

单子叶植物叶片双向反射分布的测量与分析

刘丁瑜¹, 易加维¹, 张徐洲¹, 张畅¹, 刘飞^{1,2}, 方慧^{1,2*}, 何勇^{1,2}

1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058

2. 农业部光谱检测重点实验室, 浙江 杭州 310058

摘要 作物的生物含量与作物的光学特性有直接的关系, 而植物叶片的双向反射分布函数(BRDF)又直接影响植物的光学特性。植物叶片的 BRDF 体现了叶片在各个方向不同的能量反射能力, 直接影响植物叶片的光谱检测结果, 也是植被冠层宏观光学特征的影响因素之一。对植物叶片的 BRDF 光学特性及表现出的规律性展开研究和讨论, 能够有效提高植物无损检测光谱模型的稳定性和可靠性, 提升利用作物光谱模型反演理化特性的准确性和可靠性。首先介绍了植物叶片的 BRDF 快速获取方法及自主研发的方向性光谱检测仪器, 该仪器能够在入射光的方位角和天顶角、接收探头的方位角和天顶角这四个维度进行调整, 实现多入射角和反射角的反射光谱数据采集。单子叶植物的叶脉呈纵向分布, 因而体现出较为显著的各向异性, 玉米和小麦是两种较为典型的单子叶农作物。通过自主研发仪器获取不同波段范围下的玉米和小麦的反射光谱信息, 并分析总结其反射分布规律。采用文中所介绍的 BRDF 计算方法对光谱数据以及白板校正数据进行计算, 再结合 MATLAB 程序对光谱反射数据的图像映射, 对反射结果与叶绿素含量和叶片含水量这两个叶片典型理化参数的相关性进行分析, 最后探讨了采用 ANIX 系数对叶片的各向异性进行量化分析的方法。选取小麦在可见光波段以及玉米在近红外波段的数据, 结果表明, 小麦和玉米在各波段下的 f_r 分布均关于入射天顶角两侧微小空间对称, 在相同波段下, 不同入射天顶角下的 f_r 值大小基本一致; 在相同入射天顶角下, 小麦在 800 nm 波段下的 f_r 值最大, 680 nm 波段下的 f_r 值最小, 这是由于 680 nm 波长附近是叶绿素强吸收的特征波段, 而 800 nm 附近是叶绿素反射的特征波段, 且在相同波段下, 叶绿素浓度的升高会导致 f_r 值的增大; 在水的强吸收特征波段 1450 nm 下, 玉米的 f_r 值随着含水量的升高而增长。分析表明, 作物的 BRDF 特性能够有效反映叶片主要生物含量的变化, 同时计算所得到的各向异性指数也体现出一致的变化规律, 为建立稳定且可靠的作物光谱定量分析模型提供了理论和实践基础。

关键词 双向反射分布; 双向反射分布函数; 反射光分布检测; 方向性; 量化分析

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2100-07

引言

遥感技术一直是农作物及土壤理化成分检测的重要手段, 而基于光谱技术的检测在农作物的产前、产中及产后都有着广泛的应用。有研究表明作物生长周期过程中特定生物含量的变化与作物光学特征有着紧密联系, 经过建立起作物吸收和反射光谱模型, 可以模拟和反演田间作物冠层的结构几何参数以及植物生化含量, 这对无破坏性监测作物生长、健康状况等具有很重要的应用价值。

但由于农业检测环境条件的复杂性、植物叶片结构和成

分的多样性等原因, 常见的基于电磁波的农作物光谱分析模型抗干扰能力差、稳定性差, 模型往往只对实验中的数据有较好的响应, 无法适用于多变的农业实际检测环境。此现象的原因也有学者展开研究, 王小龙等^[1]提出高光谱偏振的成像单元存在着固定偏差, 致使解析图像的工作效率降低, 丁永前等^[2]在研发冠层反射光谱测量装置过程中发现微小温度变化会严重影响光谱测量的稳定性和可靠性。

在光谱模型不稳定的众多因素中, 植物叶片本身的双向反射分布特性也是重要的影响因素之一。申怀飞等^[3]通过对生长期冬小麦冠层光谱的测定发现, 波段下的反射率在太阳高度角的变化时均有相同趋势的变化, 光谱特性受到光学方

收稿日期: 2018-03-07, 修订日期: 2018-08-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA10230401), 浙江省重点研发计划项目(2017C02031)资助

作者简介: 刘丁瑜, 女, 1996年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院本科生 e-mail: dingyu_liu@zju.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: hfang@zju.edu.cn

向特性的影响。

双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)能够反映叶片光学性质和多角度光合效能的分布,同时易于实现实验室环境下的多角度反射光谱测量。双向反射特性指的是待测样本的反射率随入射角和观测角的变化而改变的特性,其计算公式见式(1)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (1)$$

其中, θ_i , ϕ_i , θ_r , ϕ_r 和 λ 分别为入射光的方位角、天顶角,反射光的方位角、天顶角以及入射光的波长,其输出是一个数值,反映了给定入射条件下,反射方向上反射的相对能量与入射能量的比值。闫彬彦等^[4]通过采集黑河流域行播作物冠层 BRDF 验证了 BRDF 一体化模型能更准确描述作物冠层反射的各向异性性质,赵娟等^[5]小麦多年地面观测所得的多角度数据与 BRDF 核驱动模型的结合研究也表明了多角度观测更加适合于分析小麦冠层结构信息。

作物的多角度反射光学特性研究,是多角度遥感技术应用于农业领域的重要课题。本文通过对不同植物与生物量的测量,验证方向性对光谱检测差异性的影响。其中主要工作是验证作物光学反射特性的稳定与方向性之间的联系,针对这一工作自主研发了一种植物叶片三维光分布快速测量装置,能够实现光源的多角度入射以及多角度反射光谱的快速接收。通过该装置分别对小麦在可见光波段下以及玉米在近红外光波段下的双向反射特性进行研究,通过反射光谱分布以及各向异性指数量化,分析作物的多角度反射光学特性。

为展开上述研究,选择了较为典型的、已有较好光学模型基础的叶绿素含量和叶片水分作为光谱对应理化参数。叶片的叶绿素含量是衡量作物光合作用效率和生长发育过程的重要指标,研究表明^[6]它的强吸收线性特征波段落在可见光波段;叶片水分含量也能直接反映作物的生长和新陈代谢情况,其吸收特征波段落在近红外波段^[7]。作物叶片叶绿素相对浓度和含水量高低两者对植物的生理有较大影响,而且有较为敏感的光学特征,因此选择这两者作为研究的理化参数。

为更直观地量化分析作物的光学方向特性,可引入各向异性指数(ANIX)指标,各向异性指数的波动变化与作物冠层结构参数密切联系^[11],可以更好地评价任意波长下作物叶片的光学方向特性。

1 植物叶片三维光分布检测装置

植物叶片三维光分析检测装置主要包括光源、光纤、实验平台、多路复用器、光谱仪、采集装置以及计算机等。

采用海洋光学 HL-2000 多用途卤钨光源,通过光纤连接到入射装置;采用 MPM-2000 光学多路复用器,将样品置于测量平台上,入射光经过样品反射之后,由多个接收探头进行光谱接收信息的转换,探头通过光纤与光路复用器相连,改变光路复用器的传输通道即可决定传入光谱仪的通道;采用海洋光学 QE65000 光谱仪(探测波段范围为 200~1 100 nm)和海洋光学 NIRQ512 光谱仪(探测波段范围为

900~1 700 nm),传输到光谱仪的光谱信息通过仪器配套软件传输到电脑端并保存;采集装置由光纤和作为接收探头的平凸透镜组合而成,光纤的直径和传输波段与光谱探测器相配,能够形成平行光入射到待测样本的表面;装置还包括样品架、底座等辅助系统,手动调节可动的轴承座可改变接收探头的方位角度。该测量系统如图 1 所示。

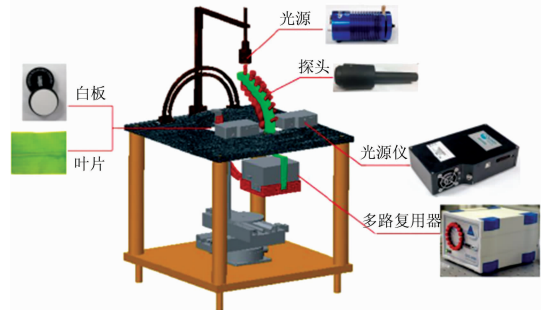


图 1 检测装置示意图

Fig. 1 Sketch map of detecting device

光学测量系统如图 2 所示。系统能够在四个维度上调整角度,分别为入射光的方位角和天顶角、接收探头的方位角和天顶角,从而可接收多个不同入射和反射角下的反射光谱。光学多路复用器、轴承座与测量平台相对固定,同步转动保证了接收探头的相对位置固定,也降低实验过程中光纤扰动对测量的影响。在测量样品之前,与常规光谱数据获取类似,需要先获取白板校正用的标准白板谱线,再关闭光源测定暗电流数据以降低环境光的干扰,然后开始实验样品的检测。其中白板校正用的标准白板谱线也是一个与角度相关的测量,即每一个测量角都对应一个相应角度的标准白板谱线。

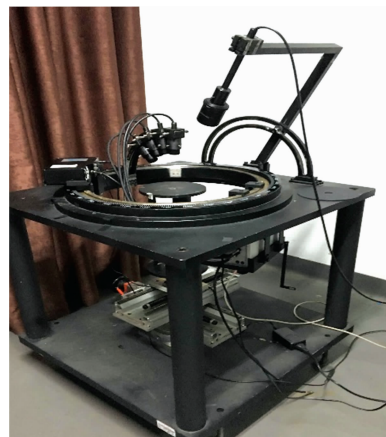


图 2 检测装置实物图

Fig. 2 Real product of detecting device

2 实验部分

单子叶叶脉的纵向分布使其反射特性体现出较强的各向异性^[9],因此选取了小麦和玉米这两种典型的单子叶植物作

为实验材料,通过采集不同入射天顶角和不同接收角度下的叶片反射值,结合叶片叶绿素以及水分这两个植物主要生物量,探究全波段下植物叶片光谱反射特性的分布规律以及和作物生物量之间的关联性。

2.1 小麦叶片的双向反射分布测量

2.1.1 实验材料

浓烟 19 号小麦叶片,45 片;乙醇丙酮混合液($V_{乙醇} : V_{丙酮} = 1 : 1$)。

2.1.2 实验方法

调整并固定光源入射位置以及反射光探头位置,首先将入射光天顶角和反射光接收方位角调至 0° ,将标准白板置于样品台上,调整积分时间避免光源曝光。手动调节轴承座带动接收探头改变角度,每隔 10° 测量一次,一共测得 144 (36×4) 个白板在不同接收角度下的反射值,关闭光源后测得 10 个暗电流数据。用待测叶片代替白板放置于样品台上,并将样品台下调一个白板的高度,重复以上测量步骤,得到 144 个叶片在不同角度下的反射值后,再测得 10 个暗电流数据。在接收 0° 入射光条件下的反射光测量后,改变光源入射角度为 30° 和 45° ,再次重复以上操作得到不同入射天顶角下的反射光谱信息。

每片叶片称取 0.1 g,将其剪成细丝状并放置于 20 mL 的乙醇丙酮混合液试管中,迅速塞紧并放在暗室环境下,静置 24 h 待叶绿素完全提取出。采用紫外-可见分光光度计测量叶绿素特征吸收波长 663 和 645 nm 处的吸光度值,并计算叶绿素含量。

2.2 玉米叶片双向反射分布测量

2.2.1 实验材料

浙江大学农学院提供,编号 SW30-4-3-2-1,45 片。

2.2.2 实验方法

称量采集的玉米叶片鲜重。

调整并固定光源入射位置以及反射光探头位置,将入射天顶角设置为 30° ,接收方位角调至 0° ,对白板进行校正,得到 144 个反射光谱数据。然后用玉米叶片代替白板,重复测量步骤,每片玉米叶片得到 144 个光谱数据。

将玉米叶片于清水中浸泡 1 h 使其饱和含水量增大,测量其浸泡后的饱和鲜重用以计算饱和含水量,然后再重复反射光谱测量步骤,得到浸泡后对应的 144 个光谱数据。测量完毕后,将玉米叶片烘干并称量其干重,即可计算叶片浸泡前后的含水量。

3 数据处理方法

3.1 叶片 BRDF 计算

光学测量系统直接获取叶片在不同入射角和观测角下对不同波长的光的反射值,需经过计算最终得到 BRDF 数值。BRDF 用 f_r 表示,定义为来自样本表面特定方向的反射幅亮度微元量(dL_r)与表面辐照度微元量的比值(dE_i),表达式见式(2)

$$f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \quad (2)$$

为计算反射光在样本空间上半球的积分数值,提出定向半球反射因子(DHRF, ρ)的概念,表达式为式(3)

$$\text{DHRF}(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \int f_r(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \phi_r d\omega_r \quad (3)$$

其中, $d\omega_r$ 为反射辐射立体角, $d\omega_r = \sin \theta_r d\theta_r d\phi_r$, DHRF 的取值范围为(0, 1)。实验中用到标准白板,其 DHRF 值已被标定,根据白板的 DHRF 表达式为式(4)

$$\rho_H(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \int \frac{dL_{r, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda)} \cos \theta_r d\omega_r \quad (4)$$

其中, $dL_{r, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)$ 表示标准白板的反射辐射亮度的微元量。由于入射到样本表面辐照度的微元量与反射方向的值无关,因此可得到式(5)

$$dE_i(\theta_i, \phi_i, \lambda) = \frac{1}{\rho_H} \int dL_{r, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r d\omega_r \quad (5)$$

将式(4)代入 BRDF 定义式(2)中,同时带入实验室采集信号 dt ,便得到 $f_{r, \text{ref}}$ 与测量值的关系式,见式(6)

$$f_{r, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \rho_H \frac{dT_{\text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) / \cos \theta_r}{\int dT_{\text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) d\omega_r} \quad (6)$$

由于实际测量过程中,存在手动操作的误差,无法直接使用式(5)。为简化测量工作量,提出标准白板的校正 BRDF 表达式,见式(7)

$$f_{r, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \rho_H \frac{f(\cos \theta_r)}{\cos \theta_r \int f(\cos \theta_r) d\omega_r} \quad (7)$$

因此,叶片的 $f_{r, \text{ref}}$ 最终表达式为式(8)

$$f_{r, \text{leaf}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda) = \frac{dT_{r, \text{leaf}}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, \lambda)}{dT_{c, \text{ref}}(\theta_i, \phi_i, c, \phi_r, \lambda) \cos \theta_r} \times \rho_H \frac{f(\cos \theta_r)}{\cos \theta_r \int f(\cos \theta_r) d\omega_r} \quad (8)$$

3.2 反射特性规律图像

将反射率数值大小通过 MATLAB 程序映射到反射率分布图中,即可直观地观察和分析不同入射天顶角和波段下反射率分布情况。首先生成原始反射数据 z ,并对测量方位角与天顶角进行插值,生成非测量点 X 和 Y ,由测量数据 z ,生成相应非测量点插值反值率 Z ,并填充等高线。

其中,由内到外四条由黑点组成的圆形表示接收(反射)天顶角,其中的每个圆形代表了不同的反射天顶角(见图 3),实验中,一般做了以 15° 天顶角为间隔的 4 个反射角,因此有 4 个这样的圆代表了 4 个接收的天顶角。而在每个圆中,每个点在圆周上与正东方向的夹角为对应方位角,即从最右端起为 0° ,虚线上每点间隔为 10° 。五角星位置代表光源入射角。每个黑点都代表了 BRDF 的特定测量位置,同时用颜色代表该点上的 BRDF 数值的大小。BRDF 分布特性图中用黑白分布表示叶片反射强弱,白色部分是反射最强部分,黑色是反射最弱部分,反射强度从白到黑逐渐降低。

如图 3 可表示光源以 0° 天顶象垂直入射时,叶片在 360° 方位角, $0^\circ \sim 45^\circ$ 接收天顶角范围内的反射分布规律。

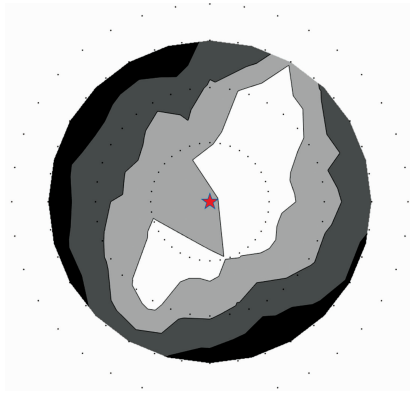


图 3 Matlab 反射分布图像

Fig. 3 Reflection distribution image in Matlab

3.3 各向异性量化分析

为进一步量化分析反射率数值的变化规律,采用各相异性指数(ANIX)对不同波段下的反射率进行分析,ANIX 能够很好地反映在任意波段下待测物的双向反射特性。

$$ANIX = f_{rmax} / f_{rmin} \quad (9)$$

在某一波段下,当待测物 ANIX 指数越大,其在该波段下的方向特性越显著。

3 结果与讨论

3.1 小麦双向反射特性与叶绿素含量分析

3.1.1 小麦双向反射特性与入射天顶角分析

实验得到 200~1 040 nm 波段范围内、45 片小麦叶片的反射值,数据量过大且规律性的研究比较困难,所以根据文献,我们选择具有代表性的波段进行观察与分析。叶绿素相

关波段主要集中于可见波段,其中在 550 nm 波长附近达到最高的相关性,并且在 680 nm 波长附近为叶绿素强吸收的特征波段,而 800 nm 附近则为叶绿素反射的特征波段之一^[8],因此,选择 550, 680 和 800 nm 作为观察叶绿素相关的 BRDF 的特征波段。

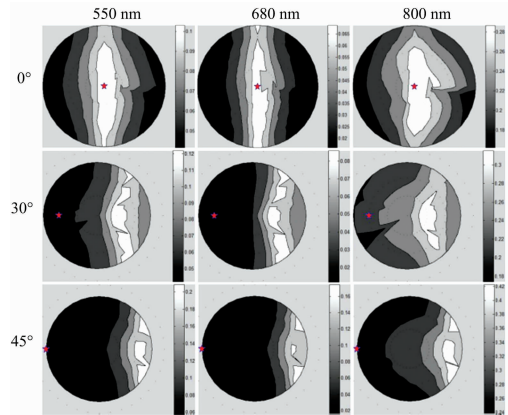


图 4 不同入射天顶角和波段下 fr 分布

Fig. 4 Bidirectional reflectance distribution of wheat leaf under different zenith angles and wavelengths

当光源垂直入射小麦叶片时,各波段下 fr 分布较为对称,且大致关于 0°入射天顶角两侧对称;当光源 30°天顶角入射小麦样本时,各波段下 fr 分布大致关于 30°入射天顶角两侧微小空间内对称,各波段下 fr 分布规律一致,且各波段下 fr 值大小同 0°入射天顶角一致;当光源 45°天顶角入射小麦样本时,各波段下 fr 分布关于 45°入射天顶角两侧微小空间内对称,其 fr 分布及 fr 值大小同 30°天顶角入射一致。

对图 4 中 9 幅分布图的数据进行定量分析,结果如表 1。

表 1 不同天顶角和波长下 fr 数据

Table 1 Bidirectional reflectance value under different zenith angles and wavelenths

参数	550 nm					680 nm					800 nm				
	max	min	ave	s	ANIX	max	min	ave	s	ANIX	max	min	ave	s	ANIX
0°	0.118	0.042	0.075	0.022	2.81	0.083	0.016	0.040	0.020	5.19	0.317	0.162	0.237	0.042	1.96
30°	0.142	0.042	0.079	0.025	3.38	0.105	0.012	0.039	0.026	8.75	0.351	0.175	0.260	0.034	2.01
45°	0.249	0.059	0.095	0.044	4.22	0.215	0.017	0.047	0.047	12.65	0.469	0.237	0.305	0.050	1.98

注: max 表示 fr 最大值, min 表示 fr 最小值, ave 表示 fr 的平均值, s 表示 fr 的标准差, ANIX 表示各向异性指数(f_{rmax} / f_{rmin})

由表 1 数据可知,当光源入射天顶角确定后,800 nm 波段下的 fr 值最大,680 nm 波段下的 fr 值最小;当波长确定后,fr 值随着入射天顶角的增大而增加,主要原因是光源非垂直入射叶片时,会存在明显的前向散射效应,且集中表现在入射光线主平面对称的两侧,呈现出大致对称的分布规律。尤其在 45°天顶角入射时,小麦叶片的各向异性指数显著增加,这一现象是镜面效应和前向散射效应共同影响的结果。

各向异性指数的波动变化能很好的体现作物冠层结构,也能反映作物叶片的结构特性。在 400~735 nm 波段范围

内,45°入射天顶角下小麦叶片各向异性指数明显高于 30°和 0°入射天顶角下的各向异性指数,实验数据表明,随着入射天顶角的增加,各波长范围下的各向异性指数增加,且入射天顶角越大,小麦叶片 fr 值分布的方向特性越显著,这一现象可能是随着入射天顶角的增加,小麦叶片微观表面的镜面效应和前向散射效应共同作用的结果。

3.1.2 小麦双向反射特性与叶绿素含量分析

选择叶绿素在可见光波段下的强吸收特征波段 680 nm,分别选取 3 个不同叶绿素浓度下小麦叶片在不同天顶角下的 fr 分布,其分布图见图 6。

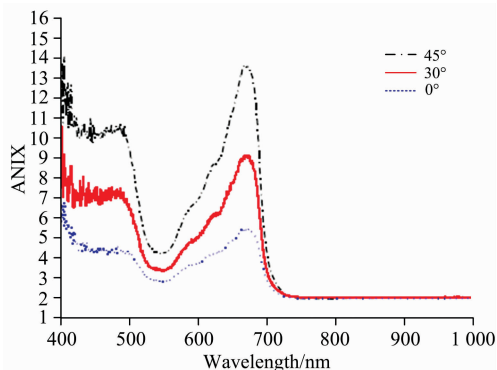


图 5 不同入射天顶角下小麦叶片各向异性指数 (ANIX)
Fig. 5 ANIX value of wheat leaf at different zenith angles

在光源 0°垂直入射时,不同叶绿素含量的叶片 fr 分布大致都关于 0°入射角附近对称;而 30°和 45°天顶角入射时,三种叶绿素含量的叶片 fr 分布都关于 30°和 45°入射角附近区域对称,不同叶绿素含量所体现出的 fr 分布规律基本相同。

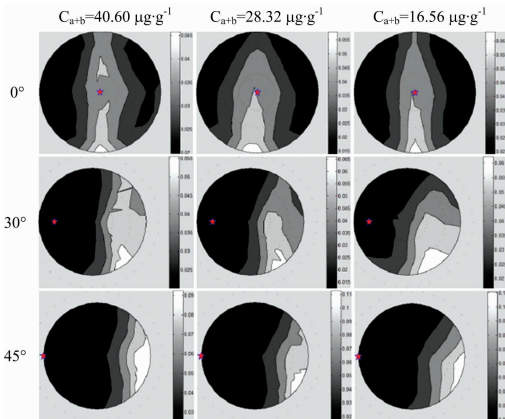


图 6 不同入射天顶角和叶绿素浓度下 fr 分布
Fig. 6 Bidirectional reflectance distribution of wheat leaf under different zenith angles and chlorophyll 11

其定量分析结果如表 2。

表 2 不同入射天顶角和叶绿素浓度下 fr 数据

Table 2 Bidirectional reflectance value at different zenith angles and chlorophyll 11

参数	$c_{a+b}=40.60 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$					$c_{a+b}=28.32 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$					$c_{a+b}=16.56 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$				
	max	min	ave	s	ANIX	max	min	ave	s	ANIX	max	min	ave	s	ANIX
0°	0.052	0.020	0.030	0.007	2.64	0.069	0.014	0.032	0.012	4.86	0.074	0.019	0.034	0.012	3.86
30°	0.064	0.020	0.031	0.011	3.22	0.080	0.013	0.031	0.015	6.28	0.075	0.017	0.036	0.013	4.50
45°	0.110	0.025	0.040	0.021	4.42	0.137	0.016	0.038	0.026	8.55	0.135	0.018	0.042	0.025	7.48

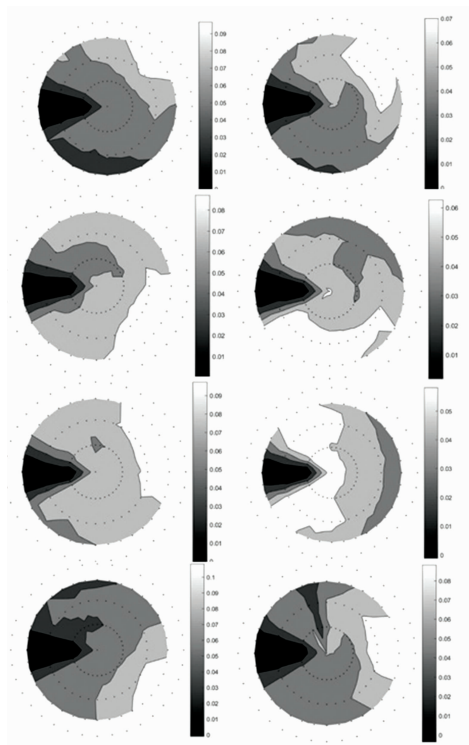


图 7 不同含水量下玉米叶片的 fr 分布
Fig. 7 Bidirectional reflectance distribution of maize leaf under different water contents

在不同入射天顶角下,叶绿素浓度变化对 ANIX 影响效果一致。图 5 为不同入射天顶角下小麦叶片的各向异性指数曲线。在可见光波段,不同入射天顶角下,叶绿素浓度越高,小麦叶片各向异性指数显著性越低,其原因是随着叶绿素含量增加,叶片的光合作用增强,叶片对光的吸收率升高,相应反射率降低,造成小麦叶片各向异性相对减弱(见表 2)。

3.2 玉米双向反射特性与含水量分析

3.2.1 相同入射天顶角下的玉米双向反射特性分析

实验得到 896~1 706 nm 波段范围、45 个玉米叶片的数据,根据文献[10]选择水分的强吸收特征波段 1 450 nm 下的数据,选取较有代表性的 4 片叶片,分析其在不同含水量情况下的 fr 分布情况见图 7。

在 30°同一入射天顶角下,不同含水量的叶片具有相似的 fr 分布规律,大致都关于 30°入射天顶角区域附近对称,且同一叶片的含水量升高时,fr 值相对都呈现增长趋势。

3.2.2 玉米双向反射特性与含水量分析

上述 4 片玉米叶片的定量分析结果如表 3。

在相同入射天顶角下,叶片含水量变化对 fr 值的影响效果一致。相同玉米叶片中,含水量增大,叶片的最大 fr 随之的减小,而最小 fr 变化不大,导致 ANIX 系数都相对降低,即同一叶片的含水量增加时,其叶片各向异性相对减弱,且主要是由最大反射值相对减小引起的,说明叶片含水量增大导致叶片对光的吸收增强。

表 3 不同含水量下玉米叶片 fr 数据

Table 3 Bidirectional reflectance value of maize leaf under different water contents

叶片	含水量 1/g	max1	min1	ANIX1	含水量 2/g	max2	min2	ANIX2	含水量 2-含水量 1	max2-max1	min2-min1	ANIX2-ANIX1
Leaf1	1.846	0.121	0.011	11.47	2.037	0.088	0.013	6.87	0.191	-0.033	0.002	-4.60
Leaf2	2.428	0.109	0.014	8.08	2.679	0.079	0.011	7.12	0.252	-0.030	-0.003	-0.96
Leaf3	2.176	0.122	0.016	7.47	2.411	0.084	0.015	5.46	0.235	-0.038	-0.001	-2.01
Leaf4	2.191	0.162	0.014	11.39	2.705	0.112	0.014	10.60	0.514	-0.050	0.000	-0.79

4 结 论

对植物叶片 BRDF 特性进行测定, 建立典型生物量与植物叶片双向反射特性之间的定量光谱模型, 能够提升植物双向反射特性反演作物生物量以及生长情况的准确性, 为作物生物量含量诊断提供重要的理论依据和技术支持。植物叶片三维光检测装置能够快速获得作物在不同入射光条件下的 BRDF, 波段响应范围可覆盖可见光及近红外波段, 能够针对多种植物生物含量进行反射光谱的检测实验。本工作采用该装置对多个小麦和玉米叶片进行了 BRDF 检测, 并在不同波段下针对小麦叶绿素和玉米水分这两个生物含量进行了反射特性分布、ANIX 系数量化分析。

通过实验分析表明, 叶片双向反射特性和叶绿素以及含水量等生物量有直接相关性, 在不同的光源入射天顶角下,

叶片反射值分布均在入射天顶角附近的微小空间呈现出对称分布, 并且随着入射天顶角的增大, 各波段范围内的各向异性指数增大, 说明随着入射天顶角增大, 叶片反射值分布的方向特性更显著, 这一现象是叶片镜面效应与前向散射效应共同作用的结果。另外, 在可见光波段下, 叶片叶绿素含量越高, 其光合作用越强, 对光的吸收率增大的同时反射率降低, 故反射的各向异性相对减弱, 即反射值的方向特性减弱; 在红外波段, 作物叶片的含水量越高, 对光的吸收率增大, 导致最大反射值相对减小, 而最小反射值的变化不大, 导致其各向异性指数相对减小, 反射的方向特性减弱。

本工作主要基于光学特性测量装置对小麦和玉米叶片的双向反射分布特性进行了研究, 探究了双向反射特性与作物生物量之间的相关性。后续应进一步在光谱定量分析模型与 BRDF 相关性分析方面展开研究, 并拓展所研究的作物及作物生长情况的实验范围等。

References

- [1] WANG Xiao-long, WANG Feng, LIU Xiao, et al(王小龙, 王峰, 刘晓, 等). *Infra-Red Technology(红外技术)*, 2018, 8: 711.
- [2] DING Yong-qian, LI Yang, TAN Xing-xiang, CAO Wei-xing, et al(丁秉前, 李杨, 谭星祥, 等). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报)*, 2014, 45(6): 284.
- [3] SHEN Huai-fei, HOU Gang, ZHANG Peng-fei, et al(申怀飞, 侯刚, 张鹏飞, 等). *Hubei Agricultural Sciences(湖北农业科学)*, 2013, 52(9): 1998.
- [4] YAN Bin-yan, XU Xi-ru, FAN Wen-jie(闫彬彦, 徐希孺, 范文捷). *Chinese Science: Earth Science(中国科学: 地球科学)*, 2012, 42(3): 411.
- [5] ZHAO Juan, HUANG Wen-jiang, ZHANG Yao-hong, et al(赵娟, 黄文江, 张耀鸿, 等). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2014, 30(9): 157.
- [6] Chen Min. *Annual Review of Biochemistry*, 2014, 83(1): 317.
- [7] LI Dan, HE Jian-guo, LIU Gui-shan, et al(李丹, 何建国, 刘贵珊, 等). *Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程)*, 2014, 43(7): 2393.
- [8] HOU Xue-hui, NIU Zheng, HUANG Ni, et al(侯学会, 牛铮, 黄妮, 等). *Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感)*, 2012, (4): 30.
- [9] Alexis Comar, Frédéric Baret, Gaël Obein, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143(6): 112.
- [10] JIN Lin-xue, LI Ying-xue, XU De-fu, et al(金林雪, 李映雪, 徐德福, 等). *Chinese Journal of Agrometeorology(中国农业气象)*, 2012, 33(1): 124.
- [11] Sun T, Fang H, Liu W, et al. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2017, 233: 143.

Measurement and Analysis of Bidirectional Reflectance Distribution in Monocotyledonous Leaves

LIU Ding-yu¹, YI Jia-wei¹, ZHANG Xu-zhou¹, ZHANG Chang¹, LIU Fei^{1,2}, FANG Hui^{1,2*}, HE Yong^{1,2}

1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Key Laboratory of Spectrum Detection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310058, China

Abstract The biological content of crops is directly related to the optical properties of the crops, which are affected by the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of plants. The BRDF of plant leaves reflects the energy reflection ability of leaves in different directions and directly affects the spectral detection results of plant leaves, also one of the influencing factors of macroscopic optical characteristics of vegetation canopy. Studying the BRDF optical properties of plant leaves can effectively improve the stability and reliability of the plant NDT spectral model, thus improving the accuracy and reliability of using the crop spectral model to invert the physicochemical properties. In this paper, we first introduced the BRDF rapid acquisition method for plant leaves and the independently developed directional spectral detection instrument which can adjust the four dimensions of incident light azimuth and zenith angle, receiver probe azimuth and zenith angle to receive the reflectance data under multi-incidence and multi-reflectance angle. The leaf veins of monocotyledonous plants are longitudinally distributed, thus showing more significant anisotropy. Maize and wheat are two typical monocotyledonous crops. Then the self-developed instruments were used to obtain the reflectance spectra of corn and wheat under different wavebands, and their reflection distribution was analyzed and summarized. The spectral data and whiteboard correction data were calculated by using the BRDF calculation method described in this paper. In combination with the image mapping of spectral reflectance data from MATLAB program, the correlation of the reflectance results with two typical physicochemical parameters of leaves, chlorophyll content and water content was analyzed. After analysis, the method of using ANIX coefficient to quantitatively analyze the anisotropy of blade was discussed. The data of wheat in the visible light band and corn in the near infrared band were selected for final analysis. The results show that the fr distributions of wheat and corn in each band are symmetrical about the tiny space on both sides of the incident zenith angle, and the fr values under different incidence zenith angles are basically the same at the same band. Under the same incident zenith angle, wheat has the largest fr value at 800 nm, and the smallest fr at 680 nm. This is due to the strong absorption of chlorophyll near the 680 nm wavelength, and the strong reflectance near 800 nm. The increase of chlorophyll concentration will lead to the increase of fr value under the same band. At 1450 nm in the strong absorption band of water, the fr value of corn increases with the increase of water content. The analysis shows that the BRDF characteristics of crops can effectively reflect the changes of the main biological content of the leaves, and the calculated anisotropy index also shows a consistent change law, which provides a theoretical and practical basis for establishing a stable and reliable model for the quantitative analysis of crop spectra.

Keywords Bidirectional reflection distribution function; Bidirectional reflectance distribution function; Reflected light distribution detection; Directionality; Quantitative analysis

(Received Mar. 7, 2018; accepted Aug. 2, 2018)

* Corresponding author