

中小区域尺度时间序列林地 LAI 快速估测方法

卢 伟, 范文义^{*}

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 时间序列 LAI 对模拟大气与植被边界上的碳水交换过程至关重要, 其已经成为众多区域尺度的碳水循环机理模型研究中重要的驱动数据。针对低空间分辨率 MODIS LAI 产品在中小区域尺度应用时表达 LAI 的空间异质性精度差问题, 该研究提出了一种中小区域尺度时间序列林地 LAI 快速估测方法。该方法首先提取了林地 MODIS LAI 的归一化生长曲线, 利用三次样条插值函数进行归一化 LAI 曲线的拟合, 以此曲线模拟 LAI 的全年变化情况; 其次基于传统遥感统计模型和 TM 遥感数据估测展叶完全时期的 LAI, 作为研究区域 LAI 的最大值并以此控制 LAI 生长曲线; 最后将归一化 LAI 拟合函数与最大 LAI 相乘得到时间序列 LAI 数据集。试验结果表明: MODIS LAI 产品对中小区域尺度较高空间分辨率 LAI 值的估测不够准确, 但 MODIS LAI 归一化生长曲线与归一化的实际 LAI 生长变化情况保持较高的一致性, 可以用来模拟 LAI 的全年变化情况; 该研究提出的方法可简单、高效地为中小区域尺度的其他研究提供有效的时间序列林地 LAI 数据。

关键词: 遥感; 时间序列分析; 林地; 叶面积指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.026

中图分类号: TP79; S127

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0188-06

卢 伟, 范文义. 中小区域尺度时间序列林地 LAI 快速估测方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 188—193.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.026 <http://www.tcsae.org>

Lu Wei, Fan Wenyi. Fast estimation method for time-series forest LAI at small and medium regional scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 188—193. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.026 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

叶子是植被进行光合作用、蒸腾作用的基本场所, 其大小和分布直接影响着林分对光能的截获和利用以及降水的截留和蒸腾, 叶面积指数 (leaf area index, LAI) 作为植被冠层最重要的结构性参数之一^[1-3], 与植被的光合作用、蒸腾作用、呼吸作用及生产力等生态生理过程密切相关, 是林分、区域及全球尺度上森林生态系统碳水循环中必不可少的驱动性参数^[4-7]。时间序列 LAI 表征了植被的生长动态, 获取区域时间序列 LAI 成为区域尺度的碳水循环机理模型研究中重要的数据准备工作。

目前区域尺度 LAI 的估测主要采用遥感反演法^[8-11], 根据其是否涉及物理生理过程, 又分为统计估测模型和物理反演模型两大类^[12]: 物理反演模型^[13-16]物理意义明确, 但存在模型参数多、不确定性大、计算量大、耗时长等不足; 统计估测模型^[17-20]主要是基于统计方法建立 LAI 与相关性较高的植被指数之间线性或者非线性函数, 此模型具有参数较少、计算效率高、容易实现等优点,

虽然模型的普遍适用性较差 (即模型参数随时间和地点发生变化), 统计估测模型依旧是反演估测 LAI 的普遍方法。

物理模型结构复杂, 不易学习掌握, 耗时长, 非专业 LAI 研究人员不易通过此种方法获取时间序列的 LAI; LAI 统计模型研究目前集中在植被展叶完全后某一时间段 (最大 LAI 时期), 覆盖整个生长季的时间序列 LAI 估测研究较为欠缺, 这是由于建立适用于整个时间序列的 LAI 模型, 需对不同时期 LAI 进行建模数据采集, 实测建模数据获取要花费大量人力、物力。因此在区域碳水循环模型中涉及到区域时间序列 LAI 数据时, 研究人员一般直接采用目前被普遍认可的 MODIS LAI 产品^[21-23], 但是 MODIS LAI 产品在中小区域尺度应用时存在两个基本问题: 1) 表达 LAI 的空间异质性精度差; 2) 低分辨率造成的混合像元使得其 LAI 产品估测值与中小区域尺度高空间分辨率 LAI 实测值相比存在较大偏差。针对以上问题, 该研究提取了 MODIS LAI 的归一化生长曲线, 研究其与实测 LAI 归一化生长曲线的一致性, 旨在探索基于 MODIS LAI 产品及 LAI 统计估测模型的中小区域尺度时间序列 LAI 的快速估测方法。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

该研究区为东北林业大学帽儿山实验林场, 位于黑龙江省尚志市境内, 经纬度范围为 45°15′~45°29′N,

收稿日期: 2015-09-24 修订日期: 2016-01-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目 (2011BAD37B01)

作者简介: 卢 伟, 女, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事碳循环模型及林业遥感研究。哈尔滨 东北林业大学林学院, 150040。

Email: sanpangzai1228@126.com

*通信作者: 范文义, 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事定量遥感及 GIS 研究。哈尔滨 东北林业大学林学院, 150040。

Email: fanwy@163.com

127°28'~127°43'E, 研究区域南北长 26 km, 东西宽 20 km, 总面积约 2 6620 hm²。该区属长白山系支脉张广才岭西北部小岭余脉, 境内平均海拔 428 m, 最高海拔 817 m, 平均坡度 14.2°, 属低山丘陵缓坡地形。该地属温带季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季温暖多雨, 平均年降水量 723.8 mm, 土壤为典型暗棕壤, 植被属长白植物区系, 原始地带性植被为阔叶红松林, 现为东北东部山区较典型的天然次生林区, 次生林类型多样且具有代表性, 群落类型有硬阔叶林、软阔叶林、针叶林、针阔混交林, 平均林龄 50 a。白桦(*betula platyphylla*)、水曲柳(*fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*juglans mandshurica*)、枫桦(*betula costata*)、山杨(*populus davidiana*)、红松(*pinus koraiensis*)和落叶松(*larix gmelinii*)等^[24]。研究区域位置如图 1 所示。

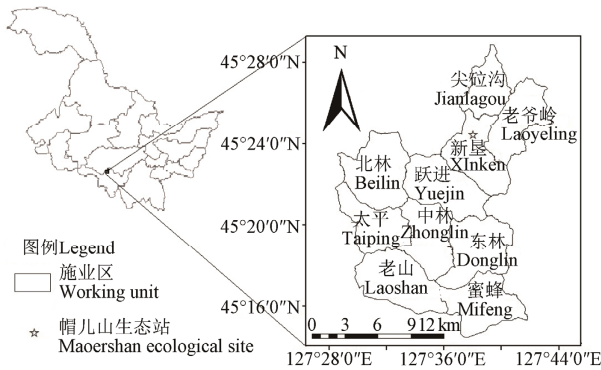


图 1 研究区域位置示意图

Fig.1 Location diagram of study area

1.2 研究方法

LAI(*t*)表示 LAI 随时间变化的生长函数, 与林分类型、林龄、林分密度密切相关, 温带森林的 LAI(*t*)为单峰曲线。归一化的 LAI 生长函数 LAI_{norm}(*t*)也是单峰, 表示叶子的生长程度或者落叶程度, LAI_{norm}(*t*)仅仅与林分类型和林龄相关, 与林分密度无关, 计算公式如下。

$$\text{LAI}_{\text{norm}}(t) = \frac{\text{LAI}(t) - \text{LAI}_{\min}}{\text{LAI}_{\max} - \text{LAI}_{\min}} \quad (1)$$

式中 *t* 表示日序天数; LAI(*t*)表示 *t* 时刻 LAI 值, 即 LAI 生长函数; LAI_{norm}(*t*)表示归一化的 LAI 生长函数, 随林龄和林分类型发生变化; LAI_{min} 表示一年中 LAI 的最小值; LAI_{max} 表示一年中 LAI 最大值, 出现在叶子展叶完全后, 并在一段时期内变化较小, 在此时间段内 LAI 测量值均可作为 LAI_{max}。

本文研究对象是温带落叶阔叶林及针阔混交林 (以落叶树种为主), 这 2 个林型的 LAI_{min} 近似于 0, 则式 (1) 简化为式 (2), LAI_{norm}(*t*)表示为 LAI 与 LAI_{max} 的比例分数。

$$\text{LAI}_{\text{norm}}(t) = \text{LAI}(t) / \text{LAI}_{\max} \quad (2)$$

$$\text{LAI}(t) = \text{LAI}_{\text{norm}}(t) \cdot \text{LAI}_{\max} \quad (3)$$

由于林分密度等差异, 造成不同位置的 LAI(*t*)不同, 在较大区域上获取的 LAI(*t*)不能代表内部各个子区域的 LAI, 即从 MODIS LAI 产品大像元上提取的 LAI 值不能代表其内部子区域的 LAI 值。但是相同林分类型且林龄相近的叶子具有相似的生长趋势, 即相同林分类型且林

龄相近叶子的 LAI_{norm}(*t*)基本一致, 在林分类型单一且林龄相近的较大 MODIS 栅格区域上获得的 LAI_{norm}(*t*)基本可以代表大像元内每个小像元 LAI 的归一化生长情况。如果获取了小像元对应林分类型及林龄的 LAI_{norm}(*t*)及其 LAI_{max}, 根据式 (3) 即可获得 LAI 的生长曲线, 以此估测小像元 LAI 的生长变化。MODIS LAI 产品目前被普遍认可, 从其上可以选取林分类型单一的像元, 提取不同林分类型不同龄组的归一化 LAI 生长函数, 用其作为小像元对应林分类型及林龄的 LAI_{norm}(*t*); TM 影像空间分辨率为 30 m, 是中小区域尺度上提取 LAI_{max} 较为合适的的数据源, 基于传统 LAI 遥感统计估测模型和植被展叶完全时期获取的 TM 影像数据可以获取 LAI_{max} 分布图, 30 m 分辨率 LAI 分布图可以用合适尺度体现中小区域 LAI 的空间异质性。

1.2.1 LAI_{max} 计算

2010 年朱高龙等^[12]在研究帽儿山地区 LAI 遥感模型时发现比值植被指数 (reduced simple ratio, RSR) 与该区有效叶面积指数 (effective LAI, LAI_e) 相关性最好, 最适合该区 LAI 的遥感提取, 该结论已经被曲迪等^[25]采纳并用于估测相关区域的 LAI。本文采用的 LAI 遥感估测方程及所涉及参数均参考朱高龙等^[12]的研究结果。LAI 遥感估测方程如下

$$\text{LAI} = (1 - \alpha) \cdot \text{LAI}_e / \Omega \quad (4)$$

$$\text{LAI}_e = 0.4939 \times \text{RSR} + 0.5188 \quad (5)$$

$$\text{RSR} = \text{SR} [1 - (\text{SWIR} - \text{SWIR}_{\min}) / (\text{SWIR}_{\max} - \text{SWIR}_{\min})] \quad (6)$$

式中 α 为树干和树枝等非绿叶要素对 LAI_e 的贡献率, $\alpha=0.15$; Ω 为叶片聚集度系数 (foliage clumping index), 由叶片空间分布特征确定, 如果叶片空间分布是随机的, 则 $\Omega=1$, 如果叶片是聚集分布, 则 $\Omega<1$, 该研究中 $\Omega_{阔}=0.83$, $\Omega_{混}=0.73$; SR 为比值植被指数, 其值为 TM 遥感影像第 4 波段地表反射率与 TM 遥感影像第 3 波段地表反射率之比; SWIR 为 TM 影像第 5 波段地表反射率; SWIR_{max} 为完全郁闭冠层的遥感影像第 5 波段反射率; SWIR_{min} 为完全开放冠层的遥感影像第 5 波段反射率。

1.2.2 逐日 LAI 计算

森林是由幼、中、近、成和过熟林组成, 相同林分类型不同林龄的 LAI_{norm}(*t*)不同, 在这种情况下, 外业测定叶面积指数时不但要区分针叶林、阔叶林和混交林, 而且在每种类型中还要按幼龄林、中龄林和近、成、过熟林分别测定拟合 LAI 曲线。由于该研究区内森林大部分都属于中龄林, 所以 LAI 估测及外业测定 LAI 时仅仅按着针、阔、混 3 种林分类型进行测定, 不考虑林龄影响。该研究的具体研究路线见图 2。

1.3 数据准备

1.3.1 MODIS LAI 栅格数据集

下载包含研究区域的 2011 年 MODIS LAI 产品 (<http://glovis.usgs.gov>), 时间分辨率为 8 d, 空间分辨率为 1 km×1 km。对其进行波段组合、重投影、范围裁剪得到 MODIS LAI 栅格数据集, 投影方式为 UTM 投影, WGS84 椭球, 投影带为 52N, 为了方便后续 TM 数据及

MODIS 数据的计算, 对 MODIS 数据进行了重采样计算, 使其行列数与 TM 的行列数保持一致, 空间分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 该研究所涉及到的其他栅格数据投影类型及空间分辨率均同上。在 MODIS LAI 栅格数据集提取 LAI 时间序列曲线 (如图 3), 可以看出 LAI 时间序列曲线出现了不均匀的季节性变动问题, 该研究采用陈镜明等提出的三次样条帽盖算法^[26] (locally adjusted cubic-spline capping, LACC) 对时间序列 LAI 数据进行平滑处理。LACC 算法是基于局部加权回归方法开发的, 用于异常数据系列的曲线拟合, 平滑前后 LAI 曲线对比如图 3 所示。平滑后的 MODIS LAI 数据集作为进一步研究基础数据集。

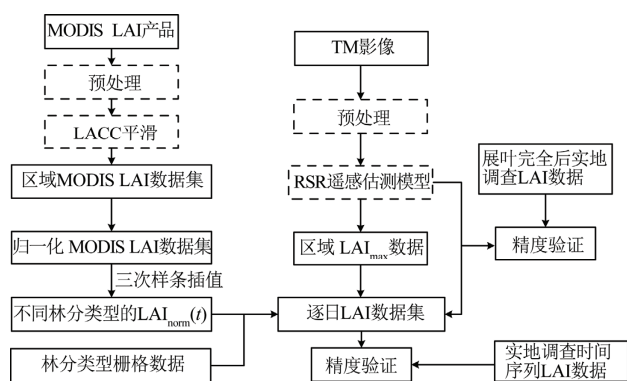


图2 研究路线流程图
Fig.2 Research route diagram

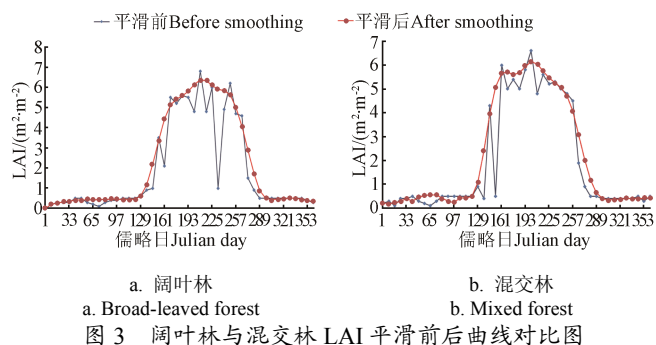


图3 阔叶林与混交林 LAI 平滑前后曲线对比图
Fig.3 Comparison for broad-leaved forest and mixed forest LAI curve before and after smoothing

1.3.2 TM 预处理

实验区 8 月份左右叶子展叶完全, 认为此时叶面积指数基本达到最大值且在一定时期内基本保持不变, 估测最大 LAI 的遥感数据来自摄于 2011 年 8 月 2 日的 Landsat 5-TM 卫星影像 (<http://glovis.usgs.gov>), 轨道编号 117-028, 图像质量良好, 基本无云, 通过对遥感图像进行辐射定标、大气校正等预处理, 裁切后得到研究区遥感影像图。

1.3.3 林分类型数据

利用研究区域的小班分布矢量数据, 根据其林分类型字段, 生成 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的林分类型栅格数据, 作为林分类型参考依据。

1.3.4 实测样地时间序列 LAI

2011 年利用 TRAC 测量仪对研究区域进行实地 LAI

测量, 样地范围与栅格分辨率大致保持尺度一致为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 实测样地个数及调查数据如表 1 所示。

表1 实测 LAI 统计表
Table 1 Statistics of observed LAI

日期 Data	阔叶林 I LAI Broad-leaved forest I LAI/(m ² ·m ⁻²)	阔叶林 II LAI Broad-leaved forest II LAI/(m ² ·m ⁻²)	混交林 LAI Mixed forest LAI/(m ² ·m ⁻²)
2011-05-10	—	—	—
2011-05-17	0.41	0.55	0.49
2011-05-24	0.47	0.69	0.83
2011-06-05	3.77	4.53	4.28
2011-06-26	4.43	5.10	5.15
2011-07-31	4.72	5.40	5.77
2011-08-31	3.86	4.34	4.67
2011-09-28	1.14	2.33	2.44
2011-10-10	0.32	0.58	0.67

注: “—”表示未获取 LAI 测量值, 2011 年 5 月 10 日研究区域实地勘测发现树木叶子未发芽, 故没有进行 LAI 测量。

Note: “—” indicates that the LAI value is not obtained. It was found that the tree leaves of study area did not germinate on May 10, 2011 through the field survey. Thus no LAI measurements were performed.

2 结果与分析

2.1 MODIS LAI 归一化生长曲线的提取

由图 4a~4c 可知, 不论是阔叶林还是混交林, 从 MODIS 上提取的 LAI 生长曲线与实测 LAI 值之间有明显差异, 在阔叶林上表现尤为明显。

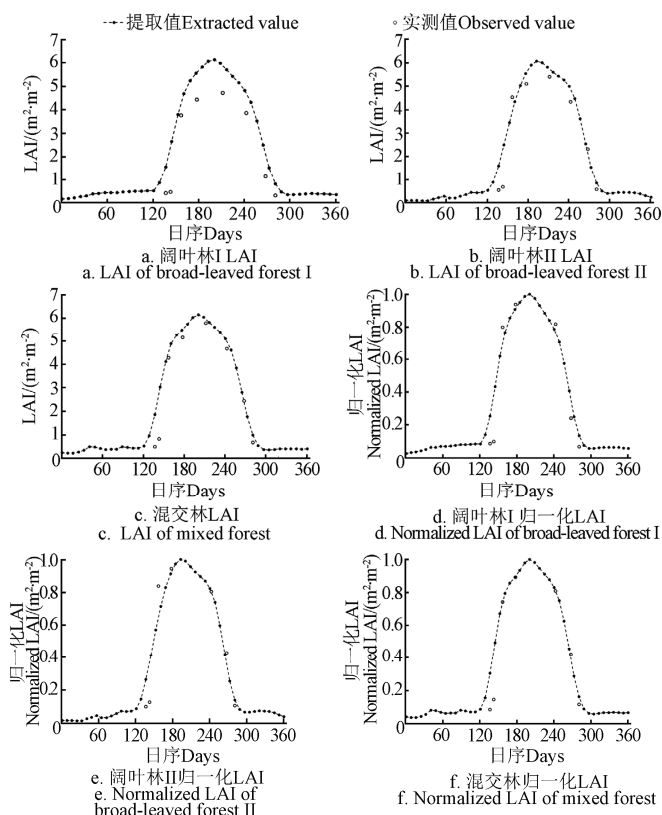


图4 基于 MODIS 的阔叶林和混交林 LAI 和归一化 LAI 提取值与实测值比较

Fig.4 Comparison of observed and extracted LAI and normalized LAI for broad-leaved forest and mixed forest based on MODIS

造成这种差异的主要原因之一是估测值与实测值之间的尺度不匹配, MODIS LAI 产品的空间分辨率为 $1\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m}$, 实测样地的范围为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, MODIS LAI 产品的低空间分辨率造成的混合像元现象使其在中小区域较高分辨率上对 LAI 值的估测不够准确。虽然对中小区域较高分辨率的 LAI 值的估测不够准确, 但是 MODIS 提取的 LAI 曲线与实际 LAI 的生长变化趋势保持一致性, 为了更好地说明这个问题, 该研究将 MODIS LAI 生长曲线及实测 LAI 值进行归一化, 从图 4d~4f 中可以看出, 归一化后的 MODIS LAI 生长曲线与归一化实测 LAI 值吻合度较高, 这说明 MODIS 提取的归一化 LAI 生长曲线能很好地反映植被 LAI 的生长变化情况, 在林分类型单一且林龄相近的较大 MODIS 栅格区域上获得的 $\text{LAI}_{\text{norm}}(t)$ 基本可以代表大像元内每个小像元 LAI 的归一化生长情况。

2.2 区域最大 LAI 遥感估测

利用式 (4)~(6) 估测 2011 年研究区域的 LAI_{max} , 分布图见图 5, 利用 2011 年 7 月 31 号实地测量的 20 组 LAI 值做精度验证, 估测 LAI 与实测 LAI 的回归方程的 R^2 为 0.747 (图 6), 可以作为 LAI_{max} 数据源。

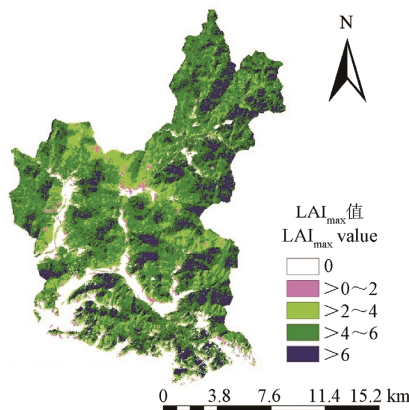


图 5 2011 年研究区最大 LAI 分布图

Fig.5 Maximum LAI distribution map of study area in 2011

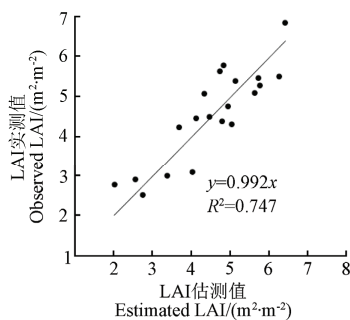


图 6 研究区 LAI 估测值与实测值回归分析图

Fig.6 Regression analysis of estimated and measured LAI in study area

2.3 中小区域尺度逐日 LAI 计算

当计算逐日 LAI 时, 需求得 LAI 归一化的生长曲线, 为了使 LAI 归一化曲线更能代表研究区内林分的 LAI 平均生长状况, 将研究区域小班分布矢量图与平滑后的

MODIS LAI 数据集进行叠加, 在研究区域内均匀选取阔叶林及针阔混交林 ROI 点。为了避免当 MODIS 像元覆盖地表不均一时, MODIS 时间序列中包含了非均一地表的空变化信息, 而不只是实测样区的林地类型时序特征, 应尽量选取林分类型纯净像元, 尽量减小 MODIS 混合像元造成的 TM LAI 时空分布的估算误差, 将提取的各点各时期归一化 LAI 求平均。利用三次样条函数进行曲线拟合, 不在此列举出三次样条插值函数的函数式, 仅给出阔叶林三次样条插值后生长季时间段归一化 LAI 函数值, 如图 7 所示。基于式 (3), 利用 MATLAB 编程实现逐日 LAI 的计算。

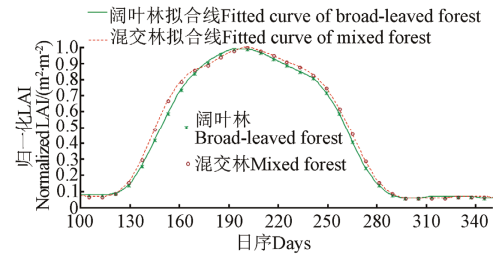


图 7 阔叶林和混交林归一化 LAI 三次样条插值函数拟合图

Fig.7 Normalized LAI curve fitted by three spline interpolation function for broad-leaved forest and mixed forest

从模拟的研究区域逐日 LAI 数据集中提取 2 个阔叶林实测点及一个混交林实测点的时间序列 LAI 数据, 与实测值进行比较 (图 8), 可以看出相比图 4 中直接从 MODIS 提取的 LAI 生长曲线, 该研究方法得到的 LAI 生长曲线与样地实测 LAI 匹配的更好, 阔叶林 I 样地的 RMSE=0.40, 阔叶林 II 样地的 RMSE=0.49, 混交林样地 RMSE=0.59。

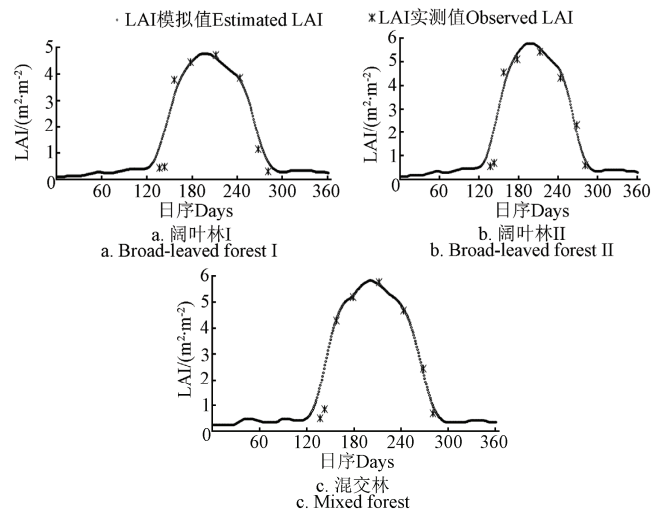


图 8 阔叶林和混交林逐日 LAI 模拟值与实测值对比图

Fig.8 Comparison of simulated daily LAI and measured LAI for broad-leaved forest and mixed forest

2.4 讨论

1) 利用 LACC 算法对 MODIS LAI 产品进行平滑, 从平滑后的 LAI 数据集提取的归一化曲线与实测的 LAI 变化曲线相比, 叶子展叶时期 (LAI 开始快速增加时间点) 与实测时间点相比偏早, 基于此的三次样条插值函数拟

合的归一化曲线也会存在问题, 需要结合“上包络线”等其他平滑算法的优势, 对平滑算法进行进一步的改进。

2) 由于研究区森林大部分都属于中龄林, 所以外业测定 LAI 时仅仅按着针、阔、混三种林分类型进行测定, 对于树种林龄构成特别复杂的地区, 不但要区分林分类型, 而且在每种林分类型中还要按幼、中、近、成、过林龄分别测定拟合 LAI 曲线。

3) 该研究提供的研究方法对 MODIS LAI 年变化曲线、TM 尺度 LAI 最大值的估测精度具有一定的依赖性, 利用该研究方法时应该注意控制 TM 尺度 LAI 最大值的估测精度。

4) 由于外业条件限制本文仅获得了有限的叶面积指数的实测数据, 有待获取更具有代表性的日观测数据, 对该研究提出的 LAI 快速估测方法进行进一步验证。

5) 因针叶林在研究区域分布较少, 无法提取其纯像元, 故此研究中未考虑针叶林, 关于此林型有待进一步研究。

3 结 论

1) 由 MODIS LAI 产品上提取的 LAI 生长曲线与实测 LAI 值之间有明显差异, 说明 MODIS 对中小区域较高分辨率的 LAI 值的估测不够准确, 但 MODIS LAI 归一化生长曲线可以用来模拟 LAI 的全年变化情况。

2) 利用比值植被指数 RSR 建立 LAI 的遥感统计估测模型, 估测 LAI 与实测 LAI 的 R^2 为 0.747。

3) 该研究提出的区域逐日 LAI 估测方法利用 MODIS LAI 产品提取 LAI 归一化生长曲线, 传统遥感统计模型估计 LAI 最大值, 将两者简单相乘估测时间序列 LAI 的方法适用中小区域尺度, 与实测值进行比较, 阔叶林 2 样地的 RMSE 分别为 0.40、0.49, 混交林样地 RMSE 为 0.59, 此方法简单、快速为中小区域尺度的其他研究提供有效的时间序列 LAI 数据。

参 考 文 献

- [1] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 153—162.
- [2] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(4): 421—429.
- [3] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展[J]. 2005, 24(5): 537—541.
Wang Xiqun, Ma Luyi, Jia Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(5): 537—541. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李世华, 牛铮, 李壁成. 植被净第一性生产力遥感过程模型研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 126—128.
Li Shihua, Niu Zheng, Li Bicheng. Study on remote sensing process model of vegetation NPP[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(3): 126—128. (in Chinese with English abstract)
- [5] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(6): 505—531.
- [6] Gholz H L. Environmental limits on above-ground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific North West[J]. Ecology, 1982, 63(2): 469—481.
- [7] 解毅, 王鹏新, 刘峻明, 等. 基于四维变分和集合卡尔曼滤波同化方法的冬小麦单产估测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 187—195.
Xie Yi, Wang Pengxin, Liu Junming, et al. Winter wheat yield estimation based on assimilation method combined with 4DVAR and EnKF[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 187—195. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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, 2004, 14(3): 58—62.
Fang Xiuqin, Zhang Wanchang. The application of remotely sensed data to the estimation of the leaf area index[J]. Remote Sensing for Land & Resource, 2004, 14(3): 58—62. (in Chinese with English abstract).
- [9] Jordan C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663—666.
- [10] Asrar G, Fuchs M, Kanemasu E T, et al. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat[J]. Agronomy Journal, 1984, 76(2): 300—306.
- [11] Myneni R B, Ramakrishna R, Nemani R, et al. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1997, 35(6): 1380—1393.
- [12] 朱高龙, 居为民, Chen J M, 等. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2117—2124.
Zhu Gaolong, Ju Weimin, Chen J M, et al. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: Ground measurement and remote sensing retrieval[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2117—2124. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李淑敏, 李红, 孙丹峰, 等. PROSAIL 冠层光谱模型遥感反演区域叶面积指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2725—2729.
Li Shumin, Li Hong, Sun Danfeng, et al. Estimation of regional leaf area index by remote sensing inversion of PROSAIL[J]. Canopy Spectral Model Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29 (10): 2725—2729. (in Chinese with English abstract)
- [14] 刘洋, 刘荣高, 刘斯亮, 等. 基于物理模型训练神经网络的作物叶面积指数遥感反演研究[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(3): 426—435.
Liu Yang, Liu Ronggao, Liu Siliang, et al. Estimation of crop LAI based on the neural network trained from physical model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(3): 426—435. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 165—184.
- [16] 陈丽, 张晓丽, 焦志敏. 基于混合像元分解模型的森林叶面积指数反演[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 124—129.
Chen Li, Zhang Xiaoli, Jiao Zhimin. Reversion of leaf area index in forest based on linear mixture model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王修信, 孙涛, 朱启疆, 等. 林地叶面积指数遥感估算方法适用分析[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4612—4619.
Wang Xiuxin, Sun Tao, Zhu Qijiang, et al. Assessment of different methods for estimating forest leaf area index from remotesensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(16): 4612—4619. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王丹萍, 刘兆礼, 候光雷, 等. 样本量对叶面积指数遥感经验建模精度影响研究[J]. 土壤与作物, 2014, 3(4): 151—156.
Wang Danping, Liu Zhaoli, Hou Guanglei, et al. Effects of sample size on LAI accuracy by remote sensing empirical modeling[J]. Soil and Crop, 2014, 3(4): 151—156. (in Chinese with English abstract)
- [19] 方秀琴, 张万昌, 刘三超. 黑河流域叶面积指数的遥感估算[J]. 国土资源遥感, 2004(1): 27—31.
Fang Xiuqin, Zhang Wanchang, Liu Sanchao, et al. The estimation of LAI in Heihe river basin using remotely sensed data[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2004(1): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [20] 石月婵, 杨贵军, 冯海宽, 等. 北京山区森林叶面积指数季相变化遥感监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 133—139.
Shi Yuechan, Yang Guijun, Feng Haikuan, et al. Remote sensing of seasonal variability monitoring of forest LAI over mountain

- areas in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 133—139. (in Chinese with English abstract)
- [21] 于颖. 基于 InTEC 模型东北森林碳源/汇时空分布研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- Yu Ying. Temporal and Spatial Analysis of Northeast Forest Carbon Sources and Sinks Distribution Based on InTEC Model[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [22] 毛学刚. 东北森林碳循环日步长模型与遥感综合应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- Mao Xuegang. Study on the Model of Northeast Forest Carbon Cycle at Daily Step and The Integrated Application of Remote Sensing[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [23] 何勇, 董文杰, 季劲松. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟[J]. 地球科学进展, 2005, 20(3): 345—349.
- He Yong, Dong Wenjie, Ji jinsong, et al. The net primary production simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 345—349. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姚鑫. 帽儿山国家森林公园建设后问题分析与对策研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- Yao Xin. MaoEr Mountain National Forest Park of Construction Issue Analysis and Countermeasures[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [25] 曲迪, 范文义, 杨金明, 等. 塔河森林生态系统蒸散发的定量估算[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1652—1660.
- Qu Di, Fan Wenyi, Yang Jinming, et al. Quantitative estimation of evapotranspiration from Tahe forest ecosystem, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1652—1660. (in Chinese with English abstract)
- [26] Chen J M, Deng F, Chen M Z. Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2006, 44(8): 2230—2238.

Fast estimation method for time-series forest LAI at small and medium regional scale

Lu Wei, Fan Wenyi*

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to solve the problem of low spatial heterogeneity of MODIS LAI products when used in regions of small and medium scale, in this paper, we presented a new method for the fast estimation of time-series LAI. LAI growth function is closely related with forest type, forest age and forest density. The normalized LAI growth function is associated with forest type and age of stand and is irrelevant with forest density. Due to the differences of LAI from different position caused by different forest density, LAI growth function of a large area can not represent the partial regions inside it, which means the LAI extracted from MODIS LAI product pixel can not represent the LAI of the internal parts. But leaves of the same forest type at the same age have a similar growth trend, namely, the normalized LAI growth function from the same forest type and age is basically the same. So the normalized LAI growth function obtained from a larger MODIS grid region with the same forest type and forest age can basically represent the normalized growth state of leaves from the sub-region within it. If the maximum LAI and normalized LAI function of the subregion are obtained, LAI growth function can be estimated based on the basis of formula. First of all, the MODIS LAI data sets were pre-processed. The MODIS time-series LAI curves were extracted from LAI MODIS raster data sets, and non normal seasonal fluctuations of LAI time-series curves were found. This study used Locally Adjusted Cubic-Spline Capping, namely LACC, to solve the problem of the non normal seasonal fluctuations. Based on the local weighted regression method, the LACC algorithm proposed by Chen et al was developed for the curve fitting and smoothing of abnormal data. In the framework of the method proposed by this paper, firstly, we extracted the MODIS time-series LAI cures of two broad-leaved forest samples and a mixed forest sample, and compared them with their own observed time-series LAI. A large deviation between the MODIS time-series LAI value and observed time-series LAI value was presented, but their normalized LAI values matched well, indicating that the normalized LAI growth curve obtained from the larger regions (MODIS pixels) could simulate the normalized LAI growth of the partial region of the large region (sample plots). Based on those conclusions, the normalized growth curves of MODIS LAI were extracted to simulate the annual variation of LAI in the studied area, and then the normalized LAI curves was fitted by using the three spline interpolation function to simulate the variation of LAI in study area at daily step. Secondly, according to the research results of LAI estimation model by Zhu Gaolong for Maoershan study area in 2011, RSR (reduced simple ratio) had the best correlation with effective LAI, and it was most suitable for the LAI estimation. Based on the traditional remote sensing statistical model proposed by Zhu and TM remote sensing data, LAI was estimated after leaves completely expanded, namely the maximum LAI, which was the peak of the curve and by which the curve was controlled. Twenty LAI values observed in July 31, 2011 were used to verify the LAI maximum layer with R^2 of 0.747. Finally, the normalized LAI fitting function and the maximum LAI were multiplied to obtain the time-series LAI data sets. The results showed that for directly estimated value of higher spatial resolution LAI on small and medium regional scale, the MODIS LAI products were not accurate and suitable, but the normalized MODIS LAI growth curve maintained high consistency with the normalized observed LAI and was used to simulate the annual change of real LAI. Moreover, the proposed method in this paper simply and efficiently provided time-series LAI data for other studies on small and medium regional scale. The fast estimation of time-series LAI proposed by this paper also had the following features: 1) the method can be applied to the region where the forest types are relatively simple and the age structure is not complicated. If the study area does not meet such situation, researchers should optimize this method by distinguishing age groups in each forest type; 2) the estimation accuracy of the LAI maximum layer estimated from TM data, which this method has certain dependence on, should be ensured above a certain precision.

Keywords: remote sensing; time series analysis; forestry; leaf area index