

# 地表双向反射对天基矢量辐射探测的影响分析<sup>\*</sup>

程天海<sup>1,2,3)</sup> 顾行发<sup>1,3)†</sup> 余 涛<sup>1,3)</sup> 陈良富<sup>1,3)</sup> 田国良<sup>1,3)</sup>

1) 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

3) 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101)

(2008 年 11 月 11 日收到 2009 年 1 月 8 日收到修改稿)

矢量辐射传输方程定量描述了辐射在地表-大气耦合介质中的传输过程, 是定量遥感的基础. 在处理辐射和离散介质相互作用时, 如何处理多次散射、辐射偏振效应和耦合地表模型是研究的重点, 直接影响定量遥感反演的精度. 文中基于逐次散射近似法求解了矢量辐射传输方程, 求解过程中耦合典型地表的非偏双向反射(BRDF)模型和偏振双面反射(BPDF)模型. 采用相对误差因子定量分析了地表双向反射效应和大气偏振效应对天基矢量辐射的影响. 为进一步研究地表-大气耦合介质系统的偏振特性及地表大气参数的定量遥感反演提供理论支持.

关键词: 矢量辐射传输方程, 逐次散射近似, 定量遥感, 偏振遥感

PACC: 9265D, 9265M, 4225B

## 1. 引 言

遥感器, 无论是航空器或航天器所载, 对地观测获取的信息, 既包括了目标地表信息, 也包括了大气信息, 是量化获取地表和大气信息的有效手段. 在地气系统中, 入射的太阳辐射为非偏振光, 经过大气分子、大气气溶胶和云粒子散射以及地表反射后, 其辐射强度、传播方向、频率和偏振状态会发生变化, 这种变化包含了这些作用对象的物理特征信息<sup>[1]</sup>. 大气辐射传输模型用于模拟大气与地表信息之间耦合作用的结果, 其过程可以描述为地表光谱信息与大气耦合以后, 在遥感器上所获得的信息. 为了从遥感器获取的光谱信息中量化提取地表和大气信息, 需要对辐射在地表-大气耦合介质中的传输过程做量化研究.

大气辐射传输的研究对象为具有半边界条件的物理问题, 其求解过程除简单的二流或四流近似外, 只能用数值方法来逼近求得近似解. 近几十年来, 与大气辐射传输有关的应用需求增长极快, 使大气辐射传输的过程研究与量化算法研究获得蓬勃发展, 各种数值离散求解方法不断涌现出来并得到完

善和发展<sup>[2-9]</sup>. 但是, 由于大气辐射传输本身问题的复杂性及其对相关学科的高度依赖性, 其中仍有许多问题尤其是辐射和离散介质相互作用的问题, 如多次散射问题、辐射的偏振效应问题和地表(偏振)双向反射的耦合问题等方面还没有得到很好的解决, 这些问题直接影响遥感量化及其应用.

为全面了解地-气耦合系统中的辐射传输过程, 探索地表和大气参数的偏振遥感量化及其在气候模式中的参数化, 本文在 6SV1<sup>[10]</sup>源代码基础上, 耦合了典型地表的非偏双向反射(BRDF)模型和偏振双面反射(BPDF)模型, 并定量分析了地表双向反射对辐射矢量的影响, 为定量遥感提供理论支持.

## 2. 矢量辐射方程逐次散射近似算法

### 2.1. 逐次散射近似法基本理论

假设大气是水平均一、垂直分层的, 则矢量辐射传输方程可表示为<sup>[11]</sup>

$$\mu \frac{d\mathbf{L}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = \mathbf{L}(\tau, \mu, \varphi) - \mathbf{S}(\tau, \mu, \varphi), \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA06A303)、国家自然科学基金(批准号: 40701109)和中国科学院知识创新工程重要方向(批准号: KZCX2-YW-303)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: xfgu@irsa.ac.cn

其中,短波辐射的源函数为

$$S(\tau, \mu, \varphi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} P(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) E_0 \exp(\tau/\mu_0) + \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} P(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') \times L(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi', \quad (2)$$

式中的第一项为单次散射贡献,第二项为多次散射贡献。 $\mu$  为极角余弦,向上为正,向下为负; $\varphi$  为相对于太阳出射光线的方位角, $\tau$  为光学厚度, $\omega$  为单次散射反照率, $E_0$  为大气顶太阳入射辐射通量, $\mu_0$  和  $\varphi_0$  为太阳天顶角的余弦和方位角, $P(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0)$  为散射相矩阵进行参考平面转动变换后的散射矩阵<sup>[11]</sup>。

假设大气层顶部没有漫射强度,则辐射传输方程的形式解为

$$L(\tau, \mu < 0, \varphi) = - \int_0^\tau e^{-(\tau-\tau')\mu} S(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu, \quad (3)$$

$$L(\tau, \mu > 0, \varphi) = L^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) e^{-(\tau^* - \tau)\mu} + \int_\tau^{\tau^*} e^{-(\tau' - \tau)\mu} S(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu, \quad (4)$$

其中, $L^{\text{up}}$  为地表反射贡献,依赖于地表类型。

逐次散射近似(SOS)法<sup>[12]</sup>是对散射一次、二次、三次等的光子分别计算其强度,总强度为所有各次散射强度之和,

$$L(\tau, \mu, \varphi) = \sum_{n=1}^N L_n(\tau, \mu, \varphi), \quad (5)$$

式中  $n$  表示散射的次数。

在定量遥感地表和大气信息研究中,需要模拟地气系统对直射太阳光的反射场。在这种情况下,对大气上边界条件而言,向下的漫入射场为零,仅需要考虑地表反射边条件,它由两部分组成:一是对漫射光的反射,二是对直射光的反射。由(3)(4)式可得

$$L_n(\tau, \mu < 0, \varphi) = - \int_0^\tau e^{-(\tau-\tau')\mu} S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu, \quad (6)$$

$$L_n(\tau, \mu > 0, \varphi) = L_n^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) e^{-(\tau^* - \tau)\mu} + \int_\tau^{\tau^*} e^{-(\tau' - \tau)\mu} S_n(\tau', \mu, \varphi) d\tau' / \mu, \quad (7)$$

其中,

$$S_1(\tau, \mu, \varphi)$$

$$= \frac{\omega(\tau)}{4\pi} P(\tau, \mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) E_0 \exp(\tau/\mu_0), \quad (8)$$

$$S_{n>1}(\tau, \mu, \varphi)$$

$$= \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} P(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') \times L_{n-1}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi', \quad (9)$$

$$L_1^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = - \mu_0 R(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0) E_0 e^{\tau^*/\mu_0} / \pi, \quad (10)$$

$$L_{n>1}^{\text{up}}(\tau^*, \mu > 0, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{+1} (-\mu') R(\mu, \varphi, \mu', \varphi') \times L_{n-1}(\tau^*, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' / \pi, \quad (11)$$

其中, $R(\mu, \varphi, \mu_0, \varphi_0)$  为下垫面反射矩阵,可以根据地表反射模型获得。

在没有经过简化的情况下无法得到矢量辐射传输方程的解析解,需要借助数值计算方法<sup>[13]</sup>。由(2)式知,求解矢量辐射传输方程需要求解关于光学厚度、方位角及观测天顶角的积分。这三个积分通常由下述方法处理:1)将矢量辐射传输方程按方位角进行 Fourier 级数展开,从而简化辐射传输方程求解。将矢量辐射传输方程转换为与方位角独立的方程,对方位角的积分可用解析方法计算;2)对天顶角的离散和积分用数值方法计算;3)对于光学厚度,大气划分为  $K$  层均匀层,每一层的光学厚度为  $\tau_K$ ,用数值方法计算对光学厚度的积分。

## 2.2. 地气耦合矢量辐射传输方程的数值算法

为简化辐射传输方程求解,进行变量  $\mu$  和  $\varphi$  分离,将辐射传输方程按方位角进行 Fourier 级数展开<sup>[14]</sup>,经 Fourier 变换后,基于逐次散射近似法如下:

$$L_n^s(\tau, \mu < 0) = - \int_0^\tau e^{-(\tau-\tau')\mu} S_n^s(\tau', \mu) d\tau' / \mu, \quad (12)$$

$$L_n^s(\tau, \mu > 0) = L_n^{\text{up},s}(\tau^*, \mu > 0) e^{-(\tau^* - \tau)\mu} + \int_\tau^{\tau^*} e^{-(\tau' - \tau)\mu} S_n^s(\tau', \mu) d\tau' / \mu, \quad (13)$$

其中,

$$S_1^s(\tau, \mu) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} P(\tau, \mu, \mu_0) E_0 e^{\tau/\mu_0}, \quad (14)$$

$$S_{n>1}^s(\tau, \mu) = \frac{\omega(\tau)}{2} \int_{-1}^{+1} P(\tau, \mu, \mu') L_{n-1}^s(\tau, \mu') d\mu', \quad (15)$$

$$L_1^{\text{up},s}(\tau^*, \mu > 0) = (-\mu_0) \mathbf{R}^s(\mu, \mu_0) \mathbf{E}_0 e^{\tau^*/\mu_0} / \pi, \quad (16)$$

$$L_{n>1}^{\text{up},s}(\tau^*, \mu > 0) = 2 \int_{-1}^0 (-\mu') \mathbf{R}^s(\mu, \mu') L_{n-1}^s(\tau^*, \mu') d\mu', \quad (17)$$

$$\mathbf{P}^s(\mu, \mu') = \sum_{l=s}^L \begin{pmatrix} \beta_l \mathbf{P}'_s \mathbf{P}'_s & \gamma_l \mathbf{P}'_s \mathbf{R}'_s & -\gamma_l \mathbf{P}'_s \mathbf{T}'_s & 0 \\ \gamma_l \mathbf{R}'_s \mathbf{P}'_s & \alpha_l \mathbf{R}'_s \mathbf{R}'_s + \zeta_l \mathbf{T}'_l \mathbf{T}'_s & -\alpha_l \mathbf{R}'_s \mathbf{T}'_s - \zeta_l \mathbf{T}'_l \mathbf{R}'_s & \epsilon_l \mathbf{T}'_s \mathbf{P}'_s \\ -\gamma_l \mathbf{T}'_s \mathbf{P}'_s & -\alpha_l \mathbf{T}'_s \mathbf{R}'_s - \zeta_l \mathbf{R}'_s \mathbf{T}'_s & \alpha_l \mathbf{T}'_s \mathbf{T}'_s + \zeta_l \mathbf{R}'_s \mathbf{R}'_s & -\epsilon_l \mathbf{R}'_s \mathbf{P}'_s \\ 0 & -\epsilon_l \mathbf{P}'_s \mathbf{T}'_s & \epsilon_l \mathbf{P}'_s \mathbf{R}'_s & \delta_l \mathbf{P}'_s \mathbf{P}'_s \end{pmatrix}. \quad (18)$$

考虑地表反射边条件,地表反射矩阵从本质上可归结为两个基本类型,其一是由入射光经过具有一定光学粗糙度处于合适视场条件的镜面反射导致的,是部分偏振,而另一部分是来自地表的多次散射部分,具有非偏振趋向<sup>[15]</sup>.对于太阳光在大气中的矢量辐射传输问题,在地表边界反射处理上,将漫反射和镜面反射分开处理.则地表反射矩阵可表示为漫射光反射矩阵和直射光镜面反射矩阵之和

$$\mathbf{R}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') = \mathbf{R}_{\text{diff}}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') + \mathbf{R}_{\text{sp}}(\mu, \varphi, \mu', \varphi'). \quad (19)$$

漫反射矩阵采用非偏近似,只有第一个 Stokes 参量非零,

$$\mathbf{R}_{\text{diff}}(\mu, \varphi, \mu', \varphi') = \text{diag}(\rho(\mu, \varphi, \mu', \varphi') \rho, 0, 0, 0). \quad (20)$$

对于地表类型为朗伯体的假设, $\rho(\mu, \varphi, \mu', \varphi')$ 为常数.地表类型为非朗伯体时,将地表模型按方位角进行 Fourier 级数展开,

$$\rho(\mu, \varphi, \mu', \varphi') = \sum_{s=0}^M (2 - \delta_{0s}) \cos(s(\varphi - \varphi')) \rho^s(\mu, \mu'), \quad (21)$$

则

$$\mathbf{R}_{\text{diff}}^s(\mu, \mu') = \text{diag}(\rho^s(\mu, \mu') \rho, 0, 0, 0). \quad (22)$$

在计算直射反射矩阵时,假设地表由随机取向的 Fresnel 反射体组成,根据 Snell Descartes 法则,直射反射矩阵用下式表示:

$$(-\mu') \mathbf{R}_{\text{sp}}(i) = \frac{\pi \rho(\mu_n, \varphi_n)}{4\mu\mu_n} \mathbf{r}(i), \quad (23)$$

式中, $\mathbf{r}(i)$ 为 Fresnel 反射矩阵, $\rho(\mu_n, \varphi_n)$ 为随机取向的 Fresnel 反射体的分布函数,

$$\rho(\mu_n, \varphi_n) d\omega_n = dS/S, \quad (24)$$

其中, $S$ 代表地表的水平面积; $dS$ 表示在 $d\omega_n$ 空间内方向为 $(\mu_n, \varphi_n)$ 的 Fresnel 反射体所占的比例, $p$

$(\mu_n, \varphi_n)$ 一般由统计获得.

在求解过程中,由于 $p(\mu_n, \varphi_n)$ 为方位角的函数,需将 $p(\mu_n, \varphi_n)$ 按方位角进行 Fourier 级数展开. Fresnel 反射矩阵 $\mathbf{r}(i)$ 是以反射面为参考面的,需经旋转变换将其转换参考面<sup>[12]</sup>,即 $\mathbf{T}(\pi - \chi) \mathbf{r}(i) \mathbf{T}(-\chi') \rightarrow \mathbf{r}(\mu, \varphi, \mu', \varphi')$ ,然后按方位角进行 Fourier 级数展开.

求解矢量辐射传输方程需离散化光学厚度和观测天顶角.对于观测天顶角,采用 Gauss 数值积分<sup>[16]</sup>进行离散化,其积分节点为 $\mu_p$  ( $u_p = -\mu_{-p}$ ),对应的积分权重为 $a_p$  ( $a_p = a_{-p}$ ).对于光学厚度,大气划分为 $K$ 层均匀层,每一层的光学厚度为 $\tau_k$ , $\tau_1 = 0$ , $\tau_{k+1} = \tau^*$ ,第 $k$ 层介质的光学厚度为 $\Delta\tau_k$ .为处理在大气廓线中不同的大气粒子模型,考虑 $M$ 个不同大气粒子反射模型(包括气体分子和气溶胶粒子),则混合大气的散射相矩阵和单次散射反照率由下式计算:

$$[\bar{\omega} \bar{\mathbf{P}}^s(\mu_p, \mu_0)]_k = \left[ \sum_{m=1}^M \omega_m \Delta\tau_{m,k} \mathbf{P}_m^s(\mu_p, \mu_0) \right] \left[ \sum_{m=1}^M \Delta\tau_{m,k} \right], \quad (25)$$

则对光学厚度和观测天顶角离散后,第一次散射的辐射量用下式表示:

$$\begin{aligned} L_1^s(\tau_k, \mu_p > 0) &= L_1^s(\tau_{k+1}, \mu_p > 0) e^{-\Delta\tau_k/\mu_p} \\ &+ \frac{1}{4\pi} [\bar{\omega} \bar{\mathbf{P}}^s(\mu_p, \mu_0)]_k \mathbf{E}_0 (e^{\tau_{k+1}/\mu_0} + e^{\tau_k/\mu_0}) / 2. \end{aligned} \quad (26)$$

按照(12)–(17)式按同样方法求解第2,3,4,...次散射辐射,有

$$\begin{aligned} L_{n>1}^s(\tau_k, \mu_p > 0) &= L_{n>1}^s(\tau_{k+1}, \mu_p > 0) e^{-\Delta\tau_k/\mu_p} \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{q=-p}^{+p} a_q [\bar{\omega} \bar{\mathbf{P}}^s(\mu_p, \mu_q)]_k (L_{n-1}^s(\tau_{k+1}, \mu_q) \\ &+ L_{n-1}^s(\tau_k, \mu_q)) / 2s. \end{aligned} \quad (27)$$

### 3. 大气和地表偏振效应对辐射矢量的敏感性分析

本文采用归一化辐射强度和归一化偏振辐射强度来表征卫星接收到的总辐射信号和偏振信号<sup>[17]</sup>。具体定义如下：

$$I = \pi I' / F_0, \quad (28)$$

$$I_p = \pi \sqrt{(Q^2 + U^2)} / F_0, \quad (29)$$

其中,  $F_0$  为大气顶太阳入射辐射通量,  $I'$  为大气顶总辐射强度,  $Q$  表示平行或垂直于参考平面的线偏

振的强度,  $U$  表示与参考平面成  $45^\circ$  角上的线偏振的强度,  $V$  表示圆偏振强度。

#### 3.1. 地表模型影响分析

本文将植被地表的双向反射模型与大气辐射传输模式相耦合。反射模型包括植被非偏双向反射模型(BRDF)和偏振双向反射模型(BPDF)。植被的反射信息包括来自地表植被叶片表面和叶面内部结构的散射,其中来自表面的镜面反射形成了偏振特性,可以采用 Fresnel 反射来描述,它依赖于太阳光的照射与观测的方向;来自叶面内部的散射主要和叶子

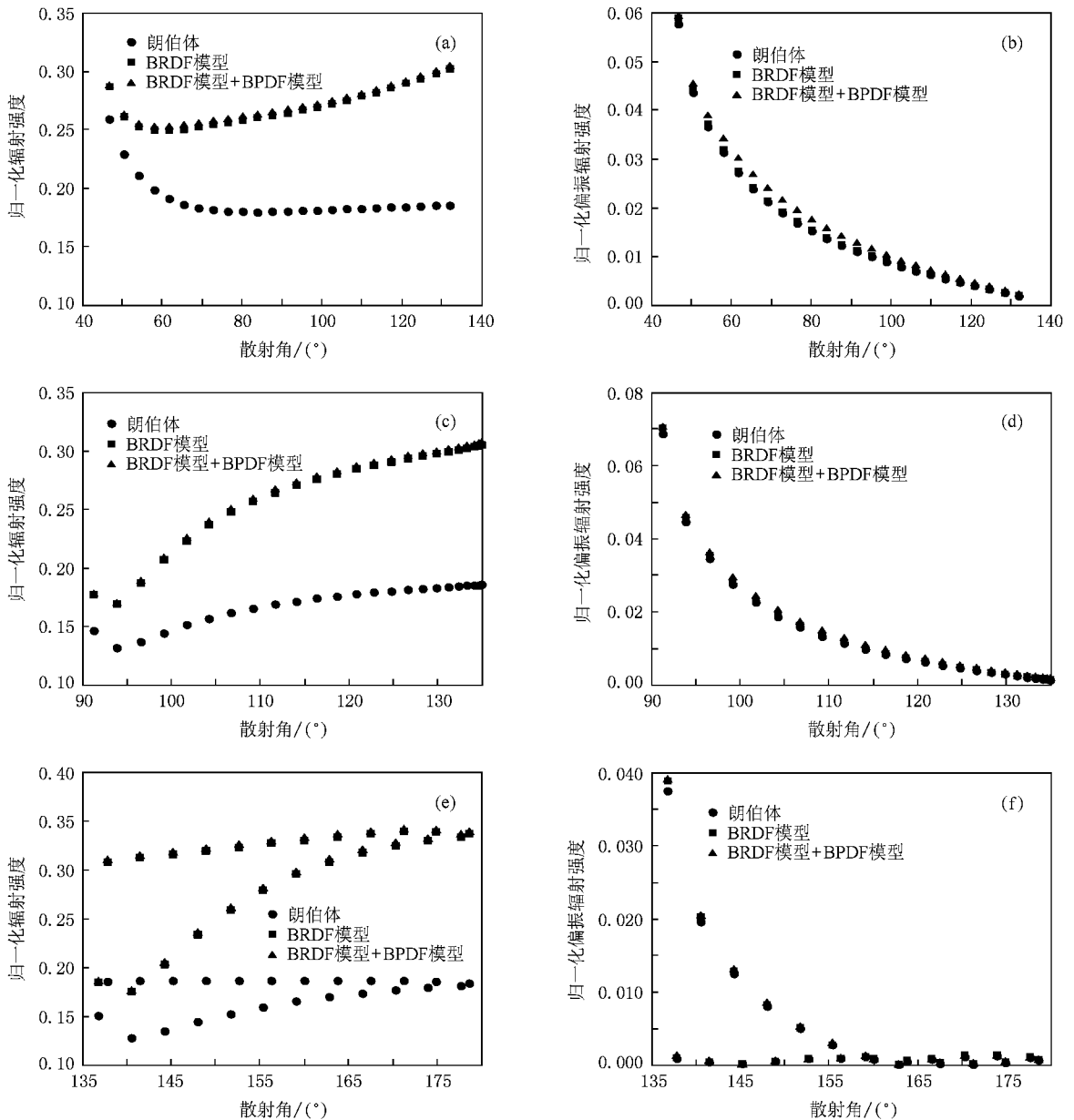


图1 耦合不同地表类型时,归一化辐射强度和偏振辐射强度随散射角的变化 (a)(b)相对方位角为  $0^\circ$ , (c)(d)相对方位角为  $90^\circ$ , (e)(f)相对方位角为  $180^\circ$

的叶绿素、纤维、水分含量有关.对于非偏的双向反射采用 Roujean 等<sup>[18]</sup>的 BRDF 模型(参见附录 A);偏振的双向反射采用 Rondeaux 和 Herman<sup>[19]</sup>的 BPDF 模型(参见附录 B),该模型偏振反射只考虑了直射反射部分.

模拟条件如下:入射波长  $\lambda$  为 865 nm,气溶胶类型为世界气象组织公布的城市型<sup>[20]</sup>,对应的光学厚度取 0.3,分子光学厚度由标准大气模式计算得到,对应的光学厚度取 0.015;太阳天顶角  $\theta_s = 45^\circ$ ,观测天顶角在  $0^\circ$ — $90^\circ$  范围内取 24 个,相对方位角取  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$ .图 1 为 865 nm 波长处归一化辐射强度和偏振辐射强度随散射角的分布.

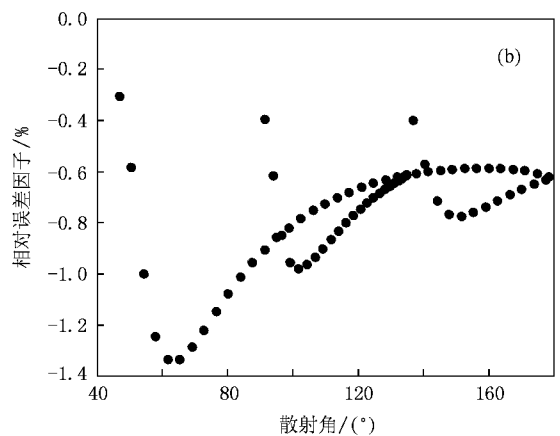
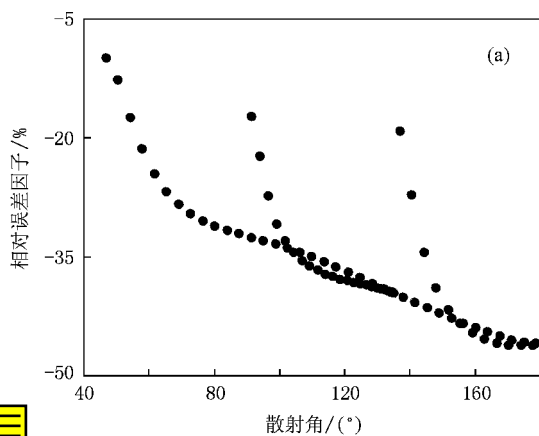


图 2 标量辐射相对误差因子随散射角的分布 (a)朗伯体地表与偏振反射地表条件下的误差因子 (b)BRDF 地表与偏振反射地表条件下的相对误差因子

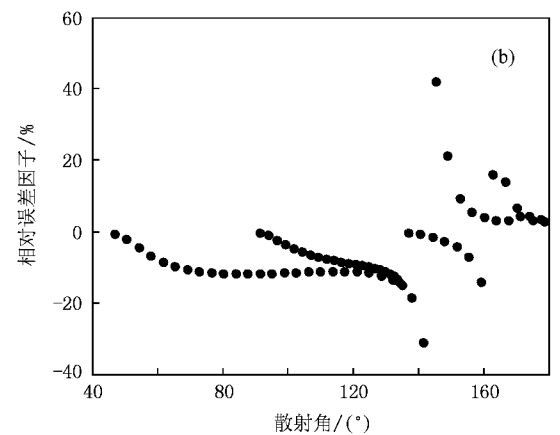
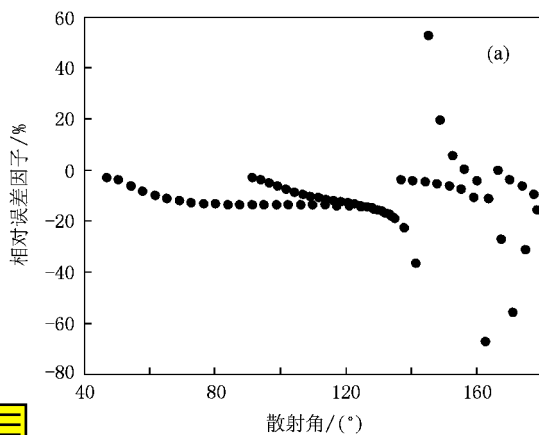


图 3 偏振辐射的相对误差因子随散射角的分布 (a)朗伯体地表与偏振反射地表条件下的误差因子 (b)BRDF 地表与偏振反射地表条件下的相对误差因子

由图 2 可知,将地表假设为 Lambert 反射,忽略地表反射的方向分布,辐射强度的相对误差随散射角的增大而增大.在散射角约为  $40^\circ$  时,相对误差大

由图 1 归一化辐射强度多角度分布知,考虑地表 BRDF 的大气顶辐射强度将变大,差值大于 0.15,且随着散射角的增大,差值变大;如果将地表双向偏振反射作用考虑进去,辐射强度将进一步增大.在散射角为  $40^\circ$ — $140^\circ$  范围内,地表偏振反射对大气顶偏振辐射有一定贡献.在本计算个例中,贡献大小约为 0.002.

为定量描述地表反射对辐射强度和偏振辐射强度的影响,定义相对误差因子<sup>[21]</sup>

$$RE = (I - I')/I' \times 100\%, \quad (30)$$

其中,  $I$  为非偏地表反射时的辐射矢量,  $I'$  为考虑地表偏振作用的辐射矢量.图 2 和图 3 分别为标量辐射和偏振辐射强度误差因子随散射角的分布.

于 5%;当散射角为  $180^\circ$  时,相对误差可达 48%;考虑地表反射的方向性,忽略地表反射的偏振特性时,辐射强度的相对误差随散射角的变化而变化,在散

射角为  $60^\circ$  时, 相对误差达到最大约为  $1.4\%$ 。

由图 3 可知, 将地表假设为 Lambert 反射, 忽略地表反射的方向性, 在散射角为  $40^\circ$ — $180^\circ$  范围内, 偏振辐射强度的相对误差大部分在  $-20\%$ — $20\%$  之间, 极端情况可达  $70\%$ ; 考虑地表反射的方向性, 忽略地表反射的偏振特性时, 在散射角为  $40^\circ$ — $180^\circ$  范围内, 偏振辐射强度的相对误差大部分在  $-20\%$ — $20\%$  之间, 极端情况可达  $40\%$ 。

### 3.2. 偏振效应影响分析

本部分主要分析忽略地气系统中的偏振效应所

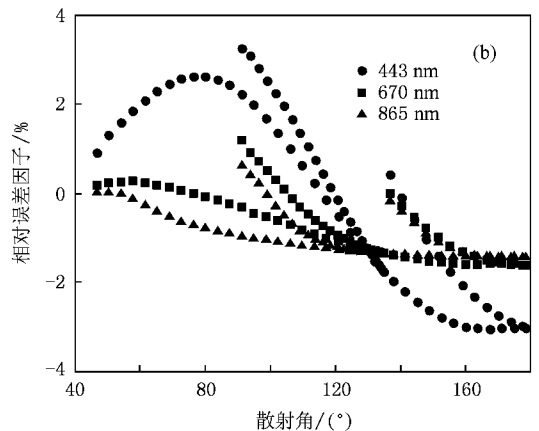
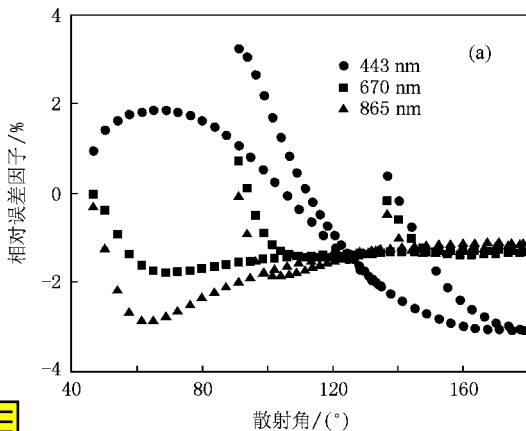


图 4 偏振效应相对误差随散射角的分布 (a) 能见度为 23 km, (b) 能见度为 5 km

由图 4 知, 忽略偏振效应所引起的相对误差随散射角的变化而变化. 能见度为 23 km 时, 波长为 443、670 和 865 nm 相对误差可达到  $3.5\%$ 、 $1.8\%$  和  $2.5\%$ . 能见度为 5 km 时, 三个波长的相对误差分别可达  $3.5\%$ 、 $1.8\%$  和  $1.8\%$ 。

## 4. 结 论

矢量辐射传输方程为一高度非线性的微积分方程, 其研究对象为具有半边界条件的物理问题, 根据辐射在地表-大气界面的反射和折射性质, 耦合典型地表的 BRDF 模型和 BPDF 模型, 得到整个地表-大气耦合介质系统的矢量辐射传输数值计算模型, 并采用相对误差因子定量分析了地表反射类型的变化对辐射矢量的影响. 结果表明, 将地表假设为 Lambert 反射体, 忽略地表反射的方向性时, 标量辐射的相对误差随散射角的增大而增大, 大于  $5\%$ , 最高可达  $48\%$ , 偏振辐射的相对误差大部分在  $-20\%$ — $20\%$  之间, 极端情况可达  $70\%$ , 考虑地表的

造成的误差. 模拟条件为: 入射波长  $\lambda$  为 443、670 和 865 nm, 气溶胶类型为城市型<sup>[20]</sup>, 光学厚度分别取能见度为 23 km (对应于三个波长的光学厚度为 0.42、0.25 和 0.18) 和 5 km (对应于三个波长的光学厚度为 1.53、0.93 和 0.70). 分子光学厚度由标准大气模式计算得到, 对应于三个波长的光学厚度分别取 0.228、0.043 和 0.015. 地表反射采用 Rondeaux 和 Herman 的 BPDF 模型<sup>[19]</sup>, 太阳天顶角  $\theta_s = 45^\circ$ , 观测天顶角在  $0^\circ$ — $90^\circ$  范围内取 24 个, 相对方位角取  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $180^\circ$ . 图 4 为 443、670 和 865 nm 的偏振效应相对误差随散射角的分布。

方向性反射而忽略地表反射的偏振特性时标量辐射的相对误差可达  $1.4\%$ , 偏振辐射的相对误差大部分在  $-20\%$ — $20\%$  之间, 极端情况可达  $40\%$ , 从而给利用遥感信息反演大气参数带来极大误差。

忽略自然界的偏振效应所引起的相对误差因子在波长为 443 nm 时, 可达到  $3.5\%$ ; 波长为 670 nm 时, 可达  $1.8\%$ ; 波长为 865 nm 时, 可达  $2.5\%$ . 在进行大气纠正和反演地表参数时, 忽略自然界的偏振效应会带来很大误差. 因此, 在利用标量遥感信息和偏振遥感信息定量反演大气和地表信息时, 需要考虑地表的方向反射特性, 即要耦合地表类型的 BRDF 模型和 BPDF 模型, 需要考虑自然界的偏振效应, 以提高量化遥感的精度。

## 附录 A

### Roujean 的 BRDF

Roujean<sup>[18]</sup> 将地表的双向反射率函数表示如下:

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \phi) = k_0 + k_1 f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) + k_2 f_2(\theta_s, \theta_v, \phi),$$

(A1)

其中  $\theta_s$  为太阳天顶角,  $\theta_v$  为观测天顶角,  $\phi$  为相对方位角,  $k_0, k_1$  和  $k_2$  为与地表特征相关的系数,  $f_1(\theta_s, \theta_v, \phi)$  函数用下式表示:

$$f_1(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2\pi} \{ (\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi \} \operatorname{tg} \theta_s \operatorname{tg} \theta_v - \frac{1}{\pi} \{ \operatorname{tg} \theta_s + \operatorname{tg} \theta_v + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\theta_s) + \operatorname{tg}^2 \theta_v - 2 \operatorname{tg} \theta_s \operatorname{tg} \theta_v \cos \phi} \}, \quad (\text{A2})$$

$f_2(\theta_s, \theta_v, \phi)$  函数用下式表示:

$$f_2(\theta_s, \theta_v, \phi) = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{\cos \theta_s + \cos \theta_v} \times \left\{ \left( \frac{\pi}{2} - \xi \right) \cos \xi + \sin \xi \right\} - \frac{1}{3}, \quad (\text{A3})$$

其中  $\xi$  定义如下:

$$\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \phi. \quad (\text{A4})$$

## 附录 B

### Rondeaux 和 Herman 的 BPDF 模型<sup>[19]</sup>

Rondeaux 和 Herman<sup>[19]</sup> 从利用 POLDER 偏振测量反演陆

地上空对流层气溶胶的需求出发, 研究过植被的镜面反射模型, 作为中间结果直接从偏振反射率概念入手, 在平面平行、垂直均匀和均匀分布  $G$  函数的假定条件下, 给出了一个偏振反射率  $\rho_p$  的简化模型

$$\rho_p(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{F_p(\gamma)}{4(\cos \theta_s + \cos \theta_v)}, \quad (\text{B1})$$

其中  $F_p$  由 Fresnel 定律给出的镜面反射的偏振系数, 可以表示为

$$F_p(\gamma) = \frac{1}{2}(r_{\perp}^2 - r_{\parallel}^2), \quad (\text{B2})$$

其中  $r_{\perp}$  和  $r_{\parallel}$  分别是垂直和水平 Fresnel 反射系数, 分别由下式给出:

$$r_{\perp}(\gamma) = \frac{N \cdot \mu_{\text{T}} - \mu_{\text{I}}}{N \cdot \mu_{\text{T}} + \mu_{\text{I}}}, \quad (\text{B3})$$

$$r_{\parallel}(\gamma) = \frac{N \cdot \mu_{\text{I}} - \mu_{\text{T}}}{N \cdot \mu_{\text{I}} + \mu_{\text{T}}}, \quad (\text{B4})$$

$$\mu_{\text{I}} = \cos \gamma, \quad (\text{B5})$$

$$\mu_{\text{T}} = \left[ 1 - \frac{\sin^2 \gamma}{N^2} \right], \quad (\text{B6})$$

其中  $N$  是反射介质的折射系数,  $\gamma$  用下式表示:

$$\gamma = 0.5 \cos^{-1} [\cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos \phi]. \quad (\text{B7})$$

- [1] Liou K N 2002 *An Introduction to Atmospheric Radiation* (2nd ed) (San Diego: Academic Press)
- [2] Chandrasekhar S 1950 *Radiative Transfer* (Oxford: Oxford Univ. Press)
- [3] Nakajima T, King M D 1992 *Appl. Opt.* **31** 7669
- [4] Stmnes K, Tsay S C, Wiscombe W, Jayaweera K 1988 *Appl. Opt.* **27** 2502
- [5] Plass G N, Kattawar G W 1968 *Appl. Opt.* **3** 415
- [6] Evans K F, Stephens G L 1991 *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer* **46** 413
- [7] Hansen J E 1971 *J. Atmos. Sci.* **28** 120
- [8] Takano Y, Liou K N 1989 *J. Atmos. Sci.* **46** 3
- [9] Evans K F 1998 *J. Atmos. Sci.* **55** 429
- [10] Kotchenova S Y, Vermote E F, Matarrese R, Klemm F J 2006 *Appl. Opt.* **45** 6762
- [11] Cheng T H, Chen L F, Gu X F, Yu T, Tian G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5323 (in Chinese) [程天海、陈良富、顾行发、余涛、田国良 2008 物理学报 **57** 5323]

- [12] Min Q L, Duan M Z 2004 *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer* **87** 243
- [13] Liang Z C, Jin Y Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 247 (in Chinese) [梁子长、金亚秋 2003 物理学报 **52** 247]
- [14] Deuzé J L, Herman M, Santer R 1989 *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer* **41** 483
- [15] Coulson K L, Bouricius G M, Gray E L 1965 *J. Geo. Res.* **70** 4601
- [16] van der Mee C V M, Hovenier J W 1990 *Astron. Astrophys.* **228** 559
- [17] Deuzé J L, Goloub P, Herman M, Marchand A, Perry G, Susana S, Tanré D 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 15329
- [18] Roujean J L, Leroy M, Deschamps P Y 1992 *J. Geophys. Res.* **97** 20455
- [19] Rondeaux G, Herman M 1991 *Rem. Sen. Env.* **38** 63
- [20] World Climate Reaearch Programme 1986 *WMO/TD Report* 24
- [21] Lawless R, Xie Y, Yang P, Kattawar G W, Laszlo I 2006 *Opt. Exp.* **14** 6381

# Effect of surface reflectances on the space-based vector radiative detection<sup>\*</sup>

Cheng Tian-Hai<sup>1 2 B)</sup> Gu Xing-Fa<sup>1 B)†</sup> Yu Tao<sup>1 B)</sup> Chen Liang-Fu<sup>1 B)</sup> Tian Guo-Liang<sup>1 B)</sup>

1 *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3 *Center for National Spaceborne Demonstration, China National Space Administration, Beijing 100101, China*

( Received 11 November 2008 ; revised manuscript received 8 January 2009 )

## Abstract

The propagation and redistribution of radiation in surface-atmosphere medium can be fully described by vector radiative transfer equation, which is the basis of quantitative remote sensing. How to deal with the questions of multiple-scattering effect, the polarization effect of the scattered radiation and the surface reflectance model is essential to an accurate simulation of vector radiative transfer equation, which affects the precision of quantitative remote sensing. This paper solves the vector equation of radiative transfer by using the successive orders of scattering approach; it includes the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model and bidirectional polarized reflectance distribution function (BPDF) model of surface reflectance. The index of relative errors was used to quantitatively study the effect induced by the difference of surface reflectance models and the polarization effect. Based on the studies, the basic theory of quantitative remote sensing using vector radiative transfer equation is proposed.

**Keywords** : vector radiative transfer equation, successive orders of scattering, quantitative remote sensing, polarized remote sensing

**PACC** : 9265D, 9265M, 4225B

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA06A303 ), the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 40701109 ), and the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences ( Grant No. KZCX2-YW-303 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : xfgu@irsa.ac.cn