

引用格式:Ma Jindian, Jiang Hong. Performance Evaluation of Topographic Correction for Four Spatial Resolution Images by the Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI)[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5):1100-1110. [马锦典, 江洪. SEVI指数消除4种十米级空间分辨率卫星影像地形阴影影响的效果评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5):1100-1110.]  
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1100

## SEVI指数消除4种十米级空间分辨率卫星影像 地形阴影影响的效果评价

马锦典, 江 洪

(福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室, 卫星空间信息技术综合应用国家地方  
联合工程研究中心, 数字中国研究院(福建), 福建 福州 350108)

**摘要:**为评价阴影消除植被指数(Shadow-Eliminated Vegetation Index, SEVI)对常用十米级不同空间分辨率遥感影像的地形阴影消除效果,采用2019年1月24~25日过境的Sentinel S2B(10 m)、GF-1(16 m)、Landsat 8 OLI(30 m)、GF-4(50 m)4种空间分辨率多光谱影像,计算了基于地表反射率的NDVI、SEVI和基于SCS+C模型校正后反射率的NDVI。评价方法包括植被指数数值分析、本影和落影相对误差分析、变异系数分析、植被指数与太阳入射角余弦值( $\cos i$ )散点图分析等。评价结果显示:4种空间分辨率的SEVI在本影相对误差分别为2.172%、1.422%、1.351%、1.060%;对应落影的相对误差分别为2.598%、2.801%、3.795%、2.711%;相应SEVI与 $\cos i$ 的决定系数分别为0.017 3、0.010 7、0.001 1、0.000 1;相应变异系数分别为10.036%、9.070%、8.051%、1.631%。研究结果表明,SEVI对10~50 m不同空间分辨率遥感影像的地形阴影校正效果良好,优于用SCS+C模型校正后的地表反射率计算的NDVI;遥感影像的地形阴影效应随着空间分辨率降低而减弱。

**关键词:**阴影消除植被指数(SEVI);本影;落影;SCS+C;空间分辨率

**中图分类号:**TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)05-1100-11

### 1 引言

地形阴影的影响给山区土地与覆被的解译以及各种生态参量的遥感反演带来了巨大的困难<sup>[1-2]</sup>。为更精确计算山区植被覆盖度<sup>[3]</sup>、叶面积指数<sup>[4]</sup>、地上生物量<sup>[5]</sup>、植被净初级生产力等<sup>[6]</sup>,必须消除遥感影像上的地形阴影影响。当前,国内外研究者已经发展了一系列基于经验型、物理型、半经验型的地形校正模型和具有地形校正效果的植被指数来消除或减弱遥感影像的地形阴影效应,如Cosine校正<sup>[7]</sup>、C校正<sup>[7]</sup>、SCS校正<sup>[8]</sup>、SCS+C校正<sup>[9]</sup>、归一化

差值山地植被指数(Normalized Difference Mountain Vegetation Index, NDMVI)<sup>[10]</sup>、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)<sup>[11]</sup>,以及基于波段比的阴影消除植被指数SEVI等<sup>[12-15]</sup>。但目前对常用的几种十米级不同空间分辨率卫星影像地形阴影效应的研究分析较少。另一方面,除了30 m空间分辨率的ASTER GDEM V2可以免费下载使用,更高精度的DEM数据难以获取,制约着高于30 m空间分辨率遥感影像的传统地形校正。新近提出的SEVI无需DEM数据的支持,能够有效

收稿日期:2020-07-06;修订日期:2021-09-05

基金项目:福建省自然科学基金项目(2017J01658),国家重点研发计划项目子课题(2017YFB0504203)。

作者简介:马锦典(1995—),男,江西乐平人,硕士研究生,主要从事植被遥感研究。E-mail:marcjind1995@gmail.com

通讯作者:江 洪(1975—),男,福建永安人,副研究员,主要从事环境遥感、信息管理研究。E-mail:jh910@fzu.edu.cn

消除地形本影和落影的影响,因此本实验主要采用 SEVI 方法对 Sentinel S2B(10 m)、GF-1(16 m)、Landsat 8 OLI(30 m)、GF-4(50 m)4 种十米级不同空间分辨率的影像开展地形阴影消除效果比较研究,探讨这几种常用遥感影像适宜的地形阴影校正方法。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

研究区为福建省永泰县藤山省级自然保护区一方形样区(图 1),地理坐标范围为:119°02′49″~119°06′59″ E, 25°47′33″~25°50′14″ N, 面积约 44 km<sup>2</sup>,平均海拔约 472 m。研究区地貌属于山地丘陵类型,区内植被以原生性森林和天然次生林为主。

2.2 数据源与预处理

卫星影像采用 2019 年 1 月 24 日~25 日过境的 Sentinel S2B、Landsat 8 OLI(下载自 USGS 网站 <https://earthexplorer.usgs.gov/>)和 GF-1、GF-4(下载自中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/CN/>))(图 2);高程数据采用 ASTER

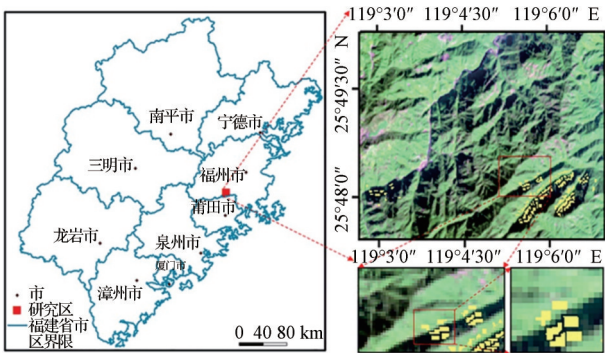


图 1 研究区地理位置、空间范围及验证样本

Fig.1 Location, spatial range and validation samples of the study area

GDEM V2(下载自地理空间数据云 <http://www.gscloud.cn/>)(表 1)。

表 1 数据源

Table 1 Data source

数据	成像日期	过境时间	分辨率/m
Sentinel S2B	20190124	10:47:33	10
GF-1	20190124	11:12:01	16
Landsat 8 OLI	20190125	10:32:34	30
GF-4	20190124	14:11:55	50
GDEM V2	/	/	30

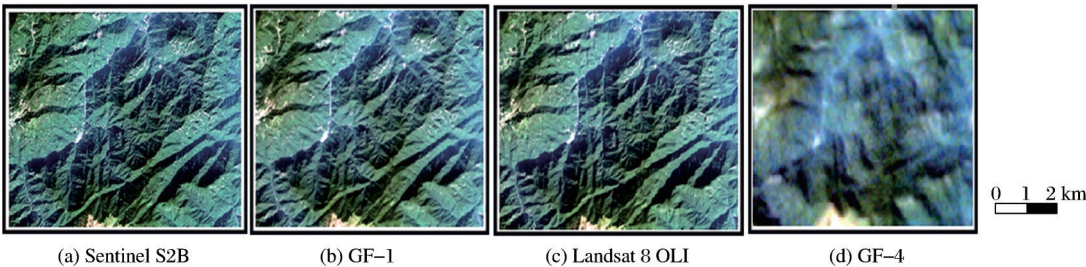


图 2 研究区 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4 遥感影像

Fig.2 Sentinel S2B, GF-1, Landsat 8 OLI, GF-4 images of the research area

遥感影像的预处理包括基于 RPC 的正射校正、几何校正、6S 大气校正、光谱通道校正等。其中 6S 大气校正模型参数中的气溶胶光学厚度来自 MAIAC AOD 产品,各卫星影像根据模型输出的大气校正参数  $x_a$ 、 $x_b$  和  $x_c$  校正各波段(表 2)。

因 Sentinel S2B、GF-1、Landsat8 OLI 和 GF-4 传感器对同一波段具有不同的光谱响应(图 3),本实验采用光谱归一化法进行不同传感器光谱通道校正<sup>[16]</sup>。根据各传感器接收的波段总辐射率差异(表 3),以 GF-4 卫星为基准,对不同卫星传感器间

表 2 6S 大气校正模型参数

Table 2 Parameters for 6S atmospheric correction model

数据	大气模型	气溶胶模型	550 nm AOD	传感器高度	$x_a$	$x_b$	$x_c$
Sentinel S2B	3	1	0.032	-1 000	0.003, 0.005	0.022, 0.009	0.049, 0.024
GF-1	3	1	0.032	-1 000	0.003, 0.004	0.021, 0.009	0.050, 0.025
Landsat8 OLI	3	1	0.036	-1 000	0.004, 0.005	0.024, 0.008	0.051, 0.022
GF-4	3	1	0.032	-1 000	0.003, 0.004	0.021, 0.009	0.049, 0.025

注:  $x_a$ 、 $x_b$ 、 $x_c$  分别按对应红、近红外波段的顺序给出

的波段反射率进行归一化处理。

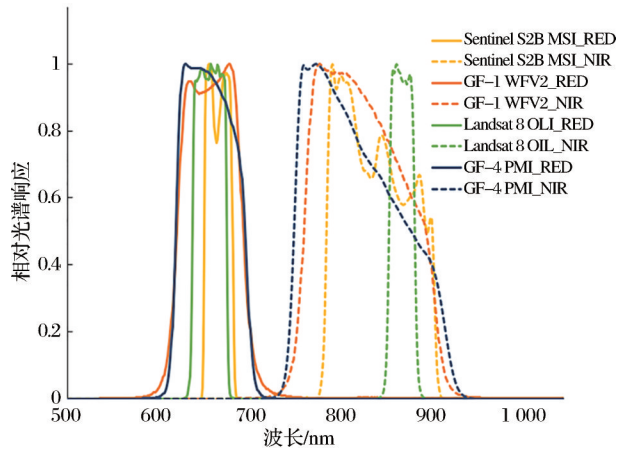


图3 光谱响应曲线

Fig.3 Relative Spectral Response Curves

DEM数据的预处理包括投影转换、分辨率重采样、裁剪、计算 $\cos i$ 、坡度、坡向等。其中, $\cos i$ 计算公式如下。

$$\cos i = \cos \sigma \cdot \cos \theta + \sin \sigma \cdot \sin \theta \cdot \cos(\beta - \omega) \quad (1)$$

其中: $i$ 表示局地太阳入射角; $\sigma$ 表示地形坡度角; $\theta$ 表示太阳天顶角; $\beta$ 表示地形坡向角; $\omega$ 表示太阳方位角。

表3 各传感器波段总辐射差异

Table 3 Band total irradiance of different sensors

传感器	总辐射率/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	
	RED	NIR
Sentinel S2B MSI	1 535.795	1 054.131
Landsat 8 OLI	1 573.925	970.464
GF-1 WFV2	1 567.895	1 087.742
GF-4 PMI	1 578.122	1 104.726
GF-4 PMI/Sentinel S2B MSI	1.028	1.048
GF-4 PMI/Landsat 8 OLI	1.003	1.138
GF-4 PMI/GF-1 WFV2	1.007	1.016

### 3 研究方法

#### 3.1 校正方法

##### 3.1.1 SCS+C校正模型

SCS+C校正模型<sup>[9]</sup>如公式(2)所示:

$$L_{SCS+C} = L_T \left( \frac{\cos \sigma \cdot \cos \theta + c}{\cos i + c} \right) \quad (2)$$

其中: $L_{SCS+C}$ 表示经过SCS+C模型校正后的像元值; $L_T$ 表示SCS+C模型校正之前的像元值; $\sigma$ 表示坡度角; $\theta$ 表示太阳天顶角; $i$ 表示太阳入射角; $c$ 表示地形校正参数,用于修正SCS校正模型因忽视散射辐射影响而产生的背光坡面的过度校正问题。 $c$

校正参数一般采用影像反射率和 $\cos i$ 一元线性回归方程的截距 $b$ 和斜率 $m$ 的比值求得。

##### 3.1.2 SEVI指数

SEVI指数<sup>[14]</sup>计算方法见公式(3),其中 $f(\Delta)$ 为调节因子。 $f(\Delta)$ 计算方法通过精选阴阳坡样区,让 $f(\Delta)$ 从0到1以0.001为步长进行遍历循环,当满足 $r_1$ (公式(6))与 $r_2$ (公式(7))的差值最小时,确定最优的 $f(\Delta)$ 。

$$\text{SEVI} = \text{RVI} + f(\Delta) \cdot \text{SVI} \quad (3)$$

$$\text{RVI} = B_{\text{nir}} / B_r \quad (4)$$

$$\text{SVI} = 1 / B_r \quad (5)$$

$$r_1 = \frac{n \sum \text{SEVI} \cdot \text{RVI} - \sum \text{SEVI} \cdot \sum \text{RVI}}{\sqrt{n \sum \text{SEVI}^2 - (\sum \text{SEVI})^2} \cdot \sqrt{n \sum \text{RVI}^2 - (\sum \text{RVI})^2}} \quad (6)$$

$$r_2 = \frac{n \sum \text{SEVI} \cdot \text{SVI} - \sum \text{SEVI} \cdot \sum \text{SVI}}{\sqrt{n \sum \text{SEVI}^2 - (\sum \text{SEVI})^2} \cdot \sqrt{n \sum \text{SVI}^2 - (\sum \text{SVI})^2}} \quad (7)$$

其中: $\text{RVI}$ 表示比值植被指数; $f(\Delta)$ 表示地形调节因子; $\text{SVI}$ 表示阴影植被指数; $B_{\text{nir}}$ 为近红外波段地表反射率; $B_r$ 为红光波段地表反射率; $r_1$ 为SEVI和RVI的相关系数; $r_2$ 为SEVI和SVI的相关系数; $n$ 为参与 $f(\Delta)$ 计算的影像的像元数。

#### 3.2 评估样本选取

本影是物体未受到直射光源照射的阴暗面,落影是由于障碍物的遮挡而投射到其他地物上的影子<sup>[17]</sup>,阳光直射到的向阳区域为非阴影(图4)。在研究区 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-44种空间分辨率遥感影像内各取40组评估样本。一组评估样本包括空间邻近的本影、落影、非阴影3个地物样本。对于本影和落影选取,先通过常规监督分类方法检测出影像的阴影和非阴影区域,其次由公式(8)和(9)获取本影检测结果。落影为阴影和本影之差。

$$\tan \zeta = \tan \sigma \cdot \cos(\pi - (\omega - \beta)) \quad (8)$$

$$\tan \zeta > \tan \gamma \quad (9)$$

其中: $\zeta$ 表示阴影像元在太阳入射方向的坡度角; $\sigma$ 表示地形坡度角; $\beta$ 表示地形坡向角; $\omega$ 表示太阳方位角; $\gamma$ 表示太阳高度角。

#### 3.3 地形校正效果评价方法

##### 3.3.1 本影和落影相对误差分析

由于地形阴影效应的影响,遥感影像上往往阴阳坡区域的亮度不一致,而通过地形校正则可以使



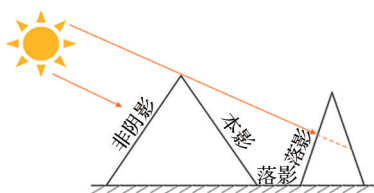


图 4 本影、落影和非阴影示意图

Fig.4 Self shadow, cast shadow and the sunlit slope

阴阳坡亮度趋于一致,且亮度均值越接近,地形校正效果越好<sup>[18]</sup>。对 40 组本影、落影和非阴影的植被指数数值进行误差分析,如果本影、落影与对应非阴影区域的植被指数值越接近,表明地形校正效果越好,反之可以评估地形阴影过校正或欠校正程度<sup>[14]</sup>。本影和落影的相对误差计算方法见公式(10)。

$$E = \frac{|VI_{shadow} - VI_{sunlit}|}{VI_{sunlit}} \cdot 100\% \quad (10)$$

其中: $E$ 表示相对误差绝对值; $VI_{shadow}$ 表示阴影(本影、落影)区域内植被指数的平均值; $VI_{sunlit}$ 表示邻近阳坡非阴影植被指数的平均值,根据选择出的阴影像元,取其相邻阳坡的非阴影像元。

### 3.3.2 变异系数分析

变异系数(Coefficient of Variation, CV)也叫分散指数(Dispersion Index, DI),是指影像的标准差和平均值之比,一般经过地形校正后,影像的变异系数相比于校正前会减小,变异系数越小则表明地形校正效果越好<sup>[19-21]</sup>。变异系数的计算见公式(11)。

$$CV = \frac{SD}{M} \cdot 100\% \quad (11)$$

其中: $CV$ 表示变异系数; $SD$ 表示目标区遥感影像的标准差; $M$ 表示目标区遥感影像的平均值。

### 3.3.3 植被指数与 $\cos i$ 散点图分析

遥感影像参数与  $\cos i$  的散点图分析(包括影像波段地表反射率、植被指数等与  $\cos i$  的分析)可以评价地形校正效果<sup>[22-23]</sup>。对植被指数值与  $\cos i$  值散点图进行线性回归拟合,分析决定系数( $r^2$ ),可以对地形校正效果进行定性定量的分析。其中,决定系数( $r^2$ )越小,则表明该地形校正方法的校正效果越好<sup>[24]</sup>。

## 4 结果与分析

### 4.1 目视分析

Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI 和 GF-4 地表反射率数据计算的 NDVI、SEVI 以及经 SCS+C 模型校正后计算的 NDVI 结果如图 5。未进行地形校正的 NDVI 存在明显的地形阴影效应(图 5(a)、(d)、(g)、(j))。经 SCS+C 模型校正后计算的 ND-

VI 地形阴影大部分得到校正(图 5(b)、(e)),其中 Landsat 8 OLI 影像能明显看出校正的本影和未校正的落影(图 5(h)),GF-4 影像地形阴影无明显校正效果(图 5(k))。SEVI 地形校正效果良好,地形阴影几乎消除(图 5(c)、(f)、(i)、(l))。

### 4.2 植被指数数值分析

由 Sentinel S2B 影像、GF-1 影像、Landsat 8 OLI 影像、GF-4 影像计算的植被指数对应的 40 组本影、落影和非阴影样本的植被指数折线图(图 6)显示:在 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI 这三种空间尺度遥感影像中,基于地表反射率数据计算的 NDVI 在非阴影区域的植被指数值明显高于对应的本影、落影区域的植被指数值(图 6(a)、(d)、(g))。基于 SCS+C 模型校正后的 NDVI 校正效果逐渐改善,可以很明显地看到,NDVI 在本影区域的植被指数值与对应非阴影区域的植被指数值趋于一致,而在落影区域的植被指数值仍然与对应的非阴影区域的植被指数值相差较大,说明 SCS+C 模型在 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI 影像中,对本影的校正效果较好,对落影的校正效果欠佳(图 6(b)、(e)、(h))。在 GF-4 遥感影像中,NDVI 在经过 SCS+C 模型校正后,本影、落影和非阴影区域对应的植被指数的值逐渐趋近(图 6(k))。基于 4 种空间尺度遥感影像地表反射率数据计算的 SEVI 在本影、落影和对应非阴影区域的植被指数值都趋于一致,说明 SEVI 对本影和落影的校正效果都良好(图 6(c)、(f)、(i)、(l))。

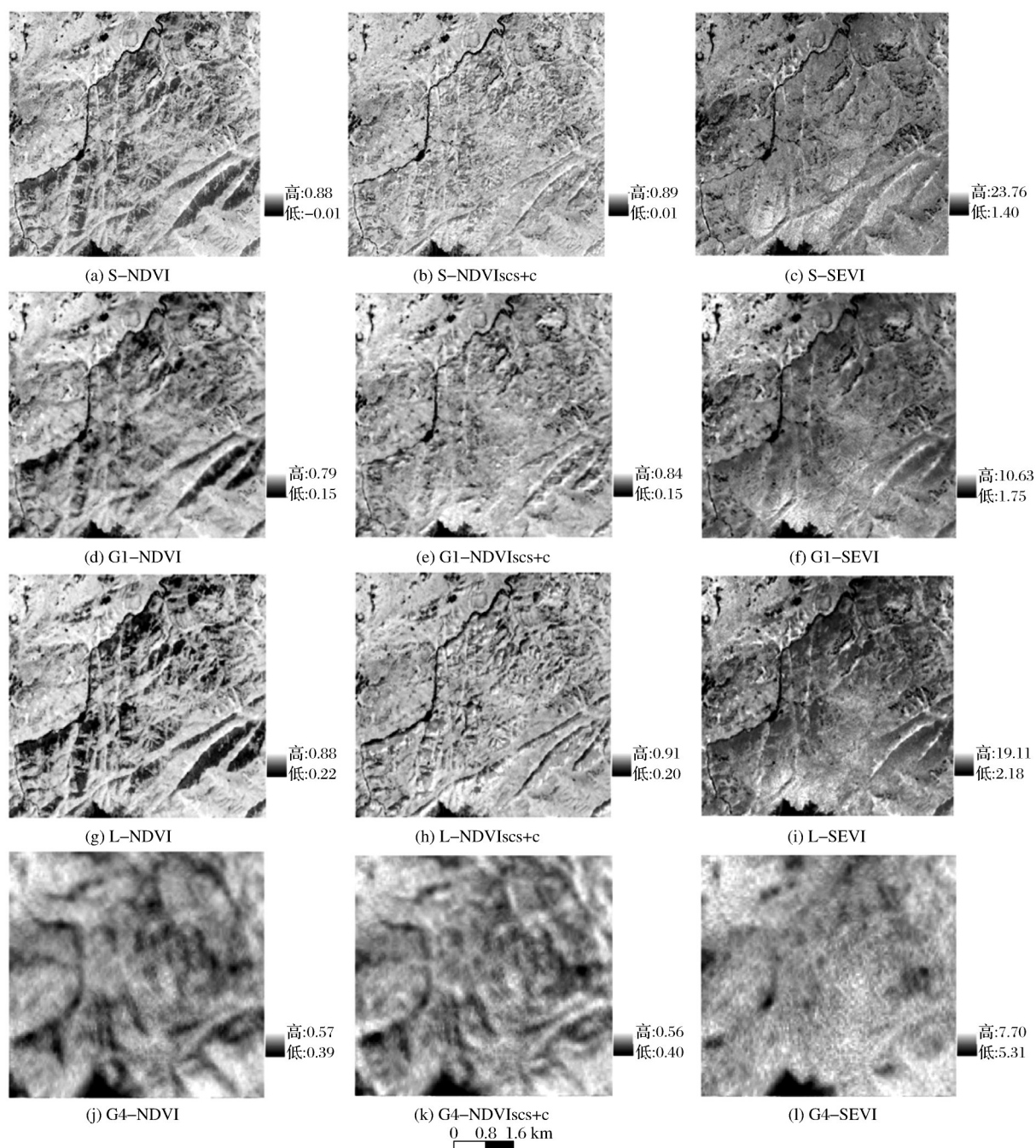
10~30 m 不同空间分辨率的遥感影像中,SCS+C 模型对落影无明显校正效果,这是由于 SCS+C 模型存在落影失效的理论缺陷<sup>[14]</sup>。对于 GF-4 遥感影像,由于影像几何畸变等质量问题<sup>[25-27]</sup>及由此导致的影像与重采样后的 DEM 数据的匹配精度下降影响了 SCS+C 模型校正效果。因此本影和落影区域植被指数在 SCS+C 模型校正前后变化不大。

### 4.3 本影和落影相对误差分析

Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI 和 GF-4 共 4 种影像计算的 NDVI 和 SEVI 对应的本影、落影的相对误差统计结果(表 4)表明:

(1) 4 种影像计算的未经地形校正的 NDVI 对应的本影、落影相对误差普遍较大,在 13%~25% 左右。

(2) 经过 SCS+C 模型校正后, Sentinel S2B 影像、GF-1 影像、Landsat 8 OLI 影像对应的 NDVI 对



(a,d,g,j)分别为基于 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4 4种影像地表反射率数据计算得到的NDVI; b,e,h,k分别为经过SCS+C模型校正后的4种影像地表反射率数据计算得到的NDVI; c,f,i,l分别为基于4种影像地表反射率数据计算得到的SEVI)

图5 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4影像对应植被指数图

Fig.5 Vegetation indices calculated from Sentinel S2B, GF-1, Landsat 8 OLI, GF-4 images

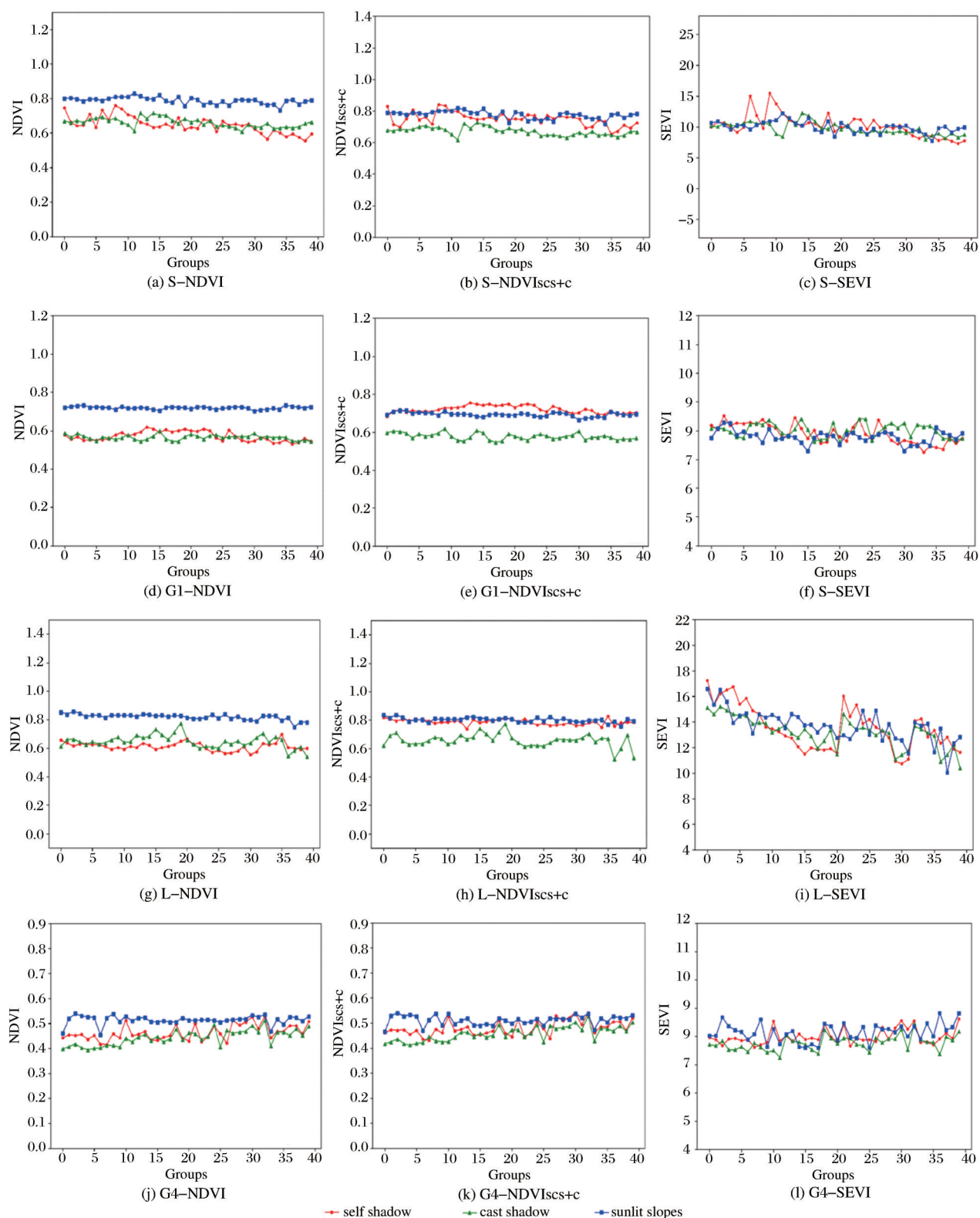
本影的校正效果良好(分别从17.907%、20.622%和25.438%降至3.362%、3.817%和1.987%),但对落影的校正效果欠佳(降幅仅在3%~5%左右);GF-4影像对应的NDVI对本落、落影校正效果不明显,本影和落影相对误差的降幅在3%左右。

(3)4种影像SEVI对本影、落影的校正效果皆优,整体校正效果更好(本影、落影相对误差均降至

1%~4%左右)。从本影、落影相对误差具体数值来看,SEVI对不同空间分辨率影像的地形校正效果良好。

#### 4.4 变异系数分析

CV指数统计结果(表5)显示:4种影像地表反射率数据计算的NDVI对应的CV值分别为10.133%、10.137%、10.175%和4.184%,影像空间



(a,d,g,j)分别为基于Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4 4种影像地表反射率数据计算得到的NDVI; b,e,h,k分别为经过SCS+C模型校正后的4种影像地表反射率数据计算得到的NDVI; c,f,i,l分别为基于4种影像地表反射率数据计算得到的SEVI)

图6 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4影像40组样本植被指数折线图

Fig.6 Line chart of vegetation indices of 40 samples for Sentinel S2B, GF-1, Landsat 8 OLI, GF-4 images



表 4 本影落影区域植被指数相对误差绝对值

Table 4 Absolute relative error of vegetation indices between the shadows and sunlit areas

VI	数据类型	传感器	分辨率	$VI_{self}$	$VI_{cast}$	$VI_{sunlit}$	$E_{self}(\%)$	$E_{cast}(\%)$
NDVI	Surface Reflectance	Sentinel S2B MSI	10 m	0.647	0.659	0.788	17.907	16.325
	SCS+C	Sentinel S2B MSI	10 m	0.749	0.670	0.775	3.362	13.548
SEVI	Surface Reflectance	Sentinel S2B MSI	10 m	10.184	9.708	9.967	2.172	2.598
NDVI	Surface Reflectance	GF-1 WFV2	16 m	0.570	0.563	0.719	20.622	21.584
	SCS+C	GF-1 WFV2	16 m	0.719	0.577	0.693	3.817	16.753
SEVI	Surface Reflectance	GF-1 WFV2	16 m	7.895	8.002	7.784	1.422	2.801
NDVI	Surface Reflectance	Landsat8 OLI	30 m	0.611	0.646	0.819	25.438	21.162
	SCS+C	Landsat8 OLI	30 m	0.786	0.656	0.802	1.987	18.184
SEVI	Surface Reflectance	Landsat8 OLI	30 m	13.521	13.186	13.706	1.351	3.795
NDVI	Surface Reflectance	GF-4 PMI	50 m	0.463	0.443	0.513	9.797	13.753
	SCS+C	GF-4 PMI	50 m	0.480	0.457	0.511	6.184	10.664
SEVI	Surface Reflectance	GF-4 PMI	50 m	6.997	6.880	7.072	1.060	2.711

注： $VI_{self}$ 、 $VI_{cast}$ 、 $VI_{sunlit}$  表示本影、落影与非阴影对应的植被指数均值； $E_{self}$  表示本影与对应的非阴影区域的相对误差绝对值； $E_{cast}$  表示落影与对应非阴影区域的相对误差绝对值

分辨率降低至 50m 时,NDVI 对应的 CV 值从 10% 骤降至 4%,地形阴影效应影响明显减弱;经过 SCS+C 模型地形校正后的各影像数据计算的 NDVI 对应的 CV 值随着影像空间分辨率降低而降

低,其值从 8.511% 递减至 3.783%,地形阴影效应影响逐渐减弱;SEVI 对应的 CV 值亦随着影像空间分辨率下降呈递减趋势,其值从 10.036% 降至 1.631%。

表 5 不同影像植被指数的变异系数(CV)

Table 5 The CV of vegetation indices for different images

VI	数据类型	CV(10 m)	CV(16 m)	CV(30 m)	CV(50 m)
NDVI	Surface Reflectance	10.133 %	10.137 %	10.175 %	4.184 %
	SCS+C	8.511 %	8.031 %	7.417 %	3.783 %
SEVI	Surface Reflectance	10.036 %	9.070 %	8.051 %	1.631 %

注:CV(10 m)、CV(16 m)、CV(30 m)、CV(50 m) 分别表示 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4 4 种影像对应的植被指数的变异系数(CV)

4.5 植被指数与 cosi 散点图分析

植被指数与 cosi 的散点图结果显示:地形校正前,4 种影像对应的 NDVI 与 cosi 的散点图中(图 7(a)、(d)、(g)、(j)),本影、落影的植被指数值相近,但与非阴影植被指数值相差较大,决定系数( $R^2$ )依次为 0.443 1、0.387 1、0.586 3 和 0.306 7(表 6),说明受地形影响较大。经过 SCS+C 模型校正后,在 Sentinel S2B 影像和 Landsat 8 OLI 影像中,虽然  $r^2$  降至很低依次为 0.001 7 和 0.023 0,本影和非阴影 NDVI 值相近,但落影 NDVI 值与非阴影 NDVI 值仍相差较大(图 7(b)、(h)),说明对本影校正效果良好,但对落影校正效果待提高。在 GF-1 影像中出现本影过校正现象,本影 NDVI 值略高于非阴影 NDVI 值,落影 NDVI 值与非阴影 NDVI 值仍相差较大(图 7(e)),此时  $r^2$  值略高为 0.206 1。在 GF-4 影像中,SCS+C 模型校正前后,本影和落影 NDVI 值无

明显变化(图 7(j)、(k)),本影、落影均没有得到校正。4 种影像对应的本影、落影、非阴影的 SEVI 值均趋于一致(图 7(c)、(f)、(i)、(l)),说明 SEVI 对各影像本影、落影的校正效果较好,对应的  $R^2$  较小依次为 0.017 3、0.010 7、0.001 1 和 0.000 1。

5 结 语

本实验从植被指数数值差异、本影和落影相对误差、变异系数、植被指数与 cosi 散点图这 4 个方面,分析 SEVI 消除 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI 和 GF-4 4 种十米级影像的地形阴影效应的性能,得出以下结论:

(1)10~50 m 不同空间分辨率的遥感影像都存在地形阴影效应的影响,SEVI 对以上不同空间分辨率的遥感影像均有效果。在 10 m 空间分辨率的 Sentinel S2B 影像中,SEVI 对应的本影、落影相对

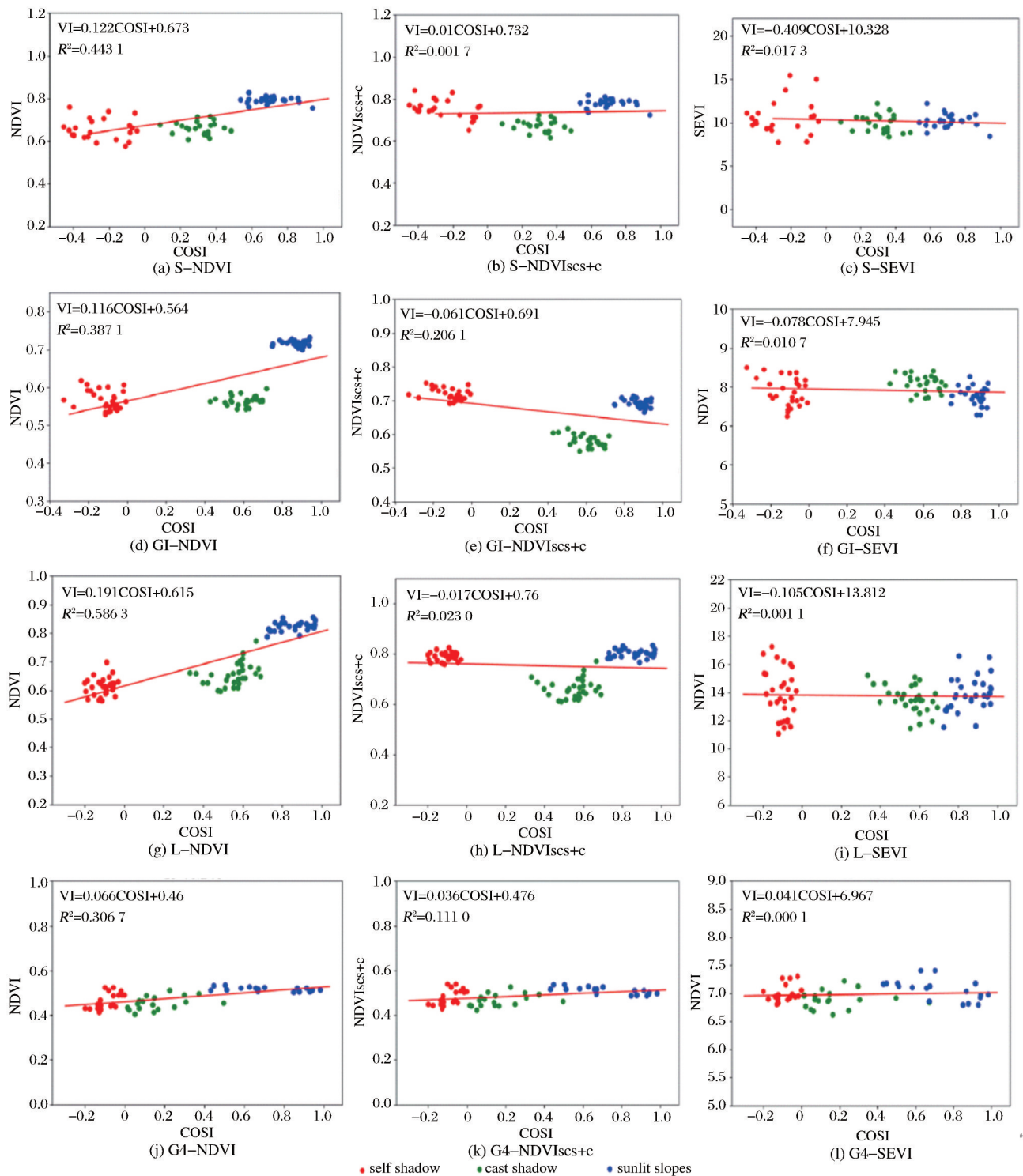


图7 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4影像数据植被指数与 $cos i$ 散点图  
 Fig.7 Scatter plots of vegetation indices versus  $cos i$  for Sentinel S2B, GF-1, Landsat 8 OLI, GF-4 images

误差降低至2.3%左右;在16 m空间分辨率的GF-1影像中,SEVI对应的本影、落影相对误差降低至2.1%左右;在30 m空间分辨率的Landsat 8 OLI影

像中,SEVI对应的本影、落影相对误差降低至2.5%左右;在50 m空间分辨率的GF-4影像中,SEVI对应的本影、落影相对误差降低至1.9%左右。4种空



表 6 植被指数与 *cosi* 的决定系数 ( $r^2$ )  
Table 6 The  $r^2$  of vegetation indices versus *cosi*

VI	数据类型	$r^2$ (10 m)	$r^2$ (16 m)	$r^2$ (30 m)	$r^2$ (50 m)
NDVI	Surface Reflectance	0.443 1	0.387 1	0.586 3	0.306 7
	SCS+C	0.001 7	0.206 1	0.023 0	0.111 0
SEVI	Surface Reflectance	0.017 3	0.010 7	0.001 1	0.000 1

注： $r^2$ (10 m)、 $r^2$ (16 m)、 $r^2$ (30 m)、 $r^2$ (50 m)分别表示 Sentinel S2B、GF-1、Landsat 8 OLI、GF-4 4 种影像对应的各植被指数与 *cosi* 的决定系数( $r^2$ ),其中  $r^2$  为 Pearson 相关系数( $r$ )的平方。

间分辨率遥感影像对应的 SEVI 与 *cosi* 的决定系数均低于 0.02,相应的变异系数均低于 10.1%。SEVI 对 10~50 m 不同空间分辨率遥感影像均具有良好的地形校正效果。

(2)在高精度 DEM 无法获取情况下,从传统地形校正模型出发,30 m 空间分辨率 DEM 往高精度重采样至 10 m 空间分辨率,仍能满足 SCS+C 模型的校正需求,但往低精度重采样至 50 m 空间分辨率,SCS+C 模型反而校正效果不佳。而 SEVI 只涉及波段间的运算,排除了 DEM 数据与遥感影像的匹配问题。SCS+C 模型或因 GF-4 影像质量问题地形校正效果不佳。

(3)10 m、16 m、30 m、50 m 空间分辨率遥感影像对应 SEVI 与 *cosi* 的决定系数分别为 0.017 3、0.010 7、0.001 1、0.000 1,决定系数随遥感影像空间分辨率的降低呈递减趋势。而 SCS+C 模型校正后得到的 NDVI 与 *cosi* 决定系数分别为 0.001 7、0.206 1、0.023 0、0.111 0,决定系数随遥感影像空间分辨率的降低呈非递减趋势。遥感影像的地形阴影效应理论上随着空间分辨率的降低而减弱,SEVI 和 *cosi* 的决定系数较好体现了这一规律,而 SCS+C 模型则不尽然。

参考文献 (References):

[1] Bian Jinhu, Li Ainong, Wang Shaonan, *et al.* Restoration of information obscured by mountain shadows for Landsat TM images based on MODIS NDVI[J].Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 12-22.[边金虎, 李爱农, 王少楠,等. 基于 MODIS NDVI 的 Landsat TM 影像地形阴影区光谱信息恢复方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 12-22.]

[2] Li Ainong, Yin Gaofei, Jin Hua'an, *et al.* Principles and methods for the retrieval of biophysical variables in mountainous areas[J].Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(1): 1-11.[李爱农, 尹高飞, 靳华安,等. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 1-11.]

[3] Yang G J, Pu R L, Zhang J X, *et al.* Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object-based spatial pattern analysis over mountain areas[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 77(3): 79-93. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2012.11.008.

[4] Jiang Haiying, Jia Kun, Zhao Xiang, *et al.* Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas[J]. Journal of Remote Sensing (Chinese), 2020, 24(12): 1433-1449.[江海英, 贾坤, 赵祥,等. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1433-1449.]

[5] Dong Dejin, Zhou Guomo, Du Huaqiang, *et al.* Effects of topographic correction with 6 correction models on phyllostachys praecox forest aboveground biomass estimation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(12): 1-8.[董德进, 周国模, 杜华强,等. 6 种地形校正方法对雷竹林地上生物量遥感估算的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(12): 1-8.]

[6] Liu Yuan, Huang Bo, Yi Chenggong, *et al.* Simulation by remote sensing and analysis of net primary productivity of vegetation based on topographical correction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 130-141.[刘玉安, 黄波, 易成功,等. 基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 130-141.]

[7] Teillet P M, Guindon B, Goodenough D G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data[J].Canadian Journal of Remote Sensing, 1982, 8(2): 84-106. DOI:10.1080/07038992.1982.10855028.

[8] Gu D, Gillespie A. Topographic normalization of landsat TM images of forest based on subpixel Sun-canopy-sensor geometry[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 64(2): 166-175. DOI:10.1016/S0034-4257(97)00177-6.

[9] Soenen S A, Peddle D R, Coburn C A. SCS+C: a modified sun-canopy-sensor topographic correction in forested terrain [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005, 43(9):2148-2159. DOI:10.1109/TGRS.2005.852480.

[10] Wu Zhijie, Xu Hanqiu. A new index for vegetation enhancements of mountainous regions based on satellite image data [J]. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(5): 656-

- 663.[吴志杰,徐涵秋.卫星影像数据构建山地植被指数与应用分析[J].地球信息科学学报,2011,13(5):656-663.]
- [11] Lee T Y, Kaufman Y J. Non-lambertian effects on remote sensing of surface reflectance and vegetation index[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, 24(5): 699-708. DOI:10.1109/TGRS.1986.289617.
- [12] Jiang H, Wu Y F. Change trend analysis of the time-series Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI) for the Wuyishan Nature reserve with the Sen+Mann-Kendall method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 658(1): 12-16. DOI: 10.1088/1755-1315/658/1/012016.
- [13] Jiang H, Wu B, Wang X. Developing a novel Topography-adjusted vegetation Index(TAVI) for Rugged area[C]//IEEE International, Geoscience and Remote Sensing Symposium 2010,7(1):2075-2078.DOI:10.1109/IGARSS.2010.5654222.
- [14] Jiang H, Wang S, Cao X J, *et al.* A Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI) for removal of self and cast shadow effects on vegetation in rugged terrains[J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(9): 1013-1029. DOI: 10.1080/17538947.2018.1495770.
- [15] Liu Xiaonong, Jiang Hong, Wang Xiaoqin, *et al.* Extraction of mountain vegetation information based on vegetation distinguished and shadow eliminated vegetaion index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 135-144.[柳晓农,江洪,汪小钦,等.构建植被区分阴影消除植被指数提取山地植被信息[J].农业工程学报,2019,35(20):135-144.]
- [16] Wang Xiaoqin, Ye Wei, Jiang Hong. Applicability analysis on LAI estimation model from remote sensing data for broadleaf forest based on spectral normalization[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2011, 39(5): 713-718.[汪小钦,叶伟,江洪.基于光谱归一化的阔叶林LAI遥感估算模型适用性分析[J].福州大学学报(自然科学版),2011,39(5):713-718.]
- [17] Jiang Hong, Yuan Yawei, Wang Sen. Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI) for removing terrain shadow effect: evaluation and application[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(12): 1977-1986.[江洪,袁亚伟,王森.阴影消除植被指数(SEVI)去除地形本影和落影干扰的性能评估与应用[J].地球信息科学学报,2019,21(12):1977-1986.]
- [18] Feng Shuangshuang, Tian Bing. Terrain correction of remote sensing image at low solar elevation angle based on normalization models[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2016, 39(4): 123-128.[冯双双,田冰.山区低太阳高度角遥感图像地形校正归一化模型的应用研究——以高黎贡山为例[J].河北农业大学学报,2016,39(4):123-128.]
- [19] Gao Y N, Zhang W C. LULC classification and topographic correction of Landsat-7 ETM+ imagery in the Yangjia River watershed: the influence of DEM resolution[J]. Sensors, 2009, 9(3): 1980-1995. DOI:10.3390/s90301980.
- [20] He Chao, Chen Jianzhen, Yue Cairong. Comparison test and research progress of normalization topographic correction model[J]. Forest Inventory and Planning, 2014, 39(3): 12-16.[何超,陈建珍,岳彩荣.归一化地形校正模型研究进展及其对比实验[J].林业调查规划,2014,39(3):12-16.]
- [21] Yu Zhexiu, Zhang Chao, Chen Jianzhen, *et al.* Topographic correction of sunny and shady slope in different division methods based on slope-matching model[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2017, 37(6): 178-187.[余哲修,张超,陈建珍,等.阴阳坡不同划分方法的坡度匹配模型地形校正研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2017,37(6):178-187.]
- [22] Gao Y, Zhang W. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(9): 2259-2275. DOI: 10.1080/01431160802549336.
- [23] Yao Chen, Huang Wei, Li Xianhua. Evaluation of topographical influence on vegetation indices of rugged terrain[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(4): 496-501.[姚晨,黄微,李先华.地形复杂区域的典型植被指数评估[J].遥感技术与应用,2009,24(4):496-501.]
- [24] Li H, Xu L, Shen H, *et al.* A General variational framework considering cast shadows for the topographic correction of remote sensing imagery[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 117(7): 161-171. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.03.021.
- [25] Xu Wen, Long Xiaoxiang, Li Qingpeng, *et al.* Image radiometric and geometric accuracy evaluation of GF-4 satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2016, 37(4): 16-25.[徐文,龙小祥,李庆鹏,等.“高分四号”卫星影像辐射与几何精度评价[J].航天返回与遥感,2016,37(4):16-25.]
- [26] Ma Feng, Sun Xu, Gao Lianru, *et al.* Research on orthorectification accuracy of GF-4 satellite image[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2019, 40(1): 74-82.[马冯,孙旭,高连如,等.“高分四号”卫星正射校正精度分析[J].航天返回与遥感,2019,40(1):74-82.]
- [27] Liu Lin. Technology and software design of GF-4 satellite image quality improvement[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.[柳林.GF-4卫星图像综合质量提升技术及软件设计[D].西安:西安电子科技大学,2018.]

## Performance Evaluation of Topographic Correction for Four Spatial Resolution Images by the Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI)

Ma Jindian, Jiang Hong

*(Key Laboratory of Spatial Data Mining & Information Sharing of MOE, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)*

**Abstract:** In order to evaluate the elimination performance of topographic shadow effect by the Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI), four multispectral images of the Sentinel S2B (10 m), GF-1 (16 m), Landsat 8 OLI (30 m) and GF-4 (50 m) were used to study. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) calculated from the surface reflectance and sun-canopy-sensor (SCS)+C correction was used to compare with SEVI calculated from the surface reflectance data. The evaluation methods included the vegetation indices value analysis, absolute relative error analysis, Coefficient of Variation (CV) analysis and scatter plots analysis of the cosine of solar incidence angle ( $\cos i$ ) versus vegetation indices. The result shows that the relative errors over the self shadow are 2.172%, 1.422%, 1.351%, 1.060% respectively for the SEVI calculated from four spatial resolution images. Meanwhile, the relative errors over the cast shadow are 2.598%, 2.801%, 3.795%, 2.711% respectively. The coefficients of determination of  $\cos i$  versus SEVI are 0.0173, 0.0107, 0.0011, 0.0001 respectively. and the coefficients of variation are 10.036%, 9.070%, 8.051%, 1.631% respectively. The SEVI eliminated the topographic shadow effect drastically of these four remote sensing images, which is better than the NDVI after the SCS+C correction. What is more, the topographic shadow effect is weakened as the spatial resolution of image is becoming lower.

**Key words:** Shadow-Eliminated Vegetation Index (SEVI); Self shadow; Cast shadow; SCS+C correction; Spatial resolution