

# 6S 辐射校正与像元分解结合提高苹果树花期冠层 反射率反演精度

王 凌<sup>1</sup>, 赵庚星<sup>1\*</sup>, 朱西存<sup>1</sup>, 董 芳<sup>2</sup>, 王瑞燕<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018; 2. 济南大学城市发展学院, 济南 250022)

**摘 要:** 为了获取近似真实的苹果树冠层反射率, 该文以山东省栖霞市为研究区, 应用 DEM 数据和 6S 辐射传输模型, 对苹果树花期 TM 影像进行辐射校正、混合像元分解, 获取 26 个果园苹果树冠层反演反射率, 将反演结果与相同时段地面实测冠层反射率以及表观反射率、表观—像元分解反射率进行比较, 分析了反演效果及精度。结果表明, 地表反演反射率有效减弱了地形和大气的影 响, 恢复了阴影处的地物, 影像清晰度明显提高; 苹果树冠层反演反射率样本平均值误差较表观、表观—像元分解、地表反演 3 类反射率小, 与实测值的相关系数提高, 而且样本间变化趋势与实测值基本一致。此反演方法具有一定可行性, 对于苹果树冠层反射率和苹果园管理基础数据获取与应用具有积极意义, 也可 为其他农业遥感反演研究及应用提供借鉴。

**关键词:** 遥感, 反射率, 像元, 辐射校正, 混合像元分解, TM 影像, 6S 模型, 苹果树花期冠层

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.09.016

中图分类号: S127; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-09-0096-07

王 凌, 赵庚星, 朱西存, 等. 6S 辐射校正与像元分解结合提高苹果树花期冠层反射率反演精度[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 96-102.

Wang Ling, Zhao Gengxing, Zhu Xicun, et al. Improving retrieval accuracy of apple tree canopy reflectance at blossom stage by combining 6S radiometric correction with pixel unmixing method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 96-102. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

苹果是世界上最主要的水果, 有 80 多个国家种植, 年产量超过 6 000 万 t, 中国是最大生产国, 面积和产量分别占世界 40%和 33%。随着苹果需求量增加和品质提升的要求, 传统苹果生产管理模式已难以适应。因此, 快速准确地获取苹果种植、营养等信息, 成为苹果生产管理的现实需求, 而定量遥感为此提供了一条快捷可行的途径。

农业定量遥感反演在作物分类、长势监测以及估产领域逐渐显示出应用优势, 但目前对苹果的研究甚少, 且已有研究多集中于地面高光谱<sup>[1-4]</sup>, 难于满足较大尺度苹果定量遥感反演需求。从地面光谱到卫星影像光谱受大气和地形的影响显著, 大气吸收和散射改变了目标辐射亮度; 地形起伏会引起大气成分和浓度差异, 导致大气透过率不同, 同时阴阳坡接收辐射的差异严重干扰影像地物光谱信息, 导致反演精度降低, 因而采取合理的

辐射校正方法消除大气和地形影响至关重要。

近年国内外学者提出多种校正方法, 地形校正模型中以 Dozier 算法最为成熟<sup>[5-6]</sup>, Proy<sup>[7]</sup>、Duguay<sup>[8]</sup>和 Sandmeier<sup>[9]</sup>等均开展过此类研究; 大气校正以 6S(second simulation of the satellite signal in the solar spectrum)大气辐射传输模型应用日益广泛且精度较高, 许多学者基于 6S 校正后影像提取植被指数<sup>[10-11]</sup>、地表反射率<sup>[12]</sup>及估测谷类作物产量<sup>[13]</sup>等, 取得较好效果。将大气校正参数与地形校正模型结合进行辐射校正反演山地辐照度和反射率已渐成趋势<sup>[8, 14-16]</sup>。地表反射率是多种地物的混合光谱, 混合像元分解研究<sup>[17-18]</sup>中以线性模型应用最广<sup>[19]</sup>, 但目前将混合像元分解与辐射校正结合用于反演植物反射率的研究尚不多见, 对于苹果树冠层反射率反演的研究鲜见报道。

花期是苹果树光谱明显区别于其他生长期的重要时相, 也是开展营养诊断的关键期<sup>[1]</sup>。本文以山东省栖霞市为研究区, 结合地面高光谱数据和 DEM 数据, 基于 6S 辐射传输模型和地形校正算法对苹果树花期 TM 影像进行辐射校正及混合像元分解, 力求获取苹果树冠层近似真实的反演反射率, 探讨合理的冠层反射率反演流程与方法, 为后续苹果树营养诊断提供可靠数据。

## 1 材料与方 法

利用地物光谱仪实测研究区高光谱数据, 同步获得 TM 影像, 运用 6S 模型获取大气辐射参数结合 DEM 对影像进行辐射校正, 获取地表反演反射率, 经 GPS 定位

收稿日期: 2011-09-02 修订日期: 2012-03-30

基金项目: 国家“863”计划项目(2008AA10Z203); 山东省自然科学基金项目(ZR2009BQ017); 山东省自主创新重大专项(2009ZHZX1B0801)

作者简介: 王 凌 (1975—), 女, 山东日照人, 讲师, 博士生, 主要从事农业遥感信息与环境生态研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。Email: lingwang@sdau.edu.cn

※通信作者: 赵庚星 (1964—), 男, 山东东营人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事土地资源和遥感信息研究。泰安 山东农业大学资源与环境学院, 271018。Email: zhaogx@sdau.edu.cn

和混合像元分解后获得苹果树冠层反演反射率，同时计算表观反射率和表观-像元分解反射率，最后将冠层反演反射率与地面实测数据及其他 3 类反射率进行反演精度对照，具体流程如图 1 所示。

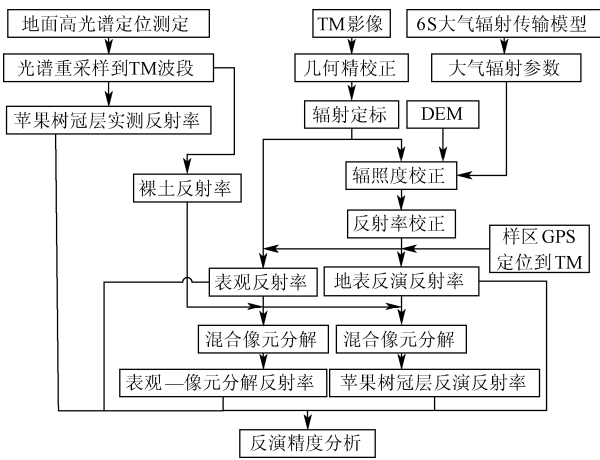


图 1 苹果树冠层反射率反演流程

Fig.1 Retrieval progress of apple tree canopy reflectance

### 1.1 地面高光谱数据获取

#### 1.1.1 高光谱测定

山东栖霞市被称为“中国苹果之都”，位于 120°33 ~ 121°15 E, 37°05 ~ 37°32 N, 主要为丘陵山地，下辖 16 个街道和乡镇，苹果种植面积 33 000 hm<sup>2</sup>，主要品种红富士 (Red Fuji)，花期 4 月下旬至 5 月上旬。光谱采样日期 2009 年 4 月 28—30 日，采样对象为花期红富士苹果树，果园内管理精细，苹果树冠形、营养状况等接近，因而以果园为基本采样单元，本着布点均匀、优劣兼顾的原则，选取 15 个乡镇 26 个果园，每果园选取代表性 30 m×30 m 方格作为样区，用 GPS 测定中心点位坐标，每样区随机选择 3 棵果树为试验样本，同时在 26 个样区随机选取 10 个裸土光谱采样点。

采用美国 ASD 公司 Field Spec 3 便携式地物光谱仪测定高光谱，波长 350~2 500 nm，其中，350~1 000 nm 光谱采样间隔 1.4 nm，1 000~2 500 nm 采样间隔 2 nm。测定时间 10:00~14:00，光谱仪探头垂直向下，视场角 25°，根据冠幅大小调整探头与树冠间距离，确保视场覆盖主体冠层。每样本记录 10 组重复采样光谱，剔除误差大的数据组后取相对反射率平均值导出，并根据白板反射比获取绝对反射率。

#### 1.1.2 高光谱重采样

根据 TM 影像 1-5 和 7 波段光谱范围和响应函数，将 350~2 500 nm 的冠层和裸土绝对反射率重采样，获取每样本 6 个波段的反射率。取每样区 3 棵样本果树各波段平均反射率代表样区冠层整体反射率，用于 TM 影像反射率验证。

### 1.2 TM 影像预处理

选择与高光谱探测同一时段遥感影像，根据卫星运行周期，选取 2009 年 4 月 26 日 Landsat5 TM 影像。

首先利用 1:2.5 万地形图对影像进行几何精校正，

选取控制点 90 个，误差控制在 1 个像元以内。然后采用 TM 增益、偏置系数进行辐射定标，得到辐亮度影像，计算方法为

$$L_{\lambda} = GAIN_{\lambda} \times DN_{\lambda} + BIAS_{\lambda} \quad (1)$$

式中， $L_{\lambda}$  为波段辐射亮度值， $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ； $GAIN_{\lambda}$  和  $BIAS_{\lambda}$  分别为增益和偏置系数； $DN_{\lambda}$  为影像灰度值。

### 1.3 6S 模型辐射参数获取

#### 1.3.1 输入参数确定

1) 几何参数：包括传感器类型、影像接收时间、影像中心经纬度。

2) 大气模式：为了更真实地模拟大气状况，选择  $U_w$  和  $U_{O_3}$  大气模式、陆地气溶胶类型，水汽含量 0.864 g/cm<sup>2</sup>、大气层臭氧浓度 0.379 cm 和 550 nm 气溶胶光学厚度 0.335，参照中国气象科学数据共享服务网 MODIS/terra 气溶胶、水汽、臭氧全球 1°×1°格点日值数据集 2009 年 4 月 26 日数据，并根据日变化规律确定。

#### 1.3.2 输出参数获取

运行 6S 模型 (<http://www-loa.univ-lille1.fr/Wsixs/>)，分别获得 6 个波段的大气辐射参数 (表 1)。

表 1 6S 模型的输出参数

波段	到达地表的太阳直接辐射/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ )	到达地表的大气散射辐射/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ )	到达卫星的大气路径辐射/ ( $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ )	大气光学厚度
1	874.281	478.169	44.389	0.541
2	918.526	368.312	23.766	0.408
3	870.702	270.744	13.547	0.322
4	663.652	139.133	5.301	0.228
5	156.330	12.421	0.258	0.094
7	59.137	3.574	0.040	0.076

### 1.4 辐射校正与地表反射率反演

将大气和地形因素统一考虑，利用 6S 模型参数、DEM (分辨率 30 m) 进行辐射校正获得地表反演反射率，包括辐照度和反射率校正。

#### 1.4.1 辐照度校正

通常坡面像元接收的总辐射包括太阳直射辐射、大气散射辐射和周围地形反射辐射<sup>[20]</sup>。

##### 1) 太阳直射辐射

受坡度、坡向及成像时太阳高度和方位影响，坡面像元接收的太阳直接辐射可分阳坡 ( $I < 90^\circ$ ) 和阴坡 ( $I > 90^\circ$ ) 2 种情况，其式如下

$$\begin{aligned} Ed &= Esd \times \cos(I) && \text{当 } I < 90^\circ \\ Ed &= 0 && \text{当 } I > 90^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $Ed$  为坡面像元接收的太阳直接辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $Esd$  为到达地表的太阳直接辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $I$  为太阳入射角，( $^\circ$ )，由式 (3) 求得：

$$\cos(I) = \cos(Z_s) \times \cos(S) + \sin(Z_s) \times \sin(S) \times \cos(A_s - A) \quad (3)$$

式中， $Z_s$  和  $A_s$  分别是成像时太阳天顶角和方位角 ( $^\circ$ )； $S$  和  $A$  为像元的坡度和坡向，( $^\circ$ )。

##### 2) 大气散射辐射

大气散射辐射分各向异性与各向同性 2 种<sup>[21]</sup>，前者

指发生在太阳周边与直射光方向接近的散射光，后者为从天空各个方向接收均同性的散射光<sup>[9,15]</sup>。

### ① 环日各向异性散射

假定太阳周边散射光与直射光入射方向相同，则环日各向异性散射辐射如下

$$\begin{aligned} Es-c &= Ess \times \cos(I) \times A_i & \text{当 } I < 90^\circ \\ Es-c &= 0 & \text{当 } I > 90^\circ \end{aligned} \quad (4)$$

式中， $Es-c$  为坡面接收的环日各向异性散射辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $Ess$  为到达地表的大气散射辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $I$  为太阳入射角， $(^\circ)$ ； $A_i$  为各向异性指数，用到达地表的太阳直接辐射与大气顶部辐照度之比表示。

### ② 各向同性散射

各向同性散射与地形遮蔽有关，其式如下<sup>[15]</sup>

$$Es-I = Ess \times (1-A_i) \times Vs \quad (5)$$

式中， $Es-I$  为坡面接收的各向同性散射辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $Ess$  和  $A_i$  同式 (4)； $Vs$  为天空可见因子，用从特定地面所见的天空区域与在无遮挡水平地面上看到的天空区域之比表示，借鉴闫广建等<sup>[22]</sup>的算法，搜索目标像元周围  $5 \times 5$  像元 16 个方向上的最大高度角，公式如下

$$Vs = \sum_{i=1}^{16} \left( \frac{\alpha_i}{2\pi} \times \cos \beta_i \right) \quad (6)$$

式中， $\alpha_i$  为  $i$  方向在水平圆周中所占方向角， $\text{rad}$ ； $\beta_i$  为  $i$  方向最大高度角， $(^\circ)$ 。

### 3) 邻近像元反射辐射

其与邻近像元坡向、坡度、距离等的关系非常复杂，为了力求准确，本文基于 Proy 等、闫广建等的方法<sup>[7,22]</sup>计算周围  $5 \times 5$  像元反射辐射。假定小范围内坡面是朗伯体，忽略相邻坡面间多次散射，则中心像元接收相邻像元的反射辐射表示为：

$$Er = \sum_{i=1}^n \frac{(Cp_i \times (Ln_i - Lp) \times e^{\tau/\cos Z_v} \times \cos T_{M_i} \times \cos T_{P_i} \times dS_{P_i})}{(r_{MP_i})^2} \quad (7)$$

式中， $Er$  为接收的相邻像元反射辐射， $W/(m^2 \cdot \mu m)$ ； $n$  为相邻像元的个数，此处为 24； $Cp_i$  为坡向系数，因相邻像元  $P_i$  与中心像元  $M$  的坡向关系而异； $Ln_i$  为相邻像元  $P_i$  的辐亮度， $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ； $Lp$  为大气路径辐射， $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ； $\tau$  为大气光学厚度； $Z_v$  为观测天顶角； $T_{M_i}$ 、 $T_{P_i}$  分别为  $M$ 、 $P_i$  坡面法线与  $MP_i$  连线的夹角； $dS_{P_i}$  为像元  $P$  的实际面积， $m^2$ ； $r_{MP_i}$  为  $M$  和  $P_i$  间的距离， $m$ 。

### 1.4.2 反射率校正

坡面像元发出的总辐射  $L_0$  可由式 (8) 计算

$$L_0 = [\rho_d \times Ed + \rho_s \times (Es + Er)] / \pi \quad (8)$$

式中， $\rho_d$  和  $\rho_s$  分别为坡面像元对直射辐射、散射辐射的反射率； $Ed$ 、 $Es$  和  $Er$  分别为像元接受的太阳直接辐射、散射辐射和邻近像元反射辐射。

坡度和观测天顶角的不同导致坡面直接辐射对于传感器出射角  $E$  的差异，因而引起同物异谱。需将坡面直接反射率转换为出射方向的直接反射率，其式如下

$$\rho_d = \rho_{ed} \times \cos(E) \quad (9)$$

式中， $\rho_{ed}$  为出射方向的直接反射率， $E$  为出射角  $(^\circ)$ 。

由于散射辐射能量较小，Shepherd 等认为当太阳高度角为  $50^\circ \sim 70^\circ$  时，水平面的散射反射率可近似等于水平面的直接辐射反射率<sup>[20,23]</sup>，本文中 TM 成像时太阳高度角  $59^\circ$ ，因此假定  $\rho_s$  等于  $\rho_{ed}$ 。

地表真实反射率  $\rho$  近似等于水平面的直接辐射反射率，由于 TM 的观测天顶角为  $0$ ， $\rho$  近似等于  $\rho_{ed}$ 。经大气衰减后到达传感器，大气路径辐射也会进入传感器，由此地表反演反射率  $\rho$  为

$$\rho = [\pi \times (L_I - L_p) \times e^{\tau/\cos Z_v}] / [Ed \times \cos(E) + Es + Er] \quad (10)$$

式中， $L_I$  为传感器接收的辐亮度， $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ； $L_p$  为大气路径辐射， $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ； $\tau$  为大气光学厚度； $Z_v$  为观测天顶角， $(^\circ)$ ， $E$  同式 (9)， $Ed$ 、 $Es$  和  $Er$  同式 (8)。

## 1.5 混合像元分解与苹果树冠层反射率反演

### 1.5.1 混合像元分解

地表反射率可表示为端元组分的光谱与其面积百分比的函数。对于研究区苹果园而言，管理精细，地物构成简单，因而可分为 2 种端元：苹果树和树间土壤。采用最常用的线性模型分解混合像元，其式为

$$\rho_i = (\rho - \rho_s \times Fs) / Ft \quad (11)$$

式中， $\rho$  为像元地表反演反射率， $\rho_i$  和  $\rho_s$  分别为像元内苹果树冠层反射率和土壤反射率， $Ft$  和  $Fs$  分别为像元内苹果树和土壤面积百分比。

样区土壤为棕壤，属性一致，土壤反射率会因含水量、腐殖质含量等有差异，但对于较大尺度可以忽略，取裸土样本 6 个波段反射率平均值 (0.106、0.152、0.202、0.299、0.397 和 0.353) 代表土壤反射率，前 3 波段与棕壤典型波谱 0.112、0.144 和 0.191<sup>[24]</sup> 相近，面积比例由下式<sup>[25]</sup>得出

$$Ft = (NDVI - NDVI_s) / (NDVI_v - NDVI_s) \quad (12)$$

式中， $NDVI$  为像元的归一化植被指数， $NDVI_v$ 、 $NDVI_s$  分别为纯植被和纯土壤的植被指数，其中， $NDVI_v$  采用  $NDVI$  最大值，由于纯土壤在近红外和红波段反射作用相似<sup>[25]</sup>，因而  $NDVI_s$  近似取 0。

### 1.5.2 冠层反演反射率提取

将样区 GPS 点位经坐标转换定位到辐射校正后的地表反演反射率影像，定位偏移不超过一个像元。若定位点位于像元中心，则以此像元为准；若位于像元边界处，则取邻近像元平均值；同时避开明显受道路等高反射率地物影响的像元。据此获取 26 个样区的地表反演反射率，混合像元分解后即得到苹果树冠层反演反射率。

## 1.6 反演精度分析

为进行反演精度对照，同时获取样区的表现反射率 (代表传感器高度的反射率，未消除大气和地形影响)，并按同样方法进行混合像元分解，得到表现—像元分解反射率。采用统计分析法将表现反射率、表现—像元分解反射率、地表反演反射率和苹果树冠层反演反射率分别与实测冠层反射率比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表反演反射率

将 DN 值、表现反射率、地表反演反射率影像经 4、

3、2 波段假彩色合成后比较表明，地势平坦区的影像类似，但地形起伏区差异明显，截取典型区域如图 2 所示，可以看出图 2c 中地形的影响有效减弱，恢复了阴影处地物，清晰度和对比度较图 2a 和图 2b 有明显提高。图 2b 和图 2a 目视效果相似，但色彩对比度略好于图 2a。

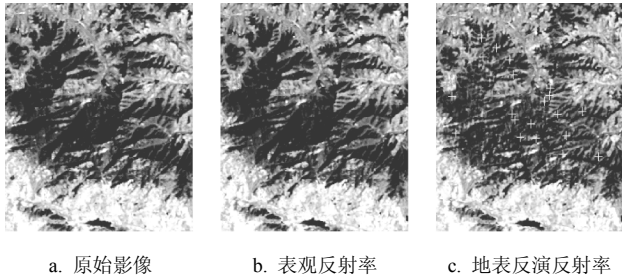


图 2 TM4/3/2 假彩色合成影像校正前后比较

Fig.2 Contrast of false color image of band 4, 3 and 2 before and after radiometric correction

随机选取阴影区 20 个像元（见图 2c 中的十字），统计表观反射率和地表反演反射率如图 3 所示。整体上，地表反演反射率呈升高趋势，尤其是 4、5 波段和 NDVI，说明植被有效恢复，但 1 波段反射率降低，可能与此波段散射强有关。

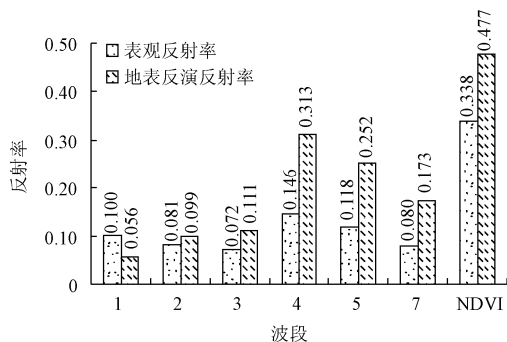


图 3 辐射校正前后波段反射率比较

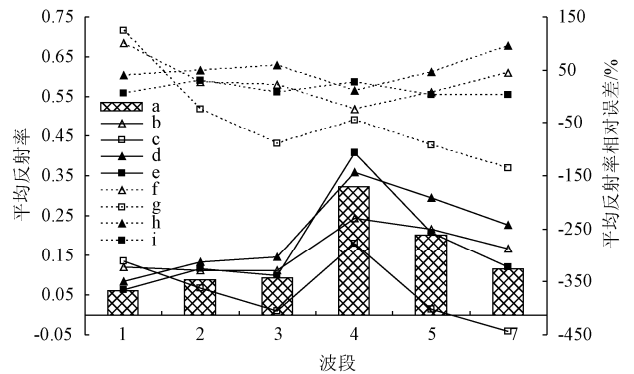
Fig.3 Contrast of band reflectance before and after radiometric correction

## 2.2 苹果树冠层反演反射率

### 2.2.1 波段比较

将 26 个样区的表观、表观—像元分解、地表反演、冠层反演 4 类反射率取波段平均值与实测冠层反射率平均值比较，如图 4。冠层反演反射率除 4 波段高出实测值 0.086 外，其余波段已非常接近实测值；表观反射率的 3、

5 波段与实测值接近，但 1 波段远大于实测值而 4 波段又远小于实测值；表观—像元分解反射率与实测值的差距最大，除 1 波段外均远低于实测值；地表反演反射率的 5、7 波段远比实测值高。总体上，冠层反演反射率不仅绝对误差小，而且相对误差(%)（图 4 虚折线）也表现出一致性，变动范围 3.189~30.918，而表观反射率的相对误差变动于-24.093~100.035，表观—像元分解反射率-135.005~125.001，地表反演反射率 11.261~95.829，其变幅均大于冠层反演反射率的变幅 27.729，说明这一反演方法具有波段稳定性。



注：a.冠层实测反射率；b.表观反射率；c.表观—像元分解反射率；d.地表反演反射率；e.冠层反演反射率；f.表观反射率与实测值相对误差；g.表观—像元分解反射率与实测值相对误差；h.地表反演反射率与实测值相对误差；i.冠层反演反射率与实测值相对误差

图 4 反射率平均值和相对误差比较

Fig.4 Average reflectance and relative error of each band among different types of reflectance

进一步将各波段 4 类反射率分别与实测值进行平均值差异显著性分析，获得相关系数  $r$ 、检验值  $T$  和显著性水平  $P$ ，如表 2 所示， $r$  越大表示与实测值相关性越强， $T$  越小  $P$  越大表明与实测值差异越不显著。从  $r$  值看，除 1 波段外，冠层反演反射率  $r$  值最高，其次为地表反演反射率，说明相关性逐渐提高；从  $T$  值看，除 2、4 波段外，冠层反演反射率  $T$  值最低，表明与实测值差异变小；从  $P$  值看，除冠层反演反射率的 5、7 波段差异不显著外，其余均小于 0.01，表明差异显著。结果说明 4 类反射率与实测值的差异都较大，但这一反演方法可使其与真实值的差距缩小，且相关性明显提高，尤其 5、7 波段，表明波长较长的波段反演效果更好；地表反演反射率  $r$  值较表观反射率提高，但  $T$  值偏高，表明像元分解对于冠层反射率反演是必要的。

表 2 平均反射率差异显著性分析

Table 2 Significance level of average reflectance of each band among different types of reflectance

波段	1			2			3			4			5			7		
	$r$	$T$	$P$	$r$	$T$	$P$	$r$	$T$	$P$	$r$	$T$	$P$	$r$	$T$	$P$	$r$	$T$	$P$
表观反射率	0.49	39.08	0	0.59	14.51	0	0.68	10.88	0	0.60	12.09	0	0.62	3.53	0	0.72	15.59	0
表观—像元分解	0.48	48.08	0	0.24	8.59	0	0.03	22.21	0	0.58	18.40	0	0.20	23.07	0	0.30	22.35	0
地表反演反射率	0.72	19.54	0	0.68	29.69	0	0.72	26.61	0	0.69	6.26	0	0.68	23.34	0	0.72	30.07	0
冠层反演反射率	0.57	2.82	0.01	0.69	14.18	0	0.79	3.64	0	0.70	15.27	0	0.78	1.95	0.06	0.84	1.35	0.19

注： $r$  为相关系数； $T$  为  $T$  检验值； $P$  为显著性水平。

2.2.2 样本比较

将26个样本各波段4类反射率与实测值比较如图5, 不同波段表现出各异分布特点。从反射率看, 波段1、3、5和7以冠层反演反射率最接近实测值, 波段2则是

表观反射率比冠层反演反射率更接近实测值, 波段4以地表反演反射率最接近, 与波段平均值表现一致。从样本间变化趋势看, 整体上仍以冠层反演反射率与实测值最一致, 说明反演方法可使各样本反射率更趋于真实。

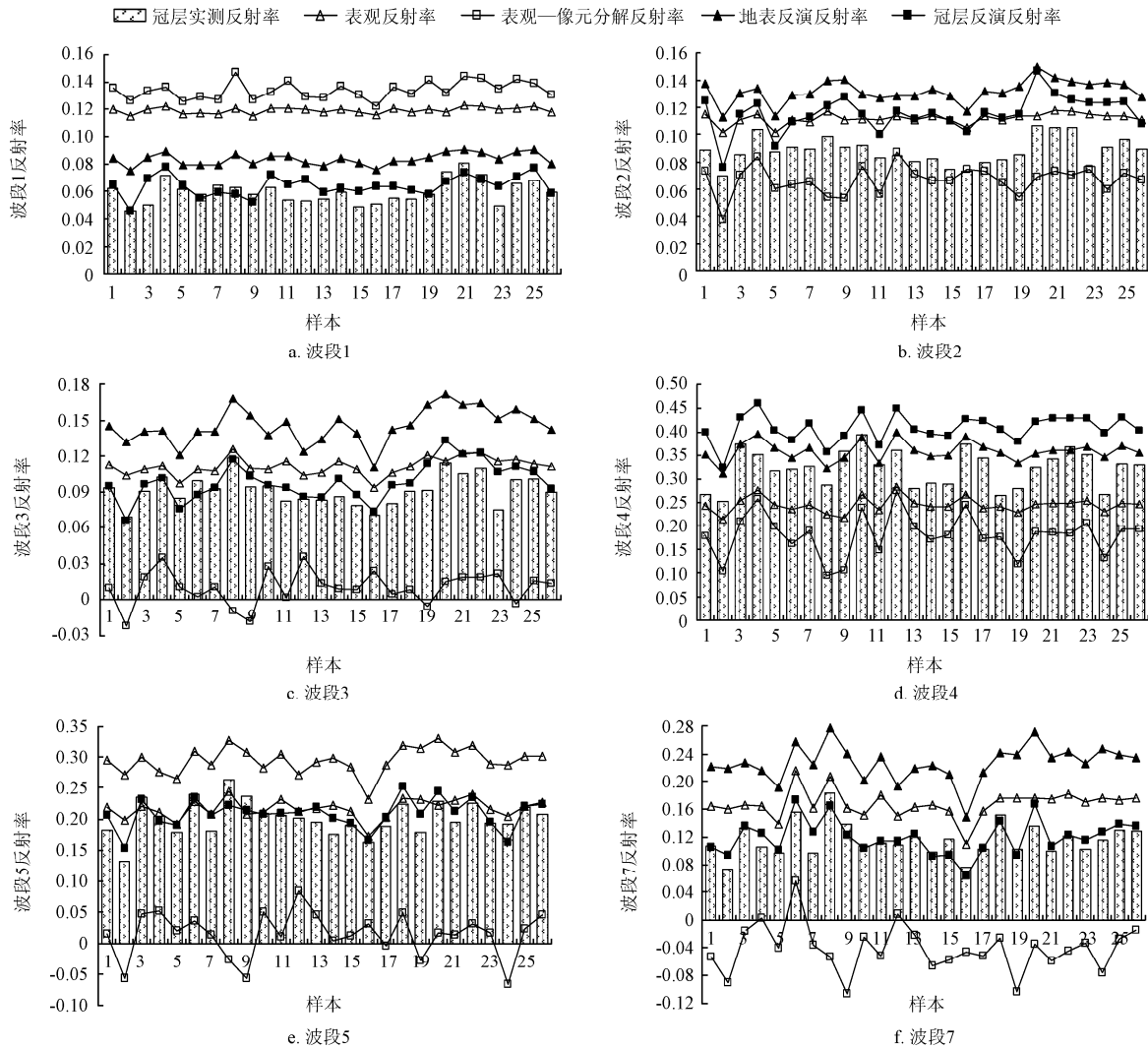


图5 各波段所有样本4类反射率比较

Fig.5 Reflectance contrast of each sample among four types in different bands

表3 各样本反射率估计标准误差

Table 3 Standard error of estimate of band reflectance of each sample

样本	估计标准误差			
	表观反射率	表观—像元分解反射率	地表反演反射率	冠层反演反射率
1	0.0490	0.1354	0.0986	0.0704
2	0.0707	0.1589	0.1121	0.0390
3	0.0737	0.1552	0.0693	0.0342
4	0.0548	0.1137	0.0741	0.0560
5	0.0515	0.1305	0.0729	0.0446
6	0.0612	0.1514	0.0701	0.0347
7	0.0611	0.1376	0.0917	0.0517
8	0.0466	0.2246	0.0689	0.0428
9	0.0799	0.2396	0.0749	0.0290
10	0.0748	0.1377	0.0674	0.0284
11	0.0724	0.1678	0.0907	0.0238
12	0.0583	0.0992	0.0668	0.0483
13	0.0474	0.1213	0.0892	0.0658

续表

样本	估计标准误差			
	表观反射率	表观—像元分解反射率	地表反演反射率	冠层反演反射率
14	0.0611	0.1437	0.1017	0.0577
15	0.0536	0.1466	0.0851	0.0560
16	0.0682	0.1180	0.0600	0.0322
17	0.0722	0.1601	0.0862	0.0450
18	0.0405	0.1435	0.0895	0.0742
19	0.0639	0.1790	0.1100	0.0552
20	0.0488	0.1634	0.0938	0.0574
21	0.0671	0.1546	0.0950	0.0469
22	0.0724	0.1685	0.0841	0.0328
23	0.0755	0.1424	0.0938	0.0486
24	0.0479	0.1862	0.0989	0.0698
25	0.0554	0.1539	0.0789	0.0523
26	0.0590	0.1388	0.0797	0.0388
总计	0.3160	0.7939	0.4377	0.2519

为更清楚地说明样本误差, 计算每样本 6 个波段反射率与实测值的估计标准误差如表 3, 可以看出, 有 19 个样本的冠层反演反射率估计标准误差最小, 多低于 0.06, 而表观—像元分解反射率的估计标准误差最大, 地表反演反射率的估计标准误差高于表观反射率, 究其原因, 地表反演反射率为果树冠层与土壤的混合光谱, 尤其 5、7 波段土壤反射率 (0.397 和 0.353) 远高于冠层反射率 (0.202 和 0.116), 由此导致误差偏高, 也进一步说明像元分解对于冠层反演的重要性。

### 3 结论与讨论

本文以 6S 辐射传输模型和地形校正算法为依据对苹果树花期 TM 影像进行辐射校正得到地表反演反射率, 更细致地考虑了像元反射辐射中的坡向系数和大气参数, 经混合像元分解获取了苹果树冠层近似真实反射率, 得出结论如下:

1) 辐射校正有效减弱了地形和大气的影 响, 地表反演反射率和 NDVI 大幅提高, 恢复了阴影处的地物, 影像解析力较原始 DN 和表观反射率影像明显改善;

2) 苹果树冠层反演反射率与实测值最接近, 除 1 波段外, 相关系数为 4 类反射率中最高, 虽然各波段平均值比实测值略高, 但差异显著性水平明显降低, 5、7 波段差异已不显著, 绝对误差较表观、表观—像元分解、地表反演 3 类反射率大为减小, 相对误差也表现出一致性, 说明反演方法具可行性和稳定性;

3) 样本间比较显示, 波段 1、3、5 和 7 中苹果树冠层反演反射率最接近实测值, 而且其样本间变化趋势也与实测值最一致, 地表反演反射率与冠层实测值的差异偏大, 说明混合像元分解对于冠层反射率反演是必要的;

4) 反演精度受数据获取时间、卫星和大气参数、地形数据、土壤背景、GPS 定位准确性等因素影响, 在反演过程中已尽量减小影响, 但由于反演的复杂性和条件限制, 部分因素仍有待进一步探讨和改善, 如理论上实测与影像拍摄应在同一时间, 2~4 d 的间隔可能会因冠层花量变化而致误差增大; 苹果花较苹果叶的 NDVI 小, 由此可能导致冠层面积比重偏小; 影像拍摄时的即时大气参数目前难以获取。随着相关技术和参数的完善, 反演精度会不断提高, 此反演方法不失为一种可行的苹果树宏观基础数据获取方式。

#### [参 考 文 献]

[1] 朱西存, 赵庚星, 董芳, 等. 基于高光谱的苹果花磷素含量监测模型[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2424—2430. Zhu Xicun, Zhao Gengxing, Dong Fang, et al. Monitoring models for phosphorus content of apple flowers based on hyperspectrum[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2424—2430. (in Chinese with English abstract)

[2] 邢东兴, 常庆瑞. 基于光谱分析的果树叶片全氮、全磷、全钾含量估测研究——以红富士苹果树为例[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(2): 141—147, 154. Xing Dongxing, Chang Qingrui. Research on predicting the TN, TP, TK contents of fresh fruit tree leaves by Spectral

Analysis with Red Fuji Apple tree as an example[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University: Nat. Sci. Ed., 2009, 37(2): 141—147, 154. (in Chinese with English abstract)

- [3] 雷彤, 赵庚星, 朱西存, 等. 基于高光谱的苹果果期冠层光谱特征及其果量估测[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2276—2285. Lei Tong, Zhao Gengxing, Zhu Xicun, et al. Canopy spectral features and fruit amount estimation of apple tree at fruit stage based on hyperspectral data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2276—2285. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王凌, 赵庚星, 朱西存, 等. 苹果盛果期冠层高光谱与其组分特征的定量模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2719—2723. Wang Ling, Zhao Gengxing, Zhu Xicun, et al. Quantitative models between canopy hyperspectrum and its component features at apple tree prosperous fruit stage[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2719—2723. (in Chinese with English abstract)
- [5] 梁顺林著, 范闻捷等译. 定量遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2009, 170—173.
- [6] Dozier J, Frew J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 963—969.
- [7] Proy C, Tanre D, Deschamps P Y. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data[J]. Remote Sense of Environment, 1989, 30: 21—32.
- [8] Duguay C R, Ledrew E F. Estimating surface reflectance and albedo from Landsat-5 Thematic Mapper over rugged terrain [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58: 551—558.
- [9] Sandmeier S, Itten K. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain[J]. IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 708—717.
- [10] Schmidt H, Karnieli A. Analysis of the temporal and spatial vegetation patterns in a semi-arid environment observed by NOAA AVHRR imagery and spectral ground measurements[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(19): 3971—3990.
- [11] Nilson T, Suvist S, Lökk T, et al. Seasonal reflectance course of some forest types in Estonia from a series of Landsat TM and SPOT images and via simulation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(17/18): 5073—5091.
- [12] Lachérade S, Miesch C, Boldo D, et al. ICARE: A physically-based model to correct atmospheric and geometric effects from high spatial and spectral remote sensing images over 3D urban areas[J]. Meteorol Atmos Phys, 2008, 102: 209—222.
- [13] Laurila H, Karjalainen M, Kleemola J, et al. Cereal yield modeling in Finland using optical and radar remote sensing[J]. Remote Sensing, 2010(2): 2185—2239.
- [14] Itten K I, Meyer P. Geometric and radiometric correction of TM-data of mountainous forested areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31: 764—770.

- [15] 亓雪勇, 田庆久. 山地 TM 遥感影像大气辐射校正模型改进及地表反射率反演[J]. 遥感信息, 2007(4): 3—9.  
Qi Xueyong, Tian Qingjiu. Modification of atmospheric correction model and surface reflectance retrieval from TM imagery in rugged terrain[J]. Remote Sensing Information, 2007(4): 3—9. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈志明, 李家国, 余涛, 等. TM 遥感影像的地形辐射校正研究[J]. 遥感信息, 2009(2): 29—33, 70.  
Chen Zhiming, Li Jianguo, Yu Tao, et al. Study on topographic correction approach of TM remote sensing images[J]. Remote Sensing Information, 2009(2): 29—33, 70. (in Chinese with English abstract)
- [17] Bastin L. Comparison of fuzzy c-means classification, linear mixture modeling and MLC probabilities as tools for unmixing coarse pixels[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(17): 3629—3648.
- [18] Mertens K C, Verbeke L P C, Westra T, et al. Sub-pixel mapping and sub-pixel sharpening using neural network predicted wavelet coefficients[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(2): 225—236.
- [19] 胡茂桂, 王劲峰. 遥感影像混合像元分解及超分辨率重建研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, 29(6): 747—756.  
Hu Maogui, Wang Jinfeng. Mixed-pixel decomposition and super-resolution reconstruction of RS image[J]. Progress in Geography, 2010, 29(6): 747—756. (in Chinese with English abstract)
- [20] 段四波, 阎广建, 穆西晗, 等. 基于 DEM 的山区遥感图像地形校正方法[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 18—22.  
Duan Sibao, Yan Guangjian, Mu Xihan, et al. DEM based remotely sensed imagery topographic correction method in mountainous areas[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(6): 18—22. (in Chinese with English abstract)
- [21] 武瑞东. 卫星遥感影像数据的地形影响校正[J]. 遥感信息, 2005(4): 31—35.  
Wu Ruidong. Correcting satellite imagery for topographic effects[J]. Remote Sensing Information, 2005(4): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [22] 闫广建, 朱重光, 郭军, 等. 基于模型的山地遥感图像辐射订正方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(1): 11—15.  
Yan Guangjian, Zhu Chongguang, Guo Jun, et al. A model based radiative transfer algorithm to correct remotely sensed image in mountainous area[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(1): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [23] Shepherd J D, Dymond J R. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17): 3503—3514.
- [24] 童庆禧. 中国典型地物波谱及其特征分析[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 616.
- [25] 赵英时, 等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 374—392.

## Improving retrieval accuracy of apple tree canopy reflectance at blossom stage by combining 6S radiometric correction with pixel unmixing method

Wang Ling<sup>1</sup>, Zhao Gengxing<sup>1\*</sup>, Zhu Xicun<sup>1</sup>, Dong Fang<sup>2</sup>, Wang Ruiyan<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. College of City Development, University of Jinan, Jinan 250022, China)

**Abstract:** In order to obtain approximate true reflectance of apple tree canopy, taking Qixia city in Shandong province as the study area, the ground surface reflectance was retrieved from TM image through radiometric correction based on DEM and atmospheric parameters from 6S Model. And the reflectance of apple tree canopy at blossom stage in 26 sample orchards was further retrieved using pixel unmixing method. Then the retrieval accuracy was assessed by the comparison of retrieval reflectance with measured canopy reflectance at the same time, apparent reflectance, and apparent-unmixing reflectance of 26 samples. The results showed that this method could weaken the effects caused by atmosphere and topography effectively, recover the ground objects in the shadow of the hills. So the analytical ability of ground surface retrieval reflectance images was improved obviously. Errors between canopy retrieval reflectance and measured value were the least of the four types of reflectance, while correlation coefficient between them was the highest. Moreover, the display features of canopy retrieval reflectance among samples were more similar to measured reflectance than that of the other types. It could be concluded that this retrieval method was feasible, so this study will be served as a reliable reference to obtain the base data for the apple tree management, and other similar agriculture retrieval research.

**Key words:** remote sensing, reflection, pixels, radiometric correction, pixel unmixing method, TM image, 6S Models, apple tree canopy