

利用鱼眼摄像机测量植被叶面积指数动态变化

牛小桃^{1,2} 樊军^{1,3*} 王胜^{1,2} 王秋铭³

(¹中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学,北京 100049; ³西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要 叶面积指数(LAI)的快速准确测量可以为相关生态过程研究提供关键参数.本研究采用光学鱼眼相机拍摄了黄土高原北部典型植被柠条、沙柳、紫花苜蓿、荒草、大豆和玉米不同生长时期冠层照片.在玉米、大豆和柠条样地固定安装鱼眼摄像机定时拍摄冠层照片,并运用图像处理软件分析获取LAI.结果表明:鱼眼相机法(DHP)获取的多种植被类型的LAI与LAI-2200测量结果存在显著线性相关关系($R^2=0.85$, $P<0.05$),均方根误差为0.256.太阳辐射值直接影响专业软件处理照片时的关键参数,镜头朝下情况下,计算LAI的关键参数——绿色指数随着拍摄照片时太阳辐射强度的增加而增加.但是镜头朝上情况下,亮度参数随着太阳辐射值的增加而减少.通过关键参数的调整,玉米、大豆和柠条样地LAI变化与LAI-2200测量结果一致,很好地反映了这些植物生长期的LAI动态变化.柠条样地镜头朝下测量结果更好.鱼眼摄像机可以用于定位监测LAI动态变化.

关键词 光学鱼镜头; 叶面积指数; 土地利用类型; 太阳辐射值

Measuring the dynamics of leaf area index of vegetation using fisheye camera. NIU Xiaotao^{1,2}, FAN Jun^{1,3*}, WANG Sheng^{1,2}, WANG Qiu-ming³ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: The rapid and accurate measurement of LAI is of great importance for the research of ecological processes. Photos from typical land use types in the northern Loess Plateau, including *Caragana*, *Salix*, alfalfa, wild grass, soybean and maize, were measured by digital hemispherical photography (DHP). Meanwhile, photos were daily taken by video camera with fisheye lens and the pictures were analyzed by image processing software to obtain the dynamics of LAI in soybean, maize and *Caragana* fields. The results showed that a linear correlation existed between the LAI measured by DHP and LAI-2200. The coefficient of determination (R^2) was 0.85 ($P<0.05$) and root mean square error (RMSE) was 0.256. The key parameters of professional software were affected by the local solar radiation. When the downward lens was used, the green index was the key parameter which increased with the increase of solar radiation. However, the brightness index decreased with the increase of solar radiation when the lens was upward. Through the adjustment of the key parameters, the results of LAI of maize, soybean, and *Caragana* were consistent with the LAI-2200 results, well reflecting LAI dynamics during the plant growth. The downward lens in *Caragana* field was better. The fisheye camera could be used for monitoring the dynamic LAI of different vegetations.

Key words: optical fisheye lens; leaf area index; land use type; solar radiation.

本文由中国科学院西部青年学者A类项目(XAB2015A03)和国家自然科学基金项目(41571224)资助 This work was supported by the Western Young Scholars Project (Class A) of Chinese Academy of Sciences (XAB2015A03) and the National Natural Science Foundation of China (41571224). 2018-01-29 Received, 2018-07-12 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanjun@ms.iswc.ac.cn

叶面积指数(leaf area index, LAI)指单位土地面积上所有叶片表面积的一半,是一个无量纲度量的参数^[1]. LAI不仅可以反映植被的生长状况,也是反映植被冠层结构变化的重要参数^[2]. 研究其测量技术已成为当前生态、土壤和环境领域的热点,探求经济、快捷、准确的测量方法对于植被积累碳的能力、植被生产力与土壤大气之间的相互作用研究等具有十分重要的意义^[3]. 近年来,国内外对 LAI 季节变化的研究主要基于直接法和光学仪器法,利用间断的 LAI 数据进行季节动态分析^[4-7]. 直接法测量包括破坏性取样法、凋落物法和点斜样方法等,它们相对精确,但工作量大、耗时耗力、对植被有破坏性、不能获得同一植被连续的 LAI 数据^[8]. 间接法利用光学原理获得 LAI,常用的仪器包括 LAI-2200、AccuPAR、SunScan 和 TRAC 等^[9-11],它们具有操作简便、对植被无破坏等优点. 最近发展起来的鱼眼相机法(digital hemispherical photography, DHP)兼具 TRAC 仪和 LAI-2200 冠层分析仪的特质,被广泛使用^[12-15]. 但使用 DHP 会受到天气、地形等外界因素影响和实验成本的限制,不能实测到长期 LAI 连续变化数据^[14]. 通过遥感数据获取 LAI 受到空间分辨率与时间分辨率的局限^[14],而基于生长方程拟合离散 LAI 测量数据得到样地 LAI 生长季连续变化的方法又受到数据较少、拟合程度不够精确的局限^[16-18].

目前, LAI 实测工作大多采用间接测量,但仪器的精确性需要在不同植被类型上验证. DHP 拍摄的照片质量受光照强度影响较大,符合拍摄条件的时间较为短暂,而且也随着季节变化而变化. 野外连续定位观测不易控制^[19];同时, DHP 因朝上拍摄时包含木质组分对冠层间隙率的截获贡献,因此,对于木质部分较多的植被,其测量结果钝化了 LAI 的动态变化^[4]. 这些因素共同影响着 LAI 测量的精度. 本研究采用光学鱼眼相机(DHP)测量黄土高原北部典型植被柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、荒草[主要植物种有茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、角蒿(*Incarvillea sinensis*)和紫云英(*Astragalus sinicus*)等]、大豆(*Glycine max*)和玉米(*Zea mays*)不同生长时期的 LAI,与 LAI-2200 同期测量 LAI 比较,验证仪器的准确性;并在玉米、大豆和柠条样地固定安装鱼眼摄像机长期连续定时拍摄冠层照片,运用图像处理软件分析获取 LAI,通过太阳辐射值对软件参数进行定量校正,进而获取

到植被整个生长过程的 LAI 变化曲线,确定适用于干旱地区典型植被的 LAI 季节动态监测方法,为生态过程的模拟提供参数.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验区位于陕西省榆林市神木市六道沟小流域(38°46′—38°51′ N、110°21′—110°23′ E),处于黄土高原水蚀风蚀交错带,是典型的生态脆弱区^[20],属中温带半干旱气候,多年平均降水量 437 mm. 该区 11 月至次年 4 月气温多在 10 °C 以下,不适宜植物萌发生长^[21].

1.2 观测项目和方法

1.2.1 不同植被样地的 LAI 测量 2016—2017 年 6—10 月测量了 18 块样地,其中,柠条地 1 块、苜蓿地 4 块、荒草地 4 块、大豆地 4 块、玉米地 2 块、沙柳地 3 块. 每块样地用普通单反相机加载光学鱼眼镜头(简称光学鱼眼相机,尼康 D90+ 尼克尔 AF DX 10.5 mm f/2.8G ED)拍摄 8 幅照片,样点位置一般选择在样地中心或对角线 1/4 处. 保持相机水平,根据植被高度决定朝上拍摄或朝下拍摄. 对于柠条、玉米和沙柳等较高的植物,相机需要朝上垂直拍摄(距离地面约 30 cm),对于紫花苜蓿、荒草地、大豆等较低的植物,相机需要朝下垂直拍摄(距离地面约 120 cm),视野范围尽量不收入样地以外的部分. 为避免操作者的身体部分拍入照片,应将变焦镜头拉至最远拍摄全天空(或地面)照片. 若天空有较强的直射光,会使照片产生较多的空隙,从而导致测定结果偏低;对于镜头朝上拍摄的图片,由于天空蓝色与植物绿色颜色反差较小,在软件处理过程中易与冠层投影面积混淆,产生较大误差^[18]. 为了保证测量精度,选择阴天、晴天日出前或日落后拍摄冠层照片.

在鱼眼相机拍摄的另一位置用 LAI-2200 冠层分析仪测量 LAI,为避免操作者身体部分对光线的影响, LAI-2200 用 270° 视角盖遮盖镜头. 用 LAI-2200 测量时,先在植被上方测量 1 个 A 值,再在样地中心、对角线 1/4 区域的植被下方地表上随机测量 4 个 B 值,为避免偶然误差,每个样地重复观测 3 次,每次观测的 LAI 相对浮动没有超过 0.3,取其均值作为该样地的最终 LAI. 部分人工种植植被排列是由稀疏到浓密的成行的植被冠层,通常采用位于两垄之间的斜线,使各 B 值取样点均匀分布. 例如,每条样线取 4 个 B 值,第一个 B 值取在垄上,第二

个 B 值取在两垄之间 1/4 处, 第三个 B 值取在两垄中间, 第四个 B 值取在离垄 3/4 处(图 1)。

1.2.2 连续定位监测植被 LAI 动态变化 2016 年分别在玉米和大豆样地安装鱼眼摄像机(海康威视 DS-2CD6362F-IV) 样点位置布设在样地中心长势较均匀的地方, 考虑到冠层的高度, 玉米样地的镜头朝上, 大豆样地的镜头朝下。朝下安装时需要使用支撑杆, 由于鱼眼摄像头视野较大, 所以需要根据拍摄样地的大小适当调整支撑杆的高度, 视野范围尽量不收入样地以外的部分。在电子电路定时器控制下, 每天 07:00—10:00 期间整点时刻连续拍摄 4 幅照片, 16:00—19:00 期间整点时刻连续拍摄 4 幅照片 6—10 月每天拍摄。同时, 在鱼镜头拍摄的位置周边每周用 LAI-2200 冠层分析仪测量 LAI。2017 年在柠条地冠层上下分别安装鱼眼摄像机, 从朝下和朝上两个方向拍摄柠条地同一范围内冠层的变化, 具体拍摄方法同 2016 年。

1.2.3 照片处理 利用鱼眼摄像机监测 LAI 时, 对于朝下拍摄的照片, 利用分析软件 CAN-EYE V6.1 (<http://www6.paca.inra.fr/caneye>) 对图像处理, 处理时选择朝下模式, CAN-EYE 需要一个结构包, 主要涉及相机镜头分辨率、测点经纬度等参数。处理大豆地和柠条朝下的照片时, 依据照片质量, 选取每天的 3 张清晰照片进行处理, 获得的冠层照片平均 LAI 包含两种: LAI4R(4 环) 代表天顶角在 0°~60° 之间综合提取的有效 LAI, LAI5R(5 环) 代表天顶角在 0°~75° 之间综合提取的有效 LAI。一般认为, LAI4R 值较为可靠^[12], 本研究采用 LAI4R 结果作为

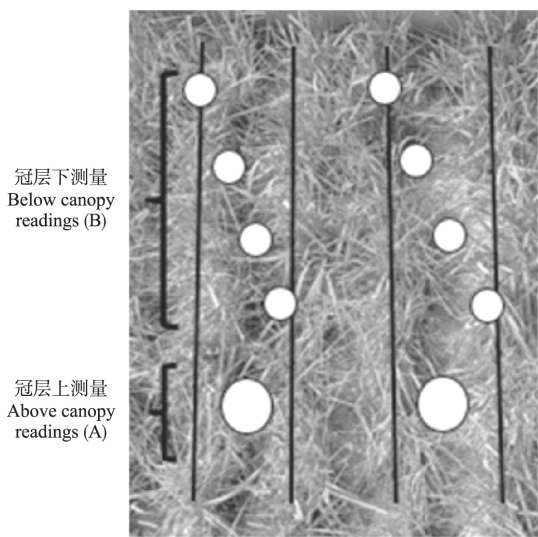


图 1 LAI-2200 测量冠层示意图
Fig.1 Sketch of canopy measurement by LAI-2200.

获取的 LAI 值。对于朝上拍摄的照片, 选择计算过程较为简单、只能处理朝上拍摄照片的冠层图像分析软件 CI-110 (<https://cid-inc.com/support/CI-110/software>) 对被捕获的图像进行数字化处理, 通过计算出太阳光直射透过系数或计算从植物冠层底下向上可观测得到的天空比例, 进而计算出 LAI。处理玉米地和柠条地朝上拍摄的照片时, 依据照片质量, 从所拍照片中选取每天的 3 张清晰照片进行处理, 取平均值。由于拍摄照片时的光照条件存在显著差异, 需要依据太阳辐射值对软件参数进行调整。

鱼眼相机选择拍摄时段基本为阴天、晴天日出前或日落、处于天空光线均匀、无直射光的情况, 可忽略光照的影响, 使用软件的默认参数进行处理, 处理方法同上。从每次拍摄的 8 幅照片中选取 3~5 张清晰照片进行处理, 获取植被样地的平均 LAI。

2 结果与分析

2.1 光学鱼眼相机测量 LAI

在 18 块样地中, 用本仪器测得的叶面积指数最小值为 0.38、最大值为 3.23, LAI-2200 测得的最小值为 0.50、最大值为 3.25。鱼眼相机测量结果与 LAI-2200 结果之间存在显著的线性相关关系(图 2), R^2 达 0.85 ($P < 0.05$)。2 种仪器测得的不同植被 LAI 基本落在 1:1 线上, 说明这两种仪器测定的 LAI 结果非常接近。干旱地区大豆和荒草 LAI 较低, 而柠条、玉米和紫花苜蓿作为该区分布较为广泛的植被, 有较高的 LAI。紫花苜蓿地和玉米地在较高 LAI 时有明显的偏离, 表明 LAI-2200 测量结果高于光学鱼眼相机法, 这是因为紫花苜蓿在生长后期, 随着株高的增加, 出现倒伏情况, 导致冠层的茎和叶分布极不均匀。玉米则是由于生长后期大量叶子变黄, 老化叶片

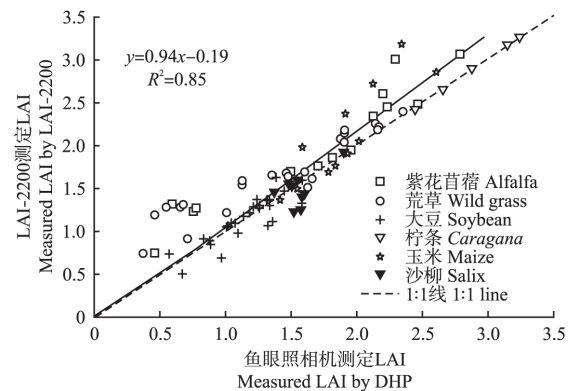


图 2 光学鱼眼相机与 LAI-2200 测量 LAI 结果之间的关系
Fig.2 Relationship between measured results of DHP and LAI-2200.

的透射率变高,两种仪器测量原理不同导致二者差异明显.同时,这两种植物是带状种植,冠层有较大的不均匀性,也可能是造成差异的原因.簇生植物沙柳生长年限较短(5年),测量时段为其生长中期,LAI变化不大.柠条也属于簇生植物,由于测量样地柠条种植稠密,冠层较为均匀,使用 LAI-2200 和鱼眼照相法测量均匀分布的植被冠层(柠条,大豆,荒草生长中后期)一致性较好,这与苏宏新等^[4]在针叶林、阔叶林中测量结果一致.荒草地由于生长前期冠层较低,而 LAI-2200 仪器本身存在一定高度,测量时会低估 LAI 值.以上分析表明,两种仪器测量结果受到植被冠层结构的影响,低矮冠层和带状分布的植被存在较大差异性,表明在 DHP 和 LAI-2200 之间,空间透过率存在较大差异.这可能是由于仪器的覆盖区变化引起的(DHP 朝下和 LAI-2200 朝上),由于 LAI-2200 有最低测量高度限制,朝下拍摄的眼球照相法比 LAI-2200 更适合于低矮冠层的植被测量,测量精度较为理想^[22-23].此外,DHP 鱼眼镜头的视野更大以及和 LAI-2200 相比较大的方位角范围,可捕获大多数冠层空间异质性^[23].更适合于有大空隙、不均一性的带状种植、稀疏簇生的冠层.

2.2 鱼眼摄像机测量 LAI 动态

2.2.1 光照对鱼眼摄像机照片获取 LAI 的影响

使用普通单反相机加载光学鱼镜头测量 LAI 的试验表明,避开太阳光照射时鱼镜头法测量的黄土高原北部典型植被 LAI 与 LAI-2200 测量结果非常接近(图 2).但是在进行定点连续拍摄照片过程中,晴天日出前和日落后符合拍摄条件的的时间较为短暂,而且也随着季节变化而变化,无法精确控制在理想的天气状态下拍摄^[24-25].因此,可以依据拍摄时刻的太阳辐射值对照片处理过程中的参数进行校正,以提高 LAI 测量准确性.

对于镜头朝下拍摄的照片,以土壤为背景,光照强度的差异将间接表现于绿色植被冠层颜色的不同.处理大豆照片时,选取连续 10 d(8 月 8—17 日)太阳辐射值差异较大的图片,由于该时段大豆叶片基本全部展开,假设 10 d 内 LAI 基本不变,用 CAN-EYE 软件分析照片时,软件默认代表土壤的棕色、照片亮度、代表植被的绿色参数为一基本值,在此基础上先调节棕色参数,调至 0.071 时,继续调大会识别非植被区域,调小识别不全照片中的植被,同样的方法调节亮度参数至 0.735,确定这两个参数后,软件识别的植被区域只受绿色参数的影响,调节绿色参数使这 10 d 的 LAI 与 LAI-2200 测量值接近,

RMSE 最小为 0.013.通过以上过程,得出太阳辐射值与绿色指数之间存在显著的线性相关关系(图 3).根据它们的线性关系可得出测量期间不同太阳辐射值下拍摄图片的绿色指数值,进而计算得到每天的 LAI.柠条地朝下拍摄的照片处理方法与大豆地一致,选取 7 月 29 日至 8 月 7 日的照片后,首先确定亮度和棕色(土壤)参数分别为 0.742 和 1.660,然后将太阳辐射值与绿色指数进行线性回归,进而根据拍照时的太阳辐射值来调整绿色指数值,计算每天的 LAI.

对于镜头朝上拍摄的照片,以天空为背景,光照强度的差异将直接表现于拍摄照片的亮度.玉米地照片选取 8 月 5—14 日这 10 d 太阳辐射差异较大的图片,用 CI-110 软件分析时,软件默认照片的对比度、亮度、代表植被颜色的 Grama 参数均为 50%,先调节对比度参数,调至 48%时,继续调大会识别到天空,调小识别不全照片中的植被.Grama 参数为 50%时,软件识别的植被区域最接近人眼识别绿色的结果,确定这两个参数后,软件识别的植被区域只受亮度参数的影响,该时段玉米叶片也基本全部展开,调节亮度参数使得 LAI 接近 LAI-2200 测量值, RMSE 最小为 0.018,得出亮度指数与太阳辐射值在 0.05 水平上显著相关,根据它们的线性关系可得出所有图片的亮度指数值,进而计算得到每天的 LAI.柠条地朝上拍摄的照片处理方法与玉米地一致,选取 8 月 24 日至 9 月 2 日这 10 d 的照片后,确定对比

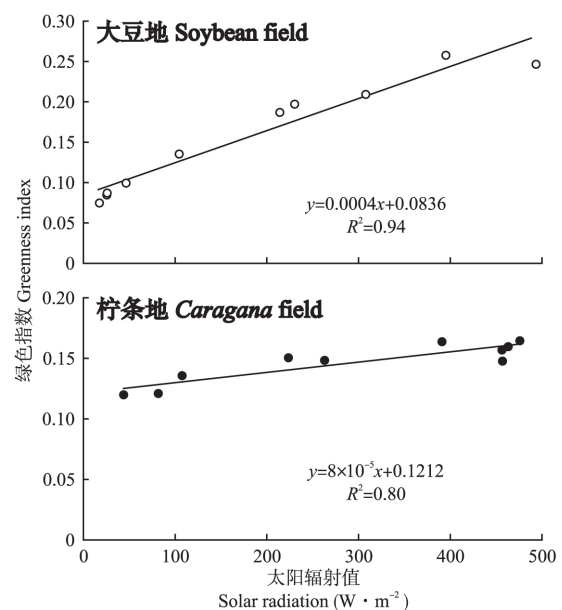


图 3 镜头朝下时太阳辐射与绿色指数的关系

Fig. 3 Relationships between solar radiation and greenness index at downward lens of camera.

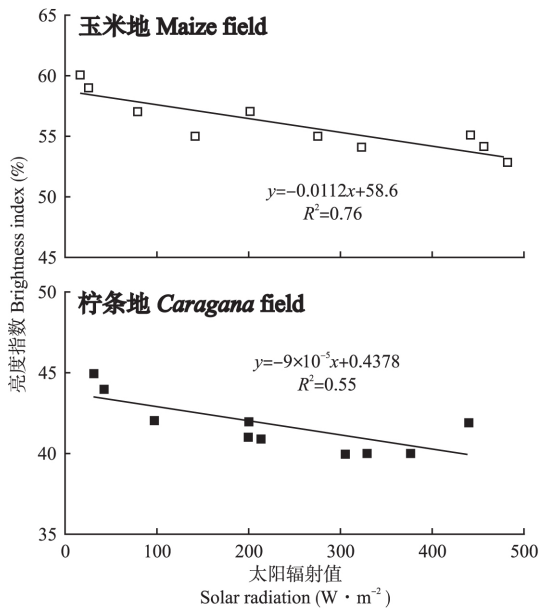


图 4 镜头朝上时太阳辐射与亮度指数的关系
 Fig.4 Relationships between solar radiation and brightness index at upward lens of camera.

度和 Grama 参数分别为 40% 和 50% ,之后 ,将太阳辐射值与亮度指数确定线性关系(图 4) ,进而计算每天的 LAI.

线性回归分析结果显示 ,与镜头朝下相比 ,朝上时亮度指数与太阳辐射值的 R^2 较小(图 3、图 4) ,这是因为朝上安装时摄像机镜头可能暴露于直射光 ,并易受雨水、露水、掉落的叶子和灰尘等影响.前人研究结果表明 ,镜头朝下时 ,CAN-EYE 软件无法区分太阳光直射情况下产生的黑色的植被阴影和土壤背景 ,导致其分析直射光情况下的照片 LAI 偏小^[23] ,所以光照校正对鱼眼摄像机照片尤为重要. Chen 等^[26] 发现 ,光照强度对森林的影响程度大于农作物 ,这可能是因为一般森林植被的叶子相对于农作物较小 ,在太阳光直射情况下更难区分^[23] .本研究根据太阳辐射值调整软件参数时 ,两种拍摄方式下 ,大豆地、玉米地的 R^2 均高于柠条地 ,这也验证了此观点.

2.2.2 LAI 动态变化 通过以上方法处理得出的玉米地和大豆地 LAI 都是在 6 月开始迅速上升 ,玉米地 LAI 迅速超过大豆 ,到 8 月中旬达到最高峰 ,之后大豆地 LAI 迅速下降 ,但玉米地下降缓慢 ,10 月还未迅速降低.两种样地的 LAI 有明显的季节变化趋势 ,但也存在差异(图 5) ,这与该区两种农作物的生长特性有关 ,大豆经过 8 月上旬结荚期后开始枯萎 ,黄叶迅速增多并部分凋落 ,而玉米 8 月下旬才开始出现部分黄叶.对于柠条地上下两种拍照方式测量

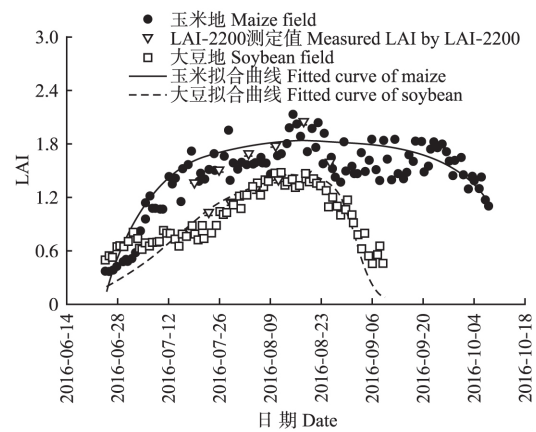


图 5 玉米地和大豆地 LAI 的动态变化
 Fig.5 Dynamics of LAI in maize and soybean fields.

的 LAI ,由于安装鱼眼摄像机在 7 月 14 日 ,柠条属于多年生灌木 ,当季生长量较小 ,该时段柠条叶片基本全部展开 ,LAI 在 7 月中旬到 9 月初波动较小 ,9 月初到 10 月下旬呈缓慢的下降趋势(图 6) .

通过前文建立的校正方程进行调整后 ,同期 LAI-2200 和鱼眼摄像机方法测定结果变化趋势一致 ,这与前人研究结果一致^[1, 12, 23] .但 3 个样地测量结果均存在一定变异 ,是由于鱼眼摄像机除受太阳辐射影响外 ,还易受天气条件影响.同时 ,柠条样地两种拍摄方式结果差异较小 ,均可以反映柠条的 LAI 动态变化.9 月 4 日以后 ,柠条地的 LAI 呈缓慢下降趋势(图 6) ,镜头朝下比朝上的测量结果下降趋势更明显.朝下拍摄时 ,拍到的茎秆部分较少 ,对 LAI 的变化更敏感 ,能更真实地反映 LAI 的季节变化.

为拟合 LAI 连续测量数据 ,特引入作物生长方程.选用逻辑斯蒂(Logistic)和单分子式(Mitscherlich) 2 种生长方程分别拟合大豆和玉米生长过程.

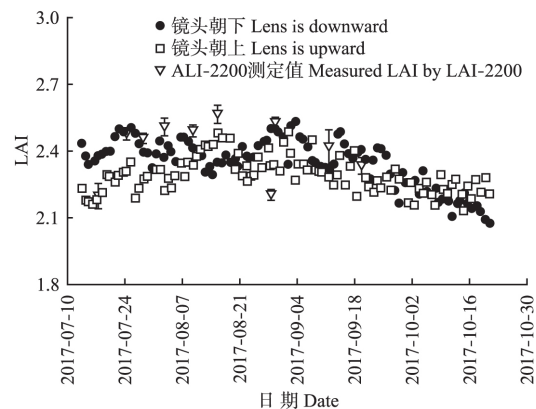


图 6 柠条地镜头朝下和朝上测量 LAI 的动态变化
 Fig.6 Dynamics of LAI from downward and upward-pointing lens in Caragana field.

Logistic 方程适用于描述慢生作物生长,而对生长较快的作物精度低,Mitscherlich 生长方程比较简单,无拐点,其曲线形状类似于“肩形”,适用于描述初期生长速率较快的作物的生长过程^[16]。两种模型中,描述叶片增加和减少过程的参数不同。使用 SPSS 18.0 软件获取拟合参数,两作物拟合方程如下:

大豆叶片增加过程: $y = 1.45 / (1 + 100 \times e^{0.1t})$
($t = 28 \sim 78$ d)

叶片减少过程: $y = 1.45 / (1 + 1.490 \times 10^{-11} \times e^{0.37t})$
($t = 79 \sim 104$ d)

玉米叶片增加过程: $y = 1.85 \times (1 - e^{-0.08t})$
($t = 1 \sim 52$ d)

叶片减少过程: $y = 1.84 \times (1 - e^{-0.08 \times (1.18-t)})$
($t = 53 \sim 106$ d)

2 种生长方程可以较好地模拟大豆和玉米生长过程,与采用鱼眼摄像机测量 LAI 动态结果变化趋势一致(图 5)。

综上所述,镜头朝下情况下,利用分析软件 CAN-EYE 对被捕获的图像进行数字化处理时,计算 LAI 的关键参数绿色指数随着拍摄照片时的太阳辐射强度增加而增加。但是镜头朝上情况下,利用分析软件 CI-110 对照片进行处理时,亮度参数随着太阳辐射值的增加而减少。通过关键参数的调整,玉米、大豆和柠条样地 LAI 变化与 LAI-2200 测量结果一致,很好地反映了这些植物生长期的 LAI 动态变化。所以,对于低矮型植被(例如,苜蓿和玉米),为了更好地识别生长初期低矮冠层 LAI,建议采用朝下拍摄方法。对于 1~3 m 高度的植被(例如,柠条、沙柳和玉米等),两种拍摄方式均可。但对于木质部分较多的植被,朝上拍摄的测量结果钝化了 LAI 的动态变化^[4,11]。朝下拍摄方式更理想。需要注意的是,朝下安装时需要使用支撑杆,由于鱼眼摄像机视野较大,所以需要根据拍摄样地的大小适当调整支撑杆的高度。对于高于 3 m 的植被(例如,油松 *Pinus tabulaeformis* 和云杉 *Picea asperata*),朝上拍摄可通过测量植被无叶期非光合(木质)部分面积指数对非光合部分进行校正^[27-28]。无落叶期的常绿阔叶林和针叶林非光合部分也可通过多光谱冠层成像仪(multi-spectral canopy imager, MCI) 测量^[9,29]。

2.2.3 天气条件对测量结果的影响 由于设计原理的差异,应用较为广泛的各种 LAI 光学测量方法对观测条件的要求各不相同,如 AccuPAR、SunScan 和 TRAC 均需在晴朗无云天气条件下工作^[9],而 LAI-

2200、DHP 方法则适宜在日出前、日落后和阴天天气条件下观测^[1,23]。鉴于野外试验天气条件不稳定^[21],使用以上仪器时,一方面符合测量的时间较为短暂;另一方面,人工操作无法保证数据的连续性和准确性。而固定安装在观测样地的鱼眼摄像机,通过每天自动拍摄照片来研究植被样地同一范围内 LAI 变化,与其他光学测量方法相比,避免了人力投入,在冠层半球方向直射光及散射光分布测量,冠层聚集效应评估及结构参数测量等方面优势明显^[1]。

为进一步探究特殊天气条件对鱼眼摄像机测量结果的影响,选取玉米地和柠条地具备典型代表性、拍摄日期接近的不同天气条件下的照片进行分析(图 7)。表 1 是照片未调整参数的处理结果,雨天、阴天的 LAI 接近 LAI-2200 测定值,朝上拍摄(玉米)晴天的 LAI 偏小,朝下拍摄(柠条)晴天的 LAI 偏大,这是由于晴天条件下镜头视野范围内出现反光叶片导致的。从玉米地和柠条地的照片对比可见,雨天照片表现尤其不同,这是由于摄像机安装方向不同导致的,可通过该时段气象数据区别阴天和雨天。镜头朝上拍摄时,在雨水、大雾、露水等潮湿条件下拍摄时,水滴落在镜头上导致较大的不确定性,镜头上的水滴由于挡光会对处理软件的识别造成影响,应该避免使用这种条件下的照片获取 LAI。

本研究将光学鱼眼摄像机安装在观测样地,通过自动拍摄照片来研究植被 LAI 变化,每天拍摄照片为研究动态变化提供了丰富、连续的数据,并结合专用软件对照片进行分析,总结了一套较为可靠的定位监测 LAI 动态变化方法及具体操作流程:首先,根据植被高度确定摄像机拍摄方式,灌木两种拍摄方式均可,其次,设置摄像机拍摄时间(日出和日落前后),最后,通过太阳辐射强度与照片处理软件参数建立校正方程对关键参数进行订正,获取到植被整个生长过程的 LAI 动态曲线。将照片后期处理程

表 1 对应图 7 玉米地和柠条地的照片处理结果

Table 1 Processed results of maize and *Caragana* fields in figure 7

地类 Land type	天气条件 Weather condition	叶面积 指数 LAI	叶片平均 倾角 Mean leaf angle (°)	太阳辐射值 Solar radiation ($W \cdot m^{-2}$)
玉米 Maize	雨天 Rainy	1.20	85.91	106.82
	晴天 Sunny	0.90	85.91	498.94
柠条 Caragana	阴天 Cloudy	1.19	77.49	128.51
	雨天 Rainy	2.44	14.47	58.20
	晴天 Sunny	2.59	16.00	463.20
	阴天 Cloudy	2.43	14.38	45.90

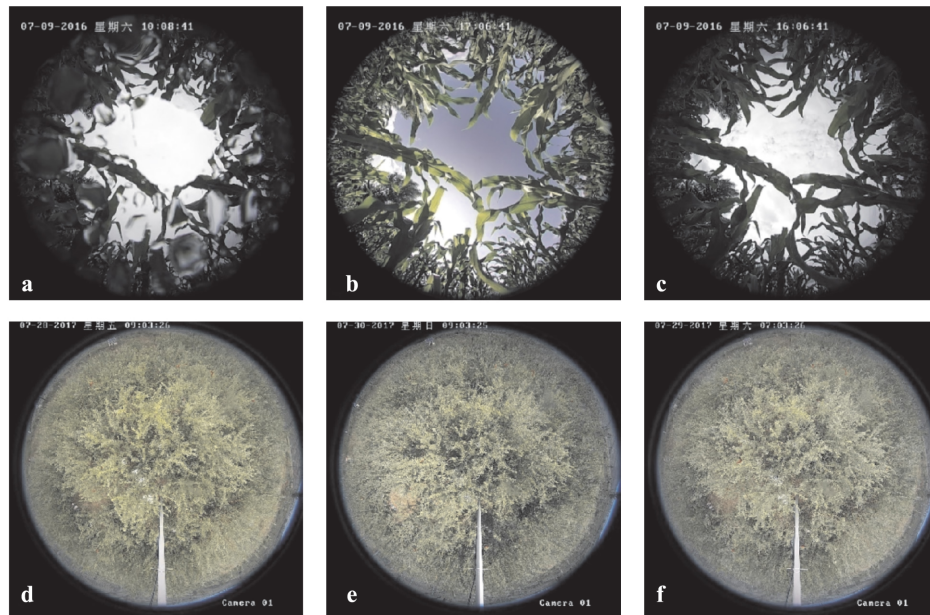


图 7 玉米地和柠条地的照片

Fig.7 Images from maize and *Caragana* fields.

a~f 分别表示玉米地和柠条地的雨天、晴天、阴天 The image from a to f indicated rainy , sunny and cloudy in maize and *Caragana* fields , respectively.

序内嵌到鱼眼摄像机可实现相关参数的全自动测量,避免人为因素影响是应该考虑的改进方向.此外,干旱地区植被多稀疏不连续,未来应该采用考虑聚集效应的 TRAC 植物冠层分析仪或者直接测量法来验证,进一步提高连续测量 LAI 的精度.

3 结 论

普通单反相机加载鱼眼镜头在适宜的光照条件下拍摄照片,通过软件处理照片获取的 LAI 与 LAI-2200 结果一致,仪器的精确性在黄土高原北部柠条、沙柳、紫花苜蓿、大豆和玉米等典型植物样地上得到了验证.

应用专业软件处理鱼眼摄像机定时拍摄的照片时,镜头朝下情况下,计算 LAI 的关键参数——绿色指数随着拍摄照片时太阳辐射强度的增加而增加.但是镜头朝上情况下,亮度参数随着太阳辐射强度的增加而减少.通过 2 个关键参数的调整,可以得到不同植被生育期动态 LAI,测量结果与 LAI-2200 结果一致.

参考文献

- [1] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, **121**: 19–35
- [2] Haboudane D, Miller JR, Pattey E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting

green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 337–352

- [3] Guan D-X (关德新), Wu J-B (吴家兵), Wang A-Z (王安志). Simulation of crown leaf area index of Korean pine and broadleaved mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(3): 499–503 (in Chinese)
- [4] Su H-X (苏宏新), Bai F (白帆), Li G-Q (李广起). Seasonal dynamics in leaf area index in three typical temperate montane forests of China: A comparison of multi-observation methods. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2012, **36**(3): 231–242 (in Chinese)
- [5] Li G-Z (李根柱), Wang H-X (王贺新), Zhu J-J (朱教君). Seasonal dynamics of leaf area index of main broadleaf forest types in eastern Liaoning secondary forest zone. *Chinese Journal of Ecology (生态学杂志)*, 2008, **27**(12): 2049–2055 (in Chinese)
- [6] Chen X (陈厦), Sang W-G (桑卫国). Dynamics of leaf area index and canopy openness for three forest communities in the warm temperate zone of China. *Chinese Journal of Plant Ecology (植物生态学报)*, 2007, **31**(3): 431–436 (in Chinese)
- [7] Schleppi P, Thimonier A, Walthert L. Estimating leaf area index of mature temperate forests using regressions on site and vegetation data. *Forest Ecology and Management*, 2011, **261**: 601–610
- [8] Chason JW, Baldocchi DD, Huston MA. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, **57**: 107–128
- [9] Zou J (邹杰), Yan G-J (阎广建). Optical methods

- for in situ measuring leaf area index of forest canopy: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2971–2979 (in Chinese)
- [10] Yan G-J (阎广建), Hu R-H (胡容海), Luo J-H (罗京辉). Review of indirect methods for leaf area index measurement. *Journal of Remote Sensing* (遥感学报), 2016, **20**(5): 958–978 (in Chinese)
- [11] Chen JM, Rich PM, Gower ST, et al. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**: 29429–29443
- [12] Ma Z-Q (马泽清), Liu Q-J (刘琪璟), Zeng H-Q (曾慧卿), et al. Estimation of leaf area index of planted forests in subtropical China by photogrammetry. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(5): 1971–1980 (in Chinese)
- [13] Leblanc SG, Chen JM, Fernandes R, et al. Methodology comparison from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **129**: 187–207
- [14] Zhang Y, Chen J, Miller JR. Determining digital hemispherical photograph exposure for leaf area index estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **133**: 166–181
- [15] Chianucci F, Cutini A. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: Current controversies and opportunities. *iForest: Biogeosciences and Forestry*, 2012, **5**: 290–295
- [16] Von BL. Quantitative laws in metabolism and growth. *Quarterly Review of Biology*, 1957, **32**: 217–231
- [17] Zhu G-L (朱高龙), Ju W-M (居为民), Chen JM, et al. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: Ground measurement and remote sensing retrieval. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(8): 2117–2124 (in Chinese)
- [18] Gonsamo A, Chen J. Continuous observation of leaf area index at Fluxnet-Canada sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **189/190**: 168–174
- [19] Ling F-L (凌飞龙), Li Z-Y (李增元), Chen E-X (陈尔学). Leaf area index estimation for Qinghai spruce forest using digital hemispherical photography. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2009, **24**(7): 803–809 (in Chinese)
- [20] Wang S (王胜), Fan J (樊军). Application of three heat pulse technique-based methods to determine the stem sap flow. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(8): 2244–2252 (in Chinese)
- [21] Gao Y (高宇), Fan J (樊军), Peng X-P (彭小平). Soil water depletion and infiltration under the typical vegetation in the water-wind erosion crisscross region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(23): 7038–7046 (in Chinese)
- [22] Liu J, Elizabeth P. Retrieval of leaf area index from top-of-canopy digital photography over agricultural crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**: 1485–1490
- [23] Garrigues S, Shabanov NV, Swanson K, et al. Inter-comparison and sensitivity analysis of leaf area index retrievals from LAI-2000, AccuPAR, and digital hemispherical photography over croplands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1193–1209
- [24] Zhao C-Y (赵传燕), Shen W-H (沈卫华), Peng H-H (彭焕华). Methods for determining canopy leaf area index of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(5): 860–869 (in Chinese)
- [25] Macfarlane C, Ryu Y, Ogden GN, et al. Digital canopy photography: Exposed and in the raw. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **197**: 244–253
- [26] Chen JM, Black TA, Adams RS. Evaluation of hemispherical photography for determining plant area index and geometry of a forest stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, **56**: 129–143
- [27] Chen JM. Optically-based methods for measuring seasonal variation of leaf area index in boreal conifer stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **80**: 135–163
- [28] Kucharik CJ, Norman JM, Gower ST. Measurements of branch area and adjusting leaf area index indirect measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **91**: 69–88
- [29] Zou J, Yan G, Zhu L, et al. Woody-to-total area ratio determination with a multispectral canopy imager. *Tree Physiology*, 2009, **29**: 1069–1080

作者简介 牛小桃,女,1993年生,硕士研究生.主要从事环境土壤物理研究. E-mail: niuxiaotao16@mails.ucas.ac.cn
责任编辑 杨弘

牛小桃,樊军,王胜,等. 利用鱼眼摄像机测量植被叶面积指数动态变化. *应用生态学报*, 2018, **29**(10): 3183–3190

Niu X-T, Fan J, Wang S, et al. Measuring the dynamics of leaf area index of vegetation using fisheye camera. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3183–3190 (in Chinese)