

引用格式: Xu Guangzhi, Xu Hanqiu. Cross-comparison of Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Multispectral Information[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(1): 165-175. [徐光志, 徐涵秋. Sentinel-2A MSI和Landsat-8 OLI两种传感器多光谱信息的交互对比[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(1): 165-175.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.1.0165

## Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 两种传感器 多光谱信息的交互对比

徐光志<sup>1,2</sup>, 徐涵秋<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学环境与资源学院, 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 福建 福州 350116;  
2. 福州大学遥感信息工程研究所, 福建省水土流失遥感监测评价重点实验室, 福建 福州 350116)

**摘要:**在遥感对地观测中,受卫星发射、过空时间以及大气等因素的影响,单颗卫星获取的影像难以满足长时间序列的观测需求。因此,定量研究不同卫星平台传感器数据之间的关系是非常必要的。对 Sentinel-2A MSI 和 Landsat-8 OLI 传感器之间的定量关系进行了研究,基于两种传感器的 3 对同日过空的无云影像对,采用样区均值法和全试验区法对二者对应波段的光谱信息进行逐一对比,探求它们之间的定量关系。研究结果表明: Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 的表观反射率数据总体比较一致,两种方法获得的  $R^2$  均值分别为 0.89 (全试验区法) 和 0.99 (样区均值法)。但二者也存在着差异,表现在 Sentinel-2A MSI 的表观反射率总体要比 Landsat 8 OLI 高约 5%, 且在不同的波段的表现有所不同。分析表明: 二者之间的差异与其光谱响应函数、光谱范围以及试验区土地覆盖类型的不同有关。通过回归分析获得了两种传感器各对应波段数据的转换方程。验证结果表明,转换方程可以显著提高 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 数据之间的一致性,为二者之间的协同使用提供了可行的方法。

**关键词:** Sentinel-2A MSI; Landsat-8 OLI; 表观反射率; 交互对比; 定标

**中图分类号:** TP75      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2021)01-0165-11

### 1 引言

近 10 年来,卫星遥感对地观测技术迅速发展,许多新型卫星传感器相继发射,为科学研究和应用提供了大量遥感数据。然而,由于受到卫星发射时间、过空时间和频率以及云、雨天气的影响,单颗光学遥感卫星难以提供长时间序列的对地观测数据。为此,实现多源遥感数据的互补应用就显得尤为重要。其中 Landsat 系列是运行时间最长、被普遍认为是定标精度较高的卫星,所以围绕着 Landsat 卫星和其他卫星以及 Landsat 系列卫星自身之间的交互对比工作一直在开展。

Chander 等<sup>[1]</sup>通过比较 P6 AWiFS、P6 LISS-III 与 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+ 传感器对应波段的表观反射率发现,几种传感器数据之间的决定系数都在 0.97 以上。Xu 和 Zhang<sup>[2]</sup>对 Landsat ETM+ 和 ASTER 多光谱数据进行的交互对比发现,二者在红光、近红外波段之间有很强的相关性,并提供了相应的转换方程。宋军伟等<sup>[3]</sup>通过对 Landsat 8 OLI 和 GF 1 WFV 的研究发现,两种传感器对应波段决定系数均大于 0.92,但在不同地物类型的分类精度上存在差异。Mancino 等<sup>[4]</sup>基于意大利南部巴利斯卡塔地区的 Landsat 7 ETM+ 和 Landsat 8 OLI 影像进行研究,结果显示两种传感器各波段的平均

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2021-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971639)。

作者简介: 徐光志(1994—),男,安徽安庆人,主要从事环境与资源遥感应用研究。E-mail: xuguangzhi223@163.com

通讯作者: 徐涵秋(1955—),男,江苏盐城人,教授,博士生导师,主要从事环境与资源遥感应用研究。E-mail: hxu@fzu.edu.cn

反射率存在细微差异;不同指数(特别是NDVI和NDWI)之间具有很高的相关系数表明,ETM+和OLI可以作为互补数据。She等<sup>[5]</sup>采用Landsat 8 OLI和Landsat 7 ETM+数据,对不同植被类型季节变化的连续性进行评价,结果表明OLI在很大程度上继承了ETM+的波段特性。Li等<sup>[6]</sup>使用Landsat 8 OLI和Landsat 7 ETM+数据对植被指数的对比分析表明,两种传感器植被指数的决定系数大于0.96。Silvestri等<sup>[7]</sup>交互对比了ECOSTRESS、ASTER和Landsat 8 TIRS在热异常的地区获得的温度,统计分析表明在测试区域内,传感器之间的相关性和平均值非常一致。

Sentinel卫星是近年来新发射的系列卫星,其MSI传感器数据由于和Landsat 8 OLI比较接近,且都可以免费使用,因此已有学者对二者数据进行了交叉对比研究。Chastain等<sup>[8]</sup>对Sentinel 2 MSI和Landsat 8 OLI的表观反射率进行对比发现,MSI和OLI各波段表观反射率的均方根误差在0.012 8~0.039 8之间。Barsi等<sup>[9]</sup>利用利比亚和阿尔及利亚定标场影像对Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI进行了对比,结果表明两种传感器在各波段的表观反射率差异都小于2.5%。Arekhi等<sup>[10]</sup>对不同季节的土耳其埃格尼达朗戈斯森林地区Sentinel-2 MSI和Landsat 8 OLI波段的反射率比较发现,不同季节各波段都表现出较好的一致性,其中春季获得的影像波段的相关系数几乎都最高。Zhang等<sup>[11]</sup>研究发现利用传感器光谱响应函数和实验室光谱模拟得到的Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI反射率在红光、近红外和中红外波段之间的关系与实际数据相似,并给出了可用于改善Sentinel-2A MSI与Landsat 8 OLI数据之间一致性的回归系数。Mandanici等<sup>[12]</sup>通过比较Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI传感器对应波段的反射率发现,两种传感器数据之间的相关系数都在0.98以上。钟函笑等<sup>[13]</sup>研究了Landsat 8 OLI与Sentinel-2A MSI山区遥感影像辐射的一致性,发现地形效应导致了二者数据在阴坡和阳坡的辐射信号存在较大的差异。张弋等<sup>[14]</sup>通过比较西北地区黑河流域Landsat 8和Sentinel-2数据的空间尺度差异及其水面信息提取结果的不确定性,发现Landsat 8和Sentinel-2数据不同地物的光谱曲线具有相似性,但反射率相差较大;Landsat 8和Sentinel-2数据在提取水面信息上可以协同使用。Wang等<sup>[15]</sup>比较了Landsat 8、Sentinel-2和GF-1

的植被指数,结果表明Sentinel-2数据对植被特征更敏感,对植被信号检测能力更强。

从这些Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI数据的对比研究来看,它们有的是基于全试验区方法来对比<sup>[10,13]</sup>,有的是基于样区均值法来比较<sup>[11]</sup>;有的研究不是基于同步影像,使得研究结果存在一定的不确定性<sup>[8]</sup>;有的研究未对传感器数据的差异是否与土地覆盖类型有关进行研究<sup>[9]</sup>。因此,本次研究基于3对同步影像,同时采用了全试验区法和样本均值法,通过选取不同土地覆盖类型的影像来对Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI的多光谱传感器数据进行更全面的交互对比,分析它们异同的原因,并求取二者各波段之间相互转换的关系方程,为两颗卫星传感器数据在实际应用中的互补使用提供依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据源

为保证不同传感器影像对应地物光谱的一致性,采用同一目标区域的同日过空影像对是本次进行传感器交互比较的重要前提<sup>[16]</sup>。试验选用的3对同步影像质量完好,每对同步影像的日照和大气条件良好,晴空无云,太阳高度角、方位角基本一致,确保了不同传感器对地物观测的一致性(图1、表1)。这3对影像分别位于新疆克拉玛依(以植被为主)、甘肃敦煌(以裸土为主)和新疆哈密(兼有植被和裸土)。前2对作为试验影像对,后1对作为验证影像对。采用试验地点和土地覆盖类型均不同的多对影像进行对比可以有效避免试验结果的偶然性。这3对影像分别下载于美国地质调查局(USGS)数据分发网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)和欧空局(ESA)网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)。

### 2.2 两种传感器对比的波段选择

Sentinel-2A MSI具有13个波段,Landsat 8 OLI只有9个波段,因此本文只比较二者共有的波段。另外,Sentinel-2A MSI近红外波段分为近红外宽波段和近红外窄波段,其窄波段与Landsat 8 OLI的近红外波段范围比较接近,因此采用Sentinel-2A MSI的近红外窄波段与Landsat 8 OLI的近红外波段进行比较。实验比较的两种传感器的7个波段的信息见表2。

### 2.3 数据预处理

由于卫星传感器在成像过程中会产生辐射畸

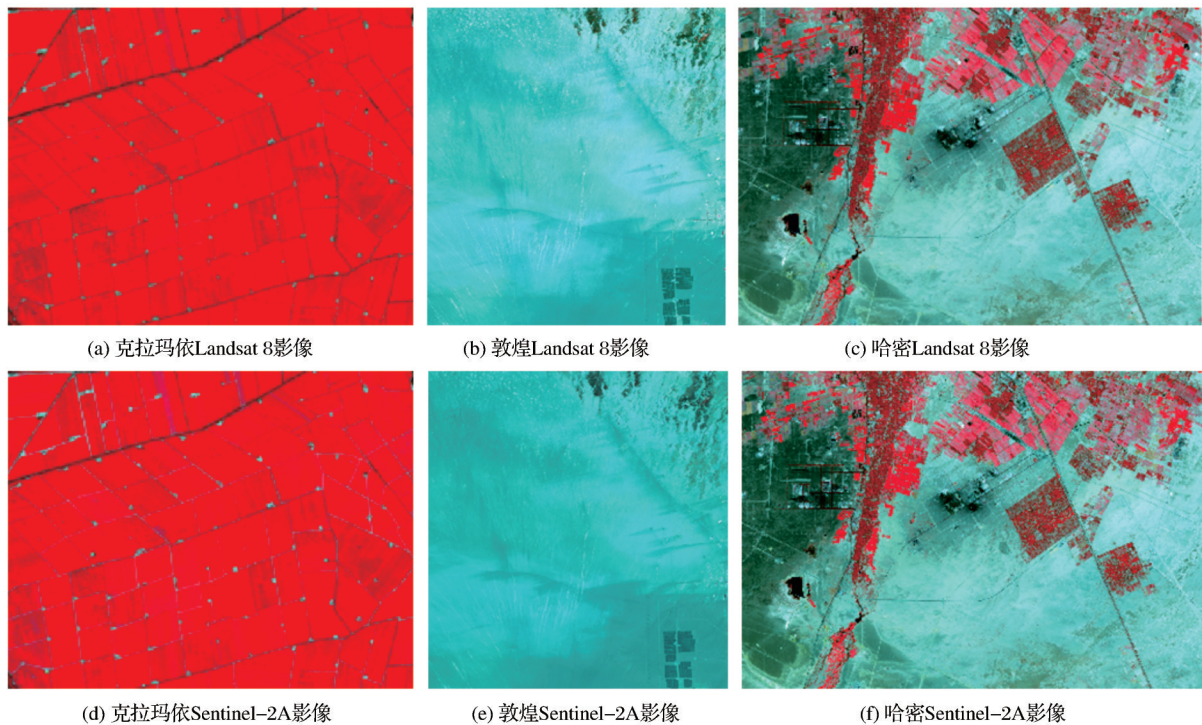


图1 Landsat 8 OLI与 Sentinel-2A MSI 交互对比的影像对 (RGB: 8A, 4, 3 波段)

Fig. 1 Image pairs for cross comparison between Landsat 8 OLI and Sentinel-2A MSI (RGB: Bands 8A, 4, 3)

表1 同步影像对参数

Table 1 Parameters of the used synchronous image pairs

影像对	传感器	日期	时间	太阳天顶角/°	太阳方位角/°
克拉玛依	Landsat 8 OLI	2019-07-26	13:08:18	30.29	139.40
	Sentinel-2A MSI		13:17:01	28.02	149.06
敦煌	Landsat 8 OLI	2019-08-10	12:26:20	30.81	137.10
	Sentinel-2A MSI		12:27:11	28.70	143.67
哈密	Landsat 8 OLI	2019-06-14	12:31:25	25.50	135.27
	Sentinel-2A MSI		12:37:01	23.08	143.52

表2 Sentinel-2A MSI和 Landsat 8 OLI 对应波段的特性

Table 2 Characteristics of corresponding bands between Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI

Sentinel-2A MSI				Landsat 8 OLI			
波段号	波段名	空间分辨率/m	波长范围/nm	波段号	波段名	空间分辨率/m	波长范围/nm
B1	深蓝	60	433~453	B1	深蓝	30	435~451
B2	蓝光	10	458~523	B2	蓝光	30	452~512
B3	绿光	10	543~578	B3	绿光	30	533~590
B4	红光	10	650~680	B4	红光	30	636~673
B8A	近红外	20	855~875	B5	近红外	30	851~879
B11	中红外 1	20	1 565~1 655	B6	中红外 1	30	1 566~1 651
B12	中红外 2	20	2 100~2 280	B7	中红外 2	30	2 107~2 294

变,因此在试验前必须对影像进行辐射校正。同时本文所用 3 对影像均为同日过空影像,且过空时间相差不超过 10 min,可视为大气条件基本一致,因此将影像的原始灰度值转换为表观反射率。

对于 Landsat 8 OLI 的 L1T 级产品,可通过影像

头文件中的校正参数进行辐射校正,计算得到表观反射率数据<sup>[17]</sup>。

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_{\rho}}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

其中:  $M_{\rho}$  和  $A_{\rho}$  均为波段  $\lambda$  的反射率调整因子,  $Q_{cal}$  为



波段 $\lambda$ 的像元灰度值, $\theta_s$ 为影像太阳天顶角,它们都可从影像头文件中获取。 $\rho_\lambda$ 为波段 $\lambda$ 的表观反射率。

下载的 Sentinel-2A MSI 数据为 L1C 级产品,是已经过定标的表观反射率数据,因此不需要再对其进行辐射校正<sup>[18]</sup>。

虽然下载的影像已经过系统的几何校正,但经叠加对比发现,3对影像上地物的空间位置仍有一个像素的差异,因此通过坐标平移方法对3对 Landsat 8 和 Sentinel-2A 影像进行配准。

由于两种传感器数据的空间分辨率不同,因此将 Sentinel-2A 影像的分辨率重采样为 30 m,以保持和 Landsat 8 的分辨率一致。采用能最大程度保持原始光谱值的最邻近像元法进行重采样。

## 2.4 交互对比方法

### 2.4.1 基于样区均值的比较法

样区均值比较法是在2幅试验同步影像中选取

范围相同的感兴趣区(Region Of Interest, ROI),统计各 ROI 样区的表观反射率均值来进行比较,这样可有效避免配准和空间分辨率不一致可能造成的问题<sup>[19]</sup>。样区(ROI)的选择应满足以下原则:

(1) 平坦、无云、均质,避免选取地形复杂、高低起伏的地区。

(2) ROI具有一定的面积,但也不宜过大。

(3) ROI必须有一定的光谱波长覆盖范围,即要有高反射率区域,也要有低反射率区域。尽量均匀分布在遥感影像的整个灰度范围,能代表不同地物,这样才能客观地分析两种不同的传感器影像在其整个设计的谱段范围内的关系。

基于以上原则,对2对试验影像进行 ROI 样区选取,选取了克拉玛依试验区的植被样区及敦煌试验区的高、中、低亮度区共4类样区,共计495个同质 ROI 样区。图2以 Sentinel-2A MSI 为例列出4类 ROI 样区。

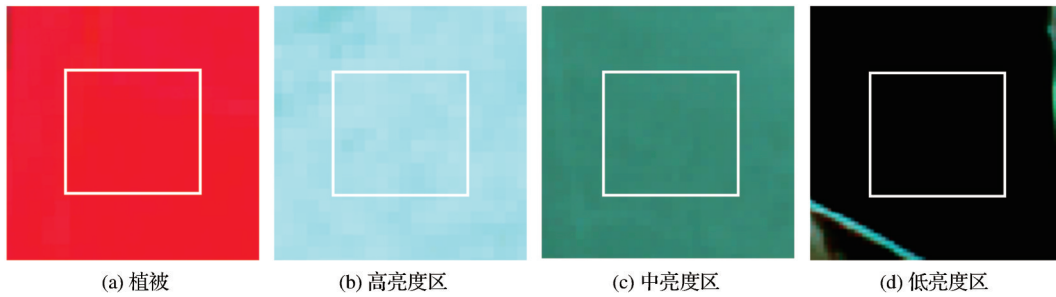


图2 4类 ROI 样区(方框中为样区,RGB: 8A,4,3波段)

Fig. 2 Four types of ROI (box is the ROI, RGB: Bands 8A, 4, 3)

分别计算决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和相对偏差率(ME)这3个评价指标来衡量两种传感器表观反射率的偏差程度,并进行对应波段表观反射率的回归分析来进行对比。

$$RMSE = \sqrt{\sum (MSI - OLI)^2 / n} \quad (2)$$

$$ME(\%) = (\overline{MSI} - \overline{OLI}) \times 100 / \overline{OLI} \quad (3)$$

其中:MSI和OLI分别为两种传感器每个ROI样区的表观反射率均值, $\overline{MSI}$ 和 $\overline{OLI}$ 分别为两种传感器对应波段的表观反射率均值, $n$ 为ROI个数。

### 2.4.2 基于全试验区的比较法

基于全试验区的光谱比较法是将同步影像对的两幅影像的相同试验区(图1)作为一个大样区来整体比较,而不进行逐点对比,因此只需对比两种传感器在该试验区的表观反射率均值(MEAN)、均方根误差(RMSE)和相对偏差率(ME)。

## 3 结果与分析

### 3.1 基于 ROI 样区的比较结果

基于2对试验影像所选的495个ROI同质样区,求出每个样区的表观反射率均值,然后对两种传感器逐个对应波段的表观反射率均值进行回归分析(图3)。图3的左图以 Landsat 8 OLI 为自变量,以 Sentinel-2A MSI 为因变量, $y$ 表示综合以上2对影像495个ROI样区得到的 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 的关系方程;右图以 Sentinel-2A MSI 为自变量,以 Sentinel-2A MSI 减 Landsat 8 OLI 表观反射率的差值作为因变量。

表3为综合两个试验区495个ROI样区的统计特征值,综合图3和表3可以看出:

(1) Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 各对应波段线性回归方程的决定系数均 $>0.99$ (方程通过 $p<0.001$ 的显著性检验),RMSE的值都 $<0.015$ ,

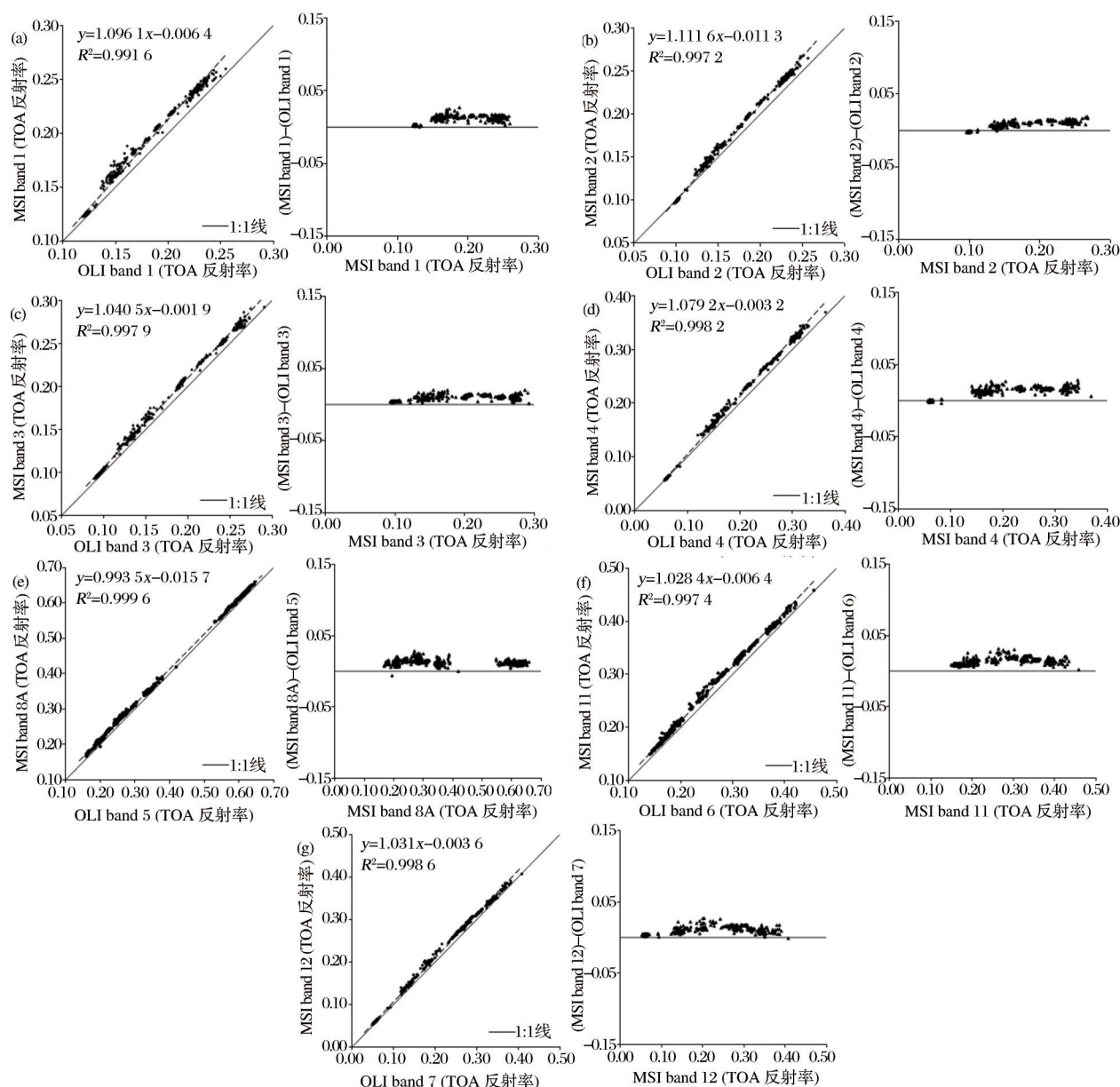


图 3 2 个试验区的 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 的表现反射率散点对比图

Fig.3 Scatter plots of TOA reflectance of Landsat 8 OLI and Sentinel-2A MSI in Karamay and Dunhuang test areas

ME 都  $\leq 6\%$ , 说明两种传感器的表现反射率之间具有很强的 consistency。

(2) 各波段的 ME 均为正值, 平均值为  $4.95\%$ , 说明 Sentinel-2A MSI 的表现反射率大于 Landsat 8 OLI 近  $5\%$ 。图 3(a)~(g) 左图的散点分布在 1:1 线上方, 右图的散点分布在  $x=0$  线的上方也都说明了这一点。

(3) 在所对比的 7 个波段中, 深蓝、蓝波段的一致性稍差, 表现在  $R^2$  较小, 斜率较大, 散点也较分散。但从图 3 左侧的散点图可以看出, 随着波长的增加, 其他波段的散点分布一致性有变好的趋势, 且逐渐向 1:1 线靠拢。

### 3.2 基于全试验区的比较结果

表 4 是基于全试验区方法获得的各波段对比结果。从表中可以看出:

(1) 2 对影像的  $R^2$  绝大部分介于  $0.81\sim 0.97$  之间, 均值为  $0.89$ , RMSE 均小于  $0.02$ , ME 也小于  $7\%$ , 同样表明 Landsat 8 OLI 与 Sentinel-2A MSI 数据的表现反射率具有较好的一致性。

(2) 两个试验区的 ME 平均值为  $4.31\%$ , 表明 Sentinel-2A MSI 的表现反射率总体大于 Landsat 8 OLI。

(3) 敦煌试验区各波段的  $R^2$ 、RMSE 和 ME 都比较一致, 起伏不大, 而克拉玛依试验区则波动较大。

表 3 基于 ROI 对比的 Sentinel-2A MSI 与 Landsat 8 OLI 的统计特征

Table 3 Comparison of Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI data based on ROIs

对应波段	Landsat 8 OLI			Sentinel-2A MSI			ME/%	RMSE	R <sup>2</sup>
	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值			
深蓝	0.119 2	0.254 7	0.163 6	0.122 5	0.259 7	0.173 0	5.73	0.011 1	0.991 6
蓝光	0.098 2	0.256 7	0.152 1	0.096 2	0.268 3	0.157 8	3.72	0.008 7	0.997 2
绿光	0.089 0	0.290 8	0.155 7	0.093 1	0.292 5	0.163 9	5.25	0.009 1	0.997 9
红光	0.056 5	0.363 0	0.156 5	0.056 1	0.369 1	0.165 7	5.89	0.012 6	0.998 2
近红外	0.159 0	0.646 3	0.400 6	0.167 0	0.659 4	0.413 6	3.26	0.013 6	0.999 6
中红外 1	0.140 7	0.456 3	0.237 9	0.149 5	0.458 4	0.251 1	5.55	0.014 1	0.997 4
中红外 2	0.049 4	0.408 5	0.168 7	0.052 9	0.407 3	0.177 5	5.23	0.010 4	0.998 6

表 4 基于全试验区法的 Sentinel-2A MSI 与 Landsat 8 OLI 的统计特征

Table 4 Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI data based on whole test area method

	对应	Landsat 8 OLI			Sentinel-2A MSI			ME/%	RMSE	$R^2$
	波段	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值			
克拉玛依	深蓝	0.118 4	0.190 0	0.123 8	0.121 4	0.166 2	0.126 7	2.34	0.004 3	0.620 3
	蓝光	0.095 6	0.192 0	0.103 0	0.094 9	0.204 2	0.101 5	-1.36	0.003 5	0.821 7
	绿光	0.084 0	0.218 9	0.096 1	0.088 0	0.212 0	0.100 2	4.27	0.005 8	0.818 3
	红光	0.053 2	0.261 7	0.065 2	0.053 7	0.254 5	0.065 3	0.15	0.006 9	0.813 4
	近红外	0.246 5	0.655 2	0.574 7	0.252 5	0.666 0	0.587 0	2.14	0.017 9	0.909 0
	中红外 1	0.131 6	0.538 7	0.165 4	0.142 0	0.495 5	0.174 6	5.56	0.010 9	0.891 9
	中红外 2	0.043 3	0.821 6	0.063 4	0.047 8	0.850 0	0.067 2	5.99	0.009 3	0.856 7
敦煌	深蓝	0.114 6	0.522 2	0.201 9	0.136 1	0.417 6	0.216 2	7.08	0.014 8	0.932 8
	蓝光	0.094 6	0.556 9	0.198 7	0.097 7	0.655 1	0.210 7	6.04	0.012 6	0.950 4
	绿光	0.091 3	0.621 7	0.212 2	0.086 9	0.670 1	0.223 5	5.33	0.012 2	0.948 1
	红光	0.057 1	0.676 9	0.237 3	0.063 4	0.759 8	0.253 4	6.78	0.017 2	0.942 5
	近红外	0.035 0	0.721 4	0.256 3	0.038 9	0.781 0	0.270 7	5.62	0.015 3	0.962 4
	中红外 1	0.031 1	0.695 1	0.303 3	0.043 4	0.712 2	0.320 0	5.51	0.017 4	0.965 3
	中红外 2	0.024 6	0.894 3	0.269 8	0.030 1	0.672 0	0.282 9	4.86	0.014 1	0.959 8

3.3 转换方程

为了检验图 3 中得到的 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 的关系方程的准确性,本文在未参与试验的哈密影像中选取了 355 个同质 ROI 样区来进行验证。利用图 3 中各个波段的关系方程,将 Landsat 8 OLI 的各波段模拟成 Sentinel-2A MSI 对应波

段,然后将模拟后的 Sentinel-2A MSI 数据与真实的 Sentinel-2A MSI 进行回归(图 4,横坐标为模拟数据,纵坐标为真实数据),计算它们之间的 RMSE 和 ME,并将结果与模拟前的结果进行比较,以此来评价转换方程的模拟精度(表 5)。

转换结果表明(图 4、表 5),Landsat 8 OLI 模拟

表 5 哈密验证影像模拟转换前后的统计特征值对比

Table 5 Statistics of the Kumul image before and after conversion

对应波段	RMSE			ME/%		
	模拟前	模拟后	变化/%	模拟前	模拟后	变化/倍
深蓝	0.007 9	0.004 0	-48.55	4.67	-0.92	4.08
蓝光	0.006 0	0.002 8	-52.66	3.40	-0.29	10.72
绿光	0.007 0	0.005 1	-26.99	3.75	-1.40	1.68
红光	0.009 1	0.005 6	-38.85	4.38	-1.57	1.79
近红外	0.014 2	0.009 9	-30.78	3.99	-0.90	3.43
中红外 1	0.013 3	0.006 8	-48.98	4.86	-0.59	7.23
中红外 2	0.007 7	0.007 5	-3.17	3.13	-1.69	0.85

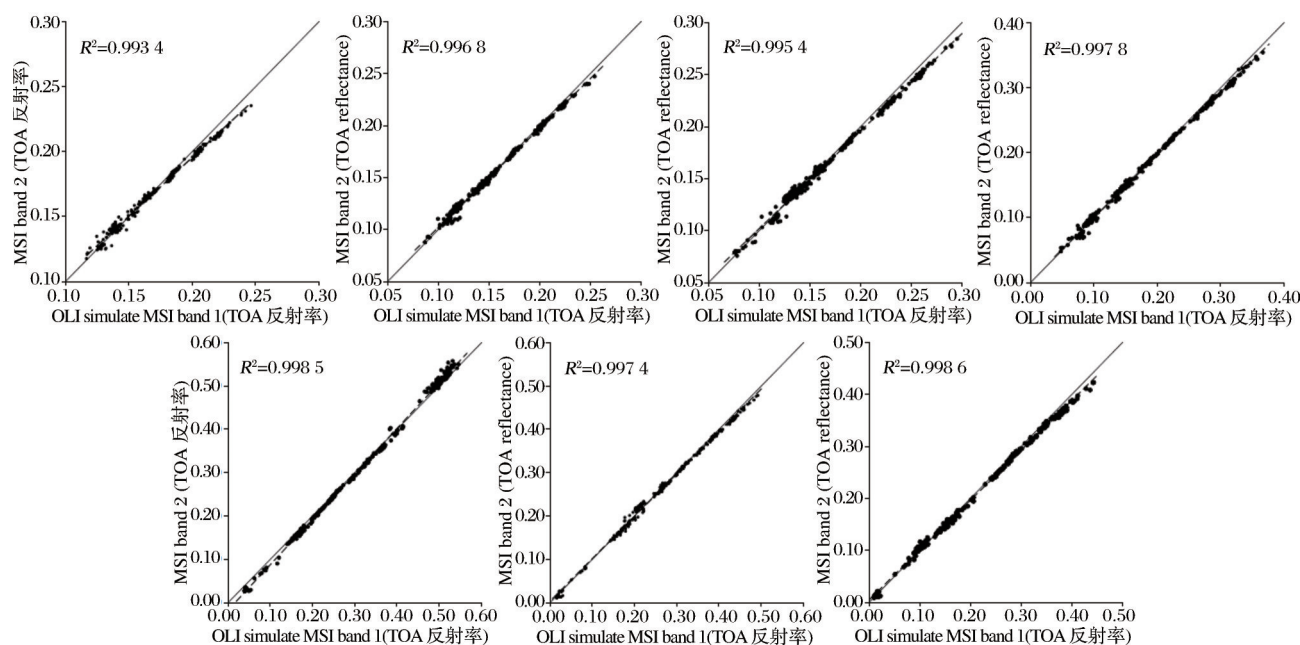


图 4 基于试验影像建立的 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2A MSI 转换方程的拟合结果

Fig.4 Fitting results between Landsat 8 OLI and Sentinel-2A MSI using the derived conversion models

成 Sentinel-2A MSI 数据后,其与实际 Sentinel-2A MSI 数据的差异大幅缩小。与模拟前的数据相比, RMSE 最大减小了 52.66% (蓝光波段),平均减小了 35.71%。ME 同样也有明显减少,最小的减少了 0.85 倍 (中红外 2 波段),最大的降幅可近 11 倍 (蓝光波段)。这表明本文获得的 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 的关系方程可有效降低这两种传感器数据之间的差距。

## 4 讨 论

### 4.1 传感器数据差异原因分析

上述对比结果表明, Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 传感器数据之间具有很好的一致性,但也存在一定的差异,表现在 Sentinel-2A MSI 的表观反射率总体强于 Landsat 8 OLI,这可能是由于二者各波段之间在光谱范围和光谱响应函数方面的差异引起的。

表 2 和 5 显示,两种传感器各波段的光谱分布范围和光谱响应函数形态存在一定差异。从图中可以看出,波长较长的 3 个波段 (近红外、中红外 1、2 波段) 的光谱分布范围和光谱响应函数形态比较一致,因此这 3 个波段的  $R^2$  总体高于可见光的 4 个波段。表 3 中,近红外、中红外 1 和中红外 2 这 3 个波段的平均  $R^2$  为 0.998 5,大于可见光 4 个波段的 0.996 2;表 4 中 2 个试验区近红外、中红外 1 和中红外 2 波段的平均  $R^2$  为 0.924 2,大于可见光 4 个波段

的 0.855 9。在图 3 中,散点群也表现为随着波长的增加,逐渐向 1:1 线靠拢的趋势。

全试验区对比的结果和基于 ROI 方法的结果有所区别,全试验区方法的  $R^2$  小于 ROI 方法, RMSE 和 ME 略高于 ROI 法,这是由于两种传感器的空间分辨率不一致所造成的。 Landsat 8 OLI 的分辨率总体低于 Sentinel-2A MSI,因此混合像元现象较为严重。为了考察这一现象,随机选取一块面积为 120 m × 60 m 的样区,其对应 Sentinel-2A 的 3 种不同分辨率波段的像元数分别为: 60 m 分辨率的 1 波段为 2 个像元, 10 m 分辨率的 2~4 波段为 12 × 6 = 72 个像元, 20 m 分辨率的 8A、11 和 12 波段为 6 × 3 = 18 个像元 (图 6); 它们重采样为 30 m 后都统一成为 4 × 2 = 8 个像元。统计表明 (表 6), 它们的表观反射率在重采样后会有一定的变化, 7 个波段的平均误差为 0.15%, 说明虽然采用了光谱保真度最高的最邻近像元法进行重采样,但仍会使光谱值产生偏差。而采用 ROI 均值进行对比的方法客观上起了平滑作用,能有效降低混合像元带来的影响。因此,较之于全试验区法, ROI 方法对比结果的  $R^2$  更高, RMSE 和 ME 更低。

另外,采用 ROI 对比法还可以通过点对点的回归分析获得不同传感器数据之间的关系转换方程,因此这一方法也是不同传感器交互对比采用较多的方法<sup>[1,5,11-20]</sup>。



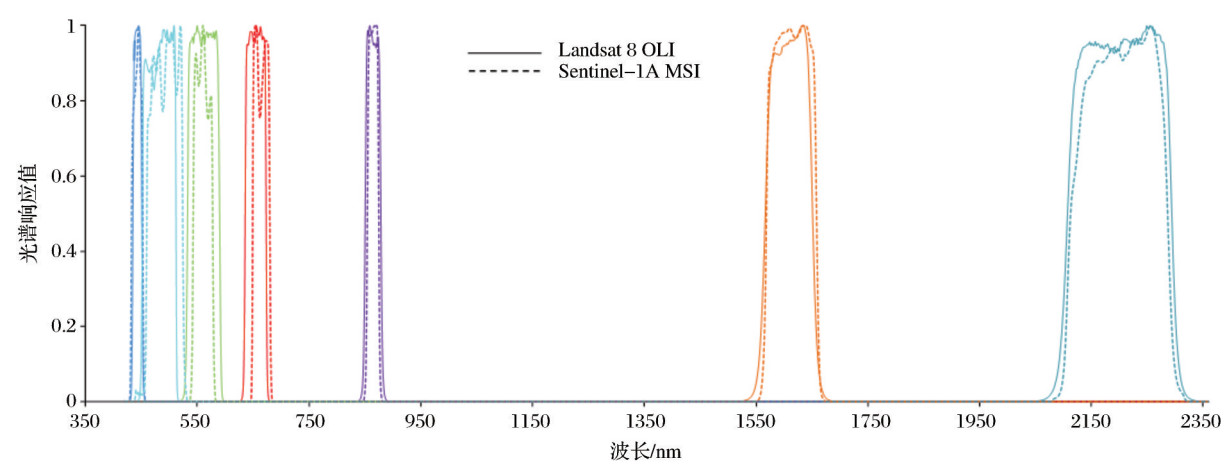


图 5 Sentinel-2A MSI和Landsat 8 OLI的光谱响应函数

Fig. 5 Relative spectral response function of Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI

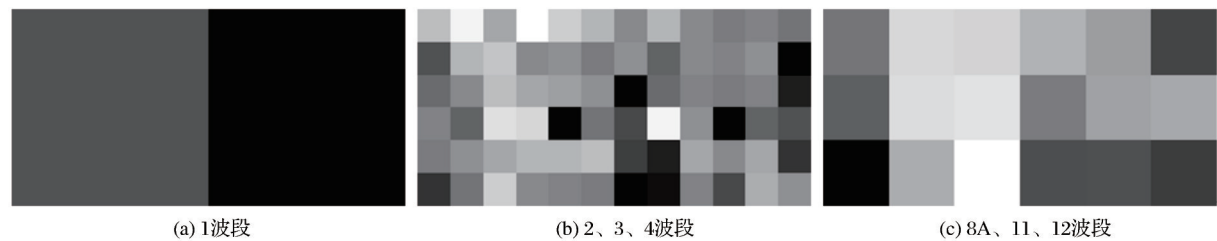


图 6 Sentinel-2A MSI不同空间分辨率波段的像元数差异

Fig. 6 Difference in the pixel number of three spatial resolutions of Sentinel-2A MSI imagery

表 6 Sentinel-2A MSI 影像重采样对表现反射率的影响

Table 6 The influence of the resampling on TOA Reflectance of Sentinel-2A MSI imagery

波段	原分辨率均值	重采样为 30 m 分辨率均值	偏差(%)
深蓝	0.124 8	0.124 7	-0.08
蓝光	0.098 3	0.098 3	0.00
绿光	0.095 6	0.095 6	0.00
红光	0.058 4	0.058 3	-0.17
近红外	0.651 1	0.649 6	-0.23
中红外 1	0.180 6	0.180 2	-0.22
中红外 2	0.060 3	0.060 1	-0.33
均值	0.181 3	0.181 0	-0.15

4.2 土地覆盖类型对传感器数据差异的影响

从表 4 可以看出,两种传感器在两个不同试验区的表现有所差异。克拉玛依试验区以植被(农田)为主,其 Sentinel-2A MSI 在绿光的 ME 值明显高于其它可见光波段,在近红外波段的 ME 值也大于红光波段。由于 2 幅试验影像都没有林地,因此又采用了 1 组日本名古屋 2018 年 6 月 25 日的两种传感器的同步影像对(图 7),选择其中的林地进行了基于全试验区的对比,统计结果表明, Sentinel-2A 在林地的绿光和近红外波段的 ME 值也具有同样的特征(表 7)。由于绿光和近红外波段是表征植被反射光谱的特征波段,近红外波段和红光波段的

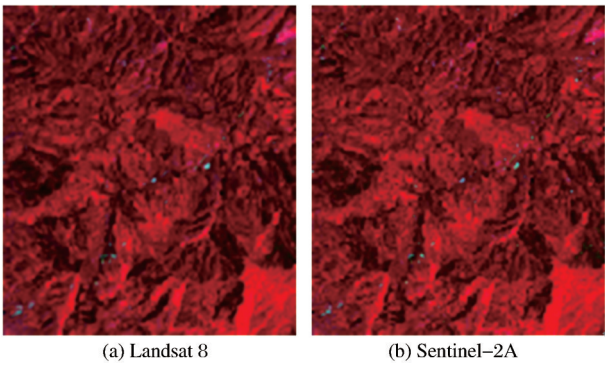


图 7 日本名古屋 Landsat 8 OLI 与 Sentinel-2A MSI 影像对(RGB: 8A,4,3 波段)

Fig. 7 Image pairs of Landsat 8 OLI and Sentinel-2A MSI of Nagoya, Japan (RGB: Bands 8A,4,3)

差值是构成各种植被指数的重要基础,因此 Sentinel-2A MSI 在绿光和近红外波段的突出表现说明 Sentinel-2A MSI 对于植被信息的敏感度要明显高于 Landsat 8 OLI。就敦煌试验区而言,该区以裸土为主,因此其绿光波段的 ME 值并不大于其他可见光波段,近红外波段的 ME 值也明显小于红光波段。以上分析说明, Sentinel-2A MSI 的表现反射率整体大于 Landsat 8 OLI,且在植被信息上这种差异会表现得更为明显。另外,克拉玛依试验区各波段的



$R^2$ 、RMSE 和 ME 数值的起伏都比敦煌试验区大,这也和它们的土地覆盖类型的复杂性有关。前者虽然以植被为主,但其中仍杂有田埂、道路和星散的建筑物,而后者为比较均一的裸土(图 1)。这说明在土地覆盖类型比较复杂的地区,二者在各波段差异性的分化可能更为明显。

表 7 日本名古屋 Landsat 8 OLI 与 Sentinel-2A MSI 的林地统计特征对比  
Table 7 Comparison of Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI data based on the forest area in Nagoya, Japan

	对应 波段	Landsat-8 OLI			Sentinel-2A MSI			ME/%	RMSE	$R^2$
		最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值			
全试验区法	深蓝	0.110 2	0.206 1	0.117 8	0.112 3	0.151 5	0.119 0	1.02	0.001 7	0.840 0
	蓝光	0.085 5	0.195 9	0.092 9	0.080 0	0.239 1	0.089 0	-4.20	0.004 2	0.782 2
	绿光	0.067 3	0.195 0	0.078 8	0.064 8	0.237 4	0.081 8	3.81	0.003 7	0.788 0
	红光	0.039 3	0.195 0	0.047 0	0.036 6	0.260 8	0.045 5	-3.19	0.003 0	0.744 9
	近红外	0.118 4	0.608 2	0.348 6	0.136 1	0.600 5	0.361 9	3.82	0.021 8	0.914 5
	中红外 1	0.060 7	0.352 3	0.133 9	0.037 6	0.329 1	0.145 4	8.59	0.013 4	0.937 8
	中红外 2	0.024 1	0.276 7	0.053 8	0.029 4	0.246 8	0.058 0	7.81	0.005 3	0.925 1

4.3 BRDF 效应

双向反射现象是可能导致不同遥感传感器光谱数据差异的又一因素,因此在遥感传感器定标和对比的研究中经常要考虑其影响,并通过双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 进行校正。但受 BRDF 影响的主要是大观测视角的传感器和非同步影像对<sup>[21]</sup>,Chen 等<sup>[22]</sup>也认为, BRDF 对于小视角传感器(Landsat 8、Sentinel-2)且使用同步影像进行定标和对比的影响不大,可不必考虑,因为即便有影响,对两种传感器的影响也是相等的。李娟等<sup>[23]</sup>对 GF-1 WFV 采用 2 种方法进行了交叉定标,结果发现 BRDF 方法仅对非星下点的 WFV1 和 WFV4 相机有效,而对于近星下点、小视角的 WFV2 和 WFV3 相机的精度并不如常规方法。Zhang 等<sup>[11]</sup>对 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 进行的比较结果表明,在经过 BRDF 校正的 7 个多光谱波段和 1 个植被指数波段中,有 5 个的均方根差(RMSD)大于未经 BRDF 校正的常规方法,只有 3 个(蓝光和 2 个近红外波段)小于后者<sup>[11]</sup>。钟函笑等<sup>[13]</sup>对 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 的一致性研究表明,在给出的 3 个对比波段中,采用 BRDF 校正的  $R^2$  仅在蓝光波段高于常规方法,而在近红外和中红外波段却低于后者<sup>[13]</sup>。综合以上分析可以看出, BRDF 对于 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 同步影像对的光谱一致性的影响可能不及大视角传感器,因此许多涉及二者传感器对比的研究都没有考虑 BRDF<sup>[8,10,12]</sup>。但从文献[11,13]的研究来看, BRDF 对蓝光波段会产生影响,因为二者的研究都一致表明 BRDF 校正会改善两种传感器蓝光波段的一致性。

5 结 论

本研究基于 3 对同步影像对,采用全试验区和样区均值比较法对 Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 传感器数据的对应波段进行了交互对比。结果表明,这两种传感器的表观反射率有较好的一致性, RMSE 都小于 0.02, ME 不超过 7%, 基于样区均值法获得的  $R^2$  大于 0.99, 全试验区法的平均  $R^2$  达到 0.89。但研究也发现,二者的数据之间也存在着一定差距,表现在 Sentinel-2A MSI 的表观反射率总体高于 Landsat 8 OLI, 幅度约为 5%。

通过分析发现, Sentinel-2A MSI 和 Landsat 8 OLI 之间的差异与其光谱响应函数、光谱范围和试验区的土地覆盖类型及其复杂性有关。

由于以上差异的存在,在时间序列的分析中, Sentinel-2A MSI 与 Landsat 8 OLI 的影像数据不宜直接替代使用,而必须进行必要的数据转换。本文利用所获得的 Sentinel-2A MSI 与 Landsat 8 OLI 的转换方程进行的数据转换结果证实,通过转换可以显著减少二者对应波段数据之间的差异。

参考文献(References):

[1] Chander G, Coan M J, Scaramuzza P L. Evaluation and Comparison of the IRS-P6 and the Landsat Sensors [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 46 (1): 209-221. doi: 10.1109/TGRS.2007.907426.

[2] Xu H, Zhang T. Assessment of Consistency in Forest-dominated Vegetation Observations between ASTER and Landsat ETM+ Images in Subtropical Coastal Areas of Southeastern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 168: 1-9. doi: 10.1016/j.agrformet.2012.08.012.

[3] Song Junwei, Zhang Youjing, Li Xinchuan, et al. Compari-

- son between GF-1 and Landsat 8 Images in Land Cover Classification[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 255-263. [宋军伟, 张友静, 李鑫川, 等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 影像的土地覆盖分类比较[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 255-263.]
- [4] Mancino G, Ferrara A, Padula A, *et al.* Cross-comparison between Landsat 8 (OLI) and Landsat 7 (ETM+) Derived Vegetation Indices in a Mediterranean Environment [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 291. doi: 10.3390/rs12020291.
- [5] She X, Zhang L, Cen Y, *et al.* Comparison of the Continuity of Vegetation Indices Derived from Landsat 8 OLI and Landsat 7 ETM+ Data Among Different Vegetation Types [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13485-13506. doi: 10.3390/rs71013485.
- [6] Li P, Jiang L, Feng Z. Cross-comparison of Vegetation Indices Derived from Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) and Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) Sensors [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(1): 310-329. doi: 10.3390/rs6010310.
- [7] Silvestri M, Romaniello V, Hook S, *et al.* First Comparisons of Surface Temperature Estimations between ECOSTRESS, ASTER and Landsat 8 over Italian Volcanic and Geothermal Areas [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 184. doi: 10.3390/rs12010184.
- [8] Chastain R, Housman I, Goldstein J, *et al.* Empirical Cross Sensor Comparison of Sentinel-2A and 2B MSI, Landsat 8 OLI, and Landsat 7 ETM+ Top of Atmosphere Spectral Characteristics over the Conterminous United States [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 221: 274-285. doi: 10.1016/j.rse.2018.11.012.
- [9] Barsi J A, Alhammoud B, Czaplá-Myers J, *et al.* Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Radiometric Cross Comparison over Desert Sites [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2018, 51(1): 822-837. doi: 10.1080/22797254.2018.1507613.
- [10] Arekhi M, Goksel C, Balik Sanli F, *et al.* Comparative Evaluation of the Spectral and Spatial Consistency of Sentinel-2 and Landsat 8 OLI Data for Igneada Longos Forest [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(2): 56. doi: 10.3390/ijgi8020056.
- [11] Zhang H K, Roy D P, Yan L, *et al.* Characterization of Sentinel-2A and Landsat 8 Top of Atmosphere, Surface, and Nadir BRDF Adjusted Reflectance and NDVI Differences [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 215: 482-494. doi: 10.1016/j.rse.2018.04.031.
- [12] Mandanici E, Bitelli G. Preliminary Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 Imagery for a Combined Use [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(12): 1014. doi: 10.3390/rs8121014.
- [13] Zhong Hanxiao, Bian Jinhu, Li Ainong. Radiometric Consistency between Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI Imagery in Mountainous Terrain [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(3): 428-438. [钟函笑, 边金虎, 李爱农. Landsat-8 OLI 与 Sentinel-2 MSI 山区遥感影像辐射一致性研究[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(3): 428-438.]
- [14] Zhang Yi, Xia Jianxin, Du Lei, *et al.* Comparison and Collaborative Application of Water Index based on Landsat 8 and Sentinel-2A Data: A Case Study in Heihe River Basin, Northwest China [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(6): 1361-1368. [张戈, 夏建新, 杜蕾, 等. Landsat 8 和 Sentinel-2A 的水体指数比较与协同应用——以黑河流域典型区为例[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(6): 1361-1368.]
- [15] Wang Q, Li J, Jin T, *et al.* Comparative Analysis of Landsat 8, Sentinel-2, and GF-1 Data for Retrieving Soil Moisture over Wheat Farmlands [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2708. doi: 10.3390/rs12172708.
- [16] Teillet P M, Barker J L, Markham B L, *et al.* Radiometric Cross-calibration of the Landsat 7 ETM+ and Landsat 5 TM Sensors based on Tandem Data Sets [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1): 39-54. doi: 10.1016/S0034-4257(01)00248-6.
- [17] USGS. Landsat 8 Data Users Handbook [DB/OL]. [https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/a/toms/files/LSDS-1574\\_L8\\_Data\\_Users\\_Handbook-v5.0.pdf](https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/a/toms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook-v5.0.pdf), 2016.]
- [18] ESA. Sentinel-2 User Handbook [DB/OL]. [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2\\_User\\_Handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook), 2015.
- [19] Jiang Qiaoling, Xu Hanqiu. Cross-Comparison between GF-1 PMS2 and GF-2 PMS2 Sensor Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(6): 1084-1094. [蒋乔灵, 徐涵秋. GF-1 PMS2 与 GF-2 PMS2 传感器数据的交互对比[J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(6): 1084-1094.]
- [20] Li Chunhua, Xu Hanqiu, Chen Licong. Cross-Comparison between ASTER and Landsat 7 ETM+ Multispectral Imagery [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(9): 2518-2524. [李春华, 徐涵秋, 陈荔聪. ASTER 和 Landsat-7 ETM+ 两种多光谱传感器影像的交互对比[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(9): 2518-2524.]
- [21] Liu Q, Yu T, Gao H. Radiometric Cross-calibration of GF-1 PMS Sensor with a New BRDF Model [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 707. doi: 10.3390/rs11060707.
- [22] Chen Y, Sun K, Li D, *et al.* Radiometric Cross-calibration of GF-4 PMS Sensor based on Assimilation of Landsat 8 OLI Images [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 811. doi: 10.3390/rs9080811.
- [23] Li Juan, Feng Lian, Pang Xiaoping. Comparison of the Cross-calibration Methods between Image-based and RTM-BRDF for GF-1 Images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(7): 882-890. [李娟, 冯炼, 庞小平. 针对 GF-1 遥感影像的基于影像与基于辐射传输模型的两交叉定标方法比较[J]. *测绘学报*, 2017, 46(7): 882-890.]

## Cross-comparison of Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI Multispectral Information

Xu Guangzhi<sup>1,2</sup>, Xu Hanqiu<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fuzhou University, College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;*

2. *Institute of Remote Sensing Information Engineering, Fujian Provincial Key Laboratory of Remote Sensing of Soil Erosion, Fuzhou 350116, China*)

**Abstract:** The images provided by an individual satellite are difficult to meet the requirement for a long time series observation due to the factors such as satellite operation duration, satellite passage time, atmosphere condition and others. Therefore, it is necessary to quantitatively study the relationship between different satellite sensor data for their collaborative use for a long time series earth observation. In this paper, the quantitative relationship between Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI sensors' data was studied. Based on three synchronous, cloud-free image pairs of the two sensors, the corresponding bands of the two sensors were compared band-by-band by using the Region Of Interest (ROI) method and the whole test area method to explore the quantitative relationship between them. The results show that the Top Of Atmospheric (TOA) reflectance data of Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI are generally consistent, and the mean  $R^2$  values obtained via the two methods are 0.89 (whole test area method) and 0.99 (ROI method), respectively. However, the differences between the two sensors' data have also been revealed. The total TOA reflectance of Sentinel-2A MSI is generally about 5% higher than that of Landsat-8 OLI, which, however, is different in different bands. The analysis shows that this difference is due to the two sensors' differences in spectral response function and spectral range, as well as the difference in land cover type of the test areas. By regression analysis, the data conversion equations of each band between the two sensors are obtained. The validation results show that the conversion equations can significantly improve the consistency of Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI data, providing a feasible method for the collaborative use of the two sensors' data.

**Key words:** Sentinel-2A MSI; Landsat 8 OLI; TOA reflectance; Cross comparison; Calibration