

用地面点测量数据验证 LAI 产品中的 尺度转换方法

刘艳, 王锦地, 周红敏, 薛华柱

北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875

摘要: 遥感叶面积指数产品精度和不确定性需要通过地面测量的数据来验证。因为两者的空间尺度差异, 验证前需要通过尺度转换方法将这两种数据的尺度统一。将泰勒级数展开模型进行改进后, 可以用于解决叶面积指数遥感产品验证中地面测量数据与遥感产品尺度不匹配的问题, 同时可以针对每个数据定量给出误差。将误差在阈值范围内的实测数据作为地面参考值对遥感产品进行验证。本文利用这种方法将黑河综合遥感联合实验数据集中的地面测量叶面积指数尺度上升到遥感像元尺度, 并与 MODIS GLASS LAI 遥感产品进行了比较。

关键词: 叶面积指数(LAI), 尺度转换, 泰勒级数展开模型, 黑河流域

中图分类号: TP75

文献标志码: A

引用格式: 刘艳, 王锦地, 周红敏, 薛华柱. 2014. 用地面点测量数据验证 LAI 产品中的尺度转换方法. 遥感学报, 18(6): 1189 – 1198

Liu Y, Wang J D, Zhou H M and Xue H Z. 2014. Upscaling approach for validation of LAI products derived from remote sensing observation. Journal of Remote Sensing, 18(6): 1189 – 1198 [DOI: 10.11834/jrs.20144084]

1 引言

叶面积指数(LAI)指单位面积地表上方植物叶(单面)面积总和,为一无量纲值(Chen 和 Black, 1992)。它可用于植被许多生物、物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等,是环境、生态或者作物估产等模型的重要输入参数。地表植被的 LAI 可以通过地面测量以及遥感数据反演来获得。其中地面测量方法获取的数据精度较高,但受到地域范围、时间、财力等多方面的影响,测量起来比较费时费力(吴伟斌等, 2007)。遥感技术可以实现对地长时间、大面积的监测。因此利用遥感观测数据反演已成为估算 LAI 的主要技术手段(方秀琴和张万昌, 2004)。已经发布的全球 LAI 产品有来自中分辨率成像光谱仪(MODIS)、先进型甚高分辨率辐射计(AVHRR)、辐射偏振探测器(POLDER)等等遥感数据。这些产品已广泛应用于全球的环

境模型、生态模型以及农作物估产模型等。LAI 遥感产品的精度将直接影响到产品的应用范围以及模型的精度。正确估计 LAI 产品的误差范围,是 LAI 遥感产品应用的基本前提。遥感产品的精度和不确定性需要通过地面获取的数据来进行验证。可靠的验证结果可以对算法进行改进,提高产品精度(Liang 等, 2002)。

全球的 LAI 遥感产品的空间分辨率较低,通常为 100 m—10 km(Chen 等, 2002)。而地面测量的参数仅能代表采样范围或者仪器视场范围,通常为几米或几十米。这个代表范围显然与遥感产品像元的空间分辨率相差较远,对于整个像元缺乏代表性。因此直接利用少量测量点的信息验证遥感影像反演结果存在很大的不确定性(Liang 等, 2002)。对于这种尺度差异需要通过尺度转换(Scaling Transfer)来解决。

利用地面测量数据对遥感产品进行的验证方

收稿日期: 2014-03-17; 修订日期: 2014-08-19; 优先数字出版日期: 2014-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41171263); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号: 2013CB733403)

第一作者简介: 刘艳(1988—), 女, 博士研究生, 现从事定量遥感研究, 已发表论文 3 篇。E-mail: yanliu827@gmail.com

通信作者简介: 王锦地(1955—), 女, 教授, 主要从事定量遥感研究与教学。E-mail: wangjd@bnu.edu.cn

法可以分为两种,一种是直接将像元范围内的地面测量数据简单平均作为地面真值对遥感产品进行验证。Stroeve 等人(2005)利用格陵兰冰原的站点地面测量的数据对 MODIS 反照率产品(MOD43)进行了验证,对 MOD43 主算法和备用算法生成的产品在格陵兰冰原冰雪覆盖地区给出了定量的精度描述。Riihela 等人(2010)使用同样的方法在格陵兰冰原利用站点数据对用 AVHRR 反演的反照率产品进行了验证。这种验证方法对产品精度评价的可靠程度主要依赖于地面测量点对遥感像元的代表性如何。而地面测量点对遥感像元的代表性受像元内部的异质性以及采样方案的影响。要得到可信的验证结果,需要优化采样方案以获取对低空间分辨率遥感像元代表性较高的地面测量数据集。但这种代表性难以有定量的描述。Román 等人(2009)使用 ETM+ 影像作为 MODIS 像元的亚像元信息,使用半方差法分析了 Harvard Forest、Morgan Monroe 等站点的空间分布格局,讨论了地面测量数据对像元的代表性。研究结果表明站点对遥感像元的代表性会随着时间的空间发生变化,并不稳定。虽然文中构建了很多参数来分析站点的异质性,但对于地面数据对遥感像元的代表性也没有定量的描述。

利用地面测量数据对遥感产品进行验证的另一种方法是以高空间分辨率遥感影像作为桥梁,拟合地面测量数据与高分辨率遥感影像的关系,生成高分辨地表参数分布图,进一步将分布图平均到遥感产品像元尺度,再用来对遥感产品进行验证。Liang 等人(2002)认为直接使用地面测量点的数据验证 MODIS 反照率产品是不可行的,除非反照率在很大范围上分布是均一的,因为这两种数据的尺度差异太大。Liang 等人(2002)在 Beltsville, MD 站点先将高分辨率遥感影像与地面测量数据进行定标,生成高分辨率反照率分布图,进而将其聚合到低空间分辨率上,用来验证 MODIS 反照率产品。Chen 等人(2002)使用加拿大森林地区测量的 LAI 与 SPOT 影像的植被指数建立经验关系,来生成高分辨率 LAI 分布图,进一步将其尺度上升,通过这样的方法来验证 AVHRR 和 VEGETATION 的 LAI 产品。Yang 等人(2006)分析了两种验证方法的优劣,认为直接使用地面测量数据与 MODIS LAI 进行比较是不可行的。Yang 等人(2006)然后采用第 2 种方法对 MODIS LAI 产品进行了验证。Garrigues 等人(2008)使用相同的方法,选择了分布全球的 41 个地面站点对 CYCLOPES、ECOCLIMAP、MODIS 以

及 CCRS LAI 进行了分析。可以看出第 2 种方法是目前常用的验证方法,可以较好地解决地面测量数据代表范围与遥感像元尺度不匹配的问题。但是这种方法的精度取决于生成高分辨率地表参数分布图的拟合关系的精度,当这种拟合关系的精度无法满足应用模型计算要求的时候,这样的验证结果是不精确的。

泰勒级数展开模型(TSM)尺度转换理论认为不同尺度地表参数由于尺度效应造成的差异主要由两点原因引起,一是地表参数在空间上的异质性分布,二是反演模型的非线性。这两点原因必须同时存在才会有尺度效应,否则就没有尺度效应。即当地表参数分布均一或者反演模型是线性的时候,估算地表参数可不考虑尺度效应。

这种方法早在 20 世纪 90 年代就有科学家用来讨论遥感参数的尺度效应。Hu 和 Islam(1997)基于泰勒级数展开模型提出了尺不变算法的设计框架,用这种方法分析了归一化植被指数(NDVI)的尺度不变算法。Li 等人(2000)利用这种模型推导了普朗克定律的尺度纠正因子,将适用于点上的物理定律扩展到以存在异质性的像元(面)为单位的地表发射率的遥感估算上。吴骅等人(2009)用泰勒级数展开模型探讨了 LAI 的尺度问题,认为泰勒级数模型能够很好地刻画 LAI 的尺度效应,利用该方法对低分辨率 LAI 尺度纠正后的相对误差小于 1%。以上的研究表明,泰勒级数展开模型用于分析尺度问题时,较好地融合了低分辨率像元数值和像元内部异质性的信息,能够用来表达不同尺度地表参数之间的关系。

2 方法和实验

2.1 泰勒级数展开模型的升尺度方法

本文在原泰勒级数展开模型(TSM)(Hu 和 Islam, 1997)的基础上进行了改进,针对通常地面实测数据在粗分辨率像元内仅具有有限个实测点,且像元内非均一的情况,提出一种将有限的点测量真值升尺度到像元尺度的方法,用于解决 LAI 遥感产品验证中地面测量数据与遥感产品尺度不匹配的问题。

泰勒级数展开模型认为地表参数值的像元真值是像元范围内各均一下垫面亚像元地表参数值的面积加权值。地表参数的反演模型用 $f(x)$ 来表示,像元真值的表达式为: $F_D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i)$ 。式

中 n 是像元内亚像元的个数, x_i 是每个亚像元上用于地表参数反演的遥感观测或者经过无尺度效应运算的遥感观测, 比如反射率、植被指数等等。

地面测量数据是低空间分辨率像元的亚像元信息, 用 F_m 表示。地面测量数据不能直接代表像元尺度的信息。需要利用一定的辅助信息将地面测量数据转换到像元尺度, 使其可代表该像元的真值。泰勒级数展开模型推导过程如下:

假设反演函数 $f(x)$ 至少两阶连续可导, 那么将函数值在 x_0 处用泰勒级数展开, 且忽略三阶以及三阶以上各项, 则有:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x - x_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) (x - x_0)^2 \quad (1)$$

假定该像元内只有一个地面测量数据, 对于像元内每一个亚像元都在地面测量数据对应的 x_0 处做泰勒级数展开进行离散化, 然后将像元范围内所有的亚像元相加取平均求得像元值, 自变量的均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 用 x_{mean} 来表示。得到下式:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) &= f(x_0) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x_i - x_0) + \\ &\frac{1}{2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) (x_i - x_0)^2 = \\ &f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x_{\text{mean}} - x_0) + \\ &\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}} + x_{\text{mean}} - x_0)^2 = \\ &f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x_{\text{mean}} - x_0) + \\ &\frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2 + (x_{\text{mean}} - x_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

将像元内部方差 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2$ 用 VAR 来表示。理论上 F_m 和该点遥感观测估算值 $f(x_0)$ 是相等的。上式可以简化为:

$$F_D = F_m + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) [VAR + (x_{\text{mean}} - x_0)^2] \quad (3)$$

基本的泰勒级数用于处理尺度效应时, 着重于分析异质性对地表参数在不同尺度上差异的影响, 因此在基本泰勒级数公式中, x_{mean} 与 x_0 是相等的。而应用于实测数据的时候, 由于采样并不能保证在

像元的平均值处, 因此两者之间有一定差异。式 (3) 中的等号右侧的后两项称为对地面测量数据进行尺度转换的修正项, 用 F_x 表示。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) \cdot [VAR + (x_{\text{mean}} - x_0)^2] \quad (4)$$

式 (3) 表达了低分辨率像元尺度的真值 F_D 与地面测量数据 F_m 的关系。它们之间的差异主要受参考模型 $f(x)$ 、地面测量数据对应的遥感观测与像元均值的差异以及像元内部的异质性 (内部方差) 的影响。

由于归一化植被指数 (NDVI) 与叶面积指数 (LAI) 存在着很大的相关性, 这两个参数之间的关系往往是非线性的。因此, NDVI 常用于 LAI 估算 (Baret 和 Guyot, 1991)。本文中并没有直接使用 NDVI 估算 LAI。只是将 NDVI 和 LAI 之间的统计关系作为参考模型, 得到升尺度转换的修正项。其中高分辨率 NDVI 用于估计低分辨率像元的异质性 (式 (4) 中的 VAR)。实测点与低分辨率像元的差异通过计算像元 NDVI 均值 (x_{mean}) 和实测点 NDVI (x_0) 得到。

2.2 误差分析

传统的验证方法以及泰勒级数展开模型并没有考虑经验公式以及泰勒级数的误差, 本文进一步分析升尺度方法的可能误差。这种升尺度方法有两个误差来源: 泰勒级数展开模型简化的前提假定以及 NDVI 与 LAI 的统计模型的不确定性。

2.2.1 泰勒级数展开模型前提假定所带来的误差

泰勒级数展开模型公式在推导时忽略泰勒级数展开式中三阶导数以及三阶导数以后各项。这一简化的前提条件是三阶导数以及三阶以上各泰勒级数项贡献很小, 可以忽略不计。但在具体的计算中, 这种前提有时无法满足, 从而会引入较大的误差。因此这一部分误差需要定量估算。本文使用泰勒级数余项来对这一部分误差进行估计。

式 (5) 为有泰勒级数余项的泰勒展开式。其中余项的大小采用拉格朗日余项 $R_n(x)$ 来进行估计, 如式 (6) 所示。

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x} f(x_0) (x - x_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_0) (x - x_0)^2 + \cdots +$$

$$\frac{1}{n!} \frac{\partial^n}{\partial x^n} f(x_0) (x - x_0)^n + R_n(x) \quad (5)$$

$$R_n(x) = \frac{1}{(n+1)!} \frac{\partial^{(n+1)}}{\partial x^{n+1}} f(\varepsilon) (x - x_0)^{n+1} \quad (6)$$

对于每一个亚像元 $R_n(x)$, 进行如下的推算。
若在公式成立的区间上

$$\left| \frac{\partial^{(n+1)}}{\partial x^{n+1}} f(x) \right| \leq M \quad (7)$$

则 $R_n(x)$ 有如下推算:

$$|R_n(x)| = \frac{M}{(n+1)!} |x - x_0|^{n+1} \quad (8)$$

对于每一个亚像元的 R_{li} 估计如下:

$$R_{li} = \max(|R_n(x)|) \quad (9)$$

像元泰勒级数展开模型前提假定所带来的误差 R_1 的大小为各亚像元 R_{li} 的平均值。

$$R_1 = \frac{1}{n} \sum R_{li} \quad (10)$$

本文使用的 NDVI-LAI 统计模型的模式为:

$$LAI = \frac{\ln[(1 - NDVI/a) \cdot b]}{-c} \quad (11)$$

式中 a, b, c 均为正数。在泰勒级数展开模型中, 忽略了三阶以及三阶以上各项, 因此 n 为 2, 所以 $f^{(n+1)}(x)$ 有如下估算:

$$f^{(n+1)}(x) = \frac{2}{ca^3 \left(1 - \frac{x}{a}\right)^3} \quad (12)$$

$f^{(n+1)}(x)$ 是单增函数, 式(6)中的 ε 为介于 x 与 x_0 之间的数值。因此求算 M 只需要带入 x 与 x_0 之间的最大值即可。针对每一个亚像元分别计算出误差 R_{li} , 然后将所有亚像元的误差取平均。这样就给出了泰勒级数展开模型前提假定所带来误差的上限 R_1 。

2.2.2 NDVI-LAI 统计模型引入的误差

构建统计分析模型的经验公式的不确定性可用总均方根差 RMSE (Root Mean Square Error) 来评价。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (13)$$

式中 y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为实际测定值和模型预测值, n 为样本数。在式(3)中, 地面测量数据部分 F_m 没有引入统计模型, 所以这一部分没有引入统计模型的误差。统计模型引入的误差 R_2 主要由修正项 F_x 引入, 这一部分引入误差的比例与修正项大小有

关。这个比例为修正项与统计模型计算值的比值。因此 R_2 计算方式如下:

$$R_2 = \frac{|F_x|}{F_{yc}} RMSE \quad (14)$$

升尺度方法总的误差是这两项误差值之和。即:

$$R = R_1 + R_2 \quad (15)$$

像元内存在多个地面测量点的时候, 像元的升尺度误差为各代表范围误差的加权平均。

3 数据处理与结果分析

3.1 数据处理

黑河流域是中国第二大内陆河流域, 面积约 1 2.87 万 km^2 , 位于 $96^\circ 42' \text{E}$ — $102^\circ 00' \text{E}$, $37^\circ 41' \text{N}$ — $42^\circ 42' \text{N}$, 包括高山冰雪带、森林草原带、平原绿洲带及戈壁荒漠带等不同的景观类型。是中国内陆河流域研究的基地之一, 具有良好的研究基础、完备的观测系统和丰富的数据积累。黑河综合遥感联合试验 (WATER) 是国家重点基础研究发展计划“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”和“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”共同组织进行的大型航空、卫星遥感和地面同步观测实验, 于实验期间获取了大批宝贵的星—机—地同步遥感实验数据 (李新等, 2010)。本文使用该实验 2008 年获取的数据, 对改进后的泰勒级数展开模型进行了升尺度实验。表 1 为输入数据的信息。其中机载 CCD 传感器有 4 个波段, 中心波长分别为 550 nm, 650 nm, 700 nm 和 750 nm。采用 650 nm 和 750 nm 数据计算 NDVI (方莉等 2009)。

表 1 输入数据信息

Table 1 Input data information

原始数据集	参数	时间信息	空间分辨率
地面测量数据	LAI	5 月 20 日— 7 月 15 日	覆盖面积约 1—10 m^2
机载 CCD	DN	6 月 29 日	1.25 m
连续纠正法 ASTER	NDVI	DOY145—DOY193 时间间隔为 8 天	15 m
ASTER	反射率	5 月 3 日— 6 月 4 日	15 m
TM	反射率	7 月 22 日—7 月 7 日	30 m

3.1.1 地面测量 LAI 数据

地面测量数据为盈科绿洲与花寨子荒漠加密观测区的 LAI 数据集(范闻捷等 2008),本文选取其中玉米作物的测量数据(图 1),测量数据获取期为玉米出苗后的生长期,采样区玉米长势良好。LAI 的测量方法采用 LAI-2000、TRAC、鱼眼相机和手工测量等多种方式。详见黑河综合遥感联合试验数据网站([2014-03-07]http://westdc.westgis.ac.cn/water/)。数据记录中有真实 LAI 以及有效 LAI,因此需要将记录中的有效 LAI 转换为真实 LAI。转换方法参考 Liu 等(2007)给出的有效 LAI 以及真实 LAI 之间的关系,如下式:

$$LAI_{\text{effective}} = 0.9LAI_{\text{true}} \quad (16)$$

经整理后形成真实 LAI 地面点测量数据集。

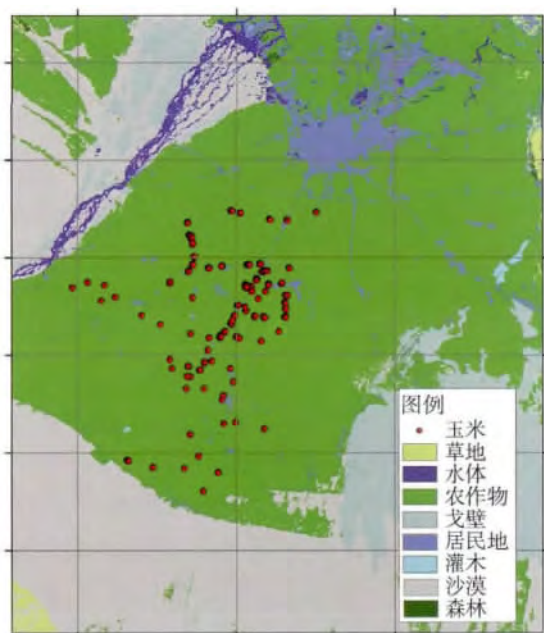


图 1 玉米地面测量 LAI 分布图

Fig. 1 Ground measured LAI map

3.1.2 高分辨率遥感影像

高分辨率遥感影像数据集包括 CCD 航片以及 ASTER 反射率遥感影像。这两个数据用来统计不同尺度上的信息。

CCD 是航片拼接而成,它的分辨率与地面测量的代表范围最为接近,但只有一景影像,且没有经过大气纠正,直接用于计算像元内部异质性会出现一定误差,所以需要利用 ASTER 数据对 CCD 进行了相对定标。本文使用的 ASTER NDVI 数据集为 Cai 等(2010)利用连续纠正法生成的在时间上连续

的 NDVI 数据。这种方法采用数据同化的方法,以具有类别标志的 MODIS NDVI 多年均值为背景场,以该类别的 ASTER 影像的 NDVI 为观测,结合这两个数据源的误差,生成 15 m 空间分辨率、8 天一次的 NDVI 分布图。为了匹配低分辨率遥感产品的坐标系统,对 CCD 航片以及 ASTER 影像进行了投影转换。然后统计每个 ASTER 像元的 NDVI 以及对像元内所有 CCD 像元 NDVI 均值,用其间的关系对 CCD 进行相对定标。

3.1.3 NDVI-LAI 统计模型

用 NDVI 与 LAI 的统计分析模型来估算 LAI 是一种简洁、有效的估算方法,常作为研究区 LAI 的遥感估算。基于泰勒级数展开模型的尺度上升的方法需要利用 NDVI 与 LAI 之间的统计分析模型来反映两种参数之间的关系。

由于 TM 数据与 ASTER 数据空间分辨率相近,且红光及近红外波段范围较为接近,NDVI 有一定的可比性。为了增加与实测 LAI 相匹配的遥感观测 NDVI 的数量,挑选出的 TM 与 ASTER 纯像元共同与地面测量 LAI 进行拟合。所得到的统计关系,用作 LAI 尺度转换计算的参考模型。以同区域 1.25 m 空间分辨率的机载 CCD 影像与 TM、ASTER、地面测量点配准,并辅助判断 TM、ASTER 是否为纯像元。实测数据与遥感影像选择的对应关系如表 2 所示。其中 2008 年 5 月 3 日 ASTER 影像与 2008 年 5 月 20 日实测 LAI 时间间隔较大,但由于在这段玉米生长初期 LAI 值大多小于 1,其差异对拟合结果的影响并不大。

表 2 实测数据与影像数据获取时间对应表

Table 2 Ground measured LAI and remote sensed NDVI

时间	测量方法	影像数据
2008-07-09	LI-3000 手工	2008-07-07 TM
2008-05-20	LI-3000	2008-05-03 ASTER
2008-06-11	LAI-2000 鱼眼相机	2008-06-04 ASTER
2008-07-14— 2008-07-15	LAI-2000	2008-07-22 ASTER

拟合结果如图 2,拟合公式如式(17),统计模型的 $R^2 = 0.7682$, $RMSE = 0.76$,拟合度较高。总体来说该统计分析模型是可信的。

$$LAI = \frac{\ln[(1 - NDVI/0.8)/0.9385]}{-0.3619} \quad (17)$$

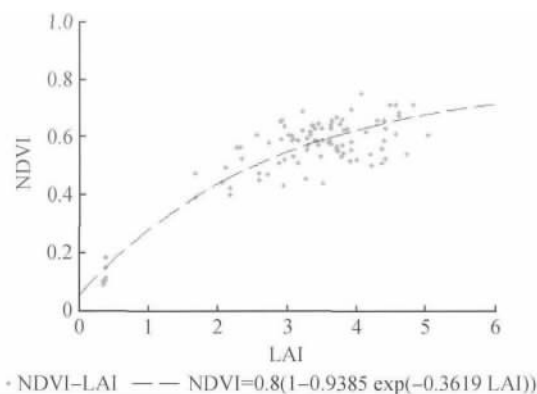


图2 NDVI-LAI 统计模型拟合

Fig. 2 Empirical model of NDVI and LAI

3.1.4 处理流程

图3为升尺度数据处理流程,其中TSM是泰勒级数展开模型的缩写。

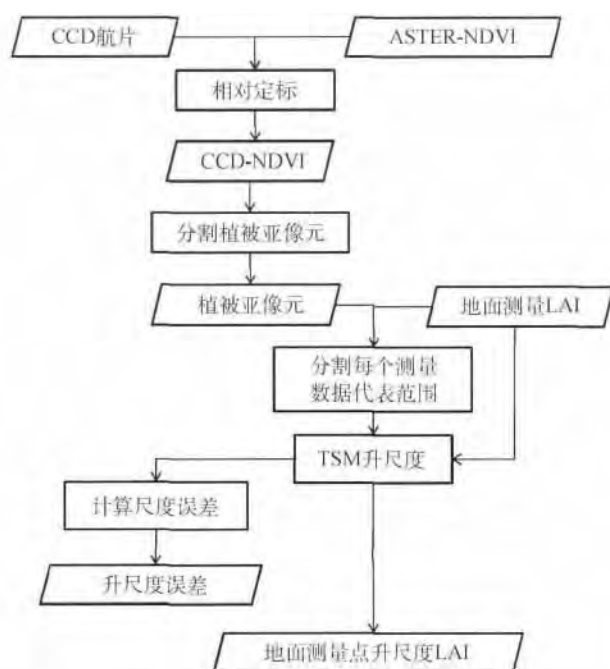


图3 地面测量数据升尺度流程图

Fig. 3 Flowchart of upscaling ground measured LAI

由于该统计模型只适用于植被区域,因此首先需要区分像元内部的植被区域和非植被区域。若像元内的地面测量数据只有单点,将该地面测量数据用式(3)上升至像元尺度;若像元内有多个地面测量数据,则需要划分每个测量数据所代表的范围。划分方法为,首先计算高分辨率影像像元NDVI与每个实测点NDVI的差值。对比差值的大小,将NDVI差值最小的地面测量数据作为相应高分辨

率像元的代表值。并且根据代表范围所占面积比例计算每个地面测量数据的代表权重。然后将各地面测量数据尺度上升到代表范围内。最后将所有尺度上升的结果加权平均,就得到了像元尺度上的升尺度结果。

3.2 结果分析

针对升尺度结果从两方面进行了分析:(1)与传统的地面测量数据加权平均进行比较;(2)与MODIS GLASS(Global Land Surface Satellite) LAI产品进行比较。

选取数据时,本文参考了地表参数的特征精度。根据Zhang等人(2010)的定义,特征精度是指地表参数能够满足应用模型具体计算,反演和应用要求精度的数量级。Zhang等人(2010)认为LAI的特征精度值在0.1—0.6,且特征精度与像元尺度是相关的,即尺度越大,特征精度值越大。本文对1 km尺度选择0.6作为特征精度。

3.2.1 与地面参考真值比较

利用地面测量数据验证遥感产品的常用方法是将像元内的地面测量数据简单加权平均作为像元的地表真值。在采样较为密集的情况下,例如采用地毯式扫描测量(Zhang等2010),这种方法比较可信。但这种方法较为依赖地面采样点的数值,而且无法提供误差范围。在不具备1 km尺度LAI地面测量真值的条件下,本文采用式(17)所示NDVI-LAI统计模型计算高分辨率植被亚像元的LAI值,将1 km像元内所有亚像元LAI计算值平均到像元,暂且作为测试升尺度算法的LAI参考真值(Chen等2002; Yang等2006; Garrigues等2008)。

在实际情况下,地面实测点在1 km像元内往往只有很有限的几个点,如果只用这几个点的平均值代表像元尺度真值,则在像元内异质性明显时,往往不被接受。本文采用改进后的泰勒级数方法将有限点观测值转换到1 km的像元尺度上,并与LAI参考真值进行了对比,如图4所示。其中 r 代表泰勒级数展开模型升尺度方法的误差,用式(15)计算。根据误差的大小,将数据分为了4组。绿色的点代表升尺度误差小于特征精度数值一半的数据。这一组数据精度较高,可以作为标准的验证数据。1 km上特征精度数值为0.6,因此选择了特征精度的一半,即0.3作为标准。黄色的点表示升尺度误差较大的数值,但是在数据不足的情况下仍可以用

来对遥感产品进行验证,此处选择 0.5 作为标准;红色和紫色的点表示升尺度误差很大的点,难以用作验证数据。

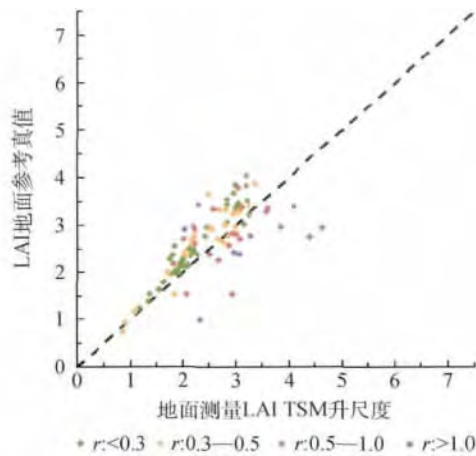


图4 地面测量 LAI 加权平均与 TSM 升尺度比较

Fig.4 Comparison of empirical model calculated LAI and TSM upscaled ground measured LAI

从泰勒级数展开模型的误差计算公式(式(5)一式(15))中可以看出,测量数据与像元整体水平差异较大时,升尺度的误差也较大。图4从另一个侧面印证了这一点。泰勒级数展开模型提供的误差信息,可作为对升尺度结果评价的参考值。

3.2.2 与 MODIS GLASS LAI 遥感产品比较

MODIS LAI 产品使用了 MOD09(反射率数据)以及 MOD12(地表覆盖分类数据)来反演 LAI,采取的反演策略是:首先针对不同植被类别用主算法以及 MODIS 7 个波段反射率来计算 LAI,当主算法反演失败,采用备用算法,用 NDVI 来估算 LAI(Knyazikhin 等,1998)。GLASS 产品使用广义回归神经网络(GRNN)从时间序列上的 MODIS 叶面积指数, CYCLOPES 叶面积指数和 MODIS 反射率产品来估算叶面积指数。这两个产品时间分辨率为 8 天,空间分辨率为 1 km。本文选用实测数据对应的像元进行比较,针对 MODIS 仅仅使用了主算法的反演结果。

图5和图6分别为升尺度结果与两种产品数据对比的散点图,其中 LAI-MODIS 代表 MODIS LAI 数值, LAI-GLASS 代表 GLASS LAI 数值, LAI-upscaled 表示使用泰勒级数展开模型对地面测量数据升尺度后的数值。此处只选用了升尺度误差小于 0.3 以及 0.3—0.5 的数据用于比较,统计结果 R^2 以及 RMSE 分别列于表2和表3。

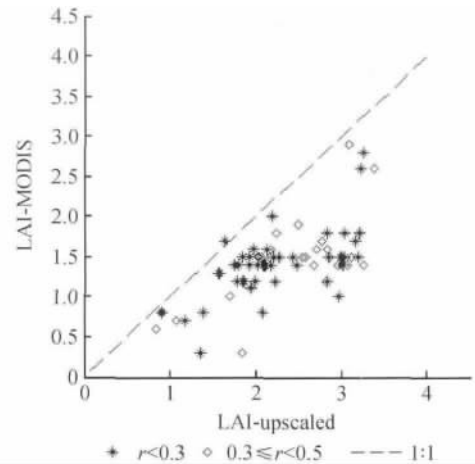


图5 MODIS LAI 产品与升尺度后实测点比较

Fig.5 Comparison of MODIS LAI and TSM upscaled ground measured LAI

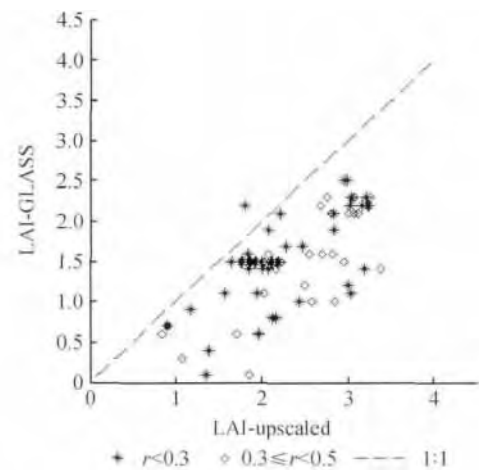


图6 GLASS LAI 产品与升尺度后实测点比较

Fig.6 Comparison of GLASS LAI and TSM upscaled ground measured LAI

表3 与 MODIS LAI 相关性

Table 3 Correlation of MODIS LAI

参数	$r < 0.3$	$0.3 \leq r < 0.5$
RMSE	0.960	0.991
R^2	0.385	0.454

表4 与 GLASS LAI 相关性

Table 4 Correlation of GLASS LAI

参数	$r < 0.3$	$0.3 \leq r < 0.5$
RMSE	0.862	0.931
R^2	0.443	0.526

从对比结果可以看出,与本实验区实测点数据升尺度结果相比,两种 LAI 产品数值均有低估,

GLASS LAI 比 MODIS LAI 更接近实测点数据升尺度后结果。但是由于实测点本身也存在不确定性, 实测数据的有效范围应为 $LAI\text{-upscaled} \pm r$ 。选取拥有最长时间序列实测数据对应的一个像元, 从时间序列上与 MODIS LAI 和 GLASS LAI 进行对比分析, 如图 7 所示。

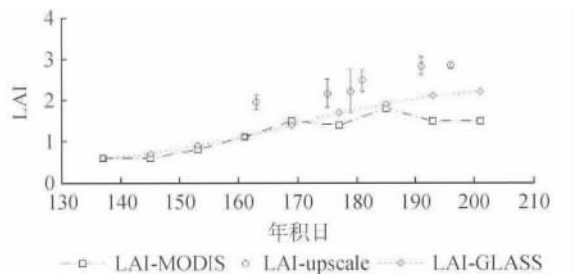


图 7 MODIS LAI ,GLASS LAI 产品与升尺度后
实测点时间序列的比较

Fig. 7 Temporal plot of MODIS ,GLASS and upscaled LAI

图 7 中黑色的竖线表示该数据的误差大小, 圆点代表均值, 因此整个图标的长度代表该数据的有效范围。从图 7 中可以看出, 升尺度后的地面实测数据在时间序列上与 MODIS ,GLASS LAI 吻合较好。特别在 LAI 数值较低的区域, 较为接近; 在高值区域则有一定的差异。这与 Garrigues 等(2008)在作物区域的趋势是一致的。低分辨率影像可能忽略一些像元内部的信息, 因此可能造成与实测数据有所差异。

4 结 论

尺度效应与尺度转换是遥感建模、反演与验证中关注的科学问题, 泰勒级数展开模型多用于研究异质地表条件下遥感建模中的尺度效应表达和尺度转换方法。本文针对遥感产品验证中地面点测量数据与遥感产品尺度不匹配的问题, 研究了基于泰勒级数展开模型将地面测量数据升尺度到像元尺度, 得到遥感产品验证参考值的方法。该方法用亚像元 NDVI 的空间分布表达像元的异质性, 将地面实测点 NDVI 和像元 NDVI 的差值作为升尺度的参考因子, 将有限点观测转换到 1 km 像元尺度。并分析了泰勒级数展开模型的精度以及误差计算方法。然后利用这种升尺度方法, 将黑河综合遥感联合试验区地面测量 LAI 进行尺度上升, 与遥感产品进行比较。

泰勒级数展开模型将黑河综合遥感联合试验

区地面测量 LAI 进行尺度上升时存在的主要问题是 NDVI 与 LAI 统计模型。本文中虽然尽量选用纯像元来构建该统计模型, 但是 NDVI 与 LAI 仍然不处于同一尺度, 地面测量 LAI 的代表性受到采样方法、对多种仪器测量数据处理方法的影响, 可能会引起一定误差。

与其他验证方法相比较, 这种方法的优势在于在将地面测量 LAI 数据尺度上升的过程中综合了多尺度信息, 并且可以定量计算出每个像元的升尺度误差, 为验证数据选择提供标准。然而其适用性仍需进一步验证。

参考文献(References)

- Baret F and Guyot G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35(2-3): 161-173 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90009-U]
- Cai W W, Song J L, Wang J D and Xiao Z Q. 2010. Assimilation MO-DIS and HJ-1 reflectance images to produce NDVI of high spatial and temporal resolution // *Proceedings of the 6th International Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*. Chengdu: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/WICOM.2010.5601000]
- 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, 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]
- Fan W J, Xin X Z, Yan G J, Wang J D, Tao X, Yao Y J, Yan B Y, Shen X Y, Zhou C Y, Li L, Liu S H, Su G L, Wen J G, Xia C F, Zhang Y, Zhou M W, Chen L, Ren H Z and Xiao Y T. 2008. WAT-TER: Dataset of LAI measurements in the Yingke oasis and Huazhai desert steppe foci experimental areas. Peking University; Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences; Beijing Normal University (范闻捷, 辛晓洲, 阎广建, 王锦地, 陶欣, 姚延娟, 闫彬彦, 沈心一, 周春艳, 李丽, 刘思含, 苏高利, 闻建光, 夏传福, 张阳, 周梦维, 陈玲, 任华忠, 肖月庭. 2008. 黑河综合遥感联合试验: 盈科绿洲与花寨子荒漠加密观测区叶面积指数 LAI 观测数据集. 北京大学; 中国科学院遥感应用研究所; 北京师范大学 [DOI: 10.3972/water973.0137.db])
- Fang L, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H and Liu Z G. 2009. Design and implementation of airborne wide-angle infrared dual-mode line/area array scanner in Heihe experiment. *Advances in Earth Science*, 24(7): 696-704 (方莉, 刘强, 肖青, 柳钦火, 刘志刚. 2009. 黑河试验中机载红外广角双模式成像仪的设计及实现. 地球科学进展, 24(7): 696-704)

- Fang X Q and Zhang W C. 2004. The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index. *Remote Sensing for Land & Resources*, (3): 58–62 (方秀琴, 张万昌. 2004. 叶面积指数 (LAI) 的遥感定量方法综述. *国土资源遥感*, (3): 58–62)
- 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: Biogeosciences* (2005–2012), 113(G2) [DOI: 10.1029/2007JG000635]
- Hu Z L and Islam S. 1997. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 747–755 [DOI: 10.1109/36.581996]
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, Diner D J and Running S W. 1998. 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* (1984–2012), 103(D24): 32257–32275 [DOI: 10.1029/98JD02462]
- Li X, Li X W and Li Z Y. 2010. Watershed allied telemetry experimental research (WATER) datasets are available for open access. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(6): 761–765 (李新, 李小文, 李增元. 2010. 黑河综合遥感联合试验数据发布. *遥感技术与应用*, 25(6): 761–765)
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 2000. Scale effects and scaling-up by geometric-optical model. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 43(S1): 17–22 [DOI: 10.1007/BF02916574]
- 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 R, Chen J M, Liu J, Deng F and Sun R. 2007. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 649–658 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.04.023]
- Riihelä A, Laine V, Manninen T, Palo T and Vihma T. 2010. Validation of the climate-SAF surface broadband albedo product: Comparisons with in situ observations over greenland and the ice-covered Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2779–2790 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.06.014]
- 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]
- Stroeve J, Box J E, Gao F, Liang S L, Nolin A and Schaaf C. 2005. Accuracy assessment of the MODIS 16-Day albedo product for snow: Comparisons with greenland *in situ* measurements. *Remote Sensing of Environment*, 94(1): 46–60 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.001]
- Wu H, Jiang X G, Xi X H, Li C R and Li Z L. 2009. Comparison and analysis of two general scaling methods for remotely sensed information. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 183–189 (吴骅, 姜小光, 习晓环, 李传荣, 李召良. 2009. 两种普适性尺度转换方法比较与分析研究. *遥感学报*, 13(2): 183–189)
- Wu W B, Hong T S, Wang X P, Peng W X, Li Z and Zhang W Z. 2007. Advance in ground-based LAI measurement methods. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 26(2): 270–275 (吴伟斌, 洪添胜, 王锡平, 彭万喜, 李震, 张文昭. 2007. 叶面积指数地面测量方法的研究进展. *华中农业大学学报*, 26(2): 270–275)
- Yang W Z, Tan B, Huang D, Rautiainen M, Shabanov N V, Wang Y, 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]
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B, Chen S H and Tang X Z. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Science China Earth Sciences*, 53(5): 741–751 [DOI: 10.1007/s11430-010-0021-3]

Upscaling approach for validation of LAI products derived from remote sensing observation

LIU Yan, WANG Jindi, ZHOU Hongmin, XUE Huazhu

State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: The quality of remote sensing Leaf Area Index (LAI) products and the uncertainties of the products are evaluated with ground measurements. The spatial scale mismatch problem of these two data should be solved through upscaling before comparing these two dataset. To evaluate remote sensing LAI products using ground measurements, the spatial scale mismatch problem of these two datasets should be solved first. A new approach based on Taylor Series Expansion Model (TSM) was proposed in this paper. It combines the information of high-resolution images, NDVI-LAI empirical model and the LAI ground measurements to generate the upscaled LAI at the coarse-resolution scale. This approach not only can upscale ground measured LAI to coarse-resolution,

it also can provide upscaling accuracy for each pixel. The LAI measurements collected in 2008 in the Heihe experimental research region was used to test this method. The possible error associated with this method is from two sources. One is neglect of the third- and higher-order TSM terms, which can be estimated using Taylor series remainder. Another is the uncertainty of the empirical model. The total error of the upscaling method is the sum of these two errors. The data used in this study were collected during the Watershed Allied Telemetry Experimental Research (WATER) project. The ground measurements were collected in the Yinke Oasis and the Huazhaizi Desert experimental area using LAI-2000, TRAC, fisheye camera, and by manual measurement. The corn LAI dataset was chosen for analysis. Airborne CCD and ASTER data were used to help upscaling to ground measurements. Upscaled LAI ground measurements were compared with NDVI-LAI empirical model calculated LAI and MODIS, GLASS LAI product at 1km scale. The accuracy of the upscaling process was used as reference to select the upscaled LAI. Empirical model calculated LAI is usually considered as more reliable validation data, but it's not directly associated with ground measured LAI, and can't provide accuracy of each pixel. Comparison with empirical model calculated LAI shows that this approach can provide reliable result. Also the accuracy of this approach is a good indicator for selecting validation data. By using the upscaled LAI with a acceptable accuracy only, comparison with MODIS and GLASS LAI products show that both products are lower than ground measured LAI at this region. In comparison with other validation method, this method can improve the representativeness of ground measurements by combining more information at the sub-pixel scale and considering the heterogeneity of the land surface. Consequently, this method is suitable for validation studies in which the field-measured data are derived from non-uniform surfaces at coarse-resolution pixel scales. It's a new approach to upscale ground measurements for validation of coarse-resolution products. Mostly important is that the upscaling accuracy can be estimated for each pixel, which can provide a reference of how to select high quality ground measurements for validation. Though comparison with MODIS and GLASS LAI products in Heihe region shows both products are underestimating LAI, but this conclusion is not suitable at global scale.

Key words: validation, LAI, upscaling, TSM, Heihe river basin