

山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展

江海英^{1,2}, 贾坤^{1,2}, 赵祥^{1,2}, 魏香琴³, 王冰^{1,2}, 姚云军^{1,2},
张晓通^{1,2}, 江波^{1,2}

1. 北京师范大学 地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
2. 北京师范大学 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 叶面积指数LAI (Leaf Area Index) 是表征叶片疏密程度和冠层结构特征的重要植被参数, 在气候变化、作物生长模型以及碳、水循环研究中发挥着重要作用。遥感是获取区域及全球尺度LAI的一个重要手段, 当前LAI产品主要基于遥感数据反演得到, 但是多数LAI产品算法并未考虑地形特征的影响, 导致山地LAI遥感反演精度不确定性大。提高山地LAI遥感反演精度亟需考虑地形因子对冠层反射率的影响, 其中山地冠层反射率模型和遥感数据地形校正是提升山地LAI遥感反演精度的关键。本文围绕山地LAI遥感反演理论与方法, 综合分析了国内外山地冠层反射率模型和地形校正模型的研究进展, 总结了目前山地LAI遥感反演存在的问题, 并讨论了未来研究的发展趋势。

关键词: 遥感, 光学遥感, 叶面积指数, 地形校正, 山地冠层反射率模型, DEM

引用格式: 江海英, 贾坤, 赵祥, 魏香琴, 王冰, 姚云军, 张晓通, 江波. 2020. 山地叶面积指数反演理论、方法与研究进展. 遥感学报, 24(12): 1433-1449

Jiang H Y, Jia K, Zhao X, Wei X Q, Wang B, Yao Y J, Zhang X T and Jiang B. 2020. Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas. Journal of Remote Sensing (Chinese), 24(12): 1433-1449 [DOI: 10.11834/jrs.20200229]

1 引言

叶面积指数一般定义为单位地表面上绿叶表面积总和的一半 (Chen 和 Black, 1992), 该定义适用于平坦地表。为了描述山地地形的LAI, LAI可以定义为“单位水平地表面上绿叶表面积总和的一半” (Gonsamo 和 Pellikka, 2008; Luisa 等, 2008; Yin 等, 2020a), 即坡面上的叶片面积投影到水平地面上 (图1), 该定义适用于各种叶片类型和平坦或倾斜表面 (Yan 等, 2019)。LAI是刻画地表植被状况的重要植被参数之一。LAI对植被与大气之间的能量、水分和二氧化碳交换有着重要影响, 是植被净初级生产力、水和养分利用以及碳平衡的主要影响因子 (Bréda, 2008)。因此, LAI是众多生态系统模型、水碳循环模型不可或缺或输入变量 (Wei 等, 2017)。另外, 植被生

长状况和植被空间分布能间接反映气候变化, 因此LAI在气候变化研究中也具有重要作用 (Chen 和 Cao, 2012)。

山地面积约占全球陆地面积的24%, 中国也是一个多山国家, 山地面积约占中国陆地面积的66.7%, 其中起伏度大于200 m的山地占55.2% (钟祥浩和刘淑珍, 2014)。山地是一个复杂的生态系统, 拥有丰富的自然资源, 具有维持生物多样性、调节区域气候和涵养水源等生态功能 (方精云 等, 2004; 李爱农 等, 2016b)。因此, 山地是当前国际全球变化研究的热点区域, 山地生态系统的结构、过程、功能和演替进程与全球变化有紧密的联系 (王根绪 等, 2011), 而山地生态系统又对植被多样性和分布格局最为敏感。山地植被覆盖面积广且植被类型多样, 地形起伏以及较

收稿日期: 2020-06-27; 预印本: 2020-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41671332); 国家重点研发计划(编号:2016YFB0501404, 2016YFA0600103)

第一作者简介: 江海英, 1992年生, 女, 博士研究生, 研究方向为植被定量遥感。E-mail: 201931051040@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 贾坤, 1983年生, 男, 副教授, 研究方向为植被定量遥感、土地覆盖遥感分类和生态遥感。E-mail: jiakun@bnu.edu.cn

高的海拔高度会造成不同坡向、不同海拔高度上的植被类型和空间分布的不同。因此,开展山地LAI地面测量与遥感反演研究对定量评价山地植被群落生命活力及其环境效应、山地系统碳水储量以及气候变化等具有十分重要的意义(靳华安等,2016)。遥感技术能够实现对地表的大尺度观测,能够多频次和持久地获取多种时空尺度的地表信息(童庆禧,2005),为估算区域尺度乃至全球范围的陆表植被LAI提供了强有力的手段。

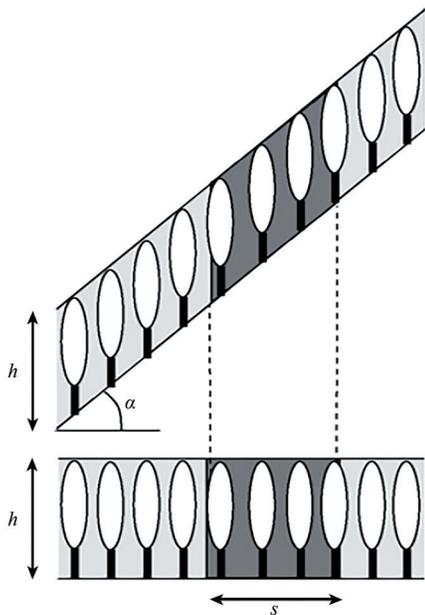


图1 倾斜地面上的LAI定义(Luisa等,2008)

Fig.1 The definition of LAI over sloping terrain (Luisa et al.,2008)

目前,利用遥感数据源生产的LAI产品主要包括AVHRR、MODIS、GEOVI、GLOBMAP、GLASS和CYCLOPES LAI等产品(Claverie等,2016;Huang等,2008;Verger等,2013;Liu等,2012;Xiao等,2016;Baret等,2006),相关研究表明这些产品在高海拔和高地形起伏度区域的时空完整性和精度要明显低于平坦地区(杨勇帅等,2016;景金城等,2019)。不考虑地形因素,MODIS LAI产品(C5版)总体验证精度均方根标准差(RMSE)为0.87,CYCLOPES LAI产品总体验证精度RMSE为1.16(Fang等,2019),GLASS LAI产品总体验证精度RMSE为0.51(Xiang等,2014)。Jin等(2017)基于高空间分辨率LAI验证了GLASS和MODIS LAI产品在中国西南山区的精度,RMSE分别为1.72和1.75,平均误差(mean

bias)分别为-71%和-67%。Fu和Wu(2017)研究表明MODIS LAI产品(C6版)严重高估了青藏高原北部草地LAI,MOD15A2H、MYD15A2H和MCD15A2H LAI相对地面实测LAI,分别呈现出17%、46%和55%的高估。Yu等(2020)基于DART模型模拟数据对比平地 and 坡地LAI反演精度,结果表明平地LAI反演的平均绝对误差(MAE)为0.15,而坡地LAI反演误差随着坡度角的增大而显著增大,坡度角为 60° 时,反演误差平均可达51%。

相对平坦地表,山地LAI反演精度主要受地形因素的影响,尤其是地形起伏(Jin等,2017)。山地地形起伏会造成遥感影像几何和光谱特征的变化(Olyphant,1986a),对遥感反演LAI产生干扰。地形通过局部光照几何变化改变了太阳直射辐射,减少了天空漫反射,增加了来自邻近斜坡的反射辐射(Wen等,2018)。在太阳天顶角较大的情况下,光照斜坡的散射部分(天空散射和邻近地形散射)约占40%,而被相邻坡面遮挡了太阳的限影斜坡,散射部分则约占100%。(Chen等,2006;Helbig等,2009;Wen等,2018)。如果忽略上述地形效应的影响,冠层反射率的相对误差最大将达到60%(Fan等,2014a),会显著降低山地LAI遥感估算的精度。学者对比了地形效应校正前后反演的山地LAI,发现地形效应校正能显著提高各植被指数与LAI的相关关系(夏学齐等,2004;廖钰冰等,2011)。山地由于受到地形影响,遥感尺度差异比平坦地面更为显著(李爱农等,2016a)有研究表明地形对LAI估算的影响大小取决于空间尺度,空间分辨率越高,地形对LAI反演的影响越显著(Jin等,2019)。因此,若要提高中高空间分辨率的山地LAI反演精度,需要考虑地形效应的影响。在山地LAI反演中,地形效应的校正可以分为两种:一是直接对遥感影像进行地形校正,用校正后的反射率数据反演LAI;二是直接使用已考虑地形影响的山地冠层反射率模型进行反演,或者将地形因子(如坡度和坡向等)作为变量加入到LAI统计回归模型。

本文针对山地LAI遥感反演研究进行探讨,首先阐述了山地LAI遥感反演的理论基础,介绍了山地辐射传输过程、山地冠层反射率模型和地形校正模型,进而讨论了山地LAI遥感反演方法,最后总结和分析了目前山地LAI遥感反演研究存在的主

要问题及未来的发展方向。

2 反演机理

传感器接收来自地表发射或反射的能量包含了植被冠层、植被下垫面和大气信息，经过大气纠正后的遥感地表反射率数据可以用于地表参数反演。植被对不同波段入射光的吸收和散射作用不同，其中植被 LAI 显著地影响植被冠层在红光和近红外波段的反射率，因此当前 LAI 遥感反演经常利用这两个波段（刘洋等，2013）。对于平坦地区，LAI 遥感反演一般是通过不同方式建立 LAI（以及叶片参数、冠层结构参数和土壤背景参数）与大气校正后的地表反射率或植被指数的关系来实现。但是崎岖地形的地表反射率受地形效应的影响较大，不校正地形效应反演的山地 LAI 精度会明显低于平坦地区，所以在山地 LAI 反演过程中需要考虑地形因素的影响。

2.1 山地辐射传输过程

崎岖地形是影响遥感监测植被冠层信息的重要因素，地形起伏会引起观测几何的改变，同时改变了地物接收到的辐射，主要产生以下影响：（1）由于本地光照几何变化，坡面目标像元自身接收到的太阳直射辐射发生改变；（2）邻近地形会对目标像元产生遮挡，减少来自太阳的直射辐射；（3）来自天空的散射辐射也会由于邻近地形遮挡而减小；（4）目标像元所接收的邻近地形反射辐射增加；（5）部分像元会被邻近地形完全遮挡，不能被传感器监测到（李静，2010）。山地辐射传输过程建模基于辐射传输理论和地形相关参数对上述 5 种辐射变化进行模拟与计算。在坡地上，根据太阳到地表的路径，总太阳辐射可分为 5 个分量（图 2）：（1）未被大气散射的太阳直接辐射；（2）天空散射辐射，也称大气散射；（3）邻近地形的直接反射辐射；（4）被邻近地形反射后的天空散射辐射；（5）地表多重反射与天空散射辐射耦合后的辐射（Chen 等，2006）。为了简化模型，将上述（3）—（5）部分归结为邻近地形的反射辐射，因此传感器接收到的总辐射 E_{sum} 可以归纳为以下 3 部分：太阳直射辐射 E_{sun} 、天空散射辐射 E_{sky} 和邻近地形的反射辐射 E_{terrain} ，下面将详细介绍 3 部分辐射的计算。

$$E_{\text{sum}} = E_{\text{sun}} + E_{\text{sky}} + E_{\text{terrain}} \quad (1)$$

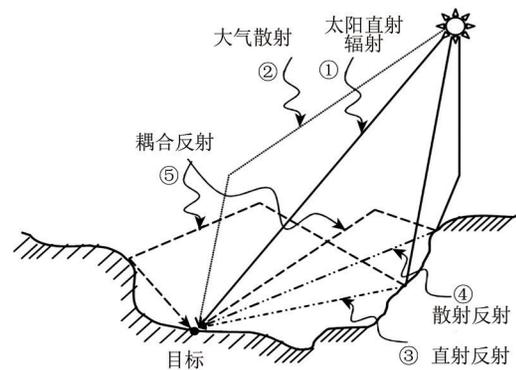


图 2 太阳总辐射分量(Chen 等, 2006)

Fig.2 Total solar radiation component (Chen et al., 2006)

图 3 是坡面光照几何图，其中 α 为坡面的倾斜角（坡度角）， β 为坡面的方位角， θ_s 和 φ_s 分别为太阳天顶角与太阳方位角， i 为局地太阳入射角，即太阳光线与坡面法线的夹角。

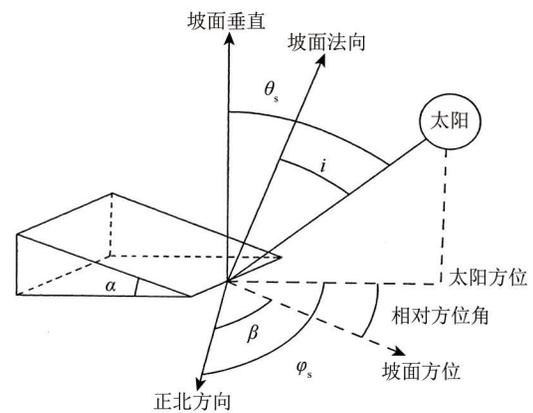


图 3 坡面光照几何图(李静, 2010)

Fig.3 Slope illumination geometry (Li, 2010)

（1）太阳直射辐射。地表接收的太阳直射辐射 E_{sun} 取决于大气层外的太阳辐射通量、大气光学厚度以及太阳天顶角和太阳入射角等（李静，2010）。若不考虑大气吸收作用，坡面接收到的太阳直射光辐照度 E_{sun} 可表示为（Olyphant，1986b）

$$E_{\text{sun}} = \Theta \cdot E_d^h \cdot \frac{\cos i}{\cos \theta_s} \quad (2)$$

式中， Θ 为地形阴影系数，是一个二值数， Θ 为 0 表示坡面为阴影区， Θ 为 1 表示坡面为光照区； E_d^h 为入射到与坡面同等高度的水平面上的太阳直射光辐照度， $\cos i$ 为局地入射角余弦值，其计算公式如下：

$$\cos i = \cos \theta_s \cos \alpha + \sin \theta_s \sin \alpha \cos (\varphi_s - \beta) \quad (3)$$

（2）天空散射辐射。天空散射辐射 E_{sky} 是大气

对太阳辐射的散射效应, E_{sky} 可以分为各向同性散射和各向异性散射两部分, 其中各向异性特质是由大气散射本身各向异性和邻近地形的遮挡造成的 (阎广建等, 2000)。

$$E_{\text{sky}} = E_r^h \cdot \left(k_a \cdot \frac{\cos i}{\cos \theta_s} + (1 - k_a) \cdot V_d \right) \quad (4)$$

式中, E_r^h 是水平面上的漫反射; k_a 为各向异性指数 ($k_a = E_d^h/E_d^i$, E_d^i 为大气顶层辐射), k_a 与大气透过率相关, 取值范围为 0—1; V_d 为天空可视因子, 等于从坡面像元上所观察到的天空区域与在无遮挡的水平面上所观察到的天空区域的比值 (丁一帆等, 2018)。 V_d 有不同的计算方法, 其中 Kondratyev (1969) 和 Bonan (2002) 假设大气漫散射为各向同性, 坡面倾斜角是估算从一个点上能看到的天空和地形区域的唯一参数, 并且总散射辐射与坡面所观察到的天空区域的比例成正比, V_d 计算如下:

$$V_d = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (5)$$

但在山地地形中, 邻近山地会减少可见天空区域, 即坡面观测到的天空区域可能会被邻近坡面所遮挡, 考虑到邻近坡面的遮挡影响, Dozier 和 Frew (1990) 提出了另一种 V_d 计算方法:

$$V_d \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\cos \alpha \sin^2 H_\phi + \sin \alpha \cos(\phi - \beta)(H_\phi - \sin H_\phi \cos H_\phi)) d\phi \quad (6)$$

式中, H_ϕ 表示方位角为 ϕ 时, 天顶方向与坡面的夹角。

但上述两种方法只适用于理想的无限长斜坡, 不符合实际情况, 精度难以满足要求, 于是又发展了另一种近似表示方法 (Temps 和 Coulson, 1977):

$$V_d = \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \left(1 + \sin^3 \frac{\alpha}{2} \right) (1 + \sin^3 \theta_s \cos^2 i) \quad (7)$$

(3) 邻近地形反射辐射。邻近地形反射辐射 E_{terrain} 取决于 4 个因素: 到达邻近坡面的总辐射、能看见的邻近地形范围、邻近地形的地表反射率以及目标像元与邻近坡面的距离 (Sandmeier 和 Itten, 1997)。

$$E_{\text{terrain}} = E^h \cdot V_i \cdot \rho_{\text{adj}} \quad (8)$$

式中, E^h 为水平面上的总辐照度, V_i 为地形可视

因子 (从坡面像元观察的邻近地形区域与在无遮挡的水平面上观察的邻近地形区域之比), ρ_{adj} 为邻近地表的平均反射率。与 V_d 相对应, Kondratyev (1969) 提出了 V_i 的概念, 把地形的反射辐射也假设为各向同性, 则 V_i 的计算如下:

$$V_i = \frac{1 - \cos \alpha}{2} \quad (9)$$

Dozier 和 Frew (1990) 认为地形可见因子 V_i 可近似为目标像元与可见的邻近地形像元之间的总面积:

$$V_i = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{H_\phi}^{\psi_\phi} \sin \theta_s (\cos \theta_s \cos \alpha + \sin \theta_s \sin \alpha \cos(\phi - \beta)) d\alpha d\phi \approx \frac{1 + \cos \alpha}{2} - V_d \quad (10)$$

式中, ψ_ϕ 是地平线与平行于坡面光线的夹角。

鉴于假设邻近地形辐射在较大区域上为各向同性不符合实际情况, 不能有效表达邻近地形的反射辐射, Proy 等 (1989) 假设邻近地形辐射在像元尺度上为各向同性, 逐点计算邻近像元的反射辐射, 坡面上像元 P 接收到邻近地形各点的反射辐射表达为

$$E_{\text{terrain}} = \sum_p \frac{L_p \cos T_M \cos T_p dS_p}{r_{MP}^2} \quad (11)$$

式中, E_{terrain} 理论上需要对所有可见像元的辐射进行求和; L_p 为像元 P 的辐亮度, T_M 和 T_p 分别为点 M 和点 P 坡面法线与 MP 连线的夹角, dS_p 为像元 P 的面积, r_{MP} 为点 M 和点 P 之间的距离。一般只计算周围有限个点的反射辐射, 但计算量还是比较大。

2.2 山地冠层反射率模型

冠层反射率模型是定量遥感研究的理论基础, 它描述了地表相关参数 (如 LAI、叶片生化参数和土壤参数等) 与给定太阳—地表—传感器几何关系下的遥感信号之间的物理关系 (李爱农等, 2016b)。山地冠层反射率模型是在平地冠层反射率模型的基础上, 考虑了地形因素对传感器接收到的辐射影响: 根据山地辐射传输过程, 可知山地冠层反射率模型需要考虑地形起伏带来的太阳直射辐射、天空散射辐射和邻近地形反射辐射的变化, 此外还需要考虑到坡地植被的向地性生长特性, 而不是将坡地视为平坦地面的简单倾斜。

目前，山地冠层反射率模型主要可分为几何光学模型（GO）、辐射传输模型（RT）和混合模型（表1）。

这些模型被用来模拟山地冠层的形态和光学性质以及反演山地地表参量。

表1 常见的山地冠层反射率模型

Table 1 Main mountain canopy reflectance model

类型	模型	几何纠正	植被向地生长	漫射辐射	非连续冠层	参考文献
GO模型	GOMST	√	×	×	√	Schaaf等(1994)
	GOST	√	√	×	√	Fan等(2014b)
RT模型	VVM	√	√	×	×	Combal等(2000)
	PLC	√	√	√	×	Yin等(2017)
混合模型	GOST2	√	√	×	√	Fan等(2015)
	GAFP	√	√	×	√	Geng等(2017)
	SLCT	√	×	√	√	Mousivand等(2015)
	GEOSAILT	√	√	×	√	Wu等(2019)

GO模型基于“景合成模型”，考虑了植被的宏观几何结构，能有效模拟单次散射的几何效应。GO模型假设树木是由椭球状冠层和圆柱状树干构成且树木是稀疏分布的。此外，模型还假设地表和冠层是朗伯表面，忽略了组分间的多次散射和较小的天空散射影响（Li和Strahler, 1986, 1992）。对于森林冠层，倾斜表面显著地改变了单个树木投射的阳光和阴影的模式，进而改变了与树冠层相关的双向反射率分布函数（BRDF）和半球形反射率（Schaaf等, 1994）。几何光学互遮蔽模型GOMS（Geometry Optical Mutual Shadow）考虑了入射和反射方向互相遮蔽或阴影重叠（Li和Strahler, 1992；柳钦火等, 2019）。Schaaf等（1994）基于GOMS模型发展了适用于山区地形的GOMST模型，使其适应倾斜的非朗伯表面，但该模型只是对地形起伏引起的光照几何进行了纠正，没有考虑树的向地生长特性以及来自天空和邻近地形的散射辐射改变。Fan等（2014b）在四尺度模型（4-SCALE）的基础上发展了几何光学斜坡模型GOST（Geometric-Optical model for Sloping Terrains），考虑了斜坡地形对场景四分量（光照冠层、光照背景、阴影冠层和阴影背景）面积比例的影响，可用于模拟场景分量和坡地森林冠层的BRDF。GOST模型考虑到了树的向地生长特性，能很好的模拟太阳直射辐射，但是忽略了斜坡上的散射辐射（Wu等, 2019）。GO模型适用于模拟不连续植被，但没有考虑地物的非朗伯特性，也忽略了地形起伏对邻近地形反射辐射和大气散射的影响。

RT模型基于辐射传输理论和平均冠层透射理论，考虑了冠层内部的多次散射作用，一般用于模拟连续植被的冠层反射率。Combal等（2000）基于浑浊介质模型发展了适用于倾斜坡面的向地生长植被冠层模型VVM（Vertical Vegetation Model），该模型考虑了植被的向地生长特性以及地形坡度对植被结构特性的影响，相应地修改了冠层的辐射特性，包括对热点效应的修改。但VVM模型假设冠层为浑浊介质，显然不适于模拟山地非连续植被，此外模型只考虑了太阳直射部分。Yin等（2017）基于路径长度修正PLC（Path Length Correction）发展了适用于倾斜地形的1维冠层反射率模型，考虑了坡度对太阳辐射多重散射和大气散射辐射的影响，但是忽略了坡度对邻近地形反射辐射的影响（Yin等, 2020b）。VVM模型和PLC模型都是1维冠层反射率模型，相比3维模型，具有输入参数少，反演易实现的优点，但该类模型没有考虑冠层结构和场景结构信息的影响，不适于模拟复杂的、不连续的植被冠层反射率。

混合模型结合了GO模型在单次散射及几何效应模拟的优势和RT模型在多次散射和漫反射辐射效应模拟的优势，对山地冠层反射率的模拟相对更准确。为了提高计算效率，Fan等（2015）基于GOST模型提出了一种混合冠层反射率模型GOST2，该模型采用“光线追踪+GO”方法来模拟斜坡上光照叶片和遮荫叶片的面积比，具有明确的物理机制。Geng等（2017）基于GOST2模型进一步发展了森林几何光学冠层GAFP（Geometric-optical Forest Plantation）模型，用超几

何模型描述树的分布,适用于模拟人工树林的方向反射率因子。Mousivand等(2015)将土壤—叶片—冠层辐射传递模型推广到倾斜坡面上,发展了SLCT (Soil-Leaf-Canopy for slope Terrain)模型,详细分析了BRDF效应、邻接效应和地形效应对辐射建模的影响,并对天空可视因子和邻近地形的非朗伯反射辐射进行了精确建模。SLCT模型对直射光和漫射光照辐射模拟效果好,但忽略了植被的向地生长特性,从而影响场景分量的面积比例估算,用于结构参数反演时仍存在较大不确定性。Wu等(2019)基于GOMS模型和SAIL模型提出了离散森林树冠层各向异性反射模型—GOSAILT模型,考虑了树的向地生长特性、树冠间隙、坡地几何、多次散射和天空漫反射对冠层反射率模拟的影响。但当天顶角较大时,GOSAILT模型存在反射率模拟值过高现象,特别是茂密植被。另外,GOSAILT模型忽略了邻近地形的散射辐射,并暗含树冠是球状的。以DART模型(Gastellu-Etchegorry等,2015)模拟反射率为参考,Wu等(2019)比较了4个山地冠层反射率模型在红光和近红外波段的情况,结果表明与GOST、SLCT和GOMST模型相比,GOSAILT模型在红光和近红外波段的反射率模拟具有较高的总体精度。

当遥感影像与DEM空间分辨率相当时,山地冠层反射率模型需要考虑单个坡面(即单坡面地形)的坡度和坡向,GOST、SLCT、VVM和PLC等模型都是单坡面反射率模型。当遥感影像空间分辨率相对DEM比较粗时(如MODIS 1 km与30 m DEM),则认为该地形为复合坡地。Hao等(2020)基于GOMST模型和核驱动RTLSR (Ross Thick LiSparse Reciprocal)模型发展了漫反射等效斜坡模型dESM (diffused Equivalent Slope Model),适用于粗尺度复合坡地地形,并提出了子地形影响因子,研究了不同光照条件下微坡地形对复合坡地反射率的影响,能精确地模拟复合坡地的天空漫反射效应。dESM模型所需的阴影因子、天空可视因子等地形参数可以在模型执行前进行计算,模型只需要进行少量的简单算术运算,计算效率高。但dESM模型忽略了来自邻近地形的多重散射效应,假设天空漫反射为各向同性以及复合坡地上的土地覆盖为均匀,这些限制了模型的精度和应用。

除了上述专门为山地发展的冠层反射率模型,

计算机模拟模型也可以直接模拟山地冠层反射率。计算机模拟模型能够模拟逼真的植被冠层3维结构和场景结构(宋金玲等,2009),进而模拟光子与树冠和环境之间的相互作用,地形要素是这类模型的输入参数,因此模型得到的是已经考虑了地形因素影响的输出。计算机模拟模型考虑了植被叶片、冠层以及茎秆等组分的尺寸大小、距离以及空间分布特征,模拟结果要比上述3类模型更真实、更详细,这些模型包括DART模型(Gastellu-Etchegorry等,1996,2015)、RAPID模型(Huang等,2013;Huang和Lian等,2015)和LESS模型(Qi等,2017)等。DART模型是目前最全面的物理3维模型之一,用于模拟从可见光到热红外波段的地球—大气辐射相互作用,但是该模型需要输入大量复杂参数,计算效率低。RAPID模型是为了快速计算复杂植被场景(均质或异质)下的多重散射和双向反射因子而开发的,它去除了一些非关键植被结构细节,保留起主要作用的关键特征。LESS模型的参数设置更为简单,与算法本身有关的参数更少。该模型针对不同模拟数据采用了不同的模拟策略,能够以较高的效率模拟具有真实结构的、复杂大场景的各种遥感信号。相比前面的3种山地冠层反射率模型,计算机模拟模型的缺点是输入参数复杂、模拟效率低。计算机模拟模型正向模拟数据精度高,目前更多是用于其他冠层反射率模型的验证,也有研究将其用来反演小面积区域的LAI。

因此,现有的山地冠层反射率模型都对地形起伏引起的光照几何进行了校正,但有的忽略了植被的向地性生长,或者忽略了来自邻近地形的反射辐射,或者假设冠层是均质的、地表是各向同性发射。也有山地冠层反射率模型考虑了上述的各方面,但往往又存在输入参数复杂的问题,难以实现模型反演,所以对于山地冠层反射率的模拟还需考虑到参数化难易度。计算机模拟模型可以很好地模拟山地冠层反射率,但是输入参数多、计算复杂,不适用于大区域面积上的LAI反演。

2.3 山地冠层反射率模型的反演

通过山地冠层反射率模型的反演,可以实现对地表参数的估算。由于山地冠层反射率模型比较复杂,直接用于反演LAI非常困难,一般采用间

接反演技术实现 (Fang 等, 2019; 刘洋 等, 2013), 包括常用的查找表 (LUT) 和人工神经网络 (ANN) 等方法。LUT 方法首先利用先验知识或实测数据等确定合理的模型输入参数 (包括叶片、冠层以及地形等相关参数) 的取值范围和间隔, 然后通过正向模型模拟波段反射率值以及相关植被指数等, 构建维度和大小合适的查找表。最后, 对于一组给定的观测几何、反射率或植被指数以及 DEM 数据, 利用插值方法从查找表中检索对应的 LAI。ANN 反演方法首先基于山地冠层反射率模型建立大小合适的模拟数据集。然后, 模拟数据作为训练样本用于训练神经网络模型。神经网络模型一般包括输入层、隐藏层和输出层 3 层 (图 4), 输入层通常输入红光和近红外波段反射率、植被指数、DEM 以及观测几何等, 隐藏层将输入层数据进行计算与转换, 输出层为 LAI。最后, 利用训练好的神经网络模型实现 LAI 反演。

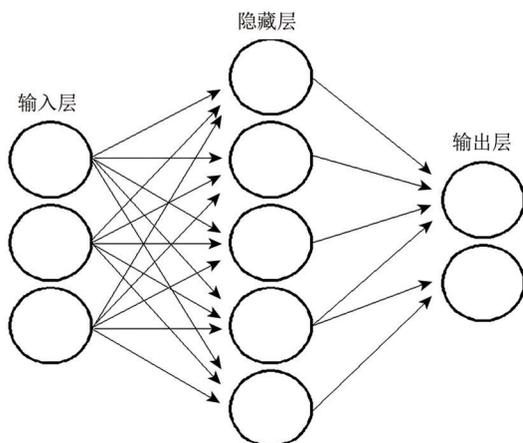


图 4 神经网络结构示意图

Fig.4 Artificial neural network structure

3 山地叶面积指数遥感反演

根据遥感数据是否进行地形校正处理, 山地 LAI 反演可以分为两种情况: 一种需对影像进行地形校正, 用校正后影像进行山地 LAI 反演; 另一种是影像不做地形校正处理, 在正向的山地冠层反射率模型中考虑地形因素的影响, 或者是地形因子作为控制变量加入到 LAI 反演模型中。由于影像地形校正要比山地冠层反射率模拟更易实现, 所以第一种方法应用相对更广泛。基于山地冠层反射率模型反演 LAI 已在 2.3 节论述, 因此, 下文将从地形校正和山地叶面积指数反演方法两个方面

进行总结与分析。

3.1 地形校正

影像的地形校正效果是影响山地 LAI 反演精度的关键因素, 目前已经发展了多种地形校正方法, 常用的包括基于波段比方法和基于 DEM 地形校正方法。基于波段比的地形校正方法通过两个波段的反射率比值来减弱地形阴影的影响, 校正效果有限, 当地表覆被具有相似的光谱反射特性时, 地表反射率的差异变得模糊不清 (张洪亮 等, 2001; 高永年和张万昌, 2008)。基于 DEM 的地形校正方法则通过 DEM 数据计算坡面几何及相关地形参数来纠正地形效应, 具体可以分为 3 类: 经验方法、朗伯体反射方法和非朗伯体反射方法 (表 2)。

经验方法基于太阳入射角与传感器所接收的辐射之间的经验关系来校正地形效应, 经验关系的建立同时还需要加入坡面像元对应的平坦地区的像元反射率, 一般用同类地物的平均反射率代替。经验方法具有参数少、简单易实现的优点, 但是缺乏理论基础和普遍性。Teillet 等 (1982) 提出的经验统计校正模型, 通过传感器接收到的辐射亮度与局地入射角余弦值 ($\cos i$) 之间的线性关系来校正地形效应, 但该方法只校正了太阳直射辐射部分的影响, 校正精度有限。Gao 和 Zhang (2009) 针对 Landsat ETM+ 影像提出了变量经验系数算法 VECA (Variable Empirical Coefficient Algorithm) 方法, 利用一个可变的调节系数代替一般的常数系数来校正地形效应, 该方法不存在过校正现象, 实现更加容易, 可操作性更强, 但是移植性差。朗伯反射校正方法假设地表为朗伯反射, 只考虑地形对太阳直射辐射的影响, 忽略天空漫反射和周围地形辐射的变化 (Singh 和 Talwar, 2013)。这类方法一般会存在过度校正现象。Cosine 模型仅试图纠正倾斜坡面造成的光照几何差异, 由于没有考虑来自大气和邻近地形的反射辐照度, 在太阳入射角较大时会造成过校正现象 (Teillet 等, 1982)。Teillet 等 (1982) 提出的 C 模型、Civco (1989) 提出的 Cosine-C 模型和 Richter 等 (2009) 提出的 Gamma 模型都是 Cosine 模型的改进版本, 用于改进过校正问题。考虑了树木生长的向地性, Gu 和 Gillespie (1998) 基于太阳—冠层—传感器三者几何关系提出 SCS 模型,

适合森林地区的辐射校正。但SCS模型和Cossine模型一样,在太阳入射角接近90°时会存在过度校正现象。Soenen等(2005)在SCS模型的基础上引入经验参数 C 来调节天空漫反射效应(类似于Cossine模型引入参数 C),即SCS+C模型,该模型对森林地形的校正很有效(Soenen等2010; Yin等,2018)。非朗伯反射方法则考虑到了地表反射的非朗伯体特性,更接近真实情况,计算会相对复杂一些。Minnaert模型引入常数 k 来描述自然地表的非朗伯特性(Smith等,1980),需要计算不

同波段、不同地表覆盖类型以及不同相位下的 k 值。因此,该模型不适用于复杂的大区域。此外,Minnaert模型在太阳入射角接近90°时也存在过校正问题。Reeder(2002)考虑到 C 校正模型系数 C 和Minnaert模型常数 k 的高度相关性,发展了Minnaert+SCS模型。Nichol等(2006)发展的坡度匹配方法,将反射率归一化为北向像元的平均光照水平,而不是整幅影像的整体平均光照值,可以调整南北向坡度之间的亮度,提供真实的光谱反射率定量反演,特别是在阴影区域。

表2 基于DEM的地形校正方法计算公式

Table 2 Calculation formula of topographic correction methods based on DEM

类型	序号	校正方法	计算公式	参考文献
经验方法	1	经验统计	$\rho_h = \rho - b \cdot \cos i - a + \rho_{avg}$	Teillet(1982)
	2	VECA	$\rho_h = \rho \frac{\rho_{avg}}{m \cdot \cos i + b}$	Gao和Zhang(2009)
朗伯反射方法	3	Cosine	$\rho_h = \rho \frac{\cos \theta_s}{\cos i}$	Teillet(1982)
	4	C	$\rho_h = \rho \frac{\cos \theta_s + C}{\cos i + C}$	Teillet(1982)
	5	Cosine-C	$\rho_h = \rho + \rho \frac{\cos_m(i) - \cos i}{\cos_m(i)}$	Teillet(1982)
	6	Cosine-b	$\rho_h = (\rho - b) \frac{\cos \theta}{\cos i}$	Chen等(2006)
	7	Gamma	$\rho_h = \rho \frac{\cos \theta + \cos \gamma}{\cos i + \cos \delta}$	Richter等(2009)
	8	SCS	$\rho_h = \rho \frac{\cos \theta_s \cdot \cos \alpha}{\cos i}$	Gu和Gillespie(1998)
	9	SCS+C	$\rho_h = \rho \frac{\cos \theta_s \cdot \cos \alpha + C}{\cos i + C}$	Soenen等(2005)
	10	C-HuangWei	$\rho_h = (\rho - \rho_{min}) \cdot \frac{\cos \theta_s - \cos i_{min}}{\cos i - \cos i_{min}} + \rho_{min}$	黄微等(2005)
非朗伯反射方法	11	Minnaert	$\rho_h = \rho \frac{\cos \alpha}{(\cos i \cdot \cos \alpha)^k}$	Smith等(1980)
	12	Minnaert + SCS	$\rho_h = \rho \frac{(\cos \theta_s)^{k'} \cos \alpha}{(\cos i)^{k'}}$	Reeder(2002)
	13	坡度匹配	$\rho_h = \rho + (\rho_{max} - \rho_{min}) \cdot \rho \frac{\cos i_s - \cos i}{\cos i_s} \cdot C_s$	Nichol等(2006)

表2中, ρ_h 是地形校正后的反射率, ρ 是地形校正前的反射率, ρ_{avg} 是校正前的平均反射率。 θ_s 和 φ_s 分别是太阳天顶角和太阳方位角, i 为局地太阳入射角。 $\cos_m(i)$ 是局地入射角余弦值的平均值, $\cos i_s$ 是南面局地入射角余弦值的平均值, $\cos i_{min}$ 是最小局地入射角的余弦值。 γ 和 δ 分别是传感器相

对于水平面和坡面的观测角, α 为坡度角。 ρ_{min} 和 ρ_{max} 是原始影像中的最小和最大地表反射率。 a 、 b 、 C 和 C_s 是经验系数, k 和 k' 分别是Minnaert和Minnaert+SCS模型的Minnaert常数。

一般情况下,系数 C 可以通过地表反射率与太阳入射角余弦值($\cos i$)的统计回归关系得到。

地表反射率与入射角的关系可表示为

$$\rho = m \cdot \cos i + b \quad (12)$$

式中， m 和 b 是线性回归分析的模型参数。然后 C 通过 m 和 b 计算得到（ $C = m/b$ ）（Teillet等，1982）。

Minnaert常数 k 表示土地覆盖类型对地形效应的敏感度（Gu和Gillespie，1998），可以通过线性化模型方程得到：

$$\ln \rho_h + k \cdot \ln(\cos i \cdot \cos \alpha) = \ln(\rho \cos \alpha) \quad (13)$$

可以用 x 、 y 和 m 分别表示 $\ln(\cos i \cdot \cos \alpha)$ 、 $\ln(\rho \cos \alpha)$ 和 $\ln \rho_h$ ，因此上式变为

$$y = kx + m \quad (14)$$

除了上述3类地形校正方法，还有研究考虑到地形对大气校正有很大的影响，将大气校正和地形校正耦合在一起。ATCOR4校正模型（Richter和Schläpfer，2002）建立在大气校正模型的基础上，可以同时实现对大气和地形效应的校正。该模型假设地表为朗伯反射，经验参数依赖于地表类型和太阳—地表—传感器之间的几何关系，适用于视场角较小的机载影像，不具有普遍性和推广性（段四波和阎广建，2007）。Shepherd和Dymond（2003）将DEM模型加入到6S大气校正模型中，来计算太阳直射辐射和天空散射辐射，采用简单的入射角和出射角函数计算斜坡上的像元反射率，该方法也是基于地表朗伯性假设，不适用于复杂非均质地表。Zhang等（2018）提出大气校正和地形校正耦合算法（Coupled Atmospheric and Topographic Correction Algorithm），将暗物质大气校正方法和地形校正物理模型耦合在一起，在没有经验回归的情况下，该算法在大气校正和地形校正方面都有较好的表现，但该方法基于地表朗伯反射和大气散射各向同性假设，不适于复杂地形的地形校正。上述地形校正和大气校正结合的方法都是基于地表朗伯假设，而实际地表反射率表现为各向异性。Li等（2012）考虑到地表反射率的方向性，基于非朗伯表面发展了地形校正和大气校正以及BRDF校正相结合的物理模型。基于数字表面模型或DEM计算坡度和坡向，基于影像元数据以及地理坐标等计算像元的观测—太阳几何角度，通过MODTRAN5或6S模型计算大气相关参数，将这些参数和BRDF函数耦合在一起，进而同时实现影像的地形、大气和BRDF校正。BRDF

描述了地物的反射特性随观测几何变化而变化的特性，也有研究将地形效应和BRDF效应结合在一起考虑。Wu等（2018）在RTLSR模型框架的基础上，提出了一种新的基于核驱动的坡地反射率模型（KDST），考虑了坡度、坡向和树冠向地性、组分光谱比例。引入BRDF模型需要多角度的太阳入射和传感器观测数据，如利用POLDER、MODIS、MISR和ATSR数据，才能提供足够的角度信息来计算BRDF模型。但是从一个太阳入射角和一个传感器观测角的卫星场景中很难获得精确的BRDF模型（Wen等，2009），因此地形校正与BRDF校正结合适用于多角度数据。

有很多研究者对不同的地形校正方法进行了评估。Gao和Zhang（2009）基于Landsat 7 ETM+影像评估了11种地形校正方法在陕西秦岭南部山区的校正效果，结果表明VECA、Cosine-b和C模型表现最好。Richter等（2009）比较了C、Gamma和改良Minnaert模型在不同影像数据（Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+和SPOT 5）、不同地域、不同季节下的校正效果。在大多数情况下，改良Minnaert方法（Richter，1998）表现最好，但有时C方法在蓝到红光谱区域有更好的结果。Hantson和Chuvieco（2011）基于不同光照条件下的15景Landsat ETM+影像验证了8种地形校正方法的效果。结果表明，在按地表覆盖类型分别估算对应地形校正模型参数的情况下，C校正和经验统计方法能取得更好的校正效果；其中，经验—统计方法的算法稳定性最好，在大多数情况下都取得了令人满意的效果。Singh等（2011）基于AWiFS卫星数据，分析了7种地形校正方法在喜马拉雅山积雪区域的校正效果，结果表明坡度匹配方法的校正效果最好，能很好地校正光照角度变化带来的影响。Ghasemi等（2013）基于ALOS AVNIR-2数据评估了7种地形校正方法在森林地区的校正情况，结果表明简单的校正方法（Cosine、SCS和Minnaert模型）对异常粗糙森林的校正效果很差，而基于像元尺度的Minnaert模型（Ge等，2008）是表现最好的。Gao等（2014）基于资源3号卫星数据比较了5种地形校正方法对生物量反演的影响，结果表明基于非朗伯假设（Minnaert和Minnaert+SCS模型）的地形校正效果要比基于朗伯假设（Cosine、C-HuangWei和SCS+C模型）的更佳，其中Minnaert+SCS模型校正效果最好，校正

后反演得到生物量精度最高。Park 和 Jung (2015) 比较了 3 个地形校正模型 (经验统计、C 和 Minnaert 模型) 对 Landsat 8 OLI 波段 2—6 的校正效果, 结果表明 Minnaert 模型对可见光和短波红外波段反射率的校正效果最好, 而近红外波段最适用的是经验统计模型。林起楠等 (2017) 比较了 SCEDLL、C 和 SCS+C 模型在平坦地形和陡峭地形的校正效果, 结果表明 SCEDLL 模型对陡峭地形的校正效果优于常规地形校正模型。Park 等 (2017) 评估了 8 种常用的地形校正模型对 Landsat 8 对应 3 种地表类型下的反射率校正效果, 研究结果表明地表类型为森林时, Cosine、SCS 和 C-HuangWei 3 个模型存在严重的过度校正, 可见光波段的最佳校正模型为经验统计模型或 SCS+C 模型, 近红外和短波红外波段的最佳校正模型为 Minnaert+SCS 模型。Gupta 和 Shukla (2020) 基于两种 DEM 数据 (SRTM 和 TanDEM-X) 和 Landsat 8 数据评估了 5 种地形校正模型的校正效果, 统计分析表明 VECA 和 C 校正方法对于两种 DEM 都具有较好的地形校正效果。

从以上不同研究的地形校正方法评估结果来看, 现有地形校正方法在一定程度上都能减弱地形效应, 但在不同传感器、不同波段、不同地表类型以及不同区域的校正效果不一样, 各个方法各有其优缺点, 不存在一种适用于任何影像和任何区域的最优方法。这些方法的校正效果在很大程度上取决于地表覆盖类型和光谱波段, 因此根据地表类型和波段选择最佳校正方法是非常重要的。包含经验系数的校正方法, 如 VECA、C、经验统计、SCS+C、Minnaert 和 Minnaert+SCS, 需要为不同的场景确定不同的经验参数, 这在一定程度上限制了这类地形校正算法的广泛应用 (Gao 和 Zhang, 2009)。现有的大多数地形校正方法都是基于 DEM 数据, 但是高空间分辨率的 DEM 数据往往难以获取, 并且遥感影像和山区 DEM 数据之间也很难做到精确配准 (江洪等, 2015), 从而导致无法对高空间分辨率影像进行相关地形校正。

3.2 反演方法

根据 LAI 与冠层反射率建立的关系, 山地 LAI 反演方法主要可以分为两类: 经验关系方法和物理模型方法。

3.2.1 经验关系方法

根据影像是否做地形校正, 经验关系方法可以细分为两种: 一种是先对影像进行地形校正, 然后基于校正后的影像计算相关植被指数 (VI), 再建立实测 LAI 与 VI 的统计回归关系; 另一种是建立实测 LAI 与 VI、地形因子之间的统计回归关系, 常被考虑的地形因子包括高程、坡度和坡向等。其中, 常用的 VI 包括归一化植被指数 NDVI (Kamal 等, 2016)、增强型植被指数 EVI (Houborg 等, 2007) 和土壤调节植被指数 SAVI (Biudes 等, 2014) 等 (Fang 等, 2019)。基于地形校正后的数据来反演 LAI, 此时山地 LAI 的反演效果依赖于影像地形校正的精度。夏学齐等 (2004) 忽略邻近地形辐射、考虑大气辐射, 基于辐射传输对 Landsat 7 ETM+影像进行地形校正, 进而利用经验方法反演 LAI, 结果表明不同林种的 LAI 反演精度差异较大。Heiskanen (2006) 先用 C 校正方法对 ASTER 7 个波段数据进行地形校正, 然后用校正后的影像数据分析波段间的相关性并计算了 12 种不同 VI, 再建立不同波段、不同 VI 与实测 LAI 的统计关系, 进而估算山区白桦林 LAI。有研究同时反演了影像地形校正前和校正后的山地 LAI, 对比其精度变化。廖钰冰等 (2011) 对比了 Landsat 5 TM 影像地形校正前后反演秦岭山地 LAI 的效果, 其中地形校正方法选择的是改进后的 CIVCO 模型 (Civco, 1989), 结果表明, 地形校正能显著提高各植被指数与 LAI 的相关关系。也有研究不对数据做地形校正处理, 假设地形会影响植被的结构和功能, 将地形因子作为独立变量加入到 LAI 反演的回归模型中。靳华安等 (2016) 以中国西南地区为研究区域, 用多源遥感数据 (SPOT4 HRVIR、HJ CCD 和 Landsat 8 OLI 数据) 进行了山地 LAI 反演, 研究将地形因子 (高程、坡度和坡向等) 加入到 LAI 遥感估算模型中, 基于最小二乘原理构建不同植被类型的 LAI 估算模型。该研究的验证结果表明, 考虑了地形因子的森林 LAI 遥感反演精度要高于未考虑地形因子的 LAI 反演精度。对于高空间分辨率影像, 由于难以获取高精度的山地 DEM 数据, 地形校正变得更为困难, 有研究者利用可以减弱地形效应的相关指数来反演山地 LAI。江洪等 (2015) 在用 RapidEye 遥感影像 (空间分辨率为 5 m) 反演山区毛竹林 LAI 时, 采用地形调节植被

指数 (TAVI) 来减弱地形效应对 LAI 反演精度的影响, 验证结果表明 TAVI 与实测 LAI 线性回归的 R^2 ($R^2=0.61$) 明显高于 NDVI、RVI 与 LAI 的 R^2 (R^2 分别为 0.32 和 0.41)。

$$TAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} + f(\Delta) \frac{M_{RED} - R_{RED}}{R_{RED}} \quad (15)$$

式中, R_{RED} 和 R_{NIR} 分别为红光和近红外波段反射率, M_{RED} 为研究区红光波段数据的最大值, $f(\Delta)$ 表示地形调节因子, 不同地表类型对应不同的 $f(\Delta)$ 。

基于经验方法反演山地 LAI, 优点是计算简单高效, 在小区域内能获得较高的精度, 但是难以推广到大区域上。

3.2.2 物理模型方法

物理模型方法基于山地冠层辐射传输过程, 建立叶片生化参数、冠层结构参数以及土壤参数等与地表反射率之间的正向模型, 利用遥感数据和地表已知信息对物理模型进行反演以得到 LAI。模型反演方法包括最优化方法、LUT 方法、机器学习算法等。物理模型方法可以分为两种, 一种是不需要对遥感影像做地形校正, 直接基于山地冠层反射率模型反演; 另一种是先对遥感影像做地形校正处理, 然后在基于平地冠层反射率模型 (比如 PROSAIL、ACRM 和 5-SCALE 模型等) 反演。Johnson 等 (2000) 基于 GOMS 模型提出了一种可适用于山地地形的“多重前向模式”(MFM) 反射率模拟方法, 在亚像元尺度上考虑地形影响。基于 MFM 模型模拟数据, 利用 LUT 方法反演得到山地 LAI。UofT LAI 产品算法 (Deng 等, 2006) 没有考虑地形效应, 在山地地区的表现很差, 因此 Gonsamo 和 Chen (2014) 提出了 UofTv2 LAI 算法, 在 UofT LAI 算法的 BRDF 效应计算上加入了地形信息, 即所谓的坡面 BRDF, 然后基于改进后的 UofTv2 LAI 算法估算森林地区 LAI。Pasolli 等 (2015) 在山地草原 LAI 估算时, 用 DEM 数据对 MODIS 数据 (分辨率 250 m) 进行地形纠正 (只校正了几何效应), 然后利用平地冠层反射模型 (PROSAIL 模型) 建立模拟数据 LUT 以反演 LAI, 并对比地形校正前后反演的 LAI, 发现未进行地形校正情况下反演的 LAI 值低于校正后反演的。Jin 等 (2019) 利用 MODIS 和 Landsat 8 数据, 借助多尺度集合卡尔曼滤波 (EnMsF) 算法, 基于 ACRM

模型反演了复杂地形上 6 个尺度上的 (空间分辨率分别为 960 m、480 m、240 m、120 m、60 m 和 30 m) 的 LAI。对比了 5 种校正模型 (SCS+C、Cosine、Minnaert、SCS 和 Teillet 经验统计) 对 Landsat 8 影像的校正效果, 结果表明使用 SCS+C 模型后反演的 LAI 精度最高, 但是在坡度很陡时, LAI 估算精度还是较差。在不同地形复杂度下比较地形校正前后反演的 LAI 和 MODIS LAI 产品三者之间的差异, 结果表明地形校正能够明显提高崎岖地区的 LAI 反演精度, 平地校正前后的 LAI 差异很小。

目前山地 LAI 反演研究更多是利用地形校正后的影像进行 LAI 反演, 因此地形效应的校正成了山地 LAI 反演的关键问题。但是现有的地形校正模型受到地域、波段和地物类型的限制, 而不具有通用性, 这就造成现有的基于地形校正后影像反演山地 LAI 没有可移植性, 不能直接推广到大区域。直接对山地冠层反射率模型的反演具有更强的普适性, 更适用于在大空间尺度 (乃至全球) 上估算 LAI, 但该方法中模型参数化依赖于地表类型、传感器类型和波段等, 存在参数化方案复杂和反演计算效率相对较低的问题。

4 结 语

4.1 存在问题

目前, 山地 LAI 反演研究还存在很多问题需要解决。首先, 针对基于影像地形校正的山地 LAI 反演的方法, 反演精度取决于地形校正模型的效果。但地形校正方法存在以下问题: (1) 虽然目前针对地形效应已发展了诸多地形校正模型, 但模型通用性较差, 单一的地形校正模型可能只适用于某种地形条件、某个区域、某个传感器或某个波段; (2) 地形效应对大气校正有较大影响 (Proy 等, 1989; Sandmeier 和 Itten, 1997), 因此也有研究将地形校正和大气校正结合在一起, 但一般假设地表为朗伯反射, 在卫星视场角较大情况下地形校正达不到理想效果, 考虑到地表的非朗伯特性, 将地形校正和 BRDF 模型结合, 则需要多角度遥感数据, 不易于推广使用; (3) 由于难以获取高精度的高空间分辨率山区 DEM 数据, 导致基于 DEM 的地形校正方法在高空间分辨率影像上表现有待进一步提高; (4) 现有的地形校正方法评估

研究大多是基于小区域、某种或几种地表覆盖类型开展的,结论不具有推广性。

其次,针对基于山地冠层反射率模型的山地 LAI 反演方法,反演效果则取决于山地冠层反射率模型的模拟精度。该反演方法存在的主要问题表现为:(1)已有大多山地冠层反射率模型将山地假设为单一的倾斜面,只是考虑了倾斜地形带来的光照几何变化,没有考虑或简化了地形起伏对大气散射和邻近地形散射的改变,导致模型模拟和反演精度不高;(2)考虑了光照几何、大气散射和邻近地形辐射变化的山地冠层反射率模型一般只适用于连续均匀分布的植被冠层,对于异质性较大的地表不适用;(3)光学—几何混合山地冠层反射率模型的模拟精度虽然相对更高,但由于不同冠层结构、场景结构的描述和模拟需要输入一系列参数,又存在输入参数较多,获取困难的问题。

再次,针对直接将地形因子作为控制变量加入到 LAI 的统计回归关系式的反演方法,由于引入了更多的独立变量,建立的函数关系变复杂,可能会造成过拟合现象,不具有稳健性和可移植性。

最后,山地 LAI 验证也面临较多挑战:(1)目前大多数 LAI 产品验证并未考虑地形影响,如 BELMANIP 观测网提供的实测数据多是基于平坦地区测量的;(2)由于地面验证数据的缺乏,山区 LAI 产品验证相关研究主要集中于时空完整性和连续性分析,较少分析 LAI 精度;(3)在山区开展 LAI 地面观测实验存在人力、物力方面的约束,观测数据获取存在困难,而且观测数据如何转化成相对真值也存在问题;(4)山地地表异质性强,站点实测数据转换到像元尺度会存在较大的不确定性,进而影响 LAI 反演精度评估的准确性。

4.2 研究展望

围绕地形校正和山地冠层反射率模型,山地 LAI 反演在以下 3 个方向可以做进一步研究:

首先,在地形校正方面:(1)考虑到太阳—地表—传感器的几何位置不仅影响地形校正,也会影响地表方向反射率,未来的地形校正模型可以考虑在地形校正与 BRDF 模型相结合方向上做进一步研究,结合多源多角度遥感数据以及 BRDF 模型经验参数来校正地形效应;(2)对于高空间分辨率影像的地形校正,可以考虑通过提高 DEM 的

质量和空间分辨率来实现;(3)对于复杂山地,需要考虑地形效应取决于多种因素,包括大气条件、地形起伏度和土地覆盖类型等,可以进一步研究将这些因素综合集成,考虑地表的非朗伯特性,开发一种综合大气校正和地形校正的物理模型算法,实现复杂山区的地形校正;(4)对于已有地形校正方法的评估研究,需要在大区域范围(甚至全球范围)对不同传感器、不同波段和不同光照条件下的地形效应校正效果进行深入研究,并区分不同地表覆盖类型,研究某种遥感数据在何种情况下哪种地形校正方法表现最佳。

其次,山地冠层反射率模型可以考虑在模型准确性和模型参数化方案上做进一步深入研究。未来的山地冠层反射率模型应该在同时考虑地表非朗伯特性、树的向地性生长以及大气和邻近地形的散射辐射的前提下,准确刻画植被冠层结构以及山地的 3 维结构特征,针对不同地表覆盖类型建立不同的参数化方案,提高模型模拟精度。此外,还可以考虑进一步研究基于计算机模拟模型的山地 LAI 反演方法,但需要对现有的计算机模拟模型进行参数优化以提高计算效率。

再次,准确、高效地反演山地 LAI,还需要综合考虑研究区域的大小、地表异质性以及地形起伏程度等因素,选择合适的地形校正方法或山地冠层反射率模型。对于大尺度、复杂山区,则需要根据地表覆盖类型、地形起伏等级等因素划分子区域,不同类型的子区域选用不同的地形校正方法或山地冠层反射率模型。

最后,在山地 LAI 反演精度验证方面需要开展更深入的研究。一方面,在山地地面观测实验上,考虑地形起伏、地表覆盖类型以及空间异质性等因素,设计合理的采样方案,以获取更多有效验证数据来验证山区 LAI 产品的精度。另一方面,可以考虑对山地 LAI 验证方法进行改进,减小尺度效应的影响。

参考文献(References)

- Baret F, Bacour C, Béal D, Weiss M, Berthelot B and Regner P. 2006. Algorithm theoretical basis document for MERIS top of canopy land products (TOC_VEG), Contract 1-25
- Biudes M S, Machado N G, De Moraes Danelichen V H, Souza M C, Voullitis G L and De Souza Nogueira J. 2014. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional

- forest and seasonal flooded forest in Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 58(6): 1181-1193 [DOI: 10.1007/s00484-013-0713-4]
- Bonan G. 2002. *Ecological Climatology: concept and Applications*. New York: Cambridge University Press.
- Bréda N J J. 2008. Leaf area index//Jørgensen S E and Fath B D, eds. *Encyclopedia of Ecology*. Amsterdam: Elsevier: 2148-2154 [DOI: 10.1016/b978-008045405-4.00849-1]
- Chen J M and Black T A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15(4): 421-429 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1992.tb00992.x]
- Chen W and Cao C X. 2012. Topographic correction-based retrieval of leaf area index in mountain areas. *Journal of Mountain Science*, 9(2): 166-174 [DOI: 10.1007/s11629-012-2248-2]
- Chen Y, Hall A and Liou K N. 2006. Application of three-dimensional solar radiative transfer to mountains. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 111(D21): D21111 [DOI: 10.1029/2006JD007163]
- Civco D L. 1989. Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9): 1303-1309
- Claverie M, Matthews J L, Vermote E F and Justice C O. 2016. A 30+ year AVHRR LAI and FAPAR climate data record: Algorithm description and validation. *Remote Sensing*, 8(3), 263 [DOI: 10.3390/rs8030263]
- 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]
- Deng F, Chen J M, Plummer S, Chen M Z and Pisek J. 2006. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8): 2219-2229 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.872100]
- Ding Y F, You H G, Zhang H, Chen S J, Xu B and Sun T. 2018. Topographic correction method for high-resolution remote sensing images. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 44(1): 27-35 (丁一帆, 尤红建, 张浩, 陈双军, 许斌, 孙韬. 2018. 面向高分辨率遥感影像的地形辐射校正方法. *北京航空航天大学学报*, 44(1): 27-35) [DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0979]
- Dozier J and Frew J. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5): 963-969 [DOI: 10.1109/36.58986]
- Duan S B and Yan G J. 2007. A review of models for topographic correction of remotely sensed images in mountainous area. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 43(3): 362-366 (段四波, 阎广建. 2007. 山区遥感图像地形校正模型研究综述. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 43(3): 362-366) [DOI: 10.3321/j.issn:0476-0301.2007.03.025]
- 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]
- Fang H L, Baret F, Plummer S and Schaepman - Strub G. 2019. An overview of global Leaf Area Index (LAI): methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57(3): 739-799 [DOI: 10.1029/2018rg000608]
- Fang J Y, Shen Z H and Cui H T. 2004. Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science*, 12(1): 10-19 (方精云, 沈泽昊, 崔海亭. 2004. 试论山地的生态特征及山地生态学的研究内容. *生物多样性*, 12(1): 10-19) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-0094.2004.01.003]
- Fu G and Wu J S. 2017. Validation of MODIS collection 6 FPAR/LAI in the alpine grassland of the northern Tibetan plateau. *Remote Sensing Letters*, 8(9): 831-838 [DOI: 10.1080/2150704X.2017.1331054]
- Gao M L, Zhao W J, Gong Z N, Gong H L, Chen Z and Tang X M. 2014. Topographic correction of ZY-3 satellite images and its effects on estimation of shrub leaf biomass in mountainous areas. *Remote Sensing*, 6(4): 2745-2764 [DOI: 10.3390/rs6042745]
- Gao Y N and Zhang W C. 2008. Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data. *Geographical Research*, 27(2): 467-477 (高永年, 张万昌. 2008. 遥感影像地形校正研究进展及其比较实验. *地理研究*, 27(2): 467-477) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-0585.2008.02.024]
- Gao Y N and Zhang W C. 2009. A simple empirical topographic correction method for ETM+ imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 30(9): 2259-2275 [DOI: 10.1080/01431160802549336]
- 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]
- 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]
- Ge H L, Lu D S, He S Z, Xu A J, Zhou G M and Du H Q. 2008. Pixel-based minnaert correction method for reducing topographic effects on a Landsat 7 ETM+ image. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(11): 1343-1350 [DOI: 10.14358/pers.74.11.1343]
- 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]
- Ghasemi N, Mohammadzadeh A and Sahebi M R. 2013. Assessment of different topographic correction methods in ALOS AVNIR-2

- data over a forest area. *International Journal of Digital Earth*, 6(5): 504-520 [DOI: 10.1080/17538947.2011.625049]
- Gonsamo A and Chen J M. 2014. Improved LAI algorithm implementation to MODIS data by incorporating background, topography, and foliage clumping information. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(2): 1076-1088 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2247405]
- Gonsamo A and Pellikka P. 2008. Methodology comparison for slope correction in canopy leaf area index estimation using hemispherical photography. *Forest Ecology and Management*, 256(4): 749-759 [DOI: 10.1016/j.foreco.2008.05.032]
- Gu D G and Gillespie A. 1998. Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel sun - canopy - sensor geometry. *Remote Sensing of Environment*, 64(2): 166-175 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00177-6]
- Gupta S K and Shukla D P. 2020. Evaluation of topographic correction methods for LULC preparation based on multi-source DEMs and landsat-8 imagery. *Spatial Information Research*, 28(1): 113-127 [DOI: 10.1007/s41324-019-00274-0]
- Hantson S and Chuvieco E. 2011. Evaluation of different topographic correction methods for landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5): 691-700 [DOI: 10.1016/j.jag.2011.05.001]
- Hao D L, Wen J G, Xiao Q, You D Q and Tang. An improved topography-coupled Kernel-driven model for land surface anisotropic reflectance. 2020. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(4): 2833-2847 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2956705]
- Heiskanen J. 2006. Estimating aboveground tree biomass and leaf area index in a mountain birch forest using ASTER satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(6): 1135-1158 [DOI: 10.1080/01431160500353858]
- Helbig N, Löwe H and Lehning M. 2009. Radiosity approach for the shortwave surface radiation balance in complex terrain. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 66(9): 2900-2912 [DOI: 10.1175/2009JAS2940.1]
- Houborg R, Soegaard H and Boegh E. 2007. Combining vegetation index and model inversion methods for the extraction of key vegetation biophysical parameters using Terra and Aqua MODIS reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 106(1): 39-58 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.016]
- Huang D, Knyazikhin Y, Wang W, 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 and Lian J. 2015. A 3D approach to reconstruct continuous optical images using lidar and MODIS. *Forest Ecosystems*, 2: 20 [DOI: 10.1186/s40663-015-0044-5]
- 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 W, Zhang L P and Li P X. 2005. An improved topographic correction approach for satellite image. *Journal of Image and Graphics*, 10(9): 1124-1128 (黄微, 张良培, 李平湘. 2005. 一种改进的卫星影像地形校正算法. *中国图象图形学报*, 10(9): 1124-1128) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2005.09.009]
- Jiang H, Zhang Z M, Wang X Q and He G J. 2015. Bamboo forest LAI retrieval and analysis in mountainous area based on TAVI. *Journal of Geo-information Science*, 17(4): 500-504 (江洪, 张兆明, 汪小钦, 何国金. 2015. 基于TAVI的山区毛竹林LAI反演分析. *地球信息科学学报*, 17(4): 500-504) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2015.00500]
- Jin H A, Li A N, Bian J H, Nan X, Zhao W, Zhang Z J and Yin G F. 2017. Intercomparison and validation of MODIS and GLASS leaf area index (LAI) products over mountain areas: a case study in southwestern China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 55: 52-67 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.10.008]
- Jin H A, Li A N, Bian J H, Zhao W, Zhang Z J and Nan X. 2016. Leaf Area Index (LAI) estimation from remotely sensed observations in different topographic gradients over southwestern China. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(1): 42-50 (靳华安, 李爱农, 边金虎, 赵伟, 张正健, 南希. 2016. 西南地区不同山地环境梯度叶面积指数遥感反演. *遥感技术与应用*, 31(1): 42-50) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.1.0042]
- Jin H A, Li A N, Xu W X, Xiao Z Q, Jiang J Y, and Xue H Z. 2019. Evaluation of topographic effects on multiscale leaf area index estimation using remotely sensed observations from multiple sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 154: 176-188 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.06.008]
- Jing J C, Jin H A, Tang B and Li A N. 2019. Intercomparison and evaluation of influencing factors among different LAI products over mountainous areas. *Journal of Natural Resources*, 34(2): 400-411 (景金城, 靳华安, 唐斌, 李爱农. 2019. 山区LAI遥感产品对比分析及影响因子评价. *自然资源学报*, 34(2): 400-411) [DOI: 10.31497/zrzyxb.20190215]
- Johnson R L, Peddle D R and Hall R J. 2000. A Modeled-Based Sub-pixel scale mountain terrain normalization algorithm for improved LAI estimation from airborne CASI imagery//*Proceedings of the 22nd Canadian Remote Sensing Symposium*. Ottawa: Canadian Remote Sensing Society: 415-424.
- Kamal M, Phinn S and Johansen K. 2016. Assessment of multi-resolution image data for mangrove leaf area index mapping. *Remote Sensing of Environment*, 176: 242-254 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.013]
- Kondratyev K Y. 1969. *Radiation in the Atmosphere*. New York: Academic Press
- Li A N, Bian J H, Zhang Z J, Zhao W and Yin G F. 2016a. Progresses, opportunities, and challenges of mountain remote sensing research. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1199-1215 (李爱农, 边金虎, 张正健, 赵伟, 尹高飞. 山地遥感主要研究进展, 发展机遇与挑战. *遥感学报*, 2016a, 20(05): 1199-1215) [DOI: 10.11834/jrs.20166227]
- Li A N, Yin G F, Jin H A, Bian J H and Zhao W. 2016. Principles and methods for the retrieval of biophysical variables in mountainous areas. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(1): 1-11 (李爱农, 尹高飞, 靳华安, 边金虎, 赵伟. 2016b. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题. *遥感技术与应用*, 31(1): 1-11) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.1.0001]
- Li F Q, Jupp D L B, Thankappan M, Lymburner L, Mueller N, Lewis A and Held A. 2012. A physics-based atmospheric and BRDF cor-

- rection for Landsat data over mountainous terrain. *Remote Sensing of Environment*, 124: 756–770 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.018] <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.018>
- Li J. 2010. The study of modeling and parameterization methods for LAI retrieval in mountains area. Beijing: Beijing Normal University (李静. 2010. 面向LAI反演效率的复杂地形区综合建模及参数化方法研究. 北京: 北京师范大学)
- Li X and Strahler A H. 1992. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 276-292 [DOI: 10.1109/36.134078]
- Li X W and Strahler A H. 1986. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(6): 906-919 [DOI: 10.1109/TGRS.1986.289706]
- Lin Q N, Huang H G, Chen L and Chen E X. 2017. Topographic correction method for steep terrain mountain images. *Journal of Remote Sensing*, 21(5): 776-784 (林起楠, 黄华国, 陈玲, 陈尔学. 2017. 陡峭地形山区影像的半经验地形校正. *遥感学报*, 21(5): 776-784) [DOI: 10.11834/jrs.20176384]
- Liao Y B, Chen X F, Chen X, Zhang D R, Guan B H and Zhou F. 2011. Effect of topographic correction on the estimation of leaf area index based on Landsat TM. *Remote sensing Information*, (5): 47-51, 64 (廖钰冰, 陈新芳, 陈喜, 张丹荣, 关保华, 周峰. 2011. 地形校正对叶面积指数遥感估算的影响. *遥感信息*, (5): 47-51, 64) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.05.008]
- Liu Y, Liu R G and Chen J M. 2012. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981—2011) from combined AVHRR and MODIS data. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(G4): G04003 [DOI: 10.1029/2012jg002084]
- 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*, 23(1): 1-10 (柳钦火, 阎广建, 焦子铎, 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——深切缅怀李文院士. *遥感学报*, 23(1): 1-10) [DOI: 10.11834/jrs.20198077]
- Liu Y, Liu R G, Chen J M, Cheng X and Zheng G. 2013. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data. *Journal of Geo-information Science*, 15(5): 734-743 (刘洋, 刘荣高, 陈镜明, 程晓, 郑光. 2013. 叶面积指数遥感反演研究进展与展望. *地球信息科学学报*, 15(5): 734-743) [DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00734]
- Luisa E M, Frédéric B and Marie W. 2008. Slope correction for LAI estimation from gap fraction measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10): 1553-1562 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2008.05.005]
- 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]
- Nichol J, Hang L K and Sing W M. 2006. Empirical correction of low sun angle images in steeply sloping terrain: a slope-matching technique. *International Journal of Remote Sensing*, 27(3): 629-635 [DOI: 10.1080/02781070500293414]
- Olyphant G A. 1986a. Longwave radiation in mountainous areas and its influence on the energy balance of alpine snowfields. *Water Resources Research*, 22(1): 62-66 [DOI: 10.1029/wr022i001p00062]
- Olyphant G A. 1986b. The components of incoming radiation within a mid-latitude alpine watershed during the snowmelt season. *Arctic and Alpine Research*, 18(2): 163-169 [DOI: 10.2307/1551125]
- Park S H and Jung H S. 2015. Comparative performance analysis between topographic correction models for landsat-8 OLI images. 36th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS2015), 1: 315-320.
- Park S H, Jung H S, Choi J and Jeon S. 2017. A quantitative method to evaluate the performance of topographic correction models used to improve land cover identification. *Advances in Space Research*, 60(7): 1488-1503 [DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.054]
- Pasolli L, Asam S, Castelli M, Bruzzone L, Wohlfahrt G, Zebisch M and Notarnicola C. 2015. Retrieval of leaf area index in mountain grasslands in the alps from MODIS satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 165: 159-174 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.04.027]
- Proy C, Tanré D and Deschamps P Y. 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]
- Qi J B, Xie D H, Guo D S and Yan G J. 2017. A large-scale emulation system for realistic three-dimensional (3-D) forest simulation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(11): 4834-4843 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2714423]
- Reeder D H. 2002. *Topographic Correction of Satellite Images: theory and Application*. Hanover: Dartmouth College
- Richter R and Schläpfer D. 2002. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(13): 2631-2649 [DOI: 10.1080/01431160110115834]
- Richter R, Kellenberger T and Kaufmann H. 2009. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*, 1(3): 184-196 [DOI: 10.3390/rs1030184]
- Richter R. 1998. Correction of satellite imagery over mountainous terrain. *Applied Optics*, 37(18): 4004-4015 [DOI: 10.1364/AO.37.004004]
- 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]
- Shepherd J D and Dymond J R. 2003. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17): 3503-3514 [DOI: 10.1080/01431160210154029]
- Singh S, Sharma J K and Mishra V D. 2011. Comparison of different topographic correction methods using AWiFS Satellite data. *International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technolo-*

- gies, 7(1): 85-91
- Singh S and Talwar R. 2013. A systematic survey on different topographic correction techniques for rugged terrain satellite imagery. *International Journal of Electronics and Communication Technology*, 4(5): 14-18
- Smith J A, Lin T L and Ranson K J. 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9): 1183-1189
- Soenen S A, Peddle D R and Coburn C A. 2005. SCS+C: a modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9): 2148-2159. [DOI: 10.1109/TGRS.2005.852480]
- Soenen S A, Peddle D R, Hall R J, Coburn C A and Hall F G. 2010. Estimating aboveground forest biomass from canopy reflectance model inversion in mountainous terrain. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1325-1337 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.012]
- Song J L, Wang J D, Shuai Y M and Xiao Z Q. 2009. The research on bidirectional reflectance computer simulation of forest canopy at pixel scale. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29(8): 2141-2147 (宋金玲, 王锦地, 帅艳民, 肖志强. 2009. 像元尺度林地冠层二向反射特性的模拟研究. *光谱学与光谱分析*, 29(8): 2141-2147) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)08-2141-07]
- Teillet P M, Guindon B and Goodenough D G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2): 84-106 [DOI: 10.1080/07038992.1982.10855028]
- Temps R C and Coulson K L. 1977. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar Energy*, 19(2): 179-184 [DOI: 10.1016/0038-092x(77)90056-1]
- Tong Q X. 2005. Earth observation from space and human demension for global change studies. *Advance in Earth Sciences*, 20(1): 1-5 (童庆禧. 2005. 空间对地观测与全球变化的人文因素. *地球科学进展*, 20(1): 1-5) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-8166.2005.01.002]
- Verger A, Baret F, Weiss M, Kandasamy S and Vermote E. 2013. The CACAO method for smoothing, gap filling, and characterizing seasonal anomalies in satellite time series. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4), 1963-1972 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2228653]
- Wang G X, Deng W, Yang Y and Cheng G W. 2011. The advances, priority and developing trend of alpine ecology. *Journal of Mountain Science*, 29(2): 129-140 (王根绪, 邓伟, 杨燕, 程根伟. 2011. 山地生态学的研究进展、重点领域与趋势. *山地学报*, 29(2): 129-140) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2011.02.001]
- Wei X Q, Gu X F, Meng Q Y, Yu T, Zhou X, Wei Z, Jia K and Wang C M. 2017. Leaf area index estimation using Chinese GF-1 wide field view data in an agriculture region. *Sensors*, 2017, 17(7): 1593 [DOI: 10.3390/s17071593]
- Wen J G, Liu Q H, Liu Q, Xiao Q and Li X W. 2009. Parametrized BRDF for atmospheric and topographic correction and albedo estimation in Jiangxi rugged terrain, China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(11): 2875-2896 [DOI: 10.1080/01431160802558618]
- 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]
- Wu S B, Wen J G, Lin X W, Hao D L, You D Q, Xiao Q, Liu Q H and Yin T G. 2019. 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]
- Xia X Q, Tian Q J and Du F L. 2004. Analysis of topographical effect on retrieval of LAI from remotely sensed data. *Remote Sensing Information*, (2): 16-19, 37 (夏学齐, 田庆久, 杜凤兰. 2004. 遥感提取叶面积指数的地形影响分析. *遥感信息*, (2): 16-19, 37) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2004.02.005]
- Xiang Y, Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D and Song J L. 2014. Validation of global land surface satellite (GLASS) leaf area index product. *Journal of Remote Sensing*, 18(3): 573-596 (向阳, 肖志强, 梁顺林, 王锦地, 宋金玲. 2014. GLASS 叶面积指数产品验证. *遥感学报*, 18(3): 573-596) [DOI: 10.11834/jrs.20143117]
- Xiao Z Q, Wang T T, Liang S L and Sun R. 2016. Estimating the fractional vegetation cover from GLASS leaf area index product. *Remote Sensing*, 8(4), 337 [DOI: 10.3390/rs8040337]
- Yan G J, Hu R H, Luo J H, Weiss M, Jiang H L, Mu X H, Xie D H and Zhang W M. 2019. Review of indirect optical measurements of leaf area index: recent advances, challenges, and perspectives. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265: 390-411. [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.11.033]
- Yan G J, Zhu C G, Guo J, Wang J D and Li X W. 2000. A model based radiative transfer algorithm to correct remotely sensed image in mountainous area. *Journal of Image and Graphics*, 5(1): 11-15 (闫广建, 朱重光, 郭军, 王锦地, 李小文. 2000. 基于模型的山地遥感图象辐射订正方法. *中国图象图形学报*, 5(1): 11-15) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2000.01.003]
- Yang Y S, Li A N, Jin H A, Yin G F, Zhao W, Lei G B and Bian J H. 2016. Intercomparison among GEOV1, GLASS and MODIS LAI products over mountainous area in southwestern China. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(3): 438-450 (杨勇帅, 李爱农, 靳华安, 尹高飞, 赵伟, 雷光斌, 边金虎. 2016. 中国西南山区 GEOV1、GLASS 和 MODIS LAI 产品的对比分析. *遥感技术与应用*, 31(3): 438-450) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0438]
- Yin G F, Cao B, Li J, Fan W L, Zeng Y L, Xu B D and Zhao W. 2020a. Path length correction for improving leaf area index measurements over sloping terrains: a deep analysis through computer simulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(7): 4573-4589 [DOI: 10.1109/tgrs.2019.2963366]
- Yin G F, Li A N, Wu S B, Fan W L, Zeng Y L, Yan K, Xu B D, Li J and Liu Q H. 2018. PLC: a simple and semi-physical topographic correction method for vegetation canopies based on path length correction. *Remote Sensing of Environment*, 215: 184-198 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.009]
- Yin G F, Li A N, Zhao W, Jin H A, Bian J H, 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]
- Yin G F, Ma L, Zhao W, Zeng Y L, Xu B D and Wu S B. 2020b. Topographic Correction for Landsat 8 OLI vegetation reflectances through path length correction: a comparison between explicit and implicit method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-13(accepted) [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2987985]

- 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]
- Zhang H L, Ni S X and Zhang J. 2001. Progress on the study of topographic normalization methods on remotely sensed imagery on abroad. *Remote Sensing Information*, (3): 24-26 (张洪亮, 倪绍祥, 张军. 2001. 国外遥感图像的地形归一化方法研究进展. *遥感信息*, (3): 24-26) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2001.03.005]
- Zhang Z M, He G J, Zhang X M, Long T F, Wang G Z and Wang M M. 2018. A coupled atmospheric and topographic correction algorithm for remotely sensed satellite imagery over mountainous terrain. *Giscience and Remote Sensing*, 55(3): 400-416 [DOI: 10.1080/15481603.2017.1382066]
- Zhong X H and Liu S Z. 2014. China Mountain Classification Research. *Journal of Mountain Science*, 32(002): 129-140 (钟祥浩, 刘淑珍. 2014. 中国山地分类研究. *山地学报*, 32(002): 129-140) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2014.02.001]

Review on the theory, method, and research progress of leaf area index estimation in mountainous areas

JIANG Haiying^{1,2}, JIA Kun^{1,2}, ZHAO Xiang^{1,2}, WEI Xiangqin³, WANG Bing^{1,2}, YAO Yunjun^{1,2}, ZHANG Xiaotong^{1,2}, JIANG Bo^{1,2}

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Leaf Area Index (LAI) is an important vegetation parameter that represents leaf density and canopy structure characteristics. This parameter plays an important role in climate change, crop growth model, and carbon and water cycle studies. Remote sensing is an important means to estimate LAI on regional and global scales. LAI products are currently mainly obtained by remote sensing retrieval. However, most LAI product algorithms ignore the effect of topographic features, which results in the great uncertainty in the accuracy of retrieved LAI in mountainous areas. The influence of topographic factors on the canopy reflectance needs to be considered to improve the accuracy of mountain LAI retrieval. Generally, there are mainly two methods to eliminate the influence of topography on mountain LAI retrieval. One method is to use the mountain canopy reflectance model to simulate reflectance, and the other method is to perform topographic correction on remote sensing data.

In this paper, the research progress of mountain canopy reflectance model and topographic correction method were comprehensively analyzed on the basis of the theories and methods of LAI retrieval in mountainous areas. For mountain LAI retrieval method based on mountain canopy reflectance simulation, some mountain canopy reflectance models simplify the influence of topographic factors on atmospheric scattering and adjacent terrain scattering, resulting in poor model simulation and low LAI retrieval accuracy. Some complex mountain canopy reflectance models, such as geometric-optical hybrid model or computer simulation model, can accurately simulate topographic effect on reflectance, but it is difficult to invert due to complex input parameters. For mountain LAI retrieval method based on image topographic correction, it is difficult to choose suitable topographic correction method, because the generality of the existing models is poor that a single topographic correction model may only be applicable to a certain terrain condition, a certain area, a certain sensor or a certain waveband. In addition to the above two methods, some studies directly add topographic factors into the statistical regression equation of LAI as a control variable, so as to retrieve mountain LAI. However, this method may cause over fitting phenomenon and does not have robustness and portability.

Based on the existing problems of mountain canopy reflectance model, topographic correction method and mountain LAI retrieval method, this paper summarizes and discusses the development trend of future research of mountain LAI retrieval. For mountain canopy reflectance model, it is necessary to develop a model that takes into account the non-Lambertian characteristics of the surface, the geotropic growth of trees, and diffuse radiation and other factors to improve the accuracy of model simulation. In addition, the parameter optimization and retrievability of the model should also be considered. For topographic correction method, it can be combined with BRDF correction or atmospheric correction in the future, especially for complex terrain. To accurately and efficiently retrieve mountain LAI, it is necessary to comprehensively consider factors such as the size of the study area, the heterogeneity of the ground surface, and the degree of terrain undulations, and choose an appropriate topographic correction method or mountain canopy reflectance model. Moreover, it is necessary to carry out more in-depth research on the validation of LAI retrieval accuracy in mountainous areas.

Key words: remote sensing, optical remote sensing, LAI, topographic correction, mountain canopy reflectance model, DEM

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41671332); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0501404, 2016YFA0600103)