

文章编号: 1000-5641(2017)06-0136-11

GF-1 WFV与Landsat-8 OLI和Sentinel-2A MSI遥感图像光谱信息转换研究

杨天鹏^{1,2}, 闫文佳^{1,2}, 张 远^{1,2}

(1. 华东师范大学 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241;

2. 华东师范大学 地理科学学院, 上海 200241)

摘要: 地表环境的宏观动态监测研究中, 受卫星回归周期及天气的影响, 单颗卫星难以获取长期、连续的光学遥感数据, 因此, 定量分析多平台遥感数据的光谱信息关系是十分必要的. 本研究基于两组同日过境的无云卫星影像(GF-1与Landsat-8和Sentinel-2A), 结合地面调查数据, 进行了不同传感器影像间对应波段的光谱信息对比, 并通过统计回归分析获得了两组卫星对应波段(蓝、绿、红和近红外)的反射率转换方程. 研究结果显示, GF-1与Landsat-8和GF-1与Sentinel-2A对应波段的反射率都具有很强的相关性, 得到的转换方程能够对上述三种卫星数据间对应波段的光谱信息实现高精度的转换. 本研究能够实现同日多光谱遥感数据的光谱信息转换及协同应用, 并为区域资源环境的长期定量遥感监测提供技术支持.

关键词: GF-1; Landsat-8; Sentinel-2A; 遥感; 传感器; 反射率; 转换方程

中图分类号: TP732 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2017.06.013

Conversion study on multi-spectral information of remote sensing images GF-1 WFV, Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI

YANG Tian-peng^{1,2}, YAN Wen-jia^{1,2}, ZHANG Yuan^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education),*

East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. *School of Geographic Sciences, East China Normal University,*
Shanghai 200241, China)

Abstract: Owing to the restrictions in weather conditions and revisit cycle of satellites, single satellite can't successively acquire effective optical RS data for long-term monitoring the terrestrial environments. Therefore, it is crucial important to analyze the multi-spectral information of multi-source RS data. In this study, two groups of clear RS images (GF-1 and Landsat-8, GF-1 and Sentinel-2A), in along with ground survey data, were respectively acquired on identical date. Four bands, blue, green, red and near infrared (NIR), were selected to compare their spectral characteristics. At the same time, conversion equation

收稿日期: 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(41571410); 上海市自然科学基金(15ZR1411800)

第一作者: 杨天鹏, 男, 硕士研究生, 研究方向为GIS与遥感应用. E-mail: 932032777@qq.com.

通信作者: 张 远, 男, 博士, 副教授, 研究方向为生态遥感. E-mail: yzhang@geo.ecnu.edu.cn.

for reflectance of four corresponding spectral bands was derived respectively via statistical regression method. The result shows that each pair of bands in the two comparing groups has a strong correlation. And, these conversion equations can effectively converse spectral information in between each band of two comparing groups with a better precision. This study provides a useful technological approach for the identical date information integration and syngeneic application of multi-spectral RS data from the same day, as well as quantitatively monitoring the long-term dynamics in environments and resources at regional scale.

Key words: GF-1; Landsat-8; Sentinel-2A; remote sensing; sensor; reflectance; conversion equation

0 引言

近年来, 卫星遥感技术发展迅速, 众多新型卫星相继发射, 遥感对地观测能力逐步提高. 然而, 由于受到云、雨天气的影响及回归周期的限制, 单颗光学遥感卫星在进行长时间序列和高质量的无云影像获取中皆显得力不从心, 为此, 实现多源遥感数据的互补应用则显得尤为重要. 徐涵秋等^[1]利用归一化植被指数(NDVI)将 GF-1 PMS 与 ZY-3 MUX 传感器在植被观测能力上进行了对比, 发现 ZY-3 MUX 的 NDVI 信息量和信号总量强于 GF-1 PMS. Van Leeuwen 等^[2]对 MODIS 和 AVHRR 影像的 NDVI 进行对比, 发现两者有较好的线性相关性, 通过线性方程可相互转换, 但 NDVI 指标仅涉及到近红外和红波段, 没有对其它波段信息进行对比. 贾玉秋等^[3]利用 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像进行了玉米 LAI 反演对比, 发现 GF-1 影像的蓝、绿、红和近红外波段表现反射率 (Top of the Atmosphere Reflectance, TOA 反射率) 与 Landsat-8 有显著的线性关系, 但所获得的线性关系方程由于选取的样本点较少, 转换精度有待提高. 苏涛等^[4]将 IRS-P6 LISS-3 和 Landsat-5 TM 两种多光谱传感器影像进行了数据对比, 也针对对应波段的 TOA 反射率建立了转换方程, 但该研究并没有考虑各波段的地表真实反射率 (Bottom of the Atmosphere Reflectance, BOA 反射率). 当前在轨运行的代表性资源卫星中, Landsat-8 是美国国家航空航天局 (NASA) 于 2013 年 2 月 11 日发射的第八代陆地资源卫星^[5]; 2015 年 6 月 23 日发射的哨兵 2A 号 (Sentinel-2A) 是欧空局 (ESA) “哥白尼” 计划下多光谱成像任务中的首发星^[6]; 高分一号 (GF-1) 卫星是我国高分辨率对地观测系统重大专项天基系统中的首发星, 于 2013 年 4 月 26 日发射^[7]. 3 颗卫星凭借数据精度高、更新速度快、成像波段多等优势, 广泛应用于精细农业、污染监测、土地资源管理、公共安全等领域. 可以预见, 这 3 种卫星数据在当前以及今后相当长时期内, 将成为最具广泛应用前景的地表资源环境遥感监测数据源. 目前 3 颗卫星运行状况良好, 数据质量高且可免费获取, 是今后实现卫星长时间序列数据集构建重要的互补性数据源. 因此, 开展上述卫星数据间的光谱信息对比及定量分析转换研究具有重要意义. 基于此, 本研究将 GF-1 与当前国际上使用广泛的 Landsat-8 以及 Sentinel-2A 进行对比, 定量分析 GF-1 与另外两颗卫星在蓝、绿、红、近红外波段 TOA 反射率以及 BOA 反射率中的差异和相关性, 以期提升我国 GF-1 数据的应用价值、拓展数据的应用领域、增强多源多光谱遥感数据在定量遥感研究中的互补提供技术支持.

1 数 据

为了准确量化不同卫星多光谱传感器各波段之间的信息差异, 一个重要的前提条件

是选取同日过境、太阳高度角和方位角接近且有重叠覆盖范围的无云卫星影像. 这样可以保证传感器在获取遥感数据时大气影响的差异最小, 并且获得的地表反射能量最为接近. 由于不同卫星的重访周期和幅宽不同, 因此难以获取一个地区内的同一天、同时过境的三颗卫星影像. 本研究获取了 2014 年 9 月 8 日同天过境研究区 1(123°02' ~123°44'E, 41°11' ~41°37'N)的 GF-1 WFV2 及 Landsat-8 OLI 遥感影像, 以及 2016 年 8 月 22 日覆盖研究区 2(122°48' ~123°47'E, 41°10' ~41°35'N)的 GF-1 WFV3 及 Sentinel-2A MSI 影像. 研究区主要土地覆盖类型包括耕地、林地、水体、裸土和不透水面(建筑物、道路等), 具体地理范围如图 1 所示.

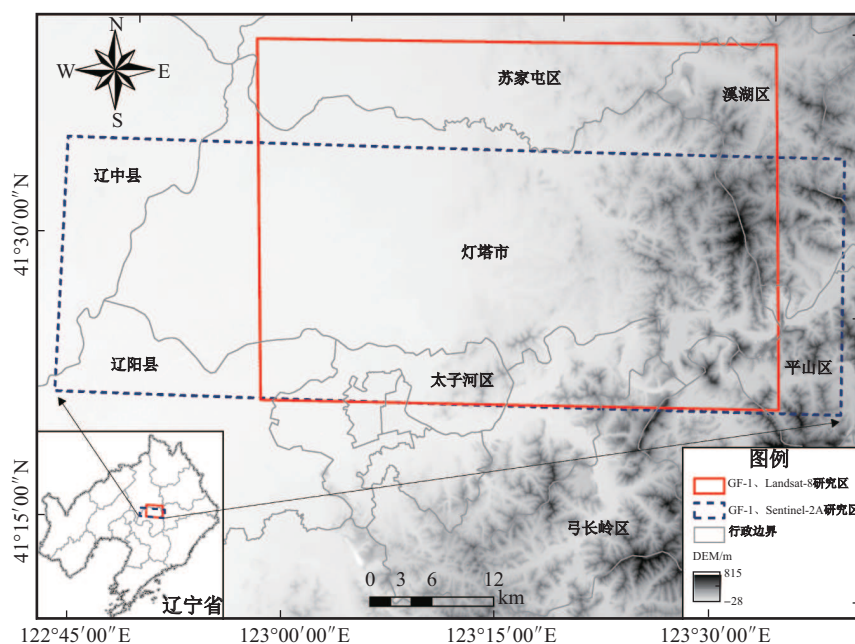


图 1 研究区域图

Fig. 1 Study areas

GF-1 卫星搭载了一台 2 m 分辨率的全色相机、一台 8 m 分辨率的多光谱相机 (PMS) 和四台 16 m 分辨率多光谱相机 (WFV). 基于卫星观测模式 and 对比影像的空间分辨率信息特征, 共获取两景 GF-1 多光谱 16 m 影像. 研究区 1 选取的 GF-1 WFV2 影像成像时间为 2014 年 9 月 8 日, 研究区 2 选取的 GF-1 WFV3 影像成像时间为 2016 年 8 月 22 日. Landsat-8 卫星携带有 OLI 和 TIRS 两个传感器: ①陆地成像仪 OLI, 包括 9 个波段, 空间分辨率为 30 m(全色波段为 15 m), 成像幅宽为 185 km; ②热红外传感器 TIRS, 包括 2 个热红外波段, 空间分辨率为 100 m. 本研究获取的 Landsat-8 OLI 影像包括 L1T 级产品和在其基础上经过大气校正的 L2 级产品, 成像时间为 2014 年 9 月 8 日. Sentinel-2A 卫星携带一个多光谱传感器 MSI, MSI 包括 13 个波段, 空间分辨率有 10 m、20 m、60 m 3 种, 成像幅宽 290 km. 本研究获取的 Sentinel-2A MSI 影像成像时间为 2016 年 8 月 22 日. 上述 3 颗卫星的具体参数及要对比的对应波段信息如表 1 及图 2 所示. 同时, 课题组于 2016 年 9 月 15-17 日对研究区进行了为期 3 d 的实地调查. 通过田间观测和走访咨询, 获得了大量研究区的地物类型(耕地、林地、水体、城镇等)、分布规律及植被的物候特征等信息(见图 2), 这为提高遥感影像的地类识别, 以及对比样本点选择的精度提供了有效保证.

表 1 GF-1、Landsat-8及Sentinel-2A卫星参数表

Tab. 1 System parameters of GF-1, Landsat-8 and Sentinel-2A							
卫星	分辨率/m	重访周期/d	幅宽/km	波段数	传感器		
GF-1	16	4(有侧摆)	800(4台相机)	4	WFV2; WFV3		
Landsat-8	30	16	185	9	OLI		
Sentinel-2A	10	10(双星5)	290	13	MSI		
对应波段及波长范围/ μm				地方时间		轨道号	
B1(Blue): 0.450~0.520	B2(Green): 0.520~0.590	B3(Red): 0.630~0.690	B4(NIR): 0.770~0.890	WFV2: 2014/09/08 11:01	WFV3: 2016/08/22 11:30	WFV2: P594R87	WFV: P595R87
B2(Blue): 0.450~0.520	B3(Green): 0.520~0.590	B4(Red): 0.630~0.690	B5(NIR): 0.770~0.890	2014/09/08 10:28		P119R31	
B2(Blue): 0.430~0.550	B3(Green): 0.515~0.605	B4(Red): 0.623~0.702	B8(NIR): 0.765~0.920	2016/08/22 10:38		相对轨道: 绝对轨道: R089 R00609	

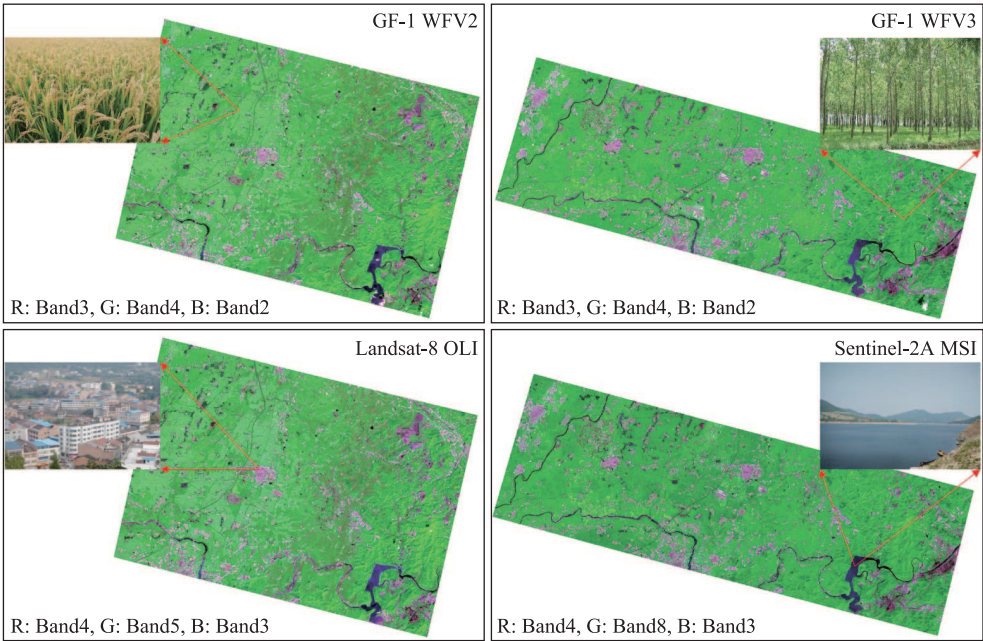


图 2 用于对比的遥感图像以及研究区典型地物类型

Fig. 2 Remote sensing images for comparison and typical land covers in study areas

2 方 法

2.1 数据处理

对于 GF-1 的 WFV2 和 WFV3 影像, 处理步骤包括: 正射校正, 几何校正, 辐射定标和大气校正. 首先, 参考空间分辨率为 30 m 的 DEM 数据对 GF-1 影像进行正射校正, 减小因地形起伏对数据造成的影响; 然后, 分别以经过严格校正的 Landsat-8 以及 Sentinel-2A 影像作为参考^[8], 对同时期 GF-1 数据进行几何校正; 接下来对校正后的数据进行辐射定标, 定标参数从中国资源卫星应用中心获取 (<http://www.cresda.com/CN/Downloads/dbcs/10506.shtml>); 最后, 通过 ENVI5.3 软件提供的 FLAASH 方法进行大气校正. 具体定标公式如下.

GF-1辐射定标公式:

$$L_{\lambda} = Gain \cdot DN. \quad (1)$$

式中, L_{λ} 为辐射亮度, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; $Gain$ 为增益; DN 为亮度值. GF-1 辐射亮度转换为 TOA 反射率计算公式为^[9]

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_S \cdot \cos(\theta_{SE})} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_S \cdot \sin(\theta_{SZ})}. \quad (2)$$

式中, ρ_{λ} 为 TOA 反射率; L_{λ} 为辐射亮度; d 为日地天文单位距离; E_S 为大气层外波段太阳辐照度, 单位为 $W/(m^2 \cdot \mu m)$; θ_{SE} 为太阳天顶角; θ_{SZ} 为太阳高度角, 且满足 $\theta_{SE} = 90^\circ - \theta_{SZ}$.

对于 Landsat-8 OLI 的 L1T 级产品, 主要通过美国地质调查局 (USGS) 提供的定标参数(可从影像头文件中获得)对其进行辐射定标处理, 得到大气上行辐射亮度, 再计算 TOA 反射率. L2 级产品为经过大气校正之后的 BOA 反射率数据, 经 USGS 数据分发网站(<http://earthexplorer.usgs.gov/>)可以免费下载. 本研究采用的具体计算公式如下.

Landsat-8 OLI 大气上层辐照度计算公式^[10]:

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{CAL} + A_L. \quad (3)$$

式中, L_{λ} 为辐射亮度, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; M_L 为辐射亮度增益; A_L 为辐射亮度偏移; Q_{CAL} 为影像 DN 值. Landsat-8 OLI 辐射亮度转换为反射率计算公式:

$$\rho_{\lambda} = M_{\rho} \cdot Q_{CAL} + A_{\rho} / \cos(\theta_{SZ}). \quad (4)$$

式中, ρ_{λ} 为 TOA 反射率; M_{ρ} 为反射率增益; A_{ρ} 为反射率偏移; Q_{CAL} 为像元 DN 值; θ_{SZ} 为太阳高度角. Sentinel-2A MSI 影像是从 ESA 网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)下载到的, Sentinel-2A MSI L1C 级产品为经过定标之后的 TOA 反射率, 为方便数据的存储, 数值被扩大了 10 000 倍^[11]. 主要数据处理步骤是进行大气校正. 本研究采用的是欧空局开发的开源遥感数据处理软件 SNAP 上用于处理 Sentinel-2A L1C 级产品的工具箱 SEN2COR 来计算 BOA 反射率^[12].

2.2 样本数据选择

为了对比两组传感器在蓝、绿、红、近红外波段 TOA 反射率以及 BOA 反射率的差异, 参考同时期高分 2 号(GF-2)的高清影像(0.8 m)和 2016 年 9 月的实地调查数据, 选取了耕地、林地、水体、裸土和不透水面等类型用于反射率定量对比研究. 样点数据的选择是本研究中最关键的步骤, 后期数据的统计分析都在此基础上进行. 为此, 样点的选择应满足以下原则.

- (1) 选取无云区域, 尽可能减少复杂大气环境对结果造成的影响.
- (2) 样点应选择均质区域, 并尽可能选取均质区域中央位置, 以确保选择纯像元.
- (3) 应在一定的波长范围内选取样本, 即高低反射率地物都应涉及, 这样才能客观地对比不同传感器在整个波谱范围的性能.

- (4) 选取地每类地物样本数目不少于 300 个, 以确保不同传感器对应波段间数据的可信度.

GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI TOA 反射率和 BOA 反射率的对比研究共选取了 1 903 个纯样点, GF-1 WFV3 与 Sentinel-2A MSI 的对比则选取 1 527 个纯样本点. 对于每组对比图像, 随机选取每类地物纯样本点中 2/3 用于不同传感器光谱信息对比及回归建模, 其余的 1/3 用于转换结果的精度验证.

2.3 回归模型建立与检验

本研究采用统计线性回归方法, 对不同传感器各个对应波段的 TOA 反射率及 BOA 反射率进行逐一对比. 利用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 这两个评价指标, 分别进行对应波段光谱反射率回归分析. 然后利用回归得到的转换方程进行 TOA 反射率及 BOA 反射率的模拟, 线性回归方程的显著性检验是借助 F 检验来实现的.

决定系数 R^2 均方根误差 RMSE 计算公式为^[13]

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}. \quad (6)$$

式中, n 为验证样点数量; y_i 为样点实测值; \hat{y}_i 为样点估测值; \bar{y}_i 为样点平均值.

F 检验计算公式为

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (7)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (8)$$

$$F = \frac{U}{Q/(n-2)}. \quad (9)$$

式中, Q 为误差平方和或剩余平方和; U 为回归平方和; n 为样本数.

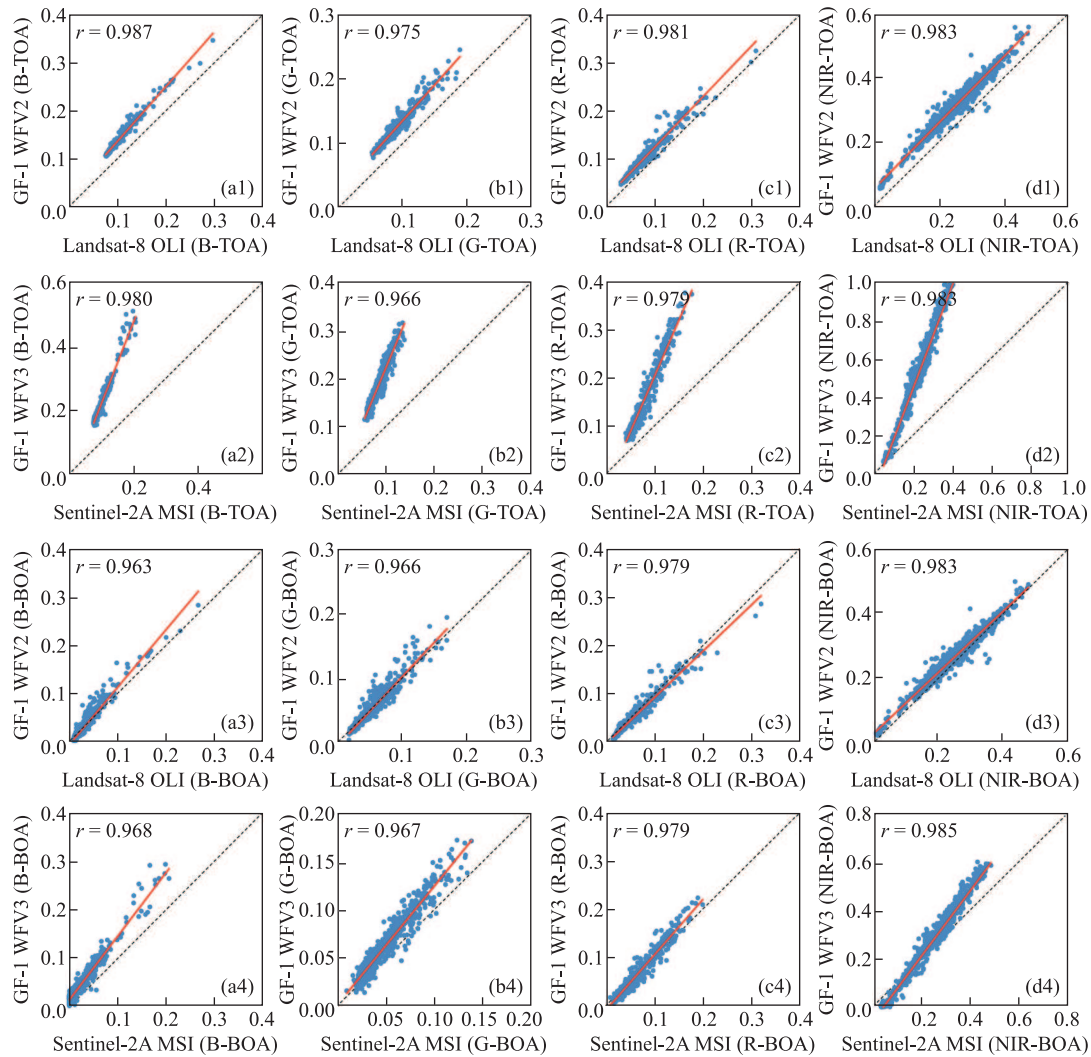
3 结果与分析

在选择样本点处, 分别提取了 3 颗卫星各个波段的 TOA 及 BOA 反射率数值, 得到了两组卫星对应波段的光谱信息对比结果(见图 3).

由图 3 可见, 对于 TOA 和 BOA 反射率, GF-1 WFV 与 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 数据在蓝 (B)、绿 (G)、红 (R) 和近红外 (NIR) 波段都不同程度地存在一定偏差. 而且, 对比卫星对应波段的光谱值的相关系数 r 均大于 0.96, 这表明各个对应波段反射率都具有很强的线性相关性. 横向对比结果显示: 在 TOA 反射率上, GF-1 WFV2 各个波段反射率数值普遍高于 Landsat-8 OLI, 拟合直线与 1:1 线几乎平行(图 3(a1)–(d1)); GF-1 WFV3 各个波段反射率数值普遍高于 Sentinel-2A, 拟合直线随着反射率数值增加而逐渐偏离 1:1 线(图 3(a2)–(d2)); 对于 BOA 反射率, GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI 各个波段的差异不大, 分布在 1:1 线两侧(图 3(a3)–(d3)); GF-1 WFV3 各个波段 BOA 反射率数值大部分高于 Sentinel-2A MSI, 并随着反射率数值增加差异逐渐增大(图 3(a4)–(d4)). 通过纵向对比可发现, 与 TOA 反射率对比结果相比, 经过大气校正之后的 BOA 反射率数值的差异降低明显, 一致性明显提高.

为了分析产生上述波谱信息差异的原因, 本研究绘制了 3 颗卫星对应波段的光谱响应曲线(见图 4). 其中, GF-1WFV 光谱响应曲线由中国资源卫星应用中心提供的光谱响应函数进行绘制 (<http://www.cresda.com/CN/Downloads/gpxyhs/index.shtml>); Landsat-8 OLI 的光谱响应曲线则通过美国地质调查局 (USGS) 提供的光谱响应函数进行绘制(<https://landsat.usgs.gov/using-usgs-spectral-viewer>); Sentinel-2A 光谱响应值可直接从下

载到的影像参数信息中获取并绘制成图。



注: a、b、c、d分别指代蓝、绿、红、近红外波段

图3 TOA反射率和BOA 反射率对比散点图

Fig. 3 Scatter plots of TOA and BOA reflectance comparison

由图 4 可以看出, GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI 两传感器的蓝与绿波段波谱带宽设置较为接近,但在红和近红外波段,波谱带宽差异显著(见图 4)。对于 GF-1 WFV3 与 Sentinel-2A MSI 而言,除了近红外波段,GF-1 的波谱带宽明显要比 Sentinel-2A 宽。

波谱范围越宽,则传感器获得的能量越多。由图 4(a) 可知,WFV2 各个波段的波谱范围比 OLI 要宽,在蓝、绿波段,两者光谱响应值差异不大,在红波段中心波长位置 WFV2 光谱响应值稍低于 OLI。在近红外波段,只有在很窄的范围内 WFV2 光谱响应值小于 OLI,光谱响应值越大,传感器接收到的信号能量越强。结合图 3(a1)–(d1) 不难发现,WFV2 在蓝、绿波段 TOA 反射率比 OLI 要大,在红、近红外波段部分值要小于 OLI,这与光谱响应曲线体现出来的差异一致,波谱范围和光谱响应值共同影响反射率的大小。由图 4(b) 可见,WFV3 各个波段的波谱范围大于 Sentinel-2A MSI,在近红外波段波谱范围差异最小。各对应波段 WFV3 光谱响应值比

MSI 要高, 在蓝、绿、红波段差异最大, 在近红外波段差异最小. 通过图 3(a2)–(d2) 容易发现, WFV2 各个波段的 TOA 反射率数值要大于 MSI 反射率数值, 蓝、绿、红波段反射率的差异最大, 近红外波段反射率差异最小, 两者结果一致. 由图 3(a3)–(d3) 和图 3(a4)–(d4) 发现, BOA 反射率数值比 TOA 反射率数值低, 由于大气校正, 减弱了大气的影响, 降低了反射率.

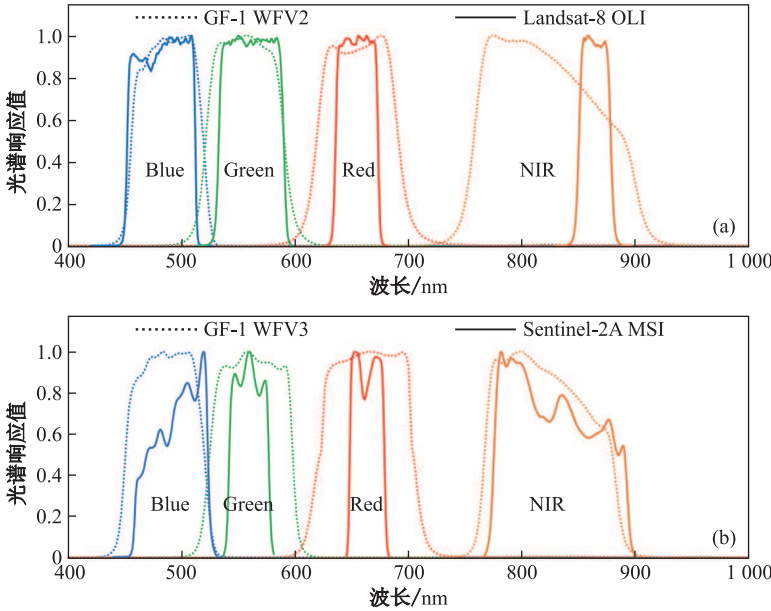


图 4 传感器光谱响应曲线

Fig. 4 Spectral response curves of GF-1, Landsat-8 and Sentinel-2A

基于对两组数据的波段信息对比可知, 构建 GF-1 与其他两颗卫星对应波段的光谱信息转换方程, 便可实现不同卫星之间对应波段的相互转换. 通过对 GF-1 WFV 与 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 影像各个波段反射率分别进行回归分析, 获得了 WFV2 与 OLI 以及 WFV3 与 MSI 传感器在蓝、绿、红、近红外波段的反射率转换方程(见表 2).

表 2 GF-1 WFV与Landsat-8 OLI和Sentinel-2A MSI的光谱转换方程

Tab. 2 Equations for spectrally conversing Landsat-8 OLI to GF-1 WFV2 and Sentinel-2

MSI to GF-1 WFV3			
传感器	波段	TOA反射率转换方程	BOA反射率转换方程
WFV2与OLI	蓝	$y = 1.141\ 0x + 0.021\ 7$	$y = 1.219\ 1x - 0.013\ 6$
	绿	$y = 1.125\ 4x + 0.023\ 2$	$y = 1.086\ 9x - 0.009\ 3$
	红	$y = 1.054\ 9x + 0.019\ 9$	$y = 0.953\ 9x - 0.001\ 3$
	近红外	$y = 1.025\ 3x + 0.058\ 2$	$y = 0.947\ 7x + 0.029\ 6$
WFV3与MSI	蓝	$y = 0.374\ 3x + 0.017\ 9$	$y = 0.709\ 5x - 0.007\ 5$
	绿	$y = 0.396\ 9x + 0.010\ 1$	$y = 0.760\ 7x + 0.001\ 3$
	红	$y = 0.414\ 4x + 0.013\ 4$	$y = 0.827\ 7x + 0.010\ 3$
	近红外	$y = 0.360\ 0x + 0.040\ 2$	$y = 0.722\ 6x + 0.044\ 8$

为了检验转换方程的效果, 本研究将 Landsat-8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 进行了波段转换, 并将转换结果分别于 GF-1 WFV2 及 GF-1 WFV3 进行了对比验证. 其中, 选择了总体样本点中

余下的 1/3 作为验证数据用来进行光谱转换效果的验证, 结果如图 5 所示.

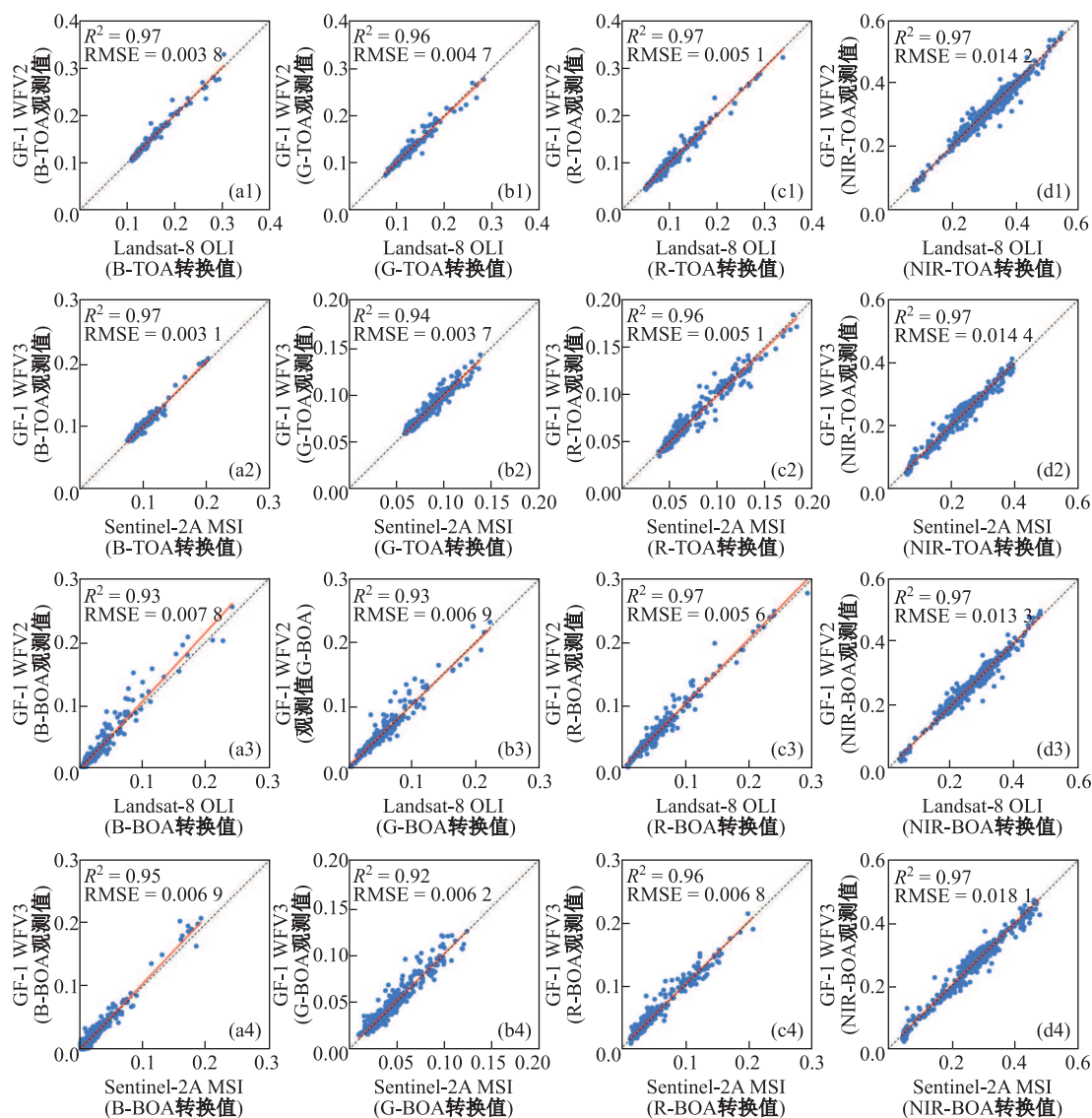


图5 Landsat-8 OLI和Sentinel-2A MSI的转换值与GF-1的观测值对比验证结果图

Fig. 5 The results of Landsat-8 OLI and Sentinel-2A MSI conversion value contrast with the observed values of GF-1

通过对比由转换方程计算的 GF-1 WFV2 和 WFV3 的各个波段 TOA 反射率与另外两颗卫星数据的对应波段反射率值发现, 两组对比数据的一致性显著提高, 拟合直线与 1:1 线几乎重叠(见图 5). 统计分析显示, 对于 GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI 两传感器在可见光(蓝、绿、红)波段, RMSE 都低于 0.008, 在近红外波段 $RMSE < 0.015$, $R^2 > 0.93$. 通过一元线性回归模型 F 检验得到, 在置信度水平 $\alpha = 0.05$ 下, $F \gg F_{0.05}(1, 632)$, 说明回归方程在此水平上是显著的. 对于 GF-1 WFV3 与 Sentinel-2A MSI 两传感器, 可见光(蓝、绿、红)波段的 $RMSE < 0.007$, 在近红外波段 RMSE 最大值为 0.0181, $R^2 > 0.92$. F 检验结果显示在置信度水平 $\alpha = 0.05$ 下, $F \gg F_{0.05}(1, 509)$, 这表明回归方程在此水平上是显著的, 所建立的光谱转换方程的转换效果

较好.

4 结 论

本文通过选取同日过境的卫星影像,对比分析了 GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI 以及 GF-1 WFV3 与 Sentinel-2A MSI 对应波段在 TOA 及 BOA 反射率上的差异. 通过统计回归拟合得到了 GF-1 与另两颗卫星的波段光谱信息转换方程,并利用大量的样本点对光谱转换方程进行了验证. 研究表明,多光谱数据 GF-1 与 Landsat-8 以及 GF-1 与 Sentinel-2A 的各个对应波段在 TOA 以及 BOA 反射率上具有很好的线性相关性,对于少量云层覆盖,地物类型丰富的地区,可以对不同传感器数据采用线性光谱转换. 在进行光谱转换时,两景影像时间间隔不宜过长,否则影响转换结果. 通过转换方程计算得到的 GF-1 转换值与观测值对比验证得出,本研究获得的 GF-1 WFV2 与 Landsat-8 OLI 以及 GF-1 WFV3 与 Sentinel-2A MSI 转换方程在 TOA 和 BOA 反射率中能够实现数据间的高精度转换,这将为多源遥感数据在农作物生长状态的长期定量监测、自然灾害持续定量监测等领域提供技术支持.

另外,本研究显示,所选择的 3 个卫星的过境时间存在差异(约 0.5~1 h)(见表 1),因此如果研究区域有云移动的情况,可以用无云区域的影像来进行互相弥补. 本研究主要针对的是同日过境的卫星影像进行波段信息对比及转换,而对于相隔一定天数比如间隔 1 d、2 d、3 d 天等等所获取数据间的光谱关系则需要进一步分析,这也是今后研究的重点. 总之,时间间隔越大,误差越大,原因是由于大气状况以及地表状况将随时间发生明显变化,必将导致各传感器波段的光谱信息发生变化.

虽然本研究获得了 GF-1 与 Landsat-8 以及 Sentinel-2A 在蓝、绿、红、近红外波段的 TOA 以及 BOA 反射率的转换方程,但由于数据获取限制,对于分类型的地表反射率差异分析及转换的研究依然缺乏,尚需进一步检验及深入探讨. 由于 3 颗卫星空间分辨率各不相同,过境时间也略有偏差,再加之不同大气校正算法的差异也在一定程度上对结果造成偏差. 本研究只对同日过境的卫星影像进行了波段光谱信息对比以及转换,但现实应用中,大多数遥感数据的获取时间都存在一定差异,对于相隔不同天数的数据光谱之间的定量关系有待进一步探讨. 因此,从卫星遥感数据协同应用的角度讲,这将成为研究的一个出发点,不仅有助于今后更好地利用已有的、免费共享的多光谱遥感数据,而且对于加强多源遥感卫星数据在长期、连续的地表参数定量反演的应用潜力都具有重要价值.

致 谢 感谢中国资源卫星应用中心、美国地质调查局以及欧空局为本研究提供遥感数据.

[参 考 文 献]

- [1] 徐涵秋,刘智才,郭燕滨. GF-1 PMS 与 ZY-3 MUX 传感器 NDVI 数据的对比分析[J]. 农业工程学报, 2016(8): 148-154.
- [2] VAN LEEWEN W J D, ORR B J, MARSH S E, et al. Multi-sensor NDVI data continuity: Uncertainties and implications for vegetation monitoring applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 67-81.
- [3] 贾玉秋,李冰,程永政,等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较[J]. 农业工程学报, 2015(9): 173-179.
- [4] 苏涛,冯绍元,徐英. IRS-P6 LISS-3 和 Landsat-5 TM 两种多光谱传感器影像数据的对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 887-895.
- [5] ROY D P, WULDER M A, LOVELAND T R, et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 145: 154-172.
- [6] DRUSCH M, DELBELLO U, CARLIER S, et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 25-36.
- [7] 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. 中国航天, 2013(8): 5-9.

- [8] STOREY J, ROY D P, MASEK J, et al. A note on the temporary misregistration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 121-122.
- [9] CHANDER G, MARKHAM B L, HELDER D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [10] PAHLEVAN N, LEE Z P, WEI J W, et al. On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat-8) for applications in aquatic remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 272-284.
- [11] ESA. Sentinel-2_User_Handbook [EB/OL]. (2015-07-24) [2017-09-18]. https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook.
- [12] ESA. STEP [EB/OL]. [2017-09-18]. <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>.
- [13] 徐建华. 计量地理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.

(责任编辑: 李万会)

(上接第 135 页)

- [23] 程玉鑫, 艾未华, 孔毅, 等. 基于影像纹理特征和外部风向的星载 SAR 海面风场反演研究 [J]. 海洋科学, 2015, 39(12): 157-164.
- [24] LIN H, XU Q, ZHENG Q. An overview on SAR measurements of sea surface wind [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(8): 913-919.
- [25] WACKERMAN C C, RUFENACH C L, SHUCHMAN R A, et al. Wind vector retrieval using ERS-1 synthetic aperture radar imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(6): 1343-1352.
- [26] PORTABELLA M, STOFFELEN A, JOHANNESSEN J A. Toward an optimal inversion method for synthetic aperture radar wind retrieval [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C8): 1-13.
- [27] 王珂, 洪峻, 张问一, 等. SAR 反演邻近岸海面风场方法 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(8): 1800-1805.

(责任编辑: 李万会)