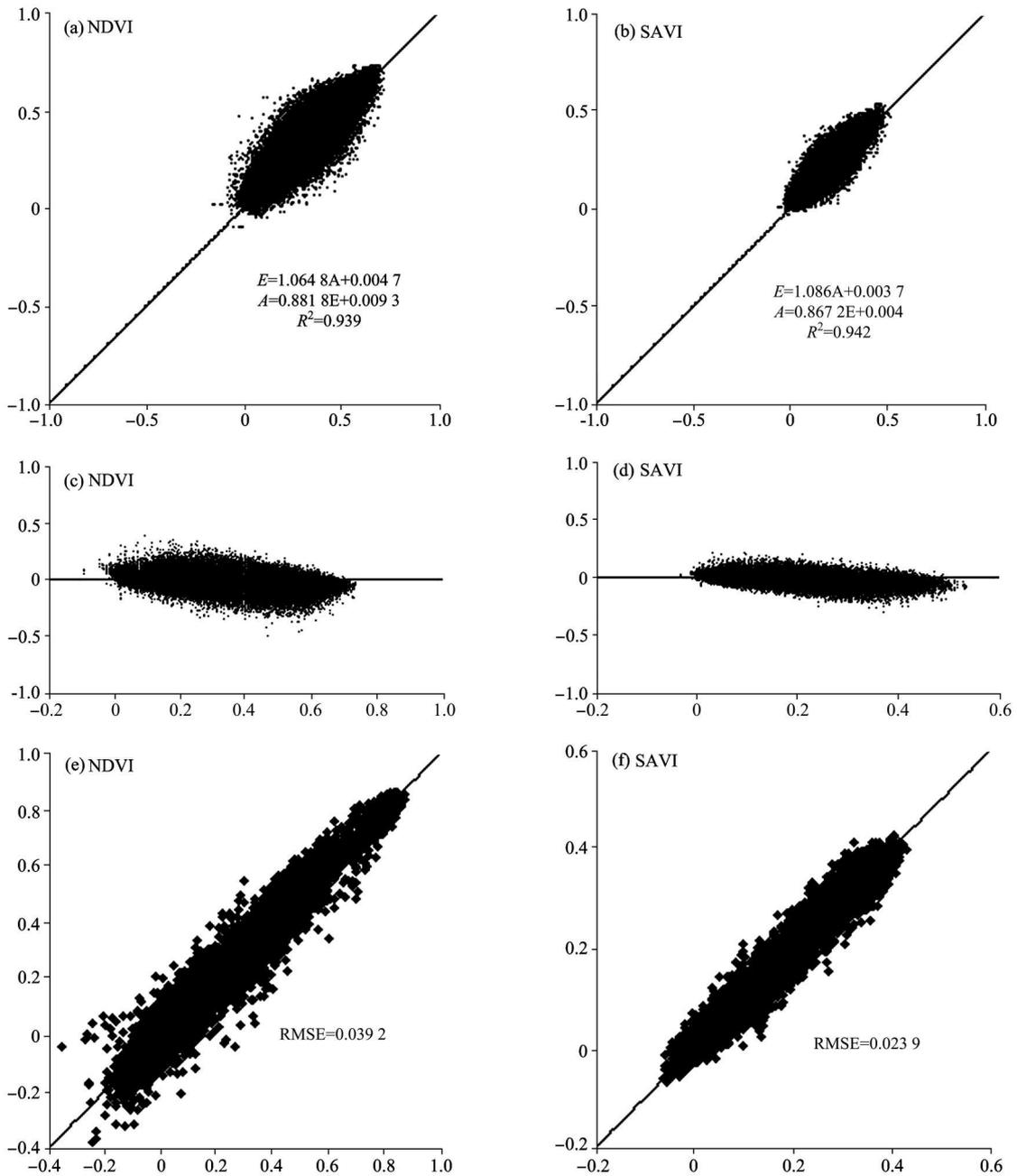


Fig 3 Scatterplots of NDVI (a) and SAVI (b) of ASTER (x axis) vs ETM+ (y axis) with their conversion equations (Letter E stands for ETM+, and A for ASTER). The equations were F tested ($p = 0.001$); Scatterplots of (ASTER-ETM+ vegetation index differencing image) (y axis) relative to corresponding ETM+ index image (x axis) (c)-(d); Scatter plots of simulated vegetation index (y axis) vs. actual vegetation index (x axis) (e)-(f)

Table 3 Comparison of vegetation indices between ETM+ and ASTER data

指数	ETM+			ASTER			RMSE
	动态范围	均值	标准差	动态范围	均值	标准差	
NDVI	0.7135	0.2372	0.2109	0.6962	0.2184	0.1910	0.057
SAVI	0.4909	0.1389	0.1214	0.4657	0.1244	0.1079	0.034

ASTER 植被指数获得的植被信息要小于 ETM+。根据均值计算, ASTER 所获得的植被信息要比 ETM+ 所获得的植被

信息小 7.9% (NDVI) 和 10.4% (SAVI)。

(3) ASTER 减去 ETM+ 植被指数的差值影像的散点分布位置有随 ETM+ 指数值的增大而降低的趋势[见图 3(c) 和 (d)]。这说明, 在植被覆盖率高的地方, ETM+ 影像反演的植被指数值要高于 ASTER 影像, 但在低植被覆盖率的地方, 会出现相反的情况。

以上分析表明, ASTER 与 ETM+ 植被指数虽然很接近, 但仍存在一定的差异, 主要表现在前者反演的植被信号要弱于后者。我们认为这是因为两种传感器在构成植被指数

的红光与近红外波段的光谱响应函数的不同而造成的。从图 4 可以看出, 两种传感器在红光和近红外波段的光谱覆盖范围并不完全一致。ASTER 红光波段光谱范围的上限进入 0.7~0.75 μm 区间, 近红外波段的光谱范围也下探至这一

区域。而 ETM+ 无论是红光或近红外波段的光谱范围都几乎不进入这一区域。这一光谱响应函数的不同就会导致两种传感器的红光和近红外波段所接收到的地物反射信号产生差异。

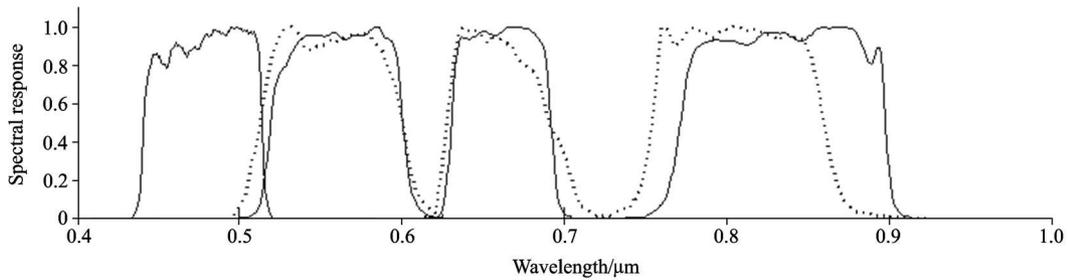


Fig 4 Relative spectral response functions for ETM+ and ASTER visual and near infrared bands

光谱范围 0.7~0.75 μm 区间是著名的植物“红边”所在区域(图 5)^[2], 植物在红光波段中由于叶绿素所导致的对光的吸收作用在这一区域已经停止, 代之的是植物细胞的散射作用。吸收的减弱和散射的增强就会使植物对进入这一区域的 ASTER 红光波段的反射增强, 并大于其对未进入这一区域的 ETM+ 红光波段的反射(表 2)。另外, “红边”区域是植物从吸收转向反射的快速过渡区域, 但其反射尚未达到最强程度, 因此植物对进入这一区域的 ASTER 近红外波段的反射反而有所降低, 低于其在 ETM+ 近红外波段的反射(表 2)。这一增一减就会使得植被在 ASTER 影像中对红光和近红外波段的反射率差距的减小, 从而导致依此计算的植被指数值值的降低, 并出现总体上小于 ETM+ 植被指数值的结果。

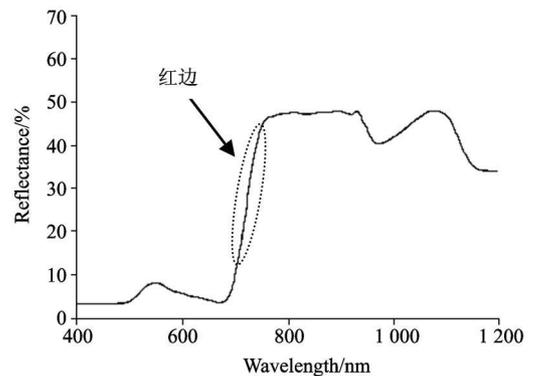


Fig 5 Signature of vegetation and the “red edge”

3 结论

ASTER 的 NDVI 和 SAVI 植被指数与 ETM+ 的对应指数具有极显著的线性正相关关系($R^2 > 0.93$), 利用研究得到的转换关系方程可以实现两种传感器对应植被指数的高精度转换(RMSE < 0.04)。

ASTER 的 NDVI 和 SAVI 指数和 ETM+ 的对应指数也存在一定的差异, 主要表现在 ASTER 所获得的植被信息要比 ETM+ 小 7.9% (NDVI) 和 10.4% (SAVI)。因此在对比这两种传感器的上述植被指数信息时, 要予以注意。

两种传感器在红光与近红外波段的光谱响应函数差异是造成这一差距的主要原因。

References

- [1] Dingirard M, Slater P N. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 194.
- [2] Chander G, Markham B. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(11): 2674.
- [3] Chander G, Meyer D J, Helder D L. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(12): 2821.
- [4] Teillet P M, Barker J L, Markham B L. Remote Sensing of Environment, 2001, 78: 39.
- [5] Thome K J. Remote Sensing of Environment, 2001, 78: 27.
- [6] Thome K J, Biggar S F, Wisniewski W. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1180.
- [7] Steven M D, Malthus T J, Xu H, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(4): 412.
- [8] Thenkabail P S. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(2): 389.
- [9] Goward S N, Davis P E, Fleming D, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(1): 80.
- [10] Soudani K, Francois C, Maire G, et al. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(2): 161.
- [11] LIU Liang ming, LIANG Yitong, MA Huiyun, et al (刘良明, 梁益同, 马慧云, 等). Geomatics and Information Science of Wuhan University (武汉大学学报·信息科学版), 2004, 28(4): 307.
- [12] Van Leeuwen W J D, Orr B J, Marsh S E, et al. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 67.
- [13] CHEN La, HUANG Jing feng, WANG Xir zhen (陈拉, 黄敬峰, 王秀珍). Journal of Remote Sensing (遥感学报), 2009, 12(1): 143.
- [14] Miura T, Yoshioka H, Fujiwara K, et al. Sensors, 2008, 8: 2480.

- [15] Irish R. Landsat 7 Science Data Users handbook. http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/ias/handbook/handbook_toc.html, 2010.
- [16] Abrams M, Hook S, Ramachandram B. ASTER User Handbook, Version 2. http://asterweb.jpl.nasa.gov/documents/aster_user_guide_v2.pdf, 2010.
- [17] Chander G, Xiong X, Choi T, et al. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 925.
- [18] CHEN Zheng-chao, LIU Xiang, LI Jur-sheng, et al(陈正超, 刘翔, 李俊生, 等). Journal of Astronautics(宇航学报), 2008, 29(2): 247.
- [19] XU Har qiu(徐涵秋). Geomatics and Information Science of Wuhan University(武汉大学学报·信息科学版), 2007, 32(1): 62.
- [20] Chavez P S, jr. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025.
- [21] Huete A R. Remote Sensing of Environment, 1988, 25: 295.
- [22] JIANG Jir-bao, CHEN Yuir hao, HU ANG Wei-jiang(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(6): 1614.

Cross Comparison of ASTER and Landsat ETM+ Multispectral Measurements for NDVI and SAVI Vegetation Indices

XU Har qiu, ZHANG Tie jun

Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

Abstract The present paper investigates the quantitative relationship between the NDVI and SAVI vegetation indices of Landsat and ASTER sensors based on three tandem image pairs. The study examines how well ASTER sensor vegetation observations replicate ETM+ vegetation observations, and more importantly, the difference in the vegetation observations between the two sensors. The DN values of the three image pairs were first converted to at sensor reflectance to reduce radiometric differences between two sensors, images. The NDVI and SAVI vegetation indices of the two sensors were then calculated using the converted reflectance. The quantitative relationship was revealed through regression analysis on the scatter plots of the vegetation index values of the two sensors. The models for the conversion between the two sensors, vegetation indices were also obtained from the regression. The results show that the difference does exist between the two sensors, vegetation indices though they have a very strong positive linear relationship. The study found that the red and near infrared measurements differ between the two sensors, with ASTER generally producing higher reflectance in the red band and lower reflectance in the near infrared band than the ETM+ sensor. This results in the ASTER sensor producing lower spectral vegetation index measurements, for the same target, than ETM+. The relative spectral response function differences in the red and near infrared bands between the two sensors are believed to be the main factor contributing to their differences in vegetation index measurements, because the red and near infrared relative spectral response features of the ASTER sensor overlap the vegetation "red edge" spectral region. The obtained conversion models have high accuracy with a RMSE less than 0.04 for both sensors' inter conversion between corresponding vegetation indices.

Keywords NDVI; SAVI; Cross comparison; ASTER; ETM+ ; Spectral response function

(Received Sep. 25, 2010; accepted Dec. 10, 2010)