

引 用 格 式:Hu Yuetong, Wu Shuang, Feng Xianfeng, *et al.* Topographic Correction of Leaf Area Index Product Derived from Remote Sensing Data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1070-1078. [胡月童, 武爽, 冯险峰, 等. 面向遥感叶面积指数产品的地形校正研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1070-1078.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.5.1070

面向遥感叶面积指数产品的地形校正研究

胡月童^{1,2}, 武 爽^{1,2}, 冯险峰^{1,2}, 刘 洋¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:地形校正是提高复杂地形区地表参数遥感定量化反演精度的重要手段。当前广泛应用的遥感叶面积指数产品(Leaf Area Index, LAI)多具有一定的地形误差,减少地形影响、提升其产品精度有着非常重要的意义。以我国江西省千烟洲地区为研究区域,利用地面实测 LAI 数据、Landsat TM 数据和高程数据等,基于高程标准差和 GLOBMAP LAI 产品值的关系,建立面向叶面积指数产品的地形校正模型,利用这一模型对 GLOBMAP LAI 产品进行地形校正。结果表明:校正后的 LAI 与地面实测数据更为接近, LAI 产品与地面测量值的 RMSE 由 2.11 下降到 2.04;校正后 LAI 产品的标准差由 2.08 下降至 1.69, LAI 产品的地形误差得到了较好的改正。该方法较好地完成了 LAI 产品的地形校正,进一步提高了产品精度,具有一定的实用价值。

关 键 词:千烟洲地区;叶面积指数;地形校正;高程标准差;叶面积指数产品

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)05-1070-09

1 引 言

植被是地球系统的关键组成部分,叶片是植被进行光合等生理作用的主要载体^[1]。叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是表征叶片疏密程度、描述植被生长状态和冠层结构的重要参数,控制着植被光合、呼吸、蒸腾等生物物理过程^[2]。为了将针叶和阔叶两种不同类型植被统一在一个框架之下,1992 年 Chen 等^[3]提出将叶面积指数定义为单位地表面积上绿叶表面积总和的一半。

测定和估算叶面积指数的方法可以分为传统的地面测量法和遥感估算法。地面测量法获得的信息有限,且不能呈面状分布,遥感估算法是获取大区域叶面积指数的唯一途径^[4]。通过遥感估算法,众多长期的不同时空分辨率的全球叶面积指数产品,例如 MODIS^[5]、GEOV2^[6]、AVHRR LAI^[7]、GLASS^[8]、GLOBMAP LAI^[9]等已经得到发展。这

些产品在全球气候变化和生态环境研究中具有广泛的应用。

受太阳、大气和地形等多种因素的影响,复杂地形地表接收到的太阳辐射能量具有非均一性的特点,这种辐射畸变称为地形效应^[10]。地形效应干扰了遥感影像上地物的光谱信息,给遥感影像的分析与应用带来了严重影响^[11]。

受地形效应的影响,复杂地形区域的遥感叶面积指数产品精度难以满足应用的要求^[12]。已有验证工作显示,受山区地形影响,复杂地形下 LAI 产品的估算差异值更大^[13];在 LAI 反演中,地形导致了超过 50% 的不确定性^[14],地形对 LAI 反演的影响与冠层密度有关,除稀疏冠层外,通常导致被低估^[15];只有 27.27% 的 MODIS C5 和 36.36% 的 GLASS 产品满足应用要求^[16-17]。

为减少地形影响,应在生产反演叶面积指数产

收稿日期:2019-05-21;修订日期:2020-06-28

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040401)资助。

作者简介:胡月童(1993—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,主要从事生态遥感研究。E-mail:huyuetong15@mailsucas.ac.cn

通讯作者:冯险峰(1970—),女,河南新乡人,副研究员,主要从事植被遥感与全球变化研究。E-mail:fengxf@lreis.ac.cn

品前,对模型算法和参数进行优化,并对模型中使用的遥感反射率产品进行地形校正^[18-19](简称前端地形校正)。地形校正是指通过各种变换,将所有像元的辐射亮度变换到某一参考平面上(通常取水平面),从而减少由于地形起伏引起的影像辐亮度值变化,使影像更好地反映地物的光谱特性^[20]。地形校正对于遥感影像定量化反演精度具有重要意义^[21]。国内外学者对地形校正做了大量研究,并提出了许多地形校正算法,如 Cosine 校正^[22]、C 校正^[22]、2 阶段法校正^[23]、SCS 校正^[24]和 SCS + C 校正^[25]。

前端地形校正的遥感叶面积指数估算是理论上减少地形误差的有效方法^[26-29]。已有研究表明,完成前端地形校正的叶面积指数估算模型,植被指数与实测 LAI 拟合回归的相关性明显提升^[26],提取的叶面积指数与地面实测值的平均偏差下降 19.1%^[27],引入了地形等环境因子建立的 LAI 反演模型验证精度有所提高^[28],并且空间分辨率越大时,前端地形校正后 LAI 的精度越高^[29]。引入了地形因子,但这些算法复杂,需要的数据较多,难度较高。从产品应用研究来看,直接针对已有的叶面积指数产品进行后端地形校正,实用性更强,但遥感叶面积指数产品的后端地形校正研究目前较少。

千烟洲属山地丘陵盆地地貌,地形起伏明显,植被覆盖度高,冠层结构单一,适宜开展叶面积指数与地形相关研究。因此,以我国千烟洲地区为研究区,针对 GLOMAP LAI 产品,旨在建立一种叶面积指数产品后端地形校正模型,实现地形校正和平滑,以提高遥感叶面积指数产品的精度。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

千烟洲地区(25°59′~27°27′N, 114°4′~115°44′E),位于江西省吉安市,属罗霄山脉中段。

海拔分布在 25~1 604 m 之间。地貌以山地、丘陵为主,东、南、西 3 面环山。地势由边缘山地到赣江河谷,徐徐倾斜,逐级降低,往东北方向逐渐平坦。北为赣抚平原,中间为吉泰盆地(图 1)。在气候上属中亚热带季风湿润气候,植被以乔木和农业作物为主。

2.2 数据

使用的数据包括高程数据、土地覆盖数据、植被数据、GLOMAP LAI 数据、地面实测叶面积指数数据和 Landsat TM 数据等(表 1)。

GLOMAP LAI 产品的空间分辨率为 500 m (2000~)/0.08°(1981~1999),时间分辨率为 8 d (2000~)/半月(1981~1999)^[9]。该产品是基于 AVHRR GIMMS 和 MODIS 反射率数据生成的全球 1981 年以来的高一致性叶面积指数数据,重点解决了两个传感器的差异问题,提高了时间序列的一致性^[1]。这一产品基于全球范围内各种植被类型代表站点数据进行了长时间序列的验证。

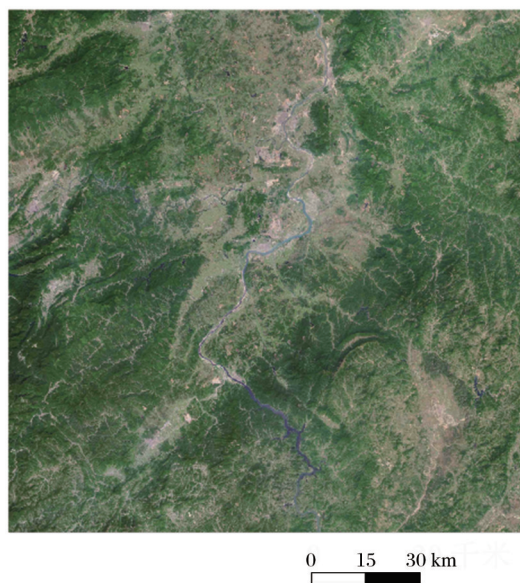


图 1 研究区位置

Fig.1 The study area

表 1 数据列表

Table 1 Data list

数据项	数据格式	年份	空间尺度	时间尺度	来源
高程数据	栅格	2009	30 m	年	地理空间数据云
GlobeLand30 土地覆盖数据	栅格	2010	30 m	年	国家基础地理信息中心
中国植被图	矢量	2001	1:100 万	年	中国科学院中国植被图编辑委员会
GLOMAP LAI 产品	栅格	2008	500 m	8 d	中科院地理所
LAI 实测数据	文本	2008	/	/	南京大学
Landsat TM 数据	栅格	2008	30 m		

GLOBMAP LAI产品中的植被分为针叶林、阔叶林、针阔混交林、灌丛、草和农作物。多源反射率产品反演的 GLOBMAP LAI产品具有较好的空间完整性^[30],但未经前端校正^[9]。因此,本文以 2008 年 201~209 天(夏季)500 m 分辨率的 GLOBMAP LAI数据作为地形校正对象,并重采样至 30 m 用于模型构建。

LAI 实测数据,是在晴朗天气条件下,使用 TRAC(叶面积指数检测仪)对有代表性样地进行观测获得。为确保与 GLOBMAP LAI数据的时相匹配,选择 2008 年 7 月 24 日~27 日的 47 个样地进行观测,每个样地的大小为 30 m×30 m。利用地面实测数据和 Landsat TM 反射率数据估算得到的 30 m 分辨率的 LAI数据集^[31-32],用于构建模型和验证。

GlobeLand30 土地覆盖数据是源自国家基础地理信息中心的 GlobeLand30 数据,空间分辨率为 30 m。由于土地覆盖数据缺少具体的植被分类,因此需引入 1:100 万的中国植被图作为补充,用于生成研究区的植被类型数据。

3 研究方法

在数据处理的基础上,首先通过 TMLAI 与地形因子的相关性分析,筛选了模型中使用的地形参数,然后利用 GLOBMAP 产品、TMLAI 数据,考虑植被类型构建研究区的后端地形校正模型,采用该模型对 GLOBMAP 产品进行校正,并对结果进行验证(图 2)。

3.1 数据处理

研究中所用数据的空间分辨率包含 30 m 和 500 m 两种,其中 30 m 的数据用于构建地形校正模型,500 m 分辨率的数据用于 GLOBMAP LAI产品的校正。

3.1.1 提取地形因子

30 m 分辨率的高程数据产品重采样后得到空间分辨率为 500 m 的高程数据,并计算两种分辨率下的坡度、坡向和高程标准差 σ (公式(1))等地形因子。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (1)$$

其中: N 表示栅格总数, h_i 表示的是第 i 个数据的高程, \bar{h} 代表的是这一组数据平均值。

计算时,选择一个邻域范围内的数据进行计算。30 m 分辨率下的高程标准差是以 500 m×500 m

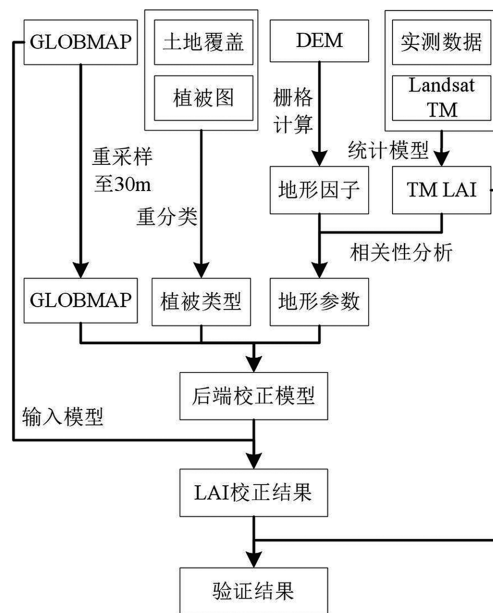


图 2 技术路线

Fig.2 The workflow of this study

为窗口大小(约 17 像元×17 像元)计算的(图 3)。计算 500 m 分辨率下高程标准差的窗口大小用均值变点分析法确定。高程标准差的平均值随窗口面积的变化呈对数关系($y=19.34 \ln x+38.35, R^2=0.999$),用均值变点分析法确定最佳窗口大小是 6 像元×6 像元。

3.1.2 植被类型

中国植被图栅格化后得到 30 m 的植被分布图,结合 GlobeLand30 数据,按照表 2 的转换关系,得到 30 m 的植被类型情况。

3.1.3 标准数据的生成

TM LAI 作为构建模型的标准数据,该数据是根据实地观测的 LAI 与 Landsat 5 TM 影像以统计模型法估算得到的千烟洲地区 30 m LAI 数据。

通过遥感反射率数据获取的植被指数与叶面积指数具有较强的相关性,统计模型法认为两者具有某种函数形式的关系,因此以叶面积指数为因变量、植被指数作为自变量拟合两者建立经验关系,可以估算叶面积指数^[32]。估算中使用了地面观测前后,成像于 2008-07-26(122/41, 122/42)及 2008-05-16(121/41)的 3 景 TM 数据,在拼接前对各景影像进行几何精校正和大气校正处理。根据拼接和裁剪后的反射率影像计算了千烟洲地区的比值植被指数(SR)、归一化植被指数(NDVI)、垂直植被指数(PVI)、土壤调节植被指数(SAVI)、简化比值植被指数(RSR)和修正的归一化差值植被指数

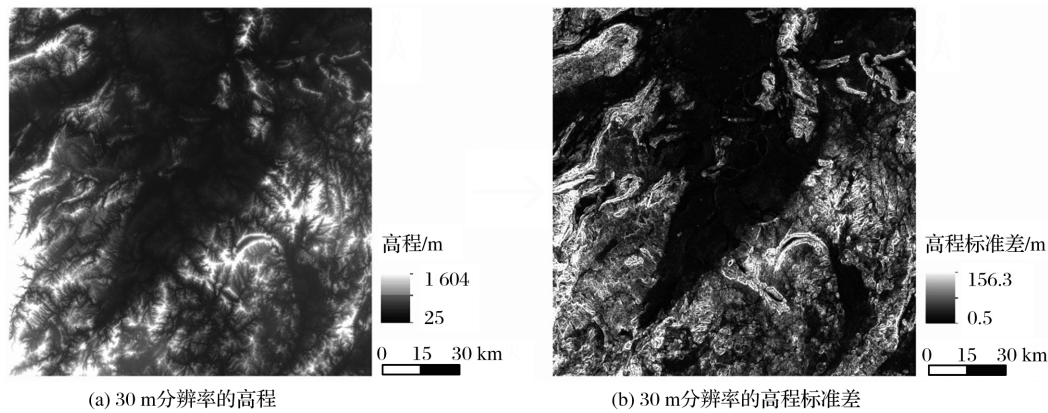


图3 研究区 30 m 分辨率的高程和高程标准差

Fig.3 DEM and standard deviation of elevation

表 2 不同植被类型分类体系的转换关系

Table 2 Conversion relationship of classification codes used in different land cover datasets

植被类型	GlobeLand30	中国植被图
1 针叶林	20	1
2 阔叶林	20	3
3 针阔混交林	20	2
4 灌丛	40	4
5 草和农作物	10,30	7,8,11
0 非植被	80	9,0

(MNDVI)等6种常见植被指数。发现经过指数形式变换后,NDVI与观测的LAI之间的相关性最高($R^2=0.68$, $RMSE=0.25$, $N=47$),因此,以NDVI和LAI建立指数回归模型:

$$LAI = 0.028e^{7.7357NDVI} \quad (2)$$

其中:LAI表示的是观测的叶面积指数,ℯ表示自然对底数,NDVI表示归一化植被指数。这一模型下得到47个采样点的平均LAI为2.77,而观测数据的平均值为2.88。采用这一模型计算得到30 m分辨率的TM LAI影像(图4)。受植被分布的客观条件限制,建立模型时未考虑植被类型。

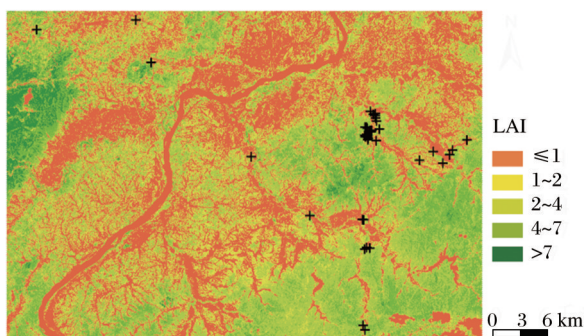


图4千烟洲地区的TM LAI

Fig.4 TM LAI of Qianyanzhou

3.2 构建模型

在TM区域内随机选取了500个栅格点,分别建立TM LAI与高程、坡度、坡向(北向为 0° ,顺时针计算)和高程标准差进行相关性分析,发现TM LAI(LAI_{TM})和高程标准差(σ)的线性相关性最高(图5)。 $LAI_{TM}(\sigma=i)$ 与 $LAI_{TM}(\sigma=0)$ 的差值不能完全代表遥感叶面积指数产品中的地形误差。因此,以TM LAI和GLOBMAP LAI(2008年201天至208天的合成数据)的差值(δ)与高程标准差进行拟合,即:

$$\delta = LAI_{TM} - LAI_{PD} = f(\sigma) \quad (4)$$

其中: LAI_{TM} 表示TM LAI的值, LAI_{PD} 表示GLOBMAP LAI, σ 表示高程标准差。

Pisek等^[34]提出了一种根据高程标准差建立地形校正和平滑经验模型的方法。这一方法的理论基础是,未经地形校正的影像会忽略地形的起伏情况,即将山区地形看作理想的平坦地形进行计算^[35]。

一般的地形校正模型常用地形起伏度^[35]来表示地形起伏的程度,但地形起伏度仅计算了地形单元内高程最高点与最低点的差值,无法很好地概括区域整体的地形情况。而高程标准差则综合考虑了地形单元内所有栅格点的高程变化大小,可更好地表达地形起伏程度和地形全貌。

此外,通过建立较高空间分辨率下高程标准差与校正对象的统计模型,用于较低空间分辨率下的地形校正。将较低分辨率的像元大小作为较高分辨率高程标准差的计算邻域,通过选取的高程标准差邻域,建立两种分辨率下的地理联系。建立模型时使用的校正对象数值是分段求得的均值,可以抵消部分来自其他因素的误差。

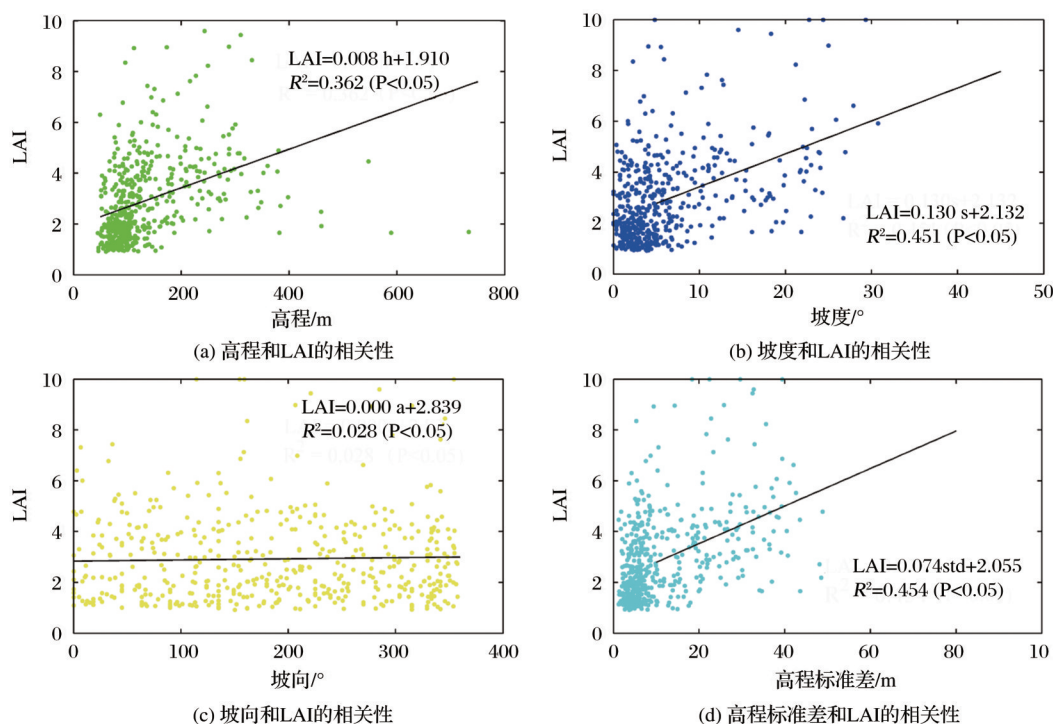


图 5 地形因子与 LAI 的相关性

Fig.5 Correlation between terrain characteristics and LAI

在 30 m 分辨率的尺度下,以 TM LAI 数据集和高程标准差来构建适用于研究区域 GLOBMAP LAI 产品的地形校正经验模型。首先剔除了非植被的区域及 TM LAI 为 0 的栅格数据。TM LAI 覆盖区域(TM 区域)高程标准差的范围在 0.589 4 到 89.988 2 之间,以每 5 m 的高程标准差进行分段统计,计算了高程标准差落在每一区间内的 TM LAI 的平均值,并与高程标准差的中间值进行三次拟合(图 6)。采用三次拟合可以使拟合方程的拟合度更好,且不至于过度拟合。

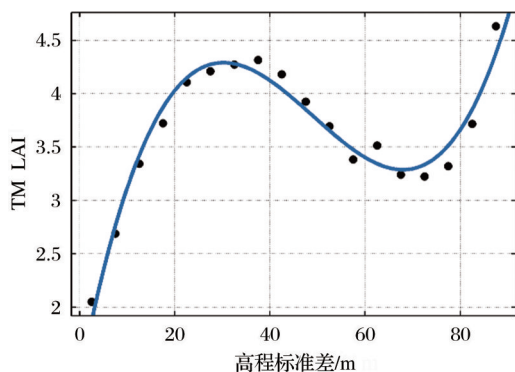


图 6 TM LAI 随高程标准差变化情况

Fig.6 Correlation between σ and TM LAI

以高程标准差 σ 每 5 m 为步长统计这一区间 δ 的平均值,并与该区间 σ 的中间值进行三次拟合,构

建 LAI 产品后端地形校正的统计模型(图 7)。

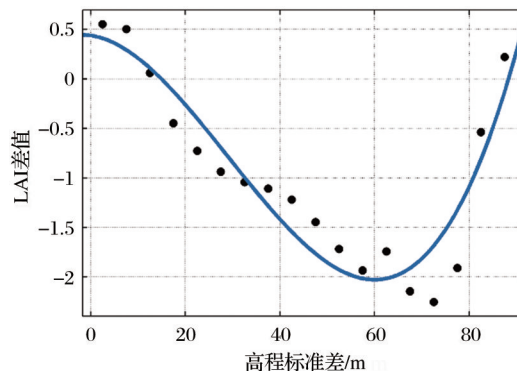


图 7 高程标准差随 LAI 差别值的变化情况

Fig.7 Correlation between σ and δ

4 校正结果与验证

4.1 GLOBMAP LAI 产品后端校正模型

考虑不同植被类型,研究区的叶面积指数地形校正模型为:

$$LAI_{TC} = LAI_{PD} + (\rho_1 \sigma^3 + \rho_2 \sigma^2 + \rho_3 \sigma + \rho_4) \quad (5)$$

其中: LAI_{TC} 表示的是经过地形校正后 LAI, LAI_{PD} 表示待校正的 LAI 产品值, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 均表示校正参数。 $\rho_1 \sigma^3 + \rho_2 \sigma^2 + \rho_3 \sigma$ 代表的是产品的地形误差,当 $\sigma = 0$,误差也应该为 0, ρ_4 可以看作 GLOBMAP LAI 算法的系统误差。并以相同的方法根据拟合结果

得到研究区域内不同植被类型的校正参数,如表3所示。

4.2 GLOBMAP LAI产品地形校正结果

研究区域GLOBMAP LAI产品的地形校正是在500 m分辨率下进行的。由于构建模型区域的高程标准差不超过90 m,因此在LAI产品校正时,首

先剔除了高程标准差大于90 m的区域,并剔除了校正后LAI小于0的不合理区域,校正像元为61 554个,占研究区域面积的68.39%。

未进行地形校正的区域则用GLOBMAP LAI原产品替代,校正前后研究区的LAI分布情况如图8所示。

表3 研究区地形校正模型参数

Table 3 Parameters of the topographic correction model

植被类型	p_1	p_2	p_3	p_4	R^2
针叶林	1.02×10^{-5}	-1.60×10^{-4}	-6.92×10^{-2}	0.50	0.91
阔叶林	-3.61×10^{-5}	4.21×10^{-3}	1.63×10^{-2}	0.86	0.98
灌丛	-4.00×10^{-8}	-6.11×10^{-4}	-3.32×10^{-3}	0.16	0.98
草和农作物	1.43×10^{-5}	1.35×10^{-3}	1.26×10^{-2}	0.57	0.90
不区分类型	2.09×10^{-5}	1.83×10^{-3}	6.81×10^{-3}	0.44	0.88

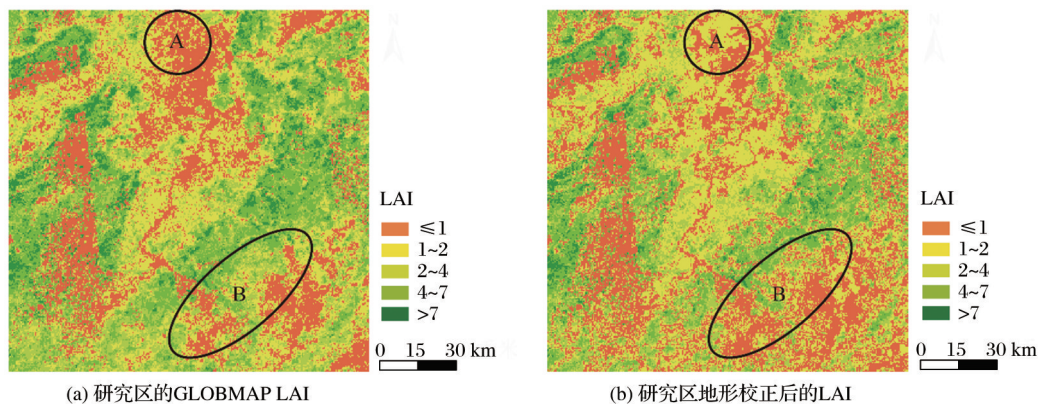


图8 研究区地形校正前后的LAI

Fig.8 GLOBMAP LAI and corrected LAI

经过地形校正,GLOBMAP LAI的变化值在 $[-6.03, 0.56]$ 之间,其中65.05%区域的LAI减少,34.95%区域的LAI有所增加。从空间上看,A区域属于高程较低、地形有微弱起伏的地区,地形校正后这一区域的LAI变化以增加为主,而B区域属于丘陵地区,校正后LAI有所减少。

4.3 校正结果的验证

LAI地形校正的精度检验可以用多种统计参数来定量分析。

在500 m分辨率下将校正前后的LAI产品值与地面实测的LAI进行比较(图9)。地形校正后LAI估算值与地面测量值的均方根误差(RMSE)由2.11降低至2.04。RMSE是观测值与真值偏差的平方期望值的算术平方根,代表了测量的精密程度。

地形校正前后LAI数据集的统计参数如表4所示。数据集的标准差是指所有栅格值与均值之差的均方根,反映的是一个数据集的离散程度。而地形校正的目的是减少LAI数据集中因地形造成的

像元的辐射亮度变不在同一参考平面上的地形误差,因此校正后的标准差应小于原始数据集。经过地形校正,研究区LAI数据集的标准差由2.08下降至1.69。

5 结 语

5.1 结 论

利用地面实测LAI数据、Landsat TM数据和高程数据等,基于高程标准差和GLOBMAP LAI产品值的关系,以千烟洲地区为研究区开展GLOBMAP LAI产品的后端地形校正研究。

DEM数据提取的地形因子与基于地面实测LAI数据估算的TMLAI数据进行相关性分析,结果表明在高程、坡度、坡向、高程标准差四个地形因子中,高程、坡度和高程标准差与LAI存在正相关关系,高程标准差与LAI的相关性($R^2=0.454$)最高。

以高程标准差构建后端校正模型,LAI真实值

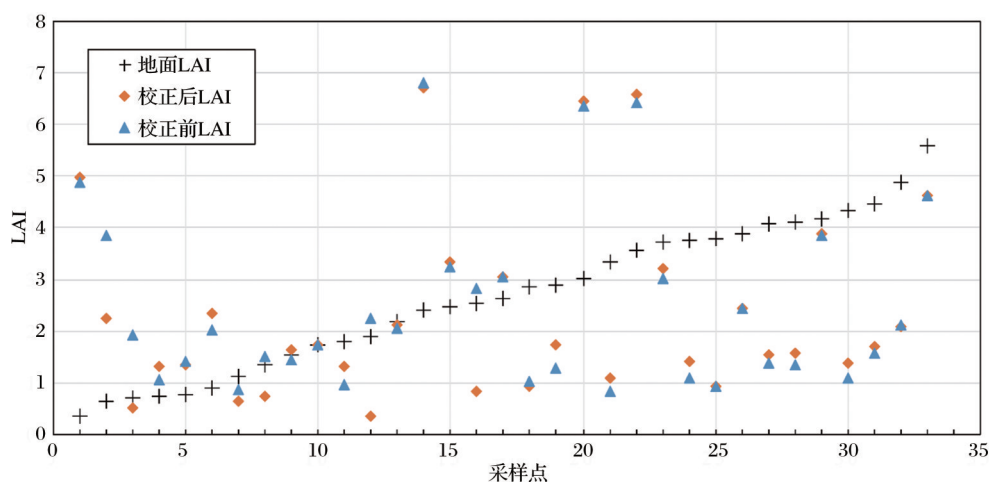


图9 地形校正前后 LAI 与地面实测数据对比

Fig.9 Comparisons of original LAI, corrected LAI and true LAI (field measurement)

表4 校正前后研究区 LAI 统计参数比较

Table 4 Statistical analysis between original LAI and corrected LAI

统计参数	地形校正后	地形校正前
最大值	10.23	10.07
最小值	0.00	0.04
均值	2.10	2.80
标准差	1.69	2.08

与 LAI 估算值的差值可以用高程标准差的数学表达式来表示,根据这一关系可以建立基于高程标准差的 LAI 产品地形校正的通用统计模型 $LAI_{TC} = LAI_{PD} + (2.09 \times 10^{-5} \sigma^3 - 1.83 \times 10^{-3} 5\sigma^2 - 6.81 \times 10^{-3} \sigma + 0.44)$ 。在不同植被类型的模型中,灌丛的模型拟合系数最高 ($R^2=0.986$)。但受到地面数据的限制,针阔混交林 LAI 的地形校正可用通用模型完成。用于构建模型的高程标准差不大于 90 m,因此模型的适用性受到了一定影响。

5.2 地形校正对 LAI 产品的重要性

在地形起伏差异较大的山区,地形是影响叶面积指数的重要因素。在山区开展的 LAI 产品验证研究表明较大的地形起伏差异导致各 LAI 遥感产品表现不一,产品间差异随高程和地形起伏度的变化有明显变化。

另一方面,地表反射率产品的地形误差对叶面积指数的反演有重要影响。叶面积指数反演质量依赖于输入数据的质量。地表反射率是叶面积指数反演中最关键的输入,其误差将会直接影响反演结果^[30]。因此,通过地形校正方法减少地表反射率数据中的地形误差,对于保证叶面积指数的反演精度十分关键。

5.3 局限性与展望

研究工作根据千烟洲地区的实测数据建立了 GLOBMAP LAI 产品的经验校正模型,同大多数的经验模型类似,该模型仅适用于一定范围的区域,但建立模型的方法具有可拓展性。经验模型是基于一定范围内地理属性的相似性而建立的,因此需要获取区域内地面实测数据用于地形校正模型的建立。

模型方法中存在降尺度的问题,以 30 m 分辨率的数据建立模型,然后用于 500 m 分辨率下的产品地形校正。在这一方法中,通过高程标准差的计算窗口大小很好地建立了不同分辨率下变量的关系。

利用本文中建立的 LAI 产品地形校正模型对千烟洲地区 2008 年 201~209 天的 GLOBMAP LAI 产品进行校正,校正后 65.05% 区域的 LAI 减少,34.95% 区域的 LAI 有所增加。与地面实测数据进行验证分析,发现校正后 LAI 与地面实测数据的 RMSE 降低,且校正后的 LAI 数据集的标准差减少。这一模型能够完成这一地区的 GLOBMAP LAI 的地形校正,能够减少产品中的地形误差,有效提高 LAI 产品的精度。

地形对叶面积指数产品的影响是综合的,除高程标准差外,描述地形特征的指标还有高程、坡度、坡向和地形起伏度等,它们对 LAI 的影响还有待确定。本文仅考虑了高程标准差这一更具综合性的地形因子的影响,开展了小范围、较短时期内的产品后端地形校正来提高产品精度,后期还需不断研究其他地形因子对 LAI 估算的影响,并提高模型在不同时间、空间尺度的可拓展性,建立更为综合、全面的叶面积指数后端地形校正模型。

参考文献(References):

- [1] Liu Yang, Liu Ronggao, Chen Jingming, *et al.* Current Status and Perspectives of Leaf Area Index Retrieval from Optical Remote Sensing Data [J]. *Geo-information Science*, 2013, 15(5): 734-743.[刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 等. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(5): 734-743.]
- [2] Chen J M, Cihlar J. Retrieving Leaf Area Index of Boreal Conifer Forests Using Landsat TM Images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996(55): 153-162.
- [3] Chen J M, Black T. Defining Leaf Area Index for Non-flat Leaves [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1992, 15(4): 421-429.
- [4] Fang Xiuqin, Zhang Wanchang. The Application of Remotely Sensed Data to the Estimation of the Leaf Area Index[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2003, 15(3): 58-62. [方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. *国土资源遥感*, 2003, 15(3): 58-62.]
- [5] Yan K, Park T, Yan G, *et al.* Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 1: Consistency and Improvements[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 359.doi: 10.3390/rs8050359.
- [6] Verger A, Baret F, Weiss M. Near Real-time Vegetation Monitoring at Global Scale[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3473-3481.
- [7] Ganguly S, Schull M A, Samanta A, *et al.* Generating Vegetation Leaf Area Index Earth System Data Record from Multiple Sensors. Part 1: Theory[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4333-4343.
- [8] Xiao Z, Liang S, Wang J, *et al.* Use of General Regression Neural Networks for Generating the GLASS Leaf Area Index Product from Time-Series MODIS Surface Reflectance [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [9] Liu Yang, Liu Ronggao. Retrieval of Global Long-term Leaf Area Index from LTDR AVHRR and MODIS Observations. *Journal of Geo-information Science*, 2015, 17(11): 1304-1312.[刘洋, 刘荣高. 基于LTDR AVHRR和MODIS观测的全球长时间序列叶面积指数遥感反演[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(11): 1304-1312.]
- [10] Holben B, Justice C. An Examination of Spectral Band Ratioing to Reduce the Topographic Effect on Remotely Sensed Data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1981, 2(2): 115-133.
- [11] Civco D L. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(9): 1303-1309.
- [12] Jing Jincheng, Jin Hua'an, Tang Bin, *et al.* Intercomparison and Evaluation of Influencing Factors among Different LAI Products over Mountainous Areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(2): 400-411. [景金城, 靳华安, 唐斌, 等. 山区LAI遥感产品对比分析及影响因子评价[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 400-411.]
- [13] Xie X, Li A, Jin H, *et al.* Assessment of Five Satellite-derived LAI Datasets for GPP Estimations Through Ecosystem Models[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 690: 1120-1130.
- [14] Yu W, Li J, Liu Q, Topographic Effects on Leaf Area Index Retrieval by Remote Sensing Approach[C]// IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE, 2019.
- [15] Yu W, Li J, Liu Q, *et al.* A Simulation-based Analysis of Topographic Effects on LAI Inversion over Sloped Terrain [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 794-806.
- [16] Yang Yongshuai, Li Ainong, Jin Hua'an, *et al.* Intercomparison Among GEOV1, GLASS and MODIS LAI Products over Mountainous Area in Southwestern China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3): 438-450. [杨勇帅, 李爱农, 靳华安, 等. 中国西南山区 GEOV1、GLASS 和 MODIS LAI 产品的对比分析[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 438-450.]
- [17] Jin H, Li A, Bian J, *et al.* Intercomparison and Validation of Modis and Glass Leaf Area Index (LAI) Products over Mountain Areas: A Case Study in Southwestern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 55: 52-67.
- [18] Chen W, Cao C. Topographic Correction-based Retrieval of Leaf Area Index in Mountain Areas[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(2): 166-174.
- [19] Jin Hua'an, Li Ainong, Bian Jinhu, *et al.* Leaf Area Index (LAI) Estimation from Remotely Sensed Observations in Different Topographic Gradients over Southwestern China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(1): 42-50.[靳华安, 李爱农, 边金虎, 等. 西南地区不同山地环境梯度叶面积指数遥感反演[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(1): 42-50.]
- [20] Li Yingcheng. Analysis and Correction of Topographic Effect of Digital Remote Sensing Images [J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 1994, (2): 14-19.[李英成. 数字遥感影像地形效应分析及校正[J]. *北京测绘*, 1994, (2): 14-19.]
- [21] Gao Yong, Zhang Wanchang. Comparison Test and Research Progress of Topographic Correction on Remotely Sensed Data [J]. *Geographic Research*, 2008, (2): 467-477, 484.[高永, 张万昌. 遥感影像地形校正研究进展及其比较实验[J]. *地理研究*, 2008, (2): 467-477, 484.]
- [22] 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): 1537-1540.
- [23] Civco D L. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(9): 1303-1309.
- [24] 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: 166-175.
- [25] 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 and Remote Sensing*, 2005, 43(9): 2148-2159.

- [26] Liao Yubing, Chen Xinfang, Chen Xi, *et al.* Effect of Topographic Correction on the Estimation of Leaf Area Index based on Landsat TM[J]. Remote Sensing Information, 2011(5): 47-51, 64.[廖钰冰, 陈新芳, 陈喜, 等. 地形校正对叶面积指数遥感估算的影响[J]. 遥感信息, 2011(5): 47-51, 64.]
- [27] Xia Xueqi, Tian Jiuqing, Du Fenglan. Analysis of Topographical Effect on Retrieval of LAI from Remotely Sensed Data [J]. Remote Sensing Information, 2004(2): 16-19, 37.[夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 遥感提取叶面积指数的地形影响分析[J]. 遥感信息, 2004(2): 16-19, 37.]
- [28] Cai Wenjie, Sha Jinming. Inversion of Leaf Area Index based on Geographical Environment Factors[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2019, 14(2): 55-64.[蔡雯洁, 沙晋明. 寄语地理环境要素的叶面积指数遥感定量反演[J]. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(2): 55-64.]
- [29] Jin H, Li A, Xu W, *et al.* Evaluation of Topographic Effects on Multiscale Leaf Area Index Estimation Using Remotely Sensed Observations from Multiple Sensors[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 154: 176-188.
- [30] Xiao Z Q, Liang S L, Jiang B. Evaluation of Four Long Time-series Global Leaf Area Index Products[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 218-230.
- [31] Li Xianfeng, Ju Weimin, Chen Shu, *et al.* Influence of Land Cover Data on Regional Forest Leaf Area Index Inversion[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 974-989.[李显凤, 居为民, 陈姝, 等. 地表覆盖分类数据对区域森林叶面积指数反演的影响[J]. 遥感学报, 2010, 14(5): 974-989.]
- [32] Liu Yibo, Ju Weimin, Zhu Gaolong, *et al.* Retrieval of Leaf Area Index for Different Grasslands in Inner Mongolia Prairie Using Remote Sensing Data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5159-5170.[柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5159-5170.]
- [33] Chen Jun, Liao Anping, Chen Jin, *et al.* 30-Meter Global Land Cover Data Product-GlobeLand30 [J]. Geomatics world, 2017, 24(1): 1-8.[陈军, 廖安平, 陈晋, 等. 全球 30m 地表覆盖遥感数据产品-GlobeLand30[J]. 地理信息世界, 2017, 24(1): 1-8.]
- [34] Pisek J, Chen J M, Lacaze R, *et al.* Expanding Global Mapping of the Foliage Clumping Index with Multi-angular Polder Three Measurements: Evaluation and Topographic Compensation [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(4): 341-346.
- [35] Zhu G, Ju W, Chen J M, *et al.* Foliage Clumping Index over China's Landmass Retrieved from the Modis Brdf Parameters Product [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2122-2137.

Topographic Correction of Leaf Area Index Product Derived from Remote Sensing Data

Hu Yuetong^{1,2}, Wu Shuang^{1,2}, Feng Xianfeng^{1,2}, Liu Yang¹

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Terrain correction is an important approach to improve the accuracy of remote sensing quantification of surface parameters in complex terrain areas. The widely used remote sensing Leaf Area Index (LAI) product always have certain terrain error. It has a great importance to eliminate the influence of terrain and improve LAI products' accuracy. Taking the Qianyanzhou area of Jiangxi Province as the research area, the paper aims to establish a terrain correction model which takes terrain error into account to promote the accuracy of GLOBMAP LAI product. Based on the measured LAI data, Landsat TM data, GLOBMAP LAI product and elevation data, the model achieved terrain correction by establishing the index relationship between elevation standard deviation and LAI product values. The terrain correction model of GLOBMAP LAI product was established, and then used to correct the product in the study area. The results indicated that the corrected leaf area index was closer to the ground measured data, and the RMSE between the LAI product and the ground measurement decreases from 2.11 to 2.04. The standard deviation of the corrected LAI dataset was reduced from 2.08 to 1.69, which meant the terrain error could be eliminated. The method in this paper had well completed the terrain correction of LAI product. The model is meaningful to improve the accuracy of LAI product.

Key words: Qianyanzhou area; Leaf Area Index (LAI); Topographic correction; Standard deviation of elevation; LAI product