植被BRDF研究进展及应用综述

摘要：用叶片的光学特性及冠层水平上近距离成像技术获取叶片生物物理化学成分时，植被双向反射分布函数（Bidirectional Reflectance Distribution Function）显得尤为重要。通过对植被叶片反射率和透射率的测量可间接研究光与植物叶片细胞之间的相互作用，更好地获取植被生长过程中物质、能量交换过程的信息，对不同生长期植被进行有效的监测和管理。为了更好地把植被BRDF应用于农业遥感等数字农业领域中，本文将针对植被BRDF的国内外研究现状、BRDF定义、测量及装置、模型分类及其在农业中的应用等环节展开叙述。

关键词：BRDF；叶片光学特性；测量装置；模型分类；应用

0 前言

许多与植被相关的物质能量交换过程都与植被的理化参数密切相关[1]，而植被BRDF又与植物生长过程中各理化参数存在关系，所以研究植被BRDF可以间接的获取植被生长过程中的物质能量交换过程信息，可以更好地了解植被不同生长阶段的营养物质元素需求，更好地为植被提供合理有效的营养配比。植物结构的建模和可视化研究是虚拟植物和计算机图形学领域的关键技术。叶片是植物的重要器官之一，所以研究叶片的三维模型对实现虚拟植物来说是一个重要和基本的工作[2]。用叶片的光学特性和在冠层水平用近距离成像技术获取叶片生化成分的测量时，双向反射分布函数显得尤为重要。

在植被二向反射模型中，植被体内唯一与光谱特征有关的是叶子的反射率和透射率[3]。通过对植物叶片反射率和透射率的测量可间接研究光与植物叶片细胞的相互作用。因此BRDF技术的研究和发展是农业遥感技术从定性走向定量的基础，是BRDF技术能否成功应用在农业遥感及数字农业领域中的关键。

1 BRDF概述

地物双向反射模型的研究是多角度遥感资料定量解译的理论基础。研究双向反射模型的最终目的，是要以遥感信息更精确地反演植被冠层更丰富的结构参数。理想的双向反射模型不仅能充分地描述植被冠层的几何结构和光学特性，而且必须能快速计算冠层的双向反射率和反演植被冠层结构参数[4]。

冠层特性的远距离遥感估测依赖叶片的方向特性。然而，基于冠层反射的叶片双向反射分布研究很少。最早，Willstatter-Stoll等[5]提出了一个近似圆弧形的叶片细胞结构以适用于光线追踪模型中叶片反射率的测量，该装置为单介质和空气组成的二维偏心光学系统，该系统在应用中可以通过引入更多的细胞间空气间隙来改善该模型以更优越的表现物理现实。考虑叶片的方向成分时，运用冠层辐射传输模型可以很明显地说明冠层反射率的区别。当模拟光被小麦冠层吸收时，表明叶片BRDF的朗伯假设相较于方位各向异性假设是成立的。Lewis[6]在一篇3D冠层模型在遥感中的应用中提到叶片方向特性研究的匮乏影响冠层反射率模拟的准确性。计算机图形领域已经深入研究过BRDF模型，许多基于物理模型的BRDF认为物质表面相同属性的微元面呈现统计学排列和给定的方向分布[7]。如菲涅耳方程[8]所描述的那样，微元面被假定成朗伯体[9]或者完全镜面反射。空间技术的迅速发展，要求遥感技术实现从定性到定量，从表面现象的描述到内在规律探求的过渡[10]。地物的二向性反射模型谱模型是实现这种过渡的重要环节。遥感能否成功应用于全球植被监测和管理主要取决于其在确定植被类型、生长期以及估算植被主要生态参数等方面的能力，而植被BRDF的研究目的就是确定植被叶片反射率和透射率与其生物物理化学参数及冠层结构的关系。

1.1国内外研究现状

双向反射分布函数可很好的描述地物的波谱特征，其中地物的波谱特征包含其材料的波谱特征及其空间结构特征两个因素。从多角度观测的BRDF值来反演地物的波谱特征和结构特征有助于对地物的识别和分类[10]。

Yuri Knyazikhin等[11]基于在近红外波段BRF（Bidirectional Reflectance Function）与植被叶片氮积累量的相关关系，并对这种关系进行了深入研究，为今后用遥感卫星数据通过对地物反射率的测量来监控植被叶面氮素含量提供一种简单有效的方法。在710-790nm波段范围内，当用遥感数据推断叶片生化组分时，如氮素含量，BRF可为结构修正提供有效地信息，进一步的分析表明叶子的表面特征是影响遥感应用的内部因素之一。双向散射分布函数（BSDF）描述的是光线在给定的入射和观测方向下经过反射和透射后的比例。Michael A. Greiner[12]等在近红外波段对糖枫和三角叶杨的光学散射特性作了研究，并在一系列离散的入射和观测角度下对这两种植物进行BSDF测量，然后对数据进行建模，其他研究人员即可将他们的任何入射方向的散射值应用到该模型中。Simonot等[13]在研究单子叶植物叶片时将方位角的各向异性及遮蔽和阴影效应考虑进去，建立了一个既有镜面反射成分又有朗伯体成分的双向反射分布函数模型。Combes[14]和Comar[15]研究表明，单子叶植物的平行血管系统会产生定向的粗糙度变化，当测量机构的方位角发生变化时，这种粗糙度的变化会影响叶片反射率。考虑这些特性的模型在描述叶片表面双向反射时需要了解冠层反射率并要以一种更健壮的方式获取叶片的生化组分信息。

Miao等[2]用PROSPECT模型计算BTDF和BRDF的漫反射量，并在可见光区域将光谱转换成RGB模型。申广荣、王人潮等[4]通过对水稻光谱数据的分析，将不同生长期的水稻特性建立多组分BRDF模型，并将模型模拟值与实际测量值进行比较分析，该结果能较好地反映水稻多组分反射光谱的角度分布特征。Xie[16]等利用多方向设备装置对玉米嫩叶、玉米成熟叶和一品红叶片的偏振反射分布规律进行了研究，对不同入射天顶角和观测天顶角下的偏振度进行计算，通过偏振度的对比分析得出偏振度随着入射天顶角和观测天顶角的增加而增加，这一点表明叶片表面的非朗伯特性随着入射天顶角的增加而更加显著，同时还得出偏振度与反射率、表面粗糙度及漫射组分有关，但并没有给出这三者是如何影响叶片表面偏振度的，同时并提出应当建立一个叶片物理偏振双向反射分布模型来分析叶片表面的偏振特性。

近年来，随着BRDF的发展和完善，高光谱遥感与双向反射模型的反演相结合，并应用日趋完善的植被高光谱算法，不仅能提供关于植被冠层更多的光谱信息，而且可以定量分析地物、植被生物物理化学过程及参数。BRDF技术的成熟为进一步准确估算植物所吸收的光合有效辐射APAR，植物的初级生产力NPP等[3]指标提供了可能，从而推进了遥感定量化的进程。

1.2 BRDF定义

目前大家较普遍被接受的BRDF的定义是Nicodemus[17]在1977年提出的，这是5个变量的函数。该式也被理解成在相同入射条件下地物向某一方向反射的强度与理想朗伯体在该方向上的反射强度之比。



2 BRDF测量及装置

双向反射分布函数表示不同入射条件下物体表面在任意观测角的反射特性，它所确定的反射特性只取决于物体表面本身的特性，因此它是有效地描述目标表面在半球空间的光辐射特性的最佳物理量[18]。BRDF的测量为植物生长过程中各生物物理化学参数与光照相互关系的确定提供了定量化的研究方法，在植被生长过程模型建立、分析、研究及植被定量遥感研究中，都具有十分重要的意义。

2.1BRDF的测量

由上述可知，BRDF是个五变量的函数（λ,θi,φi,θr,φr），这对双向反射分布函数的测量和函数表达来说不易，因此人们试图通过对地物进行全方位多角度进行BRDF值测量。BRDF的测量试图建立双向反射分布函数的某种特定子集与地物结构的某些主要特征的关系[10]。

地物结构具有明显的方向性，植被BRDF的特性研究应保证入照光源和观测方向角度的变化，因此叶片方向特性的测量是复杂的，所以需要精细复杂的仪器设备。涉及其他对象双向反射分布测量的仪器设备虽有不少文章报道，但是真正涉及植被双向反射分布测量的设备却鲜有报道。

近年来，随着国内外学者对BRDF的不断深入研究，BRDF测量装置也随之不断地发展，为进一步深入BRDF技术在各领域的应用发展奠定了良好的基础。就目前而言，国内外植被BRDF测量装置的大致分为以下两种1）光源固定，旋转样品和探测器；2）样品固定，移动光源和探测器

2.2BRDF测量装置

对植被BRDF的精确测量有助于获取作物不同阶段生长信息水平，可以对地物长势进行有效监测和营养诊断，以便更加全面有效指导农业生产。

Yasuhiro Mukaigawa等[19]使用一组椭球棱镜和投影仪研制出一个BRDF快速获取系统，该系统采用椭球棱镜和投影仪分别替代机械驱动和光源以改变入射角，因此大量的BRDF测量工作可很快的进行。此外，该系统通过调节4个角度参数不仅可以进行各向同性反射的测量而且还可以进行各向异性反射的测量。刘若凡、张宪亮等[20]搭建了可以同时测量可见和近红外两个波段的双向反射分布函数的测量系统，在可见光波段采用卤钨灯作为光源，采用光纤光谱仪作为光接收器，以10nm的波长间隔测量双向反射分布函数。在红外波段釆用碳化硅作为红外光源，釆用热释电探测器作为光接收器，采用标准板相对定标的方法测量待测样板的双向反射分布函数。王安祥，张涵璐[18]等设计了一个双向反射分布函数测定仪来对目标双向反射分布函数进行测量，该自动测量系统在可见光区域对样本进行BRDF值测量、预处理，并结合五参数半经验统计模型和遗传模拟退火算法获得样本的BRDF模型参数，进而得到样本三维空间的BRDF分布。Zhang等[21]设计了一个可在实验室条件下有效测量各向同性材料双向反射分布函数（BRDF）分布装置。该测量仪器由光纤光谱仪、三维转台、卤素灯光源和一台电脑组成。其中光谱仪在可见光范围可获得696个样本；在三维转台的控制下，观测方位角和天定角的转动分别为0~330°和0~80°；卤素灯光源可在360~1500nm波段内稳定连续高效地入射到样品表面；光谱仪和三维转台连接电脑；角度旋转和数据采集均在电脑控制下完成。该双向反射测量系统可快速准确地获取测量材料表面光谱反射特，被广泛应用在计算机渲染和目标识别中。Stephen R. Marschner等[22]提出一个新的基于图像理论的可快速全面准确测量目标表面双向反射的装置，该装置由两个摄像头，一个光源和一个已知外观形状的被测体组成，该装置也可测量各个方位角和观测角下的BRDF，通过内部连续一致性验证后，该装置测量的数据被证明是有效，结果数据显示精度能与定制的专用仪器相媲美。

3 BRDF模型

双向反射分布函数模型的建立有助于对植物叶片生理生态特性的定量分析。历年来，根据学者们研究BRDF的角度不同，BRDF的模型分类可以分为以下三种，分别是物理模型、经验统计模型和半经验模型。这三中模型各有优缺点，其中经验统计模型比较简单，适用性强，一般适用于处理物理机理不详的地物或植被双向反射分布函数的测量和应用中；物理模型涉及物理机理最为深入，各种地物、植被等相关参数的理论基础较为完善，能够很好的综合表征双向反射中相应参数的物理意义，是未来BRDF发展的主流研究方向；半经验模型则是介于以上两者之间，模型参数一般为经验参数，各参数均有一定的物理意义。

3.1 物理模型

物理模型的研究最为深入，理论基础较为完善，是未来BRDF模型的主流研究方向。其中物理模型中MAXWELL J.R.，BEARD J.等[23]提出一个较具体基于物理性质的可以测量油漆材料表面的模型，该模型考虑材料外层的局部镜面反射和内层反射光的体积散射。Westlund 和Meyer等[24]随后通过建立一个有400种材质的数据库又对上述模型的参数和函数进行优化进而简化改进了原始模型。在几何光学理论和先前的研究基础上，Cook和Torrance等[25]又开发出一个新的模型，该模型引入一种渲染领域的新材料，可很好的区分金属和非金属表面。此模型的缺点是用户不能很直观的设置参数值，而需要通过不断地实验测量来确定最优参数值。Kajiya等[26]在辉度方程的理论下基于基尔霍夫近似方法实现了用各向异性方法估算反射光强的解析式。该模型用最近切平面来简化粗糙表面，每次将计算得到的光照记录到表格，然后将表中值进行线性插值。该模型虽使用一种新的数值分析方法来研究非偏振光特性和菲涅耳定律，但没有考虑内部的相互反射影响和能量守恒定律。Poulin和Fournier等[27]考虑入射光的反射和折射，提出了适用于各向异性材料的BRDF模型。He等[28]认为双向反射分布与光的衍射和干涉等光的波动性有关，并将入射光波长、反射率指数等一些几何或者物理参数引入模型中来描述表面粗糙度。该模型涉及到光学机理的研究，虽是较为完善和复杂的物理模型之一，但没能很好地结合蒙特卡洛方法，而且也不满足互换性。The Oren和Naya等[29]提出一个可以很好的解释漫反射物体表面几何光学特性决定其外观结构的BRDF模型，该模型完善了经典朗伯体在漫射材料上的应用。The Oren和Naya等将微元面被定义为纯漫反射，除了遮蔽和阴影效应外，微元面之间的相互反射也被考虑进去，且各微元面的方向呈高斯分布。Shirley等[30]介绍了一种描述不光滑表面的BRDF模型，该模型也包含镜面反射和散射两部分，而且该模型还能很好的适应蒙特卡洛渲染算法，在处理镜面反射部分时，Shirley把与空气接触的那部分介电层当作抛光的二维平面来处理，而处理散射成分时，则假定为各向同性。Ashikhmin等 [31]使用简单和直观的参数来研究各向异性微元面，通过参数化，用户可以生成任何微元面的双向反射分布表达式，同时提出了一种基于双向反射分布函数的采样方法。

基于物理模型的BRDF是亟需的，因为这些物理模型使用几个有一定意义的物理参数来描述不同光源和观测角方向下的双向反射分布。此外，这些参数可由用户根据样品的双向反射的测量值来调整，以获得最佳的模型。

其中，根据其研究方法不同，基于物理模型的BRDF模型主要分为以下四类，分别为辐射传输模型RT（Radiative-Transfer）、几何光学模型GO（Geometric-Optical）、混合模型（GO-RT）和计算机模拟模型CS（Computer-Simulation）。下表1是对这四种模型的优缺点及适用条件的分析比较。

表1 四种模型优缺点及使用条件分析比较

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 模型 | 优点 | 缺点 | 适用条件 |
| RT模型 | 考虑多次散射，在红外和微波波段在对均匀植被较为重要 | 三维空间微分方程过于复杂、未能很好的考虑热点现象及叶片水平上BRDF各向异性 | 适于连续植被冠层发射，不适于复杂不连续的植被冠层 |
| GO模型 | 考虑了地物散射和大气散射的差异，简明清晰 | 未考虑多次散射对构成“阴影区”地物反射强度的影响及地物的非朗伯辐射性质 | 适于不连续植被及粗糙地表等RT模型难以适用的地物 |
| RT-GO模型 | 综合考虑RT模型和GO模型，使得修正的模型较为紧密 | | |
| CS模型 | 通过改变植被结构来估算不同结构特征对BRDF的影响，一定条件下可作为验证其他模型的工具 | 结构设计不足、难以理解和反演，需要较大的存储空间，计算时间较长，需预先确定概率密度函数 |  |

3.2 经验统计模型

其中经验统计模型比较简单，适用性强，一般适用于处理物理机理不详的地物或植被双向反射分布函数的测量和应用中。Minnaert[32]等第一次将经验统计模型应用于月球表面的反射率探测，该模型不仅可以应用到月球表面反射率探测，而且还适用于边缘有黑色的物体遮蔽。该模型有两个输入参数，分别是定向半球反射率和反射比k，其中k的取值范围0~2，当k=1时，该模型就是理想的朗伯体反射模型。Phong[33]等提出了一个既不遵循能量守恒定律又不遵循互换定律，适用于非朗伯表面单一输入参数的BRDF模型，该模型在本质上是Torrance-Sparrow模型的简化形式，由于其简洁性而被广泛地应用在计算机图形学领域。Blinn[34]等开发的一个基于经验统计方法的BRDF模型，该模型主要应用在DirectX和OpenGL的图形绘制中。Lewis等[35]结合能量守恒定律和互换定律并对二者特性进行深入研究，提出了一个可行的双向反射分布模型，并在模型微元面基础上提出了正态分布理论，这样进一步规范化了双向反射分布函数使其能够适用于任何光运算。在假定能量守恒的条件下，提出微元面的投影面积应该与相应的微分得到的面积一致的理论。Neumann等[36]提出了一个可以很好地结合以显示算法为基础的蒙特卡洛方法的双向反射分布函数模型。该模型适用于金属、塑料、陶瓷、逆向反光材料，甚至可用于各向异性反射。Strauss等[37]认为在模拟实体外观时前述的BRDF模型很难选择合适的参数值，因此为了描述金属及其他光亮表面的双向反射，他提出了一个可以使用户用较少的参数很直观的来描述不同类型材料特性的模型。

3.3 半经验模型

半经验模型介于以上两者之间，参数为经验参数，有一定的物理意义。前述的各类模型中考虑到材质表面各向异性的BRDF模型计算都比较耗时，Ward等[38]开发了一个可以获取样品表面反射率并用数学表达式来描述各向异性材质的反射率的设备。Schlick[39]基于微元面模型提出了一个BRDF模型，该模型满足菲涅耳方程并且可以通过设置参数来描述各向同性和各向异性材质。该模型在处理各向异质材质将其表面定义为两层，外层为镜面反射，内层为漫反射；同质表面则用单一的镜面反射或者漫反射来描述。Lafortune等[40]引入了一个多功能的BRDF模型，该模型适用于实际测量表面，同样遵循互换性和能量守恒定律，在一定程度上，该模型可以视为广义的Phong模型。

任何一种BRDF模型都有其优越性和局限性，因为BRDF模型是一个涉及五个参数的函数，鉴于模型的复杂性，因此为了得到更加精确全面的BRDF模型，学者们在相关研究中要做到的就是具体问题具体分析，在不同实验条件或应用条件下对研究对象采取不同的双向反射分布模型，以得到一个简单快速精确有效的BRDF模型。BRDF模型越精确全面，其所需要的模型参数也就越多，对计算量的需求也就越大，同时将导致后续的BRDF模型反演也越复杂困难[4]。如若选择稍微较少的模型参数，虽很大程度上可减少对计算量的要求，降低BRDF模型反演难度，但会降低模型的精确度和全面性。所以，对不同条件下的地物、植被BRDF建模过程中参数的合理选择是BRDF技术能否全面精确有效地应用在农业生产活动中的关键。

4 BRDF在农业中的应用

Alexis Comar等[7]建立并评价一个基于物理模型的BRDF来描述单子叶植物叶片BRF的方位角各向异性。通过对小麦和高粱叶片的研究实验表明，入射光垂直入射到叶片表面比平行入射到叶片表面时的镜面反射成分要高。而叶片的DHRF较依赖入射方位角，平行入射时主平面内的镜面反射成分会随着方位角的增加而得到补偿，垂直入射时则相反，并定性解释了宏观尺度上叶表面的粗糙度是由叶脉的存在导致的，即叶脉的方位角决定叶表面粗糙度，且在垂直叶脉方向时最大。谢东辉、王培娟等[16]在Cook-Torrances光照模型的基础上，将不同偏振态的菲涅耳因子耦合到模型中，继续对玉米嫩叶、成熟叶和一品红叶表面双向偏振反射率进行测量，得到了用于叶片表面偏振的二向性反射分布函数模型（pBRDF-polarimctric Bidirectional Reflectance Distribution Function）。在0.4um-14um波段内，F. Gerber[41]等提出第一个连续叶方向半球反射和透射光谱与叶水和干物质含量的变化关系，并且得出热红外光谱密切依赖于叶表面光学性质。此外测量数据还表明干燥叶片的表面透射率非零。黄健熙等[42]构建了光子在作物冠层传输的随机过程，采用蒙特卡罗（Monte Carlo）方法模拟了作物冠层BRDF，并将该模型与Andres Kuusk等[43]提出的MCRM（The Markov Chain Canopy Reflectance Model，该模型侧重于辐射传输理论的建模和应用）模型作对比，分析了叶倾角（LAD）与叶面积指数（LAI）对两种不同BRDF模型的影响，并对二者的差异给出了合理的解释，最后得出基于蒙特卡罗方法的BRDF模型可以作为其他作物冠层BRDF前向模拟的有效验证工具的结论。Jean-Baptiste Feret等[44]在400nm-2450nm对叶片生化（叶绿素a，叶绿素b，类胡萝卜素、水和干物质）和光学性质（方向半球反射率和透射率）进行了测量，并对PROSPECT模型进行校正和验证，成功地在可见光谱区域用综合数据集将植物色素分离。并提出植被体内有特定的吸收系数，这些吸收系数决定植被内部平均反射率指数。Miao[2]等采用一种新颖的生物遮蔽模型来模拟叶片外观，该生物遮蔽模型通过改变叶绿素a+b含量、类胡萝卜素含量、表皮细胞扁平度及叶片厚度四个不同的生物参数来产生不同颜色叶片。基于此模型，用户通过调节四个参数值可以很容易的产生各种植物叶片的三维模型和真实外观，并提出将来可以通过曲线图像信息来估算植被的一些生物物理化学参数，如叶绿素含量、类胡萝卜素含量等。

5 思考与展望

本文围绕近年来植被BRDF技术的国内外研究现状、BRDF定义、测量及装置、模型分类及其在农业中的应用等环节展开叙述，以期为更好地将植被BRDF技术应用到相关农业生产活动过程中做良好的铺垫。

要展开地物双向反射分布函数的研究，两方面的工作是必须要解决的，一是如何有效并快速的获取地物的双向反射分布的测量数据，二是根据已获得的数据建立相应的双向反射分布函数模型来验证地物结构与双向反射分布函数的关系[10]。只有这些模型建立起来并用实测数据加以验证后，我们才能把握的将波谱数据库用来提高遥感技术在数字农业智慧农业中的应用。

获取的地物、植被双向反射分布函数（BRDF）还可用于以下几个方面：1）了解植被不同生长阶段的营养物质元素需求，更好地为植被提供合理有效的营养配比；2）进一步研究植被的BRDF特性与植被理化等参量的关系，为用BRDF模型在大范围内反演植被的生物物理化学参数、监测不同生长时期植被长势、估产等奠定基础；3）建立BRDF数据库，以便为将来BRDF模型在遥感领域或智慧农业领域对地物、植被的识别匹配等应用。

Research and Application of Vegetation BRDF

Abstract: The BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) of vegetation was particularly significant, when the biophysical and chemical composition of leaves were acquired with the optical properties of leaves and near-distance imaging technology at canopy level. Measuring the reflectance and transmittance of leaves could indirectly study the interaction between light and plant leaves’ cells. Moreover, we had access to the information about material and energy exchange process during the vegetation growth. Meanwhile, we could monitor and manage the different growth period of vegetation effectively. In order to better apply the BRDF of vegetation to agricultural remote sensing and other fields of digital agriculture, we reviewed the domestic and foreign research present situation about BRDF, the definition of BRDF, measurement and device, classification model and their application in agriculture. We hoped that the BRDF technology of vegetation could be constructively applied to the process of agricultural production and related activities through this review.

Key words: BRDF; the optical properties of plant leaves; measuring device; classification model; application