

基于计算机模拟模型 LESS 的落叶松 林木木质元素影响分析

许月¹, 谢东辉¹, 漆建波^{1,2}, 阎广建¹, 穆西晗¹, 张吴明¹

1. 北京师范大学 地理科学学部 遥感科学与工程研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083

摘要: 目前大部分植被辐射传输模型在模拟太阳辐射与植被之间的相互作用过程时, 将植物结构进行了简化, 只保留了叶片的结构和空间分布特征, 而忽略了木质元素(枝干等)对冠层反射特性的影响。计算机模拟模型 LESS 能够充分考虑植被的多种组分光谱和结构特征, 精确模拟植被冠层内部的光散射和辐射过程。本文以地面实测数据为基础, 发展了以单木为基本单元的复杂森林三维场景重建基本流程; 并在重建森林场景基础上, 利用计算机模拟模型 LESS 模拟森林三维场景反射率, 对比分析了森林木质元素对冠层反射率的影响。结果表明, 忽略木质元素会引起植被冠层反射率模拟的偏差, 特别是在近红外波段, 在不同叶面积指数(LAI)下, 其相对偏差都在40%以上。高空间分辨率是一个会突出木质元素影响的重要因素, 随着空间分辨率提高, 偏差也随之增大。不同等级枝干结构均对冠层反射率产生影响, 即使忽略最小分枝也会引起17.7%(近红外)的估计误差。因此, 在进行定量遥感研究中, 必须考虑到忽略木质元素引起的偏差, 即使是高LAI森林也无法忽视木质元素的影响。特别是在高分辨率遥感图像中, 传统的以统计特征代替三维结构分布的辐射传输模型已经无法满足精度的要求。

关键词: 辐射传输模型, 森林, 反射率, 木质元素, 三维重建, LESS

引用格式: 许月, 谢东辉, 漆建波, 阎广建, 穆西晗, 张吴明. 2021. 基于计算机模拟模型 LESS 的落叶松林木木质元素影响分析. 遥感学报, 25(5): 1138-1151

Xu Y, Xie D H, Qi J B, Yan G J, Mu X H and Zhang W M. 2021. Influence of woody elements on nadir reflectance of forest canopy based on simulations by using the LESS model. National Remote Sensing Bulletin, 25(5): 1138-1151 [DOI: 10.11834/jrs.20210100]

1 引言

森林是陆地生态系统的重要组成部分, 在维持全球碳平衡、改善气候和水文条件等方面发挥重要作用(Daily等, 1997)。森林生态系统中的乔木和灌木主要由叶片和枝干等元素组成。其中, 枝干等木质元素作为森林的主要组成要素, 在很大程度上控制着植物结构和形态(Lau等, 2018), 对植物冠层的光辐射吸收及其生理特性也有重要影响(Fearnside, 1997)。

遥感是长时间大范围监测森林的重要手段。遥感传感器通过接收到的反射或发射辐射信号, 监测森林生长状况。植被光学辐射模型通过模拟光与地

物目标, 特别是植被组分(包括叶片、枝干、土壤背景等)之间的相互作用过程, 辅助理解遥感信号特征, 也是利用遥感数据定量反演地表参量的理论基础。在植被定量遥感研究中, 先后发展了植被光学辐射传输模型、几何光学模型、混合模型和计算机模拟模型等, 这些都成为定量遥感研究的理论基础。由于地物目标结构复杂, 植被光学辐射模型在建立过程中往往对现实世界进行一定的简化。从植被光学辐射传输模型的发展历史来看, 其对植被结构的描述从理想的叶片均匀分布假设逐渐过渡到逼近于真实结构(Liu等, 2016)。例如, 经典的SAIL模型(Verhoef, 1984), 将植被冠层假设为由随机分布的叶片组成的混合体, 忽略了植被冠层的

收稿日期: 2020-04-28; 预印本: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42071304)

第一作者简介: 许月, 1995年生, 女, 硕士研究生, 研究方向植被参数反演。E-mail: 201821051067@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 谢东辉, 1976年生, 女, 副教授, 研究方向计算机模拟模型研究及植被参数反演。E-mail: xiedonghui@bnu.edu.cn

结构和不均匀分布特征。几何光学模型将树冠简化为具有已知几何形状和光学性质、并且按一定方式排列的几何体。其中，最具代表性的 GOMS 模型 (Li 和 Strahler, 1992)，假设树冠形状为锥形刚体，树木随机分布，考虑了森林冠层中树木之间的聚集和相互遮挡现象，但没有考虑木质元素对冠层反射率造成的影响。在此基础上，Chen 和 Leblanc (1997) 发展了四尺度模型，该模型充分考虑了森林结构在冠层群落尺度上的非随机分布特征和树冠内部枝叶的空间聚集特征。四尺度模型以几何实体的形式将树干和树枝耦合在模型中，但是忽略了小枝在树冠内的聚集和不规则分布特征 (Malenovsky 等, 2008)。

上述植被光学辐射传输模型是以森林结构统计特征为基础，针对空间分辨率相对较低的遥感探测器信号的模拟和分析。近年无人机平台发展迅速，可以方便地获取高分辨率多/高光谱及多角度图像。因此，利用传统植被光学辐射传输和几何光学模型已经无法满足高精度的信号分析需求。随着计算机技术的发展，基于虚拟实验室的计算机模拟模型被发展并得到重视。这类模型通过构建三维虚拟植被结构场景，在模拟地表植被冠层反射辐射过程中充分保留了叶片、茎等植被组分的空间结构信息，细致地刻画了植被的各种形态及生长结构特征对光线作用的影响，能够全面地考虑光线与冠层组分之间相互作用的反射、透射和多次散射过程，借助于高性能计算机技术，克服了一般植被遥感物理模型中很多简化和假设 (Zhao 等, 2006)。因此，在一定程度上其模拟结果可以用于代替野外实验数据，作为验证其他理论或经验模型的工具 (Li 和 Wang, 1995)。

由于受到计算能力和场景复杂度的限制，大部分计算机模拟模型和应用研究所模拟的场景尺度有限，计算效率低。为了使计算机模拟模型能够模拟更大的场景和提高计算效率，通常的做法是简化三维场景结构 (Huang 等, 2013)。然而，根据 Widlowski 等 (2014) 的研究表明，由于模型中使用简化的冠层结构中缺少了木质组分 (枝干等)，当模拟中等分辨率 ($>125\text{ m}$) 遥感图像反射率时，在近红外波段引起的误差超过 5%；而当模拟的分辨率达到 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 时，模拟的反射率误差甚至超过 50%。为了量化枝干对冠层反射率特性的影响，Malenovsky 等 (2008) 使用几何实体 (树干和一级分枝) 和混合介质 (叶片和直径小于

1 cm 的细枝) 的组合场景形式，利用 DART 模型模拟并定量对比了挪威松树林有无枝干对天顶方向反射率的影响，结果表明，在 0.4 m 分辨率下，耦合木质元素的冠层反射率在近红外波段会降低 4%，而在红光波段会增加 2%，进而导致冠层 NDVI 降低。虽然这种混合体元的方式实现了对直径小于 1 cm 的木质元素的构建，但是离真实结构仍有差距。一些学者意识到枝干对植被反射率的影响，尽力在植被辐射传输模型中增加枝干结构及其光学属性。Verrelst 等 (2010) 使用 FLIGHT 模型模拟植被反射率过程中考虑到了木质元素的影响，但是，仅将木质元素散射单元视为不透明的叶片单元 (透过率为 0)，树冠内的所有组分 (叶片和枝干) 使用统一的光学属性 (叶片和枝干的平均反射率)，而忽略了木质元素不同于叶片的反射特性。Myneni 等 (1997) 发展了基于数值解的三维辐射传输模型，该模型可以考虑植被结构及其空间异质性特征。他们在应用该模型反演全球植被叶面积指数 (LAI) 时，假设树干垂直，而树枝朝向随机分布，仍然使用植被统计属性，而不是真实的结构和分布信息。

通常计算机模拟模型需要准确的三维结构场景作为输入，而生成森林场景的过程比较复杂，使得计算机模拟模型的推广应用受到了一定的制约。上述研究中使用的植被冠层结构或组分光谱信息，以及模型都或多或少被简化，模拟信号的精度必然受到影响。为了克服场景简化带来的误差，Qi 等 (2019) 基于光线追踪算法发展了计算机模拟模型 LESS (Large-Scale remote sensing data and image Simulation framework)，该模型以虚拟实验室的形式，充分保留了三维场景的多尺度 (叶片尺度—冠层尺度—区域尺度) 细节特征，实现了更准确和更高效的森林大场景遥感信号模拟 (Liang 等, 2020)。

基于上述分析，本研究以大兴安岭典型树种兴安落叶松为例，提出了一套以单木为基础的真实森林场景重建方法流程；然后利用 LESS 模型模拟不同结构冠层场景的反射率信号，定量对比分析了木质元素对森林场景反射率的影响。

2 研究区及数据

2.1 研究区概况

研究区位于中国东北部大兴安岭根河森林保护

区, 森林覆盖率 83.76%, 主要树种有兴安落叶松、白桦和樟子松等。兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 为松科落叶松属的落叶乔木, 为寒湿性针叶林的主要建群树种。因其木材蓄积丰富, 也是该地区荒山造林和森林更新的主要树种。

兴安落叶松树冠近圆锥形, 树皮呈暗灰色或灰褐色, 易纵裂成鳞片状剥落; 针叶为条形或倒披针状条形, 长 1.5—3 cm, 成簇生长。根据气候条件, 每年 5 月中旬开始发芽, 8 月底开始落叶。

2.2 数据

数据包括 2013 年地面测量数据和 2016 年飞行获取的数据。地面测量数据包括组分和背景光谱、单木信息和地基激光雷达数据等。机载飞行获取的数据包括高分辨率 CCD 影像。

(1) 植被组分和背景光谱。将兴安落叶松树皮剥离, 利用美国 ASD field - Spec 3 分析光谱仪, 配备积分球测量了落叶松树皮的反射率光谱 (400—1100 nm, 光谱分辨率 2 nm)。由于针叶结构细小, 难以用同样的方法实测其光谱。参考 Wang 等 (2009) 实测的兴安岭落叶松针叶光谱和反演的参数, 并利用 LIBERTY 模型 (Dawson 等, 1998) 模拟典型兴安落叶松针叶的反射率和透过率谱。由于缺少样方林下反射率测量, 因此, 采用了一条研究区测量的裸土光谱, 作为林下背景反射率谱。所有测量的光谱数据如图 1 所示。

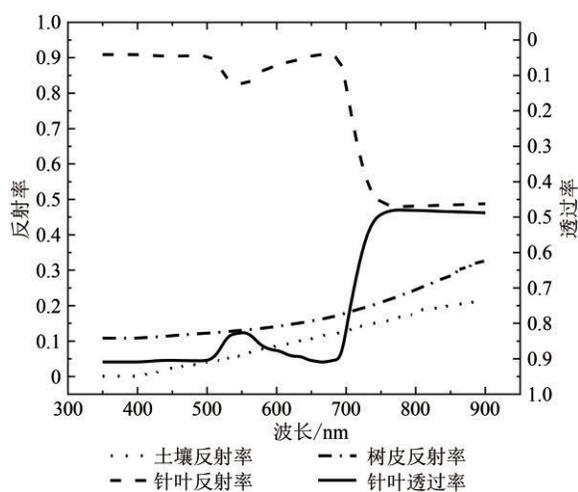


图 1 落叶松组分与背景光谱曲线

Fig. 1 Spectral curve optical properties of the larch and soil background

(2) 单木信息采集。在研究区内选择一典型森林样方 (45 m×45 m), 海拔高度约为 900 m。本样

方中共有 581 棵单木, 所有单木均为兴安落叶松。人工测量了样方内每木高度、冠幅、胸径和相对位置。将所有测量数据记录, 统计结果如表 1 所示。

表 1 样方内单木信息统计值

Table 1 Statistics of single tree information in the quadrat

树木参数	最小值	最大值	平均值	标准差
胸径/cm	5	22.7	8.6895	3.03688
树高/m	4	15.3	8.3655	2.11461
冠幅/m	0.5	6.6	2.3592	0.74686
枝下高/m	1.4	9.1	4.28263	1.607105

(3) 地基激光雷达数据与 DEM。用 Riegl vz-1000 地面全波形激光雷达扫描样方, 将 45 m×45 m 样方均匀分为 9 个方形小样方, 在每个小样方内选择合适位置进行全景扫描, 扫描角度分辨率 0.03°, 最后进行多站点数据拼接。点云数据基于后视定向方法进行数据粗拼接。根据拼接后的激光雷达数据, 经过滤波生成研究区 DEM 数据, 空间分辨率为 0.5 m。

(4) LAI 数据。2013-08-11, 样方内 LAI 采用两台 LAI-2000 仪器同时进行联合观测, 一个探头和主机自动测量冠层上方的测量值, 另一个探头和主机手动测量观测下方的测量值。将 45 m×45 m 大小的样方, 均匀划分为 9 个方格, 在方格内均匀采样。最终测得样方数据的 LAI 值为 2.28。

(5) 机载高光谱数据。2016-08-28, 通过机载飞行, 搭载 The AISA Eagle II 传感器, 获取高光谱图像, 并对数据进行辐射校正、几何纠正和大气校正, 得到地表反射率产品。该数据的空间分辨率为 1 m, 波段范围为 400—970 nm, 共有 64 个波段。

3 研究方法

森林场景是计算机模拟模型中最重要的输入参数之一。森林场景构建, 特别是还原现实的真实三维森林结构场景的重建是近几年研究的热点和难点。森林场景的构建主要以单木为基础, 通过不同的单木 (阔叶树和针叶树) 在空间上的组合与分布 (如二项式等概率分布模式) 而生成大场景。树木具有复杂的几何形状和拓扑形态, 真实树木的三维信息获取在测量和重建方面都极富挑战性。目前主要建模方法有两大类: 基于图像或三维测量信息的真实结构重建方法和根据植被生理生态特征发展而来的虚拟建模方法。其中, 真实结构重建可重现真实树木的形态及几何结构。但该类方法一般操作复

杂, 需要较多实测数据。虚拟建模方法则针对不同植被种类特征, 通过参数控制自动生成与真实结构相似的植被。目前基于虚拟建模方法发展了几款植被结构自动生成软件包, 例如 Xfrog (www.xfrog.com [2020-04-28])、L-studio、AMAP (www.amapstudio.cirad.fr [2020-04-28])、GreenLab (www.greenlab.org [2020-04-28])、OnyxTREE (www.onyxtree.com [2020-04-28]) 等。其中, OnyxTREE 软件开发了丰富易用的植被模型库, 包含了大量典型阔叶和针叶树种, 可以通过调整参数, 直接得到满足需要的单木结构模型。

本研究以单木为基本单元, 首先基于大量地面实测单木结构数据, 结合异速生长模型, 确定单木分级, 再利用 OnyxTREE 软件构建单木模型库, 并结合地面测量的单木位置和胸径信息, 近真实地还原森林样地, 实现真实森林场景重建; 然后用 LESS 模型模拟具有不同结构森林 (全木林和纯叶林) 场景的反射率信号, 定量对比分析不同因素对冠层反射率的影响。

3.1 单木模型构建

单木是森林的基本单元。虽然单木之间有差异, 但是同一树种的单木结构具有相似性。为了简化森林样方构建的过程, 我们使用少量的典型单木模型代表样方内具有相似结构的单木, 以减少森林场景重建所需的数据存储量和计算量。

一般来说, 同类树木具有相似的分支和叶片分布结构。为了在单木模型构建过程中确定结构参数, 减少控制结构参数变量的数量, 本研究首先对地面测量的样方内所有单木结构进行了统计分析。根据已有异速生长模型的研究, 胸径是一个与树高、冠幅、叶面积、生物量等有密切关系的关键参数 (Wang, 2006)。选择胸径作为控制单木分级结构的主要变量, 按照等间隔将胸径分为 6 级 (T1—T6) (表 2)。并以分级内所有单木的平均胸径、平均树高、平均冠幅和平均枝下高 (表 3) 作为构建单木模型的典型参数。分级单木平均结构参数与分级内实测单木相应参数对比, 其残差符合正态分布。其中胸径标准偏差为 0.83 cm; 树高标准偏差 1.40 m; 枝下高标准偏差 1.37 m; 冠幅标准偏差 0.51 m。都在可接受范围内。

然后, 利用 OnyxTREE 软件, 选择针叶模型库中落叶松属 (Larch), 输入平均胸径、冠幅、树

高、枝下高, 调整单木结构参数, 得到从小到大 6 类不同外观的兴安落叶松单木。

表 2 单木分级标准

Table 2 Tree grading standard

分级	胸径/cm	棵数	百分比/%
T1	5.0—7.95	295	50.8
T2	7.95—10.9	177	30.5
T3	10.9—13.85	71	12.2
T4	13.85—16.8	24	4.1
T5	16.8—19.75	9	1.5
T6	19.75—22.7	5	0.9
总计		581	100

表 3 分级单木信息统计值

Table 3 Statistics of single tree information for each tree grading

结构参数	单木分级					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
平均胸径/cm	6.51	9.21	12.15	15.08	18.28	21.64
平均树高/m	7.02	8.92	10.65	11.73	12.21	12.8
平均冠幅/m	1.97	2.43	3.03	3.31	4.17	5.42
枝下高/m	3.56	4.59	5.53	6.06	6.4	5.56



同时, 控制单木的叶面积密度, 将每棵单木叶面积 (LA) 分 7 等 (L0—L6)。如表 4 所示, 以 T3 单木为例, 保持枝干不变, 改变叶面积密度, 得到具有不同叶面积的单木三维模型。其中, L0 代表纯枝干, L1—L6 的单木模型叶面积逐渐增大。在这一类中的 7 棵单木具有相同的枝干结构, 枝干面积均为 10.31 m²。

表 4 不同叶面积单木结构 (以 T3 单木为例)

Table 4 Single tree structure with different leaf area (T3 is taken as an example here)

LA/m ²	0	2.64	4.94	8.48	17.74	31.90	46.10
缩略图							
单木	L0	L1	L2	L3	L4	L5	L6

生成的单木模型按冠型分6级,每一级按叶面积积分7等,因此,共有42棵具有不同外形结构和叶面积的树木三维模型。在每一个单木模型中,枝干和叶片是最主要的两类组成成分,单木模型以OBJ文件格式存储,使用过程中可以将枝干和叶片分类保存和使用。

3.2 森林场景构建

根据地面实测单木位置和结构(图2(a)),以胸径等级作为选择标准,在构建的单木模型中选择合适的单木,结合DEM数据,构建近真实三维森林场景(图2(b))。与机载CCD影像对比发现,重建的单木分布与真实森林场景接近,但是在部分区域的覆盖度或单木冠幅偏小,可能的原

因有(1)地面实测的单木位置和冠幅等信息有一定偏差,(2)分级的单木结构(冠幅、树高、叶面积等)与真实情况不完全一致,导致重建场景与真实场景之间的差距。为了获取不同LAI的场景,通过选择具有不同叶面积密度的单木模型(L0—L6),重复上述森林场景重建过程,构建若干个具有不同LAI的三维森林场景,根据LAI从小到大分别标记为S0—S6,相对应的叶面积指数分别为0, 0.4763, 0.908, 1.389, 2.6749, 4.6833, 6.9318。

同时,将模拟的森林场景分为仅包含叶片的纯叶林(L)和同时包含叶片与枝干的全木林(LB)场景,两类场景唯一的区别就是是否包含枝干。

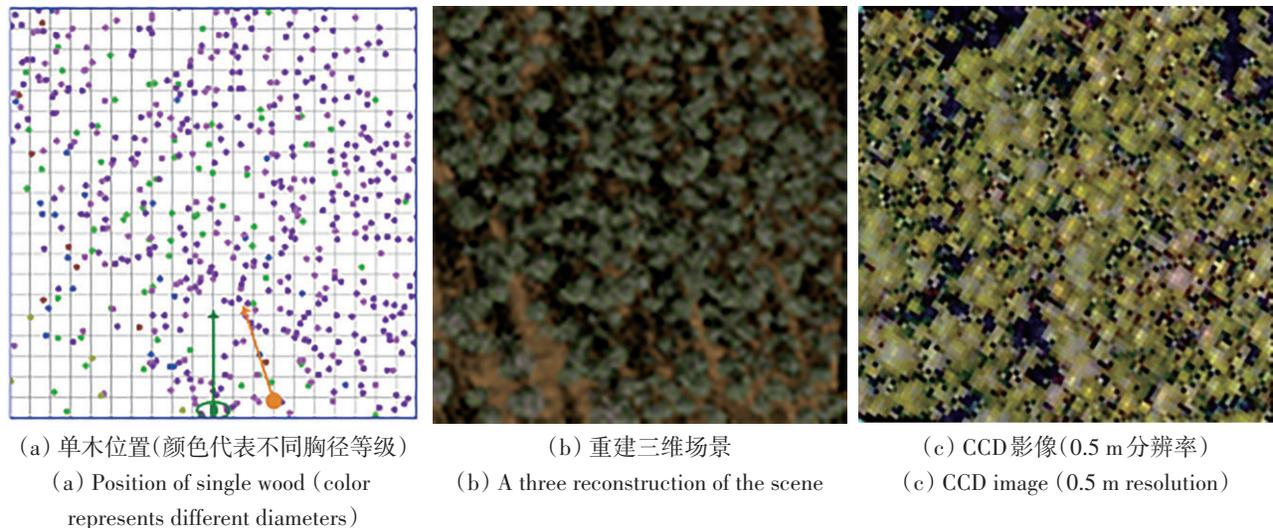


图2 样方尺度森林三维场景
Fig. 2 Quadrangle forest three dimensional scene

3.3 反射率模拟

计算机模拟模型LESS基于光线追踪算法,可以模拟多角度、多尺度、多/高光谱反射率图像,该模型已经开发了友好的用户界面和比较全面的功能模块,包括数据管理模块、场景构建模块、三维可视化模块、辐射传输模拟模块、并行计算模块以及后处理模块。

为了对比分析枝干对森林冠层反射辐射特征的影响,使用LESS模型分别模拟了全木林(LB)和纯叶林(L)场景的反射率。模拟的全木林样方的高光谱影像如图3(a),计算得到图像平均反射率谱,并与机载高光谱图像相同区域的平均结果进行对比(图3(b))。在可见光波段模拟全木林影像

的反射率略高于实测影像;在近红外波段模拟全木林影像的反射率低于实测影像,且模拟影像的红边更靠后。造成这样结果的原因可能有:(1)结构差异:构建的场景与真实场景结构有一定的差异,包括单木的位置、冠幅和叶面积等;(2)光谱差异:模拟影像的组分光谱采集于2013-08中旬,而机载高光谱影像采集于2016-08底。8月下旬是当地的秋季,森林进入落叶期,叶片光谱和森林LAI变化都较快。图2(c)的CCD影像中深浅不一的黄绿色也反映了这一时期植被组分光谱和LAI的迅速变化特征。模型中使用的裸土反射率光谱与实际林下反射率光谱的差异,也是导致这种差异的重要原因之一。整体来说,3条反射率均符合植被的反射率特征,曲线趋势一致,全木林比纯叶林

反射率更接近实测。全木林和纯叶林的反射率与实测反射率曲线的均方根误差分别为 0.0171 和 0.0411。

以 S2 场景 (表 5) 为例, 利用 LESS 分别模拟纯叶林和全木林影像, 图 4 对比了两类场景模拟的标准假彩色合成图像。模拟波段参照 Landsat 8 卫星

上 OLI 传感器上的波段设置。其中, 绿光 (Green, 中心波长 561.5 nm)、红光 (Red, 中心波长 654.5 nm) 和近红外 (NIR, 中心波长 865 nm) 3 个波段是本研究分析的重点波段。从图 4 的对比可以看出二者具有比较明显的颜色差异, 其本质是由于木质元素引起的反射率差异。

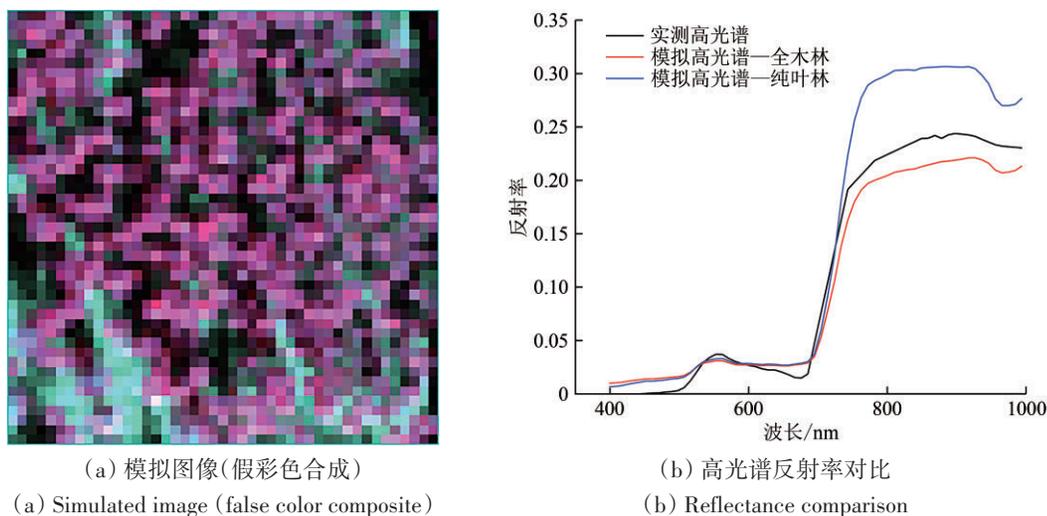


图 3 模拟与实测高光谱图像平均反射率谱对比

Fig. 3 Comparison of mean reflectance spectrum between simulated and measured hyperspectral images

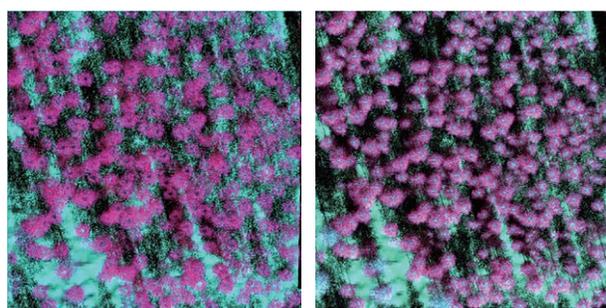


图 4 S2 场景模拟图像对比(假彩色合成)

Fig. 4 S2 scene simulation image comparison (false color composite)

4 结果分析

本文从图像空间分辨率、冠层 LAI 和分枝等级 3 个主要因素, 针对枝干对冠层反射率的影响进行定量的对比分析。

4.1 空间分辨率

随着遥感探测器的不断发展, 遥感图像的空间分辨率越来越高, 特别是随着无人机的出现,

使得亚米级—厘米级高分辨率图像的获取便捷而高效。与传统卫星遥感图像 (几十米—公里级) 相比, 高分辨率图像反映的地物细节特征更突出。因此, 传统以统计特征为主的辐射传输模型难以抓住地物异质性和细节特点, 无法实现高分辨率图像信号的模拟。

本研究以 S4 场景 (表 5) 为例, 分别模拟了空间分辨率为 0.1 m、0.5 m、1 m、3 m、5 m、9 m、15 m 时全木林和纯叶林的反射率图像, 并根据红光和近红外波段反射率计算差值植被指数 (NDVI)。

对全木林和纯叶林两类图像逐像元计算其反射率和 NDVI 差值 (全木林—纯叶林), 以绿光波段为例 (图 5)。其中红色代表低估 (正值), 即忽略枝干的纯叶林对应像元的反射率要低于全木林; 反之, 绿色则为高估 (负值)。黄色代表差值为 0, 即对反射率没有影响。从图 5 中可见, 空间分辨率越高, 反射率低估 (红色) 和高估 (绿色) 的像素数量就越多, 差值的阈值范围也越大。而随着空间分辨率降低, 反射率差值高估 (绿色) 像素增加, 而低估 (红色) 像素减少。当空间分辨率

大于5 m时,冠层场景反射率差值整体表现为偏高估。其他波段反射率和NDVI差值随空间分辨率有

类似的变化规律和特征。

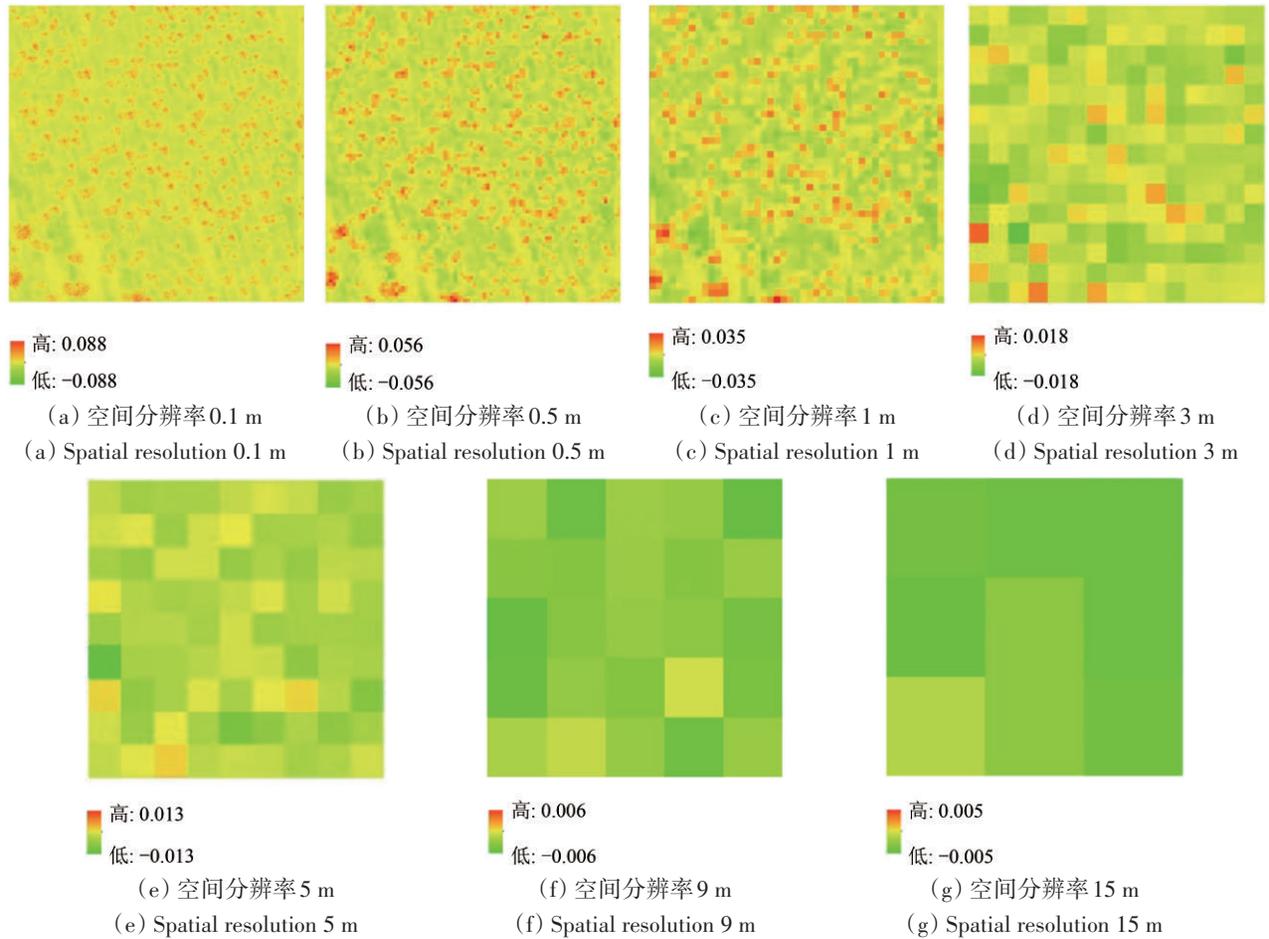


图5 S4场景绿光波段反射率差值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of reflectance in green band of S4 scene

以空间分辨率0.5 m为例,对比绿光、红光、近红外3个波段的反射率和NDVI的差值分布图像(图6)发现,红光和绿光波段反射率差值高估和低估像素具有相似的空间分布规律,而近红外波段则有更多高估(绿色)像素。从反射率和NDVI差值随空间分辨率的统计特征中可见,不同空间分辨率差值图像的均值都保持在负值(高估)的状态,在近红外波段的差值达到-0.088(47.1%)。而高估和低估的值域范围呈指数变化,空间分辨率越高,值域范围越大。以绿光为例,其反射率差值的极值从15 m分辨率时的0.005,迅速上升到0.1 m空间分辨率下的0.088(绝对值),估计误差增大了17倍以上。也就是说,当使用高空间分辨率(≤ 5 m)图像时,使用统计特征的模型在正向模拟和反向反演过程中都将失效。如何更好的处理和应用高空间分辨率图像所展现出来的各种细节信息既是机遇,也是挑战。

利用LESS模拟空间分辨率在0.1 m下的四分量(光照树冠、阴影树冠、光照背景和阴影背景)图像,以该像素中占优的组分制图,如图7(a)所示。截取其中部分区域放大(图7(b)),与反射率差值图像对比发现,在可见光波段(图7(c)—图7(d)),红色像素(低估)主要是光照树冠,而绿色像素(高估)主要是阴影背景和阴影树冠部分,而黄色像素(相等)存在于光照背景以及红色和绿色斑块的边缘过渡部分。在近红外波段(图7(e)),反射率差值在树冠部分整体表现为比较明显的绿色(高估),阴影背景表现为浅绿(弱高估),光照背景近黄色。整体来看,反射率差值在不同组分的空间对比表现不如可见光波段那么明显,树冠与背景像素的差值过渡更缓慢,出现更多偏黄色调像素。一方面,忽略枝干使树冠部分在近红外波段的反射率表现出明显的高估(绿色);另一方面,是由于植被在

近红外波段的多次散射更强烈，使得树冠与土壤背景的过渡区域扩大（黄色）。值得注意的是，图像中光照背景区域，由于受到多次散射的影响，也表现出了偏高估（黄绿色）现象。受红光和近红外波段

的共同影响，NDVI 差值（图 7（f））在树冠部分表现为高估（绿色），在阴影背景部分主要是低估（红色）。与近红外波段近似，在四分量之间有比较平缓的过渡，导致光照背景表现为略高估（黄绿色）。

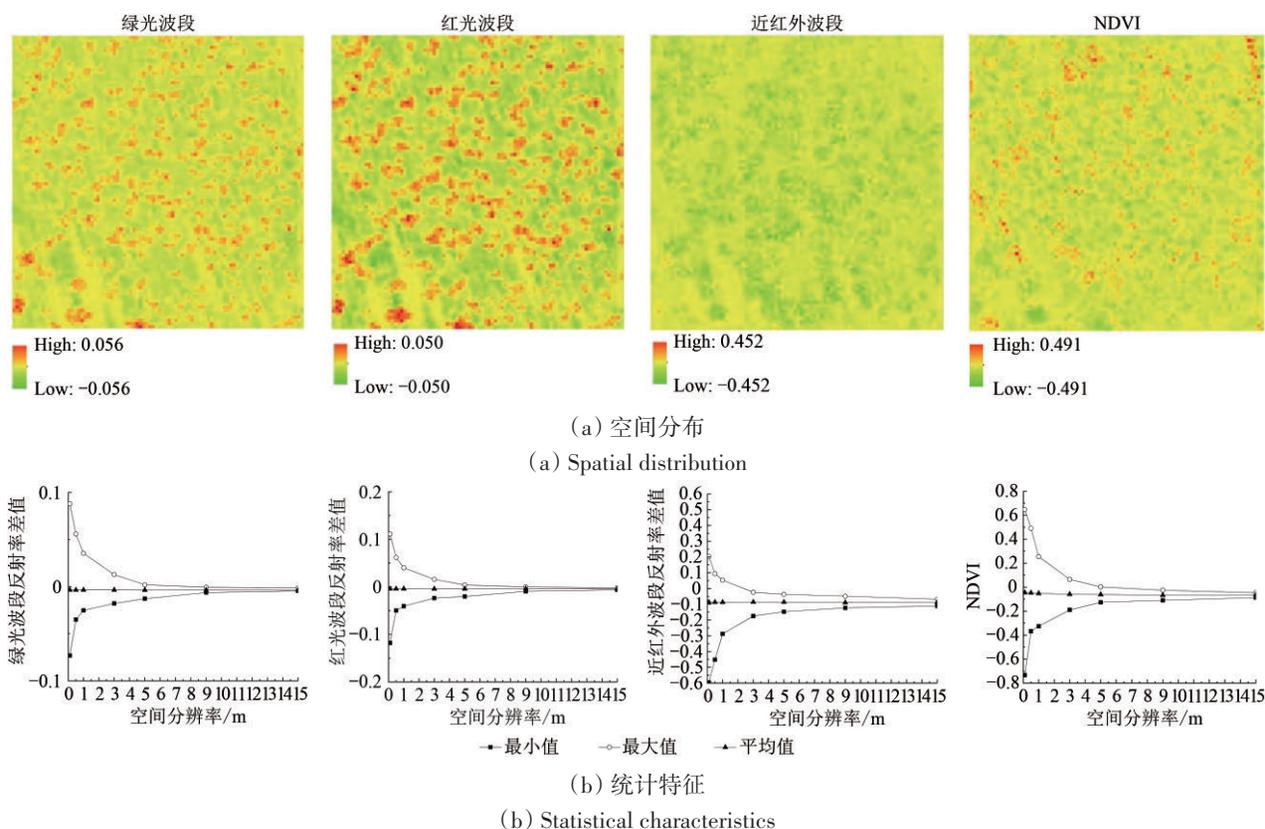


图 6 S4 场景波段反射率和 NDVI 差值的空间分布(0.5 m 空间分辨率)及随空间分辨率变化的统计特征

Fig. 6 Spatial distribution and statistical of difference of reflectance in green band of S4 scene

4.2 LAI

LAI 是影响植被冠层反射特征的最主要因素，而叶片的多少也会影响枝干对冠层反射率的贡献。本节通过模拟具有不同 LAI 的场景 (S0—S6) 反射率，定量分析枝干在不同 LAI 条件下对模拟森林冠层反射率的影响。根据 4.1 节的分析可知，空间分辨率越高，枝干对像元尺度反射率的影响越大。考虑到空间分辨率对估计误差的影响，此处以案例场景中最低空间分辨率，即整个场景作为一个像元 (45 m) 为例进行分析，可以推断，高于此空间分辨率时忽略枝干对森林冠层反射率的模拟误差会更大。

分别计算纯叶林和全木林整个场景反射率，结果如图 8 (a) 所示。随着 LAI 增加，场景在红光和绿光波段反射率逐渐减少，而近红外波段则逐渐增加。3 个波段的反射率在 LAI 大于 3 以后都接近饱

和，反射率变化缓慢。将纯叶林冠层反射率 R_L 与全木森林冠层反射率 R_{LB} 取绝对差值 ΔR ($\Delta R = |R_{LB} - R_L|$)。如图 8 (b) 所示，当 LAI 比较小时，两类冠层场景红光和绿光反射率差异明显，但总体而言，可见光波段反射率绝对差值比近红外波段的反射率绝对差值小得多，最大不超过 0.035 (红光波段)，差别主要来自于纯枝干和裸土反射率差值。虽然，红光和绿光波段反射率绝对差值较小，但是其相对差值 ($dR\% = \left(\frac{\Delta R}{R_{LB}}\right) \times 100\%$) 在 LAI 为 0 时 (落叶期) 接近 50% (红光波段)。随 LAI 增加，红光和绿光反射率绝对差值逐渐减小，在 LAI 大于 3 以后，其绝对差值趋近于 0。也就是说，对于红光和绿光波段而言，枝干对于冠层反射率的影响随着 LAI 增加而降低。特别是当 LAI 大于 3 以后，这种影响下降到 10% 以下。

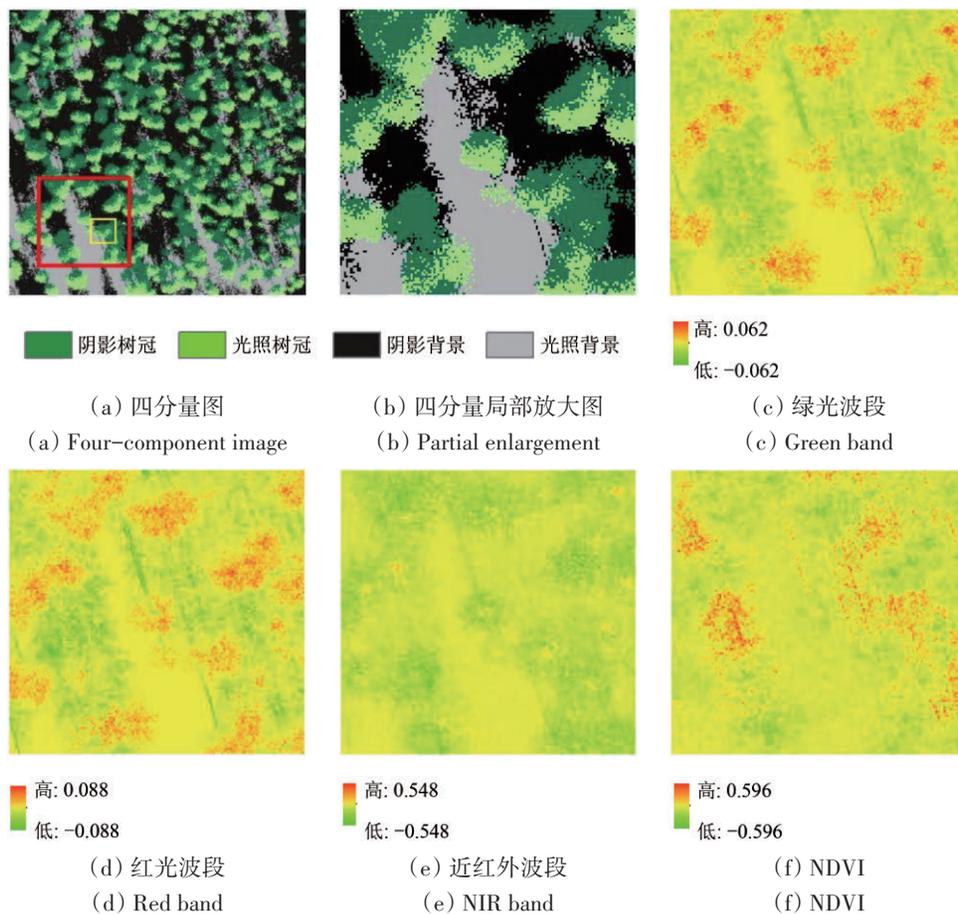


图7 S4场景反射率差值及NDVI差值的空间分布(分辨率为0.1 m)

Fig. 7 Spatial distribution of reflectance and NDVI in NIR band of S4 scene (resolution is 0.1 m)

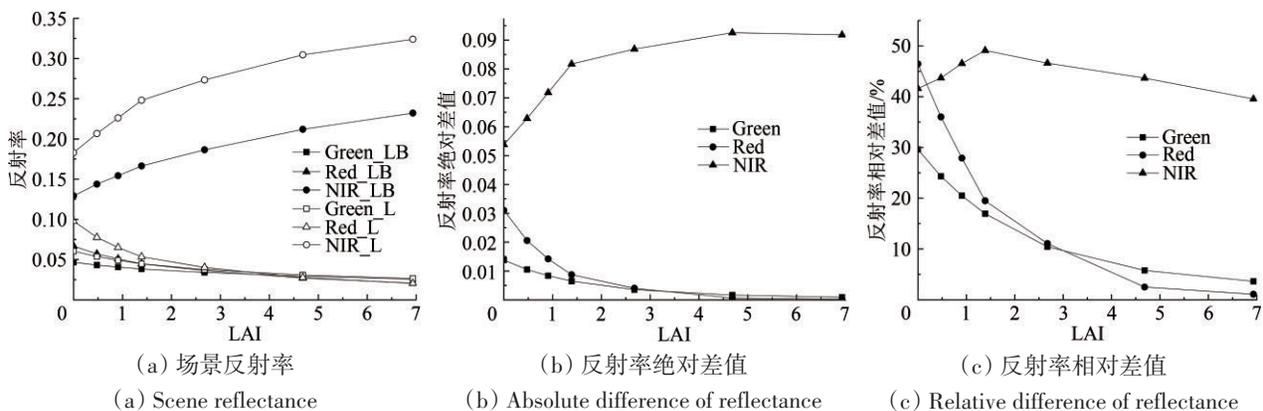


图8 不同LAI下木质元素影响冠层反射率对比

Fig. 8 Comparison of canopy reflectance with different LAI

与红光和绿光等可见光波段的冠层反射率相比, 近红外波段的反射率绝对差值随着LAI增大而增加, 当LAI大于3以后, 这种绝对差值接近饱和。也就是说, 随着LAI的增加, 近红外波段的反射率受枝干的影响反而更大, 其相对差值都在40%以上, 因此不可忽略。

NDVI对于植被的特征具有指示和放大的作

用, 经常被用于植被冠层参数(例如LAI)的反演。本研究利用模拟的森林冠层反射率分别计算两类场景的NDVI。如图9(a)所示, 两类场景的NDVI都随LAI的增大而增加, 符合一般植被特征规律。从图中可见, 当LAI为0时, 全木林(纯枝干)比纯叶林(裸土)的NDVI略低; 随着LAI增加, 全木林比纯叶林的NDVI略高。其绝对差值随

LAI先增加后降低, 在S3场景 (LAI=1.39) 时达到最大。虽然, 两类 NDVI 绝对差值最大仅为 0.051 (LAI=1.39), 相对差值也不超过 10%, 但是, 如果利用 NDVI 在该点估算 LAI 会导致 23% 的高估。

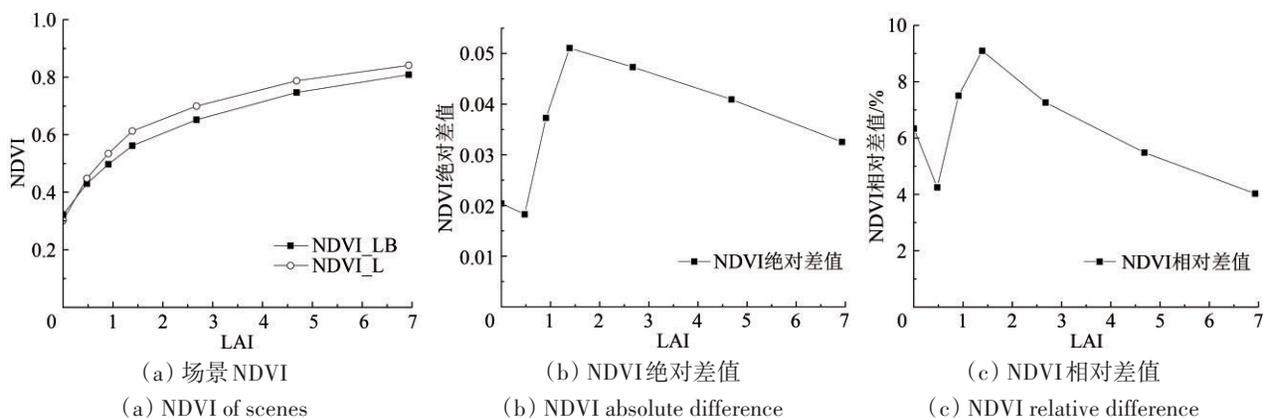


图9 不同LAI下枝干影响冠层NDVI
Fig. 9 Comparison of canopy NDVI with different LAI

4.3 分级枝干

随着辐射传输模型不断发展, 对植被结构的描述逐渐逼近于真实结构。然而, 分级枝干结构, 特别是小枝作为最末端的细微枝干结构, 目前为止在辐射传输模型中还未得到很好的刻画, 往往被简化处理。

表6以单木T5为例展示了具有不同等级分枝的木质结构。其中B1仅保留了主干, B2包含主干

和一级分枝, 以此类推, B5则包含了主干及所有分级分枝。木质元素面积WA (Woody Area) 为包括不同等级小枝、一级分枝和主干等的木质部分表面积, 单位为 m^2 。从WA可见, 从B1到B5单木木质面积增加了近10倍。木质元素面积比WAI (Wood Area Index), 由WA除以场景的面积得到, 单位为 m^2/m^2 。

表6 不同分枝等级木质元素结构(T5为例)

Table 6 Display of different grades of wood elements (T5 as an example)

枝干	B1	B2	B3	B4	B5	B6
缩略图						
WA/ m^2	2.33	6.48	11.92	12.07	21.66	21.66

以S4场景(表5)为例, 分别模拟空间分辨率为0.1 m时全木林(包括完整分枝结构)和去掉不同等级分枝结构的森林的反射率图像。对两类图像

逐像元计算其反射率差值(全木林—逐级去掉枝干结构的森林)。截取并放大T5单木(图7(a)中黄框)在场景中的反射率差值图像, 如图10所示。

以近红外波段为例，可以看到，当单木的木质元素仅保留主干时，在树冠部分模拟反射率会有比较明显的高估（最大达到0.445），随着分级枝干的增加，这种高估降低。这种高估主要是由于枝干和叶片反射率的差异引起的。此外，随着分级枝干的增

加，在反射率差值中还看到了个别低估像元（红色），这主要是由于枝干结构的增加同时还改变了冠层内部的光照和遮挡的比例关系，引起冠层反射率变化。

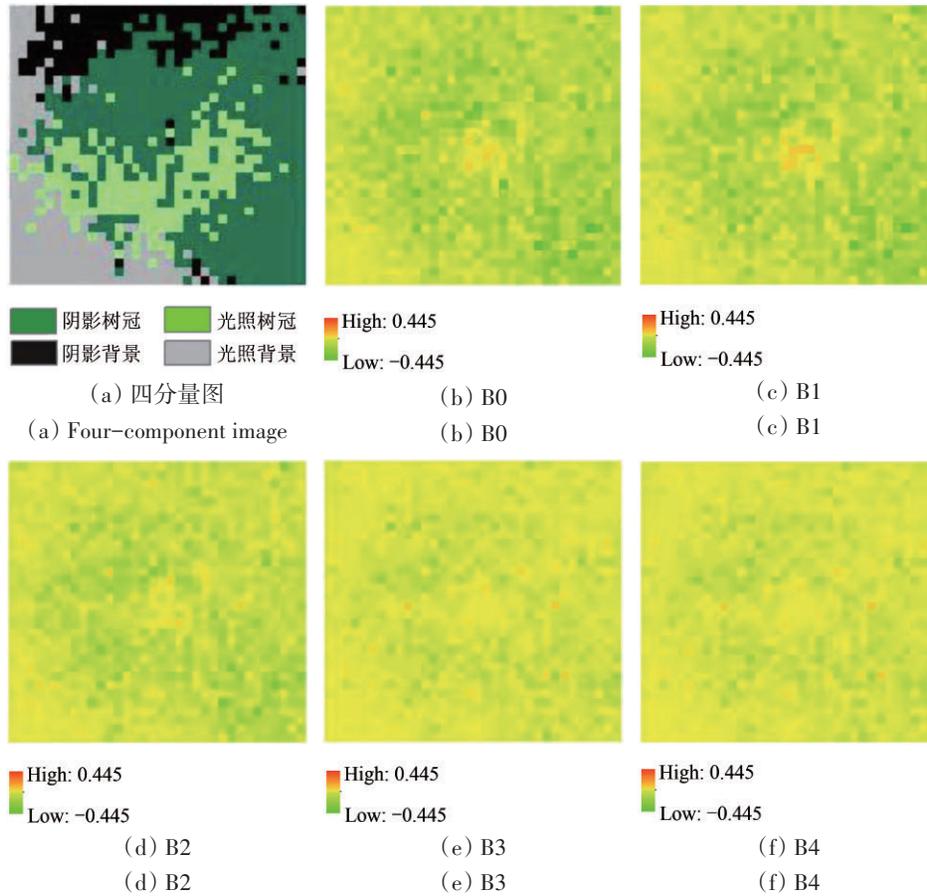


图 10 近红外波段反射率差值空间分布(T5 为例,空间分辨率0.1 m)

Fig. 10 Spatial distribution of the difference between the whole tree and the simplified tree reflectance in NIR band (T5 is taken as an example, and the spatial resolution is 0.1 m)

从定量来看，提取 T5 这棵树在不同分枝等级时的反射率和 NDVI（黄框区域取平均），如图 11 所示，随着木质元素等级的增加，可见光和近红外波段的反射率随之减小。其中，近红外波段反射率受枝干影响最大，最大反射率差值（B0 情况）可以达到 0.114，模拟误差高达 49.0%。虽然，红光和绿光波段的反射率绝对差值都在 0.01 左右，但是其相对误差也都高达 31.8%（红光）和 24.6%（绿光）。即使仅忽略最小一级分枝（B4），模拟误差也能达到 17.7%（近红外），13.4%（红光）和 10.5%（绿光）。

从模拟的森林场景反射率整体来看（图 11（d）—图 11（f）），其反射率和 NDVI 变化规律与 T5 单木类

似，都随着分枝等级的增加，场景反射率逐渐降低，反射率差值减小。场景整体的反射率绝对差值相对于单木略低，但是其最大相对误差仍然达到 48.0%（近红外），36.7%（红光）和 28.8%（绿光）。由此可见，枝干，即使是小枝对于冠层反射率仍具有显著的影响，不可忽略。

本文重点分析了忽略枝干对冠层反射率的影响，但是在此过程中未考虑因忽略枝干对冠层结构引入的偏差。为了保持冠层结构不变，把枝干假设为叶片，用叶片反射率代入枝干反射率（枝干透过率仍然设为 0）重新模拟冠层反射率（R'），其中主杆光谱保持枝干光谱不变。这种方法相当于将枝干等效为叶面积。模拟的冠层平均反射率

与相应忽略枝干的冠层反射率做对比，结果如图 11 (d)—图 11 (f) 中 ‘★’ 号所示。可以发现，在可见光波段，R’要略低于全木林（低估）；在近红外波段则略高估（图 11 (d)）。这主要是由于枝干与叶片光谱的差异引起的。从 R’与全木林

反射率和 NDVI 的绝对差值（图 11 (e)—图 11(f)）来看，枝干等效叶面积的方法可以部分缓解完全忽略枝干引起的冠层反射率差异，但是仍然会导致冠层反射率的高估（近红外）或低估（可见光）。

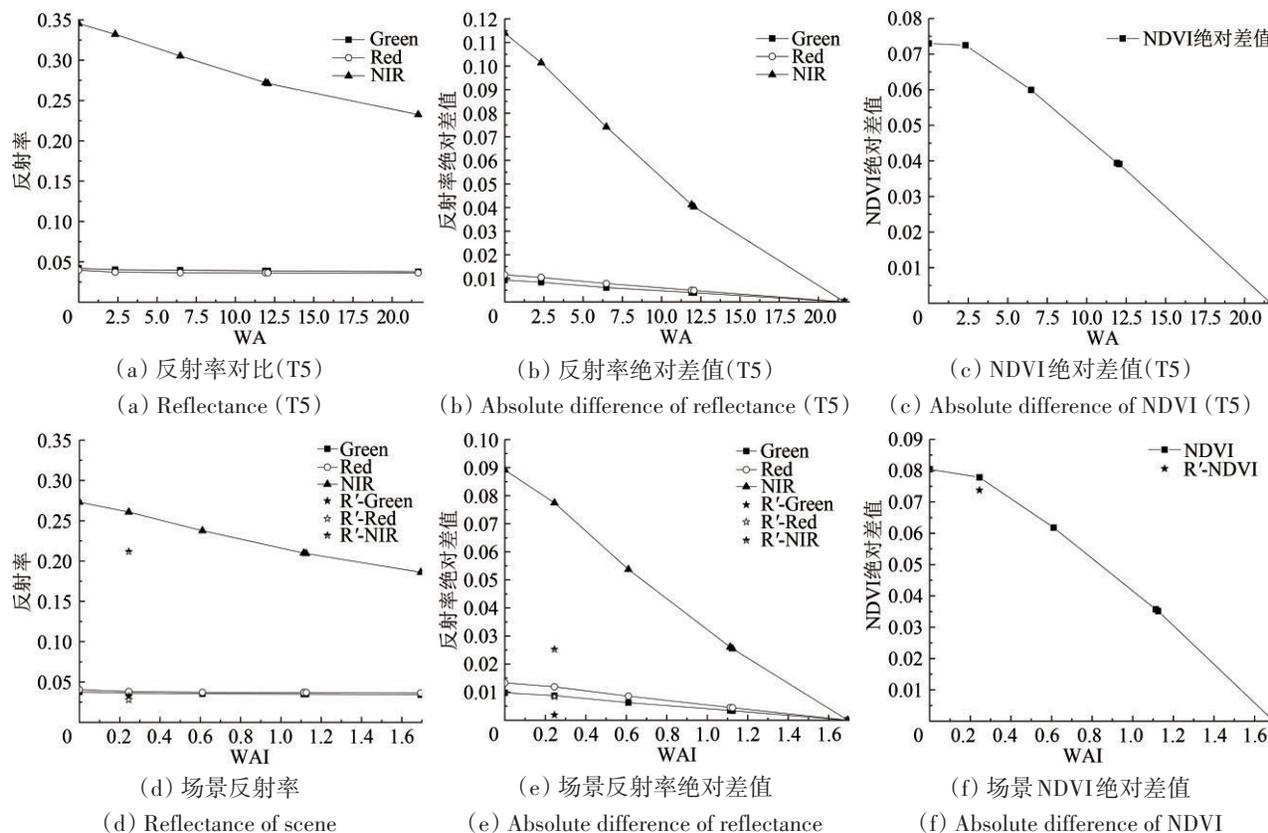


图 11 不同等级木质元素对单木和森林场景反射率和 NDVI 影响对比

Fig. 11 Comparison of the effects of different grades of wood elements on the reflectance and NDVI of single wood and forest scene

5 结论

本文基于地面实测数据，以单木为单元重建三维森林场景，并利用 LESS 模型模拟冠层反射率，定量对比分析了在不同条件（空间分辨率、LAI 和分枝等级）下枝干对植被冠层反射率的影响。

研究发现，遥感图像的空间分辨率越高，森林结构细节越明显，忽略枝干对森林冠层反射率在像元尺度的影响也就越大，且模型的估计误差在空间分布上具有一定规律性。以兴安落叶松场景为例，忽略枝干会导致模拟反射率表现出明显的低估和高估，这种估计误差与波段和场景四分量组分有关。其中，可见光波段在光照树冠主要表现为低估，在阴影树冠和阴影背景部分表现为

高估；而近红外波段在光照和阴影树冠都表现为比较明显的高估；而光照背景在所有波段中受枝干影响最小。在整个场景尺度（45 m）上，忽略木质元素会导致模拟的反射率高估。其中，可见光波段（红光和绿光）为弱高估，而近红外波段高估明显（47.1%）。

随着森林场景 LAI 增加，忽略枝干对冠层在可见光波段反射率的影响逐渐减小，当 LAI 大于 3 后相对偏差低于 10%；而对近红外波段的影响逐渐增加，在 LAI 大于 3 后趋于饱和，在所有 LAI 条件下相对偏差都能达到 40% 以上。由此导致 NDVI 相对差值的显著增大，最大可达 9.10%（LAI=1.389）。

分枝具有不同等级，即使是最末端的小枝也会对冠层反射率造成 10%（绿光）以上的模拟偏差，而忽略所有分枝结构，更是会使模拟偏差达

到49% (近红外)。

综上所述, LAI增加, 无法完全消除木质元素对冠层反射率造成的影响, 特别是在近红外波段, 忽略木质元素会对冠层反射率造成40% (近红外)以上的偏差, 即使仅忽略最末级小枝仍然会造成10% (绿光)以上的偏差。而降低空间分辨率, 则可以削弱木质元素对冠层反射率的影响。然而, 随着全球遥感探测器空间分辨率不断提高, 未来的定量遥感研究不可避免的要面对处理和精确提取高空间分辨率下细节信息的问题。

参考文献(References)

- 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]
- Daily G, Postel S, Bawa K and Kaufman L. 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press.
- Dawson T P, Curran P J and Plummer S E. 1998. LIBERTY—modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment*, 65(1): 50-60 [DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00007-8]
- Fearnside P M. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90(1): 59-87 [DOI: 10.1016/s0378-1127(96)03840-6]
- 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]
- Lau A, Bentley L P, Martius C, Shenkin A, Bartholomew H, Raunonen P, Malhi Y, Jackson T and Herold M. 2018. Quantifying branch architecture of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Trees*, 32(5): 1219-1231 [DOI: 10.1007/s00468-018-1704-1]
- Li X W 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 Wang J D. 1995. *Plant Photon Remote Sensing Model and Parameterizing of Plant Structure*. Beijing: 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)
- Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni W J, Qiu F, Song L L, Sun L,

Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子铤, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. 遥感学报, 24(6): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]

- 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 (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) [DOI: 10.11834/jrs.20166280]
- Malenovský Z, Martin E, Homolová L, Gastellu-Etchegorry J P, Zurita-Milla R, Schaepman M E, Pokorný R, Clevers J G P W and Cudlín P. 2008. Influence of woody elements of a Norway spruce canopy on nadir reflectance simulated by the DART model at very high spatial resolution. *Remote Sensing of Environment*, 112(1): 1-18 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.028]
- Myneni R B, Ramakrishna R, Nemani R and Running S W. 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6): 1380-1393 [DOI: 10.1109/36.649788]
- Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etchegorry J P, Li L Y, Zhang W M, Mu X H and Norford L K. 2019. LESS: Large-Scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sensing of Environment*, 221: 695-706 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.036]
- 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]
- Verrelst J, Schaepman M E, Malenovský Z and Clevers J G. 2010. Effects of woody elements on simulated canopy reflectance: implications for forest chlorophyll content retrieval. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 647-656 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.11.004]
- Wang C K. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 222(1/3): 9-16 [DOI: 10.1016/j.foreco.2005.10.074]
- Wang L, Luo Y Q, Huang H G, Shi J, Keliövaara K, Teng W X and Qi G X. 2009. Reflectance features of water stressed *Larix gmelinii* needles. *Forestry Studies in China*, 11(1): 28-33 [DOI: 10.1007/s11632-009-0012-7]
- Widlowski J L, Côté J F and Béland M. 2014. Abstract tree crowns in 3D radiative transfer models: impact on simulated open-canopy

reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 142: 155-175
[DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.016]
Zhao F, Gu X F, Liu Q, Yu T, Chen L F and Gao H L. 2006. Modeling
of 3D Canopy's radiation transfer in the VNIR and TIR domains.

Journal of Remote Sensing, 10(5): 670-675 (赵峰, 顾行发, 刘强,
余涛, 陈良富, 高海亮. 2006. 基于 3D 真实植被场景的全波段辐
射传输模型研究. *遥感学报*, 10(5): 670-675) [DOI: 10.11834/jrs.
20060599]

Influence of woody elements on nadir reflectance of forest canopy based on simulations by using the LESS model

XU Yue¹, XIE Donghui¹, QI Jianbo^{1,2}, YAN Guangjian¹, MU Xihan¹, ZHANG Wuming¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management,
Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: At present, Most vegetation radiative transfer models were developed on the basis of a simplified canopy structure when simulating the interaction between solar radiation and vegetation. They retain the structure and spatial distribution characteristics of leaves but ignore the influences of wood elements (such as branches) on the reflection characteristics of a canopy. LESS, as one of the computer simulation models, can fully consider the spectral and structural characteristics of various components (leaves and branches) of vegetation and accurately simulate the process of light scattering and radiation in the canopy. Thus, it can be applied to analyze the effects of wood elements on the reflectance of a forest canopy on the basis of a reconstructed realistic three dimensional (3D) forest scene.

On the basis of field data, we developed a basic framework to reconstruct a 3D scene of a complex forest with single tree as basic unit. Diameter at Breast Height (DBH) was selected as the main variable to divide trees into six levels (T1—T6). The mean DBH, mean tree height, mean crown width, and mean height of branches at level were used as typical parameters to build a tree model by using OnyxTREE. When a near-real 3D forest scene was constructed, the appropriate model in the constructed single-tree library was selected with the DBH level as the standard. The computer simulation model LESS was used to simulate the reflectance of 3D scenes of forests with and without wood elements. The effects of forest wood elements on canopy reflectance were analyzed quantitatively.

Ignoring the wood elements will lead to the deviation of vegetation canopy reflectance, especially in the NIR band. The relative deviation of reflectance in the NIR band is more than 40% for all scenes with different LAIs. High spatial resolution is another important factor highlighting the influences of wood elements. As the spatial resolution increases, the deviation increases. Different grades of woody structure affect canopy reflectance; even ignoring a twig will cause an estimation error of 17.7% (NIR band). The use of wooden area instead of leaf area can partially alleviate the difference in canopy reflectance caused by completely ignoring wooden elements, but it still leads to overestimation (NIR) or underestimation (visible light) of canopy reflectance.

The vegetation radiative transfer models that use statistical features to replace 3D structure distribution can no longer meet the accuracy requirements of quantitative remote sensing. Hence, the deviation caused by ignoring wood elements should be considered, specially for high-resolution remote sensing images.

Key words: radiative transfer model, forest, reflectance, wood elements, 3D reconstruction, LESS (Large-Scale remote sensing data and image Simulation framework)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42071304)