

三维解析辐射传输模型 ESRT 原理及其 异质森林冠层光谱模拟应用

李骁尧^{1,2}, 饶月明^{3,4}, 张卓立¹, 魏胜蓉¹, 秦朋遥¹,
谭炳香^{1,2}, 符利勇¹

1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;
2. 国家林业和草原局 林业遥感与信息技术重点实验室, 北京 100091;
3. 国家林业和草原局 西北调查规划院, 西安 710048;
4. 旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710048

摘要: 森林场景中的复杂空间异质性会影响冠层反射特性, 如何处理异质性问题为辐射传输建模领域的难点。为克服经典解析模型简化场景导致的精度受限问题以及计算机模拟模型在大场景模拟中的运行效率受限问题, 我们基于随机辐射传输理论开发了三维解析辐射传输模型 ESRT, 然而 ESRT 模型在不同复杂森林场景的应用尚待挖掘, 需要更多的野外实测数据进行模型验证与评估。本文介绍了 ESRT 模型的基本原理和输入输出参数, 并基于 21 个混交林样地和 50 个虫害胁迫样地调查数据, 探讨模型模拟不同类型异质森林冠层光谱的能力, 并分析混交、虫害程度对森林冠层光谱的影响。结果表明, 相比原版 SRT 模型, 扩展的 ESRT 模型模拟混交林、虫害胁迫林分冠层光谱与样地实测光谱有更好的一致性, 模拟精度更接近三维计算机模型; 针阔混交比、受害叶片的垂直分布均会影响冠层光谱信号。ESRT 模型提供了面向多种异质森林场景的辐射传输模拟框架, 平衡了三维结构的模拟精度与经典解析模型的模拟效率, 更适合大尺度的复杂林分模拟。研究可为 ESRT 模型的复杂森林场景监测应用提供一定的理论基础。

关键词: 遥感, 辐射传输, 三维解析模型, 异质森林冠层, 混交林, 森林病虫害

中图分类号: P2

引用格式: 李骁尧, 饶月明, 张卓立, 魏胜蓉, 秦朋遥, 谭炳香, 符利勇. 2025. 三维解析辐射传输模型 ESRT 原理及其异质森林冠层光谱模拟应用. 遥感学报, 29(4): 976-989

Li X Y, Rao Y M, Zhang Z L, Wei S R, Qin P Y, Tan B X and Fu L Y. 2025. Principles of the three-dimensional analytical radiative transfer model esrt and its applications in simulating heterogeneous forest canopy spectra. National Remote Sensing Bulletin, 29(4): 976-989 [DOI: 10.11834/jrs.20243510]

1 引言

植被遥感辐射传输建模是理解遥感观测信号和反演地表植被参数的理论基础, 像元内部的植被结构空间异质性是遥感机理建模需要考虑的重要问题。其中, 森林的类型、结构复杂多变, 不仅具有林木与林隙之间的非均质分布特征, 林木之间、单木内部也会存在空间异质性 (如树种混交、扰动胁迫、物候变化等)。进行异质森林冠

层辐射传输建模对于探究林业定量遥感机理、优化森林参数反演方法具有重要研究意义, 在森林经营评价、森林胁迫监测等多学科领域存在应用潜力。

现有的植被遥感机理模型多种多样, 总体上可分为辐射传输模型 (均匀场景假设)、几何光学模型 (树冠土壤分离)、混合模型 (辐射传输与几何光学耦合)、计算机模拟模型 (精细场景刻画) (李小文等, 1993; 李小文和王锦地, 1995)。对于复杂森林冠层场景而言, 一维辐射传输模型的

收稿日期: 2023-12-04; 预印本: 2024-03-19

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFD2200405-1); 中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (编号: CAFYBB2023MA013)

第一作者简介: 李骁尧, 研究方向为林业遥感机理建模与应用。E-mail: xiaoyaoli@ifrit.ac.cn

通信作者简介: 谭炳香, 研究方向为森林资源遥感监测、森林信息遥感提取。E-mail: tan@caf.ac.cn

最初版本假设冠层为浑浊均匀介质, 经过一系列研究的改进, 通过水平拼接 (Zeng 等, 2016) 或者垂直分层 (Leblanc 等, 1999; Kuusk 和 Nilson, 2000; Kuusk, 2001; Wang 和 Li, 2013) 思想, 逐渐可以用于特定规律场景的非均质植被模拟; 几何光学模型中假设植物具有特定的形状, 同时可扩展至行播结构以垄为几何特征的二维场景假设 (闫彬彦 等, 2012), 可适用于单一树种、行结构的人工林模拟。然而对于森林中的多层、离散树冠结构与冠内异质性, 传统解析模型难以兼顾三维空间的异质结构模拟。三维计算机模拟模型是模拟复杂森林场景辐射传输的重要工具之一, 此类模型通常先生成特定的三维场景, 然后模拟辐射与三维场景中的对象之间的交互作用过程, 如基于辐射度的模型 RAPID (radiosity applicable to porous individual objects for directional reflectance over complex vegetated scenes) (Huang 等, 2013, 2018), 以及基于光线追踪的模型 DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) (Gastellu-Etchegorry 等, 1996) 和 LESS (large-scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes) (Qi 等, 2019)。通过设定三维森林场景中任意位置组分要素的光学和结构特性, 能够实现多种异质森林冠层辐射传输的模拟。然而, 使用三维计算机模型对森林冠层内部异质性进行的研究很少 (Lin 等, 2021), 因为此类模型的主要缺点是精细特征模拟通常会以大量的运行时间为代价, 在进行大尺度模拟时, 有必要引入解析模型的思想对模型参数进行简化 (Qi 等, 2022)。

现有的适合异质森林冠层场景的遥感模型中, 传统解析模型、三维计算机模型都有各自的缺点, 无法兼顾精确度和模拟速度。随机辐射传输 SRT (Stochastic Radiative Transfer) 理论源自三维辐射传输方程, 通过引入随机概率参数, 将场景三维结构进行参数化表达, 从而兼具一维的简洁形式和接近三维的模拟精度 (柳钦火 等, 2016), 是目前叶面积指数 MODIS LAI (Leaf Area Index)、光合有效辐射吸收比 FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) 产品生产的核心模型算法 (Shabanov 等, 2003; Pu 等, 2023)。最初版本的 SRT 面向单树种森林, 具有模拟由离散树冠组成的非连续森林冠层辐射传输的能力 (Shabanov 等, 2000)。SRT 理论提出后经历了一系列的发展, 通

过改进随机几何理论实现了对多种树冠形状林分三维结构的参数化 (Huang 等, 2008), 通过耦合比尔—朗伯定律将间隙率和叶面积指数融入到模型中 (Shabanov 和 Gastellu-Etchegorry, 2018), 并修正了镜面反射和热点效应 (Yang 等, 2018; Yan 等, 2021), 加入了日光诱导叶绿素荧光辐射传输 (Zeng 等, 2020)。SRT 模型在非均质森林场景的辐射传输模拟应用中具有优势和潜力, 然而上述 SRT 理论的扩展及验证主要基于单一光学特性树种假设, 无法直接迁移至叶片光学特性存在水平、垂直异质性的森林; 不同光学特性的多树种混合林分双向反射率因子 BRDF (Bi-directional Reflectance Factor) 计算的理论公式虽曾被提出 (Shabanov 等, 2007), 但尚未使用真实森林场景进行验证, 并且缺少各类典型异质冠层结构的参数化方法, 阻碍了其在复杂场景的实际应用。因此, 聚焦不同类别树冠内部、树冠之间异质性结构的森林场景, 有必要构建一种普适性的异质冠层结构模型框架。我们基于 SRT 理论扩展异质森林冠层结构的参数化表达方式, 用一维的模型参数实现了兼顾水平、垂直异质性的三维林分结构模拟, 提出了平衡三维森林冠层模型的精度和一维解析模型的运算效率的 ESRT (Stochastic Radiative Transfer model for forests with heterogeneous canopy structure) 模型 (Li 等, 2020, 2022)。

然而目前 ESRT 模型在不同类别森林异质冠层的适用性尚有待论证, 并且需要更多野外实测数据对模型在不同场景的表现进行评估。因此, 本研究系统介绍了 ESRT 模型模拟不同复杂森林场景的基本原理和输入输出参数; 基于 21 个华北落叶松 (*Larix principis rupprechtii* Mayr) — 白桦 (*Betula platyphylla* Suk) 混交林样地和 50 个小蠹虫害胁迫云南松 (*Pinus yunnanensis*) 样方调查数据, 探究模型对不同类别真实森林异质冠层光谱的模拟精度, 并和改进前的 SRT 模型、三维计算机模型 LESS 模拟结果进行对比; 同时分析混交、虫害胁迫水平对森林冠层光谱的影响机制, 为 ESRT 模型在复杂结构森林监测领域的实际应用提供理论指导。

2 ESRT 模型基本原理

2.1 SRT 模型基本原理

植被三维辐射传输方程可以求解三维场景中

每个位置的辐射强度 (Ross, 1981; Myneni 等, 1995), 然而遥感对地观测的实际应用通常在像元尺度, 计算辐射场的统计平均值比单个位置的辐射强度更有意义 (Knyazikhin 等, 1998)。实现这一目标的基本方法是生成一组具有代表性的树冠, 分别对每个位置求解辐射传输方程, 最终计算平均辐射强度。然而, 这种方法过于耗费时间和计算资源, 因此需要另一种思路, 即在求解辐射传输方程之前先对冠层结构进行统计平均化处理。基于这种思路, Shabanov 等 (2000) 开发了 SRT 模型, 研究结果证明 SRT 模型能够有效模拟非连续植被冠层的辐射传输。

为模拟林分内特定水平面特定方向的平均辐射度, SRT 模型使用随机概率统计函数, 将三维辐射状态平均化为一维形式, 并直接提供平均辐射场的方程。随机概率统计函数概念主要包括两个概率参数指标: 找到植被概率 $p(z)$ 和对相关函数 $q(z, z', \Omega)$, 以此将林分的空间结构参数化, 进而求解辐射传输方程 (Shabanov 等, 2000)。如图 1 所示, 在三维空间中, $p(z)$ 表示在水平面 z 找到植被的概率, $q(z, z', \Omega)$ 表示光子沿 Ω 方向穿过 z 和 z' 两个水平面时同时找到植被的概率。

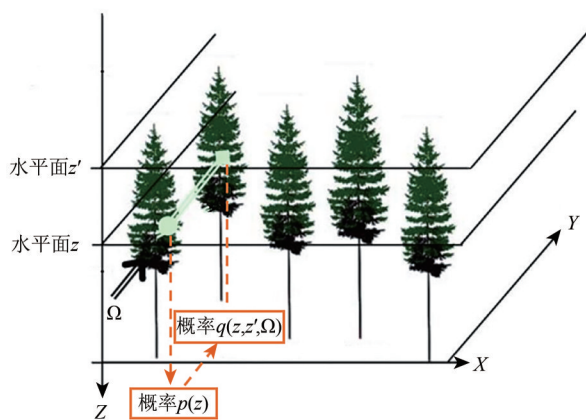


图 1 SRT 模型参数 p 和 q 示意图
Fig. 1 Schematic diagram of parameters p and q in the SRT model

SRT 模型的核心方程组如式 (1)—(3) 所示:

$$I(z, \Omega) + \frac{1}{\mu} \int_z p(z') \sigma(\Omega) U(z', \Omega) dz' = \frac{1}{\mu} \int_z \omega_0 dz' \int_{4\pi} p(z') U(z', \Omega') \sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' + I(z_B, \Omega) \quad (1)$$

$$U(z, \Omega) + \frac{1}{\mu} \int_z K(z, z', \Omega) \sigma(\Omega) U(z', \Omega) dz' = \frac{1}{\mu} \int_z \omega_0 dz' \int_{4\pi} K(z, z', \Omega) U(z', \Omega') \sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega' + U(z_B, \Omega) \quad (2)$$

式中, $I(z, \Omega)$ 和 $U(z, \Omega)$ 分别是总体空间和植被区域在 z 平面 Ω 方向极角的平均辐射强度。 $I(z_B, \Omega)$ 和 $U(z_B, \Omega)$ 代表相应的边界条件, μ 是 Ω 方向极角的余弦值。植被的总消光系数用 $\sigma(\Omega)$ 表示, 受叶面积体密度、叶倾角分布和树冠高度影响; 而 $\sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 是从 Ω' 到 Ω 方向的差分散射系数, 受叶倾角分布影响; ω_0 是单次散射反照率 (取决于波长)。 $K(z, z', \Omega)$ 表示冠层结构的条件对相关函数, 跟两个随机概率参数有关:

$$K(z, z', \Omega) = q(z, z', \Omega) / p(z) \quad (3)$$

在求解方程时, 将辐射传输分解为两个子问题: BS (Black Soil) 问题和 S (Soil) 问题 (Knyazikhin 等, 1998)。BS 问题是指太阳光从上方射入植被冠层, 进入下方土壤表面的辐射被完全吸收; S 问题是指同样的冠层, 仅考虑来自土壤反射的光源从冠层下方进入, 并作用于冠层中的叶片元素。分别求解两个子问题的总体空间平均辐射强度 $I(z, \Omega)$ 和植被区域平均辐射强度 $U(z, \Omega)$, 每个子问题在求解过程中进一步将 $I(z, \Omega)$ 和 $U(z, \Omega)$ 分解为直射辐射部分和散射辐射部分。然后基于能量守恒原理, 计算子问题的冠层吸收率、反射率、透过率及 BRF。最终组合两个子问题, 即考虑入射辐射在冠层、土壤间的多次散射和吸收过程, 假设土壤为朗伯体表面, 根据式 (4) 计算冠层 BRF:

$$\text{BRF}(\lambda) = \text{BRF}_{\text{BS}}(\lambda) + \frac{\rho_{\text{soil}}(\lambda)}{1 - \rho_{\text{soil}}(\lambda) R_s(\lambda)} T_{\text{BS}}(\lambda) \text{BRF}_s(\lambda) \quad (4)$$

式中, λ 表示波长, R_s 是 S 问题的冠层反射率, T_{BS} 是 BS 问题的冠层透射率, ρ_{soil} 表示土壤反射率。

2.2 ESRT 模型对冠层异质性的扩展

造成森林冠层结构异质性的原因多种多样 (图 2), 导致冠层中光学特性不同的要素存在空间分布上的差异, 需要开发不同结构通用的冠层模型, 从而对冠层结构具有明确的参数化表达。为了平衡模拟精度和效率, 我们假设森林冠层中存在两种光学特性的要素。对于 3 种以上光学要素的复杂森林结构情况, 直接输入模型会大幅增加三

维解析模型的复杂度与运行时间，在实际应用中可结合关注的主要目标，将森林冠层划分为两类主要的光学要素组（如针叶树和阔叶树、健康木和胁迫木等）。因此，在单木尺度上，我们综合考虑了多种异质森林结构场景，将模型中的单木树

冠定义为3种类型：（1）均质型树冠，（2）上下异质型树冠，（3）随机异质型树冠。上下异质型树冠代表两种光学要素呈垂直分层的树木，而随机异质型树冠代表两种光学要素在树冠内没有规则的垂直变化。

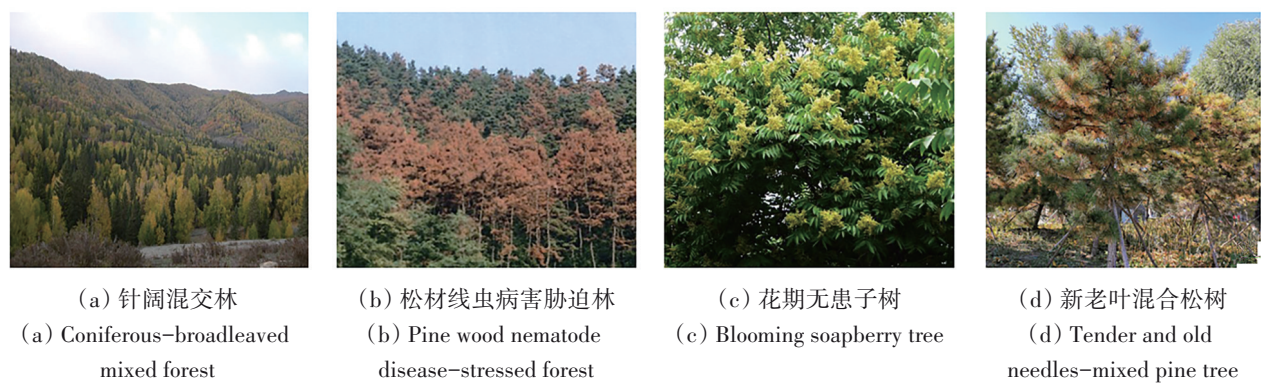


图2 典型异质森林冠层场景
Fig. 2 Typical heterogeneous forest canopy scenarios

在冠层尺度上，我们基于不同树冠之间的常见组合，考虑了3类典型场景，提出了两个参数以表达不同的异质冠层结构：（1）冠间异质指数 (y_r)，即具有不同光学特性的树冠数量与林木总数的比值；（2）冠内异质指数 (y_i)，即单一树冠内具有不同光学特性的要素数量与要素总量的比值。对于圆柱形树冠假设，单木树冠及冠层场景的示意图如图3所示。

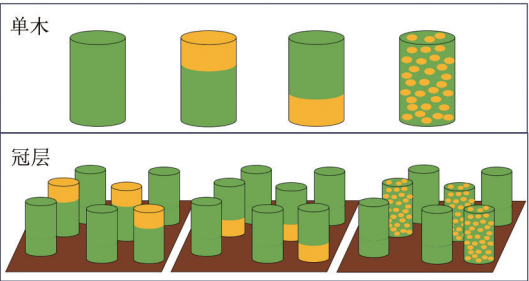


图3 异质单木树冠及冠层结构示意图(单木:均质、上部异质、下部异质、随机异质;冠层:顶部异质、底部异质、随机异质)
Fig. 3 Schematic diagrams of heterogeneous crowns and canopies (individual trees: homogeneity, upside-heterogeneity, downside-heterogeneity and random-heterogeneity; canopies: top-heterogeneity, bottom-heterogeneity and random-heterogeneity)

由于SRT模型用 p 和 q 函数表征冠层的三维结构，因此我们需要对图3中各类异质冠层结构中的 p 和 q 进行扩展。通过随机几何理论和SRT理论的

结合 (Huang 等, 2008)，我们进一步扩展了上述冠层场景中的找到不同要素类的概率和要素类对相关函数，有关推导过程见文献 (Li 等, 2020)。参数化过程基于以下关于三维随机冠层结构的假设：（1）树冠被建模为具有相同高度的圆柱体；（2）场景内所有树冠中心位置的生成服从平稳泊松点过程 (Stoyan 等, 2013)；（3）林分中具有不同光学特性的单木的空间分布是随机的。

2.3 ESRT模型的输入和输出

ESRT模型的主要输入变量是：（1）太阳光照与传感器参数——太阳天顶角与方位角、太阳直射辐射与总入射通量的比值、传感器观测天顶角与方位角；（2）冠层结构参数——植被覆盖度（表示找到植被概率 p ）、冠间异质指数 y_r 、冠内异质指数 y_i 、树冠纵横比（树冠高度和冠幅的比，用于计算对相关函数 q ）；（3）冠层光学要素特征——不同光学要素（多为叶片）的反射率和透射率光谱（或PROSPECT模型输入）、光学冠高（单位体积要素面积之和乘以树冠高度，用于计算消光系数 $\sigma(\Omega)$ ）、倾角分布（用于计算差分散射系数 $\sigma_s(\Omega' \rightarrow \Omega)$ 和消光系数）；（4）背景反射光谱，表示在林冠层之下的纯土壤层或均质灌草覆盖土壤层的反射特性 (Li 等, 2020)。

ESRT模型的主要输出为：（1）冠层双向反射率；（2）冠层吸收率（可计算FPAR）；（3）冠层

叶绿素荧光 (ESRT 和 FLUSPECT 模型耦合的更新版本 FluorESRT 模型) (Li 等, 2022)。

ESRT 模型适用于多种具有异质冠层结构的森林类型, 对叶片脱落、开花等形态变化的模拟可通过调节光学要素的单位面积体积密度及倾角分布等参数实现, 叶片光谱变化可通过调节光学要素的反射率和透射率等参数实现。模型可模拟样地或林分尺度的冠层辐射传输, 由于模型假设场景中通过随机点过程生成林木点位置, 且每株林木具有一定冠幅, 场景过小时难以满足“随机”假设, 所以模型更适合大中尺寸的场景模拟 (例如样地边长 > 10 m, 对应中低分辨率遥感像元) (Li 等, 2022)。

3 研究区与数据

3.1 研究区概况

为了评估 ESRT 模型在混交林、病虫害胁迫林分两类场景光谱模拟的应用效果, 本研究选择了河北省华北落叶松—白桦混交林分和云南省小蠹虫害胁迫云南松林分为研究对象。河北省研究区位于张家口市崇礼区四台嘴乡东北部冬奥核心区 ($40^{\circ}51'N-40^{\circ}59'N$, $115^{\circ}24'E-115^{\circ}30'E$), 区内乔木树种以华北落叶松为主, 树种占比 47%, 并伴有白桦、油松 (*Pinus tabulaeformis* Carr)、山杨 (*Populus davidiana*) 等, 多为中龄林和新造林。研究区存在较多的落叶松—白桦混交林, 林分冠层存在着明显的水平异质性。云南省研究区位于大理市祥云县普淜镇 ($25^{\circ}14'N-25^{\circ}29'N$, $100^{\circ}48'E-101^{\circ}2'E$), 林区以云南松人工纯林为主, 多为中幼龄林。近年来因气候严重干旱, 遭受切梢小蠹 (*Tomicus* spp.) 等大量虫害胁迫和大规模砍伐。小蠹虫繁殖周期为一年一代, 每年的 5—11 月为“蛀梢期”, 期间小蠹成虫在云南松树梢进行钻蛀危害 (俞琳锋 等, 2017)。在受害的针叶梢上, 虫孔顶部的针叶颜色逐渐由绿色变为黄色, 直至变为红色。根据野外实地观察, 中国西南地区受小蠹虫害胁迫的云南松林分冠层呈现出垂直异质性, 受害枝梢一般分布在树冠顶部, 而同时底部枝条仍可能保持健康, 早期只有少数零散树木受到影响, 而大多数树木保持健康。因此, 受害森林场景存在明显的冠内针叶异质性和三维冠层结构异质性。

3.2 样地调查

2021 年 8 月基于冬奥核心区二类调查数据, 选择主要树种为华北落叶松、白桦的小班进行实地踏查, 选取华北落叶松—白桦混交林为调查对象, 布设了 21 块 30 m×30 m 样地。对样地内树木进行每木检尺, 记录其胸径、枝下高、树高、冠幅和单木位置。其中, 使用胸径尺测量胸径, 使用布鲁莱斯测高仪测量树高、活枝下高, 使用皮尺测量东西向和南北向冠幅的平均值, 并通过 RTK 定位系统获取单木位置信息, 定位精度为 5 cm。

2018 年 8 月在云南研究区受切梢小蠹虫害胁迫的云南松林区建立两个大小为 50 m×50 m 的大样方, 确保样方林分具有受害引起的典型异质冠层结构, 即样方内含有典型的健康林木、不同枯梢程度的林木以及完全枯死树木。使用罗盘仪对每个样地进行了坡度校正, 并使用差分 GPS 设备 (GeoExplorer 6000, Trimble) 对每个样方的 4 个顶点和中心点进行坐标定位, 误差大小控制在 ± 0.75 m 内。将每个大样方进一步细分为 10 m×10 m 的小样地, 共计 50 个。依次在每个小样地中进行每木检尺, 测量每棵树的胸径、树高、活枝下高、冠幅和枯梢率。枯梢率的定义为一棵云南松单木受害梢头的数量占梢头总数之比。由于受害的云南松呈现明显的顶部受害结构特征, 统计了每株单木受害梢头数与未受害梢头数, 从而计算得到每株单木的枯梢率。我们按照松针受害后常见的变色顺序 (绿色、浅绿色、黄色、红色), 定义健康 (绿色)、轻度受害 (浅绿色)、中度受害 (黄绿色或黄色) 和重度受害 (黄红色或红色) 4 种受害等级 (图 4), 记录每株单木的受害等级。

光谱测量使用 AvaSpec-EDU-VIS (350—850 nm, 1 nm 光谱分辨率) 光谱仪, 分别测量了华北落叶松针叶、白桦叶片、云南松不同受害等级针叶的反射光谱。收集了华北落叶松、白桦、云南松每个受害等级各 50 个叶片样本, 采集方式为从树冠的 4 个不同方向分别收集部分叶片, 然后将采集到的叶片用塑封袋密封保存并置于冰盒中, 立即带回实验室进行光谱测量。在测量光谱前, 首先使用 98% 漫反射白色参考板进行校准。由于针叶非常细小, 难以填满整个光纤探头视场进行测量, 因此将同类别的针叶样品用夹子紧密地排列在开槽的装置中进行光谱测量。测量光源采用

AVANTES 卤素光源 (AvaLight DHc, 波长范围为 400—2500 nm)。同时, 将透射浸入式探头 (TDP, 2 m 长) 设置在光源上用于测量叶片的透射率 (Lin 等, 2018)。将光纤探头安装在反射探头支架中并采用接触式进行光谱测量, 以避免外部光源的干

扰。每组叶片测量 5 次取平均值, 以削弱仪器测量误差, 采用 Matlab 软件对测量的叶片光谱进行高斯滤波处理, 从而获得平滑的光谱曲线, 如图 5 所示。

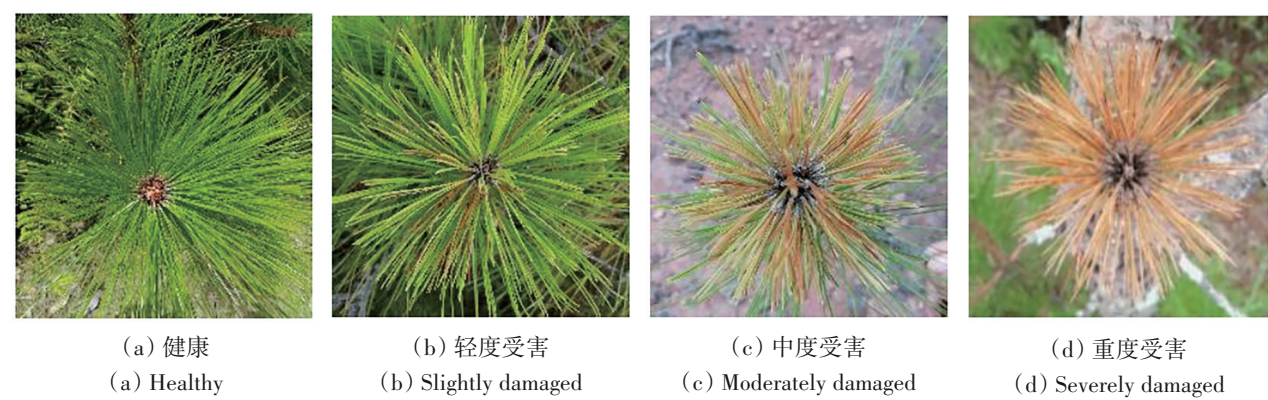


图 4 不同受害阶段的云南松针叶照片
Fig. 4 Photographs of Yunnan pine needles at different damage stages

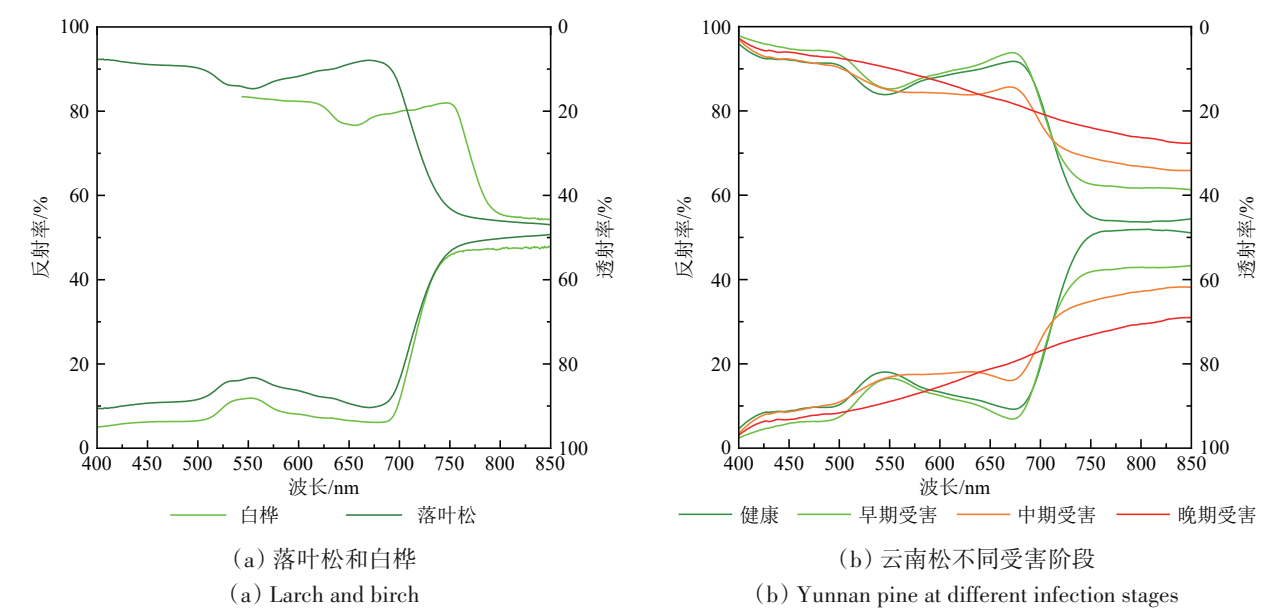


图 5 实测叶片反射率和透射率光谱
Fig. 5 The measured foliage reflectance and transmittance spectra

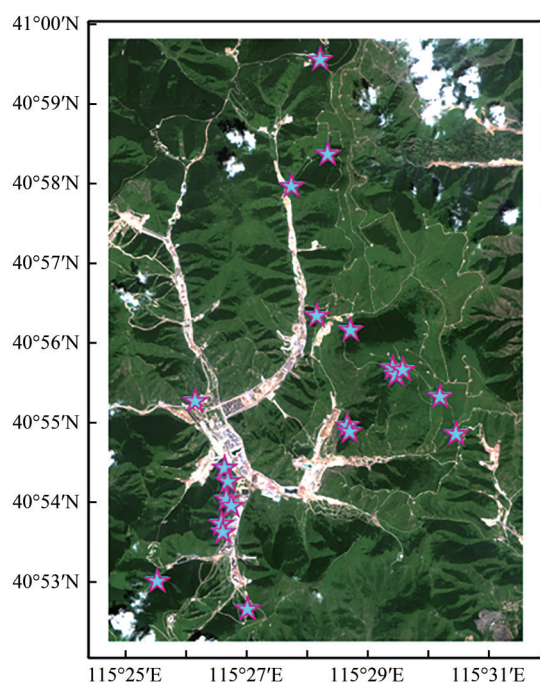
3.3 遥感数据获取

光学数据方面, 崇礼混交林样地对应的遥感数据选择与调查日期接近、少云的 2021 年 8 月 Sentinel-2 光学影像数据。Sentinel-2 图像从谷歌地球引擎 (Google Earth Engine) 中下载获取。获取 21 个 30 m×30 m 样地的冠层反射率的具体方法为: 首先, 输入目标森林区域范围的经纬度, 下载区域内的 Sentinel-2 2A 级影像; 然后, 使用图像处

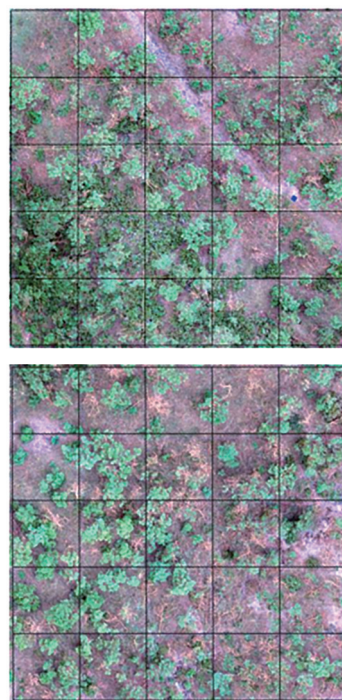
理软件 ENVI, 将 Sentinel-2 图像和样地中心点进行叠加显示 (图 6 (a)); 最后, 将每一个样地中心点对应像素周围的九个像素反射率求平均, 以作为 30 m×30 m 范围森林冠层的反射率。云南小蠹虫害样地对应的遥感数据来自 2018 年 9 月在普洱获取的无人机数据 (Lin 等, 2019)。使用大疆 M600PRO 六旋翼无人机搭载的高光谱相机对所有云南松样地进行了拍摄, 得到样地高空间、光谱

分辨率图像。高光谱图像(270个光谱通道,范围从400 nm到1000 nm,采样间隔为2.2 nm)由Nano-Hyperspec推扫式高光谱成像仪(产自美国Headwall Photonics公司)以垂直向下的观测模式获取(图6(b)),镜头焦距为17 mm,视场角为 8° 。无人机在70 m的飞行高度收集图像,两条最近的飞行路线之间有60%的轨道重叠率。飞行时间为2018年9月21日中午13时。对所有图像进行正

射校正和辐射校准,其中正射图像基于Headwall公司的SpectralView分析软件生成,反射率校准通过 3 m^2 的漫反射参考灰布进行,该参考布由20%、40%、60%反射率的3种灰度灰布组成,将每个条带的高光谱影像的辐射值转换为反射率。使用中海达A8 GNSS RTK GPS(精度 $\pm 2.5\text{ mm}$)设备标记的十个地面控制点对高光谱图像进行几何精度校正,校正后图像的最终像素大小为0.2 m。



(a) 混交林样地位置(星号)及Sentinel-2真彩色影像
(a) Location of mixed forest sample plots (asterisk) and Sentinel-2 true color images



(b) 根据无人机RGB图像建立的云南松病虫害样地
(b) Pest damaged Yunnan pine sample plots established based on UAV RGB images

图6 混交林和病虫害样地遥感图像

Fig. 6 Remote sensing images of mixed forests and pest damaged sample plots

同时,为得到驱动模型所需的样地结构参数,还获取了所有样地范围的无人机载激光雷达数据。崇礼混交林研究区使用多旋翼无人机搭载华测AS-1300HL激光雷达测量系统,飞行高度150 m,飞行速度 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,激光点频600 kHz,天顶角 -33° — 33° ,点云旁向重叠率50%,获取到的样地激光雷达平均点云密度 $50\text{ pts}\cdot\text{m}^{-2}$ (谢栋博等,2022)。云南虫害研究区采用数字绿土公司LiAir 200无人机集成HS40传感器扫描系统,飞行高度70 m,激光脉冲频率设置为10Hz,垂直向下最大观测角度为 10° ,点云密度在 200 — $1000\text{ pts}\cdot\text{m}^{-2}$ (Lin等,2019)。使用LiDAR 360软件工具进行地面点分类、单木分割,结合样地调查区域与单木位置,提取样

地的植被覆盖度及指定单木的叶面积体密度(树冠内部单位体积的单面叶面积总和,单位为 $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)。

4 ESRT模型的异质森林冠层光谱模拟应用

ESRT模型是一个面向异质森林冠层结构的辐射传输模型,可用于定量分析冠层BRF对多种复杂森林结构的敏感性。通过对模型的输入参数进行调整,可以模拟不同森林场景的冠层BRF信号,进而分析特定的空间异质性结构对遥感信号的影响,为优化辐射传输解析模型对于复杂森林场景的适用性提供理论基础。

本研究基于ESRT模型进行了混交林分和虫害

胁迫林分两类样地冠层光谱模拟应用研究。利用获取的样地实测和遥感数据，以红波段和近红外波段为例，分别模拟了两类样地的冠层反射率，以计算各样地冠层归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)。首先，测试了模型在落叶松—白桦混交林模拟中的表现，并定量分析

了混交度对林分冠层 NDVI 的影响。其次，评估了模型在小蠹虫害胁迫的云南松林分的模拟精度，并定量分析了受害垂直分布对林分冠层 NDVI 的影响。ESRT 模型的主要输入参数及混交林、病虫害样地的参数设置见表 1。对本研究中的部分参数输入说明如下。

表 1 ESRT 模型的输入参数介绍
Table 1 The major input parameters of the coupling model ESRT

参数来源	参数名称	混交林样地参数设置	病虫害样地参数设置
PROSPECT 模型	叶绿素含量(C_{ab})		
	类胡萝卜素含量(C_{ca})		
	干物质含量(C_{dm})	根据图 5(a)中落叶松、白桦叶片测量光谱和 Sentinel-2 光谱响应函数输入	根据图 5(b)中健康叶片测量光谱和按照受害等级株数加权的平均受害叶片测量光谱输入
	等效水厚度(C_w)		
	棕色物质含量(C_s)		
	叶片结构参数(N)		
SRT 模型	太阳天顶角	35	29
	太阳方位角	123	99
	太阳直射辐射比	1	1
	树冠纵横比	1.67	1.67
	找到植被概率(p)	[0.25, 0.99]	[0.13, 0.71]
	对相关函数(q)	根据 p, yr, yi 计算	
	光学冠高(d_t)	白桦 4.4/落叶松 2.9	云南松 2
	叶倾角分布	球形	球形
ESRT 模型	背景反射率	根据卫星影像提取土壤像元	根据无人机影像提取背景像元
	冠间异质指数(yr)	[0.15, 0.98]	[0.14, 1]
	冠内异质指数(yi)	1	[0.07, 1]
	冠内异质类型(顶部、底部、随机)	无	顶部

(1) 叶片光谱可选择使用 PROSPECT 模型模拟输入，在本研究中直接根据实测叶片的红波段和近红外波段光谱输入。其中，崇礼混交林样地模拟波段需要和 Sentinel-2 影像的对应波段一致，因此将实测落叶松和白桦叶片 1 nm 间隔的光谱曲线，按照 Sentinel-2 光谱响应函数转化为 Sentinel-2 红波段（中心波长 665 nm）和近红外波段（中心波长 842 nm）的叶片反射率和透射率，作为模型中的两个树种的叶片光谱输入。云南虫害样地无人机影像光谱分辨率较高，因此直接提取四类云南松针叶在 665 nm 和 842 nm 波长处的反射率和透射率，其中健康叶片的反射率和透射率输入为各样地相同，各样地的受害叶片平均反射率和透射率按照样地内 3 个受害等级株数加权平均计算。

(2) 背景反射率从样地区域的光学遥感影像中获取。其中，崇礼混交林样地在 Sentinel-2 影像

中选择混交林样地周边的裸地像元，将其反射率作为样地近似土壤反射率；云南虫害胁迫林样地在无人机高光谱影像中选择各样地裸土和林下植被覆盖土壤的典型区域，得到各样地 665 nm 和 842 nm 波长处的背景反射率。

(3) 其他输入参数根据第 3 章介绍的样地实测和激光雷达遥感数据提取，其中，光学冠高等于叶面积体密度乘以树冠高度。

4.1 混交林冠层反射光谱模拟与分析

4.1.1 华北落叶松—白桦混交林分模拟光谱验证

通过华北落叶松—白桦混交林分的样地实测和无人机激光雷达数据提取，得到模型输入参数。由于该研究区未获取无人机光学影像，所以用 Sentinel-2 卫星影像来评估 ESRT 模型在模拟混交林分冠层反射率的精度。21 个混交林样地的输入

参数范围见表1, 其中冠间异质指数表示落叶松株数占样地林木总数之比, 从而驱动 ESRT 模型模拟了 Sentinel-2 红波段 (中心波长 665 nm) 和近红外波段 (中心波长 842 nm) 的样地冠层反射率, 计算 NDVI 的模拟值。将样地中心点坐标对应的 Sentinel-2 影像 3×3 窗口内的 9 个 10 m 像素 NDVI 求平均, 得到 NDVI 的影像参考值 (图 7 中的红色方点)。为了比较 ESRT 模型与原始 SRT 模型、三维计算机模型的模拟精度, 一方面, 基于原始 SRT 模型进行了 3 组对照实验, 将样地内两个树种的叶片光谱输入改为: (1) 仅输入白桦叶片的光谱 (图 7 中的浅绿倒三角); (2) 仅输入落叶松针叶的光谱 (图 7 中的深绿正三角); (3) 仅输入各样地内株数较多的一种主要树种的光谱 (图 7 中的黑色圆点)。另一方面, 基于三维计算机模拟模型 LESS (2.1.5 版本) 模拟了样地冠层 NDVI 作为对比 (图 7 中的蓝色星形), 方法为: (1) 将各样地激光点云输入到 LESS 模型, 通过 “3D Forest from LiDAR” 工具中的 Alpha-shape 算法提取树冠轮廓, 自动生成冠层结构文件 (obj 格式); (2) 结合实测样地数据中的混交比例与单木定位, 将场景中树冠分为落叶松和白桦两类, 分别添加两个树种红波段和近红外波段的叶片光谱; (3) 运行 LESS 计算样地 NDVI。

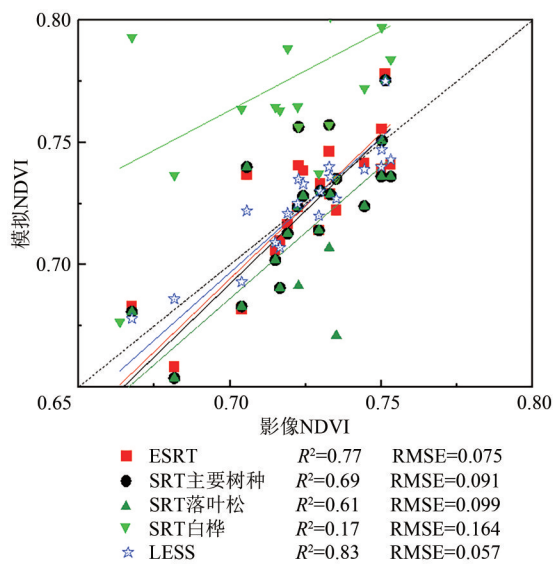


图7 混交林样地的模拟 NDVI 与卫星图像 NDVI 的相关性
Fig. 7 The correlation of simulated NDVI with satellite-image NDVI for the mixed-forest plots

原始 SRT 模型在仅考虑单一树种的情况下运行, 导致 NDVI 误差较大 ($R^2=0.61$, $RMSE=0.099$;

$R^2=0.17$, $RMSE=0.164$), 尤其是多数样地中的落叶松比例较大, 使用白桦光谱输入会造成更大的误差。总体上白桦光谱输入会造成 NDVI 的高估, 落叶松光谱输入会造成 NDVI 的低估。考虑主要树种的光谱输入总体精度有所提高 ($R^2=0.69$, $RMSE=0.091$), 但仍低于考虑树种光谱异质性的 ESRT 模型模拟结果 ($R^2=0.77$, $RMSE=0.075$), 这种差异可以用混交林的空间异质性程度来解释。考虑主要树种的光谱输入在混交水平较低时具有较高的精度, 但在混交结构异质性较强时存在误差。即使使用扩展的 ESRT, 模拟仍然存在一定的误差, 因为每个样地的两个树种存在着单木年龄、树高、空间分布等差异性, 解析模型用统计参数表达三维结构的思想在复杂场景中产生的误差难以避免。三维计算机模型 LESS 中的场景更接近真实林分, 模拟精度 ($R^2=0.83$, $RMSE=0.057$) 最高。然而相比原版 SRT 模型的 3 组对照实验结果, ESRT 模型的模拟精度更接近三维计算机模型精度, 更能表达混交林分树种空间异质性的冠层结构。

4.1.2 混交程度对冠层反射的影响

为了比较混交程度对冠层光谱的影响, 调整参数冠间异质指数 y_r 和找到植被概率 p , 模拟落叶松—白桦不同混交程度森林冠层的红波段和近红外波段反射率, 计算 NDVI (图 8)。其中 y_r 设定为 0—1, p 设定为 0.2—0.9, 步长均为 0.1。

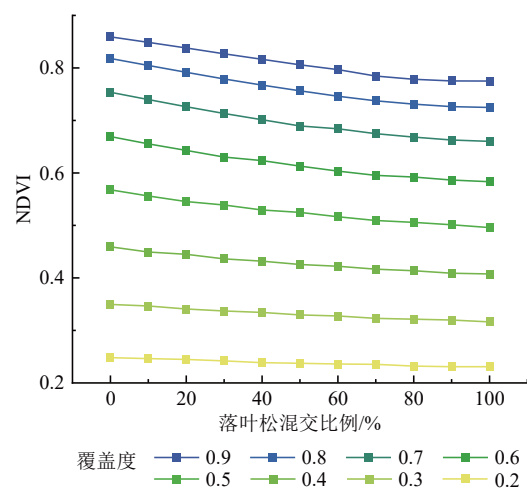


图8 不同覆盖度混交林冠层 NDVI 随混交度的变化
Fig. 8 The dependence of canopy NDVI on mixing level for forests with different coverage

模拟结果揭示了表征混交度的 y_r 和表征森林覆盖度的 p 对 NDVI 的共同影响: NDVI 一方面随着

森林盖度的降低而降低，另一方面随着针叶树种比例的增加而降低。在覆盖度较低时，由于背景对冠层反射的影响较大，混交信息被弱化，导致覆盖度成为影响NDVI的主要因素；在覆盖度较高时，NDVI可能逐渐趋于饱和，但混交度对NDVI的影响逐渐明显。由于落叶松和白桦的叶片光谱和叶面积体密度存在差异，导致在本研究参数设定下白桦比例较高时NDVI较高，落叶松比例较高时NDVI较低。

4.2 病虫害冠层反射光谱模拟与分析

4.2.1 小蠹虫害胁迫的云南松林分模拟光谱验证

通过切梢小蠹虫害胁迫的云南松林分的样地实测和无人机激光雷达数据提取，得到模型输入参数。由于该研究区各样地空间连续且边长仅10 m，Sentinel-2卫星影像难以准确获取样地边界，所以用高分辨率无人机光学影像来评估ESRT模型在模拟病虫害胁迫森林冠层反射率的精度。50个病虫害小样地的输入参数范围见表1，其中冠间异质指数表示受害单木株数占样地林木总数之比，冠内异质指数表示样地内单木枯梢率的平均值，从而驱动ESRT模型模拟了红波段（665 nm波长）和近红外波段（842 nm波长）的样地冠层反射率，计算NDVI的模拟值。将无人机影像中每个样地的所有像素NDVI求平均，得到NDVI的影像参考值（图9中的红点）。为了比较ESRT模型与原始SRT模型、三维计算机模型的模拟精度，一方面，基于原始SRT模型进行了两组对照实验，将样地内健康和受害两类叶片光谱输入改为：（1）仅输入健康针叶的光谱（图9中的绿点）；（2）仅输入由健康针叶和受害针叶加权的线性混合光谱（图9中的黑点）。另一方面，基于三维计算机模拟模型LESS（2.1.5版本）模拟了样地冠层NDVI作为对比（图9中的蓝色星形），方法为：（1）将各样地激光点云输入到LESS模型，通过“3D Forest from LiDAR”工具中的Alpha-shape算法提取树冠轮廓，自动生成冠层结构文件（obj格式）；（2）按照实测样地内受害株数比例与单木位置，将场景中树冠分为健康和受害两类，其中，将受害树冠在垂直方向分为十层，根据样地内单木枯梢率和受害叶按受害等级株数加权后的光谱，将受害树冠上部组分光谱设定为受害叶光谱；（3）运行LESS计算样地NDVI。

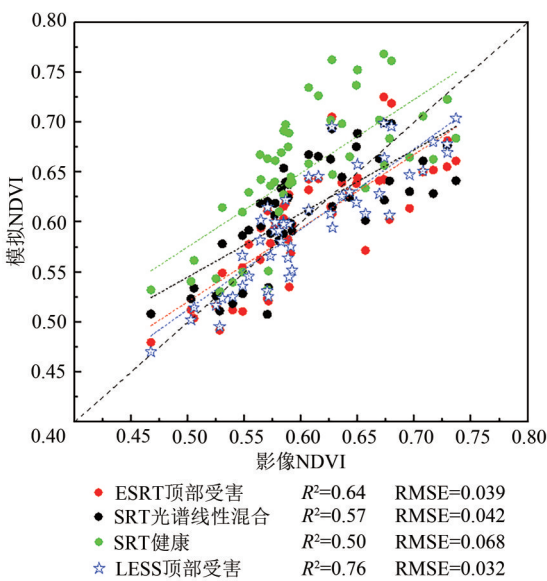


图9 虫害样地的模拟NDVI与无人机图像NDVI的相关性
Fig. 9 The correlation of simulated NDVI with UAV-image NDVI for the pest-damage plots

原始SRT模型在不考虑冠层受害水平的情况下运行，导致NDVI误差较大（ $R^2=0.50$ ， $RMSE=0.068$ ）。线性混合光谱的输入考虑了受害针叶光谱的变化，在一定程度上提高了原始SRT模型的性能（ $R^2=0.57$ ， $RMSE=0.042$ ），尽管忽略了受害枝梢的分布。扩展的ESRT模型同时考虑了受害针叶的光谱变化及顶部受害特征，进一步提高了模拟精度（ $R^2=0.64$ ， $RMSE=0.039$ ）。这种差异可以用冠层顶部的光学信号变化更容易被传感器识别来解释。受害针叶的反射率在红波段逐渐高于健康树叶，在近红外波段则降低，导致针叶受害后NDVI下降。而冠层顶部受害针叶的NDVI下降对冠层BRF的贡献更大，由于原始SRT忽略了垂直异质性，导致NDVI的高估。即使使用扩展的ESRT，模拟仍然存在一定的误差，因为在ESRT中用每个样地的平均 y_i 和 y_r 来表征该样地的异质性冠层结构，而真实森林的异质结构和多层特征往往更为复杂，同时可能存在一些难以测量的早期受害，使得林木间叶片生理生化指标存在差异性。三维计算机模型LESS考虑了受害木之间 y_i 的异质性，模拟精度（ $R^2=0.76$ ， $RMSE=0.032$ ）最高。然而相比原版SRT模型的两组对照实验结果，ESRT模型的模拟精度更接近三维计算机模型精度，更能表达虫害林分水平、垂直异质性的三维冠层结构。

4.2.2 病虫害水平对冠层反射的影响

为了关注受害叶片的垂直分布对冠层光谱的影响，将参数找到植被概率 p 和冠间异质指数 y_r 固定为1，因此场景充满了没有间隙的受害树冠。通过在0—1范围内改变 y_i 和受害分布类型，模拟不同病虫害水平森林冠层的红波段和近红外波段反射率，计算NDVI（图10）。

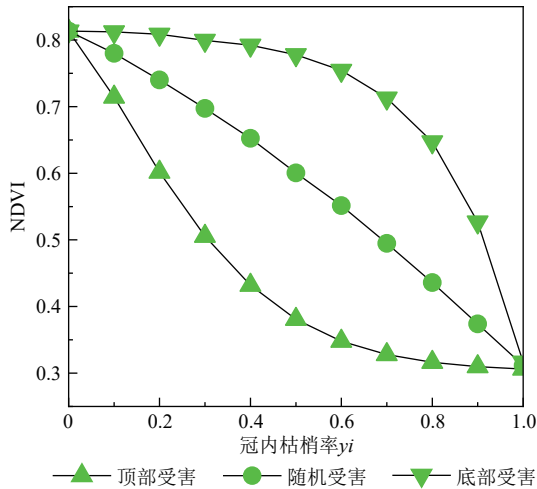


图 10 3种受害分布的林分冠层NDVI随受害水平的变化
Fig. 10 The dependence of canopy NDVI on damage levels for the three kinds of damage distributions

NDVI对 y_i 的敏感性在不同受害分布类型之间存在差异。林分随着受害程度的加深，NDVI逐渐降低。底部受害林分的NDVI在 y_i 较低时呈现轻微变化，然后随着 y_i 增加至最大值呈现急剧变化。相反，顶部受害森林的NDVI在 y_i 较低时变化显

著，但在 y_i 较高时趋于平稳。随机受害森林的NDVI随 y_i 呈现逐步平稳变化。结果表明，受害叶对冠层NDVI的影响在不同受害垂直分布特征之间存在差异，上层受害比下层更显著。原因是光学遥感获取的更多是冠层顶部信号，下层辐射经上层冠层吸收、散射，反射信号变弱，被传感器接收的信息少。

5 结 论

面向复杂森林冠层结构，我们通过扩展SRT理论提出了异质冠层辐射传输三维解析模型ESRT。为了验证ESRT模型在不同类型复杂森林样地的模拟效果，本研究通过野外实测混交林样地和病虫害样地对模型模拟结果进行了评估，相比原版SRT模型，扩展的ESRT模型可以更好地模拟针阔混交林、病虫害胁迫林分冠层光学信号变化，模拟结果与样地实测数据有更高的一致性，模拟精度更接近三维计算机模型。同时，解析模型对三维场景的参数化使模型模拟时间不受场景大小影响，且无需场景构建时间，对本研究中任一异质森林场景的运行效率均高于LESS模型（表2），适用于大量、大场景异质森林冠层辐射传输模拟。三维解析模型平衡了三维结构的模拟精度与经典解析模型的模拟效率，解决了冠内异质性存在时难以准确且快速地模拟辐射传输的问题。扩展的ESRT能够模拟不同树冠类型混合、树冠内具有异质叶片分布结构的森林，因此有可能帮助森林管理者更准确、更有效地进行森林动态变化监测。

表 2 ESRT 和 LESS 模型场景构建和运行时间对比

Table 2 Comparison of scene construction and model running time between ESRT and LESS

模型	样地类别/s	混交林(30 m×30 m)	虫害胁迫林(10 m×10 m)
ESRT	场景构建时间	0	0
	模型运行时间	3.8	3.8
LESS	场景构建时间	36.2	8.9
	模型运行时间	22.5	11.3

注：运行平台：Intel酷睿 i7-7700 HQ 处理器，4 核，8 GB 内存。

在模型场景假设方面，为简化森林结构、提高计算效率，目前版本ESRT模型将树冠简单假设为圆柱体，适用于没有明显几何形状或上下冠型差异的树种，本研究中华北落叶松、白桦、云南松冠型各异，圆柱假设会产生一定的误差；对于其他类型树冠形状，可参照文献（Huang等，2008）进行圆锥、椭球型树冠的扩展。同时，目

前模型版本未考虑树木的空间聚集效应，而真实森林中不同光学特性的林木的混合模式在空间上可能是复杂的且随时间变化的，后续可以基于随机几何中聚集点过程的方法生成特定森林场景，进一步扩展ESRT模型在复杂聚集情况下的随机概率函数。另外，真实林分中下层灌草复杂的空间分布可能会对冠层反射率产生影响，模型中均质

土壤背景假设可能对模拟光谱产生一定的误差, 但能够简化林冠层和背景层的多次散射过程。

在混交林模拟方面, 考虑树种混交比的模拟精度高于传统的单树种模型。然而混交林结构多样, 受树种的年龄、生物生态学特性影响, 存在大量异龄混交林以及高度差异很大的混交树种, 并且在中国森林全周期经营的指导思想下, 营建复层混交林是一个重要趋势。目前 ESRT 模型中树冠高度被归一化, 对于复层混交林中混交树种的垂直分层、林窗补植造成的树种空间分布差异等情况, 需要结合具体的森林经营方式, 进一步改进 ESRT 模型的结构参数, 提高复杂混交林结构的模拟精度。

在病虫害胁迫林分模拟方面, ESRT 模型可以很好地模拟不同受害分布的受感染森林的光学变化。考虑树冠内部叶片的异质分布特征, 可以更准确、更有效地估算受害水平。冠层反射光信号对冠部受害的敏感性取决于受害的程度和分布, 未来可结合常见病虫害的生理生化变化调查, 探索重要病虫害的光谱响应机理, 依托机理模型优化不同类型病虫害的遥感监测算法。

三维解析模型具有明确的参数输入和较高的运行效率, 其输入参数能够和森林生长、经营、胁迫等动态过程模型 (Bugmann 和 Seidl, 2022) 的输出相匹配, 通过模型耦合能够进行多角度、多时相、高光谱的时空遥感数据模拟, 从而构建考虑角—时—谱信息的多维特征变量, 探索复杂森林结构参数敏感新参量, 为森林参数反演算法改进提供了机理模型支撑。而机理模型和人工智能算法的深度融合, 将是定量遥感发展的大势所趋。未来随着更先进的传感器技术的出现、更多智能算法的提出, 本研究提出的模型框架, 一方面可以将模拟结果结合先进的机器学习技术作为训练样本, 另一方面可以为发展基于物理的深度学习技术提供思路, 进一步探索森林参数定量反演的新算法在森林资源监测、森林经营评估、森林灾害监测等多领域的应用。

参考文献 (References)

- Bugmann H and Seidl R. 2022. The evolution, complexity and diversity of models of long-term forest dynamics. *Journal of Ecology*, 110 (10): 2288-2307 [DOI: 10.1111/1365-2745.13989]
- Gastellu-Etchegorry J P, Demarez V, Pinel V and Zagolski F. 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote Sensing of Environment*, 58(2): 131-156 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00253-7]
- 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, 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]
- Huang H G, Zhang Z Y, Ni W J, Chai L N, Qin W H, Liu G, Xie D H, Jiang L M and Liu Q H. 2018. Extending RAPID model to simulate forest microwave backscattering. *Remote Sensing of Environment*, 217: 272-291 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.011]
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Diner D J, Myneni R B, Verstraete M, Pinty B and Gobron N. 1998. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24): 32239-32256 [DOI: 10.1029/98JD02461]
- 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]
- 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 X W and Wang J D. 1995. *The Vegetation Optical Remote Sensing Models and the Structures Parameters*. 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)
- Li X W, Wang J D, Liu Y, Zhu X Y and Strahler A H. 1993. A hybrid geometric optical and radiative transfer approach for modeling BRDF of discontinuous canopies. *Remote Sensing of Environment China*, 8(3): 161-172 (李小文, 王锦地, 刘毅, 朱晓艳, Strahler A H. 1993. 不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型初探. *环境遥感*, 8(3): 161-172) [DOI: 10.11834/jrs.1993018]
- Li X Y, Huang H G, Shabanov N V, Chen L, Yan K and Shi J. 2020. Extending the stochastic radiative transfer theory to simulate BRDF over forests with heterogeneous distribution of damaged foliage inside of tree crowns. *Remote Sensing of Environment*, 250: 112040 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112040]
- Li X Y, Shabanov N V, Chen L, Zhang Y G and Huang H G. 2022. Modeling solar-induced fluorescence of forest with heterogeneous distribution of damaged foliage by extending the stochastic radiative transfer theory. *Remote Sensing of Environment*, 271: 112892

- [DOI: 10.1016/j.rse.2022.112892]
- Lin Q N, Huang H G, Chen L, Wang J X, Huang K and Liu Y Y. 2021. Using the 3D model RAPID to invert the shoot dieback ratio of vertically heterogeneous Yunnan pine forests to detect beetle damage. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112475 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112475]
- Lin Q N, Huang H G, Wang J X, Huang K and Liu Y Y. 2019. Detection of pine shoot beetle (PSB) stress on pine forests at individual tree level using Uav-based hyperspectral imagery and lidar. *Remote Sensing*, 11(21): 2540 [DOI: 10.3390/rs11212540]
- Lin Q N, Huang H G, Yu L F and Wang J X. 2018. Detection of shoot beetle stress on Yunnan pine forest using a coupled LIBERTY2-INFORM simulation. *Remote Sensing*, 10(7): 1133 [DOI: 10.3390/rs10071133]
- 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 (in Chinese)*, 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]
- Myneni R B, Maggion S, Jaquinta J, Privette J L, Gobron N, Pinty B, Kimes D S, Verstraete M M and Williams D L. 1995. Optical remote sensing of vegetation: modeling, caveats, and algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 51(1): 169-188 [DOI: 10.1016/0034-4257(94)00073-V]
- Pu J B, Yan K, Gao S, Zhang Y M, Park T, Sun X, Weiss M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2023. Improving the MODIS LAI compositing using prior time-series information. *Remote Sensing of Environment*, 287: 113493 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113493]
- Qi J B, Xie D H, Jiang J Y and Huang H G. 2022. 3D radiative transfer modeling of structurally complex forest canopies through a lightweight boundary-based description of leaf clusters. *Remote Sensing of Environment*, 283: 113301 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113301]
- Qi J B, Xie D H, Yin T G, Yan G J, Gastellu-Etcheberry 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]
- Ross J. 1981. *The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands*. Dordrecht: Springer, 391 [DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3]
- Shabanov N V and Gastellu-Etcheberry J P. 2018. The stochastic Beer-Lambert-Bouguer law for discontinuous vegetation canopies. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 214: 18-32 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.04.021]
- 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]
- Shabanov N V, Wang Y, Buermann W, Dong J, Hoffman S, Smith G R, Tian Y, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2003. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 410-423 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00017-8]
- Stoyan D, Kendall W S and Mecke J. 2013. *Stochastic geometry and its applications*. *Journal of the Royal Statistical Society*, 45(2): 345
- 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]
- Xie D B, Liu Q W, Lei Y K, Yu H, Yang X P and Fu L Y. 2022. Suitability analysis of single tree segmentation algorithm in the core area of winter olympic games based on airborne lidar data. *Scientia Sinicae*, 58(10): 121-130 (谢栋博, 刘清旺, 雷雅凯, 于航, 杨旭平, 符利勇). 2022. 基于机载 LiDAR 数据的崇礼冬奥核心区单木分割算法适宜性分析. *林业科学*, 58(10): 121-130 [DOI: 10.11707/j.1001-7488.20221012]
- Yan B Y, Xu X R and Fan W J. 2012. A unified canopy bidirectional reflectance (BRDF) model for row ceops. *Science China Earth Sciences*, 55(5): 824-836 (闫彬彦, 徐希孺, 范闻捷). 2012. 行播作物二向性反射(BRDF)的一体化模型. *中国科学: 地球科学*, 42(3): 411-423 [DOI: 10.1360/zd-2012-42-3-411]
- Yan K, Zhang Y M, Tong Y Y, Zeng Y L, Pu J B, Gao S, Li L Y, Mu X H, Yan G J, Rautiainen M, Knyazikhin Y and Myneni R B. 2021. Modeling the radiation regime of a discontinuous canopy based on the stochastic radiative transport theory: modification, evaluation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 267: 112728 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112728]
- Yang B, Knyazikhin Y, Xie D H, Zhao H M, Zhang J Q and Wu Y. 2018. Influence of leaf specular reflection on canopy radiative regime using an improved version of the stochastic radiative transfer model. *Remote Sensing*, 10(10): 1632 [DOI: 10.3390/rs10101632]
- Yu L F, Huang H G, Ze S Z, Ren L L, Zong S X, Lu W J and Luo Y Q. 2017. Research on the spatial distribution patterns of *Tomicus* sp. in *Pinus yunnanensis* during the shoot feeding period. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 940-946 (俞琳锋, 黄华国, 泽桑梓, 任利利, 宗世祥, 卢文娟, 骆有庆). 2017. 云南松林两种切梢小蠹成虫蛀梢期的空间分布格局. *应用昆虫学报*, 54(6): 940-946 [DOI: 10.7679/j.issn.2095-1353.2017.112]
- Zeng Y L, Badgley G, Chen M, Li J, Anderegg L D L, Kornfeld A, Liu Q H, Xu B D, Yang B, Yan K and Berry J A. 2020. A radiative transfer model for solar induced fluorescence using spectral invariants theory. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111678 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111678]
- 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]

Principles of the three-dimensional analytical radiative transfer model ESRT and its applications in simulating heterogeneous forest canopy spectra

LI Xiaoyao^{1,2}, RAO Yueming^{3,4}, ZHANG Zhuoli¹, WEI Shengrong¹, QIN Pengyao¹,
TAN Bingxiang^{1,2}, FU Liyong¹

1. Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Key Laboratory of Forestry Remote Sensing and Information System, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China;

3. Northwest Surveying and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China;

4. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, National Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710048, China

Abstract: The complicated spatial heterogeneity in forest scenes may have an effect on canopy reflectance. How to address heterogeneity is a challenge in the field of radiative transfer modeling. To overcome the accuracy limitations of classical analytical models caused by simplified scenarios and the efficiency limitations of computer simulation models in large-scale applications, we developed a three-dimensional analytical radiative transfer model called ESRT based on stochastic radiative transfer theory. At present, the application of ESRT in different complex forest scenes still needs to be explored, and additional field data are essential for model verification.

This study introduces the basic principles and input–output parameters of the ESRT model, in which two key input parameters were proposed to express different heterogeneous canopy structures: (1) the intercanopy heterogeneity index (yr), representing the ratio of tree crowns with different optical properties to the total number of trees; (2) the intracrown heterogeneity index (yi), denoting the ratio of elements with different optical properties within a single tree crown to the total number of elements. To evaluate the model performance in simulating different kinds of heterogeneous forest canopy spectra, 21 30 m×30 m sample plots in mixed forests and 50 10 m × 10 m quadrats in pest-damaged forests were set up with individual tree measurements and remote sensing data acquisitions. Control experiments based on the original SRT model and the three-dimensional model LESS were conducted for the two cases to compare simulation results with the extended ESRT model. On the basis of the framework of ESRT, sensitivity analyses were conducted to reveal the effect of mixing and pest levels on forest canopy spectra.

Results showed that compared with the original SRT model simulations, the canopy spectra simulated by the extended ESRT model have better consistency with the measured spectra from the sample plots for the cases of mixed forests ($R^2=0.77$, $RMSE=0.075$) and pest-damaged forests ($R^2=0.64$, $RMSE=0.039$), and the simulation accuracy is closer to that of a 3D computer model. The conifer–broadleaf ratio and the vertical distribution of damaged foliage can affect the canopy spectral signals. In mixed forests, the canopy NDVI decreases with the decrease in forest coverage and with the increase in coniferous tree species proportion. Canopy coverage is the main factor affecting NDVI when the coverage is low, but the effect of mixing on NDVI becomes more apparent when the coverage is high. In pest-damaged forests, the sensitivity of BRF to yi varies considerably with damage types. The BRF of the bottom damaged forest exhibits a slight change at reduced yi and then shows a sharp change toward the maximum of yi . On the contrary, the BRF of the top damaged forest changes dramatically at reduced yi but levels off at increased yi .

The three-dimensional analytical model ESRT balances the simulation accuracy of three-dimensional structures with the simulation efficiency of classical analytical models, resolving the difficulty in accurately and efficiently simulating radiation transfer in the presence of heterogeneity. The computation time is suitable for large-scale heterogeneous forest canopies. The extended ESRT can simulate forests with mixed canopy types and heterogeneous leaf distribution structures within the canopy, potentially aiding forest managers in more accurately and effectively monitoring forest dynamic changes.

Key words: remote sensing, radiative transfer, three-dimensional analytical model, heterogeneous forest canopy, mixed forest, forest pest

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFD2200405-1); Fundamental Research Funds of CAF (No. CAFYBB2023MA013)