

传感器光谱响应函数的差异对棉花反射信息的影响

黄涌涵

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年12月7日; 录用日期: 2025年12月28日; 发布日期: 2026年1月9日

摘要

棉花作为全球最重要的天然纤维作物, 在农业经济、“减排降碳”和国际贸易中具有关键地位。准确刻画棉花多源遥感反射信息的一致性, 是开展精细化监测、资源管理和多源数据融合的前提。近年来多源中高分辨率遥感快速发展, 为区域尺度棉花信息提取提供了有效技术途径, 但针对传感器光谱响应函数差异对棉花反射率及植被指数估算的系统影响仍缺乏量化认识。因此, 本文面向国内外多种主流中高分辨率光学传感器, 利用2346条不同物候期棉花冠层高光谱观测, 结合各传感器SRF, 模拟生成多源多光谱反射率及植被指数, 并从“波段-指数-物候期”三维视角解析由SRF内在差异向地表观测传递的不确定性。结果表明, 蓝、绿及近红外波段的模糊贴中度普遍高于0.95, NDVI和SAVI的平均绝对相对偏差整体控制在0.2%~0.35%, 而红波段局部贴中度可降至约0.89, EVI的偏差可达约3.8%, 成为多源棉花反射与指数不一致的敏感波段和指数; 具备SWIR1波段的L7_ETM+、L8_OLI与Sentinel-2A/B在LSWI上的一致性极高。由此表明, 在棉花植被遥感研究中若忽略SRF诱发的差异, 可能在特定物候期和敏感指数上引入数个百分点甚至更高的系统误差, 因此在多源数据融合与跨传感器对比时必须显式考虑SRF差异并设计合理的数据组织与误差校正策略, 以保证研究结论的科学可靠与可比。

关键词

光谱响应函数, 棉花, 传感器, 物候

The Impact of Differences in Sensor Spectral Response Functions on Cotton Reflectance Information

Yonghan Huang

School of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: December 7, 2025; accepted: December 28, 2025; published: January 9, 2026

Abstract

As the most important natural fiber crop worldwide, cotton plays a pivotal role in the agricultural economy, carbon emission reduction, and international trade. Accurately characterizing the consistency of multi-source remote sensing reflectance information for cotton is a prerequisite for refined monitoring, resource management, and multi-source data fusion. In recent years, the rapid development of multi-source medium- to high-resolution remote sensing has provided an effective technical means for extracting cotton information at regional scales, yet a quantitative understanding of the systematic impacts of differences in sensor spectral response functions (SRFs) on cotton reflectance and vegetation index estimation is still lacking. Therefore, this study targets multiple mainstream medium- to high-resolution optical sensors from China and abroad, and uses 2346 canopy hyperspectral measurements of cotton at different phenological stages, combined with the SRFs of each sensor, to simulate multi-source multispectral reflectance and vegetation indices. From a three-dimensional perspective of “band-index-phenological stage”, we analyze how intrinsic SRF differences propagate into uncertainties in surface observations. The results show that the fuzzy similarity in the blue, green, and near-infrared bands is generally higher than 0.95, and the mean absolute relative bias of NDVI and SAVI is overall constrained within 0.2%~0.35%. In contrast, the local similarity in the red band can drop to about 0.89, and the bias of EVI can reach approximately 3.8%, making them the most sensitive band and index responsible for inconsistencies in multi-source cotton reflectance and vegetation indices. Sensors equipped with an SWIR1 band, such as L7_ETM+, L8_OLI, and Sentinel-2A/B, exhibit extremely high consistency in LSWI. These findings indicate that neglecting SRF-induced differences in cotton vegetation remote sensing studies may introduce several percentage points or more of systematic error at specific phenological stages and for certain sensitive indices. Consequently, SRF differences must be explicitly considered, and appropriate data organization and error-correction strategies must be designed in multi-source data fusion and cross-sensor comparisons to ensure the scientific reliability and comparability of research conclusions.

Keywords

Spectral Response Function, Cotton, Sensors, Phenology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

棉花作为天然纤维和重要经济作物，在全球农业经济、“减排降碳”和国际贸易体系中同样具有关键地位[1]。棉纤维是仅次于涤纶的第二大纺织原料，近年约占全球纤维终端消费的 20%~25%，年消费量在 2400 万吨以上，是全球服装和家纺行业的基础原料[2]。近年来全球棉花年产量稳定在约 2600 万吨左右，主要生产国包括中国、印度、美国和巴西等，其中 2024~2025 年度中国和印度合计产量占比超过 45%。美国长期是全球最大棉花出口国，近年出口量约占世界棉花贸易量的 30% 左右，是国际棉花市场价格和贸易格局的重要枢纽[3]。在中国，棉花是纺织工业的战略性原料，2022 年全国棉花产量约 539 万吨，其中新疆产量超过 90%，已经发展为全球最大的高品质商品棉生产基地[4]。因此近年来涌现了大量关于油菜墒情提取的研究。

随着干旱半干旱区水资源约束趋紧和低碳农业转型加速，准确提取棉田墒情已成为棉花精细化管理与可持续发展的迫切需求[5]。棉花属于典型高耗水作物，其生育期内土壤水分状况直接影响株高生长、

蕾铃分化与成铃率等关键生理过程,进而决定皮棉产量和纤维品质[6];在此背景下,基于遥感反演的棉田土壤墒情信息,一方面可以为滴灌定额与灌溉时机提供空间化约束,精细识别不同生育阶段的水分胁迫阈值,从而在保证产量和纤维品质的前提下最大限度节水减排;另一方面,墒情驱动的精准灌溉和施肥有助于降低氮肥淋溶和农药流失,缓解棉区面源污染风险,改善农田生态环境[7]。因此,构建适用于棉花主产区的高时空分辨率墒情遥感提取方法,不仅对保障我国棉花产业链安全与国际竞争力具有重要意义,也是推动干旱区农业绿色低碳发展的关键技术支撑。

多源遥感观测技术的快速发展为区域尺度棉花信息的提取提供了有效途径,但对多传感器观测差异对棉花辨识的潜在影响研究仍显空白。早期对于棉花墒情的提取多是应用最传统的田间采集因而效率低下,而随着遥感技术的发展,各类遥感数据为高效提取棉花墒情提供了潜在机会[8]。多源数据融合通过整合不同传感器的时空互补特性,可有效缓解数据缺失问题并增强反演稳健性,是准确提取棉花种植墒情的重要手段,然而,不同传感器间光谱响应函数差异会导致显著的光谱重建偏差,如 Alexander 等发现不同 AVHRR 传感器在红波段反射率差异达-25%~12%,近红外波段差异为 2%~4% [9] [10]。Teillet 团队(2001)证实 Landsat-5 TM 与 Landsat-7 ETM+在可见光-近红外波段的光谱响应差异约为 2%,短波红外波段差异增至 3%~7% [11]。Flood 进一步指出 Landsat-7 ETM+与 Landsat-8 OLI 的地表反射率平均误差达 2% [12]。这些研究都表明多源融合时光谱响应函数造成的差异不可忽略,但由于观测差异对不同物候期的棉花识别带来的影响的研究仍然存在空白[13]。综上,本文拟通过建立光谱响应函数-植被指数-物候期的三维分析框架,旨在揭示传感器光谱特性与不同物候期棉花反射特征的耦合机制,寻找合适的多源传感器组织策略,为构建高精度多源遥感融合模型提供理论支撑。

2. 数据来源

每个传感器都有其不同的波段位置、波段数目、中心波长等参数,本文研究的目标传感器包括国产卫星 GF 系列:GF1PMS1、GF1PMS2、GF1WV1、GF1WV2、GF1WV3、GF1WV4、GF2PMS1、GF2PMS2、GF4PMS、GF6PMS。国产卫星资源系列:ZY301MUX、ZY302MUX、ZY303MUX。Landsat 系列:Landsat4TM、Landsat5TM、Landsat7ETM+、Landsat8OLI。哨兵系列:Sentinel2AMSI、Sentinel2BMSI,以及 MODIS。传感器的光谱响应函数信息来源如表 1 所示。地面测棉花波谱数据来自于北京师范大学 863 波谱库,共 2346 条棉花冠层反射率包含了棉花 4 个物候时期:盛蕾期、盛花期、花铃以及盛铃期。

Table 1. Sources of spectral response functions for sensors

表 1. 星载传感器光谱响应函数来源

| 星载传感器 | 光谱响应函数来源 |
|-------------|--|
| GF 系列 | 中国资源卫星应用中心(https://www.cresda.com/zgzywxxyzx/index.html) |
| 资源系列 | 中国资源卫星应用中心(https://www.cresda.com/zgzywxxyzx/index.html) |
| Landsat 系列 | 美国地质调查局(https://Landsat.usgs.gov/spectral-characteristics-viewer) |
| Sentinel 系列 | 欧洲航天局(https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/document-library) |
| MODIS | 美国国家航空航天局(https://modis.gsfc.nasa.gov/) |

3. 研究方法

3.1. 光谱响应函数

光谱响应函数是星载传感器成像过程中的重要参数,它描述了在不同波长范围内的辐射响应程度,也被成为波段响应函数、狭缝函数,是波长的函数[14] [15]。不同的卫星由于其观测目标、观测任务有所

差异, 使得其搭载的光学传感器也各有特点, 不同传感器的差异性体现在波段宽度、中心波长位置等由此导致其光谱响应函数有所差别, 而同一系列的传感器由于其硬件的老化等原因也会导致其光谱响应函数的细微不同。选取的传感器在蓝、绿、红、近红外波段的光谱响应函数对照图如图 1 所示。

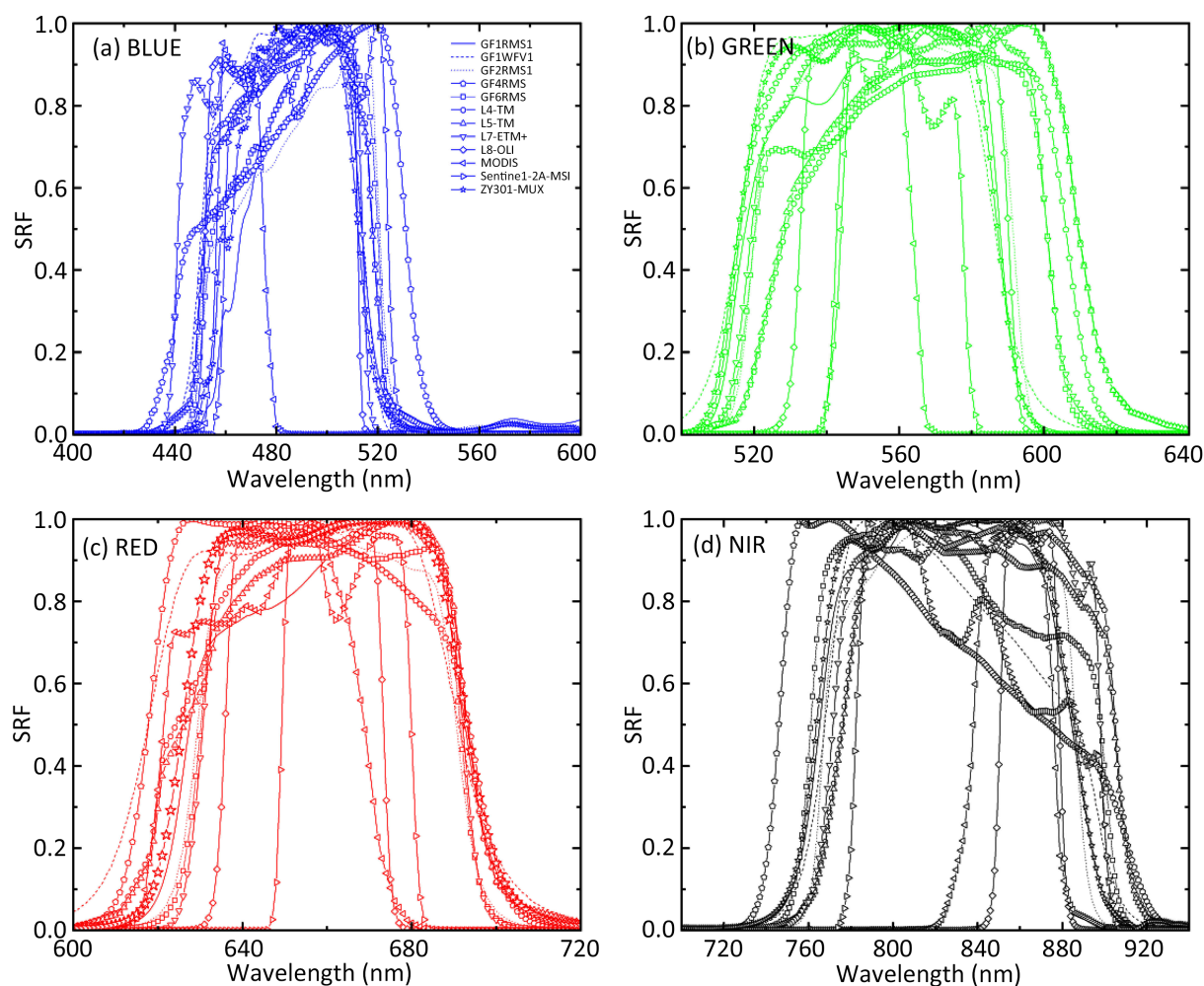


Figure 1. Comparison of spectral response functions among different sensors

图 1. 不同传感器的光谱响应函数对比

3.2. 星载多光谱模拟

监测提取区域地表覆被信息时采用中高分辨率卫星遥感数据已成主流方法, 但是遥感卫星由于其运行的轨道限制以及辐射传输过程中大气影响会导致地表信息采集的角度单一以及消除大气干扰所带来的不确定性。因此使用地物波谱库数据进行星载传感器多光谱模拟并以此作为基础数据用来探讨传感器光谱响应函数的差异对地物反射信息的影响可以有效解除大气对研究结果的干扰。地面高光谱数据为光谱分辨率为 1 nm 的窄波段光谱数据而由于辐射能量的衰减, 星载传感器的通道为多个具有一定波宽的离散波段, 因此可以根据星载传感器的光谱响应函数与对应波谱区间内高光谱采样信息进行卷积运算将窄波段反射率转为宽波段反射率[16]。

$$r_{\beta} = \frac{\sum_{\lambda=a}^b (\rho(\lambda) * \omega(\lambda))}{\sum_{\lambda=a}^b \omega(\lambda)} \quad (1)$$

其中 r_β 为模拟卫星宽波段 β 的反射率, $\rho(\lambda)$ 为传感器在波长 λ 处的观测目标反射率, $\omega(\lambda)$ 为传感器在波长 λ 处的光谱响应函数值, a, b 为模拟卫星宽波段 β 的波长下界和上界。

3.3. 不确定性分析方法

为量化不同传感器星载多光谱模拟结果及光学遥感指数之间的差异, 本文选取了决定系数、相对偏差以及模糊贴进度 3 类统计指标进行综合评价。分析过程中, 将参考传感器的模拟结果作为真实值, 对比传感器的模拟结果作为观测值, 以此定量刻画两者在不同波段及指数下的差异特征。决定系数(R-Square, R^2)用于衡量因变量的变异程度中有多少可由自变量通过回归关系进行解释, 其取值范围为 0 至 1。该指标反映了模型拟合优度的高低, 数值越接近 1, 说明自变量对因变量的解释能力越强。在星载多光谱模拟分析中, R^2 表示对比传感器的多光谱反射变化能被参考传感器反射变化所解释的比例。当 R^2 趋近于 1 时, 说明两传感器模拟值的拟合程度较高, 点对在 1:1 参考线附近分布更为集中。星载多光谱的决定系数可表示为:

$$T_{R^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{y_i} - y_i)^2} \quad (2)$$

其中 T_{R^2} 表示两传感器星载多光谱模拟值之间的决定系数, $\overline{y_i}$ 表示参考传感器的星载多光谱模拟值的均值。分子部分表示对比传感器与参考传感器的星载多光谱模拟值之间的平方差之和, 分母部分表示参考传感器的星载多光谱模拟值与均值之间的平方差之和。

绝对偏差用于衡量观测值与真实值之间的差异, 其值为二者的直接差。对于星载多光谱数据, 绝对偏差反映参考传感器与对比传感器在相同波段下多光谱模拟值的差值大小。相对偏差则是在绝对偏差的基础上, 将其与观测值的比值乘以 100%, 以百分比形式表示。

$$R_{BIAS} = \frac{x_i - y_i}{y_i} \times 100\% \quad (3)$$

基于模糊贴进度可以估算两传感器星载多光谱模拟值之间融合的相似性。假设

X, Y 为两个模糊子集, 分别表示对比传感器和参考传感器的星载多光谱模拟值集合。定义 X, Y 为两个模糊子集的内积, 可以表达为,

$$X \circ Y = \sum_{i=1}^n (x_\beta(\lambda) \wedge y_\beta(\lambda)) \quad (4)$$

其中, $x_\beta(\lambda)$ 表示在波段 β 的波长 λ 处, 对比传感器的星载多光谱模拟值, $y_\beta(\lambda)$ 表示在波段 β 的波长 λ 处, 参考传感器的星载多光谱模拟值。定义 X, Y 为两个模糊子集的外积, 可以表达为,

$$X \otimes Y = \sum_{i=1}^n (x_\beta(\lambda) \vee y_\beta(\lambda)) \quad (5)$$

其中 \wedge 表示取最小值, \vee 表示取最大值。

定义 S 为模糊贴进度, 即,

$$S = \frac{X \circ Y}{X \otimes Y} \quad (6)$$

4. 结果与分析

4.1. 不同传感器对棉花反射率模拟结果的影响

为系统评估不同卫星传感器光谱响应函数差异对棉花模拟反射特性的影响, 本研究选取盛蕾期、盛

花期、花铃期及盛铃期四个典型物候阶段，基于地面高光谱反射数据与多源传感器响应函数的卷积模拟结果，计算了各传感器在蓝、绿、红及近红外波段的模糊贴进度矩阵。模糊贴进度用于定量衡量不同传感器波段响应结果之间的相似程度，其取值范围为 0~1，值越接近 1 表明波段间光谱响应越一致，值越低则反映出传感器间存在较明显的响应差异。

如图 2，各物候期的模糊贴进度均处于较高水平，多数值高于 0.95，表明不同传感器在可见光至近红外区的模拟反射率具有较好的一致性。然而，各波段之间仍呈现出明显的差异规律。蓝、绿波段的贴进度在各时期均维持较高水平，尤其在盛蕾期与盛铃期阶段，大部分传感器间的贴进度接近 0.99，说明短波区域的光谱响应差异较小。这主要归因于蓝、绿波段受叶片结构及叶绿素含量变化的影响较弱，同时各传感器在该波段范围内的中心波长与带宽设置较为集中，响应函数形态相对一致。

相比之下，红波段的模糊贴进度在不同物候阶段间波动较大，部分传感器组合的贴进度最低可降至约 0.89，表明在红光吸收区传感器间的光谱响应差异相对突出。LANDSAT 8 与 Sentinel-2、MODIS 等传感器之间的差异最为显著，可能与其中心波长偏移及带宽设计差异有关。该差异在后续植被指数计算中易引入系统性误差，需在数据融合与模型反演中予以修正。相较而言，近红外波段的贴进度普遍高于 0.98，说明在高反射区不同传感器的响应曲线形态较为一致，光谱一致性较高，红波段差异成为多源数据间反射不一致的主要来源。

从物候变化的角度看，随着棉花生长进入盛花期至盛铃期，冠层结构趋于稳定，叶面积指数与叶绿素含量变化减缓，反射率变化幅度随之减小。此时模糊贴进度矩阵间差异收敛，图像整体相似性增强，特别是在花铃期与盛铃期，蓝、绿及近红外波段的贴进度均保持在较高水平。这表明在棉花生长后期，各传感器间的光谱响应差异进一步减弱。

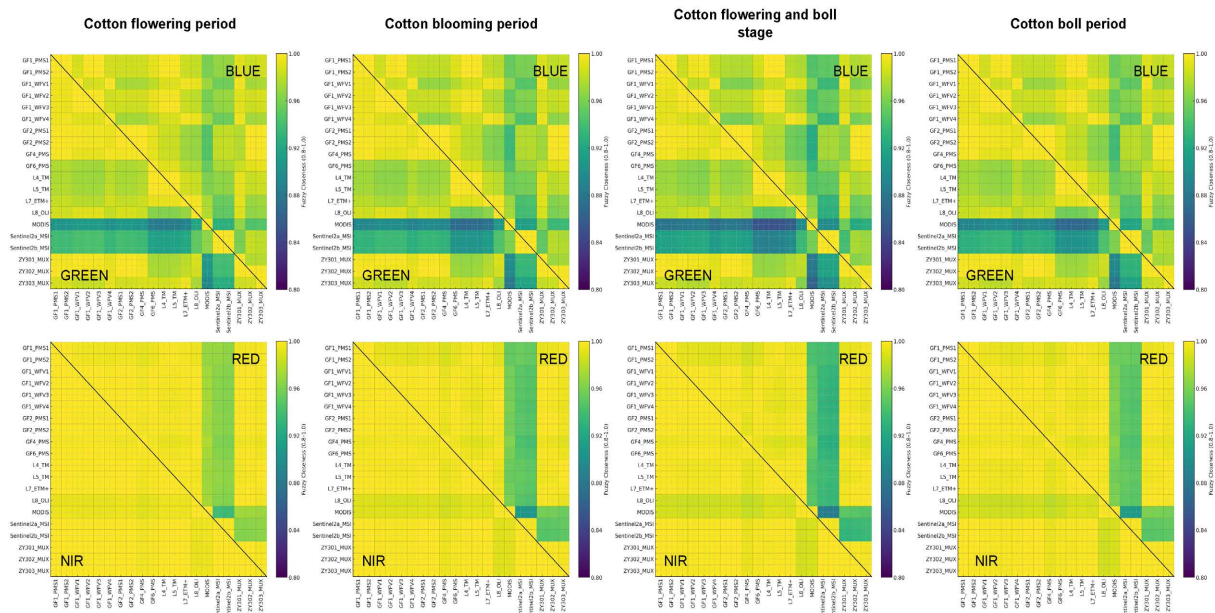


Figure 2. Fuzzy similarity of band-level reflectance among sensor groups across four cotton growth stages. From left to right, the stages are the squaring stage, peak flowering stage, peak boll-setting stage, and peak boll-opening stage. The fuzzy similarity ranges from 0.8 to 1, with darker colors indicating greater differences between sensors. L4, L5, L7, and L8 denote abbreviations for Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7, and Landsat 8, respectively (same below)

图 2. 棉花 4 个生长阶段各传感器组波段反射率模糊贴进度示意图，从左至右依次是棉花的盛蕾期、盛花期、花铃期、盛铃期，模糊贴进度的范围是 0.8~1，颜色越深代表传感器之间差异越大。其中 L4/L5/L7/L8 分别为 Landsat 4/Landsat 5/Landsat 7/Landsat 8 的简写(下同)

4.2. 光谱响应函数的差异传递至棉花植被指数的影响

4.2.1. 棉花植被指数的相对偏差结果

从棉花四个物候期的多传感器指数相对偏差矩阵可以看出, NDVI、EVI 和 SAVI 在不同传感器之间整体保持了较高的一致性, 相对偏差的量级普遍较小, 但不同指数和物候阶段的敏感程度存在差异。以所有非对角元的统计结果来看, NDVI 与 SAVI 的平均绝对相对偏差基本控制在 0.2%~0.35% 范围内, 而 EVI 的平均绝对相对偏差在各物候期约为 0.76%~0.87%。同时, 三个指数的相对偏差分布在零值附近呈较为对称的正负分布, 四个物候期的中位数均接近 0, 表明不同传感器之间的指数偏差更多表现为轻微的相对高估和低估相互抵消, 而非系统性单向偏移。

从 NDVI 的相对偏差矩阵来看如图 3, 盛蕾期、盛花期、花铃期和盛铃期四个阶段中, 多数传感器组合的平均绝对相对偏差集中在约 0.25%~0.32% 之间, 整体偏差水平较低。各物候期的最大绝对相对偏差分别约为 1.34%、1.47%、1.64% 和 1.36%, 其中花铃期的传感器间差异略高, 最大偏差略超过 1.6%。具体传感器组合上, NDVI 最大偏差主要出现在 MODIS 与 Sentinel2b_MSI 的配对中, 在四个物候期分别为约 1.34%、1.47%、1.64% 和 1.36%, 而其他如 GF 系列、Landsat 系列和 Sentinel2a_MSI 之间的 NDVI 相对偏差大多在 $\pm 1\%$ 以内。矩阵对角线附近的数值接近 0, 对角线远端的偏差才略有增加, 说明在 NDVI 指数层面, 多数光谱配置相近或经过设计优化的传感器之间保持了较高的一致性, 仅在个别跨平台组合中出现略高的相对偏差。

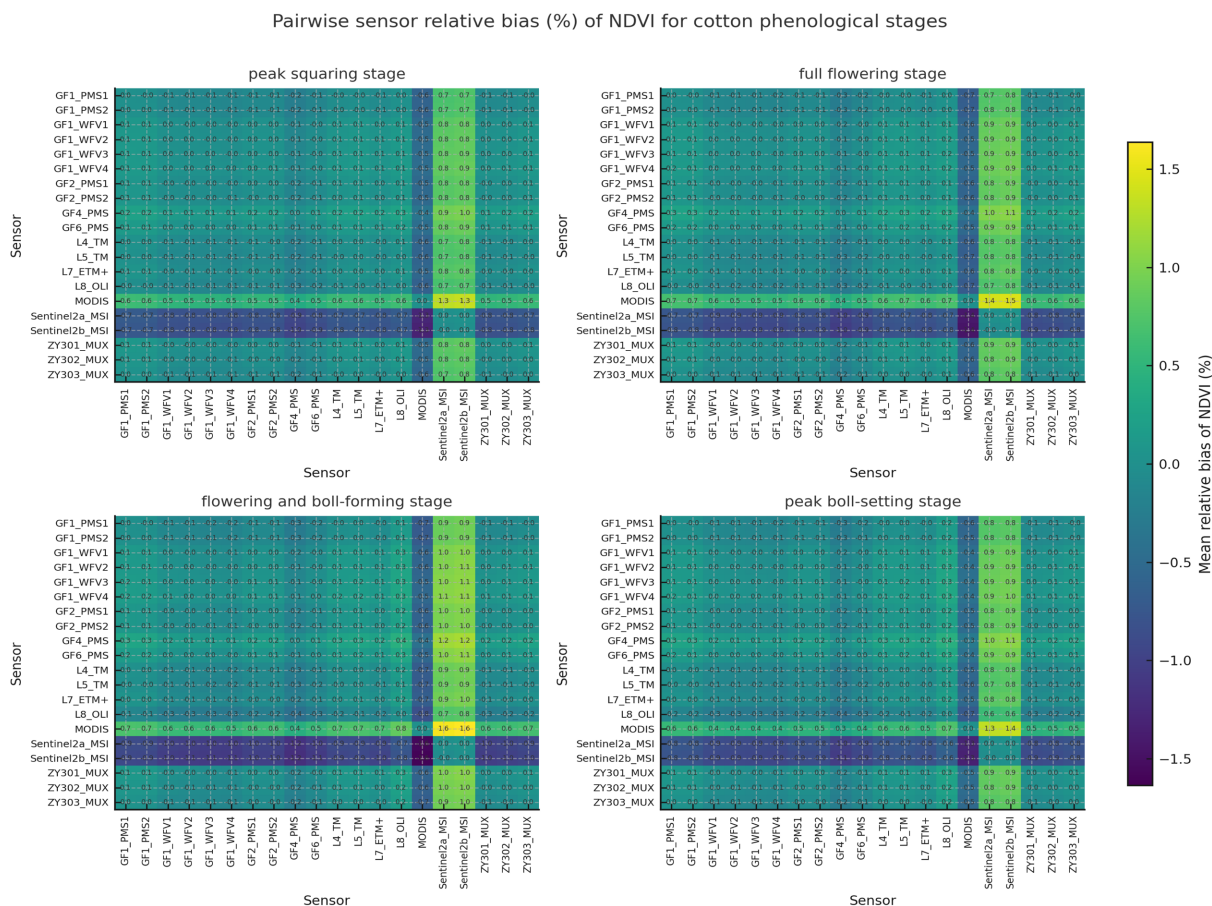


Figure 3. Relative NDVI bias among sensor groups across four cotton growth stages. From top left to bottom right, the stages are the squaring stage, peak flowering stage, peak boll-setting stage, and peak boll-opening stage

图 3. 棉花 4 个生长阶段各传感器组 NDVI 相对偏差示意图, 从左至上至右下分别为棉花的盛蕾期、盛花期、花铃期以及盛铃期

EVI 的相对偏差矩阵整体数值略高于 NDVI, 表现出更强的指数敏感性。如图 4, 在盛蕾期和盛花期, 所有传感器对的平均绝对相对偏差分别约为 0.78% 和 0.79%; 花铃期达到约 0.87%, 为四个物候阶段中最高; 盛铃期略有回落, 为约 0.76%。各物候期的最大绝对相对偏差分别约为 3.80%、3.69%、3.85% 和 3.17%, 明显高于 NDVI 对应的 1%~2% 水平。其中, EVI 最大偏差同样主要集中在 MODIS 与 Sentinel2b_MSI 组合, 在盛蕾期、盛花期和花铃期的相对偏差接近 $\pm 3.7\%$ ~ 3.9% , 盛铃期略低但仍在 $\pm 3.2\%$ 左右。相比之下, GF 系列内部以及 GF 与 Landsat 系列之间的 EVI 相对偏差大多维持在 $\pm 1\%$ 左右, 明显低于上述跨平台组合。该结果表明, 在三种指数中, EVI 对多传感器反射率细微差异更为敏感, 尤其是在花铃期, 少数传感器组合在 EVI 层面的相对偏差可接近 4%。

Pairwise sensor relative bias (%) of EVI for cotton phenological stages

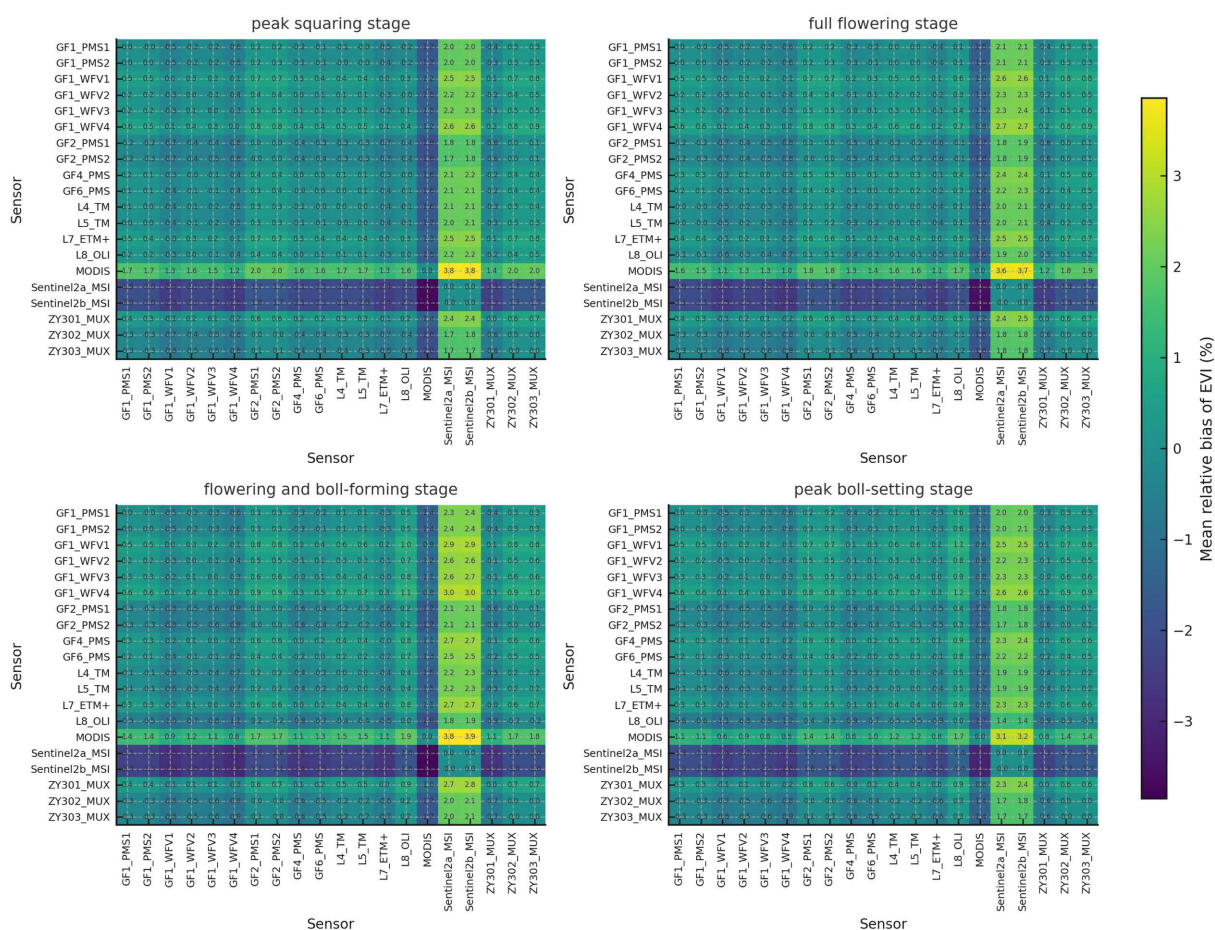


Figure 4. Relative EVI bias among sensor groups across four cotton growth stages. From top left to bottom right, the stages are the squaring stage, peak flowering stage, peak boll-setting stage, and peak boll-opening stage

图 4. 棉花 4 个生长阶段各传感器组 EVI 相对偏差示意图, 从左至右下分别为棉花的盛蕾期、盛花期、花铃期以及盛铃期

如图 5, SAVI 的相对偏差整体水平与 NDVI 相近, 略高但仍明显低于 EVI。四个物候期的平均绝对相对偏差分别为约 0.23%、0.28%、0.33% 和 0.33%, 呈现出由盛蕾期向花铃期、盛铃期逐渐增大的趋势。最大绝对相对偏差则分别约为 0.95%、1.08%、1.23% 和 1.29%, 整体控制在 $\pm 1.3\%$ 之内, 其中花铃期和盛铃期略高。具体来看, SAVI 最大偏差主要发生在 GF4_PMS 与 Sentinel2b_MSI 或 L8_OLI 等传感器组合中, 花铃期和盛铃期 GF4_PMS 与 L8_OLI 的平均相对偏差分别约为 1.23% 和 1.29%。除上述少数组合外,

GF 系列其他载荷、Landsat_ETM+、MODIS 以及 Sentinel2a_MSI 与多传感器之间的 SAVI 相对偏差大多集中在 $\pm 1\%$ 以内。矩阵整体呈现出与 NDVI 类似的结构特征, 对角近零、非对角元偏差缓慢增加, 说明在 SAVI 层面, 多数多光谱配置之间的指数估计仍然保持良好的一致性。

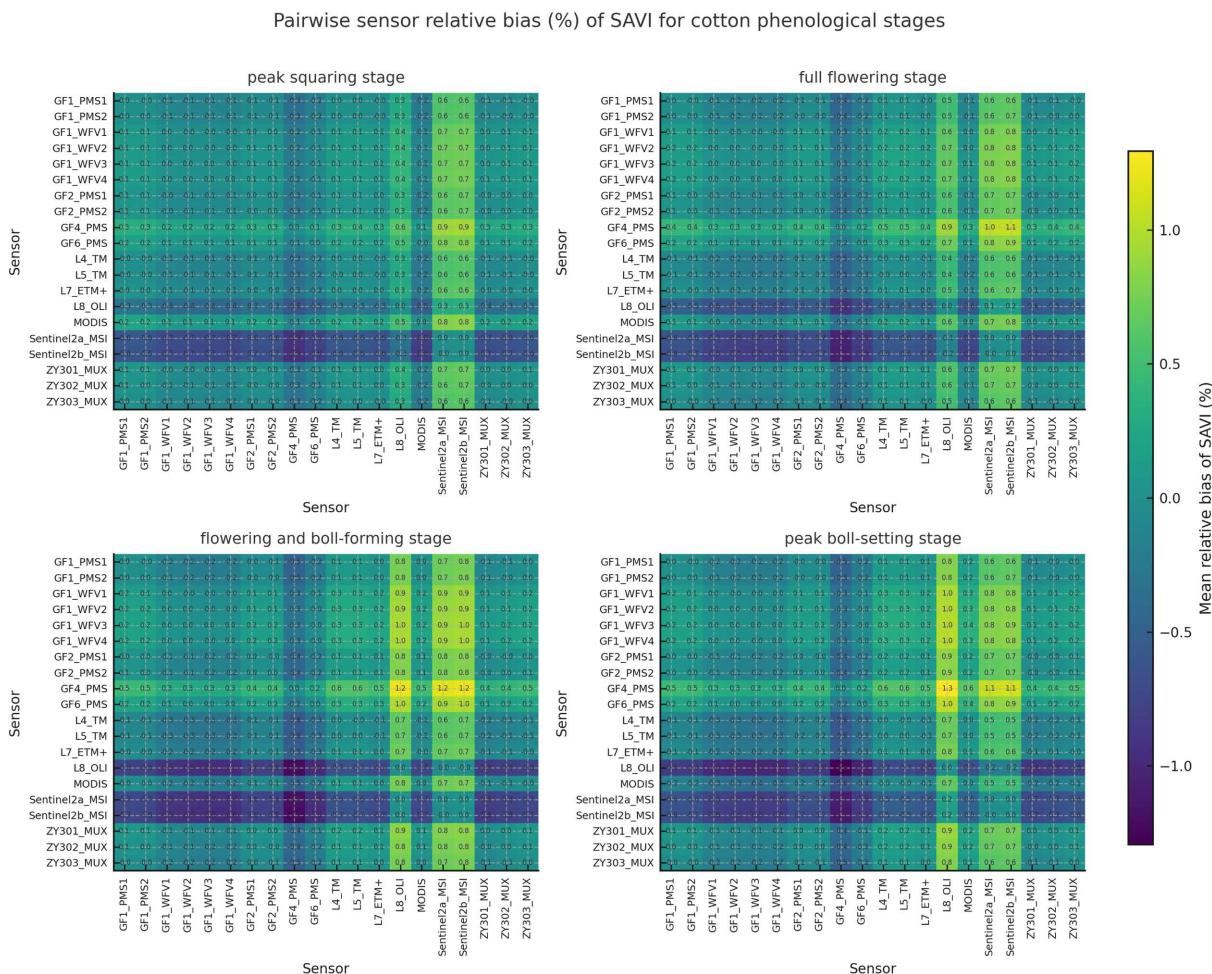


Figure 5. Relative SAVI bias among sensor groups across four cotton growth stages. From top left to bottom right, the stages are the squaring stage, peak flowering stage, peak boll-setting stage, and peak boll-opening stage

图 5. 棉花 4 个生长阶段各传感器组 SAVI 相对偏差示意图, 从左上至右下分别为棉花的盛蕾期、盛花期、花铃期以及盛铃期

4.2.2. 棉花植被指数的决定系数结果

本研究进一步基于 LSWI 指数, 对具备 SWIR1 波段的四种传感器(L7_ETM+, L8_OLI, Sentinel-2A MSI, Sentinel-2B MSI)间的一致性开展两两对比。图 6 展示了六组传感器组合的 LSWI 散点关系, 2000 余条不同物候期棉花地面高光谱经卷积后形成的指数值作为散点输入, 并通过颜色区分盛蕾期、盛花期、花铃期和盛铃期。整体上, 六组组合的散点均高度贴近 1:1 参考线, 全样本决定系数 R^2 均大于 0.998, 其中 L7_ETM+L8_OLI、L7_ETM+Sentinel-2A/B MSI 及 L8_OLI-Sentinel-2A/B MSI 的 R^2 约为 0.998~0.999, Sentinel-2A MSI-Sentinel-2B MSI 组合的相关性最高, R^2 接近 1.000, 表明四种传感器在 LSWI 估值层面几乎不存在显著系统性偏差, 仅存在极小幅度随机差异。

从点云结构看, 不同物候期散点在坐标空间高度重叠, 并未出现明显的物候分簇或物候特定偏移, 各阶段样本均紧密围绕 1:1 线分布, 仅在 LSWI 较低或较高区间出现少量轻微偏离, 说明物候变化并未

放大跨传感器差异。具体而言, L7_ETM++L8_OLI 以及 L8_OLI-Sentinel-2A/B MSI 组合的散点最为紧凑, 几乎呈条带状贴附于 1:1 线, L7_ETM++Sentinel-2A/B MSI 这一跨平台组合的表现也高度一致; Sentinel-2A MSI-Sentinel-2B MSI 由于在轨道与光谱配置上的高度相似, 其 LSWI 几乎完全重合。综合来看, 在本研究棉花地物和物候条件下, LSWI 对多传感器光谱响应函数差异表现出极强鲁棒性, 可作为多源数据联合监测棉花水分状况和生长状态的稳定指数基础。

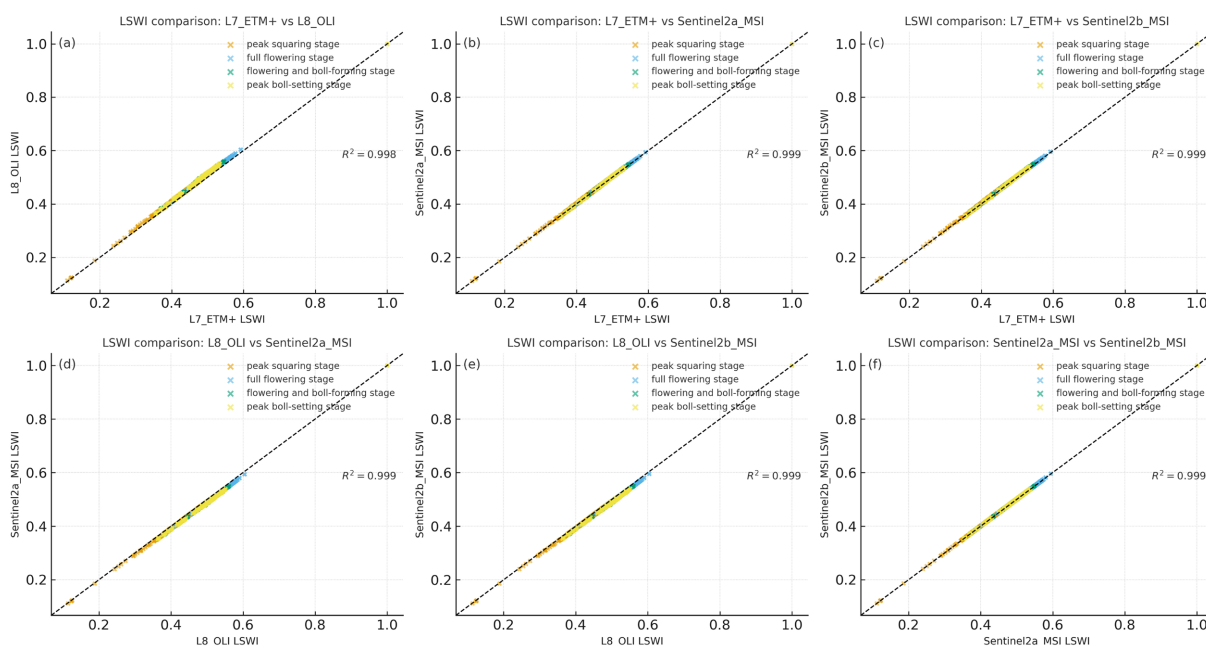


Figure 6. LSWI comparison among sensor pairs across four cotton growth stages. Panels (a)~(f) correspond to the index scatter relationships of L7_ETM++L8_OLI, L7_ETM++Sentinel-2A MSI, L7_ETM++Sentinel-2B MSI, L8_OLI-Sentinel-2A MSI, L8_OLI-Sentinel-2B MSI, and Sentinel-2A MSI-Sentinel-2B MSI, respectively

图 6. 棉花 4 个生长阶段各传感器组 LSWI 对比图, (a)~(f), 分别对应 L7_ETM++L8_OLI、L7_ETM++Sentinel-2A MSI、L7_ETM++Sentinel-2B MSI、L8_OLI-Sentinel-2A MSI、L8_OLI-Sentinel-2B MSI 以及 Sentinel-2A MSI-Sentinel-2B MSI 的指数散点关系

5. 结论

5.1. 不同传感器间由 SRF 诱发的差异特征

本研究通过卷积模拟系统评估了 SRF 差异对棉花反射率与植被指数的一致性影响。结果表明, SRF 诱发的多传感器差异具有显著的波段依赖和物候依赖特征。

在波段层面, 模糊贴中度矩阵显示蓝、绿波段在四个物候期内整体贴中度较高, 多数传感器组合的模糊贴中度高于 0.95, 盛蕾期和盛铃期更是接近 0.99, 说明短波可见光区不同传感器的响应函数形态较为接近, 反射率模拟结果具有良好的一致性。近红外波段的模糊贴中度普遍高于 0.98, 反映出在高反射区不同传感器之间的 SRF 差异对模拟反射率影响极小。相比之下, 红波段的模糊贴中度在不同物候阶段和不同传感器组合间波动较大, 局部可降至约 0.89, 尤其是 Landsat8 OLI 与 Sentinel-2、MODIS 等组合差异更为突出, 表明红光吸收区的 SRF 差异是多源棉花反射率不一致的主要来源之一。随棉花由盛蕾期进入盛花期、花铃期再到盛铃期, 冠层结构趋于稳定, 叶面积指数与叶绿素含量变化减缓, 蓝、绿及近红外波段的模糊贴中度进一步收敛, 说明在生育后期不同传感器间的光谱响应差异影响有所减弱。

在指数层面, NDVI、EVI 与 SAVI 在 4 个物候期和多传感器组合间整体保持较高一致性, 但敏感程

度存在差别。NDVI 和 SAVI 的平均绝对相对偏差总体控制在 0.2%~0.35% 左右,最大偏差多不超过 1.5%,仅在少数组合(如 MODIS-Sentinel-2B MSI、GF4_PMS-L8_OLI)中略有增大;EVI 对 SRF 差异更为敏感,各物候期平均绝对相对偏差约为 0.76%~0.87%,最大偏差接近 3.8%,且以花铃期偏差略高。三个指数的偏差在零值附近呈较为对称的正负分布,四个物候期的中位数均接近 0,说明多传感器指数差异以轻微的相对高估与低估为主,并未表现出明显的单向系统漂移。此外,基于具备 SWIR1 波段的 L7_ETM+、L8_OLI、Sentinel-2A/B MSI 计算的 LSWI 两两对比结果显示,六组传感器组合的散点均高度贴近 1:1 线, R^2 均大于 0.998,不同物候期的样本在坐标空间高度重叠,表明在本研究棉花地物与物候条件下,LSWI 对 SRF 差异表现出极强的鲁棒性。

综上,在棉花背景下 SRF 诱发的多传感器差异主要集中在红光吸收区和对蓝光/结构敏感的 EVI 指数上,而蓝、绿、近红外波段及 NDVI、SAVI、LSWI 等指数整体表现出较高的一致性,为多源数据融合与跨传感器应用提供了良好的基础。

5.2. 不同物候期棉花观测的最优传感器组合选择

在总体差异较小的前提下,本研究基于模糊贴适度矩阵与 NDVI、EVI、SAVI、LSWI 的相对偏差与散点特征,从物候分期角度对多传感器观测棉花的适宜组合进行了综合分析。结果表明,虽然多数传感器组合在各物候期均能提供较为一致的棉花反射与指数信息,但仍可在此基础上识别出更优的观测组合及需谨慎使用的传感器对。

对于盛蕾期与盛铃期,蓝、绿、近红外波段的模糊贴适度普遍接近 0.99,NDVI 与 SAVI 的平均绝对相对偏差处于全生育期最低水平,多数 GF 系列载荷、Landsat 系列与 Sentinel-2A MSI 之间的指数偏差稳定在 $\pm 1\%$ 以内,此时多源数据融合的鲁棒性较高,可优先选用上述传感器作为联合监测的核心组合。盛花期和花铃期是棉花光谱特性和冠层结构变化更为剧烈的阶段,模糊贴适度与指数偏差在部分传感器对中略有放大,其中 MODIS-Sentinel-2B MSI 组合在 NDVI、EVI 上的相对偏差相对较大,EVI 在花铃期的最大偏差可接近 4%,GF4_PMS-L8_OLI 在 SAVI 上的偏差也略高。因此,在生育中期若需高精度对比不同平台观测,应尽量选择 GF 系列内部、GF-Landsat7/8 以及 Landsat7/8-Sentinel-2A 等光谱配置相近的组合,避免直接将 MODIS 与个别敏感载荷进行未经校正的数据拼接。

在水分敏感指数方面,具备 SWIR1 波段的 L7_ETM+、L8_OLI 与 Sentinel-2A/B MSI 之间 LSWI 的 R^2 均大于 0.998,散点几乎完全贴合 1:1 线,且各物候期样本高度重叠,说明这四种传感器在棉花水分状况监测上具有高度可替代性和可互操作性。对于以棉田墒情和水分胁迫监测为目标的多源融合应用,可优先采用 L8_OLI 与 Sentinel-2A/B MSI 作为主干数据源,在时间分辨率和空间覆盖受限时再引入 L7_ETM+作为辅助补充。

总体而言,在不考虑轨道与时空分辨率差异的前提下,本研究认为:GF 系列内部载荷、GF-Landsat7/8 以及 Landsat7/8-Sentinel-2A/B 等组合在四个物候期均表现出较小的反射率与指数偏差,是适合用于多物候期棉花精细监测的优选传感器组合;LSWI 相关的 L7/L8/Sentinel-2 组合则可作为棉田水分监测的稳定骨干。在此基础上,结合实际观测需求和轨道时空特性,可进一步叠加简单的线性或乘性误差校正,从而构建面向不同物候期棉花的高一致性多源遥感观测体系。

参考文献

- [1] 吕思怡. 贸易政策不确定性对新疆棉花价格的影响[J]. 北方经贸, 2025(3): 74-79.
- [2] 高标, 房骄, 卢晓玲, 等. 区域农业碳排放与经济增长演进关系及其减排潜力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 13-18.

-
- [3] 马铮. 中美贸易摩擦背景下我国棉花产业分析与建议[J]. 山西农经, 2025(9): 43-46.
- [4] 文婷婷, 赵晓雁, 宋美珍, 等. 8 个陆地棉主栽品种在新疆早中熟植棉区“宽早优”种植模式下的表现[J]. 中国棉花, 2025, 52(4): 13-16+21.
- [5] 王敏轩. 棉花干旱响应基因 GhNAC029 的鉴定及功能验证[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北农业大学, 2023.
- [6] 姚穆. 纺织产业智能化的发展现状与展望[J]. 棉纺织技术, 2016(2): 1-3.
- [7] 熊丽君, 殷硕, 朱陈乐. 果园面源污染来源和迁移特征及影响因素研究进展[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 416-428.
- [8] Shuai, Y., Masek, J.G., Gao, F., Schaaf, C.B. and He, T. (2014) An Approach for the Long-Term 30-m Land Surface Snow-Free Albedo Retrieval from Historic Landsat Surface Reflectance and Modis-Based a Priori Anisotropy Knowledge. *Remote Sensing of Environment*, **152**, 467-479. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.009>
- [9] Trishchenko, A.P., Cihlar, J. and Li, Z. (2002) Effects of Spectral Response Function on Surface Reflectance and NDVI Measured with Moderate Resolution Satellite Sensors. *Remote Sensing of Environment*, **81**, 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00328-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00328-5)
- [10] Trishchenko, A.P. (2009) Effects of Spectral Response Function on Surface Reflectance and NDVI Measured with Moderate Resolution Satellite Sensors: Extension to AVHRR NOAA-17, 18 and Metop-a. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.002>
- [11] Teillet, P., Barker, J., Markham, B., et al. (2001) Radiometric Cross-Calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM Sensors Based on Tandem Data Sets. *Remote Sensing of Environment*, **78**, 39-54. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00248-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00248-6)
- [12] Flood, N. (2014) Continuity of Reflectance Data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for Both Top-of-Atmosphere and Surface Reflectance: A Study in the Australian Landscape. *Remote Sensing*, **6**, 7952-7970. <https://doi.org/10.3390/rs6097952>
- [13] Ling, X., Gao, Y. and Wu, G. (2023) How Does Intensive Land Use Affect Low-Carbon Transition in China? New Evidence from the Spatial Econometric Analysis. *Land*, **12**, Article 1578. <https://doi.org/10.3390/land12081578>
- [14] Xu, N., Wu, P., Ma, G., Hu, Q., Hu, X., Wu, R., et al. (2021) In-Flight Spectral Response Function Retrieval of a Multispectral Radiometer Based on the Functional Data Analysis Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **60**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3073097>
- [15] Choi, K.Y. and Milton, E.J. (2004) Estimating the Spectral Response Function of the CASI-2. *Mapping and Resources Management, Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society*, Aberdeen, 7-10 September 2004, 1-15.
- [16] Franke, J., Heinzl, V. and Menz, G. (2006) Assessment of NDVI- Differences Caused by Sensor Specific Relative Spectral Response Functions. 2006 *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver, 31 July-4 August 2006, 1138-1141. <https://doi.org/10.1109/igarss.2006.294>