

# 多光谱影像NDVI阴影影响去除模型

焦俊男<sup>1,2</sup>, 石静<sup>1,2</sup>, 田庆久<sup>1,2</sup>, 高林<sup>1,2</sup>, 徐念旭<sup>1,2</sup>

1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023;  
2. 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023

**摘要:** 归一化植被指数(NDVI)在植被多光谱遥感反演中占据尤为重要的地位, 而遥感影像中普遍存在的阴影对NDVI的精度产生很大的影响, 因此去除阴影对植被NDVI的影响对更精确的定量化研究具有应用价值。本文基于光照区和阴影区的太阳辐射能量差异, 模拟出同一植被在光照区和阴影区的辐亮度, 分析阴影对NDVI的影响机理; 利用植被固有反射率谱间关系, 引入对阴影极敏感的且与植被信息相关性小的归一化暗像元指数NDPI(Normalized Dark Pixel Index), 分析同一植被处于光照区与阴影区的NDVI关系, 构建以光照区植被NDVI为基准的NDVI阴影影响去除模型NSEE(NDVI Shadow-Effect-Eliminating), 并应用于Landsat 8 OLI影像进行验证。结果表明: NDVI阴影影响基本去除, 阴影区NDVI接近正常值, 且光照区NDVI保持稳定; 有效解决了阴影导致NDVI统计直方图的偏态问题, 使其更接近正态分布; 与验证影像NDVI沿剖面线逐像元比对发现, 植被NDVI阴影影响基本去除; 均方根误差RMSE为0.067。本模型能够将本身NDVI值很低的像元与阴影导致NDVI降低的植被像元区分开, 符合实际地物情况; 模型基于影像自身信息, 去除NDVI阴影影响的同时, 有效保持了NDVI的相对空间关系; 本文基于物理机理构建模型, 模型表达简洁、易于应用, 且仅依赖于影像自身信息, 无需异源数据, 计算方便且高效。

**关键词:** 遥感, 植被阴影冠层, NDVI, NDPI, 阴影, Landsat 8 OLI, 多光谱遥感

**引用格式:** 焦俊男, 石静, 田庆久, 高林, 徐念旭. 2020. 多光谱影像NDVI阴影影响去除模型. 遥感学报, 24(1): 53-66

Jiao J N, Shi J, Tian Q J, Gao L and Xu N X. 2020. Research on multispectral-image-based NDVI shadow-effect-eliminating model. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(1): 53-66[DOI:10.11834/jrs.20208225]

## 1 引言

归一化植被指数(NDVI)是目前应用最为广泛的植被指数, 它利用植物光谱的典型特征, 能够有效地反映植被信息与植被活力, 成为多光谱遥感反演植被叶绿素含量、植被覆盖度、叶面积指数、生物量、净初级生产力(NPP)和光合有效辐射吸收等生物物理与生物化学参数的重要技术手段(田庆久和闵祥军, 1998)。NDVI在植被指数中占据着非常重要的位置, 因其在一定程度上能消除地形和群落结构的阴影和辐射干扰, 以及削弱太阳高度角和大气所带来的部分噪音(郭锐, 2003), 但是这些影响的消除是不完全的, 无法消除的部分会导致NDVI在精确估计植被生物物理量及其时间变化

(Liu 和 Huete, 1995)等定量遥感反演中产生误差。王正兴等(2003)以 AVHRR-NDVI 数据产品为例, 分析指出NDVI对大气干扰处理有限, 没有考虑背景土壤干扰的影响, 且利用MVC合成方法(Maximum Value Composite)来消除阴影影响存在缺陷。

目前, 对NDVI植被指数的改进多侧重于去除大气、背景土壤的影响, 已取得较多成果, 而对于因太阳—地物—传感器相对角度关系引起的影响的研究相对较弱, 影像中阴影的存在是其最特殊且影响最为明显的一种情况。受太阳入射角、卫星侧摆、地物自身高度及地形起伏等综合影响(初庆伟等, 2013), 遥感影像中普遍存在大量阴影: 云层阻挡太阳辐射使得遥感影像中出现大面

收稿日期: 2018-05-17; 预印本: 2018-10-06

基金项目: 国家科技重大专项(编号:03-Y20A04-9001-17/18, 30-Y20A07-9003-17/18); 国家自然科学基金(编号:41771370); 国家重点研发计划(编号:2017YFD0600903); 民用航天技术预先研究项目(编号:Y7K00100KJ)

第一作者简介: 焦俊男, 1994年生, 男, 研究方向为高光谱遥感。E-mail: junnanjiao@163.com

通信作者简介: 田庆久, 1964年生, 男, 教授, 研究方向为高光谱遥感、定量遥感。E-mail: tianqj@nju.edu.cn

积连续阴影；地形起伏通常会导致阳坡与阴坡的植被光谱信息存在较大差异；因自身高度的遮挡，在森林中存在较大比例的阴影；即使是在稀疏的农田或草地，也有可能出现阴影。Jiang等(2006)提出由于暗土壤背景和阴影的存在，NDVI明显呈非线性特征，这使得应用NDVI估测植被覆盖度的精度大大降低。因此去除阴影对NDVI的影响对于量化研究具有重要意义。

国内外学者针对阴影对植被的影响的研究已经取得一定的成果。Huemmrich(1996)基于SAIL(Scattering by Arbitrary Inclined Leaves)模型研究了在利用归一化植被指数NDVI和土壤调节植被指数SAVI(Soil Adjusted Vegetation Index)反演光合有效辐射吸收(FAPAR)过程中阴影产生的影响(Huemmrich, 1996)。Zhang等(2015)，基于地面成像光谱仪，从叶片尺度计算了14种常见植被指数在阴影和非阴影下的差异，并以反演植被覆盖度为例分析了不同植被指数受阴影影响的程度。对于去除阴影对植被NDVI的影响，现有的方法大致可以分为4类：(1)第1类为通用的阴影检测和阴影补偿方法，例如：虢建宏等(2006)利用多波段检测方法检测出影像中的阴影区域，并基于成像机理构建模型来恢复各波段DN值；Liu和Yamazaki(2012)基于面向对象的方法，通过分类检测阴影像元，构建不同地物类型在阴影与非阴影下的DN值的统计关系，实现阴影区的信息补偿。这类研究不局限于某一类型的地物，而是从检测影像阴影像元后进行光谱信息修复的思路入手，在整体恢复影像阴影区信息后能够实现植被NDVI的修正，但不同地物达到的阴影修复效果往往不同，而且该方法通常需要较大的计算量；(2)第2类方法通过融合多源卫星影像来恢复阴影区信息，例如：基于MODIS和TM数据，陈阳等(2015)应用增强时空适应反射率融合模型(ESTARFM)修复影像中的云和阴影遮挡地区的信息；边金虎等(2016)结合MODIS NDVI与Landsat TM卫星数据来恢复地形阴影区的光谱信息。该类方法利用多源遥感数据来恢复影像中的阴影区信息，而复杂的异源数据信息差异的同化过程和多源同步数据的获取难度限制了这些方法的普适性；(3)第3类方法结合NDVI将植被阴影区从影像中剔除，以减少阴影对整体信息的影响。许章华等(2013)通过分析多种多光谱影像指出，阴影区植被因近红外波段光谱信息较

红光波段削弱更多导致其NDVI偏小，并在此基础上构建阴影植被指数SVI(Shaded Vegetation Index)以增大光照区植被、阴影区植被与水体的差异，实现阴影检测与去除，并应用于4种遥感影像；王凌等(2016)通过结合NDVI构建的比值阴影指数RSI(Ratio Shadow Index)来放大水体、云阴影与其他阴影间的差异，实现云阴影的区分。这类方法大多结合NDVI等植被指数，将阴影作为一类地物整体剔除，而没有考虑阴影区可能包含的植被信息；(4)第4类方法区别于上述3类方法，该类方法仅针对植被这一地物，目的在于恢复影像阴影区的植被信息(NDVI)，而不侧重于阴影区地物光谱曲线的修正，最常见的方法如：AVHRR-NDVI数据产品所采用的MVC合成算法，利用多幅NDVI影像合成来消除阴影的影响(王正兴等，2003)；另外，杨奇勇等(2013)应用地统计学的方法结合序贯高斯模拟(SGS)，对洼地山体阴影区域植被NDVI通过空间插值进行模拟，该方法利用NDVI的空间自相关性来模拟阴影下NDVI数值，但忽略了真实地物情况。

实际上，阴影区域植被因太阳直射辐射被阻挡，获得的能量仅来自于太阳散射(天空光)辐射和周围地物的影响。因此本文从光照区与阴影区的植被辐亮度差异入手，模拟影像中光照区与阴影区植被反射率数据，利用植被固有反射率光谱间关系，引入对阴影区域极敏感且与植被信息相关性小的归一化暗像元指数NDPI(Normalized Dark Pixel Index)，构建光照区植被NDVI与阴影区植被NDVI的关系，并以光照区NDVI为基准去除阴影对NDVI的影响。本文从机理出发，利用模拟数据构建NDVI阴影影响去除模型NSEE(NDVI Shadow-Effect-Eliminating)，并应用于两景Landsat 8 OLI数据(一景为实验，一景为验证)，验证效果较好；结果表明该方法物理机理直观，模型表达简洁，且仅依赖于影像，计算方便且高效。

## 2 模型构建

### 2.1 理论分析

地球表面某一观测点水平面上所接收太阳总辐射包含太阳直射辐射与太阳散射(天空光)辐射两部分。阴影区域因太阳直射辐射被阻挡，植被所接收的辐射能量来自于天空光辐射以及周围地物

的影响, 光照区域则直接接收太阳辐射能量, 包含太阳直射辐射和天空光辐射(图1)。

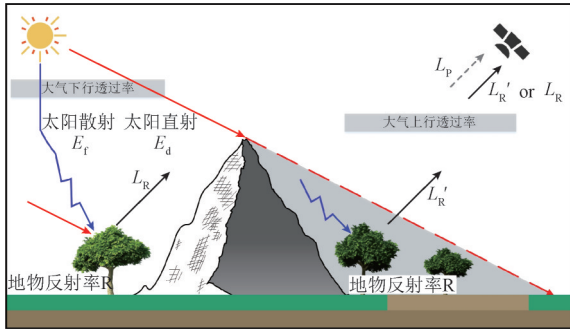


图1 光照区和阴影区植被接收太阳辐射能量传输示意图

Fig.1 Solar irradiance received by vegetations in Bright or Shaded region

本文利用 MODTRAN4.0 模拟美国标准大气模式下(水汽、二氧化碳和臭氧等保持默认设置, 气溶胶模型选择 Rural -VIS=23 km)水平地面的太阳直射辐射  $E_d$  和向下散射辐射  $E_f$  (太阳总辐射  $E_0 = E_d + E_f$ ), 单位为辐照度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ ), 如图2(a)。

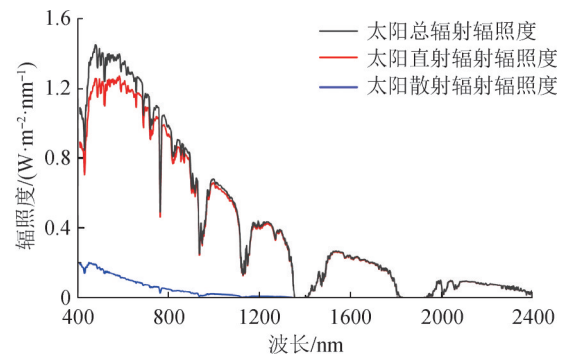
从 ENVI 光谱库中选取一条典型植被反射率光谱(400—2400 nm), 记为  $R$ , 如图2(b)。反射率是植被固有属性, 不会因所接收辐射能量变化而变化。以固有反射率不变为前提, 忽略周围地物的影响, 并采用太阳散射辐射的各向同性模式(本文中均只考虑各向同性模式), 结合式(1)计算模拟出影像中光照区植被辐亮度  $L_R$  和阴影区的植被辐亮度  $L'_R$

$$\begin{aligned} L_R &= \frac{R \cdot E_0}{\pi} \\ L'_R &= \frac{R \cdot E_f}{\pi} \\ E_0 &= E_d + E_f \end{aligned} \quad (1)$$

如图2(b)所示, 植被在蓝光波段呈低反射率特征, 在绿光波段的中心(0.55  $\mu m$  左右), 形成一个反射小峰, 使得植物叶片大多呈绿色; 进入红光波段, 反射率先低后高, 在 0.65  $\mu m$  左右处出现一个低谷, 随后迅速上升, 在近红外波段的中段 0.80  $\mu m$  附近形成最高峰。光照区域植被辐亮度光谱如图3(a)所示, 其光谱特征与标准植被特征基本符合。而阴影区的植被辐亮度光谱(图3(a))相比之下, 出现很大程度的信息缺失, 各波长辐亮度均不足光照区辐亮度的 15%(与太阳和大气条件相关), 且植被光谱信息最丰富的近红外波段受削弱的程度很大; 如图3(b)模拟的阴影区域植被辐亮度光谱曲线中, 蓝

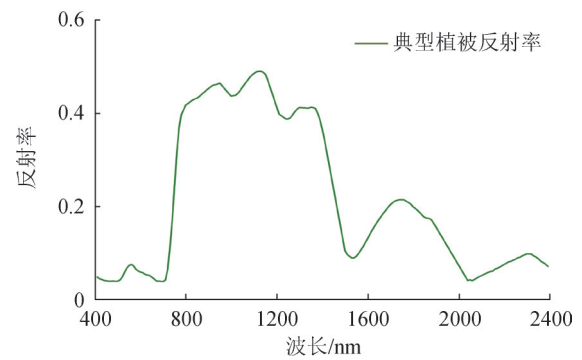
光波段所占比例明显提升, 相对地, 在 2000 nm 之后, 辐亮度几乎为 0; NDVI 依赖于植被 NIR 波段和 Red 波段的差分比值, 虽然在光照区和阴影区, 均表现出高值 NIR 与低值 Red 的特征, 但光谱曲线整体发生变异且不同波段的变异程度不同, 导致 NDVI 仍会受到阴影影响。下面利用模拟的光照区和阴影区的植被辐亮度光谱曲线, 计算出植被在阴影区相对于光照区的辐亮度变化幅度  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{L_R - L'_R}{L_R} \quad (2)$$



(a)水平地面接收太阳总辐射、太阳直射辐射和太阳散射辐射辐照度曲线

(a)Total solar irradiance, direct solar irradiance and diffuse solar irradiance on a horizontal surface



(b)典型植被反射率光谱

(b)Typical vegetation reflectance spectrum

图2 太阳辐照度模拟与典型植被光谱选取

Fig.2 Simulated solar irradiance and the chosen vegetation spectrum

如图4所示, 变化幅度  $\varepsilon$  随波长变长而变大; 这样的变化趋势也很好的解释了阴影下植被 NDVI 偏小的原因。数学上, NDVI 可以表示为比值植被指数 RVI 的函数形式

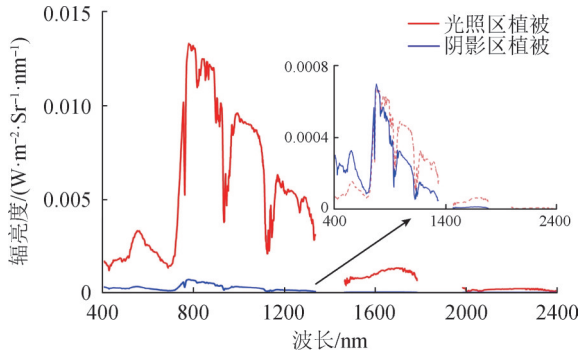


图3 同一植被在光照区与阴影区的模拟辐亮度曲线  
Fig.3 Simulated radiance curves of the same vegetation in Bright or Shaded region

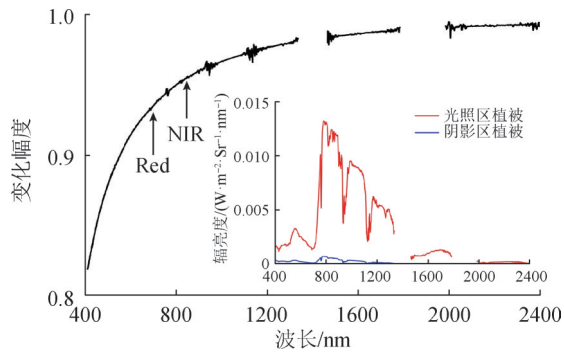


图4 阴影区植被辐亮度相对于光照区植被辐亮度变化幅度  
Fig.4 The magnitude of radiance difference of vegetation in shaded region against bright region

$$\text{NDVI} = 1 - \frac{2}{\text{RVI} + 1} = f(\text{RVI})$$

$$\text{RVI} = \frac{R(\text{NIR})}{R(\text{Red})} \quad (3)$$

NDVI 随 RVI 递增,但这种增长是非线性的。由图4可知, NIR 的变化幅度大于 Red(分子减少幅度大于分母),这就导致比值植被指数 RVI 在阴影下明显偏小,从而导致 NDVI 变小;基于 NDVI 与 RVI 的函数关系,虽然 NDVI 能在一定程度上削弱这一影响,但仍无法去除,因此需进一步探索去除阴影对植被 NDVI 影响的方法。另外,式(2)经过化简可以发现,变化幅度  $\varepsilon$  仅与太阳直射辐射和太阳散射辐射能量有关,与地物类型无关。结合式(1)、(2)可知

$$\varepsilon = \frac{L_R - L_R'}{L_R} = \frac{\frac{R \cdot E_0}{\pi} - \frac{R \cdot E_f}{\pi}}{\frac{R \cdot E_0}{\pi}} = \frac{E_0 - E_f}{E_0} \quad (4)$$

在此基础上,为进一步量化阴影对植被 NDVI 产生的影响,利用如下公式模拟影像中光照区与阴影区 NDVI 的差值来表达阴影影响程度:

植被固有反射率记为  $R$ ,是植被固有属性;影像中光照区与阴影区因接收的太阳辐射能量本身存在差异,而在通用的影像处理步骤中没有考虑这种差异,导致转换成像元反射率数据时会出现明显差异。模拟影像中光照区植被反射率记为  $R_d$ ,阴影区反射率记为  $R_f$ ,有

$$R_d = \frac{\pi \cdot L_R}{E_0} = \frac{R \cdot E_0}{E_0} = R$$

$$R_f = \frac{\pi \cdot L_R'}{E_0} = \frac{E_f}{E_0} \cdot R \quad (5)$$

因此,植被在光照区  $\text{RVI}_d$  与阴影区  $\text{RVI}_f$  可以表示为

$$\text{RVI}_d = \frac{R_d(\text{NIR})}{R_d(\text{Red})} = \frac{R(\text{NIR})}{R(\text{Red})} \quad (6)$$

$$\text{RVI}_f = \frac{R_f(\text{NIR})}{R_f(\text{Red})} = \frac{R(\text{NIR}) \cdot \frac{E_f(\text{NIR})}{E_0(\text{NIR})}}{R(\text{Red}) \cdot \frac{E_f(\text{Red})}{E_0(\text{Red})}} =$$

$$a \cdot \frac{R(\text{NIR})}{R(\text{Red})} = a \cdot \text{RVI}_d \quad (7)$$

$$\text{式中, } a = \frac{\frac{E_f(\text{NIR})}{E_0(\text{NIR})}}{\frac{E_f(\text{Red})}{E_0(\text{Red})}} = \frac{1 - \varepsilon(\text{NIR})}{1 - \varepsilon(\text{Red})} < 1$$

由式(4)、(7)可知,  $a$  与太阳条件有关,与地物反射率无关;根据文中的给出  $\varepsilon$ (图4)可推得,  $0 < a < 1$ 。

故,计算光照区与阴影区 NDVI 差值  $\Delta\text{NDVI}$  为

$$\Delta\text{NDVI} = \text{NDVI}_d - \text{NDVI}_f = f(\text{RVI}_d) - f(\text{RVI}_f)$$

$$f(\text{RVI}_f) = f(\text{RVI}_d) - f(a \cdot \text{RVI}_d) \quad (8)$$

经化简得

$$\Delta\text{NDVI} = \frac{2 \cdot (1 - a)}{\left(a \cdot x + \frac{1}{x}\right) + a + 1} \quad (9)$$

式中,  $0 < a < 1, x = \text{RVI}_d$

由上述可知,  $\Delta\text{NDVI} > 0, x = \text{RVI}_d$  与植物本身反射率特性有关,  $a$  与当时所处的太阳和大气条件有关;式(9)定量表达阴影对植被 NDVI 的影响,影响的强度与当时的太阳条件( $a$ )有关;在本文模拟的太阳条件下,  $a=0.69$ 。

在此基础上,本文引入一种与植被 NDVI 相关性小,但对阴影区极为敏感的指数 NDPI,以此来表达阴影对 NDVI 的影响;通过构建光照区植被

NDVI与阴影区植被NDVI的关系,去除阴影对NDVI的影响。

## 2.2 NDVI阴影影响去除模型构建

王凌等(2016)利用NDPI构建比值阴影指数RSI来加强Landsat 8 OLI影像中水体与云阴影的差异,实现云阴影的提取。其NDPI构建公式如下

$$\text{NDPI} = \frac{B1 - B7}{B1 + B7} \quad (10)$$

式中,  $B1$ ,  $B7$  分别为Landsat 8 OLI深蓝波段(450—520 nm)和SWIR2波段(2038—2356 nm)。

本文从植被本身特性出发,讨论NDPI指数应用于去除NDVI阴影影响的可行性。在植被固有反射率光谱中(图2(b)),在400—500 nm和2000—2400 nm的光谱反射率值占据植被信息的比例极小,均不足1/100。相对于NDVI指数所使用的NIR与Red波段,NDPI所使用波段与NDVI相关性很小;此外,比较光照区和阴影区植被辐亮度的差异可以发现,变化幅度最小出现在400—500 nm波段,最大在2000—2400 nm(图4),可以认为对光照区与阴影区太阳辐射能量的变化差异最不敏感的波段为400—500 nm,而相对的,2000—2400 nm最为敏感。因此借鉴NDVI指数设计的思想,选取变化最不敏感波段(400—500 nm)与变化最敏感波段(2000—2400 nm)通过差分比值的方法来标准化这一差异。Jiang等(2006)提出,暗土壤背景和阴影影响会导致NDVI明显呈非线性特征。本文仅考虑阴影情况,拟通过NDPI指数来实现对由阴影引起的NDVI非线性特征的线性化表达,实现NDVI阴影影响去除。

从ENVI标准光谱库中选取8种不同类型植被光谱(代表不同植被类型NDVI),结合式(5)模拟影像中阴影区和光照区的反射率数据;植被固有反射率记为 $R$ ,光照区的植被反射率记为 $R_d$ ,阴影区的反射率记为 $R_t$ ,并分别计算植被在光照区和阴影区的NDVI和NDPI(图5)。

图5(b)中NDPI-NDVI散点图,可以发现光照区的植被NDVI表现为高值,而同一植被在阴影区则表现为低值,在选取的8种植被中,NDVI的变化范围为0.13—0.19,这种差异是很明显的;如果未去除阴影影响,导致的NDVI误差会在遥感反演传递过程中放大。同样地,同一植被的NDPI在光照区表现为负值,而在阴影区为正值且较高。

NDPI在光照区和阴影区的差值在-1.10—-1.27,说明NDPI对于阴影有很强的指示性。

利用每组植被的光照区与阴影区NDPI-NDVI数据对,计算各组斜率,如图5(b);计算每组植被在光照区与阴影区 $\Delta\text{NDVI}$ 与 $\Delta\text{NDPI}$ ,并拟合出过原点的直线,如图5(c);计算每条植被斜率与拟合斜率的差值,如图5(d)。可以发现,植被在光照区和阴影区的NDVI差异在NDPI指数的引入下呈现类线性特征,且植被的NDPI差异也呈现一定的稳定性;因此利用同一植被在光照区和阴影区的NDPI差值来线性修正NDVI差异具有一定可行性。

基于影像光照区和阴影区的NDPI-NDVI线性关系,构建NDVI阴影影响去除模型(NSEE)如下

$$\text{NDVI}_{\text{correct}} = \text{NDVI}_{\text{original}} + k \cdot (\text{NDPI}_{\text{original}} - \text{NDPI}_{\text{direct}}) \quad (11)$$

式中, $k$ 为NDPI-NDVI散点图拟合的斜率, $\text{NDVI}_{\text{correct}}$ 是去除阴影影响的NDVI, $\text{NDVI}_{\text{original}}$ 为原始NDVI, $\text{NDPI}_{\text{original}}$ 是植被在阴影区NDPI, $\text{NDPI}_{\text{direct}}$ 为植被在光照区NDPI。对模型斜率 $k$ 进行 $t$ 假设检验,通过了显著性水平为0.001的显著性检验( $\text{Pro} > |t| = 1.0082\text{E}-6$ )。NDVI修正模型示意图如图6所示。

从图5拟合的斜率可以发现,拟合斜率与实际斜率的最大差值为0.026,由此误差导致的NDVI修正的最大误差(最大斜率差值 $0.026 \times \Delta\text{NDPI}$ 最大值 $1.27 = 0.033$ )小于0.034,这说明利用NDPI与NDVI关系构建线性模型来去除阴影对NDVI的影响是可行且有效的。

本文模型是以线性的方式将阴影下的植被NDVI修正到正常值,而在植被—土壤系统中,土壤NDVI也同样受阴影影响;由式(4)可知,阴影区相对于光照区的辐亮度变化幅度 $\varepsilon$ 是与地物类型无关的参数;结合图4和式(9)可知,阴影造成的影响程度 $\Delta\text{NDVI}$ 是关于RVI的函数,因为植被和裸土的RVI均大于0,所以其 $\Delta\text{NDVI} > 0$ ,即阴影对植被或裸土的NDVI均会造成衰减的影响。

结合式(9),裸土的RVI通常近似于1(略大于1),植被的RVI通常大于2,在本文模拟的太阳条件下( $a = 0.69$ ),分别计算阴影对裸土和植被的影响程度:

$$\text{设 } x_1 = \text{RVI}_{\text{veg}} > 2, x_2 = \text{RVI}_{\text{Soil}} > 1, a = 0.69$$

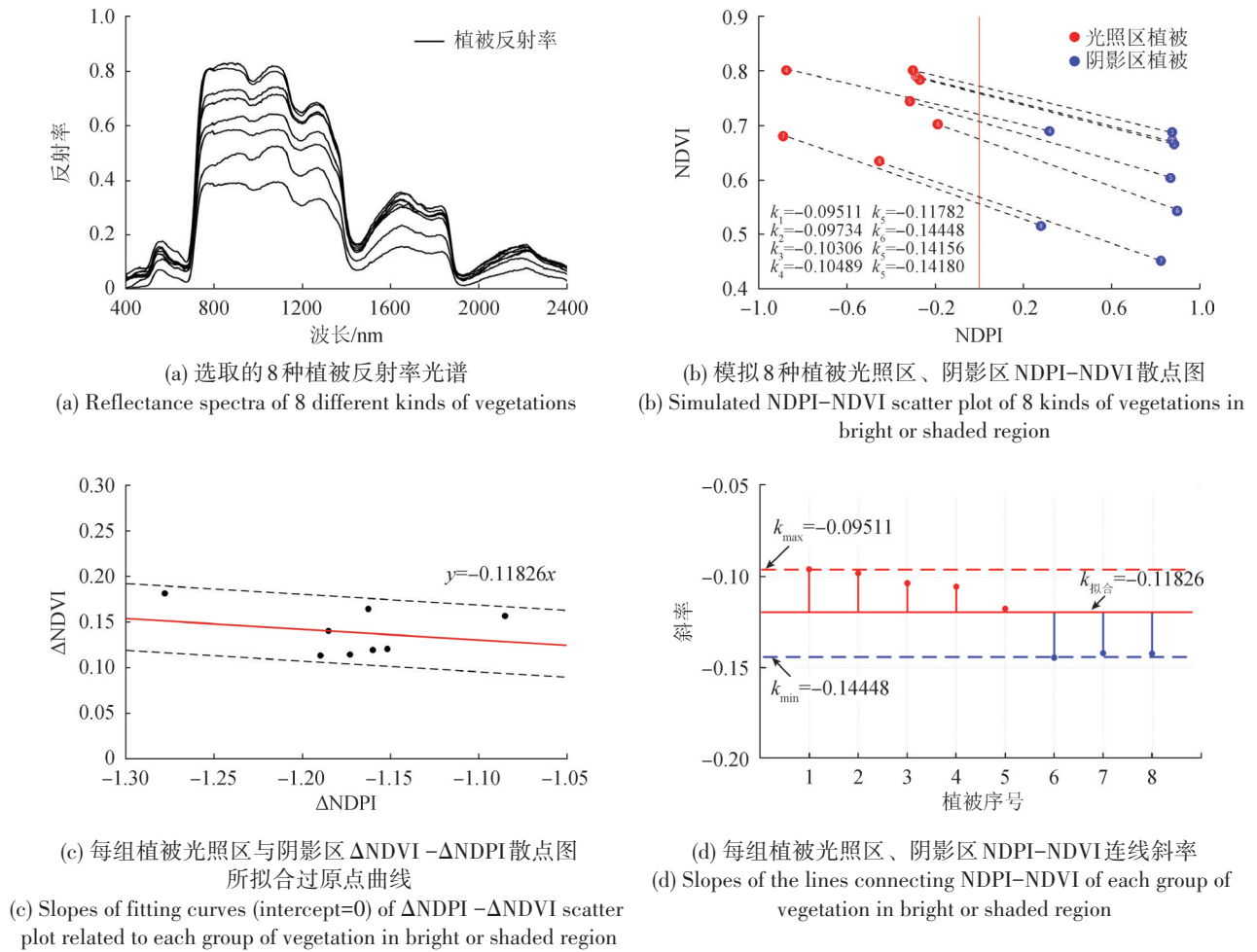


图5 模拟数据误差分析

Fig.5 Error analysis of simulated data

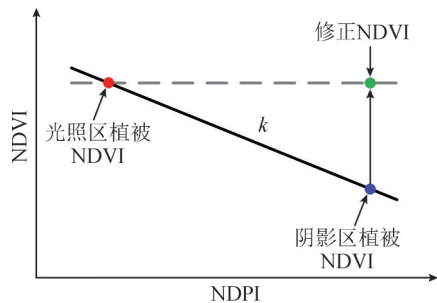


图6 NDVI阴影影响去除模型示意图

Fig.6 Schematic diagram of NDVI Shadow-Effect-Eliminating Model

$$\frac{1}{\Delta NDVI_{Veg}} - \frac{1}{\Delta NDVI_{Soil}} = \frac{1}{2 \cdot (1 - a)} \cdot (x_1 - x_2) \cdot \left( \frac{ax_1x_2 - 1}{x_1x_2} \right) > 0 \quad (12)$$

可得,  $\Delta NDVI_{Veg} < \Delta NDVI_{Soil}$

在本文模拟的太阳条件下(通常大多数晴空情况下均适用), 阴影对裸土NDVI造成的衰减程度大

于植被, 因此同处于阴影区的植被与裸土仍存在NDVI数值上的差异而不会出现混淆; 而且, 在通过上述模型修正后, 裸土NDVI也不会出现过校正而与阴影区植被混淆的现象, 这有效保证了植被NDVI的准确性。

### 3 数据验证与结果分析

#### 3.1 数据概况

针对从模拟数据构建的NDVI阴影影响去除线性模型, 本文选择两景Landsat 8 OLI数据进行实验和验证。两景为同一区域不同太阳高度角下(34°、66°)的常绿植被区域, 忽略时间季节差异且假定植被在空间上的变化一致。以太阳高度角较低的作为实验影像A, 影像中存在明显阴影区与光照区; 太阳高度角较高的作为验证影像B, 验证影像B中均表现为光照区; 通过比较验证影像B计算

所得 NDVI 与实验影像 A 经模型修正后的 NDVI 之间的数值关系与空间关系, 验证该模型的实际效果。

如图 7(a)所示, 实验影像 A 反射率数据中, 光

照区植被表现正常植被特征, 阴影区植被特征与之前模拟的数据相吻合, 光谱信息损失且发生变异; 而在验证影像 B 相同位置, 均表现为正常植被反射率特征。

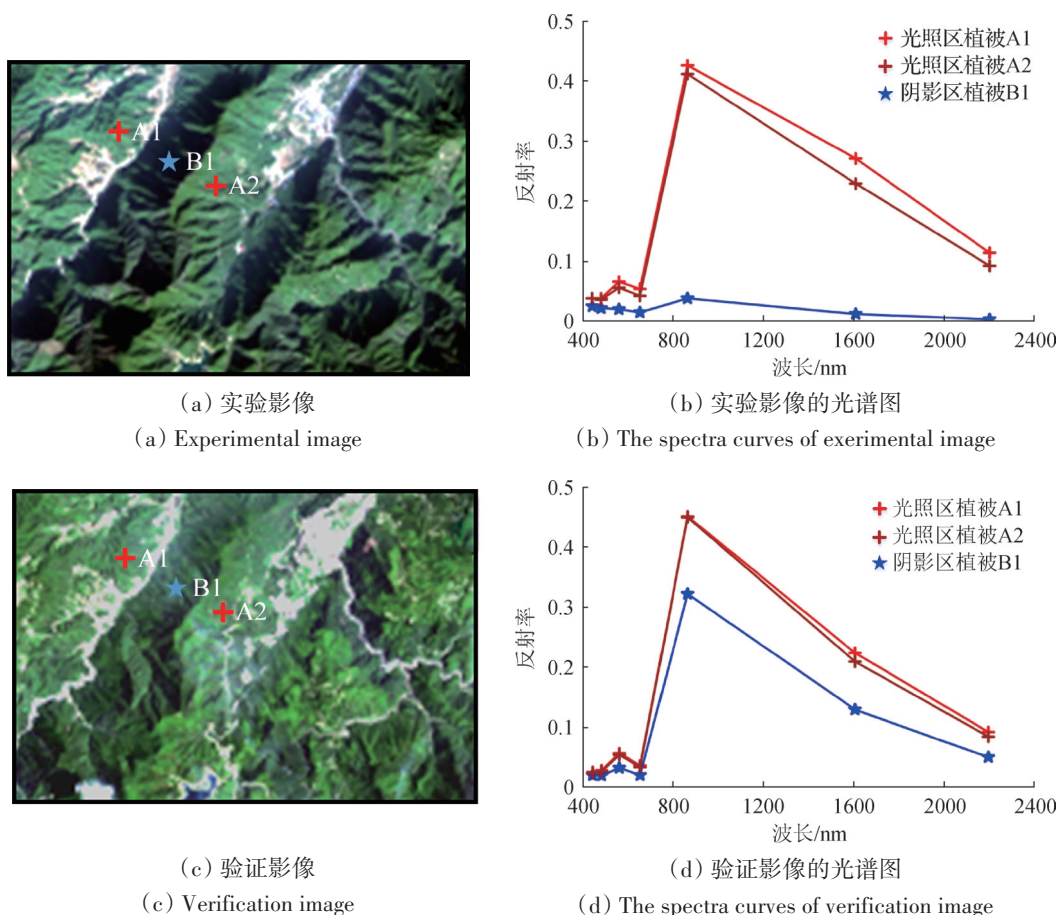


图7 实验影像与验证影像概况

Fig.7 Overview of experimental image and verification image

### 3.2 实验影像 NDPI 验证分析

本文构建的 NDVI 阴影影响去除模型是基于 NDPI 对于阴影区域的指示性。对于实验影像 A, 计算其 NDPI, 来验证分析 NDPI 指数的有效性。

如图 8(a)所示, 直观上可以看出, 阴影区域 NDPI 为高值, 光照区域 NDPI 为低值, 且差异明显。从图 8(a)中 NDPI 3 维图可以发现光照区与阴影区的分割线明显且 NDPI 数值出现两极化现象。如图 8(b)的 NDPI 统计直方图, 在低值区  $-0.6 \sim -0.2$  (中心  $-0.4$ ) 和高值区  $0.5 \sim 0.8$  (中心  $0.7$ ) 出现两个聚类, 并且两个聚类之间的过渡值 ( $-0.2 \sim 0.5$ ) 出现在影像中阴影与光照的过渡地带, 这可能是混合像

元或者邻边效应引起的, 本文中不作研究。图 8 表明, 光照区与阴影区在 NDPI 下差异明显, 在此基础上可以较为容易地给出二值化阈值(本文中取 0), 将图像中的光照区与阴影区进行分类, 分类效果理想(图 8(c))。

实验影像验证 NDPI 效果表明, 该指数对于阴影和光照区的识别敏感度高, 并且两者的差异稳定, 在一定程度上可以量化; 此外, NDPI 所涉及的波段与 NDVI 相关性小且在植被固有反射率中占比小。所以, 基于 NDPI 构建的 NDVI 阴影影响去除模型科学可行。

### 3.3 实验影像 NDVI 阴影影响去除模型验证分析

计算实验影像 NDVI 与 NDPI 如图 9(c)所示,

阴影区与光照区的 NDVI 差值接近 0.2。从图 9(b) 中 NDVI 散点图可以看出, 由于阴影的影响, NDVI 在散点空间形成 2 个聚类。通过构建的研究区 NDPI-NDVI 散点图(如图 9(b)), 可以发现: (1) NDVI 在高值区的聚类与 NDPI 统计的低值聚类区域相对应; NDVI 在低值区的聚类与 NDPI 统计的高值聚类区域相对应; (2) 在 NDVI 出现低值的区域, 也存在 NDPI 值较低的散点, 这些散点说明此区域 NDVI 值较低但处于光照区, 与图像中的裸土、城镇区域相对应; (3) 通过在实验影像中手动选择阴影区 ROI 和光照区 ROI(图 9(a)), 并将其在 NDPI-NDVI 散点图中显示(图 9(b)), 可见阴影和光照两类植被区域, 在 NDPI-

NDVI 散点图的中分布位置与上述理论分析相符合。由此, 可以得出以下几个结论: (1) 阴影的影响会导致部分 NDVI 偏向低值区, NDPI 指数可以有效地将其与光照区 NDVI 区分; (2) 光照区裸土、城镇等本身 NDVI 较低区域, 在 NDPI 指数的引入下可以与阴影导致 NDVI 降低的植被区分, 具有重要的应用意义; 另外, 根据 2.2 节, 同处于阴影区的裸土与植被在本模型中也得到很好的区分; (3) NDPI-NDVI 散点图整体趋势, NDVI 随 NDPI 增大而类线性降低; 取出的光照区、阴影区植被 ROI 散点分布也表明上述模型的可行性。

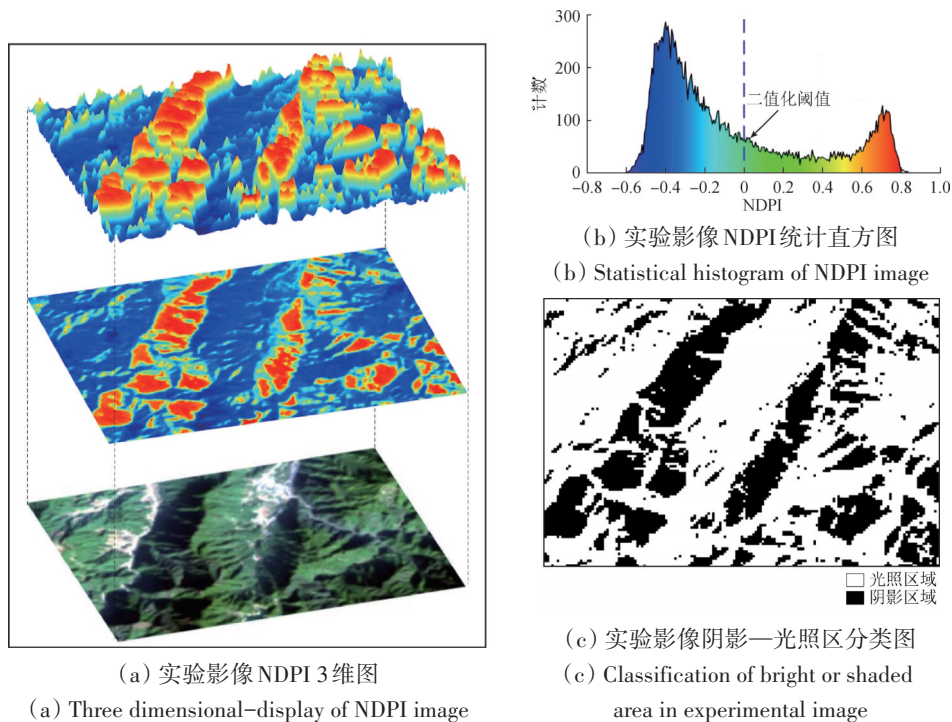


图 8 实验影像 NDPI 验证分析

Fig.8 Analysis of NDPI in experimental image

但是, NDPI 会受水体的影响。因为水体的蓝光波段反射率较高, 导致水体 NDPI 高于阴影区其他地物, 而水体 NDVI 较低, 多为负值(较浅或有水体植被时可能出现正值), 在 NDPI-NDVI 散点图中为右下角的聚类。如若在应用模型前未去除水体, 会导致水体的 NDVI 过度抬升, 将水体去除后方可应用该模型。

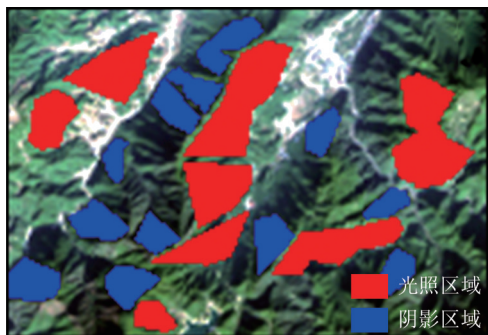
利用所选光照区-阴影区植被 ROI 构建 NDPI-NDVI 散点图, 拟合模型  $k$  值, 以 NDVI 最大且

NDPI 最小值为基点(表示为  $NDPI_{(min, NDVI_{max})}$ ), 利用下述公式应用于整幅图像:

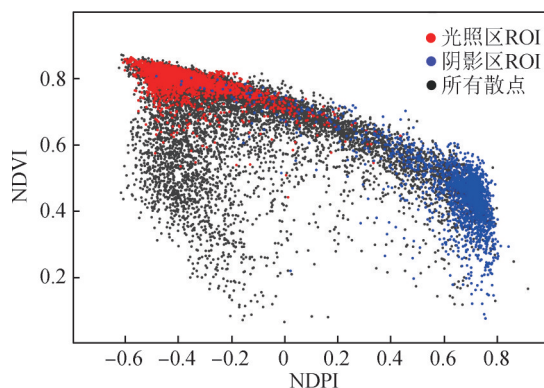
$$NDVI_{correct} = NDVI_{original} + k \cdot (NDPI_{original} - NDPI_{(min, NDVI_{max})}) \quad (13)$$

在本模型中使用的 NDVI 修正基点是基于以下的假设: 如图 10, 假设位于同一条修正直线上的点的 NDVI 差异是由于接收的辐射能量差异导致的; 模型假设这条修正直线上(NDVI 最大, NDPI 最小)的值为其在光照区的 NDVI 真值, 以此为修正基点。

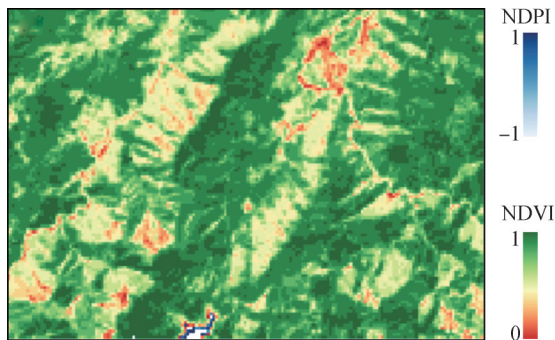




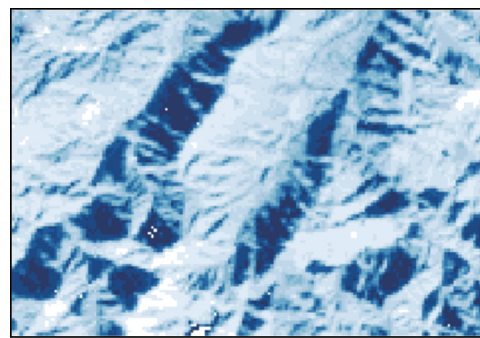
(a) 实验影像光照区 ROI 与阴影区 ROI  
(a) Selected shaded ROI and bright ROI in experimental image



(b) NDPI-NDVI 散点图  
(b) NDPI-NDVI scatter plot



(c) 实验影像 NDVI 图  
(c) NDVI image of experimental data



(d) 实验影像 NDPI 图  
(d) NDPI image of experimental data

图9 实验影像 NDPI-NDVI 散点图分析

Fig.9 Analysis of NDPI-NDVI Scatter on experimental image

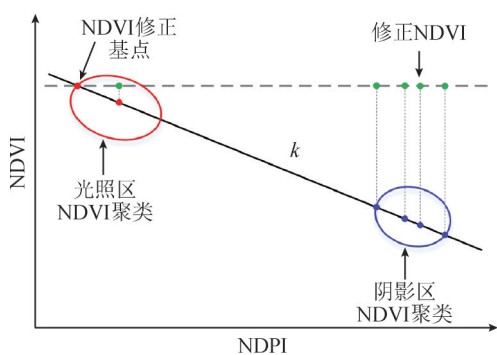


图10 实验影像 NSEE 模型应用示意图

Fig.10 Schematic diagram of NSEE Model applied in experimental image

### 3.4 NDVI 阴影影响去除结果分析

为定量分析验证结果, 选择区域相同且无阴影的影像作为验证影像, 所选区域均为常绿区域, 忽略季节差异并假设空间变化一致性, 仅考虑阴影带来的影响。计算修正后 NDVI 与验证影像

NDVI, 逐像元比对; 统计原始影像、阴影影响去除后和验证影像 NDVI 值, 对整体进行验证分析; 横跨实验影像光照区—阴影区截取剖面线-1, 验证阴影去除效果; 横跨实验影像光照区植被和非植被像元截取剖面线-2, 验证模型适用性; 随机选择 60 个验证点, 构建原始 NDVI 与验证 NDVI、修正 NDVI 与验证 NDVI 散点图(在 0.05 水平上( $P=0.0318$ )存在显著性差异), 进行相关性分析, 验证模型效果; 验证结果如图 11 所示。

图 11(a)为未修正 NDVI, 图 11(b)修正 NDVI, 图 11(c)验证 NDVI。直观上, 阴影区 NDVI 基本修正到正常值, 光照区 NDVI 仍基本保持原值, 非植被区 NDVI 值仍保持低值, 基本实现 NDVI 阴影影响的去除。

在 3 幅结果图横跨光照区—阴影区做剖面线-1, 将各像元对应的原始 NDVI、修正 NDVI、

验证 NDVI 统计出, 可以看出原本因阴影影响降低的 NDVI 经修正后均与验证 NDVI 接近(图 11(d)所标注阴影区域), 原本光照区 NDVI 仍保持高值; 横跨光照区植被—非植被像元做剖面线-2, 可以看出原本光照区 NDVI 本身很低的像元(裸土、城镇)仍保持低值, 而因阴影 NDVI 降低的植被像元得到有效修正; 随机选取 60 个采样点, 对原始 NDVI 与验证 NDVI, 以及修正 NDVI 与验证 NDVI 分别做相关性分析(图 11(f)), 可以发现: 修正前, 拟合直线  $R^2=0.3462$ ,  $RMSE=0.1749$ , 原始 NDVI 受阴影影响大, 经模型修正后  $R^2=0.9361$ ,  $RMSE=0.0483$ , 显著性水平  $P=0.0318$ , 说明该模型阴影影响去除效果显著; 与整景验证影像 NDVI 计算均方根误差  $RMSE$  为 0.073, 将非植被区掩膜后计算  $RMSE$  为 0.067, 阴影影响去除效果较好; 修正后的 NDVI 是基于原始 NDVI 上线性补偿而来, 在一定程度上能够保留同区域(同为阴影或同为光照)地物间的空间变化关系; 将原始 NDVI、修正 NDVI 与验证 NDVI 分别统计其 NDVI 直方图, 可以发现原本因阴影影响导致的 NDVI 统计直方图的偏态问题得到解决, 修正后 NDVI 近似正态分布, 与验证 NDVI 统计很吻合, 说明该方法在 NDVI 整体性上效果突出。

修正后光照区 NDVI 虽变化幅度小, 但相对于 NDVI 原值提高, 这是因为在模型应用时, 选择 NDVI 最高且 NDPI 最低的值作为修正端元来修正 NDVI(这就相当于假定光照区 NDVI 值最高的像元在两幅影像中保持一致); 这种模型参数选择带来的影响在反演某些参数时影响不大(因为以最大值为基准整体抬升), 但这种变化的带来的具体影响有待进一步的研究。

## 4 讨论

### 4.1 NDVI 阴影影响去除模型与地形校正

因本文仅考虑水平地面太阳直射辐射与太阳散射辐射引起的植被 NDVI 差异, 使用太阳高度角不同的影像进行实验和验证, 并未考虑地形起伏造成的影响, 而实际上地形的影响不可忽略。

Yang 等(2013)考虑山区阳坡与阴坡的辐射能量差异, 提出考虑太阳直射辐射和太阳散射辐射的地形校正物理模型

$$E(\lambda, z) = \alpha \cdot E_d^h(\lambda, z) \cdot T_{scs+c} + E_f^h(\lambda, z) \cdot (k(\lambda, z) \cdot T_{scs+c} + (1 - k(\lambda, z)) \cdot V_d) + E^h(\lambda, z) \cdot V_i \cdot \rho_{adj} \quad (14)$$

式中,  $E(\lambda, z)$  为高度为  $z$  的倾斜像元所接收的总辐射辐照度;  $\alpha$  是二进制数值, 1 代表为光照像元, 0 代表阴影像元;  $E_d^h(\lambda, z)$  为水平地表太阳直射辐照度,  $E_f^h(\lambda, z)$  为水平地表太阳散射辐照度;  $T_{scs+c}$  为地形因子,  $k(\lambda, z)$  为各向散射异性因子, 介于(0,1)之间;  $V_d$  为天空可视因子, 公式最后部分则考虑了周围像元的影响。

上述地形校正物理模型在地形校正因子  $T_{scs+c}$  基础上, 考虑阴影像元与非阴影像元的太阳直射辐射与散射辐射下的差异, 并采用散射辐射各向异性模式, 兼顾周围地物的邻边效应。本文所使用方法未考虑邻边效应, 且认为散射为各向同性模式, 因此在此基础上可以简化上述模型为

$$E(\lambda, z) = f(\alpha, T_{scs+c}) \cdot E_d^h(\lambda, z) + g(V_d, T_{scs+c}) \cdot E_f^h(\lambda, z) \quad (15)$$

式中,  $f(\alpha, T_{scs+c})$  与  $g(V_d, T_{scs+c})$  为参数化函数, 与地形(DEM)、太阳方位角、太阳天顶角等有关, 而与波长无关; 因此上述公式可以理解为

$$E(\lambda, z) = k_1 \cdot E_d^h(\lambda, z) + k_2 \cdot E_f^h(\lambda, z) \quad (16)$$

式中,

$$k_1 = f(\alpha, T_{scs+c}), k_2 = g(V_d, T_{scs+c})$$

本文考虑的纯光照区与纯阴影区的情况, 在上述公式中可以认为是  $k_1=1, k_2=1$  与  $k_1=0, k_2=1$  的特殊情况, 以此来构建线性阴影影响去除模型。而其他情况(地形坡度、坡向影响等)可以通过参数化过程来表达, 在  $k_1, k_2$  的表现形式为线性组合。直观上可以理解为因地形等影响, 目标像元所获得的辐射能量可以认为是太阳直射辐射与太阳散射辐射的线性组合(虽然这与物理过程不符合, 但仅在数学表达上可以如此理解)。

因此, 在不考虑周围地物对目标像元的影响, 认为太阳散射辐射为各向同性模式的简化情况下, 该方法与简化后的物理模型相符合, 可以认为本方法能在一定程度上去除地形的影响。

太阳入射角余弦( $\cos i$ )和遥感影像波段之间的相关系数是评价复杂地形卫星遥感数据地形效应的一种有效手段(高永年和张万昌, 2008)。本文将原始 NDVI、本文模型修正后 NDVI、以及 SCS+C 模型地形校正后的 NDVI 与利用 DEM 数据计算所得的研究区  $\cos i$  构建散点图(图 12), 分析本文模型与地形效应的关系。

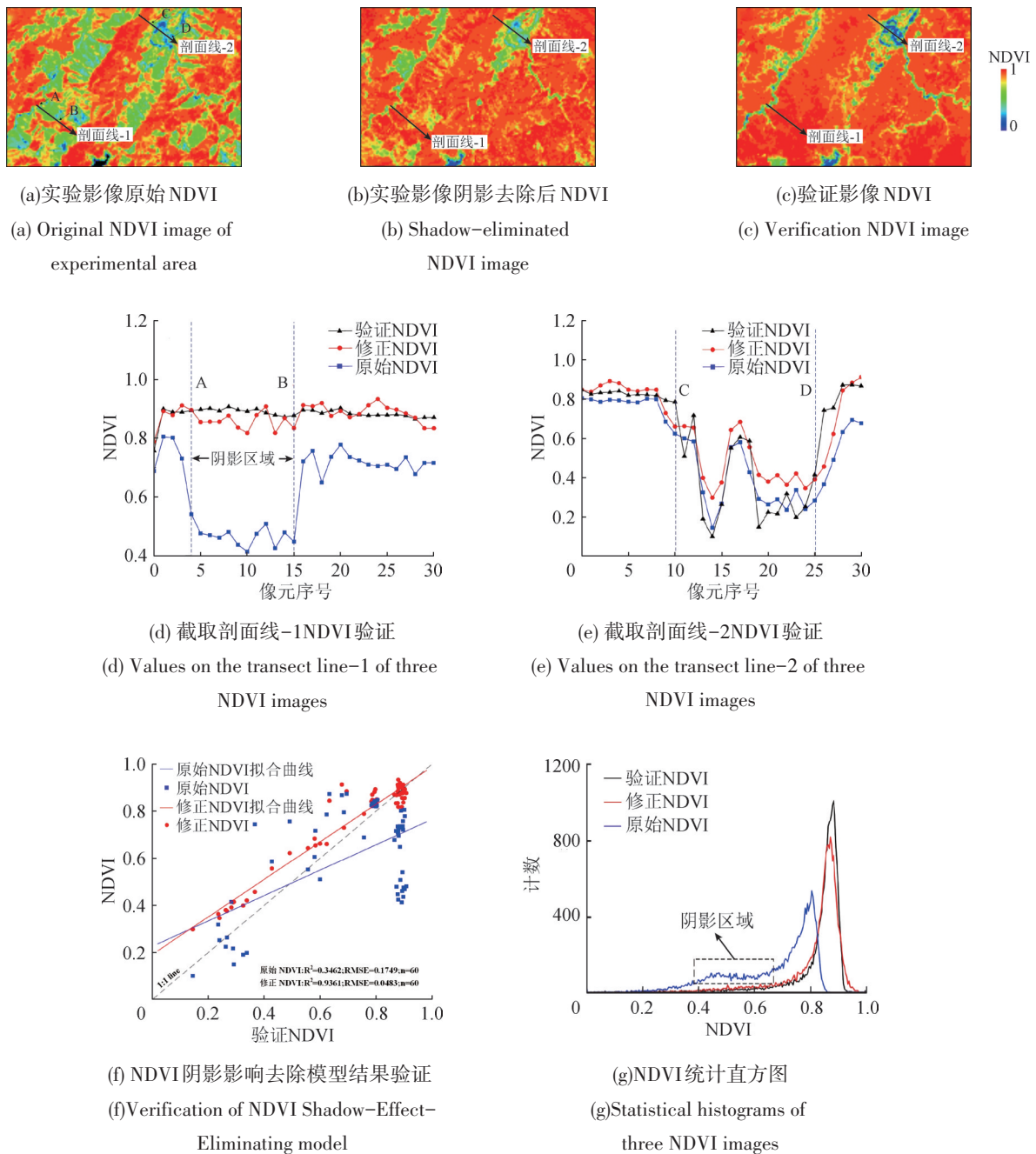


图 11 模型结果验证与分析

Fig.11 Validating and analysis of NDVI Shadow-Effect-Eliminating(NSEE) model

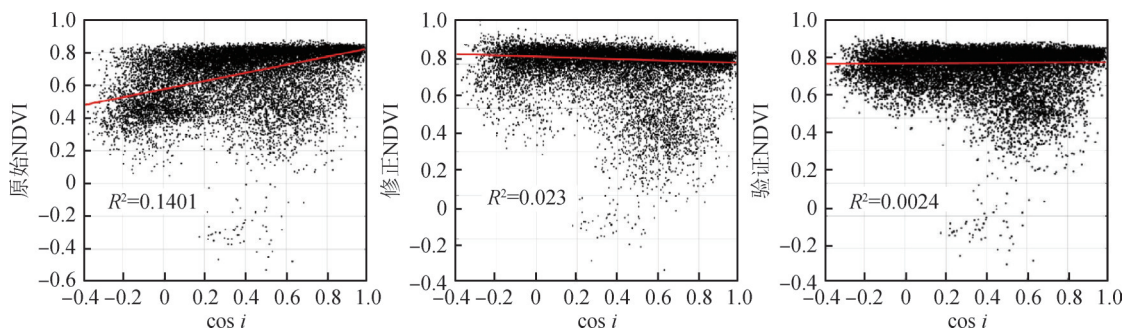


图 12 原始 NDVI、NSEE 修正 NDVI、地形校正 NDVI 与  $\cos i$  相关性分析

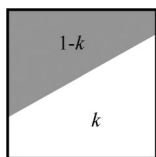
Fig.12 Correlation analysis between NDVI(original NDVI, NDVI of NSEE model and NDVI of topographical correction) and  $\cos i$

结果表明, 3个散点图中, 原始NDVI与 $\cos i$ 表现出最大的相关性,  $R^2=0.1401$ , 说明原始NDVI受地形影响较大; 经过本文模型修正后NDVI与 $\cos i$ 几乎无相关性,  $R^2=0.023$ , 但稍弱于地形校正模型: 本文模型能够在一定程度上消除地形影响, 但其有效性仍需进一步研究。

#### 4.2 NDVI阴影影响去除模型与混合像元

图9(c)所示实验影像NDPI-NDVI散点图中除了出现(NDPI低值, NDVI高值)与(NDPI高值, NDVI低值)两个聚类集合外, 还存在这两个集合之间的过渡区间。基于Landsat 8 OLI数据30 m的空间分辨率以及NDPI在光照—阴影交接区域的数值, 除考虑上述存在的地形影响外, 还可能是混合像元的影响(本文所讨论的混合像元仅考虑阴影像元与光照像元, 而不考虑实际地物混合)。

基于栾海军等(2013)在NDVI连续尺度转换模型中通过小尺度辐亮度面积加和的方式求得大尺度地表辐亮度的方法, 考虑混合像元辐亮度加和模型。假设混合像元P中存在光照、阴影两部分, 设光照区占比为 $k$ , 则阴影占比为 $(1-k)$ 。



结合上文太阳总辐照度 $E_0$ , 太阳直射辐射辐照度 $E_d$ , 太阳散射辐射辐照度 $E_i$ , 假定太阳散射各向同性模式, 忽略周边地物影响。混合像元P所接收太阳辐照度 $E_p$ 为

$$E_p = k \cdot E_0 + (1 - k) \cdot E_i \quad (17)$$

由上述公式, 混合像元P所接收的能量可以认为是太阳总辐射与太阳散射辐射能量的线性组合(且和为1)。本文所使用方法在混合像元层面可以认为是利用纯光照区( $k=1$ )与纯阴影区( $k=0$ )的特殊情况来构建线性NDVI阴影去除模型; 故, 混合像元(阴影像元—光照像元混合)的现象, 在本模型中也得到很好的表达。在简化模型下, 可以认为本文提出的NSEE模型在一定程度上能够去除光照—阴影混合像元导致的NDVI差异。

## 5 结论

本文立足于影像中普遍存在的阴影对植被指

数NDVI的影响; 从模拟数据入手, 分析阴影对NDVI的影响机理, 引入NDPI指数并分析其对阴影的敏感性, 依靠光照区—阴影区的NDPI-NDVI关系, 构建NDVI阴影影响去除线性模型; 应用于Landsat-8 OLI数据, 结果证明了该模型的可靠性和有效性。

(1) 本文模型基于光照—阴影区接收的太阳辐射能量差异, 分析阴影影响NDVI的原因, 并构建NDVI阴影影响去除模型。模型从机理出发, 表达简单, 易于应用; (2) 模型仅依赖于图像, 避免异源数据结合引入的误差, 计算高效且方便; (3) 本文模型可以有效地将本身NDVI较低的像元(城镇、裸土等混杂着植被的像元)与因阴影导致NDVI降低的植被像元区分开, 符合地表真实情况, 具有实际应用意义; 另外, 对于同处于阴影下的裸土与植被, 本模型也能有效的区分并避免过校正的情况; (4) 模型适用于简化情况下因地形坡度引起的辐射能量差异和混合像元(光照—阴影混合像元)导致的辐射能量差异; 但模型对这些情况的适用条件和极限, 仍需要进一步研究。

同时, 本文模型有以下约束条件: (1) 水体或深蓝色物体的光谱特性导致其NDPI值较高且多高于阴影, 因此在使用模型之前需将其去除; (2) 本文所拟合模型 $k$ 值, 会依赖于选取的ROI、影像所处太阳辐射条件等, 是否可以给出经验值需要进一步研究; (3) 模型NDVI参考基点选择的不同所产生的实际影响需进一步研究。(4) 不同植被类型(林、农、草)、稀疏植被覆盖情况、结合土壤背景情况以及城镇遮挡植被等情况下该模型的适用性, 以及针对不同空间分辨率影像、不同传感器波段设置下该模型适用性仍需研究。限于篇幅, 上述问题需要另外撰文单独阐述。

## 参考文献(References)

- Bian J H, Li A N, Wang S N, Zhao W and Lei G B. 2016. Restoration of information obscured by mountain shadows for landsat TM images based on MODIS NDVI. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(1): 12-22(边金虎, 李爱农, 王少楠, 赵伟, 雷光斌. 2016. 基于MODIS NDVI的Landsat TM影像地形阴影区光谱信息恢复方法研究. *遥感技术与应用*, 31(1): 12-22)[DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.1.0012]
- Chen Y, Fan J R, Wen X H, Cao W C and Wang L. 2015. Research on cloud removal from landsat TM image based on spatial and tem-

- poral data fusion model. *Remote Sensing Technology and Application*, 30(2): 312-320 (陈阳, 范建容, 文学虎, 曹伟超, 王蕾). 2015. 基于时空数据融合模型的TM影像云去除方法研究. *遥感技术与应用*, 30(2): 312-320 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.2.0312]
- Chu Q W, Zhang H Q, Wu Y W, Feng Z K and Chen B. 2013. Application research of Landsat-8. *Remote Sensing Information*, 28(4): 110-114 (初庆伟, 张洪群, 吴业炜, 冯钟葵, 陈勃). 2013. Landsat-8 卫星数据应用探讨. *遥感信息*, 28(4): 110-114 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.04.019]
- Gao Y N and Zhang W C. 2008. Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data. *Geographical Research*, 27(2): 467-477 (高永年, 张万昌). 2008. 遥感影像地形校正研究进展及其比较实验. *地理研究*, 27(2): 467-477 [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.02.024]
- Guo J H, Tian Q J and Wu J Z. 2006. Study on multispectral detecting shadow areas and a theoretical model of removing shadows from remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 10(2): 151-159 (魏建宏, 田庆久, 吴昉昭). 2006. 遥感影像阴影多波段检测与去除理论模型研究. *遥感学报*, 10(2): 151-159 [DOI: 10.11834/jrs.20060224]
- Guo N. 2003. Vegetation index and its advances. *Arid Meteorology*, 21(4): 71-75 (郭妮). 2003. 植被指数及其研究进展. *干旱气象*, 21(4): 71-75
- Huemmmrich K F. 1996. Effects of shadows on vegetation indices//Proceedings of 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln: IEEE [DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516990]
- Jiang Z Y, Huete A R, Chen J, Chen Y H, Li J, Yan G J and Zhang X Y. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3): 366-378 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.01.003]
- Liu H Q and Huete A. 1995. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 457-465 [DOI: 10.1109/36.377946]
- Liu W and Yamazaki F. 2012. Object-based shadow extraction and correction of high-resolution optical satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4): 1296-1302 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2189558]
- Luan H J, Tian Q J, Yu T, Hu X L, Huang Y, Du L T, Zhao L M, Wei X, Han J, Zhang Z W and Li S P. 2013. Modeling continuous scaling of NDVI based on fractal theory. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(7): 1857-1862 (栾海军, 田庆久, 余涛, 胡新礼, 黄彦, 杜灵通, 赵利民, 魏曦, 韩杰, 张周威, 李少鹏). 2013. 基于分形理论的NDVI连续空间尺度转换模型研究. *光谱学与光谱分析*, 33(7): 1857-1862 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)07-1857-06]
- Tian Q J and Min X J. 1998. Advances in study on vegetation indices. *Advance in Earth Sciences*, 13(4): 327-333 (田庆久, 闵祥军). 1998. 植被指数研究进展. *地球科学进展*, 13(4): 327-333 [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.1998.04.002]
- Wang L, Zhao G X, Jiang Y M, Zhu X C, Chang C Y and Wang M M. 2016. Detection of cloud shadow in Landsat 8 OLI image by shadow index and azimuth search method. *Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1461-1469 (王凌, 赵庚星, 姜远茂, 朱西存, 常春艳, 王明媚). 2016. 利用阴影指数和方位搜索法检测 Landsat 8 OLI 影像中云影. *遥感学报*, 20(6): 1461-1469 [DOI: 10.11834/jrs.20165248]
- Wang Z X, Liu C and Huete A. 2003. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 23(5): 979-987 (王正兴, 刘闯, Huete A. 2003. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. *生态学报*, 23(5): 979-987 [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.05.020]
- Xu Z H, Liu J, Yu K Y, Liu T, Gong C H, Tang M Y, Xie W J and Li Z L. 2013. Construction of vegetation shadow index (SVI) and application effects in four remote sensing images. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 33(12): 3359-3365 (许章华, 刘健, 余坤勇, 刘涛, 龚从宏, 唐梦雅, 谢婉君, 李增禄). 2013. 阴影植被指数 SVI 的构建及其在四种遥感影像中的应用效果. *光谱学与光谱分析*, 33(12): 3359-3365 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)12-3359-07]
- Yang G J, Pu R L, Zhang J X, Zhao C J, Feng H K and Wang J H. 2013. Remote sensing of seasonal variability of fractional vegetation cover and its object-based spatial pattern analysis over mountain areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77: 79-93 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.008]
- Yang Q Y, Jiang Z C, Luo W Q, Ma Z L, Cao J H and Shen L N. 2013. Sequential simulation of normal different vegetation index of mountain shadow in Karst Peak cluster area. *Transactions of The Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44(5): 232-236, 225 (杨奇勇, 蒋忠诚, 罗为群, 马祖陆, 曹建华, 沈利娜). 2013. 岩溶区峰丛洼地山体阴影区域植被指数随机模拟. *农业机械学报*, 44(5): 232-236, 225 [DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.040]
- Zhang L F, Sun X J, Wu T X and Zhang H M. 2015. An analysis of shadow effects on spectral vegetation indexes using a ground-based imaging spectrometer. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(11): 2188-2192 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2450218]

## Research on multispectral-image-based NDVI shadow-effect-eliminating model

JIAO Junnan<sup>1,2</sup>, SHI Jing<sup>1,2</sup>, TIAN Qingjiu<sup>1,2</sup>, GAO Lin<sup>1,2</sup>, XU Nianxu<sup>1,2</sup>

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing 210023, China

**Abstract:** This paper presents a multispectral-image-based model for eliminating the shadow effect on NDVI. This NDVI Shadow-Effect-Eliminating model (NSEE) is derived from simulated data and then applied on two Landsat 8 OLI images (one for the experiment and one for verification).

NDVI plays a key role in the multispectral remote sensing retrieval of vegetation and has been widely used in many areas. However, the shadow normally existing in remote sensing images always influences the accuracy of NDVI. These effects will be transmitted in the process of further remote sensing retrieval, thereby resulting in errors. In this case, eliminating the shadow effect on vegetation is crucial and has a positive application value and high necessity.

The difference between the shaded region and non-shaded regions in an image depends on how much solar irradiance these regions have received (i.e., supposing that the shaded region receives a solar diffuse radiation whereas the bright region receives total solar radiation, including direct and diffuse ones). The total solar irradiance ( $E_0$ ), solar direct irradiance ( $E_d$ ), and solar diffuse irradiance ( $E_p$ ) are simulated by using MODTRAN 4.0, the typical vegetation reflectance spectra ( $R$ ) are selected from the spectra library in ENVI 5.3, and the radiances of vegetations ( $L_R, L_R'$ ) in the shaded and non-shaded regions are calculated (using  $E_0, E_p$  and  $R$ ). The mechanism behind the shadow effects on the NDVI of vegetation is analyzed by using the aforementioned simulated data. A normalized dark pixel index (NDPI) that shows high sensitivity in shadow detection and low relativity to NDVI is introduced. By analyzing the relationships between two sets of simulated NDVI (under solar diffuse radiation and under total solar radiation) of the same vegetation spectrum (to simulate shaded and non-shaded situations in remote sensing image), the NSEE model of NDVI Shadow-Effect-Eliminating(NSEE) is constructed to correct the NDVI in shaded regions based on the NDVI in the bright regions of an image.

The NSEE model is applied on two Landsat 8 OLI images. The results show that, the NDVI values in the shaded regions are basically corrected to be normal, whereas the NDVIs in the bright regions remain stable in both the experimental and verification images. The NSEE model can also normalize the skewness of the NDVI statistical histogram caused by the shadow effect. The NDVI values of the experimental and verification images are compared pixel by pixel along the two transect lines, and the result shows that the reduction in NDVI due to shadow is eliminated and that the NDVI in the bright region belonging to either vegetation or non-vegetation pixels remains stable. The total RMSE is 0.067, thereby validating the effectiveness of the model is effective.

The NSEE model effectively eliminates the shadow effects of shadow on the NDVI of vegetations. This model can also distinguish the NDVI-decreasing pixels of NDVI-decreasing (due to shadow effects) from those pixels with relatively low original NDVI values, thereby suggesting that the model fits well with land type. This model is entirely based on the image information itself, it can effectively maintain the relative spatial relations of NDVI, and effectively eliminate the influence of shadow. The proposed NSEE model is based on a physical mechanism, it is concise and can be easily applied. This model only depends on the information of the multispectral image, does not require different data sources, and shows a convenient and efficient calculation.

**Key words:** remote sensing, shaded vegetation canopy, NDVI, NDPI, shadow effects, Landsat 8 OLI, multispectral remote sensing

**Supported by** National Science and Technology Major Project (No.03-Y20A04-9001-17/18,30-Y20A07-9003-17/18); National Natural Science Foundation of China (No.41771370); National Key R&D Program of China (No.2017YFD0600903); Civil Aerospace Technology Advance Research Project (No.Y7K00100KJ)