

地表生态类型BRDF形状约束的针阔混交林植被聚集指数估算

谢蕊^{1,2}, 焦子锦^{1,2}, 董亚冬^{2,3}, 崔磊^{1,2}, 尹思阳^{1,2}, 张小宁^{1,2},
常雅轩^{1,2}, 郭静^{1,2}

1. 北京师范大学 地理科学学部遥感科学与工程研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;

3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101

摘要: 聚集指数CI (Clumping Index) 是植被冠层的一个重要结构参数, 对植被冠层的辐射截获, 以及全球碳、水循环的研究均有重要作用。现有星载CI产品的估算主要是基于CI-NDHD (Normalized Difference between Hotspot and Dark spot) 线性模型方法, 由于针叶林和阔叶林在叶片尺度上存在聚集层级的差异, 该模型对它们分别采用了不同的模型系数。但是, 该模型对中分辨率的针阔混交林像元通常采用阔叶林的CI反演系数, 因此, 理论上会导致该类型CI的高估。为此, 本文提出了一种动态选取混交林像元端元CI组分的方法, 以改进针阔混交林植被聚集指数的估算精度。首先, 通过国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 的地表类型和描述二向性反射分布函数BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 特征的地表各向异性平整指数AFX (Anisotropic Flat Index) 进行双重约束, 逐像元地计算端元CI值; 然后, 结合高分辨率的土地覆盖分类数据确定端元在像元中的面积比例, 并估算MODIS针阔混交林像元的聚集指数MFCI (Mixed Forest CI); 最后, 将方法应用于研究区MODIS数据的MFCI估算, 并通过地面实测数据进行精度评价。结果表明: 目前的MODIS产品算法高估了针阔混交林像元的CI值, 而MFCI估算方法在CI-NDHD算法的基础上, 可以较显著地改善该类型聚集指数的估算精度, 当针叶林树种成数达到60%时, 精度改善可达28.03%, 其中, 改进结果的均方根误差 (RMSE) 和偏差 (Bias) 各降低约84%和175%。研究表明, MFCI方法对针阔混合像元的端元组分的变化敏感, 在高分辨率地表分类已知的条件下, MFCI方法为针阔混交林CI产品生产和精度提高提供了可行的解决方案。

关键词: 遥感, 聚集指数, 混交林, MODIS, AFX, NDHD, MFCI

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 谢蕊, 焦子锦, 董亚冬, 崔磊, 尹思阳, 张小宁, 常雅轩, 郭静. 2024. 地表生态类型BRDF形状约束的针阔混交林植被聚集指数估算. 遥感学报, 28(4): 995-1009

Xie R, Jiao Z T, Dong Y D, Cui L, Yin S Y, Zhang X N, Chang Y X and Guo J. 2024. An improved method for estimating clumping index in mixed coniferous and broadleaved forests using BRDF shape of surface ecotype as constraints. National Remote Sensing Bulletin, 28(4): 995-1009 [DOI:10.11834/jrs.20211522]

1 引言

植被聚集指数CI (Clumping Index) 表征植被冠层叶片的聚集程度, 是植被冠层的重要结构参数。叶片的聚集程度能够影响植被冠层内辐射的截获与分配, 从而影响冠层的光合作用 (Stenberg, 1998) 和蒸腾作用 (Liu 等, 2003), 还影响着全球总初级生产力GPP (Gross Primary Productivity)

的估算精度 (Chen 等, 2012), 对碳、水循环和生态学研究均有重要作用 (Baldocchi 和 Harley, 1995; Wei 和 Fang, 2016)。Nilson通过分析马尔可夫链给出了孔隙率 $P(\theta)$ 的表达式, 并首次定义了量化叶片聚集程度的参数 Ω :

$$P(\theta) = \exp\left(\frac{-G(\theta) \cdot LAI \cdot \Omega}{\cos \theta}\right) \quad (1)$$

式中, $P(\theta)$ 表示天顶角 θ 方向的孔隙率, $G(\theta)$ 表

收稿日期: 2021-08-10; 预印本: 2021-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2018YFA0605503); 国家自然科学基金(编号:41971288, 41571326)

第一作者简介: 谢蕊, 研究方向为定量遥感, 混交林植被聚集指数反演。E-mail: xierui@mail.bnu.edu.cn

通信作者简介: 焦子锦, 研究方向为多角度光学遥感的建模、反演与应用(土壤—植被—冰雪)。E-mail: jiaozt@bnu.edu.cn

示叶面积在垂直于该方向的平均投影系数 (Chen 和 Black, 1991)。当叶倾角为球状分布时, 平均叶倾角约为 57° , $G(\theta)=0.5$ (Ross 等, 1981; Myneni 等, 1989), LAI 为真实叶面积指数 LAI (Leaf Area Index), Ω 为表征叶片聚集程度的参数, 即聚集指数, Ω 越小, 聚集效应越强 (Nilson, 1971), 当 $\Omega=1$ 时, 叶片为随机分布。

目前, 星载聚集指数产品主要采用了 Chen 等人通过四尺度模型模拟发展的基于热点 (Hotspot) 和暗点 (Dark spot) 的归一化差值指数 NDHD (Normalized Difference between Hotspot and Dark spot) 与 CI 之间的线性关系的方法, 其中, 针叶树种使用圆柱体和圆锥体的组合进行建模 (Chen 和 Leblanc, 1997), 阔叶树种使用全椭球体 (Bartelink, 1998; Nilson 和 Peterson, 1991; Strahler 和 Jupp, 1990) 以及半椭球体进行建模 (Chen 等, 2005):

$$CI(\theta_s) = A(\theta_s) \cdot NDHD + B(\theta_s) \quad (2)$$

$$NDHD = (\rho_{HS} - \rho_{DS}) / (\rho_{HS} + \rho_{DS}) \quad (3)$$

式中, ρ_{HS} 为热点反射率, ρ_{DS} 为暗点反射率, 系数 A 、 B 是分别对应于圆锥/圆柱以及椭球/半椭球形树冠模拟产生的, 与太阳天顶角 θ_s 、观测波段以及冠层形状有关的函数。树冠形状对 CI 的影响较大 (Ryu 等, 2010; Yin 等, 2014), 在目前的实际应用中, 两组系数分别用于估算针叶林以及除针叶林以外的其他植被类型的 CI (Chen 等, 2005)。

研究表明, 基于 MODIS 红波段反演的 CI 受太阳天顶角的影响更小, 且优于基于近红外波段反演得到的 CI, 特别是对于茂密森林类型而言 (He 等, 2012)。因此, 现有全球 MODIS CI 产品算法主要是利用红波段的二向性反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 数据反演得到的 (Chen 等, 2005; He 等, 2012; Jiao 等, 2018)。在主平面 PP (Principal Plane) 上, 当热、暗点的天顶角方向分别设定为后向和前向 45° 时, 在红波段, 针叶林类型的 CI 计算公式为 (Chen 等, 2005)

$$CI = -0.47 \cdot NDHD + 0.80 \quad (4)$$

而对于其他植被类型 (包括阔叶林以及针、阔混交林):

$$CI = -1.23 \cdot NDHD + 1.34 \quad (5)$$

在式 (4) 和 (5) 中, 地表覆盖类型作为 CI-NDHD 线性模型的输入数据, 决定了估算不同地表

覆盖类型像元的 CI 时采用不同的系数。然而, 国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 分类体系将混交林定义为落叶针叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和常绿阔叶林的混合林 (Friedl 等, 2002)。但 CI-NDHD 模型却未考虑针阔混交林的情况, 在现有 500 m 分辨率的 MODIS CI 产品中, 该类型 CI 的反演通常直接采用阔叶林式 (5), 并未考虑针叶林和阔叶林叶片的聚集效应在像元中的差异 (Pisek 等, 2011; Zhu 等, 2012; Jiao 等, 2018)。理论上, 如果对混交林像元直接作为阔叶林来估算 CI 必定会引起 CI 的高估, 因为在叶片尺度上, 针叶林存在针簇聚集层级, 聚集效应最高, 所以聚集指数通常最低 (Jiao 等, 2018)。这可能成为影响 MODIS 混交林 CI 产品精度的主要因素之一。

混交林对森林退化、碳储量等科学问题的研究具有重要的作用 (Luo 等, 2015), 同时, 混交林也是在亚像元尺度的空间变异性、以及其他测量过程中引入不确定性影响的关键生物群落之一 (Román 等, 2011)。除此之外, 作为反演植被真实叶面积指数的关键中间参数, CI 的估算误差必然会进一步传递到 LAI 的估算中。研究表明, 考虑亚像元混合的影响可显著提高 LAI 反演的准确性 (Wu 等, 2013; Yin 等, 2015)。特别是混交林类型, 其比其他植被覆盖类型具有更高的空间异质性 (Ma 等, 2008), 而在异质性较高的生态系统中, CI 的估算误差对叶面积指数估算精度的影响会更加显著 (Kucharik 等, 1999)。

目前, 对于混交林 CI 估算的研究较少。Huang 等 (2017) 根据 MODIS BRDF 数据以及研究区的实测 CI 数据, 通过最小二乘法给出了针对混交林类型的 CI-NDHD 经验公式。但是, 根据研究区有限实测数据得到的经验公式通常很难在大区域中推广应用。Ma 等 (2019) 基于 Beer 定律和 30 m 的土地覆盖分类数据来估算了中国区域 1 km 分辨率的混合像元 CI, 其中, 端元 CI 的选取采用了 Tang 等 (2007) 实测的各地表覆盖类型的聚集指数均值, 而未考虑 CI 测量值的像元变化。该研究在一定程度上也为针、阔混交林像元 CI 的估算问题提供了解决策略, 但在端元 CI 取值上采用的是仅由地表覆盖类型决定的单一的常数值, 即: 仅考虑了 CI 随植被类型的变化, 忽略了端元 CI 的空间变化可能造成的影响, 使得混交林 CI 估计值可能显著低于针叶林 CI 值或高于阔叶林 CI 值。除此之

外,忽略CI的空间变化还会对与叶绿素含量相关的指数产生较大的影响(Sun等,2021)。

因此,本文提出了一种通过IGBP高质量地表生态类型和相似AFX/BRDF形状的双重约束逐像元提取混交林像元端元并估算针阔混交林像元CI的方法,为进一步提高全球混交林CI产品的估算精度提供有意义的探索和切实可行的解决方案。

2 研究区及数据介绍

2.1 研究区概况

研究区主要覆盖了小滦河流域及其临近的塞罕坝林场,属典型的半干旱半湿润寒温带大陆季风气候,主要树种包括落叶松、樟子松、云杉和白桦(Zhou等,2021),在500 m像元尺度上包含大量的针阔混交林类型。其中,地面实测聚集指数数据分布在小滦河流域内。小滦河处于典型的

森林—草原过渡带、农牧交错带,流域内包含大规模的人工林场,适合作为定量遥感算法检验的区域,且该地区对于京津冀生态涵养区的生态保护也具有重要意义(Yan等,2021)。图1(a)为Sentinel-2B Level 1C数据,获取时间为2018年9月5日,红线区域为小滦河流域及其临近的塞罕坝林场。图1(b)为MODIS MCD12Q1 500m的IGBP土地覆盖分类图;图1(c)为GLC_FCS 2020 30 m土地覆盖分类图;图1(d)为所对应的地面实测CI空间分布图。对比(b)和(c)可以看出,不同于该类型在全球尺度验证结果,虽然在全球尺度上,该类型有总体上较高的精度,但在区域精细尺度上,两者存在较多不一致的地表分类结果,为此,我们以GLC_FCS 2020 30 m土地覆盖分类结果为准,以此判断500 m MODIS/IGBP植被类型的混交林像元。

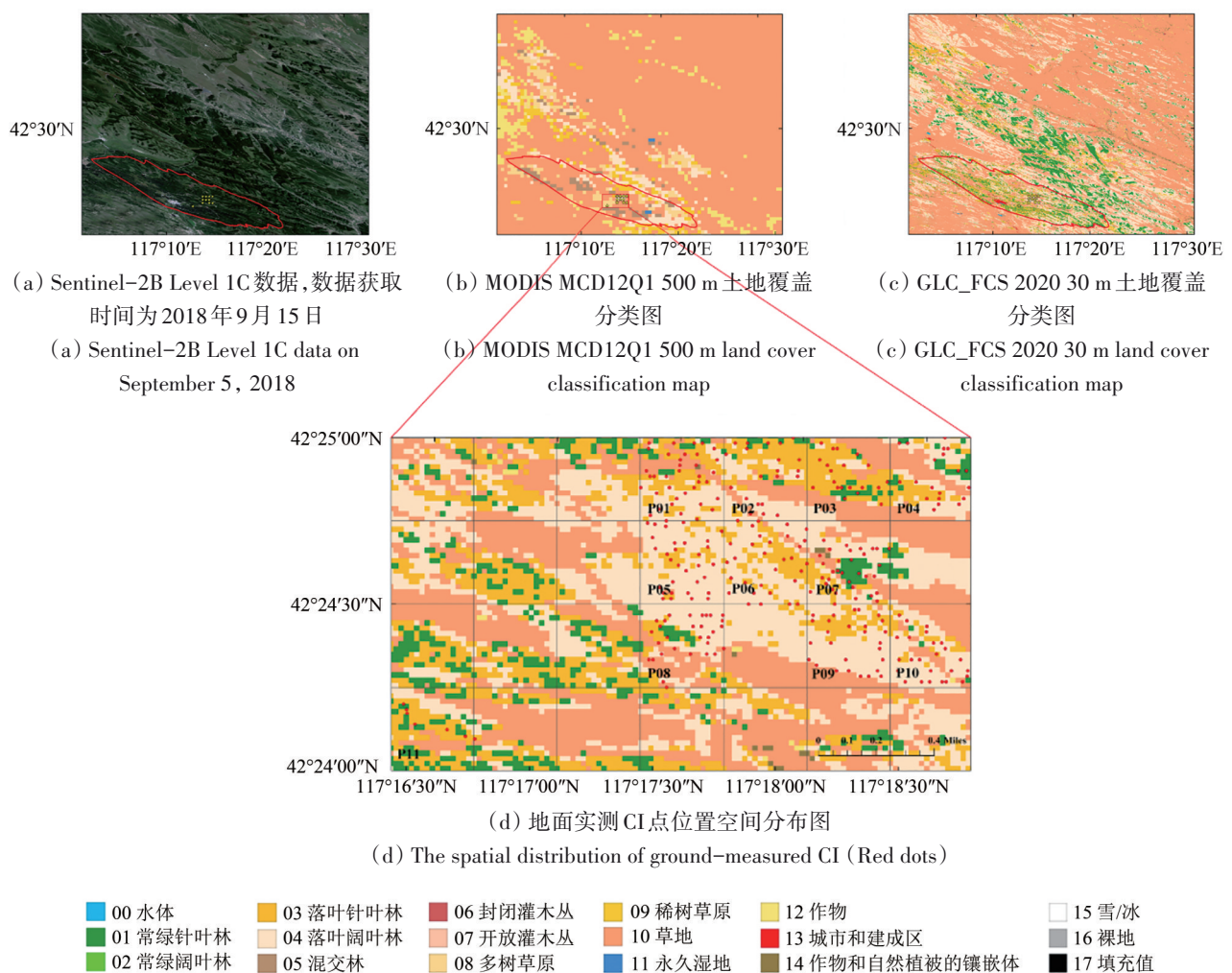


图1 研究区概况及地面实测CI位置分布图

Fig.1 Maps of study area and the spatial distribution of field measured CIs

2.2 数据产品

2.2.1 土地覆盖分类图

MODIS 提供了 500 m 空间分辨率的全球土地覆盖分类图, 其中, IGBP 分类体系下的 MODIS 土地覆盖分类数据产品 (MCD12Q1) (Friedl 等, 2002) 是目前 500 m 聚集指数产品中主要应用的地表类型数据分类标准。

在本研究中, 采用 GLC_FCS2020 数土地覆盖分类据产品来提取 MODIS 针阔混交林像元的端元丰度含量。GLC_FCS 数据是中国科学院空天信息创新研究院生产的全球尺度 30 m 空间分辨率的土地覆盖精细分类产品 (GLC_FCS30, [http://data.casearth.cn/\[2021-08-10\]](http://data.casearth.cn/[2021-08-10])), 目前包括 2015 年以及 2020 年的版本。该产品在 (GEE) Google Earth Engine 计算平台上开发高质量训练数据, 然后利用相应训练数据的多时空 Landsat 光谱和纹理特征, 建立 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 地理范围的局部自适应随机森林 RF (Random Forest) 模型, 提供 30 种土地覆被类型 (包括森林的二级分类类型)。在 24 个精细类的验证系统下, GLC_FCS30-2015 的总体准确率为 68.7%, kappa 系数为 0.662 (Zhang 等, 2019, 2020)。

2.2.2 MODIS BRDF 参数产品

MODIS-BRDF/反照率产品 (MCD43A1, V006) 是采用了半经验的核驱动模型对经过大气校正的 16 d 累积的多角度反射率反演得到的复合数据集, 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 d。该数据集提供了核驱动模型的 3 个模型参数以及对应的数据质量产品 (MCD43A2) (Schaaf 等, 2002)。本研究将基于该数据的 BRDF 参数数据集来计算热点及冷点方向的反射率, 并进行 CI 产品的反演。

2.2.3 地面站点实测 CI 数据

本文采用的地面实测 CI 数据是由本研究团队基于跟踪辐射与冠层结构测量仪 TRAC 测量得到, 测量时间为 2017 年和 2018 年的 8 月份, 测量数据主要分布在小滦河流域 (图 1 (d)), 且站点分布的像元位置均对应了高质量的 MODIS BRDF 参数产品。由于地面实测 CI 数据测量点较多且分布较为密集, 本研究直接采用 MODIS 500 m 像元范围内实测 CI 的均值作为该像元对应的 CI 地面测量值真实值 (CI_{measured})。

表 1 和图 1 (d) 中展示了本文使用的地面实测 CI 数据的站点森林覆盖及其分布情况。表 1 中列出的森林覆盖度, 阔叶林和针叶林树种成数是根据 30 m 地表分类数据计算所得, 其中, 林分树种成数是指构成林分的树种成分以及比例。

表 1 地面站点实测数据分布情况

Table 1 Distribution of field measured CIs at ground stations

地面测量 站点	森林 覆盖度/%	阔叶林树 种成数/%	针叶林树 种成数/%	地面实测 CI
P1	77.34	40.23	37.11	0.5767
P2	80.85	42.18	38.67	0.5629
P3	62.40	12.80	49.60	0.577
P4	67.57	39.84	27.73	0.614
P5	98.82	85.15	13.67	0.5363
P6	97.65	70.31	27.34	0.5448
P7	75.39	49.22	26.17	0.6248
P8	69.52	46.87	22.65	0.5427
P9	80.30	62.10	18.20	0.5973
P10	67.57	55.07	12.50	0.5781
P11	82.03	15.62	66.41	0.6643

3 模型与方法

3.1 核驱动模型

核驱动模型将地物的反射特征表示为体散射和几何光学散射的加权和形式 (Roujean 和 Lacaze, 2002; Wanner 等, 1995):

$$R(\theta, \vartheta, \eta, \lambda) = f_{\text{iso}}(\lambda) + f_{\text{vol}}(\lambda) \cdot K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \eta) + f_{\text{geo}}(\lambda) \cdot K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \eta) \quad (6)$$

式中, $R(\theta, \vartheta, \eta, \lambda)$ 是波段 λ 的二项反射因子 BRDF (Bidirectional Reflectance Factor), $K_{\text{vol}}(\theta, \vartheta, \lambda)$ 和 $K_{\text{geo}}(\theta, \vartheta, \lambda)$ 是关于太阳天顶角 θ 、观测天顶角 ϑ 和相对方位角 η 的核函数, 二者分别描述地物的体散射以及几何光学散射特征。 $f_{\text{iso}}(\lambda)$, $f_{\text{vol}}(\lambda)$ 和 $f_{\text{geo}}(\lambda)$ 为模型的 3 个参数, 分别代表各向同性、体散射和几何光学核的权重系数。如果获得足够的多角度观测数据且 BRDF 采样良好, 就可以通过最小二乘拟合的方法反演得到 3 个模型参数, 从而基于核驱动模型前向计算出任意入射和观测方向的反射率。

对 Ross-Li 核驱动模型热点校正的研究经历了较为漫长过程 (Chen, 1997; Maignan 等, 2004;

He 等, 2012; Jiao 等, 2016; Dong 等; Chang 等, 2021), 其中, 本研究采用热点改进的核驱动模型进行热冷点反射率的重构。该模型为热点校正的 RossThickChen 核与 LiSparseRChen 核的组合, 缩写分别为 K_{RTC} (Jiao 等, 2016) 与 K_{LSRC} (Dong 等, 2019; Chang 等, 2019), 组合后的热点校正模型简称为 RTL_SR_C 模型, 热点校正的体散射和几何光学核的公式如下:

$$K_{\text{RTC}} = \frac{(\frac{\pi}{2} - \tau) \cdot \cos \tau + \sin \tau}{\cos \theta + \cos \vartheta} \cdot (1 + C_1 \cdot e^{\frac{-\tau}{C_2}}) - \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

$$K_{\text{LSRC}} = O(\theta', \vartheta', \eta) \cdot \left(1 + C_1 e^{\frac{-\tau}{C_2}}\right) - \sec \theta' - \quad (8)$$

$$\sec \vartheta' + \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \tau') \cdot \sec \theta' \cdot \sec \vartheta'$$

$$\cos \tau' = \cos \theta' \cdot \cos \vartheta' + \sin \theta' \cdot \sin \vartheta' \cdot \cos \eta \quad (9)$$

$$\theta' = \tan^{-1}\left(\frac{b}{r} \cdot \tan \theta\right) \quad (10)$$

$$\vartheta' = \tan^{-1}\left(\frac{b}{r} \cdot \tan \vartheta\right) \quad (11)$$

在式 (7)、(8) 中, 热点校正的方法是分别在原体散射和几何光学核函数中增加了热点函数 $\left(1 + C_1 e^{\frac{-\tau}{C_2}}\right)$, C_1 和 C_2 分别用于调整热点的高度和宽度, 相角 τ 是观测方向和光照方向之间的夹角。 $O(\theta', \vartheta', \eta)$ 是在理论上确定热点效应的观测阴影和光照阴影的重叠函数, 比值 $\frac{b}{r}$ 描述了树冠形状, 是重叠函数的参数, 其中, b 是模拟椭球的平均垂直半轴, r 是平均水平半径 (Li 和 Strahler, 1992), 对于目前用于 MODIS BRDF/Albedo 算法的热点校正的核驱动模型版本, $b/r=1$ (Dong 等, 2019)。

3.2 各向异性平整指数 (AFX)

植被角度指数的研究是多角度研究领域的一个主要研究方向 (Chen 等, 1997; Jiao 等, 2011; Zhang 等, 2015)。各向异性平整指数 AFX (Anisotropic Flat Index) 是基于核驱动模型发展的角度指数, 能够量化 BRDF 的基本形状变化, 反映了植被冠层的结构特征 (Jiao 等, 2014; Zhang 等, 2015)。其定义为白天空反照率 (WSA) 和各向同性核参数 (f_{iso}) 的比值, 具体表示为

$$\text{AFX} = \frac{\text{WSA}(\Lambda)}{f_{\text{iso}}(\Lambda)} = 1 + \frac{f_{\text{vol}}(\Lambda)}{f_{\text{iso}}(\Lambda)} \cdot H_{\text{ker_vol}} + \frac{f_{\text{geo}}(\Lambda)}{f_{\text{iso}}(\Lambda)} \cdot H_{\text{ker_geo}} \quad (12)$$

式中, $H_{\text{ker_vol}}$ 和 $H_{\text{ker_geo}}$ 分别为 Rossthick 核 (体散射核) 和 LiSparseR 核 (几何光学核) 在入射和观测半球方向的积分。当 $\text{AFX} < 1$ 时, 几何光学散射占主导作用, BRDF 形状呈 “屋顶状”; 当 $\text{AFX} > 1$ 时, 体散射占主导作用, BRDF 呈 “碗状”; 当 AFX 接近于 1 时, 两种散射强度相互抵消, BRDF 形状相对平整。

研究表明, 植被冠层结构是影响其 BRDF 变化的主要因素 (Strahler, 1997), 而叶片的聚集程度又与 BRDF 的特征变化紧密相关 (Chen 等, 2005)。因此, 在同一 IGBP 植被类型中, 通过采用相似的 BRDF 形状特征作为进一步约束, 为考虑 BRDF 特征变化的混交林像元的端元选取提供了一种可行的新方法。

3.3 针阔混交林聚集指数 MFCI 的估算方法

在本研究中, 假设一个针阔混交林像元由 n 种不同端元混合组成。其中, 端元是像元的基本组分, 只包含一种地物信息, 不同类型端元所占的面积比例即为端元的丰度 (Per)。对于针阔混交林像元的聚集指数 MFCI, 这里表示为 Ω , 通过 Beer 定律可以表示为

$$\Omega = -\frac{\cos \theta \cdot \ln \overline{P(\theta)}}{G(\theta) \cdot \overline{\text{LAI}}} \quad (13)$$

在线性混合模型下, 像元的叶面积指数 LAI 和孔隙率 P 可以通过下式计算:

$$\overline{\text{LAI}} = \sum_{i=1}^n \text{LAI}_i \cdot \text{Per}_i \quad (14)$$

$$\overline{P} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \text{Per}_i \quad (15)$$

而端元的 LAI 可以由 Beer 定律得到:

$$\text{LAI}_i = -\frac{\cos \theta \cdot \ln P_i(\theta)}{G_i(\theta) \cdot \Omega_i} \quad (16)$$

基于前人在该领域关于 G 函数的球形分布假设考虑 (Chen 和 Cihlar, 1995), 同时, 考虑该研究有相似的研究前提, 本文假设叶倾角满足球形分布, 即: $G(\theta) = G_i(\theta) = 0.5$ (Myneni 等, 1989), 那么, 把式 (14)、(16) 代入式 (13) 后, 可以整理为

$$\Omega = \frac{\ln \overline{P(\theta)}}{\sum_{i=1}^n \left(\ln P_i(\theta) / \Omega_i \right) \cdot Per_i} \quad (17)$$

考虑到目前大区域的高分辨率孔隙率数据难以获取,而在冠层顶部,不同形状的树冠之间的孔隙率差异较小(Yin等,2014),因此本研究忽略了针、阔叶树种之间孔隙率的差异,以及端元与像元孔隙率的差异,从而将式(14)进一步简化为

$$\Omega = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(1 / \Omega_i \right) \cdot Per_i} \quad (18)$$

式中,500 m MODIS针阔混交林像元的端元丰度可以通过高分辨率的土地覆盖分类图获得,所以对于式(18),还需要进一步获得端元CI值(Ω_i),从而可以估算针阔混交林像元的CI值(Ω)。

为此,考虑到植被在红光波段的强吸收和弱散射,本文假设混交林像元和端元组分的NDHD在红光波段为线性混合,关于该假设的误差分析详见3.4节。首先通过AFX作为BRDF形状指示因子的作用,对不同IGBP类型的像元进行BRDF约束,即将MODIS针阔混交林像元的BRDF形状作为端元的约束条件。为此,需要统计混交林像元及其端元组分所对应的各IGBP类型像元的AFX值和3个模型参数值(f_{iso} , f_{vol} 和 f_{geo}),从而计算得到对应于混交林像元AFX值的各端元组分的NDHD均值作为先验知识;然后,根据混交林像元和其组分NDHD应满足上述线性混合的假设条件,本研究进一步引入了线性优化因子 f 对各端元组分的端元NDHD先验值($NDHD_{prior}$)进行动态调整和优化,使调整后各端元的NDHD值的线性混合结果与该针阔叶混交林像元的NDHD值保持一致,从而消除基于该假设条件计算得到的混交林像元NDHD和该像元实际NDHD的差异。优化因子 f 可以表示为

$$f = \frac{NDHD}{\sum_{i=1}^n NDHD_{prior} \cdot Per_i} \quad (19)$$

基于上述假设,优化后的端元NDHD,本文中表示为 $NDHD'_{prior}$,可以通过下式计算:

$$NDHD'_{prior} = f \cdot NDHD_{prior} \quad (20)$$

式中,优化因子 f 的引入,保证了混交林像元的NDHD和其各端元组分NDHD线性混合后结果的一致性,使得混交林像元趋向于仅由某一端元类型

所决定的“纯像元”时,该混交林像元的NDHD也能够趋向于该端元类型的NDHD,从而实现针阔混交林像元CI估算与其他类型的纯像元CI估算之间的自然过渡。

最终,在CI-NDHD线性模型框架下,端元CI可以表示为

$$CI_i = A \cdot NDHD'_{prior_i} + B \quad (21)$$

总体而言,本研究发展的针阔混交林MFCI估算方法,主要包含以下几个步骤:(1)利用30 m土地覆盖分类图,计算针阔混交林像元的端元丰度含量;(2)在每一针阔混交林像元内,采用各IGBP类型的质量标识和MODIS/BRDF参数所计算的AFX指数作为约束条件,提取与混交林像元BRDF形状相似的各端元IGBP植被类型的BRDF(f_{iso} , f_{vol} 和 f_{geo}),从而计算出AFX约束下各端元类型的NDHD均值,并将其作为端元NDHD的先验值($NDHD_{prior}$);(3)通过引入线性优化因子 f ,进一步调整和优化端元NDHD先验值,以计算得到NDHD的最优的端元取值 $NDHD'_{prior}$;(4)进一步地,通过CI-NDHD线性模型,即式(4)、(5),来计算亚像元尺度的端元CI,然后根据式(18)估算针阔混交林像元的MFCI。计算针阔混交林像元聚集指数的具体流程图如图2所示。

3.4 NDHD线性混合假设的误差分析

由于植被叶片在可见光波段散射低,尤其在红波段的多次散射几乎可以忽略不计(Breece III和Holmes,1971),因此,本研究假设对于同一种类型植被,红波段的热点和暗点反射率符合光谱线性混合模型,那么,对归一化的热点和暗点指数(NDHD)所给出的函数表达式 $f(\rho_H, \rho_C) = \frac{\rho_H - \rho_C}{\rho_H + \rho_C}$ 应用二阶泰勒展开式可以得到:

$$\left(\frac{\rho_H - \rho_C}{\rho_H + \rho_C} \right) = \frac{\overline{\rho_H} - \overline{\rho_C}}{\overline{\rho_H} + \overline{\rho_C}} + Er \quad (22)$$

$$Er = \frac{1}{2} \cdot f''_{\rho_H \rho_H}(\overline{\rho_H}, \overline{\rho_C}) \cdot \text{Var}(\rho_H) + \frac{1}{2} \cdot f''_{\rho_C \rho_C}(\overline{\rho_H}, \overline{\rho_C}) \cdot \text{Var}(\rho_C) + f''_{\rho_H \rho_C}(\overline{\rho_H}, \overline{\rho_C}) \cdot \text{Cov}(\rho_H, \rho_C) + R_n \quad (23)$$

式中, $f''_{\rho_H \rho_H}$ 、 $f''_{\rho_C \rho_C}$ 和 $f''_{\rho_H \rho_C}$ 是NDHD函数中热点反射率(ρ_H)和暗点反射率(ρ_C)的二阶偏导数, $\text{Var}(\rho_H)$ 和 $\text{Var}(\rho_C)$ 是 ρ_H 和 ρ_C 的方差, $\text{Cov}(\rho_H, \rho_C)$ 是 ρ_H 和 ρ_C 的协方差。

$$\text{Var}(\rho_H) = \sum_{i=1}^n (\rho_{H_i} - \overline{\rho_H})^2 \cdot \text{Per}_i \quad (24)$$

$$\text{Var}(\rho_C) = \sum_{i=1}^n (\rho_{C_i} - \overline{\rho_C})^2 \cdot \text{Per}_i \quad (25)$$

$$\text{Cov}(\rho_H, \rho_C) = \sum_{i=1}^n (\rho_{H_i} - \overline{\rho_H}) \cdot (\rho_{C_i} - \overline{\rho_C}) \cdot \text{Per}_i \quad (26)$$

对式(23)移项可得：

$$\frac{\overline{\rho_H} - \overline{\rho_C}}{\overline{\rho_H} + \overline{\rho_C}} = \left(\frac{\rho_H - \rho_C}{\rho_H + \rho_C} \right) - Er \quad (27)$$

即：

$$\text{NDHD} = \sum_{i=1}^n \text{NDHD}_i \cdot \text{Per}_i - Er \quad (28)$$

通过上述推导可知，端元NDHD的线性混合是像元NDHD的主要成分，受像元组分光谱间相互作用的影响，端元NDHD的线性混合与像元NDHD之间的误差项 Er 主要包括端元热、暗点方向反射率之间的方差、协方差以及二阶泰勒展开式产生的近似误差。由于在红光波段散射小，反射率低，NDHD线性混合的误差对于本研究计算端元CI的影响很小，因此，通常可近似忽略不计。

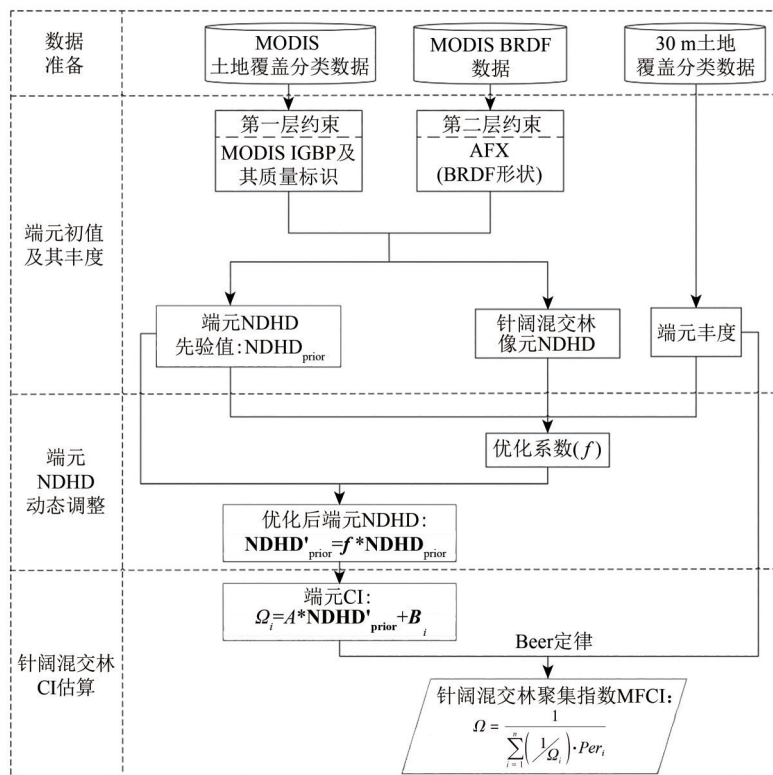


图2 针阔混交林聚集指数估算方法流程图

Fig. 2 Flowchart of MFCI method in the retrieval of CIs for mixed forests with mixture of the needle and broad-leaved components

4 结果与分析

4.1 研究区MFCI估算结果

为了消除MODIS/IGBP分类结果在该研究区误分类的影响，本研究依据IGBP国际分类体系中混交林的定义，基于30 m空间分辨率精细地表覆盖分类数据（GLC_FCS2020），对研究区内MODIS 500 m的土地覆盖分类图中的混交林像元进行了错分校正。校正后共1198个500 m空间分辨率的混交林像元，其中1196个为针阔混交林像元。对于林草混合像元，本文采用相同处理算法进行处理，

但本研究重点放在针阔混交林像元的研究。

图3中，对研究区的针阔混交林像元，进一步通过30 m精细地表覆盖分类数据进行统计的结果表明，针阔混交现象在研究区内十分普遍。其中针叶林树种成数超过30%的混交林像元高达68.66%，针叶林树种成数超过60%的混交林像元也超过17%，因此，现有MODIS CI产品算法中没有考虑混交林中针叶林树种影响而导致的针阔混交林CI估算误差问题，对研究区混交林CI反演精度的影响普遍存在，这也在一定程度上反映了针阔混交林像元CI反演方法改进的必要性。

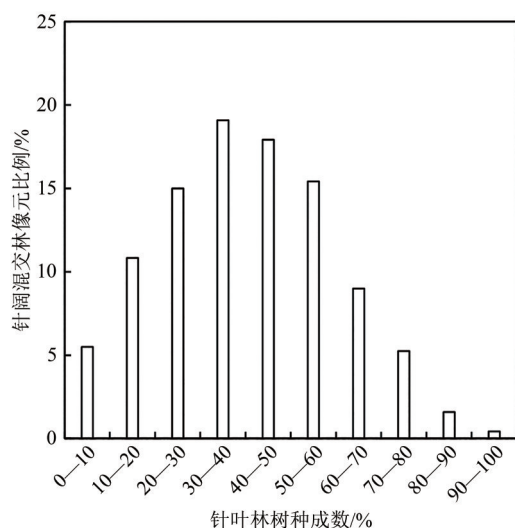


图3 研究区针阔混交林像元的比例随针叶林树种成数的变化

Fig. 3 The proportion of conifer-broadleaf mixed forest pixels in the study area as a function of coniferous forest area percentage

图4为研究区内各混交林像元对应的针叶林、阔叶林端元CI值的空间变化情况，图4中空白部分为其他类型像元，我们在本研究中对这些像元做掩膜处理。从图4可以看出，由于本研究发展的MFCI估算方法采用了逐像元计算的动态端元CI，因此随着像元本身BRDF特征的变化，端元CI在空间上具有较显著的变化，其中，阔叶林类型端元的CI变化范围较大，分布在0.33—1.00，而针叶林类型端元的CI变化较小，主要集中在0.33—0.68。结合基于本算法得到的各混交林像元对应的端元CI值，本文还统计了不同类型端元CI的方差，结果显示，落叶阔叶林(0.56) > 落叶针叶林(0.32) > 常绿针叶林(0.29)，这主要是由于研究区内有较多的阔叶林树种，使混交林像元中阔叶林端元的变化呈现为更大幅度的变化，而研究区中针叶林树种相对单一。

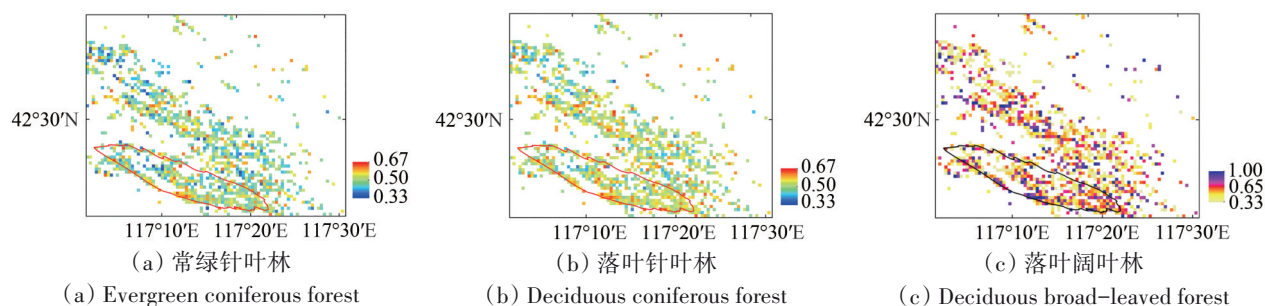


图4 各针阔混交林像元对应的不同树种类型端元CI取值的空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of endmember CI values for different tree species types

图5(a)所示为采用本研究提出的改进算法计算的MFCI的空间分布图，对于非混交林像元类型，本研究仍采用MODIS CI产品值，在本文中简称为MODCI。据统计，研究区域内MODCI的均值为0.6643，MFCI的均值为0.6144。从研究区MFCI

与MODCI之间的差值分布图(图5(b))可以看出，MODCI总体高于MFCI，两者之间呈现出有意义的差异(最大差值为0.27)。结合图1(c)可以看出，这种差异在林草交界处表现的尤为显著。

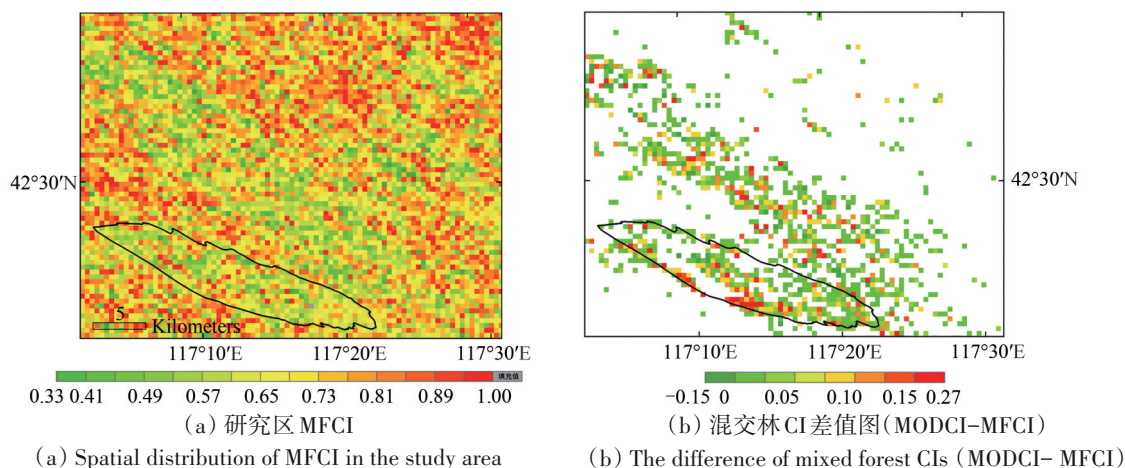


图5 研究区MFCI及其与MODCI差值分布图

Fig.5 Spatial distribution of MFCI and the difference with MODCI

为了进一步探索MFCI相对于MODCI随针叶林树种成数变化的敏感性, 本文统计了MODCI和MFCI随针叶林树种成数的变化趋势(图6)。从图6可以看出, MFCI对针叶林树种成数增加的变化敏感, 其与针阔混交林像元中的针叶林树种成数之间呈现近乎线性的负相关关系。这是由于本研究发展的改进算法考虑了针叶林在混交林像元中的贡献, 而针叶林具有一束多针的针束构造, 从而具有更加显著的聚集现象和更小的CI, 使得MFCI能够对针阔混交林像元中针叶林树种成数的变化表现出良好的响应。相比之下, MODCI则不考虑亚像元尺度的林分树种变化, 直接对混交林像元采用椭圆、半椭圆型树冠适用的式(5), 从而导致MODCI与MFCI之间的差值随着针叶林树种成数的增加而不断增大, 最大可达0.3。

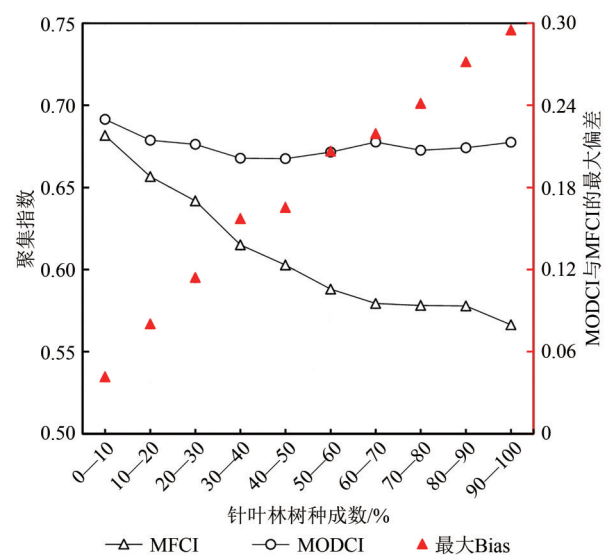


图6 MODCI与MFCI随针叶林树种成数的变化趋势
Fig. 6 Variation of MODCI and MFCI as a function of different coniferous forest area fractions

除此之外, 为分析MFCI和MODCI的差异, 本文进一步提供了MFCI和MODCI的核密度散点图(图7)。从图7可以看出, 虽然MFCI与MODCI有良好的相关性($R^2=0.90$), 但两者之间的总体差异较为显著($RMSE=0.07$, $Bias=0.05$)。尤其是当 $CI>0.6$ 时, MODCI相对于MFCI表现出更为明显的高估, 这种高估显然与混交林像元中针叶林树种的成数有密切关系, 结合图7, 我们可以近似估算出两者差异(即, $MODCI-MFCI$)随针叶林树种成数增加的定量变化关系。

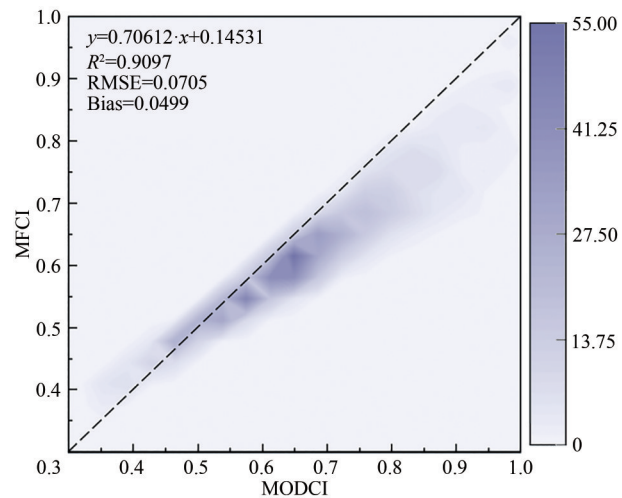


图7 MODCI与MFCI的核密度散点图
Fig. 7 Kernel density plot of MODCI and MFCI

4.2 结果验证

表2提供了地面测量的CI值、本方法反演MFCI值、MODIS产品的对应CI值以及MODIS混交林像元的针叶林和阔叶林端元CI值。

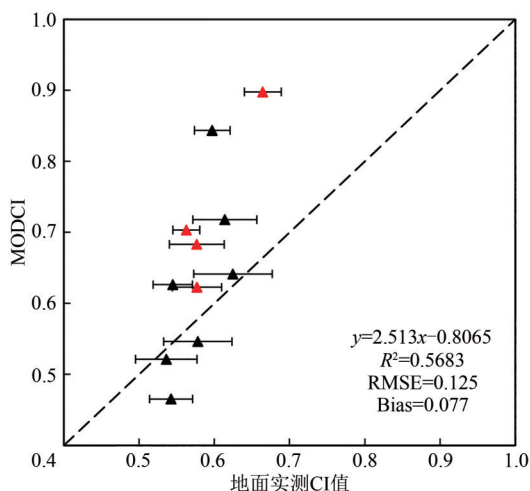
表2 针阔混交林CI反演值与地面实测CI的数据情况
Table 2 Data of CI inversion values and ground-truthing CI of mixed needle and broad leaf forests

地面测量站点	地面实测CI	MFCI	MODCI
P1	0.5767	0.6070	0.6831
P2	0.5629	0.6309	0.7034
P3	0.577	0.5793	0.6227
P4	0.6140	0.6766	0.7179
P5	0.5363	0.5245	0.5212
P6	0.5448	0.6043	0.6263
P7	0.6248	0.6212	0.6415
P8	0.5427	0.4695	0.4652
P9	0.5973	0.7651	0.8436
P10	0.5781	0.5359	0.5461
P11	0.6643	0.7115	0.8977
平均值	0.5835	0.6114	0.6608
标准差	0.0391	0.0853	0.1300

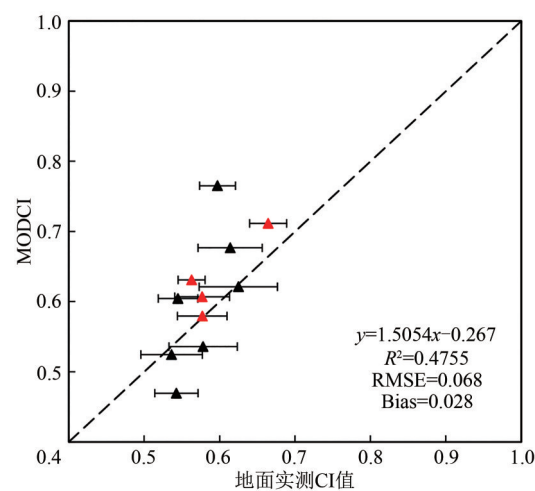
图8为现有MODIS CI产品(MODCI)以及MFCI与地面实测的CI数据的散点图。其中, 树种成数是指构成林分的树种成分及其所占的比例。从验证结果看, 相对于地面站点的实测数据, 本研究计算得到的MFCI使得MODIS针阔混交林类型的CI反演值表现了较为显著的精度改善, 其中, RMSE从0.125降至0.068, 降低了约84%, Bias从

0.077降至0.028,降低了约175%。然而由于实测数据分布相对集中且数量较少, R^2 并未表现有意

义的变化。这些统计结果表明, MFCI对针阔混交林像元的CI反演精度有显著的改善效果。



(a) MODCI与地面实测CI的散点图



(b) MFCI与地面实测CI的散点图

(a) Scatter plots to compare MODCI with ground-measured CIs (b) Scatter plots to compare MFCI with ground-measured CIs

针叶林树种成数: ▲ 10%—30% ▲ 30%—70%

图8 针阔混交林CI反演值与地面实测CI的散点图

Fig. 8 Scatter plots to compare retrieved CIs with ground-measured CIs

对于本文所提出的方法, 其结果取决于针阔混交林像元中针叶林树种的成数, 在此, 我们评估了不同地面测量站点的MFCI相对于现有MODCI估算精度的差异(图9)。由图9可以看出, 总体上, 针叶林树种成数越高, MFCI的精度改善越显著, 当针叶林树种成数达到60%以上时, MFCI对针阔混交林CI估算精度的改善可达28%以上。

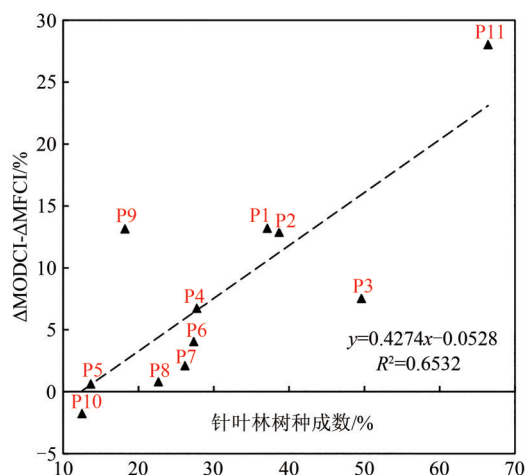


图9 $\Delta\text{MODCI}-\Delta\text{MFCI}$ 随地面站点针叶林成数的变化, 其中, $\Delta\text{MODCI}=|\text{MODCI}-\text{CI}_{\text{measured}}|/\text{CI}_{\text{measured}}$;

$\Delta\text{MFCI}=|\text{MFCI}-\text{CI}_{\text{measured}}|/\text{CI}_{\text{measured}}$

Fig. 9 $\Delta\text{MODCI}-\Delta\text{MFCI}$ changing as a function of percentage of needle-leaved component in a mixed forest pixels at in-situ sites

另一方面, 由于本方法所估算的MFCI需要满足NDHD-CI线性模型, 这表明MFCI还与像元本身的BRDF特性有关, 因此其改进效果还受到MODIS BRDF参数产品本身的影响。像元的热点反射率越低, 相应的NDHD也就越低, 此时, 对应不同冠层形状NDHD-CI反演系数的CI反演结果差异越大, 因此MFCI相对于MODCI的改进效果也会越显著。例如站点P9, 虽然针叶林树种成数小于20%, 但同样表现了显著的精度改善效果, 然而, 对于站点P3而言, 虽然针叶林树种成数接近于50%, 但改善效果不显著, 这正是由于考虑其端元NDHD变化影响的结果, 这是现有绝大多数混交林CI估算方法研究没有解决的问题。

此外, 地面实测的数据分布以及均匀程度可能也在一定程度上影响了站点进行精度验证的代表性, 这在以后的工作中需要结合计算机模拟方法进一步研究。

表3提供了常绿针叶林、落叶针叶林以及落叶阔叶林端元CI与地面实测CI的数据情况, 部分站点像元中亚像元树种类型无实测数据覆盖或不同时包含常绿针叶林、落叶针叶林以及落叶阔叶林类型。图10中评估了端元CI反演值的精度表现。研究结果显示, 针叶林端元CI反演值有不同程度

的偏低，而阔叶林端元的CI反演值相对偏高。这主要是由于在本文的实验区内，对亚像元尺度的各树种而言，实测数据分布并不均匀，且测量数据量较少，可能代表性不足；另一方面，本文中所采用的地表分类图在该区域的针对性不足，而

分类精度对CI反演的影响很大，这在一定程度上影响验证的结果。同时，本算法目前很难有效选择高精度的端元BRDF，从而也有可能使端元的反演产生不确定性。

表 3 端元CI反演值与地面实测CI的数据情况

Table 3 Data of endmember CI inversion values and ground-truthing CI of mixed needle and broad leaf forests						
站点	常绿针叶林		落叶针叶林		落叶阔叶林	
	实测 CI	反演 CI	实测 CI	反演 CI	实测 CI	反演 CI
P1	—	—	0.5663	0.5504	0.5992	0.7370
P2	0.5400	0.5176	0.5433	0.5520	0.5812	0.7371
P3	0.5433	0.4637	0.5746	0.5060	—	—
P4	0.5300	0.5216	0.5750	0.5543	0.6216	0.7377
P5	—	—	0.5686	0.4572	0.5881	0.5342
P6	—	—	0.5633	0.5137	0.5728	0.6396
P7	0.5650	0.4746	0.5600	0.5128	0.6287	0.6640
P8	0.4300	0.4262	0.535	0.4623	0.5336	0.4695
P9	—	—	0.5743	0.6038	0.6379	0.8454
P10	0.4900	0.4917	0.5700	0.4953	0.5789	0.5536
P11	0.6485	0.6071	0.6271	0.6313	—	—
均值	0.5353	0.5004	0.5679	0.5308	0.5936	0.6576

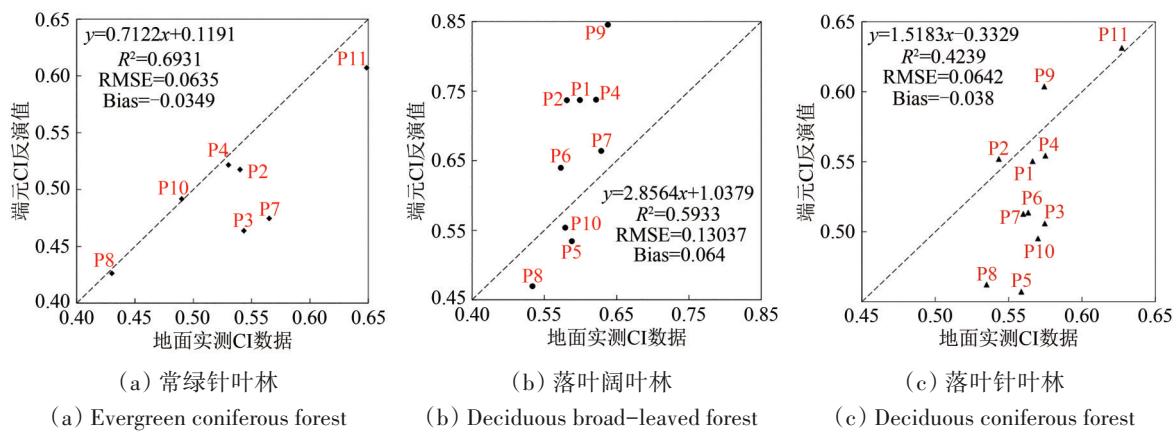


图 10 不同森林类型端元的CI反演值与各站点地面实测数据的散点图

Fig. 10 Scatter plots to compare retrieved endmember CIs with ground-measured CIs

5 结 论

现有卫星CI产品的混交林像元通常采用CI-NDHD模型的阔叶林估算系数，从而在理论上增加了CI产品的不确定性。本研究提出了一种对端元CI动态调整的针阔混交林像元MFCI的估算方法，提高了针阔混交林CI的估算精度。首先，根据30 m空间分辨率的精细地表覆盖分类图进行端元识别；其次，结合IGBP地表生态类型与AFX/

BRDF形状逐像元计算端元CI；然后，利用端元CI和精细地表覆盖分类数据计算针阔混交林像元的CI；最后，基于地面站点实测CI进行精度评估。本文结论如下：

- (1) 现有MODIS CI产品算法未考虑针阔混交林像元类型中针阔混合带来的影响，导致了针阔混交林像元的高估，当针叶林树种成数达到60%时，其对针阔混交林像元CI的高估可达35%以上；
- (2) 本研究提出的MFCI估算方法较显著地改

善了针阔混交林聚集指数的估算精度,且通常针叶林树种成数越大,MFCI精度改善的效果越显著。对于针叶林树种成数达到60%的针阔混交林像元,MFCI的精度改善可达28%以上,改进后结果的均方根误差(RMSE)和偏差(Bias)各降低约84%和175%。

(3) 通过与现有MODIS CI产品的对比分析表明,对于针阔混交林像元,本文提出的MFCI方法对像元中针叶林树种成数的变化敏感,随针叶林在混交林像元中所占面积比例的增大而表现出明显下降的趋势。

目前,针阔混交问题对中分辨率卫星CI产品的精度具有不同程度的影响,随着定量遥感的不断发展,全球碳、水循环等方面的研究势必会对地表参数的反演精度提出更高的要求。本研究基于高空间分辨率的精细地表覆盖分类数据发展了MFCI估算方法,为提高全球混交林CI产品的估算精度提供了有意义的探索和可能的解决方案。

然而,本研究也需要考虑一些不确定性因素的影响。例如,研究中忽略了针叶林和阔叶林树种之间孔隙率的差异,以及端元与像元孔隙率的差异,采用了G函数的球形分布假设,以及端元的代表性及其精度评估和验证等,这些问题在遥感机理研究中具有很大的挑战性。其次,由于BRDF存在尺度效应问题,混合像元的表面各向异性反射特性代表该像元生态系统整体的复杂结构响应(Román等,2011),本研究以混交林像元的BRDF特征来约束端元选取,在一定程度上会造成端元选取的不确定性,因此,如何验证这些端元的精度是一个很大的挑战,尤其对于一些因自然或人为扰动所导致的部分端元类型结构异质性过大的混交林像元,端元CI的反演精度的验证有更大挑战。除此之外,即使对本研究中采用的30 m土地覆盖分类数据而言,仍具有少量端元类型不明确的混交林类型,但在可预见的将来,随着全球可用的精细地表覆盖分类数据的持续发展,这一问题也将会得到进一步验证和更有效地解决。针对这些问题,我们下一步研究将利用已有的高分辨率土地覆盖分类数据,研究全球或区域尺度,例如,北方森林区(Boreal Forest)混交林区域聚集指数估算精度的改进,为改进全球MODIS CI产品的精度做进一步研究探索,为用户提供更高精度的植被聚集指数产品。考虑到现有针阔混交林

像元的实测数据较少,因此,一方面需要我们在更大尺度上进行混交林像元CI验证数据的测量和积累,另一方面,也可以结合计算机模拟场景的重建,研究针阔混交林亚像元组分空间结构变化对像元CI以及BRDF形状特征等的影响,从而在理论和方法上对针阔混交林像元进行更深入细致的CI建模、反演和应用研究。

参考文献(References)

- Baldocchi D D and Harley P C. 1995. Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. *Plant, Cell & Environment*, 18 (10): 1157-1173 [DOI: 10.1111/j.1365-3040.1995.tb00626.x]
- Bartelink H H. 1998. Radiation interception by forest trees: a simulation study on effects of stand density and foliage clustering on absorption and transmission. *Ecological Modelling*, 105(2/3): 213-225 [DOI: 10.1016/S0304-3800(97)00165-8]
- Breece III H T and Holmes R A. 1971. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo. *Applied Optics*, 10(1): 119-127 [DOI: 10.1364/AO.10.000119]
- Chang Y X, Jiao Z T, Dong Y D, Zhang X N, He D D, Yin S Y, Cui L and Ding A X. 2019. Parameterization and correction of hotspot parameters of Ross-Li kernel driven models on POLDER dataset. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(4): 661-672 (常雅轩, 焦子铄, 董亚冬, 张小宁, 何丹丹, 尹思阳, 崔磊, 丁安心. 2019. Ross-Li核驱动模型热点参数化及其校正——以POLDER数据为例. *遥感学报*, 23(4): 661-672) [DOI: 10.11834/jrs.20198332]
- Chang Y X, Jiao Z T, Zhang X N, Mei L L, Dong Y D, Yin S Y, Cui L, Ding A X, Guo J, Xie R, Zhu Z D and Li S J. 2021. Assessment of improved Ross-Li BRDF models emphasizing albedo estimates at large solar angles using POLDER data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(12): 9968-9986 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3030948]
- Chen J M and Black T A. 1991. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57(1/3): 1-12 [DOI: 10.1016/0168-1923(91)90074-Z]
- Chen J M and Cihlar J. 1995. Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3): 777-787 [DOI: 10.1109/36.387593]
- Chen J M and Cihlar J. 1997. A hotspot function in a simple bidirectional reflectance model for satellite applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D22): 25907-25913 [DOI: 10.1029/97JD02010]
- 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 J M, Liu J, Leblanc S G and Roujean J L. 2003. Multi-angular

- optical remote sensing for assessing vegetation structure and carbon absorption. *Remote Sensing of Environment*, 84(4): 516-525 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00150-5]
- Chen J M, Menges C H and Leblanc S G. 2005. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 97(4): 447-457 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.05.003]
- Chen J M, Mo G, Pisek J, Liu J, Deng F, Ishizawa M and Chan D. 2012. Effects of foliage clumping on the estimation of global terrestrial gross primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1): GB1019 [DOI: 10.1029/2010GB003996]
- Dong Y D, Jiao Z T, Cui L, Zhang H, Zhang X N, Yin S Y, Ding A X, Chang Y X, Xie R and Guo J. 2019. Assessment of the hotspot effect for the PROSAIL model with POLDER hotspot observations based on the hotspot-enhanced kernel-driven BRDF model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(10): 8048-8064 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2917923]
- Dong Y D, Jiao Z T, Zhang H, Li J Y, Jiao G P, Shi H Y. 2014. Efficient algorithm for improving the hotspot effect of the operational MODIS BRDF product. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 18(4): 804-825 (董亚冬, 焦子锜, 张虎, 李佳悦, 焦广平, 石涵予. 2014. 改善 MODIS BRDF 产品热点效应的方法研究. *遥感学报*, 18(4): 804-825) [DOI: 10.11834/jrs.20143229]
- Friedl M A, Mciver D K, Hodges J C F, Zhang X Y, Muchoney D, Strahler A H, Woodcock C E, Gopal S, Schneider A, Cooper A, Baccini A, Gao F and Schaaf C. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 287-302 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00078-0]
- He L M, Chen J M, Pisek J, Schaaf C B and Strahler A H. 2012. Global clumping index map derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sensing of Environment*, 119: 118-130. [DOI: 10.1016/j.rse.2011.12.008]
- Huang T, Fan W Y, Mao X G and Yu Y. 2017. Foliage clumping index of main vegetation types in Daxing'an Mountains, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(3): 757-762 (黄婷, 范文义, 毛学刚, 于颖. 2017. 大兴安岭地区主要植被类型的叶片聚集度系数. *应用生态学报*, 28(3): 757-762) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.201703.011]
- Jiao Z T, Dong Y D, Schaaf C B, Chen J M, Román M, Wang Z S, Zhang H, Ding A X, Erb A, Hill M J, Zhang X N and Strahler A. 2018. An algorithm for the retrieval of the clumping index (CI) from the MODIS BRDF product using an adjusted version of the kernel-driven BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, 209: 594-611. [DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.041]
- Jiao Z T, Hill M J, Schaaf C B, Zhang H, Wang Z S and Li X W. 2014. An anisotropic flat index (AFX) to derive BRDF archetypes from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 141: 168-187 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.017]
- Jiao Z T, Li X W, Wang J D and Zhang H. 2011. Assessment of MODIS BRDF shape indicators. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 15(3): 432-456 (焦子锜, 李小文, 王锦地, 张虎. 2011. 评估 MODIS 的 BRDF 角度指数产品. *遥感学报*, 15(3): 432-456) [DOI: 10.11834/jrs.20110073]
- Jiao Z T, Schaaf C B, Dong Y D, Román M, Hill M J and Chen J M, Wang Z S, Zhang H, Saenz E, Poudyal R, Gatebe C, Bréon F M, Li X W and Strahler A. 2016. A method for improving hotspot directional signatures in BRDF models used for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 186: 135-151 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.08.007]
- Kucharik C J, Norman J M and Gower S T. 1999. Characterization of radiation regimes in nonrandom forest canopies: theory, measurements, and a simplified modeling approach. *Tree Physiology*, 19 (11): 695-706 [DOI: 10.1093/treephys/19.11.695]
- 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]
- Liu J, Chen J M and Cihlar J. 2003. Mapping evapotranspiration based on remote sensing: an application to Canada's landmass. *Water Resources Research*, 39(7): 1189 [DOI: 10.1029/2002WR001680]
- Luo D, Shi Z M, Wang W X, Liu S R, Liu L H, Ming A G and Yu H L. 2015. Carbon and nitrogen storage in monoculture and mixed young plantation stands of *Erythrophloeum fordii* and *Pinus massoniana* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 35(18): 6051-6059 (罗达, 史作民, 王卫霞, 刘世荣, 卢立华, 明安刚, 于浩龙. 2015. 南亚热带格木、马尾松幼龄人工纯林及其混交林生态系统碳氮储量. *生态学报*, 35(18): 6051-6059) [DOI: 10.5846/stxb201401030018]
- Ma L L, Li C R, Tang B H, Tang L L, Bi Y Y, Zhou B Y and Li Z L. 2008. Impact of spatial LAI heterogeneity on estimate of directional gap fraction from SPOT-satellite data. *Sensors*, 8(6): 3767-3779 [DOI: 10.3390/s8063767]
- Ma Q M, Li Y J, Li J and Liu Q H. 2019. Modeling of mixed-pixel clumping index from remote sensing data and its evaluation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2320-2331 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2897818]
- Maignan F, Bréon F M and Lacaze R. 2004. Bidirectional reflectance of Earth targets: evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the hot spot. *Remote Sensing of Environment*, 90(2): 210-220 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.006]
- Mu X H, Yan G J, Zhou H M, Pang Y, Qiu F, Zhang Q, Zhang Y G, Xie D H, Zhou Y J, Zhao T J, Zhong B, Song J L, Sun R, Jiang L M, Yin S Y, Li F, Jiao Z T, Qu Y H, Zhang W M, Cheng S and Cui T X. 2021. Airborne comprehensive remote sensing experiment of forest and grass resources in Xiaoluan River Basin. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(4): 888-903 (穆西哈, 阎广建, 周红敏, 庞勇, 邱凤, 张乾, 张永光, 谢东辉, 周盈吉, 赵天杰, 仲波, 宋金玲, 孙睿, 蒋玲梅, 尹思阳, 李凡, 焦子锜, 屈永华, 张吴明, 程顺, 崔同祥. 2021. 小滦河流域复杂地表碳循环遥感综合试验. *遥感学报*, 25(4): 888-903) [DOI: 10.11834/jrs.20210305]

- Myneni R B, Ross J, Asrar G. 1989. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 45 (1/2): 1-153 [DOI: 10.1016/0168-1923(89)90002-6]
- Nilson T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agricultural Meteorology*, 8: 25-38 [DOI: 10.1016/0002-1571(71)90092-6]
- Nilson T and Peterson U. 1991. A forest canopy reflectance model and a test case. *Remote Sensing of Environment*, 37(2): 131-142 [DOI: 10.1016/0034-4257(91)90024-Z]
- Pisek J, Chen J M and Nilson T. 2011. Estimation of vegetation clumping index using MODIS BRDF data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(9): 2645-2657 [DOI: 10.1080/01431161.2010.507611]
- Román M O, Gatebe C K, Schaaf C B, Poudyal R, Wang Z S and King M D. 2011. Variability in surface BRDF at different spatial scales (30m—500m) over a mixed agricultural landscape as retrieved from airborne and satellite spectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115(9): 2184-2203 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.012]
- Ross J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands [M]. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/978-94-009-8647-3]
- Roujean J L and Lacaze R. 2002. Global mapping of vegetation parameters from POLDER multiangular measurements for studies of surface-atmosphere interactions: A pragmatic method and its validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D12): 4150 [DOI: 10.1029/2001JD000751]
- Ryu Y, Sonnentag O, Nilson T, Vargas R, Kobayashi H, Wenk R and Baldocchi D D. 2010. How to quantify tree leaf area index in an open savanna ecosystem: A multi-instrument and multi-model approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1): 63-76.
- Schaaf C B, Gao F, Strahler A H, Lucht W, Li X W, Tsang T, Strugnell N C, Zhang X Y, Jin Y F, Muller J P, Lewis P, Barnsley M, Hobson P, Disney M, Roberts G, Dunderdale M, Doll C, D'entremont R P, Hu B X, Liang S L, Privette J L and Roy D. 2002. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 83(1/2): 135-148 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00091-3]
- Stenberg P. 1998. Implications of shoot structure on the rate of photosynthesis at different levels in a coniferous canopy using a model incorporating grouping and penumbra. *Functional Ecology*, 12(1): 82-91 [DOI: 10.1046/j.1365-2435.1998.00169.x]
- Strahler A H. 1997. Vegetation canopy reflectance modeling—recent developments and remote sensing perspectives. *Remote Sensing Reviews*, 15(1/4): 179-194 [DOI: 10.1080/02757259709532337]
- Strahler A H and Jupp D L B. 1990. Modeling bidirectional reflectance of forests and woodlands using Boolean models and geometric optics. *Remote Sensing of Environment*, 34(3): 153-166.
- Sun Q, Jiao Q J, Liu L Y, Liu X J, Qian X J, Zhang X and Zhang B. 2021. Improving the retrieval of forest canopy chlorophyll content from MERIS dataset by introducing the vegetation clumping index. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 5515-5528 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3082621]
- Tang S, Chen J M, Zhu Q, Li X, Chen M, Sun R, Zhou Y, Deng F and Xie D. 2007. LAI inversion algorithm based on directional reflectance kernels. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 638-648 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.08.018]
- 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]
- Wei S S and Fang H L. 2016. Estimation of canopy clumping index from MISR and MODIS sensors using the normalized difference hotspot and darkspot (NDHD) method: the influence of BRDF models and solar zenith angle. *Remote Sensing of Environment*, 187: 476-491 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.10.039]
- Wu H, Tang B H and Li Z L. 2013. Impact of nonlinearity and discontinuity on the spatial scaling effects of the leaf area index retrieved from remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(9/10): 3503-3519 [DOI: 10.1080/01431161.2012.716537]
- Yin G F, Li J, Liu Q H, Zeng Y L, Xu B D, Yang L and Zhao J. 2015. Improving leaf area index retrieval over heterogeneous surface by integrating textural and contextual information: a case study in the Heihe river basin. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(2): 359-363 [DOI: 10.1109/LGRS.2014.2341925]
- Yin G F, Liu Q H, Li J, Zeng Y L and Xu B D. 2014. Effect of crown shape on the estimation of gap probability and leaf area index. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 18(4): 752-759 (尹高飞, 柳钦火, 李静, 曾也鲁, 徐保东. 2014. 树冠形状对孔隙率及叶面积指数估算的影响分析. 遥感学报, 18(4): 752-759) [DOI: 10.11834/jrs.20143205]
- Zhang H, Jiao Z T, Dong Y D, Li J Y and Li X W. 2015. Albedo retrieved from BRDF archetype and surface directional reflectance. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 19(3): 355-367 (张虎, 焦子铄, 董亚冬, 李佳悦, 李小红. 2015. 利用BRDF原型和单方向反射率数据估算地表反照率. 遥感学报, 19(3): 355-367) [DOI: 10.11834/jrs.20154131]
- Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Xie S and Gao Y. 2019. Fine land-cover mapping in China using Landsat Datacube and an operational SPEClib-based approach. *Remote Sensing*, 11(9): 1056 [DOI: 10.3390/rs11091056]
- Zhang X, Liu L Y, Wu C S, Chen X D, Gao Y, Xie S and Zhang B. 2020. Development of a global 30 m impervious surface map using multisource and multitemporal remote sensing datasets with the Google Earth Engine platform. *Earth System Science Data*, 12 (3): 1625-1648 [DOI: 10.5194/essd-12-1625-2020]
- Zhou Y, Zhang Z W, Wen S, Sun H and Liu Q. 2021. Changes of light response indicators and its impact factors of *Larix principis-rupprechtii* on Saihanba forest farm, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(5): 1690-1698 (周颖, 张泽文, 温烁, 孙赫, 刘强. 2021. 塞罕坝华北落叶松针叶光响应指标变化规律及其影响因素. 应用生态学报, 32(5): 1690-1698) [DOI: 10.13287/j.1001-9332.202105.002]
- Zhu G L. 2016. Spatial-temporal characteristics of foliage clumping index in China during 2000-2013. *Chinese Science Bulletin*, 61(14): 1001-9332.202105.002]

1595-1603 (朱高龙. 2016. 2000 ~ 2013 年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征. 科学通报, 61(14): 1595-1603) [DOI: 10.1360/N972015-00987]
Zhu G L, Ju W M, Chen J M, Gong P, Xing B L and Zhu J F. 2012. Fo-

liage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(6): 2122-2137 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2172213]

An improved method for estimating clumping index in mixed coniferous and broadleaved forests using BRDF shape of surface ecotype as constraints

XIE Rui^{1,2}, JIAO Ziti^{1,2}, DONG Yadong^{2,3}, CUI Lei^{1,2}, YIN Siyang^{1,2}, ZHANG Xiaoning^{1,2},
CHANG Yaxuan^{1,2}, GUO Jing^{1,2}

1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.Skate Key Laboratory of Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3.Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The foliage Clumping Index (CI) is an important structural parameter of vegetation canopies. The CI influences radiation interception within canopies and plays an important role in the study of global carbon and water cycles. Currently, the widely used method for deriving satellite-borne CI products is based on a linear model constructed on the basis of the CI and the Normalized Difference between the Hotspot and Dark spot (NDHD) angular indices. As coniferous and broadleaf forests exhibit aggregate differences at the leaf scale, the CI inversion model can be applied to a variety of coefficients to generate different CI-NDHD models. Modelers typically use CI inversion coefficients of broadleaf forests to estimate the CI of coniferous-broadleaf mixed forests for medium-coarse resolution pixels, but this approach can theoretically cause a CI overestimation for this landcover type. Thus, in this study, we propose a novel coniferous-broadleaf Mixed Forest CI (MFCI) estimation method to dynamically select the endmember CIs of mixed forests pixel by pixel. The proposed method was successfully applied to satellite-borne MODIS data. The MFCI of the tree-farm study area on Saihanba was estimated, and the accuracy of the results was validated using ground-measured CIs.

The MFCI was estimated by considering land cover classes and the Anisotropy Flatness Index (AFX), which describes the basic Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) variation. First, the prior values of the endmember NDHD were extracted pixel by pixel by imposing double constraints on the landcover type of the International Geosphere – Biosphere Program and the surface AFX, which characterize the shape of the BRDF. Then, the high-resolution land cover classification data were used to obtain the proportions of the endmembers in the coniferous-broadleaf mixed forest pixels. An optimization factor f was introduced to eliminate the differences between the NDHD of mixed forest pixels and the NDHD prior values of different vegetation cover types based on the NDHD linear mixing assumption. Then, the endmember CIs were calculated. Finally, the endmember CIs, combined with endmember abundance, were used to estimate the MFCIs based on Beer's law.

First, the existing MODIS CI product algorithm does not consider coniferous-broadleaf mixed forest pixels within mixed forest pixels, which leads to overestimation of coniferous – broadleaf mixed forest CIs. When the proportion of coniferous species reaches 60% in a mixed forest pixel, the overestimation of the CI can exceed 35%. Second, the proposed MFCI estimation method based on the CI-NDHD algorithm can significantly improve the CI estimation accuracy of coniferous-broadleaf mixed forest pixels. When the proportion of coniferous forest in the mixed forest pixels reached 60%, the accuracy improved by 28.03%. The root mean-square error and bias for the enhanced results were reduced by approximately 84% and 175%, respectively. Third, the MFCI method is more sensitive than the current MODIS CI products to changes in coniferous and broadleaf forest structures in mixed forest pixels.

The current satellite CI products for mixed forest pixels typically use the modeled coefficients of broadleaf forests in the CI-NDHD model, which theoretically implies increased uncertainty in CI products. In this study, the proposed MFCI estimation method was used for coniferous-broadleaf forest mixed pixels. The CI endmembers were dynamically adjusted. The validation based on ground-measured CIs showed that the proposed method was significantly more accurate than the current MODIS CI products in terms of estimating the CI of mixed coniferous and broadleaved forests. In summary, the MFCI estimation method improved the estimation accuracy of mixed forest CI products in the selected study area. The proposed method is a promising technique for further improving the accuracy of global CI products.

Key words: remote sensing, clumping index, mixed forest, MODIS, AFX, NDHD, MFCI

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFA0605503); National Natural Science Foundation of China (No. 41971288, 41571326)