

叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正

刘良云

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,中国科学院数字地球重点实验室,北京 100101

摘要: 由于地表空间异质性的普遍存在,遥感反演模型的非线性必然会导致不同分辨率观测的遥感结果不一致,从而产生遥感产品尺度效应。本文研究了遥感产品尺度效应概念、模拟方法和定量计算模型,并利用锡林浩特草原研究区的实测数据,对尺度效应模型和方法进行了定量计算与验证分析。首先,基于不同分辨率方法与多尺度遥感成像机理之间的机理联系,通过“先反演再平均”与“先平均再反演”之间的差异,可计算“高”分辨率与“低”分辨率之间的遥感产品尺度差异。其次,分别以红光、近红外两波段反射率和归一化植被指数(NDVI)为自变量,对叶面积指数(LAI)非线性遥感模型进行泰勒展开,研究了模型非线性、遥感数据空间异质性对LAI遥感产品尺度差异的影响,发现高阶项可忽略,利用二阶导数项和遥感数据方差项可定量计算遥感产品尺度差异,经过二阶导数项纠正后的尺度差异相对偏差从5.6%分别降低到0.78%和1.45%。最后,分析了LAI遥感产品尺度效应的特征规律,得出以下结论:随着植被覆盖的增大,同等遥感空间异质性的LAI遥感产品尺度差异越大,且红光波段比近红外波段的尺度差异敏感性高近2个数量级;对于绝大部分陆地植被区域,存在“低分辨率低估”尺度效应,且遥感产品尺度差异的主导要素为LAI模型非线性,NDVI变量自身非线性对尺度效应贡献占23.5%;对于湿地类植被与水体混合情形,NDVI变量非线性的贡献为主导贡献,出现“低分辨率高估”尺度效应,必须利用红光、近红外两波段的二阶导数项非线性尺度差异,才能解释这一类型的LAI遥感产品尺度效应。本文建立了具有一定普适意义的遥感产品尺度效应定量模拟与尺度纠正方法,对推动定量遥感的尺度问题研究有一定参考价值。

关键词: 尺度效应,升尺度,叶面积指数,泰勒展开,非线性,空间异质性

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 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

Liu L Y. 2014. Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index. Journal of Remote Sensing, 18(6): 1158-1168 [DOI: 10.11834/jrs.20144103]

1 引言

尺度是一个宽泛的概念,对于遥感领域而言,尺度效应涉及遥感数据像元大小、地表空间异质性、遥感辐射传输过程、产品反演模型和产品尺度转换等方面。地球表面空间是一个复杂的巨系统,在某一尺度上观察到的性质、总结出的原理或规律,在另一尺度上可能有效、可能相似,也可能需要修正。加之遥感观测信息多空间分辨率并有的特点,从定量遥感出发的地学描述必然存在多尺度的问题(李小文等,2002;李小文和王祎婷,2013;李小

文,2005)。尺度问题作为遥感科学中的关键问题,已存在30多年,并得到研究者的普遍关注。但是,已取得的方法和结果距离实际应用还有较大的差距,对尺度效应的认识和方法论还不够系统,严重制约了定量遥感“突破非普适性的瓶颈、再上新台阶”的发展(李小文,2006;李小文和王祎婷,2013;张仁华等,1999)。

从物理本质上来说,定量遥感尺度效应源于地物空间复杂性,这种复杂性体现在地物空间结构、地物本身辐射特性、冠层层面的植被组分差异、遥感数据像元层面的尺度差异以及像元内部组分差

收稿日期:2014-04-24;修订日期:2014-07-11;优先数字出版日期:2014-07-18

基金项目:国家自然科学基金(编号:41325004);“中国科学院新型对地观测系统科技创新交叉合作团队”项目

第一作者简介:刘良云(1975—)男,博士,研究员,主要从事植被定量遥感研究。E-mail:lyliu@ceode.ac.cn

异等(Li 和 Wang ,1998; 李小文 等 ,1999 2000) 。遥感产品尺度效应存在各种理解 ,对定量遥感科学中的空间尺度效应定义为: 同一区域、同一时间、同样遥感模型、同类遥感数据、同等成像条件 ,只是分辨率不同导致的遥感反演地表参量不一致 ,且这种地表参量属于存在物理真值的可标度量 ,这种现象称为遥感产品尺度效应(刘良云 ,2014) 。对于该定义的遥感尺度效应 ,只有两种情况下不存在尺度差异: (1) 地表均一 ,没有空间异质性; (2) 遥感产品反演模型是线性反演模型、且模型驱动变量与辐亮度信号是线性变换的。由于地表空间异质性的普适性存在 ,任何非线性遥感模型的遥感反演产品都存在尺度效应。

由于地表空间异质性的普遍存在和遥感模型的非线性原因 ,定量遥感反演过程中 ,在保证遥感数据质量、反演模型精度、算法适用的区域和植被类型、实测数据精度等各个因素准确的情况下 ,同样的方法计算出来的不同尺度的数据也存在差异。已有部分研究来分析这种现象 ,很多学者证明当叶面积指数(LAI) 算法应用在不同尺度的数据上时 ,如果地表有异质性或算法有非线性 ,则 LAI 结果会存在差别(Raffy ,1994; Friedl 等 ,1995; Lovejoy 等 ,2001; Garrigues 等 ,2006; 孙晨曦 等 ,2013 ,2014; 范闻捷 等 2013; 陈健 等 2006) ,这就是 LAI 遥感产品的尺度效应。研究表明 ,地表异质性是遥感产品尺度效应的根源 ,地表异质性和算法非线性均能产生尺度效应 ,这种结果是两者耦合在一起造成的。Chen(1999) 发现森林区域尺度差异会引起 2% 的低分辨率低估 ,但当植被和水体混合时 ,尺度效应会导致低分辨率高估误差达 45% 。吴骅等人(2009) 开展了 LAI 反演与尺度效应分析 ,发现林地、农田和水体 3 种地表覆盖的尺度效应的相对误差分别为 2%、7% 和 7% ,且以 NDVI 为自变量的 1 维泰勒级数模型能够很好地刻画尺度效应 ,可将尺度效应引起的相对误差降低到小于 1% 。

在上述研究基础上 ,本文试图进一步定义遥感产品尺度效应的物理内涵 ,完善遥感产品尺度效应的模拟计算方法 ,并以 LAI 指数统计模型为例 ,结合 Taylor 展开数学工具 ,研究模型非线性和遥感数据空间异质性对 LAI 产品尺度效应的影响 ,实现不同升尺度模拟的 LAI 尺度差异与二阶导数项尺度差异的交叉验证 ,阐明 LAI 遥感产品尺度效应的特征规律。

2 混合像元与遥感产品尺度差异定量计算模型

2.1 不同升尺度方法与遥感产品尺度差异计算

对于陆地植被 ,尺度效应会导致低分辨率(本文中的“高”、“低”分辨率是一个相对概念 ,表示两者中较高或较低的情况) 遥感反演的 LAI 低估现象; 对于湿地植被 ,尺度效应却会导致低分辨率遥感反演的 LAI 高估现象(Chen ,1999; 刘良云 2014) 。

尺度转换就是将数据或信息从一个尺度转换到另一个尺度的过程(张仁华 ,2010) 。根据尺度效应原理分析 ,高分辨率尺度的 LAI 产品 ,LAI 计算过程应该先对小像素计算 ,然后进行升尺度求平均。而对于低分辨率 LAI 遥感产品 ,其成像机制是先获得低分辨率的遥感数据 ,然后从“低”分辨率遥感数据中反演得到低分辨率像素的 LAI。在遥感成像过程中 ,辐亮度信号之间不存在尺度效应。基于这一基本特性 ,可以利用不同升尺度方法 ,评价线性混合条件下、不同观测尺度下的尺度差异(Hu 和 Islam ,1997; 张仁华 2010; 刘艳 等 2010) 。

图 1 为 LAI 产品真实性检验中的 3 种不同升尺度方法。若“高”分辨率的地表反射率图像与辐亮度信号是线性变换(如无地形校正的反射率数据) ,根据图中 3 种升尺度方法的结果差异就可以定量计算不同的尺度差异(刘良云 2014) 。

升尺度方法 U1 为“先反演再平均” ,既先计算高分辨率的归一化植被指数(NDVI) 数据 ,然后利用 LAI 经验统计模型计算得到高分辨率、小像素的 LAI 遥感反演结果 ,再进行线性重采样 ,得到低分辨率、大像素的 LAI 数据。由于 LAI 重采样过程是线性变换 ,因此 ,该 U1 升尺度方法模拟得到的低分辨率的 LAI 数据与高分辨率的 LAI 产品在大像素或区域统计结果是完全一致的 ,是高分辨率、小像素尺度的 LAI 观测结果。

升尺度方法 U2 为“先平均再反演” ,先对高分辨率的反射率数据进行线性重采样 ,得到低分辨率的反射率模拟产品 ,然后再计算低分辨率的 NDVI ,最后再利用 LAI 统计模型计算得到低分辨率的 LAI 数据。该升尺度过程中 ,与低分辨率遥感成像过程是一致的 ,获得的是低分辨率、大像素尺度的 LAI 观测结果。因此与 U1 升尺度方法的结果差异即为高、低分辨率之间的 LAI 遥感产品尺度差异 ,也是以红光、近红外两个波段反射率为自变量的 LAI 非线性

性模型的高、低分辨率之间的尺度差异。

升尺度方法 U3 也是一种“先平均再反演”方法,先计算高分辨率的 NDVI 数据,然后再通过线性重采样,得到低分辨率的 NDVI 数据,最后再利用 LAI 统计模型计算得到低分辨率的 LAI 数据。该升尺度方法中,由于 NDVI 与反射率之间的非线性关

系,线性重采样过程会带来一定的尺度转换误差,与 U2 升尺度方法相比较,其差异就是 NDVI 变量非线性引起的高、低分辨率之间的尺度差异;与 U1 升尺度方法相比较,二者差异就是以 NDVI 为自变量的 LAI 非线性模型的高、低分辨率之间的尺度差异。

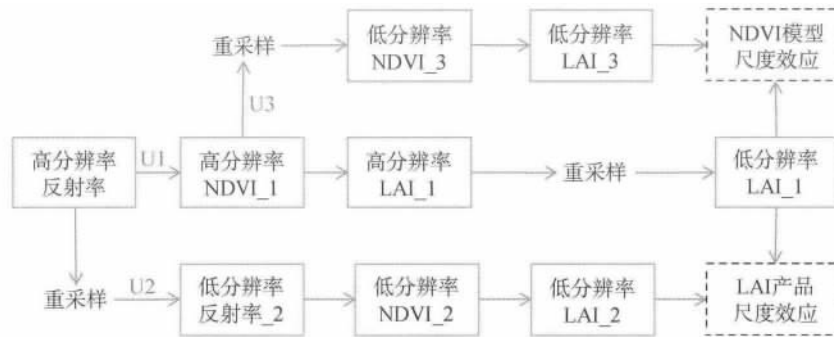


图 1 LAI 遥感产品的 3 种不同升尺度方法

Fig. 1 LAI scale differences derived from three upscaling methods

2.2 LAI 遥感模型泰勒展开与遥感产品尺度差异计算模型

以 2 维(如红光、近红外两波段反射率为自变量)和 1 维变量(NDVI 为自变量)为例,利用泰勒展开,建立模型非线性项数学表达模型。

根据 U1 升尺度方法,可以计算低分辨率、大像素内的 LAI 值,为“反演后再平均”的 LAI,与高分辨率观测结果是一致的(式(1))。

$$\bar{F} = \frac{1}{A} \int F(x_1, x_2) dA \quad (1)$$

式中 (x_1, x_2) 为高分辨率小像素的近红外反射率 x_1 和红光波段反射率 x_2 的集合, $F(x_1, x_2)$ 为高分辨率小像素的 LAI 遥感反演产品, A 是低分辨率大像素的大小, \bar{F} 是 U1 升尺度方法计算的低分辨率遥感产品,与高分辨率小像素尺度的区域结果是一致的。

根据泰勒定理,若函数 F 在点 (\bar{x}_1, \bar{x}_2) 某邻域内有直到 $(n+1)$ 阶的连续偏导数,则对邻域内任一点 $(x_1, x_2) = (\bar{x}_1 + h, \bar{x}_2 + k)$, 存在相应 $\theta \in (0, 1)$, 使得

$$\begin{aligned} F(\bar{x}_1 + h, \bar{x}_2 + k) &= F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \\ &\left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right) F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \\ &\frac{1}{2!} \left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^2 F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \dots + \\ &\frac{1}{n!} \left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^n F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{(n+1)!} \left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^{n+1} F(\bar{x}_1 + \theta h, \bar{x}_2 + \theta k) \quad (2)$$

式中 \bar{x}_1, \bar{x}_2 为低分辨率大像素的近红外波段反射率和红光波段反射率, h, k 为大像素内的小像素红光和近红外波段反射率与大像素反射率的差异。

若忽略高阶项,将式(2)代入式(1)得

$$\begin{aligned} \bar{F} &\approx \frac{1}{A} \int \left(F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right) F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \right. \\ &\left. \frac{1}{2!} \left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^2 F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \right) dA = \\ &F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \frac{1}{2A} \int \left(\left(h \frac{\partial}{\partial x_1} + k \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^2 F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \right) dA \approx \\ &F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) + \frac{1}{2} \left(\sigma_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + \sigma_2 \frac{\partial}{\partial x_2} \right)^2 F(\bar{x}_1, \bar{x}_2) \quad (3) \end{aligned}$$

式中 σ_1 和 σ_2 为大像素内全部小像素在近红外、红光波段反射率的方差, $F(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ 为“先平均再反演”的低分辨率大像素的 LAI,与图 1 中 U2 升尺度方法的低分辨率尺度遥感反演结果一致。式(3)中的二阶导数项的尺度效应即为 U1、U2 两种升尺度方法之间的差异,也是以红光、近红外两波段反射率为自变量的 LAI 非线性模型尺度效应。

若忽略 NDVI 变量本身的尺度效应,以 NDVI 为自变量的式(3)为:

$$\bar{F} \approx F(\overline{\text{NDVI}}) + \frac{1}{2} \left(\sigma \frac{\partial}{\partial \text{NDVI}} \right)^2 F(\overline{\text{NDVI}}) \quad (4)$$

式中, \overline{NDVI} 为低分辨率大像素的 NDVI 值, σ 为大像素内全部小像素 NDVI 值的方差, $F(\overline{NDVI})$ 为低分辨率、大像素尺度的 LAI 遥感反演产品, 其尺度效应为图 1 中的 U1、U3 两种升尺度方法之间的差异, 是以 NDVI 为自变量的 LAI 非线性模型尺度效应, 只是遥感产品尺度效应的一部分。

从式(3)(4)可以看出尺度差异可由大像素内的遥感数据方差项和模型二阶导项来描述, 而方差项代表了地表的空间变异, 二阶导项则代表了函数 F 的非线性程度。

3 LAI 遥感产品尺度效应计算与方法比较

根据上述分析, 不仅可以利用图 1 所示的升尺度方法, 计算“先反演再平均”和“先平均再反演”两种升尺度方法的差异评价不同分辨率之间的遥感产品尺度差异; 还可以利用式(3)(4), 通过计算大像素内的空间异质性(遥感数据方差)和模型非线性的二阶导数项, 计算不同分辨率之间的遥感产品尺度差异。这两种方法之间存在的差异, 就代表高阶项对尺度效应的影响。

本文利用 2011-08 锡林浩特草原实验区的数据, 研究 Landsat TM 尺度(30 m)到 MODIS(1 km)尺度之间遥感产品尺度差异, 并对不同方法结果差异进行分析。

3.1 实验区域、数据与 LAI 统计模型

实验区域位于锡林郭勒大草原中部(43°02′N—44°52′N, 115°13′E—117°06′E)。锡林浩特草原是典型温带草原, 属于中温带半干旱大陆性气候, 大部分地区年降水量为 200—300 mm(李素英等, 2007)。论文实验实测数据包括植被冠层光谱数据和 LAI 数据。于 2011-08-22—2011-08-24 开展了样方调查、光谱测量和 LAI 取样测量, 在研究区内设置 19 个样点, 考虑到地表异质性, 每个样点取 3、4 个样方, 样方直径 0.73 m。

样点 LAI 采用收割法测量。将每一个草地样点内地上部分绿色生物量取样, 分别密封在塑料袋中带回室内, 测量样点草地绿色生物量, 然后从中取出一定比例样品, 用扫描仪对样品进行扫描获得其叶片面积, 根据样点全部样品的重量、扫描样品重量与叶面面积, 计算被测样点的 LAI(Chen 等, 1997; Jonckheere 等, 2004)。

样点的植被冠层光谱利用 ASD 光谱仪测量。光谱仪探头距离地面 150 cm 垂直向下观测。在每一个样点附近进行 20 次以上的冠层光谱测量, 测量样点大小约 1 m², 通过多次测量平均获得样点冠层光谱。为计算反射率光谱, 冠层光谱测量前后各测量参考板 2 次。全部样点的光谱测量为 9:00—16:00 在晴天无云的情况下获取的。ASD 光谱仪光谱范围为 350—2500 nm, 700 nm 处分辨率为 3 nm, 1400 nm 和 2100 nm 处分辨率为 10 nm; 350—1050 nm 范围处, 光谱采样间隔为 1.4 nm, 1050—2500 nm 范围处, 间隔为 2 nm。

根据实验区域和地面观测实验时间, 选用 2011 年 8 月 18 日 TM 影像, 图幅号为 124/29。该数据为 USGS 网站 [2014-01-05] (<http://www.usgs.gov>) 共享的 LIT 数据, 是标准地形校正数据, 投影为 UTM-WGS84, 空间分辨率为 30 m。结合 TM 辐射定标参数, 将灰度值的多光谱图像转换为大气层顶 TOA 观测的辐亮度数据。然后, 利用 MODIS 同步观测的大气参数, 包括气溶胶、水汽含量和臭氧含量, 并结合 6S 辐射传输模型, 对 TOA 辐亮度图像进行逐像素的大气辐射校正处理。由于 MODIS 和 Landsat 卫星过境时间差别较小, MODIS 大气参产品分辨率较高(0.05°), 可以反映遥感图像覆盖区域的大气空间差异, 该方法比传统单大气参数大气辐射校正的结果更合理, 能消除图像内大气非均匀分布的影响(Hu 等, 2014)。研究区域图像的部分像素是云覆盖的, 为避免云污染像素对分析结果的影响, 通过目视解译方法, 选择训练样本和监督分类方法对遥感图像中的云和云阴影像素进行分类提取, 并在后续图像分析和统计计算时, 剔除了云污染像素。

利用地面测量光谱和 Landsat TM 光谱响应函数, 模拟计算了与 TM 光谱通道一致的近红外、红光波段的光谱反射率和 NDVI, 结合地面测量的 LAI 数据, 可以建立 LAI 统计遥感模型。

$$LAI = a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot NDVI) =$$

$$a_1 \cdot \exp\left(a_2 \cdot \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}\right), n = 19, R^2 = 0.736 \quad (5)$$

式中, a_1 、 a_2 为指数统计模型回归系数, 分别为 0.079 和 4.728, NDVI 为地面冠层光谱模拟的 TM 波段的归一化植被指数。

对式(5)的 NDVI 和近红外反射率与红光反射率分别计算二阶导数。与式(4)对应的 NDVI 二阶导数项为

$$\left(\frac{\partial}{\partial \text{NDVI}}\right)^2 (a_1 \cdot \exp(a_2 \cdot \text{NDVI})) = a_1 \cdot a_2^2 \cdot \exp(a_2 \cdot \text{NDVI}) \quad (6)$$

与式(3)对应的近红外反射率和红光反射率二阶偏导数为

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_1}\right)^2 \left(a_1 \cdot \exp\left(a_2 \cdot \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}\right)\right) = a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot \left(\frac{a_2}{x_1 + x_2} - \frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)^2}{(x_1 + x_2)^2}\right)^2 - a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot a_2}{(x_1 + x_2)^2} - \frac{2 \cdot a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{(x_1 + x_2)^3}\right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \frac{\partial}{\partial x_2} \left(a_1 \cdot \exp\left(a_2 \cdot \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}\right)\right) = \left(\frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot x_1 - x_2}{(x_1 + x_2)^3}\right) - a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot \left(\frac{a_2}{x_1 + x_2} + \frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{(x_1 + x_2)^2}\right) \cdot \left(\frac{a_2}{x_1 + x_2} - \frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{(x_1 + x_2)^2}\right) \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x_2}\right)^2 \left(a_1 \cdot \exp\left(a_2 \cdot \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}\right)\right) = a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot \left(\frac{2 \cdot a_2}{(x_1 + x_2)^2} + \frac{2 \cdot a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{(x_1 + x_2)^3}\right) + a_1 \cdot \exp\left(\frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{x_1 + x_2}\right) \cdot \left(\frac{a_2}{x_1 + x_2} + \frac{a_2 \cdot (x_1 - x_2)}{(x_1 + x_2)^2}\right)^2 \quad (9)$$

3.2 LAI 遥感产品尺度差异的特征分析与对比研究

根据图1的遥感产品尺度效应模拟方法,结合2011年8月18日 Landsat TM 反射率数据(图2(a))和式(5)所示的 LAI 遥感统计模型,模拟了 TM 尺度(30 m)到 MODIS 尺度(1 km)的 LAI 遥感产品尺度差异、NDVI-LAI 指数模型的尺度效应和式(7)(8)(9)的二阶偏导项。LAI 尺度效应和二阶偏导项计算结果为 MODIS 尺度,分辨率为 990 m。

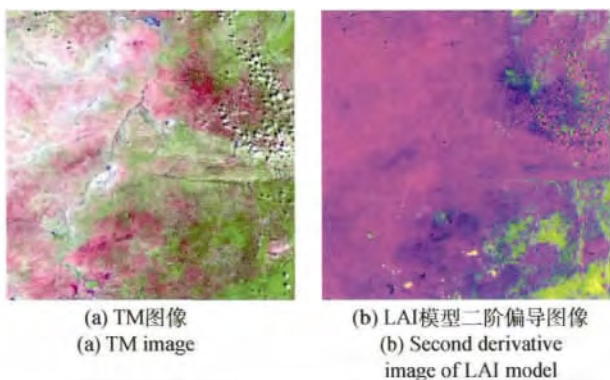


图2 TM 图像(RGB=742 bands)和 LAI 模型二阶偏导(RGB 分别为式(7)(9)(8)的偏导)

Fig. 2 Pseudo-color image of TM (RGB=742 Bands) and the second derivatives of LAI model based on reflectances of red and NIR bands

图2为 LAI 指数模型二阶偏导项与 TM 反射率图像对比图,结果表明, LAI 模型二阶偏导项与地表

覆盖存在密切联系,对于高植被覆盖区域(图2(a)绿色区域),式(9)计算的红光波段反射率的二阶偏导项占主导贡献,呈现绿色;在平坦均匀的中低植被覆盖区域,二阶偏导图像呈粉红色,说明是近红外波段的偏导占主导贡献,而对于部分河谷和水体区域混杂区域,图像呈现蓝色,说明红光与近红外波段交叉项的偏导项主导了图像空间差异。

图3为图2(b)和式(7)~(9)对应的 LAI 遥感模型的二阶导数项,从式(4)可知,二阶导数项绝对值越大,同等遥感空间异质性条件下的遥感产品尺度差异越大。因此,图3结果表明: LAI 遥感产品尺度效应对红光波段异质性最敏感,比近红外波段的敏感性高近2个数量级;红光、近红外两个反射率波段的交叉项的二阶导数项在中等植被覆盖度(NDVI=0.5附近)较大,因此图3中 NDVI 空间异质性对 LAI 遥感产品尺度差异的影响远大于红光或近红外波段反射率空间异质性的影响;不同植被覆盖条件下,遥感产品尺度差异对遥感数据空间异质性的敏感性存在很大差异,在高植被覆盖条件下,遥感数据空间异质性对遥感产品尺度差异的影响要远远大于低植被覆盖。这与图2(b)二阶偏导项图像中表现的规律是一致的。

图4为锡林浩特草原研究区,MODIS 尺度大像素的 LAI 尺度差异与大像素内全部小像素遥感数据空间异质性之间的关系,包括大像素内红光波段反

射率均方差、近红外波段反射率均方差和 NDVI 均方差。该地表覆盖相对均一,MODIS 尺度大像素内 NDVI 平均方差为 0.0488, LAI 遥感产品尺度差异为 0.0289, 尺度效应导致约 5.6% 的反演偏差。结果表明遥感数据空间异质性能够部分解释反射率和近红外波段反射率, 决定系数分别为 0.674、0.318 和 0.218。但遥感产品尺度差异与遥感数据空间异质性之间尚存在较大的不确定性, 说明了遥感数据空间异质性只是尺度差异的一个因素, 必须结合模型非线性才能较好解释 LAI 遥感产品

尺度效应。

根据 MODIS 尺度大像素 NDVI 值进行分级, 计算了高植被覆盖 (0.78 ± 0.020)、中等植被覆盖 (0.5 ± 0.005) 和低植被覆盖 (0.3 ± 0.005) 对应的大像素内的 NDVI 方差与 LAI 尺度差异的关系, 如图 5 所示。结果表明, NDVI 空间异质性越大, 大像素 LAI 遥感产品的尺度差异也越大; 且同等 NDVI 空间异质性条件下, NDVI 越大, 大像素的 LAI 遥感产品尺度差异越大。这与图 3 所示的 LAI 模型二阶偏导随 NDVI 变化规律也是一致的。

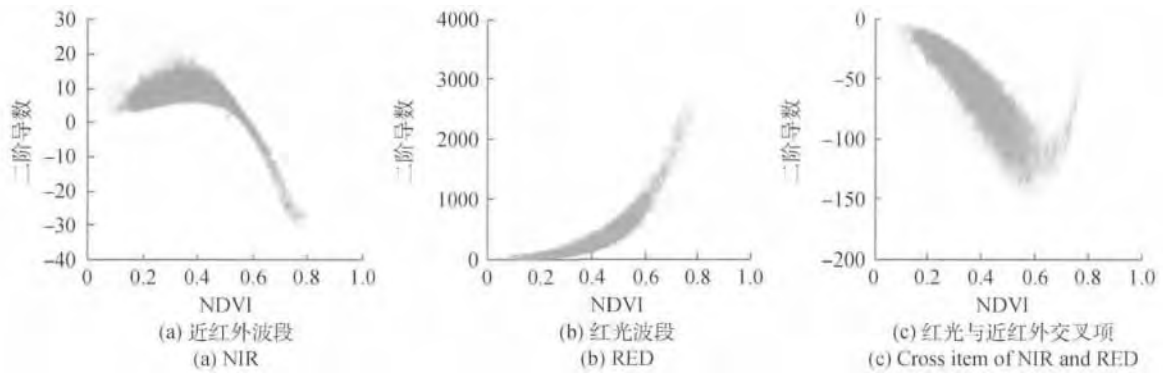


图 3 不同 NDVI 条件下的 LAI 遥感模型二阶偏导项
Fig.3 Second derivatives of LAI model at different NDVI values

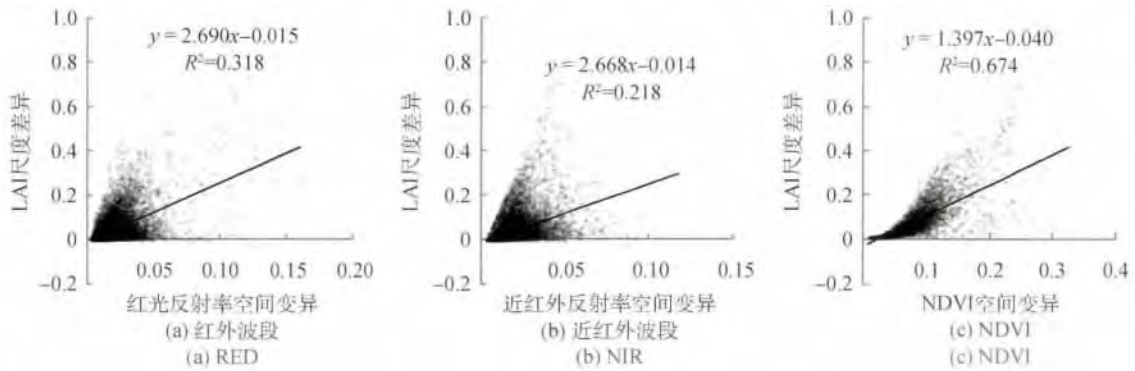


图 4 遥感数据空间异质性(大像素内遥感数据方差)与 LAI 产品尺度差异
Fig.4 Relations between spatial heterogeneity of remote sensing data and the scale difference of LAI

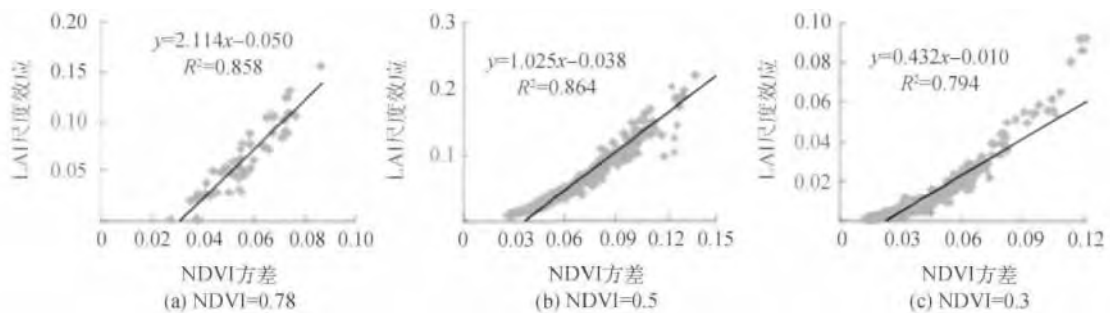


图 5 不同植被覆盖条件下 NDVI 空间异质性(大像素内遥感数据方差)与 LAI 尺度差异关系
Fig.5 Relations between the spatial heterogeneity of NDVI and LAI scale difference for different NDVI values

根据式(3)(4),可以由 LAI 模型二阶导数项和大像素内反射率或 NDVI 方差,计算二阶导数项对应的 LAI 尺度差异,另一方面,也可以由图 1 所示不同升尺度方法模拟的尺度差异,二者之间的差异为高阶项近似误差。图 6(a)为根据式(4) NDVI 二阶导数项和大像素 NDVI 方差计算的 LAI 尺度差异与模拟尺度差异之间(升尺度方法 U1、U2 之间的差异)的关系,图 6(b)为根据式(3)红光、近红外两个波段偏导和反射率方差计算的 LAI 尺度差异与模拟尺度差异(升尺度方法 U1、U2 之间的差异)之间的关系。结果表明,二阶导数项能够比较好地解释 LAI 遥感产品尺度差异,且式(3)所示红光、近红外两个波段反射率二阶偏导项的贡献与 LAI 产品尺

度差异一致性显著高于 NDVI 单变量二阶导数项,决定系数分别为 0.849 和 0.945,斜率为 0.928 和 1.058。因此,若能获得地表空间异质性先验知识,就可以利用将式(3)(4)计算二阶导数项引起的遥感产品尺度差异作为尺度纠正项,从而实现不同尺度间的尺度纠正。锡林浩特草原研究区域的 TM 和 MODIS 之间的模拟尺度差异(升尺度方法 U1、U2 之间的差异)为 0.0298,其相对偏差为 5.6%,若利用二阶导数项作为尺度纠正项,基于红光、近红外两波段反射率和 NDVI 为自变量的二阶导数项的尺度纠正后的尺度差异分别降低到 0.00417 和 0.00769,尺度纠正后的尺度效应相对偏差分别为 0.78% 和 1.45%。

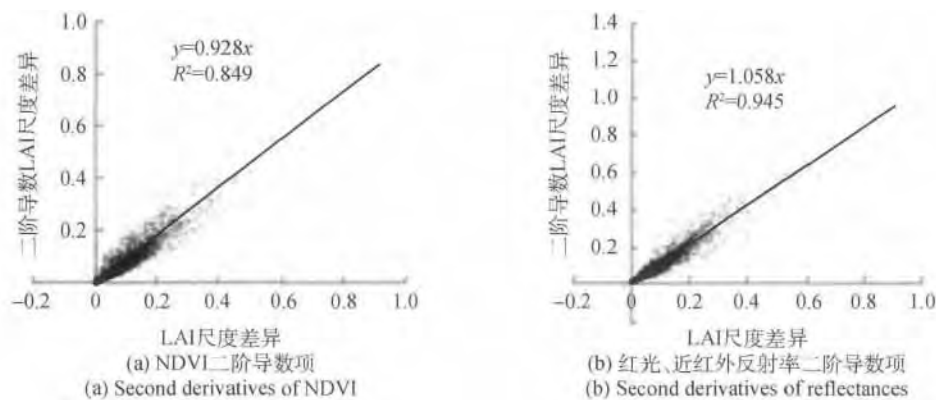


图 6 不同升尺度方法模拟 LAI 尺度差异与二阶导数项计算尺度差异之间的关系

Fig. 6 Relations between the LAI scale difference and its due to the second derivatives of reflectances or NDVI

根据图 1 不同升尺度方法,升尺度方法 U1、U3 之间的尺度差异为 NDVI 指数模型引起的尺度差异,U1、U2 之间的尺度差异为高低分辨率 LAI 遥感产品之间的尺度差异,二者之间的差异说明 NDVI 变量本身也存在一定的尺度效应,如图 7(a)所示。图 7(b)为 NDVI 二阶导数项解释的尺度差异与升尺度方法 U1、U3 之间的 NDVI 指数模型尺度差异的散点图。结果表明,NDVI 变量本身存在一定的尺度效应,基于 NDVI-LAI 非线性模型会导致低分辨率低估,低估约 3.7%;NDVI 二阶导数项对应的尺度差异与 NDVI 指数模型尺度差异具有非常高的一致性,决定系数达 0.955,说明 NDVI-LAI 指数模型的高阶项对尺度差异的贡献较小,利用二阶导数项能够解释 NDVI-LAI 指数模型的大部分尺度差异。

根据图 6 和图 7,基于 NDVI 的 LAI 指数模型的非线性是 LAI 遥感产品尺度效应的主导要素,但 NDVI 与红光、近红外波段反射率之间的非线性也会对 LAI 遥感产品尺度效应有一定贡献。图 8 为升

尺度方法 U2、U3 两种升尺度方法之间的差异,即 NDVI 公式中的非线性项引起的尺度差异,NDVI 变量非线性项引起的尺度差异与 NDVI 值、LAI 尺度差异大小等无显著相关关系,但 NDVI 变量非线性引起的尺度效应不能被忽略。对 NDVI 变量自身非线性引起的尺度差异的绝对值进行全图统计平均,其平均尺度差异大小为 0.0062,占 LAI 遥感产品尺度差异的 23.5%。因此,以 NDVI 为自变量的 LAI 指数模型非线性引起的尺度效应是 LAI 遥感产品尺度效应的主导因素,NDVI 变量自身非线性引起的尺度效应也有一定贡献。

此外,若忽略 NDVI 变量非线性对尺度效应的贡献,只考虑 LAI 指数模型非线性的尺度效应,模拟和计算的尺度效应会导致低分辨率遥感的 LAI 低估。对于植被与水体混合条件(如湿地植被),低分辨率会导致 LAI 高估(Chen, 1999; 刘良云, 2014)。图 9 为升尺度方法 U1、U2 之间的遥感产品尺度效应中低分辨率高估的数据,结果表明基于红光、近红

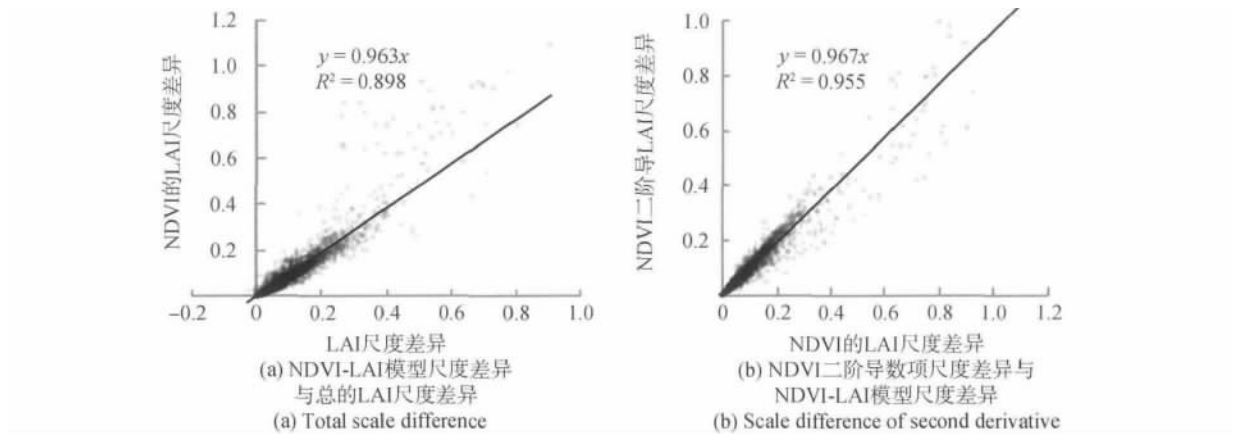


图7 NDVI-LAI 指数遥感模型尺度差异及其二阶导数项的尺度差异贡献

Fig. 7 Relations between the scale difference due to the nonlinear NDVI-LAI model and the total scale difference or its second derivative

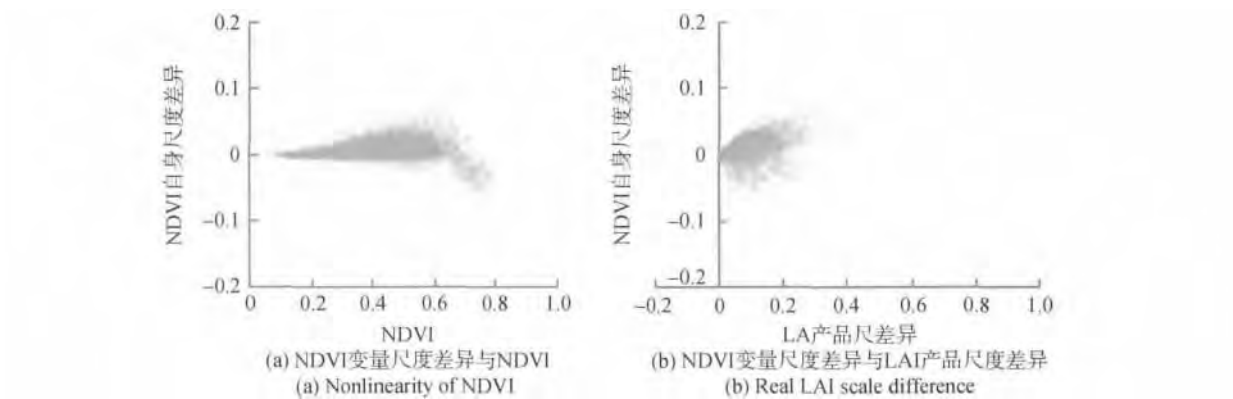


图8 NDVI 变量自身非线性引起的 LAI 产品尺度效应

Fig. 8 LAI scale difference due to the nonlinearity of NDVI and its relation with the red LAI scale difference

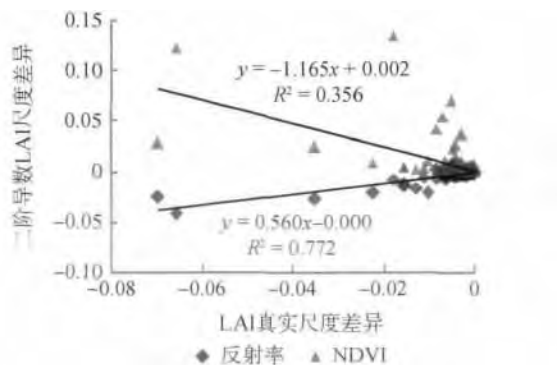


图9 低分辨率高估尺度差异与二阶导数项尺度差异的关系

Fig. 9 Relations between real LAI scale difference and second derivative difference of LAI

外两个波段反射率的二阶导数项计算的尺度差异与 LAI 产品尺度差异有较好的一致性, 决定系数为 0.772; 若忽略 NDVI 变量非线性的影响, 无法体现低分辨率高估的这种尺度效应, 且统计相关的趋势性与真实结果相反。因此, 对于植被水体混合研究

区域, 无法忽略 NDVI 变量本身非线性对尺度效应的影响, 且基于红光、近红外波段反射率的二阶导数项依然能较好地代表遥感产品真实尺度效应。

4 结论

对遥感产品尺度效应定义、模拟计算方法、非线性泰勒展开等进行探讨, 建立了 LAI 遥感产品尺度效应模拟方法, 并以 LAI 指数统计模型为例, 推导了泰勒展开与二阶导数项的尺度效应贡献。在此基础上, 利用实测数据, 分析了 TM 和 MODIS 尺度之间的 LAI 遥感产品尺度差异特征, 并利用不同升尺度方法模拟的 LAI 产品尺度差异, 与 LAI 模型二阶导数项导致的尺度差异进行对比分析。得到以下结论:

(1) 不同升尺度方法与多尺度遥感成像机理存在密切联系, 论文建立不同升尺度方法的尺度差异模拟方法, 进一步证实了“先反演再平均”与“先平

均再反演”两种升尺度方法之间的差异为高分辨率与低分辨率之间的尺度差异。其中,“先反演再平均”方法对应为高分辨率、小像素尺度的遥感监测结果,“先平均再反演”方法对应为低分辨率、大像素尺度的遥感监测结果。由于尺度效应原因,高分辨率、小像素尺度的尺度效应要小,距离地面测量 LAI 真值的尺误差更小,因此应该利用“先反演再平均”升尺度方法的结果,去评价低分辨率遥感产品误差和尺度效应。

(2) 遥感数据空间异质性是遥感产品尺度效应的物理基础,红光、近红外波段反射率和 NDVI 空间异质性与 LAI 遥感产品尺度差异之间存在统计相关关系,决定系数分别为 0.318、0.218 和 0.674。但遥感产品尺度差异与遥感数据空间异质性之间尚存在较大的不确定性,说明了遥感数据空间异质性只是尺度差异的一个因素,必须结合模型非线性才能较好解释 LAI 遥感产品尺度差异。

(3) 对 LAI 非线性遥感模型进行泰勒展开,若忽略高阶项,可以利用二阶导数项和大像素内遥感数据方差项,定量计算遥感产品尺度差异。与 NDVI 相比,考虑红光、近红外两个波段反射率空间二阶导数项,能够更可靠、更准确地解释 LAI 遥感产品尺度效应。NDVI 和红光、近红外两波段二阶导数项与遥感产品尺度差异的决定系数分别为 0.849 和 0.945,斜率分别为 0.928 和 1.058。若利用二阶导数项作为尺度纠正项,基于红光、近红外两波段反射率和 NDVI 为自变量的二阶导数项校正后的尺度效应偏差分别降低到 0.00417 和 0.00769,修正后的尺度效应相对偏差从 5.6% 分别降低到 0.78% 和 1.45%。因此,通过二阶偏导项来定量计算 LAI 遥感模型非线性贡献,发现红光、近红外两波段的二阶项偏导能够解释大部分尺度差异(87.1% 将尺度差异从 5.6% 降低到 0.78%) 其他 12.9% 的尺度差异源于 LAI 遥感模型的高阶非线性项的贡献。

(4) LAI 遥感产品尺度效应与植被覆盖条件有关。植被覆盖越大,同等遥感空间异质性的 LAI 遥感产品尺度差异越大,且 LAI 遥感产品尺度差异对红光波段的异质性最敏感,比近红外波段的敏感性高近 2 个数量级。对于绝大部分陆地植被区域,遥感产品尺度效应的主导要素为 LAI 模型非线性,但 NDVI 变量自身非线性对尺度效应也有一定贡献,占 23.5%。但对于湿地这种植被与水体混合情形,NDVI 变量非线性的贡献占主导贡献,必须利用红光、近红外两个波段的二阶导数项的贡献,才

能代表 LAI 遥感产品尺度效应。

本文定量分析了 LAI 指数模型反演的遥感产品尺度差异特征,对于其他非线性反演模型,红光、近红外两波段反射率和 NDVI 二阶导数项的数学表达式都不一样,二阶导数项与尺度差异之间的定量关系也会有一定变化,但基本规律应该相似或一致。另外,尺度效应与研究区域地表覆盖条件相关,在本文的锡林浩特草原研究区,地表覆盖相对均一,MODIS 尺度大像素内 NDVI 平均方差为 0.0488, LAI 遥感产品尺度差异为 0.0289,尺度差异导致约 5.6% 的遥感反演偏差,对于其他研究区域, LAI 遥感产品尺度差异大小、幅度及其与遥感数据空间异质性的关系会有所变化。

尺度效应涉及很多因素,本文只考虑了遥感产品空间维的尺度效应,关于时间、辐射维度的尺度效应没有涉及,并对遥感产品空间尺度效应进行了严格的边界条件限制,定义了遥感产品空间尺度效应。在遥感产品空间尺度差异定量计算和模拟时,也忽略了遥感模型的尺度适用性,即假定遥感模型与高分辨率、小像素的观测尺度是一样的,只分析了空间分辨率不同导致的遥感反演结果差异这种尺度效应。此外,本文只是以红光、近红外两波段反射率和 NDVI 为自变量的 LAI 统计模型,从模型非线性的二阶导数入手,研究了 LAI 遥感产品尺度差异与模型非线性、遥感数据空间异质性的关系,对于更多波段、更复杂的反演模型,模型非线性的数学表达可能更加复杂,但论文建立的不同升尺度方法与尺度效应的关系依然存在,我们仍可以通过不同升尺度方法,模拟遥感产品尺度差异,只是难以定量分析模型非线性和遥感数据空间异质性两个要素对遥感产品尺度差异的影响。

参考文献(References)

- Chen J, Ni S X, Li J J and Wu T. 2006. Scaling effect and spatial variability in retrieval of vegetation LAI from remotely sensed data. *Acta Ecologica Sinica*, 26(5): 1502–1508 (陈健,倪绍祥,李静静,吴彤. 2006. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性. *生态学报*, 26(5): 1502–1508)
- Chen J M, Rich P M, Gower S T, Norman J M and Plummer S. 1997. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24): 429–443 [DOI: 10.1029/97JD01107]
- Chen J M. 1999. Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of Environment*, 69(1): 30–42 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00006-1]

- Fan W J, Gai Y Y, Xu X R and Yan B Y. 2013. The spatial scaling effect of the discrete-canopy effective leaf area index retrieved by remote sensing. *Science China (Earth Sciences)*, 56(9): 1548 - 1554 (范闻捷, 盖颖颖, 徐希孺, 闫彬彦. 2013. 遥感反演离散植被有效叶面积指数的空间尺度效应. *中国科学(地球科学)*, 43(2): 280 - 286 [DOI: 10.1007/s11430-012-4554-5])
- Friedl M A, Davis F W, Michaelsen J and Moritz M A. 1995. Scaling and uncertainty in the relationship between the NDVI and land surface biophysical variables: An analysis using a scene simulation model and data from FIFE. *Remote Sensing of Environment*, 54(3): 233 - 246 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00156-5]
- Garrigues S, Allard D, Baret F and Weiss M. 2006. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 286 - 298 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.013]
- Hu Y, Liu L Y, Liu L L, Peng D L, Jiao Q J and Zhang H. 2014. A Landsat-5 atmospheric correction based on MODIS atmosphere products and 6S model. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(5): 1609 - 1615 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2290028]
- Hu Z L and Islam S. 1997. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 747 - 755 [DOI: 10.1109/36.581996]
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muys B, Coppin P, Weiss M and Baret F. 2004. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1-2): 19 - 35 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2003.08.005]
- Li S Y, Li X B, Fu N, Zhu X L, Zhang W J and Zhang L. 2007. Spatial change of soil hardness and soilmoisture in typical steppe area of Inner Mongolia. *Arid Land Geography*, 30(2): 196 - 202 (李素英, 李晓兵, 符娜, 朱孝林, 张文杰, 张立. 2007. 内蒙古典型草原区土壤硬度与土壤水分的空间变化分析——以锡林浩特为例. *干旱区地理*, 30(2): 196 - 202)
- Li X W, Wang J D and Strahler A H. 1999. Scale effects of Planck principle on non-equal-temperature blackbody. *Science in China (Series E)*, 29(5): 422 - 426 (李小文, 王锦地, Strahler A H. 1999. 非同温黑体表面上 Planck 定律的尺度效应. *中国科学(E 辑)*, 29(5): 422 - 426)
- 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)*, 43(Suppl): 17 - 22 (李小文, 王锦地, Strahler A H. 2000. 尺度效应及几何光学模型用于尺度纠正. *中国科学(E 辑)*, 30(增刊): 12 - 17 [DOI: 10.1007/BF02916574])
- Li X W, Zhao H R, Zhang H and Wang J D. 2002. Global change study and quantitative remote Sensing for land surface parameters. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 365 - 370 (李小文, 赵红蕊, 张颢, 王锦地. 2002. 全球变化与地表参数的定量遥感. *地学前缘*, 9(2): 365 - 370)
- Li X W. 2005. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 35(4): 49 - 56 (李小文. 2005. 定量遥感的发展与创新. *河南大学学报(自然科学版)*, 35(4): 49 - 56)
- Li X W. 2006. Review of the project of quantitative remote sensing of major factors for spatial-temporal heterogeneity on the land surface. *Advances in Earth Science*, 21(8): 771 - 780 (李小文. 2006. 地球表面时空多要素的定量遥感项目综述. *地球科学进展*, 21(8): 771 - 780)
- Li X W and Wang Z M. 1998. Comments on reciprocity in the directional reflectance modeling. *Progress in Natural Science*, 8(3): 354 - 358.
- Li X W and Wang W T. 2013. Prospects on future developments of quantitative remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 68(9): 1163 - 1169 (李小文, 王祎婷. 2013. 定量遥感尺度效应刍议. *地理学报*, 68(9): 1163 - 1169)
- Liu L Y. 2014. *Vegetation Quantitative Remote Sensing Principles and Applications*. Beijing: Science Press (刘良云. 2014. *植被定量遥感原理与应用*. 北京: 科学出版社)
- Liu Y, Wang J D, Zhou H M and Xue H Z. 2010. LAI measuring data processing, analysis and spatial scaling in the middle reaches of Heihe experimental research region. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(6): 805 - 812 (刘艳, 王锦地, 周红敏, 薛华柱. 2010. 黑河中游试验区不同分辨率 LAI 数据处理、分析和尺度转换. *遥感技术与应用*, 25(6): 805 - 812)
- Lovejoy S, Schertzer D, Tessier Y and Gaonach H. 2001. Multifractals and resolution-independent remote sensing algorithms: The example of ocean colour. *International Journal of Remote Sensing*, 22(7): 1191 - 1234 [DOI: 10.1080/01431160151144314]
- Raffy M. 1994. Heterogeneity and change of scale in models of remote sensing. Spatialization of multi-spectral models. *International Journal of Remote Sensing*, 15(12): 2359 - 2380 [DOI: 10.1080/01431169408954250]
- 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): 945 - 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): 945 - 954)
- Sun C X and Liu L Y. 2014. Validation and error analysis of MODIS LAI product in Xilinhot grassland. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 518 - 536 (孙晨曦, 刘良云. 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)
- Wu H, Jiang X G, Xi X H, Li C R and Li Z L. 2009. Comparison and a nalysis of two general scaling methods for remotely sensed information. *Journal of Remote Sensing*, 13(2): 183 - 189 (吴骅, 姜小光, 刁晓环, 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)
- Zhang R H, Sun X M, Su H B, Tang X Z and Zhu Z L. 1999. Remote sensing and scale transferring of levity parameters on earth surface. *Remote Sensing for Land & Resources*, 41(3): 51 - 58 (张仁华, 孙晓敏, 苏红波, 唐新斋, 朱志林. 1999. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换. *国土资源遥感*, 41(3): 51 - 58)
- Zhang R H, Tian J, Li Z L, Su H B and Chen S H. 2010. Principles and methods for the validation of quantitative remote sensing products. *Science China (Earth Sciences)*, 40(2): 211 - 222 (张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. *中国科学(地球科学)*, 40(2): 211 - 222)

Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index

LIU Liangyun

*State Key Laboratory of Remote Sensing Science, and Key Laboratory of Digital Earth Science,
Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

Abstract: Various remote sensing sensors observe the Earth's surface at different spatial resolutions. Due to the spatial heterogeneity and model's nonlinearity, there would be some scale difference among different remote sensing surface parameter (such as leaf area index, LAI) derived from remote sensing images with different resolution. In this paper, the spatial scale effects and transformation methods are studied using both experiment at Xilinhaote steppe region and theoretic models. Firstly, different upscaling methods were presented to simulate the scale effects between fine resolution and coarse resolution. Secondly, Taylor expansion was conducted for both NDVI model and reflectance model for LAI estimation, and the nonlinearity can be well explained by the second derivatives. The scaling difference was reduced from 5.6% to 1.45% and 0.78%, respectively, if the contributions of the second derivatives were corrected for LAI models based on NDVI and reflectances of red and NIR bands. Finally, the effects of the nonlinearity and heterogeneity on scaling are quantified. It can be observed: (1) the scaling error increases with the vegetation coverage under same spatial heterogeneity; (2) the heterogeneity in red band is about 100 times sensitive to scale error than it in near-infrared band for high NDVI conditions; (3) for terrestrial vegetation region, the LAI would be underestimated at coarse resolution. The nonlinearity of the exponent LAI model based on NDVI is the primary factor, and the nonlinearity of NDVI variable contributes about 23.5% scaling difference; (4) for wetland region (mixed by vegetation and water), the LAI would be overestimated at coarse resolution. The nonlinearity of NDVI variable becomes the dominant factor, and the scaling difference can still be corrected by the contribution of the second derivatives of the LAI model based on reflectances of red and NIR bands. Therefore, we developed a series methods and models to quantify the scale effect of LAI, and the scaling error was consistent with contributions of the second derivatives by Taylor expansion, which can also be applied to other surface parameters.

Key words: scale effect, upscaling, leaf area index (LAI), Taylor expansion, non-linear, spatial heterogeneity