

引用格式: YE Yuyang, QI Jianbo, CAO Ying, *et al.* Relationship between $FPAR_{green}$ and several vegetation indices in heterogeneous vegetation based on LESS model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(1): 51-65. [叶雨洋, 漆建波, 曹颖, 等. 基于LESS模型的异质植被冠层光合有效辐射吸收比与植被指数的关系研究[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(1): 51-65.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.1.0051

基于LESS模型的异质植被冠层光合有效辐射吸收比与植被指数的关系研究

叶雨洋^{1,2}, 漆建波², 曹颖², 蒋靖怡²

(1. 北京师范大学 环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875;

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

摘要: 研究植被指数与光合有效辐射吸收比 $FPAR$ 的定量关系对于提高 $FPAR$ 反演精度与指导生产实践具有一定的参考价值。研究在三维辐射传输模型 LESS 基础上发展了一个兼具一维模型简洁和三维模型精度优势的 LESS1D 模块(已随 LESS 模型正式发布, www.lessrt.org); 探究随机均匀场景和三维异质场景中植被冠形、盖度等 7 种因素对 6 种植被指数与 $FPAR_{green}$ 关系的影响。结果表明: ①在均质性场景中, $NDVI$ 、 $SAVI$ 、 EVI 对 $FPAR_{green}$ 拟合相对最优, 而在异质性场景中, 则为 $NDVI$ 和 RVI 。②在异质性场景中, 不同冠形下 $FPAR_{green}$ 与植被指数的拟合精度为圆柱形 > 椭球形 > 圆锥形; 植被盖度较低时, 植被指数对 $FPAR_{green}$ 拟合精度较差; 随着太阳天顶角增大, RVI 与 $FPAR_{green}$ 由线性关系变为指数关系。结论: 树冠体积和树冠几何结构是不同冠形影响 $FPAR_{green}$ 大小的关键因素, 而叶片聚集度、植被盖度和植被指数类型则是影响植被指数饱和效应的相关因素。

关键词: 三维辐射传输; LESS; $FPAR_{green}$; 植被指数; 异质场景

中图分类号: Q945.11; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2023)01-0051-15

1 引言

光合有效辐射吸收比 $FPAR$ (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) 是指植被冠层光合作用吸收的太阳辐射占到达植被冠层顶部的太阳辐射 PAR (Photosynthetically Active Radiation) 的比例, 是直接反映植被冠层对光能的截获、吸收能力的重要参数。 $FPAR$ 作为城市生态的重要输入变量, 与植被的各生理生化过程和碳循环等关系密切, 并且 $FPAR$ 在估算植被健康、评估冠层初级生产力 (GPP)、城市绿地降温效应、大气—

陆面生物圈之间的能量、水分和 CO_2 的交换等方面起到至关重要的作用^[1-4]。因此, $FPAR$ 的准确获取在绿地改善设计、碳循环研究、植被生产力估算、陆地生态系统过程研究、全球气候变化研究等方面具有重要意义。

$FPAR$ 的获取途径主要有地面定点实测法和基于遥感反演 $FPAR$ 的模型估算法。前者通过冠层分析仪可以较为准确地、实时地获取植被冠层 $FPAR$, 但实测法只能采集单点信息, 仅适用于少数冠层开阔的植物^[5], 且受限于天气状况、人力、财力等客观因素, 难以研究植被 $FPAR$ 的高分辨率空间

收稿日期: 2022-04-28; 修订日期: 2022-10-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42001279), 国家自然科学基金重点项目 (42130111)。

作者简介: 叶雨洋 (2000—), 女, 福建三明人, 硕士研究生, 主要从事林业遥感应用、城市生态系统管理。E-mail: yeyuyang_bnu@163.com

通讯作者: 漆建波 (1989—), 男, 四川德阳人, 博士, 副教授, 主要从事植被定量遥感辐射传输建模与应用方面的研究。

E-mail: jianboqi@bjfu.edu.cn

异质性以及不同因素对FPAR的影响;后者借助遥感手段能够实现不同尺度上FPAR的快速获取,相较实测法操作更简便、应用更广泛。基于遥感的FPAR估算方法主要包括:以植被指数为手段的经验性统计与半机理方法和以冠层反射模型为基础的估算方法,其中植被指数方法由于参数少、运算效率高等优点得到广泛运用,是光能利用率模型中获取FPAR的主要途径^[6]。探究更加符合真实场景的FPAR与植被指数之间的关系有助于优化遥感产品反演FPAR的经验模型,提高反演精度,是目前国际重要的研究方向^[7-8]。但笼统的植被指数经验模型会对FPAR的反演造成较大误差。例如, Myneni等^[9]的研究表明, FPAR和NDVI呈近线性函数关系;而Wiegand等^[10]发现玉米、棉花的FPAR与NDVI成指数关系,而与PVI则成线性关系,研究结果表明相对于PVI,NDVI更适合于作物FPAR的估算。

FPAR_{green}是植被中的绿色叶片对光合有效辐射的吸收比率^[11],是对FPAR的细化和发展。Asner等^[12]发现当LAI小于3.0,非光合组分吸收的太阳辐射使FPAR的值增加10%~40%。Chen^[13]表明非光合组分吸收的太阳辐射不参与光合作用,对估算GPP和生物量没有实际意义,反而会因光能吸收与光利用率LUE不匹配而产生不确定性,将冠层的FPAR精细到绿色叶片FPAR_{green},可以有效地解决该问题。Jenknis等^[14]发现在作物返青时期,NDVI与FPAR更多是线性关系,但在叶片枯黄时期则表现出非线性关系。植被冠层的非光合组分(树干、枝茎、枯叶)对冠层FPAR有较大影响,精细到绿色叶片FPAR_{green}与植被指数关系的研究,对于提高FPAR与植被指数关系经验模型的相关程度和应用范围,进而提高植被FPAR的反演精度具有重要意义。

目前已有的对于FPAR_{green}与植被指数关系的研究结论主要基于一维辐射传输模型。董恒等^[15]利用PROSAIL模型探究不同叶倾角分布和土壤背景反射率下FPAR_{green}与多种常见植被指数的线性拟合精度,结果表明NDVI、SAVI和EVI的线性拟合精度都保持在0.9以上。徐富宝^[16]利用PROSAIL模型模拟不同叶面积指数、叶倾角分布、叶绿素含量下FPAR_{green}与植被指数关系,其中NDVI、EVI和MSAVI与FPAR_{green}具有非常好的相关性,线性拟合精度均在0.97以上,认为这3种植被指数

能够用来精确反映FPAR_{green}的变化。传统的一维辐射传输模型建立在简化和抽象描述地物结构特征的基础上,将植被冠层简化为水平均匀分布的叶片理想模型,难以描述精细的植被结构,影响植被反射率模拟及生物光学参数反演的准确性,因此基于一维辐射传输模型建立的FPAR_{green}与植被指数经验模型在真实场景中可能存在较大误差,对真实场景中植被FPAR的反演精度可能造成显著偏差。

随着计算技术以及三维信息获取技术的飞速发展,三维辐射传输模型近年来受到了越来越多的重视。基于真实结构的三维辐射传输模型可以很好地考虑传感器观测和太阳入射方向、地表辐照度的直射与漫散射,以及场景复杂的三维结构问题^[17],能够准确描述空间异质性。但现有的三维辐射传输模型面临的一个重要问题是计算效率低以及模拟场景小,多数模型为了提高计算效率,采用简化场景结构的做法。漆建波等^[18]基于光线追踪算法发展了三维辐射传输模型LESS (Large-Scale remote sensing data and image Simulation framework),该模型以三角面片形式准确构建三维真实场景结构,进行前向光线追踪和后向光线追踪的同时充分考虑植被的多种组分光谱和结构特征^[19],并以虚拟实验室的形式充分保留了三维场景的多尺度(叶片尺度—冠层尺度—区域尺度)细节特征,实现了更准确和更高效的森林大场景遥感信号模拟,能够克服场景简化带来的误差,精确模拟植被冠层FPAR的辐射吸收过程^[20],为定量遥感反演建模和时空尺度转换等研究提供可靠的数据支持。然而,在需要频繁修改场景结构参数的应用中,使用三维模型的最大障碍之一就是难以快速地构建合适的三维场景,因此三维模型的场景自动生成是三维模型走向实用化的重要条件之一。

研究在三维辐射传输模型LESS的基础上,提出了基于场景自动构建的LESS1D模块,LESS1D提供了一维模型的简单输入参数,但以光线追踪实现了三维辐射传输模拟,因而兼具“一维模型的简洁和三维模型的精确”。基于LESS1D,研究模拟了三维异质性植被冠层中不同冠形、植被盖度、叶绿素浓度Cab、叶面积指数LAI、叶倾角分布LAD组合下的FPAR_{green},并探究了不同因子对植被指数与FPAR_{green}关系的影响;分析了不同植被指数在不同条件下FPAR_{green}的反演表现,选取反演FPAR_{green}相对最优的植被指数。

2 方 法

2.1 LESS1D 模块

LESS1D 是 LESS 三维辐射传输模型的一维“简化版”,其主要特征是根据一维模型统计参数(例如叶面积指数、叶倾角分布以及株密度等)自动构建三维场景。LESS1D 提供了 LESS-Hom, LESS-Row 以及 LESS-Forest 共 3 种场景模拟(图 1),分别表示水平均匀分布场景、垄行结构场景以及离散森林冠层场景。在 LESS-Hom 中,叶片以三角面片进行表示并随机分布于三维场景中,而 LESS-Row 则根据输入的行间距、行高以及行宽等参数构建垄行结构,叶片随机分布于行内,LESS-Forest 则通过椭球、圆锥、立方体以及圆柱等方式表达单株树木,叶片则随机分布于树冠内部。3 种模式中的叶倾角分布均根据输入的叶倾角分布函数采样生成得到。

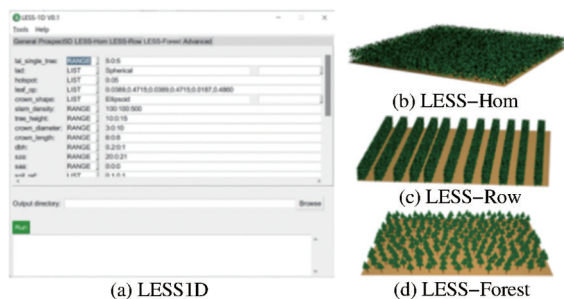


图 1 界面及场景类型

Fig.1 Interface and scene types

相较于原始的三维辐射传输模型 LESS, LESS1D 虽然在冠层表达上进行了一定程度的简化,但其辐射传输计算过程与原始 LESS 模型完全一致,即辐射传输过程完全以光线追踪的形式进行,具有较高的计算精度。与应用广泛的 PROSAIL、INFORM 等模型相比,LESS1D 同样具有简单的输入参数,但得益于三维辐射传输的计算过程,因而减少了模型的假设,例如 LESS1D 中的热点完全由辐射传输过程模拟得到,而 PROSAIL 等模拟则是通过半经验公式近似得到。此外,LESS1D 提供了易用的图形界面,支持参数批量输入以及批量模拟等,是进行大量参数组合模拟的理想工具。

2.2 场景构建

为了比较水平均质场景和三维离散冠层异质场景对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 与植被指数关系的影响,研究利用

LESS1D 模块中的 LESS-Hom 以及 LESS-Forest 分别进行了两类场景的 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的模拟。天空光通过 LESS 中集成的 6S 模型计算得到,大气模型为中纬度夏季,气溶胶为大陆型,光学厚度为 0.375。

2.2.1 均质性场景

利用 LESS1D 模块中的 LESS-Hom 模块设置场景叶面积指数(LAI)、叶倾角分布类型(LAD)、叶绿素含量(Cab)等参数构建均质性场景,均质性场景的构建不考虑树干、树冠和植被盖度,其他参数都与异质性场景一致(具体输入参数见表 1)。

表 1 LESS1D 模块输入参数列表

Table 1 List of Variables Required to Run LESS1D Model

参数		取值大小或范围	单位
三 维 场 景	叶片大小	0.01	m^2
	叶倾角分布类型	平面型、倾斜型和球面型	—
	叶绿素含量(Cab)	30、50、70	$\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	叶片内部结构参数(N)	1.5	—
	叶片等效水厚度(Cw)	0.015	cm
树 干	叶片干物质含量(Cm)	0.012	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$
	树高(H)	7	m
	冠下树高(H_1)	3	m
	胸径	0.2	m
	冠形	圆柱形、椭球形、圆锥形	—
树 冠	冠高 H_2	4	m
	东西冠幅	2	m
	南北冠幅	2	m
辐 射 场 景	场景 LAI	1.0~8.0(步长为 1.0)	—
	植被盖度	0.1~0.9(步长为 0.1)	m
传 太 阳	太阳天顶角 SZA	21.917、30、45、75	$^\circ$
	太阳方位角 SAA	166.422	$^\circ$
方 向	天空光比例	通过 LESS 中集成的 6S 模型计算得到	—
其 他	$\text{FPAR}_{\text{green}}$	400~750(步长为 10)	nm
	模拟波段		

2.2.2 异质性场景

如图 2 所示,利用 LESS1D 模块中的 LESS-Forest 模块构建 3 种异质冠形:圆锥形(图 2(a))、椭

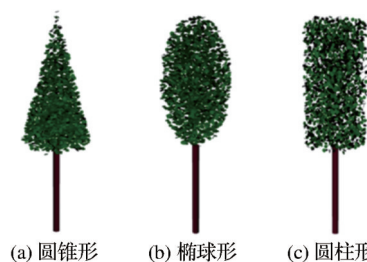


图 2 异质性森林场景中的单木结构模型

Fig.2 Single tree structure model in heterogeneous forest scene

球形(图 2(b))、圆柱形(图 2(c))。在模拟过程中,通过异质冠形、植被盖度、叶面积指数(LAI)、叶倾角分布类型(LAD)、叶绿素含量(Cab)不同参数的组合,模拟获得植被绿色部分的光合有效辐射吸收比率的 $FPAR_{green}$ (叶片反射率、透过率及土壤反射率见图 3,其他输入参数见表 1)。

2.3 植被指数

植被指数是定性定量评估植被特定生化特征

关键指标^[21],根据不同的监测数据源及估算方法可将植被指数划分为多种^[22],在 $FPAR$ 与植被指数关系研究中较常用的有:归一化植被指数(NDVI)^[15-16,23]、绿色归一化植被指数(GREEN-NDVI)^[15]、土壤调节植被指数(SAVI)^[15,23]、比值植被指数(RVI)^[15,23]、增强型植被指数(EVI)^[15-16,23]、MERIS 陆地叶绿素指数(MT-CI)^[15-16],6种植被指数的计算公式见表 2。

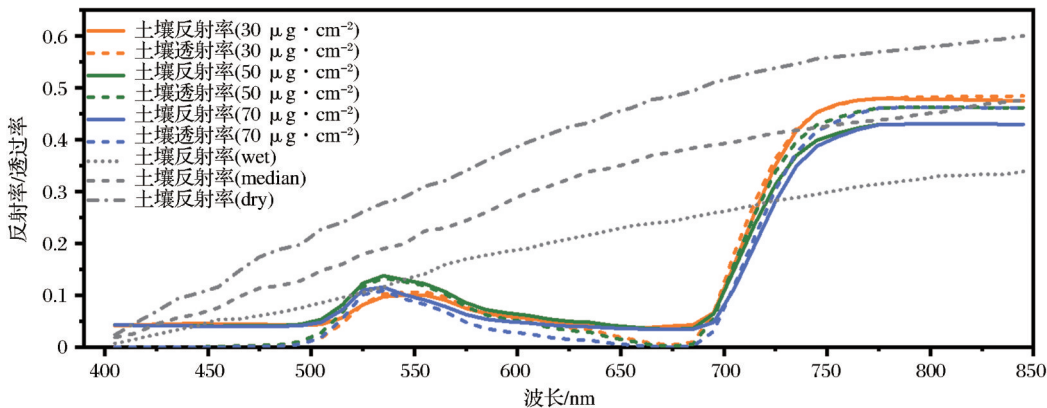


图 3 土壤反射率及叶片反射率、叶片透过率

Fig.3 Soil reflectance and leaf reflectance and leaf transmittance

表 2 本研究使用的植被指数及其计算公式		
Table 2 Vegetation index and their calculation formula used in this study		
植被指数	计算公式	参考文献
NDVI	$(R_{850}-R_{650})/(R_{850}+R_{650})$	[24]
GREEN-NDVI	$(R_{750}-R_{550})/(R_{750}+R_{550})$	[25]
SAVI	$((R_{850}-R_{650})/(R_{850}+R_{650}+0.5))(1+0.5)$	[26]
RVI	R_{850}/R_{650}	[27]
EVI	$(R_{753}-R_{708})/(R_{708}+R_{681})$	[28]
MTCI	$2.5*(R_{850}-R_{650})/(R_{850}+6*R_{650}-7*R_{450}+1)$	[29]

3 结 果

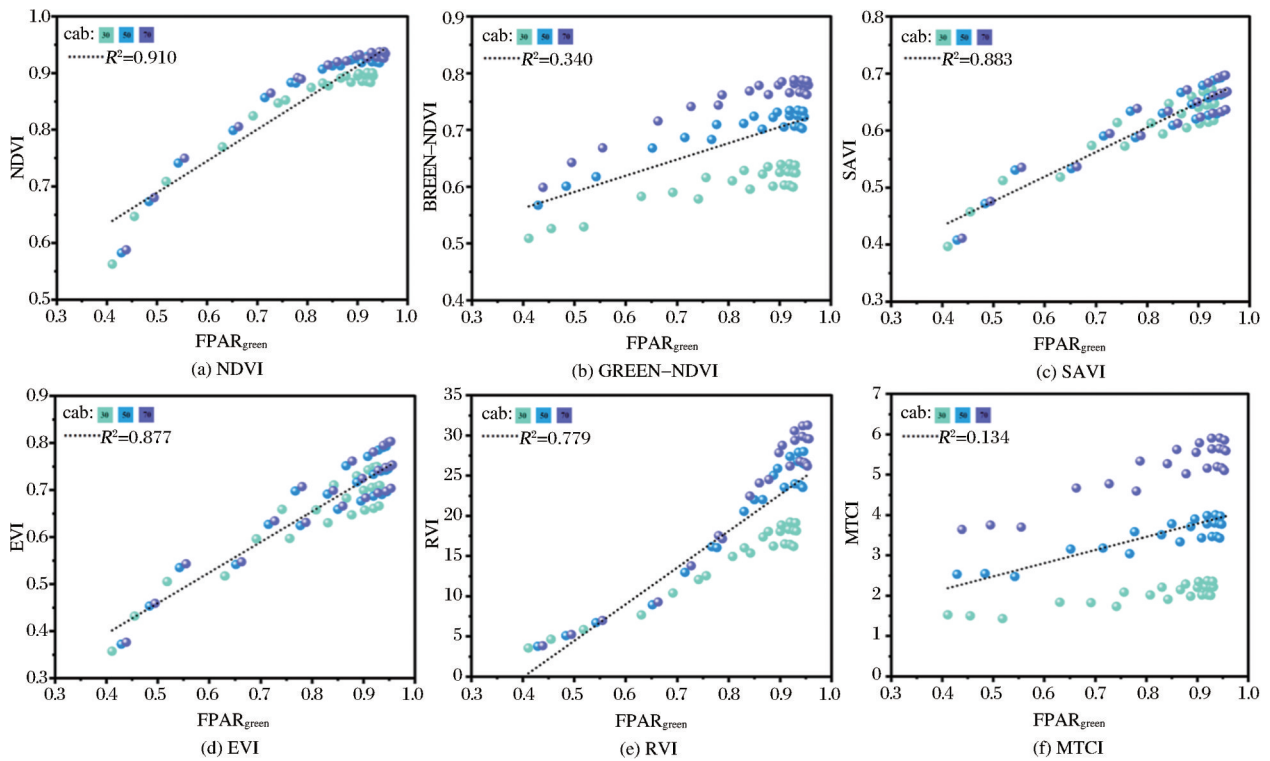
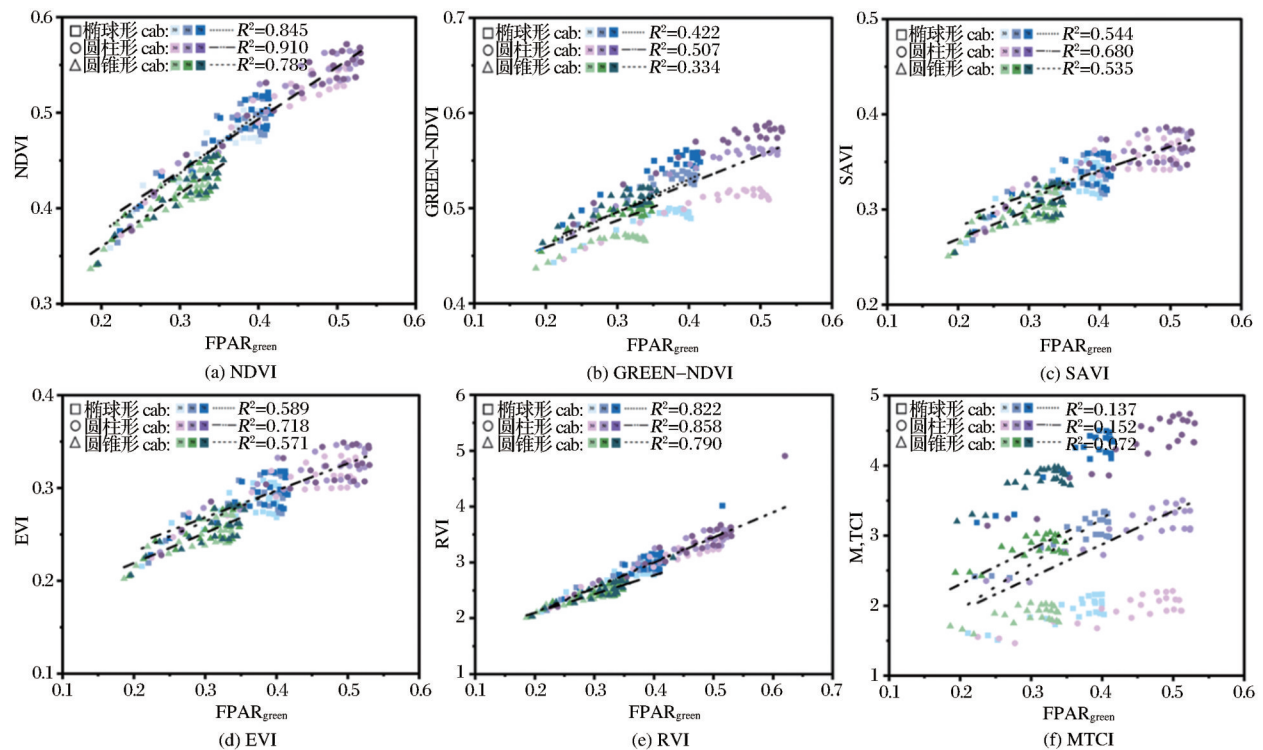
3.1 不同场景的相对最优植被指数

图 4 展示了均质性场景下(包括了 8 种 LAI、3 种 LAD、3 种 Cab 共 72 种组合的均质性场景) $FPAR_{green}$ 与 6 种植被指数的关系,其中 NDVI、SAVI、EVI 对均质性场景的 $FPAR_{green}$ 线性拟合精度较高, R^2 均高于 0.87,而 RVI($R^2=0.779$)和 GREEN-NDVI($R^2=0.340$)表现一般,MTCI 表现最差($R^2=0.134$)。此结果与董恒等^[15]利用一维辐射传输模型 PROSAIL 对这 6 种植被指数与 $FPAR_{green}$ 的线性拟合效果完全一致。因此,在均质性场景中,NDVI、SAVI、EVI 是对 $FPAR_{green}$ 拟合相对最优的植被指数。

在异质性场景的研究中,考虑了 8 种 LAI、3 种 LAD、3 种 Cab、3 种异质冠形、9 种植被盖度共 1 944 种组合的异质性场景下 $FPAR_{green}$ 与 6 种植被指数的关系。图 5 展示了植被盖度为 0.6 的异质场景中,6 种植被指数对相同异质植被冠层的拟合结果表明:在均质性场景中表现较好的植被指数 SAVI、EVI 在异质性场景中表现很差,NDVI 和 RVI 对异质冠形拟合精度均相对较高。经验证,在植被盖度 0.1~0.9 下结果一致。因此,在相同植被盖度的异质性场景中,NDVI 和 RVI 是对 $FPAR_{green}$ 拟合相对最优的植被指数。

3.2 异质冠形对 $FPAR_{green}$ 和植被指数饱和性的影响

由图 5 可知,异质冠形对光合有效吸收辐射 $FPAR_{green}$ 影响显著,且在相同条件下, $FPAR_{green}$ 大小均为圆柱形>椭球形>圆锥形,且 3 种异质冠形的线性拟合精度为圆柱形>椭球形>圆锥形。6 种植被指数均随着 $FPAR_{green}$ 的增加,出现明显的饱和现象,且不同异质冠形下植被指数的饱和存在先后顺序,均为圆锥形>椭球形>圆柱形。由图 6 可知,在对不同盖度情况下的异质植被冠层 $FPAR_{green}$ 的拟合中,当植被盖度小于 0.7 时,植被指数 NDVI 和 RVI 存在饱和效应;当植被盖度大于 0.7 时,NDVI 和 RVI 对异质植被冠层的拟合未达到饱和。因此,

图 4 均质植被冠层下的 $FPAR_{green}$ 与 6 种植被指数关系Fig.4 Relationship between $FPAR_{green}$ and six vegetation indices under homogeneous vegetation canopy图 5 异质植被冠层下的 $FPAR_{green}$ 与 6 种植被指数关系 (植被盖度为 0.6)Fig.5 Relationship between $FPAR_{green}$ and six vegetation indices under heterogeneous vegetation canopy (vegetation coverage is 0.6)

研究认为植被指数 NDVI 和 RVI 在高植被盖度场景中具有较好的抗饱和性。

3.3 植被盖度对 $FPAR_{green}$ 和植被指数拟合精度的影响
为排除个别植被指数对 $FPAR_{green}$ 的拟合精

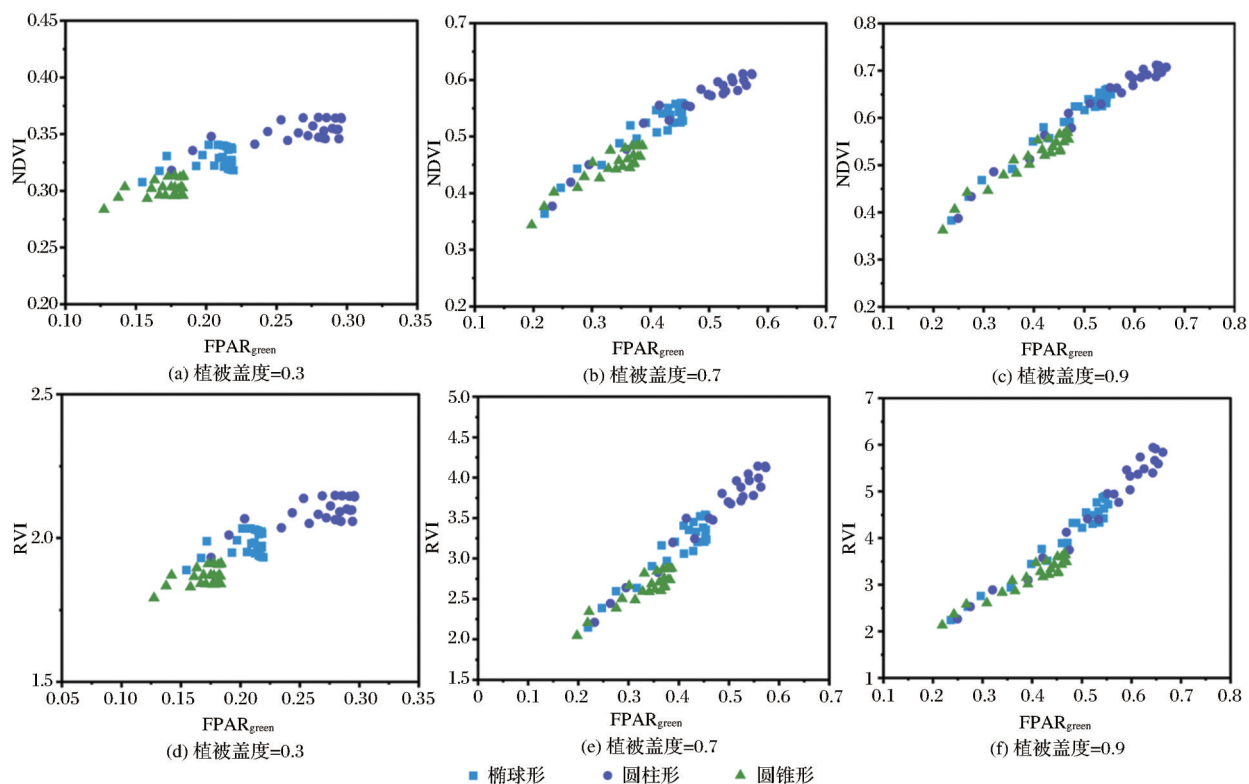


图6 植被指数NDVI和RVI在不同植被盖度下的饱和性

Fig.6 Saturation of vegetation indices (NDVI and RVI) under different vegetation coverage

度可能受到叶绿素浓度的影响,以叶绿素浓度为 $30 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 为例进行拟合精度 R^2 的计算。图7对比

了各植被盖度下3种冠形的植被指数拟合精度 R^2 , 每种植被盖度场景 R^2 均综合考虑了3种LAD和8

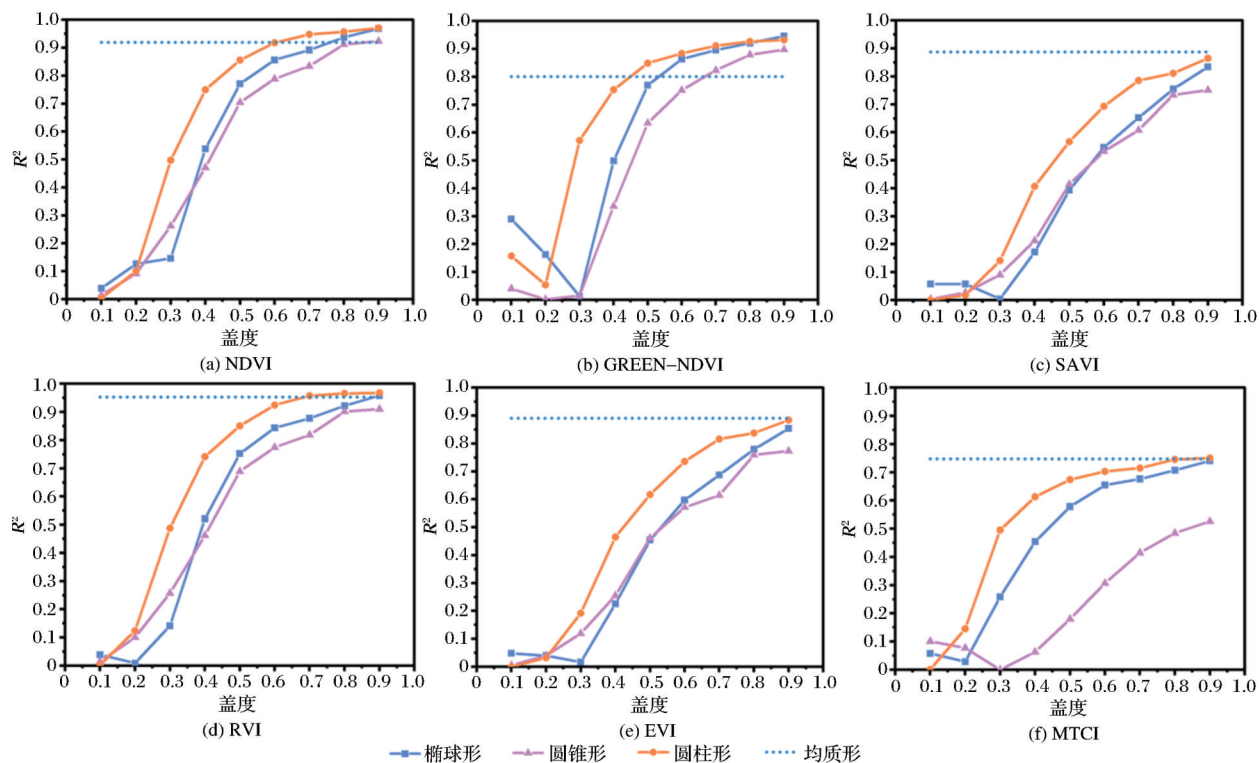


图7 植被盖度对植被指数拟合精度的影响

Fig.7 Influence of vegetation coverage on fitting accuracy of vegetation indices

种 LAI, 因此, 结果更具普适性。由图 7 可知, 植被盖度对异质性冠层的植被指数拟合精度具有显著影响, 当植被盖度低时, 植被指数拟合精度均较差; 当植被盖度增加时, 植被指数拟合精度也随之提高, 接近均质形场景的拟合精度。

6 种植被指数对不同异质冠层的拟合精度均为圆柱形 > 椭球形 > 圆锥形, 即对圆柱形冠层的拟合精度相比其他冠形更高。植被指数 GREEN-NDVI 对异质冠层的拟合精度在中盖度情况下超过均质冠层 (均质冠层不考虑盖度因素, 图 7 中虚线表示同一个值), 植被指数 NDVI 在高盖度情况下略超过均质冠层, 而其他 4 种植被指数随着盖度增大, 对异质冠层的拟合精度不断逼近对均质形冠层的拟合精度。当盖度小于 0.3 时, 植被指数 GREEN-NDVI 和 MTCI 的拟合精度曲线存在相对较大的抖动现象, 其他植被指数也略有抖动。

3.4 叶片生理生化参数和结构参数对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 和植被指数关系的影响

3.4.1 叶绿素浓度

由图 5 和图 7 可知, 综合考虑多种叶绿素浓度下的植被指数拟合精度时, 植被指数 GREEN-NDVI、MTCI、SAVI 对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的拟合关系均较差。而由图 8 可知, 单独计算不同叶绿素浓度下的植被指数拟合精度时, GREEN-NDVI、MTCI、SAVI 与 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的相关性显著提高。

因此, 若要提高这些植被指数的拟合精度, 需要单独考虑不同叶绿素浓度的情况, 但在现实中植被的叶绿素浓度在一定范围内动态变化, 因此单独考虑叶绿素浓度不具有现实意义。其中, 植被指数 MTCI 的线性拟合精度随叶绿素浓度增加而提高, 其他 5 种植被指数在不同叶绿素浓度下对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的拟合精度相近。

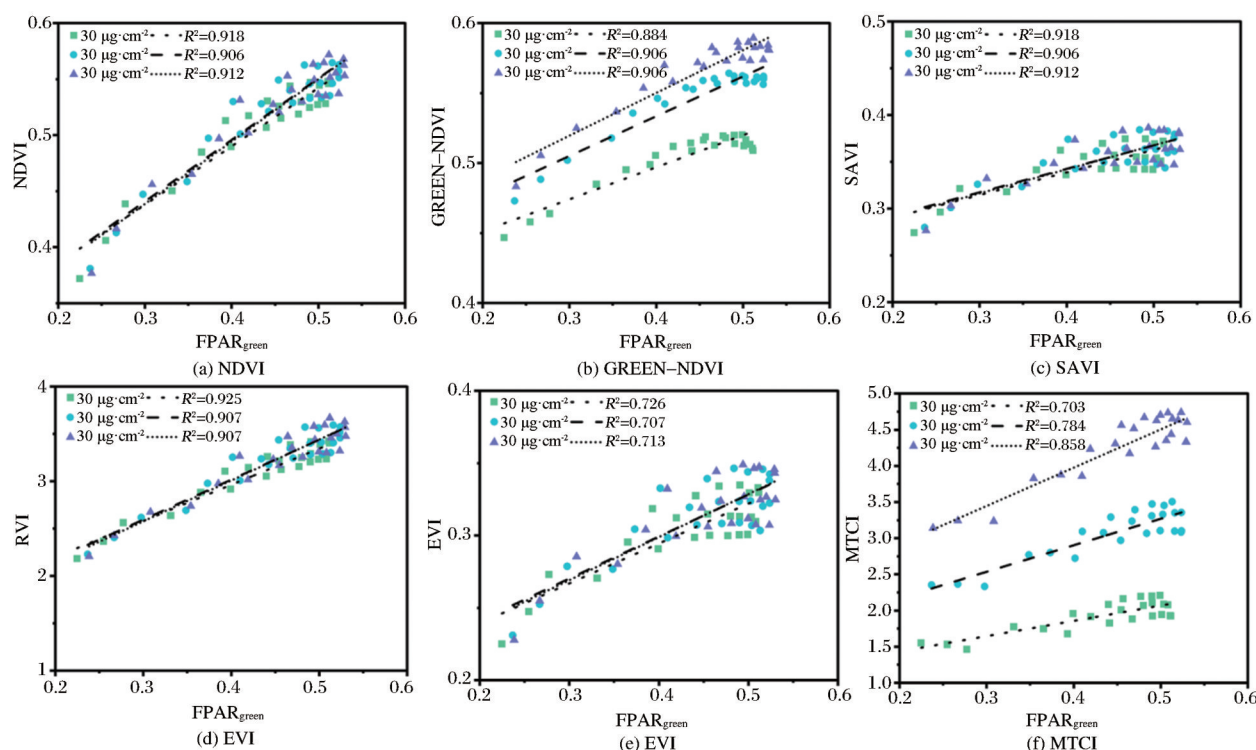


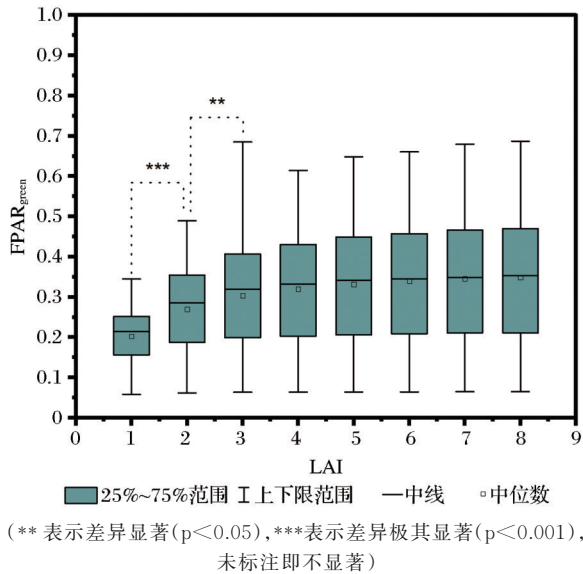
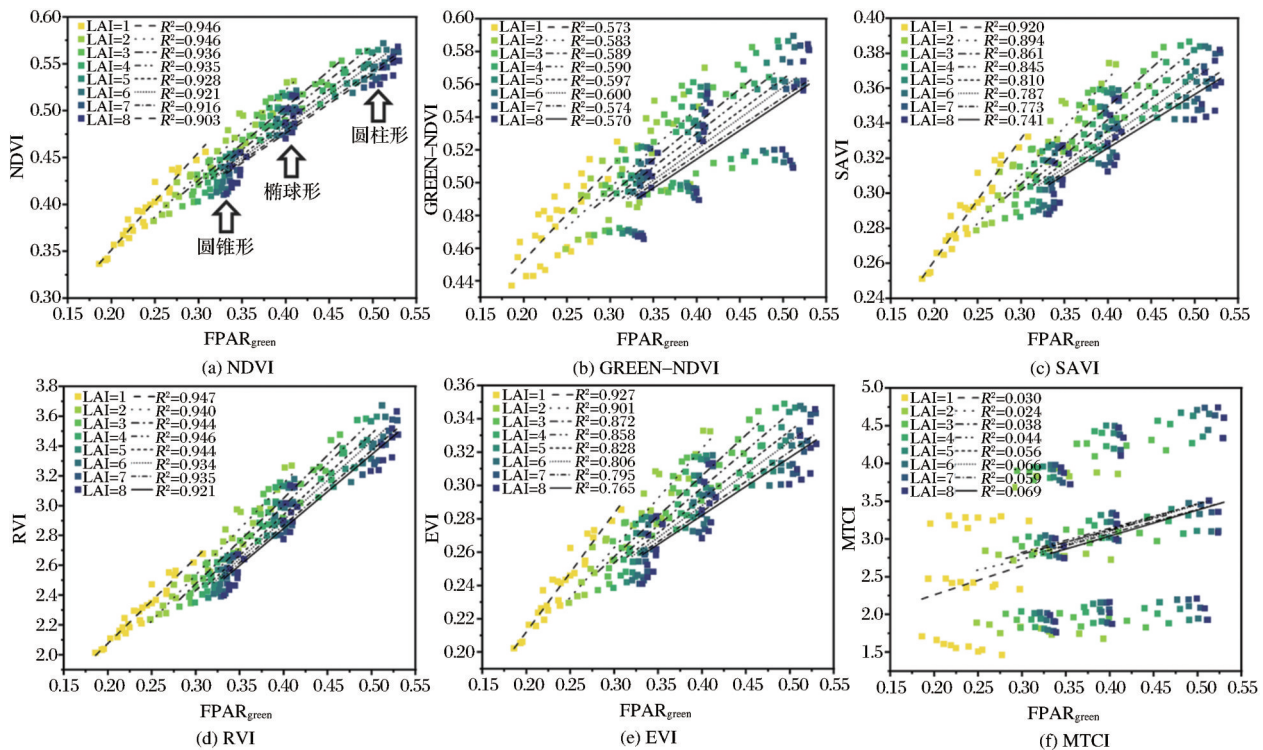
图 8 叶绿素浓度对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 与植被指数关系的影响

Fig.8 Effect of Cab on the relationship between $\text{FPAR}_{\text{green}}$ and vegetation indices

3.4.2 叶面积指数

由图 9 可知, 当异质植被场景 $\text{LAI} < 3$ 时, LAI 对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 影响显著 ($p < 0.05$); 异质植被场景 $\text{LAI} \geq 3$ 时, 各 LAI 之间对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 影响差异不显著 ($p > 0.05$)。图 10 展示了在植被盖度为 0.6 的异质性场景中, 随着 LAI 增加, 植被指数趋近饱和, 植被指数 NDVI 和 RVI 对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的拟合精度略有下降,

但整体拟合效果仍然较好, LAI 影响不大; SAVI 和 EVI 对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的拟合精度随 LAI 增加而显著下降, LAI 对其影响较大; GREEN-NDVI 和 MTCI 对 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的拟合精度随 LAI 增加而略有上升, 但整体拟合效果仍然很差。因此, 在 6 种植被指数中, LAI 只对植被指数 SAVI 和 EVI 和 $\text{FPAR}_{\text{green}}$ 的关系存在一定影响。

图9 叶面积指数对 $FPAR_{green}$ 的影响Fig.9 Influence of LAI on $FPAR_{green}$ 图10 叶面积指数对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响Fig.10 Effect of Cab on the relationship between $FPAR_{green}$ and vegetation indices

3.5.2 太阳天顶角

图13展示了在植被盖度为0.6的圆柱形冠层中,在3种太阳天顶角下 $FPAR_{green}$ 与植被指数之间的关系稳定, $FPAR_{green}$ 随着太阳天顶角增大而增大。植被指数 RVI 的线性拟合精度随着太阳天顶角增大而减小,当太阳天顶角为 75° 时,植被指数 RVI 与 $FPAR_{green}$ 的关系变成指数关系。在其他冠形和植被

3.4.3 叶倾角分布类型

由图11可知,6种植被指数对 $FPAR_{green}$ 的拟合精度受叶倾角分布类型所影响,拟合精度为平面型 < 倾斜型 < 球面型,其中平面型下的植被指数更快达到饱和状态。

3.5 其他环境因素对 $FPAR_{green}$ 和植被指数饱和性的影响

3.5.1 土壤反射率

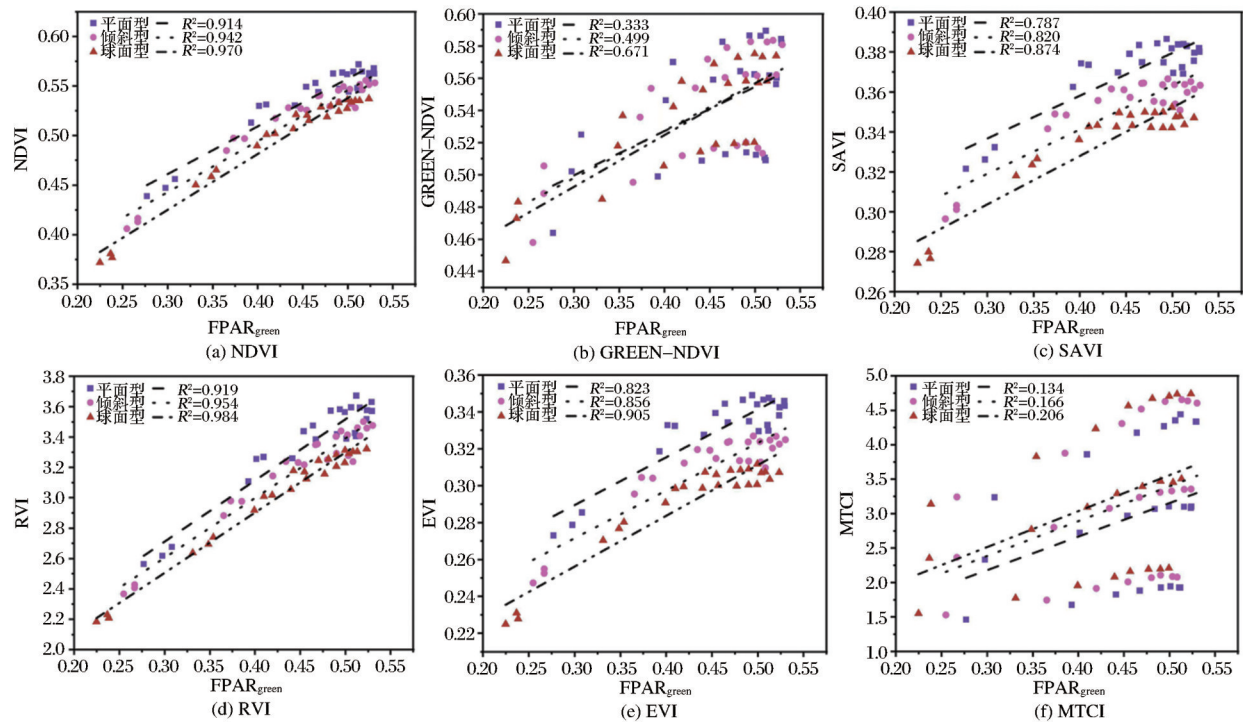
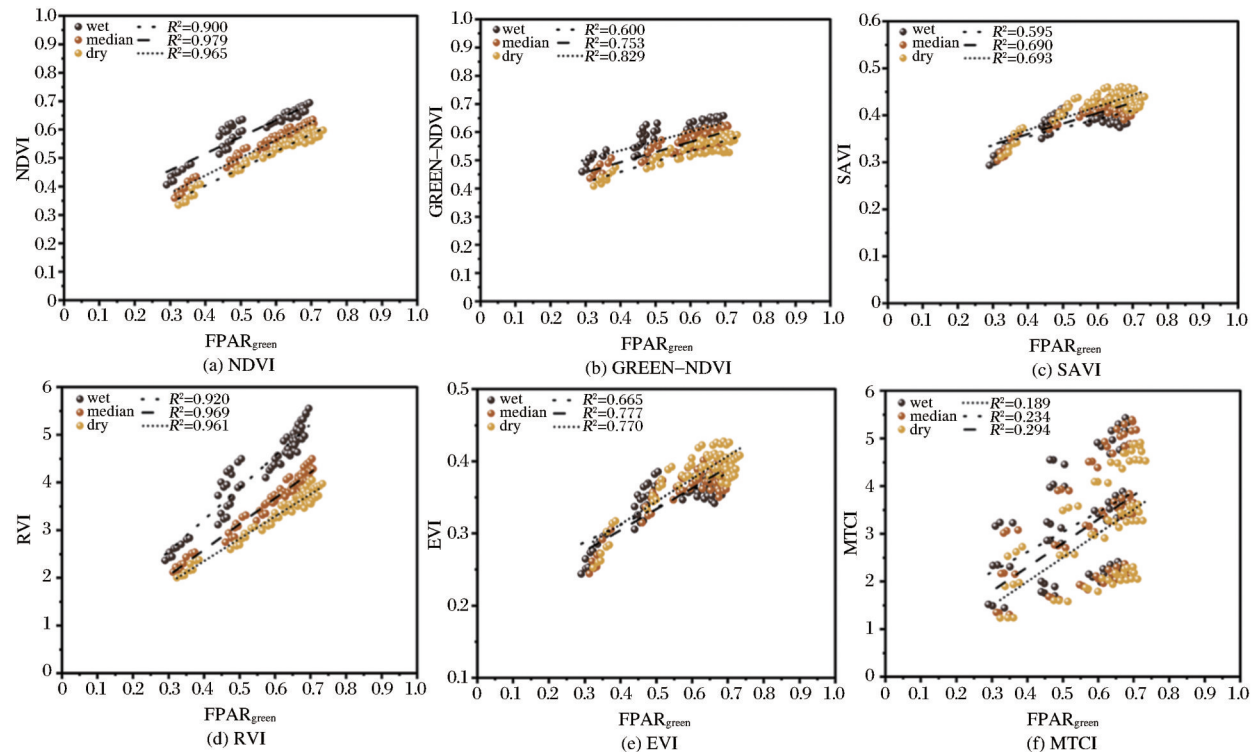
图12展示了在植被盖度为0.6的圆柱形冠层中,在3种不同含水量土壤的土壤反射率下, $FPAR_{green}$ 与植被指数的各关系稳定,且随着土壤含水量的减少、土壤反射率增大,植被指数拟合精度略有提高。在其他冠形和植被盖度下,土壤反射率对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响稳定。因此,土壤反射率对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系没有显著影响。

盖度下,太阳天顶角对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响稳定。

4 讨论

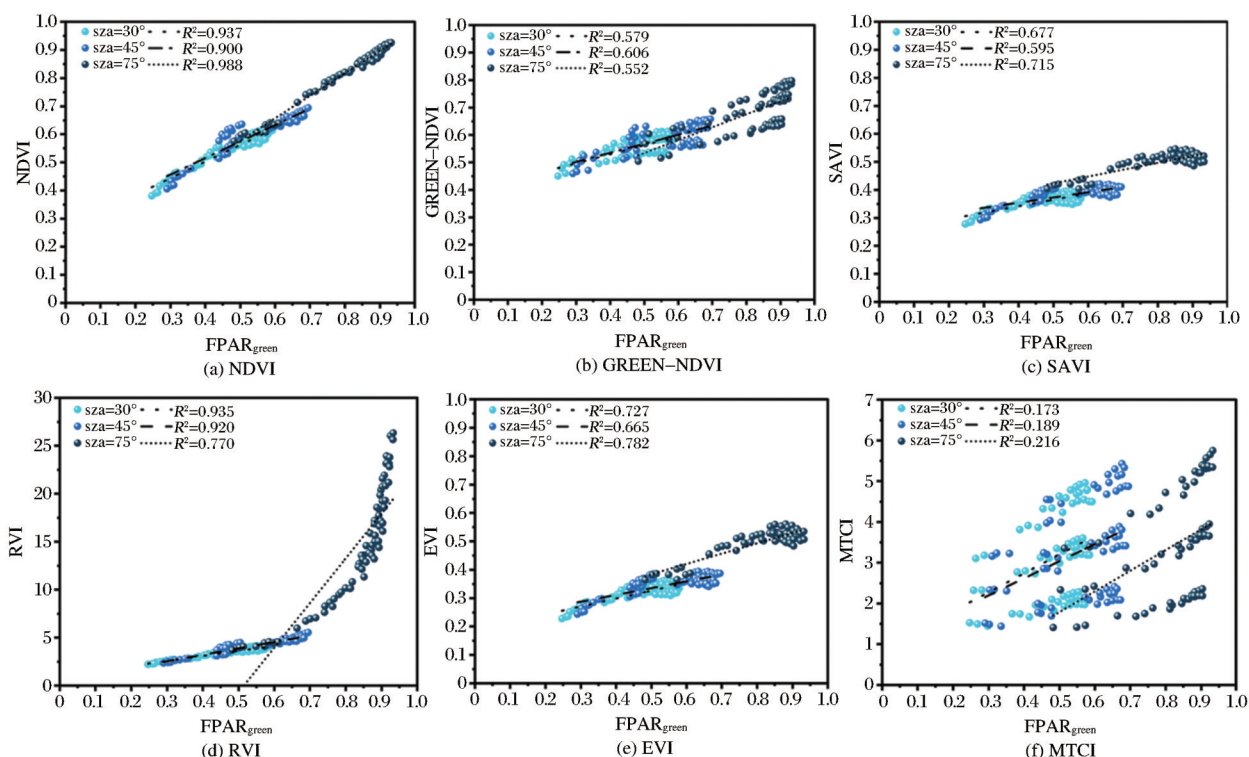
4.1 三维辐射传输模型对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系探究的贡献

本研究运用 LESS1D 模拟并分析了在均质性

图 11 叶倾角分布对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响Fig.11 Effect of LAD on the relationship between $FPAR_{green}$ and vegetation indices图 12 土壤反射率对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响Fig.12 Effect of Soil reflectance on the relationship between $FPAR_{green}$ and vegetation indices

和异质性冠层中,6种常见植被指数与 $FPAR_{green}$ 的关系,并确立了对 $FPAR_{green}$ 拟合程度相对最优的植被指数。其中,在均质性冠层场景中确立的对 $FPAR_{green}$ 拟合相对最优的植被指数与前人^[15]基于传

统的一维传输模型 PROSAIL 对均质性场景的研究结果完全一致,进一步验证了本研究所提出的 LESS1D 模块对均质性场景中 $FPAR_{green}$ 模拟应用的准确性。

图13 太阳天顶角对 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响Fig.13 Effect of SZA on the relationship between $FPAR_{green}$ and vegetation indices

研究结果表明均质性和异质性场景中相对最优植被指数的不同,说明了基于传统一维传输模型确定的最优植被指数对于三维真实场景 $FPAR_{green}$ 的反演不具适用性。传统一维辐射传输模型的局限性突出体现在对场景结构和光学辐射模拟的简化上,由于一维辐射传输模型无法构建冠层的真实结构,只能通过给定的冠层结构参数和环境参数来计算冠层反射率和透过率,因此,对真实场景中 $FPAR_{green}$ 的反演存在不可忽视的误差。而三维辐射传输模型 LESS 将冠层内的叶簇视为被复杂边界包围的浑浊介质,基于这种混合了浑浊介质和三角形网格的冠层新表示,提出了基于统一路径跟踪框架的辐射传输建模理论,即考虑了向后路径跟踪和向前路径跟踪^[30]。因此 LESS 可以构建较为逼真的单木结构并对其中包含的每一个组分(例如枝干和叶片)设定对应的光谱属性^[18],进而提高对异质性场景反演的精度。近年来,由于地表空间异质性导致的参数反演误差引起了高度关注^[31],因此,三维辐射传输模型对于构建更符合真实异质性场景的植被指数与 $FPAR_{green}$ 关系模型和进一步提高对 $FPAR_{green}$ 的反演精度等方面具有重要意义。

4.2 异质冠形对 $FPAR_{green}$ 和植被指数饱和性的影响

研究结果表明异质冠形对植被冠层 $FPAR_{green}$

有重要影响,在相同条件下, $FPAR_{green}$ 大小均为圆柱形 > 椭球形 > 圆锥形。基于 Beer 定律在植被冠层光线截获中的应用^[32],本研究认为不同冠形 $FPAR_{green}$ 大小是树冠表面积、叶面积体密度和穿过树冠的光线路径长度综合影响的结果。不同冠形树冠的表面积不同,光截获面积也不同;穿过不同冠层的光线数量和光线路径长度不同,且不同树冠的叶面积体密度不同,树冠的光截获能力存在差异,进而影响不同冠形的 $FPAR_{green}$ 。孙滢^[33]研究发现光能在冠层内的分布和利用情况与光线在冠层中穿越距离密切相关。Seyednasrollah 等^[34]介绍了穿过树冠冠层的辐射束长度 L_{path} 的计算方法,并计算出相同条件下穿过异质树冠冠层的辐射束长度为圆柱形 > 椭球形 > 圆锥形。圆柱形结构的树冠可以更大程度地增加受光面积与辐射束穿透树冠的长度,进而增加光合有效辐射被树冠拦截和吸收的机会,因此其 $FPAR_{green}$ 相对其他冠形 $FPAR_{green}$ 更大。

在中低植被盖度的场景中,随着 $FPAR_{green}$ 增大,各植被指数均出现饱和现象。本研究认为叶片聚集度、植被盖度和植被指数类型是影响植被指数饱和效应的相关因素。研究结果表明:同一植被指数在不同异质冠形下达到饱和的先后顺序均为圆锥形 > 椭球形 > 圆柱形。在相同植被盖度的情况

下,树冠体积大小为圆锥形<椭球形<圆柱形,随着场景LAI不断增大,树冠的叶片聚集程度为圆锥形>椭球形>圆柱形。圆锥形冠层内的叶片聚集度更快达到饱和状态,随着 $FPAR_{green}$ 增大,植被指数更快饱和;而圆柱形冠层相对更接近均质性冠层,冠层叶片聚集度相比其他异质性冠层更小,植被指数的抗饱和性更好。研究发现植被指数NDVI和RVI在高植被盖度场景中(植被盖度 ≥ 0.7),随着 $FPAR_{green}$ 增大,未出现饱和现象,而在中低植被盖度的场景中出现饱和现象。因为植被盖度较低时,相同LAI场景下的树冠的叶片聚集程度更大,导致植被指数更快饱和。除NDVI和RVI外的其他4种植被指数在任何植被盖度中都随 $FPAR_{green}$ 增大都出现饱和现象,说明不同植被指数的抗饱和性存在差异。

4.3 植被盖度、叶绿素浓度、叶面积指数和叶倾角分布对 $FPAR_{green}$ 和植被指数关系的影响

植被盖度对异质性冠层的植被指数拟合精度

具有显著影响,当植被盖度低时,植被指数拟合精度均较差,因为在低植被盖度场景中,随着场景LAI增加,冠层叶片聚集程度远高于高盖度场景,导致植被指数饱和,对拟合精度造成较大影响。图7中植被指数GREEN-NDVI的拟合精度存在异常现象,即拟合精度曲线在低植被盖度场景中剧烈抖动,而在中高盖度场景中超过均质性冠层的拟合精度。本研究对植被指数GREEN-NDVI下的各盖度数据进一步探索,由图14可知,在低植被盖度场景中,植被指数GREEN-NDVI均过度饱和,其他植被指数同样在低植被盖度时过度饱和,因此线性拟合精度 R^2 出现抖动现象。异质性冠层在高植被盖度场景中的饱和程度高于均质性冠层,但由于异质性冠层的离散点紧密分布在回归直线两侧,离散点距离回归直线比均质性更近,从而出现植被指数GREEN-NDVI已达高度饱和,但其拟合精度 R^2 却在中高盖度场景中超过均质冠层的异常现象。

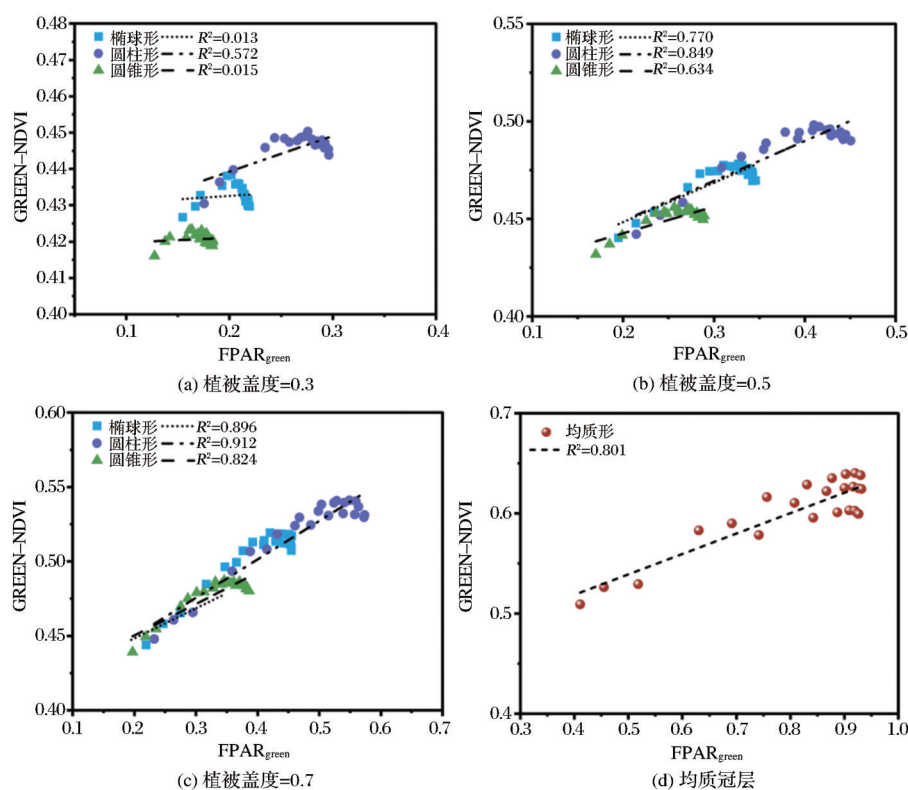


图14 不同植被盖度下的GREEN-NDVI饱和性

Fig.14 GREEN-NDVI saturation under different vegetation coverage

对叶绿素浓度(Cab)研究结果表明:植被指数GREEN-NDVI、MTCI、SAVI与 $FPAR_{green}$ 的相关性受叶绿素浓度影响较大。其中,植被指数MTCI使用了3个红/近红外波段的数据,这些波段的中心位置分别为681.25、708.75和753.75 nm,对叶绿素

浓度具有高敏感性,尤其是在较高叶绿素浓度值时^[35]。由于在现实中植被的叶绿素浓度处于动态变化中,对叶绿素敏感的植被指数GREEN-NDVI、MTCI、SAVI在对真实场景的 $FPAR_{green}$ 反演中不适用性。

对叶面积指数(LAI)研究结果表明:当异质植被场景 $LAI < 3$ 时, LAI 对 $FPAR_{green}$ 具有重要影响; 当 $LAI \geq 3$ 时, $FPAR_{green}$ 趋向饱和, 因此 LAI 对 $FPAR_{green}$ 影响不显著。徐富宝^[16]对 FPAR 和 $FPAR_{green}$ 关系探讨中也发现: 当 LAI 达到 3 以上时, FPAR 和 $FPAR_{green}$ 均趋向饱和。

对叶倾角分布(LAD)研究结果表明: 相比倾斜型和平面型, 叶倾角分布为平面型时, 植被指数更快达到饱和。张亚等^[36]对 LAD 与离散冠层反射率关系研究表明, 当 LAD 为平面型时, 场景中冠层光照部分所占面积比和其反射率占主导作用, 因此平面型冠层反射率大于其他 LAD, 平面型下的植被指数更快达到饱和。

4.4 太阳天顶角对 $FPAR_{green}$ 和植被指数关系的影响

当太阳天顶角较小时, 即接近正午时刻, 植被光合作用吸收的 PAR 最大, 但到达冠层的光合有效辐射总量 PAR 也达到一天中最大值, 其增量远大于吸收增量, 因此光合有效辐射吸收比 FPAR 随之减小。当太阳天顶角增加时, 入射 PAR 总量减少, 光线路径随着太阳天顶角增加而增加, 因为 PAR 波段主要表现为一次吸收, 因此随着光线路径增加, 光线与冠层相互作用的概率越大, 光合有效吸收辐射比 $FPAR_{green}$ 随之增大。该结论与董泰锋等^[37]的研究结论一致。

随着太阳天顶角增大, 光线穿透冠层的路径长度增加, 近红外波段反射率迅速增加(“碗边效应”), 而红光波段减小, 因而 RVI(近红外与红光的比值)迅速增大。RVI 对植被冠层较为敏感, 尤其是在植被盖度较高时表现更为明显。在大角度观测下, 由于传感器光线追踪获取到土壤组分的概率更小, 因而放大了这一效应。郑裕东等^[38]对小麦和玉米冠层 RVI 研究发现, 随着太阳天顶角增大, 叶片对太阳光产生更多地拦截和散射, 近红外波段和红外波段的反射率均增大, 随着 LAI 增加, 场景内非绿色叶片组分比例下降, 近红外波段反射率增大, 红外波段反射率减小, 对 RVI 产生较大影响。

5 结 论

研究结果表明均质性和异质性场景中相对最优植被指数存在差异, 说明基于传统一维传输模型确定的最优植被指数对于三维真实场景 $FPAR_{green}$ 的反演不具普适性。随着三维真实场景越来越受到重视, 运用三维辐射传输模型进行定量遥感的研究

成为发展趋势。本研究在验证三维辐射传输模型 LESS1D 对 $FPAR_{green}$ 模拟应用的准确性的基础上, 确立了对异质性场景 $FPAR_{green}$ 拟合的相对最优植被指数, 对于 FPAR 的反演具有一定的参考价值。

重点探讨了三维真实异质场景中 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响因素。不同异质冠形在相同条件下的 $FPAR_{green}$ 大小为圆柱形 > 椭球形 > 圆锥形, 植被指数达到饱和状态的先后顺序为圆锥形 > 椭球形 > 圆柱形。本研究认为树冠体积和树冠几何结构是不同冠形影响 $FPAR_{green}$ 大小的关键因素, 树冠体积通过影响植被冠层绿色部分吸收的光合有效辐射总量, 进而影响 $FPAR_{green}$ 大小; 树冠几何结构影响穿过冠层的辐射束长度进而影响 $FPAR_{green}$ 大小。各植被指数随着 $FPAR_{green}$ 增大均出现饱和现象, 本研究认为叶片聚集度、植被盖度和植被指数类型是影响植被指数饱和效应的相关因素。因此, 可通过调节适当的叶片聚集度、提高植被盖度和选择合适的植被指数来减缓植被指数随 $FPAR_{green}$ 增大出现的饱和现象。其中, NDVI 和 RVI 在高植被盖度场景中(植被盖度 ≥ 0.7)未出现饱和现象, 对于遥感应用的植被指数选择具有重要意义。植被盖度对植被指数拟合精度有很大影响, 当植被盖度低时, 植被指数拟合精度均较差; 当植被盖度增加时, 植被指数拟合精度也随之提高, 接近均质形场景的拟合精度。因此在探讨 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系时, 植被盖度是不可忽略的因素之一。叶绿素浓度对植被指数 GREEN-NDVI、MT-CI、SAVI 与 $FPAR_{green}$ 的相关性影响较大, 该植被指数在单一叶绿素浓度下拟合效果较好, 但在现实植被场景中的叶绿素浓度不止一种情况, 因此该植被指数对异质场景 FPAR 反演存在一定局限性。当 $LAI < 3$ 时, LAI 对 $FPAR_{green}$ 具有重要影响; 当 $LAI \geq 3$ 时, $FPAR_{green}$ 趋向饱和, LAI 对 $FPAR_{green}$ 影响不显著。太阳天顶角通过影响光线路径和植被吸收光合有效辐射与总光合入射辐射相对量, 进而影响 $FPAR_{green}$, 在大角度下, 植被指数 RVI 与 $FPAR_{green}$ 的关系变为非线性。

本研究对异质场景中 $FPAR_{green}$ 与植被指数关系的影响因素的研究结果, 有助于提高复杂森林场景的精细化定量遥感反演精度, 实现高精度的森林动态监测, 对于森林经营方案设计、经济林木整形修枝、植被生产力提升、绿地生态修复监测、林业长期规划等研究都具有参考意义。三维辐射传输模

型向着更加精细化和更准确的方向不断发展,不断实现对算法和模型的简化和快速计算模拟,实现高精度且快速化模拟数据,为未来采用更加真实的场景进行定量遥感的相关研究提供了一定的技术支持。

参考文献(References):

- [1] LIANG S, LI X, WANG J. Advanced remote sensing[M]. Cambridge, MA, US:2012:383-414.
- [2] LIU Z, SHAO Q, LIU J. The performances of MODIS-GPP and -ET products in China and their sensitivity to input data (FPAR/LAI)[J]. Remote Sensing, 2014, 7: 135 - 152.
- [3] Report of the Sixteenth Session of the WMO-IOC-UNEP-ICSU Steering Committee for GCOS[R]. WMO/TD.WMO: Geneva, Switzer: Land, 2008.
- [4] BICHERON P, LEROY M.A method of biophysical parameter retrieval at global scale by inversion of a vegetation reflectance model[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 67(3):251-266.
- [5] CHEN Shuwei. Distribution simulation of photosynthetically active radiation and light interception ability analysis within loquat canopy [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.[陈舒伟. 单株枇杷冠层光合有效辐射分布模拟与光截获能力分析[D].福州:福州大学,2018.]
- [6] DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang. Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22):7190-7201.[董泰锋,蒙继华,吴炳方. 基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述[J].生态学报,2012,32(22):7190-7201.]
- [7] WANG Baolin, WANG Jingjie, YANG Yong, *et al.* Algorithm improvements for two important parameters of FPAR and maximum solar energy utilization efficiency [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(5):220-228.[王保林,王晶杰,杨勇,等. 植被光合有效辐射吸收分量及最大光能利用率算法的改进[J].草业学报,2013,22(5):220-228.]
- [8] FENSHOLT R, SANDHOLT I, RASMUSSEN M S. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using in situ measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91: 490-507.
- [9] MYNENI R B, RAMAKRISHNA R N, RUNNING S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(6):1380-1393.
- [10] WIEGAND C L, RICHARDSON A J, ESCOBAR D E, *et al.* Vegetation indices in crop assessments[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3):105-119.
- [11] BRASWELL B H, SCHIMEL D S, PRIVETTE J L, *et al.* Extracting ecological and bio-physical information from AVHRR optical data: An integrated algorithm based on inverse modeling[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D18): 23335-23348.
- [12] ASNER G P, WESSMAN C A, ARCHER S. Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems[J]. Ecological Application, 1998, 8(4): 1003-1021.
- [13] CHEN J M. Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifer forests[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(6): 1353-1368.
- [14] JENKINS J P, RICHARDSON A D, BRASWELL B H, *et al.* Refining light-use efficiency calculations for a deciduous forest canopy using simultaneous tower-based carbon flux and radiometric measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1/2):64-79.
- [15] DONG Heng, HE Fangjian, ZHANG Chengfang. Relationship between FPAR_{green} and several vegetation indices based on radiative transfer model[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2016, 35(4):70-75.[董恒,何枋健,张城芳. 基于辐射传输模型的FPAR_{green}与几种植被指数的关系研究[J].华中农业大学学报,2016,35(4):70-75.]
- [16] XU Fubao. Research of FPAR estimation method based on medium-high spatial resolution remote sensing data[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.[徐富宝. 中—高空间分辨率遥感数据的FPAR估算方法研究[D].青岛:山东科技大学,2019.]
- [17] ZHEN Zhijun. Vegetation reflection simulation and bio-optical property inversion based on three-dimensional radiative transfer model[D]. Changchun: Jilin University, 2021.[甄治钧. 基于三维辐射传输模型的植被反射率模拟及其生物光学参数反演[D].长春:吉林大学,2021.]
- [18] QI Jianbo, XIE Donghui, XU Yue, *et al.* Principles and applications of the 3D radiative transfer model LESS[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(5): 914-924.[漆建波,谢东辉,许月,等. 三维辐射传输模型LESS原理及其应用[J].遥感技术与应用,2019,34(5):914-924.]
- [19] BIAN Zunjian, QI jianbo, WU Shengbiao, *et al.* A review on the development and application of three-dimensional computer simulation mode of optical remote sensing[J]. National Re-

- Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(2): 559-576. [卞尊健, 漆建波, 吴胜标, 等. 光学遥感三维计算机模拟模型的研究进展与应用[J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 559-576.]
- [20] LIANG Shunlin, BAI Rui, CHEN Xiaona, *et al.* Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2020, 24(6): 618-671. [梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 等. 2019年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报, 2020, 24(6): 618-671.]
- [21] ZHANG Hui, LI Pingheng, ZHOU Guomou, *et al.* Advances in the studies on topographic effects of vegetation indices [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 669-677. [张慧, 李平衡, 周国模, 等. 植被指数的地形效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 669-677.]
- [22] PAN Xia, GAO Yong, WANG Ji, *et al.* Review on Vegetation Index using remote sensing evolution[J]. Northern Horticulture, 2018(20): 162-169. [潘霞, 高永, 汪季, 等. 植被指数遥感演化研究进展[J]. 北方园艺, 2018(20): 162-169.]
- [23] TANG Zhongjie, WANG Laigang, GUO Yan, *et al.* FPAR estimation of cotton breeding material based on Unmanned Aerial Vehicle (UAV) multispectral images [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50(11): 162-171. [唐中杰, 王来刚, 郭燕, 等. 基于无人机多光谱的棉花育种材料 FPAR 估测[J]. 河南农业科学, 2021, 50(11): 162-171.]
- [24] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [C] // Greenbelt, Maryland: Third ERTS Resources Technology Satellite-1 Symposium, 1974: 309-351.
- [25] GITELSON A A, MERZLYAK M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing of chlorophyll[J]. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3/4): 494-500.
- [26] HUETE A R. A Soil-Adjusted Vegetation Index(SAVI)[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25: 295-309.
- [27] JORDAN C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50: 663-666.
- [28] LIU H Q, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33: 457-465.
- [29] DASH J, CURRAN P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI)[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(1): 100-104.
- [30] QI Jianbo, XIE Donghui, JIANG Jingyi, *et al.* 3D radiative transfer modeling of structurally complex forest canopies through a lightweight boundary-based description of leaf clusters[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 283: 113301. DOI:10.1016/j.rse. 2022.113301.
- [31] LIU Qinhuo, CAO Biao, ZENG Yelu, *et al.* Recent progresses on the remote sensing radiative transfer modeling over heterogeneous vegetation canopy [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2016, 20(5): 933-945. [柳钦火, 曹彪, 曾也鲁, 等. 植被遥感辐射传输建模中的异质性研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 933-945.]
- [32] YAN Guangjian, HU Ronghai, LUO Jinghui, *et al.* Review of indirect methods for leaf area index measurement [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2016, 20(5): 958-978. [阎广建, 胡容海, 罗京辉, 等. 叶面积指数间接测量方法[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 958-978.]
- [33] SUN Ying. Modeling and verification for light interception, utilization and tree structure optimization in apple orchards with dwarf stocks[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2018. [孙滢. 矮砧苹果园光能截获利用和树体结构优化模型的建立及验证[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.]
- [34] SEYEDNASROLLAH B, KUMAR M. Effects of tree morphometry on net snow cover radiation on forest floor for varying vegetation densities[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(22): 12508-12521.
- [35] DASH J, CURRAN P J. Evaluation of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCI)[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(1): 100-104.
- [36] ZHANG Ya, GENG Jun, WANG Shaoteng. Influence of leaf angle distribution on discrete canopy reflectance[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(4): 92-99. [张亚, 耿君, 王少腾. 叶倾角分布对离散冠层反射率的影响[J]. 遥感信息, 2021, 36(4): 92-99.]
- [37] DONG Taifeng, WU Bingfang, MENG Jihua, *et al.* Sensitivity analysis of retrieving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): 1-7.
- [38] ZHENG Yudong, XU Yuncheng, YAN Haijun, *et al.* Analysis of influencing factors in wheat/maize canopy RVI and NDVI acquisition using ground-based remote sensing system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2578-2585. [郑裕东, 徐云成, 严海军, 等. 基于近地遥感系统的小麦玉米冠层 RVI 和 NDVI 获取影响因素分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2578-2585.]

Relationship between $FPAR_{green}$ and Several Vegetation Indices in Heterogeneous Vegetation based on LESS Model

YE Yuyang^{1,2}, QI Jianbo², CAO Ying², JIANG Jingyi²

(1.State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2.The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The quantitative relationship between $FPAR$ (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) and vegetation indices has certain reference value for improving $FPAR$ inversion accuracy and guiding production practice. Based on the three-dimensional radiative transfer model LESS, a module named LESS1D (formally released with LESS though www.lessrt.org) with advantages of simplicity of 1D model and accuracy of 3D model is proposed. Based on this model, the influences of vegetation canopy, coverage and other factors on the relationship between $FPAR_{green}$ and 6 vegetation indices were explored in random homogeneous scenes and 3D heterogeneous scenes. The results showed that in homogeneous scenarios, NDVI, SAVI and EVI fit $FPAR_{green}$ best in homogeneous scenarios, while NDVI and RVI fit $FPAR_{green}$ best in heterogeneous scenarios. In heterogeneous scenes, the fitting accuracy of $FPAR_{green}$ and vegetation index under different crown shapes is cylindrical > ellipsoidal > conical; When the vegetation coverage is low, the fitting accuracy of vegetation indices to $FPAR_{green}$ is poor; As the solar zenith angle increases, the relationship between RVI and $FPAR_{green}$ changes from linear to exponential. Canopy volume and canopy geometry are the key factors affecting the size of $FPAR_{green}$ with different crown shapes, while leaf aggregation, vegetation coverage and vegetation index type are the relevant factors affecting the saturation effect of vegetation index.

Key words: 3D radiative transfer; LESS; $FPAR_{green}$; Vegetation index; Heterogeneous canopy