

基于 LAI-2200 的草地 LAI 测量与聚集度系数分析

朱高龙^{1,2}

(1. 闽江学院地理科学系, 福州 350108; 2. 福建省测绘工程技术研究中心, 福州 350108)

摘要: 叶面积指数(LAI)是陆地表层生态系统最重要的植被结构参数之一。近年来,利用 LAI-2200 观测草地叶面积指数的研究逐渐增多,但是其精度验证研究却很少。本文利用 LAI-2200 获取 19 个草地样地的有效植被面积指数(PAI_e),并利用草地孔隙率模型模拟 LAI-2200 测量值,然后与收获法得到的植被面积指数(PAI)进行比较,进而评估 LAI-2200 的测量精度,并分析草地聚集度系数(CI)的变化规律。结果表明 LAI-2200 观测天顶角较小的 4 圈数据计算的 PAI_e比 5 圈数据计算的 PAI_e的精度更高;PAI_e与 PAI 相关性极显著($R^2=0.951$);当 PAI 小于 3 时,PAI_e略小于 PAI;随着 PAI 继续增大,PAI_e低估逐渐严重。这种低估现象主要原因是叶片的聚集效应,当 PAI 小于 3 时,CI 均值为 0.97;当 PAI 为 3~6 时,CI 均值为 0.88;当 PAI 大于 6 时,CI 均值为 0.71,因此 LAI-2200 用于浓密草地测量时需要用 CI 进行订正。

关键词: 草地; 叶面积指数; 聚集度系数; LAI-2200; 精度验证

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0307-08

Validation of Grassland Leaf Area Index and Clumping Index Retrievals from LAI-2200

Zhu Gaolong^{1,2}

(1. Department of Geography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China

2. Engineering Research Center of Surveying and Mapping of Fujian Province, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Leaf area index (LAI) is one of the most important structural parameters of terrestrial ecosystems. In recent years, the use of LAI-2200 to measure leaf area index of grassland has gradually increased, but few studies have evaluated the accuracy of the optical method to estimate LAI in grassland ecosystems. In order to validate the measurement accuracy of LAI-2200 for grassland leaf area index, the effective plant area index (PAI_e) retrievals by LAI-2200 were compared with the simulated LAI-2200 measurements and the plant area index (PAI) retrievals by destructive sampling in 19 grassland sites. As an additional biophysical parameter of comparable importance to LAI, the clumping index (CI) of grassland was also analyzed. The PAI_e retrievals from LAI-2200 4-ring data with smaller zenith angle perform better than from LAI-2200 5-ring data, and correspond very well with the destructive PAI values ($R^2=0.951$). Reasonable agreement of the PAI_e retrievals from LAI-2200 with the destructive sampling and the simulated results verifies the reliability of LAI-2200 used in sparse grassland. PAI_e is slightly less than PAI when PAI is less than 3. As PAI continues to increase, PAI_e has been seriously underestimated due to clumping effect; $CI=0.97$ for $PAI < 3$, $CI=0.88$ for $3 < PAI < 6$, and $CI=0.71$ for $PAI > 6$. Therefore, the LAI retrieved from LAI-2200 with the assumption of the random foliage distribution might yield inaccurate results in clumped grass, which need to be corrected using CI values.

Key words: grassland; leaf area index; clumping index; LAI-2200; accuracy validation

收稿日期: 2015-12-20 修回日期: 2016-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271354)、福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(JA13245)和福建省自然科学基金指导性科技计划项目(2012D105)

作者简介: 朱高龙(1974—),男,教授,主要从事植被遥感研究,E-mail:zhugaolong@163.com

引言

目前比较公认的叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 定义是单位地表面积上绿叶表面积总和的一半^[1], LAI 作为关键的陆表特征参量之一, 已被广泛应用于气候、生态、水文、生物地球化学等模型研究^[2-5]。遥感反演是当前获取大范围 LAI 唯一有效的方法, 几种中等空间分辨率的遥感数据 (AVHRR、VEGETATION、POLDER、MISR、MODIS 等) 已经用于生产短期或长时间序列的区域或全球的 LAI 产品^[6-11]。科学严格的真实性检验是 LAI 产品生成链中极其重要的一个环节, 是改进 LAI 反演模型、提高 LAI 产品精度和数据使用可靠性的重要保证。国际卫星对地观测委员会 (CEOS) 下设的陆表产品真实性检验小组 (LPV) 提出的基于地面测量的遥感数据产品直接验证和多种遥感数据产品间相互比较是 LAI 产品真实性检验的 2 种主要途径^[12], 但后者作为参考的 LAI 产品也需事先进行真实性检验, 因此 LAI 地面观测是任何 LAI 产品真实性检验程序中最基础、最重要的工作。LAI 地面测量大致可以分为直接测量法与间接测量法 2 类。直接测量法主要包括收获测量法、落叶收集法、异速生长回归法、探针法等^[13]。直接测量法相对准确, 但比较费时费力, 只能用于获取小范围 LAI。利用 LAI-2000、TRAC、AccuPAR、DHP (Digital hemispherical photography) 等光学仪器的 LAI 间接测量法大大提高了获取实地 LAI 的效率, 但是基于光学仪器的 LAI 间接测量法的可靠性仍然需要使用直接测量法进行验证。

LAI-2000 (升级版为 LAI-2200) 由于具有使用快捷方便以及测量结果稳定的特点, 已经被广泛地应用于森林、农作物等生态系统的 LAI 观测^[14-16]。LAI-2000 对视野内能够遮光的所有物体均很灵敏, 包括地上各种植被成分, 如绿叶、茎干、分枝、花果以及枯枝、枯叶等。基于冠层空隙率理论的 LAI-2000 测量假定叶片的空间分布是随机的, 但现实世界中的植被叶片在群落、树冠、枝簇等层次上通常存在不同程度的集聚现象, 导致 LAI-2000 测量值往往较真实值偏低^[17-18]。如果将地上所有植被成分的面积指数称为植被面积指数 (Plant area index, PAI), 则 LAI-2000 测量值应该被称为有效植被面积指数 (Effective plant area index, PAI_e)^[19]才更准确。虽然 PAI_e 与植被截光、截水面积直接相关, 是一个具有重要物理意义的植被结构参数, 但是对于植被光合作用而言, 其更大程度上取决于实际绿叶面积 (LAI 真实值)。要将 LAI-2000 测量值转换为 LAI 真实值需要一个校正系数, 即表征叶片集

聚效应的聚集度系数 (Clumping index, CI)^[20]。叶片聚集度系数定义为有效 LAI 与真实 LAI 的比值^[1], 它也是一个重要的植被结构参数, 但是由于其获取相对困难, 大多研究仅考虑聚集度系数随植被类型的变化, 而没有考虑其时空变化, 从而制约了 LAI 观测及反演精度的提高。

草地是一种重要的分布广泛的生态系统, 草地 LAI 的获取通常采用破坏性的收获测量法, 但是这种方法工作量太大, 只适用于小范围的典型样地。近年来, LAI-2000 用于草地 LAI 观测的研究逐渐增多^[21-22], 但是相对于森林、灌木或农作物等生态系统, 草地生物量较小、植株较矮, LAI-2000 是否适合草地 LAI 观测及其精度如何, 需要使用直接测量法进行验证。但是目前 LAI-2000 观测验证工作主要集中在森林与农作物^[15, 19, 23], 而草地 LAI-2000 观测验证工作研究较少, 大部分工作都是直接利用 LAI-2000 测量值通过升尺度后验证各种中等空间分辨率草地 LAI 产品精度^[24], 这不可避免地会带来很大的不确定性。另外, 草地叶片的空间分布通常被认为是相对随机的, 其 CI 常被假定为一个接近于 1 的固定值。实际上草地生态系统也是复杂多样的, 其 CI 存在着很大的时空变异性。但是目前这些方面的验证研究还很少, 无法保证草地 LAI 产品精度评估的可靠性。本文选择不同密度的草地样地, 利用 LAI-2200 观测 PAI_e, 并利用草地孔隙率模型模拟 LAI-2200 观测值, 然后与收获法得到的 PAI 进行比较, 进而评估 LAI-2200 测量精度, 并分析其 CI 的变化规律。

1 材料和方法

1.1 样地选择

本研究在我国南方丘陵盆地地区挑选了 19 个不同密度的草地样地, 每个样地都是选择在草长势均匀、高度均一、优势种明显的平坦区域, 且样地面积足够大, 样地附近没有高大的建筑物、树木等遮挡物 (图 1)。样地优势种主要是我国南方最具代表性的暖季型草坪草——禾本科的狗牙根 (*Cynodon dactylon* (Linn.) Pers.), 以及我国南方丘陵山地普遍生长的芒 (*Miscanthus sinensis*) 和五节芒 (*Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb.) 等禾本科草类。本文主要目的是验证 LAI-2200 观测不同密度草地 LAI 的精度, 因此忽略了不同区域草本种类引起的测量差异。野外采样和观测时间从 2014 年 8 月 23 日持续到 2014 年 9 月 2 日, 该时间段是这类草坪草生长最为旺盛的季节, 黄叶很少可以忽略不计。每个样地先用 LAI-2200 测量草地 PAI_e, 再用

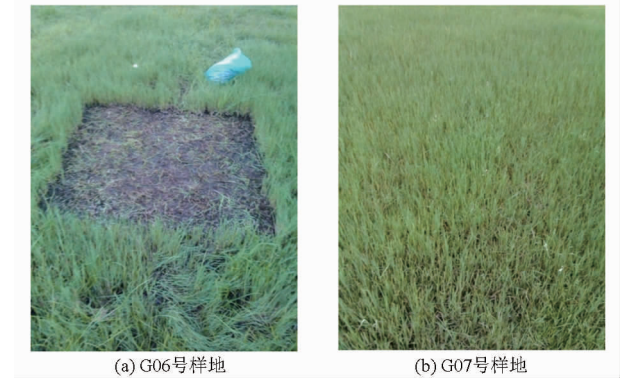


图 1 样地图像
Fig. 1 Images of sampling sites

收获法获取 PAI。

1.2 LAI-2200 测量草地 PAI。

为排除直射光的干扰,选择阴天或日落时分使用 LAI-2200 进行观测,并用 270°视角盖遮盖镜头以避免操作者对光线的影响。测量每个样地时,先在草层上方用 LAI-2200 测量 1 个 A 值,再在样地中心区域的草层下方地表上随机测量 4 个 B 值,最后在草层上方再测量 1 个 A 值,所得 2 个 A 值和 4 个 B 值用于计算该次测量的 PAI_e 。对于植株较矮(草高小于 20 cm)的草地,为减少 LAI-2200 光学感应传感器自身厚度对测量结果的影响,在不破坏周围草地的前提下,在每个 B 值观测处用小铲挖出 1 个长条形小坑,将传感器探头放入小坑中与地面齐平进行 B 值观测。为避免偶然误差,每个样地重复观测 3 次,每次观测的 PAI_e 相对浮动没有超过 0.3,取其均值作为该样地的最终 PAI_e 。

LAI-2200 是利用“鱼眼”光学传感器测量 5 个天顶角区间 ($0^\circ \sim 13^\circ$ 、 $16^\circ \sim 28^\circ$ 、 $32^\circ \sim 43^\circ$ 、 $47^\circ \sim 58^\circ$ 、 $61^\circ \sim 74^\circ$;中心天顶角分别为 7° 、 23° 、 38° 、 53° 、 68°) 同心光圈的天空散射辐射透过冠层后的衰减量来计算 LAI。本研究利用 LAI-2200 的 1~5 圈数据(天顶角从 0° 到 74° ,简称 5 圈)和 1~4 圈数据(天顶角从 0° 到 58° ,简称 4 圈)分别计算每个样地的 PAI_e 。

1.3 收获法测量草地 PAI

LAI-2200 最大观测天顶角为 74° ,传感器的最大视野半径约为草高的 3.5 倍,若草高为 30 cm,其视野半径可达 1 m。为保证实测样方与 LAI-2200 的测定范围具有较大重叠度,在样地中心区域沿地表割下 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 样方的所有植被(图 1),迅速装入保鲜袋,带回实验室进行叶面积测量。由于样方内草本总株数大多在 1 000 株以上,很难测量其全部面积,因此本研究采用常规的抽样测定法进行测量。先从每个样方中随机抽取 100 株草,用电子天平称

出其质量,然后把每株草的叶片与茎分开,分别展平在方格白纸上,并用铅笔绘出其形状,测量该 100 株草的叶片与茎的总投影面积。假定草叶片为厚度为零的平板,其投影面积即为叶片总表面积的一半。假设茎为圆柱体,根据 LAI 定义,茎的总投影面积乘以 $\pi/2$ 将得到一半的茎总表面积。最后根据 100 株草所占 1 m^2 样方的质量比例,求出每个样地的真实绿叶叶面积指数(LAI)和茎面积指数(Stem area index, SAI)。为了估算称量法的误差,本研究清点了 G13 与 G19 样方的总株数,利用随机抽样的 100 株草占样方总株数的比例换算求得 LAI 与 SAI,发现与上述称量法所得值相当接近(两者相差平均小于 5%),这说明抽样测定法用于长势均匀草地样方的叶面积测量具有一定的可靠性。由于黄叶所占比例很少,加上黄叶卷曲难以测量,本研究暂不考虑黄叶的叶面积指数。每个样地收获测量法实测的 PAI 为

$$PAI = LAI + SAI \quad (1)$$

式中 PAI ——收获测量法实测的植被面积指数
 LAI ——收获测量法实测的绿叶叶面积指数
 SAI ——收获测量法实测的茎面积指数

根据定义,草地聚集度系数(CI)为 LAI-2200 测量值 PAI_e 与 PAI 比值,计算式为

$$CI = PAI_e / PAI \quad (2)$$

式中 PAI_e ——LAI-2200 测量的有效植被面积指数
将 PAI_e 转换为真实绿叶叶面积指数(LAI_T)计算式为^[25]

$$LAI_T = PAI_e (1 - \alpha) (1 - \gamma) / CI \quad (3)$$

式中 α ——茎面积指数与植被面积指数的比值
 γ ——黄叶面积指数与植被面积指数的比值
(本研究中假定 γ 为 0)

实际应用中, α 、 γ 与 CI 通常根据不同植被种类赋予相应的固定值。

1.4 模拟 LAI-2200 测量

假定单位面积水平地面内有满足泊松分布的 N 株分布均匀的草,沿天顶角 θ 观测到的每株草在水平面上的投影为 $A(\theta)$,根据 Boolean 原理^[26],该水平面内孔隙率 $P(\theta)$ 为

$$P(\theta) = \exp(-NA(\theta)) \quad (4)$$

假定每株草都由以平均叶倾角 φ 分布的绿叶叶片和以圆柱体直立分布的茎构成,根据叶面积指数定义,单位面积内 N 株草的绿叶单面积总和为 LAI , N 株草总表面积的一半为 SAI ,则式(4)可以转换为

$$P(\theta) = \exp(-G(\theta)LAI/\cos\theta - 2\tan\theta SAI/\pi) \quad (5)$$

式(5)中 LAI 和 SAI 可由收获法实测获得(表 1),投

影函数 $G(\theta)$ 由平均叶倾角 φ 和观测天顶角 θ 确定^[27],即

$$G(\theta)=\begin{cases}\cos\varphi\cos\theta & (\varphi+\theta\leqslant\pi/2) \\ \cos\varphi\cos\theta[1+2(\tan\beta-\beta)/\pi] & (\varphi+\theta>\pi/2)\end{cases}$$

(6)

其中 $\beta=\arccos(\cot\theta\cot\varphi)$
式(6)中 φ 取 LAI-2200 测量的平均叶倾角(表 1), θ 变化范围为 $0^{\circ}\sim90^{\circ}$ 。

LAI-2200 基于 Miller 原理^[28] 计算有效植被面积指数 PAI_e ,即

$$PAI_e=-2\int_0^{\pi/2}\ln P(\theta)\cos\theta\sin\theta d\theta$$

(7)

实际测量中,LAI-2200 是利用 5 个天顶角同心光圈的冠层上、下 2 个测量数值得到各个光圈的平均 $\ln P(\theta)$,然后根据每个光圈的权重计算出 PAI_e 。本文依据 LAI-2200 各个光圈的天顶角范围和相应权重,利用式(5)和式(7)计算每个样地的 LAI-2200 测量模拟值(PAI_s),并计算出模型模拟的聚集度系数(CI_s)

$$CI_s=PAI_s/PAI$$

(8)

式中 CI_s ——模型模拟的聚集度系数
 PAI_s ——LAI-2200 测量模拟值

2 结果与分析

2.1 收获法实测值

表 1 列出了 19 个草地样地 LAI 的 LAI-2200 测量值与收获法实测值。本研究包含了高中低不同密度的草地样地,草叶层高范围在 15~90 cm,平均高 38.7 cm,低密度样地的草本植株相对矮小。收获法实测的 PAI 和 LAI 的值域范围分别为 1.79~10.43 和 1.05~5.93,均值分别为 4.19 和 2.70。不同样地的草茎(SAI)对 PAI 的 α 差别很大, α 最小值为 0.08,最大值达到 0.58,平均值为 0.35;总体而言,LAI 越小, α 越大。这表明根据不同植被种类赋予 α 某一固定值来估算真实叶面积指数的做法有可能会带来较大误差,因为即便是同一种草类, α 与草的密度及植株大小也有很大关系。

2.2 LAI-2200 测量值

从表 1 可知,LAI-2200 测量的平均叶倾角变化范围为 $52^{\circ}\sim90^{\circ}$,所有样地平均值为 68.3° ,垂直叶片占优势。LAI-2200 的 4 圈 PAI_e 测量值的值域范围为 1.71~6.90,均值为 3.53;5 圈 PAI_e 测量值的值域范围为 1.45~5.81,均值为 3.23,5 圈 PAI_e 相对 4 圈 PAI_e 平均偏低 8.5%,这与一些文献利用 LAI-2000 5 圈数据计算的 PAI_e 平均偏低 8%接

表 1 19 个草地样地叶面积指数的收获法实测值、LAI-2200 测量值与模型模拟值比较

样地 编号	采样日期	收获法实测值					LAI-2200 测量值				模型模拟值	
		叶层高/ cm	LAI	SAI	PAI	α	平均叶倾 角/ $(^{\circ})$	5 圈 PAI_e	4 圈 PAI_e	CI	PAI_s	CI_s
G01	2014-08-23	45	3.78	1.34	5.12	0.26	56	4.33	4.85	0.95	4.96	0.97
G02	2014-08-28	45	3.91	0.35	4.26	0.08	64	3.06	3.36	0.79	4.08	0.96
G03	2014-08-28	30	1.47	0.32	1.79	0.18	72	1.45	1.71	0.96	1.68	0.94
G04	2014-08-30	70	3.71	2.43	6.14	0.40	64	4.16	4.71	0.77	5.80	0.94
G05	2014-08-30	70	2.48	1.47	3.95	0.37	60	3.61	3.49	0.88	3.76	0.95
G06	2014-08-30	21	1.79	0.76	2.55	0.30	78	2.28	2.52	0.99	2.36	0.93
G07	2014-08-30	30	1.55	1.34	2.89	0.46	80	2.84	2.88	1.00	2.67	0.92
G08	2014-08-31	20	2.42	1.04	3.46	0.30	66	2.90	2.98	0.86	3.27	0.94
G09	2014-08-31	21	1.79	0.71	2.50	0.28	69	2.49	2.51	1.00	2.35	0.94
G10	2014-08-31	20	3.39	1.14	4.53	0.25	67	3.56	3.94	0.87	4.28	0.94
G11	2014-08-31	20	2.65	1.62	4.27	0.38	75	3.32	3.58	0.84	3.97	0.93
G12	2014-09-01	18	2.18	1.17	3.35	0.35	73	2.79	2.90	0.86	3.12	0.93
G13	2014-09-01	25	2.97	1.18	4.15	0.28	64	3.38	3.67	0.88	3.94	0.95
G14	2014-09-01	15	2.44	1.16	3.60	0.32	61	2.82	3.04	0.84	3.43	0.95
G15	2014-09-01	60	4.82	3.07	7.89	0.39	52	4.54	5.63	0.71	7.65	0.97
G16	2014-09-02	90	5.93	4.50	10.43	0.43	59	5.81	6.90	0.66	9.92	0.95
G17	2014-09-02	25	1.13	1.55	2.68	0.58	81	2.55	2.54	0.95	2.47	0.92
G18	2014-09-02	50	1.05	1.18	2.23	0.53	90	2.02	2.04	0.91	2.05	0.92
G19	2014-09-02	60	1.82	2.00	3.82	0.52	67	3.53	3.80	0.99	3.57	0.93
平均值		38.7	2.70	1.49	4.19	0.35	68.3	3.23	3.53	0.88	3.96	0.94

近^[29]。但是当 PAI_e 小于 4 时,两者差别较小,最大差值为 0.38;当 PAI_e 大于 4 时,5 圈 PAI_e 明显小于 4 圈 PAI_e ,最大差值达到 1 以上,平均偏低达到 14.45%。从图 2a 可以看出,两者存在高度的线性相关($R^2=0.972$),但是随着 PAI_e 增加,两者差值逐渐加大。

图 2b、2c 显示 4 圈 PAI_e 测量值与 PAI 实测值的相关度($R^2=0.951$)大于 5 圈 PAI_e 测量值与 PAI 实测值的相关度($R^2=0.894$),而且 4 圈 PAI_e 测量值的均值更接近 PAI 实测值,这表明对于草地 LAI-2200 观测而言,利用的 4 圈数据计算的 PAI_e 比 5 圈数据计算的 PAI_e 精度更高,这也证明了 CHEN 等^[30]推荐使用 LAI-2200 4 圈数据计算的 PAI_e 具有合理性。这是由于 LAI-2200 感应波段主要为蓝色光(波长小于 490 nm),并假定叶片不透光且无反射与散射,但是随着观测天顶角的增大,蓝色光多次散射越来越严重,因此观测天顶角最大的第 5 圈观测数

据包含较大的多重散射噪声。实际操作中是否需要屏蔽外围光圈(如第 5 圈)读数重新计算 PAI_e ,可以利用各光圈光束接触数(CNTCT#,数值等于空隙率对数除以光学路径长度)随天顶角增加单调递增性进行简单判断,因为正常情况下观测天顶角越大,光束穿透冠层的路径越长,光束被冠层遮挡的概率越大,如 G05 样地的第 5 圈 CNTCT# 明显小于第 4 圈(图 3),则有可能混入散射噪声,需屏蔽第 5 圈读数计算 PAI_e 。另外,当所选样地范围无法保证充分大于 LAI-2200 视野时,也需要屏蔽第 5 圈读数。这是因为 LAI-2200 第 5 圈观测天顶角达到 74° ,第 5 圈视野半径接近草高的 3.5 倍,可能存在非草本的地物(如建筑物、树、起伏地形等)进入第 5 圈观测视野,从而影响 LAI-2200 测量精度。为减少误差,本文统一利用 LAI-2200 观测天顶角较小的 4 圈数据计算的 PAI_e 与收获法实测值进行比较(下文中 PAI_e 都是指 LAI-2200 4 圈数据测量值)。

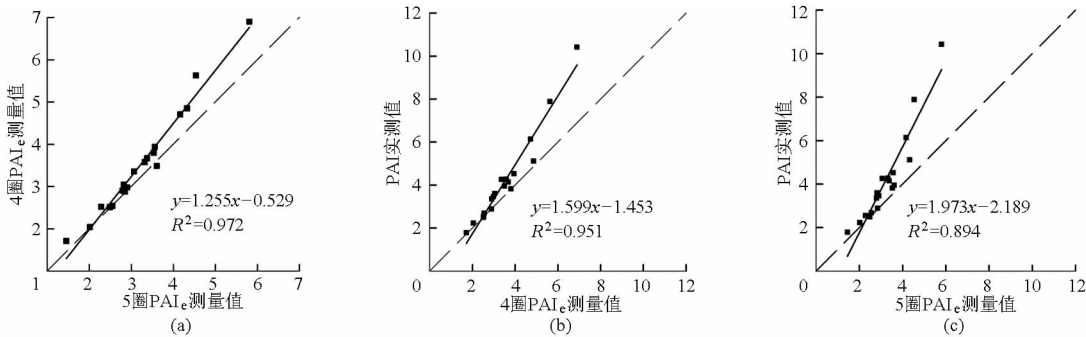


图 2 LAI-2200 4 圈和 5 圈 PAI_e 测量值及收获法 PAI 实测值之间的相互比较

Fig. 2 Comparison of PAI_e retrievals from 4-ring and 5-ring data of LAI-2200 and destructive PAI

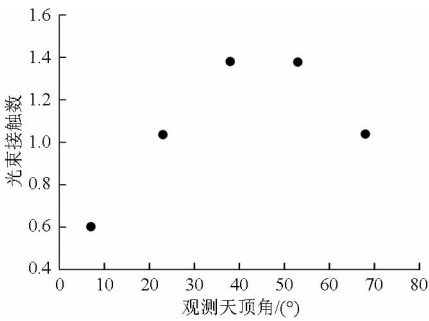


图 3 G05 样地 LAI-2200 观测的 5 个同心圆环
光束接触数 CNTCT# 随观测天顶角的变化

Fig. 3 Contact number (CNTCT#) vs. view zenith angle of five concentric rings measured by LAI-2200 in G05 site

2.3 LAI-2200 测量值验证

从图 4 可知,所有样地的 LAI-2200 PAI_e 测量值普遍小于收获法 PAI 实测值,而且 PAI 越大,两者差值越大。当 PAI 小于 3 时,两者差别相对较小, PAI_e 相对于 PAI 平均偏低 3.2%;当 PAI 为 3~4 时,两者差值最大为 0.56, PAI_e 平均偏低 11.02%;当 PAI 大于 4 时,两者差值显著增大, PAI_e 平均偏低

19.1%;最浓密的 G16 号样地两者差值达到 3.53, PAI_e 偏低 33.8%(表 1)。LAI-2200 测量值与收获法实测值呈现极显著的相关性, R^2 达 0.951(图 2b),这说明 LAI-2200 用于观测草地叶面积指数相当可靠,但是浓密草地的 LAI-2200 测量值低估严重,需要进行订正。19 个样地的 LAI-2200 模拟值 PAI_s 都略小于 PAI(图 4),最大偏低 0.51(G16 号样地),19 个样地的 PAI_s 和 PAI 平均值分别为 3.96 和 4.19, PAI_s 平均偏低 5.5%,这表明在植株水平随机分布的情况下,即使植株密度很大,LAI-2200 也可以较为准确地测量草地叶面积指数。LAI-2200 测量值 PAI_e 与模拟值 PAI_s 也呈现显著相关性, R^2 达到 0.953,当 PAI 小于 3 时, PAI_e 略大于 PAI_s ,平均偏大 4.1%;当 PAI 为 3~6 时, PAI_e 相对 PAI_s 平均偏小 8.2%;当 PAI 大于 6 时, PAI_e 相对 PAI_s 平均偏小 34.3%,浓密草地的 LAI-2200 测量值低估严重的原因在于草地叶片集聚效应更明显,这与叶片空间分布随机的假定偏离较大。

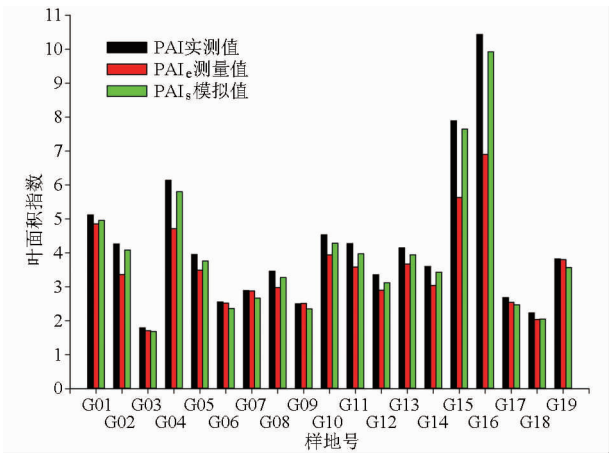


图4 收获法 PAI 实测值、LAI-2200 PAI_e测量值与模型 PAI_s模拟值的比较

Fig. 4 Comparison of destructive sampling retrievals, LAI-2200 measurements and simulated LAI-2200 values

除了 G02 样地的 PAI_e 比收获法实测的绿叶 LAI 小 0.55 外,其他样地的 PAI_e 都大于 LAI,所有样地的 PAI_e 比 LAI 平均偏大 30.7% (表 1),这表明如果不考虑草茎等非绿叶成分的影响,直接将 LAI-2200 观测值当作绿叶 LAI 存在严重的高估现象。图 5 显示 PAI_e 与 LAI 也呈现显著的相关性 ($R^2 = 0.851$),其回归线大体平行于 1:1 线,这说明非绿叶成分对 LAI-2200 观测值的贡献部分补偿了叶片集聚效应造成的 LAI-2200 观测值的低估。从图 5 还可以看出低值区 PAI_e 的离散度明显大于高值区,这是因为低密度草地的草叶与草茎相互遮挡的机率大大减小,LAI-2200 视野内的草茎有效截光比例增加,LAI-2200 测量值反映草茎的贡献比例增加。另外,LAI 低值区样本的茎叶比相对较大,也进一步加大了 LAI-2200 测量值中的 SAI 贡献率,导致低值区 PAI_e 大于其真实绿叶 LAI 的现象更为明显。

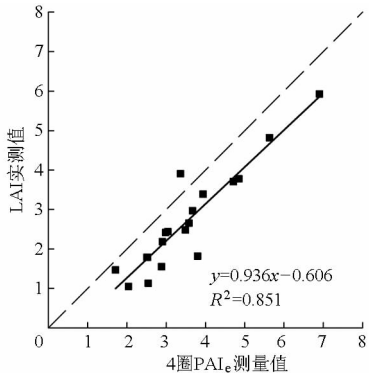


图5 LAI-2200 PAI_e测量值与收获法 LAI 实测值的比较

Fig. 5 Comparison of PAI_e retrievals from LAI-2200 and destructive LAI values

2.4 聚集度系数分析

如表 1 所示,利用 LAI-2200 测量值 PAI_e 计算的各个样地 CI 变化范围为 0.66 ~ 1.00,平均值为

0.88,该均值与很多参考文献所设定的草地 CI 为 0.9 较为接近^[31],但是不同密度的草地的 CI 差别明显:当 PAI 小于 3 时,CI 均值为 0.97;当 PAI 为 3 ~ 6 时,CI 均值为 0.88;当 PAI 大于 6 时,CI 均值为 0.71。这表明稀疏草本叶片空间分布接近随机,草本越密,其叶片空间集聚效应越明显。利用 LAI-2200 模拟值 PAI_s 计算的聚集度系数 CI_s 变化范围为 0.92 ~ 0.97,平均值为 0.94。CI_s 明显大于 CI 的原因是 CI_s 只考虑叶片束缚于不同的草株,而忽略草株内部叶片分布和草株群体分布的非随机性。图 6 展示为后二者所引起的聚集度系数 (CI/CI_s) 与 PAI 呈现明显的线性相关 ($R^2 = 0.715$),草本越密, CI/CI_s 越小,最小值可达 0.7,这表明高密度草地的叶片集聚效应主要来源于草株内部叶片分布和草株群体分布的非随机性。草地的叶片集聚效应一般小于森林、灌木等的植被群落,但是其聚集度系数也会随草地密度增大而变小,而目前大多研究中由于缺乏可靠的草地聚集度系数,通常将其设定为一个接近于 1 的固定值,这对稀疏草地基本适用,但用于高密度草地真实叶面积指数的估算可能带来严重的低估,因此需要进一步订正。

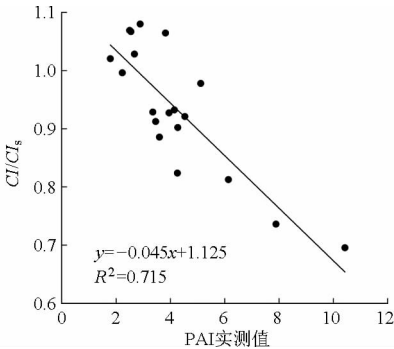


图6 聚集度系数 CI/CI_s 与收获法 PAI 实测值的相关性

Fig. 6 Correlation between the clumping index of CI/CI_s and destructive PAI

3 讨论

LAI-2200 测量值与真实值存在误差,这是普遍的现象。总体而言,由于植被叶片的集聚效应会导致 LAI-2200 测量值偏低,植被密度越大,这种低估现象越严重;但是同时干茎、黄叶等非绿叶成分的截光效应也有可能导导致 LAI-2200 测量值相对偏高,这种现象对于低密度植被尤为明显。因此用 LAI-2200 获取真实绿叶叶面积指数,需要用式 (3) 进行订正,但是实际应用中 α 、 γ 与 CI 通常难以获取,往往根据不同植被种类赋予相应的固定值,这可能会带来很大的误差。本文研究对于草地叶面积指数的 LAI-2200 测量与订正具有一定的参考价值。

但是本文研究仍存在不足之处,如随机抽样测定样方草本叶面积难免带来误差,未考虑草本长势不均一的草地以及黄叶对 LAI-2200 测量精度的影响等。另外,对于特别稀疏低矮的草地(PAI_e 小于 1),即使用挖坑的方法进行 LAI-2200 测量,其每次测量值仍然存在很大的变动,实际上表明特别稀疏低矮草地的 LAI-2200 测量结果受周边环境的影响很大,其结果不可靠,因此本文没有进行其精度的验证。如何利用 LAI-2200 获取更准确的草地 LAI,还需要在不同草种、不同生长期、不同长势、不同地形条件下进行 LAI-2200 测量精度验证。

4 结论

(1)与收获法实测值相比较,利用 LAI-2200 观测天顶角较小的 4 圈数据计算值比 5 圈数据计算

值的精度更高。因此建议草地 LAI-2200 观测时,屏蔽噪声较大的第 5 圈数据,直接用 4 圈数据计算 PAI_e 。

(2)草地 LAI-2200 测量值 PAI_e 与收获法实测值 PAI 相关性极显著 ($R^2 = 0.951$),这说明 LAI-2200 观测结果相当可靠,LAI-2200 可以用于草地叶面积指数观测,当 PAI 小于 3 时,两者差别很小, PAI_e 相对于 PAI 平均偏小 3.23%,但是随着 PAI 继续增大,LAI-2200 测量值低估现象逐渐严重。

(3)草地 LAI-2200 测量值低估的主要原因是叶片的聚集效应。随着草本密度增大,其聚集度系数变小,表明其聚集效应逐渐增强,所以 LAI-2200 用于浓密草地测量时需要用聚集度系数进行订正。

参 考 文 献

- 1 CHEN J M, BLACK T. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(4): 421-429.
- 2 RUNNING S W, PETERSON D L, SPANNER M, et al. Remote-sensing of coniferous forest leaf-area [J]. Ecology, 1986, 67(1): 273-276.
- 3 BALDOCCHI D, WILSON K B, GU L. How the environment canopy structure and canopy physiological functioning influence carbon, water and energy fluxes of a temperate broadleaf deciduous forest-an assessment with the biophysical model CANOAK [J]. Tree Physiology, 2002, 22(15-16): 1065-1077.
- 4 CHEN J M, CHEN X F, JU W M. Effects of vegetation heterogeneity and surface topography on spatial scaling of net primary productivity[J]. Biogeosciences, 2013, 10(7): 4879-4896.
- 5 黄健熙,李昕璐,刘帝佑,等. 顺序同化不同时空分辨率 LAI 的冬小麦估产对比研究 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 240-248.
- HUANG Jianxi, LI Xinlu, LIU Diyou, et al. Comparison of winter wheat yield estimation by sequential assimilation of different spatio-temporal resolution remotely sensed LAI dataset [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 240-248. (in Chinese)
- 6 MYNENI R B, NEMANI R R, RUNNING S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(6): 1380-1393.
- 7 MASSON V, CHAMPEAUX J L, CHAUVIN F, et al. A global database of land surface parameters at 1 km resolution in meteorological and climate models [J]. Journal of Climate, 2003, 16(9): 1261-1282.
- 8 DENG F, CHEN J M, PLUMMER S, et al. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2219-2229.
- 9 BARET F, HAGOLLE O, GEIGER B, et al. LAI, FAPAR and FCOVER CYCLOPES global products derived from VEGETATION: part 1: principles of the algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 110(3): 275-286.
- 10 BARET F, WEISS M, LACAZE R, et al. GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: principles of development and production [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 137: 299-309.
- 11 XIAO Z, LIANG S, WANG J, et al. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time series MODIS surface reflectance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 209-223.
- 12 MORISSETTE J T, BARET F, PRIVETTE J L, et al. Validation of global moderate resolution LAI products: a framework proposed within the CEOS land product validation subgroup [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1804-1817.
- 13 曾也鲁,李静,柳钦火. 全球 LAI 地面验证方法及验证数据综述 [J]. 地球科学进展, 2012, 27(2): 165-174.
- ZENG Yelu, LI Jing, LIU Qinhua. Global LAI ground validation dataset and product validation framework [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(2): 165-174. (in Chinese)
- 14 LIAO Y R, GAI Y Y, YAO Y J, et al. Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect [J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(1): 134-152.
- 15 FANG H, LI W, WEI S, et al. Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE China: intercomparison

- of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 198-199: 126-141.
- 16 PAULO C, STEVEN F, DAVID B, et al. Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177: 110-116.
- 17 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)
- 18 温一博, 范文义, 常颖. 林冠层结构参数自动测量系统设计与试验 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(11): 302-308.
- WEN Yibo, FAN Wenyi, CHANG Ying. Design and experiment of automatic measuring system for forest canopy structure parameter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11): 302-308. (in Chinese)
- 19 GARRIGUES S, SHABANOV N V, SWANSON K, et al. Intercomparison and sensitivity analysis of leaf area index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8-9): 1193-1209.
- 20 NILSON T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1971, 8: 25-38.
- 21 DARVISHZADEH R, ATZBERGER C, SKIDMORE A, et al. Mapping grassland leaf area index with airborne hyperspectral imagery: a comparison study of statistical approaches and inversion of radiative transfer models [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): 894-906.
- 22 SI Y, SCHLERF M, ZURITA-MILLA R, et al. Mapping spatio-temporal variation of grassland quantity and quality using MERIS data and the PROSAIL model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 415-425.
- 23 柳艺博, 居为民, 朱高龙, 等. 内蒙古不同类型草地叶面积指数遥感估算 [J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5159-5170.
- LIU Yibo, JU Weimin, ZHU Gaolong, et al. Retrieval of leaf area index for different grasslands in Inner Mongolia prairie using remote sensing data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5159-5170. (in Chinese)
- 24 刘志理, 金光泽, 周明. 利用直接法和间接法测定针阔混交林叶面积指数的季节动态 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 843-856.
- LIU Zhili, JIN Guangze, ZHOU Ming. Measuring seasonal dynamics of leaf area index in a mixed conifer-broadleaved forest with direct and indirect methods [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(8): 843-856. (in Chinese)
- 25 CHEN J M. Optically-based methods for measuring seasonal variation in leaf area index of boreal conifer forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80(2-4): 135-163.
- 26 NILSON T. Inversion of gap frequency data in forest stand [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98-99: 437-448.
- 27 MONSI M, SAEKI T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion [J]. *Journal of Japanese Botany*, 1953, 14: 22-52.
- 28 MILLER J B. A Formula for average foliage density [J]. *Australian Journal of Botany*, 1967, 15: 141-144.
- 29 LEBLANC S G, CHEN J M. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 110(2): 125-139.
- 30 CHEN J M, GOVIND A, SONNENTAG O, et al. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140(1-4): 257-268.
- 31 LIU R, CHEN J M, LIU J, et al. Application of a new leaf area index algorithm to China's landmass using MODIS data for carbon cycle research [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 649-658.