

山区LAI遥感产品对比分析及影响因子评价

景金城^{1,2,3}, 靳华安¹, 唐 斌², 李爱农¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所数字山地与遥感应用中心, 成都 610041;

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 3. 四川省煤炭设计研究院, 成都 610031)

摘要：叶面积指数(LAI)遥感产品对比分析不仅能够提供产品质量的定量化描述信息, 还对产品反演算法优化和认知陆面过程模型的不确定性具有重要意义。为研究不同LAI产品在地形复杂、景观破碎的中国西南地区的表现差异, 选择2001-2016年间MODIS(C5、C6)和Geoland2(GEOV1、GEOV2)LAI产品, 从时空完整性和连续性方面, 对比分析不同LAI产品在山区的变化情况, 并比较同源不同版本LAI产品在山区的改进效果。选择地形(如高程、地形起伏度)、植被类型、气候因子, 使用地理探测器评估LAI遥感产品受不同下垫面的影响程度。结果表明:

(1)高海拔和高地形起伏度区域LAI产品质量较差;(2)MODIS LAI产品连续性整体性差于Geoland2, MODIS LAI均值在局部地区高于Geoland2, 同源产品LAI差值低于非同源产品;(3)MODIS C6主算法反演比例低于C5, 时间连续性优于C5, GEOV2反演成功率和连续性优于GEOV1;(4)各因子对山区LAI变化的贡献量 q :地形起伏度最小, MODIS产品受植被类型影响最大, Geoland2产品受高程和气象数据影响较大。通过LAI产品对比分析, 能够准确认知山区各因素对LAI产品精度的影响程度, 可为山区生产高质量的LAI产品提供借鉴。

关键词：叶面积指数; 西南地区; 对比分析; 地理探测器; 空间异质性

叶面积指数(leaf area index, LAI)是植被长势监测^[1]、全球气候变化^[2]和陆面过程模拟^[3]的重要生理参数。目前利用遥感数据源反演的LAI产品主要包括MODIS^[4-5]、GEOV2^[6]、GLASS^[7]等。由于数据源和反演算法等的差异, 各产品表现不一, 只有经过广泛的验证, 在掌握数据质量和可靠性的前提下, 才能应用于相关的研究过程中。目前, 以BELMANIP网络^[8]和中国遥感产品验证网络(VRPC)^[9]为代表的观测网, 为LAI产品验证提供大量的实测数据, 但是这些观测站点多分布于平坦地区, 无法为复杂山区提供足够的观测数据^[10]。Camacho等^[11]从时空连续性和植被类型差异等角度对比分析GEOV1与其他LAI产品差异, Jiang等^[12]对比分析多种LAI产品相互之间的不确定性和相对不确定性。这些工作为山区LAI产品对比研究提供了借鉴。然而, 全球尺度LAI产品对比分析中并未考虑山区特殊性的影响。

山地因受地形限制, 景观破碎程度较为严重, 山地植被的高空间异质性严重制约着LAI产品质量^[13]。杨勇帅等^[14]和Jin等^[10]在中国西南山区实地采集样点数据, 定量评价LAI

收稿日期: 2018-08-03; 修订日期: 2018-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600103); 国家自然科学基金项目(41671376, 41631180); 四川省应急测绘与防灾减灾工程技术研究中心开放基金(K2015B001)

作者简介: 景金城(1991-), 男, 甘肃灵台人, 硕士, 主要从事3S技术集成和定量遥感产品验证工作研究。

E-mail: jingjincheng27@163.com

通讯作者: 李爱农(1974-), 男, 安徽庐江人, 研究员, 主要从事山地定量遥感理论、方法及其综合应用研究。

E-mail: ainongli@imde.ac.cn

产品精度,并从时空完整性和连续性角度进行MODIS、GLASS和GEOV1 LAI产品的对比分析,评价LAI随地形梯度和植被类型差异的变化关系。Fu等^[15]利用地面实测LAI验证青藏高原北部高寒草甸区域MODIS C6 FPAR/LAI产品精度。虽然山区LAI遥感产品验证取得了一些进展,但仍处于初步探索阶段,由于山区区位环境的复杂性,围绕不同LAI产品在山区的不同表现,相关研究工作有待进一步深化。此外,最新版本的MODIS C6、GEOV2产品已经发布,相关验证研究工作也陆续开展^[15-16]。MODIS C6 LAI产品验证中并未考虑地形影响,受采样点的限制,无法全面反映山区LAI产品质量;同时GEOV2产品尚处于验证阶段。新产品在复杂山区的表现,亟待进一步检验。GLASS LAI产品具有高时空分辨率的特性,产品精度和质量较MODIS LAI有较大改善^[10,14]。此外,地理探测器作为探测空间异质性地表各因子对因变量的贡献量的统计方法^[17],已在土壤抗生素空间分异^[18]、城市地表温度^[19]、煤矿区植被指数变化^[20]等方面表现出独特优势,对于空间分异变化明显的山区LAI产品影响因素评价提供参考。

选择2001-2016年MODIS C5、MODIS C6、GEOV1和GEOV2四种LAI产品,通过产品间对比分析,评价产品的时空完整性和连续性,开展LAI产品在中国西南山区的质量评估工作,并使用地理探测器估算山区LAI影响因子时空分异特征。山区不同源多版本LAI遥感产品验证,有助于更好地理解各LAI产品在山区的适用性以及产品在山区的改进效果,探测各因子对LAI的贡献量,为产品反演算法改进和精度提高提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南地区,面积约233万km²,包含四川、贵州、重庆、西藏、云南5个省级行政区。区内地形复杂多变,海拔从低于500 m(长江)到8844 m(青藏高原的珠穆朗玛峰)变化(图1)。地质构造复杂,包含三种主要的地貌形态:青藏高原、四川盆地和云贵高原^[21]。独特的气候和地形条件,造就了研究区脆弱的植被生态系统和异质景观。

1.2 LAI产品

1.2.1 MODIS LAI产品

MODIS LAI产品反演算法包括主算法和备用算法两种。主算法使用三维辐射传输模型作为前向模型,对不同植被类型设置不同的输入参数,模拟不同观测条件及土壤下垫面的各波段反射率并构建查找表,对比MODIS反射率和查找表中的模拟数据,计算小于设定阈值的LAI的均值和方差,均值为最终反演结果,方差为反演结果的不确定性^[22]。备用算法依据LAI-NDVI经验关系估算LAI值,且只有在主算法失败时才会被使用。C5和C6是MODIS最近的两期版本(表1),使用8种MODIS土地覆被类型作为先验知识约束模型参数,分别是草地/谷类作物、灌丛、阔叶作物、稀树草原、常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林和落叶针叶林^[23]。相比于C5产品,C6选择Terra传感器上每8天数据中“最好”的可用像元合成,并使用改进的多年土地覆被产品作为先验知识,L2G-lite表面反射率作为模型输入参数,主算法反演比例在常绿阔叶林中高达17%,LAI产品误差从0.80下降到0.66^[5]。MODIS LAI产品的质量控制信息(QC)用8位无符号整形二进制数表示,其中第0位表示算法状态,第3~第4位表示云的状态,第5位表示主算法是否饱

和,第6位表示主算法失败原因并使用备用算法,第7位表示填充值。

1.2.2 Geoland2 LAI产品

Geoland2 LAI产品利用一致性较高的CYCLOPES V3.1和MODIS C5数据,使用神经网络算法融合成多期近实时LAI产品^[6],投影方式为plate carrée投影。神经网络算法输入参数包括SPOT/VEGETATION传感器的红光、近红外、短波红外波段的方向归一化冠层顶部反射率和太阳天顶角^[24],数据输入前进行了大气校正、方向归一化和云掩膜^[25]。产品生产过程中使用地面基准站点BELMANIP2数据弥补1998-2014年间CYCLOPES产品的缺失,确保LAI产品的时间连续性^[25]。GEOV1和GEOV2是Geoland2最近的两期产品(表1),相比于GEOV1产品,GEOV2使用多步过滤方法消除大气和积雪的影响,反演算法使用VGT-P反射率的瞬时估计神经网络^[26]。Geoland2 LAI接近于真值^[11],质量标识(QFLAG)使用16位无符号整形二进制数表示,第0位表示陆地/海洋,7位表示LAI可用状态,13位表示是否填充值。

表1 不同版本LAI产品介绍

Table 1 Introduce of different version LAI product about MODIS C5, C6, GEOV1 and GEOV2

产品	时间范围	分辨率		算法	合成/天	最大值	来源
		空间	时间/天				
MODIS C5 (MOD15A2)	2000-02-18 至今	1 km	8	主算法: 三维辐射传输模型构建查找表 备用算法: LAI-NDVI线性关系	8	10	文献[4]
MODIS C6 (MOD15A2H)	2000-02-18 至今	500 m	8		8	10	文献[5]
GEOV1	1999年至今	1/112°	10	人工神经网络(CYC和MOD融合)	30	7	文献[24]
GEOV2	1999年至今	1/112°	10		±60	7	文献[6]

注: CYC、MOD分别表示CYCLOPES和MODIS。

1.3 辅助数据

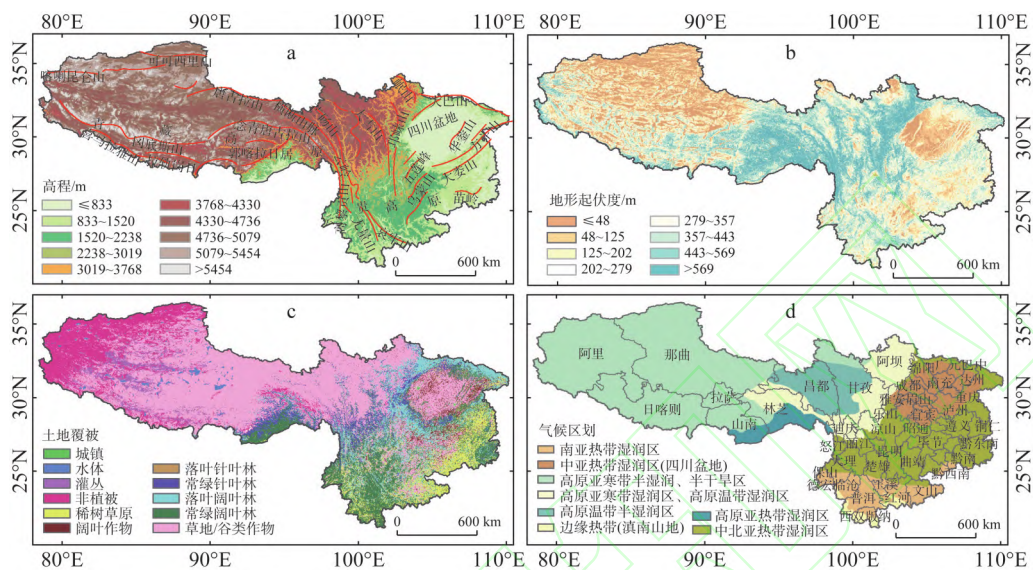
DEM数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。研究中选择90 m分辨率的SRTM数据源,空间聚合到与LAI产品空间分辨率一致的DEM和地形起伏度(图1a、图1b)。植被类型数据选择MODIS陆地研究小组利用监督分类法生产的空间分辨率500 m的土地覆被数据集产品MCD12Q1^[27],共包括5种主要的土地覆被分类数据层,研究中选取其中的叶面积/光合有效辐射分量分类数据集(图1c)。气候区划数据来源于中国气候区划新方案^[28],研究区主要为高原亚寒带、高原温带、高原亚热带、北亚热带、边缘热带、中亚热带和南亚热带7个大的气候区和19个次级气候区(图1d)。

1.4 研究方法

由于缺乏有效的地面测量数据,研究工作主要针对不同LAI遥感产品进行对比分析。从时空完整性、时间连续性和空间一致性三个方面,对比分析同源不同版本LAI遥感产品间的差异,并使用地理探测器定量评价各因子对LAI反演结果的影响。

1.4.1 时空完整性对比

时空完整性即指同一LAI产品时间序列所有数据中高质量数据所占比例。用质量信息定性评价,采用原始时空分辨率数据计算。由于MODIS LAI备用算法使用线性关系拟合,可信度较低,因此,分别定义2001-2016年所有时间序列数据中主算法反演的MODIS LAI比例为质量信息^[4,10,29],LAI状态可用(即人工神经网络算法成功反演)的Geo-



注: 图1a中的红色线为山脊线, 数据来源于中国数字山地图[11]。研究区范围数据来源于1:100万全国基础地理数据库, 本图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2921号的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 西南地区高程、地形起伏度、植被类型和气候区划分布

Fig. 1 Spatial distribution of DEM, relief amplitude, vegetation types and climate regionalization in southwestern of China

land2 LAI 占比为质量信息^[14]。因GEOV2 LAI产品是融合±60天数据得到, 研究区内所有像元LAI值均可用, 即质量信息为100%, 故在此不做讨论。

1.4.2 时间连续性对比

时间连续性是指同一LAI产品在相等时间间隔变化上的连续性。选用平滑度指数 δ ^[29]定量描述LAI产品时间序列变化的差异。各产品的平滑度指数 δ 由所有可用时相原始时空分辨率LAI数据计算得到, 其定义如式(1)所示, 计算过程中, 先计算相邻时序的 δ , 然后取多个时间段的 δ 平均值作为LAI产品的平滑度指数。时间连续性和空间一致性分析中所用LAI产品均经过掩膜处理, MODIS LAI中只保留主算法反演数据, Geoland2产品保留LAI状态可用数据。

$$\delta = \left| \frac{LAI(t + \Delta t) + LAI(t - \Delta t)}{2} - LAI(t) \right| \quad (1)$$

式中: Δt 是产品的时间分辨率, MODIS产品是8天, GEOV产品是10天。当相邻两个时相的LAI产品存在时才会计算 δ 值, δ 值越小, 表示产品时间序列上的变化越平滑。

1.4.3 空间一致性对比

空间一致性指不同LAI产品在空间变化上的差异。使用生长季LAI均值、偏差和均方根误差(RMSE)指标定量评价同源产品的空间一致性, 3种指标均由聚合至1 km空间分辨率的生长季(4-10月)^[30]数据计算得到。其中偏差和RMSE是从同源和非同源两个角度, 分析各产品的不确定性和相对不确定性, 同时定量分析偏差和RMSE与地形因子的关系。考虑到定量描述的方便性, 高程和地形起伏度分别按照100 m和20 m的间隔分段。计算时, 偏差取不同LAI产品间年生长季均值之差的多年平均, RMSE计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (LAI_{i,k} - mLAI_i)(LAI_{j,k} - mLAI_j)}{n-1}} \quad (2)$$

式中: $n=1, 2, \dots, 16$, 表示年数; $LAI_{i,k}$ 和 $mLAI_i$ 分别为 i 产品第 k 年生长季 LAI 均值及其 n 年平均值; $LAI_{j,k}$ 和 $mLAI_j$ 分别为 j 产品第 k 年生长季 LAI 均值及其 n 年平均值。

1.4.4 各因子贡献量分析

山地地形、植被类型和气候特征对 LAI 产品产生不同程度的影响^[10,31], 为准确评价各因子的影响程度, 利用地理探测器计算各因子对 LAI 的贡献量 q ^[32-33], 公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (3)$$

式中: L 为因子分层数; N 和 N_h 分别为样本总体和 h 层的样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为样本总体和 h 层的方差。 q 的值域是 $[0, 1]$, q 越大表示因子对 LAI 的解释力越大。LAI 产品是栅格数据, 计算过程中对每层的像元按 100 的间隔取值。

2 结果分析

2.1 时空完整性分析

中国西南地区 2001-2016 年间各 LAI 产品的质量信息分布如图 2 所示, 三种 LAI 产品均显示出较好的时空完整性, 空间上保持了较为相似的变化趋势, MODIS C5 和 C6 产品变化趋势更为接近。研究区西部 MODIS 产品质量信息高于 GEOV1, 西部边缘为高海拔和云、雪覆盖区域, MODIS 产品 LAI 值多为填充值或不可用, GEOV1 产品由于融合 30 天数据, 表现出一定的质量信息; 四川盆地和云贵高原东部 GEOV1 产品质量信息低于 MODIS, 可能与低海拔有关 (图 1a); 四川盆地边缘的龙门山和大娄山, MODIS 产品质量信息较低, 形成明显的过渡带。MODIS 两种产品对比发现, 在研究区西部边缘区域两种产品空值覆盖率表现出较大差异, 可能与 C6 产品反演算法中使用了改进的土地覆被分类数据有关。

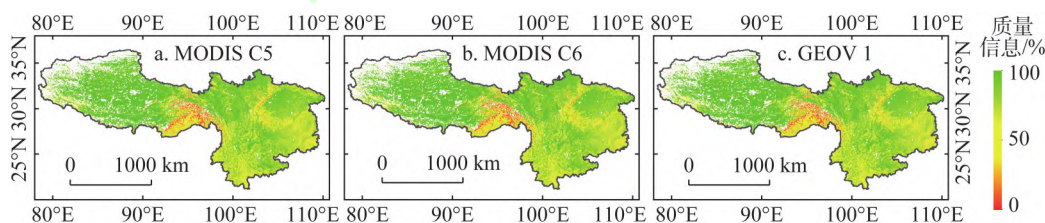


图2 LAI产品质量信息

Fig. 2 Percentage of good quality data for MODIS C5, MODIS C6 and GEOV1

2.2 时间连续性分析

LAI 产品平滑度指数 δ 空间分布如图 3 所示, 整体上呈现出由西向东 δ 值不断增大的趋势, 非同源 LAI 产品 δ 值差异较大。Geoland2 产品 δ 值偏小 ($\delta < 0.2$), 时间连续性较好, 而 MODIS 的 δ 值偏大 ($\delta < 0.8$), 且数据相对最优区域 ($\delta < 0.2$) 面积占比不足研究区 1/2。造成这种差异的可能原因是 Geoland2 产品由 CYCLOPES 和 MODIS LAI 融合, 时序变化更

加连续平滑。四川盆地和云贵高原(图1a), MODIS C5、C6、GEOV1产品的 δ 值在空间上存在局部差异,融合 ± 60 天数据的GEOV2产品 δ 值波动较小,时间连续性最佳。研究区西部边缘为非植被覆盖区,MODIS产品数据源受云、雪覆盖影响,存在较多空值,Geoland2产品由于融合时间长(30天、 ± 60 天),很大程度上消除云、雪覆盖对像元值的影响。

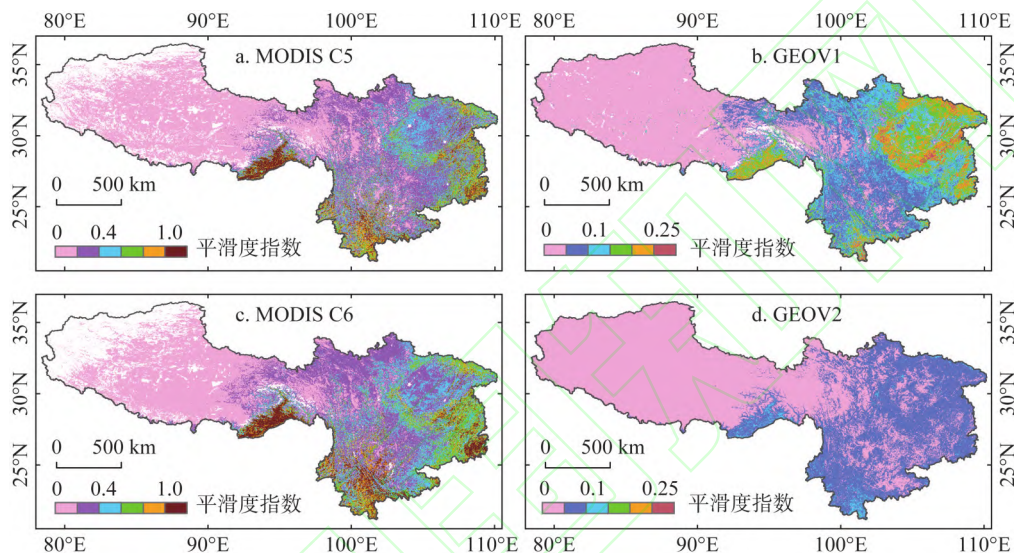


图3 LAI产品平滑度指数

Fig. 3 Temporal smoothness index for MODIS C5, MODIS C6, GEOV1 and GEOV2

2.3 空间一致性分析

LAI产品生长季均值空间分布如图4所示, Geoland2 LAI在大多数区域高于MODIS产品。研究区内青藏高原主要以草地为主(图1), 高程大于3000 m, LAI低于四川盆地和云贵高原; 四川盆地以谷类作物为主, 地势较低, LAI变化相对比较稳定; 云贵高原以森林为主, LAI变化较大。喜马拉雅南翼高原亚热带湿润区, 云贵高原的德宏、普洱、西双版纳, 气候湿润, 以落叶阔叶林为主(图1d), MODIS LAI高于Geoland2的两种产品。图中同一区域各LAI产品的表现不一, 造成这种现象的原因可能与植被类型、反演算法、输入数据源^[34]、地形因子有关。MODIS产品输入数据来源于Terra/MODIS传感器, 主算法LAI值由三维辐射传输模型反演, Geoland2产品来源于SPOT/VEGETATION传感器, 由神经网络算法合成, 且MODIS产品受土地覆被分类结果的约束, 而Geoland2反演过程中不受植被类型限制。

不同产品间的LAI差值和RMSE与高程和地形起伏度的关系如图5所示, LAI差值和RMSE与高程和地形起伏度联系紧密。同源产品间LAI差值和RMSE变化趋势一致, 差异相对较小, 非同源产品间LAI差值和RMSE随高程和地形起伏度增加差异较大。RMSE随高程增加先增大后减小, 随地形起伏度增加, 先增大而后基本保持稳定。同源产品间的RMSE较大, 其中GEOV1与GEOV2间的RMSE全区最大, 非同源产品间的RMSE变化趋势较为接近。高程低于700 m时, 不同产品之间的RMSE迅速增大; 高程大于700 m, RMSE开始减小, 700~2400 m范围变化相对比较稳定, 在2000 m和2400 m附近分别存

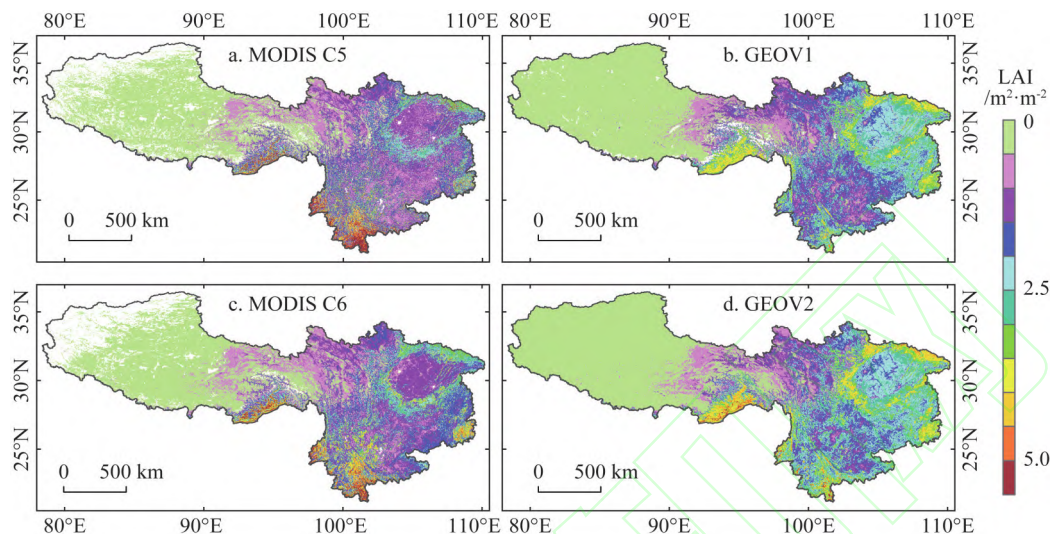


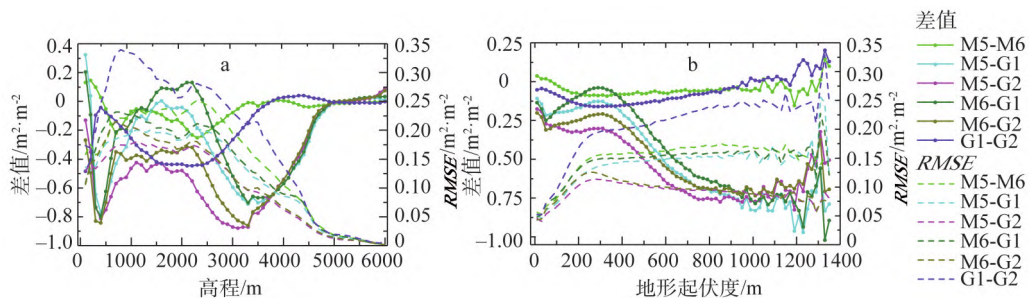
图4 2001-2016年生长季LAI均值

Fig. 4 Mean LAI in growing season for MODIS C5, MODIS C6, GEOV1, GEOV2 during 2001-2016

在局部谷值和峰值；高程大于2400 m， $RMSE$ 迅速降低；高程超过5000 m后，不同产品间LAI差值和 $RMSE$ 逐渐趋于稳定， $RMSE$ 逼近于0。地形起伏度0~250 m， $RMSE$ 从0增加到0.20；起伏度250~1300 m时， $RMSE$ 保持在一定范围内变化，其中，地形起伏度超过900 m，LAI差值和 $RMSE$ 波动较大。

2.4 各因子贡献量分析

利用地理探测器分析高程、地形起伏度、植被类型、气候区划4种因子对2001-2016年生长季LAI均值的影响。以高程为例，比较LAI变化的差异性情况，考虑到样本总体较大，将其分别分为3~10组，利用地理探测器计算各分组的解释力大小。结果表明，当高程按自然间隔法分为10组时（图1a），高程对LAI变化解释力最大，说明高程对LAI变化影响较大。类似地，地形起伏度按百分位法分为8组时（图1b），因子的统计显著差异性最佳。为有效减少植被类型和气候区划类型分级，同时保持较好的因子统计差异性，对土地覆被中的水体、城镇和非植被做掩膜处理，将常绿和落叶阔叶林合并，将气候区划从19个二级分区合并为8个气候区（图1d）。探测结果表明各因子均存在差异



注：M5、M6、G1、G2分别表示MODIS C5、MODIS C6、GEOV1、GEOV2四种LAI产品。

图5 不同LAI产品差值和 $RMSE$ 随地形因子的变化Fig. 5 Statistical indicators (bias, $RMSE$) among different LAI products, related to altitude and relief amplitude

性,说明不同因子对 LAI 变化产生不同程度的影响。

地理探测器探测结果如表 2 所示。对比单一影响因子的贡献量 q 结果:地形起伏度 q 值最小,说明地形起伏度对山区 LAI 影响较小;高程、植被类型和气候差异对山区 LAI 变化占据主导作用 (q 值较大)。同一产品中不同因子对 LAI 变化的影响,植被类型对 MODIS C6 LAI 贡献最大,可能与 MODIS 产品反演算法中考虑了植被类型差异的影响有关^[4-5];高程对 Geoland2 贡献最大,进一步证实地形因子对山区 LAI 产品影响的重要性;气候变化对 Geoland2 的贡献仅次于高程,说明气候因子(温度、降水等)对 Geoland2 产品影响较大。因子相互作用后对山区 LAI 的影响,由地理探测器因子交互作用探测结果表明,任意单因子与其他因素交互后的因子解释力强于单因子解释力,表明山区 LAI 是受多种因素共同作用。

表 2 各影响因子探测结果
Table 2 The detection of all the influencing factors

LAI 产品	交互探测				
		高程	地形起伏度	气候区	植被类型
MODIS C5	高程	0.4597			
	地形起伏度	0.5139	0.0692		
	气候区	0.5740	0.5297	0.4865	
	植被类型	0.6070	0.5290	0.6389	0.5201
MODIS C6	高程	0.5321			
	地形起伏度	0.6035	0.0891		
	气候区	0.6373	0.5837	0.5233	
	植被类型	0.7531	0.6748	0.7579	0.6635
GEOV 1	高程	0.6414			
	地形起伏度	0.7079	0.1139		
	气候区	0.7209	0.6579	0.6040	
	植被类型	0.7438	0.5598	0.7409	0.5439
GEOV 2	高程	0.7064			
	地形起伏度	0.7617	0.1063		
	气候区	0.7743	0.6997	0.6488	
	植被类型	0.8052	0.6275	0.7956	0.6165

3 讨论

3.1 山区 LAI 产品验证的重要性

山区 LAI 产品验证不仅为遥感数据反演 LAI 提供新的视角,同时对复杂地形条件下 LAI 相关的陆表过程模型不确定性的分析提供帮助^[10]。山区 LAI 产品验证的一个主要问题是分析空间异质地表对 LAI 反演算法和产品精度的影响,已有验证工作分析了山区地形因子和植被类型对 LAI 产品的影响^[10,14],结果显示只有 27.27% 的 MODIS C5 和 36.36% 的 GLASS 产品满足 GCOS 质量标准的要求^[10],山区气候变化^[2]等研究工作需要更高质量的 LAI 产品支持。

中国西南山区地表起伏差异较大,导致各 LAI 遥感产品表现不一,同源产品生长季

LAI差值低于非同源产品。各产品间的差异随高程增加而逐渐减小,地形起伏度低于250 m时不同产品之间差异整体性不断增大,超过900 m时,LAI产品间的差异出现波动。地形因子(高程和地形起伏度)影响着山区LAI的变化,山区多样性的植被生物气候特征对LAI变化的影响,有待在研究工作中不断明确,为生产高精度的山区LAI遥感产品提供帮助。

3.2 地理探测器对山区LAI产品验证的有效性

地理探测器作为空间异质地表的因子贡献率统计方法,能够定量评价下垫面变化复杂的山区LAI的影响。山区LAI变化受地形、植被类型、纬度、积温、降雨和日照等多因素的影响,地理探测器可以有效地检验各因子对LAI变化的贡献量 q ,甄别影响山区LAI的主导因素,剔除伪元素,从而为山区高精度LAI产品的生产提供借鉴。已经通过实验证实,高程、植被类型和气候差异对山区LAI变化起主导作用,定量评价了各因子对LAI的贡献量 q 。因各LAI产品数据源和算法的差异,不同因子对山区LAI变化的贡献量 q 大小顺序存在差别。

3.3 局限性与展望

研究工作只是针对不同LAI产品进行对比分析,未能给出精确的LAI误差估计,下一步工作需要多采集地面LAI测量数据,在综合考虑地表特征的基础上,结合高分辨率遥感影像制作LAI实测图,以便与已有LAI产品进行空间尺度直接验证。文章利用地理探测器检验了各因子对山区LAI变化的影响,山区地形复杂多变,描述地形特征的指标有高程、坡度、坡向、起伏度、高程标准差、山体阴影等,除高程和地形起伏度外的其他地形因子对山区LAI变化的影响大小有待明确。气候区划由温度、降雨、日照等多因素作用,文章只考虑了其综合影响,未考虑各气候因子的单独影响。后期研究需要不断研究各气候因子和地形因子对山区LAI的变化,去伪存真,明确各因子对LAI变化的影响,同时需要不断挖掘新的影响因子,充分理解各因子对LAI变化的贡献。

MODIS LAI产品反演中使用的土地覆被分类产品受空间分辨率的限制,如何有效地减弱混合像元的影响,对LAI产品质量提升有莫大帮助。空间、时间、光谱和角度的一体化图像融合方法^[35]为高分辨率反射率数据和土地覆被数据的生产提供了很好的技术支持,高分辨率遥感影像能更清晰地表达地表生物的空间异质性,为地形和生态环境特殊的山区LAI产品的生产提供很好的输入数据源和辅助数据。

4 结论

选择MODIS C5、MODIS C6、GEOV1和GEOV2四种LAI产品,对比分析了非同源产品的差异以及同源产品在山区的改进效果,利用地理探测器检验了不同下垫面因子对山区LAI变化的影响,主要得到以下结论:(1)非同源产品对比发现:MODIS LAI产品连续性整体差于Geoland2,MODIS LAI均值在局部地区高于Geoland2。在高海拔和高地形起伏的林芝(图1d)等地LAI产品质量较差。(2)同源产品对比发现:山区LAI产品改进效果不显著。MODIS C6主算法反演比例低于MODIS C5,时间连续性优于MODIS C5;GEOV2由于融合 ± 60 天数据,可用LAI比例和连续性明显改善。GEOV1和GEOV2 LAI差值多在1.0以内,而MODIS C5和MODIS C6差值在地形起伏剧烈区域大于1。同源产品LAI差值高于非同源产品。(3)地形起伏度对山区LAI变化影响最小,高

程、植被类型和气候差异对山区 LAI 变化起主导作用,且对不同源反演的 LAI 贡献量 q 大小不一致。

参考文献(References):

- [1] JIN H A, LI A L, WANG J D, et al. Improvement of spatially and temporally continuous crop leaf area index by integration of CERES-Maize model and MODIS data. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 1-12.
- [2] CLAVERIE M, MATTHEWS J L, VERMOTE E F, et al. A 30+ year AVHRR LAI and FAPAR climate data record: Algorithm description and validation. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 263.
- [3] CHANEY N W, METCALFE P, WOOD E F. Hydroblocks: A field-scale resolving land surface model for application over continental extents. *Hydrological Processes*, 2016, 30(20): 3543-3559.
- [4] MYNENI R B, HOFFMAN S, KNYAZIKHIN Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 214-231.
- [5] YAN K, PARK T, YAN G J, et al. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. Part 1: Consistency and improvements. *Remote Sensing*, 2016, 8(5): 359.
- [6] VERGER A, BARET F, WEISS M. Near real-time vegetation monitoring at global scale. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(8): 3473-3481.
- [7] XIAO Z Q, LIANG S L, WANG J D, et al. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [8] BARET F, MORISSETTE J T, FERNANDES R A, et al. Evaluation of the representativeness of networks of sites for the global validation and intercomparison of land biophysical products: Proposition of the CEOS-BELMANIP. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1794-1803.
- [9] MA M G, CHE T, LI X, et al. A prototype network for remote sensing validation in China. *Remote Sensing*, 2015, 7(5): 5187-5202.
- [10] JIN H A, LI A L, BIAN J H, et al. Intercomparison and validation of MODIS and GLASS leaf area index (LAI) products over mountain areas: A case study in Southwestern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 55: 52-67.
- [11] CAMACHO F, CERNICCHARO J, LACAZE R, et al. GEOV1: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 2: Validation and intercomparison with reference products. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137: 310-329.
- [12] JIANG C Y, RYU Y, FANG H L, et al. Inconsistencies of interannual variability and trends in long-term satellite leaf area index products. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4133-4146.
- [13] PASOLLI L, ASAM S, CASTELLI M, et al. Retrieval of leaf area index in mountain grasslands in the Alps from MODIS satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 165: 159-174.
- [14] 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. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 438-450. [YANG Y S, LI A N, JIN H A, et al. Intercomparison among GEOV1, GLASS and MODIS LAI products over mountainous area in Southwestern China. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3): 438-450.]
- [15] FU G, WU J S. Validation of MODIS collection 6 FPAR/LAI in the alpine grassland of the Northern Tibetan Plateau. *Remote Sensing Letters*, 2017, 8(9): 831-838.
- [16] YAN K, PARK T, YAN G, et al. Evaluation of MODIS LAI/FPAR Product Collection 6. Part 2: Validation and Intercomparison. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 460.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. [WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [18] LI X W, XIE Y F, WANG J F, et al. Influence of planting patterns on fluoroquinolone residues in the soil of an intensive vegetable cultivation area in northern China. *Science of the Total Environment*, 2013, 458: 63-69.
- [19] REN Y, DENG L Y, ZUO S D, et al. Quantifying the influences of various ecological factors on land surface tempera-

- ture of urban forests. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 519-529.
- [20] 李俊刚, 闫庆武, 熊集兵, 等. 贵州省煤矿区植被指数变化及其影响因子分析. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(3): 374-378. [LI J G, YAN Q W, XIONG J B, et al. Variation of vegetation index in coal mining areas in Guizhou province and its affecting factors. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 374-378.]
- [21] 南希, 李爱农, 陈昱, 等. 竖版中国数字山地图(1:670万)的设计与编制. *遥感技术与应用*, 2016, 31(3): 451-458. [NAN X, LI A N, CHEN Y, et al. Design and compilation of digital mountain map of China (1:6700000) in vertical layout. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(3): 451-458.]
- [22] KNYAZIKHIN Y, MARTONCHIK J, MYNENI R B, et al. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D24): 32257-32275.
- [23] YANG W Z, TAN B, HUANG D, et al. MODIS leaf area index products: From validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1885-1898.
- [24] BARET F, WEISS M, LACAZE R, et al. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 137: 299-309.
- [25] LI Z, TANG H, ZHANG B, et al. Evaluation and intercomparison of MODIS and GEOV1 global leaf area index products over four sites in North China. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(3): 6196-6216.
- [26] VERGER A, BARET F, WEISS M, et al. GEOV2/VGT: Near real time estimation of global biophysical variables from VEGETATION-P data// *Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, Multitemp 2013*. IEEE, 2014.
- [27] FRIEDL M A, SULLA-MENASHE D, TAN B, et al. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 168-182.
- [28] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12. [ZHENG J Y, YIN Y H, LI B Y. A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 3-12.]
- [29] WEISS M, BARET F, GARRIGUES S, et al. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: Validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(3): 317-331.
- [30] PIAO S L, FANG J Y, JI W, et al. Variation in a satellite-based vegetation index in relation to climate in China. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(2): 219-226.
- [31] 彭飞, 孙国栋. 1982-1999年中国区域叶面积指数变化及其与气候变化的关系. *气候与环境研究*, 2017, 22(2): 162-176. [PENG F, SUN G D. Variation of leaf area index in China from 1982 to 1999 and its relationship with climate change. *Climatic and Environmental Research*, 2017, 22(2): 162-176.]
- [32] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [33] WANG J F, ZHANG T L, FU B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 250-256.
- [34] GONSAMO A, CHEN J M. Evaluation of the GLC 2000 and NALC 2005 land cover products for LAI retrieval over Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2011, 37(3): 302-313.
- [35] CHEN B, HUANG B, XU B. Constructing a unified framework for multi-source remotely sensed data fusion//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2016.

Intercomparison and evaluation of influencing factors among different LAI products over mountainous areas

JING Jin-cheng^{1,2,3}, JIN Hua-an¹, TANG Bin², LI Ai-nong¹

(1. Research Center for Digital Mountain and Remote Sensing Application, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Sichuan Provincial Coal Design & Research Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: The validation of LAI products not only provides quantitative quality description, but also plays an important part in the improvement of retrieval algorithm and understanding of uncertainties regarding to land surface process models over rugged surfaces. This study evaluated the performance of MODIS (C5, C6), Geoaldn2 (GEOV1, GEOV2) LAI products using intercomparison methods over Southwestern China. The spatiotemporal distribution of integrity and consistencies, such as the percentage of main algorithm, smoothness index, average value during growing season, yearly mean LAI bias and root mean square error (RMSE), respectively, were investigated during the period 2001-2016. Meanwhile, different versions of the same data source LAI products were compared so as to get a clear understanding of improvement about the new one over heterogeneously hilly regions. Lastly, four factors, such as topography (altitude and relief amplitude), vegetation types, and climate regionalization were selected to assess the influence of different underlying surfaces on LAI products using the Geodetector. The results show that spatial and temporal consistency of these LAI products is good over most areas. All LAI products exhibit a higher percentage of good quality data (i. e. successful retrieval) in mountainous areas, and GEOV2 LAI is higher than others. The percentage in altitude and higher relief amplitude area seems to be low. GEOV2 LAI shows smoother temporal profiles than others, and Geoland2 is smoother than MODIS LAI. It is clear that MODIS C5 is smoother than MODIS C6, and GEOV2 is superior to GEOV1. RMSE and yearly mean LAI bias between one and another LAI product are vulnerable to topographic indices, especially to altitude. Q-statistic in Geodetector is smallest related to relief amplitude, biggest to vegetation for MODIS LAI product, and biggest to climate for Geoland2 LAI. Altitude, vegetation, and climate play a dominant role in spatial distribution of LAI. The validation experience demonstrates the importance of topography, vegetation and climate for LAI estimation over mountainous areas. Considerable attention will be paid to the production of higher quality LAI products in topographically complex terrain.

Keywords: leaf area index; Southwestern China; intercomparison; Geodetector; spatial heterogeneity