

植被遥感辐射传输建模中的异质性研究进展

柳钦火^{1,2,3}, 曹彪¹, 曾也鲁¹, 李静¹, 杜永明¹, 闻建光¹, 范渭亮¹,
赵静¹, 杨乐¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049;

3. 电子科技大学 资源与环境学院, 四川 成都 610054

摘要: 遥感辐射传输建模是在研究电磁波与地物相互作用机理的基础上, 建立遥感观测信号与地物属性、地物结构和观测几何等参量之间定量关系的模型, 是理解遥感观测信号和反演地表参量的理论基础。近年来空间异质性问题引起了定量遥感领域的高度关注, 高分辨率卫星及激光雷达等数据的日益丰富给研究空间异质性提供了有力支撑。在异质性植被场景遥感辐射传输建模过程中, 像元内部的组分比例、3维结构、空间格局以及端元边界处的阴影效应与散射过程等方面是需要重点考虑的因素。本文在总结非均质地表空间异质性描述的基础上, 分别总结了植被二向性反射与热红外辐射方向性建模研究的发展历程, 以及非均质地表植被遥感建模研究的最新进展, 并指出了地表遥感建模中研究异质性问题的发展方向。

关键词: 空间异质性, 辐射传输建模, 混合像元, 3维结构

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A

引用格式: 柳钦火, 曹彪, 曾也鲁, 李静, 杜永明, 闻建光, 范渭亮, 赵静, 杨乐. 2016. 植被遥感辐射传输建模中的异质性研究进展. 遥感学报, 20(5): 933-945

Liu Q H, Cao B, Zeng Y L, Li J, Du Y M, Wen J G, Fan W L, Zhao J and Yang L. 2016. Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 933-945 [DOI:10.11834/jrs.20166280]

1 引言

遥感辐射传输建模是在研究电磁波与地物相互作用过程机理的基础上, 建立描述遥感观测信号与地物属性、地物结构和观测几何等参量之间的定量模型, 是模拟理解遥感观测信号和定量反演地表参量的理论基础(柳钦火等, 2010)。植被可见/近红外二向性反射、热红外辐射模型包括辐射传输、几何光学、辐射传输—几何光学混合和计算机模拟模型等不同的类型(李小文和王锦地, 1995)。具有解析形式的植被机理模型发展历程经过了4个发展阶段: 体现在对植被结构的描述上, 从理想假设到逐渐逼近于真实地表的过程, 包括连续植被模型、几何光学模型、五尺度模型、随

机辐射传输模型。

近年来, 由于地表空间异质性导致的参数反演误差引起了高度关注。例如, 早期的植被参数反演模型多采用1维辐射传输模型, 忽略了植株空间分布的聚集效应, 因此Chen等人(2005)提出聚集指数的概念, 并生产出全球聚集指数产品, 用于对原有的参数产品进行聚集效应的校正。Yao等人(2008)对行播作物在不同生长期, 采用行播模型与S连续植被模型SAIL(Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves)进行叶面积指数反演的误差分析; 并指出在作物生长初期, 使用SAIL模型进行反演误差较大。Garrigues等人(2006)系统分析了由于地表空间异质性导致的叶面积指数反演误差, 并基于线性光谱混合的假设, 提出基于泰勒级数的尺

收稿日期: 2016-07-07; 修订日期: 2016-07-17; 优先数字出版日期: 2016-07-24

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973计划)(编号: 2013CB733401); 国家自然科学基金(编号: 41501366)

第一作者简介: 柳钦火(1968—), 男, 研究员, 研究方向为遥感辐射传输机理与建模、地表参数多源遥感反演与同化等。E-mail:

liuqh@radi.ac.cn

度纠正方法。徐希孺等人(2009)和范闻捷等人(2010)指出地表的空同异质性与反演模型的非线性,是导致叶面积指数反演产生尺度效应的根本原因。

Kolasa和Rollo(1991)认为,如果目标参量在3维空间中存在变化,则存在空间异质性。异质性可以发生在不同的尺度上,比如景观级的类型变化与斑块或端元级的密度变化。空间异质性问题在景观格局分析和地统计学领域受到广泛关注,近年来也引起了定量遥感领域的高度关注(Jacob和Weiss, 2014; Li等, 2013; 李德仁等, 2012)。这里的异质性主要包括类型的变化与密度的变化(Wu等, 2013),或被Garrigues等人(2006)解释为空间结构—类型层次和空间变异—密度层次。观测手段(高分辨率卫星、LIDAR)的日益丰富给正向建模考虑异质性提供了更多的可行性,高分辨率遥感数据被作为先验知识引入,用以辅助描述像元的非均质性,像元内部的不同组分比例、空间分布格局、植被冠层的3维结构以及阴影效应等方面被重点考虑。当前遥感反演的一个重要趋势是,充分利用高分辨率数据提取的结构信息作为先验知识,用以描述像元内部在亚像元级的异质性,最终支持中低分辨率的参数反演。

本文在总结分析非均质地表空间描述的基础上,分别总结了植被二向性反射、以及热红外辐射方向性建模研究发展历程,以及近期非均质地表异质建模研究的最新进展。

2 非均质地表空间异质性描述研究进展

2.1 景观生态学中的空间格局指数

景观格局是指的景观要素在空间上的排列,景观要素的组成和构型是其基本特点。组成是要素的类型以及各类型所占比例,而构型是空间排列方式。景观格局分析的目的就是从看似无序的景观要素镶嵌图中发现潜在的有意义的规律,并确定产生和控制空间格局的因子和机制(陈利顶等, 2008)。

景观空间格局分析自从20世纪80年代被提出以来在景观生态学的研究中一直占据着重要的地位,但是由于其一直停留在景观格局特征的描述方面,未能深入研究格局指数是否能够真正地代

表所谓的格局,未能深入研究其对生态过程的表达能力,在景观生态学领域越来越受到非议(李秀珍等, 2004)。越来越多的格局指数被提出(目前已提出超过100个指数),但是相互之间具有较高的相关性,更像在玩数理统计的游戏。

相对简单的指标如面积、周长、板块形状等多直接来自于数理统计,而多样性、优势度、蔓延度等指标则来源于信息论。这些指标以景观空间结构的几何特征为基础,对复杂的现象进行简单的定量的描述,他们对空间结构的表达都过于抽象,具有一定的局限性。任何一个指标所描述的空间格局特征都只是其众多特征中的一个方面,目前还没有一个可以全面概括所有特征的指标,针对不同的应用目的使用指标集合来表达整体的特征是一种可行的解决方案,但是目前较少被研究(曹彪, 2014)。

2.2 空间异质地统计学中的相关方法

(1)局部方差法。局部方差可以用来描述场景中观测目标的大小和像元空间分辨率之间的关系,采用滑动窗口内的局部方差作为图像异质性的表征因子(Woodcock和Strahler, 1987)。当观测尺度在目标范围内,局部方差变化较小;当观测尺度接近目标范围时,由于像元内部的异质性增强,局部方差会明显增大;当观测尺度大于目标范围时,像元内部包含多个目标,局部方差又会回落。局部方差的峰值点就是能够与研究目标相匹配的空间分辨率的取值依据。

(2)半方差函数。半方差函数是用来描述不同采用位置的属性值与采样间距之间关系的函数,它可以用来描述图像的空间异质性(Woodcock等, 1988a, 1988b)。计算公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N (z(i) - z(i+h))^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为半方差, $z(i)$ 为距*i*点距离为0的依赖变量值, $z(i+h)$ 为距*i*点距离为*h*的依赖变量值, $N(h)$ 表与*i*点距离等于*h*的点的数量。从式(1)可以看出,半方差与经典统计学中方差的根本差异在于考虑了空间尺度。块金值(nugget)指变差函数在0值附近的半方差值,可以用来描述噪声(如测量噪声)的影响。台基值(sill)即变差函数稳定时对应的函数值,该值是度量数据相关长度的一种方法。变程是 γ 达到台基值时对应的最小*h*值,它可以用来

刻画景观的空间结构特征。通过分析空间异质性随像元空间分辨率的变化规律可以通过选择最优的空间分辨率来降低异质性带来的误差(Wu和Li, 2009)。

(3)小波变换。Haar是目前在尺度分析领域使用最为广泛的基本小波,将基本小波做调整和位移之后,在不同尺度下与待分析信号(频率域信号)做内积运算,可以得知该尺度下该位置处是否存在与基本小波类似的特征模式,这些特征模式出现的位置和对应的尺度可以方便地获取。在特定尺度下所有位置上对小波变换结果的平方取均值称为小波方差(Bradshaw和Spies, 1992)。Percival (1995)发现小波方差是评价遥感影像异质性的一种有效工具。Pelgrum(2000)指出最大小波方差对应的尺度是地表景观主要的特征尺度。

(4)分形。分形几何是以不规则的或者支离破碎的物体作为研究对象的几何学,它试图从看似混沌的物体结构中寻找规律,这种规律即自相似特征。描述自相似特征的主要工具就分形维数。分形体已不再具有欧氏几何意义下的整数维,比如一个曲线的维数可能出于1和2之间,一个曲面的维数可能出于2和3之间。分形维数是这类物体结构的有效表征。一般来说,物体越不规则其维数越大。因此可以用分维数来表征异质性和测量的最优尺度。

2.3 植被体系的异质性表达

植被冠层模型是遥感辐射传输建模中的一大分支,植被体系也是异质性的,它是由植被和背景(土壤或草)组成的混合场景。针对植株或叶片在像元内部的分布规律的表达方法,产生了一系列的植被冠层模型。其中一部分被扩展到了TIR波段,但是仍有一部分未进行热红外波段的扩展。

(1)均匀分布(Verhoef, 1984; Verhoef等, 2007)。该分布如图1所示。均匀分布的假设适用于浓密植被,此类模型以SAIL系列模型为典型代表,一般将植被划分为 N 个薄层。SAIL系列模型有3个基本假设:首先每一层都是水平且无限延伸的;其次不考虑植被的枝和干,冠层内部唯一的成分是小而薄的叶片;其三每一层都是均一的。以LAI(Leaf Area Index)和LAD(Lead Area Distribution)为基本输入参数求解冠层方向反射率,改进后的TSAIL模型可以输入组分温度模拟浓密植被的方向热辐射。SAIL模型可以认为是1维的模型。



图1 均匀分布

Fig. 1 Homogeneous distribution

(2)随机分布(Li和Strahler, 1986)。该分布如图2所示。SAIL系列模型在稀疏植被场景中遇到了挑战,于是有了几何光学学派的产生。几何光学系列模型都是以植株作为基本单位,考虑植株的形状以及植株在场景内部的分布密度和空间位置,重点求解植株在背景上的投影以及植株之间的投影面积的变化规律。最早期的几何光学模型就是假设植株随机分布在场景中,即满足Boolean原理,且认为植株内部是混沌的刚体结构,Boolean原理是GO系列模型的思想灵魂,在非随机分布的情况下这个定理不再适用。

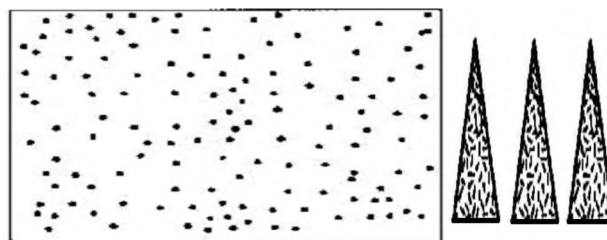


图2 随机分布

Fig. 2 Random distribution

(3)聚集分布(Chen和Leblanc, 1997)。该分布如图3所示。Chen和Leblanc在1997年提出的四尺度模型仍然属于几何光学模型的范畴。它不仅考虑冠层尺度上植株位置的非随机分布(Ω_E),认为植株的空间分布满足纽曼分布而非泊松分布,同时考虑了植株内部叶片分布的聚集效应(γ_E),并基于归一化的亮点暗点指数(NDHD)和POLDER数据进行了全球聚集指数产品的生产(Chen等, 2005)。冠层聚集指数(Ω)的计算如式(2)所示, a 和 b 为拟合系数, ρ_{hs} 和 ρ_{ds} 分别为亮点和暗点的反射率。目前没有见到将四尺度模型扩展到TIR波段的相关研究。

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\Omega_E}{\gamma_E} \\ \Omega &= a + b \times \text{NDHD} \\ \text{NDHD} &= \frac{\rho_{hs} - \rho_{ds}}{\rho_{hs} + \rho_{ds}} \end{aligned} \quad (2)$$

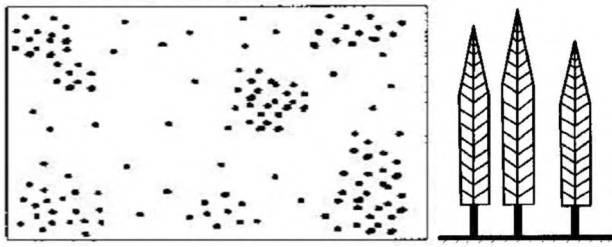


图3 聚集分布

Fig. 3 Clumping distribution

(4)多林分的聚集分布。该分布如图4所示。Shabanov等人(2007)通过相关函数引入随机场的概念,提出了适用于混交林的随机辐射传输模型。随机辐射传输模型能考虑五尺度模型在树冠群落分布的聚集效应,其特点是能适用于由光学特性与结构特性存在差异的不同树种构成的混交林。然而,混交林假设不同树种的空间分布相互独立,即充分混合,不能适用于多种地物类型大面积拼接混合的场景(Zeng等,2016)。



图4 多林分的聚集分布

Fig. 4 Clumping distribution of mixture forest

(5)植被垂直结构异质性。为了描述垂直方向上的异质性,即垂直方向上叶面积体密度、叶片生化组分等叶片光学、结构参数的变化对总的辐射贡献的影响,Kuusk(2001)提出两层连续植被冠层反射率模型(ACRM),Wang和Li(2013)提出多层植被辐射传输模型(MRTM),能刻画两层或多层连续植被在垂直方向上的混合。FRT(Forest Reflectance and Transmittance)模型从ACRM模型继承而来,能描述垂直方向上一层离散植被与两层连续植被的混合,实质上是一个3层模型,适合描述垂直结构明显、存在林下冠层的森林场景(Kuusk和Nilson,2000)。Leblanc等人(1999)将五尺度模型推广到两

层模型,能刻画两层离散植被在垂直方向上的混合。至此,垂直方向上连续或离散植被的混合,用现有模型可能得到较高精度的描述。

(6)植被—非植被斑块分布(Shi,2011)。该分布如图5所示。Shi等人(2011)年在开展根据野外地面多角度测量的植被体系热辐射图像反演组分温度的研究时,发现视场内可能会存在大片的裸露土壤,传统的反演方法精度较差。于是引入植被区面积比例 s 来修正现有植被冠层热辐射方向性模型(如式(3)所示),并基于该考虑裸土和植被混合场景的模型进行了组分温度反演尝试,取得了精度较好的结果。

$$R(\theta) = s \cdot R_v(\theta) + (1 - s)R_s(\theta) \quad (3)$$

式中, $R_v(\theta)$ 为整个冠层的方向辐射亮度, θ 为观测天顶角, $R_v(\theta)$ 为植被区方向辐射亮度, $R_s(\theta)$ 为裸土区方向辐射亮度, s 为植被区的面积比例。

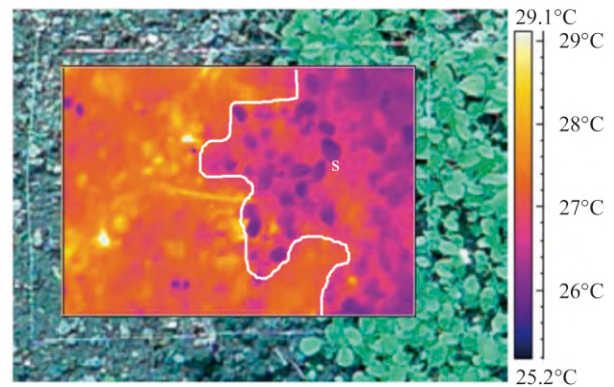


图5 植被—非植被斑块分布

Fig. 5 Patch mixed scene of vegetation and non-vegetation

从航空多角度热红外图像中可以发现农田区域纵横交错的道路与植被之间具有明显的温差。由于农田区域的道路宽度通常较窄,所以必须考虑植被冠层对道路的遮挡作用。2015年曹彪等人针对此问题提出了植被斑块和土壤斑块的混合场景热辐射方向性模型(Cao等,2015),该模型考虑了光照叶片、阴影叶片、光照土壤、阴影土壤、光照道路、阴影道路共计6个组分。

对于像元内部具有多个斑块或端元的场景,针对景观尺度水平方向上的异质性问题,目前最常用的描述方法是光谱线性混合模型。光谱线性混合模型广泛应用于高光谱领域的混合像元分解或丰度反演(Cubero-Castan等,2015;童庆禧等,2006),以及热红外领域的地表温度降尺度(Kallel

等, 2013; Zhan 等, 2013)。不同端元一般具有不同的3维结构, 光谱线性混合模型对边界处的遮挡与散射问题的忽略会带来多大的误差需要进一步研究。

3 植被二向性反射模型中的空间异质性研究进展

地表二向性反射模型是利用遥感手段定量反演叶面积指数(LAI)、吸收光合有效辐射比(FAPAR)、植被覆盖度(FVC)等地表生物物理参量的理论基础。以LAI反演为例, 现有的全球LAI反演体系, 多采用地表分类数据作为先验知识, 利用正向模型对不同植被类型分别构建查找表(LUT)或利用人工神经网络(ANN)进行训练, 最终根据反射率数据进行反演(Myneni 等, 2002)。Yang等人(2006)指出, 影响LAI反演精度的3个关键因素为: (1)输入分类数据的不确定性; (2)输入反射率数据的不确定性; (3)正向模型的不确定性。其中, 输入分类数据与正向模型的不确定性与地表的复杂程度直接相关(Fang 等, 2013b)。在中低分辨率像元尺度(>100 m), 由不同地表类型构成的混合像元大量存在。即使某一像元的分类信息正确, 也只表明该类型是这一像元的主要类型, 这一像元仍然可能含有其他类型(Myneni 等, 2002; Tian 等, 2002)。现有的植被二向性反射模型在单一地表类型上建立, 并不直接具备描述含有多种地物类型的混合像元辐射场的能力。相关研究表明, 叶面积指数反演在异质性显著的区域, 存在更大的不确定性(Fang 等, 2013a; Garrigues 等, 2006; Yin 等, 2015)。近年来, 高分辨率(30 m)全球地表分类产品的出现, 为亚像元级的异质性刻画提供了新的数据支撑(Gong 等, 2013)。因此, 在高分辨率地表分类数据的支撑下, 构建遥感像元尺度的复杂地表二向性反射模型, 对模型正向模拟及参数反演精度的提高具有重要意义。

早期的辐射传输模型假设植被水平均一, 无限延伸, 适合于封垄后的小麦等连续植被, 实质上是1维模型(Suits, 1972; Verhoef, 1984)。针对森林等离散特征明显的植被, 假设树冠为不透明刚体或浑浊介质, 并在空间上满足一定统计规律的分布, 发展了几何光学模型(Li和Strahler, 1985)。Chen和Leblanc(1997)在经典的几何光学模

型基础上考虑了群落分布和树冠内部的聚集, 提出五尺度模型。Shabanov等人(2007)将相关函数引入随机场, 提出适用于混交林的反射率模型。对典型的单一植被类型场景, 现有的模型已经可以实现较高精度的模拟, 但目前并不存在能描述多种地物类型的复杂地表二向性反射机理模型。

3.1 植被二向性反射辐射传输模型

植被辐射传输模型最早是从微观尺度的大气发展而来, 研究对象是针对水平均匀、无限延伸的浑浊介质, 实质上是不考虑水平方向辐射场变化的1维模型。这个假设使得植被辐射传输模型更适用于水平方向上相对均一的农作物、草地等连续植被。植被辐射传输模型将叶片视为大小为无限小、但叶面存在倾向的介质(Suits, 1972; Verhoef, 1984), 由于叶片实际上是具有有限大小和特定形状的, 这导致在入射和观测方向之间的消光系数存在一定的相关性(Knyazikhin 等, 1992)。

当入射与观测方向重合, 即热点方向时, 相关性最高。这个过程可用基于双向间隙率思想的双相关函数或基于几何光学相互遮阴思想的重叠函数来描述, 因而较好地模拟出了热点效应(Jupp和Strahler, 1991; Kuusk, 1985)。逐次散射近似(SOSA)或四流近似(4-Stream)的处理方式, 使得辐射传输模型在计算多次散射上具有明显优势(Verhoef, 1998)。

对于垂直方向上的异质性, Wang和Li(2013)提出多层植被辐射传输模型(MRTM), 能描述垂直方向上叶面积体密度、叶片生化组分等叶片光学、结构参数的变化对总的辐射贡献的影响。对于水平方向上异质性的描述, 1维的植被辐射传输模型并不能直接描述稀疏的森林等典型离散植被, 3维辐射传输模型随之被提出(Myneni 等, 1992)。3维模型将场景分割为若干个体元, 每个体元内部或者为植被介质, 或者为空隙。尽管3维模型能写出显式的解析表达式, 但在解算的时候需要逐体元的进行, 运算量非常大。Shabanov等人(2000)和Huang等人(2008)引入随机场的思想, 利用相关函数描述介质分布的不均匀性, 提出随机辐射传输模型。该模型具有接近于3维模型的精度, 却具有1维模型的简洁形式, 从而将辐射传输模型的适用对象扩展到森林。对于树冠在空间中的分布模

式,有随机分布、聚集分布、聚集情形下的硬核分布共3种分布方式。为了描述混交林这类具有不同光学特性的混合介质,Shabanov等人(2007)将相关函数进行了推广,使之能适用于混交林这类充分混合的介质,并有望进一步描述不同尺度下的聚集效应和景观尺度的异质性。

3.2 植被二向性反射几何光学模型

几何光学模型最初关注的最小尺度是植株尺度,将植株视为不透明刚体,并假设植株在空间上满足如泊松分布等具有一定统计规律的分布,根据几何投影关系计算光照植被、阴影植被、光照背景、阴影背景这4个分量的面积比例,进而计算整个场景的反射率(Li和Strahler, 1985)。几何光学模型考虑了树冠尺度的聚集效应,在稀疏森林这类典型离散植被的二向性反射模拟上得到了广泛应用。对于浓密森林, Li和Strahler(1992)进一步考虑了树冠之间的相互遮阴,提出了GOMS模型,但此时树冠仍为不透明的刚体。Chen和Leblanc(1997)在经典的几何光学模型基础上考虑了树冠群落分布和树冠内部的聚集,提出了五尺度模型,此时已经考虑了树冠内的孔隙率,树冠不再被当作不透明刚体。同时,为了描述乔木与灌木在垂直方向上的混合, Leblanc等人(1999)将五尺度模型推广到两层模型,能考虑垂直方向的异质性。几何光学模型在考虑冠层结构的情形下难于计算多次散射贡献,阴影部分的辐亮度需要通过实测或其他手段补充获得。对于端元级别及其内部的异质性,几何光学模型能够实现较高精度的描述并进行模拟。

3.3 植被二向性反射几何光学—辐射传输混合模型

混合模型是将场景内的散射分为一次散射贡献和多次散射贡献,充分利用几何光学模型在计算一次散射和利用辐射传输模型在计算多次散射上的各自优势分别进行解算,联系两者的桥梁是孔隙率模型。目前有代表性的混合模型有Li等人(1995)的GORT(Geometric Optical-Radiative Transfer)模型和Kuusk和Nilson(2000)的FRT模型。在混合模型中,树冠不再被视为不透明刚体,而是布满孔隙的多孔实体。对于树冠在空间中的分布,与五尺度模型的纽曼分布类似, FRT模型采用二项分布进行描述,可对应现实场景中的规则分布、随机

分布、聚集分布这3种典型分布模式。FRT模型继承自ACRM模型(Kuusk, 2001), ACRM模型作为两层植被反射率模型考虑了垂直方向上的混合,因此FRT模型实质上考虑了垂直方向上的异质性。FRT模型在RAMI模型验证中取得了较高的精度(Widlowski等, 2013),在后向散射方向上的精度还有待提高,目前仍在改进完善中(Kuusk等, 2014)。

3.4 植被二向性反射计算机模拟模型

计算机模拟模型通常首先生成特定的3维场景,再通过蒙特卡洛光线追踪(ray-Tracing)或计算机图形学辐射度(radiosity)的方式计算单次散射和多次散射,理论上可以设置和模拟任意复杂的场景。比较典型的计算机模拟模型有RGM(Radiosity-Graphics Based Model)模型、RAPID(Radiosity Applicable to Porous Individual objects)模型以及DART(Discrete Anisotropic Radiative Transfer)模型等(Gastellu-Etchegorry等, 2004; Grau和Gastellu-Etchegorry, 2013; Huang等, 2013; Qin等, 1996)。计算机模拟模型并不具备解析表达式,尤其对于像元尺度的大场景模拟(>100 m),计算量非常大,一般不能直接用于反演或查找表的构建。可靠的3维计算机模拟模型一般作为参考值,用于验证各解析模型或用于复杂场景的二向性反射分析(Widlowski等, 2013)。

3.5 非均质复杂地表二向性反射模型建模

近年来,像元尺度的非均质地表二向性反射模型的发展较慢。最近, Zeng等人(2016)针对中国北方的农林格网典型场景,提出能描述其辐射传输过程的RTAF(Radiative Transfer for Agro-Forestry scenarios)模型。根据边界长度、高差和朝向,将3维混合场景划分为非边界区域和边界区域分别处理。对非边界区域,采用现有的成熟模型计算散射项;重点针对边界区域,分单次散射和多次散射分别计算散射贡献。通过定义混合像元双向间孔隙率,并构造混合像元热点因子,考虑了边界处的遮挡效应与阴影效应。同时,引入Hapke模型以考虑土壤的各向异性。最终,将提出的RTAF模型在黑河中游农林格网场景中,分别用DART辐射传输模型与机载WIDAS多角度观测数据进行了模型评价与验证,并与忽略了非主要端元作用的DCT

(Dominant Cover Type)模型和忽略了边界处的遮挡、阴影效应等相互作用的SLM(Spectral Linear Mixture)模型进行了比较。结果表明,边界效应能显著改变方向反射率DRF(Directional Reflectance Factor)的角度分布,增强热点区域后视与前视方向的反射率差异。场景的真实反射率在后视方向高于SLM模型模拟的结果;在前视方向低于SLM模型模拟的结果。SLM模型的最大相对误差在红波段与近红外波段分别达25.7%和13.7%。3维DART模型的评价结果表明,RTAF模型在红波段,可将模拟误差由25.7%(SLM)和23.0%(DCT)降低到9.8%(RTAF);在近红外波段,模拟误差可由19.6%(DCT)和13.7%(SLM)降低到8.7%(RTAF)。这为后续进行非均质地表叶面积指数等生物物理参数的定量反演提供了机理模型的支撑。

4 地表热红外辐射方向性建模中的非均质性研究进展

相比于其他地物类型,植被的热辐射方向性模型发展得较为成熟,针对垄行种植的农作物、连续分布的森林与草地、离散分布的灌木各自发展了一系列的热辐射方向性模型。植被冠层的热辐射方向性模型发展的较为成熟,其中很多模型都扩展于可见光近红外波段的二向反射冠层模型。

辐射传输模型适用于连续分布的森林、草地、农作物。它能够很好地描述各组分之间以及各组分与大气之间的热辐射交换过程。辐射传输模型一般将植被冠层分成 N 层,将方向亮度温度描述为观测角度、叶片的温度分布以及叶倾角分布的函数,认为每一层都是水平均匀的,每一层的上下行辐射贡献取决于方向孔隙率的值,观测到的辐射亮度来自该方向所有层辐射贡献的总和。几何投影模型针对离散灌木场景和简化的垄行种植的农作物场景具有很好的描述能力。几何投影模型将植被土壤体系分成光照土壤、阴影土壤、光照植被、阴影植被4个组分(Jackson等,1979;Pinheiro等,2004)或者土壤、植被顶层、植被侧面3个组分(Sobrino和Caselles,1990)。每一个组分有一个对应的组分温度,而组分发射率仅分为土壤、植被两类。几何投影模型可以很简洁地解释热点效应,其基本思想可以概括为:每个组分均是朗伯的发射源,但是整个冠层的热辐射特性是

非朗伯的。几何投影模型将植被视为刚体,不考虑光线在冠层内部的辐射传输过程。难点在于根据结构参数和观测几何来计算每一个组分的可视面积比,投影面积随着观测角度的变化规律是立体几何问题,计算机图形学方法可以准确计算出变化规律,可作为解析求解的真值。

4.1 垄行植被场景热辐射方向性模型

早期基于几何光学模型思路的箱体模型具有一个很明显的不足就是其忽略了一个植被垄内部的空隙,忽略了植被垄内部的多次散射。为了解决这个问题,考虑植被垄内部的空隙、热点效应、作物生长期和视场效应的混合模型被相继报道。Chen等人(2002)首先在这个植被垄的空隙问题上取得重要进展,将Li-Strahler离散体孔隙率模型思想(Li和Strahler,1988)和Kuusk交相关概率思想(Kuusk,1985)引入KIMES1983箱体模型中,使得热点效应得到的初步模拟。Yan等人(2003)在同一年提出一个类似的垄行植被的双向间隙率热辐射方向性模型,与Chen等人方法的差别在于其引入重叠指数来求解双向间隙率的大小,同样地该模型也模拟出了热点效应,重叠指数的求解方法借鉴自Li-Strahler几何光学模型(Li和Strahler,1992)。Yu等人(2004)在CHEN2002模型的基础上提出了一个考虑农作物叶片层离地高度的混合模型,用实测数据进行了热点效应的验证并取得良好结果。Zhao等人(2012)在YU2004的基础上,借鉴工程热物理中的辐射换热思想,提出了一个考虑非同温异质表面间以及组分与环境间的多次散射的热辐射方向性模型并对多次散射给出了明确的解析表达式。Ren等人(2013)在YU2004的基础上进一步考虑了传感器的FOV(Field of View)效应,提出了一个考虑视场FOV效应的垄行植被混合模型,其考虑FOV的想法很大程度上启发自SOBRINO1990模型(Sobrino和Caselles,1990),在具体的求解过程中又借鉴了DART模型的求解方法(Guillevic等,2003)。Du等人(2007)在野外的实验测量中发现,之前所有模型在麦穗时期均不能准确地模拟热辐射方向性规律,于是其将场景分成麦穗层、叶片层和土壤层3层,借鉴KIMES1981年的分层孔隙率辐射传输模型(Kimes,1981)和Li-strahler几何光学系列模型(Li和Strahler,1986)的思路构建了穗—叶复合模型。

4.2 斑块混合场景热辐射方向性模型

石玉立2007年在开展基于野外地面多角度测量的植被体系热辐射图像反演组分温度的相关研究时,发现视场内可能会存在大片的裸露土壤,此时传统的适用于连续植被的反演方法精度较差。于是引入植被区面积比例 s 来进行修正,提出了植被土壤斑块式混合场景的热辐射方向性模型,并基于该模型进行了组分温度反演尝试,取得了精度较好的结果(Shi, 2011)。植被区域的热辐射方向性继承自Francois2002模型(François, 2002),认为裸露土壤与植被下的背景土壤温度相同且都是朗伯的,且不考虑植被对裸露土壤斑块的遮挡作用。具体公式为

$$R(\theta) = s \cdot R_v(\theta) + (1 - s) \cdot R_s(\theta) \quad (4)$$

式中, $R_v(\theta)$ 为植被区的方向辐射亮度, $R_s(\theta)$ 为裸土区的方向辐射亮度, $R(\theta)$ 为整个场景的方向辐射亮度。

该模型研究对象是较为简单的植被—土壤两个端元的混合场景,从某种角度讲可以认为是植被聚集的一种特例,但是仍然是从单一端元模型到混合像元模型的重要进步。该研究存在几个方面的不足:没有考虑裸土本身的热辐射方向性;裸露土壤的温度和植被覆盖下的土壤的温度一致的假设一般难以成立;没有考虑边界处植被对土壤的遮挡效应,即 s 应该是角度相关参量。

从航空多角度热红外图像中可以发现农田区域纵横交错的道路与植被之间具有明显的温差。由于农田区域的道路宽度通常较窄,所以必须考虑植被冠层对道路的遮挡作用。年曹彪等人(2015)针对此问题发展了植被道路斑块式混合像元热红外辐射方向性模型,首次模拟了由于双朝向的道路所导致的方向亮度温度极坐标图上的双轴特征。该模型考虑了光照叶片、阴影叶片、光照土壤、阴影土壤、光照道路、阴影道路共计6个组分,敏感性分析结果表明经典的垄行结构模型和连续植被模型都可以认为是该模型的特例。

从客观地表现状出发,热辐射方向性解析模型在不断地逼近现实景观,但是目前在植被与非植被的混合场景问题上进展缓慢。

4.3 热红外辐射方向性计算机模拟模型

辐射传输模型、几何光学模型和混合模型都

是使用一定的数学方法来描述植被冠层间的辐射特性,它们均属于物理模型。这些物理模型为了便于计算,在建立模型时使用了很多简化假设,通常不能考虑冠层表面和内部的精细结构特征,尽管事实上这些精细结构特征有可能包含植被冠层的重要信息。为了尽量细致地模拟植被的各种形态及生长结构特征,一些学者引入并发展了基于真实结构模拟的计算机模拟模型,以便克服理论模型中的缺点。计算机模拟模型能够真实地再现植被结构,与物理模型相比能够更加详细更加灵活的处理各种植被。现在发展起来的计算机模拟模型主要有蒙特卡洛模拟模型(Monte Carlo)、辐射度模型(radiosity)、光线追踪模型(ray-tracing)等。

陈良富等人(2000)进行了逆向蒙特卡洛模拟,苏理宏等人(2002)进行了正向蒙特卡洛模型,2007年柳钦火等人将RGM模型(Qin和Gerstl, 2000)扩展到热红外波段,提出了基于植被真实结构场景的TRGM(Thermal Radiosity-Graphics Combined Model)模型(Liu等, 2007)。黄华国等人(2011b)利用农田小气候模型和TRGM模拟分析了玉米冠层热辐射方向性的日变化规律,并基于TRGM分析了玉米雄穗对热辐射方向性的影响,分析结果表明在建模和反演过程中均可以忽略雄穗的影响(Huang等, 2011a)。Guillevic等人(2003)基于离散非均质辐射传输模型(DART)提出了一种3维辐射传输模型来模拟冠层的方向性热辐射。杨贵军等人(2010)借鉴DART模型的思路提出一个新的热红外波段的3维辐射传输模型,并在小麦垄行时期和连续时期分别对该模型进行了验证,结果表明两个时期的相关系数均能到达0.9左右。

5 结论与展望

遥感辐射传输建模是模拟理解遥感观测信号和定量反演地表参量的理论基础,植被可见/近红外二向性反射、热红外辐射模型包括辐射传输、几何光学、辐射传输—几何光学混合和计算机模拟模型等不同的类型。

近年来,由于地表空间异质性导致的参数反演误差引起了高度关注,观测手段的日益丰富给正向建模考虑异质性提供了更多的可行性,高分辨率遥感数据被作为先验知识引入,用以辅助描述像元的非均质性,像元内部的不同组分比例、

空间分布格局、植被冠层的3维结构以及阴影效应等是非均质地表遥感辐射传输建模中需要重点考虑的因素。

本文总结分析了植被遥感辐射传输建模的非均质性研究进展, 但是仍然面临很多关键科学问题需要进一步解决, 未来需要加强的研究领域和方向包括: 针对全球地表参数反演需要的普适性非均质地表遥感辐射传输模型研究仍然十分薄弱; 非均质复杂地表条件下的多尺度遥感综合试验与模型验证仍面临很多挑战; 基于非均质地表遥感辐射传输模型, 综合利用中高分辨率遥感数据相结合, 有望显著提高全球地表参量遥感产品的精度和可靠性, 具有广阔的应用前景。

参考文献(References)

- Bradshaw G A and Spies T A. 1992. Characterizing canopy gap structure in forests using wavelet analysis. *Journal of Ecology*, 80(2): 205–215 [DOI: 10.2307/2261007]
- Cao B, 2014, Modeling directional brightness temperature distribution over complex surface, University of Chinese Academy of Sciences (曹彪, 2014. 复杂地表热辐射方向性模型研究, 北京: 中国科学院大学)
- Cao B, Liu Q H, Du Y M, Li H, Wang H S and Xiao Q. 2015. Modeling directional brightness temperature over mixed scenes of continuous crop and road: a case study of the Heihe River Basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*, 12(2): 234–238 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2333874]
- Chen J M, Menges C H and Leblanc S G. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 447–457 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.003]
- Chen J M and Leblanc S G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1316–1337 [DOI: 10.1109/36.628798]
- Chen L D, Liu Y, Lv Y H, Feng X M and Fu B J, 2008, Landscape pattern analysis in landscape ecology current challenges and future, *Acta Ecologica Sinica*, 28(11): 5521–5531. (陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰, 2008. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报* 28(11): 5521–5531) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2008.11.037]
- Chen L F, Liu Q H, Fan W J, Li X W, Xiao Q, Yan G J and Tian G L. 2002. A bi-directional gap model for simulating the directional thermal radiance of row crops. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45(12): 1087–1098 [DOI: 10.1360/02yd9106]
- Chen L F, Zhuang J, Liu Q, Xu X and Tian G L, 2000. Study on the law of radiant directionality of row crops. *Science in China (Series E)*, 43(S1): 70–82.
- Cubero-Castan M, Chanussot J, Achard V, Briottet X and Shimoni M. 2015. A physics-based unmixing method to estimate subpixel temperatures on mixed pixels. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 1894–1906 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2350771]
- Du Y M, Liu Q H, Chen L F, Liu Q and Yu T. 2007. Modeling directional brightness temperature of the winter wheat canopy at the ear stage. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3721–3739 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.903401]
- Fan W J, Yan B Y and Xu X R. 2010, Crop area and leaf area index simultaneous retrieval based on spatial scaling transformation. *Sci China Earth Sci*, doi: 10.1007/s11430-010-4078-9 (范闻捷, 闫彬彦, 徐希孺, 2011. 尺度转换规律与同步反演作物播种面积和叶面积指数. *中国科学: 地球科学* 40(12): 1725–1732) [DOI: 10.1007/s11430-010-4078-9]
- Fang H L, Jiang C Y, Li W J, Wei S S, Baret F, Chen J M, Garcia-Haro J, Liang S L, Liu R G, Myneni R B, Pinty B, Xiao Z Q and Zhu Z C. 2013a. Characterization and intercomparison of global moderate resolution leaf area index (LAI) products: analysis of climatologies and theoretical uncertainties. *Journal of Geophysical Research*, 118(2): 529–548 [DOI: 10.1002/jgrg.20051]
- Fang H L, Li W J and Myneni R B. 2013b. The impact of potential land cover misclassification on MODIS leaf area index (LAI) estimation: a statistical perspective. *Remote Sensing*, 5(2): 830–844 [DOI: 10.3390/rs5020830]
- François C. 2002. The potential of directional radiometric temperatures for monitoring soil and leaf temperature and soil moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 122–133 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00293-0]
- Garrigues S, Allard D, Baret F and Weiss M. 2006. Influence of landscape spatial heterogeneity on the non-linear estimation of leaf area index from moderate spatial resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 286–298 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.013]
- Gastellu-Etchegorry J P, Martin E and Gascon F. 2004. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 73–96 [DOI: 10.1080/0143116031000115166]
- Goel N S, Rozeznal I and Thompson R L. 1991. A computer graphics based model for scattering from objects of arbitrary shapes in the optical region. *Remote Sensing of Environment*, 36(2): 73–104 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90032-2]
- Gong P, Wang J, Yu L, Zhao Y C, Zhao Y Y, Liang L, Niu Z G, Huang X M, Fu H H, Liu S, Li C C, Li X Y, Fu W, Liu C X, Xu Y, Wang X Y, Cheng Q, Hu L Y, Yao W B, Zhang H, Zhu P, Zhao Z Y, Zhang H Y, Zheng Y M, Ji L Y, Zhang Y W, Chen H, Yan A, Guo J H, Yu L, Wang L, Liu X J, Shi T T, Zhu M H, Chen Y L, Yang

- G W, Tang P, Xu B, Giri C, Clinton N, Zhu Z L, Chen J and Chen J. 2013. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: first mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7): 2607–2654 [DOI: 10.1080/01431161.2012.748992]
- Grau E and Gastellu-Etchegorry J P. 2013. Radiative transfer modeling in the Earth–Atmosphere system with DART model. *Remote Sensing of Environment*, 139: 149–170 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.019]
- Guillevic P, Gastellu-Etchegorry J P, Demarty J and Prévot L. 2003. Thermal infrared radiative transfer within three-dimensional vegetation covers. *Journal of Geophysical Research*, 108(D8): 4248 [DOI: 10.1029/2002JD002247]
- Huang D, Knyazikhin Y, Wang W L, Deering D W, Stenberg P, Shabanov N, Tan B and Myneni R B. 2008. Stochastic transport theory for investigating the three-dimensional canopy structure from space measurements. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 35–50 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.05.026]
- Huang H G, Dou B C and Hu N. 2011a. Tassel effect on the thermal emission directionality of corn canopies. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 30(2): 120–123 (黄华国, 窦宝成, 胡妮, 2011, 雄穗对玉米冠层热辐射方向性的影响分析, 红外与毫米波学报, 30(2): 120–123)
- Huang H G, Liu Q H, Qin W H, Du Y M and Li X W. 2011b. Temporal patterns of thermal emission directionality of crop canopies. *Journal of Geophysical Research*, 116(D16): D06114 [DOI: 10.1029/2010JD014613]
- Huang H G, Qin W H and Liu Q H. 2013. RAPID: a radiosity applicable to porous Individual Objects for directional reflectance over complex vegetated scenes. *Remote Sensing of Environment*, 132: 221–237 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.01.013]
- Jackson R D, Reginato R J, Pinter P J Jr and Idso S B. 1979. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops. *Applied Optics*, 18(22): 3775–3782 [DOI: 10.1364/AO.18.003775]
- Jacob F and Weiss M. 2014. Mapping biophysical variables from solar and thermal infrared remote sensing: focus on agricultural landscapes with spatial heterogeneity. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10): 1844–1848 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2313592]
- Jupp D L and Strahler A H. 1991. A hotspot model for leaf canopies. *Remote Sensing of Environment*, 38(3): 193–210 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90089-O]
- Kallel A, Otlé C, Le Hégarat-Masclé S, Maignan F and Courault D. 2013. Surface temperature downscaling from multiresolution instruments based on Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1588–1612 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2207461]
- Kimes D S. 1981. Remote sensing of temperature profiles in vegetation canopies using multiple view angles and inversion techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-19(2): 85–90 [DOI: 10.1109/TGRS.1981.350357]
- Knyazikhin Y V, Marshak A L and Myneni R B. 1992. Interaction of photons in a canopy of finite-dimensional leaves. *Remote Sensing of Environment*, 39(1): 61–74 [DOI: 10.1016/0034-4257(92)90140-F]
- Kolasa J and Rollo C D. 1991. Introduction: the heterogeneity of heterogeneity: a glossary//Kolasa J and Pickett S T A, eds. *Ecological Heterogeneity*. New York: Springer: 1–23 [DOI: 10.1007/978-1-4612-3062-5_1]
- Kuusk A. 1985. The hot spot effect of a uniform vegetative cover. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 3(4): 645–658
- Kuusk A. 2001. A two-layer canopy reflectance model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 71(1): 1–9 [DOI: 10.1016/S0022-4073(01)00007-3]
- Kuusk A and Nilson T. 2000. A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 72(2): 244–252 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00111-X]
- Kuusk A, Kuusk J and Lang M. 2014. Modeling directional forest reflectance with the hybrid type forest reflectance model FRT. *Remote Sensing of Environment*, 149: 196–204 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.035]
- Leblanc S G, Bicheron P, Chen J M, Leroy M and Cihlar J. 1999. Investigation of directional reflectance in boreal forests with an improved four-scale model and airborne POLDER data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3): 1396–1414 [DOI: 10.1109/36.763304]
- Li D R, Tong Q X, Li R X, Gong J Y and Zhang L P. 2012. Current issues in high-resolution Earth observation technology. *Sci China Earth Sci*, 55: 1043–1051, doi:10.1007/s11430-012-4445-9 (李德仁, 童庆禧, 李荣兴, 龚健雅, 张良培, 2012. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题. *中国科学: 地球科学*, 42(6): 805–813) [DOI: 10.1007/s11430-012-4445-9]
- Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu Q H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L and Xu Z W. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8): 1145–1160 [DOI: 10.1175/BAMS-D-12-00154.1]
- Li X and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276–292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W and Strahler A H. 1985. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23(5): 705–721 [DOI: 10.1109/TGRS.1985.289389]

- Li X W and Strahler A H. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(6): 906–919 [DOI: 10.1109/TGRS.1986.289706]
- Li X W and Strahler A H. 1988. Modeling the gap probability of a discontinuous vegetation canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 26(2): 161–170 [DOI: 10.1109/36.3017]
- Li X W and Wang J D. 1995. Vegetation optical remote sensing model and parameterization of vegetation structure, Science Press (李小文, 王锦地, 1995. 植被光学遥感模型与植被结构参数化. 北京: 科学出版社)
- Li X W, Strahler A H and Woodcock C E. 1995. A hybrid geometric optical-radiative transfer approach for modeling albedo and directional reflectance of discontinuous canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 466–480 [DOI: 10.1109/36.377947]
- Li X Z, Bu R C, Chang Y, Hu Y M, Wen Q C, Wang X G, Xu C G, Li Y H and He H S. 2004. The response of landscape metrics against pattern scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 123–134. (李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕, 2004. 景观格局指标对不同景观格局的反应. *生态学报*, 24(1): 123–134 [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.01.019] [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.01.019])
- Liu Q H, Huang H G, Qin W H, Fu K H and Li X W. 2007. An extended 3-D radiosity-graphics combined model for studying thermal-emission directionality of crop canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(9): 2900–2918 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.902272]
- Liu Q H, Xin X Z, Tang P, Liao J J and Wu B F. 2010. Research on quantitative remote sensing model, application and uncertainty, Science Press (柳钦火, 辛晓洲, 唐娉, 廖静娟, 吴炳方, 2010. 定量遥感模型、应用及不确定性研究. 北京: 科学出版社)
- Myneni, R B, Asrar, G, Hall, F G, A three-dimensional radiative transfer method for optical remote sensing of vegetated land surfaces, 1992. *Remote Sensing of Environment*, 41: 105–121
- Myneni R B, Hoffman S, Knyazikhin Y, Privette J L, Glassy J, Tian Y, Wang Y, Song X, Zhang Y, Smith G R, Lotsch A, Friedl M, Morisette J T, Votava P, Nemani R R and Running S W. 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 214–231 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00074-3]
- Pelgrum H. 2000. Spatial aggregation of land surface characteristics. Netherlands: Wageningen University
- Percival D P. 1995. On estimation of the wavelet variance. *Biometrika*, 82(3): 619–631 [DOI: 10.1093/biomet/82.3.619]
- Pinheiro A C T, Privette J L, Mahoney R and Tucker C J. 2004. Directional effects in a daily AVHRR land surface temperature dataset over Africa. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(9): 1941–1954 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.831886]
- Qin W H and Gerstl S A W. 2000. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 145–162 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00129-2]
- Qin W H, Goel N S and Wang B Q. 1996. The hotspot effect in heterogeneous vegetation canopies and performances of various hotspot models. *Remote Sensing Reviews*, 14(4): 283–332 [DOI: 10.1080/02757259609532323]
- Ren H Z. 2013. Modelling of directional thermal radiation and angular correction on land surface temperature from space. Beijing: Beijing Normal University
- Shabanov N V, Huang D, Knjazikhin Y, Dickinson R E and Myneni R B. 2007. Stochastic radiative transfer model for mixture of discontinuous vegetation canopies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 107(2): 236–262 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2007.01.053]
- Shabanov N V, Knyazikhin Y, Baret F and Myneni R B. 2000. Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 74(1): 125–144 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00128-0]
- Shi Y L. 2011. Thermal infrared inverse model for component temperatures of mixed pixels. *International Journal of Remote Sensing*, 32(8): 2297–2309 [DOI: 10.1080/01431161003698252]
- Sobrino J A and Caselles V. 1990. Thermal Infrared Radiance Model for Interpreting the Directional Radiometric Temperature of a Vegetative Surface. *Remote Sensing of Environment*, 33(3): 193–199 [DOI: 10.1016/0034-4257(90)90030-P]
- Su L H, Li X W and Wang J D. 2002. Monte Carlo simulation for directional emissivity of non-isothermal surfaces, *Progress in Natural Science*, 12(4): 446–448. (苏理宏, 李小文, 王锦地, 2002. 地表非同温像元发射率的Monte Carlo模拟. *自然科学进展*, 12(4): 446–448) [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2002.04.024]
- Suits G H. 1972. The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment*, 2: 117–125 [DOI: 10.1016/0034-4257(71)90085-X]
- Tian Y H, Woodcock C E, Wang Y J, Privette J L, Shabanova N V, Zhou L M, Zhang Y, Buermann W, Dong J R, Veikkanen B, Häme T, Andersson K, Ozdogan M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2002. Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product: I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 83(3): 414–430 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00047-0]
- Tong Q X, Zhang B and Zheng L F. 2006. Hyperspectral remote sensing: principles, techniques and applications, Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 2006. 高光谱遥感: 原理, 技术与应用. 北京: 高等教育出版社)
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16(2): 125–141 [DOI: 10.1016/0034-4257(84)90057-9]

- Verhoef W. 1998. Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies. The Netherlands: Remote Sensing Department of the National Aerospace Laboratory
- Verhoef W, Jia L, Xiao Q and Su Z. 2007. Unified optical-thermal four-stream radiative transfer theory for homogeneous vegetation canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1808–1822 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.895844]
- Wang Q and Li P H. 2013. Canopy vertical heterogeneity plays a critical role in reflectance simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 111–121 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.10.004]
- Widlowski J L, Pinty B, Lopatka M, Atzberger C, Buzica D, Chelle M, Disney M, Gastellu-Etchegorry J P, Gerboles M, Gobron N, Grau E, Huang H, Kallel A, Kobayashi H, Lewis P E, Qin W, Schlerf M, Stuckens J and Xie D. 2013. The fourth radiation transfer model intercomparison (RAMI-IV): proficiency testing of canopy reflectance models with ISO-13528. *Journal of Geophysical Research*, 118(13): 6869–6890 [DOI: 10.1002/jgrd.50497]
- Woodcock C E and Strahler A H. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21(3): 311–332 [DOI: 10.1016/0034-4257(87)90015-0]
- Woodcock C E, Strahler A H and Jupp D L B. 1988a. The use of variograms in remote-sensing. I. Scene models and simulated images. *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 323–348 [DOI: 10.1016/0034-4257(88)90108-3]
- Woodcock C E, Strahler A H and Jupp D L B. 1988b. The use of variograms in remote-sensing. II. Real digital images. *Remote Sensing of Environment*, 25(3): 349–379 [DOI: 10.1016/0034-4257(88)90109-5]
- Wu H and Li Z L. 2009. Scale issues in remote sensing: a review on analysis, processing and modeling. *Sensors*, 9(3): 1768–1793 [DOI: 10.3390/s90301768]
- Wu H, Tang B H and Li Z L. 2013. Impact of nonlinearity and discontinuity on the spatial scaling effects of the leaf area index retrieved from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9/10): 3503–3519 [DOI: 10.1080/01431161.2012.716537]
- Yan G J, Jiang L M, Wang J D, Chen L F and Li X W. 2003. Thermal bidirectional gap probability model for row crop canopies and validation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(12): 1241–1249 [DOI: 10.1007/BF02883250]
- Yang G J, Liu Q H, Liu Q, Xiao Q and Huang W J. 2010. Directional simulation of thermal infrared radiation and 3D radiative transfer model of canopy. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 29(1): 38–44 (杨贵军, 柳钦火, 刘强, 肖青, 黄文江, 2010, 植被冠层3D辐射传输模型及热辐射方向性模拟. *红外与毫米波学报*, 29(1): 38–44)
- Yang W, Shabanov N V, Huang D, Wang W, Dickinson R E, Nemani R R, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2006. Analysis of leaf area index products from combination of MODIS Terra and Aqua data. *Remote Sensing of Environment*, 104(3): 297–312 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.04.016]
- Yao Y J, Liu Q H, Liu Q and Li X W. 2008. LAI retrieval and uncertainty evaluations for typical row-planted crops at different growth stages. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 94–106 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.09.037]
- Yin G F, Li J, Liu Q H, Li L H, Zeng Y L, Xu B D, Yang L and Zhao J. 2015. Improving leaf area index retrieval over heterogeneous surface by integrating textural and contextual information: a case study in the Heihe River Basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 359–363 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2341925]
- Yu T, Gu X F, Tian G L, Legrand M, Baret F, Hanocq J F, Bosseno R and Zhang Y. 2004. Modeling directional brightness temperature over a maize canopy in row structure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10): 2290–2304 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.834196]
- Zeng Y L, Li J, Liu Q H, Huete A R, Yin G F, Xu B D, Fan W L, Zhao J, Yan K and Mu X H. 2016. A radiative transfer model for heterogeneous agro-forestry scenarios. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8): 4613–4628 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2547326]
- Zhan W F, Chen Y H, Zhou J, Wang J F, Liu W Y, Voogt J, Zhu X L, Quan J L and Li J. 2013. Disaggregation of remotely sensed land surface temperature: literature survey, taxonomy, issues, and caveats. *Remote Sensing of Environment*, 131: 119–139 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.12.014]
- Zhao L M, Gu X F, Yu T, Wan W, Zhang L and Xie Y H. 2012. A directional thermal radiance model for multiple scattering over surfaces. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 31(6): 528–535 (赵利民, 顾行发, 余涛, 万玮, 张伦, 谢燕华, 一种顾及表面间多次散射的热辐射方向性模型. *红外与毫米波学报*, 31(6): 528–535) [DOI: 10.3724/SP.J.1010.2012.00528]

Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy

LIU Qinhuo^{1,2,3}, CAO Biao¹, ZENG Yelu¹, LI Jing¹, DU Yongming¹, WEN Jianguang¹, FAN Weiliang¹, ZHAO Jing¹, YANG Le¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

Abstract: Radiative transfer models establish the quantitative relationship between remote sensing signals and physical parameters, including the object properties, the object structures and the observation geometries, on the understanding of the interactions of the electromagnetic wave and the objects. They serve as the theoretical basis for the interpretation of the remote sensing signals and the retrieval of surface parameters. Recently spatial heterogeneity has drawn widespread attention in the field of quantitative remote sensing. The increasing high resolution imagery and LiDAR data provide a strong support for the consideration of heterogeneity. For the radiative transfer modeling process over heterogeneous vegetation scenarios, the component area ratio, the 3D structure and the distribution pattern within the pixel, and the shadowing and scattering effects near the boundary, are important factors that should be considered. The recent progresses on the VIS/NIR BRDF and the TIR directional emission modeling over heterogeneous land surfaces are introduced, respectively. The key scientific issues and future development directions of heterogeneous vegetation canopy modeling are proposed at last.

Key words: spatial heterogeneity, radiative transfer modeling, mixed pixel, 3D structure

Supported by National Basic Research Program of China(973 Program)(No. 2013CB733401); National Natural Science Foundation of China(No.41501366)