

地面站点叶面积指数观测的空间代表性评价 ——以 CERN 站网观测为例

徐保东^{1 2 3}, 李静^{1 2}, 柳钦火^{1 2}, 曾也鲁^{1 3},
尹高飞^{1 3}, 赵静^{1 2}, 杨乐^{1 2}

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 在叶面积指数 LAI(Leaf Area Index) 产品真实性检验中, 地面站点的多时相连续观测 LAI 数据是重要的验证数据来源。当站点观测范围与产品像元尺度不一致时, 站点观测 LAI 直接用于产品验证可能为验证结果带来误差。因此, 在验证之前需要分析站点观测对像元尺度的空间代表性, 选择空间代表性好的观测来验证产品, 从而减小尺度效应带来的验证误差。以往的研究只是简单的定性说明研究区域, 并直接用站点测量数据对产品进行验证, 缺少一套系统的站点观测在产品像元尺度内空间代表性评价的方法体系。本文提出了站点 LAI 观测的空间代表性评价方法, 建立了评价指标 DVTP(Dominant Vegetation Type Percent)、RSSE(Relative Spatial Sampling Error) 和 CS(Coefficient of Sill) 构建了空间代表性评价分级体系。以中国生态系统研究网络 CERN(Chinese Ecosystem Research Network) 农田站和森林站 LAI 观测为例, 对站点观测在 1 km 产品像元尺度内空间代表性进行评价, 并分析评价前后站点观测对 MODIS LAI 产品验证精度的影响。结果显示, 本文提出的方法能够有效地对不同站点 LAI 观测在产品像元尺度内空间代表性进行质量分级, 且年际间的站点观测空间代表性较为一致。评价方法能够去掉在特定产品像元尺度下空间代表性不好的观测数据, 一定程度上提高验证数据集对产品验证精度的可靠性。

关键词: 空间代表性评价, 产品验证, 站点观测, 叶面积指数, CERN 站网

中图分类号: TP79

文献标志码: A

引用格式: 徐保东, 李静, 柳钦火, 曾也鲁, 尹高飞, 赵静, 杨乐. 2015. 地面站点叶面积指数观测的空间代表性评价——以 CERN 站网观测为例. 遥感学报, 19(6): 910-927

Xu B D, Li J, Liu Q H, Zeng Y L, Yin G F, Zhao J and Yang L. 2015. Spatial representativeness estimation of station observation in validation of LAI products: A case study with CERN in-situ data. Journal of Remote Sensing, 19(6): 910-927 [DOI: 10.11834/jrs.20154246]

1 引言

叶面积指数 LAI(Leaf Area Index) 通常定义为单位地表面积上叶子表面积总和的一半(Chen 和 Black, 1992)。LAI 是描述植被冠层功能的重要参数, 是影响植被光合作用、蒸散以及陆表能量平衡的重要生物物理参量(Bonan, 1995; Tian 等, 2002), 也是气候、水文以及生态系统模型中的关键输入因子(Sellers 等, 1997)。目前通过遥感技术手段发展

了许多区域以及全球尺度的 LAI 产品, 如 GLOB-CARBON(Deng 等, 2006)、CYCLOPES(Baret 等, 2007) 和 MODIS(Myneni 等, 2002) 等。但不同产品之间存在着明显的不一致性(Garrigues 等, 2008), 需要对 LAI 产品进行真实性检验(Morisette 等, 2002, 2006)。遥感产品真实性检验的误差影响因素是多方面的, 包括遥感数据的预处理误差、模型和反演方法的误差、以及地面验证数据集的误差等(孙晨曦等, 2013, 2014; 刘良云, 2014; 吴小丹等,

收稿日期: 2014-10-24; 修订日期: 2015-05-19; 优先数字出版日期: 2015-05-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2013CB733401); 国家自然科学基金(编号: 41271366); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(编号: 2012AA12A304, 2012AA12A305)

第一作者简介: 徐保东(1990—) 男, 博士研究生, 主要从事叶面积指数产品算法及验证研究。E-mail: xubd@radi.ac.cn

通信作者简介: 李静(1978—) 女, 副研究员, 主要从事植被辐射传输模型、叶面积指数反演等研究。E-mail: lijing01@radi.ac.cn

2014)。目前,对数据预处理误差、模型及反演方法的误差都有较广泛的研究(Yang等,2006)。但是,对地面验证数据集在产品像元尺度内误差分析的研究却较为有限。地面验证数据集的分析评价是获得可靠的遥感产品真实性检验结果的一个重要环节。

目前 LAI 产品真实性检验主要分为直接验证和交叉验证两种方式(Garrigues等,2008)。交叉验证主要通过产品间的对比,衡量不同产品的时空连续性与一致性。直接验证通过地面实测 LAI 数据与产品对比,从而得到产品的绝对精度,是产品真实性检验的主要方式。地面 LAI 数据的获取主要包括野外实验测量和站点组网观测两种方式。目前 LAI 产品真实性检验大多基于野外实验获取的实测 LAI 数据,以高空间分辨率(高分)影像为辅助对产品进行验证(Chen等,2002;Cohen等,2003;Tan等,2005;Pisek和Chen,2007;Weiss等,2007)。野外实验测量目的性强,针对验证参数开展特定的实验,如全球范围开展的 VALERI(Baret等,2005;Rossello和Baret,2007)、BigFoot(Campbell等,1999;Cohen等,2009)项目实验以及其他区域性的观测实验(Lu等,2005;DeKauwe等,2011;Claverie等,2013;Duan等,2014)等。这些实验获取数据的优点是能与卫星保持同一时相、配套参数齐全、根据采样方法通过多点观测获取高分参考图进行多尺度验证(曾也鲁等,2013;Zeng等,2014)。在全球主要大洲如北美洲(Shabanov等,2005;Verbyla,2005;Abuelgasim等,2006;Cohen等,2006;DeKauwe等,2011)、欧洲(Wang等,2004;Tan等,2005;Huang等,2006;Claverie等,2013)、亚洲(Yang等,2007;杨飞等,2010;孙晨曦等,2013,2014)、非洲(Fensholt等,2004)和南美洲(Aragao等,2005)等区域都开展有大量的 LAI 野外观测实验。但是,这种检验方法也存在着不足,如实验观测空间范围有限;观测的植被类型较单一;由于观测成本较高,观测时相有限且多不连续等。因此,基于野外实验观测对产品的真实性检验是有限的,尤其是对全球尺度的 LAI 产品。除此之外,不同的野外观测实验采用的观测方法不同,也会给产品检验带来误差。因此,对于全球 LAI 产品验证,迫切需要大面积覆盖、长时间连续、具有统一观测规范的台站 LAI 观测数据(傅伯杰等,2007)。

目前,在全球范围内布设有大量的包括 LAI 等参数的观测台站。如国际通量观测研究网络

(FLUXNET)分为7个主要的区域性通量研究网络,包含全球500多个台站,成立于1995年,LAI是其观测的一个重要参数(Baldocchi等,1996)。中国生态系统研究网络 CERN(Chinese Ecosystem Research Network)包含6种不同地表类型共40个台站,成立于1988年,包括 LAI 等一系列生态特征参数的观测(Fu等,2010)。大量的站点观测提供了丰富的全球分布、覆盖不同植被类型、时间序列连续的地面 LAI 观测数据,是进行 LAI 产品真实性检验重要的验证数据来源。

但是,目前站点测量 LAI 的方式主要是在站点周围划定几十米的样方,进行单点观测(吴冬秀等,2007)。而全球 LAI 遥感产品多是百米甚至公里级尺度,由于地表空间异质性等因素的影响,将站点数据与遥感产品直接比较会存在明显的尺度不匹配问题(Yang等,2006)。因此,利用站点观测 LAI 进行产品验证时,需要首先确定其在产品像元尺度内的空间代表性,减小地面验证数据集带来的误差。当前,在其他参数遥感产品真实性检验中,发展了多种站点观测空间代表性评价方法,主要分为点面特征比较及空间异质性评价两种方法(徐保东等,2015)。点面特征比较法通过将站点观测与区域整体值的分布进行比较,设定阈值评价站点观测的空间代表性。其缺点是未考虑区域整体的空间变异性,评价结果不稳定。空间异质性指标是通过衡量区域变异程度来间接说明站点观测的空间代表性程度,但也存在着未考虑站点观测落入异常值导致空间代表性程度降低等的不足。这两种评价方式分别在蒸散、地表温度以及反照率等遥感产品真实性检验中得到了广泛的应用(Román等,2009;王圆圆等,2011;Cescatti等,2012;Jia等,2012;Wang等,2012)。

在 LAI 产品验证中,目前还较少研究站点观测在像元尺度内的空间代表性,站点观测与遥感产品的直接比较为验证结果带来较大的不确定性。因此,有必要对站点观测 LAI 的空间代表性进行评价。由于参数物理含义不同,评价方法也不尽相同,需要针对 LAI 观测进行空间代表性评价方法的研究,为站点观测 LAI 在产品像元尺度内的空间代表性程度进行定量描述,进而为 LAI 产品真实性检验提供更可靠的验证数据集。

本文设计了针对站点 LAI 观测在产品像元尺度内的空间代表性评价指标,提出地面观测 LAI 的空间代表性分级方法,分析讨论了站点观测空间代表

性的影响因素。最后,以 CERN 站网观测 LAI 为例,对森林和农田类型的站点观测在 1 km 尺度的空间代表性进行评价与讨论,并以 MODIS LAI 产品为例,分析评价前后对 LAI 产品真实性检验结果的影响。

2 LAI 观测空间代表性评价方法

2.1 LAI 观测空间代表性评价指标

空间代表性是指在一个特定时空维度上测量的数据,能够多大程度上反映在这个特定范围下的真实情况(Nappo 等,1982)。由于 LAI 产品反映的是公里级像元整体特征,而站点 LAI 观测的是像元内部分区域特征。因此,最直接的评价方式是点观测对像元尺度整体特征在统计意义上的代表性,借助于高空间分辨率影像,构建空间采样误差 SSE (Spatial Sampling Error) 指标,用于衡量站点观测对应的高分辨像元与高分辨率影像在产品像元尺度内聚合后的值的差异(Hakuba 等,2013)。当两者间差异小于一定阈值,说明站点观测能够一定程度上代表像元尺度特征。为便于不同时相观测的不同 LAI 相互比较,采用相对空间采样误差 RSSE (Relative Spatial Sampling Error) 来描述。SSE 和 RSSE 的定义如式(1)(2)所示。

$$SSE(s) = |x_s - \bar{x}(s)| \quad (1)$$

$$RSSE(s) = \frac{SSE(s)}{x_s} \times 100 \quad (2)$$

式中, s 代表像元尺度大小。像元尺度 s 的 RSSE 需要借助更高分辨率的图像计算得到。 $\bar{x}(s)$ 为高分辨率 LAI 参考图在站点位置周边像元尺度 s 内的算术平均值, x_s 为站点位置对应的高分参考图像元 LAI 值。RSSE 值越小,说明站点观测值与产品像元尺度值越接近,站点 LAI 观测在像元尺度内的空间代表性程度越高。

点面特征比较是对地面观测在特定尺度内的整体特征进行分析描述,是一个重要的评价指标。但是,单凭这个指标来确定站点观测空间代表性还是不稳定的。即使点观测 LAI 与像元尺度 LAI 一致,但如果像元内空间异质性较大,点观测 LAI 仍然不能够代表像元尺度的 LAI(Liang 等,2002; Nightingale 等,2008)。并且,站点观测的空间代表性误差与空间异质性密切联系(李新,2014)。因此, LAI 观测空间代表性评价的另一个指标为像元尺度的空间异质性定量描述。植被 LAI 的空间异

质性分为植被与非植被混合带来的空间异质性以及植被内部不同长势带来的空间异质性两种方式(Chen 等,2011)。地物类型的不同带来的空间异质性通过地表覆盖分类图进行分析,以计算像元尺度内主要植被类型比例 DVTP (Dominant Vegetation Type Percent) 指标来说明。DVTP 指标计算如式(3)所示:

$$DVTP(s) = \frac{A(s)}{\sum_{i=1}^{N(s)} n_i(s)} \times 100 \quad (3)$$

式中, s 代表像元尺度大小。像元尺度 s 的 DVTP 需要更高尺度的分类图进行计算。 $A(s)$ 代表站点观测的植被类型在产品像元尺度的面积, $n_i(s)$ 代表像元尺度为 s 的第 i 类植被类型的面积, $N(s)$ 代表像元尺度为 s 的总地物类别个数。DVTP 越大,说明像元尺度内站点观测的植被类型所占比例越高,站点观测的空间代表性程度也越高。

对于不同植被密度和长势带来的空间异质性,需借助高空间分辨率影像进行分析。NDVI 和 LAI 等都能够描述植被长势信息,都可用于分析空间异质性。由于本文是针对站点 LAI 观测的空间代表性进行分析,且 LAI 具有更明确的物理意义,是分析像元尺度内 LAI 空间异质性特征的首选参数。在高分辨率影像质量不好导致不适合进行定量反演 LAI 时,可选用 NDVI 进行分析。作为定量描述空间异质性的有效工具,半方差函数在遥感地统计学中应用非常普遍(Cohen 等,1990; Stoyan 等,2000; Sertel 等,2007)。半方差函数定义为,在一定距离间隔时所有采样值之差的平方和的均值的一半,如式(4)所示(Garrigues 等,2006):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (4)$$

式中, $N(h)$ 为两个点间隔 h 的点对数总和; $z(x_i)$ 代表在像元 x_i 处高分 LAI/NDVI 参考图的值, $z(x_i + h)$ 代表距离像元 x_i 间距 h 时高分 LAI/NDVI 参考图的值。在产品像元尺度内,计算每个间距 h 时的半方差值,根据 h 和对应的半方差值绘制半方差图像,通过变异函数模型(球面模型、指数模型或高斯模型等)来拟合半方差图像,得到反映空间结构及属性变化的模型参数。根据以往学者采用半方差函数在遥感中的分析可知,球面模型通常能够反映实际地表空间变异情况,且模型拟合精度较高(Román 等,2009; Wang 等,2012,2014)。因此本文采用球面模型拟合得到相应的模型参数,用于定量反映空间异质性程度,模型表达如式(5)所示:

$$\gamma_{\text{sph}}(h) = \begin{cases} c_0 + c \cdot \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ c_0 + c & h > a \end{cases} \quad (5)$$

模型拟合包含变程 (range) a 、块金值 (nugget) c_0 及基台值 (sill) $c_0 + c$ 等参数。变程表示采样点之间具有相关性的最大距离、块金值表示高分辨率像元内的变异及其他随机因素引起的空间异质性、基台值代表区域内的最大变异程度 (Román 等, 2009; Wang 等, 2014)。因此, 在站点 LAI 观测的空间代表性评价中, 基台值可用于判断像元尺度内的整体空间异质性程度。为了使不同站点观测 LAI 在不同时相的空间异质性能相互比较, 构建基台系数 CS (Coefficient of Sill) 指标来进行评价。CS 定义如式 (6) 所示:

$$\text{CS}(s) = \frac{\sqrt{c_0(s) + c(s)}}{\mu(s)} \times 100 \quad (6)$$

式中, s 代表产品像元尺度大小。像元尺度 s 的 CS 需要更高分辨率的 LAI/NDVI 参考图进行计算。 $c_0(s) + c(s)$ 为在像元尺度 s 内高分辨率 LAI/NDVI 参考图的基台值, $\mu(s)$ 为在像元尺度 s 内高分辨率 LAI/NDVI 参考图的均值。当 CS 越大, 说明产品像元尺度内相对空间变异程度越大。像元内部空间异质性越大, 则站点观测 LAI 的空间代表性程度越低。

由于不同产品尺度大小所包含的地物特征是不一致的, 因此以上评价指标都是与尺度相对应的, 特定尺度计算得到相应的评价指标值, 从而得到站点在相应尺度的空间代表性特征。

2.2 LAI 观测的空间代表性质量分级

根据以上评价指标可见, 当站点所处产品像元内植被类型不单一时, 站点观测 LAI 对于像元尺度的 LAI 真值没有空间代表性, 不能用于相应尺度产品的真实性检验。当站点所处产品像元内植被类型单一, 但像元尺度均质性相对较差, 或点面特征存在一定程度不一致时, 站点观测用于产品真实性检验可能存在一定程度的检验误差。当植被类型单一、点面特征一致且像元尺度内 LAI 比较均质时, 站点 LAI 观测是用于产品尺度真实性检验最理想的情况。基于以上分析, 对站点观测 LAI 的准确使用需要对其在产品像元尺度内的空间代表性进行分级。

DVTP、RSSE 和 CS 3 个指标分别对站点观测的植被类型分布、点面特征一致性和站点所处像元内部空间异质性情况进行定量描述。它们是评价站

点观测对周边地表空间代表性程度的主要参量。但是这 3 个指标在什么定量水平时可以说明此站点观测具有空间代表性, 客观上并没有一个明确的标准。为了进行定量分级, 本文分别对 DVTP、RSSE 和 CS 设定了阈值。DVTP 的阈值设定是根据 MODIS 地表分类产品 (MCD12Q1) 像元分类规则, 以像元内某一类地物比例达到 60% 进行像元类别确定 (Strahler 等, 1999)。当 DVTP 大于 60% 时, 认为站点观测的植被类型对产品像元尺度的植被类型具有空间代表性。反之, 认为站点观测的单一植被类型不能代表整个产品像元, 空间代表性等级最低。对于 RSSE 和 CS, 本文以 20% 为临界阈值。当 RSSE 和 CS 都小于这个阈值时, 认为站点观测的点面特征一致, 且站点所处像元均质性较好, 站点观测 LAI 的空间代表性等级最高。当 RSSE 小于阈值而 CS 大于阈值时, 说明站点观测 LAI 值与像元尺度 s 的均值比较一致, 但是站点周围具有一定的异质性, 站点观测 LAI 的空间代表性稳定度不高。当 RSSE 大于阈值而 CS 小于阈值时, 说明像元内比较均质, 但是站点处的观测可能处于像元尺度异常点处等原因, 站点 LAI 观测在像元尺度上的空间代表性较低。当 RSSE 和 CS 均大于阈值时, 说明不仅像元尺度内空间异质性大, 而且站点 LAI 观测与像元尺度均值差异也大, 空间代表性等级更低, 误差也更大。

本文中 RSSE 和 CS 的阈值是为了进行分级而设定的一个确定值。RSSE 和 CS 阈值选择的原则是使分级后每个等级内观测在特定尺度上的空间代表性差异较为一致, 从而保证同一等级观测在特定尺度上空间代表性较为稳定。由于异质性特征不同, 对于不同植被类型, RSSE 和 CS 的阈值也不尽相同。本文目前暂未按照类型进行进一步的分析, 仅选择一个相对较宽泛的阈值进行分析。

综上所述, 对站点 LAI 观测在产品像元尺度内空间代表性分为五级, 具体分级规则如表 1 所示。

2.3 评价方法流程

LAI 地面观测的空间代表性评价指标需要基于在相应像元尺度内的 LAI/NDVI 等分布特征进行计算, 需要对应观测时相比待评价的像元尺度更高空间分辨率的遥感影像。使用不同的高分辨率影像, 评价得到的异质性特征也是不同的。但是, 由于遥感数据的限制, 高分辨率影像的选择也是有限的。相对于 1 km 或更低空间分辨率, 30 m 空间分辨率能够代表冠层尺度, 并能较好地反映低分辨率产品

像元内部空间异质性信息(Garrigues 等 2006; Yin 于 30 m 分辨率,则需要更高空间分辨率的影像进行
等 2015) ,且较容易获取 ,可用于实际评价。相对 异质性分析。

表 1 站点 LAI 观测空间代表性质量分级规则

Table 1 Criterion of spatial representativeness grading for station observed LAI dataset

代表 等级	空间代表性指标			质量等级说明
	DVTP > 60%	RSSE < 20%	CS < 20%	
0	√	√	√	质量最好 站点 LAI 观测能够代表像元尺度 ,代表性程度最高
1	√	√	×	站点 LAI 观测与产品像元尺度内均值较一致 ,但像元内变异程度较大 ,代表性稳定程度不高
2	√	×	√	产品像元尺度内较均一 ,但站点 LAI 观测处在像元内异常点处等原因 ,代表性程度较低
3	√	×	×	产品像元内地表类型单一 ,但植被长势差异较大 ,站点 LAI 观测的代表性程度更低
4	×	—	—	产品像元内地表类型多样 ,站点 LAI 观测代表性程度最低

站点观测在像元尺度内空间代表性评价前需要获取站点对应时相的高分辨率影像 ,在经过辐射校正、几何校正等数据预处理后 ,根据获取的高分辨率影像质量 ,对较好质量的影像通过物理模型结合地表覆盖分类图反演 LAI 高分参考图。如

果遥感影像受天气等因素影响较大 ,质量不高 ,可通过 NDVI 参考图进行评价指标的计算。然后根据评价指标的阈值设定 ,分别计算站点 LAI 观测的空间代表性等级。评价方法流程图如图 1 所示。

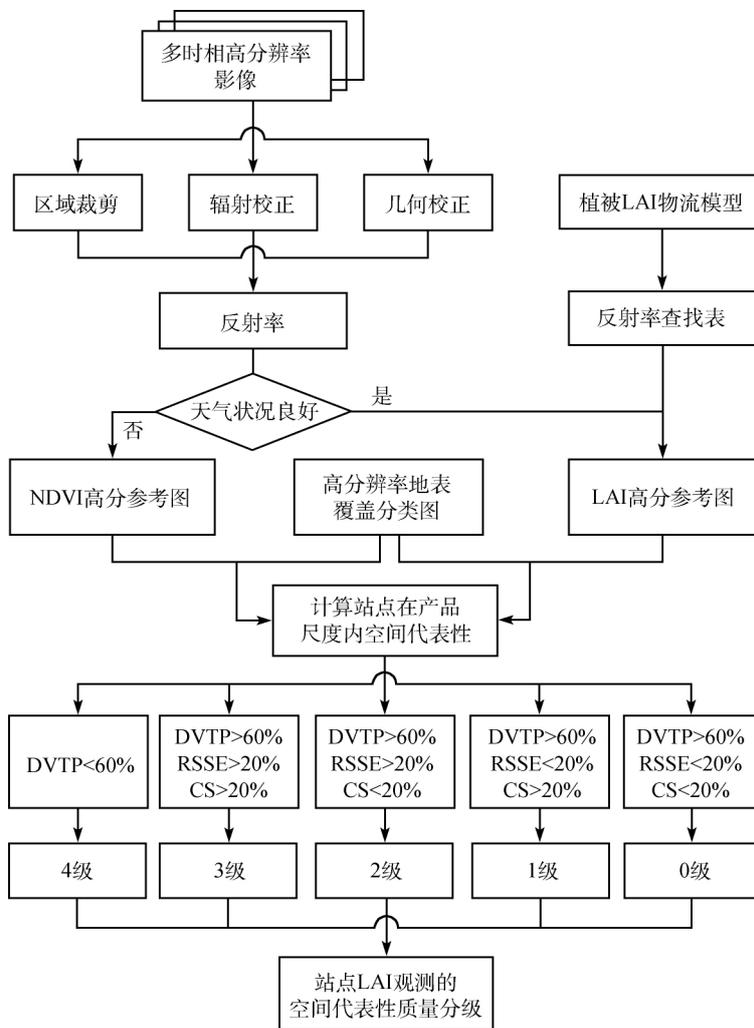


图 1 地面 LAI 观测空间代表性评价流程图

Fig. 1 Flow for evaluating spatial representativeness of station observed LAI dataset

基于以上流程获得的是一次观测的空间代表性评价结果。对于一个站点长时间连续的观测进行空间代表性评价,可获得对应站点的整体空间代表性特征,进而获得站点的空间代表性评价。本文只考虑对站点每个观测时相分别进行空间代表性评价。

3 研究区域及数据

本文使用中国生态系统研究网络(CERN)站点 LAI 观测数据,对提出的空间代表性方法进行分析。

3.1 CERN 站点及 LAI 观测介绍

根据站点周边地表覆盖类型的不同,CERN 生态站网分为 15 个农田站、10 个森林站、6 个水域站、6 个荒漠站、2 个草地站以及 1 个城市站(Fu 等, 2010)。对于植被 LAI 产品的验证,考虑到站点观测类型与观测个数,本文选择农田站与森林站的 LAI 观测进行空间代表性评价分析。CERN 站网农田站和森林站位置及对应的主要植被类型如表 2 所示。

站点观测 LAI 方法根据植被类型的不同而不尽相同。农田站点 LAI 测量方法主要采用叶面积仪扫描法进行测量(吴冬秀等, 2007)。通常,首先在观测场划定 40 m × 40 m 以上较为均质的 I 级样方,然后在 I 级样方内分为 64 个 5 m × 5 m 的 II 级样方。每次测量选择 4—6 个 II 级样方内的农作物进行测量。森林站点一般采用冠层分析仪测量 LAI(吴冬秀等, 2007)。首先划定 100 m × 100 m 左右的 I 级样方,然后在 I 级样方内分为 100 个 10 m × 10 m 的 II 级样方,每次测量随机选择 6—10 个 II 级样方进行测量。将森林垂直结构由上向下分为乔木层、灌木层以及草本层等 3 层测量,首先在灌木层上测量乔木层 LAI₀,然后在灌木层下草本层上测量乔木层和灌木层 LAI 总和 LAI₁,最后在草本层下测量 3 层结构 LAI 总和 LAI₂。计算的乔木层 LAI 值为 LAI₀,灌木层的 LAI 值为 LAI₁—LAI₀,草本层的 LAI 值为 LAI₂—LAI₁。由于遥感影像反映的 3 层垂直结构的综合反射率信息,因此本文将 3 层结构 LAI 值求和作为森林站点观测 LAI 值。

根据 CERN 站网提供的 LAI 观测数据,本文选用 2010 年和 2011 年的 CERN 站网观测进行分析。

表 2 农田站与森林站分布与主要植被类型
Table 2 Geographical distribution and dominant vegetation type of cropland and forest stations

站点	代码	经度/°E	纬度/°N	主要植被类型
河北栾城站	LCA	114.69	37.89	小麦、玉米
河南封丘站	FQA	114.55	35.02	小麦、玉米
辽宁沈阳站	SYA	123.37	41.52	大豆、玉米
山东禹城站	YCA	116.57	36.83	小麦、玉米
江苏常熟站	CSA	120.70	31.55	小麦、水稻
四川盐亭站	YGA	105.46	31.27	小麦、玉米
农 陕西长武站	CWA	107.68	35.24	小麦、玉米
田 广西环江站	HJA	108.32	24.74	大豆、玉米
站 西藏拉萨站	LSA	91.34	29.68	小麦
湖南桃源站	TYA	111.44	28.93	水稻
江西鹰潭站	YTA	116.92	28.21	水稻
陕西安塞站	ASA	109.32	36.86	大豆
江西千烟洲站	QYA	115.07	26.74	水稻
黑龙江海伦站	HLA	126.97	47.45	大豆
新疆阿克苏站	AKA	80.83	40.62	棉花
北京森林站	BJF	115.43	39.96	阔叶林
湖南会同站	HTF	109.61	26.85	混交林
四川茂县站	MXF	103.90	31.69	阔叶林
广东鹤山站	HSF	112.90	22.68	混交林
森林 广东鼎湖山站	DHF	112.54	23.17	混交林
吉林长白山站	CBF	128.10	42.40	阔叶林
湖北神农架站	SNF	110.50	31.32	阔叶林
四川贡嘎山站	GGF	101.99	29.57	针叶林
云南哀牢山站	ALF	101.03	24.55	混交林
云南西双版纳站	BNF	101.20	21.96	混交林

3.2 站点高分辨率 NDVI/LAI 参考图获取

在进行空间代表性评价中,需要包含站点位置的高分辨率的分类图和 NDVI/LAI 参考图,以分析观测点周围 1 km 范围内的异质性特征。本研究中 DVTP 的计算基于 Gong 等人(2012)发布的 30 m 全球地表覆盖分类图(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>)。基于站点的高分辨率 LAI/NDVI 参考图,根据式(2)(6),可计算得到 RSSE 和 CS 的指标值。根据分级规则,只有当 DVTP 大于 60% 时,才需要进一步计算 RSSE 和 CS 以进行分级。因此,首先选择 DVTP 大于 60% 的 CERN 站点,包括 10 个农田站和 9 个森林站,下载对应的 HJ-1 A/B 的 CCD 数据用于生产 LAI/NDVI 参考图。由于大气中云、水汽

以及气溶胶等因素影响,部分站点地面观测时相无对应的质量较好的影像数据。

图2分析了2010年农田和森林站点地面观测时相对应的HJ-1/CCD影像的获取情况。由于南方森林地区云量较多,森林的无云HJ-1影像缺失

率较高,从详细时相绝对差异的对比也可看出,HJ-1/CCD影像时相与农田站和森林站观测时相差异均值分别为3天和5.64天,因此获取的影像数据能够基本满足与地面LAI观测时相同步的要求。

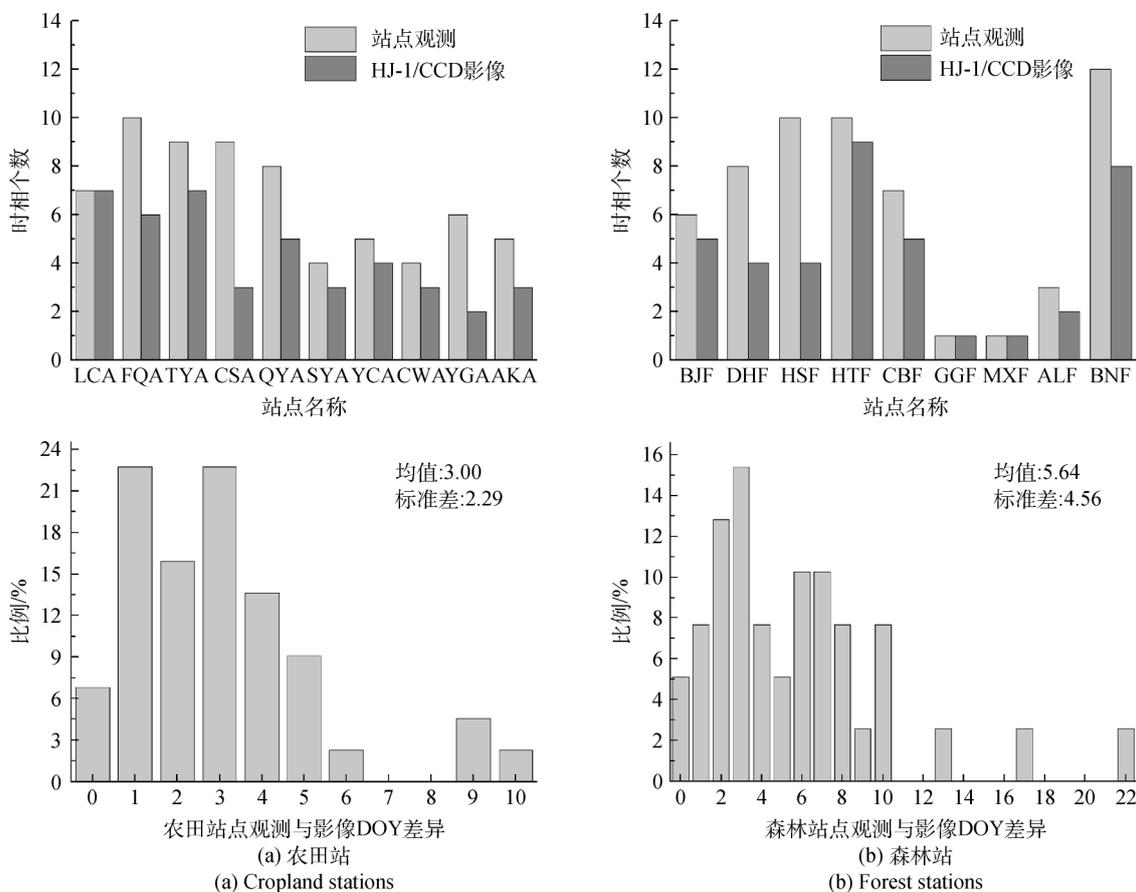


图2 HJ-1/CCD影像时相与农田站和森林站地面测量时相个数与DOY对比
Fig.2 Comparison of the number of observing dates and DOY (Day of Year) between HJ-1/CCD images and ground observations at cropland stations and forest stations

根据获取的HJ-1/CCD影像,首先对影像进行几何精校正,然后经过辐射定标及6S模型进行大气校正(Zhong 2011),最后以站点所处像元位置为中心,裁剪5 km × 5 km区域用于计算LAI/NDVI高分参考图。

由于MODIS LAI产品Collection 4(C4)版本建立的查找表用于反演LAI时,存在着输入分类数据及模型误差都较大的问题(Yang等 2006)。因此,在改进后的Collection 5(C5)版本对输入的分类数据及建立查找表的模型都进行了调整,精度有一定的提高,但是仍然没有达到GCOS的±0.5的精度要求(Fang等 2012)。因此,本文LAI高分参考图采用基于已有物理模型,针对特定的HJ-1影像建

立查找表进行查找或拟合经验关系进行反演。反演时,针对每一幅HJ-1影像,把太阳和观测天顶角以及相对方位角输入到模型中,分别建立查找表用于LAI反演。对于农作物植被类型,利用PRO-SAIL模型反演(Verhoef, 1984; Jacquemoud和Barret, 1990)。反演时需确定模型需要的植被组分参数,经查阅不同学者的研究,并结合农田站点具体的作物类型,模型输入参数的具体设置如表3所示。对于站点观测的森林植被类型,选用四尺度模型(Chen等, 1997),输入参数采用模型内置的针叶林和阔叶林组分参数建立查找表,然后建立与植被指数(NDVI或SR)的经验关系来反演LAI。

表3 不同作物类型 PROSAIL 模型输入参数

Table 3 Values of the input parameters for PROSAIL model

作物类型	N	参数				hspot
		C_{ab} $l(\mu\text{g}/\text{cm}^2)$	C_w l/cm	C_m $l(\text{g}/\text{cm}^2)$	ALA $l(^{\circ})$	
玉米 ^a	1.6	50	0.015	0.006	50	0.25
小麦 ^b	1.6	40	0.02	0.005	63.24	0.2
水稻 ^c	1.5	30	0.02	0.004	63.24	0.1
大豆 ^d	1.7	40	0.02	0.009	45	0.2
棉花 ^e	1.5	45	0.03	0.008	45	0.15

注: a: Duan 等 2014; Yang 等 2012; González-Sanpedro 等 2008; Koetz 等 2005。

b: Botha 等 2010; Wang 等 2013; Richter 等 2011。

c: Darvishzadeh 等 2012。

d: Breunig 等 2013。

e: Dorigo 2012。

N 为叶肉层数; C_{ab} 为叶绿素含量; C_w 为叶片含水量; C_m 为叶片干物质含量; ALA : 平均叶倾角; $hspot$ 为热点因子大小。

根据所获取的 HJ-1/CCD 影像质量,对 10 个农田站点和 3 个森林站点的所有测量时相都采用 LAI 反演。由于 LAI 的反演精度对 RSSE 和 CS 指标的计算结果有较大影响,高精度的 LAI 结果才能够准确的反映出地表的空 间异质性情况,进而给出准确的空间代表性评价结果。因此,根据地面站点观测的 LAI 值,对高分辨率 LAI 的反演结果进行了分析验证。分别采用平均相对偏差(Bias)、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及相关性决定系数(R^2)等 4 个指标进行精度评价。LAI 高分参考图反演精度如图 3 所示。

由图 3 所示,相对于站点观测 LAI 而言,农田站和森林站 HJ/CCD 影像 LAI 反演的整体精度 Bias 在 0.3 以内,绝对偏差 MAE 以及均方根误差 RMSE 分别在 0.4 和 0.5 左右。对于相关性决定系数而言,农田站的 R^2 达到了 0.85 以上,森林站的 R^2 在 0.5 左右。因此 LAI 高分参考图的反演精度能够满足评价指标计算的精度要求。其余森林站点由于高分辨率影像质量问题而采用 NDVI 参考图进行评价指标的计算。

4 结果分析与讨论

4.1 站点 LAI 观测空间代表性分级结果

基于本文站点 LAI 观测的空间代表性分级方法,以 1 km 尺度为例,对 CERN 站网 15 个农田站和

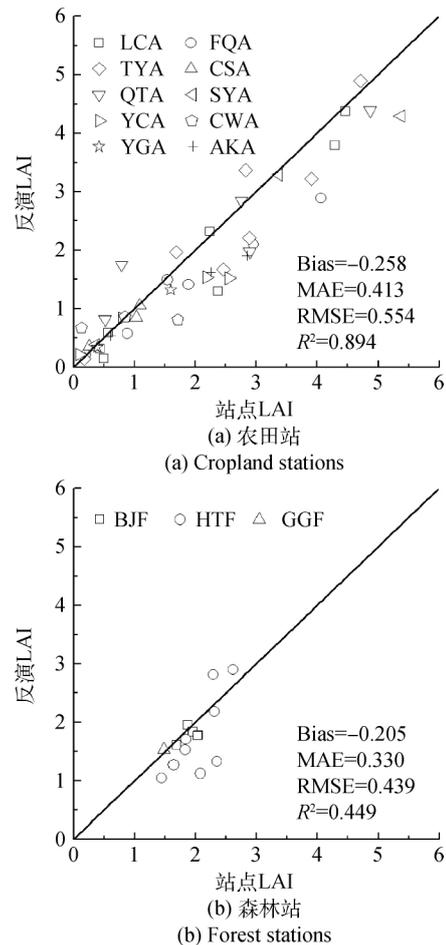


图3 农田站和森林站 LAI 反演精度

Fig. 3 Overall accuracy of generated high-resolution LAI maps for cropland stations and forest stations

10 个森林站进行了空间代表性分级。首先,所有站点的 DVTP 结果如表 4 所示。其中森林站点观测的植被类型在 1 km 尺度内所占比例较大,而农田站点观测的植被类型在像元尺度内所占比例差异较大。一些农田站点观测的植被类型在 1 km 尺度内所占比例较少,如 ASA、HLA 等。根据评价规则中 DVTP 的阈值设定,农田站 LSA、ASA、YTA、HLA、HJA 和森林站 SNF 在 1 km 尺度内 LAI 观测的空间代表性质量等级为 4 级,不适宜在 1 km 尺度上进行产品验证。其余 10 个农田站和 9 个森林站的植被类型的代表性较好,需要根据 RSSE 和 CS 指标对站点观测的空间代表性进行进一步分级。

根据 HJ-1/CCD 影像获得的 LAI/NDVI 高分参考图和站点 LAI 观测的空间代表性评价分级规则,分别计算出具体 RSSE 和 CS 指标值,对农田站和森林站不同站点不同时相的 LAI 观测的空间代表性分别进行质量分级。农田站和森林站 LAI 观测的空间代表性分级结果分别如表 5 和表 6 所示。

表4 农田站与森林站 DVTP 统计

Table 4 Values of DVTP for cropland and forest stations

农田站点代码	DVTP/%	森林站点代码	DVTP/%
LCA	96.6	HTF	100
ASA	24.5	SNF	58.4
CWA	96.9	GGF	81.1
FQA	73.0	BJF	100
HLA	2.1	BNF	100
YGA	89.8	MXF	100
YCA	100	DHF	100
TYA	100	CBF	99.8
LSA	26.4	ALF	91.2
SYA	93.8	HSF	92.1
QYA	75.8		
YTA	28.9		
AKA	96.6		
CSA	67.9		
HJA	27.5		

4.2 站点 LAI 观测的空间代表性年内年际变化分析

站点 LAI 观测的空间代表性随着站点植被生长差异而变化。在评价尺度范围内植被类型单一、植被长势均匀的站点,空间代表性随时间变化不明显。如果在观测尺度内植被类型多样、植被长势异质性明显,则站点的空间代表性会随时间有显著变化。空间代表性的年内年际变化特征一定程度上反映了站点的整体的空间代表性特征,对地面观测用于多年 LAI 产品的真实性检验具有重要意义。本节分别选取一个农田站和一个森林站为例,对站点观测的空间代表性在年内和年际之间变化情况进行分析。

空间代表性年内年际变化包括两方面:一是在同一年度不同季节的变化,二是不同年份同一时相

表5 农田站点观测 LAI 空间代表性质量分级

Table 5 Spatial representativeness grading of observed LAI dataset for cropland stations

站点名称	评价量	DOY	RSSE/%	CS/%	等级	站点名称	评价量	DOY	RSSE/%	CS/%	等级
		78	1.35	23.49	1			125	5.29	14.68	0
		110	7.20	25.57	1			153	8.37	10.09	0
		132	15.11	31.74	1			173	27.99	29.99	3
LCA	LAI	190	5.83	22.54	1	TYA	LAI	220	3.87	13.62	0
		203	1.94	49.07	1			233	13.36	20.96	1
		221	12.98	36.06	1			258	31.76	44.32	3
		336	18.73	28.48	1			271	26.85	44.52	3
		15	24.97	59.71	3			127	1.57	72.31	1
		125	99.19	78.87	3			188	32.59	60.02	3
FQA	LAI	138	4.65	78.54	1	QYA	LAI	225	33.01	60.34	3
		145	14.33	64.55	1			262	43.07	66.90	3
		178	45.87	91.22	3			286	56.12	177.9	3
		255	27.53	70.89	3						
		191	62.83	38.03	3			9	30.68	67.83	3
YCA	LAI	214	4.1	20.29	1	CSA	LAI	166	36.45	114.23	3
		230	2.6	14.25	0			190	31.58	72.37	3
		277	22.23	10.83	2						
		164	3.33	38.00	1			153	21.17	39.56	3
SYA	LAI	207	47.93	42.63	3	CWA	LAI	177	11.96	24.43	1
		221	13.45	93.66	1			321	4.04	18.03	0
		168	18.79	54.53	1	YGA	LAI	224	10.17	37.64	1
AKA	LAI	190	28.48	68.19	3			352	11.97	40.56	1
		218	13.96	68.27	1	LSA	Land cover	All	—	—	4
ASA	Land cover	All	—	—	4	YTA	Land cover	All	—	—	4
HLA	Land cover	All	—	—	4	HJA	Land cover	All	—	—	4

注: Land cover 为基于土地覆盖图进行代表性等级评价; All: 站点所有观测时相。

表 6 森林站点观测 LAI 空间代表性质量分级

Table 6 Spatial representativeness grading of observed LAI dataset for forest stations

站点名称	评价量	DOY	RSSE/%	CS/%	等级	站点名称	评价量	DOY	RSSE/%	CS/%	等级	
HTF	LAI	42	3.27	4.62	0	BNF	NDVI	56	0.83	2.61	0	
		85	0.99	14.12	0			84	0.67	3.10	0	
		100	1.57	7.61	0			115	0.47	3.65	0	
		145	2.37	19.46	0			176	1.08	7.78	0	
		227	114.40	24.35	3			298	0.24	6.30	0	
		258	8.40	43.05	1			329	1.50	6.77	0	
		297	16.44	25.81	1			359	5.96	10.83	0	
		320	37.11	21.24	3							
		345	10.39	29.44	1							
BJF	LAI	134	1.54	7.15	0	CBF	NDVI	106	8.55	21.54	1	
		164	8.87	9.58	0			171	1.46	4.74	0	
		226	47.43	20.91	3			230	1.55	4.49	0	
		255	10.52	23.35	1			265	1.57	4.80	0	
		286	22.58	12.55	2			288	10.10	13.78	0	
DHF	NDVI	62	0.53	5.40	0	HSF	NDVI	180	0.15	30.94	1	
		96	4.25	7.09	0			209	8.78	33.03	1	
		135	0.27	4.61	0			271	5.60	29.43	1	
		188	0.68	5.11	0			302	1.45	45.62	1	
ALF	NDVI	117	7.15	34.06	1	GGF	LAI	241	40.37	68.67	3	
		355	4.99	32.80	1	MXF	NDVI	264	2.68	3.49	0	
SNF	Land cover	All	—	—	4							

注: Land cover: 基于土地覆盖图进行代表性等级评价; All: 站点所有观测时相。

的变化。本节选取河北栾城农田站(LCA)和湖南会同森林站(HTF)分析2010年和2011年地面LAI观测的空间代表性变化。由于用于计算DVTP的地表分类图不是每年更新,无法反映站点的年际变化,且一般而言,根据站点观测规则,森林站点人为干扰较小,农田站点种植类型和比例在年际间同一时相的变化不大,本节不对DVTP指标分析。分别获取2010年和2011年LCA和HTF站点地面观测对应的质量较好的HJ-1/CCD影像,通过数据预处理及LAI反演后,采用LAI高分参考图计算评价指标RSSE和CS,用于说明站点各时相LAI观测的空间代表性。由于LAI反演精度对评价结果有着重要影响,因此需要对用于评价的年际高分参考图的精度进行比较。基于2010年和2011年地面站点观测数据,对反演得到的LAI高分参考图的精度进行评价结果显示,2010年和2011年的RMSE分别为0.53和0.62, R^2 分别为0.79和0.73。因此,年际之间高分参考图精度相近且较为合理,可以用于对

年际之间空间代表性评价指标进行比较。表7和表8分别列出LCA站点和HTF站点在2010年和2011年不同观测时相的空间代表性等级。

由表7和表8可见,不同站点观测的空间代表性的年内变化差异较大。对于LCA站点,DVTP为96%,像元尺度内植被类型单一,不同年份同一时相种植都为小麦或玉米,长势相对均匀。因此,同一年不同时相的观测在1 km尺度的空间代表性变化不大,都是1级。对于HTF站点,DVTP为100%,表明植被类型单一。但在评价尺度内,地表均质性较差,在10月份和12月份,CS明显增大,空间代表性等级由0级变为1级。在11月份,RSSE也明显增大,空间代表性为3级。可见评价尺度内植被长势的异质性对站点观测的空间代表性年内变化影响显著。

表7和表8还显示对于LCA和HTF站点而言,虽然同一年内不同时相观测的空间代表性有显著变化,但是年际间同一时相的空间代表性等级是一致的,且评价指标之间的差异 Δ 都比较小。这主要

是由于 CERN 站网观测都是长时间连续观测, 站点设计通常使用几十年以上, 站点周围的人为和自然变化相对较小, 植被结构和种植方式等都较稳定。在没有突发的自然情况影响站点周边植被生长时,

年际间相同物候期植被长势较为稳定 (Kim 等, 2006; Chen 等 2011)。并且, 观测时间固定, 观测方式一致。因此, 年际间的站点空间代表性等级通常是一致的。

表 7 LCA 站点 2010 年和 2011 年不同时相 LAI 观测的空间代表性等级

Table 7 Spatial representativeness level of observed LAI dataset for LCA station in the year 2010 and 2011

评价 指标	2010-04-23	2011-04-24	Δ	2010-05-15	2011-05-12	Δ	2010-07-06	2011-07-08	Δ	2010-07-20	2011-07-30	Δ
RSSE	7.20	2.80	4.40	15.10	18.00	-2.9	5.83	2.25	3.58	1.94	2.34	-0.40
CS	25.57	32.39	-6.82	31.74	39.96	-8.22	22.54	37.4	-14.86	49.07	50.52	-1.45
等级	1	1		1	1		1	1		1	1	

注: Δ : 2010 和 2011 年相近观测时相代表性评价指标对应的差值。

表 8 HTF 站点 2010 年和 2011 年不同时相 LAI 观测的空间代表性等级

Table 8 Spatial representativeness level of observed LAI dataset for HTF station in the year 2010 and 2011

评价 指标	2010- 04-16	2011- 04-26	Δ	2010- 05-25	2011- 05-28	Δ	2010- 10-20	2011- 10-17	Δ	2010- 11-19	2011- 11-21	Δ	2010- 12-08	2011- 12-02	Δ
RSSE	1.57	5.45	-3.88	2.37	4.36	-1.99	16.44	7.56	8.88	37.11	28.63	8.48	10.39	8.76	1.63
CS	7.61	6.49	1.12	19.46	7.53	11.93	25.81	20.85	4.96	21.24	33.99	-12.8	29.44	30.09	-0.65
等级	0	0		0	0		1	1		3	3		1	1	

注: Δ : 2010 和 2011 年相近观测时相代表性评价指标对应的差值。

4.3 空间代表性评价对 LAI 产品验证结果的影响

站点 LAI 观测的空间代表性评价目的是为 LAI 产品真实性检验提供更可靠的验证数据集。当 LAI 观测在产品像元尺度内未进行空间代表性评价, 通常把所有的观测数据都用于产品验证, 不准确的验证数据必然为验证结果带来误差。当对站点观测进行空间代表性评价后, 可以根据待验证的 LAI 产品尺度, 选择评价等级较高的观测进行产品验证, 以保证验证精度的可靠性。本文选择 1 km 8 天合成周期的 MODIS LAI 标准产品 MOD15A2 C5 (Collection 5) 版本, 通过比较 2010 年和 2011 年站点观测空间代表性评价前后对 LAI 产品验证结果的差异, 用于说明空间代表性评价对验证结果的影响。

对于 MODIS LAI 标准产品, 数据预处理(反射率)误差的差异不大, 但反演算法在不同像元可能不同。MODIS LAI 产品采用了主算法和备用算法两种算法反演, 当主算法失败时, 采用备用算法。由于主备算法原理的差异, 得到的产品精度是不一致的。Wang 等人(2001)指出主算法失败而采用备用算法的主要原因是由于残云或者大气校正质量不好等问题, 因此备用算法得到的反演结果可靠性是

需要质疑的。Fang 等人(2012)在验证全球 MODIS LAI 产品时也指出备用算法反演 LAI 的精度比较差且不能接受, 与主算法相比, 备用算法的误差达到了 150% 左右。为了减小因模型和反演算法的差异而导致的验证误差来源差异, 本文只分析了采用主算法生产的 LAI 产品。当遥感数据的预处理误差及模型和反演误差都一致时, 则真实性检验结果的差异主要是由于地面验证数据集的误差导致。

表 9 列出了基于空间代表性分级的站点观测对 MOD15A2 产品主算法的验证结果。基于 LAI 参考图进行空间代表性评价, 且对应主算法生产 MOD15A2 产品像元的多时相地面观测共 79 个, 包括 2010 年 CERN 站网全部农田和森林站点的 70 个多时相观测, 以及 2011 年河北栾城站(LCA)和湖南会同站(HTF)的 9 个多时相观测。不同空间代表性等级的站点观测对产品验证结果显示, 未进行空间代表性评价时, 站点观测的 79 个多时相 LAI 数据全部用于 MOD15A2 产品验证, 产品绝对误差 RMSE 为 1.67, 与地面观测数据的相关系数 R^2 为 0.407。在 79 个验证数据中, 经过在 1 km 尺度内的空间代表性评价, 1 级质量的观测最多, 为 28(35.4%) 个; 其次是 3 级和 4 级质量观测, 分别为 19(24.1%) 和

23(29.1%)个;0级和2级质量观测一共为9(11.4%)个。可见,没有评价的站点观测对产品验证结果基本上是这4个级别质量观测数据验证结果的平均。4级质量的站点观测,根据以上分析,观测的地表类型对像元尺度的地表类型没有代表性,因此在评价尺度内通常会有较大的验证误差,不适合用于产品验证。表9也显示了4级质量观测的验证结果RMSE较高,对产品的验证偏差较大。如果仅去掉4级质量观测,基于0—3级质量观测验证,产品误差RMSE从1.67降低到1.16;与地面观测的相关系数 R^2 从0.407提高到0.596。由于4级观测的空间代表性误差最大,因此,去掉由于观测空间代表性不好而在产品像元尺度内带来误差较大的观测,对产品验证精度就会有较大的提升。同时还可以看出,整体而言,随着代表性等级的降低,站点观测对于产品验证的误差增大, RMSE升高, R^2 降低(2级观测由于数量较少,统计意义不明显)。因此,综合表9验证结果可以看出,如果地面观测在产品像元尺度内的空间代表性越低,用于产品验证时,相对于产品像元尺度真值而言,观测值自身误差越大,会给产品验证结果带来较大的误差。与其他验证结果相比, Fang等人(2012)和Camacho等人(2013)对MOD15A2 C5产品全球平均精度(RMSE)分别为1.17和0.92。本研究对中国区域的验证结果,选用0级及1级数据验证精度分别为0.57和1.01。比Fang等人(2012)验证结果更优,其主要原因即验证数据误差存在使产品验证结果被高估。由于3级站点观测空间代表性不太好,会对产品验证精度带来一定误差,而4级则由于站点观测空间代表性更差,导致验证结果带来更大的误差。

表9 基于空间代表性分级的站点观测对MOD15A2主算法产品验证结果
Table 9 Validation results of MOD15A2 main algorithm product after evaluating the spatial representativeness levels of observed LAI dataset

质量等级	评价指标		
	n	RMSE	R^2
未评价	79	1.67	0.407
0级	7(8.9%)	0.57	0.840
1级	28(35.4%)	1.01	0.721
2级	2(2.5%)	1.46	1
3级	19(24.1%)	1.43	0.497
0—3级	56(70.9%)	1.16	0.596
4级	23(29.1%)	2.51	0.268

以上分析可见,没有空间代表性评价时,所有的验证数据都被同等使用,与选择空间代表性好的观测数据进行验证相比, RMSE偏高, R^2 偏低,产品的验证精度会偏低。主要原因分为两方面,一是4级质量站点测量的植被类型与产品像元尺度整体植被类型不一致。如在农田站点观测的主要是农作物LAI,但是在产品像元尺度内可能有森林、草地等其他植被类型,使观测的LAI与产品得到的LAI差别较大。二是尺度效应的影响。当站点LAI观测对应产品像元内植被LAI变异性较大时,观测代表的空间范围小于产品像元尺度时,由于产品像元包含了较大的变异程度而站点LAI观测却没有,尺度效应就会给产品验证带来较大的误差。通过空间代表性评价前后站点观测对产品的验证结果,能够较好的显示由于站点观测与产品尺度不一致给产品验证精度带来的影响。

综合以上分析,不同等级之间的站点观测对产品验证结果的差异,主要是由于地面验证数据在产品像元尺度的空间代表性不同所导致,说明了站点观测在像元尺度内空间代表性评价的必要性。

5 结 论

站点多时相连续观测的LAI数据可以弥补LAI产品地面验证数据集的不足。但是针对站点单点观测与产品像元尺度不匹配的问题,以往的研究只是简单的定性说明研究区域,然后直接用站点测量数据对产品进行验证,缺少系统的站点观测在产品像元尺度内的空间代表性评价方法体系。因此,本文提出了地面观测LAI的空间代表性评价方法,通过设计DVTP、RSSE和CS3个定量指标,用于分析站点观测对站点周边地表的空间代表性程度,将站点观测在产品像元尺度的空间代表性分为五级,分别描述站点观测在对应尺度上验证LAI产品的适用性。将评价方法用于CERN站网农田站和森林站的站点观测质量评级,基于2010年和2011年的分析结果显示:(1)由于地表空间异质性不同,站点观测空间代表性随时间变化具有明显差异。植被类型单一,植被密度较为均质,空间代表性随时间变化不太明显;相反,若植被混杂,植被生长异质性明显,空间代表性等级随时间变化明显。但是,由于种植结构和种植方式的相对稳定,植被年际间生长差别不大,年际间的空间代表性变化较一致。(2)站点LAI观测的空间代表性分级用于MOD15A2主

算法产品验证结果显示,没有评价时,所有的验证数据都使用,比选择空间代表性好的观测数据进行验证, RMSE 结果偏高,产品验证精度偏低。如果去掉观测等级最差的 4 级观测,基于 0—3 级质量观测验证产品的误差 RMSE 从 1.67 降低到 1.16,相关系数 R 从 0.407 提高到 0.596。因此,评价方法能够去掉在特定尺度下不具有代表性的观测数据,一定程度上提高地面验证数据集的可靠性。

通过对观测数据在产品像元尺度内的空间代表性程度进行质量分级,通常质量等级较低的验证数据不再用于产品验证。但从本文的研究结果来看,目前能够满足在产品像元尺度内具有空间代表性的站点观测不多。以 CERN 站网为例,2010 年站点观测 0 级—3 级观测只占总观测数的 70.9%,其中等级最高的 0 级只占总观测数的 8.9%。由于地表空间异质性的影响,具有较好空间代表性的观测是有限的,有时无法满足产品验证的需求。因此需要探索结合高空间分辨率影像进行尺度转换的方法,以及没有高分辨率影像只有地面观测 LAI 的情况下如何对站点观测数据进行尺度转换的方法,让更多的站点观测能够用于产品验证中。本研究仍然存在以下需要改进的方面:

(1) CS 指标是根据高分参考图的半方差值,用球面模型拟合参数来进行计算获取,不同的拟合模型(指数模型、高斯模型等)得到的拟合参数可能也会有所不同,对 CS 计算结果可能会带来一定的影响。

(2) 评价指标的计算依赖于高分参考图的获取精度。在部分森林站点,由于天气状况的影响,无法获取较高质量的影像,对实际站点观测空间代表性等级的划分会带来误差。

(3) 本文未考虑不同阈值设定下对等级划分的影响,仅选择一个较为宽泛的阈值为例进行站点观测代表性评价结果的分析。后续工作需要进一步考虑不同阈值对代表性分级误差的影响,确定最优阈值来划分代表性等级。

(4) 本文仅针对中国区域以 CERN 站网观测为例进行分析评价,还需要在全球尺度上收集更多的站点观测,开展分析评价,形成全球范围的在产品像元尺度内具有空间代表性等级的 LAI 验证数据集,更好的为 LAI 产品的真实性检验服务。

志 谢 中国科学院地理科学与资源研究所郭学兵副研究员提供研究所所需的 CERN 站网野外观

测的 LAI 及相关数据,在此表示衷心的感谢!

参考文献(References)

- Abuelgasim A A, Fernandes R A and Leblanc S G. 2006. Evaluation of national and global LAI products derived from optical remote sensing instruments over Canada. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1872–1884 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.874794]
- Aragao L E O C, Shimabukuro Y E, Espirito-Santo F D B and Williams M. 2005. Spatial validation of the collection 4 MODIS LAI product in eastern Amazonia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11): 2526–2534 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.856632]
- Baldocchi D, Valentini R, Running S, Oechel W and Dahlman R. 1996. Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2(3): 159–168 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.1996.tb00069.x]
- Baret F, Hagolle O, Geiger B, Bicheron P, Miras B, Huc M, Berthelot B, Niño F, Weiss M, Samain O, Roujean J L and Leroy M. 2007. LAI, fAPAR and fCover CYCLOPES global products derived from VEGETATION: Part 1: Principles of the algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 275–286 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.02.018]
- Baret F, Weiss M, Allard D, Garrigue S, Leroy M, Jeanjean H, Fernandes R, Myneni R B, Privette J, Morissette J, Bohbot H, Bosseno R, Dedieu G, Bella C D, Duchemin B, Espana M, Gond V, Gu X F, Guyon D, Lelong C, Maisongrande P, Mougou E, Nilson T, Veroustraete F and Vintilla R. 2005. VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products [EB/OL]. [2013-11-24]. <http://w3.aviignon.inra.fr/valeri/>
- Bonan G B. 1995. Land-Atmosphere interactions for climate system Models: coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 57–73 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)00065-U]
- Botha E J, Leblon B, Zebarth B J and Watmough J. 2010. Non-destructive estimation of wheat leaf chlorophyll content from hyperspectral measurements through analytical model inversion. *International Journal of Remote Sensing*, 31(7): 1679–1697 [DOI: 10.1080/01431160902926574]
- Breunig F M, Galvão L S, Formaggio A R and Epiphanyo J C N. 2013. Influence of data acquisition geometry on soybean spectral response simulated by the prosail mode. *Engenharia Agrícola*, 33(1): 176–187 [DOI: 10.1590/S0100-69162013000100018]
- Camacho F, Cernicharo J, Lacaze R, Baret F and Weiss M. 2013. GEOVI: 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*, 137: 310–329 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.030]
- Campbell J L, Burrows S, Gower S T and Cohen W B. 1999. Bigfoot

- Field Manual, Version 2. 1 [EB/OL]. [2013-12-14]. <http://www.fsl.orst.edu/larse/bigfoot/index.html>
- Cescatti A, Marcolla B, Santhana Vannan S K, Pan J Y, Román M O, Yang X Y, Ciais P, Cook R B, Law B E, Matteucci G, Migliavacca M, Moors E, Richardson A D, Seufert G and Schaaf C B. 2012. Intercomparison of MODIS albedo retrievals and in situ measurements across the global FLUXNET network. *Remote Sensing of Environment*, 121: 323–334 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.02.019]
- Chen B Z, Coops N C, Fu D J, Margolis H A, Amiro B D, Barr A G, Black T A, Arain M A, Bourque C P A, Flanagan L B, Lafleur P M, Mccaughey J H and Wofsy S C. 2011. Assessing eddy-covariance flux tower location bias across the Fluxnet-Canada Research Network based on remote sensing and footprint modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(1): 87–100 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.09.005]
- Chen J M and Black T A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4): 421–429 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x]
- Chen J M and Leblanc S G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1316–1337 [DOI: 10.1109/36.628798]
- Chen J M, Pavlic G, Brown L, Cihlar J, Leblanc S G, White H P, Hall R J, Peddle D R, King D J, Trofymow J A, Swift E, Van Der Sanden J and Pellikka P K E. 2002. Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 165–184 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00300-5]
- Claverie M, Vermote E F, Weiss M, Baret F, Hagolle O and Demarez V. 2013. Validation of coarse spatial resolution LAI and FAPAR time series over cropland in southwest France. *Remote Sensing of Environment*, 139: 216–230 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.027]
- Cohen W B, Maersperger T K, Turner D P, Ritts W D, Pflugmacher D, Kennedy R E, Kirschbaum A, Running S W, Costa M and Gower S T. 2006. MODIS land cover and LAI collection 4 product quality across nine sites in the western hemisphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1843–1857 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876026]
- Cohen W B, Maersperger T K, Yang Z Q, Gower S T, Turner D P, Ritts W D, Berterretche M and Running S W. 2003. Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 88(3): 233–255 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.06.006]
- Cohen W B, Spies T A and Bradshaw G A. 1990. Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure. *Remote Sensing of Environment*, 34(3): 167–178 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90066-U]
- Cohen W B, Turner D P, Gower S T and Running S W. 2009. Linking in situ measurements, remote sensing, and models to validate MODIS products related to the terrestrial carbon cycle [EB/OL]. [2013-11-24]. <http://www.fsl.orst.edu/larse/bigfoot/index.html>
- Darvishzadeh R, Matkan A A and Ahangar A D. 2012. Inversion of a radiative transfer model for estimation of rice canopy chlorophyll content using a lookup-table approach. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4): 1222–1230 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2186118]
- De Kauwe M G, Disney M I, Quaife T, Lewis P and Williams M. 2011. An assessment of the MODIS collection 5 leaf area index product for a region of mixed coniferous forest. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 767–780 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.11.004]
- Deng F, Chen J M, Plummer S, Chen M Z and Pisek J. 2006. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2219–2229 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872100]
- Dorigo W A. 2012. Improving the robustness of cotton status characterization by radiative transfer model inversion of multi-angular CHRIS/PROBA data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(1): 18–29 [DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2171181]
- Duan S B, Li Z L, Wu H, Tang B H, Ma L L, Zhao E Y and Li C R. 2014. Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 12–20 [DOI: 10.1016/j.jag.2013.05.007]
- Fang H L, Wei S S and Liang S L. 2012. Validation of MODIS and CYCLOPES LAI products using global field measurement data. *Remote Sensing of Environment*, 119: 43–54 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.006]
- Fensholt R, Sandholt I and Rasmussen M S. 2004. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, 91(3/4): 490–507 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.04.009]
- Fu B J, Li S G, Yu X B, Yang P, Yu G R, Feng R G and Zhuang X L. 2010. Chinese ecosystem research network: progress and perspectives. *Ecological Complexity*, 7(2): 225–233 DOI: 10.1016/j.ecocom.2010.02.007]
- Fu B J, Niu D and Yu G R. 2007. The roles of ecosystem observation and research network in earth system science. *Progress in Geography*, 26(1): 1–16 (傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 2007. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用. *地理科学进展*, 26(1): 1–16)
- Garrigues S, Allard D, Baret F and Weiss M. 2006. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 81–96 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.03.013]
- Garrigues S, Lacaze R, Baret F, Morisette J T, Weiss M, Nickeson J E, Fernandes R, Plummer S, Shabanov N V, Myneni R B, Knyazikhin Y and Yang W. 2008. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 113(G2): G02028 [DOI: 10.1029/2007jg000635]

- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y C, Zhao Y Y, Liang L, Niu Z G, Huang X M, Fu H H, Liu S, Li C C, Li X Y, Fu W, Liu C X, Xu Y, Wang X Y, Cheng Q, Hu L Y, Yao W B, Zhang H, Zhu P, Zhao Z Y, Zhang H Y, Zheng Y M, Ji L Y, Zhang Y W, Chen H, Yan A, Guo J H, Yu L, Wang L, Liu X J, Shi T T, Zhu M H, Chen Y L, Yang G W, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z L, Chen J and Chen J. 2012. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7): 2607–2654 [DOI: 10.1080/01431161.2012.748992]
- González-Sanpedro M C, Le Toan T, Moreno J, Kergoat L and Rubio E. 2008. Seasonal variations of leaf area index of agricultural fields retrieved from Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 112(3): 810–824 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.018]
- Hakuba M Z, Folini D, Sanchez-Lorenzo A and Wild M. 2013. Spatial representativeness of ground-based solar radiation measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15): 8585–8597 [DOI: 10.1002/jgrd.50673]
- Huang D, Yang W Z, Tan B, Rautiainen M, Zhang P, Hu J N, Shabanov N V, Linder S, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2006. The importance of measurement errors for deriving accurate reference leaf area index maps for validation of moderate-resolution satellite LAI products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1866–1871 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876025]
- Jacquemoud S and Baret F. 1990. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34(2): 75–91 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90100-Z]
- Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Chen Y J and Zhu M J. 2012. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D13): D13113 [DOI: 10.1029/2011JD017037]
- Kim J, Guo Q, Baldocchi D D, Leclerc M Y, Xu L and Schmid H P. 2006. Upscaling fluxes from tower to landscape: overlaying flux footprints on high-resolution (IKONOS) images of vegetation cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136(3/4): 132–146 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2004.11.015]
- Koetz B, Baret F, Poilvé H and Hill J. 2005. Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 115–124 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.017]
- Li X. 2014. Characterization, controlling, and reduction of uncertainties in the modeling and observation of land-surface systems. *Science China: Earth Science*, 57(1): 80–87 (李新. 2013. 陆地表层系统模拟和观测的不确定性及其控制. *中国科学: 地球科学*, 43(11): 1735–1742) [DOI: 10.1007/s11430-013-4728-9]
- Liang S L, Fang H L, Chen M Z, Shuey C J, Walthall C, Daughtry C, Morisette J, Schaaf C and Strahler A. 2002. Validating MODIS land surface reflectance and albedo products: methods and preliminary results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 149–162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00092-5]
- Liu L Y. 2014. Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index. *Journal of Remote Sensing*, 18(6): 1158–1168 (刘良云. 2014. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正. *遥感学报*, 18(6): 1158–1168) [DOI: 10.11834/jrs.20144103]
- Lu L, Li X, Huang C L, Ma M G, Che T, Bogaert J, Veroustraete F, Dong Q H and Ceulemans R. 2005. Investigating the relationship between ground-measured LAI and vegetation indices in an alpine meadow, north-west China. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20): 4471–4484 [DOI: 10.1080/01431160500114938]
- Morisette J T, Baret F, Privette J L, Myneni R B, Nickeson J E, Garrigues S, Shabanov N V, Weiss M, Fernandes R A, Leblanc S G, Kalacska M, Sanchez-Azofeifa G A, Chubey M, Rivard B, Stenberg P, Rautiainen M, Voipio P, Manninen T, Pilant A N, Lewis T E, Iames J S, Colombo R, Meroni M, Busetto L, Cohen W B, Turner D P, Warner E D, Petersen G W, Seufert G and Cook R. 2006. Validation of global moderate-resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1804–1817 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872529]
- Morisette J T, Privette J L and Justice C O. 2002. A framework for the validation of MODIS Land products. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 77–96 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00088-3]
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R and Running S W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 214–231 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00074-3]
- Nappo C J, Caneill J Y, Furman R W, Gifford F A, Kaimal J C, Kramer M L, Lockhart T J, Pendergast M M, Pielke R A, Randerson D and Shreffler J H. 1982. Workshop on the representativeness of meteorological observations, June 1981, Boulder, Colo. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(7): 761–764
- Nightingale J, Nickeson J, Justice C, Baret F, Garrigues S, Wolfe R and Masuoka E. 2008. Global validation of EOS land products, lessons learned and future challenges: A MODIS case study // Proc. of the 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment. Stresa, Italy. [s. n.]
- Pisek J and Chen J M. 2007. Comparison and validation of MODIS and VEGETATION global LAI products over four BigFoot sites in North America. *Remote Sensing of Environment*, 109(1): 81–94 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.004]
- Richter K, Atzberger C, Vuolo F and D'urso G. 2011. Evaluation of sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat, sugar beet, and maize. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(2): 458–464 [DOI: 10.1109/JSTARS.2010.2091492]
- Román M O, Schaaf C B, Woodcock C E, Strahler A H, Yang X Y, Braswell R H, Curtis P S, Davis K J, Dragoni D, Goulden M L, Gu L H, Hollinger D Y, Kolb T E, Meyers T P, Munger J W, Privette J L, Richardson A D, Wilson T B and Wofsy S C. 2009. The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: assessment of spatial representativeness over forested landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 113(11): 2476–2498 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.009]

- Rossello P and Baret F. 2007. Validation of Land European Remote sensing Instruments [EB/OL]. [2013-12-13] <http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>
- Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, Betts A K, Hall F G, Berry J A, Collatz G J, Denning A S, Mooney H A, Nobre C A, Sato N, Field C B and Henderson-Sellers A. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275(5299): 502–509 [DOI: 10.1126/science.275.5299.502]
- Sertel E, Kaya S and Curran P J. 2007. Use of semivariograms to identify earthquake damage in an urban area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1590–1594 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.894019]
- Shabanov N V, Huang D, Yang W Z, Tan B, Knyazikhin Y, Myneni R B, Ahl D E, Gower S T, Huete A R, Aragao L E O C and Shimabukuro Y E. 2005. Analysis and optimization of the MODIS leaf area index algorithm retrievals over broadleaf forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(8): 1855–1865 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852477]
- Stoyan H, De-Polli H, Böhm S, Robertson G P and Paul E A. 2000. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant and Soil*, 222(1/2): 203–214 [DOI: 10.1023/A:1004757405147]
- Strahler A, Muchoney D, Borak J, Friedl M, Sucharita G, Lambin E and Moody A. 1999. MODIS land cover product Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 5.0 [EB/OL]. [2013-12-13]. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/land_atbd.php
- Sun C X, Liu L Y and Guan L L. 2013. Validation of the GLASS LAI products in Xilinhot Grassland. *Remote Sensing Technology and Application*, 28(6): 949–954 (孙晨曦, 刘良云, 关琳琳. 2013. 内蒙古锡林浩特草原 GLASS LAI 产品的真实性检验. *遥感技术与应用*, 28(6): 949–954)
- Sun C X, Liu L Y, Guan L L, Jiao Q J and Peng D L. 2014. Validation and error analysis of the MODIS LAI product in Xilinhot grassland. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 518–536 [DOI: 10.11834/jrs.20143097] (孙晨曦, 刘良云, 关琳琳, 焦全军, 彭代亮. 2014. 锡林浩特草原区域 MODIS LAI 产品真实性检验与误差分析. *遥感学报*, 18(3): 518–536) [DOI: 10.11834/jrs.20143097]
- Tan B, Hu J N, Zhang P, Huang D, Shabanov N, Weiss M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2005. Validation of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer leaf area index product in croplands of Alpilles, France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D1): D01107 [DOI: 10.1029/2004JD004860]
- Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J, Privette J L, Shabanov N V, Zhou L M, Zhang Y, Buermann W, Dong J R, Veikkanen B, Häme T, Andersson K, Ozdogan M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2002. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 83(3): 414–430 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00047-0]
- Verbyla D L. 2005. Assessment of the MODIS leaf area index product (MOD15) in Alaska. *International Journal of Remote Sensing*, 26(6): 1277–1284 [DOI: 10.1080/01431160412331330194]
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16(2): 125–141 [DOI: 10.1016/0034-4257(84)90057-9]
- Wang L J, Dong T F, Zhang G M and Niu Z. 2013. LAI retrieval using PROSAIL model and optimal angle combination of multi-angular data in wheat. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3): 1730–1736 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2261474]
- Wang Y J, Tian Y H, Zhang Y, El-Saleous N, Knyazikhin Y, Vermote E and Myneni R B. 2001. Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties: case study with SeaWiFS and MODIS LAI/FPAR algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 78(3): 299–313 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00225-5]
- Wang Y J, Woodcock C E, Buermann W, Stenberg P, Voipio P, Smolander H, Häme T, Tian Y H, Hu J N, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2004. Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment*, 91(1): 114–127 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.02.007]
- Wang Y Y, Li G C and Zhang Y. 2011. Regional representativeness analysis of national reference climatological stations based on MODIS/LST product. *Journal of Applied Meteorological Science*, 22(2): 214–220 (王圆圆, 李贵才, 张艳. 2011. 利用 MODIS/LST 产品分析基准气候站环境代表性. *应用气象学报*, 22(2): 214–220)
- Wang Z S, Schaaf C B, Chopping M J, Strahler A H, Wang J D, Román M O, Rocha A V, Woodcock C E and Shuai Y M. 2012. Evaluation of Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) snow albedo product (MCD43A) over tundra. *Remote Sensing of Environment*, 117: 264–280 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.002]
- Wang Z S, Schaaf C B, Strahler A H, Chopping M J, Román M O, Shuai Y M, Woodcock C E, Hollinger D Y and Fitzjarrald D R. 2014. Evaluation of MODIS albedo product (MCD43A) over grassland, agriculture and forest surface types during dormant and snow-covered periods. *Remote Sensing of Environment*, 140: 60–77 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.025]
- Weiss M, Baret F, Garrigues S and Lacaze R. 2007. LAI and fAPAR CYCLOPES global products derived from VEGETATION. Part 2: validation and comparison with MODIS collection 4 products. *Remote Sensing of Environment*, 110(3): 317–331 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.03.001]
- Wu D X, Wei W S and Zhang S M. 2007. *Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems*. Beijing: China Environmental Press (吴冬秀, 韦文珊, 张淑敏. 2007. *陆地生态系统生物观测规范*. 北京: 中国环境科学出版社)
- Wu X D, Xiao Q, Wen J G, Liu Q, Peng J J and Li X W. 2014. Advances in uncertainty analysis for the validation of remote sensing products: take leaf area index for example. *Journal of Remote Sensing*, 18(5): 1011–1023 (吴小丹, 肖青, 闻建光, 刘强, 彭菁菁, 李小文. 2014. 遥感数据产品真实性检验不确定性分析研究进展. *遥感学报*, 18(5): 1011–1023) [DOI: 10.11834/jrs.

- 20143332]
- Xu B D, Li J, Liu Q H, Xin X Z, Zeng Y L and Yin G F. 2015. Review on methods of evaluating representativeness for ground station observations and its application in the validation of remote sensing products. *Journal of Remote Sensing*, 19(5): 703–718 (徐保东, 李静, 柳钦火, 辛晓洲, 曾也鲁, 尹高飞. 2015. 地面站点观测数据代表性评价方法研究进展. *遥感学报*, 19(5): 703–718) [DOI: 10.11834/jrs.20154178]
- Yang F, Sun J L, Zhang B, Yao Z F, Wang Z M, Wang J L and Le X F. 2010. Assessment of MODIS LAI product accuracy based on the PROSAIL model, TM and field measurements. *Transactions of the CSAE*, 26(4): 192–197 (杨飞, 孙九林, 张柏, 姚作芳, 王宗明, 王卷乐, 乐夏芳. 2010. 基于 PROSAIL 模型及 TM 与实测数据的 MODIS LAI 精度评价. *农业工程学报*, 26(4): 192–197)
- Yang F, Sun J L, Fang H L, Yao Z F, Zhang J H, Zhu Y Q, Song K S, Wang Z M and Hu M G. 2012. Comparison of different methods for corn LAI estimation over northeastern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 462–471 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.004]
- Yang P, Shibasaki R, Wu W B, Zhou Q B, Chen Z X, Zha Y, Shi Y and Tang H J. 2007. Evaluation of MODIS land cover and LAI products in cropland of North China plain using *in situ* measurements and landsat TM images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10): 3087–3097 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.902426]
- Yang W Z, Tan B, Huang D, Rautiainen M, Shabanov N V, Wang Y J, Privette J L, Huemmrich K F, Fensholt R, Sandholt I, Weiss M, Ahl D E, Gower S T, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2006. MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7): 1885–1898 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.871215]
- Yin G F, Li J, Liu Q H, Li L H, Zeng Y, Xu B D, Yang L and Zhao J. 2015. Improving leaf area index retrieval over heterogeneous surface by integrating textural and contextual information: a case study in the Heihe River Basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 359–363 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2341925]
- Zeng Y L, Li J, Liu Q H and Bai J H. 2013. A sampling strategy based on NDVI prior knowledge for LAI ground measurements. *Journal of Remote Sensing*, 17(1): 107–121 (曾也鲁, 李静, 柳钦火, 柏军华. 2013. 基于 NDVI 先验知识的 LAI 地面采样方法. *遥感学报*, 17(1): 107–121) [DOI: 10.11834/jrs.20131387]
- Zeng Y L, Li J, Liu Q H, Li L H, Xu B D, Yin G F and Peng J J. 2014. A sampling strategy for remotely sensed lai product validation over heterogeneous land surfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(7): 3128–3142 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2312231]
- Zhong B. 2011. Improved estimation of aerosol optical depth from Landsat TM/ETM+ imagery over land // *Proceedings of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Vancouver, BC: IEEE: 3304–3307 [DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6049926]

Spatial representativeness estimation of station observation in validation of LAI products: A case study with CERN insitu data

XU Baodong^{1,2,3}, LI Jing^{1,2}, LIU Qinhuo^{1,2}, ZENG Yelu^{1,3}, YIN Gaofei^{1,3}, ZHAO Jing^{1,2}, YANG Le^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Joint Center for Global Change Studies (JCGCS), Beijing 100875, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The continuously observed Leaf Area Index (LAI) dataset from the ground station network is an important data source for the validation of remote sensing products. However, direct comparison introduces errors to the validation results if the station-observed LAI cannot represent the pixel because of the scale mismatch between station and pixel observations. This study aims to present an approach to evaluate the spatial representativeness of station LAI observations. This proposed approach will be used to validate LAI products. Three evaluation indicators, including the Dominant Vegetation Type Percent (DVTP), the Relative Spatial Sampling Error (RSSE), and the Coefficient of Sill (CS), were established to determine the different levels of spatial representativeness for station observations. DVTP calculated by land-cover maps can evaluate the vegetation-type representativeness in the product pixel. RSSE and CS were calculated from LAI/normalized difference vegetation index high-resolution reference maps, which were used to describe the degree of representativeness for vegetation density in the pixel. The approach was applied to 25 stations from the Chinese Ecosystem Research Network (CERN), which includes croplands and forest in China. The threshold was set as 60% for DVTP and 20% for both RSSE and CS to determine the level of spatial representativeness at different observed dates and stations. Then, the variation between seasonal and inter-annual spatial representativeness was evaluated by comparing 2010 and 2011. Finally, the results of Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) LAI product validation before and after

grading station observations were compared to demonstrate the importance of spatial representativeness evaluation. The spatial representativeness level of station-observed LAI data with different dates was first determined on the basis of grading criterion. The seasonal level varied at different growth stages of vegetation, whereas the inter-annual level was consistent because the structure and pattern of vegetation were stable for the adjacent years. The root mean squared error between the MOD15A2 and observed LAI with the good spatial representativeness reduced from 1.67 to 1.16 compared with that of all observed LAI data. The combination of DVTP, RSSE, and CS is an effective approach to assess the spatial representativeness of station-observed LAI dataset. Moreover, the uncertainty of MOD15A2 validation significantly differs at different levels of spatial representativeness. Thus, the level of station-observed LAI data at the product pixel scale should be determined, and high-level LAI observation should be chosen to reduce the error for validating LAI products. However, the station LAI observations that can represent the product pixel were not sufficient because of the influence of spatial heterogeneity. For example, the percentages of levels 0 to 3 for CERN station-observed LAI dataset were 70.9% and 8.9% in 2010, respectively. Therefore, further studies should focus on increasing the number of validation dataset by two ways: collecting station LAI observations over many years at the global scale for various biomes and rectifying scale errors between station and pixel observations to fully utilize station-observed LAI data. Consequently, the LAI products can be comprehensively and reliably validated.

Key words: spatial representativeness, LAI, validation, station observation, CERN

Supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB733401); National Natural Science Foundation of China (No. 41271366); National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA12A304, 2012AA12A305)