

黑河中游试验区不同分辨率 LAI 数据 处理、分析和尺度转换

刘 艳^{1,2}, 王锦地^{1,2}, 周红敏^{1,2}, 薛华柱^{1,2}

(1. 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要:2008 年开展的黑河综合遥感联合试验获取了大量野外实测叶面积指数(LAI)数据以及遥感 LAI 产品。在利用 LAI 地面点观测数据对遥感影像进行验证或者不同分辨率遥感产品相互比较的过程中存在由于地表异质性引起的尺度效应,导致无法直接进行验证、比较,需要进行尺度转换。以基于泰勒级数展开的尺度转换模型为基础,研究不同源 LAI 之间的尺度转换方法。包括两部分内容:①以高分辨率影像为辅助数据将地面实测点尺度的 LAI 转换到中、低分辨率遥感像元尺度;②利用高分辨率影像作为亚像元信息对低分辨率 LAI 产品进行尺度纠正。结果表明,利用泰勒级数展开模型进行尺度转换是一种简单可行的方法,经尺度转换的地面实测点尺度 LAI 可用作像元尺度数据比较验证的参考。

关 键 词:LAI;泰勒级数展开模型;尺度转换

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)06-0805-09

1 引 言

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)指单位面积地表上方植物叶(单面)面积总和。是陆面过程研究中十分重要的植被参数,它控制着植被许多生物、物理过程,如光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等^[1]。LAI 获取方式可以分为地面实测以及遥感影像反演两类^[2]。单点实测获取的数据所能代表的空间范围较小,通常只有几米。遥感影像空间分辨率可以从几米一直到几千米,与地面实测点观测的空间代表性有较大差异。因此直接使用实测点验证遥感影像数据或者不同分辨率遥感 LAI 产品之间相互比较的时候就存在不可忽视的尺度效应。这是由于不同数据源之间空间分辨率的差异、反演算法的非线性以及地表异质性造成的。

前人在 LAI 验证以及模型的尺度问题进行了很多研究。张仁华^[3]等探讨了用点观测的 LAI 与遥感影像 LAI 比较可能带来的误差,证明了直接采用点的信息来验证遥感产品是不可行的。Chen^[4]

等在温哥华岛维多利亚的森林地区,研究用 TM 数据验证 AVHRR 和 VEGETATION 的 LAI 反演产品的方法及其可行性,并讨论了采用“先反演后平均”和“先平均后反演”两种方法的差别,以及这两种 LAI 的换算方法。

本文主要探讨 LAI 的两种尺度问题:①实测点用于验证遥感影像估算结果时的尺度效应。因为实测点所能代表的范围远小于像元面积,且像元内包含的实测点数量有限,当像元内 LAI 分布非均一时,局部的实测值不能直接用于验证整个像元的地表参数。在这种情况下,需要进行一定转换使其能够代表像元尺度。②低分辨率反演结果与高分辨率反演结果之间的尺度效应。当像元内部植被分布非均一时,使用低分辨率遥感影像估算 LAI 忽略了像元内部的异质性,无法反映地表真实情况,需要利用高分辨率遥感影像对其进行尺度纠正。

2008 年开展的黑河综合遥感联合试验获取了大量多尺度的叶面积指数(LAI)观测,本文提供的尺度转换方法可为这些数据的相互比较提供技术

支持。

2 数据来源及数据处理

研究采用的数据来自黑河综合遥感联合试验数

据集^[6]。表 1 为本文所用试验数据列表。

2.1 野外实测数据

研究中所用实测数据来自盈科绿洲与花寨子荒漠加密观测区的 LAI 数据集。由 LAI-2000、TRAC、

表 1 使用的试验数据列表
Table 1 The data list

原始数据集	参数	成像时间	空间分辨率/m	光谱信息/nm
野外实测数据	LAI	2008.5.20~7.15		
机载 CCD 数据	DN 值	2008.6.29	1.25	0.55、0.65、0.7、0.75
ASTER 数据	反射率	2008.5.3、6.4、7.22	15	0.52~0.60、0.63~0.69、0.78~0.86
TM 遥感影像	反射率	2008.7.7	30(可见光)	0.45~0.52、0.52~0.60、0.63~0.69、0.76~0.90、 1.55~1.75、2.08~2.35、10.4~12.5
MOD15A2	LAI	2008.DOY145~193	1 000	

鱼眼相机和手工测量等多种方式在玉米种植区获取。其中有些实测点只记录了有效 LAI,需将其转换为真实 LAI。转换方法参考 Chen 和 Cihlar^[6-7]给出的作物覆盖区域有效 LAI 以及真实 LAI 之间的关系,如下式:

$$LAI_{effective}=0.9\times LAI_{true}\tag{1}$$

2.2 遥感影像

使用遥感数据为盈科绿洲与花寨子荒漠加密观测区的机载 CCD 数据、ASTER 影像、TM 影像以及 MODIS-LAI 产品(MOD15A2)。机载 CCD 数据为 2008 年 6 月 29 日红外广角双模式成像仪 WiDAS (Wide-angle Infrared Dual-mode Line/Area Array Scanner) 航空飞行试验时获得的数据,包括 4 个 CCD 相机合成的多波段数据。整幅影像由多航带数据拼接而成,经过几何纠正。数值为 DN 值,因此 NDVI 影像不可以直接用于计算 LAI。ASTER 与 TM 遥感影像进行了几何精纠正。并且 TM 影像为 DN 值,因此对其进行了大气纠正。同时也使用了相同区域的 MODIS-LAI 产品,由于其影像原始投影(Sinusoidal)与其它影像投影(WGS84,UTM)不一致,将其进行投影转换。

经过以上处理,研究数据集包括了试验区经过几何配准的地面实测点 LAI、1 km 空间分辨率 LAI 产品和 1.25 m、15 m 以及 1 km 空间分辨率 NDVI 数据。

3 ASTER/TM 的 LAI 估算

3.1 估算方法

用植被指数与 LAI 的统计分析模型来估算 LAI 是一种简洁、有效的估算方法,常用于 LAI 的

遥感估算^[1]。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,因此结合 TM 数据与 ASTER 数据,选用纯像元共同拟合与地面测量 LAI 的统计关系。筛选出 138 条数据,选择 87 条进行拟合,剩余 51 条数据用于检验模型的精度。选取好的数据拟合结果如图 1 所示。

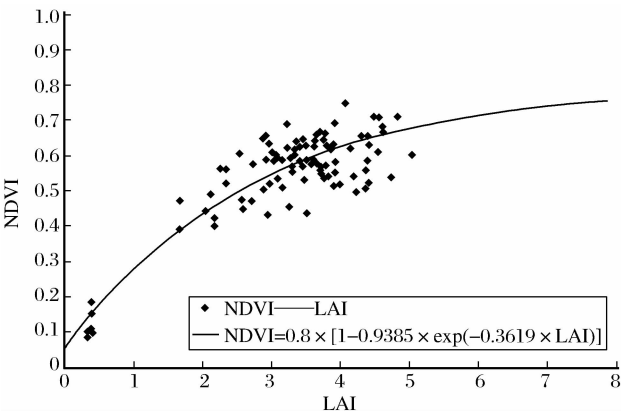


图 1 NDVI 与 LAI 统计拟合关系

Fig. 1 Modeling the relationship between NDVI and LAI

图 1 中,当 LAI=0 的时候 NDVI>0,即地表无植被覆盖的时候,会有背景土壤的贡献。随着 LAI 增大,NDVI 逐渐趋于饱和。且统计模型 $R^2=0.7682$,拟合度较高。总体来说该统计分析模型较为可信。将拟合公式变换为 $LAI=f(NDVI)$ 的形式,得到式(2)统计分析模型。

$$LAI=\frac{\ln[(1-NDVI/0.8)0.9385]}{-0.3619}\tag{2}$$

3.2 ASTER 估算结果与实测点比较

利用上文获得的统计分析模型,在 ASTER 全景影像上计算 LAI。选取影像中建模以外的 51 个

纯像元对该模型进行检验,如图 2。其中横坐标为实测点 LAI,纵坐标为遥感影像估算结果。两组数据的相关系数为 0.904。说明该统计分析模型对于黑河区域的玉米作物是较为适用的。本文中 LAI 尺度效应将基于这个关系来探讨。

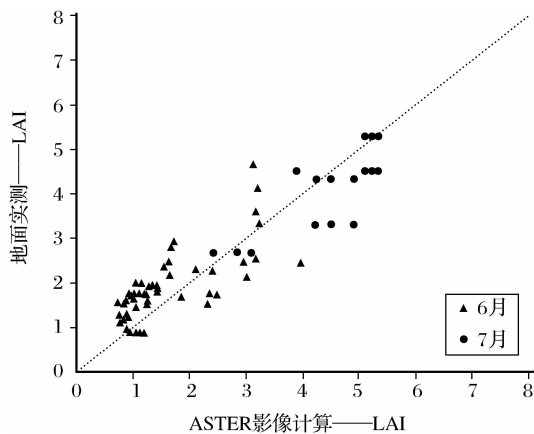


图 2 实测 LAI 与 ASTER 影像反演 LAI 比较

Fig. 2 Comparison of the field measured LAI and the LAI derived from ASTER image

4 尺度转换的方法

本文探讨 LAI 的两种尺度转换:一种是将实测

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x - x_0)^2 \quad (3)$$

对于像元内每一个亚像元都在实测点 $NDVI(x_0)$ 处进行离散化,然后相加取平均,自变量均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 用 x_{mean} 来表示,得到式(4):

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) &= f(x_0) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x_i - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x_i - x_0)^2 = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \\ &\times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2 + (x_{\text{mean}} - x_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

像元内部方差 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2$ 用 VAR 来表示,式(4)可以简化为:

$$F_D = F_m + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times [\text{VAR} + (x_{\text{mean}} - x_0)^2] \quad (5)$$

式(5)表达了像元尺度的真值 F_D 与实测点 F_m 的关系。它们之间的差异主要受反演公式、实测点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。本文利用式(5)将实测点分别转换到 15 m 分辨率和 1 km 分辨率。

4.1.1 实测点 LAI 转换到 15 m 分辨率像元尺度

式(5)中, $f(x)$ 代表 NDVI 与 LAI 的关系,用统计分析模型式(2)。 x_0 代表实测点 NDVI, x_{mean} 代表亚像元尺度 NDVI 的均值,由于 15 m 空间分辨率像元内 NDVI 的尺度效应可以忽略,因此用 AS-

点转换到像元尺度的方法,利用与实测点分辨率较为接近的 CCD 机载数据作为辅助数据,将其转换到 15 m 以及 1 km 的分辨率;另一种是在像元和亚像元信息共存的情况下,利用亚像元信息对像元的反演结果进行尺度纠正。这两种方法都是基于泰勒级数展开的尺度转换模型来推导的。

4.1 实测点 LAI 转到像元尺度

将遥感观测数据 x_i 与地表参数值的关系模型用 $y = f(x)$ 表示。理论上,像元的地表参数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^[1],即: $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i)$,用 F_D 来表示。当像元范围内下垫面非均一,实测点代表范围明显小于像元且数量较少的时候,只能得到像元内部局部的值 $f(x_0)$,用 F_m 来表示。这时候就需要一定的变换,利用一定的辅助信息将实测点上的数据转化为像元尺度,使其在该像元上具有代表性。本文利用泰勒级数展开(Taylor Series Expansion)模型推导尺度转换的方法。

假设反演函数 $f(x)$ 至少两阶连续可导,那么将函数值在任一点 x_0 处用泰勒级数展开^[6],忽略三阶及三阶以上各项,有:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x - x_0)^2 \quad (3)$$

对于像元内每一个亚像元都在实测点 $NDVI(x_0)$ 处进行离散化,然后相加取平均,自变量均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 用 x_{mean} 来表示,得到式(4):

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) &= f(x_0) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x_i - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x_i - x_0)^2 = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \\ &\times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2 + (x_{\text{mean}} - x_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

像元内部方差 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2$ 用 VAR 来表示,式(4)可以简化为:

$$F_D = F_m + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times [\text{VAR} + (x_{\text{mean}} - x_0)^2] \quad (5)$$

式(5)表达了像元尺度的真值 F_D 与实测点 F_m 的关系。它们之间的差异主要受反演公式、实测点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。本文利用式(5)将实测点分别转换到 15 m 分辨率和 1 km 分辨率。

4.1.1 实测点 LAI 转换到 15 m 分辨率像元尺度

式(5)中, $f(x)$ 代表 NDVI 与 LAI 的关系,用统计分析模型式(2)。 x_0 代表实测点 NDVI, x_{mean} 代表亚像元尺度 NDVI 的均值,由于 15 m 空间分辨率像元内 NDVI 的尺度效应可以忽略,因此用 AS-

点转换到像元尺度的方法,利用与实测点分辨率较为接近的 CCD 机载数据作为辅助数据,将其转换到 15 m 以及 1 km 的分辨率;另一种是在像元和亚像元信息共存的情况下,利用亚像元信息对像元的反演结果进行尺度纠正。这两种方法都是基于泰勒级数展开的尺度转换模型来推导的。

4.1 实测点 LAI 转到像元尺度

将遥感观测数据 x_i 与地表参数值的关系模型用 $y = f(x)$ 表示。理论上,像元的地表参数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^[1],即: $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i)$,用 F_D 来表示。当像元范围内下垫面非均一,实测点代表范围明显小于像元且数量较少的时候,只能得到像元内部局部的值 $f(x_0)$,用 F_m 来表示。这时候就需要一定的变换,利用一定的辅助信息将实测点上的数据转化为像元尺度,使其在该像元上具有代表性。本文利用泰勒级数展开(Taylor Series Expansion)模型推导尺度转换的方法。

假设反演函数 $f(x)$ 至少两阶连续可导,那么将函数值在任一点 x_0 处用泰勒级数展开^[6],忽略三阶及三阶以上各项,有:

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x - x_0)^2 \quad (3)$$

对于像元内每一个亚像元都在实测点 $NDVI(x_0)$ 处进行离散化,然后相加取平均,自变量均值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 用 x_{mean} 来表示,得到式(4):

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) &= f(x_0) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x}f(x_0)(x_i - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0)(x_i - x_0)^2 = f(x_0) + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \\ &\times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2 + (x_{\text{mean}} - x_0)^2 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

像元内部方差 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{mean}})^2$ 用 VAR 来表示,式(4)可以简化为:

$$F_D = F_m + \frac{\partial}{\partial x}f(x_0) \times (x_{\text{mean}} - x_0) + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2}f(x_0) \times [\text{VAR} + (x_{\text{mean}} - x_0)^2] \quad (5)$$

TER 影像 NDVI。像元内部方差用 CCD 的 NDVI 影像作为 ASTER 影像的亚像元计算。将选用的数据代入式(5),就可以计算出从实测点转换到 15 m 分辨率像元尺度的 LAI 值,用 15 m-LAI 表示。当像元内存在多个实测点时,对每个实测点进行上述运算,最后取平均,我们认为这个值就是像元内多个实测点转换到该像元的值。

4.1.2 实测点 LAI 转换到 1 km 分辨率像元尺度

上述公式用于将实测点转换到 1 km 尺度时,均值和方差数据需要进一步处理。将 ASTER 影像

NDVI 值向上聚合到 1 km,作为 1 km 尺度上 NDVI 的均值。对于方差我们采用三级像元尺度的思想。

本文中有 3 个像元尺度,空间分辨率分别为 1.25 m(CCD 影像)、15 m(ASTER 影像)、1 km(MODIS 影像)。我们认为 CCD 影像作为 ASTER 像元的亚像元统计所得的方差是可信的,但 CCD 影像本身没有进行大气纠正,直接用于计算 1 km 尺度像元内方差会出现误差。且 ASTER 影像作为 MODIS 影像的亚像元统计的方差是可信的。使用这两个方差来组合计算 1 km 分辨率像元内,以 1.25 m

为亚像元统计的方差。用 VAR_{C-M} 表示以 1.25 m 影像作为 1 km 影像的亚像元统计的方差, VAR_{C-A} 表示以 CCD 影像作为 ASTER 的亚像元统计的方差, VAR_{A-M} 表示以 ASTER 影像作为 MODIS 的亚像元统计的方差。假设 MODIS 像元内有 n 个 ASTER 像元,每一个 ASTER 像元内有 m 个 CCD 像元。 \overline{NDVI}_M 为 MODIS 尺度 NDVI 值, $NDVI_{Aj}$ 为 MODIS 像元范围内第 j 个 ASTER 像元的 NDVI 值, $NDVI_{Cj,i}$ 为 MODIS 像元范围内第 j 个 ASTER 像元内第 i 个 CCD 尺度 NDVI 值。那么 VAR_{C-M} 应为:

$$VAR_{C-M} = \frac{1}{n \times m} \sum_1^{n \times m} (NDVI_{Cj,i} - \overline{NDVI}_M)^2 \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \tag{6}$$

将 MODIS 像元尺度内的方差分配到每一个 ASTER 尺度的像元上去,方差变换为如下形式:

$$VAR_{C-M} = \frac{1}{n \times m} \left[\sum_1^m (NDVI_{Cj,i} - \overline{NDVI}_M)^2 + \sum_{m+1}^{2m} (NDVI_{Cj,i} - \overline{NDVI}_M)^2 + \dots + \sum_{(n-1) \times m + 1}^{n \times m} (NDVI_{Cj,i} - \overline{NDVI}_M)^2 \right] \tag{7}$$

以第 1 个 ASTER 尺度的像元为例,其内部方差可以进行如下变换:

$$\frac{1}{n \times m} \sum_1^m (NDVI_{C1,i} - \overline{NDVI}_M)^2 = \frac{1}{n \times m} \sum_1^m (NDVI_{C1,i} - NDVI_{A1})^2 + \frac{1}{n} \times (NDVI_{A1} - \overline{NDVI}_M)^2 \tag{8}$$

将每一个 ASTER 像元进行上述变换,将式(8)代入式(7)中,得到下式:

$$VAR_{C-M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n VAR_{C-A} + VAR_{A-M} \tag{9}$$

也就是说将 CCD 影像在 15 m 分辨率上计算的

方差平均到 1 km,同时加上 ASTER 影像在 MODIS 尺度统计的方差,这个数值就等于 CCD 影像作为 1 km 尺度亚像元统计得到的方差。将方差与均值代入式(5)可以算出实测点转换到 1 km 尺度的 LAI。

图3为将实测点转换为 1 km 像元尺度的流程

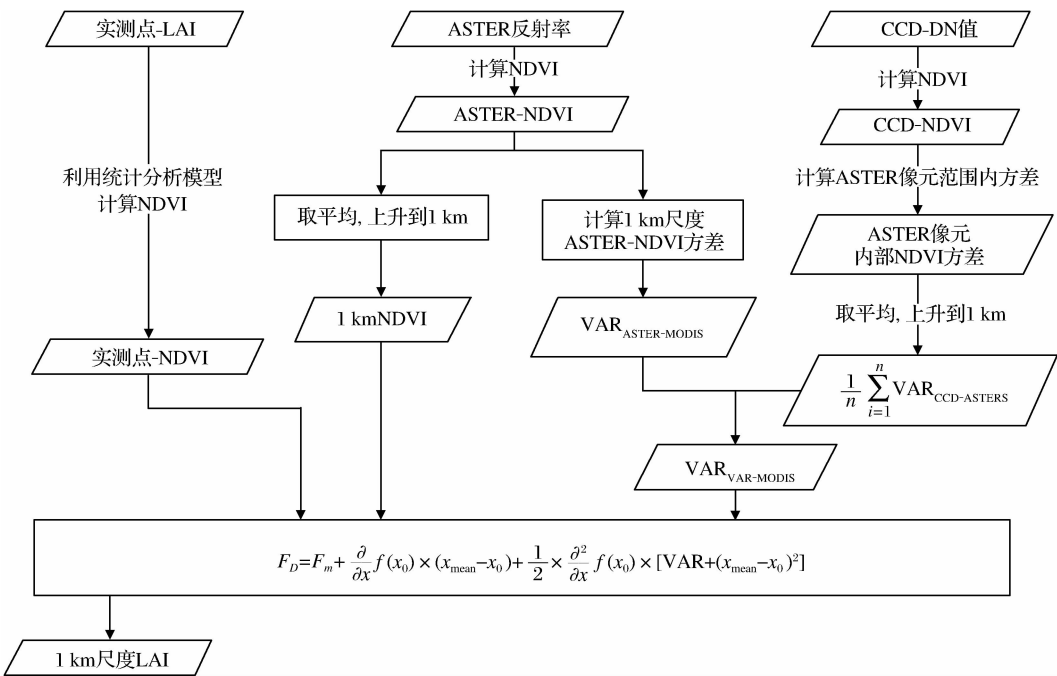


图 3 实测点 LAI 转化为 1km 尺度 LAI 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of the scaling-up for LAI

图。需要说明的是,将实测点的目标参数(如 LAI)转换到像元尺度主要是为了验证遥感影像估算的结果,因此原则上实测点位的选择应对像元尺度的目标参数有足够的代表性。一般的情况是像元内目标参数的空间分布不完全均一,存在一定的变化。这种变化用像元内的统计方差表示,当这一统计方差不过大的情况下,可以通过上述的尺度转换方法,估计在像元尺度上可参考的地面观测相对真值。当这一统计方差很大,则说明像元内目标参数的异质性强,实测点的观测数据已不能有效代表像元尺度的实测值,因而实测点的数据不易用作验证像元估算结果。

4.2 不同分辨率遥感影像之间尺度转换

不同分辨率遥感影像之间尺度纠正公式仍用泰勒级数展开(Taylor Series Expansion)模型进行推导。当式(5)运用到不同分辨率影像之间时,由于影像之间不存在数据缺失的问题,即 $x_{mean} = x_0$ 。用 F_L 代表 $f(x_{mean})$,即使用低分辨率影像反演所得的数值,式(4)变为如下形式:

$$F_D = F_L + \frac{1}{2} \times \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x_{mean}) \times VAR \quad (10)$$

此时尺度效应只与反演公式以及像元内的异质性有关^[4]。对于 ASTER 影像和 MODIS 影像的尺度纠正,用各自高一级分辨率遥感影像作为亚像元信息计算尺度纠正因子,从而进行尺度纠正。

5 结果分析与讨论

5.1 实测点转换为像元尺度

选取盈科绿洲与花寨子荒漠加密观测区 5 月到 7 月 270 个玉米地实测点数据,利用式(5)将实测点 LAI 转换成 15 m 以及 1 km 的像元分辨率。

将实测点转换为像元尺度是为了验证遥感影像估算结果。满足检验的实测点必须符合以下两个条件:① 对像元有一定的代表性;② 像元内部相对均一。如果不满足这两点,实测点在尺度纠正的过程中可能会出现过度纠正的情况。为了避免这种情况出现,我们设定两个条件来选择数据:① 实测点 NDVI 与像元 NDVI 差值小于 0.15;② 像元内部方差小于 0.05。得到将实测点 LAI 转换到 15 m 分辨率像元 138 个,用 15 m-LAI 表示,实测点 LAI 转换到 1 km 分辨率像元 68 个,用 1 km-LAI 表示。

图 4(a)为实测点转换到 15 m 像元尺度转换前后比较,图 4(b)为实测点转换到 1 km 像元尺度转换前后比较。图中实测点转换前后变化在 1 以内,这是由于筛选了较纯像元的缘故。虽然变化较小,但仍然对实测点进行了一定的尺度纠正。从转换公式来看,实测点 LAI 与像元 LAI 的差异主要受到反演函数、像元 NDVI 与实测点 NDVI 差值以及像元内部方差的影响。当像元 NDVI 小于实测点 NDVI 时,实测数据与像元比较的时候就过高估计了像元

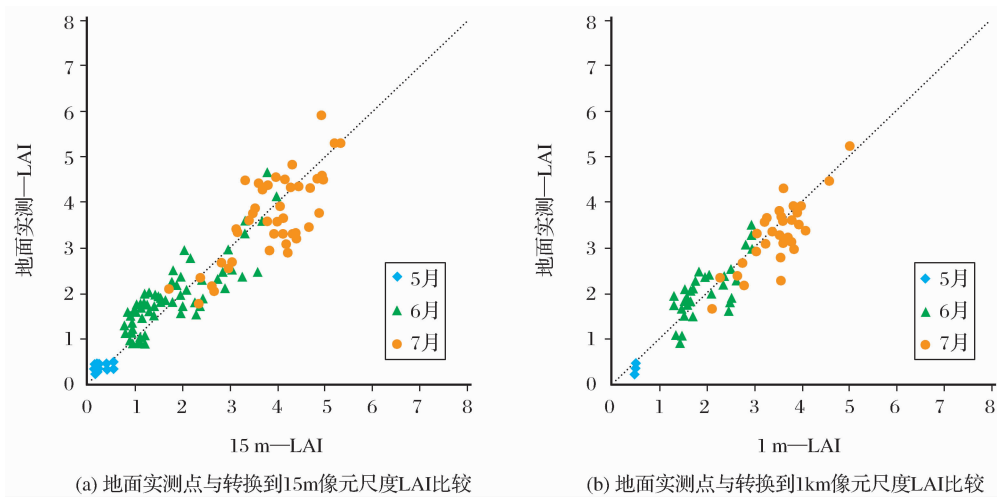


图 4 实测点尺度转换前后比较

Fig. 4 Comparison between the field measured LAI and the LAI after scaling-up

的 LAI。通过这个公式可以使数值变小,得到纠正。相反,如果实测点低估了像元数值的时候,通过运算数值就会变大。同时公式也提供由于异质性造成的尺度修正因子,用像元内部方差表达。

5.2 不同空间分辨率遥感 LAI 的尺度纠正

5.2.1 ASTER-LAI 尺度纠正前后比较

本文中 NDVI-LAI 统计分析模型是利用纯像元 NDVI 与实测点 LAI 拟合得到的,ASTER 全景

影像中并非都是纯像元,相反大部分像元内部是存在异质性的。因此将此模型直接用于计算 ASTER 全景 LAI 时会造成尺度问题。对此利用 CCD 影像作为亚像元信息,通过式(10)对 ASTER-LAI 进行尺度纠正。

图 5 为 ASTER 影像 LAI 尺度纠正前后比较,其中横坐标为直接将统计分析模型用于 ASTER 影像的 LAI 数据,纵坐标为利用 CCD 影像作为亚像元信息经过尺度纠正后的 LAI 数据。图 5(a)为区域内的

所有数据,有尺度效应较大的点以及尺度效应很小的点,难以分析。利用 CCD 影像以及 ASTER 尺度的方差影像进行目视解译,可以看出像元内部主要存在植被与道路、稀疏植被以及连续植被这 3 种亚像元组合。选取影像中这 3 类地物的特征点进行分析,如图 5(b)。可以看出连续植被区域的尺度效应是很小的,稀疏植被区域的尺度效应相对较大,植被与道路混合区域的尺度效应最大。所以对于 LAI,像元内部的异质性越大,尺度效应就越大。

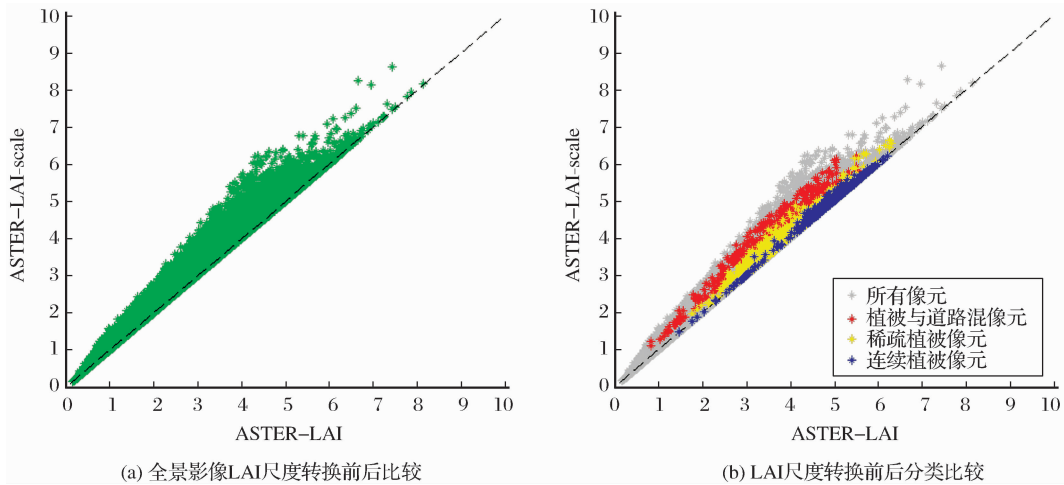


图 5 ASTER-LAI 尺度纠正前后比较

Fig. 5 Comparison of ASTER LAI before and after scaling-up

5.2.2 利用 ASTER 作为亚像元,MODIS-LAI 尺度纠正前后比较

在利用 ASTER 作为 MODIS 影像的亚像元对 LAI 进行纠正的时候,我们假设 ASTER 为纯像元,对它内部的异质性忽略不计。选取相同范围的 MODIS-LAI 产品与 ASTER-LAI 进行比较,如图 6 (a)。两种 LAI 的相关系数为 0.813,虽然存在差

异,但还是有一定相关性的,同时可以看出 MODIS 产品值相对较低。造成两种 LAI 数据差异的原因是多样的,包括模型估算误差、输入数据差异和尺度效应。本文仅对尺度效应进行讨论,尝试利用 ASTER 影像作为亚像元对 MODIS 产品进行尺度纠正,观察是否可以提高两种数据的相关性。利用 ASTER-NDVI 影像计算 MODIS 像元内部方差以

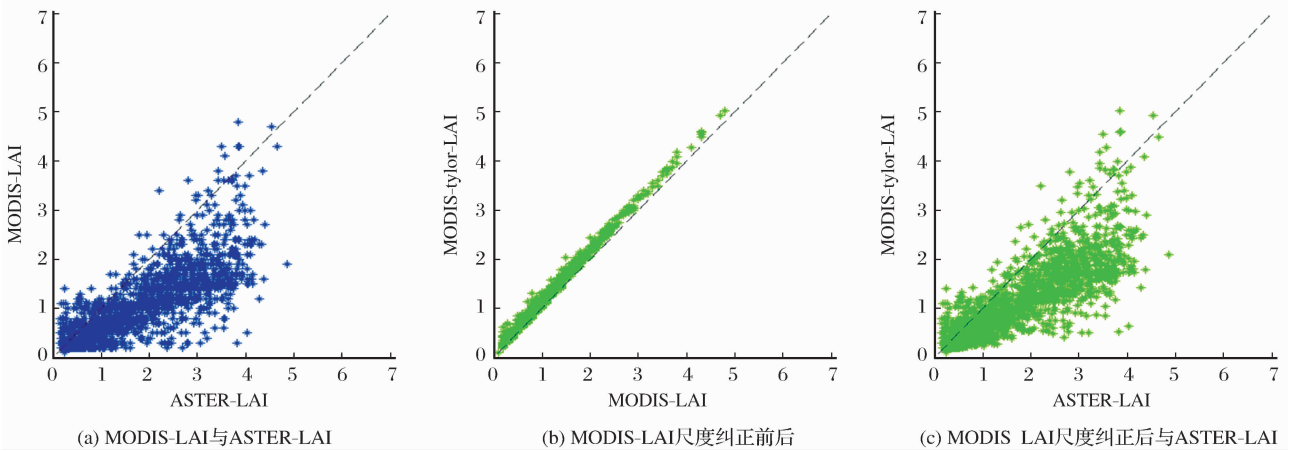


图 6 MODIS-LAI 产品尺度纠正比较

Fig. 6 Comparison of MODIS LAI before and after scaling-up

及均值,将这两项代入式(10)算出尺度纠正因子,将其加到 MODIS-LAI 产品上,进行尺度纠正,记作 MODIS-tylor-LAI。

图 6(b)为 MODIS 产品尺度纠正前后的比较。与图 5 比较,ASTER(15 m)到 MODIS(1 km)的尺度效应明显小于 CCD(1.25 m)到 ASTER(15 m)的尺度效应。这是由于研究区域为大片的玉米地,地块大小约为 60 m×60 m 左右。从上文分析中可知 CCD 到 ASTER 尺度的异质性来源较多,包括连续植被、稀疏植被以及植被与道路混合像元。而以 ASTER 影像作为 MODIS 尺度的亚像元所计算的异质性主要来自于地块与地块之间的差异,异质性较小,因此计算出来的尺度效应相对要小很多。同时也说明在农作物种植区域,地块与地块之间的差异较小,而地块内部的异质性相对较大。图 6(c)为经过尺度纠正的 MO-

DIS 产品与 ASTER-LAI 比较。与图 6(a)相比,可以看出吻合度较好,相关系数为 0.843,相比之前的相关系数 0.813 有一定的提高。说明经过尺度纠正后的不同源 LAI 趋于一致。

5.3 尺度转换后实测点 LAI 对遥感 LAI 的验证

图 7 为转换到 15 m 尺度的实测点与相同尺度的遥感影像 LAI 比较结果。图 7(a)为尺度转换后的实测点与 ASTER 影像 LAI 对比,图 7(b)为尺度转换后的实测点与经过尺度转换的 ASTER 影像 LAI 对比。两幅图中数据基本分布在 1:1 线左右,且两幅图变化较小。主要是由于筛选出来的实测点所在像元异质性较小,因此尺度效应较小。但仍有细微的变化,尺度纠正前 ASTER 影像与实测点相关系数为 0.975,尺度纠正后相关系数为 0.982,有轻微的提升。

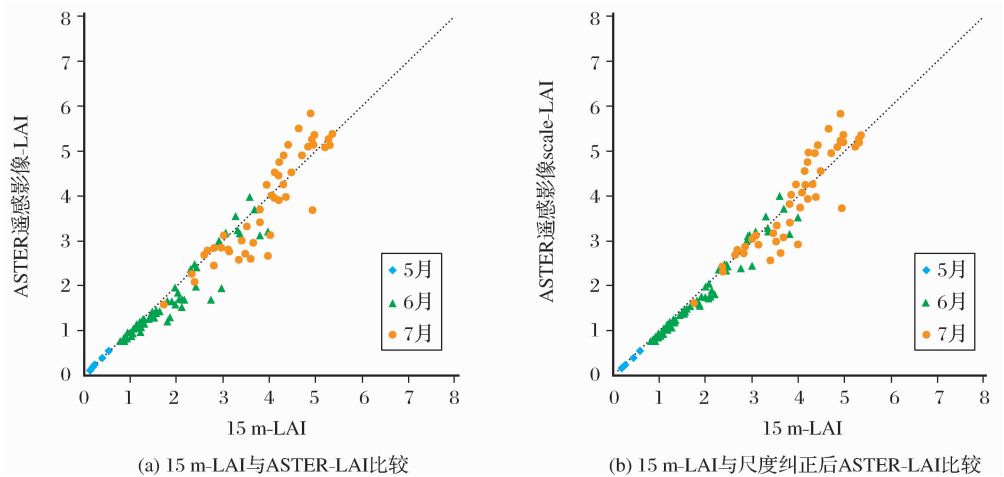


图 7 尺度转换后实测点验证 ASTER-LAI

Fig. 7 Using scaled field measured LAI to validate ASTER LAI

图 8 为转换到 1 km 尺度的实测点与 MODIS-LAI 产品对比。MODIS 影像中有一部分像元与实

测点较为接近,但总体而言 MODIS-LAI 产品数值相对较低。

6 结 语

针对用地面实测点 LAI 数据验证遥感估算产品中的两种尺度效应问题,本文利用泰勒级数展开(Taylor series expansion)模型进行了推导和转换。首先利用 ASTER/TM 纯像元 NDVI 与实测点 LAI 建立统计分析关系。基于该统计关系,通过泰勒级数展开模型将黑河区域 2008 年 5 月、6 月、7 月的实测点 LAI 转换到了 15 m 以及 1 km 的像元尺度,同时对 MODIS 以及 ASTER-LAI 产品利用高一级分辨率影像作为亚像元信息计算它们的尺度转换因子,进一步对 MODIS 以及 ASTER-LAI 进行尺度

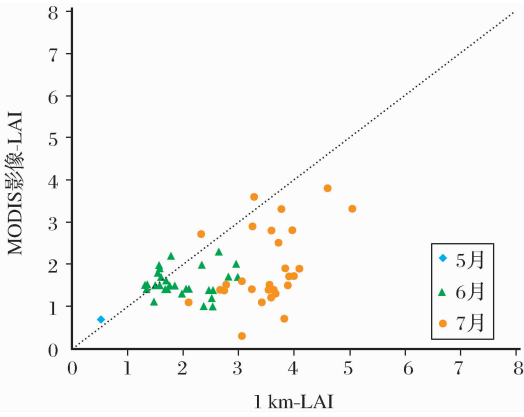


图 8 1 km-LAI 验证 MODIS-LAI

Fig. 8 Using scaled field measured LAI to validate MODIS LAI product

纠正。最后我们利用尺度转换后的实测点对遥感影像估算的 LAI 进行验证。通过研究得出以下结论并进行了相应的讨论:

(1) 本文探讨 LAI 尺度转换是基于 NDVI-LAI 统计分析模型来展开的。该模型简单,在采样数据可信的前提下可以得到较好的 LAI 估算结果,但也存在模型参数估算受到数据限制的问题。本文构建统计分析模型的时候,遥感 NDVI 与地面测量 LAI 无法保证时间和空间上严格的一致。这会影响到统计模型的准确性。而且统计分析模型会随时间、空间的变化有不同的参数组合。因此在其它研究区域适用性存在问题。但是,采用该模型讨论的尺度转换方法是可行的,结果合理。

(2) 在将实测点 LAI 转换到像元尺度的过程中,为了避免出现过度纠正的情况,我们对数据进行了选择。认为像元内部异质性较大或实测点与像元平均水平相差较大的情况下,实测点采样精度较低,因此不再作尺度转换处理。选择后的实测点通过泰勒级数展开模型转换后在该像元分辨率上有较高的可信度,可以作为验证该分辨率遥感影像 LAI 的参考数据。

(3) 不同分辨率遥感影像 LAI 产品之间的尺度效应与像元内部亚像元的异质性有关。利用不同分辨率的亚像元统计异质性所反映的地表变化的意义也是不同的。利用 CCD 影像作为 ASTER 影像的亚像元统计的异质性主要反映地块内部的变化;利用 ASTER 影像作为 MODIS 影像的亚像元统计的异质性反映地块之间的变化。

(4) 利用尺度转换后的实测点对遥感 LAI 进行验证。结果表明 ASTER 影像与实测点吻合度较高。对 MODIS-LAI 产品进行验证可以发现,虽然有一些点与实测点吻合较好,但 MODIS 叶面积指数产品在许多点存在低估的情况。

(5) 不同数据源的几何配准精度也会影响尺度纠正的精度。GPS 记录的实测点经纬度以及不同分辨率影像之间空间对应可能出现偏移,这样会造成像元内部异质性计算的误差。如果能解决这个问题,相信尺度转换结果精度可以有较大的提高。

综上所述,在反演模型可信度较高以及空间地理位置匹配较好的情况下,泰勒级数展开(Taylor series expansion)模型是一种有效、简洁的计算和表达尺度效应的方法,将这种方法用于 LAI 尺度纠正,可以得到较好的纠正结果,可作为验证遥感像元尺度 LAI 估算结果的地面观测参考值。

致谢:论文采用数据由国家 973 项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(2007CB714400)与中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(KZCX2-XB2-09)联合试验获取。感谢参加试验人员提供的观测数据和相关资料、感谢帮助获取试验期卫星遥感数据的专家和数据发布机构、感谢提供星、机载数据预处理结果的课题组。

参考文献:

- [1] Zhang Renhua. Quantitative Models in Thermal Infrared Remote Sensing and Its Experimental Foundation on the Ground Surface[M]. Beijing: Science Press, 2009: 172-176, 505-507. [张仁华. 定量热红外遥感模型及地面实验基础[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 172-176, 505-507.]
- [2] Fang Xiuqin, Zhang Wanchang. The Application of Remotely Sensed Data to the Estimation of Leaf Area Index[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2003, 3: 58-62. [方秀琴, 张万昌. 叶面积指数(LAI)的遥感定量方法综述[J]. 国土资源遥感, 2003, 3: 58-62.]
- [3] Zhang Renhua, Sun Xiaomin, Su Hongbo, et al. Remote Sensing and Scale Transferring of Leafy Parameters on Earth Surface[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1999, 41 (3): 51-58. [张仁华, 孙晓敏, 苏红波, 等. 遥感及其地球表面时空多要素的区域尺度转换[J]. 国土资源遥感, 1999, 41 (3): 51-58.]
- [4] Chen J M. Spatial Scaling of a Remotely Sensed Surface Parameter by Contexture[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 69: 30-42.
- [5] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, et al. Simultaneous Remote Sensing and Ground-based Experiment in the Heihe River Basin: Scientific Objectives and Experiment Design[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 897-914.]
- [6] Chen J M, Cihlar J. Quantifying the Effect of Canopy Architecture on Optical Measurements of Leaf Area Index Using Two Gap Size Analysis Methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(3): 777-787.
- [7] Chen J M, Cihlar J. Plant Canopy Gap-size Analysis Theory for Improving Optical Measurements of Leaf Area Index[J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6211-6222.
- [8] Wu Hua, Jiang Xiaoguang, Xi Xiaohuan, et al. Comparison and Analysis of Two General Scaling Methods for Remotely Sensed Information[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13 (2): 183-189. [吴骅, 姜小光, 习晓环, 等. 两种普适性尺度转换方法比较与分析研究[J]. 遥感学报, 2009, 13 (2): 183-189.]
- [9] Aman A, Randriamanantena H P, Podaire A. Upscale Integra-

tion of Normalized Difference Vegetation Index; The Problem of Spatial Heterogeneity[J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 1992, 30: 326-338.

[10] Hu Z, Islam S. A Framework for Analyzing and Designing Scale Invariant Remote Sensing Algorithms[J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 1997, 35: 747-755.

[11] Li Xiaowen, Wang Jindi, Strahler A H. Scale Effects and Scaling-up by Geometric-Optical Model[J]. Science in China (Series E), 2000, 30(Suppl): 12-17. [李小文, 王锦地, Strahler A H. 尺度效应及几何光学模型用于尺度纠正[J]. 中国科学(E 辑), 2000, 30(增刊): 12-17.]

LAI Measuring Data Processing, Analysis and Spatial Scaling in the Middle Reaches of Heihe Experimental Research Region

LIU Yan^{1,2}, WANG Jin-di^{1,2}, ZHOU Hong-min^{1,2}, XUE Hua-zhu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China; 2. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Watershed Allied Telemetry Experimental Research was hold in Heihe experimental research region in the summer of 2008. During that period, a number of ground LAI measurements and remote sensing LAI products were collected. When validating remote sensing LAI products with ground measurements or matching of LAI products derived from different resolution remote sensing images, scaling issue caused by surface heterogeneity cannot be ignored. So different measured and estimated LAI data can't be directly compared to each other without spatial scaling. In this paper, we developed a spatial scaling method based on Taylor series expansion model. This study mainly included two parts. ① Setting high-resolution image as auxiliary data, ground LAI measurements were converted into middle-resolution and low-resolution. ② LAI products of low-resolution were scale transferred with high-resolution image as sub-pixel information. Based on these results, we find that, scaling method based on Taylor series expansion model is simple and effective. After upscaling process, the ground LAI measurements can be consider as reference to validate estimated LAI from remote sensing data.

Key words: Leaf area index; Taylor series expansion model; Spatial scaling