引 用 格 式:FANG Hongliang.A synthesis on the vegetation spectral invariant theory[J].Remote Sensing Technology and Application,2025,40(4):802-815.[方红亮.植被光谱不变量理论研究进展[J].遥感技术与应用,2025,40(4):802-815.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2025.4.0802

植被光谱不变量理论研究进展

方红亮[1,2,3]
(1.中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101;
2.中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100049;
3.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023)

摘要:过去20年,围绕植被光谱不变理论(也称为p理论)的建模理念得到了快速发展。2023年底,作者在Remote Sensing of Environment发表了题为"Photon recollision probability and the spectral invariant theory: Principles, methods, and applications"的综述文章(DOI: 10.1016/j.rse.2023.113859),全面阐述了p理论的提出背景、建模原理、光谱不变量的获取与p理论应用等。本研究在英文版的基础上,对p理论进行了进一步系统整理并补充了一些新的认识。首先阐述了p理论的基本要点,介绍了不同光学参数和再碰撞概率尺度转换的基本原理,总结了光谱不变量获取的经验方法、光谱方法和结构方法等,分析了p理论在冠层反射率建模以及植被结构和生理参数反演与估算中的应用。文章剖析了原文中的几处关键创新点,最后探讨了p理论的未来发展方向及我国在相关方面的研究。

关 键 词:逃逸概率;再碰撞概率;光谱不变理论;p理论;冠层反射率模型
中图分类号:TP701 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-0323(2025)04-0802-14

1 引 言

太阳入射光线在植被冠层中的辐射传输过程主要受3个因素的影响:植被冠层的结构特征、植被单元的理化特征以及光子入射和出射的几何特征等[1]。植被冠层反射率模型主要通过模拟太阳光线在植被冠层的辐射传输过程获得冠层的反射率信息。为了计算冠层的方向反射率,通常将太阳辐射分解为零次散射、单次散射和多次散射,分别计算它们对总体反射率的贡献[2-3]。对于多次散射,目前存在多种数值计算方法,比如逐次散射方法、离散纵标方法以及二流近似方法等[2-3]。

20世纪80年代,Myneni等[4-5]首次将逐次散射近似方法引入植被冠层反射率模型构建中,并利用大豆叶片和冠层实测数据得到了较好的验证。20世纪90年代初,在三维辐射传输模型的构建过程中,Knyazihkin等[6]引入了逐次散射方法模拟光子的多次散射过程,而且基于Sobolev[7]的工作(数学上证明了光子再碰撞概率与辐射传输方程特征值之间的关系)指出逐次散射的收敛速率就是辐射传输方程的正特征值,该文代表了植被光谱不变理论的萌芽。

在世纪之交,以美国波士顿大学地理系为首的研究团队在植被冠层反射率模型构建中提出了"光谱不变量"(Spectral Invariant)的概念,用于表达植被结构特征对冠层散射的影响[8-9]。简单的说,"光谱不变量"指植被辐射传输过程中独立于波长的变量,比如植被结构参数以及他们的不同组合[10-11]。"光谱不变量"的概念最先用于植被三维辐射传输建模,用于从MODIS和MISR等卫星传感器反演

收稿日期:2024-03-04;**修订日期**:2025-04-15
基金项目:国家自然科学基金项目(42171358),资源与环境信息系统国家重点实验室自主创新项目(088RA405SA)。
作者简介:方红亮,博士,研究员,主要从事遥感建模、参数反演与不确定性研究。E-mail:fanghl@lreis.ac.cn

全球叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)和光合有效辐射吸收系数(Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation,FAPAR)等参数[8]。概念提出后,英国[10-12]和芬兰[13-14]的研究人员跟进对这一建模理念进行了大量研究,奠定了光谱不变理论早期发展的基础。

过去10余年,光谱不变量的理念得到持续发展,并在地面测量和遥感反演等方面得到不断检验和应用[15-16]。在诸多光谱不变量中,光谱不变理论关注的核心参数主要有两个:光子逃逸概率和光子再碰撞概率[17]。逃逸概率(ρ)是指光子在特定方向逃离冠层的概率[11]。光子再碰撞概率(p)是指从冠层植物单元散射的光子再次与冠层植物单元发生碰撞的概率[17],也是当前被广泛研究和使用的一个变量[15,18]。当前诸多研究中所谓的光谱不变理论,狭义上专指与光子再碰撞概率相关的理论和模型,因而也常常被称为"p理论"。

在众多研究人员中,Yuri Knyazikhin 和 Pauline Stenberg 二人无疑起到了关键的引领和推动作用。Knyazikhin的工作侧重基础理论研究,除了最初引入光谱不变建模思想,他对逃逸概率、再碰撞概率和方向面散射因子(Directional Area Scattering Factor, DASF)等参量都有详细的研究,同时还将相关理论应用于植被LAI、FAPAR和叶片氮含量等参数的遥感反演中。Stenberg对光谱不变理论的基本原理、测量和应用等方面做了多项原创性工作,她提出了估算p值的Stenberg公式,并对投影面积比(Silhouette to Total Area Ratio,STAR)的测量及其与p值的关系做了系统的分析。

在前人工作的基础上,Fang[19]系统梳理了植被光谱不变理论的提出背景、光谱不变理论的建模原理以及光谱不变量的获取与应用等,论文发表在Remote Sensing of Environment上(以下简称"F2023文")。与同类文章相比,F2023文试图从一个更大更系统的角度总结光谱不变理论的研究进展,专门梳理了光谱不变量的获取与验证方法,增加了近年的一些新进展和新应用,并添加了作者的认识和理解,以增进对该理论的理解和研究。F2023文也是作者关于植被结构参数系列综述的第三篇,前两篇分别是关于叶面积指数[20]和聚集指数[21]的综述。

F2023文依照原理—方法—应用等主题展开介绍,原文较长,本研究对F2023文进行了进一步系统整理并补充了前文发表后的一些新认识,旨在为p理论的学习与研究提供一个总体纲要。文章首先阐述了光谱不变理论的基本要点,择要介绍了光谱不变理论的几个核心公式,总结了F2023文中的关键创新点,最后讨论了p理论的未来发展方向和我国在相关方面的研究。

2　F2023文的主要内容

2.1　光谱不变理论的基本原理

与许多其他研究一样,p理论并不是一个凭空出现的理论,先前也有大量的研究基础。光子逃逸概率和再碰撞概率的概念早在上世纪70年代就广泛应用于经典的概率辐射传输(Probabilistic Radiative Transfer,PRT)理论中。PRT强调用概率的理念表达辐射传输过程,它的应用并不局限于简单的浑浊介质,也包括动态介质等更一般介质的辐射传输过程。

在一定意义上,p理论可被视为PRT模型在植被冠层辐射传输过程中的应用,二者在不同的概念框架下表达光子的辐射传输过程。对植被冠层来说,必须考虑叶片的大小、形状及其在空间的分布。事实上,上世纪70年代,已有学者在植被辐射传输建模中提出过"碰撞概率"的概念[22],其涵义与目前所称的再碰撞概率非常相似。但由于缺乏后续研究,"碰撞概率"的理念没有得到更广的发展。

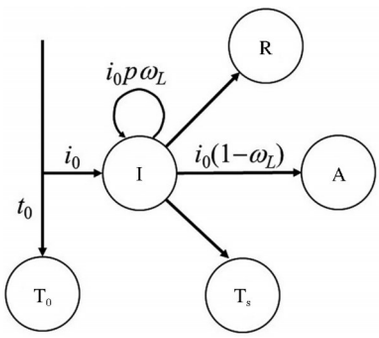
2.1.1　光谱不变量的提出

在三维辐射传输模型构建中,Knyazikhin等[8]提出辐射传输方程的正特征值可以表示为叶片反照率和一个"波长独立"变量的乘积,这是最早与光谱不变量相关的思想。Panferov等[9]首次提出了"光谱不变量"的概念,即:

$$\xi_\chi(\lambda_0,\lambda_1)=\frac{\chi(\lambda_0)-\chi(\lambda_1)}{\omega(\lambda_0)\chi(\lambda_0)-\omega(\lambda_1)\chi(\lambda_1)} \tag{1}$$

其中:χ表示冠层反射率或散射透射率;$\omega(\lambda)$为叶片反照率;ξ_χ是关于波长λ_0、λ_1的对称函数,即$\xi_\chi(\lambda_0,\lambda_1)=\xi_\chi(\lambda_1,\lambda_0)$。光谱不变量$p_\chi$是$\xi_\chi$的数学期望。式(1)从不同波段间光学参数的转换函数来定义光谱不变量p。

假设冠层背景反射率为零,入射到冠层的光子可分为零阶冠层截获(i_0)和透射(t_0)两部分(图1)。i_0与t_0均与波长无关,是太阳入射角和冠层结构的函数[23]。光子被叶片截获后发生吸收或者散射,散射后一部分光子逃离冠层,另一部分以概率p与其它叶片发生再碰撞,逃逸与再碰撞的过程持续到所有



（t_0和i_0分别代表冠层零阶透射率和截获率，I、A、R、T_0和T_s分别代表冠层截获、吸收、反射、零阶透射和散射透射）

图1 光子在黑土下垫面冠层的传输过程

Fig.1 Photon transportation in a black-soil canopy

光子被吸收或逃离冠层。假设叶片的散射系数为ω_L，各阶散射的p值相同，则冠层总体光子相互作用系数$i(\lambda)$为[11]：

$$i(\lambda)=i_0+i_0 p\omega_L(\lambda)+i_0 p^2\omega_L^2(\lambda)+\cdots=\frac{i_0}{1-p\omega_L(\lambda)} \quad (2)$$

右侧第一项表示对直射的截获，后面其他项的和表示被截获的光子继续与冠层叶片的相互碰撞概率（附录A）。其中的p值可通过不同阶光学参数（如叶片尺度的ω_L和冠层尺度的ω_C）的转换来得到。

Stenberg[14]给出了冠层平均逃逸概率的表达式：

$$\rho=\frac{1}{A_L}\int_{A_L}\frac{1}{\pi}\int_{2\pi(\Omega_r)}\chi(r,\Omega)\cos(\Omega,\Omega_r)\,\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}L \quad (3)$$

其中：Ω_r代表叶片上r点处的法向量方向；A_L为叶片的总体双面面积（A_L为dL的并集）；$\chi(r,\Omega)$是个二值函数，如果光线能从叶片上r点的Ω方向自由透过冠层时为1，否则为0。从形式上看，式(3)表示的是光子在双面叶表面A_L向叶片正面半球方向的平均逃逸概率。根据Stenberg[14]，我们可以定义一个方向逃逸概率$\rho(\Omega)$：

$$\begin{aligned}\rho(\Omega)&=\frac{1}{A_L}\int_{A_L}\chi(r,\Omega)\,\mathrm{d}L\\&=\frac{1}{2\mathrm{LAI}\cdot A_C}\int_{A_L}\chi(r,\Omega)\,\mathrm{d}L=\frac{i_0(\Omega)}{2\mathrm{LAI}}=\frac{1-P(\Omega)}{2\mathrm{LAI}}\end{aligned} \quad (4)$$

其中：A_C为单位地表面积；$P(\Omega)$为冠层方向孔隙率；系数1/2的引入是因为逃逸概率的计算是针对所有叶片表面（双面）。植被冠层的平均再碰撞概率也可表示为：

$$\begin{aligned}p&=1-\frac{1}{\mathrm{LAI}}\int_{LAI}\rho(r)\,\mathrm{d}L\\&=1-\frac{1}{\mathrm{LAI}}\int_{LAI}\frac{1}{\pi}\int_{2\pi(\Omega_r)}\chi(r,\Omega)\cos(\Omega,\Omega_r)\,\mathrm{d}\Omega\mathrm{d}L\end{aligned} \quad (5)$$

式(1)～(5)分别从波段转换、能量平衡和几何概率的角度定义光谱不变量。前两种定义（式(1)～(2)）都与辐射测量相关，便于遥感估算。Stenberg方法（式(3)和(5)）从几何概率的角度定义冠层平均ρ和p，涵义明确，适用性广，对连续和离散冠层均适用。

2.1.2 光学参数的波段和尺度变换

(1)波段转换

光谱不变量概念的提出为光学参数在不同波段和不同尺度之间的转换提供了极大的便利。从波段转换来看，式(1)可用于将任意参考波长λ_0处的光学参数转换到波长λ处。对冠层光子相互作用系数而言有：

$$i(\lambda)=\frac{1-p\omega_L(\lambda_0)}{1-p\omega_L(\lambda)}i(\lambda_0) \quad (6)$$

利用冠层吸收$a(\lambda)$与光子相互作用系数$i(\lambda)$之间的关系$a(\lambda)=[1-\omega_L(\lambda)]i(\lambda)$，可以得到不同波段的冠层吸收系数之间的转换公式：

$$a(\lambda)=\frac{[1-p\omega_L(\lambda_0)][1-\omega_L(\lambda)]}{[1-p\omega_L(\lambda)][1-\omega_L(\lambda_0)]}a(\lambda_0) \quad (7)$$

(2)尺度转换

p值极大便利了从叶片到冠层尺度散射系数（ω_L和ω_C）的计算[13]。

$$\begin{aligned}\omega_C(\lambda)&=\omega_L(\lambda)(1-p)+\omega_L(\lambda)p\omega_L(\lambda)(1-p)+\\&\omega_L(\lambda)p^2\omega_L^2(\lambda)(1-p)+\cdots=\frac{\omega_L(\lambda)(1-p)}{1-p\omega_L(\lambda)}\end{aligned} \quad (8)$$

上式可推广用于叶片内部、单木冠层和林冠层。比如对于针叶林冠层，叶簇的散射系数可以由针叶的散射系数尺度上推得到[24]。

更为一般地，任意两个连续尺度上的散射系数之间的关系为：

$$\omega_{i+1}(\lambda)=\omega_i(\lambda)\frac{1-p_{i+1}}{1-p_{i+1}\omega_i(\lambda)} \quad (9)$$

或者表示为：

$$\frac{\omega_{unit}(\lambda)}{\omega_{element}(\lambda)}=i(\lambda)(1-p_{unit}) \quad (10)$$

其中：$i(\lambda)=1/[1-p_{unit}\omega_{element}]$，式(10)表示由其元素的散射系数归一化的任何单元的散射系数等于波长相关的冠层光子相互作用系数$i(\lambda)$乘以逃逸概率ρ。

在散射系数和反射率尺度转换的基础上，利用再碰撞概率p可实现植被指数在不同尺度之间的转换[25]。

2.1.3　再碰撞概率的尺度转换

除了不同波段和尺度之间光学参数的转换,利用p理论可以对针叶、叶簇、单木到森林冠层不同尺度的p值进行转换。在针叶冠层中,冠层尺度的再碰撞概率(p')可由叶片内部(p_{leaf})、叶簇内部(p_{shoot})和冠层内部(p_{canopy})的再碰撞概率复合计算得到[10]:

$$p'=(p_{shoot}+(1-p_{shoot})p_{canopy}))(1-p_{leaf})+p_{leaf} \quad (11)$$

该p'可以认为是不同阶散射再碰撞概率的平均值或有效值。更一般的,n层不同尺度的总体p满足:

$$1-p=(1-p_1)(1-p_2)\cdots(1-p_n) \quad (12)$$

其中:p_n为第n层次的再碰撞概率[15,26]。

2.1.4　DASF与BRF的计算

据式(8)可知零反射率背景表面包围的冠层在观察方向Ω的二向反射率因子(Bidirectional Reflectance Factor, BRF)为:

$$\text{BRF}(\Omega)=\frac{\rho(\Omega)\omega_L}{1-p\omega_L}i_0 \quad (13)$$

对上式进行变换可得:

$$\frac{\text{BRF}(\Omega)}{\omega_L}=p\text{BRF}(\Omega)+i_0\rho(\Omega) \quad (14)$$

由式(14)的截距和斜率计算可得DASF[23]:

$$\text{DASF}=\frac{i_0\rho(\Omega)}{1-p} \quad (15)$$

DASF为在给定方向上植被冠层零阶截获的光子经过多次碰撞最终逃离冠层的概率,也是一个光谱不变量。根据式(13)和(15)有:

$$\text{BRF}=\text{DASF}\cdot\omega_C=\text{DASF}\cdot\frac{(1-p)\omega_L}{1-p\omega_L} \quad (16)$$

2.2　光谱不变量的获取方法

F2023文首次对p值估算方法进行了系统分类和总结,将不同实测方法分为经验方法、光谱方法和结构方法。本节在F2023文基础上做了进一步整理归类。

2.2.1　经验方法

经验方法通过p值与其他结构或光谱参数(如植被指数)的经验关系来估算,比如在叶片尺度,利用叶肉细胞折射系数估算叶内等效再碰撞概率[10],利用比叶重(Leaf Mass Per Unit Area, LMA)[27]或叶片干物质的含量[28]来估算p_{leaf}值等。

2.2.2　光谱方法

光谱方法又分为单一尺度的光谱方法和光谱尺度转换方法。利用单一尺度的光谱方法,可由任意参考波长λ_0和波长λ处的冠层反射率r或散射透射t_s与叶片单次散射反照率ω_L计算得到p值(式(6))。光谱尺度转换方法主要通过分别测量不同层次(如叶片和冠层)的散射系数,然后利用式(9)计算得到p值。也可以通过测量不同尺度的ω_{i+1}和ω_i,然后将ω_{i+1}/ω_i和ω_i画在同一个坐标系下,这时的斜率和截距就分别对应p_{i+1}和$\rho_{i+1}(\Omega)$(参考式(14))[16,26]。光谱方法假设叶片散射各向同性,下垫面为黑色背景或者是浓密冠层(可忽略下垫面影响)。

2.2.3　结构方法

结构方法又分为STAR方法、聚集指数方法、Stenberg公式方法、近似计算方法和LAI估算方法等。STAR是指物体平均投影面积与总面积的比率,可简称为投影面积比,可以通过投影方法获得[13,24,29]。Smolander等[24]利用蒙特卡洛模拟方法计算了松枝叶簇的逃逸概率ρ_{shoot}(=1-p_{shoot}),发现其数值非常接近4STAR,即:

$$\begin{aligned}\rho_{shoot}&=4\text{STAR}\\ p_{shoot}&=1-\rho_{shoot}=1-4\text{STAR}\end{aligned} \quad (17)$$

另一方面,对凸形针叶而言,叶簇水平的聚集指数与4STAR相等[30-31]。所以对于叶簇有:

$$\begin{aligned}\rho_{shoot}&=K_{shoot}\\ p_{shoot}&=1-K_{shoot}\end{aligned} \quad (18)$$

其中:K_{shoot}代表叶簇内的聚集指数;叶簇内的聚集程度越高,K_{shoot}的值越小,其再碰撞概率也越大。因此,STAR和聚集指数提供了一个计算针叶林叶p_{shoot}值的直接方法,该方法还可以推广到树冠和林冠等不同尺度(详见F2023文)。STAR和聚集指数方法虽然直接,但也是一种近似方法。实际测量时叶片和木质组分混淆在一起,容易给p值的估算造成一定的误差[16]。

Stenberg[14]提出一个简单的解析表达式计算平均再碰撞概率:

$$p=1-\frac{i_D}{\text{LAI}} \quad (19)$$

其中:i_D为冠层对漫射光的截获率(与冠层郁闭度有类似,但不等同)。许多光学仪器,如LAI-2200(包括其前身LAI-2000)有一个输出变量是漫射非截获率(diffuse non-interceptance,DIFN=1-i_D),由此

$$p=1-\frac{1-\text{DIFN}}{\text{LAI}} \quad (20)$$

式(20)中的DIFN表示透过冠层能看到的天空比例,可通过冠层孔隙率的积分计算得到。DIFN是一个融合了LAI和平均叶倾角(Mean Tilt Angle, MTA)的结构参数,同样也是一个光谱不变量。

2.2.4 p值的地面测量与遥感估算

根据式(20)可以从LAI-2200或LAI-2000观测得到的DIFN和LAI计算冠层的p值。不过光学仪器测量时通常假设叶片在空间随机分布,并且光子在叶片上没再发生散射。对于非随机分布叶片,LAI-2200输出的是有效LAI,应用公式(20)时需将有效LAI转换成真实LAI[21]。除了LAI-2200,数字半球摄影(DHP)方法也可用于获取森林冠层的p值[18]。

目前利用遥感方法估算p值的研究尚不多见,因为更多的还是将p做为一个中间变量估算其他参数(下文2.3.2节)。Pisek等[32]利用MODIS估算的聚集指数和LAI产品得到了p值,并与LAI-2000/2200的测量值进行了比较,但该研究没有进行大范围的p值制图和验证。Wang等[33]首次通过地面激光扫描(TLS)点云利用STAR方法估算树冠尺度的p值(式(17))。He等[34]借助机载激光雷达(ALS)点云数据和模拟方法比较了几种不同的p值估算方法。当然,无论地面测量还是遥感估算得到的都是植被冠层的平均再碰撞概率,而且包括了木质部分。另外,遥感获取的p值还需要与地面参考值进行对比验证,而目前相关的工作还很少。

2.2.5 模拟方法与验证

光谱不变量当然也可以通过各种模拟方法,如蒙特卡洛射线追踪来获取[10]或者通过三维辐射传输模型进行模拟[35]。在模拟过程中,可通过能量衰减或统计光子数的变化来得到p值。

$$p = F_n / \omega_L F_{n-1} \tag{21}$$

其中:F_n为散射阶n的叶表面平均辐照度[11,35]。式(21)提供了通过能量平衡方法定义和计算p的一种方式,但由于在实践中难以测量不同散射阶的能量衰减,该式大多只在模拟过程中使用。

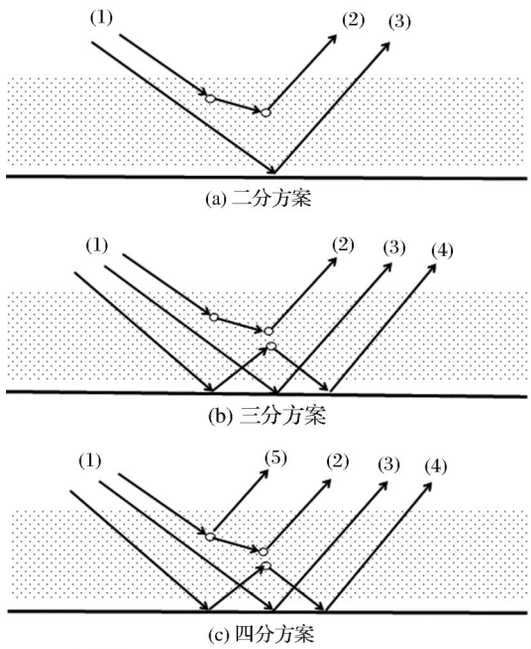
不同方法获取的p值可以通过相互对比来进行直接或间接验证。比如,尺度转换方法得到的p值可以与STAR方法得到的值进行直接检验,Stenberg方法得到的p值也可以与STAR方法和尺度转换方法得到的p值进行对比验证。间接检验方法就是将p值用于尺度转换的公式中,从低层次计算高层次的散射系数(式(9)),最后与实测的高层次散射系数进行对比检验。间接验证方法已经在不同层次的验证中得到应用[32]。

2.3 光谱不变理论的主要应用

F2023文主要从冠层反射率建模和生物物理参数的反演两方面对p理论的应用做了剖析。

2.3.1 冠层反射率建模

目前利用p理论建模的冠层反射率模型都基于该理论计算植被冠层内部的多次散射,区别在于不同模型对辐射场的分解方式不同(图2)。F2023文大致以时间顺序介绍了几个有代表性的模型,这些模型对辐射场分别采用了二分、三分或四分的方案。



注:(1)入射辐射;(2)冠层内多次散射;(3)背景反射;(4)冠层与背景之间的多次散射;(5)冠层单次散射

图2 入射光在植被冠层内的不同分解方式

Fig.2 Different decomposition methods of incident light in the vegetation canopy

最简单的是二分方案,将森林BRF简单的视为由林下植被(或地表)和零反射率地表背景下的林冠两部分的贡献组成。这方面的例子如早期的森林反射率模型PARAS,其中计算林下植被的贡献时考虑了冠层的双向孔隙率,林冠部分则基于p理论考虑了叶片之间的多次散射[36]。

辐射场的二分方案过于简单,改进的PARAS模型采用了三分方案,考虑了冠层和地表间的多次散射[37]。植被冠层的总体反射率由三部分组成:不依赖植被冠层的背景反射率贡献、不依赖背景的植被冠层内在贡献(p理论方法)以及冠层与背景之间的多次散射贡献。

Zeng等[38]开发的CANOPY-SIP模型采用了辐射场的四分方案,植被冠层BRF由4部分组成:光

照土壤的单次散射、植被冠层的单次散射、与土壤无相互作用的植被内的多次散射(用p理论表示)以及植被冠层和土壤之间的多次散射等。相比PARAS模型,CANOPY-SIP增加了对热点和聚集效应的计算。

无论是在叶片尺度还是植被冠层尺度,利用p理论有助于解耦植被结构和光学参数,从而简化辐射传输模型,使得植被模型更易于被耦合到复杂的陆表过程模型中。当然现有的p理论冠层反射率模型还需要进一步验证,特别是在近红外(near infrared, NIR)波段[18, 39]。

2.3.2　生物物理参数估算

早期p理论主要被用于从MODIS和MISR等数据反演LAI和FAPAR的算法中[8-9]。该方法基于p参数计算植被冠层BRF,构建查找表,然后利用查找表方法估算LAI和FAPAR。查找表不直接存储冠层反射率和LAI之间的多维度关系,而是存储辐射传输过程的少量中间量以及p参数与LAI的关系以降低查找表维度,提高模型反演效率[40]。该方法随后又被用于从NOAA AVHRR[41-42]、GEOS-R[43]、DSCOVR EPIC[44]和VIIRS[40]等传感器估算LAI、光照LAI和FAPAR等参数,取得了良好的效果。

上文提到可以通过聚集指数来估算叶簇或树冠的逃逸概率和再碰撞概率(2.2.3节),那么反过来也可以通过叶簇或树冠的逃逸概率和再碰撞概率来估算聚集指数[33]。Stenberg公式可用于植被LAI的估算:

$$\mathrm{LAI}=\frac{i_D}{1-p}=\frac{i_D}{\rho} \tag{22}$$

近年来,p理论在植被荧光遥感领域获得了极大的关注,呈现蓬勃发展的趋势。通过p理论可方便的将观测到的表观SIF转换为冠层内部发射的总SIF,或者将冠层SIF降尺度到光系统水平,以更好的理解植被光合作用过程[45-48]。表1列举了不同的估算冠层荧光有效逃逸概率(σ_{FC})即冠层和叶片的散射系数比的方法。除了σ_{FC}的基本形式,这些方法可分为利用BRF和利用$\mathrm{NIR_v}$(或$\mathrm{Red_v}$)的估算方法两大类(表1)。

表1　冠层荧光有效逃逸概率(σ_{FC})的估算方法*

Table 1　Estimation method for the effective escape probability (σ_{FC}) of canopy fluorescence

序号	表达式	描述	参考文献
(a)基本形式			
	$\sigma_{FC}=\frac{\omega_C}{\omega_L}=\frac{\rho}{1-p\omega_L}=\frac{\rho_{SIF}}{1-p_{SIF}\omega_L}$	通过冠层和叶片的散射系数比来计算σ_{FC}	Fang[19]
(b)基于BRF的估算			
	$\sigma_{FC}=\frac{\mathrm{BRF}}{i_0\omega_L}$	通过近红外BRF与i_0和ω_L的比值来估算近红外SIF的σ_{FC}	Yang和van der Tol[49], Zhang等[46], Yang等[50]
	$\sigma_{FC}=\frac{\mathrm{BRF}}{i\omega_L}=\frac{\pi\cdot\mathrm{SIF}_{toc}}{\mathrm{SIF}_{tot}}$	通过BRF与i和ω_L之比来估算σ_{FC}	Lu等[51]
(c)通过$\mathrm{NIR_v}$和$\mathrm{Red_v}$的估算			
	$f_{NIR}^{esc}=\sigma_{FC}\approx\frac{\mathrm{NIR}_V}{\mathrm{FAPAR}}$	通过$\mathrm{NIR_v}$与FAPAR之比来估算σ_{FC}	Zeng等[52], Liu等[53], Hao等[54]
	$\sigma_{FC}\approx\frac{\mathrm{Red}_v}{\mathrm{FAPAR}}$	通过红光BRF与$\mathrm{NDVI^2}$的乘积和FAPAR之比估算红光σ_{FC}	Liu等[53], Hao等[54]
	$\sigma_{FC}=\frac{\mathrm{NIR}_V}{i_0\omega_L}$	通过$\mathrm{NIR_v}$与i_0和ω_L之比来估算σ_{FC}	Zhang等[55], Zhang等[48]
	$f_{NIR}^{esc}=\sigma_{FC}=\frac{\mathrm{NIR}_V}{\mathrm{FAPAR}}\cdot f(r_S,\mathrm{VI})$	通过引入一个校正因子f考虑背景对σ_{FC}的影响	Qi等[56]

注:*f_{NIR}^{esc}: 冠层近红外荧光有效逃逸概率,ρ_{SIF}:冠层荧光逃逸概率,p_{SIF}:冠层荧光再碰撞概率,r_s:土壤反射率,σ_{FC}:冠层荧光有效逃逸概率,$\mathrm{NIR_v}$:NDVI与近红外BRF的乘积,$\mathrm{Red_v}$:$\mathrm{NDVI^2}$与红光BRF的乘积,$\mathrm{SIF_{tot}}$:冠层总体发射荧光,$\mathrm{SIF_{toc}}$:冠层顶部所测的方向荧光,VI:植被指数。

3　F2023文的若干说明

3.1　F2023文的几处新探索

F2023文在总结现有工作的基础上也提出了几个新概念,探索了若干新方法。本研究在原文基础上继续进行了扩展,当然这些概念和方法还有待进一步实验和验证。

3.1.1　逃逸概率的近似计算

Stenberg[14]公式建立了逃逸概率(ρ)和散射截获系数(i_D)以及LAI之间的关系。现有的研究表

明，冠层散射截获可以用散射截获的FIPAR（$FIPAR_d$）或散射吸收的FAPAR（$FAPAR_d$）来近似，而后二者又可以直接用FIPAR和FAPAR来近似[57-59]。假设冠层全吸收，FAPAR也可以用植被覆盖度（Fractional Vegetation Cover，FVC）来表示[60-61]，即存在如下近似关系：

$$i_D \approx \mathrm{FIPAR_d} \approx \mathrm{FAPAR_d} \approx \mathrm{FIPAR} \approx \mathrm{FAPAR} \approx \mathrm{FVC} \quad (23)$$

因此冠层平均逃逸概率可以用下式估算：

$$\rho \approx \frac{\mathrm{FAPAR}}{\mathrm{LAI}} \approx \frac{\mathrm{FVC}}{\mathrm{LAI}} \quad (24)$$

或者说

$$\mathrm{FAPAR} \approx \mathrm{FVC} \approx \rho \cdot \mathrm{LAI} \quad (25)$$

作者曾把FVC与LAI的比值定义为植被比覆盖度（SVC）[62]，因而植被冠层逃逸概率实际上可由植被比覆盖度来近似计算：

$$\rho \approx \mathrm{SVC} = \frac{\mathrm{FVC}}{\mathrm{LAI}} \quad (26)$$

3.1.2 光照LAI（LAIsun）的计算

光照LAI（LAI_{sun}）通常由下式计算[63-64]：

$$\mathrm{LAI_{sun}} = \frac{(1 - P(\theta_s)) \cdot \cos\theta_s}{G(\theta_s)} \quad (27)$$

其中：$G(\theta_s)$是叶片投影函数，即单位叶面积在θ_s方向的投影面积。式（27）通过方向孔隙率$P(\theta_s)$来计算LAI_{sun}，对连续和离散冠层均适用。

F2023文未及建立LAI_{sun}与p理论的关联。这里借助光的自由路径函数$\chi(r, \Omega')$给出一个LAI_{sun}的直接定义：

$$\mathrm{LAI_{sun}}(\Omega') = \frac{1}{A_C}\int_{A_L} \chi(r, \Omega')\,\mathrm{d}L \quad (28)$$

其中：Ω'表示光照方向。式（28）表示单位地表面积上的所有光照叶面积。对于双面叶片，事实上只有单面叶片可以被光照到，因此上式与LAI的定义方式也一致（总面积的一半）。式（28）从二值函数$\chi(r, \Omega')$来定义LAI_{sun}，具有统计特征，对连续和离散冠层也均适用。但式（28）也只适用双面叶片，对更复杂的叶片形状（比如楔形叶片等）如何定义，有待进一步探讨。

3.1.3 光照叶片百分比和光照可见LAI的计算

光照叶片百分比（α_{sun}）是指传感器（或像元）中光照的可见叶面积占总的可见叶面积的百分比[65]，可用LAI比值的形式表示为：

$$\alpha_{sun}(\theta_s, \theta_v) = \frac{\mathrm{LAI_{sv}}(\theta_s, \theta_v)}{\mathrm{LAI_{vis}}(\theta_v)} \quad (29)$$

其中：LAI_{sv}指光照的可见LAI，LAI_{vis}为总的可见LAI。式（29）中3个变量都是角度的函数（附录B）。

单位叶片在观测方向的逃逸概率（$\rho(\theta_v)$）可以通过下式计算得到[65-66]：

$$\rho(\theta_v) = \frac{1}{2}\alpha_{sun}(\theta_s, \theta_v)\,\frac{G(\theta_s)}{\cos\theta_s} \quad (30)$$

式（30）假设叶子的形状为有一定大小的双面叶片（可称为叶片假设，planar-leaf assumption），计算过程中已借助α_{sun}对双面叶表面做了归一化平均。上式可改写为：

$$\alpha_{sun}(\theta_s, \theta_v) = \frac{2\rho(\theta_v)\cos\theta_s}{G(\theta_s)} \quad (31)$$

该式右侧把参考面从单位叶片到单位地表上做了转换（转换系数为$\cos\theta_s/G(\theta_s)$），以便与α_{sun}的计算参考面保持一致。特别的，当观测方向与太阳方向一致时，$\alpha_{sun}(\theta_s, \theta_s))=1$，$\rho(\theta_v)=0.5$。

式（31）可用于计算光照的可见LAI。参考式（27），总的可见LAI可表示为：

$$\mathrm{LAI_{vis}} = \frac{(1 - P(\theta_v)) \cdot \cos\theta_v}{G(\theta_v)} \quad (32)$$

综合式（29）、式（31）和式（32），可得到：

$$\mathrm{LAI_{sv}}(\theta_S, \theta_v) = \frac{2\rho(\theta_v))\cos\theta_S}{G(\theta_S)} \cdot \frac{(1 - P(\theta_v))\cos\theta_v}{G(\theta_v)} \quad (33)$$

结合方向逃逸概率与孔隙率的关系（式（4）），有：

$$\mathrm{LAI_{sv}}(\theta_S, \theta_v) = \frac{(1 - P(\theta_v))\cos\theta_S}{G(\theta_S)} \cdot \frac{\mathrm{LAI_{vis}}(\theta_v)}{\mathrm{LAI}} \quad (34)$$

式（34）的推导过程利用了BRF的计算公式（式（30）与式（14）中的（相互对应）[65-66]，因此该方法主要适用于浓密冠层LAI_{sv}的计算。

3.1.4 植被冠层方向面散射因子的计算

F2023文根据DASF的定义，提出了新的植被半球—方向面散射因子（Hemispherical-Directional Area Scattering Factor，HDASF）和半球—半球面散射因子（Hemispherical-Hemispherical Area Scattering Factor，HHASF）两个新概念。假设冠层截获是各向同性的（$i_0 = i_D$），冠层HDASF可表示为：

$$\mathrm{HDASF} = \mathrm{LAI} \cdot \rho(\Omega) \quad (35)$$

HDASF表示均匀分布在整个叶片表面上的各向同性光源的光子逃离植被冠层的概率。假设逃逸概率也是各向同性的，则可以通过漫射截获（i_D）或漫射FAPAR估算冠层HHASF：

$$\begin{aligned} &\mathrm{HHASF} = \mathrm{LAI} \cdot \rho \approx \mathrm{LAI}(1 - p) = i_D = i_0 \\ &\mathrm{HHASF} \approx \mathrm{FAPAR_d} \approx \mathrm{FAPAR} \approx \mathrm{FVC} \end{aligned} \quad (36)$$

HDASF和HHASF两个新的概念拓展了现有DASF定义，有助于更好表达冠层的结构特征。

3.2 p理论建模剖析

3.2.1 p理论建模的特点

p理论建模的主要原理是利用逐次散射方法对光子的多次散射进行简化处理,用一个纯结构参数—光子再碰撞概率来表征光子的多次散射过程。光学参数的波段转换理论(2.1.2节)显示,当已知冠层的光谱不变量和某一波长下的单次散射反照率后,即可重建任何波长下的冠层辐射场。光子再碰撞概率提供了一种从叶片到冠层散射系数的连结方法(式(8))。这种不同尺度的联结可进一步推广到叶片内部、叶簇、单木与林冠等不同尺度进行光谱参数的转换(式(9))。冠层光谱不变量简化了冠层反射率查找表的构建和反演,增进了三维模型的尺度变换能力,使模型能方便的用于不同的空间分辨率[8, 40]。

3.2.2 学习和研究p理论的几个注意点

学习和研究p理论需要注意几个区别:①植被冠层形态的差别,如平行平板冠层和离散冠层(或独立冠层)的区别,后者可假设为球体或椭球体浑浊介质;②叶片、叶簇、树冠和林冠等不同尺度单元的区别;③参考平面和计算单位的区别,如单位地面和单位叶片的差别,比如有些定义是针对单位地面或单位像元的(如孔隙率、BRF和LAI),有些则是针对单位叶片(如逃逸概率和再碰撞概率),实践中有时容易混淆。另外,从实用的角度来看,逃逸概率通常是对特定点位和立体角而言的(即(r,Ω)),这样便于计算BRF。再碰撞概率常常取冠层的平均值($p=1-()$,用以表征冠层的平均特征。F2023文中根据上下文,几种涵义均有涉及。

3.2.3 植被冠层孔隙率和逃逸概率的异同

孔隙率通常指植被冠层在某个特定方向上的孔隙比率,如果是遥感反演得到的通常是单位像元的孔隙率。植被冠层辐射传输建模中一个最常用的方法是将植被冠层简化为浑浊的水平介质,这样冠层的方向孔隙率就可以通过Beer-Lambert定律计算[67-69]:

$$P(\theta)=\exp(-G(\theta)\mathrm{LAI}/\cos(\theta)) \tag{37}$$

其中:$P(\theta)$是冠层在天顶角θ方向的孔隙率。式(37)对叶片形状做了叶点假设(point-leaf assumption),即叶子为一个没有大小的点,但具有叶倾角特征参数($G(())$并可以计算冠层总体叶面积。式(37)中的$P(\theta)$也代表光子在θ方向的最小逃逸概率。

在浑浊水平介质假设下,植被冠层光子零阶逃逸概率和孔隙率在冠层中的某个特定点r上是一致的,即$\rho(r,\Omega)=P(r,\Omega)$。需要注意的是逃逸概率$\rho(r,\Omega)$具有方向性,而且针对单位叶面积计算,实践中可根据冠层BRF测量得到有效逃逸概率(ρ_e):

$$\rho_e=\frac{\rho(r,\Omega)}{1-p(r,\Omega)\omega_L}=\frac{\mathrm{BRF}}{i_0\omega_L} \tag{38}$$

3.2.4 p理论建模的局限性

p理论追求简洁的建模理念,这样对模型的反演也比较简单。为了简化,人们通常把冠层假设为处处均匀的浑浊介质,p值与光学厚度无关,而且各向均一,不受入射和散射角度的影响。实际上,逃逸概率和再碰撞概率都具有角度变化特征,不同散射阶的逃逸概率和再碰撞概率也不相同。假设叶片具有各向同性的散射特征可能会给某些波段带来较大误差[16]。在实际建模和反演过程中,冠层结构参数和光谱参数依然耦合在一起,如何在反演过程中对其进行解耦还是一个无法回避的问题[70]。应用p理论建模时需要注意理论本身的一些应用条件,比如对黑色下垫面背景的假设;这样在稀疏植被的情况下直接应用该方法可能会带来一定误差。冠层结构参数DASF也易受到土壤背景的影响,尤其是在热点方向上光照土壤的影响。

3.3 未来研究方向

目前的p理论建模框架主要集中在简单的连续混浊介质,对叶片形状、大小和叶倾角分布考虑不足,也缺乏对后向散射(如热点效应)的考虑。未来应该可以在更一般的情况下计算有效再碰撞概率(p_e),比如考虑冠层的水平异质性、叶片的几何大小和形状以及叶片散射相函数随位置的变化等。过去很多研究集中在水平连续均匀介质;基于独立冠层在全球碳平衡中也占有重要地位[71],今后应更加重视对独立冠层的研究。当前的p理论模型都是单层模型,未考虑冠层的垂直结构分布差异,未来可以研究如何将p理论应用于更复杂的多层模型中。

在p理论建模的基础上,未来应进一步研究光谱不变量的获取方法,开展不同方法的对比分析试验。在实测研究基础上,应加强p值的遥感反演和验证研究。如何在全球尺度开展关键光谱不变量和其他生化参数的反演和验证应是下一步值得关注的方向。精确的光谱不变量的获取将有助于提高模型模拟精度,同时提高生物物理参数和生化参数的遥感反演精度。

光谱不变理论已被用于植被冠层与大气层的耦合辐射传输建模,未来有可能将土壤—叶片—冠

层与大气辐射传输过程耦合到一个统一的建模框架中(可称为广义p理论),这有助于将地面高光谱测量与大气顶层的辐射观测紧密联系起来,使得大气顶层的辐射模拟值与遥感卫星观测可以直接对比。

4 中国学者在p理论方面的相关研究

国外学者在进行p理论开拓研究的同时,中国学者也在多方面进行了研究。本世纪初就有中国留学生在国外相关团队工作,为p理论的初建做出了贡献,当时的工作主要集中在p理论的基本原理构建和p值获取等方面[11,72-73]。随着我国对外交流的扩大,国内外学者在p理论方面的合作研究一直持续至今[33,74-76]。

我国自主研究p理论的历史始于2014年。Fan等[77]基于p理论建立了一个适合于坡地冠层的多次散射模型;同年,Fan等[78]基于p理论估算了植被FAPAR,并获得了与MODIS近似的结果。徐希孺等[79]开发了一个四分量统一模型,该模型利用p理论方法计算了冠层内部、冠层与土壤间的多次散射对冠层BRF的贡献。

近年来,p理论更是大量应用于叶片[27]和冠层反射率建模[38]以及地形校正模型中[80]。在热红外领域,中国学者首次构建了基于p理论的冠层方向发射率模型(CE-P)[81]和冠层亮温模型(CBT-P)[82]。这两个模型均考虑了冠层内部和植被与背景之间的多次散射,其中热红外波段的p值参照Stenberg公式计算得到。Yang等[83]的新近研究则揭示了经典的二流近似理论(Kubelka-Munk方法)和p理论之间的关联关系。经过10余年的发展,我国已经成为全球p理论研究与应用的重心。

在光谱不变量的获取方面,Wu等[27]提出叶片内部的再碰撞概率(p_{leaf})可表示为与比叶重的函数。同时,人们也通过不同波段的冠层BRF计算获取p和DASF值[84-85]。Wang等[33]首次利用STAR方法从地基LiDAR数据获取树冠的p值。Zeng等[52]提出植被指数NIR_v受土壤背景影响较小,可以作为DASF的近似。Lin等[86]提出利用一个经验关系对冠层的p和DASF值进行校正,该方法考虑了叶绿素和干物质对叶片单次散射系数的影响。F2023文提出植被逃逸概率可以近似地用植被比覆盖度SVC(植被覆盖度与LAI的比值)来表示。在2021年,Fang等[62]曾对不同植被逃逸概率(即SVC)的季节和长时期变化趋势进行了分析。

在植被参数估算方面,Gu等[87]基于p理论将冠层尺度的植被指数转换到叶片尺度并用于估算叶片叶绿素含量。在新的FAPAR估算模型中,Tao等[88]区分了一次和多次散射的p值并基于该模型估算了逐小时的FAPAR值。随着植被荧光遥感的快速发展,p理论在荧光遥感研究中受到了极大重视,中国学者在这方面做了大量的工作[28,45-48,89]。如上文提到的,我国学者率先开展了利用近红外BRF和NIR_v估算荧光有效逃逸概率(σ_{FC})的研究[49,52](表1)。

经过10余年的引进发展,中国在p理论方面的研究已经初具规模,几个细分领域都得到了一定发展,为未来进一步的发展奠定了良好的基础。相比欧美在森林生态系统的研究,中国有更多有利的条件可以关注农田和草地生态系统的研究。另一方面,中国在实测和遥感反演与验证方面的工作相对较少,还没有将p理论作为一个专门的方向来进行系统研究。未来应抓住时机,抢占理论、方法和应用研究的制高点,持续作出创新性贡献。

5 总 结

2000年左右开始流行的p理论方法极大促进了遥感学科的研究和发展。从理论起源来看,p理论的相关概念源于概率辐射传输模型(PRT),所采用的建模思路实际上是对多次散射的一种简化计算策略。这一思路作为一个专门的概念被引进后,首先用到了3D冠层辐射传输建模中,用于简化模型构建,后来又被推广到叶片、叶簇和林冠等尺度的建模,并且在实测和遥感等方面都得到了发展和检验,形成了一个专门的研究方向。

过去20余年,研究人员对p理论的原理、方法和应用等方面进行了多方位的研究。未来的研究可以继续在三方面进行拓展:①对光谱不变量的物理特性进行研究,如其在不同尺度、时间和空间上的变化特征等;②探讨p理论和光谱不变参数用于遥感建模和产品生产的方法,并对模型参数和产品进行检验;③基于p理论的冠层反射率模型可以与陆面过程模型和生态过程模型耦合,在模型耦合和数据同化方面发挥p理论建模的优势。随着理论的不断演化和研究的深入,相信未来还会不断有新的研究方向涌现。

致谢:徐希孺与陈镜明教授最早在中国开展了关于p理论的建模和应用研究。感谢成文过程中与

Matti Mõttus的讨论交流以及杨沛琦和闫凯提供的资料。马田帮助收集了部分资料和参与讨论,郭可若帮助整理了参考文献。错漏之处难免,敬请广大同行不吝指正!

附录A. 植被冠层光子相互作用系数($i(\lambda)$)和冠层截获概率(i_0)

F2023文中的$i(\lambda)$和i_0分别代表冠层光子相互作用系数(canopy interaction coefficient)和冠层截获概率(canopy interceptance)[11],原文中有混用。冠层对零次散射的光子进行截获(i_0)以后,被截获的光子在冠层内部与叶片继续进行交互作用($i(\lambda)$)。i_0也等于w L(1)=0时的$i(\lambda)$。

冠层总体截获概率可表示为$i=i_0(1-\beta)+i_D\beta$,其中i_0和i_D分别代表植被冠层对直射光和散射光的截获概率,β代表天空光的比率。

附录B. 对F2023文中关于植被冠层中光照叶片百分比(α_{sun})相关内容的修正

经过与Matti Mõttus交流,光照叶片百分比(α_{sun})的计算应参考本文中式(29)。F2023文对α_{sun}的理解有误,原文中式(159)、(160)和(163)以及附录D中式(D4)~(D6)是多余的,相关公式可以参考本文或者Hernández-Clemente等[66]和Ihalainen和Mõttus[90]文附录中的内容。

参考文献(References):

[1] ROSS J, The radiation regime and architecture of plant stands [M]. The Hague, Netherlands: Dr.W. Junk Publishers. 1981.

[2] MYNENI R B, ROSS J, ASRAR G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies[J].Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 45(1/2): 1-153. DOI: 10.1016/0168-1923(89)90002-6

[3] LIANG S, Quantitative remote sensing of land surfaces[M]. New York: John Wiley and Sons. 2004.

[4] MYNENI R B, ASRAR G, KANEMASU E T. Light scattering in plant canopies: The method of Successive Orders of Scattering Approximations(SOSA)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 39(1): 1-12. DOI: 10.1016/0168-1923(87)90011-6

[5] MYNENI R B, ASRAR G, KANEMASU E T. Reflectance of a soybean canopy using the method of Successive Orders of Scattering Approximations (SOSA)[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 40(1): 71-87. DOI: 10.1016/0168-1923(87)90056-6

[6] KNYAZIKHIN Y, MARSHAK A. Fundamental equations of radiative transfer in leaf canopies, and iterative methods for their solution[A].Photon-Vegetation Interactions[M].Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991: 9-43. DOI: 10.1007/978-3-642-75389-3_2

[7] SOBOLEV V V, Treatise on Radiative Transfer[M]. Princeton, N.J.: Van Nostrand. 1963.

[8] KNYAZIKHIN Y, MARTONCHIK J V, MYNENI R B, *et al*. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, 103(D24): 32257-32275. DOI: 10.1029/98JD02462

[9] PANFEROV O, KNYAZIKHIN Y, MYNENI R B, *et al*. The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(2): 241-253. DOI: 10.1109/36.905232

[10] LEWIS P, DISNEY M. Spectral invariants and scattering across multiple scales from within-leaf to canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(2): 196-206. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.015

[11] HUANG D, KNYAZIKHIN Y, DICKINSON R E, *et al*. Canopy spectral invariants for remote sensing and model applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 106(1): 106-122. DOI: 10.1016/j.rse.2006.08.001

[12] DISNEY M, LEWIS P, SAICH P. 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 114-132. DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.003

[13] SMOLANDER S, STENBERG P. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(3): 355-363. DOI: 10.1016/j.rse.2004.10.010

[14] STENBERG P. Simple analytical formula for calculating average photon recollision probability in vegetation canopies[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(2): 221-224. DOI: 10.1016/j.rse.2006.12.014

[15] STENBERG P, MÕTTUS M, RAUTIAINEN M. Photon recollision probability in modelling the radiation regime of canopies—A review[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 183: 98-108. DOI: 10.1016/j.rse.2016.05.013

[16] HOVI A, FORSSTRÖM P, GHIELMETTI G, *et al*. Empirical validation of photon recollision probability in single crowns of tree seedlings[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 169: 57-72. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.027

[17] KNYAZIKHIN Y, SCHULL M A, XU L, *et al*. Canopy spectral invariants. part 1: A new concept in remote sensing of vegetation[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(4): 727-735. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.06.014

[18] HOVI A, SCHRAIK D, HANUŠ J, *et al*. Assessment of a photon recollision probability based forest reflectance model in European boreal and temperate forests[J]. Remote Sensing of

Environment, 2022, 269: 112804. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112804

[19] FANG H L. Photon recollision probability and the spectral invariant theory: Principles, methods, and applications[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 299: 113859. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113859

[20] FANG H L, BARET F, PLUMMER S, *et al*. An overview of global Leaf Area Index (LAI): Methods, products, validation, and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 739-799. DOI: 10.1029/2018RG000608

[21] FANG H L.Canopy clumping index(CI):A review of methods, characteristics, and applications[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 303: 108374. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108374

[22] IDSO S B, DE WIT C T. Light relations in plant canopies[J]. Applied Optics, 1970, 9(1): 177. DOI: 10.1364/ao.9.000177

[23] SCHULL M A, GANGULY S, SAMANTA A, *et al*. Physical interpretation of the correlation between multi-angle spectral data and canopy height[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(18). DOI: 10.1029/2007GL031143

[24] SMOLANDER S, STENBERG P. A method to account for shoot scale clumping in coniferous canopy reflectance models[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 88(4): 363-373. DOI: 10.1016/j.rse.2003.06.003

[25] MÖTTUS M, RAUTIAINEN M. Scaling PRI between coniferous canopy structures[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(2): 708-714. DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2253307

[26] SCHULL M A, KNYAZIKHIN Y, XU L, *et al*. Canopy spectral invariants, part 2: Application to classification of forest types from hyperspectral data[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(4): 736-750. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2010.06.004

[27] WU S B, ZENG Y L, HAO D L, *et al*. Quantifying leaf optical properties with spectral invariants theory[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 112131. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112131

[28] LU W D, ZENG Y L, VILFAN N, *et al*. Characterizing leaf-scale fluorescence with spectral invariants[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 322: 114704. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114704

[29] OKER-BLOM P, SMOLANDER H. The ratio of shoot silhouette area to total needle area in Scots pine[J]. Forest Science, 1988, 34(4): 894-906. DOI: 10.1093/forestscience/34.4.894

[30] STENBERG P, LINDER S, SMOLANDER H, *et al*. Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating Leaf Area Index of some Scots pine stands[J].Tree Physiology, 1994, 14(7-9): 981-995. DOI: 10.1093/treephys/14.7-8-9.981

[31] STENBERG P, MÖTTUS M, RAUTIAINEN M, *et al*. Quantitative characterization of clumping in Scots pine crowns[J]. Annals of Botany, 2014, 114(4): 689-694. DOI: 10.1093/aob/mct310

[32] PISEK J, BUDDENBAUM H, CAMACHO F, *et al*. Data synergy between Leaf Area Index and clumping index earth observation products using photon recollision probability theory[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 215: 1-6. DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.026

[33] WANG D, SCHRAIK D, HOVI A, *et al*. Direct estimation of photon recollision probability using terrestrial laser scanning[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 247: 111932. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111932

[34] HE S Y, QI J B, WANG D, *et al*. Estimation of canopy photon recollision probability from airborne laser scanning[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 311: 114264. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114264

[35] YAN K, ZHANG Y M, TONG Y Y, *et al*. Modeling the radiation regime of a discontinuous canopy based on the stochastic radiative transport theory: Modification, evaluation and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 267: 112728. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112728

[36] RAUTIAINEN M, STENBERG P. Application of photon recollision probability in coniferous canopy reflectance simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(1): 98-107. DOI: 10.1016/j.rse.2005.02.009

[37] STENBERG P, LUKEŠ P, RAUTIAINEN M, *et al*. A new approach for simulating forest albedo based on spectral invariants[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 137: 12-16. DOI: 10.1016/j.rse.2013.05.030

[38] ZENG Y L, XU B D, YIN G F, *et al*. Spectral invariant provides a practical modeling approach for future biophysical variable estimations[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1508. DOI: 10.3390/rs10101508

[39] HADI, PFEIFER M, KORHONEN L, *et al*. Forest canopy structure and reflectance in humid tropical Borneo: A physically-based interpretation using spectral invariants[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 201: 314-330. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.018

[40] YAN K, PARK T, CHEN C, *et al*. Generating global products of LAI and FPAR from SNPP-VIIRS data: Theoretical background and implementation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2119-2137. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2775247

[41] GANGULY S, SAMANTA A, SCHULL M A, *et al*. Generating vegetation Leaf Area Index earth System data record from multiple sensors. Part 2: Implementation, analysis and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4318-4332. DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.013

[42] GANGULY S, SCHULL M A, SAMANTA A, *et al*. Generating vegetation Leaf Area Index earth system data record from multiple sensors. Part 1: Theory[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4333-4343. DOI: 10.1016/j.

rse.2008.07.014

[43] GANGULY S, LI S, NEMANI R, *et al*. Leaf Area Index retrieval from next generation geostationary GOES-R satellite [C]// 2017 International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing. Valencia, Spain.2017.

[44] YANG B, KNYAZIKHIN Y, MÖTTUS M, *et al*. Estimation of Leaf Area Index and its sunlit portion from DSCOVR EPIC data: Theoretical basis[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 198: 69-84. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.033

[45] LIU X J, GUANTER L, LIU L Y, *et al*. Downscaling of solar-induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 110772. DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.035

[46] ZHANG Z Y, CHEN J M, GUANTER L, *et al*. From canopy-leaving to total canopy far-red fluorescence emission for remote sensing of photosynthesis: First results from TROPOMI [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(21): 12030-12040. DOI: 10.1029/2019GL084832

[47] ZENG Y L, BADGLEY G, CHEN M, *et al*. A radiative transfer model for solar induced fluorescence using spectral invariants theory[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111678. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111678

[48] ZHANG Z Y, ZHANG Y, ZHANG Y G. Generating high-resolution total canopy SIF emission from TROPOMI data: Algorithm and application[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 295: 113699. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113699

[49] YANG P Q, VAN DER TOL C. Linking canopy scattering of far-red Sun-induced chlorophyll fluorescence with reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 456-467. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.029

[50] YANG P Q, VAN DER TOL C, CAMPBELL P K E, *et al*. Fluorescence Correction Vegetation Index (FCVI): A physically based reflectance index to separate physiological and non-physiological information in far-red Sun-induced chlorophyll fluorescence[J].Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111676. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111676

[51] LU X L, LIU Z Q, ZHAO F, *et al*. Comparison of Total Emitted Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence (SIF) and Top-Of-Canopy (TOC) SIF in estimating photosynthesis [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 251: 112083. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112083

[52] ZENG Y L, BADGLEY G, DECHANT B, *et al*. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232: 111209. DOI: 10.1016/j.rse. 2019.05.028

[53] LIU X J, LIU L Y, HU J C, *et al*. Improving the potential of red SIF for estimating GPP by downscaling from the canopy level to the photosystem level[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 281: 107846. DOI: 10.1016/j. agrformet. 2019.107846

[54] HAO D L, ZENG Y L, QIU H, *et al*. Practical approaches for normalizing directional solar-induced fluorescence to a standard viewing geometry[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 255: 112171. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112171

[55] ZHANG Z Y, ZHANG Y G, PORCAR-CASTELL A, *et al*. Reduction of structural impacts and distinction of photosynthetic pathways in a global estimation of GPP from space-borne solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111722. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111722

[56] QI M J, LIU X J, DU S S, *et al*. Improving the estimation of canopy fluorescence escape probability in the near-infrared band by accounting for soil reflectance[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4361. DOI: 10.3390/rs15184361

[57] LI W J, FANG H L. Estimation of direct, diffuse, and total FPARs from Landsat surface reflectance data and ground-based estimates over six FLUXNET sites[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(1): 96-112. DOI: 10.1002/2014JG002754

[58] LI W J, FANG H L, WEI S S, *et al*. Critical analysis of methods to estimate the fraction of absorbed or intercepted photosynthetically active radiation from ground measurements: Application to rice crops[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 297: 108273. DOI: 10.1016/j. agrformet. 2020.108273

[59] ZHANG Y H, FANG H L, WANG Y, *et al*. Variation of intra-daily instantaneous FAPAR estimated from the geostationary Himawari-8 AHI data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108535. DOI: 10.1016/j. agrformet. 2021. 108535

[60] PICKETT-HEAPS C A, CANADELL J G, BRIGGS P R, *et al*. Evaluation of six satellite-derived Fraction of Absorbed Photosynthetic Active Radiation (FAPAR) products across the Australian continent[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 241-256. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.037

[61] XIAO Z Q, LIANG S L, SUN R, *et al*. Estimating the fraction of absorbed photosynthetically active radiation from the MODIS data based GLASS leaf Area Index Product[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 171: 105-117. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.016

[62] FANG H L, LI S J, ZHANG Y H, *et al*. New insights of global vegetation structural properties through an analysis of canopy clumping index, fractional vegetation cover, and Leaf Area Index[J].Science of Remote Sensing, 2021, 4: 100027. DOI: 10.1016/j.srs.2021.100027

[63] CHEN J M, LIU J, CIHLAR J, *et al*. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications[J]. Ecological Modelling, 1999, 124(2/3): 99-119. DOI: 10.1016/S0304-3800(99)00156-8

[64] Bonan G B. Ecological Climatology[M]. New York: Cambridge University Press, 2002: 678.

[65] MÖTTUS M, TAKALA T L H, STENBERG P, *et al*. Dif-

fuse sky radiation influences the relationship between canopy PRI and shadow fraction[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, 105: 54-60. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.03.012

[66] HERNÁNDEZ-CLEMENTE R, KOLARI P, PORCAR-CASTELL A, *et al*. Tracking the seasonal dynamics of boreal forest photosynthesis using EO-1 Hyperion reflectance: Sensitivity to structural and illumination effects [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5105-5116. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2554466

[67] MONSI M, SAEKI T. Uber den lichtfaktor in den pflanzegeesellschaften und seine bedeutung fur die stoffproduktion[J]. Japanese Journal of Botany, 1953. 14: 22-52.

[68] MONSI M. On the factor light in plant communities and its importance for matter production[J]. Annals of Botany, 2004, 95(3): 549-567. DOI: 10.1093/aob/mci052

[69] NILSON T. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands[J]. Agricultural Meteorology, 1971, 8: 25-38. DOI: 10.1016/0002-1571(71)90092-6

[70] KNYAZIKHIN Y, SCHULL M A, STENBERG P, *et al*. Hyperspectral remote sensing of foliar nitrogen content[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(3): E185-E192. DOI: 10.1073/pnas.1210196109

[71] TUCKER C, BRANDT M, HIERNAUX P, *et al*. Sub-continental-scale carbon stocks of individual trees in African drylands[J]. Nature, 2023, 615(7950): 80-86. DOI: 10.1038/s41586-022-05653-6

[72] WANG Y J, BUERMANN W, STENBERG P, *et al*. A new parameterization of canopy spectral response to incident solar radiation: Case study with hyperspectral data from pine dominant forest[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3): 304-315. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00009-9

[73] TIAN Y H, WANG Y J, ZHANG Y, *et al*. Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(1): 143-159. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00102-5

[74] YAN K, PARK T, YAN G J, *et al*. Evaluation of MODIS LAI/FPAR product collection 6. part 1: Consistency and improvements[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 359. DOI: 10.3390/rs8050359

[75] 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[J]. Remote Sensing, 2016, 8(7): 563. DOI: 10.3390/rs8070563

[76] WANG W L, NEMANI R, HASHIMOTO H, *et al*. An interplay between photons, canopy structure, and recollision probability: A review of the spectral invariants theory of 3D canopy radiative transfer processes [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1805. DOI: 10.3390/rs10111805

[77] FAN W L, CHEN J M, JU W M, *et al*. Hybrid geometric optical - radiative transfer model suitable for forests on slopes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014,52(9):5579-5586. DOI:10.1109/TGRS.2013.2290590

[78] FAN W J, LIU Y, XU X R, *et al*. A new FAPAR analytical model based on the law of energy conservation: A case study in China[J].IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,2014,7(9):3945-3955.

[79] XU Xiru, FAN Wenjie LI Jucai, *et al*. A unified model of bi-directional reflectance distribution function for the vegetation canopy[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2017, 47(2): 217-232. [徐希孺, 范闻捷, 李举材, 等. 植被二向性反射统一模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(2): 217-232.]

[80] LI W H, YAN G J, GENG J, *et al*. A model based on spectral invariant theory for correcting topographic effects on vegetation canopy reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 322: 114695. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114695

[81] CAO B, GUO M Z, FAN W J, *et al*. A new directional canopy emissivity model based on spectral invariants [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(12): 6911-6926. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2845678

[82] GUO M Z, CAO B, FAN W J, *et al*. Scattering effect contributions to the directional canopy emissivity and brightness temperature based on CE-P and CBT-P models[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(6): 957-961. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2886606

[83] YANG P Q, VERHOEF W, FANG H L, *et al*. Linking Kubelka-Munk and recollision probability theories for radiative transfer simulations in turbid canopy[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 321: 114680. DOI: 10.1016/j. rse.2025.114680

[84] SONG W J, KNYAZIKHIN Y, WEN G Y, *et al*. Implications of whole-disc DSCOVR EPIC spectral observations for estimating earth's spectral reflectivity based on low-earth-orbiting and geostationary observations [J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1594. DOI: 10.3390/rs10101594

[85] SUN Y H, KNYAZIKHIN Y, SHE X J, *et al*. Seasonal and long-term variations in leaf area of Congolese rainforest [J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112762. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112762

[86] LIN Y, LIU S Y, YAN L, *et al*. Improving the estimation of canopy structure using spectral invariants: Theoretical basis and validation [J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 284: 113368. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113368

[87] GU C P, LI J, LIU Q H, *et al*. Deriving leaf-scale chlorophyll index (CIleaf) from canopy reflectance by correcting for the canopy multiple scattering based on spectral invariant theory[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 322: 114692. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114692

[88] TAO Y Z, PENG N J, FAN W J, *et al*. High spatiotemporal resolution vegetation FAPAR estimation from Sentinel-2 based on the spectral invariant theory[J]. Science of Remote Sensing, 2025, 11: 100207. DOI: 10.1016/j.srs.2025.100207

[89] HE Y C, ZENG Y L, HAO D L, *et al*. Combining geometric-optical and spectral invariants theories for modeling canopy fluorescence anisotropy[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 323: 114716. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114716

[90] IHALAINEN O, MÖTTUS M. Spectral invariants in ultra-high spatial resolution hyperspectral images[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 288: 108265. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2022.108265

A Synthesis on the Vegetation Spectral Invariant Theory

FANG Hongliang[1,2,3]

(1.*LREIS, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*

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

3.*Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing* 210023, *China*)

Abstract: Over the past two decades, studies about the spectral invariant theory have been developed rapidly in vegetation remote sensing. The theory has been widely used in vegetation parameter measurement, canopy reflectance modeling, and biophysical parameters retrieval. A review paper titled "Photon recollision probability and the spectral invariant theory: Principles, methods, and applications" was published by the author in "*Remote Sensing of Environment*" in 2023 (DOI: 10.1016/j.rse.2023.113859). The current paper provides a comprehensive overview of the background of spectral invariant theory, general principles of the theory, determination and applications of spectral invariants. Recent progresses of the theory are summarized and potential future developments are discussed. A special section is dedicated to the researches made by Chinese scholars. The goal is to provide a synthetic overview of the theory. Some new thoughts about the theory are also given in the paper. (1) The spectral invariant theory evolves from the successive orders of scattering approximation method of the multiple scattering process of photons in vegetation canopy. The theory faciliates the conversion of spectral parameters between different spectral bands and different scales (mainly between leaves and canopy) and provides new means for calculating the directional reflectance, albedo, and fluorescence escape probability.(2) Spectral invariants can be obtained through empirical methods, spectral methods, and structural methods. The spectral method is divided into single scale spectral method and spectral scaling method, and the structural method is divided into the Silhouette to Total Area Ratio (STAR) method, clumping index method, Stenberg method, and approximation method. Different methods can be cross-validated.(3) The spectral invariant theory has been applied in a number of canopy reflectance models. Based on these models, researchers have carried out a large number of inversion studies for vegetation structural parameters and physiological parameters. The principles, methods and applications of the theory can be further explored in the future.(4) New approximation methods for the spectral invariants are proposed and new formulae for the visible sunlit leaf area index and the hemispherical directional area scattering factor are summarized. Chinese researchers have made significant contribution to the development of the theory, especially in calculating the escape probability of the solar induced fluorescence using the theory.

Key words: Escape probability; Recollision probability; Spectral invariant theory; p-theory; Canopy reflectance model