

水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析

刘 琦¹ 褚金奎² 王 兢³ 关 乐²

¹ 大连理工大学辽宁省微纳米技术及系统重点实验室, 辽宁 大连 116023
² 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023
³ 大连理工大学电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116023

摘要 研究了水云光学特性对大气偏振特性的影响,对水云条件下大气偏振模式进行了仿真。使用基于蒙特卡罗法的矢量辐射传输模式,模拟 350~700 nm 波长下大气偏振特性随水云的光学厚度、有效半径的变化趋势。通过计算 450 nm 波长处不同太阳高度角下的全天空离散点的 Stocks 矢量,对水云下大气的偏振分布模式进行研究,并与晴朗大气下的天空光偏振度和偏振方位角模式进行分析比对。结果表明,波长越大,偏振度随水云光学厚度增大而减小的趋势越明显。随着有效半径的减小偏振度有一定程度的减小,但对短波波段影响较小。随着太阳高度角的增大,天空可探测区域整体偏振度下降。天空光的偏振度近 0 区域,会对其附近偏振方位角的准确性产生一定影响。水云天气下的大气偏振分布研究为偏振光导航传感器的实际应用提供了理论基础。

关键词 大气光学;偏振模式;蒙特卡罗法;水云光学特性;大气散射

中图分类号 O436.3; P401 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0301004

Research and Simulation Analysis of Atmospheric Polarization Properties under Water Cloud Condition

Liu Qi¹ Chu Jinkui² Wang Jing³ Guan Le²

¹ Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

² Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

³ School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract The impact of water cloud optical properties on atmospheric polarization properties is researched, and atmospheric polarization pattern under water cloud condition is simulated. By using the polarized radiative transfer based on Monte Carlo model, the changes of atmospheric polarization properties with the optical thickness and effective radius of water cloud from 350 nm to 700 nm are simulated. By calculating Stocks vector of discrete points in the whole sky, atmospheric polarization pattern of water cloud is researched and compared with the polarization pattern of clear sky. The results show that the degree of polarization (DOP) decreases with the increasing of water cloud optical thickness, which is more obvious with the wavelength upward trend. DOP decreases with the fall of effective radius to a certain extent, but it has less influence on short wavelength. With the increasing of solar altitude angle, DOP of the whole sky becomes lower. The area of DOP at about 0 makes the angle of polarization (AOP) imprecise. The research on atmospheric polarization pattern of water cloud provides theoretical basis for the specific application of polarization navigation sensor.

Key words atmospheric optics; polarization pattern; Monte Carlo method; water cloud optical properties; atmospheric scattering

OCIS codes 010.1290; 290.5855; 290.1090; 260.5430

收稿日期: 2013-09-09; 收到修改稿日期: 2013-10-31

基金项目: 国家 973 计划(2011CB302101, 2011CB302105)、国家自然科学基金(51305057)

作者简介: 刘 琦(1987—),女,硕士研究生,主要从事仿生偏振光导航生物机理和大气偏振模式等方面的研究。

E-mail: lq5467@163.com

导师简介: 褚金奎(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事智能机器人、仿生偏振光导航传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

许多昆虫(沙蚁、蜜蜂、蟋蟀、蜣螂等)都能够利用天空偏振光进行导航。由于当太阳位置一定时,天空光的偏振分布模式较为稳定,使用天空偏振光导航有利于在太阳不直接可见的情况下获得方向信息。国内外很多学者对生物偏振光导航机理以及大气偏振分布模式进行了较为深入的研究。

在生物机理方面,早在1949年,Frisch^[1]便发现蜜蜂可以利用天空偏振光进行导航;Wehner^[2]发现,沙蚁可以利用其背部边缘区域(DRA)小眼来感知偏振光的方向信息;Labhart^[3]发现昆虫脑部的偏振敏感神经元能将接收到的天空偏振光信号转换成相应的电信号从而进行导航;此外,实验证明,蟋蟀可感知偏振度(DOP)大于5%的天空偏振光^[4]。在大气偏振理论方面,由于Rayleigh散射理论相对简单且应用广泛,目前与晴朗天空的偏振分布相似的大气偏振Rayleigh散射模型被普遍采用^[5]。Mie散射理论虽然更接近实际大气的散射,然而由于其自身复杂性,未能建立起系统的大气偏振模型。除大气成分影响之外,水面反射等地表因素也会对大气偏振模式产生一定影响^[6]。根据仿生原理,Lambrinos等^[7-8]制作了基于生物机理的偏振光导航传感器。

Rayleigh散射大气偏振模型虽然使用较广,但由于没有考虑实际天气因素影响,本身不够准确。尤其在大气中,由于云层散射对天空偏振光有反射和退偏的作用,云对大气偏振特性和导航系统精度的影响不容忽视。此外,通过研究多种昆虫的DRA区小眼特性,Labhart等^[9]发现昆虫的偏振敏感光谱主要集中在绿光以下的短波波段,特别是蓝紫和紫外(UV)波段。针对该现象,Barta等^[10]简化参数讨论了云层对不同波段天空光偏振度的影响,认为生物的偏振光谱选择偏好与大气条件较差的雾霾、特别是有云天气,有着较为直接的关系。因此,有云条件下的天空偏振光分布模式研究十分必要。但是由于云的厚度、几何结构、空间分布及其演化过程十分复杂,因此有云天气下的偏振模型研究目前主要集中在实验测量上。2004年,Pomozi等^[11]使用图像偏振测试仪,拍摄了晴天和云天的偏振模式图像,通过对比450、550、650 nm波长的偏振信息,验证了昆虫偏振敏感光谱选择与有云天气相关的观点;Hegedüs等^[12]针对厚云天气下的天空偏振分布进行了全天空拍摄,认为偏振方位角(AOP)的分布对于大气环境变化有着很高的稳定性;Miyazaki

等^[13]使用鱼眼摄像头研究比对了晴天、云天与Rayleigh情况下的大气偏振分布规律,验证了Pomozi等^[11]的测试结果,并分析了照相机倾斜对大气偏振拍摄的影响。国内对于复杂大气下的偏振研究起步较晚,但取得了一定的进展。崔岩等^[14-15]分别搭建了点源式和图像式大气偏振测试系统,并对多种天气下的大气偏振模型进行了测量,王威等^[16]理论分析了气溶胶对大气偏振特性的影响。

由于已有的云天气下大气偏振特性研究极少涉及云参数变化对大气偏振模式影响的讨论,较难对偏振导航传感器的具体应用进行指导。因此,设定具体的云参数,定量模拟云条件下的大气偏振情况,对预测大气偏振导航误差和提高精度有着非常重要的作用。

根据云内温度和云粒子的相态,云可以被分为水云、冰云和混合云等。鉴于云系统的复杂性,本文简化研究对象,仅对水云天气下的大气偏振情况进行模拟分析。水云主要位于温度较高的大气低层,由球形水滴组成。通过细化影响因素,分析水云光学参数对大气偏振特性的影响,模拟更贴近实际环境的大气偏振模式,为偏振光导航传感器的具体应用提供理论基础。

2 水云条件下大气偏振模式研究原理

2.1 光的偏振特性

太阳光进入地球大气层后,经过大气中的气体分子、气溶胶、小水滴、冰晶等粒子的散射而具有偏振特性,成为部分偏振光。偏振的完整状态可用Stokes矢量表示,通常写作 $\mathbf{S}=[I, Q, U, V]^T$,其中 I 为总光强, Q 和 U 分别代表两个方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。这里仅考虑大气散射光的线偏振特性,因此认为 $V=0$ 。

线偏振度 P 和偏振方位角 χ 分别定义为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (1)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (2)$$

2.2 基于蒙特卡罗法的矢量传输模型

蒙特卡罗法是一种数值模拟介质中光子传播过程的随机方法。通过对数量足够多的光子的传播过程进行模拟,可以很精确地获取散射场的统计特征。对于解决云等几何结构复杂介质中的辐射传输问题有很大的优越性。

针对具体的计算过程,蒙特卡罗辐射传输算法

并不尽相同,但其基本原理为:考虑一个光子以某一角度进入大气上界,根据权重产生被吸收和被散射两种随机过程,对其运动轨迹进行追踪。当光子碰撞粒子被散射时,若经过多次碰撞,则二次碰撞之间光子所走的路程为随机变量,该变量与光学厚度相关;每次散射角方向也为随机变量,但与相函数相关。根据前一次碰撞的散射角,决定该光子下一次碰撞可能的路径和碰撞的空间位置。最后通过统计到达地面的光子数及其方向,就可统计出包括 Stocks 矢量在内的大气辐射特性参数。

本文使用 libRadtran 软件包^[17],采用 Mayer 等^[18-19]研究提出的基于蒙特卡罗法的 MYSTIC 矢量辐射传输模型,能够计算包含气溶胶、云滴粒子的大气辐射传输模式,为水云天气下的全天空大气偏振特性研究提供了更为合理的模型。

2.3 水云参数模型

研究云的散射和吸收的时候,应对云的尺度谱和云的含水量有合理的估算。不同云滴的谱差异较大,计算中采用修正的伽马函数对云滴谱进行拟合,即

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}), \quad (3)$$

式中 r 为云滴的半径,四个参数 a, b, α, γ 均为正实数,计算中一般为简化参数设定 $\gamma = 1$ 。

云水含量 L_{wc} 由下式决定:

$$L_{wc} = \frac{4\pi}{3} \rho_w \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr, \quad (4)$$

式中 ρ_w 为水的密度。

云的性质参数中,光学厚度和有效半径是非常重要的两个参数,它们构成了云辐射参数化方法的基础。有效半径一般定义为云滴谱的三阶矩阵与二阶矩阵之比,即

$$r_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}. \quad (5)$$

云的光学厚度可表示为

$$\tau = \Delta z \cdot \int_0^{\infty} Q_{\text{ext}} \pi r^2 n(r) dr, \quad (6)$$

式中,由于云滴半径 $r \gg \lambda$,消光效率因子 $Q_{\text{ext}} \approx 2$, Δz 为云厚。刘洪利等^[20]针对中国地区云特征进行了对比研究,认为南方地区云的光学厚度较大(一般在 5~9 之间),北方地区云的光学厚度小(一般在 2.5 以下)。

由(3)、(5)式可简化得到

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp\left[-\frac{(\alpha+3)r}{r_{\text{eff}}}\right]. \quad (7)$$

计算时,取水云 $\alpha=7$, a 值可通过上述参数的设置进而得出。

水云光学厚度、有效半径可以较好地通过反演来得到,并且与云滴谱和云水含量有很好的相关,对水云天气辐射性质有重要影响。此外,云滴形状近似球形,因此云滴粒子的微观散射性质由 Mie 散射理论进行求解。

本文通过设定大气情况、地表反照率、气溶胶和水云参数,对水云天气下的大气偏振模式情况进行分析研究。

3 水云光学参数对大气偏振特性影响

以美国标准大气模式作为背景大气。设定臭氧柱总量为 300 DU ($1 \text{ DU} = 2.688 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$),背景气溶胶类型为大陆平均型气溶胶。统一选择平均地表反照率 0.2。水云情况下,云底高度为 3 km,探测器位置为水平海拔处。

在太阳高度角为 30° ,太阳方位角为 0° 的情况下,对观测方位角 180° 、余弦值 -0.866 处的观测点进行讨论。

3.1 水云光学厚度对偏振特性影响

设定水云有效半径不变,对水云光学厚度为 0 (无云)以及 1~8 (薄云-厚云)的情况进行模拟,得到水云光学厚度对不同波长天空光的偏振度影响,结果如图 1 所示。

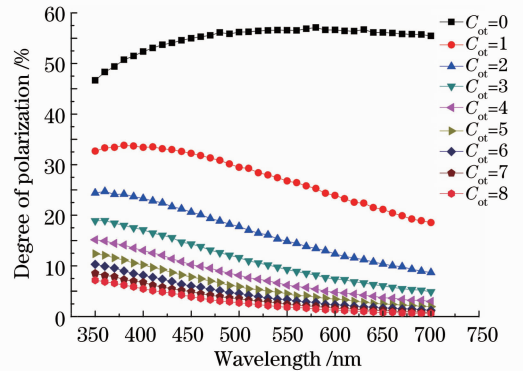


图 1 350~700 nm 天空光偏振度随水云光学厚度 C_{ot} 的变化

Fig. 1 DOP changing with optical thickness of water cloud from 350 nm to 700 nm

由图 1 可知,天空光偏振度对水云光学厚度变化敏感,350~700 nm 各波长处偏振度均随水云光学厚度变大而减小。晴朗大气下的偏振度随着波长增大而增大;与其相对,随着水云光学厚度的增大,偏振度随波长增大而减小的趋势越来越明显。

参考生物实验可知,自然界中昆虫进行天空偏振光导航需要天空光偏振度大于 5%。因此,可以推出短波区域更适合水云光学厚度较大时的大气偏振信息探测。同时,考虑全天空的偏振度分布情况,水云光学厚度过大则会造成可探测区域过小,导致大气偏振光导航精度的降低。

3.2 水云有效半径对偏振特性的影响

在水云光学厚度恒定的情况下,模拟水云有效半径对天空光偏振度的影响。水云有效半径分别取 5、10、15、20、25 μm 。结果如图 2 所示。

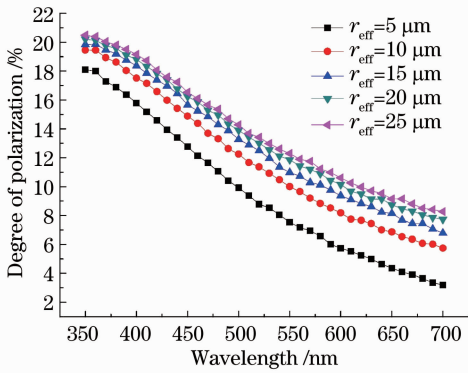


图 2 350~700 nm 天空光偏振度随水云有效半径 r_{eff} 变化

Fig. 2 DOP changing with effective radius of water cloud from 350 nm to 700 nm

从图 2 中可以看出,相同波长条件下,偏振度随着有效半径的减小而降低,并且偏振度变化率随着有效半径的减小而增大。波长越短,偏振度对有效半径的变化越不敏感。然而总体来说有效半径变化,特别是有效半径大于 15 μm 时,对水云下大气偏振特性的影响不大。

4 水云天气下全天空偏振模式仿真

背景大气、气溶胶成分、地表情况以及探测器相对位置均不变,设定波长为 450 nm,水云光学厚度为 3,太阳方位角为 0° ,对观测方位角($0^\circ\sim 360^\circ$)和高度角($0^\circ\sim 90^\circ$)每隔 5° 进行取点,共 1387 个点进行全天空大气偏振仿真。同时,在相同条件下,模拟大陆平均气溶胶下的晴朗天空偏振模式,进行对比研究。太阳高度角分别为 0° 、 30° 、 60° 时,云天和晴

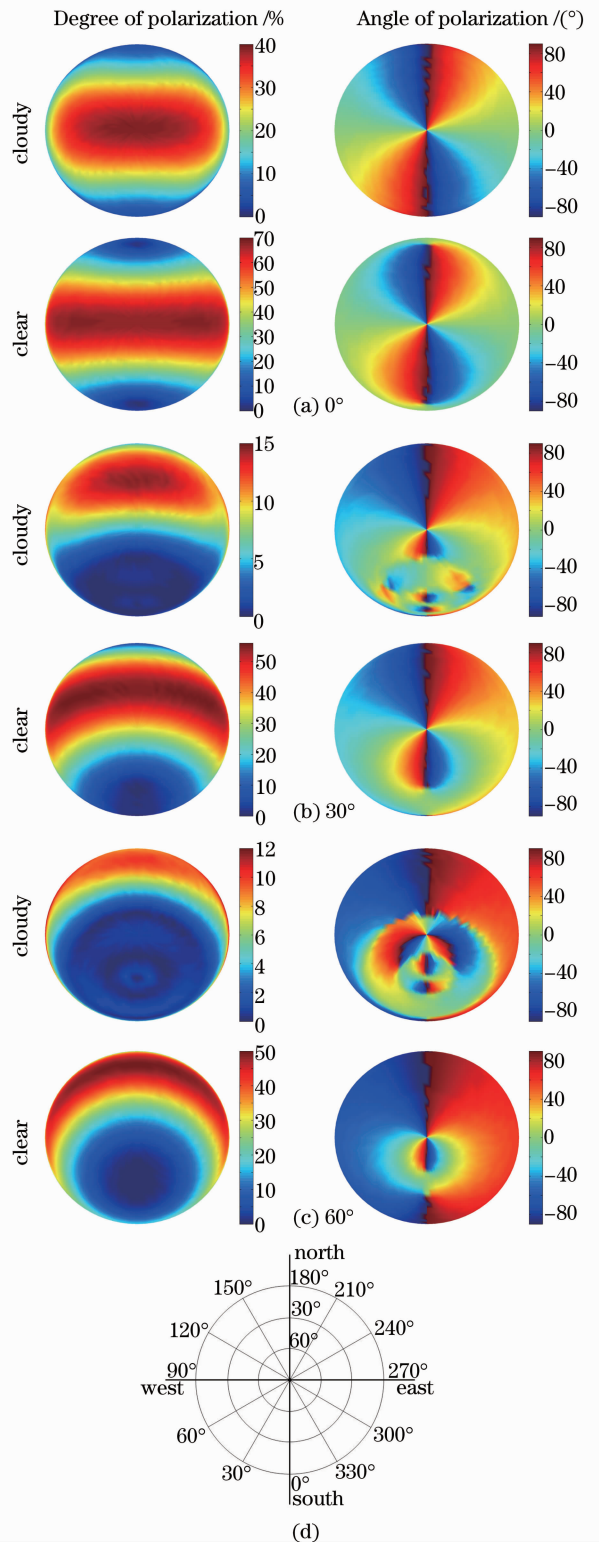


图 3 太阳高度角为(a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° 时的水云天气下和晴朗天气下偏振度(左列)和偏振方位角(右列)分布对比; (d)参考坐标系

Fig. 3 DOP (left) and AOP (right) of water cloud and clear cloud with the solar altitude angle of (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° ; (d) reference system

朗大气条件下的全天空偏振度图像以及偏振方位角

图像如图3所示。

天空光偏振度和偏振方位角的分布随太阳高度角的变化而不同。偏振度整体关于太阳子午线呈轴对称分布,偏振方位角的角度值则基本关于太阳子午线互为相反数。对比大气偏振分布模型可见,无论是晴天还是晴朗天气下,天空整体偏振度均随着太阳高度角的增大而下降。伴随有水云条件下天空光偏振度的减小,太阳点附近的偏振度近零范围扩大,使得非偏振及偏振不可探测区域增大,导致该区域的偏振方位角丧失实际意义,模拟结果有一定混乱,不具有参考性。偏振度相对较大的地方,云天与晴朗天空下的偏振角分布基本一致。相对而言,水云天气条件下,偏振度较高的背太阳点半球的偏振方位角模式更为稳定。

5 结 论

运用基于蒙特卡罗法的矢量传输模式,通过选择更接近于实际大气成分的参数,模拟了水云条件下的大气偏振特性。对结果进行分析整理可知:晴朗天气下,各个波段偏振度较高,均可满足探测需求;与其相对,水云天气下整体偏振度较低,蓝紫等短波波段比长波波段更有利于天空偏振光的探测。此外,水云光学厚度对大气偏振特性影响较明显,水云有效半径对大气偏振特性影响不大。相对而言,短波波段受水云光学厚度和有效半径的影响更小,对水云参数变化具有更高的稳定性。较高的整体偏振度有利于偏振光导航传感器的应用,因此选择短波波段作为偏振探测的敏感波段更适用于水云天气下的偏振光导航系统。

参 考 文 献

- 1 K Frisch. Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den Tänzen der Bienen [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 1949, 5(4): 142-148.
 - 2 E Wehner. The polarization-vision project: championing organismic biology [J]. Robotics and Autonomous System, Special Issue on Biomimetic Robots in Neural Basis of Behavioural Adeptation, 1994, 30: 103-143.
 - 3 T Labhart. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system [J]. Nature, 1988, 331(6155): 435-437.
 - 4 T Labhart. How polarization-sensitive interneurons of crickets perform at low degrees of polarization [J]. J Experimental Biology, 1996, 199(7): 1467-1475.
 - 5 Yao Hongyi. Research on the Skylight Polarization for the Bionic Micro-Nano Navigation System [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- 姚弘轶. 面向仿生微纳导航系统的天空偏振光研究[D]. 大连:

- 大连理工大学, 2006.
- 6 J Gal, G Horvath, V B Meyer-Rochow. Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(1): 103-111.
 - 7 D Lambrinos, R Möller, T Labhart, *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 30(1): 39-64.
 - 8 J Chu, K Zhao, Q Zhang, *et al.*. Design of a novel polarization sensor for navigation [C]. International Conference on Mechatronics and Automation IEEE, 2007. 3161-3166.
 - 9 T Labhart, E P Meyer. Detectors for polarized skylight in insects: a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye [J]. Microscopy Research and Technique, 1999, 47(6): 368-379.
 - 10 A Barta, G Horváth. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV [J]. J Theoretical Biology, 2004, 226(4): 429-437.
 - 11 I Pomozi, G Horváth, R Wehner. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation [J]. J Experimental Biology, 2001, 204(17): 2933-2942.
 - 12 R Hegedüs, S Åkesson, G Horváth. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies [J]. J Opt Soc Am A, 2007, 24(8): 2347-2356.
 - 13 D Miyazaki, M Ammar, R Kawakami, *et al.*. Estimating sunlight polarization using a fish-eye lens [J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 2009, 49(4): 1234-1246.
 - 14 Cui Yan, Cao Nannan, Chu Jinkui, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(6): 1431-1435.
- 崔岩, 曹楠楠, 褚金奎, 等. 天空偏振光测量系统的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1431-1435.
- 15 Gao Qisheng. Study on All-Weather Polarization Patterns of Scattering Skylight [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- 高启升. 全天候天空散射光偏振模式研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- 16 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.*. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0513001.
- 王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513001.
- 17 B Mayer, A Kylling. Technical note: the libRadtran software package for radiative transfer calculations-description and examples of use [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, 5(7): 1855-1877.
 - 18 B Mayer. Radiative transfer in the cloudy atmosphere [C]. EPJ Web of Conferences, 2009, 1: 75-99.
 - 19 R Buras, B Mayer. Efficient unbiased variance reduction techniques for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmospheres: the solution [J]. J Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2011, 112(3): 434-447.
 - 20 Liu Hongli, Zhu Wenqin, Yi Shuhua, *et al.*. Climatic analysis of the cloud over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(4): 466-473.
- 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 中国地区云的气候特征分析[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 466-473.