



# 从 BRDF 到 BPDF: 遥感反演基础模型的演进初探

尚可<sup>1</sup>, 晏磊<sup>1\*</sup>, 张飞舟<sup>1</sup>, 褚君浩<sup>2</sup>, 杨彬<sup>3</sup>, 刘思远<sup>1,4\*</sup>, Kevin TANSEY<sup>5</sup>,  
贾秀萍<sup>6</sup>, Oleg DUBOVIK<sup>7</sup>, 张子晗<sup>1</sup>, 李飞<sup>4</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 遥感与地理信息系统研究所, 北京大学空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871, 中国
  2. 中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083, 中国
  3. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082, 中国
  4. 中国兵器工业导航与控制技术研究所, 北京 100089, 中国
  5. School of Geography, Geology, and the Environment, University of Leicester, Leicester LE17RH, UK
  6. School of Engineering and Technology, The University of New South Wales, Canberra ACT 2600, Australia
  7. Laboratoire d'Optique Atmosphérique, CNRS/Université Lille, Villeneuve d'Ascq 59655, France
- \* 通信作者. E-mail: liyan@pku.edu.cn, liusy0527@163.com

收稿日期: 2023-07-14; 修回日期: 2023-11-15; 接受日期: 2023-11-30; 网络出版日期: 2024-08-02

国家自然科学基金重点基金项目 (批准号: 42130104)、湖南省自然科学基金 (批准号: 2023JJ20018) 和国家自然科学基金 (批准号: 41842048) 资助项目

**摘要** 光的本质是横波电磁波矢量, 以双向反射分布函数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 为基础模型的标量遥感体系只利用植被反射光的整体强度信息, 无法进一步区分反射辐射蕴含的叶表、叶内和冠层结构信息; 在标量遥感基础上考虑垂直于电磁波传播方向的二维偏振矢量特性 (强度 + 方向) 就能深化为矢量遥感体系, 从而有望精确刻画反射光中蕴含的多种信息, 提升植被参数反演精度. 刻画偏振反射空间分布的双向偏振分布函数 BPDF 目前存在精度低、泛化性差等问题, 因此进一步探索矢量遥感基础理论, 构建通用性强的植被矢量遥感基础模型具有迫切的现实需求. 本文旨在利用光子与植被元素的相互作用构建通用性较强的植被 BPDF 物理模型. 首先基于光子-植被元素相互作用的光谱不变原理, 提出基于方向逃逸概率的植被 BPDF 物理模型基础形式, 并基于植被单次反射的辐射传输理论推导模型解析表达; 随后通过考虑叶片散射随干物质含量的变化, 提出光谱不变原理优化表达并推导模型通用表达式; 最后分别利用三维矢量辐射传输模型和多尺度实测数据实现模型的正演直接验证和间接验证. 结果表明, 本文构建的 BPDF 物理模型的解析表达和通用表达在不同植被场景下, 对偏振反射率的正演均方根误差可达 0.001 以内, 与矢量辐射传输模型正演结果在半球空间内具有很强一致性, 在多尺度实测数据也简洁验证了模型关系的稳定性, 模型  $R^2$  普遍高于 0.9. 相比于现存植被偏振反射模型, 本文构建的模型兼具物理机理、简洁形式、可接受的参数化方案、较高精度和较强泛化能力, 对浓密植被具备通用性, 为在 BRDF 一维标量遥感的基础上进一步

**引用格式:** 尚可, 晏磊, 张飞舟, 等. 从 BRDF 到 BPDF: 遥感反演基础模型的演进初探. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 2001–2020, doi: 10.1360/SSI-2023-0193  
Shang K, Yan L, Zhang F Z, et al. From BRDF to BPDF: a preliminary study on evolution of the basic remote sensing quantitative inversion model (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 2001–2020, doi: 10.1360/SSI-2023-0193

考虑 BPDF 二维偏振特性从而形成矢量遥感体系这一转变过程提供了理论基础和探索性方案.

**关键词** 植被, BPDF, 矢量遥感, 物理模型, 偏振

## 1 引言

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 是陆地碳汇的重要来源. 光学遥感是构建植被短波辐射收支模型和定量反演上述植被生态参量的重要手段. 随着硬件技术的快速发展和遥感数据量的指数级增长, 更高精度的植被定量遥感建模与生态参数反演需求与日俱增. 光的本质是横波电磁波矢量, 一束波在传播过程中具有垂直于传播方向振动的特征, 即偏振特征. 光强、频率、相位和偏振是电磁波的四大物理属性. 遥感的本质是电磁波与探测目标的相互作用, 但目前光学遥感过程大多只依托电磁波传播方向上不同波长下的平均强度这一统计标量遥感特征, 未考虑电磁波传播方向切平面上的偏振二维矢量真实特征<sup>[1,2]</sup>. 这构成了以双向反射分布函数 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 为基础模型的标量遥感体系. 对植被而言, 反射光是辐射与植被元素多次相互作用 (反射、透射、逃逸、再碰撞等) 后的结果, 其包含叶表、叶内、下垫面和冠层结构等多方面耦合信息. 标量遥感主要关注地物反射光的平均强度, 无法将上述耦合信息区分开来, 这导致对其中一种信息的探测势必会受到其他耦合因素的影响. 未考虑偏振特性使遥感电磁波原有的具有光量子辨识力的真实矢量探测能力被弱化为二维标量和图像灰度级识别能力<sup>[3]</sup>, 进而使得光子与地表要素的相互作用无法更加精细地刻画<sup>[3,4]</sup>. 因此, 随着高分辨率遥感数据越来越多、研究越来越深入, 常规标量遥感存在的问题也愈加突出. 例如多项研究表明, 忽略植被反射辐射的矢量偏振特性使多种植被 BRDF 模型存在不确定性, 而考虑偏振特性则能使误差平均降低 20%<sup>[5~8]</sup>, 从而能够提升植被参数的遥感定量反演精度<sup>[9~11]</sup>. 为了更精确地刻画电磁波与地物相互作用并提升定量遥感精度, 偏振信息的利用显然已无法回避.

正如植被双向反射率分布函数 BRDF 及可测量的双向反射率因子 (bidirectional reflectance factor, BRF) 描述了植被在  $2\pi$  空间 (上半球) 的非朗伯反射特征, 植被的双向偏振分布函数 BPDF 及双向偏振反射率因子 (bidirectional polarized reflectance factor, BPF) 则描述了植被在  $2\pi$  空间的非朗伯偏振反射特征<sup>[12]</sup>. BPDF 模型往往基于多种方式构建并由测量得到的偏振反射率 BPF 进行验证. BPDF 模型从构建方法上分为物理模型和数据驱动模型两大类.

物理模型分为基于冠层辐射传输过程的传统物理模型和基于蒙特卡洛 (Monte Carlo) 方法的计算机模型两类. 其中 Rondeaux-Herman 模型<sup>[13]</sup> 是所有模型的基础. Breon 模型假设叶倾角球型分布, 构建了植被和裸土模型. 基于 Monte-Carlo 光线追踪的计算机模型包括 Kallel 模型<sup>[14~16]</sup>. 物理模型的优点是考虑了光传播的物理机理, 但仍存在缺点: (1) 模型依赖数学物理近似使模型精度较低; (2) 模型正演需要多种实测的冠层结构数据作为输入, 限制了其高精度使用. 数据驱动模型部分解决了上述问题. Nadal 和 Breon<sup>[17]</sup> 首先提出了引入经验参数, 利用实测数据进行拟合的 BPDF 建模方法, 这类方法使用条件广, 适合在更大尺度上建模. Yang 等<sup>[18]</sup> 提出了一种基于可见光照面积指数的单经验参数 BPDF 模型, 在草地目标上的验证结果表明, 其拟合误差分别比 Nadal-Breon 和 Litvinov 模型下降了 7% 和 10%. 此外, 如基于广义回归神经网络、支持向量机、K 近邻和随机森林四种机器学习算法<sup>[19,20]</sup> 的神经网络模型, 也能够对 BPF 与菲涅尔 (Fresnel) 因子、散射角及多波段反射率等变量之间的关系进行构建. 数据驱动模型优点: (1) 精度高于物理模型; (2) 经验参数可直接由观测数据拟合获得; 缺点: (1) 缺乏物理机理; (2) 固定的经验参数使模型泛化能力差, 依赖传感器和测量尺度, 限制其更高精度的应用.

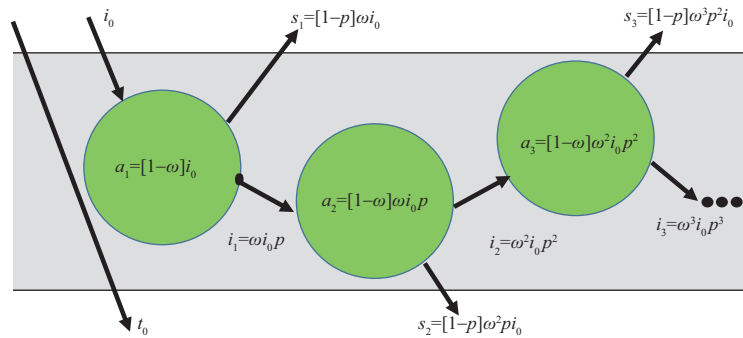


图 1 (网络版彩图) 光子 - 植被元素多次散射和吸收示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of multiple scattering and absorption of photon-vegetation elements

综上,上述模型存在问题,各类植被场景并不普适,不具备通用性、基础性,限制了矢量遥感的高精度发展,所以进一步探索矢量遥感基础理论,构建新的同时满足简洁、高精度和高泛化性的模型,具有迫切的现实需求和长远的意义.光子-植被元素相互作用的光谱不变原理用简洁的方式刻画了光子在冠层内传输过程中与植被元素的“截获、碰撞、逃逸”等行为,这些行为只与冠层结构有关,与波长无关.与此同时,植被冠层的偏振反射描述了光子的振动效应,也由冠层结构决定且具备光谱不变特性.这启发我们利用描述光子-植被元素相互作用的光谱不变原理作为工具来构建植被 BPDF 模型,但偏振反射率与光谱不变量的关系尚未被挖掘,基于光谱不变量的植被 BPDF 建模尚未被研究.光谱不变原理描述了光子在冠层内的传输机理,因此基于光子-植被元素相互作用的植被 BPDF 模型将同时具备简洁、机理性和高精度的特点,有极大潜力服务于植被参量的偏振遥感反演应用.

针对现有标量遥感手段无法更高精度实现植被参数遥感反演和目前缺乏植被矢量遥感基础模型现状,本文拟开展基于光子-植被元素相互作用的植被 BPDF 矢量遥感基础模型构建工作,并通过实际数据对模型进行验证.本文结构如下:第 2 节首先介绍光子-植被元素相互作用的光谱不变原理,其次利用重要的光谱不变量方向逃逸概率构建基于方向逃逸概率的植被偏振反射模型(directional-escape-probability-based polarized reflectance model for vegetation, DEP-P)并推导其解析表达.第 3 节推导了 DEP-P 模型在叶片单次散射反照率已知和未知时的通用表达.第 4 节基于矢量辐射传输模型实现了叶片单次散射反照率已知时 DEP-P 模型在多种植被场景下的直接验证.第 5 节分别通过室内植株多角度偏振测量数据、机载研究型偏振扫描仪(research scanning polarimeter, RSP)数据、星载偏振多角度辐射计(polarization and directionality of the Earth's reflectance, POLDER)等多尺度数据对模型的有效性进行间接验证.

## 2 BPDF 物理模型基础形式与解析表达

植被冠层反射的偏振辐射主要由发生在叶片表面的光的单次散射中的镜面反射过程产生<sup>[21]</sup>.鉴于此,我们先简要介绍描述光子-植被元素相互作用的光谱不变原理,随后由冠层单次散射的光谱不变原理表达出发,构建由单次散射产生的植被偏振反射率 BPF 的光谱不变原理表达,最后推导模型的解析表达.

### 2.1 光子-植被元素相互作用的光谱不变原理

光子-植被元素多次散射和吸收过程如图 1 所示.

## 2.2 冠层单次散射与光谱不变量的关系

根据光谱不变原理, 对于足够浓密或下垫面是黑色背景的植被冠层而言, BRDF 可表达为

$$\text{BRF}(\Omega) = \frac{i_0(\Omega_0) \rho_{\text{eff}}(\Omega)}{1 - \omega_\lambda p_{\text{eff}}} \omega_\lambda, \quad (1)$$

其中  $\Omega_0$  代表入射方向,  $i_0$  为截获率;  $\rho_{\text{eff}}(\Omega)$  是冠层方向逃逸概率 (directional escape probability, DEP) 的有效值;  $\omega_\lambda$  是叶片单次散射反照率;  $p_{\text{eff}}$  是再碰撞概率有效值. 式 (1) 表明 DEP 这项只与冠层结构有关的量决定了冠层 BRDF 的方向性 [22].

基于从冠层中逃逸的光子在  $2\pi$  空间中的方向性主要由单次散射决定这一假设 [23,24], 以及  $\rho(\Omega)$  和  $p$  在第一次 (单次) 和多次散射下的值差异显著这一事实, 式 (1) 可以写作由第 1 次散射时的冠层方向逃逸概率  $\rho_1(\Omega)$  和再碰撞概率  $p_1$  表示的单次散射 BRDF,  $\text{BRF}_1$ , 和由第  $m$  次散射时的冠层方向逃逸概率  $\rho_m(\Omega)$  和再碰撞概率  $p_m$  表示的多次散射 BRDF,  $\text{BRF}_m$  的和的形式:

$$\text{BRF}(\Omega) = \text{BRF}_1(\Omega) + \text{BRF}_m(\Omega), \quad (2)$$

其中

$$\text{BRF}_1(\Omega) = i_0(\Omega_0) \omega_\lambda \rho_1(\Omega), \quad (3)$$

$$\text{BRF}_m(\Omega) = i_0(\Omega_0) p_1 \omega_\lambda^2 \rho_m(\Omega) + i_0(\Omega_0) p_1 p_m \omega_\lambda^3 \rho_m(\Omega) + \dots = \frac{i_0(\Omega_0) p_1 \omega_\lambda^2 \rho_m(\Omega)}{1 - p_m \omega_\lambda}. \quad (4)$$

根据式 (3), 利用大尺度遥感数据和影像模拟模型 (Large-scale remote sensing data and image simulation model, LESS) 模拟的  $i_0(\Omega_0)$  和  $\rho_1(\Omega)$  计算  $\text{BRF}_1$ , 并与 LESS 直接计算所得  $\text{BRF}_1$  进行对比, 如图 2 所示. 其中实线为 LESS 直接模拟的单次散射 BRDF, 虚线为利用 LESS 模拟的  $i_0(\Omega_0)$  和  $\rho_1(\Omega)$  通过光谱不变表达式计算得到的单次散射 BRDF. 叶片单次散射反照率采用 LESS 内置的实测桦树绿叶光谱. 入射天顶角为  $30^\circ$ . 红、黑和蓝色分别代表近热点方位 ( $\text{VZA} = 38.13^\circ, \text{RAA} = 348.75^\circ$ )、近天底方位 ( $\text{VZA} = 8.13^\circ, \text{RAA} = 45^\circ$ ) 和前向方位 ( $\text{VZA} = 53.12^\circ, \text{RAA} = 180^\circ$ ) 的观测.

图 2 表明, 在多次散射可触发、光谱不变原理成立的植被弱吸收谱段 (710 ~ 900 nm), 式 (3) 具有很高精度, 能够简洁有效地模拟冠层  $\text{BRF}_1$ . 用冠层截获率和 DEP 两个光谱不变量来构建冠层单次散射 BRDF (式 (3)) 是有效的, 这为利用光谱不变原理描述的冠层单次散射过程进而实现冠层 BPF 建模提供了基础. 叶片单次散射反照率  $\omega_\lambda$  可以表示为

$$\begin{aligned} \omega_\lambda &= \int_{4\pi} \gamma_{LD}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega + \int_{4\pi} \gamma_{LS}(\Omega_L, \Omega' \rightarrow \Omega) d\Omega = i_L \bar{\omega}_\lambda + s_L \\ &= (1 - K(\kappa, \alpha') F_r(N, \alpha')) \bar{\omega}_\lambda + K(\kappa, \alpha') F_r(N, \alpha'). \end{aligned} \quad (5)$$

对于单次散射过程,  $\omega_\lambda$  的镜面反射项  $K(\kappa, \alpha') F_r(N, \alpha')$  是部分偏振的 (主要为线偏振). 类似于菲涅尔镜面反射函数, 表面偏振反射部分可以由菲涅尔偏振反射函数刻画:

$$F_p(N, \alpha') = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{N \cos \alpha - \cos \alpha'}{N \cos \alpha + \cos \alpha'} \right)^2 - \left( \frac{N \cos \alpha \alpha' - \cos \alpha}{N \cos \alpha' + \cos \alpha} \right)^2 \right].$$

根据式 (5), 为了描述冠层 BRDF 的偏振反射部分, 即双向偏振反射率因子 (bidirectional polarized reflectance factor, BPF), 我们可以将单次散射 BRDF 模型中的  $\omega_\lambda$  替换为  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha')$ , 即可得到基于 DEP 的植被 BPF 模型 DEP-P:

$$\text{BPF}(\Omega) = i_0(\Omega_0) K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') \rho_1(\Omega). \quad (6)$$

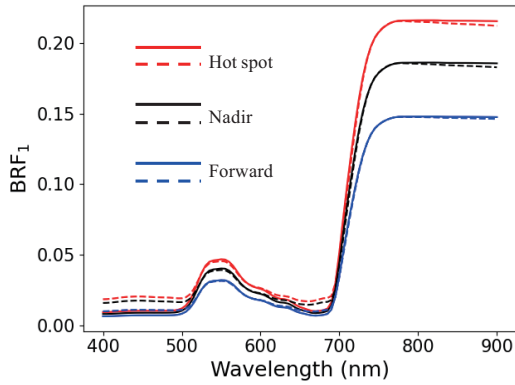


图 2 (网络版彩图) BRF<sub>1</sub> 的模拟结果对比图  
**Figure 2** (Color online) Comparison of simulation results of BRF<sub>1</sub>

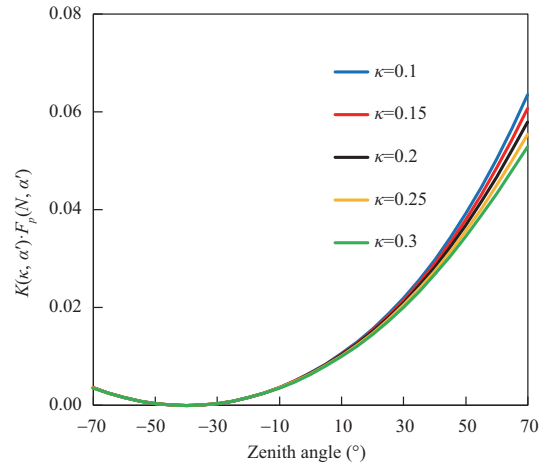


图 3 (网络版彩图) 叶表粗糙度系数  $\kappa$  对叶片偏振反射的影响  
**Figure 3** (Color online) Influence of leaf surface roughness coefficient  $\kappa$  on blade polarization reflection

在式 (6) 中, 入射角  $\alpha'$  能够从入射 - 观测几何计算得到; 叶表粗糙度系数  $\kappa$  往往在 0.1 ~ 0.3 之间取值 [25], 其对叶片偏振反射相函数影响不大 (图 3), 在观测天顶角为 70° 的前向散射区域最大不确定度 < 10%, 因此可固定为 0.2; 叶表折射率可固定为 1.5, 这是前人研究中广为接受的 [13, 17, 21, 26]. 因此,  $i_0(\Omega_0) \rho_1(\Omega)$  是 DEP-P 模型 (式 (6)) 中唯一需要解算的项.

### 2.3 模型解析表达

如果冠层 BRF<sub>1</sub> 可以被解析表达, 则根据式 (3),  $i_0(\Omega_0) \rho_1(\Omega)$  可表达为 BRF<sub>1</sub> 和  $\omega_\lambda$  的比值. Kuusk 等 [27] 的研究表明, BRF<sub>1</sub> 的解析表达式如下:

$$\text{BRF}_1(\Omega) = \frac{\Gamma(\Omega_0 \rightarrow \Omega)}{\mu\mu_0} \int_0^H u_L(z) p(z, \Omega_0, \Omega) dz, \quad (7)$$

其中  $\Gamma(\Omega_0 \rightarrow \Omega)$  是冠层的面积散射相函数, 由叶倾角分布函数 (leaf inclination distribution function, LIDF) ( $g_L$ ), 入射 - 观测几何和叶片散射特性决定. 类似地,  $\Gamma(\Omega_0 \rightarrow \Omega)$  也由漫散射项  $\Gamma_D$  和镜面反射项  $\Gamma_S$  两部分构成. 假设叶片在冠层中是随机分布的, 且冠层结构与叶片光学特性与冠层高度  $z$  无关, 则式 (7) 的解析解可近似表达为 [27]

$$\text{BRF}_1(\Omega) = \Gamma(\Omega_0 \rightarrow \Omega) (T_1 + T_2 - T_3), \quad (8)$$

其中,

$$T_1 = \frac{1 - \exp(-\text{LAI}(G(\Omega_0)/\mu_0 + G(\Omega)/\mu))}{G(\Omega)\mu_0 + G(\Omega_0)\mu},$$

$$T_2 = \frac{1 - \exp(-\text{LAI}(G(\Omega_0)/\mu_0 + G(\Omega)/\mu)/2 - \xi S_l \sqrt{\mu\mu_0})}{(G(\Omega)\mu_0 + G(\Omega_0)\mu)/2 + \xi \sqrt{\mu\mu_0}/(4S_l \text{LAI})},$$

$$T_3 = \frac{1 - \exp(-\text{LAI}(G(\Omega_0)/\mu_0 + G(\Omega)/\mu) - \xi S_l \sqrt{\mu\mu_0}/4)}{G(\Omega)\mu_0 + G(\Omega_0)\mu + \xi \sqrt{\mu\mu_0}/(4S_l \text{LAI})},$$

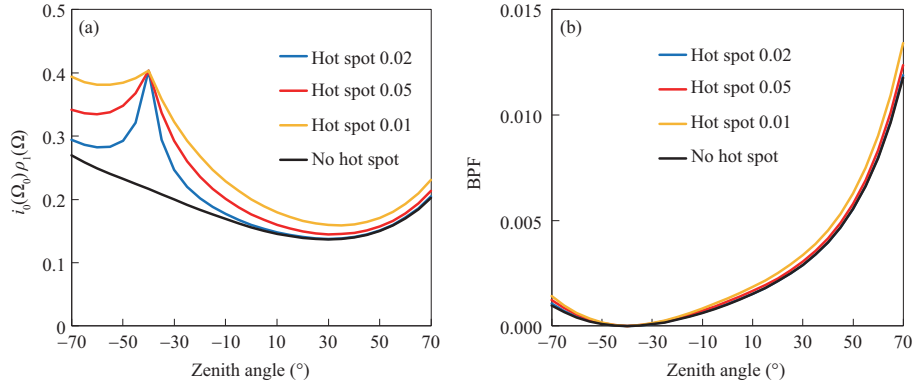


图 4 (网络版彩图) 热点效应的考虑与否对 (a) 单次方向逃逸概率  $i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega)$  和 (b) 偏振反射率 BPF 的影响  
**Figure 4** (Color online) Influence of hot spot effect considered or not on (a) single directional escape probability  $i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega)$  and (b) polarization reflectivity BPF

$LAI = \int_0^H u_L(z)dz$  为叶面积指数,  $T_2$  和  $T_3$  与热点效应相关.

对于叶倾角球型分布 ( $g_L = 1, G = 0.5$ ) 的均匀植被,  $\Gamma_S$  的量级在  $10^{-3}$  (不大于 0.005),  $i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega)$  可表达为

$$i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega) = \left( \frac{1}{3\pi}(\sin \xi - \xi \cos \xi) + \frac{1}{6} \cos \xi \right) (T_1 + T_2 - T_3). \quad (9)$$

植被 BPDF 物理模型 DEP-P 可相应表达为

$$BPF(\Omega) = \left( \frac{1}{3\pi}(\sin \xi - \xi \cos \xi) + \frac{1}{6} \cos \xi \right) (T_1 + T_2 - T_3) K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha'). \quad (10)$$

值得关注的是,  $F_p$  是入射角  $\alpha'$  (也是相角  $\xi$  的) 的单调递增函数, 当观测方向与入射方向一致时 (热点方向)  $F_p = 0$ . 这使得式 (10) 中的热点效应可以忽略不计. 如图 4 所示, 虽然热点效应对 DEP 的空间分布影响很大 (图 4(a)), 但对冠层偏振反射率 BPF 几乎没有影响 (图 4(b)). 因此式 (10) 中与热点相关的两项  $T_2$  和  $T_3$  可以忽略. 图 4(a) 中的  $i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega)$  由式 (9) 解析表达, 0.02, 0.05 和 0.1 分别为式 (9)  $T_2$  和  $T_3$  项中热点因子  $S_l$  的取值; 无热点情况则不考虑  $T_2, T_3$  项. 图 4(b) 中考虑与不考虑热点的 BPF 分别由式 (10) 和 (11) 表达.

更进一步, 对于本文研究的  $LAI \geq 3$  的浓密冠层,  $T_1$  中的  $\exp(-0.5LAI(1/\mu_0 + 1/\mu))$  项非常趋近于 0. 因此, 式 (10) 可以简化为

$$BPF(\Omega) = \frac{2 \sin \xi + (\pi - 2\xi) \cos \xi}{3\pi(\mu + \mu_0)} K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha'). \quad (11)$$

式 (11) 即为 DEP-P 模型的解析表达. 可以看出, 不需要任何关于植被冠层的先验知识和辅助数据就可通过该式直接利用入射 - 观测角度计算冠层偏振反射率 BPF. 但该式的推导过程基于以下前提: (1) 植被水平和垂直均匀; (2) 冠层内的叶片随机分布, 没有聚集效应; (3) 叶倾角满足球型分布. 然而, 这些前提在实际场景中很难满足, 因此需要找到更通用的获取单次 DEP ( $i_0\rho_1(\Omega)$ ) 的方法.

### 3 光谱不变原理优化与 BPDF 物理模型通用表达

由于可观测到的植被反射辐射是包含多次散射的辐射传输全过程的结果, 所以从遥感数据中直接获取单次散射 DEP 非常困难. 然而根据光谱不变原理, 当叶片光学特性 ( $\omega_\lambda$ ) 已知时, 有效 DEP

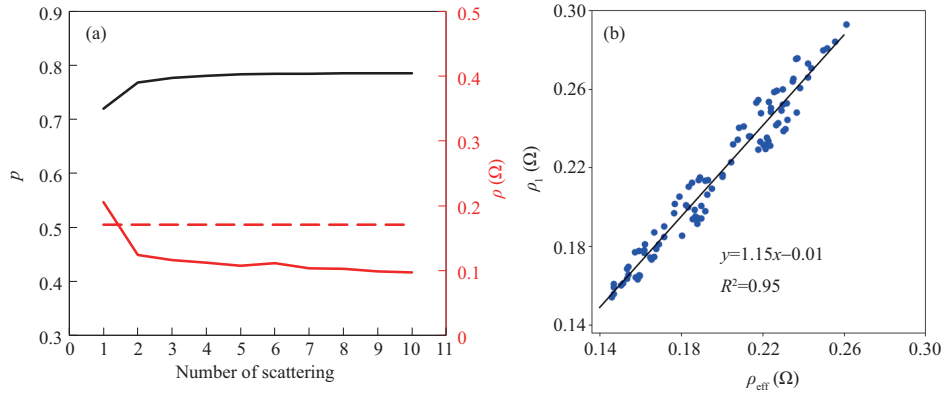


图 5 (网络版彩图) (a) 再碰撞概率 (黑色实线) 和方向逃逸概率随散射次数的变化, 其中红色虚线表示由冠层 BRF 和叶片单次散射反照率  $\omega_\lambda$  计算得到的方向逃逸概率有效值  $\rho_{\text{eff}}$ ; (b) 植被场景上半球反射空间 100 个等分立体角对应的单次和多次 DEP 的散点图及拟合的线性关系

Figure 5 (Color online) Variation of recollision probability (black solid line) and directional escape probability with the number of scattering times, where the red dashed line denotes the RMS value of the directional escape probability  $\rho_{\text{eff}}$  computed from the canopy BRF and leaf single-scattering albedo  $\omega_\lambda$ . (b) Scatterplot of the single- and multiple-occurrence DEPs corresponding to the 100 equidistant stereoscopic corners of hemispherical reflectance space on the vegetation scene and the fitted linear relationship

( $i_0(\Omega_0) \rho_{\text{eff}}(\Omega)$ ) 可以通过  $710 \sim 790 \text{ nm}$   $\text{BRF}_\lambda(\Omega)/\omega_\lambda$  和  $\text{BRF}_\lambda(\Omega)$  的线性关系的截距直接获取, 即由式 (1) 得  $\text{BRF}_\lambda(\Omega)/\omega_\lambda = \rho_{\text{eff}} \cdot \text{BRF}_\lambda(\Omega) + i_0 \rho_{\text{eff}}(\Omega)$ . 如果存在一个描述单次反射 DEP 和有效 DEP 固有关系的模型, 就能实现从遥感获取的有效 DEP 向单次反射 DEP 的转换, 从而直接服务于 DEP-P 模型的正演. 本节首先利用三维辐射传输模型构建这一转换关系, 其次推导模型通用表达.

### 3.1 有效向单次方向逃逸概率的转换模型

利用三维辐射传输模型大尺度遥感数据和影像模拟模型 (LESS) [28] 来探索有效和单次 DEP 的关系. 改进版本的 LESS 2.0 能够统计每次光子-植被元素相互作用时参与散射的光子数、散射后又被冠层元素截获的光子数, 以及散射后向以某方向为中心的某立体角内逃逸出冠层的光子数, 因此可以用来计算各散射次数下的冠层再碰撞概率  $p$  和 DEP 的真值 [29]. 与此同时, 有效 DEP 可以直接利用 LESS 模拟的冠层 BRF 和叶片单次散射反照率  $\omega_\lambda$  通过拟合  $710 \sim 790 \text{ nm}$   $\text{BRF}_\lambda(\Omega)/\omega_\lambda$  和  $\text{BRF}_\lambda(\Omega)$  的线性关系获得.

选取第四和第五版 RAMI 平台的标准匀质植被场景 HOM 23 中的  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的子场景, 作为 LESS 的输入场景, 其冠层高度为 1 m. 场景的 LAI 可通过改变散射体 (叶片) 的数量来调节, 散射体半径为 0.05 m, 厚度忽略不计; 对于  $\text{LAI} = 4$  的场景, 场景内散射体数量为 50930. 散射体随机分布在冠层空间, LIDF 为球型分布. 该场景下的  $p$  和  $\rho(\Omega)$  随散射次数的变化如图 5 所示. 随散射次数的增大,  $p$  和  $\rho(\Omega)$  分别显著增大和变小; 其中  $p_1$  和  $\rho_1(\Omega)$  相对于后续散射次数有明显差异;  $\rho_{\text{eff}}(\Omega)$  介于  $\rho_1(\Omega)$  和  $\rho(\Omega)$  的收敛值之间, 且更靠近  $\rho_1(\Omega)$ . 证实了方向逃逸概率  $\rho(\Omega)$  主要由单次散射主导 [24], 而偏振只与单次散射过程相关, 进一步证实了用 DEP 构建植被偏振模型的可行性. 如图 5(b) 所示, 在给定的冠层结构和叶片光学特性配置下, 单次和有效 DEP 的关系可以用简单线性模型表示:  $\rho_1 = k \cdot \rho_{\text{eff}}$  ( $k > 1$ ).

转换系数  $k$  受冠层结构参数影响. 经测试,  $k$  对 LAI 的依赖性相比于其他结构参数更强, 因此可

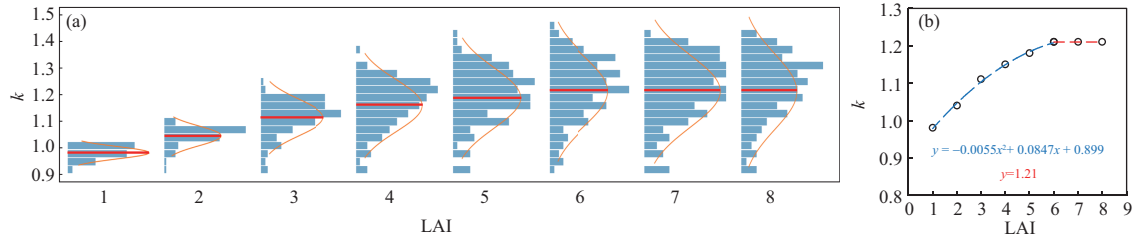


图 6 (网络版彩图) (a) 315 条 LOPEX 和 ANGERS 数据得到的  $k$  在不同 LAI 下的概率密度分布; (b)  $k$  的均值随 LAI 的变化及拟合的分段函数

Figure 6 (Color online) (a) Probability density distribution of  $k$  obtained from 315 LOPEX and ANGERS data at different LAIs; (b) variation of the mean value of  $k$  with LAI and the fitted segmentation function

将  $k$  表示为 LAI 的函数, LAI 取值范围为 1 ~ 8, 步长为 1. 不同 LAI 下  $k$  值分布的概率密度图如图 6(a), 其中红线是均值, 橙线是对应的正态分布曲线; 图 6(b) 用分段函数描述了均值的分布:

$$\rho_1 = k \cdot \rho_{\text{eff}} = \begin{cases} (-0.0055\text{LAI}^2 + 0.085\text{LAI} + 0.90) \cdot \rho_{\text{eff}}, & \text{LAI} \leq 6, \\ 1.21\rho_{\text{eff}}, & \text{LAI} > 6. \end{cases} \quad (12)$$

转换模型对 LAI 以外的其他结构参数并不敏感, 如图 7 所示, 其中右  $y$  轴对应图下方的红色区域, 表示转换关系式在不同结构配置下的最大不确定度 (相对误差) 分布. 黑色虚线表示转换模型式 (12). 由图 7 可知, 式 (12) 对于叶倾角几乎不敏感; 对冠层高度、叶片尺寸而言, 虽然不同配置对于式 (12) 的不确定度随 LAI 的增大而略有增大, 但最大不确定度控制在 10% 以内; 对于入射天顶角, 过大和过小的入射角会带来更大误差, 即便如此, 模型 (12) 的最大不确定度也在 20% 以内. 因此, 式 (12) 所刻画的  $\rho_1$  和  $\rho_{\text{eff}}$  的转换关系在不同冠层结构下具有较强的稳定性.

### 3.2 叶片单次散射反照率已知时的模型通用表达

当叶片单次散射反照率  $\omega_\lambda$  已知时, 冠层偏振反射率 BPF 可由 DEP-P 模型表达为

$$\text{BPF}(\Omega) = k(\text{LAI}) \cdot K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') i_0 \rho_{\text{eff}}, \quad (13)$$

其中 LAI 可以直接测量得到, 也可以从现有遥感产品中获得;  $i_0 \rho_{\text{eff}}$  可直接由 710~790 nm 冠层 BRDF 和  $\omega_\lambda$  的线性关系获得;  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha')$  可按  $\kappa = 0.2, N = 1.5$  直接获得. 因此  $\omega_\lambda$  已知时, DEP-P 模型可直接正演植被偏振反射率 BPF.

然而在实际情况下, 叶片光学特性 (叶片单次散射反照率) 往往是未知的, 并且很难精确获得. 此时我们需要借助光谱不变原理, 通过引入叶片单次散射反照率和已知的参考叶片单次散射反照率  $\omega_0$  的固有关系将问题转化.

### 3.3 叶片单次散射反照率未知时的模型通用表达

考虑叶片散射随干物质含量的变化, 在 710 ~ 790 nm 波段能得到  $\text{BRF}_\lambda(\Omega)/\omega_0$  与  $\text{BRF}_\lambda(\Omega)$  的新的线性关系<sup>[30]</sup>

$$\frac{\text{BRF}_\lambda(\Omega)}{\omega_0} = [B + i_L \rho_{\text{eff}} A (1 - q(t_c))] \text{BRF}_\lambda(\Omega) + I, \quad (14)$$

其中, 截距  $I = i_L i_0(\Omega_0) \rho_{\text{eff}}(\Omega) [1 - q(t_c)] A$ , 是有效 DEP  $i_0(\Omega_0) \rho_{\text{eff}}(\Omega)$ 、偏差因子  $A$  和一个与冠层平均叶片光学特性有关的固有参数  $i_L [1 - q(t_c)]$  的乘积. 在此情况下单次 DEP  $i_0(\Omega_0) \rho_1(\Omega)$  可表达



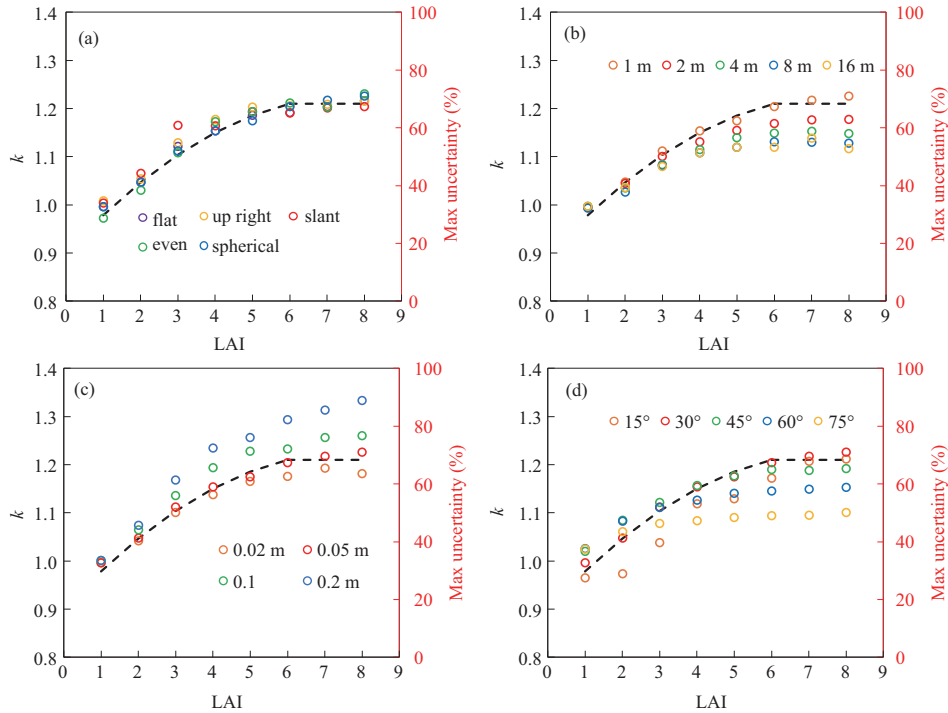


图 7 (网络版彩图)  $\rho_1$  和  $\rho_{\text{eff}}$  的转换模型 (式 (12)) 对不同冠层 (a) 叶倾角分布、(b) 高度、(c) 叶片半径、(d) 入射天顶角的敏感性

Figure 7 (Color online) Sensitivity of the transformed model (Eq. (12)) for  $\rho_1$  and  $\rho_{\text{eff}}$  to different canopy (a) leaf inclination distributions, (b) heights, (c) leaf radius, and (d) incident zenith angles

为  $i_0(\Omega_0)\rho_1(\Omega) = \frac{kl}{i_L A [1-q(t_c)]}$ , 则 DEP-P 模型可表达为

$$\text{BPF}(\Omega) = \frac{k}{i_L A [1-q(t_c)]} K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I = C \cdot K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I. \quad (15)$$

对一个给定的冠层或遥感影像中的某个植被像元, 参数  $\frac{k}{i_L A [1-q(t_c)]}$  是一个常数 ( $C$ ), 由冠层结构项  $k$  (LAI 的函数) 和平均叶片光学特性项  $\frac{1}{i_L A [1-q(t_c)]}$  组成. 后者又包括叶表光学特性项  $\frac{1}{i_L}$  和叶内组分项  $\frac{1}{A [1-q(t_c)]}$ . 由此可见若 DEP-P 确实以式 (15) 的形式成立, 则冠层或植被像元的 BPF 与  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I$  将存在正比例关系. 耦合因子  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I$  为叶表偏振项和新截距  $I$  的乘积, 是一个包含偏振、冠层结构和叶片光学特性的耦合项, 因此我们将  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I$  称作“偏振耦合因子”, 可直接通过  $\text{BRF}(\Omega)$  与已知的参考叶片单次散射反照率获得. 那么, 多角度观测下的  $\text{BPF}(\Omega)$  和偏振耦合因子之间将存在斜率为  $C$ , 截距为 0 的稳定的线性关系.

#### 4 基于辐射传输模型的植被场景验证

由 DEP-P 模型的通用表达式 (13) 和 (15) 可知, 叶片单次散射反照率  $\omega_\lambda$  已知时, 单次 DEP 可直接由有效 DEP 转化而来, 因此可对 DEP-P 模型直接验证; 当  $\omega_\lambda$  未知时, 可通过验证多角度 BPF 和偏振耦合因子  $K(\kappa, \alpha') F_p(N, \alpha') I$  是否存在截距为 0 的线性关系间接验证 DEP-P 模型. 植被矢量辐射传输模型可在人为给定叶片光学特性和冠层结构的前提下同时模拟冠层 BRF 和 BPF, 这为 DEP-P

表 1 DART-Lux 的模型参数  
Table 1 Parameters of DART-Lux model

Category	Parameter	Value
Atmosphere		No atmosphere radiative transfer
	Maximal scattering order	30
	Maximum rendering time per image (s)	Disabled
Bi-directional parameters	Target sample density per pixel (BRF, BTF)	50
	Number of repetitions of the user-defined scene	20 (Duplicated as 41 × 41)
	Target save interval (s)	20
Direction input parameters	Number of directions	200
	Sun zenith angle (°)	30
Optical properties-Specular	$n_i$ (incident)	Air
	$n_t$ (transmitted)	Leaf
	Roughness factor	0.2
	Material character	Glossy surface and diffuse base

模型的验证提供了条件, 基于目前最新版本的 DART (V5.8.15) [31], 对多种场景下  $\omega_\lambda$  已知时 DEP-P 模型进行直接验证.

#### 4.1 匀质冠层场景

首先利用叶倾角球型分布匀质植被场景验证 DEP-P 模型的解析表达和通用表达. DART-Lux 模式下的模型及表面反射参数设置见表 1.

图 8 展示了不同 LAI 和冠层高度情况下, DART 和 DEP-P 模拟的  $2\pi$  空间内植被 BPF 的分布. 实验表明, 浓密植被的 LAI 对冠层偏振反射率影响不大 (与 DEP-P 解析表达式中省略 LAI 一致), 而树高的增大会使 BPF 略有减小 (在解析表达中并未考虑).  $2\pi$  空间内, BPF 在热点方向取值最小, 并会随着相位角增大而增大, 前向散射区域取值最大, 这与现有的多尺度测量结果一致 [25, 32]. 当冠层结构变化时, DEP-P 模型的解析表达和通用表达总能很好地刻画 BPF 的二向空间分布 (图 8), 上半球空间 100 个角度的 BPF 模型值与 DART 模拟值基本保持一致 (图 9), 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 在 0.001 以下, 证明了本文推导的 DEP-P 模型解析表达和通用表达的有效性.

#### 4.2 真实阔叶林场景

进一步证明 DEP-P 模型在结构更复杂的植被场景下的适用性. 欧盟的辐射传输模型对比平台 RAMI (radiation transfer model intercomparison) 的第四和第五阶段 (RAMI-IV [33] 和 RAMI-V) 包含了从匀质到异质的各种植被场景 3D 模型, 这有助于使用 DART 在更逼真、结构更复杂的植被场景上验证 DEP-P 模型的有效性. 使用茂密白桦林场景 Jarvselja Birch Stand Summer (HET09\_JBS\_SUM), 场景包含了 7 个树种 18 种结构形态的 1029 棵树, 整体 LAI 为 3.442, 为了让该场景具有已知的叶片光学特性以直接验证 DEP-P 模型模拟 BPF 的精度, 将场景内叶片单次散射反照率统一为挪威槭叶片 (Acer-Platanoides) 反照率. 由于场景植被茂密, 木质元素和土壤几乎处于阴影中, 因此可不考虑其偏振反射特性.

由图 10 可知, DEP-P 模拟值和 DART 模拟值依然具有较好的空间分布一致性, 尤其是在常用的  $60^\circ$  观测天顶角范围内. 在前向观测天顶角大于  $70^\circ$  时, DART 模拟的 BPF 的空间分布呈现出一

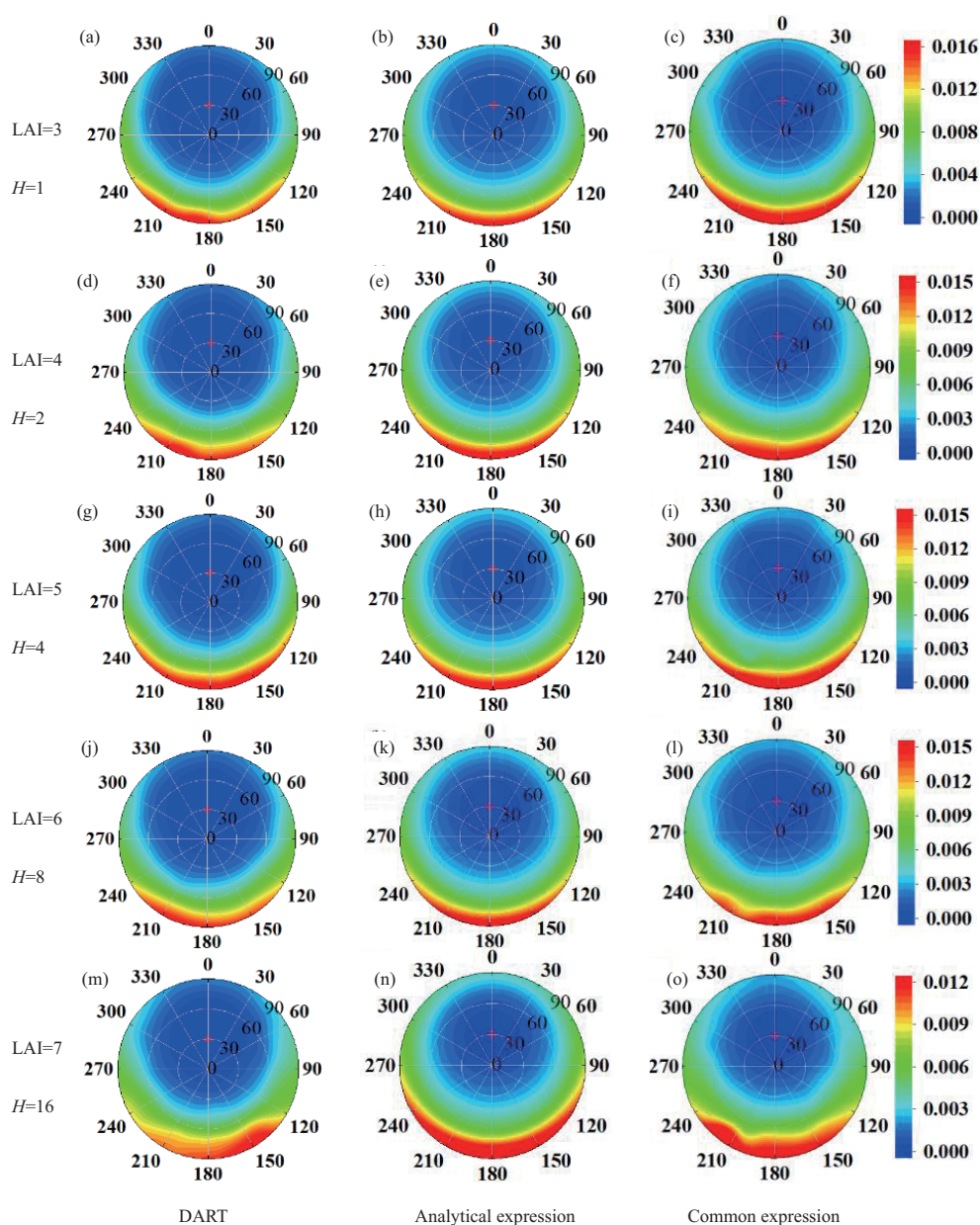


图 8 (网络版彩图) 不同 LAI 和高度 ( $H$ ) 的 RAMI HOM23 场景 BPF 的  $2\pi$  空间分布. 左, 中, 右列分别为 DART 模拟值、DEP-P 解析表达值和 DEP-P 通用表达值. 红色圆圈表示入射方向, 其所在一侧为后向散射区域. 第 1 ~ 5 行分别为 LAI = 3 &  $H = 1$  (a)~(c), LAI = 4 &  $H = 2$  (d)~(f), LAI = 5 &  $H = 4$  (g)~(i), LAI = 6 &  $H = 8$  (j)~(l), LAI = 7 &  $H = 16$  (m)~(o) 的场景

**Figure 8** (Color online)  $2\pi$  spatial distribution of BPF for the RAMI HOM23 scene for different LAI and height ( $H$ ). The left, middle, and right columns represent the simulated values of DART, the parsed expression values of DEP-P, and the general expression values of DEP-P, respectively. The red circle indicates the incident direction, with the side it is on being the backscattering region. Rows 1~5 correspond to scenes with LAI = 3 &  $H = 1$  (a)~(c), LAI = 4 &  $H = 2$  (d)~(f), LAI = 5 &  $H = 4$  (g)~(i), LAI = 6 &  $H = 8$  (j)~(l), and LAI = 7 &  $H = 16$  (m)~(o)

定的非对称性, 这一方面与 DART 采用的蒙特卡洛算法在模拟 BPF 时的随机性有关, 更重要的另一方面是 BPF 本身量级小、对视场内冠层结构的复杂性更加敏感. 而 DEP-P 模型由 BRF 通过光谱不

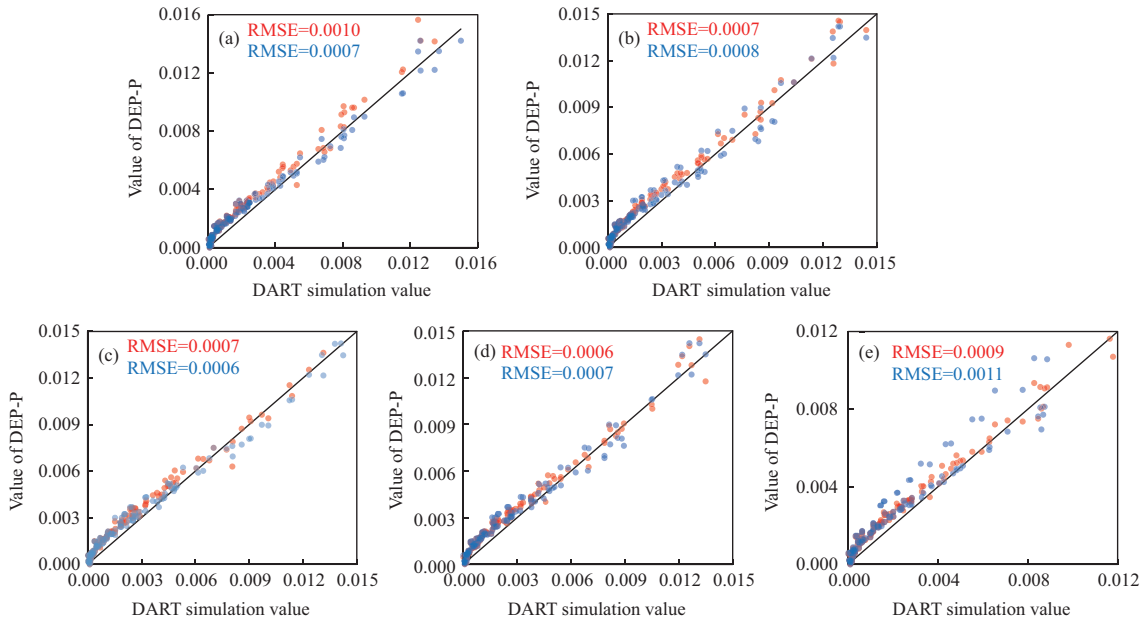


图 9 (网络版彩图) 不同 LAI 和高度 ( $H$ ) 的 RAMI 球型匀质植被场景 BPF 的 DART 模拟值与 DEP-P 解析表达模型值 (蓝色) 和 DEP-P 通用表达模型值 (红色) 的散点图

Figure 9 (Color online) Scatter plots of DART simulated values versus DEP-P resolved expression model values (blue) and DEP-P generalized expression model values (red) for the BPF of the RAMI spherical homogeneous vegetation scene for different LAI and heights ( $H$ ). (a) LAI = 3 &  $H$  = 1, (b) LAI = 4 &  $H$  = 2, (c) LAI = 5 &  $H$  = 4, (d) LAI = 6 &  $H$  = 8, (e) LAI = 7 &  $H$  = 16

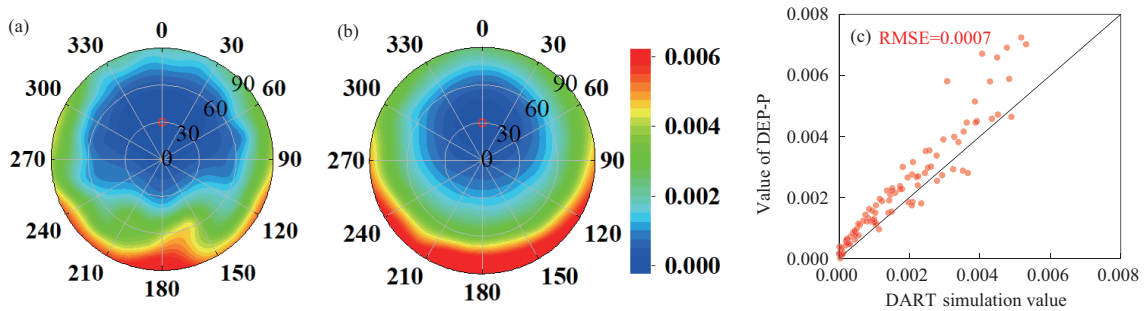


图 10 (网络版彩图) HET09\_JBS\_SUM 场景的 (a) BPF $2\pi$  空间分布的 DART 模拟值, (b) DEP-P 模型模拟值和 (c) 二者在上半球空间 100 个观测方向的散点图

Figure 10 (Color online) (a) Scatter plots of DART simulated values, (b) DEP-P model simulated values, and (c) both for the  $2\pi$  spatial distribution of the BPF of the HET09\_JBS\_SUM scene in the upper hemispherical space for 100 observation directions

变原理得到, BRF 值远大于 BPF 且空间分布更加对称, 因此 DEP-P 模型模拟的 BPF 也更对称. 此外, DEP-P 存在一定的高估, 这是由固定为 1.5 的叶表折射率和有效向单次 DEP 转换模型的不确定性导致的, 这种不确定性是有案例间差异的.

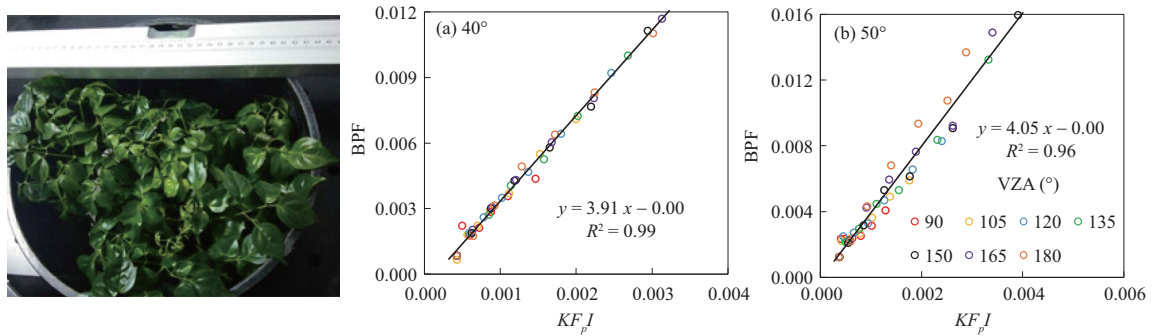


图 11 (网络版彩图) 室内阔叶植株在 (a)  $40^\circ$  和 (b)  $50^\circ$  入射天顶角下多角度 BPF 与  $K(\kappa, \alpha')F_p(N, \alpha')I$  的散点图. 不同颜色散点代表不同观测方位角. 由于后向散射区域 BPF 值过小且信噪比较低, 因此仅画出前向区域的数据. 黑色实线为全部数据的拟合线

**Figure 11** (Color online) Scatter plots of multi-angle BPF versus  $K(\kappa, \alpha')F_p(N, \alpha')I$  for indoor broadleaf plants at (a)  $40^\circ$  and (b)  $50^\circ$  incident zenith angles. Different colored dots represent different observation azimuths. Due to the small BPF values and low signal-to-noise ratio in the backscattering region, only data from the forward region were plotted. The solid black line represents the curve obtained by fitting all the data

## 5 室内、机载与星载实测数据验证

基于 DART 矢量辐射传输模式的验证过程在给定叶片光学特性和冠层结构的前提下获得对应的反射率和偏振反射率因子, 从而实现了 DEP-P 模型的正演 (直接) 验证. 而遥感场景中叶片单次散射反照率是未知的, 大多数偏振遥感场景仅可获得植被 BRF 和 BPF. 这种情况下可通过验证多角度 BPF 和偏振耦合因子  $KF_pI$  是否存在截距为 0 的线性关系来间接验证 DEP-P 模型 (式 (15)). 本节选择已发表的室内植株数据、NASA 研究型偏振扫描仪 (RSP) 数据和 PARASOL 卫星搭载的 POLDER 偏振载荷数据, 在室内、机载和星载多尺度下验证 DEP-P 模型的有效性.

### 5.1 室内植株多角度偏振测量数据

东北师范大学的孙仲秋教授团队为本文提供的于 2017 年发表的室内植株多角度 BRF 和 BPF 数据可用于验证 DEP-P 模型. 由于 BPF 随波长几乎不变, 本文采用信噪比更高的绿光至红光区域 (550 ~ 670 nm) 的平均值作为植株的 BPF.

多角度 BPF 数据和利用多角度 BRF 与参考叶片单次散射反照率光谱  $\omega_0$  获得的偏振耦合因子  $K(\kappa, \alpha')F_p(N, \alpha')I$  的散点图如图 11 所示. 在  $40^\circ$  和  $50^\circ$  入射角情况下, 多角度 BPF 和偏振耦合因子  $KF_pI$  呈现稳定的线性关系, 不同观测方位角和天顶角下斜率几乎不变且截距始终近似为 0; 入射角不同的两组数据获得的斜率均在 4 左右, 非常接近, 说明式 (15) 中的斜率常数  $C$  确实包含了冠层的固有属性信息.

### 5.2 机载研究型偏振扫描仪 (RSP) 数据验证

RSP 由 NASA 研制, 是拟搭载在 Glory 卫星上的 APS 偏振传感器的机载样机, 可测量可见光至短波红外 9 个波段 (410 nm, 470 nm, 555 nm, 670 nm, 865 nm, 960 nm, 1590 nm, 1880 nm, 2250 nm) 的 Stokes 参量 ( $I, Q, U$ ), 测量对象包括陆地和海洋背景下的云与气溶胶. 选择数据质量较好的美国南部大平原 (South Great Plain) ALIVE 实验中 2005 年 9 月 16 日获取的数据 (J31\_L1B\_20050916T163140Z) 为研究对象, 数据信息见表 2.

表 2 RSP 影像数据信息  
Table 2 RSP image data information

Category	Parameter	Category	Parameter
Date	2005-09-16	Average solar zenith angle (°)	72.74
Time	16 : 31 : 40 ~ 16 : 35 : 57	Observation zenith angle range (°)	0.03 ~ 62.13
Altitude (m)	192.89	Relative azimuth range (%)	0.01 ~ 223.07
Aerosol optical thickness	0.06 (very clear)	Phase angle range	22.50 ~ 75.97

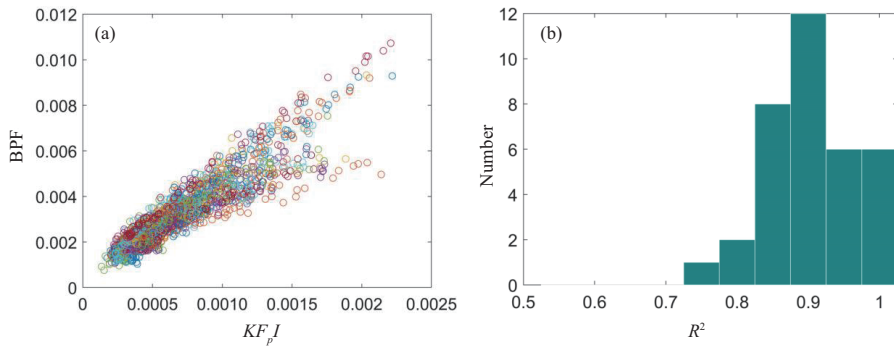


图 12 (网络版彩图) 35 个 RSP 浓密植被数据得到的 (a) BPF 与偏振耦合因子  $K F_p I$  的线性关系及 (b) 其  $R^2$  分布

Figure 12 (Color online) (a) Linear relationship between BPF and polarization coupling factor  $K F_p I$  obtained from 35 RSP dense vegetation data and (b) its  $R^2$  distribution

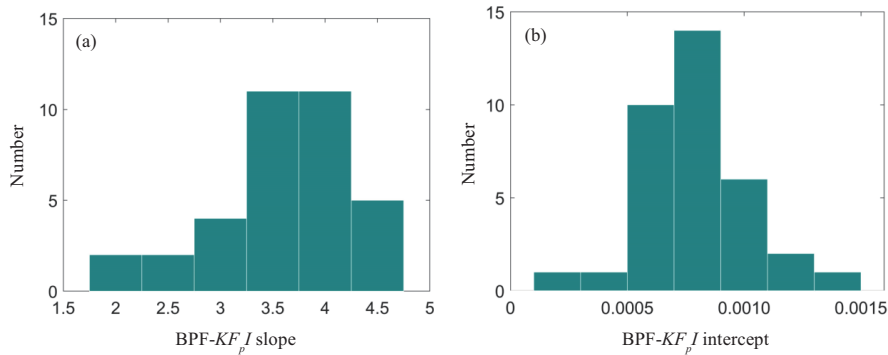


图 13 (网络版彩图) 图 12 线性关系的 (a) 斜率与 (b) 截距分布

Figure 13 (Color online) (a) Slope and (b) intercept distribution of the linear relationship of Figure 12

经过数据预处理、浓密植被筛选、双波段光谱不变量关系计算和偏振离群值剔除等过程, 35 个浓密植被样本的 124 个多角度观测被用于验证 DEP-P 模型, 样本多角度观测条带对应的 BPF 和偏振耦合因子  $K F_p I$  散点图见图 12. 35 组散点拟合的线性关系  $R^2$  均大于 0.7, 90% 以上大于 0.8; 35 组线性关系的斜率分布在 2 ~ 4.5 之间 (图 13(a)), 截距均不超过 0.0014 (图 13(b)). 该结果表明对同一样本点, 多角度 BPF 与偏振耦合因子  $K F_p I$  均存在斜率固定、截距几乎为 0 的稳定线性关系; 不同样本点线性关系的斜率不同, 代表不同的冠层固有属性. 该结果间接验证了 DEP-P 模型的有效性.

### 5.3 星载偏振多角度辐射计 (POLDER) 数据验证

2005 年发射的搭载在 PARASOL 小卫星上的偏振多角度传感器 (POLDER) 提供了大量的全球多角度偏振数据. 经大气校正的数据连续性最好的 2008 年的地表 BRDF 与 BPDF 数据存放在 2017 年发表的 BRDF-BPDF 数据库中<sup>[34]1)</sup>, 该数据库已在地表 BRDF 和 BPDF 建模方面广泛使用. 数据库中包括可见光至近红外的 6 个波段 (490 nm, 565 nm, 670 nm, 765 nm, 865 nm, 1020 nm) 的地表 BRDF 和 865 nm 的地表 BPDF. 仅提供 865 nm BPDF 是因为在此波段的大气校正不确定度较低, 且 BPDF 可被认为是随波长不变的. 数据根据 16 个国际岩石圈生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Program, IGBP) 地表分类存放. 在月度数据集的每个 IGBP 地类中存放了每个月质量最好的 50 个目标, 因此数据集中每个地类有接近 600 个目标. 每次卫星过境时对于每个目标可进行最多 16 个角度的观测, 因此目标在  $2\pi$  空间内有大量的多角度观测数据. 由于 POLDER 像素分辨率为 6.56.5 km, 在每个像素中当一个 IGBP 地类占比超过 75% 时该像素才被划分为该地类, 这一定程度上保证了数据集中目标的匀质性. 选择常绿针叶 (IGBP 01)、常绿阔叶 (IGBP 02)、落叶针叶 (IGBP 03)、落叶阔叶 (IGBP 04)、混合森林 (IGBP 05)、草地 (IGBP 10)、农田 (IGBP 12) 和农田/自然植被混合地表 (IGBP 14) 这 8 个存在浓密植被目标的地类进行 DEP-P 模型验证. 其中, IGBP 01 主要分布在北美和欧亚大陆中纬度地区; IGBP 02 主要分布在南美及澳大利亚大陆中、低纬度地区, 少量分布在欧亚大陆及非洲大陆中纬度地区; IGBP 03 主要分布在欧亚大陆高纬度地区; IGBP 04 主要分布在北美、欧亚、非洲大陆中纬度地区; IGBP 05 主要分布在北美和欧亚大陆中纬度地区; IGBP 10 主要分布在欧亚、南美大陆中纬度地区; IGBP 12 主要分布在全球范围内的中、低纬度地区; IGBP 14 主要分布在南、北美大陆中低纬度和欧亚大陆中纬度地区. 8 个地类浓密植被目标分布及其对应的 BPF 与偏振耦合因子  $KF_p I$  线性关系结果如图 14 所示. 对于所有地类, 80% 以上目标的多角度 BPF 和偏振耦合因子满足线性关系,  $R^2$  大于 0.7 且多数大于 0.8; 仅 5% 以下的目标  $R^2$  小于 0.5. 从每个地类中代表性目标的结果来看, POLDER 提供了这些目标半球空间内大量的多角度观测, 各自的多角度 BPF 与偏振耦合因子呈现稳定的线性关系, 不同目标线性关系的斜率之间有较大差异, 代表不同的植被属性. 例如, 阔叶植被 (IGBP 02, IGBP 04) 的斜率就显著大于针叶植被 (IGBP 01, IGBP 03).

需要注意的是, 相对于 RSP 机载观测的 BPF 数据, 星载 BPF 数据的不确定度更大, 主要由以下两方面原因导致. 其一, 大气的偏振反射强于地表, 轨道高度较高的卫星传感器对地表偏振弱信号的探测更容易受到大气偏振反射影响. 星载偏振信号中大气偏振的贡献大于地表, 这导致进行了偏振大气校正的地表 BPF 依然具有较大不确定度. 其二, 卫星偏振载荷往往具有较低的空间分辨率, 即使 POLDER BRDF-BPDF 数据集选取具有 75% 以上优势地类的目标像元, 但像元内的异质性依然不可忽略. 对植被目标而言, 像元内的土壤是对其偏振信号影响最大的误差源. 土壤的偏振反射率强于植被, 这使植被 BPF 蕴含了不可忽略的土壤信息, 这一定程度上影响了 BPF - 偏振耦合因子的线性关系以及基于此的后续应用.

## 6 结论与展望

本文首先从植被单次反射的辐射传输过程和光谱不变原理出发推导了基于方向逃逸概率的 BPDF 模型 (DEP-P) 的基础形式. 通过简化场景, 进一步推导得到了其解析表达. 考虑到更实际的遥感场景, 通过构建有效 DEP 向单次 DEP 的转换模型以及推导考虑叶片散射随干物质含量变化的光谱不变原

1) Bréon F.-M. A BRDF-BPDF database for the analysis of Earth targets reflectances. Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Saclay, PANGAEA, 2016. doi: 10.1594/PANGAEA.864090.

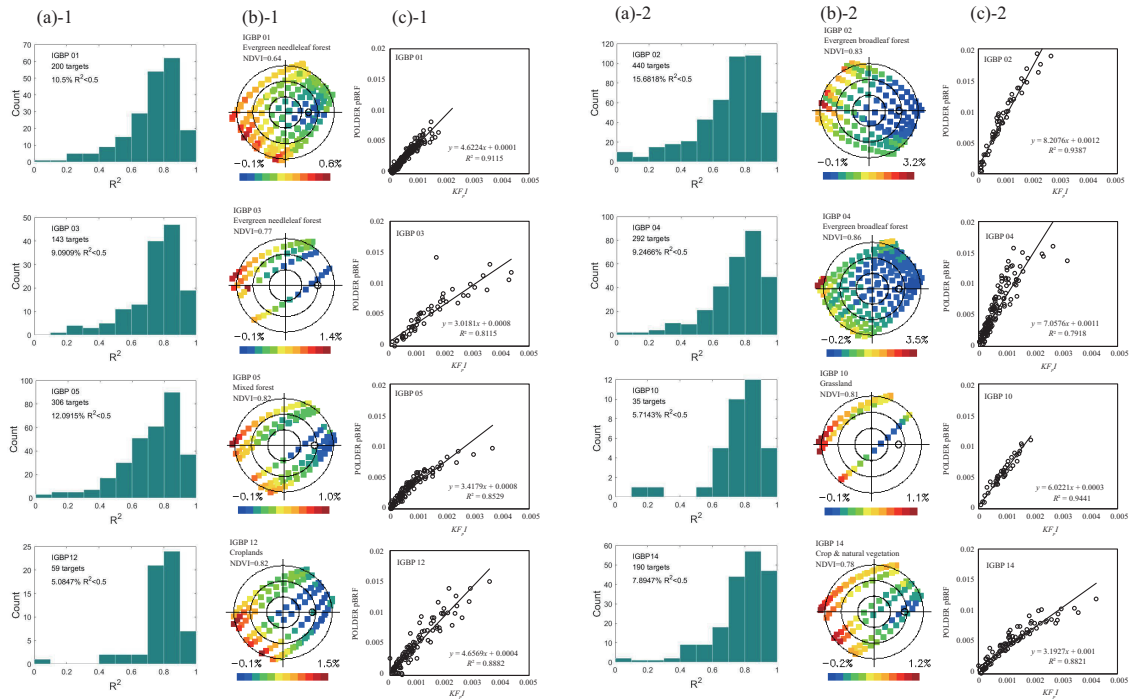


图 14 (网络版彩图) POLDER 数据在 8 个 IGBP 地类上得到的 (a) BPF 与偏振耦合因子  $K_{F_p}I$  线性关系的  $R^2$  分布, (b) 一个代表性目标的数据采集方位分布示意图和 (c) 对应的 BPF- $K_{F_p}I$  线性关系

Figure 14 (Color online) The POLDER data obtained on 8 IGBP land cover classes. (a)  $R^2$  distribution of the linear relationship between BPF and polarization coupling factor  $K_{F_p}I$  obtained, (b) schematic distribution of the data acquisition orientation of a representative target, and (c) the corresponding BPF- $K_{F_p}I$  linear relationship

理优化表达, 实现了遥感数据驱动的 BPDF 模型通用表达. 实验表明, 在已知叶片单次散射反照率的情况下, 本文所提出的 BPDF 模型 DEP-P 重构了从简单到复杂植被场景的偏振反射率的二向分布, 与 DART 结果具有很强的一致性; 在叶片单次散射反照率未知的情况下, 室内、机载和星载数据均验证了 DEP-P 模型推导出的线性关系的存在, 这一线性关系的斜率与植被固有光学属性直接相关. 该模型对偏振反射率的正演在三维矢量辐射传输模型模拟的三维匀质、异质和真实森林场景下均直接证明有效, 对偏振发射率的正演误差在 0.001 以内. 本文构建的植被 BPDF 物理模型 DEP-P 摆脱了传统物理模型的诸多理想植被假设, 只需满足植被足够浓密即可使用; 参数化方面也不需要数据驱动模型的观测数据拟合, 因此兼具了物理机理、简洁性、可接受的参数化方式、较高精度和较强的泛化性, 一定程度上解决了现有模型的问题, 具备矢量遥感基础模型的基础性和通用性.

表 3 对本文构建的 BPDF 物理模型 DEP-P 和目前几种具有代表性的以 BRDF 为基础的光学非均衡特性模型在构建机理、输入输出、模型参数化、精度泛化能力等方面进行了横向的定性比较, 以总结 DEP-P 模型的优势. 基本原理方面, 区别于普遍采用植被辐射传输理论且需要诸多数学近似的传统 BPDF 物理模型, DEP-P 模型基于描述光子-植被元素相互作用的光谱不变原理构建; 而半经验和神经网络模型则基于训练数据驱动. 现有模型中, 仅有 Kallel 蒙特卡洛物理模型可模拟来自所有单次散射信息 (镜面和非镜面反射) 的偏振信号, 且可模拟由叶绿素含量引起的圆偏振信号, 虽然非镜面偏振与圆偏振占比极小. 其余模型均假设偏振仅来自单次镜面反射, 且忽略圆偏振, 这是现有遥感探测体系下几乎所有模型的不足之处. 对植被的前提假设方面, 蒙特卡洛模型和 DEP-P 对植被要求



表 3 BPDF 光子模型与其他模型的比较总结  
Table 3 Summary of comparison between photon-vegetation interaction BPDF model (DEP-P) and other polarization models

Model	DEP-P	Rondeaux-Herman	Breon	Kallel	Nadal-Breon	Maignan	Xie-Cheng	GRNN
	Based on the polarization mechanism of photon-vegetation interaction							
	Optical non-equilibrium characteristic model based on BRDF							
Principle	Spectral invariant model	Vegetation radiative transfer	Vegetation radiative transfer	Monte Carlo three-dimensional vector radiative transfer	Physical and empirical parameters			Neural network training
Polarization source	(1) Polarization only comes from 1st order specular reflection; (2) ignoring circular polarization	(1) Polarization only comes from 1st order specular reflection; (2) ignoring circular polarization	(1) Polarization only comes from 1st order specular reflection; (2) ignoring circular polarization	(1) Polarization comes from 1st order scattering; (2) considering circular polarization	(1) Polarization only comes from 1st order specular reflection; (2) ignoring circular polarization			
Vegetation assumption	Dense enough	Pure mirror-like foliar surface; vegetation vertically and horizontally uniform; no clumping effect; dense enough	Pure mirror-like foliar surface; vegetation vertically and horizontally uniform; No clumping effect; leaf inclination spherically distributed; dense enough	Thick enough	None			
Simplicity	High	Moderate	High	Low	Moderate	High	High	Moderate
Input	(1) Reflectance; (2) leaf single scattering albedo; (3) LAI; (4) incidence-observation geometry	(1) Leaf inclination distribution function (LIDF) and G functions; (2) incidence-observation geometry	Incidence-observation geometry	(1) Total number of photons; (2) chlorophyll content; (3) LAI; (4) LIDF; (5) incidence-observation geometry	(1) Two empirical parameters; (2) incidence-observation geometry	(1) One empirical parameter; (2) incidence-observation geometry; (3) reflectance	(1) Two empirical parameters; (2) incidence-observation geometry; (3) reflectance	(1) A well-trained GRNN model; (2) incidence-observation geometry; (3) reflectance
Parameterization method	(1) Measured leaf single scattering albedo; (2) LAI from measurements or public product; (3) calculate directional escape probability (DEP) directly from reflectance	Measured canopy structural parameters	None	Measured chlorophyll content and canopy structural parameters	Empirical parameters via fitting multi angular polarized reflectance	(1) Empirical parameters via multi angular polarization reflectance; (2) NDVI calculated from reflectance	(1) Empirical parameters via multi angular polarization reflectance; (2) NDVI calculated from reflectance	Largescale data training
Output	Polarized reflectance	Polarized reflectance	Polarized reflectance	Stokes vectors	Polarized reflectance	Polarized reflectance	Polarized reflectance	Polarized reflectance
Accuracy (qualitative)	High	Low	Low	Very high	Moderate	Moderate	Moderate	High
Generalization ability	Strong	Moderate	Weak	Moderate	Weak	Weak	Weak	Weak

较宽松, 对目前版本的 DEP-P 模型而言, 只要植被满足可触发光谱不变原理的浓密植被即可, 这使这两种物理模型的泛化能力较强, 几乎不受场景约束; 稀疏植被场景是目前 DEP-P 模型无法适用的, 未来可继续考虑开发植被-土壤混合地表的 DEP-P 模型. Rondeaux-Herman 模型和 Breon 模型为了化简和方便推导, 均需植被满足多种理想条件, 这些条件在现实中很难满足, 因此导致模型精度和泛化性能均较差. 而数据驱动模型本身适用于多种地表, 因此对植被场景没有特殊要求; 然而正是因为经验参数需要训练数据拟合, 不同数据会得到不同参数, 取参数的统计值为最终先验参数时, 模型泛化能力较弱, 精度也会受此影响, 例如会出现前向饱和的问题. 在物理模型中, DEP-P 的简洁度远高于其他模型, 结合其较高的精度表现, 这是 DEP-P 的优势所在.

模型输入及输入的参数化方法是决定模型可用性和综合性能的重要因素. 物理模型均需要叶片或冠层参数的输入. 传统物理模型和蒙特卡洛模型需要冠层结构参数作为输入, 虽然 LAI 可通过遥感产品获取, 但叶倾角相关参量只能依靠实地测量方式尽量接近真实情况, 这大大限制了模型的正演可用性, 尽管蒙特卡洛模型依靠计算机模拟能给出很高的偏振反射模拟精度. Breon 模型则是在 Rondeaux-Herman 的基础上进一步假设植被满足叶倾角分布, 使模型不需要将冠层结构参数化, 直接依靠太阳-传感器几何就能模拟植被偏振反射. 然而这使得所有浓密植被的偏振反射率在相同的观测条件下完全相等, 显然不具备多种植被场景的通用性, 精度较低. DEP-P 模型则将与偏振相关的冠层结构参数统一“封装”在方向逃逸概率这一光谱不变量上, 方向逃逸概率本身就是植被复杂结构的真实概率表现. 在已知叶片单次散射反照率时, 方向逃逸概率的参数化非常简单, 直接通过反射率与实测叶片单次散射反照率的线性关系拟合即可得到; 植被反射率驱动的方向逃逸概率的参数化方式提升了模型对任意植被场景的鲁棒性. 然而叶片单次散射反照率已知是较强的约束条件, 这是 DEP-P 模型正演的最大限制. 即便如此, 相对于依赖实测的叶倾角等冠层结构参数, 叶片光学特性的测量则更加方便, 既可以直接实验室内测量叶片单次散射反照率, 也可以测量叶片参数 (主要为叶绿素) 然后通过 PROSPECT 模拟反照率. 相对于叶片单次散射反照率, 叶绿素含量的获取难度进一步降低, 例如可通过测量或遥感产品直接获得, 从而进一步降低了 DEP-P 模型参数化难度. 数据驱动模型中的参数则需要大量已知数据的训练, 这降低了模型的使用难度, 但限制了其更高精度应用. 综上, 本文构建的 DEP-P 模型总体上实现了物理机理、简洁的形式、可接受的模型参数化方式、较高精度和较强的泛化性能的统一, 具有较好的应用前景.

DEP-P 的正演模型可在宏观上理解为: 由植被反射信息 (710 ~ 790 nm BRDF) 结合叶片光学特性 (叶片单次散射反照率) 得到冠层结构光谱不变量 (方向逃逸概率), 进而结合菲涅尔偏振因子, 得到与冠层结构密切相关的植被偏振反射信息 (偏振反射率 BPF). 那么反过来, 若同时已知植被 BRDF 和 BPDF 信息, 就能基于 DEP-P 模型反演叶片光学特性, 即式 (15) 中斜率  $C$  描述的植被固有属性因子. 未来可进一步挖掘植被固有属性与植被生化含量 (如叶绿素含量) 之间的关系, 促进本文构建的 BPDF 物理模型在植被关键生化参量反演上的应用, 从而进一步探索矢量遥感的应用潜能.

## 参考文献

- 1 晏磊, 陈伟, 相云, 等. 偏振遥感物理. 北京: 科学出版社, 2014
- 2 Yan L, Gu X F, Chu J H, et al. Optical polarized effects for high-resolution quantitative remote sensing and new polarization remote sensing fields. *J Remote Sens*, 2018, 22: 901-916 [晏磊, 顾行发, 褚君浩, 等. 高分辨率定量遥感的偏振光效应与偏振遥感新领域. *遥感学报*, 2018, 22: 901-916]
- 3 Yang B, Yan L, Knyazikhin Y, et al. Vegetation polarimetric effect of three-dimensional structure and leaf inclination of canopy. *Natl Remote Sens Bull*, 2018, 22: 935-946 [杨彬, 晏磊, Knyazikhin Y, 等. 植被冠层立体结构与叶片倾角的偏振光效应. *遥感学报*, 2018, 22: 935-946]
- 4 杨彬. 定量遥感中的偏振光效应及植被氮含量精细反演验证. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2017

- 5 Yang B, Knyazikhin Y, Zhao H M, et al. Contribution of leaf specular reflection to canopy reflectance under black soil case using stochastic radiative transfer model. *Agric For Meteor*, 2018, 263: 477–482
- 6 Yang B, Knyazikhin Y, Xie D H, et al. Influence of leaf specular reflection on canopy radiative regime using an improved version of the stochastic radiative transfer model. *Remote Sens*, 2018, 10: 1632–1648
- 7 Sun Z Q, Wu D, Lv Y F, et al. Bidirectional polarized reflectance factors of vegetation covers: influence on the BRDF models results. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2017, 55: 5687–5701
- 8 Reyna E, Badhwar G D. Inclusion of specular reflectance in vegetative canopy models. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, GE-23: 731–736
- 9 Rondeaux G, Vanderbilt V C. Specularly modified vegetation indices to estimate photosynthetic activity. *Int J Remote Sens*, 1993, 14: 1815–1823
- 10 Knyazikhin Y, Schull M A, Stenberg P, et al. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 185–192
- 11 Yang B, Knyazikhin Y, Lin Y, et al. Analyses of impact of needle surface properties on estimation of needle absorption spectrum: case study with coniferous needle and shoot samples. *Remote Sens*, 2016, 8: 563–579
- 12 Yan L, Li Y F, Chandrasekar V, et al. General review of optical polarization remote sensing. *Int J Remote Sens*, 2020, 41: 4853–4864
- 13 Rondeaux G, Herman M. Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sens Environ*, 1991, 38: 63–75
- 14 Kallel A, Gastellu-Etchegorry J P. Canopy polarized BRDF simulation based on non-stationary Monte Carlo 3-D vector RT modeling. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2017, 189: 149–167
- 15 Kallel A. Leaf polarized BRDF simulation based on Monte Carlo 3-D vector RT modeling. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2018, 221: 202–224
- 16 Kallel A. Two-scale Monte Carlo ray tracing for canopy-leaf vector radiative transfer coupling. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2020, 243: 106815
- 17 Nadal F, Breon F M. Parameterization of surface polarized reflectance derived from POLDER spaceborne measurements. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, 37: 1709–1718
- 18 Yang B, Yan L, Liu S Y. Polarization of light reflected by grass: modeling using visible-sunlit areas. *photogramm eng remote Sens*, 2020, 86: 745–752
- 19 He Y H, Yang B, Lin H, et al. Modeling polarized reflectance of natural land surfaces using generalized regression neural networks. *Remote Sens*, 2020, 12: 248–264
- 20 Liu S Y, Lin Y, Yan L, et al. Modeling bidirectional polarization distribution function of land surfaces using machine learning techniques. *Remote Sens*, 2020, 12: 3891–3911
- 21 Vanderbilt V, Grant L. Plant canopy specular reflectance model. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985, GE-23: 722–730
- 22 Schull M A, Ganguly S, Samanta A, et al. Physical interpretation of the correlation between multi-angle spectral data and canopy height. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L18405
- 23 Xu X R, Fan W J, Li J C, et al. A unified model of bidirectional reflectance distribution function for the vegetation canopy. *Sci China Earth Sci*, 2017, 60: 463–477
- 24 Stenberg P, Manninen T. The effect of clumping on canopy scattering and its directional properties: a model simulation using spectral invariants. *Int J Remote Sens*, 2015, 36: 5178–5191
- 25 Maignan F, Bréon F M, Fédèle E, et al. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling. *Remote Sens Environ*, 2009, 113: 2642–2650
- 26 Yang B, Zhao H M, Chen W. Semi-empirical models for polarized reflectance of land surfaces: intercomparison using space-borne POLDER measurements. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2017, 202: 13–20
- 27 Nilson T, Kuusk A. A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sens Environ*, 1989, 27: 157–167
- 28 Qi J B, Xie D H, Yin T G, et al. LESS: large-scale remote sensing data and image simulation framework over heterogeneous 3D scenes. *Remote Sens Environ*, 2019, 221: 695–706
- 29 Yan K, Zhang Y, Tong Y, et al. Modeling the radiation regime of a discontinuous canopy based on the stochastic radiative transport theory: modification, evaluation and validation. *Remote Sens Environ*, 2021, 267: 112728
- 30 Lin Y, Liu S, Yan L, et al. Improving the estimation of canopy structure using spectral invariants: theoretical basis and validation. *Remote Sens Environ*, 2023, 284: 113368
- 31 Wang Y, Kallel A, Yang X, et al. DART-Lux: an unbiased and rapid Monte Carlo radiative transfer method for simulating remote sensing images. *Remote Sens Environ*, 2022, 274: 112973
- 32 Sun Z Q, Peng Z Y, Wu D, et al. Photopolarimetric properties of leaf and vegetation covers over a wide range of measurement directions. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2018, 206: 273–285
- 33 Widlowski J L, Pinty B, Lopatka M, et al. The fourth radiation transfer model intercomparison (RAMI-IV): proficiency

testing of canopy reflectance models with ISO-13528. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 6869–6890

34 Breon F M, Maignan F. A BRDF-BPDF database for the analysis of Earth target reflectances. *Earth Syst Sci Data*, 2017, 9: 31–45

## From BRDF to BPDF: a preliminary study on evolution of the basic remote sensing quantitative inversion model

Ke SHANG<sup>1</sup>, Lei YAN<sup>1\*</sup>, Feizhou ZHANG<sup>1</sup>, Junhao CHU<sup>2</sup>, Bin YANG<sup>3</sup>, Siyuan LIU<sup>1,4\*</sup>, Kevin TANSEY<sup>5</sup>, Xiuping JIA<sup>6</sup>, Oleg DUBOVIK<sup>7</sup>, Zihan ZHANG<sup>1</sup> & Fei LI<sup>4</sup>

1. *Beijing Key Lab of Spatial Information Integration and 3S Application, Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;*

2. *State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;*

3. *College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;*

4. *Navigation and Control Technology Research Institute, China North Industries Group Corporation, Beijing 100089, China;*

5. *School of Geography, Geology, and the Environment, University of Leicester, Leicester LE17RH, UK;*

6. *School of Engineering and Technology, The University of New South Wales, Canberra ACT 2600, Australia;*

7. *Laboratoire d'Optique Atmosphérique, CNRS/Université Lille, Villeneuve d'Ascq 59655, France*

\* Corresponding author. E-mail: lian@pku.edu.cn, liusy0527@163.com

**Abstract** The essence of light is shear wave electromagnetic wave vector. The scalar remote sensing system based on the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model only uses the overall intensity information of reflected light from vegetation. The structural information of leaf surface, leaf, and canopy contained in reflected radiation cannot be distinguished. On the basis of scalar remote sensing, considering the two-dimensional polarization vector characteristics (intensity and direction) perpendicular to the propagation direction of electromagnetic waves, it can be deepened into a vector remote sensing system, which is expected to accurately describe a variety of information contained in the reflected light and improve the inversion accuracy of vegetation parameters. The bidirectional polarization distribution function (BPDF), which describes the spatial distribution of polarization reflection, has the problems of low accuracy and poor generalization at present. Therefore, it is urgent to further explore the basic theory of vector remote sensing and construct the basic model of vegetation vector remote sensing with strong universality. In this paper, we aim to use the interaction between photons and vegetation elements to construct a more general physical model of vegetation BPDF. Firstly, based on the spectral invariant model of photon-vegetation elements interaction, the basic form of vegetation BPDF physical model based on directional escape probability is proposed, and the analytical expression of the model is derived based on the radiation transfer theory of vegetation single reflection. Then, by considering the variation of leaf scattering with dry matter content, the spectral invariant model was optimized and the general expression of the model was derived. Finally, the 3D vector radiative transfer model and multi-scale measured data were used to realize the direct and indirect verification of the model. The results show that the root mean square error of the forward polarization reflectance of the analytical expression and the general expression of the BPDF physical model constructed in this work is within 0.001 under different vegetation scenes, which is consistent with the forward results of the vector radiation transfer model in the hemisphere space. The stability of the model relationship is also briefly verified by the multi-scale measured data. The model R2 is generally higher than 0.9. Compared with the existing vegetation polarization reflection model, the model constructed in this paper has a physical mechanism, simple form, acceptable parameterization scheme, high accuracy, and strong generalization ability, and is universal for dense vegetation. It provides a theoretical basis and an exploratory scheme for the transformation process of further considering the two-dimensional polarization characteristics of BPDF to form a vector remote sensing system based on BRDF one-dimensional scalar remote sensing.

**Keywords** vegetation, BPDF, vector remote sensing, physical model, polarization