

文章编号:1001-9014(2009)04-0267-05

水云多角度偏振辐射特性研究

程天海^{1,2}, 顾行发^{1,2}, 余涛^{1,2}, 陈良富^{1,2}, 田国良^{1,2}

(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. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101)

摘要:由球形水滴组成并分布在大气底层的水云,对全球辐射平衡和气候变化有重要的影响,其影响程度取决于水云本身的微物理特性和光学特性.在对近红外通道 $0.865\mu\text{m}$ 波长处水云光学特性研究的基础上,采用矢量辐射传输方程模拟分析了大气层顶归一化辐射强度和归一化偏振辐射强度对水云微物理特征、光学特征和地表反照率的敏感性.模拟结果表明,光谱的多角度偏振遥感信息能够更有效地体现出水云微物理特征和光学特征,可以利用多角度偏振遥感信息反演各种云参数.为利用多角度偏振遥感数据反演水云各种微物理量提供了理论基础.

关键词:矢量辐射传输;多角度偏振辐射;水云微物理特征;水云光学特性

中图分类号:P407 **文献标识码:**A

MULTI-ANGULAR POLARIZED RADIATION CHARACTERISTICS OF WATER CLOUDS

CHENG Tian-Hai^{1,2}, GU Xing-Fa^{1,2}, YU Tao^{1,2}, CHEN Liang-Fu^{1,2}, TIAN Guo-Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science IRSA, CAS, Beijing 100101, China;

2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China)

Abstract: Water clouds, which are distributed at the bottom of atmosphere and composed of spherical water droplets, play an important role in Earth's radiation balance and global climate change. The effects of water clouds are based on their microphysical and optical properties. Based on the studies of water clouds optical properties in $0.865\mu\text{m}$, the sensitivity of normalized radiance and polarized radiance intensities to water clouds optical parameters, such as effective radius, optical thickness and surface albedo, was evaluated by using vector radiative transfer model. The simulated results indicate that the information of multidirectional polarized radiance can show the microphysical and optical properties of water clouds effectively, which can be used to retrieve the properties of water clouds. This study provides the basis for using the remote sensing data of multi-angular polarization to retrieve the properties of water clouds was proposed.

Key words: vector radiative transfer; multi-angular polarized radiation; water cloud microphysical parameter; water cloud optical properties

引言

水云通常覆盖地球大气约20%~30%左右,是地气系统辐射收支的主要调解者.水云的辐射性质对全球气候变化和各种尺度天气系统的影响不可忽视.水云的辐射特性取决于多种因素,它不仅依赖于云量及其分布,还依赖于水云的高度、光学厚度及水云滴谱分布等微物理量^[1].因此水云的微物理量的定量反演成为大气科学研究的重要课题之一.

卫星数据由于其自身的优越性已被应用于水云

特性的探测中^[2].但传统的遥感仪器多以单一观测方向获得的水云的反射辐射或水云自身的辐射强度来推断水云的辐射特性和微观物理量.随着空间遥感科学的发展,发现传统的单一方向遥感只能得到水云单一方向的投影,缺乏足够的信息来精确反演各种水云参数.与单一方向遥感相比,多角度对地观测通过对水云多个方向的观测,使得对水云的观测信息得以丰富,为定量反演各种水云参数提供了新的途径.

水云的散射辐射具有明显的偏振特性,其变化

收稿日期:2008-12-21,修回日期:2009-06-18

Received date: 2008-12-21, revised date: 2009-06-18

基金项目:国防科技工业民用专项科研技术研究(KJSX0601)和中国科学院青年人才专项(08S00700CX)资助项目

作者简介:程天海(1981-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事利用偏振遥感信息反演云和气溶胶的研究,E-mail: cthy122@126.com.

通讯作者:顾行发(1962-),男,湖北仙桃人,博士生导师,主要从事定量化遥感研究和遥感传感器定标等研究,E-mail: xfgu@irsa.ac.cn.

与水云的光学和微观物理特性密切相关,使得偏振遥感技术可以应用于水云的光学、微观物理特性参数探测.要利用多角度偏振遥感信息反演水云参数,需要掌握多角度偏振遥感探测水云各种微物理特征的可行性,研究卫星多角度接收的辐照度与偏振辐照度对水云各种微物理特征和地表反照率的敏感性.

1 多角度偏振辐射特性模拟原理与方法

1.1 多角度偏振辐射特性模拟原理

利用多角度偏振遥感数据进行水云参数探测的一个核心环节是矢量辐射传输方程的计算.本文采用了基于倍加累加方法求解平面平行介质矢量辐射传输方程的 RT3 模式^[3]来求解矢量辐射传输方程.

本文采用归一化偏振辐射强度^[4,5]表示卫星接收的偏振信息.大气顶层卫星接收到归一化辐射强度和归一化偏振辐射强度如下式表示

$$L = \frac{\pi I}{E_s}, \quad (1)$$

$$L_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{E_s}, \quad (2)$$

其中, 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° 角上的线偏振的强度, $\sqrt{Q^2 + U^2}$ 为大气层顶的偏振辐射强度, E_s 为大气层顶的太阳辐射通量密度.

1.2 大气模式

在进行矢量辐射传输模拟过程中,将大气简化为一个三层介质系统:在 $0 \sim 2\text{km}$ 处为气溶胶和分子层,第二层为 $3 \sim 4\text{km}$ 处光学厚度可调的水云层介质,光学厚度分别取 $1 \sim 50$,第三层为水云层上方光学厚度固定的分子散射层.鉴于理论计算的方便性,地表类型选为海洋,地表反照率设为 0.02 ;气溶胶类型选为典型的海洋性气溶胶类型^[6], $0.865\mu\text{m}$ 处的光学厚度设为 0.3 ;各层分子光学厚度由标准大气模式计算得到,并需要扣除地理几何高度的影响.

1.3 水云模式

水云粒子谱分布具有一定的特征形状,本文假设水云粒子谱为 Hansen_Γ 分布,即

$$n(r) = Cr^\alpha \exp(-\beta r^\gamma), \quad (3)$$

其中, $C = \frac{\gamma \beta^{(\alpha+1)/\gamma}}{\Gamma(\frac{\alpha+1}{\gamma})}$, $\gamma = 1$, $\alpha = \frac{1-3v_{eff}}{v_{eff}}$, $\beta =$

$\frac{1}{r_{eff} v_{eff}}$; r_{eff} 为有效半径, v_{eff} 为有效方差.

采用 Mie 散射理论求解水云的单次散射性质即水云的消光系数、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数.

1.4 水云多角度偏振辐射特性

采用基于倍加累加法的辐射传输模式 RT3,耦合水云的单次散射特性,模拟了光学厚度为 10 的水云的多角度偏振特性.图 1 为模拟的水云的多角度辐射特性,图中采用的坐标系为极坐标系.极径和极角分别为观测天顶角和相对方位角,颜色表示模拟水云的归一化辐射强度和偏振辐射强度.

由图 1 知,水云的 BRDF 主要由两部分亮区组成,上部分亮区对应着散射角为 80° 附近,这是因为水云粒子具有强的前向散射特征.下部分亮的区域呈现圆环形,经计算,圆环对应散射角 $\Theta = 140^\circ$ 附近,这是因为水云在散射角 $\Theta = 140^\circ$ 附近有峰值,为众所周知的虹特征.

相对于水云的归一化辐射强度分布,水云的 BRDF 只有一个亮的圆环,对应于散射角为 140° 附近,即偏振信息使水云的虹特征更加明显,易于探测.

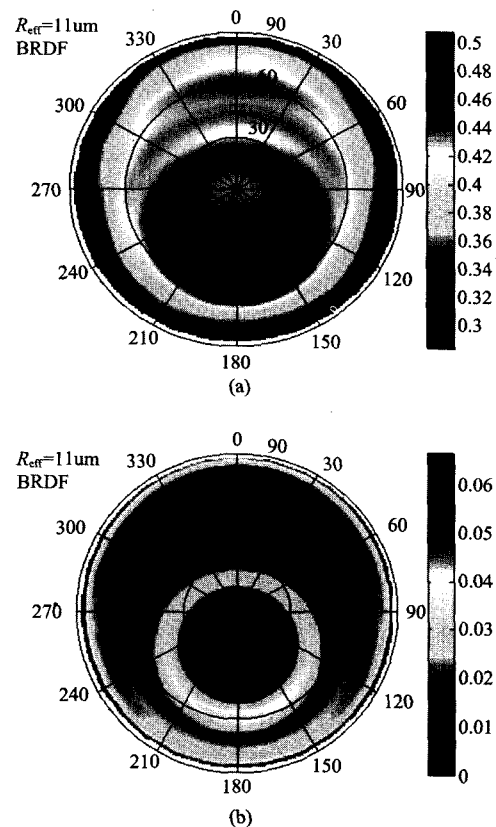


图 1 水云的归一化辐射强度和偏振辐射强度
Fig. 1 Simulated normalized radiance and normalized polarized radiance of water clouds

2 多角度水云探测的敏感性分析

2.1 水云的单次散射特性对辐射矢量的影响

水云的单次散射特性与水云粒子的大小、粒子谱分布和水云粒子的复折射指数有关。

在光学厚度和地表反照率恒定条件下,只考虑水云粒子群的不同有效半径,利用 RT3 矢量辐射传输方程模拟 $0.865\mu\text{m}$ 的辐射强度与偏振辐射强度。模拟条件:水云光学厚度为 10,太阳天顶角 $\theta_s = 20^\circ$,观测天顶角为 17 个 ($0 \sim 75^\circ$),相对方位角取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 和 180° ,地面反照率为 0.02,考虑有效方差恒定为 0.1,有效半径分别为 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 。模拟结果如图 2 所示。

由图 2 的归一化辐射强度的多角度分布可知,随着水云粒子有效半径的增大,水云的归一化辐射强度递减,但影响较小,特别是有效半径 $10\mu\text{m}$ 与 $15\mu\text{m}$ 之间,影响可以忽略。

由图 2 的归一化偏振辐射强度的多角度分布可知,水云的虹特征更加明显,且虹特征的具体位置视有效半径有一定的差异,即随着有效半径的增大,虹

特征的具体位置向左偏移。偏振辐射强度体现了水云粒子群有效半径的变化信息。

2.2 水云不同光学厚度对辐射矢量的影响

在水云粒子群的有效半径和地表反照率恒定的条件下,考虑水云的光学厚度对辐射的影响。有效半径取 $11\mu\text{m}$,有效方差为 0.1,模拟归一化辐射强度时,光学厚度分别取 1、5、10、20、30、40,模拟归一化偏振辐射强度时,光学厚度分别取 1、2、3、3.5、4、4.5、5。其它模拟条件与 2.1 相同。模拟结果如图 3 所示。

由图 3 的归一化辐射强度的多角度分布可知,归一化辐射强度随着水云光学厚度的增加而增大,其包含了水云光学厚度变化的信息。

由图 3 的归一化偏振辐射强度的多角度分布可知,在散射角为 80° 到 120° 范围内,偏振辐射强度随着水云光学厚度的增加而减少,在散射角为 80° 到 120° 范围内的偏振信息的变化包含了分子层、气溶胶层和薄水云层的混合信息,不易用来进行水云光学厚度的反演。

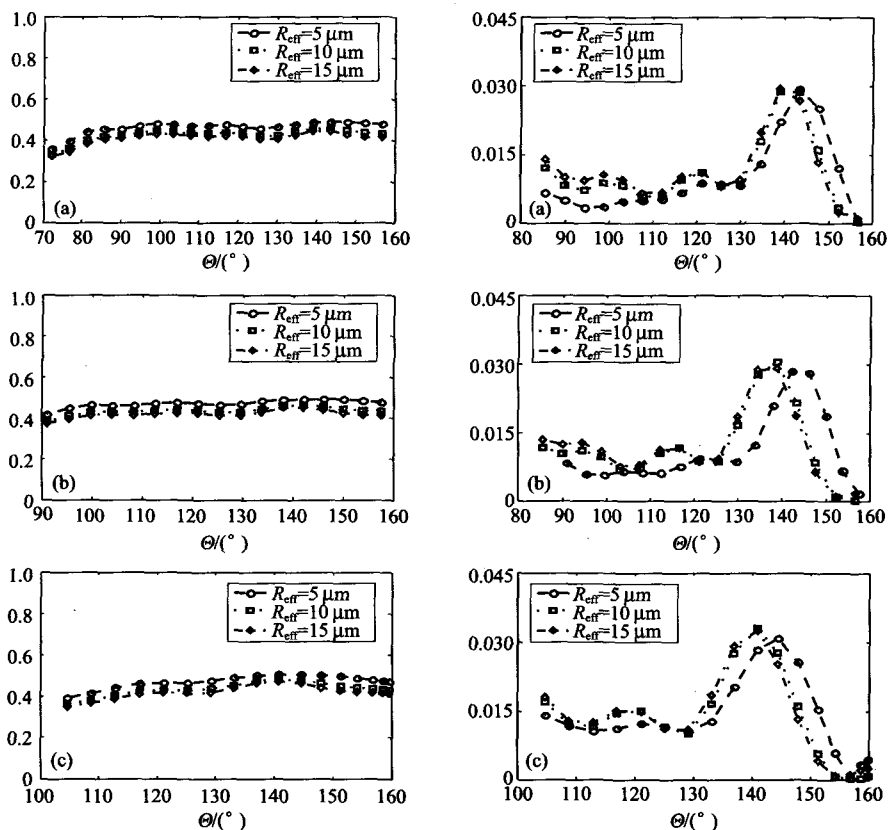


图 2 有效半径变化时不同相对方位角的辐射强度和偏振强度分布图 (a) 0° (b) 45° (c) 90°

Fig. 2 Values of normalized radiance and normalized polarized radiance as a function of scattering angles for different effective radius and azimuth angles (a) 0° (b) 45° (c) 90°

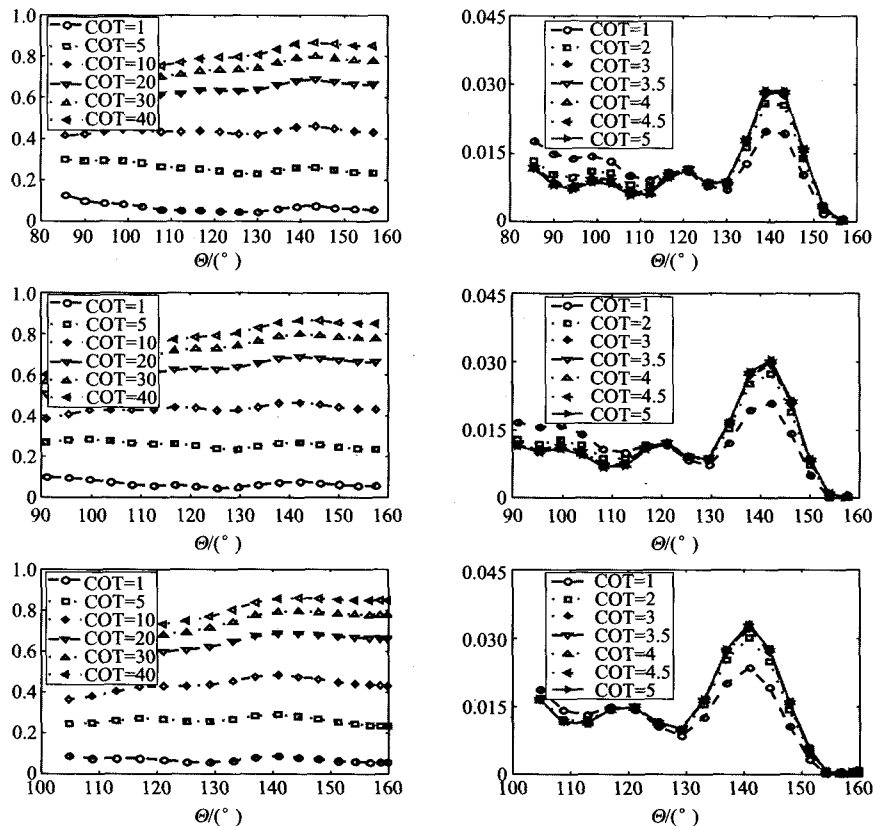


图3 光学厚度变化时不同相对方位角的辐射强度和偏振辐射强度随散射角的变化 (a)0° (b)45° (c)90°

Fig. 3 Values of normalized radiance and normalized polarized radiance as a function of scattering angles for different optical thickness and azimuth angles (a)0° (b)45° (c)90°

在散射角为 140° 附近处, 偏振辐射强度随着水云光学厚度的增加而增大, 这主要是由于在散射角为 140° 附近处为水云的虹特征, 且偏振信息使水云的虹特征更加突出, 水云对偏振辐射强度的贡献远大于分子层和气溶胶层的贡献. 当水云的光学厚度大于 3.5 时, 偏振辐射强度不能体现出水云光学厚度的变化, 这主要是由于偏振信号穿透能力比较弱, 主要体现了厚云层的上层信息, 并不能体现出整层水云信息. 在散射角为 140° 附近处的偏振信息主要体现了薄云层光学厚度的变化, 可以用来进行薄云层光学厚度的反演.

2.3 地表反照率对辐射矢量的影响

在水云粒子群的有效半径和光学厚度恒定的条件下, 辐射矢量可以近似表示为地表反照率的函数, 通过模拟计算分析地表反照率对水云卫星探测结果的影响.

模拟归一化辐射强度时, 设水云的光学厚度为 10, 考虑地表反照率取值分别为 0.0、0.2、0.4、0.6 和 0.8, 其它模拟条件同上. 由 3.2 知, 当水云的光

学厚度 > 3.5 时, 偏振辐射强度主要体现了厚云层的上层信息, 不能体现出水云下方的地表反照率的变化信息. 为研究地表反照率对偏振辐射强度的影响, 模拟归一化偏振辐射强度时, 设水云的光学厚度为 1, 其他模拟条件同上. 模拟结果如图 4 所示.

由图 4 可知, 归一化辐射强度受地表的影响较大, 随着地表反照率的增加而增加. 在散射角为 80° 到 120° 范围内, 归一化偏振辐射强度则随地表反照率的增加而增加, 这主要是由于此范围内偏振信息包含了分子层、气溶胶层、水云层和地表贡献的混合信息. 在散射角为 140° 附近时, 归一化偏振辐射强度受地表反照率的影响很小, 这主要是由于水云的虹现象, 传感器接收到的偏振辐照度信息主要表现为水云的虹信息, 不随地表反照率的变化而变化, 多角度偏振信息主要表现为云层顶部信息, 地表反照率的影响可以忽略, 这正是利用偏振遥感信息提取水云参数的优势所在. 因此可以利用偏振遥感信息反演云顶参数. 水云的虹方向, 即散射角为 140° 附近处, 为多角度偏振信息探测水云参数的最佳观测

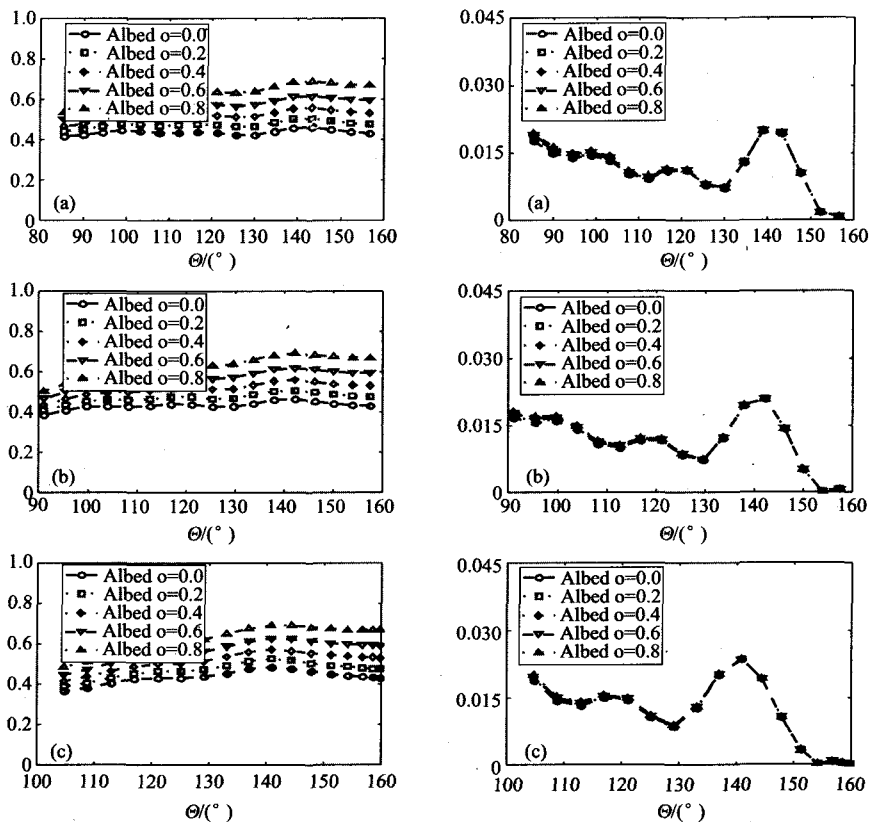


图4 地表反照率变化时不同相对方位角的辐射强度和偏振辐射强度随散射角 θ 的变化 (a)0° (b)45° (c)90°

Fig. 4 Values of normalized radiance and normalized polarized radiance as a function of scattering angles for different ground albedo and azimuth angles θ (a)0° (b)45° (c)90°

角度。

3 结语

通过利用矢量辐射传输方程模拟分析了水云各种光学特征(有效半径、光学厚度)和地表反照率对0.865 μm 波长处辐射强度和偏振辐射强度的敏感性,可以获得以下结果。

0.865 μm 波长处辐射强度信息对水云有效半径的变化不敏感,对水云光学厚度和地表反射率的变化敏感,因此,0.865 μm 波长处辐射强度信息包含了水云光学厚度的变化信息,可以用来进行水云光学厚度的反演,但在反演过程中,需要考虑地表信息的贡献。0.865 μm 波长处偏振辐射强度信息由于可以忽略地表的贡献,有利于水云粒子谱有效尺度、云顶粒子信息的反演,但对水云的光学厚度反演中只适合于光学厚度 <3.5 的薄云,利用多角度遥感信息进行水云参数反演最佳观测角度为水云的虹方向;即散射角为140°附近。

REFERENCES

- [1] Richard A F, Bryan A B, Menzel W P, *et al.* A comparison of cloud top heights computed from airborne lidar and MAS radiance data using slicing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104** (D20): 547—555.
- [2] Platnick S, King M D, Ackerman S A, *et al.* The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41**: 459—473.
- [3] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model[J]. *J. Quant. Spec. Radiat. Transfer*, 1991, **46** (5): 413—423.
- [4] CHENG Tian-Hai, GU Xing-Fa, CHEN Liang-Fu, *et al.* Multi-angular polarized characteristics of cirrus clouds[J]. *Acta Phys. Sin*(程天海,顾行发,陈良富,等.卷云多角度偏振特性研究.物理学报), 2008, **57** (8): 5323—5332.
- [5] LIU Zhi-Gang, ZHOU Guan-Hua. Polarization of Sun Glint[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(刘志刚,周冠华.太阳耀光的偏振分析.红外与毫米波学报), 2007, **26** (5): 362—365.
- [6] Deuzé J L, Goloub P, Herman M, *et al.* Estimate of the aerosol properties over the ocean with POLDER on ADEOS-1[J]. *J. Geophys. Res.*, **105** (D12): 15329—15346.