

刘振波,葛海啸,葛云健,等.冠层集聚指数对水稻 LAI 测量精度的影响[J].江苏农业科学,2018,46(24):352-354.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.24.090

冠层集聚指数对水稻 LAI 测量精度的影响

刘振波,葛海啸,葛云健,陈 健,曹雨濛

(南京信息工程大学地理与遥感学院,江苏南京 210044)

摘要:以江苏东台水稻试验区为研究样区,利用植被冠层分析仪器 TRAC 测量水稻不同生长期冠层集聚指数 (clumping index,简称 CI),结合叶面积指数 (leaf area index,简称 LAI) 测量仪器 LAI-2200 和 LI-3000C 同步测量研究样区水稻有效叶面积指数与真实叶面积指数,分析水稻不同生长期集聚指数的变化及对 LAI 的测量精度的影响。结果表明,研究区水稻冠层集聚指数测量值呈现先降低后升高的趋势。在幼苗期水稻冠层叶片整体上随机分布,集聚指数值为 0.97,到孕穗期水稻冠层集聚特征逐渐明显,集聚指数逐渐降低到 0.84,之后集聚指数值又逐渐升高,在成熟期达到 0.92;通过分析经集聚指数校正后的水稻 LAI 值与 LI-3000C 测量值发现,经校正后的 LAI 值精度总体得到了有效提高,尤其在水稻生长中期 (分蘖期至扬花期) 的校正精度最高,平均相对误差由 23% 提高到 11%。

关键词:集聚指数;水稻冠层;叶面积指数;测量

中图分类号: TP79;S511.01;S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)24-0352-03

叶面积指数 (leaf area index,简称 LAI) 是定量描述植被冠层结构常用参数之一,定义为单位地表面上绿色叶片总面积的一半^[1]。叶面积指数可以定量描述植被光合作用、呼吸作用以及蒸腾作用,它决定了陆地生态系统植被生产力,影响着地表和大气的相互作用,是解释通量站点碳、水、能量通量的一个基本且必不可少的参数,同时也是气候、生态过程模型中重要的输入参数之一^[2-4]。

作为作物生长状态与估产的重要参数,LAI 的精确测量在农业遥感研究中一直占有重要的地位^[5-7]。LAI 的地面测量方法主要分为 2 类,一是直接测量,该方法为破坏性采摘测量,即人工采集叶子样品,然后手工测量叶片面积,如传统的方格法和称质量法;二是通过非接触式的仪器间接测量,主要利用 LAI-2200、AccuPAR LP-80 等植被冠层分析仪器进行测量^[8]。传统的破坏性测量方法对植物具有一定破坏性,且耗时耗力,难以大范围进行,在野外 LAI 的实测工作中主要以光学仪器间接测量为主。光学仪器测量 LAI 虽然方便快捷,但光学测量仪一般假设叶片在空间的分布是随机的,不考虑叶片的集聚效应,测得的为植被冠层的有效叶面积指数,其值一般要低于真实叶面积指数^[9]。Chen 等把植被有效叶面积指数与真实叶面积指数的比值定义为植被冠层集聚指数 (clumping index,简称 CI),并发明了 TRAC 植被冠层分析仪器用来测量植被冠层集聚指数^[10]。集聚指数反映了植被冠层叶片的聚集状态,冠层叶片集聚效应越强,则集聚指数值越低,反之,叶片较为分散分布,集聚效应越弱,则冠层集聚指数值越高。作为全球碳循环模型的重要输入参数,已有遥感 LAI 数据产品多为有效叶面积指数,这在一定程度上造成了

碳循环模型模拟的不确定性,因此植被冠层集聚指数测量及遥感反演在近年来得到了越来越多的重视^[11]。已有研究不仅对不同植被类型集聚指数进行遥感反演,更逐步深入到同一植被类型集聚指数的年际年内变化分析,以满足植被碳循环模型精度的精确要求^[12-13]。目前,植被冠层集聚指数研究主要集中在森林植被类型^[14];在涉及农田植被类型研究中,一般采用经验值将农田植被集聚指数与草地植被集聚指数等同,且多不考虑季节变化影响^[15-16]。虽然农作物冠层集聚性相对于森林冠层集聚特征较不明显,但不同作物类型及相同作物在不同生长期内,作物冠层集聚状态也会出现差异。因此,精确测量作物在不同生长期内集聚指数的变化及评估对 LAI 测量造成的影响具有重要的理论与应用意义。本研究选取江苏东台水稻实验区为测量样区,利用集聚指数测量仪器 TRAC 冠层分析仪定位测量研究样区内水稻不同生长期冠层集聚指数,并分别利用 LAI 测量仪器 LAI-2200 和 LI-3000C 同步测量研究样区水稻有效叶面积指数和真实叶面积指数,在此基础上,分析整个生长期内水稻冠层集聚指数的变化趋势及对 LAI 仪器测量精度的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验区位于江苏省东台市 (地处 32.76°N、120.47°E),地处江苏省沿海中部,属于亚热带与暖温带过渡区,季风气候显著。地势较为平坦,耕作制度上为稻麦两熟,其中水稻一般于 5 月上旬插秧,11 月上旬收获。本试验区设定在相对分布较大片的水稻农田之中,具体设定面积约 50 m×50 m 的均质水稻田进行试验数据的测量。

1.2 野外测量数据

1.2.1 LI-3000C 真实叶面积测量 水稻真实叶面积采用 LI-3000C 叶面积测量仪在实验室进行测量。LI-3000C 便携式叶面积测量仪基于电子方法模拟传统的手工测量,扫描头使用 128 个低频红光 LED 灯排成 1 排对待测叶片进行逐

收稿日期:2017-07-24

基金项目:国家自然科学基金 (编号:41501157);江苏省自然科学基金 (编号:BK20130992);江苏省大学生实践创新训练计划 (编号:2016103000309)。

作者简介:刘振波 (1978—),男,山东寿光人,博士,副教授,主要从事资源环境遥感研究。E-mail:ZBLiu@nuist.edu.cn。

行点亮扫描,每个 LED 灯位于每 1 mm 的正中央,共计 128 mm,用来检测叶片宽度。在测量过程中,LED 灯将逐一点亮来计算这一排的方格数目,在一排的所有方格被扫描结束后,继续进行下一排的扫描,测量时通过拉动编码轮拉绳(length encoding cord)并拖动待测叶片垂直于扫描头逐行完成对整个叶片的扫描,最后累积每个被样品遮挡 50% 以上的 LED 得到叶片的总面积。野外取样时,在研究区随机选取 2 个 1 m² 的样方,数出每个样方内水稻的总株数,在样方内随机选取 3 株水稻,取出植株后放置于保温箱带回实验室进行叶面积的实测,根据实测叶面积和样方内总株数得到 2 个样方的各自的叶面积,最后取均值计算得到研究样区的平均水稻叶面积指数。

1.2.2 LAI-2200 叶面积指数测量 本研究采用 LAI-2200 (LI-COR, USA) 仪器进行水稻样区的有效 LAI 测量。LAI-2200 是最常用的野外植被 LAI 测量仪器之一,它利用“鱼眼”光学传感器(垂直视野最大天顶角 68°,水平视野范围 360°)测定 5 个不同天顶角方向的植被冠层散射天空辐射衰减,基于冠层辐射传输模型计算冠层孔隙率与 LAI。本研究测量时段均选在 09:00 左右。野外测量时操作员背对太阳方向,并利用 180° 的遮盖帽遮盖镜头以遮挡太阳直射光及操作员。测量次序首先在水稻冠层的上方测量 1 个 A 值,然后在冠层下方水面或地表之上测量 4 个 B 值。每次于测量小区内随机选 5 个点位测量,最后取平均值作为该测量小区的 LAI 值。

1.2.3 水稻冠层集聚指数测量 水稻冠层集聚指数采用植被冠层分析仪 TRAC 田间实测获得,TRAC 是由陈镜明教授发明并不断改进的一种植被冠层分析仪,不仅可以测量冠层空隙率,还可以测量冠层空隙大小分布^[17]。冠层空隙分布或集聚指数(CI)可以量化叶片非随机空间分布的影响,当叶片发生集聚时,相同的 LAI 对应的空隙率会增大,观察到大空隙的概率也在变大,当叶片是随机分布时,集聚指数 $CI = 1$,当叶片产生集聚时,集聚指数 $CI < 1$ 。在野外实地测量时,首先需要确定测量的断面,断面的方向与太阳光线方向垂直,断面的长度是水稻和株间距平均值的 10 倍或以上,本研究中取 2 条 10 m 长度测量断面进行测量。测量时手持 TRAC 以 0.3 m/s 的速度行走,利用太阳能探头,以 32 Hz 的高频率记录光合通量密度,测量数据通过 TRACOMX 导入到电脑中,通过分析软件 TRACWin 得到每条断面的集聚指数,最后取 2 条断面 CI 均值获得测量样区的集聚指数值。

2 结果与分析

2.1 水稻叶面积指数测量值

研究区水稻不同生长期内叶面积指数与集聚指数测量值统计结果见图 1、表 1。在研究区整个水稻生长期,LI-3000C 室内测量的 LAI 真实值总体上要高于 LAI-2200 田间实测的有效 LAI 值,整个测量期间的 LAI 测量均值 LI-3000C 测量结果比 LAI-2200 测量值高 0.39,此外 LI-3000C LAI 测量值的最高值、最低值也均高于 LAI-2200 的测量结果。从 LAI 值的变化趋势看,总体上 LAI-2200 田间实测与 LI-3000C 室内测量的 LAI 值均呈现出先升高再降低的趋势,在水稻生长前期幼苗期到孕穗期(190~230 d)2 种测量方法获取的 LAI 值均明显升高,从孕穗期到抽穗期

(230~254 d)间总体上 LAI 值变化不大,均为水稻生长期内 LAI 值最高的阶段;抽穗期之后,2 种测量方法 LAI 值变化趋势差异明显,LI-3000C 测量值急剧降低,LA 真实值从抽穗期(254 d)的 8.05 降低到蜡熟期(298 d)的 2.77,而 LAI-2200 测量的有效 LAI 值则只到水稻生长的乳熟期才呈现出缓慢降低的趋势,且降低的幅度也远远低于 LI-3000C 测量结果。

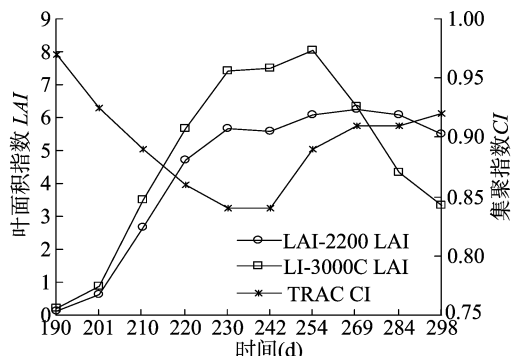


图1 水稻叶面积指数与集聚指数测量结果

表1 水稻生长期参数测量值统计

统计值	平均值	最大值	最小值	标准差
LAI-2200 LAI	4.33	6.24	0.14	2.32
LI-3000C LAI	4.72	8.05	0.21	2.75
TRAC CI	0.90	0.97	0.84	0.04

2.2 水稻集聚指数测量值

在整个水稻生长期,TRAC 测量的水稻集聚指数均值为 0.90,在不同生长阶段集聚指数表现出明显的差异(图 1、表 1),总体上呈现先降低再升高的趋势。从水稻幼苗期到孕穗期(190~230 d),伴随着水稻植株从幼苗不断分蘖、拔节,叶片的集聚性逐渐增强,TRAC 集聚指数 CI 测量值从 0.97 降低到 0.84;到水稻生长的中后期,伴随的水稻稻穗的抽穗与灌浆成熟,水稻枯黄叶片逐渐增多,加之稻穗灌浆质量加大导致的叶片整体向下低垂,平均叶倾角加大,冠层整体逐渐呈现随机分散的趋势,集聚指数从孕穗期的 0.84 逐渐上升到蜡熟期的 0.92。

2.3 水稻 LAI 校正值

根据 TRAC 测量的冠层集聚指数 CI 值与同期 LAI-2200 测量获得的有效 LAI(LAI_{eff})值计算得到不同生长期水稻 LAI 的校正值(LAI₀ = LAI_{eff}/CI),结果见表 2。经过集聚指数校正后的 LAI 测量相对误差均值由未校正前的 28% 提高到 25%,且在水稻生长的前期(扬花期之前)LAI 校正值较未校正精度值的提高尤为明显;在水稻扬花期到蜡熟期,校正后的 LAI 精度要低于校正之前值,且越临近收获期,测量相对误差越大。

进一步以测量时段的水稻分蘖期(201 d)和扬花期(269 d)为界,将水稻生长期分为 3 个阶段:幼苗期(210 d 之前)、分蘖至扬花期(210~269 d)和成熟期(269 d 之后),分别统计这 3 个不同生长期 LAI 测量误差(图 2)。不同生长期叶面积指数仪器测量结果表现差异较大,在扬花期之前,LAI-2200 测量的有效 LAI 值均不同程度地低于 LI-3000C 实测的真实 LAI 值(表 2),由图 2 可见,在幼苗期测量平均相对误差较大,且经过集聚指数的校正后,误差虽有一定的提高但仍相对较高(平均相对误差由校正前 30% 提升到校正后的 26%);在水稻分蘖期至扬花期,随着水稻植株郁闭度的不断提高,LAI-2200 测量值的误差逐渐降低,尤其是经集聚指数

校正后精度更是得到了大幅提高,在此期间内,LAI 值的平均相对测量误差由 23% 下降到了 11%;到水稻成熟期,伴随着水稻叶片逐渐枯黄和稻穗的逐渐成熟,LAI-2200 测量的有效 LAI 值由于黄叶与稻穗的增多呈现出愈来愈大的高估趋势,这一时期 LAI 测量平均相对误差高达 52%,而考虑冠层集聚校正后平均相对误差则进一步达到 66%。

表 2 水稻不同生长期 LAI 测量值与校正值

时间 (d)	LI-3000C 测量值	LAI-2200 测量值		LAI 校正值	
		LAI _{eff}	相对误差(%)	LAI _Ω	相对误差(%)
190	0.21	0.14	33	0.14	33
201	0.87	0.63	28	0.68	22
210	3.50	2.68	23	3.01	14
220	5.68	4.73	17	5.49	3
230	7.41	5.68	23	6.76	9
242	7.49	5.59	25	6.65	11
254	8.05	6.07	25	6.81	15
269	6.33	6.24	1	6.86	-8
284	4.35	6.09	-40	6.69	-54
298	3.33	5.49	-65	5.96	-79
均值	4.72	4.33	28	4.91	25

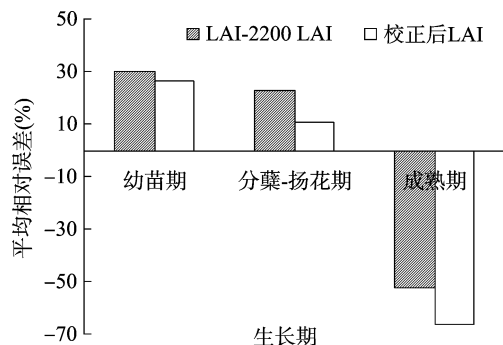


图2 不同生长期水稻 LAI 测量平均相对误差

3 结论与讨论

本研究以我国南方水稻为研究对象,基于对整个生长期水稻 TRAC 测量的集聚指数的变化,并结合有效叶面积指数经典测量仪器 LAI-2200 与真实叶面积测量仪器 LI-3000C 的测量结果,观测获得水稻生长期冠层集聚指数的变化趋势,进一步评估了不同生长期集聚指数对 LAI 测量精度的影响,得到结论如下:(1)水稻冠层集聚指数在不同生长期差异明显,总体上呈现先降低再升高的趋势,在生长中前期水稻冠层集聚性逐渐增强,到水稻生长的中后期,随着稻穗抽穗与灌浆成熟,冠层结构趋向分散的状态,冠层集聚指数又逐渐升高。(2)LAI-2200 测量结果经集聚指数校正后相对误差较未校正前得到了有效提高,但在不同生长期对测量精度的影响有明显差异,在水稻生长的中期(分蘖期至扬花期)校正精度的提高最为明显,平均相对误差由 23% 提高到了 11%,而在水稻生长的后期(扬花期以后),随着植株黄叶及稻穗的增加,LAI-2200 测量结果会出现较严重的高估现象,集聚指数校正后更是加剧了这种高估现象。

植被冠层叶面积指数由于其定义、测量目标、采样方法、数据分析和仪器误差等多种因素影响,往往呈现不同的测量结果。本研究结果表明,集聚指数对水稻 LAI 测量精度同样

有不可忽略的影响,且在整个生长期内水稻冠层集聚指数呈现有规律的波动变化。在今后农作物地面 LAI 观测及遥感反演工作中,应充分考虑不同作物及在不同生长期内集聚指数的变化,以切实提高农作物地面 LAI 观测及遥感反演的精度。

参考文献:

- [1] Chen J M, Black T A. Defining leaf area index for non-flat leaves [J]. Plant Cell & Environment, 1992, 15(4): 421-429.
- [2] 周宇宇,唐世浩,朱启疆,等. 长白山自然保护区叶面积指数测量及结果[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 38-42.
- [3] 刘振波,刘杰. 森林冠层叶面积指数遥感反演——以小兴安岭五营林区为例[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1930-1936.
- [4] Chen J M, Govind A, Sonnentag O, et al. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2006, 140(1): 257-268.
- [5] Stroppiana D, Boschetti M, Confalonieri R, et al. Evaluation of LAI-2000 for leaf area index monitoring in paddy rice [J]. Field Crops Research, 2006, 99(2/3): 167-170.
- [6] 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 & Forest Meteorology, 2014, 198/199: 126-141.
- [7] 康婷婷,居为民,李秉柏. 水稻叶面积指数遥感反演方法对比分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 366-371.
- [8] 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 & Forest Meteorology, 2008, 148(8/9): 1193-1209.
- [9] 杜春雨,范文义. 有效叶面积指数与真实叶面积指数的模型转换[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(7): 126-128.
- [10] Chen J M, Cihlar J. Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurement of leaf-index [J]. Applied Optics, 1995, 34(27): 6211-6222.
- [11] 麻庆苗,李静,刘强,等. 混合像元聚集指数研究及尺度分析[J]. 遥感学报, 2012, 16(5): 901-908.
- [12] Chen J M, Menges C H, Lebanc S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(4): 447-457.
- [13] Liming H, Jane L, Jing M C, et al. Inter- and intra-annual variations of clumping index derived from the MODIS BRDF product [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 44: 53-60.
- [14] 王宝琦,刘志理,戚玉娇,等. 利用不同方法测定红松人工林叶面积指数的季节动态[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1956-1964.
- [15] Fang H L, Jiang C Y, Li W J, et al. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: analysis of climatologies and theoretical uncertainties [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2013, 118(2): 529-548.
- [16] Govind A, Guyon D, Roujean J L, et al. Effects of canopy architectural parameterizations on the modeling of radiative transfer mechanism [J]. Ecological Modelling, 2013, 251(8): 114-126.
- [17] Lebanc S G. Correction to the plant canopy gap-size analysis theory used by the tracing radiation and architecture of canopies instrument [J]. Applied Optics, 2002, 41(36): 7667-7670.