

植被冠层多角度遥感研究进展*

高 峰

朱启疆

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008) (北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

提 要 综述了近年来关于植被冠层多角度遥感研究的最新成果, 分别讨论了二向性反射的正向模型和参量反演问题在理论研究和实际应用中的新进展。分析了卫星平台多角度遥感的应用前景及面临的困难, 指出了未来多角度遥感研究的新方向。

关键词 二向性反射 多角度遥感 植被结构反演 全球变化模型

1 前 言

自然界绝大部分的物体均具有各向异性的反射特性, 其反射率不仅与传感器的位置 (θ_v, ϕ_v) 而且还与入射光源位置 (θ_s, ϕ_s) 有关, 一般称之为二向性反射, 它可以用二向性反射分布函数(BRDF)来描述^[1]:

$$BRDF = \omega \lim_{\Omega_i \rightarrow 0, \Omega_r \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\pi} \cdot DRF \right]$$

式中 Ω 是一个给定方向的立体角; DRF 是方向反射比, 表示在相同条件下地物向某一方向反射的强度与该方向理想的漫反射强度之比。

植被冠层在可见光近红外区域的 $BRDF$ 主要由植被的三个特征所决定^[2], 即(1) 植被元素(叶、茎等)的光学及散射特征;(2) 植被元素冠层的生理状况(水状况、色素含量);(3) 单个植物及整个冠层的结构特征(叶角度和叶分布)。与传统窄视场垂直观测遥感(如 Landsat, Spot 等)方法相比, 多角度遥感提供植被的 DRF 信息, 其中包含了大量地面目标的立体结构特征信息, 因而具备求解植被特征的潜力, 进一步由此可估算植被光合作用量(PAR)及净初级生产力(NPP)等, 为全球变化模型(如全球碳循环等)提供必要的参数。此外地面目标的多角度观测有可能避免传统遥感面临的“异物同谱、同物异谱”的困难, 从而提高地面目标识别精度。

除光源 $\{a_i\}$ 、植被冠层 $\{b_i\}$ 、探测器 $\{c_i\}$ 外, 探测器接受的植被冠层反射率还受到大气 $\{d_i\}$ 、背景或土壤 $\{e_i\}$ 的影响, 这 5 个子系统决定了总的反射率^[3]: $R_i = f(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i)$

由给定的 $(a_i, b_i, c_i, d_i, e_i)$ 利用模型计算 $\{R_i\}$ 称为正向问题(Canopy \rightarrow Reflectance); 由 $\{R_i\}$ 集合使用相应的计算方法生成 $\{b_i\}$ 集合称为反演问题, 它们构成了 BRDF 研究的两个主方向。遥感所解决的是反演问题, 而反演模型的理论基础却又来自于正向模型, 正向模型对植被冠层辐射传输的理解直接关系到反演的可靠性, 因此这两个方向都是十分重要的。

至 2000 年前, 将有几颗多角度遥感卫星升空。预计 1996 年法国的 POLDER(Polarization and Directionality of Earth's Reflectance) 将搭载日本 ADEOS 平台升空; 1998 年美国

* 国家自然科学基金资助项目(49331020)。

MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)和 MISR(Multiangle Imaging Spectroradiometer)传感器搭载 NASA EOS 平台升空, 它们将提供大量的多角度、多光谱、多分辨率的图像数据, 遥感应应用将步入一个新纪元。

2 植被冠层 BRDF 正向模型研究

由植被的结构特征和光谱特征计算植被 BRDF 是遥感的正向问题。研究者从不同角度计算 BRDF 并逐渐形成了 BRDF 研究的几大流派。研究得较为全面深入的是物理模型, 主要有辐射传输 RT(Radiative Transfer)、几何光学 GO(Geometric Optical)和计算机模拟(Computer Simulation)模型, 它们具有明确的物理意义, 代表了 BRDF 模型研究的主流方向, 如 SAIL 模型、李-Strahler 模型、Kimes 的 3D 模型等。经验模型使用参数较少, 其表达式较为简单, 在实际工作中有一定的应用, 如 Walthall 模型。半经验模型兼具两者的特点, 具有一定的物理意义和较简洁的表达式, 如 Roujean 模型、Verstraete 模型, 以及 Wanner 的“核”驱动模型。限于本文篇幅, 这里仅作概略介绍, 具体可参阅文献^[1-7, 38]。

3 植被冠层反演研究

遥感的本质是反演, 通过反演算法 g 建立植被结构 $\{b_i\}$ 与 $\{R_i\}$ 、 $\{a_i\}$ 、 $\{c_i\}$ 、 $\{d_i\}$ 、 $\{e_i\}$ 的关系即: $\{b_i\} = g(R_i, a_i, c_i, d_i, e_i)$, 并进而确定光谱半球反射率及辐射吸收量、光合作用吸收率等。总的来看, 植被冠层的反演有两种方案: 一是通过多角度遥感信息进行反演; 二是用光谱信息进行反演。一般多光谱信息反演使用星下点的数据, 由于近年对全球范围变化的关心, 实际上使用的遥感数据如 AVHRR 却是多角度数据。此外星下点光谱反演还有其自身精度问题, 因此这里专辟一节对光谱变换方法进行了回顾、分析。

3.1 光谱变换

遥感发展的初期, 由于条件限制, 地面反射光谱与植被冠层参数之间的对应关系是通过光谱变换来实现的, 如常用的 Kauth Thomas(KT)线性变换和非线性的光谱植被指数。

KT 变换利用线性变换法, 对多光谱波段进行线性矩阵变换, 生成亮度、绿度、湿度分量。亮度为所有波段的权重之和, 是土壤反射的主变量方向; 绿度正交于亮度, 与绿色植被密切相关; 湿度包含了植被土壤的水份含量信息。KT 变换首先应用于 MSS₄ 个波段数据又推广至对 TM 6 个波段的计算, Jackson 等详细探讨了 KT 变换的使用及局限。

最常用的光谱植被指数(SVI)是标准化差值植被指数(NDVI)和比值植被指数(RVI)。由于光谱反射受地面土壤背景的影响, Huete 提出了一种土壤订正植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index SAVI)^[13], 以减少了土壤背景在红光和近红外波段的影响。除背景的影响外, 大气顶层(TOA)的光谱辐射还必须进行大气纠正以恢复地面植被(TOC)的辐射量。Kaufman 等最近发展了一种大气订正植被指数(Atmospherically Resistant Vegetation Index ARVI)^[14], 它利用蓝波段和红波段的辐射差值可对红波段的大气影响进行自订正。将 ARVI 与 SAVI 接合可生成同时具有校正大气和土壤背景影响能力的 SARVI。Myneni 等评价了大气对各种植被指数的影响, 指出 TOA NDVI 和 TOC NDVI 之间的关系不受叶面分布及叶片可见光波段反射特性的影响, 但对土壤反射率、太阳高度角、气溶胶厚度敏感。此外 SARVI 校正大气影响的能力不如 ARVI, 但却可以很好地校正土壤反射的影响^[15]。Roujean 和 Beron 最近使用 SAIL 模型模拟了 3 种叶倾角分布、8 个 LAI 值(0.1, 0.

3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0)、36 种不同的植被冠层和 6 种不同的土壤背景共 5184 种情况^[16], 发现目前使用的光谱植被指数受土壤背景及二向性反射影响很大, *SVI* 与光合作速率的统计关系很不明确, 进而提出这种不确定性可以通过选择合适的几何位置和新的 *SVI* 而减少。

目前全球光合作用主要是通过 AVHRR 数据来估算。由于 AVHRR 是宽视场角探测器, 自然地面目标就存在着二向性反射的影响, 从这个角度看, 二向性反射是一种“噪音”, 在计算 *SVI* 之前先要消除这种干扰, 为此要选择二向性反射模型以计算特定几何位置下的反射率^[17]。Roujean 等使用自己发展的半经验模型对 NOAA/AVHRR 数据进行了太阳和观测角的订正^[9], 计算出 *RDVI*, 发现与 *FAPAR* 具有极好的相关性。Flasse 等使用 Rahman 的半经验模型建立了 AVHRR 各种覆盖类型的二向性反射率模型^[18], 重建二向性反射数据集以消除各向异性的影响。

为剔除图像中的云体又发展了一种最大植被指数的方法(通常使用 *NDVI*), 即在连续时相图像中选取最大的植被指数作为 *SVI* 值, 以达到剔除云及噪声的目的。这种方法比较简单, 但同时也带来了新问题。由于连续时相系列图像上星下点位置的移动, 导致最大植被指数图观测角的混乱, 增加了定量分析的难度。

理论分析表明, 在一定条件下植被叶面积与 *SVI* 相关, 而光合作用率 *FAPAR* 又与叶面积相关, 因此 *FAPAR* 与 *SVI* 有着必然的联系。Myneni 等研究表明, 只有下列条件满足时, *FAPAR* 与大气层顶 *NDVI* 才表现显著的线性关系^[19]: (1) 太阳高度角小于 60° ; (2) 观察高度角在星下点左右; (3) 土壤或背景亮度稳定(*NDVI* 在 0.12 左右); (4) 550 nm 处大气光学厚度小于 0.65。 *FAPAR* 可作为生态系统生产率模型的重要参量, 计算生态系统碳交换^[20]。

3.2 模型反演

与光谱变换相比, 模型反演具有明确的物理意义, 它充分利用了多角度遥感信息, 可反演植被冠层的叶面积指数、叶倾角分布等重要参量, 但它要比光谱变换方法复杂得多, 也费时。目前由于受模型及反演方法等多种条件的限制, 用 BRDF 物理模型进行参量反演更多的是一种“艺术”, 而不是精确的科学^[20]。物理模型反演的实用化有赖于物理模型的改进, 即需要一种计算效率高而又精确的 BRDF 模型。

BRDF 反演研究的先驱是 Goel 和他的同事们, 其研究成果散见于 1983 年以后的一系列论文。他们反演了几种一维 BRDF 模型, 如 Suit 模型、SAIL 模型、Cupid 模型, 并对模型参数间的关系以及模型的敏感性进行了分析。李小文和 Strahler 将不同植被冠层视为不同的几何体, 建立了 BRDF 模型, 并用它反演了树冠大小和密度^[21]。Antyufeev 和 Marshak 发展了一种混合介质 BRDF 模型, 并成功地使用 Monte Carlo 方法进行了反演, 他们用两个波段的反射率数据反演 3 种光学和 4 种冠层结构参量。近来又出现了一种简单分析模型, 其反演主要是为气象模型提供参数, 这些模型虽没有一般模型那样具有明确的物理意义, 但却有很高的计算效率。如 Kusk 最近使用 Nilsoor Kuusk 模型计算二向性反射中的一次散射量, 再使用 SAIL 模型计算多次散射量。N-K 模型较好地解决了一次散射, 经检验发现, 新的分析模型比 N-K 模型快 50 多倍^[12]。Strahler、李小文、Wanner 等为 MODIS 产品发展了一种二向性反射的“核驱动模型”(Kernel-driven models)^[23], 他们使用了 Roujean 线性模型思想, 将二向性反射分解为各向同性反射(常量)、体散射、几何体反射三个部分的权重之各。

而每个部分可使用不同的 BRDF 模型核, 按最小误差原则组合成一个新的 BRDF 模型用以计算反照率, 其中部分模型可以进行物理参量的反演。

一般的模型反演可表述为: 给定一方向性反射测量数据集, 对应于一互不依赖模型参数集, 使得计算出的方向性反射数据与测量数据达到最佳吻合^[22], 为此定义了函数:

$$\mathcal{E}^2 = \sum_{j=1}^m u_j (r_j - r_{jm})^2$$

式中 r_j 是给定观测位置和太阳位置时的反射率值; r_{jm} 是模型计算的反射率值; n 是反射率样本数; u_j 是第 j 次测量的权重。由于反演的参数具有明确的物理意义, 因此取值范围就有一定限制, 为此又引入了惩罚函数, 定义为:

$$\mathcal{E}^2 = \sum_{j=1}^n u_j (r_j - r_{jm})^2 + \sum_{k=1}^p [(X_k - X_{kb})^2 \cdot W_k]^2$$

式中 X_k 是参数 k 的值; X_{kb} 是参数 k 的极限值; P 是限制值总数; W_k 是惩罚权重。当参数值超过预定值时, 函数将有很大的增加; 当 \mathcal{E}_p^2 为最小时, 反演参数就是地面真值的最佳估值。常用的最小值计算方法有三种: downhill simplex 方法、conjugate direction set 方法、quasi Newton 方法, 这些方法不需要为最小化再衍生函数, 可用以解决一些复杂的非线性方程。Privette 等对这三种方法进行了比较, 认为 downhill simplex 算法最精确可靠^[21]。

并非所有的 BRDF 正向模型均可反演。若经过反演不能唯一地确定植被冠层参数, 则该模型是不能反演的。Goel 发展一种简单的实验方法来确定模型的数学可反演性: 首先选择一植被冠层参数 X_i , 将 X_i 代入模型计算二向性反射量, 再将计算的二向性反射值作为无噪音的原始测量值进行反演计算, 得到反演的冠层参数 X'_i , 若经多次试验 X_i 与 X'_i 均相等, 则可认为模型在一定置信度下是可反演的。Verstraete 等认为, 一个模型是否可以反演要视该模型实际上能否反演。李小文等认为反演的成功与否, 不仅取决于模型本身, 还取决于测量数据的类型和数据量以及反演的目标^[38]。

即使经过证明模型是可数学反演的, 但由于我们所获取的测量数据中含有噪音, 这将影响到反演参数的精度, 因此反演中一个重要的环节就是要决定模型对冠层参数的敏感性。如果计算值随冠层参数的改变变化缓慢, 那么就无法对参数值进行精确计算; 另一方面如果计算值对冠层参数的变化十分敏感, 那么噪音就会导致对冠层参数的错误估算。一种理想的情况是: 反演过程对感兴趣的参数敏感, 但又不十分敏感^[3]。Privette 等研究了模型冠层参数的敏感性, 指出当 $LAI < 1.0$ 时, 土壤反射和 LAI 对模型的敏感性影响最大; 当 $LAI > 1.0$ 时叶片的光学特性对模型敏感性影响最大^[22]。

模型反演的精度还取决于所反演的参数及参数数量。对于“同形态”参数或相关项, 我们就不可能对其进行分别反演, 例如两个参数 a 、 b , 始终以 $a \times b$ 的形态出现, 那么 a 、 b 就不能分别反演。为了能提高精度或反演“同形态”参数, 必须引入一些辅助参数, 通过测量或进行间接计算。首先确定某些次要参数, 将这些参量作为已知项代入模型反演敏感的参数, 这样可大大提高反演精度。Goel 和 Thompson 使用 SAIL 模型反演, 当对所有参数进行反演时, LAI 的误差达 73%, 而若给定叶片的反射率、透过率以及土壤的反射率时, LAI 估算的误差为 1.4%^[3]。

BRDF 观测数据的获取是极为困难的, 通常由于多种外界因素的影响, 获取的观测数据并不配套或只有很少的一些配套数据, 用这些数据不足以进行目标反演, 因此需要对数据进

行“重建”^[24],即首先使用经验或半经验模型反演出较少的几个参量,再用这些模型生成冠层的多角度反射率信息,最后利用二次生成的反射率数据进行物理模型反演。“重建”过程的引入必然伴随了误差的介入,研究表明用主平面附近的数据进行重建效果较好^[25]。

模型反演是个很有吸引力却又十分棘手的难题,除了上述模型本身的问题外,在实际应用中还存有计算效率的问题。因此反演需要一种具有物理基础精确而又高效的 BRDF 模型^[20],相信随着技术的进一步发展,这将会成为现实。

3.3 专家系统

传统的方法如使用植被指数来推断地表的半球反射率、地面植被覆盖率、生物量、叶面积指数以及光合作用量等,由于环境条件和生物状况未知,因此一般是不精确的,并有一定的适用范围,它们无法处理多变的遥感数据。为此 Kimes 和他的同事们开发了一种以知识为基础的专家系统 VEG 来推断植被特征^[25],这项研究的最终目标是使用有限的方向性反射数据获取可能的地表植被生物物理参量,此外还可辅助研究者开发新的更精确的方法,并最终应用于大范围的遥感数据图像处理。VEG 将遥感技术与人工智能方法相结合,使用 LISP 语言和 FORTRAN 编写,知识库的知识来源于科技文献成果、二向性反射测量数据集以及专家经验。输入未知目标的光谱数据后,VEG 将决定使用何种最佳策略推断半球反射率,实施推理方案,同时对推断精度进行严格估算。目前,已有不少关于 VEG 的应用研究^[26,27]。李小文等也提出,多角度遥感必须基于知识的累积^[32],物理模型中参数的不确定性是有限的,多角度遥感反演的目标必须根据给定遥感信号的信息量和对不同参数的敏感程度,实行目标决策,最大限度利用有限的资源。李小文等使用先验知识和分阶段的目标决策对三种平台的数据进行了反演试验,获得了一定的成功。在专家系统方法应用的同时,还有用神经网络的方法来提取植被参量。Smith 首先对回溯神经网络进行训练^[28],用一个简单的多次散射模型估算叶面积指数,然后将这些训练好的网络应用于卫星数据,据报道估算误差小于 30%,这种方法对参数初始假设的敏感性要比其它反演方法小得多,但它最大的困难是网络权重的确定。

4 多角度卫星遥感应用

目前,对多角度遥感的应用研究还只限于地面或航空试验阶段,从试验研究阶段走向卫星平台的遥感应应用阶段,还有一段艰辛的历程。由理论到实践有两个难题要解决,一是多角度图像间的精匹配;二是多角度图像大气校正,下面分别予以讨论。

4.1 多角度遥感图像预处理

4.1.1 大气校正

太阳辐射穿过大气层到达地面,为地面目标吸收、透过及反射,反射辐射又穿透大气层到达卫星平台的探测器,因此卫星平台的遥感资料包括了地面目标的信息,同时也混入了大气干扰的信息,大气干扰主要来源于大气的散射和吸收。Kaufman 等研究发现,大气净影响随着地面目标反射率的增加而几乎呈线性减小^[29],红光波段由于大气散射是主要影响因素,因此 TOA 辐射率要比 TOC 辐射率大 2 至 10 倍(其大小取决于太阳及观察高度角);近红外波段由于气溶胶及气体吸收是主要影响因素,因而 TOA 辐射率要比 TOC 辐射率小。大气顶层红外波段的热点现象要比红光波段明显,而冠层顶的情况却相反。此外不同于红光波段,近红外波段 TOA 与 TOC 的辐射率分布特征十分相似。因此在卫星平台对地面目

标进行观察时, 大气校正是卫星遥感不可跨越的一步。

目前进行大气校正的途径主要有两条: 一是间接使用光谱植被指数消除大气影响^[14, 15, 30], 如 Kaufman 提出的大气订正植被指数 *ARVI*, 以及现广泛使用的最大标准化差值植被指数 *MNDVI*, 这些方法主要依靠图像本身的信息进行处理, 比较简单, 运算速度快, 但它无法处理单波段图像, 此外精度也较差; 二是直接计算大气的吸收和散射, 并由此而发展了许多的软件包, 如 LOWTRAN、DISORT 以及 6S 系统等。6S 系统是 Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum 的缩写^[31], 它可以模拟不同高程目标在卫星平台或航空平台上受大气干扰的状况, 可以处理均质或非均质的地面目标, 并考虑了非朗伯体的地面边界条件。

与一般的星下点大气校正方案不同, 多角度遥感图像的大气校正还要考虑另外两个不可忽视的干扰因素, 一是地面的非朗伯体特性, 一般在进行大气校正前均是先假定地面物体是朗伯体, 而多角度遥感是为了获取地面物体的非朗伯体信息, 李小文等采用了先假定地面是朗伯体, 经过大气校正后提取非朗伯体信息, 再用非朗伯体进行大气校正, 从而达到对非朗伯体物体进行大气校正的目的。二是邻近像元对非垂直观测元的影响, 这种影响随观测高度角的变化而变化, 它使得不同地物的反射对比度下降, 当邻近像元是非均质目标时, 其影响将更为复杂。如何定量地衡量和校正这两种影响尚有待进一步地研究。

4.1.2 多角度图像配准

为获取地面特定目标的二向性反射信息, 首先要对地面目标进行精确定位。定位可借助于全球定位系统(GPS)进行。Polder 在机载飞行试验中使用了 GPS, 经初步分析系统定位精度小于 100 m^[37], 而 Polder 获取图像的像元大小为 32 m, 故 Leroy 在分析时选择了 100 m 作为图像重采样的分辨率, 这样做降低了图像分辨率, 图像信息也有损失。因此相应分辨率的图像需要有相应精度的定位系统。

另一种目标定位的方法是直接对多角度遥感图像进行图像配准。目前所使用的图像配准方法有两个方案, 第一条方案是灰度相关匹配, 即利用窗口区与被测目标区之间的灰度相关性计算最大相关位置, 从而获取匹配特征点对。这种方法有两个基本问题: 一是匹配相关函数曲线较宽, 以致难以作出峰值检测; 二是图像噪声有可能掩盖相关峰值^[33]。一般认为, 图像配准的相关性测度在窗口面积和探测面积较大时便必须执行大量的计算, 失配情况与匹配情况的计算是相同的。为提高匹配速度, Barnea 和 Silverman 提出了一种序贯测试法, 这种算法的基本形式十分简单, 对于明显失配窗口, 只需要很少的计算量。一种混合方法是应用序贯测试法舍弃明显失配点, 然后对所剩下的点用统计相关性测度, 这种混合系统兼有统计相关性测度的性能优点和序贯测试的速度优点^[33]。

图像匹配的第二个方案是特征点匹配法, 即选择图像中具有不变性质的结构特征点, 如灰度局部极大值点、局部边缘、角度^[34], 并与另一角度观测图像的同类特征点作匹配。中国科学院遥感应用研究所曾利用 LOG 算子提取边缘及高曲率点作为预选控制点, 利用表面样条函数纠正图像, 取得了较好的效果。特征点匹配方法与灰度相关匹配方法相比, 其速度快, 但由于纹理边缘在提取时会有移动, 因而精度较差。

本质上讲多角度遥感图像之间的配准只能是三维空间的配准, 但目前这方面的研究还开展得很少。

4.2 AVHRR 的多角度遥感

NOAA 系列极轨气象卫星的最初设计并不是针对陆地应用的,但由于 AVHRR 可以提供多时相大范围的陆地遥感信息,近年来得到遥感界的极大重视。在目前尚无多角度卫星的情况下,AVHRR 宽视场角多时相的特点为我们提供了在卫星平台进行地面目标二向性反射研究的可能。

Cihlar 等以加拿大中部为例获取了 1988 年绿色植被峰值期连续 20 天 1 km 分辨率的 AVHRR 图像,对其进行了二向性反射的分析^[17],发现 AVHRR 的二向性反射影响取决于地面覆盖类型、光谱波段、观测位置以及大气校正的程度。他们用 Wathall 模型对二向性反射分布数据进行了最佳拟合,获得了满意的结果,并认为基于最大 NDVI 的 AVHRR 合成必须先进行二向性反射校正。Leroy 和 Roujean 也使用 Roujean 半经验模型对 AVHRR 数据进行了太阳角和观测角修正^[9]。Verstraete 等也利用自己的半经验模型对 AVHRR 数据的二向性反射进行了研究。

以上这些工作均是将 AVHRR 的二向反射特征作为“噪音”来处理的,反过来,地物的二向性反射特征又可以作为一种包含地物结构特征的“信息”,这方面的研究还较少。究其原因,一是 AVHRR 的成像机制决定了其预处理的复杂性,图像要经过严格的采样、配准、以及大气校正后才能进行二向性反射研究,每一个环节的偏差都可能导致反演的失败;二是获取的多角度遥感信息太少,即使是可获得连续时相的资料,但获取数据的观测角可能并不理想(最好在近主平面方向),而且很难保证在这连续若干天内地面植被状况不变。这就增加了在卫星平台进行多角度遥感反演的难度。但随着多角度遥感卫星传感器的升空,这些困难将成为过去。

4.3 Polder 传感器^[35~37]

法国的 Polder 传感器是专门为测量地面极化与方向性反射而设计的,计划于 1997 年搭载日本的 ADEDS 平台升空。Polder 传感器由一个 CCD 陈列组成,前面配有可旋转的滤片轮,用以切换光谱和极化方向,它共有三个波段,中心波长分别为 550、650 和 850 nm,波宽为 40 nm,每个波段可提供三个极化方向的测量值。Polder 还有一个宽视场的镜头,沿轨迹方向可达 51°,垂直于轨迹方向可达 43°。随着载体的运动,Polder 可重复获取地面反射率图像,从而得到地面单一目标的多个角度的反射率信息。至今机载 Polder 已进行过多次飞行试验,经过改进,数据质量有了较大改善。Leroy 和 Breon 对 1991 年的飞行试验数据进行了处理,根据 GPS 定位精度确定地面采样大小为 100 m,每一个栅格可提供多达 50 个观测位置的二向性反射数据,选取一些代表性的植被进行分析,可以看到典型的方向性反射特征,包括“热点”效应和镜面反射。最后,他们使用了 Roujean 的半经验模型,生成了经二向性反射校正的“标准化”反射率图像。

4.4 MODIS/MISR 传感器^[10]

美国 MODIS 传感器可提供全球范围不同分辨率(250 m、500 m、1 km)多光谱波段图像,其扫描视场角为 $\pm 55^\circ$ 。利用在不同轨道的重叠成像,MODIS 可获得地面目标的多角度测量信息。MISR 是目前唯一可提供地面覆盖多角度、连续的、高空间分辨率的 EOS 仪器,它由 9 个四波段的 CCD 相机组成,这 9 个 CCD 分别以不同的角度观测地面,从而构成了对地面目标的多角度观测。MISR 图像的扫描宽度为 364 km,在赤道重复观测需 9 天,近极地只需 2 天,受制于 EDS-AM 平台的轨道特征,MISR 重复覆盖全球需 16 天,而 MODIS 的

扫描宽度为 240 km, 重复覆盖全球需 2 天时间, 在这 16 天期间, AM 平台上的 MODIS 和 MISR 均能观察到的同一目标的最大次数由赤道的 31 次到 60° 纬度的 65 次不等。预计 MODIS/MISR 将于 1998 年升空。

5 结论与展望

随着技术的进步, 多角度遥感又一次成为全球遥感基础研究的热点。植被遥感传输机理的研究更加深入, 形成了以辐射传输、几何光学、混合模型和计算机模拟为主的几大物理模型学派, 这些模型具有明确的物理意义, 直接将植被参量及光学参量作为模型参数。经验模型旨在建立一个与观测数据较吻合的简单的数学关系, 最常用的是 Walthall 或经改进了的 Walthall 经验模型。半经验模型使用经验系数组合, 但每一组合项却有明确的物理意义, 典型的有 Roujean 和 Rahman 的模型。在这些正向模型不断完善的同时, 对植被冠层的多角度遥感反演研究也取得了一些进展, 建立了模型反演的一些理论、方法。从本质上讲, 遥感问题是一个反演问题, 而正向模型却又是反演的理论基础, 因而两方面的研究都是极有必要的。

在模型研究的同时, BRDF 应用研究也已逐步开展。目前主要的应用包括: (1) 对图像进行 BRDF 影响订正, 将图像上的每个像元订正到相同的观测位置; (2) 用模型反演植被结构参量, 如叶面积指数、生物量、全球半球反射率等; (3) 为区域或全球气候模型的边界层参数提供了一种表面-辐射散射模型; (4) 地面 BRDF 还用于大气顶层地面反射率的精确校正。

在多角度遥感卫星升空应用之前, 我们还面临许多难题, 并可能是多角度遥感近期发展的目标, 具体表现在以下几个方面: (1) 需要建立一种快速、精确、适用性广、可反演的模型。这种模型既要有物理意义, 又要简洁, 以便快速计算, 考虑到地面目标的多变性, 模型要有一种自适应的能力, 最主要的是模型能够对植物参数进行可靠反演。(2) 专家知识、背景知识、光谱知识的使用将更为广泛, 对不同的 BRDF 测量数据需要不同的反演策略, 反演的目标也可能不尽相同, 反演的方法应有所突破^[38]。(3) BRDF 模型的验证, 尽管目前 BRDF 模型众多, 但可供 BRDF 模型验证的数据却很少, 而且还存在着不配套现象, BRDF 实验科学需进一步系统化、规范化。我国可以在这方面作出自己的贡献, 一是有国家基金委支持的重点基金项目, 有可能获取较好的 BRDF 及配套数据; 二是有中国科学院长春光机所的太阳模拟实验室, 可获取较好的室内 BRDF 数据。(4) 卫星平台多角度遥感数据的预处理, 包括大气校正和几何配准。大气校正要考虑到地面非朗伯体特性和邻近像元交叉影响的情况。(5) 充分利用多光谱信息, 将多角度遥感信息与多光谱遥感信息相结合。目前的 BRDF 模型主要是针对红光和近红外波段, 反演时也是分别实施, 而没有充分利用多光谱信息的优势, 这方面研究需要投入更多的精力, 因为这种结合可为我们提供更多的关于植被本身的信息。

尽管多角度遥感困难重重, 但与传统的垂直观测遥感方式相比, 多角度遥感追求的不仅是地面目标的平面位置和大小, 而是目标在三维空间的结构特征的获取。遥感图像信息的应用将从传统的图像判读、分类, 走向目标空间结构特征的反演。定量遥感前景已呈现在科学的地平线上。

参 考 文 献

- 1 李小文, Strahler A H., 朱启疆, 朱重光. 基本颗粒构成的粗糙表面二向扫描—相互遮蔽效应的几何光学模型. 科学通报, 1993, 38: 86~ 89.
- 2 Myneni R B., Ross (Eds.) J. *Photore Vegetation Interactions*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1991.
- 3 Goel N S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*. 1988, 4: 1- 212.
- 4 Myneni R B, Asrar G, Gertl S A W. Radiative transfer in three dimensional leaf canopies. *Transport Theory and Statistical Physics*, 1990, 19: 205- 250.
- 5 Liang S, Strahler A H. An analytic radiative transfer model for the coupled atmosphere and canopy. *J. Geophys. Res.* 1995, 100: 5085- 5094.
- 6 李小文, 等. 不连续植被二向性反射的几何光学与辐射一体化综合模型初探. 环境遥感, 1993, 8(3): 161- 172.
- 7 Nilson T., Kuusk A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sens. Environ.*, 1989, 27: 157- 167.
- 8 Roujean J L, Latoy M, Deschamps P Y. Bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 20455- 20468.
- 9 Leroy M, Roujean J L. Sun and view angle corrections on reflectance derived from NOAA/AVHRR data. *IEEE Trans. Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1994, GE- 32: 684- 697.
- 10 Strahler A H, et al. MODIS BRDF/ALBEDO product: algorithm theoretical basis document version 3.2, May 15, 1995.
- 11 Kuusk A. A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 50: 75- 82.
- 12 Kuusk A. A fast invertible canopy reflectance model. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51: 342- 350.
- 13 Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, 1988, 25: 295- 309.
- 14 Kaufman Y J, Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS/MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, 30: 261- 270.
- 15 Myneni R B, Asrar G. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 47: 390- 402.
- 16 Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51: 375- 384.
- 17 Cihlar J., et al. AVHRR bidirectional reflectance effects and compositing. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 48: 77- 88.
- 18 Flasse S P, Verstraete M M, Meyer D J. Inverting a bidirectional reflectance model to remove directional effects in AVHRR data, *proc. 6th European AVHRR data user's meeting*, 1993, Belgirate, Italy.
- 19 Myneni R B, Williams D I. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 49: 200- 211.
- 20 Myneni R B, et al. Optical remote sensing of vegetation modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sens. Environ.*, 1995, 51: 169- 188.
- 21 Li X, Strahler A H. Geometrical Optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans. Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1985, GE- 23: 705- 721.
- 22 Privette J L, et al. Invertibility of a 1-D discrete ordinates canopy reflectance model. *Remote Sens. Environ.*, 1994, 48: 89- 105.
- 23 Wanner W, Li X, Strahler A H. On the derivation of kernels for kernel driven models of bidirectional reflectance. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 21077- 21089.
- 24 Goel N S, Grier T. Estimation of canopy parameters of row planted vegetation canopies using reflectance data for only four view directions. *Remote Sens. of Environ.* 1987, 21: 37- 51.
- 25 Kimes D S, Harrison P R, Ratcliffe P A. A knowledge based expert system for inferring vegetation characteristics. *Int. J. Remote Sens.* 1991, 12(10): 1987- 2020.
- 26 Kimes D S, Harrison P R, Ratcliffe P A. Learning class descriptions from a data base of spectral reflectance with multiple

- view angle. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1992, 30: 315– 325.
- 27 Kimes D S, Harrison P A, Harrison P R. Extension of off nadir view angles for directional sensor system. Remote Sens. Environ. , 1994, 50: 201– 211.
- 28 Smith J A. LAI inversion using a backpropagation neural network trained with a multiple scattering model. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1993, GE– 31.
- 29 Kaufman Y J. The atmospheric effect on remote sensing and its corrections. In theory and application of optical remote sensing, (Asrar G. Ed.) Wiley, New York, 1989. 336– 428.
- 30 Tanre D, Holben B N, Kaufman Y J. Atmospheric correction algorithm for NOAA– AVHRR products: theory and application. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1992, 30(2) .
- 31 6S user guide, NASA Goddard space Flight Center, 1994.
- 32 李小文, 高峰, 王锦地, 朱启疆. 遥感反演中参数的不确定性与敏感性矩阵. 遥感学报, 1997(1): 1~ 14.
- 33 [美] W. K. 普拉特著, 数字图像处理学. 北京: 科学出版社, 1984. 334~ 347.
- 34 徐建华编著. 图像处理与分析. 北京: 科学出版社, 1992. 290~ 308.
- 35 Deuze J L, Breon F M, et al. Analysis of the POLDER airborne instrument observations over land surface. Remote Sens. Environ. , 1993, 45: 137– 154.
- 36 Deschamps P Y, Breon F M, et al. The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , 1994, 32: 598– 615.
- 37 Leroy M, Breon F M. Angular signatures of surface reflectance from airborne POLDER data. Remote sens. Environ. 1996, 57: 97– 107.
- 38 李小文, 王锦地著, 植被光学一个模型与植被结构参数化, 北京: 科学出版社, 1995.

THE ADVANCE IN MULTI-ANGLE REMOTE SENSING OF VEGETATION CANOPY

Gao F eng

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Zhu Q ijiang

(*Beijing Normal University, Beijing 100875*)

ABSTRACT

Multi angle remote sensing is proposed on the anisotropy characteristic of ground objects. To compare with traditional method of perpendicular remote sensing, it is provided with the capability of obtaining 3D structure of ground object and represents the new aspect of quantum remote sensing. This paper introduces the latest achievements in multi angle remote sensing of vegetation canopy and discusses the theory and application on forward model and backward model (inversion) of bidirectional reflectance. Finally, the present difficulty and future progress of multi angle remote sensing are analysed.

Key Words: Bidirectional reflectance; Multi angle remote sensing; Inversion of vegetation structure; Global change model

(收稿日期: 1996- 01- 08; 改回日期: 1996- 06- 24)