

山地植被冠层二向反射遥感模型研究进展

魏珂昕^{1,2}, 闻建光^{1,2}, 游冬琴¹, 唐勇¹, 赵聪聪^{1,2},
柳钦火^{1,2}, 肖青^{1,2}

1. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感卫星应用国家工程研究中心 遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 二向反射率分布函数BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 是刻画植被冠层二向反射特性的重要函数。山地地形是影响二向反射分布函数的关键因素之一, 中国山区面积分布广, 迫切要求针对植被冠层的二向反射特性机理模型研究从平坦均质地表扩展至山地复杂地表。山地植被冠层二向反射遥感模型是理解复杂地形影响二向反射特性机制的基础, 也是山区地表关键参量反演的重要前提。依据遥感建模场景尺度差异, 当前山地植被冠层二向反射遥感模型涵盖了单一坡面植被冠层二向反射机理模型和复合坡面植被冠层二向反射机理模型。论文首先回顾了山地植被冠层平坦地表二向反射定义至山地二向反射定义的发展历程, 并从单一坡面植被冠层二向反射机理模型和复合坡二向反射机理模型两种尺度综述了当前机理模型的主要进展。在单一坡面尺度, 模型重点考虑地形坡面对冠层辐射传输过程的影响机理; 在复合坡面尺度, 模型进一步考虑亚像元微小坡面相互遮挡及其散射互作用, 并通过等效坡面奠定了单一坡和复合坡二向反射一体化建模的基础。文章最后从考虑混合地类特征的山地二向反射建模、山地地表—大气耦合的多尺度二向反射模型以及山区多角度立体观测和验证技术3方面提出未来发展展望, 构建高精度山地植被观测二向反射机理模型, 为山区定量遥感反演和监测应用提供理论支撑。

关键词: 各向异性反射率, BRDF, 复杂地形, 单一坡面, 复合坡面

中图分类号: P2

引用格式: 魏珂昕, 闻建光, 游冬琴, 唐勇, 赵聪聪, 柳钦火, 肖青. 2026. 山地植被冠层二向反射遥感模型研究进展. 遥感学报, 30 (1): 42-60

Wei K X, Wen J G, You D Q, Tang Y, Zhao C C, Liu Q H and Xiao Q. 2026. Recent advances in bidirectional reflectance remote sensing model of vegetation canopy over rugged terrain. National Remote Sensing Bulletin, 30 (1): 42-60 [DOI: 10.11834/jrs.20255060]

1 引言

自然界地物反射具有方向性, 这一特性可以用二向反射分布函数BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function)来表达(Nicodemus等, 1977)。地物二向反射可定量描述方向性反射随地表三维结构、太阳入射和传感器观测角度的变化 (Qin等, 2024; Dymond等, 2024; Jin等, 2003; Roberts, 2001; 韩源等, 2023), 这种各向异性为我们反演地表的物理属性信息提供了重要的信息源, 如反演植被结构 (Chen等, 2025; Yao等, 2024; Li等, 2023; Gu等, 2018)、生物和生化物理量

(Chen等, 2024; Shi等, 2023; Li等, 2020; Yu等, 2020)和辐射关键参量 (Li等, 2022; Ma等, 2023, 2024a; Yang等, 2020; Chu等, 2021; 赵聪聪等, 2023)。冠层是遥感观测地表的第一表层。太阳辐射入射到冠层表面, 会被反射和散射, 其主要特征会因复杂的植被结构发生变化 (闻建光等, 2025)。因此, 准确刻画植被冠层二向反射特性至关重要。

目前已有多种模型可针对平坦地表植被冠层进行BRDF建模, 建立了冠层参数和反射之间的定量关系 (闻建光等, 2025; Yan等, 2021; Goel,

收稿日期: 2025-02-21; 预印本: 2025-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2020YFA0608703)

第一作者简介: 魏珂昕, 研究方向为山地定量遥感。E-mail: weikexin231@mails.ucas.ac.cn

通信作者简介: 闻建光, 研究方向为定量遥感。E-mail: wenjg@aircas.ac.cn

1988)。然而，高精度的冠层BRDF模型不仅要考虑冠层结构、形态和理化参数，还要考虑冠层下垫面的地形地貌（Combal等，2000）。研究表明：忽略地形效应会扭曲BRDF形状和大小（Wen等，2009），其冠层顶反射率估算相对误差可达58%（Fan等，2014b），引起森林覆盖率（Yang等，2024；Gemmell，1998）、叶面积指数（He等，2024；Mousivand等，2015）和短波辐射能量（Ma等，2024b；Wang等，2005）等参数反演结果出现明显偏差。

山地约占陆地表面的24%，占中国陆地表面的67% (Wen等, 2008)。在山区，复杂地形会改变太阳—地表—传感器的几何形态 (Sandmeier和Itten, 1997)，产生地形自阴影和多重散射、导致入射辐照度 (太阳直射辐照度、天空漫散射辐照度和临近地形辐照度) (Chen等, 2006) 的重新分配 (林兴稳等, 2020)。在冠层中，地形会影响树木的相对位置、植被高度、密度和空间分布等，从而影响树冠内阴影分布、产生散射和吸收，加剧了地形对冠层辐射传输过程的影响。从机理上量化复杂地形辐射传输过程，构建山地冠层BRDF模型，有利于准确描述山地地表的二向反射特性，对山区植被参数反演、能量平衡和气候变化评估

等各个领域具有重要意义。

近年来,越来越多的学者关注复杂地形冠层二向反射模型的建立与模拟,在 web of science 以“canopy reflectance”,“canopy BRDF”,“non-Lambertian”,“bi-directional reflect*”,“albedo*”,“Bidirectional Reflectance Distribution Function”,“radiative transfer”,“inversion”等与 BRDF 相关的关键词和“mountain*”,“hill*”,“rugged terrain*”,“complex terrain*”,“topography*” OR “sloping terrain*”,“heterogeny*”,“patchy landscape*”,“mixed canopy*”,“row crop”,“complex land surface”等限制地形关键词进行检索,共有 1667 篇文章,论文总被引频次达到 50837 次,可见复杂地形植被二向反射建模是研究的前沿。基于 VosViewer 对上述文献进行分析,如图 1 所示,发现与 BRDF 建模相关的文章主要聚焦于植被冠层,反演产品验证和地形校正等是其重要的应用方面。从卫星载荷上看,出现频次最高的是 MODIS 传感器,相关的研究内容包括反照率、LAI、叶绿素浓度和植被指数等反演和应用。由图 2 可见,关于山地辐射传输建模的论文出版数量、文章被引用频次整体都呈现逐年增加趋势。2022 年达到顶峰,近两年逐步平稳。

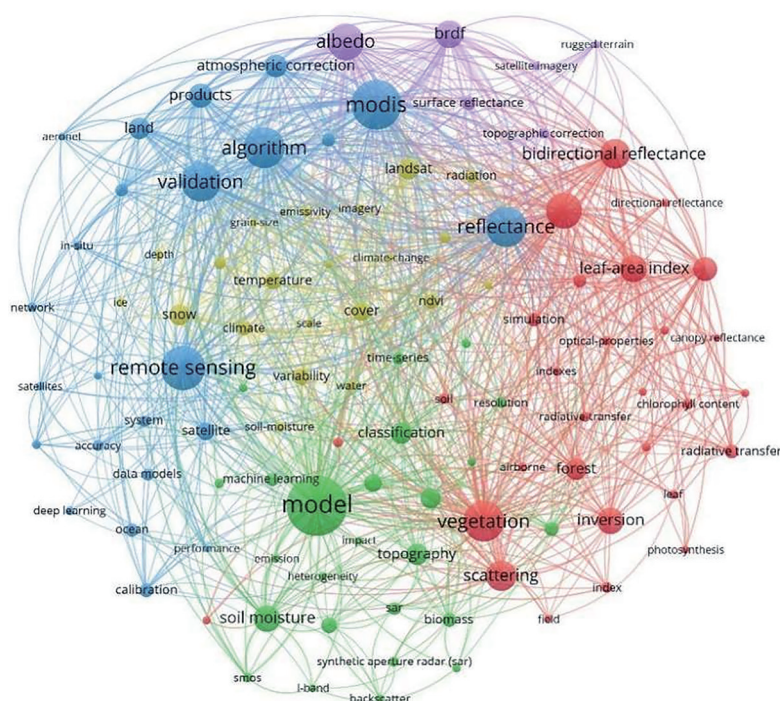


图1 1977年—2024年涉及复杂地表BRDF建模和反演方法的文献领域来源

Fig.1 The statistics of sources of publications and citations correlated with BRDF model over rugged terrain and inversion method from 1977 to 2024

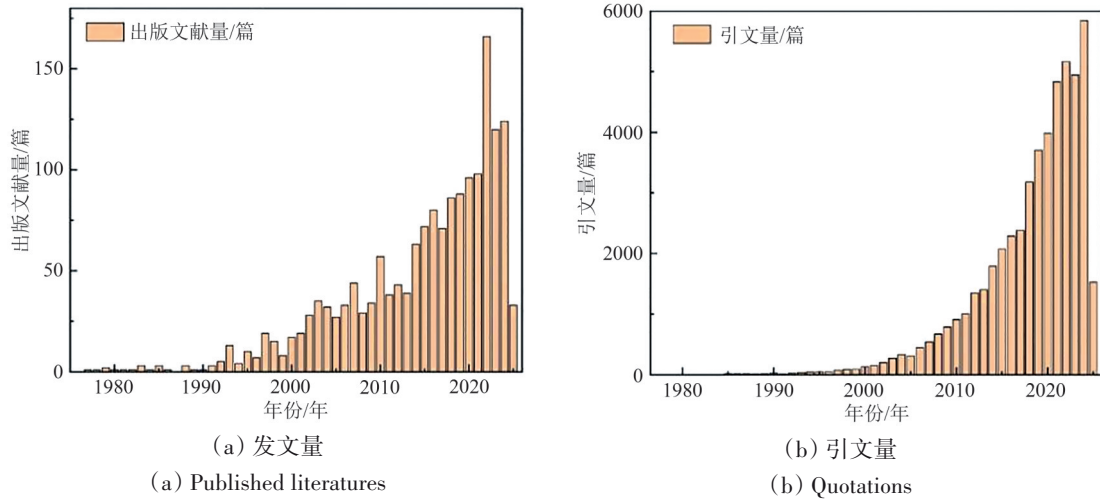


图2 1977年—2024年涉及复杂地表冠层BRDF建模和反演的文献出版和引用情况

Fig.2 The statistics of publications and citations correlate with canopy BRDF model over rugged terrain from 1977 to 2024

在山区进行冠层BRDF建模，是全面了解复杂地表二向反射特性的核心，从平坦地表冠层BRDF机理模型建模扩展到复杂地形冠层BRDF建模(Wen等, 2018)，是解决山区遥感数据获取、尺度转换，参数反演与产品应用的关键技术(Wen等, 2009, 2022)。本文在平坦地表冠层BRDF模型基础上，重点回顾山区植被冠层BRDF建模的进展，并从单一坡面和复合坡面两条主线总结现阶段主要的冠层BRDF模型发展脉络及其特点，对山区BRDF建模以及参数反演提供重要理论支撑。

2 山地BRDF基本定义

2.1 平坦地表BRDF定义

Nicodemus等(1977)定义了二向反射率分布函数BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)，从数学上描述了物体表面的方向反射特性。通常定义为地表在入射方向的微分立体角内产生的辐照度，与其在观测方向微分立体角内引发的反射辐射亮度的比值：

$$\text{BRDF}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{dL_v(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)}{dE_s(\theta_s, \varphi_s)} \quad (1)$$

式中， θ_s 和 φ_s 分别代表入射天顶角和入射方位角， θ_v 和 φ_v 分别代表观测天顶角和观测方位角。然而，Nicodemus定义的BRDF定义局限在点上，假设表面辐射量不随位置改变而改变，适用于水平均质表面。Martonchik等(2000)首次将BRDF引入到遥感领域，使BRDF定义适用于测量足迹的各种空间尺度。Snyder(2002)进一步将地物的等效反

射辐射亮度定义为视场内所有可视微小面元的反射辐射亮度平均值，扩展后的BRDF定义适用于水平混合地类的复杂异质地表。

2.2 山地BRDF定义

水平地表入射处处均一，满足水平地表BRDF的定义和数学表达。然而，在山地条件下，由于地形的影响，导致地表入射处处不均一(Chen等, 2006)。因此，平坦地表BRDF定义和数学表达必须要进行修正以满足复杂山地地表的特征。缺少对山地BRDF的定义导致了国内外研究学者对于山地入射和反射辐射能量的理解存在差异，特别是针对反射辐射为水平面投影(Combal等, 2000; Fan等, 2014b)或平行坡面(Gastellu-Etchegorry等, 2015; Yin等, 2017)两种情况造成山地植被冠层BRDF的差别。因此，一个标准化的山地BRDF定义和数学表达至关重要，以准确表征复杂地形的二向反射特性(Wu等, 2019a)。

Wu等提出了山地BRDF定义，并从复合坡场景出发认为反射辐射亮度是亚像元反射辐射亮度和邻近地形多重散射辐射亮度之和。同时，引入了一个虚拟参考面，假定该参考面位于观测地形中的最高点且所接收的入射辐射与目标像元入射辐射相同(Wu等, 2019a)。其原理可用式(2)表示：

$$\text{BRDF}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) = \frac{dL_v(\Omega_{is}; \Omega_{iv})}{dE(\Omega_s)} = \frac{dL_v^{\text{target}}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) + dL_v^{\text{adjacent}}(\Omega_{is}; \Omega_{iv})}{dE(\Omega_s)} \quad (2)$$

式中, $dE(\Omega_s)$ 虚拟平面上所接收入射辐照度; $dL_v^{\text{target}}(\Omega_{is}; \Omega_{iv})$ 表示同亚像元内入射辐射的反射辐射亮度增量; $dL_v^{\text{adjacent}}(\Omega_{is}; \Omega_{iv})$ 表示邻近亚像元多重散射的辐射亮度增量; $\Omega_{is}; \Omega_{iv}$ 分别表示相对于亚像元坡面的太阳入射角度和传感器观测角度, Ω_s 表示虚拟参考平面入射几何。山地 BRDF 定义考虑了亚像元和像元尺度的辐射传输过程, 并定义以下两种 BRDF 数学表达的差异。

(1) 当虚拟参考面水平放置时, 定义为遥感反射率 (Castellu-Etcheberry 等, 2015; Yin 等, 2017), 如式 (3):

$$\text{BRDF}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) = \frac{dL_v(\Omega_{is}; \Omega_{iv})}{dE_{\text{horizontal}}(\theta_s, \varphi_s)} \quad (3)$$

式中, θ_s, φ_s 分别表示像元整体虚拟水平坡面的局部太阳入射天顶角和方位角。

(2) 当虚拟参考面平行像元整体地形时, 定义为真实反射率 (Combal 等, 2000; Fan 等, 2014b, 2015; Schaaf 等, 1994; Shi 和 Xiao, 2021; Wu 等, 2019a), 如下式:

$$\text{BRDF}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) = \frac{dL_v(\Omega_{is}; \Omega_{iv})}{dE_{\text{parallel}}(\theta_{is}, \varphi_{is})} \quad (4)$$

式中, $\theta_{is}, \varphi_{is}$ 表示像元整体虚拟平行坡面的局部太阳入射天顶角和方位角。

显然, 以上两种定义也适合单一坡 BRDF, 此时虚拟参考平面为坡面对应的辐射。

表 1 BRDF 的定义

Table 1 The definitions of BRDF

参考文献	公式	主要特征
(Nicodemus 等, 1977)	$\text{BRDF}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{dL_v(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v)}{dE_s(\theta_s, \varphi_s)}$	BRDF 定义在一个点; 表面在水平方向均匀
(Snyder, 2002)	$\text{BRDF}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{dL_v(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v; P_v)}{dE_s(\theta_s, \varphi_s)}$	BRDF 定义在视场内可见微小面元
(Di Girolamo, 2003)	$\text{BRDF}(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{dL_v(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v; P_s; P_v)}{dE_s(\theta_s, \varphi_s)}$	BRDF 定义在入射与反射光照面积
	$\text{BRDF}(\theta_{is}, \varphi_{is}; \theta_{iv}, \varphi_{iv}; \lambda) = \frac{dL_v(\theta_{is}, \varphi_{is}; \theta_{iv}, \varphi_{iv}; \lambda)}{dE_{\text{horizontal}}(\theta_s, \varphi_s; \lambda)}$	BRDF 定义在入射辐射为水平面投影
	$\text{BRDF}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) = \frac{dL_v(\theta_{is}, \varphi_{is}; \theta_{iv}, \varphi_{iv}; \lambda)}{dE_{\text{parallel}}(\theta_{is}, \varphi_{is}; \lambda)}$	BRDF 定义在入射辐射为平行于坡面
(Wu 等, 2019a)	$\text{BRDF}(\Omega_{is}; \Omega_{iv}) = \frac{dL_v(\Omega_{is}; \Omega_{iv})}{dE_s(\Omega_s)}$	复杂地表 BRDF

3 山地植被冠层 BRDF 机理模型

植被冠层 BRDF 解析模型通常可分为辐射传输模型、几何光学模型 (柳钦火 等, 2019)、混合模型及半经验模型 (图 3)。从复杂地形 BRDF 建模来看, 主要是将当前水平地表的 BRDF 模型进行模型扩展至适用于复杂地表 (图 4)。

地形对遥感数据的影响取决于空间尺度。为了刻画复杂地形植被冠层 BRDF 建模的地形效应, 国内外研究学者采用数字高程模型 (DEM) 和遥感像元分辨率的空间尺度关系进行描述。将山地冠层建模分为像元内部唯一坡度坡向的单一坡面建模和像元内部具有多个坡度坡向的复合坡面建模 (图 5)。也就是说, 单一坡面是像元空间分辨

率小于或等于 DEM 空间分辨率 (图 6 (a)), 复合坡面就是像元空间分辨率大于 DEM 空间尺度 (图 6 (b))。

3.1 山地辐射传输过程

山地建模的基础是山地辐射传输模型 (Chen 等, 2006)。模型刻画了目标地物所接收的辐射主要包括: 太阳直射辐照度、天空漫散射辐照度和临近地表反射辐照度。

$$E_{\text{Target}} = E_s + E_d + E_a \quad (5)$$

式中, E_s 表示太阳直射辐照度; E_d 表示天空漫散射辐照度; E_a 表示临近地形反射辐照度。研究表明, 太阳直接辐射占总辐射的 80%; 大天顶角时, 漫散射辐射达到 40%, 临近地形辐射约占 1%—3% 不等 (Chen 等, 2006)。

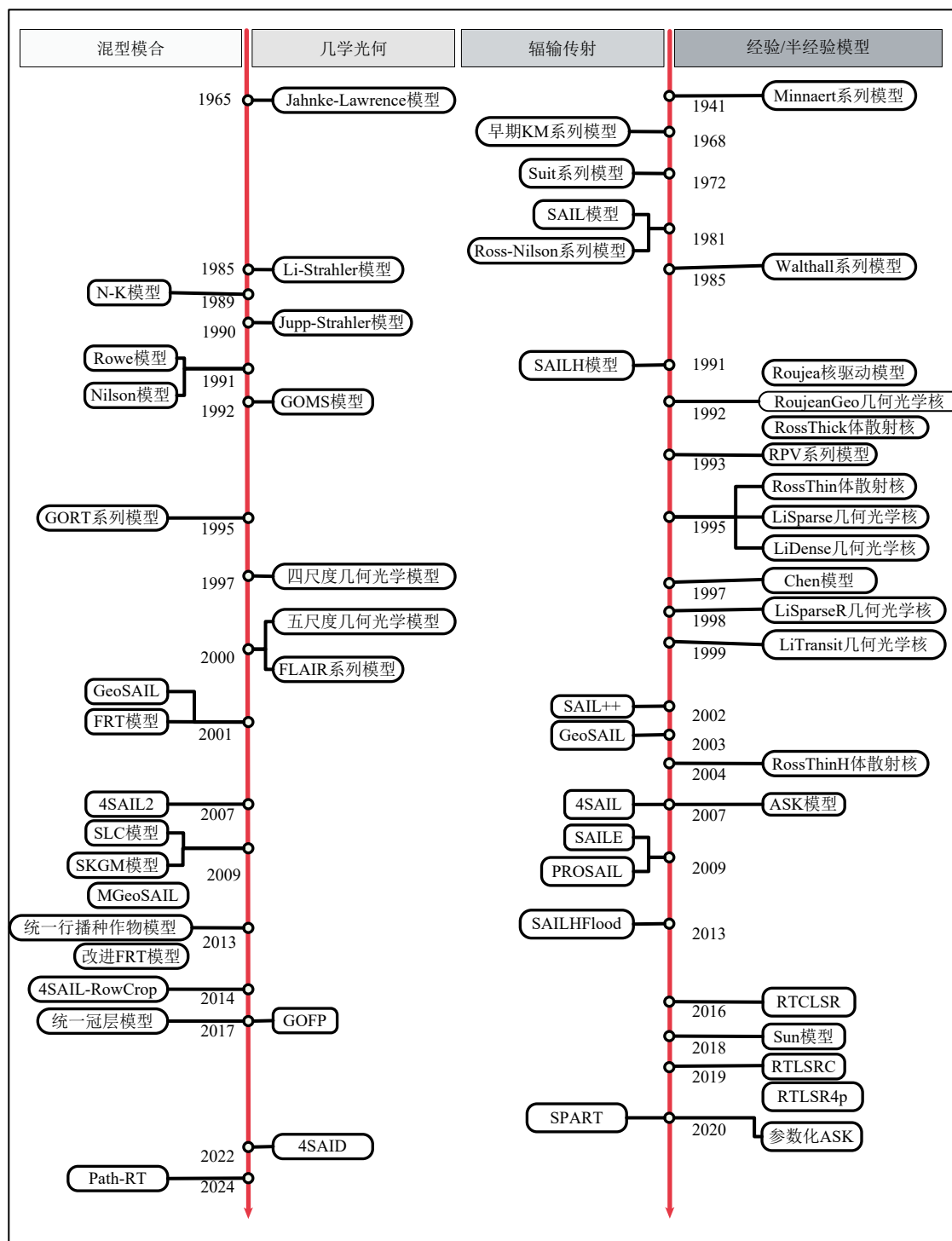


图3 平坦地表典型冠层BRDF机理模型

Fig. 3 Model of the BRDF mechanism of the typical canopy over flat surface

其中, 地表实际接收的太阳直射辐射 (图7 (a)) 表示为

可以表示为

$$E_{\text{dir}} = \iota E_s \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_s} \quad (6)$$

式中, θ_s 表示太阳天顶角; θ_i 表示太阳相对入射天顶角; ι 表示目标地物是否被相邻地物遮挡。

地表实际接收的漫散射辐射 (图7 (b)) 可以

表示为

$$E_{\text{diff}} = E_d \left(k \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_s} + (1 - k) V_{\text{sky}} \right) \quad (7)$$

式中, E_d 表示平坦地表漫散射辐射通量; k 表示各向异性因子; V_{sky} 表示天空可视因子。其中, 天空可视因子定义为从目标像元点看到的、未被周围地形遮蔽的天空视角的比例:

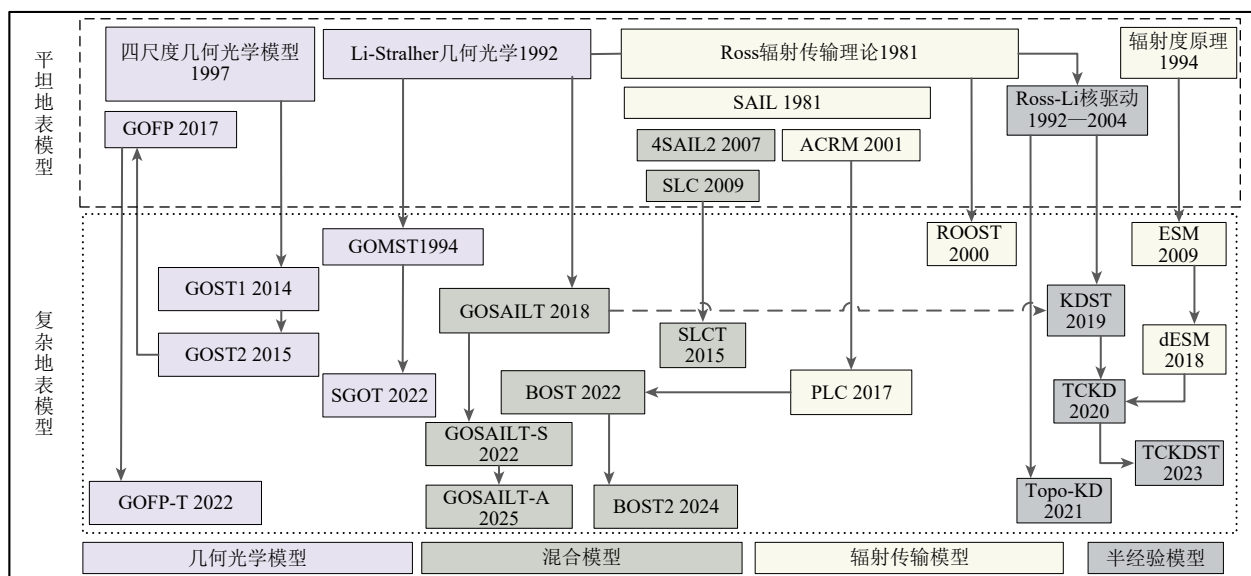


图4 平坦地表与复杂地形冠层BRDF模型的关系

Fig. 4 Relationship between flat surface and complex terrain canopy BRDF models

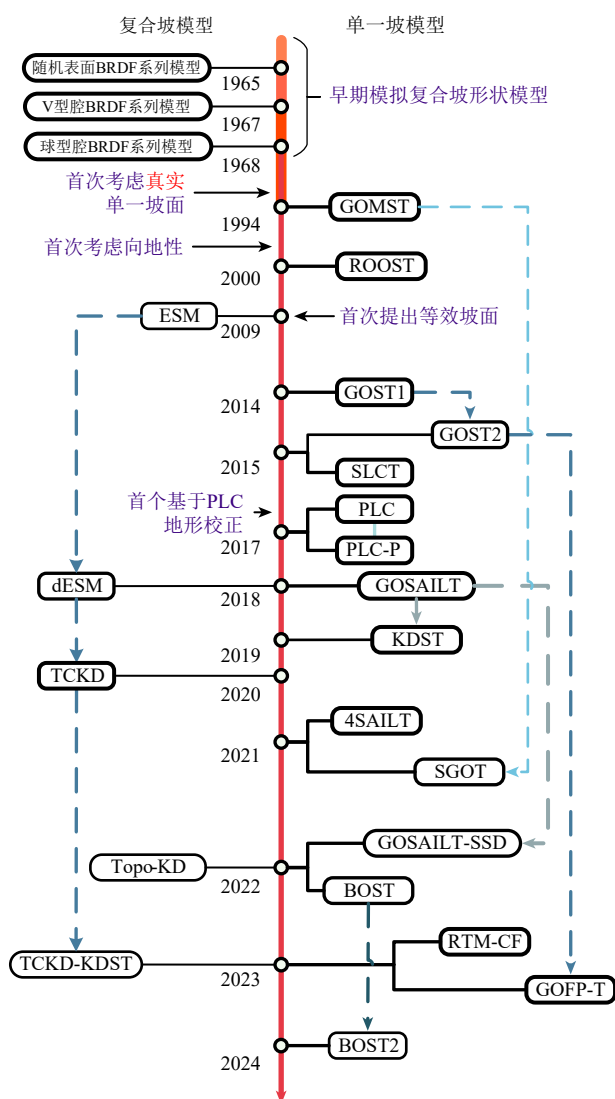


图5 山地冠层BRDF模型发展脉络

Fig. 5 Development of the canopy BRDF models over complex terrain

$$V_d \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\cos \alpha \sin^2 H_\phi + \sin \alpha \cos(\phi - \beta) \right) \left(H_\phi - \sin H_\phi \cos H_\phi \right) d\phi \quad (8)$$

式中, ϕ 表示方位; H_ϕ 表示在方向上的最大天空张角。

临近地形辐射 (图 7 (c)) 可以表示为

$$E_{\text{terr}} = \sum_{i=1}^N \frac{\cos T_M \cos T_p dS_M dS_p}{R^2} L_0 \quad (9)$$

式中, T_p 和 T_M 是法线与两个像素点连接线的夹角 (图 7 (c)), dS_p 和 dS_M 是像素点 P 和 M 的面积, R 是像素点之间的距离, N 是 M 的可见像素点数量, L_0 是像素点 P 向像素点 M 传输的总辐射量 (Proy 等, 1989)。

3.2 单一坡面冠层BRDF机理模型

3.2.1 模型基础

单一坡面冠层BRDF模型影响因素主要包括: (1) 地形倾斜导致太阳—目标—传感器的几何关系发生变化, 影响入射辐射、反射辐射与大气、地表之间复杂的辐射传输过程; (2) 山区地表坡度、坡向等地形特征使离散冠层产生自阴影、投射阴影和多重散射现象, 连续冠层内光子传输路径变化, 影响阴阳坡面辐射强度 (林兴稳 等, 2020); (3) 地形起伏改变天空可视范围, 影响目标像元入射的天空漫散射辐射和临近地形散射辐射; (4) 山区地形使冠层结构更加复杂, 改变了冠层间隙率、冠层聚集度、密度和空间分布等植被参数。因此, 单一坡面冠层BRDF建模受坡度、

坡向、相对太阳入射和传感器观测角度等几何参数, 树高、叶面积指数和叶倾角等植被结构与理化参数, 入射辐照度和漫散射辐照度等辐射特性和下垫面各向异性、叶片各向异性等光学特性的综合影响 (Wen 等, 2018)。可以表示为

$$\text{BRF} = f(\Omega_s, \Omega_v, \text{DEM}, \text{para}, \text{ref}, E) \quad (10)$$

式中, DEM 表示地形特征; Ω_s , Ω_v 表示局部坡面相对几何参数; para 表示植被参数; ref 表示光学反射率特性; E 表示辐射特性。

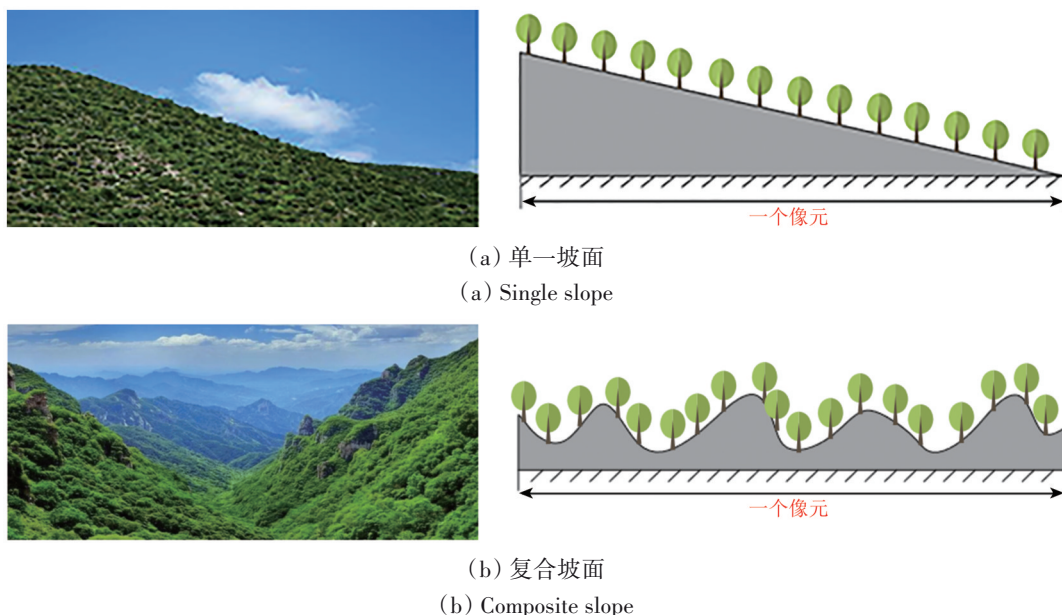


图6 复杂地形坡面类型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of slope types over complex terrain

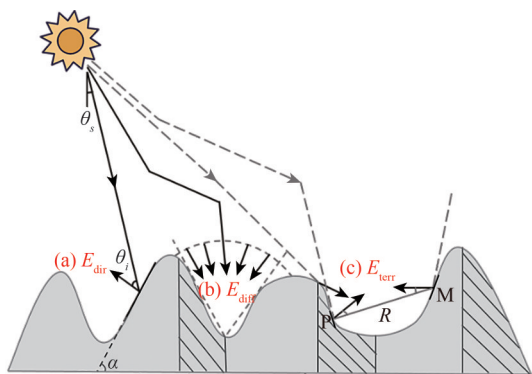


图7 山地辐射相互作用图示

Fig.7 Illustration of radiative interactions in complex terrain

单一坡面建模侧重于坡面观测的辐射和植被理化生化参数的关系准确表达, 多年来已发展了多种单一坡 BRDF 模型 (表2)。早期通过直接校正太阳—地表—传感器 STS (Sun-Terrain-Sensor) 之间的几何关系到局部坡面进行建模, 这种方法没有考虑到坡面冠层结构参数的变化。随后, 国内外研究学者一方面侧重于通过考虑树木向地性、坡面冠层间隙率和聚集度等方法表达太阳—冠层—传感器 SCS (Sun-Canopy-Sensor) 之间的几何参

数 (林兴稳 等, 2020); 另一方面, 侧重于修正坡面光子路径长度等方法细化坡面辐射传输过程 (Yin 等, 2017), 表2列出了单一坡模型的主要特点。

3.1.2 基于STS的BRDF模型

STS模型是指在冠层 BRDF 建模过程中, 只考虑太阳—地形—传感器 STS (Sun-Terrain-Sensor) 之间的几何关系, 此类模型忽略了树木的向地性生长, 导致反照率估算相对误差高达 20% 以上 (Combal 等, 2000)。

Schaaf 评估了几何光学模型中地形对树冠反射率的影响, 直接将入射角、观测角和树冠特征之间的几何关系转到坡面坐标系, 将平坦地表几何光学模型 GOMS (Li 和 Strahler, 1992) 拓展到倾斜坡面, 建立 GOMST 几何光学模型 (Schaaf 等, 1994)。该模型强调了坡度、坡向对树冠几何形状、阴影效应的影响, 模型结构简单, 直接建立水平坐标和坡面局部坐标之间旋转矩阵关系从而拓展到坡面。

表 2 单一坡面冠层BRDF模型特点总结
Table 2 Summary of BRDF model characteristics for a single slope canopy

类别	代表模型	主要特点	基础模型	参考文献
基于 STS 系列模型	GOMST	通过坐标转换改变地形对角度的影响,忽略树木向地性生长属性和散射辐射	GOMS	(Schaaf等,1994)
	SLCT	考虑了太阳直射、天空各向同性/异性漫散射和临近地形散射辐射的土壤—冠层—大气综合模型,忽略考虑树木向地性	SLC	(Mousivand等,2015)
基于 SCS 系列模型	ROOST	进行热点效应修正,考虑树木向地性,忽略散射辐射	ROSS	(Combal等,2000)
	GOST1	考虑坡面树木向地性、树木分布模式,冠内间隙率,忽略散射辐射	4-Scale	(Fan等,2014b)
	GOST2	“光线追踪+解析方法”精确计算冠层组分面积及反射率,忽略散射辐射	GOST1	(Fan等,2015)
	GOFP-T	考虑树木之间排斥距离,适用于人工林场景	GOFP	(Geng等,2022)
	SGOT	树冠投影方式简化	GOMST	(Hu和Li,2022b)
坡面辐射传输系列模型	GOSAILT	考虑树木向地性,天空散射光和树冠间多次散射忽略树冠散射辐射	GOMS+SAIL	(Wu等,2019b)
	GOSAILTS	考虑土壤各向异性特性	GOSAILT	(Cheng等,2022)
	GOSAILTA	考虑大气辐射传输过程,实现地气耦合	GOSAILT	(Zhao等,2025)
	PLC	坡面冠层内光子路径长度修正,考虑漫散射和多重散射	ACRM	(Yin等,2017)
	BOST	适用于混合植被类型	PLC	(Hu和Li,2022a)
	BOST2	考虑临近地形效应土壤—冠层—大气耦合模型	BOST+SLCT	(Hu和Li,2024)

由非朗伯地表假设 SLC (Soil-Leaf-Canopy) 模型 (Verhoef 和 Bach, 2007) 发展而来的 SLCT (Mousivand 等, 2015) 是耦合土壤—叶片—冠层和大气并考虑地形效应的混合模型,通过精确计算地形影响下的辐射传输过程,基于添加法实现对地表辐射传输过程与大气辐射传输过程的耦合,量化了临近地形和地形本身对大气层底观测辐照度的影响。研究结果表明:忽略天空可视因子、临近地形散射辐射会造成高达 5 ($\text{mW}/\text{m}^2\cdot\text{sr}\cdot\text{nm}$) 的建模误差,高达 0.5 的 LAI 反演误差。

3.1.3 基于 SCS 的 BRDF 模型

SCS 模型是指在建模过程中考虑太阳—冠层—传感器 SCS (Sun-Canopy-Sensor) 之间的几何关系,考虑地形变化导致的冠层参数的变化,包括树木向地性 (图 8)、冠层间隙率 (图 9) 等。

ROOST 模型是首个考虑树木向地性生长的一维辐射传输模型 (Combal 等, 2000),该模型基于 ROSS 辐射传输模型,假设下垫面为朗伯体,选择 Verstraete 热点模型 (Verstraete 等, 1990) 以便于考虑树木向地性假设对入射光线路径长度和叶片截面的影响。研究结果表明:不管是树木垂直于坡面假设模型 PGVM (Perpendicular to the Ground Vegetation Model) (图 8 (b)) 还是树木向地性假设模型 VVM (Vertical Vegetation Model) (图 8 (c)) 建模误差不仅和太阳方位、坡度坡向有关,还会

受到植被朝向的影响,并且 VVM 预测值反射率与实际观测值变化一致。

基于 GOMS 发展的 GOMST 模型进行坡面转换过程中,将椭球形树冠转换为球形。光照方向、树冠形状和分布模式与冠层间隙率的计算密切相关 (图 9),冠层间隙率是决定树冠二向反射率的关键参数之一。基于四尺度几何光学模型 (Chen 和 Leblanc, 1997) 发展的 GOST 系列模型 (Fan 等, 2014b, 2015),更加关注树冠分布及其组分的结构特征,弥补了基于 GOMS 的物理模型将树冠结构近似假设的缺点。GOST1 模型 (Fan 等, 2014a) 使用 Neyman-A 分布、泊松分布来模拟坡面树木分布,“筒+锥”的近似形状来描述三维针叶林树冠结构,提高了计算坡面冠层间隙率的准确性。随后耦合辐射传输方法,通过 p 光谱不变理论与叶面积指数之间定量关系计算坡地冠层内多重散射来精确模拟阴影叶片和阴影背景的反射率因子 (Fan 等, 2014b)。GOST2 模型 (Fan 等, 2015) 基于新的光线追踪方法和解析方法细化冠层内阴影叶片和光照叶片的面积比例,准确模拟了光子在冠层内的辐射传输机制。但 GOST 系列模型考虑到树木分布的随机性和规律性,与天然林不同,人工林每个树冠都有一个“外壳”,即排斥距离。Geng 等 (2017) 基于 GOST2 模型提出适用于人工林的几何光学模型 GOFP 模型,引入 RASD (Relative Allowable Shortest Distance) 描述树木之

间排斥距离和聚集度,使用超几何分布描述树木分布,从而计算适合人工林的间隙率函数,但是坡地地形会改变树冠间隙率,随后基于GOF模型建立GOF-T模型(Geng等,2022),并从两种坡面树木分布模式出发进行验证:一种是直接建立坡面与平面之间间隙率等参数转换关系,即假设坡面上树冠参数在水平上的投影保持不变,但树木之间倾斜距离和坡面面积随坡度变化而变化,称为HM假设(Fan等,2014b;Yin等,2017)(图9(a)),另一种模式即参数不随坡度变化(树与树之间距离、叶面积指数等),但植被覆盖

度随坡度变化,称为SM假设(图10(b))。结果表明:超几何分布的GOF-T模型对于两种假设的间隙率分布函数、组分面积估算还是冠层反射率的模拟都更好,第1种假设适用于高而薄的圆柱形树冠,天然林场景建模;后者适用于球形或锥形树冠,人工林场景建模。SGOT模型是一种基于GOMST的简化的单一坡面几何光学模型(Hu和Li,2022b),该模型没有将坐标系转化到坡面上,直接建立树冠入射/观测水平投影与坡面倾斜投影面积的关系,简化了计算局部坡面角度等参数的过程和树冠结构,提高了计算效率。

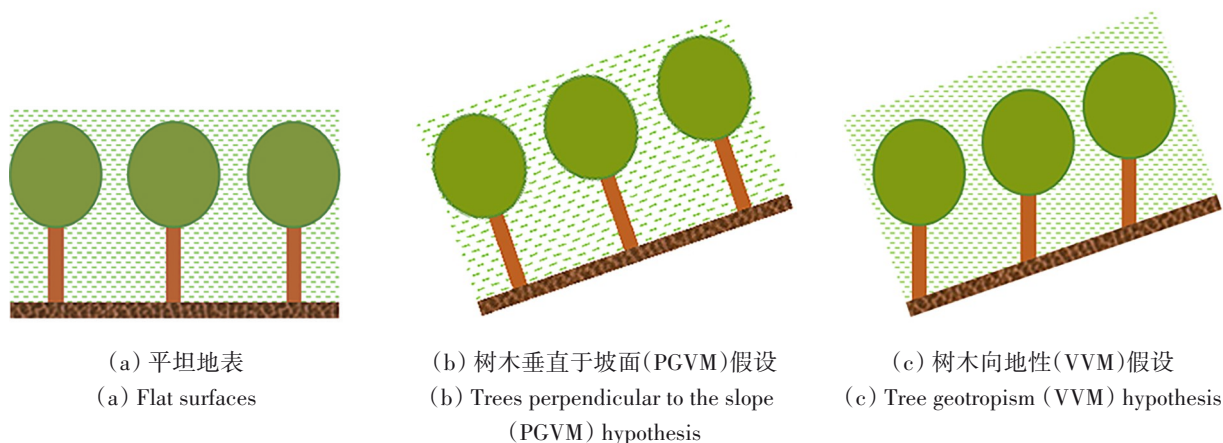


图8 树木向地性在崎岖地表的演变

Fig.8 Evolution of tree geotropism on rugged surfaces

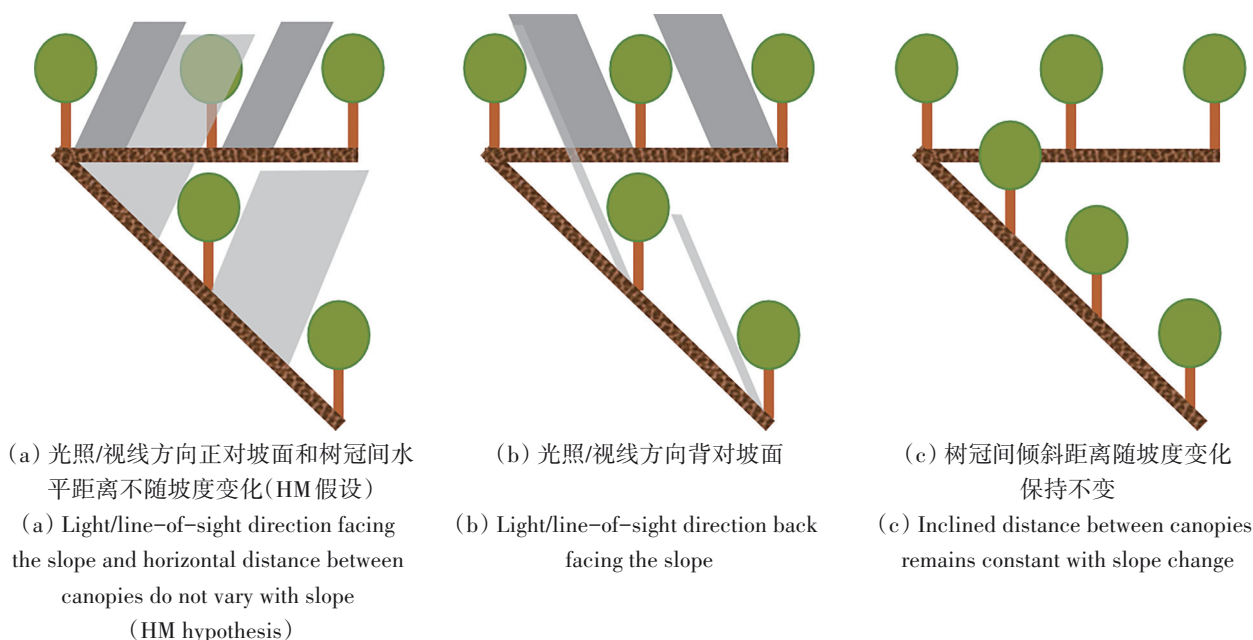


图9 地形及树木分布模式对坡面冠层间隙率的影响

Fig.9 Effect of topography and tree distribution patterns on slope canopy clearance rates

3.1.3 坡面辐射传输系列模型

地形效应会使冠层辐射传输过程复杂化，特别在高太阳天顶角时，复杂地形冠层表面接收的漫散射辐射会高达40%，当邻近斜坡遮挡了太阳表面时，这一比例会接近100%。坡面辐射传输细化系列模型不仅精细化太阳直射和临近地形条件下的冠层 BRDF/BRF (Bidirectional Reflectance Factor)，还考虑漫散射条件下的HDRF (Hemisphere-Directional Reflectance Function)。

针对离散冠层，Wu 等 (2019b) 提出并发展了 GOSAILT 系列模型，GOSAILT 是 GOMS 模型、SAIL 模型和地形效应的组合体。该模型基于 GOMS 模型将椭球体树冠转换成球体，再进行太阳—树冠—传感器之间的地形转换，保证树冠的向地性生长的同时计算坡面四分量面积比例，不同于 GOMS 基于简单的叶片与土壤组分光谱计算反射率因子，GOSAILT 利用 SAIL 模型计算树冠反射率，提高了森林冠层四组分反射率的估算精度，同时考虑了太阳直射辐射和天空漫散射 (如式 (9), (10))。

$$\rho = CK_c + GK_c + TK_r + ZK_z$$

$$\begin{bmatrix} C \\ G \\ T \\ Z \end{bmatrix} = (1-f) \begin{bmatrix} C_s \\ G_s \\ T_s \\ Z_s \end{bmatrix} + f \begin{bmatrix} C_d \\ G_d \\ T_d \\ Z_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， s 、 d 分别表示太阳直射辐射和天空漫散射辐射； f 表示散射光比例因子。随后，GOSAILT-S (Cheng 等, 2022) 考虑下垫面的各向异性反射特性，GOSAILT 耦合 SBDART 大气辐射传输模型，实现了 GOSAILT 模型的改进与完善 (Zhao 等, 2025)。Wu 等基于 GOSAILT 模型进一步发展了适用于单一坡面的核驱动模型 KDST (Wu 等, 2019c)。

针对连续冠层，PLC 模型基于 ACRM 模型 (Kuusk, 2001) 通过修正地形影响的冠层内光子传输自由路径长度 (Path Length Correction) 提高计算冠层间隙率的精度 (Yin 等, 2017)，同时考虑太阳直射辐射和天空漫散射辐射，如式 (12)：

$$\rho = S_s \rho_1 + \rho_d l(\theta, \varphi, \alpha, \beta) = \frac{1}{\cos \theta (1 - \tan \alpha \cos(\alpha - \beta) \tan \theta)} \quad (12)$$

式中， ρ_1 表示单次散射分量； ρ_d 表示漫散射通量部分； S_s 表示太阳直射辐照度比例。式中， l 表示坡

面光子路径长度； θ ， φ 表示天顶角和方位角； α ， β 表示坡度和坡向，倾斜地形路径长度变化是太阳/视线方向与地形特性的共同作用。BOST 模型 (Hu 和 Li, 2022a) 基于 PLC 模型计算的冠层、土壤单次、多重散射和漫散射，通过建立坡面聚集指数计算坡面双向间隙率将连续冠层与离散冠层建立联系，并且该模型引入了形状系数弥补了只假设冠层为椭球体的缺陷，如式 (13)：

$$C_s = C_s' \cos \sigma_1 / \iota \cos \theta_1$$

$$C_v = C_v' \cos \sigma_2 / \iota \cos \theta_2 \quad (13)$$

式中， C_s ， C_v 分别表示坡面太阳方向和观测方向的植被覆盖度； C_s' ， C_v' 平面太阳方向和观测方向的植被覆盖度； ι 表示形状系数； θ_1 和 θ_2 分别是太阳天顶角和观测天顶角； σ_1 和 σ_2 是局部坡面太阳方位角和观测方位角。该模型是一个统一场景模型但是简化树冠的同时没有考虑树冠内部叶片分布与结构，并且忽略了临近地形效应。随后基于 BOST 模型，提出了新的光线追踪法改进天空和地形视域因子的计算方法，提高了各向同性/异性天空漫散射和临近地形辐射的计算精度，并结合 SLCT 中四流辐射传输理论方法实现太阳直射辐射、天空漫散射和临近地形辐射与大气辐射传输过程的耦合，将 BOST 模型拓展至适用于崎岖地表的土壤—冠层—大气耦合模型 (Hu 和 Li, 2024)。

4.3 复合坡冠层 BRDF 机理模型

4.3.1 模型基础

通常情况下，无法获得与 DEM 空间分辨率相同的遥感数据，或者低空间分辨率 DEM 的空间异质性较强，无法精确刻画内部地形变化细节特征，此时就需要进行复合坡面建模。与单一坡面建模不同，复合坡面建模考虑的是一个更大的场景，很难建立每个微小坡面与冠层结构、临近地形辐射之间的定量关系。对于复合坡面地形，确定微小坡面空间分布导致的太阳、目标和传感器之间的几何形状改变、像元内地表反射光的空间分布和阴影函数分布特征更加重要，主要影响因素包括：(1) 子地形坡度、坡向的分布导致像元内复杂的阴影效应及分布规律；(2) 微小坡面高低起伏改变天空可视因子比例，形成局部地形遮蔽，加剧了太阳直射辐射、天空漫散射的重分配和临近地形多重散射辐射的影响。因此，复合坡面地

形效应是子地形的累积效应（Wen 等，2018）。复合坡面各向异性反射率计算公式可以表示为

$$BRF_{coarse} = f(\Omega_s, \Omega_v, DEM_{fine}, BRF_{fine}) \quad (14)$$

式中， BRF_{fine} 表示微小坡面的二向反射率； DEM_{fine} 表示像元内微小坡面的地形特征； Ω_s, Ω_v 表示微小坡面的相对几何参数。因此，复合坡面冠层 BRDF 建模的本质是描述像元内子地形影响。由于早期高精度 DEM 数据的限制，国内外研究学者将子地形抽象成特殊形状进行研究（Buhl 等，1968；Despan 等，1998；Koenderink 等，1999），或使用

阴影函数表征粗糙表面几何遮蔽和光线散射过程，以便获取粗糙表面的二向反射分布函数。此类模型假设粗糙表面的高低起伏服从高斯分布，采用均方根斜率、相关长度、平均坡度等参数量化随机表面（Despan 等，1998），本文将这种使用平均坡度表征随机表面坡度的模型，称为平均坡度模型。随着遥感技术发展，遥感可以获取高精度的 DEM 数据，现阶段，复合坡面 BRDF 模型大多基于真实 DEM 数据进行建模，复合坡模型的主要特点分析总结如表 3 所示。

表 3 典型复合坡面 BRDF 模型概述
Table.3 Overview of the typical composite slope surface BRDF model

类型	子地形形状	代表模型	特点	参考文献
特殊形状模型	V 形	T-S 模型、Blinn 模型、Liu 模型	假设粗糙表面由对称或不对称的 V 型槽组成,假设过于简单	(Torrance and Sparrow, 1967; Blinn, 1977;Liu 等,2015)
	球形	Buhlet 模型、Koenderink 模型	假设粗糙表面由正球形凹槽或负球形凸起组成,假设过于简单	(Buhl 等,1968;Koenderink 等,1999)
平均坡度模型	随机分布	Beckmann 模型、Smith 系列模型、Wagner 模型、Hapke 系列模型、Despan 模型、Ross 模型、Gao 模型	假设粗糙表面坡度和高程等特征服从高斯正态分布、拉普拉斯分布或其他分布，只有在大尺度条件下满足	(Beckmann, 1965; Smith, 1967; Wagner, 1967; Hapke, 1984; Despan 等，1998;Ross 等,2005;Gao 等,2013)
基于 DEM 模型	DEM	ESM 模型、dESM 模型、TCKD 模型、TCKDST 模型、Topo-KD 模型	真实 DEM 描述像元内子地形分布特征，计算复杂	(Wen 等,2009;Hao 等,2018,2020;Zhu 等,2023;Yan 等,2022)

4.3.1 特殊形状模型

自然界中许多物体在视觉上是复杂的，出现很多不同形状的几何模型来捕捉其复杂性。早期对地表形状进行近似，将其描述成特殊形状的凹槽（V 形、球形）和服从随机分布的表面（Buhl 等，1968；Torrance and Sparrow，1967）。目的是理解粗糙表面的投影以光线传输机制，以便于描述自然表面特性。

T-S 模型是将地表描述成随机分布的 V 形镜面模型（Torrance and Sparrow，1967），基于几何光学原理描述表面的反射、多重散射和内部散射引起的漫散射，同时分析了相邻表面的阴影和遮挡效应，随后 Blinn（1977）简化了 TS 模型的表达形式。然而，将表面描述成对称的 V 形凹槽物理缺陷明显，导致 BRDF 曲线不准确。因此，Liu 等（2015）假设相邻坡面方向相反且不对称，结合了偏振效应和阴影效应，更接近自然表面实际情况。另一种比较典型的凹槽就是球形腔。球形腔形状主要分为两种：正球形腔和负球形腔。负球形腔

大多被用来模拟很多行星表面的陨石坑，正球形腔大多用来模拟沙砾、球形物体等。Buhl 等（1968）和 Koenderink 等（1999）都提出了针对正球形凹坑的二向反射分布函数，与 V 形凹槽相比，正球形凹坑模型几何上更符合自然表面。同时，Poulin 和 Fournier（1990）还将负球形几何形状延伸到二向反射率分布模型中，更快的模拟不同表面的各向异性。

4.3.2 平均坡度模型

虽然凹槽假设模型在数学上是可行的，但其物理机制仍不完善。因此，出现了一系列假设表面粗糙形状服从统计分布的平均坡度模型，平均坡度模型使用阴影函数刻画微表面的基本参数（Hao 等，2018），主要包括 Beckmann 阴影函数（Beckmann, 1965）、Smith 阴影函数（Smith, 1967）、Wagner 阴影函数（Wagner, 1967）、Hapke 阴影函数（Hapke, 1984）、Despan 阴影函数（Despan 等，1998）和 Ross 阴影函数（Ross 等，2005）。Beckmann

阴影函数讨论了几何阴影对随机粗糙表面的散射能量的影响，被广泛应用在月球和行星回波分析。但是 Beckmann 指出阴影对表面散射的影响不应该只取决于光照比例，而是被光照且可视的表面单元的比例，Beckmann 阴影理论会高估阴影效应的影响。随后，Wagner 采用积分近似求解更大掠射角情况下的阴影函数，与 Brockelman 和 Hagfors 的计算机模拟结果表现出极高的一致性。Smith 阴影函数引入归一化项简化 Wagner 阴影函数，降低了计算复杂度。然而，Wagner 和 Smith 阴影函数假设高度和坡度的联合概率密度是不相关的，从而导致阴影函数的高估。因此，Bourlier 等（2000）引入相关性，结果表明，阴影函数由高斯分布的均值、方差和自相关函数等因素共同决定。以上阴影函数通常假设表面是一维或各向同性的，会导致平均阴影函数数值解难以处理，此时需要一个二维平面，以更好地表征粗糙表面统计特性，如 Bourlier 函数、Hapke 函数和 Despan 函数等。Bourlier 将 Smith 一维阴影函数拓展到二维表面，还将高斯随机表面拓展到拉普拉斯分布随机表面。Hapke 阴影函数最早用来模拟行星表面粒子的相互遮挡与各向同性多重散射，考虑微小面元及其坡度的概率分布，并提出“有效坡度”的概念。在此基础上，Hapke 模型得到一系列改进，包括改善消光系数和热点效应、引入各向异性多重散射和孔隙率。Despan 阴影函数基于严格的概率技术，将粗糙表面描述为成高斯分布的凸（山脉）和凹（山谷）的组合，并提出了可以通过改变入射角和出射角改变表面粗糙度的简化尺度缩放理论及其在遥感中的应用。ROSS 还使用高斯分布模拟海面，提出考虑波浪相互遮挡、投影和波面隐藏的解析 BRDF 二向反射率分布函数，该模型与海绵辐射实测数据具有高度吻合。考虑到准确计算粗糙表面多重散射是刻画表面特征的必要条件，Heitz 等（2016）基于 Smith 阴影函数模型引入多重散射，与计算机模拟模型显示良好的一致性。近些年，Gao 等（2013）基于 RTLSR 核驱动模型（Wanner 等，1995）引入 Hapke 阴影函数（Hapke，1984）建立计算考虑地形效应的核驱动模型，结果表明：改进后的核驱动模型在山区具有更好的反演精度，但是 Hapke 阴影函数假设微小地形正态分布，对于

场景仍具有局限性。

4.3.3 基于 DEM 模型

平均坡度模型只有在相对较大的尺度上（超过 10 km）才适用，直接假设粗分辨率像元内微小坡面服从统计分布将会给遥感参数估算造成较大的不确定性。地表粗糙度是一种随尺度变化的特性，自然表面本身又很复杂，所以，Wen 等（2009）从能量平衡原理出发提出等效坡面模型 ESM。该模型假设存在一个等效坡面，该坡面上入射和反射辐射能量与复合坡面相等，将复杂的复合坡面建模问题简化为求解等效单一坡面反射率与复合坡面子地形影响因子的过程，模型如式（15）：

$$\text{BRF}_{\text{coarse}} = \text{BRF}_{\text{eq}}(i_{\text{esj}}, i_{\text{evj}}, \varphi_{\text{esj}}, \varphi_{\text{evj}}) \times T(\text{DEM}, \theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) \quad (15)$$

式中， BRF_{eq} 表示等效坡面双向反射率； T 表示微小坡面地形特征，可以计算每个亚像元单一坡面坡度、坡向等。子地形影响因子的函数表示为

$$T(\text{DEM}, \theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v) = \frac{\int_{A(s,v)} \cos i_{\text{esj}} \cos i_{\text{evj}} dA_{ij}}{\cos \theta_s \int_{A(s,v)} \cos i_{vj} dA_{ij}} \quad (16)$$

式中， θ_s 表示太阳天顶角； i_{esj} 、 i_{evj} 表示等效坡面的相对太阳天顶角、观测天顶角； $\int_{A(s,v)} \cos i_{vj} dA_{ij}$ 表示复合坡面像元在观测方向的有效投影面积。相比于上述所介绍的阴影函数，形式简单易懂，更能直观清晰的解释坡面局部地形特征和阴影效应。DSM 是首个借助等效坡面概念将复合坡面建模过程简化的模型，有利于山区反照率估算和尺度效应校正，但模型只考虑了太阳直射辐射，忽略了大气漫散射、像元内多重散射和水平方向地表异质性。随后，Hao 等（2018）基于 ESM 提出考虑天空漫散射的 dESM，该模型构造了考虑天空散射光的子地形影响因子，精确的刻画了天空散射光的影响，进一步完善了 ESM 模型（图 10）。如式（17）：

$$\text{BRF}_{\text{coarse}} = \text{BRF}_{\text{eq}}(i_{\text{esj}}, i_{\text{evj}}, \varphi_{\text{esj}}, \varphi_{\text{evj}}) \times T(\text{DEM}, \theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v, S) \quad (17)$$

式中， S 表示天空散射光比例。但是该模型仍忽略了临近地形散射、各向异性天空漫散射辐射和地表水平地表异质性。

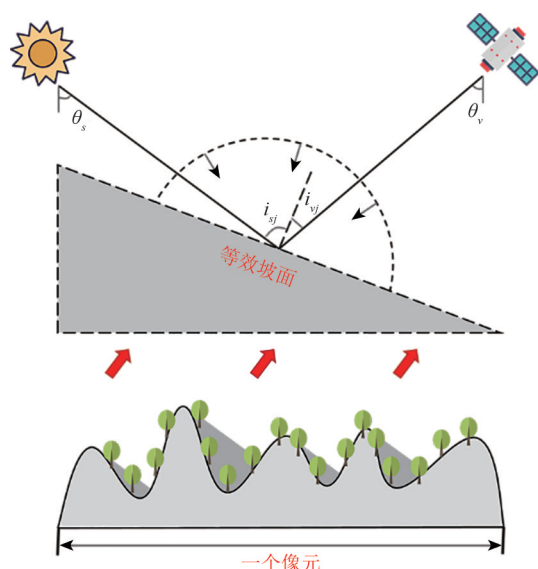


图 10 崎岖地形辐射度的贡献

Fig. 10 Contributions of irradiance over rugged terrain

TCKD 模型 (Hao 等, 2020) 是基于 dESM 模型和 RossThick-LiTransit (RTLTL) 核驱动模型 (Li 等, 1999) 发展的适用于全天空并考虑地形效应的核驱动模型, 解决了以往核驱动模型没有考虑天空漫散射, 场景实用性差等问题, 是进行山区反照率估算的关键模型。该模型基于 RTLTL 核驱动模型计算晴空和阴天情况下等效坡面反射率, 再按天空散射光比例进行线性加权并与子地形影响因子相乘即可得到考虑地形和天空漫散射的复合坡面核驱动模型。随后, Zhu 等 (2023) 在 TCKD 基础上进一步考虑了等效坡面的二向反射特性,

将 TCKD 与 KDST 耦合建立了考虑树木向地性、土壤植被组分和子地形影响因子的 TCKDST 核驱动模型, 该模型适用于混合冠层场景。还有将等效坡面概念进一步拓展到热红外, 表征考虑地形效应的地表温度方向性核驱动模型 TESKD (Fan 等, 2024)。Topo-KD 也是适用于全地形的核驱动模型, 该模型通过构建粗分辨率像元地形崎岖指数指标 TAI 实现平坦地表 RTLSR (RLKB) 和基于山地辐射传输模型构建的 LKB_T 的自适应耦合, 降低了地形对参数反演的影响 (Yan 等, 2022)。

4 结 语

地表二向反射特性是地表参数反演的基础。近些年, BRDF 定义和建模已从平坦均质地表拓展到复杂地形, 显著提升了模型的应用潜力。本文综述了复杂地形 BRDF 的定义和不同尺度冠层 BRDF 机理模型的发展脉络和特点。当前复杂地形 BRDF 模型发展如图 11 所示, 可见以山地植被冠层二向反射模型为研究主干, 以山地单一坡和复合坡建模场景为核心树干, 形成了单一坡和复合坡二向反射机理模型发展历程的枝叶, 并形成单一坡和复合坡一体化模型, 这些模型的发展为不同尺度山地植被冠层二向反射特征模拟提供了重要的模型支持, 为山地定量遥感的发展提供理论基础。面向山地定量遥感的快速发展, 对山地植被冠层二向反射机理模型的发展提出了更迫切的需求。

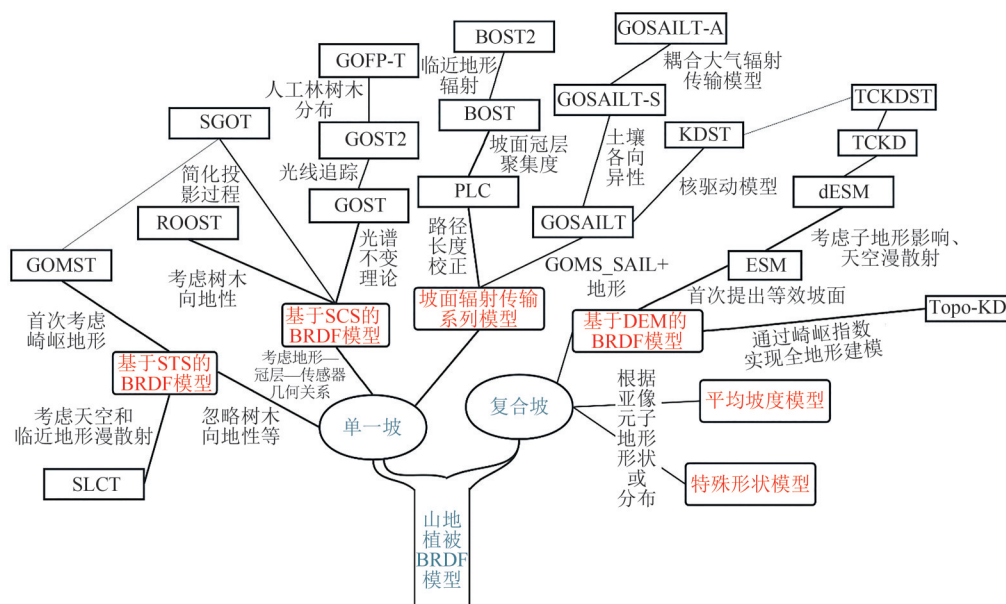


图 11 山地植被冠层 BRDF 机理模型内在关联

Fig. 11 Intrinsic relevance of BRDF mechanistic models over complex terrain

(1) 考虑混合地类特征的山地二向反射建模。当前无论是单一坡还是复合坡山地植被冠层二向反射遥感建模的假设条件是场景内地类均一，但地形特征差异明显。然而，实际上山区地类较为破碎，特别是我国西南地区尤为明显。如何在当前山地二向反射单一地类场景基础上，考虑场景内异质性混合地类特征，并充分考虑地类之间的多次散射作用，构建多尺度、全地形、多地类的物理模型仍面临挑战（柳钦火等，2016），也是进一步提高山地二向反射机理模型模拟精度的必要要求。

(2) 亟需发展耦合山地地表—大气耦合的多尺度辐射传输模型。山区地形复杂，同时还面临多云雨的大气条件，当前发展的模型已经初步将单一坡植被冠层二向反射机理模型扩展至不同大气情况、不同云特征下的大气层顶二向反射模型，这进一步提供了不同天气情况下山区遥感观测的二向反射特征模拟精度。这种山地大气层顶二向反射特征模拟，对于遥感载荷论证、山地辐射特征模拟具有重要的意义，对于全面刻画山区光学遥感辐射传输过程和关键辐射参数反演至关重要。

(3) 发展山地立体遥感观测和复杂地形 BRDF 模型验证技术（李爱农等，2025）。由于山地地表多角度观测的困难，当前模型验证多数使用 DART、LESS 和 STREAM 等三维辐射传输模型的模拟数据开展验证，普遍缺少野外实地观测的山地地表多角度观测数据（闻建光等，2023），亟需突破复杂地形地表的多角度观测或地形沙盘实境技术，获取复杂地形不同地表的野外观测数据，提升复杂地表 BRDF 模型的验证能力。

(4) 基于复杂地形 BRDF 模型实现业务化应用。基于复杂地形 BRDF 模型发展具有普遍适用性和高精度的核驱动模型，或将复杂地形 BRDF 模型与机器学习相结合，优化山地真实场景的模拟效果，提高全球遥感参数反演和产品生产的精度和效率（闻建光等，2025）。

参考文献(References)

Beckmann P. 1965. Shadowing of random rough surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 13(3): 384-388 [DOI: 10.1109/TAP.1965.1138443]

Blinn J F. 1977. Models of light reflection for computer synthesized pictures//*Proceedings of the 4th Annual Conference on Computer*

Graphics and Interactive Techniques. San Jose: Association for Computing Machinery: 192-198 [DOI: 10.1145/563858.563893]

Bourlier C, Saillard J and Berginc G. 2000. Effect of correlation between shadowing and shadowed points on the Wagner and Smith monostatic one-dimensional shadowing functions. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 48(3): 437-446 [DOI: 10.1109/8.841905]

Buhl D, Welch W J and Rea D G. 1968. Reradiation and thermal emission from illuminated craters on the lunar surface. *Journal of Geophysical Research*, 73(16): 5281-5295 [DOI: 10.1029/JB073i016p05281]

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 S Y, Xiao P F, Zhang X L, Liu H, Wang Y H, Sun L Y and Yin G F. 2024. Improved snow-covered forest bidirectional reflectance model incorporating canopy-intercepted snow and atmospheric effects. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4302117 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3427818]

Chen Y, Hall A and Liou K N. 2006. Application of three-dimensional solar radiative transfer to mountains. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D21): D21111 [DOI: 10.1029/2006JD007163]

Chen Y Y, Mu X H, McVicar T R, Wang Y Y, Guo Y H, Yan K, Lai Y K, Xie D H and Yan G J. 2025. Using an improved radiative transfer model to estimate leaf area index, fractional vegetation cover and leaf inclination angle from Himawari-8 geostationary satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 318: 114595 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114595]

Cheng J, Wen J G, Xiao Q, Wu S B, Hao D L and Liu Q H. 2022. Extending the GOSAILT model to simulate sparse woodland bi-directional reflectance with soil reflectance anisotropy consideration. *Remote Sensing*, 14(4): 1001 [DOI: 10.3390/rs14041001]

Chu Q, Yan G J, Qi J B, Mu X H, Li L Y, Tong Y Y, Zhou Y J, Liu Y N, Xie D H and Wild M. 2021. Quantitative analysis of terrain reflected solar radiation in snow-covered mountains: a case study in Southeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(11): e2020JD034294 [DOI: 10.1029/2020JD034294]

Combal B, Isaka H and Trotter C. 2000. Extending a turbid medium BRDF model to allow sloping terrain with a vertical plant stand. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 798-810 [DOI: 10.1109/36.842009]

Despan D, Bedidi A, Cervelle B and Rudant J P. 1998. Bidirectional reflectance of gaussian random surfaces and its scaling properties. *Mathematical Geology*, 30(7): 873-888 [DOI: 10.1023/A:1021730710321]

Di Girolamo L. 2003. Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. *Remote Sensing of Environment*, 88(4): 479-482 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.07.004]

Dymond J R, Shepherd J D and Gillingham S. 2024. Directional reflectance

- tance of light from landscapes on a long transect in Australia-forest to desert. *Science of Remote Sensing*, 9: 100136 [DOI: 10.1016/j.srs.2024.100136]
- Fan T Y, Wen J G, Jiao Z H, Bian Z J, Zhong S Y, Zhu W Z, Cao B, Li H, Du Y M, Xiao Q and Liu Q H. 2024. Modeling the topographic effect on directional anisotropies of land surface temperature from thermal remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 4: 0226 [DOI: 10.34133/remotesensing.0226]
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Nesbitt N. 2014a. Hybrid geometric optical - radiative transfer model suitable for forests on slopes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5579-5586 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290590]
- Fan W L, Chen J M, Ju W M and Zhu G L. 2014b. GOST: a geometric-optical model for sloping terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5469-5482 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2289852]
- Fan W L, Li J and Liu Q H. 2015. GOST2: the improvement of the canopy reflectance model GOST in separating the sunlit and shaded leaves. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4): 1423-1431 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2413994]
- Gao B, Jia L and Menenti M. 2013. An improved bidirectional reflectance distribution function (BRDF) over rugged terrain based on moderate spatial resolution remote sensing data//2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne: IEEE: 2766-2769 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6723397]
- Gastellu-Etchegorry J P, Yin T G, Lauret N, Cajgfinger T, Gregoire T, Grau E, Feret J B, Lopes M, Guilleux J, Dedieu G, Malenovsky Z, Cook B D, Morton D, Rubio J, Durrieu S, Cazanave G, Martin E and Ristorcelli T. 2015. Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sensing*, 7(2): 1667-1701 [DOI: 10.3390/rs70201667]
- Gemmell F. 1998. An investigation of terrain effects on the inversion of a forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment*, 65(2): 155-169 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00022-4]
- Geng J, Chen J M, Fan W L, Tu L L, Pang Y, Yuan G, Xu L C, Zhu C Y, Zhang T, Zhang C J, Ye Z R, Zhu Y C and Li Z X. 2022. Application of a hypergeometric model in simulating canopy gap fraction and BRDF for forest plantations on sloping terrains. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 2901-2913 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3156403]
- Geng J, Chen J M, Fan W L, Tu L L, Tian Q J, Yang R R, Yang Y J, Wang L, Lv C G and Wu S B. 2017. GOF: a geometric-optical model for forest plantations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9): 5230-5241 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2704079]
- Goel N S. 1988. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, 4(1): 1-212 [DOI: 10.1080/02757258809532105]
- Gu C Y, Clevers J G P W, Liu X, Tian X, Li Z Y and Li Z Y. 2018. Predicting forest height using the GOST, Landsat 7 ETM+, and airborne LiDAR for sloping terrains in the Greater Khingan Mountains of China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 137: 97-111 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.01.005]
- Han Y, Wen J G, Xiao Q, Bao Y F, Chen X, Liu Q and He M. 2023. Review of the land surface BRDF inversion methods based on remotely sensed satellite data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(9): 2024-2040 (韩源, 闻建光, 肖青, 鲍云飞, 陈曦, 刘强, 贺敏. 2023. 陆表二向反射(BRDF)反演方法研究进展. *遥感学报*, 27(9): 2024-2040) [DOI: 10.11834/jrs.20231188]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, Wu S B, Lin X W, You D Q and Tang Y. 2018. Modeling anisotropic reflectance over composite sloping terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7): 3903-3923 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2816015]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, You D Q and Tang Y. 2020. An improved topography-coupled kernel-driven model for land surface anisotropic reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2833-2847 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2956705]
- Hapke B. 1984. Bidirectional reflectance spectroscopy: 3. Correction for macroscopic roughness. *Icarus*, 59(1): 41-59 [DOI: 10.1016/0019-1035(84)90054-X]
- He M, Wen J G, Wu S B, Meng L, Lin X W, Han Y, You D Q, Tang Y and Liu Q H. 2024. A new forest leaf area index retrieval algorithm over slope surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4400718 [DOI: 10.1109/TGRS. 2023. 3343876]
- Heitz E, Hanika J, d'Eon E and Dachsbacher C. 2016. Multiple-scattering microfacet BSDFs with the smith model. *ACM Transactions on Graphics*, 35(4): 58 [DOI: 10.1145/2897824.2925943]
- Hu G Y and Li A N. 2022a. BOST: a canopy reflectance model suitable for both continuous and discontinuous canopies over sloping terrains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4416119 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3226460]
- Hu G Y and Li A N. 2022b. SGOT: a simplified geometric-optical model for crown scene components modeling over rugged terrain. *Remote Sensing*, 14(8): 1821 [DOI: 10.3390/rs14081821]
- Hu G Y and Li A N. 2024. Investigating the surrounding topographic effects on target reflected radiance by extending the BOST model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4412518 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3452423]
- Jin Y F, Schaaf C B, Gao F, Li X W, Strahler A H, Lucht W and Liang S L. 2003. Consistency of MODIS surface bidirectional reflectance distribution function and albedo retrievals: 1. Algorithm performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D5): 4158 [DOI: 10.1029/2002JD002803]
- Koenderink J J, Van Doorn A J, Dana K J and Nayar S. 1999. Bidirectional reflection distribution function of thoroughly pitted surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 31(2): 129-144 [DOI: 10.1023/A:1008061730969]
- Koenderink J J, Van Doorn A J, Dana K J and Nayar S. 1999. Bidirectional reflection distribution function of thoroughly pitted surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 31(2): 129-144

- [DOI: 10.1023/A:1008061730969]
- 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]
- Li A N, Bian J H, Miao G F, Wen J G, He T, Mu X H, Zhao W, Zhang Z J, Nan X, Lei G B, Jiao Z H, Cheng Z Q, Zeng H D, Xie D H, You D Q, Li L, Tian F, Jin H A, Jiang B and Ma Y C. 2025. Research progress of the stereoscopic observation and high spatial resolution products development of key global change parameters for mountain ecosystem. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 2015-2034 (李爱农, 边金虎, 缪国芳, 闻建光, 何涛, 穆西哈, 赵伟, 张正健, 南希, 雷光斌, 焦中虎, 程志强, 曾宏达, 谢东辉, 游冬琴, 李丽, 田丰, 靳华安, 江波, 马一川. 2025. 山地生态系统全球变化关键参数立体观测与高分辨率产品研制研究进展. *遥感学报*, 29(6): 2015-2034) [DOI: 10.11834/jrs.20254361]
- Li D, Chen J M, Zhang X, Yan Y, Zhu J, Zheng H B, Zhou K, Yao X, Tian Y C, Zhu Y, Cheng T and Cao W X. 2020. Improved estimation of leaf chlorophyll content of row crops from canopy reflectance spectra through minimizing canopy structural effects and optimizing off-noon observation time. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111985 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111985]
- Li X, Sun Z Q, Lu S and Omasa K. 2023. PROSPECTAR: a model for simulating multi-angular spectral properties of leaves by coupling PROSPECT with a specular function. *Remote Sensing of Environment*, 297: 113754 [DOI: 10.1016/j.rse.2023.113754]
- Li X W, Gao F, Chen L Z and Strahler A H. 1999. Derivation and validation of a new kernel for kernel-driven BRDF models//*Proceedings of SPIE 3868, Remote Sensing for Earth Science, Ocean, and Sea Ice Applications*. Florence: SPIE: 368-379 [DOI: 10.1117/12.373123]
- 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 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 X W, Wen J G, Wu S B, Hao D L, Xiao Q and Liu Q H. 2020. Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imagery. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(8): 958-974 (林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火. 2020. 地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展. *遥感学报*, 24(8): 958-974) [DOI: 10.11834/jrs.20209167]
- Liu H, Zhu J P and Wang K. 2015. Modified polarized geometrical attenuation model for bidirectional reflection distribution function based on random surface microfacet theory. *Optics Express*, 23(17): 22788-22799 [DOI: 10.1364/OE.23.022788]
- 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]
- Liu Q H, Yan G J, Jiao Z T, Xiao Q, Wen J G, Liang S L and Wang J D. 2019. Geometric-optical remote sensing modeling to quantitative remote sensing theory and methodology development: in memory of academician Li Xiaowen. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(1): 1-10 (柳钦火, 阎广建, 焦子锦, 肖青, 闻建光, 梁顺林, 王锦地. 2019. 发展几何光学遥感建模理论, 推动定量遥感科学前行——深切缅怀李小文院士. *遥感学报*, 23(1): 1-10) [DOI: 10.11834/jrs.20198077]
- Ma Y C, He T, Aguilar C, Pimentel R, Liang S L, McVicar T R, Hao D L, Xiao X X and Liu X Y. 2024a. Evaluating topographic effects on kilometer-scale satellite downward shortwave radiation products: a case study in mid-latitude mountains. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5609816 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3365865]
- Ma Y C, He T, Liang S L, McVicar T R, Hao D L, Liu T and Jiang B. 2023. Estimation of fine spatial resolution all-sky surface net shortwave radiation over mountainous terrain from Landsat 8 and Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113364 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113364]
- Ma Y C, He T, McVicar T R, Liang S L, Liu T, Peng W S, Song D X and Tian F. 2024b. Quantifying how topography impacts vegetation indices at various spatial and temporal scales. *Remote Sensing of Environment*, 312: 114311 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114311]
- Martonchik J V, Bruegge C J and Strahler A H. 2000. A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, 19(1/4): 9-20 [DOI: 10.1080/02757250009532407]
- Mousivand A, Verhoef W, Menenti M and Gorte B. 2015. Modeling top of atmosphere radiance over heterogeneous non-Lambertian rugged terrain. *Remote Sensing*, 7(6): 8019-8044 [DOI: 10.3390/rs70608019]
- Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, Ginsberg I W and Limperis T. 1977. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. National Bureau of Standards [DOI: 10.6028/NBS.MONO.160]
- Poulin P and Fournier A. 1990. A model for anisotropic reflection. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 24(4): 273-282 [DOI: 10.1145/97880.97909]
- Proy C, Tanre D and Deschamps P. 1989. Evaluation of topographic effects in remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 30(1): 21-32 [DOI: 10.1016/0034-4257(89)90044-8]
- Qin Z Q, Li X and Gu Y F. 2024. Hemisphere harmonics basis: a universal approach to remote sensing BRDF approximation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 1-16 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3374237]
- Roberts G. 2001. A review of the application of BRDF models to infer land cover parameters at regional and global scales. *Progress in*

- Physical Geography: Earth and Environment, 25(4): 483-511 [DOI: 10.1177/030913330102500402]
- Ross V, Dion D and Potvin G. 2005. Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface. *Journal of the Optical Society of America A*, 22(11): 2442-2453 [DOI: 10.1364/JOSAA.22.002442]
- Sandmeier S and Itten K I. 1997. A physically-based model to correct atmospheric and illumination effects in optical satellite data of rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3): 708-717 [DOI: 10.1109/36.581991]
- Schaaf C B, Li X W and Strahler A H. 1994. Topographic effects on bidirectional and hemispherical reflectances calculated with a geometric-optical canopy model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(6): 1186-1193 [DOI: 10.1109/36.338367]
- Shi H Y, Jiang J Y, Jacquemoud S, Xiao Z Q and Ma M G. 2023. Estimating leaf mass per area with leaf radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment*, 286: 113444 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113444]
- Shi H Y and Xiao Z Q. 2021. The 4SAILT model: an improved 4SAIL canopy radiative transfer model for sloping terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(7): 5515-5525 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3022874]
- Smith B. 1967. Geometrical shadowing of a random rough surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 15(5): 668-671 [DOI: 10.1109/TAP.1967.1138991]
- Snyder W C. 2002. Definition and invariance properties of structured surface BRDF. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(5): 1032-1037 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.1010890]
- Torrance K E and Sparrow E M. 1967. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9): 1105-1114 [DOI: 10.1364/JOSA.57.001105]
- Verhoef W and Bach H. 2007. Coupled soil-leaf-canopy and atmosphere radiative transfer modeling to simulate hyperspectral multi-angular surface reflectance and TOA radiance data. *Remote Sensing of Environment*, 109(2): 166-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.013]
- Verstraete M M, Pinty B and Dickinson R E. 1990. A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D8): 11755-11765 [DOI: 10.1029/JD095iD08p11755]
- Wagner R J. 1967. Shadowing of randomly rough surfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 41(1): 138-147 [DOI: 10.1121/1.1910308]
- Wang K C, Zhou X J, Liu J M and Sparrow M. 2005. Estimating surface solar radiation over complex terrain using moderate-resolution satellite sensor data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1): 47-58 [DOI: 10.1080/01431160410001735111]
- Wanner W, Li X and Strahler A H. 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 100(D10): 21077-21089 [DOI: 10.1029/95JD02371]
- Wen J G, Liu Q, Liu Q H, Xiao Q and Li X W. 2009. Scale effect and scale correction of land-surface albedo in rugged terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 30(20): 5397-5420 [DOI: 10.1080/01431160903130903]
- Wen J G, Liu Q, Xiao Q, Liu Q H, You D Q, Hao D L, Wu S B and Lin X W. 2018. Characterizing land surface anisotropic reflectance over rugged terrain: a review of concepts and recent developments. *Remote Sensing*, 10(3): 370 [DOI: 10.3390/rs10030370]
- Wen J G, Liu Q H, Li Z Y, Li X, Liu S M, Xiao Q, Gao Z H, Ma M G, Che T, Liu L Y, Fang H L, Yan G J, Ge Y, Chen E X, Zhang Y, Ma L L, Wu X D and Chen X. 2023. A review of the development of remote sensing field experiments and product validation in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 573-583 (闻建光, 柳钦火, 李增元, 李新, 刘绍民, 肖青, 高志海, 马明国, 车涛, 刘良云, 方红亮, 阎广建, 葛咏, 陈尔学, 张勇, 马灵玲, 吴小丹, 陈曦. 2023. 中国遥感实验与真实性检验的发展思考. *遥感学报*, 27(3): 573-583) [DOI: 10.11834/jrs.20232673]
- Wen J G, Liu Q H, Xiao Q, Liu Q and Li X W. 2008. Modeling the land surface reflectance for optical remote sensing data in rugged terrain. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(8): 1169-1178 [DOI: 10.1007/s11430-008-0085-5]
- Wen J G, Liu Q H, You D Q, Bian Z J, Wei K X, Zhao C C, Xiao Q, Du Y M, Yan G J, Fan W J and Wu Y R. 2025. Modeling of optical remote sensing mechanism: review and prospect. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1331-1346 (闻建光, 柳钦火, 游冬琴, 卞尊健, 魏珂昕, 赵聪聪, 肖青, 杜永明, 阎广建, 范闻捷, 吴一戎. 2025. 光学遥感机理建模: 回顾与展望. *遥感学报*, 29(6): 1331-1346) [DOI: 10.11834/jrs.20255007]
- Wen J G, Wu X D, Wang J P, Tang R Q, Ma D J, Zeng Q C, Gong B C and Xiao Q. 2022. Characterizing the effect of spatial heterogeneity and the deployment of sampled plots on the uncertainty of ground "truth" on a coarse grid scale: case study for Near-Infrared (NIR) surface reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11): e2022JD036779 [DOI: 10.1029/2022JD036779]
- Wu S B, Wen J G, Gastellu-Etchegorry J P, Liu Q H, You D Q, Xiao Q, Hao D L, Lin X W and Yin T G. 2019a. The definition of remotely sensed reflectance quantities suitable for rugged terrain. *Remote Sensing of Environment*, 225: 403-415 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.005]
- Wu S B, Wen J G, Lin X W, Hao D L, You D Q, Xiao Q, Liu Q H and Yin T G. 2019b. Modeling discrete forest anisotropic reflectance over a sloped surface with an extended GOMS and SAIL model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(2): 944-957 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2863605]
- Wu S B, Wen J G, Xiao Q, Liu Q H, Hao D L, Lin X W and You D Q. 2019c. Derivation of kernel functions for kernel-driven reflectance model over sloping terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(2): 396-409 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2854771]
- Yan G J, Jiang H L, Yan K, Cheng S Y, Song W J, Tong Y Y, Liu Y N, Qi J B, Mu X H, Zhang W M, Xie D H and Zhou H M. 2021. Re-

- view of optical multi-angle quantitative remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 83-108 (阎广建, 姜海兰, 闫凯, 程诗宇, 宋婉娟, 童依依, 刘雅楠, 漆建波, 穆西哈, 张吴明, 谢东辉, 周红敏. 2021. 多角度光学定量遥感. *遥感学报*, 25(1): 83-108) [DOI: 10.11834/jrs.20218355]
- Yan K, Li H L, Song W J, Tong Y Y, Hao D L, Zeng Y L, Mu X H, Yan G J, Fang Y, Myneni R B and Schaaf C. 2022. Extending a linear kernel-driven BRDF model to realistically simulate reflectance anisotropy over rugged terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4401816 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3064018]
- Yang P Q, van der Tol C, Yin T G and Verhoef W. 2020. The SPART model: a soil-plant-atmosphere radiative transfer model for satellite measurements in the solar spectrum. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111870 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111870]
- Yang Y, Zhou Z F, Huang D H, Zhang F X M, Deng F F and Du S L. 2024. A comparative analysis of the applicability of typical land cover datasets in the karst strongly heterogeneous terrain in southern China. *Geocarto International*, 39(1): 2395318 [DOI: 10.1080/10106049.2024.2395318]
- Yao C, Sun Z Q and Lu S. 2024. Evaluation of PROSPECT inversion approaches using multiangular spectral reflectance factor of leaves. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4402716 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3357774]
- Yin G F, Li A N, Zhao W, Jin H A, Bian J H and Wu S B. 2017. Modeling canopy reflectance over sloping terrain based on path length correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(8): 4597-4609 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2694483]
- Yu W T, Li J, Liu Q H, Yin G F, Zeng Y L, Lin S R and Zhao J. 2020. A simulation-based analysis of topographic effects on LAI inversion over sloped terrain. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 794-806 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2970999]
- Zhao C C, Wen J G, You D Q, Tang Y, Chen X and Liu Q. 2023. Remote sensing retrieval of high-spatial-resolution land surface albedo. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(3): 724-737 (赵聪聪, 闻建光, 游冬琴, 唐勇, 陈曦, 刘强. 2023. 高分辨率地表反照率遥感估算研究进展. *遥感学报*, 27(3): 724-737) [DOI: 10.11834/jrs.20231732]
- Zhao C C, Wen J G, You D Q, Tang Y, Han Y, Liu G K, Wei K X, Wang H J and Liu Q H. 2025. Modeling top-of-atmosphere anisotropic reflectance of discrete forests over sloped surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 4407711 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3557557]
- Zhu W Z, You D Q, Wen J G, Tang Y, Gong B C and Han Y. 2023. Evaluation of linear kernel-driven BRDF models over snow-free rugged terrain. *Remote Sensing*, 15(3): 786 [DOI: 10.3390/rs15030786]

Recent advances in bidirectional reflectance remote sensing model of vegetation canopy over rugged terrain

WEI Kexin^{1,2}, WEN Jianguang^{1,2}, YOU Dongqin¹, TANG Yong¹, ZHAO Congcong^{1,2},
LIU Qinhua^{1,2}, XIAO Qing^{1,2}

1. National Engineering Laboratory for Remote Sensing Satellite Applications and State Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Aerospace Information Research Institute, Beijing 100101, China;

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

Abstract: The Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) is an essential function that characterizes the bidirectional reflectance properties of vegetation canopies. Mountains account for approximately 24% of the Earth's land surface and 67% of China's land area. Complex terrain alters the geometric configuration among the sun, surface, and sensor, as well as the canopy structure and radiative transfer processes, thereby distorting the shape and magnitude of the BRDF and introducing significant uncertainties in land surface parameter retrievals. Therefore, quantifying the radiative transfer process in complex terrain from a mechanistic perspective and constructing a mountainous canopy BRDF model are crucial for accurately describing the bidirectional reflectance characteristics of mountainous surfaces. These tasks are fundamental for understanding the mechanisms by which topography influences reflectance features and serve as essential prerequisites for retrieving key land surface parameters in mountainous regions. Various models have been developed to simulate the BRDF of vegetation canopies over flat surfaces, establishing quantitative relationships between canopy parameters and reflectance. However, given the extensive distribution of mountainous areas in China, extending the mechanistic modeling of canopy bidirectional reflectance from flat and homogeneous surfaces to complex mountainous terrains is urgently required.

Modeling canopy BRDFs is central to comprehensively understanding the bidirectional reflectance characteristics of complex surfaces in mountainous areas. This paper first provides a brief introduction to the theoretical background of BRDF definitions over flat and complex terrains, followed by a review of the development in canopy BRDF models over flat surfaces. Subsequently, it focuses on two typical complex terrains—single- and composite-slope surfaces—to analyze the current development trends and characteristics of mechanistic

canopy BRDF models over complex terrain. Finally, we present a vision and concept for future canopy BRDF models over complex terrain.

In accordance with the spatial scale relationship between the Digital Elevation Model (DEM) and the resolution of remote sensing pixels, complex terrain modeling can be classified into single-slope modeling, where each pixel contains a unique slope and aspect, and composite-slope modeling, where each pixel encompasses multiple slopes and aspects. The former mainly optimizes the modeling process through three approaches: (1) correcting the geometry between the sun, terrain, and sensor; (2) correcting the geometry between the sun, canopy, and sensor; and (3) refining the radiative transfer process on sloped surfaces. Unlike single-slope modeling, composite-slope modeling targets larger-scale scenarios and requires consideration of subpixel topographic effects. Current composite-slope models can be categorized into three types on the basis of terrain representation methods: (1) specific-shape models; (2) models based on mean-slope approximation; (3) DEM-based BRDF models.

Perspectives on the future development of vegetation canopy bidirectional reflectance models over complex terrain are presented as follows: (1) mountain bidirectional reflectance modeling considering mixed land-cover types—how to extend current single land-cover BRDF modeling to account for within-scene heterogeneity and multiple scattering among different land-cover types, thereby constructing a multiscale, all-terrain, multitype physical model, which remains a significant challenge; (2) the urgent need to develop multiscale radiative transfer models coupling mountainous surfaces and the atmosphere; (3) advancing mountain 3D remote sensing observation techniques and validation methods for complex terrain BRDF models—because multiangular field observations in mountainous regions are difficult, ground-based multiangular datasets are generally lacking; and (4) promoting the operational application of complex terrain BRDF models. The progressive refinement of mountainous vegetation canopy bidirectional reflectance models has significantly enhanced their application potential, providing essential modeling support for simulating land surface parameters in mountainous regions across different scales. These advancements hold great significance for vegetation parameter retrieval, energy balance estimation, and climate change assessment in mountainous environments.

Key words: anisotropic reflectance, BRDF, complex terrain, single slope, composite slope

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFA0608703)