

黑河流域叶面积指数 (*LAI*) 空间尺度转换

张万昌¹, 钟 山², 胡少英²

(1. 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:为有机地整合利用不同分辨率遥感数据获取的陆面过程以及其他相关的环境变量, 尺度问题越来越受到人们的重视。选取黑河张掖绿洲区为实验研究区, 利用 ETM + 影像反演的 *LAI* 通过升尺度转换到 900m 分辨率, 对 *LAI* 尺度转换过程中引起的误差进行了定量分析, 尝试提出一种新的基于 *NDVI* 像元分解的更有效的升尺度转换方法。研究发现非线性的升尺度算法引起的误差不超过 10.5%, 且误差大小与地表异质性程度正相关, 而地表异质性是导致 *LAI* 尺度转化误差的主要原因, 严重时可能造成 45% 的偏差, 但纯像元 *LAI* 的计算不受尺度影响。提出的基于 *NDVI* 像元分解的 *LAI* 升尺度转换算法, 分两步考虑了地表异质性问题, 很好的实现了研究区 30m 空间精度 *LAI* 向 900m 的尺度转换, 该方法应用于干旱、半干旱的中国西北黑河流域 NASA 发布的 MODIS *LAI* 产品校正, 取得了良好效果。

关键词:尺度; 尺度转换; 叶面积指数 (*LAI*); Landsat ETM + ; MODIS

文章编号: 1000-0933(2008)06-2495-09 中图分类号: Q142, Q944, Q948 文献标识码: A

Spatial scale transferring study on Leaf Area Index derived from remotely sensed data in the Heihe River Basin, China

ZHANG Wan-Chang¹, ZHONG Shan², HU Shao-Ying²

1 START Regional Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2495 ~ 2503.

Abstract: In order to effectively integrate various land-surface processes and environmental variables retrieved by different spatial resolution remotely sensed data, scaling issues induced by transferring for one resolution data to another have drawn more and more attentions. Taking the Zhangye Oasis in the Heihe River Basin of northwestern China as a study site, using the *LAI* map derived from the Landsat ETM + image and NASA published MODIS *LAI* product for the same day of the region, an experimental study for up scaling the 30m spatial resolution *LAI* to 900m was conducted to quantitatively analyzes the error transforms in the process of *LAI* up scaling with the final goal of establishing a new and much effective up scaling scheme in terms of *NDVI* pixel decomposing techniques. It was found that less than 10.5% errors were caused by the non-linearity of algorithms utilized in *LAI* up scaling, and its value is highly positively correlated with the terrain heterogeneities, terrain heterogeneity is the predominate causing for the errors introduced in *LAI* scale transferring. The maximum error caused by terrain heterogeneity can reach to about 45%, but no error can be caused for the pure pixel *LAI* scale

基金项目: 国家发展基础规划资助项目(973)(2006CB400502, 2001CB309404), 中国科学院“百人计划”择优支持资助项目(8-047401)

收稿日期: 2007-04-23; **修订日期:** 2007-11-07

作者简介: 张万昌(1966 ~), 男, 新疆人, 教授, 主要从事遥感与 GIS 生态水文、水资源及全球变化研究. E-mail: zhangwc@tea.ac.cn

致谢: 蒋建军博士、张东博士、赵登忠, 方秀琴硕士、刘三超、徐全芝、乐通潮、韩杰、黄清华、余均辉等提供野外观测资料, 在此一并致谢。

Foundation item: The project was financially supported by the National Key Developing Program for Basic Sciences of China (Grant number 2006CB400502 & 2001CB309404), the 100 Talent Young Researcher Project of Chinese Academy of Sciences (No. 8-047401)

Received date: 2007-04-23; **Accepted date:** 2007-11-07

Biography: ZHANG Wan-Chang, Ph. D., Professor, mainly engaged in the study of Remote Sensing & GIS Hydrology & Water Resources and Global Changes. E-mail: zhangwc@tea.ac.cn

transferring. A new algorithm for *LAI* up scaling, based on above mentioned analyses, in terms of pixel decomposing techniques of *NDVI* accounting for terrain heterogeneity in two key procedures, was developed for the up scaling of 30 m *LAI* to 900 m with fairly satisfied resolution. This algorithm was used to correct NASA published MODIS *LAI* product and excellent results were obtained, which was back up with the fact that the corrected MODIS *LAI* product well consistent with the high spatial resolution *LAI* map of the study region.

Key Words: scaling; scale transferring; Leaf Area Index (*LAI*); Landsat ETM + ;MODIS

随着遥感技术的发展,大量不同分辨率的遥感数据为地球表层乃至一定深度的定量遥感研究提供了充足的信息源,然而不同遥感数据对陆面参数的反演方法通常也不同。传感器差异,分辨率的不同,陆面异质性变化,算法非线性等都会引起陆面参数反演的不确定性,而且不同分辨率遥感数据获取的陆面过程参数可比性较差。总体来说高分辨率遥感数据能更好的反映陆面信息,但高分辨率影像有时又过高地反映了地表真实情况使得研究对象太复杂而失去了宏观特征,反而不利于陆面参数的反演。如何有效整合不同分辨率数据以达到最高效的利用,越来越受到人们的重视,这涉及到遥感尺度转换问题,从遥感角度讲,尺度是传感器对地观测的空间度量和时间度量^[1],这里主要指空间分辨率,尺度转换是指将某一尺度上所获得的信息和知识扩展到其他尺度上的过程^[2],分升尺度转换和降尺度转换,理想的升尺度转换应该只是数据空间分辨率的降低,而数据内在信息应保存到低分辨率数据中去^[3]。

尺度问题的研究已经成为国内外研究的热点和前沿问题,国外在 20 世纪 70 年代末就开展了相关领域的研究,Mayaux, Lambin E F.^[4]等通过 4 种空间指数修正 TM 数据与 AVHRR 数据之间的统计关系,运用两步式的转换方法进行了植被指数的尺度转换。Gao X 和 Alfredo R^[5]用傅立叶变换和传感器的点扩散函数,将 MODIS 权重响应函数直接应用到 ETM + 影像频率域,实现了 ETM + 向 MODIS 250m、500m 和 1000m 的地表反射率及 *LAI* 的尺度转换。Anita Zelig, Jing M. Chen 等^[6]以 30m 分辨率图像为基础,研究发现 1km 分辨率集总式的 *NPP* 跟分布式的 *NPP* 相比有 65% 的偏差,利用亚像元信息发展了一种尺度转换方法,以减少粗分辨率 *NPP* 计算的误差。Z. Jin, Q. Tian^[7]等用主导覆盖类面积百分比来表征地表异质性,通过校正因子 *R* 建立各覆盖类尺度转换公式,实现了研究区 *LAI* 升尺度转换。胡少英,张万昌等^[8]利用纯像元信息建立了两种尺度各覆盖类集总式和分布式 *LAI* 的统计关系,通过面积加权将 30m 分辨率 *LAI* 转换到了 960m,并用此方法校正了 NASA 发布的全球 1 km MODIS *LAI* 数据产品,取得了很好的结果。以上研究都实现了遥感的升尺度转换,但这些研究普遍没有对尺度转换误差影响因素做全面分析。

本文以张掖绿洲研究区为例,在定量分析尺度转换误差影响因素的基础之上,提出了一种新的 *LAI* 升尺度转换方法,将研究区获取的 Landsat TM/ETM + *LAI* 由 30m 转换到 900m,并用此方法校正了 NASA 发布的全球 1 km MODIS *LAI* 数据产品。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

本文的研究区选择我国西北地区黑河流域绿洲区,黑河流域(37°45′~42°40′N, 97°42′~102°04′E)位于河西走廊中部,流域面积约 14.29 万 km²,是我国西北地区第二大内陆流域,北部与蒙古接壤,东以大黄山与武威盆地相连,西部以黑山与疏勒河流域毗邻。远离海洋,周围高山环绕,流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中,上游祁连山山区植被属温带山地森林草原,生长着呈片状、块状分布的灌丛和乔木林。中下游地带性植被为温带小灌木、半灌木荒漠植被,中游山前冲积扇下部和河流冲积平原上分布有灌溉绿洲栽培农作物和林木,下游两岸三角洲与冲积扇缘的湖盆洼地里,生长有荒漠地区特有的荒漠河岸林,灌木林和草甸植被^[9]。自然条件的多样性加上人类活动的影响,使得黑河流域植被覆盖非常不均一,同时,季节变化比较大。研究区景观分类及主要植被群落及其分布请参考 <http://heihe>.

westgis. ac. cn/[9]。

1.2 数据处理及 LAI 反演

1.2.1 数据介绍

研究区遥感数据为:2002 年 9 月 17 日 ETM + 图像,轨道号参数为 133/33,影像质量比较理想,已经做过几何粗校正;2002 年 9 月 14 ~ 21 号 MODIS 8d 合成 LAI 产品;2002 年 9 月 14 ~ 29 日 MODIS 16d 合成 NDVI 产品。实测数据包括 LAI 数据和地表覆盖类数据,是 2002 年 9 月 2 日到 13 日及 2003 年 7 ~ 9 月份对黑河流域两次大规模实地考察获得的, LAI 野外观测使用了跟踪辐射与冠层结构测量仪 (Tracing Radiation and Architecture of Canopies, TRAC) 和 LI-COR 公司生产的植冠分析仪 (LAI-2000) 两种仪器。 LAI 野外观测场的布设严格按照仪器操作规范要求进行,观测场一般以相隔 15m 的 3 根 50m 的测线布设,断面均值作为实际的 LAI,测点的选取比较均匀,基本覆盖了研究区的主要植被类型。

1.2.2 数据预处理

根据 Gilabert M A, Conese C. [10] 和 Zhang W C, Yamaguchi Y. [11] 提出的大气校正方法,首先对 ETM + 影像进行了辐射量校正和大气纠正。然后对 ETM + 影像进行了几何精校正,校正坐标系统为 UTM/WGS84, Zone 47N,利用 1:5 万地形图,尽量均匀的选择 15 个容易分辨的特征点,校正后误差在 0.5 个像元以内。最后截取了以张掖绿洲为中心的 2550 × 2370 大小的区域作为研究区,该区域植被较为集中,涵盖了大部分的实测数据。分别将 2002 年 9 月 14 ~ 21 日 MODIS 8d 合成 LAI 产品;2002 年 9 月 14 ~ 29 号 MODIS 16d 合成 NDVI 产品重投影并采样到 900m 分辨率,与 ETM + 影像配准后裁减出研究区图像。

1.2.3 地表覆盖分类

根据野外观测数据及黑河的自然地理概况,将黑河区的土地覆盖分为农作物、阔叶林、针叶林、草地、灌木、水体和戈壁 7 个类别,结合实测的地表覆盖数据和土地利用图,在影像上为每种覆盖类选取了大约 180 个纯像元点,借助 ENVI4.2 软件用最大似然法对研究区进行了分类,精度达到 75% 以上,得到了 30m 分辨率的地表覆盖分类图。900m 分类图由 30m 分类图重采样得到,记录 900m 分类图 (每个大像元对应 30m 分类图 900 个小像元) 每个像元内各覆盖类的百分比信息,将主导类标记为该像元的覆盖类型。

1.2.4 LAI 反演

LAI 算法采用胡少英^①的黑河流域叶面积指数估算模型:

$$\text{农作物} \quad LAI = 0.7271 \times \exp(3.0236 \times NDVI) \quad (1)$$

$$\text{阔叶林} \quad LAI = 0.5628 \times SR + 0.3817 \quad (2)$$

$$\text{针叶林} \quad LAI = 0.9428 \times \exp(2.4725 \times ARVI) \quad (3)$$

$$\text{灌木} \quad LAI = 1.1273 \times SR - 0.3468 \quad (4)$$

$$\text{草地} \quad LAI = 0.8253 \times \exp(0.3309 \times SR) \quad (5)$$

其中,NDVI 为归一化差值植被指数^[12],ARVI 为大气阻抗植被指数^[13],SR 为比值植被指数^[14]。水体和戈壁的 LAI 值置为 0,通过以上模型,反演出了研究区 30m 分辨率 LAI。

2 尺度转换误差影响因素定量分析

本文 LAI 尺度转换分析中用到了“分布式 LAI”^[15,16] (LAID) 和“集总式 LAI”^[15,16] (LAIL), LAID 是 ETM + 图像 LAI 值直接平均重采样到 900m 生成的,理论上低分辨率图像 (如 MODIS) 大像元的 LAI 值应该等于它所包含小像元 (如 TM) LAI 值的算术平均值^[17],所以 LAID 作为 900m 分辨率 LAI 的真实值。LAIL 表示直接由粗分辨率图像反演的 LAI,它是将 30m 分辨率 LAI 算法直接应用到 900m 分辨率植被指数图上得到的,900m 植被指数图是相应 30m 植被指数图平均重采样的结果。LAID 与 LAIL 的差异表示 900m 分辨率 LAI 反演的尺度误差,尺度转换的目标就是要将转换结果 LAIR 接近或等于 LAID。在实际应用中,整个区域的 LAID 通常是无

① 胡少英. 植被变化及其对陆面特征参数的响应. 南京大学, 硕士论文, 2006.

法获得的,而粗分辨率图像直接反演的 $LAIL$ 值存在较大的误差,所以需要通过尺度转换得到 $LAIR$,实现对粗分辨率 LAI 的校正。 $LAID$ 和 $LAIL$ 计算公式^[18]如下:

$$LAID = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LAI_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i(VI_i) \quad (6)$$

$$LAIL = f_i\left(\frac{VI_i}{n}\right) \quad (7)$$

式中, VI_i 是小像元的植被指数, $f_i(x)$ 为每种覆盖类对应的 LAI 算法。

2.1 算法的非线性

在 LAI 的反演过程中,如式(6)(7)及 VI 的计算,经常会有非线性算法存在,这会引起 LAI 反演值的偏差^[15]。现以 $NDVI$ 为例分析实际应用中算法非线性引起的 LAI 反演误差,900m 分辨率 $NDVI$ 计算采用两种方法^[12]:

算法 1

$$NDVI_L = \frac{\sum_{i=1}^n R_{nir(i)} w_i - \sum_{i=1}^n R_{red(i)} w_i}{\sum_{i=1}^n R_{nir(i)} w_i + \sum_{i=1}^n R_{red(i)} w_i} \quad (8)$$

$$LAIL = f_i(NDVI_L) \quad (9)$$

算法 2

$$NDVI_D = \sum_{i=1}^n \frac{R_{nir(i)} - R_{red(i)}}{R_{nir(i)} + R_{red(i)}} w_i \quad (10)$$

$$LAID^* = f_i(NDVI_D) \quad (11)$$

$$NDVI_{error} = NDVI_D - NDVI_L \quad (12)$$

$$LAI_{error} = LAID^* - LAIL \quad (13)$$

$R_{nir(i)}$, $R_{red(i)}$ 分别是 30m 分辨率图像各覆盖类在近红外和红光波段的反射率, w_i 是 900m 分辨率图像中每一个像元覆盖类的百分比, $NDVI_L$ 和 $LAIL$ 是模拟的实际应用中 $NDVI$ 和 LAI 的计算值。 $NDVI_D$, $LAID^*$ 是理论上无算法非线性误差的 $NDVI$, LAI 值, $NDVI_{error}$, LAI_{error} 是算法非线性引起的 $NDVI$, LAI 误差。注意这里的 $LAID^*$ 不同于(6)式的 $LAID$,没有考虑地表异质性引起的误差。

在研究区所有覆盖类型中,农作物的 LAI 均值最大,为 5.169,而戈壁的 LAI 值为 0,包含这两类的混合像元 LAI 值将会有比较大的误差,所以选取农作物和戈壁带入式(12)(13)进行计算,用分类时选取的纯净像元在近红外和红光的反射率均值作为农作物和戈壁的反射率,农作物:0.366、0.081,戈壁:0.402、0.334,最终结果如图 1 所示:

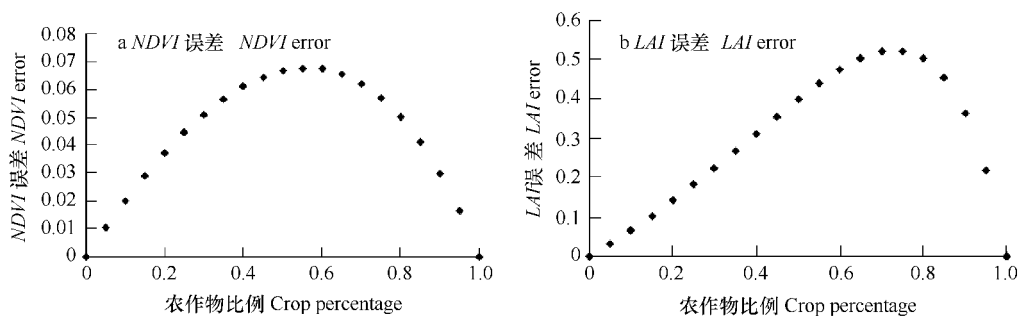


图 1 算法非线性误差

Fig. 1 Errors caused by non-linearity of the algorithm in LAI reversion

由模拟结果可以看出, *NDVI* 和 *LAI* 算法的非线性引起的 *LAI* 尺度误差很小, 这和陈键、倪绍祥等^[19] 的观点一致, 算法的非线性造成的 *NDVI* 误差不超过 10.6%, *LAI* 误差不超过 10.5%, 算法的非线性不是导致粗分辨率 *LAI* 反演的主要原因, 在有些情况下可以忽略。当农作物的比例为 0 或 1 时, 算法的非线性不会造成 *LAI* 尺度转换误差, 即对于纯净像元, 从一尺度向上转换到另一尺度时 *LAI* 不会产生尺度误差。农作物比例为 0.75 时地表异质性最大, *LAI* 尺度误差也达到了偏差 45% 的最大值, *LAI* 误差的变化趋势跟地表异质性程度正相关, 混合像元中算法非线性引起的 *LAI* 误差大小跟像元混合程度密不可分。

2.2 地表异质性

遥感是一个获得像元区域地表平均辐射信号的过程, 这种信号的均一化处理掩盖了亚像元的变化信息^[6], 尤其是随着分辨率的降低, 像元内的混合程度加剧, 一种分辨率上的反演模型应用到另一分辨率图像上时, 必将带来很大的不确定性^[20]。像元中不同覆盖类之间的光谱差异, 各类的混合程度, 同一覆盖类型内植被密度的变化等因素都会导致地表异质性产生。实际上, 一些 *LAI* 的反演算法都是假设像元内地表同质性基础上的^[21], 用粗分辨率影像反演 *LAI* 时, 这些假设很难成立, 反演结果也会有很大误差。

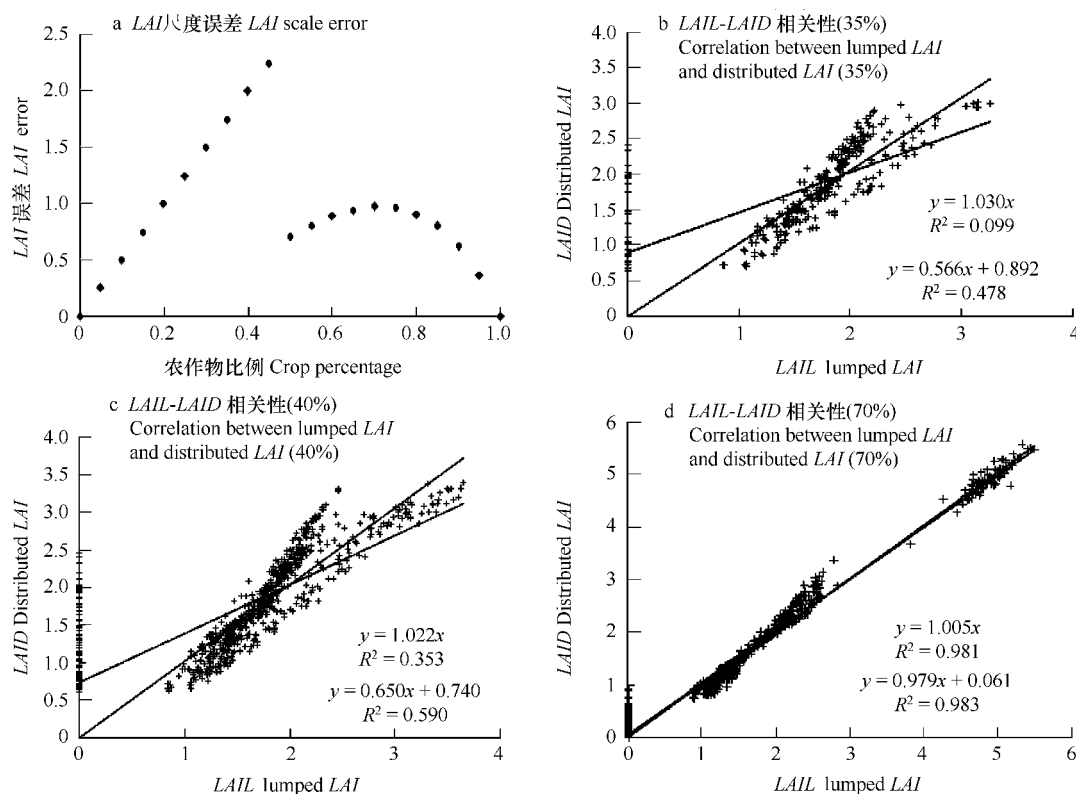


图2 地表异质性误差

Fig. 2 Errors caused by the surface heterogeneity

据式(4), 以农作物和戈壁混合为例, 模拟 *LAI* 误差如图 2(a), 图 2(b)(c)(d) 分别是整个研究区主导类百分比小于 35%, 小于 40% 和大于 70% 的点的 *LAID-LAIL* 相关图。从模拟结果可以看出, 地表异质性会引起很高的 *LAI* 尺度误差, 随着农作物跟戈壁的混合程度的增加, *LAI* 尺度误差逐渐增大, 农作物比例接近 50% 时误差最大, 达到 45%。在只有农作物跟戈壁的情况下, 900m 分辨率图像中农作物比例小于 50% 的点将被标记为戈壁, *LAI* 置 0, 大于 50% 的点标记为农作物而采用农作物对应的 *LAI* 反演公式, 这样就掩盖了 900m 像元内的亚像元信息, 使得 *LAI* 反演值出现偏差。在实际应用中, 地表异质性的存在可能使 *LAI* 被低估也可能会被高估, 这取决于像元如何被标记^[22], 农作物混合像元中含有戈壁时 *LAI* 值会高于真实值, 相反戈壁混合像元中混有农作物时 *LAI* 值会低于真实值。图 2(b) 的像元点覆盖类多且主导类不突出, 这会使得像元的异质

性增大,导致 $LAIL$ 出现更大的偏差, $LAI D-LAIL$ 的相关系数只有 0.099,图 2(c) 相关系数也很低 0.353;图 2(d) 主导像元的百分比大于 70%,像元均质性较好, $LAI D-LAIL$ 的相关系数达到了 0.981,这说明地表异质性是 LAI 反演和尺度转换的主要误差来源^[15],尺度转换过程中如何有效的利用高分辨率图像中的地表异质性信息是尺度转换的关键所在。

3 LAI 升尺度转换

3.1 基于 $NDVI$ 像元分解的转换方法

在对尺度转换误差定量分析的基础之上,本文提出了一种基于纯像元 $NDVI$ 分解的尺度转换方法,900m 植被指数图是像元内 $NDVI$ 值的均值,均一化过程掩盖了亚像元信息,利用纯像元将 900m 分辨率 $NDVI$ 值按类进行分解,分解值采用相应覆盖类的公式计算 LAI ,最后再加权平均得到整个像元的 LAI 值。技术流程图如图 3。

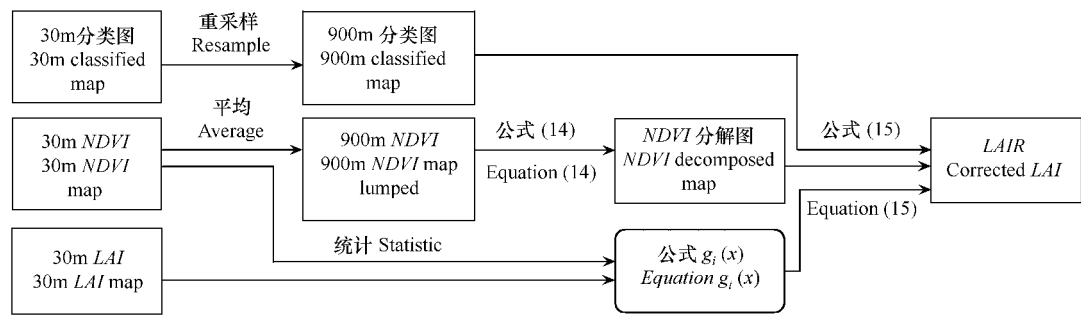


图 3 尺度转换技术流程图
Fig. 3 Flow chart of spatial scaling for LAI

$$NDVI_i = \frac{NDVI_i^*}{\sum_{i=1}^m NDVI_i^* w_i} NDVI^\nabla \tag{14}$$

$$LAIR = \sum_{i=1}^m g_i(NDVI_i) w_i \tag{15}$$

农作物

$LAIR = 0.752 \times \exp(2.899 \times NDVI)$

$\tag{16}$

阔叶林

$LAIR = 0.661 \times \exp(2.723 \times NDVI)$

$\tag{17}$

灌木

$LAIR = 5.111 \times NDVI + 0.244$

$\tag{18}$

草地

$LAIR = 5.536 \times NDVI - 0.048$

$\tag{19}$

针叶林

$LAIR = 3.482 \times NDVI + 0.478$

$\tag{20}$

戈壁、水体

$LAIR = 0$

$\tag{21}$

式中, m 是覆盖类数; $NDVI_i^*$ 是 30m 分辨率各类纯象元植被指数均值; $NDVI^\nabla$ 是粗像元集总式植被指数,由 30m $NDVI$ 图均值采样模拟得到; w_i 是各类在粗像元内的面积百分比; $NDVI_i$ 是该粗像元分解出的各覆盖类植被指数,并据表 1 做了极值限定,表 1 中的极值是由研究区 30m $NDVI$ 所有像元统计得到的; $g_i(x)$ 表示各类 LAI 与 $NDVI$ 的统计关系式,分别为式(16)~(21),由小区域 $NDVI$ 图和 LAI 图统计得到; $LAIR$ 是尺度转换后

表 1 $NDVI$ 参数
Table 1 $NDVI$ parameters

项目 Item	农作物 Farm crop	阔叶林 Broad-leaved forest	灌木 Shrub	草地 Grass	针叶林 Coniferous forest	戈壁水体 Gobi & Waters
$NDVI(j)$	0.632	0.313	0.157	0.247	0.238	0.05
$NDVI(\min)$	0.307	0.01	0.01	0.01	0.01	
$NDVI(\max)$	0.897	0.88	0.625	0.608	0.739	

的叶面积指数。

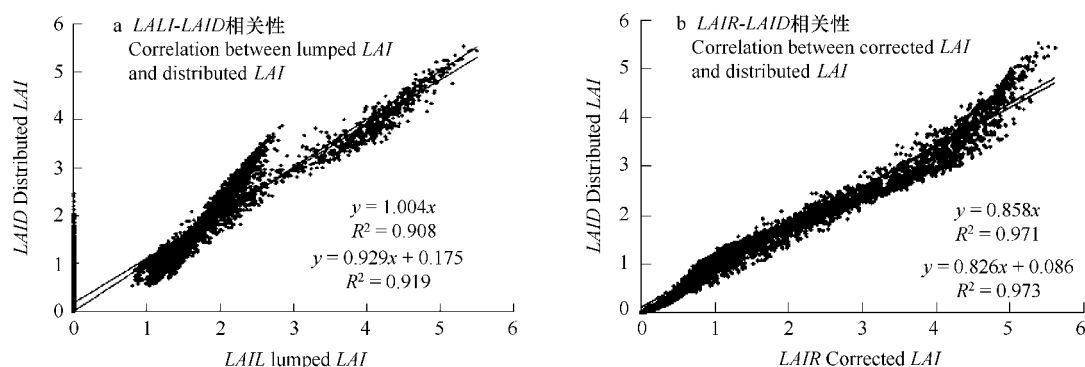


图4 尺度转换结果

Fig. 4 Scale transferring results

尺度转换前后 LAI 跟 LAID 的相关性分析如图 4 所示,通过尺度转换 LAIR-LAID 的相关系数达到了 0.972,说明该算法用于尺度转换是可行的,本文的尺度转换方法从两个方面考虑了地表异质性问题,一是用分类图来表示亚像元信息^①,二是每一类计算 LAI 时采用的是分解后的 NDVI 值,而不是共用 900m 分辨率的平均值,从而提高了尺度转换的准确性。

3.2 应用实例:MODIS LAI 产品校正

为了进一步验证该方法在实际应用中的有效性,利用 MODIS NDVI 产品,将以上尺度转换方法用于同时期 LAI 产品的校正,结果如图 5 所示,校正前 LAI 产品与 LAID 的相关系数仅为 0.607,MODIS LAI 被严重低估,校正后的叶面积指数 LAIR 跟 LAID 的相关系数显著提高到了 0.912,图 6(a)(b)为校正前后 MODIS LAI 图。

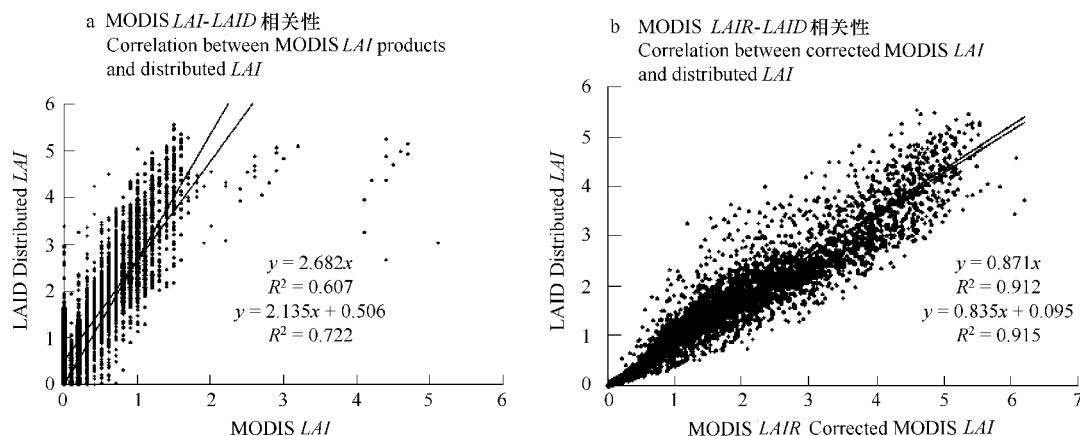


图5 MODIS LAI 校正

Fig. 5 MODIS LAI correction

4 总结与讨论

MODIS LAI 产品存在严重的被低估现象,通过最值、均值、标准差统计发现(表 2),研究区 MODIS 产品 LAI 均值仅为 0.382,而 ETM+ 得到的 LAID 均值为 1.321,研究区的 LAI 产品低估达 71%。校正前后研究区 LAI 最大值没有太大偏差,校正后的均值、标准差有了明显改进,分别达到了 1.467、1.312,更好的符合了 LAID 图像。尺度误差会造成 MODIS LAI 产品的低估,同时传感器的差异和 LAI 反演算法的不同也是引起偏

① 方秀琴. 黑河流域 LAI 遥感制图及其尺度转换探讨. 南京大学,硕士论文,2004.

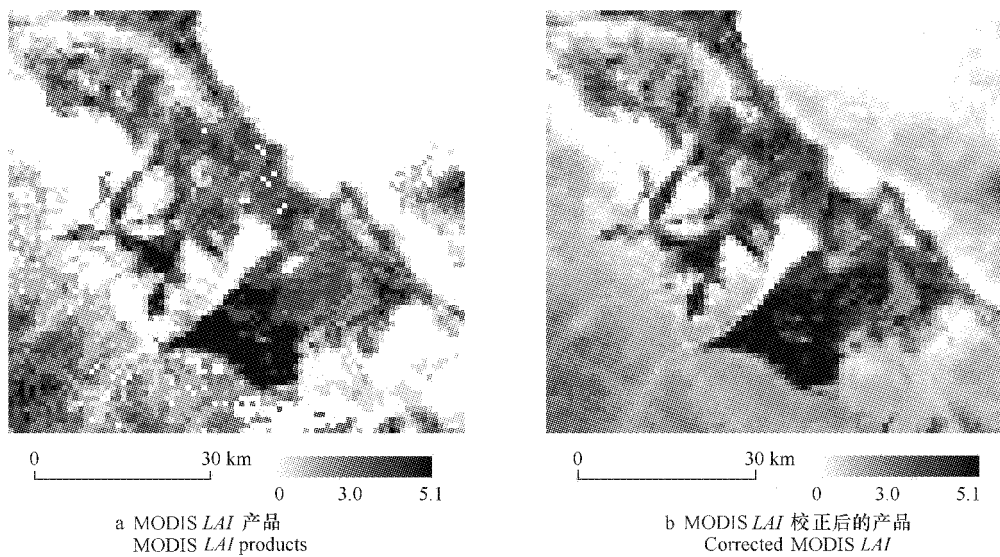


图6 校正前后 MODIS LAI 图

Fig. 6 uncorrected and corrected MODIS LAI map

差的重要原因。

表2 校正前后 MODIS LAI 统计

Table 2 uncorrected and corrected MODIS LAI map statistics

项目 Item	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Std.
MODIS LAI MODIS LAI products	0	5.100	0.382	0.456
MODIS LAIR Corrected MODIS LAI	0	6.196	1.467	1.312
LAID Distributed LAI	0	5.538	1.321	1.145

LAI 向上尺度转换受到诸多因素的影响,通过定量分析发现植被指数和 LAI 算法的非线性对尺度转换影响较小,不超过 10.5%,并且随着地表异质性的增加而增大。地表异质性是引起尺度转换误差的主要原因,像元混合严重的时候可能造成 45% 的偏差,如何更好的表征地表异质性将是 LAI 反演和尺度转换的关键。纯像元 LAI 的尺度转换不会有误差产生,可以由一尺度任意转换到另一尺度,纯像元 LAI 的这种尺度不变性是尺度转换的有用信息。基于纯像元 NDVI 分解的尺度转换方法,分两步考虑了地表异质性信息,很好的实现了 LAI 的升尺度转换。

为了更好的表征地表异质性以用于尺度转换和粗分辨率 LAI 的反演,地表异质性对尺度转换误差的影响尚需要深入的研究,即使对于具有相同百分比地表覆盖的两个像元来说,覆盖类在像元内的不同分布组合也会带来不同的尺度误差^[12],如何准确的表示地表异质性是尺度转换和提高粗分辨率 LAI 反演精度的关键。从分类到 NDVI 分解都要用到纯像元信息,纯像元的选取直接影像到尺度转换结果的好坏,在有精确纯像元信息的情况下,这种方法可以将 30m LAI 升转换到任一尺度。结果证实,利用高分辨率分类图,代表性区域的高分辨率 LAI 图像和各覆盖类纯像元信息,该算法可以用于 MODIS 等粗分辨率 LAI 产品的校正。

References:

- [1] Wu J G. Landscape Ecology-Concepts and Theories. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(1): 42—52.
- [2] Wu J G. Landscape ecology, pattern, size and scale. Beijing: Higher Education Press, 2000. 11—12.
- [3] Hay G J, Nieman K O, Goodenough D G. Spatial thresholds, image-objects and up-scaling: a multi-scale evaluation. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 1—9.
- [4] Mayaux P, Lambin E F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: a two-step correction function for proportional errors

- due to spatial aggregation. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(1): 1—15.
- [5] Gao X, Huete A R. Validation of MODIS land surface reflectance and vegetation indices with multi-scale high spatial resolution data. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2002, 2: 533—535.
- [6] Anita Zelig, Jing M. Chen, Jane Liu, *et al.* Algorithms for Scaling of Net Primary Productivity Using Subpixel Information. *Geosciences and Remote Sensing Symposium*, 2002, 2: 1066—1068.
- [7] Jin, Z, Tian Q, *et al.* Spatial Scaling Between Leaf Area Index Maps of Different Resolutions. *Journal of Environmental Management* (2006), doi: 10.1016/j. jenvman.2006.08.016.
- [8] Hu S Y, Zhang W C. A quality assessment of MODIS LAI product in Heihe and Hanjiang River Basins. *Remote Sensing Information*, 2005, 4: 22—27.
- [9] <http://heihe.westgis.ac.cn/>
- [10] Gilabert M A, Conese C, Maselli F. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15: 2065—2086.
- [11] Zhang W C, Yamaguchi Y, Ogaw K. Evaluation of the Pre-processing of the Remotely Sensed Data on the Actual Evapotranspiration, Surface Soil Moisture Mapping by an Approach Using Landsat, DEM and Meteorological Data. *Geocarto International*, 2000, 15: 57—67.
- [12] Kaufman Y J, Janre D, Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing*, 1992, 30: 261—270.
- [13] Pearson R L, Miller L D, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado, *Proceeding of the 8th International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, 1972, 2:1355—1379.
- [14] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, *Proceedings of the Third ERTS symposium*, 1974, 1: 48—62.
- [15] Chen J M. Spatial scaling of a remote sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 30—42.
- [16] Hu Z and Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 747—755.
- [17] Tan B, Hu J N, Zhang P, *et al.* Validation of moderate resolution imaging spectroradiometer leaf area index product in croplands of Alpilles, France. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D1): D01107.
- [18] Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J, *et al.* Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product I. uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83:214—231.
- [19] Chen J, Ni Sh Y, Li J J, *et al.* Scaling effect and spatial variability in retrieval of vegetation LAI from remotely sensed data. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1503—1508.
- [20] Meentemeyer V. Geographical perspectives of space, time, and scale. *Landscape Ecology*, 1989, 4(3): 163—173.
- [21] Garrigues S, Allard D, Weiss M, *et al.* Influence of spatial heterogeneity and scaling on leaf area index estimates from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(4): 286—298.
- [22] Chen J M, Pavlic G, Brown L, *et al.* Derivation and validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1):165—184.

参考文献:

- [1] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42~52.
- [2] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京高等教育出版社, 2000. 11~12.
- [8] 胡少英, 张万昌. 黑河及汉江流域 MODIS 叶面积指数产品质量评价. *遥感信息*, 2005, 4: 22~27.
- [19] 陈键, 倪绍祥, 李静静, 等. 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*, 2006, 26(5): 1503~1508.

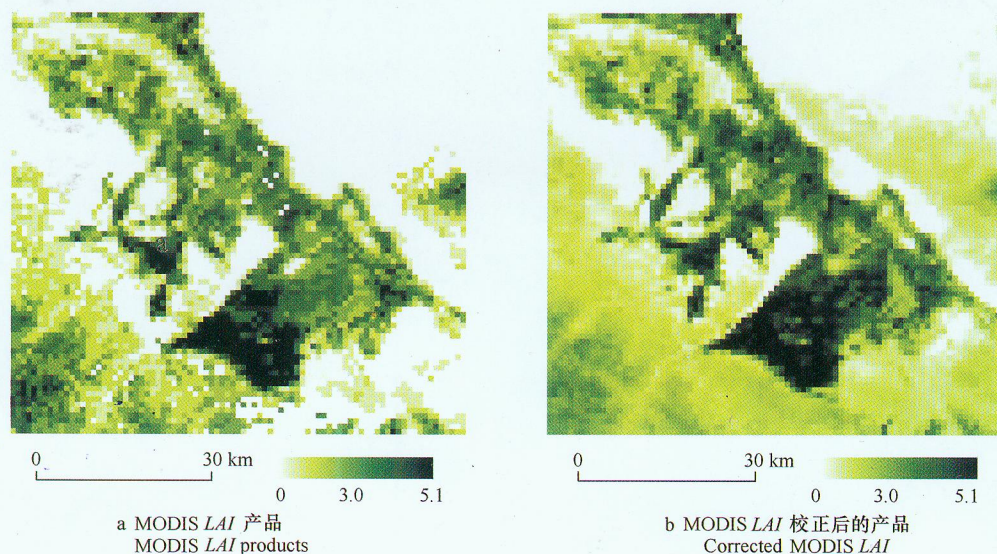


图6 校正前后 MODIS LAI 图

Fig. 6 uncorrected and corrected MODIS LAI map

差的重要原因。

表2 校正前后 MODIS LAI 统计

Table 2 uncorrected and corrected MODIS LAI map statistics

项目 Item	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Std.
MODIS LAI MODIS LAI products	0	5.100	0.382	0.456
MODIS LAI Corrected MODIS LAI	0	6.196	1.467	1.312
LAID Distributed LAI	0	5.538	1.321	1.145

LAI 向上尺度转换受到诸多因素的影响,通过定量分析发现植被指数和 LAI 算法的非线性对尺度转换影响较小,不超过 10.5%,并且随着地表异质性的增加而增大。地表异质性是引起尺度转换误差的主要原因,像元混合严重的时候可能造成 45% 的偏差,如何更好的表征地表异质性将是 LAI 反演和尺度转换的关键。纯像元 LAI 的尺度转换不会有误差产生,可以由一尺度任意转换到另一尺度,纯像元 LAI 的这种尺度不变性是尺度转换的有用信息。基于纯像元 NDVI 分解的尺度转换方法,分两步考虑了地表异质性信息,很好的实现了 LAI 的升尺度转换。

为了更好的表征地表异质性以用于尺度转换和粗分辨率 LAI 的反演,地表异质性对尺度转换误差的影响尚需要深入的研究,即使对于具有相同百分比地表覆盖的两个像元来说,覆盖类在像元内的不同分布组合也会带来不同的尺度误差^[12],如何准确的表示地表异质性是尺度转换和提高粗分辨率 LAI 反演精度的关键。从分类到 NDVI 分解都要用到纯像元信息,纯像元的选取直接影像到尺度转换结果的好坏,在有精确纯像元信息的情况下,这种方法可以将 30m LAI 升转换到任一尺度。结果证实,利用高分辨率分类图,代表性区域的高分辨率 LAI 图像和各覆盖类纯像元信息,该算法可以用于 MODIS 等粗分辨率 LAI 产品的校正。

References:

- [1] Wu J G. Landscape Ecology-Concepts and Theories. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19(1): 42-52.
- [2] Wu J G. Landscape ecology, pattern, size and scale. Beijing: Higher Education Press, 2000. 11-12.
- [3] Hay G J, Nieman K O, Goodenough D G. Spatial thresholds, image-objects and up-scaling: a multi-scale evaluation. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 1-9.
- [4] Mayaux P, Lambin E F. Estimation of tropical forest area from coarse spatial resolution data: a two-step correction function for proportional errors