

波谱模拟模型在遥感中的应用

胡 妮^{1,2,3}, 刘思含^{1,2,3}, 胡争光^{1,2,3}

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

[摘要] 波谱模拟模型在遥感应用中至关重要, 但是传统的波谱模拟模型应用主要是基于单机版的应用, 模型模拟的结果不能广泛共享, 并且利用波谱数据库的支持也十分有限。试图突破这种局限, 以波谱模拟模型在遥感中的应用为主线, 参照知识库系统建设的理论, 采取 B/S 的网络结构, 充分利用波谱数据库和先验知识库的强大支持, 建立分布式波谱模拟模型的应用系统, 通过一定的规则和算法自动从波谱数据库和先验知识库中调用数据和知识作为模型的输入参数; 对于模拟的结果, 可以根据用户意愿决定是否录入波谱数据库, 作为知识库系统的知识获取机制, 为用户进行遥感应用提供了一个有力的支持平台。

[关键词] 波谱模拟模型; 波谱知识库; 波谱数据库; 模型应用

[中图分类号] P23 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2005)03-0082-06

[作者简介] 胡妮(1981-), 女, 四川乐山人, 硕士研究生, 从事遥感与地理信息系统研究。

遥感地面测量总是受到传感器、大气等诸多因素影响, 多数情况下测出的波谱数据不可能直接满足用户要求, 所以, 波谱模拟模型^[1]采用计算机模拟和遥感物理模型方法, 在空间和时间尺度上外延遥感地面测量, 预测任意视场、光照和观测以及大气条件下的地物波谱曲线, 供用户参考。波谱模拟模型的应用, 使得系统可以根据用户查询出来的波谱曲线类型, 提取出能计算这种波谱曲线类型的工具模型供用户选择, 用户根据需要选择一种模型计算出自己想要查看的参数, 模型进行计算前要进行参数准备。可见, 波谱模拟模型无论对于遥感技术研究还是应用发展都具有重大意义。笔者主要论述波谱模拟模型在遥感中的应用, 列出中国典型地物标准波谱知识库作为波谱模拟模型应用于遥感的实例, 分析波谱模拟模型在遥感系统中地位及具体实现方式。

1 研究进展

多年来, 各国科学家对波谱模拟技术研究做了

大量工作, 根据研究所得的植被与光辐射之间相互作用的机理, 建立了几十种不同的数学模型。波谱模拟模型大体上可以分为以下4类:

1.1 光子追踪模型

该模型需要对叶子内部结构和光学常量(细胞壁、细胞质、色素、气孔等)进行详细描述。Allen 等在 1973 年通过研究光在整片叶子内部的传输来模拟叶片的反射^[2]; 同年 Kumar 和 Silva 分别指出用 Allen 的方法会低估近红外波段的反射率, 高估透过率, 可以通过加入细胞质和叶绿体来解决^[3]; 1987 年, Brakke 和 Smith 通过研究细胞间隙对空气的折射来模拟枫树叶片的的光学特性^[4]; 1997 年 Brakke 和 Rokne 提出了 ABM 模型(Algorithmic BDF Model), 利用 3D 法表示叶片结构来研究光子在叶片内的传输^[5]; Fovaerts 等在 1998 年提出 RAYTRAN 模型, 用三维的叶片代替二维的叶片成功地模拟了双子叶植物的光学特性^[6]; 2001 年 Ustin 利用 RAYTRAN 模型来计算叶片的吸收率, 并建立了一个简单模型研究光合速率与入射光强度的关系^[7]。

1.2 N 通量模型

N 通量模型是在 KM 理论上发展起来的, 是对辐射传输模型的简化, 它把叶片看作是具有散

[收稿日期] 2004 08 05

[基金项目] 国家 863 项目(2002AA130010)

射和吸收特性的厚片。Allen 和 Richardson 于 1986 年应用了二通量的 KM 理论来研究杆被子元素及冠层的辐射传输特性^[8]; 1991 年, Yamada 和 Fujimura 提出把叶片分为 4 层(上表皮层, 栅栏薄壁组织, 海绵组织, 下表皮层)来研究植被叶片的光学特性^[9]; 1993 年 Conel 等应用二通量模型研究水、蛋白质、木质素、纤维素、淀粉对叶片中红外反射影响^[10]; Fukshansky^[11] 于 1991 年, Martinezv 于 1992 年, Richter 和 Fukshansky 于 1996 年分别应用了四分量模型来计算植被叶片的散射系数、吸收系数等光学参数^[12]。

1.3 平板模型

该模型是 Allen 等于 1969 年首次提出的^[13], 它将植被看作一层紧密且透明的平板, 表面粗糙, 可以看作朗伯体, 适用于具有紧凑叶片的植物; Allen 于 1970 年对其平板模型进行了改进^[14], 假设每片叶是由 N 层叠加而成的, 有 $N-1$ 层气体窗分开, 从而把它扩展到非紧凑叶片; Jacquemoud 和 Baret 于 1990 年引入入射光线是以 Q 立体角内的入射方向穿透叶片的, 对 ALLEN 平板模型进行了改进^[15]; Jacquemoud 等于 1996 年引入了干物质, 从而代替了蛋白质和木质素, 纤维素, 对 PROSPECT 模型进行了改进^[16]。

1.4 随机模型和其他辐射传输模型

Suits 于 1972 年提出了 SUIT 模型^[17], 假设植被是水平均匀冠层, 考虑了冠层反射与植被冠层的结构特征和光谱特征及其组分如叶、杆、茎等相联系; Tucker 和 Garatt 于 1977 年利用马尔可夫链来模拟辐射传输过程, 建立了 LFMOD1 随机模型^[18]; Verhoef 于 1984 年引入了冠层叶面倾角的概念对 SUITS 模型做了扩充, 建立了 SAIL 模型^[19]; Dawson 等于 1997 年基于辐射传输模型提出了 LIBERTY 模型来预测松针的光谱响应^[20]; Maier 等于 1999 年在对 LEFODI 模型进行改进的基础上建立了 SLOP 模型^[21]; Verhoef 于 2002 年通过引入 $N+2$ 流的方法将 SAIL 模型进一步改造, 从而提高了在近红外波段模拟的精度。

2 应用现状

目前, 利用波谱模拟技术成型的软件有 DSSAT, 它是在农业科技转换国际 Benchmark 网站的 IBSNA T(International Benchmark Sites Net

work for Agrotechnology Transfer) 项目的赞助和指导下进行, 由美国国际开发署授权夏威夷大学实施的农业技术转移决策支持系统。在 DSSAT 3.5 中含有 16 种农作物模型, 也就是 CERES 模型系列: 大麦、玉米、谷子、高粱、小麦; CROPGRO 模型系列: 大豆; SUBSTOR 模型系列: 马铃薯。DSSAT 也是目前应用最广泛的模拟系统, 但其运行是在 DOS 系统下进行的, 由用户输入所需要的参数, 然后系统以输出文件的方式提供用户以结果。输入的参数格式较为规则化, 用户必须按顺序进行键入, 没有模糊的模拟, 所需要的参数必须全部被输入, 对参数的要求较高。

由北京师范大学等多家单位合作建成的中国典型地物标准波谱库中, 在前人的基础上, 将波谱模拟模型与强大的先验知识库结合, 系统可以根据少数输入的参数再根据强大波谱知识库中所存入的先验知识确定其他未知的参数。在用户没有提供完整参数的情况下, 系统仍能提取先验知识库中的相应数据作为输入参数, 大大增加了系统的可用性, 降低了对使用人员的专业要求, 使其应用范围更加广泛。该系统功能的实现为增进对像元尺度遥感信号的理解, 为推动定量遥感的发展, 促进海量遥感数据的广泛应用以及中国遥感技术和遥感应用的产业化发展提供科学的技术支撑。

3 对策

前面提到地面遥感测量遇到的诸多困难, 因此体现了波谱模拟模型的至关重要性。波谱模拟模型采用计算机模拟和遥感物理模型方法, 在空间尺度和时间尺度上外延遥感地面测量, 预测任意视场、光照和观测以及大气条件下的地物波谱曲线, 供用户参考。正是由于波谱模拟模型的应用, 使得系统可以根据用户查询出来的波谱曲线类型, 提取出能计算这种波谱曲线类型的工具模型供用户选择, 用户根据需要进行一种模型计算出自己想要查看的参数, 模型进行计算前要进行参数准备, 方便了用户利用波谱模拟模型进行遥感应用研究。

4 波谱模拟模型原理

目前, 国际上发展得比较成熟的模型主要是 PROSPECT 模型与 SAIL 模型, 它们在不同尺度

上完成不同波长的波谱模拟。PROSPECT 模型是基于 Allen 的“plate model”(平板模型)的,描述植被叶片光学特性包括反射率和透射率的辐射传输模型。其目标是建立叶片反射率(或透过率)与生化含量的关系。模型的原理是将叶片看作一层紧密的平板,并假设每片叶是由 N 层同性层堆叠而成,由 $N - 1$ 层气体空间隔开,第一层接收的是 Ω 立体角内的入射光线(入射角为 α):令 ρ_α 和 τ_α 为它的反射率和透过率。在叶子内部,假设光通量是各向同性的:令 ρ_{90} 和 τ_{90} 为内部每层的反射率和透过率。则整个 N 层叶片的反射率和透过率为

$$R_{N,a} = \rho_\alpha + \frac{\tau_\alpha \tau_{90} R_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1,90}}$$
$$T_{N,a} = \frac{\tau_\alpha T_{N-1,90}}{1 - \rho_{90} R_{N-1,90}}$$

SAIL 模型是在 Suits 模型基础上由 Verhoef 和 Bunnik 扩充而得,在连续、水平均匀冠层下,通过输入日期、波长、叶片反射率、叶片透射率作为参数,能够计算出不同波长作物的反射率,此时得到的是混合目标的反射率,不仅仅是叶片尺度上的,也是冠层尺度上的。其原理为对于连续和水平均匀冠层,假定叶面的倾角为方位随机分布,对此叶倾角密度函数

$$f(\theta_L) = 2\pi g(\theta_L, \phi_L) \sin \theta_L$$

在 SAIL 模型的运行程序中,将冠层的叶倾角分布离散为一个矩阵,矩阵中包括 13 个倾角 θ_L 的倾斜频度, θ_L 分别位于 $0^\circ \sim 10^\circ, 10^\circ \sim 20^\circ, \dots, 70^\circ \sim 80^\circ, 80^\circ \sim 82^\circ, 82^\circ \sim 84^\circ, \dots, 88^\circ \sim 90^\circ$ 这些区间的中心点,即用 $\theta_L = 5^\circ, 15^\circ, \dots, 75^\circ$ 和 $81^\circ, \dots, 89^\circ$ 的频度 $F(\theta_L)$ 近似表示 LAD,所有频度的总和为 1。这样对 $80^\circ \sim 90^\circ$ 的区间提高了分割精度,是由于特征系数 K , 散射系数 u, v 和 w 在观察天顶角 θ_0 接近于天顶时,在 θ_L 的这个区间,对 LAD 的变化特别敏感。特征系数和散 v 射系数用下式计算

$$z = \sum_{i=1}^{13} F(\theta_{Li}) z(\theta_{Li})$$

式中: θ_{Li} 为第 i 个区间内的中心叶倾角。

通常在作物生长模型^[22~24]应用中,不同冠层下的同种叶片的波谱曲线是不同的,这里重点研究的是不同种类各作物的波谱曲线,故着重是区分不同的类型。具体是首先按照作物生长模型^[25~27]及植被统计模型计算与作物波谱相关的各参数,将之作为初值,代入遥感物理模型进行反演。其中,这

是一个反复迭代的过程,最后得到的参数来进行波谱的模拟。同样,这里可以与遥感影像进行结合得到混合像元的波谱曲线,首先需要经大气纠正及几何纠正的遥感影像,将混合的像元进行分解如此得农作物的冠层波谱,再根据作物生长情况及时间选择合适的冠层波谱模型反演植被参数。得到的作物参数代入叶片波谱模型如文中介绍的 Prospect 模型,可得到叶片波谱,再根据遥感图像本身的成像条件,加之地理空间数据库,即可得到混合像元波谱。

5 应用实例

5.1 波谱库组成与体系结构

在中国典型地物波谱库中(图 1)^[28,29],波谱模拟模型库是波谱库的重要组成部分,同时也是核心部分,通过波谱模拟实现了波谱数据在时间和空间上的扩展,从而在典型地物波谱与图像数据积累的基础上,以波谱数据的知识化、定量化和实用化为目标,完成典型地物波谱、环境参数间的相互配套,为定量遥感的理论与应用研究提供一个系统化和专业化的遥感波谱科学实验平台。该平台将提供集基础数据与模型发展于一体的遥感基础研究实验环境;同时该系统也为广大用户提供能覆盖中国主要地物从可见光、红外到微波波段的典型地物标准波谱知识库,在网络化的服务体系下达到国家层次的数据共享。典型地物波谱知识库的体系结构设计为一个多层的分布式环境,最基本的形式可以

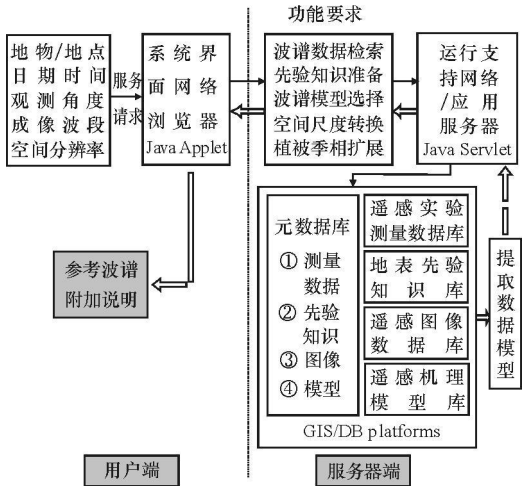


图 1 波谱知识库组成结构

Fig. 1 Frame of spectrum knowledge database

被描述为一个逻辑上的 3 层计算模型。这个基本的 3 层系统模型包括客户层、应用逻辑层(含 WEB 服务器和各类应用服务器群)、数据库层^[28, 29](数据库服务器群), 能够提供网络化的服务环境, 集成标准地物波谱数据库及其相应的知识模型库和功能算法的数据库系统。波谱知识库包括典型地物标准波谱测量数据库、典型遥感图像数据库、先验知识数据库、遥感模型库和建模工具。整个知识库系统的体系结构如图 2。

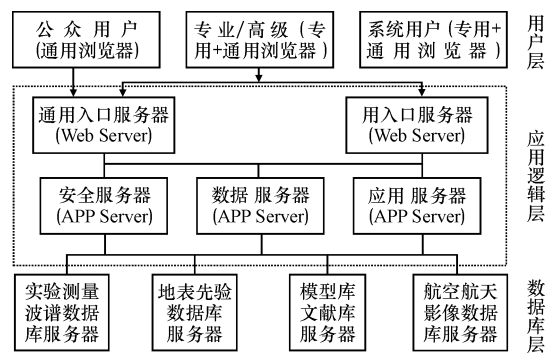


图 2 系统体系结构
Fig. 2 System architecture

5.2 波谱库中波谱模拟模型库的应用

中国典型地物波谱库系统, 第一次将地面波谱数据与遥感图像和遥感模型科学有机地联系在一起, 以实现遥感基础研究和遥感应用的结合; 波谱知识库中的地物波谱数据严格按照新规范标准进行采集和入库, 同时配套采集相关目标环境参数, 注重数据质量控制和从波谱数据中的知识挖掘; 充分考虑光谱测量尺度与遥感像元尺度的多样性, 在尺度转换理论指导下, 完成材料波谱-端元波谱-像元波谱的转换, 从根本上解决地物波谱数据与遥感图像数据脱节的现象; 通过从可见-近红外-热红外-微波的典型地物多谱段测量, 结合多时相、多角度的分析, 为定量遥感和目标的精细识别提供充分的知识基础。管理员可以进行模型的导入、查询和管理操作, 用户则可以进行下载、查询和运行操作。运行模型是用户应用的最主要功能, 对于参数的准备有从波谱数据库中提取、自己准备和利用经验值 3 种方式, 大大方便了用户使用, 对于运行结果则以曲线图形和文件下载 2 种方式获取。对于一些未涉及版权的模型可以提供下载服务, 供有兴趣的用户进行研究学习。查询功能是为方便用户更快捷获取模型信息, 以进一步使用管理或运行的操作。模型导入功能是利用系统提供的接口, 从

远程即可将模型自动上传并部署到系统中, 而不必在服务器端手工进行。管理功能包括模型的删除、信息修改和审核等几个方面的模块。

典型地物波谱库的波谱模拟是面向遥感应用的, 其波谱模拟流程如图 3。用户交互提出地物、地点、日期及时间、观测角度、成像波段、空间分辨, 然后由知识库根据这些用户提供的参数及要求, 选择合适的模型。模型的输入/输出参数归为 3 种类型: 数字(N)、字符(C)和图像(I)。其中, 像元波谱的模拟模型的选择依赖以下 3 个要素:

5.2.1 观测角度

观测角度亦即影像的成像角度与太阳的照射方向, 尤其是对一些分辨率较低的遥感影像, 其每个像元覆盖范围较大, 所以角度不可忽视, 如 MODIS 及 AVHRR。

5.2.2 成像波段

成像波段可见光、近红外、热红外和微波波段各有不同性质应分别处理, 也就是选择不同的遥感物理模型。

5.2.3 建模尺度

遥感模型的建模空间尺度从叶片、冠层到混合像元, 有多个层次, 有些是机理, 有些是经验的。

模型选定后代入: 时间扩展的植被参数; 空间扩展的地表参数; 波谱实测数据, 即可预测模拟用户给定条件下的地物波谱, 最终提供给用户波谱模拟曲线及说明文件。

波谱库中地理空间数据库, 其中包括有数字地形模型数据、土地利用土地覆盖数据以及土壤图, 要将各种数据在时间及空间上进行匹配。为了实现不同体系下的数据转换, 元数据的建立是必不少的。建立了遥感数据元数据和模型元数据后, 基于元数据的遥感模型驱动机制是必然的选择。基于元数据的遥感模型库驱动机制如图 2, 其中创建智能化的模型运行管理模块是联系用户、数据库、模型库的关键。模型运行管理模块主要完成以下几方面功能: 确定匹配用户输入的模型; 数据的提取和格式转换; 调用模型算法模块运行; 生成输出格式和界面。模型运行管理智能体从模型元数据库中选择匹配用户输入的模型并确定模型输入、输出参数及格式, 向数据管理模块发出数据请求并生成模型运行要求的格式, 从模型库中调用相应模型运行, 根据模型元数据生成输出结果和输出界面。这样就实现了数据与算法程序的分离, 使模型库与数

- [12] Richter T, Fukshansky L. Optics of a bifacial leaf: 1. A novel combined procedure for deriving the optical parameters [J]. Photochemistry and photobiology, 1996, 63(4): 507~516.
- [13] Allen W A, Gausman H W, Richardson A J. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf [J]. Journal of the Optical Society of America, 1969, 59(10): 1376~1379.
- [14] Allen W A, Gausman H W, Richardson A J. Mean effective constants of cotton leaves [J]. Journal of the Optical Society of America, 1970, 60(4): 542~547.
- [15] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34: 75~91.
- [16] Jacquemoud S, Ustin S L, Verdebout J. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3): 194~202.
- [17] Suits G H. The calculation of the directional reflectance factor of a vegetative canopy [J]. Remote Sensing of Environment, 1972, 2(2): 117~125.
- [18] Tucker C J, Garratt M W. Leaf optical properties as a stochastic process [J]. Applied Optics, 1977, 16(3): 635~642.
- [19] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling the SAIL model [J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 125~141.
- [20] Dawson T P, Curran P J, Plummer S E. LIBERTY Model linking the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 50~60.
- [21] Maier S W, Lüdeker W, Günther K P. SLOP: a revised version of the stochastic model for leaf optical properties [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3): 273~280.
- [22] 谢云, James R Kiniry. 国外作物生长模型发展综述 [J]. 作物学报, 2002, 28(2): 190~195.
- [23] 杨京平, 王兆骞. 作物生长模拟模型及其应用 [J]. 应用生态学报, 1999, 10(4): 501~505.
- [24] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物模型区域应用研究进展 [J]. 气象科技, 2002, 30(4): 193~203.
- [25] Guerif M, Duke C. Calibration of the SUCROS emergence and early growth module for sugar beet using optical remote sensing data assimilation [J]. European Journal of Agronomy, 1998, 9(2~3): 127~136.
- [26] Wiegand C L, Richardson A J, Jackson R D. Development of agrometeorological crop model inputs from remotely sensed information [J]. IEEE Trans Geosci Remote sens, 1986, 24(1): 90~97.
- [27] Guerif M, Laumay M, Duke C. Remote sensing as a tool enabling the spatial use of crop models for crop diagnosis and yield prediction [A]. 2000, IGA RSS2000 [C]. Hawaii, US, 2000. 24~28.
- [28] 吴金华, 祝国瑞. 空间数据仓库的认知过程 [J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 67~70.
- [29] 邹逸江, 吴金华. 空间数据仓库的结构设计 [J]. 地球科学与环境学报, 2003, 25(1): 66~69.

Application of spectrum simulation model in remote sensing

HU Ni^{1,2,3}, LIU Si han^{1,2,3}, HU Zheng guang^{1,2,3}

(1. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The application of spectrum simulation model in remote sensing is extremely important, whereas in the traditional way, this model was used normally in a single computer. Its simulated results can hardly be shared with others and it can be limited to be supported using spectrum database techniques as well. As a clue of the application of the model in remote sensing, the paper tries to break through this limitation, and constructs the distribution application system based on the spectrum simulation model, referenced to the theory of constructing knowledge database system, which is adopted Browser/Client network structure. The built distribution application system is enough supported by the spectrum database and prior knowledge library. It can extract and transfer the data and knowledge from these two databases as an input parameter for the model automatically with some regulations and algorithms. For the results of simulation, user can decide whether or not to use the spectrum database as a knowledge capture mechanism of knowledge library system. This system provides a strong software platform in remote sensing application for the users.

Key words: spectrum simulation model; spectrum knowledge library; spectrum database; model application

[英文审定: 马智民]