

文章编号: 0258-7025(2010)12-3002-05

基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性

黄旭锋^{1,2} 步扬¹ 王向朝¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 大气散射光偏振特性的研究对于降低自然扰动对偏振光导航系统的误差影响, 优化系统具有重要意义。实验采用矢量偏振分析装置测量了不同天气情况下大气散射光偏振度和太阳光单次散射角, 研究了两者之间的关系。结果表明, 在不同天气条件下, 大气散射光偏振度和太阳光单次散射角之间皆为抛物线型关系, 散射光偏振度变化主要由大气散射粒子大小变化引起。当散射粒子半径增大时, 散射光偏振度减小, 并且偏振度最大值所对应的散射角值发生偏移。基于米氏散射理论建立了单次光散射偏振模型对该实验进行了理论分析, 数值仿真结果与实验结果一致。

关键词 大气光学; 大气散射; 偏振; 散射角; 偏振度

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3002

Skylight Polarization Patterns Based on Mie Theory for Scattering

Huang Xufeng^{1,2} Bu Yang¹ Wang Xiangzhao¹

(¹Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Research on the polarization patterns is of great importance to reduce polarization disturbance errors, improve measurement accuracy and optimize system design. Scattering angle (SA) and degree of polarization (DOP) of skylight are measured by vector polarization measurement system under different sky conditions. The experiments demonstrate that all relationship curves between SA and DOP can be described as parabolas regardless of sky conditions. DOP changes with sizes of atmospheric scattering particles. When the sizes of the particles increase, DOP decreases and SA drifts. A single light scattering polarization model based on Mie theory is proposed to analyze the experiments. Simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words atmospheric optics; atmospheric scattering; polarization; scattering angle; degree of polarization

1 引言

偏振光导航定位技术具有抗干扰能力强、性能可靠、适用范围广、定位误差不随时间累计等优点, 是一种具有巨大发展潜力的导航定位技术^[1,2]。偏振光导航系统中偏振传感单元、信号滤波电路与数学处理软件模型的设计依赖于大气散射光偏振特

性, 太阳偏振光特性又随着太阳散射角(SA)、天气情况的变化而变化^[1,3~5], 大气偏振特性的研究对于降低自然扰动对导航系统的误差, 优化系统设计具有重要意义。

目前国内外对大气散射光偏振特性的研究主要考虑不同天气条件下其偏振特性的变化。在不同天

收稿日期: 2010-03-31; 收到修改稿日期: 2010-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、上海市启明星项目(08QB14005)和上海市科委国际合作研究项目(08520704200)资助课题。

作者简介: 黄旭锋(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事大气偏振检测技术方面的研究。E-mail: hxf1979@gmail.com

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事信息光电子技术方面的研究。

E-mail: wxz26267@siom.ac.cn(通信联系人)

气条件下天空偏振图景具有相似性,且该偏振图景是稳定和可预测的。即在理想的均匀天空介质分布情况下,对于一定的太阳方向,关于太阳位置旋转对称的不同观测方向对应的相同的散射角,其偏振分布是稳定的^[6~10]。但由于大气偏振光特性不仅与天气条件,而且与太阳散射角及散射粒子形态相关^[6~11],因此,研究大气偏振特性不能仅考虑不同天气的影响,还必须考虑太阳散射角及散射粒子形态的影响。本文采用矢量偏振分析装置检测大气散射光偏振信息,研究大气散射光偏振特性与太阳散射角及散射粒子形态之间的关系。在此基础上,基于米氏散射理论提出光散射偏振模型对两者之间的关系进行理论分析。

2 实 验

与太阳和地球之间的距离相比,地球大气层厚度要小得多,约为日地距离的 $1/10^5$ ^[12~14]。当测量高度角相同时,大气层厚度对太阳光在大气层中散射的影响可以忽略。本文仅考虑单次散射条件下,大气散射光偏振特性与太阳散射角及散射粒子形态之间的关系。

为了获取大气散射光偏振信息,实验采用了矢量偏振测量装置,结构原理如图 1 所示。装置采用两组偏振传感单元(S_1 与 S_2 , S_3 与 S_4),每组偏振传感单元由两个检偏方向正交的偏振探测通道组成。4个偏振探测通道的检偏方向分别为 0° , 90° , 45° 与 135° ,分别感知天空中不同方向的偏振光强度。采用的蓝光光电二极管(BPD)的峰值波长为460 nm,光谱响应范围为400~540 nm。测量装置先将每一组偏振传感单元的两个偏振探测通道的BPD探测信号进行对数相减预处理,再送入时分复用(TMD)信号处理电路进行滤波和放大,最终测量信号进入计算机进行数据处理和分析,得到大气散射光偏振度(DOP)和偏振方位角等信息。在偏振测量过程中,同步利用天文算法程序计算太阳相对本地的空间位置,获得太阳单次散射角数据。利用图 1 测量装置和数据分析软件对不同天气情况下大气散射光偏振信息进行了测量,测量结果如图 2,3 所示。

图 2 给出了不同天气情况下散射角与偏振度之间关系的对比。在晴天,当散射角小于 90° 时,散射光偏振度随散射角增大而增大,呈现上升趋势。散射角为 90° 时,散射光偏振度达到最大值。当散射角继续增大时,散射光偏振度开始变小,呈现下降趋势。当天气分别为薄云、多云时,随着散射角的逐渐

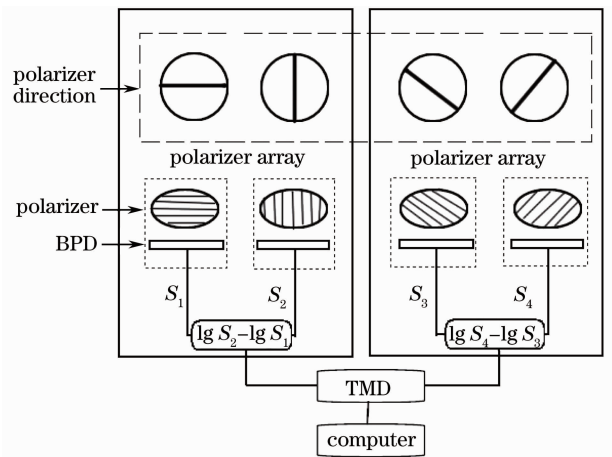


图 1 矢量偏振分析装置系统结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of the polarization vector analysis instrument

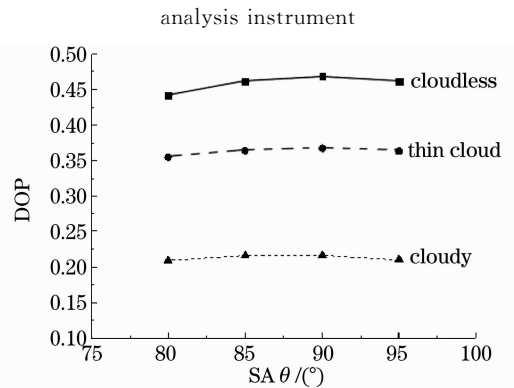


图 2 不同天气情况下散射角与偏振度之间变化关系的比较

Fig. 2 Degree of polarization and scattering angle variation relationship under different sky conditions

增大,大气散射光偏振度依然呈现逐渐增加→最大值→逐渐减小这种变化趋势。这表明对于不同的天气情况,大气散射光偏振度与散射角之间关系的变化趋势是相似的。对于相同的散射角,不同天气条件下大气散射光偏振度值之间的差异却很大。例如,当散射角为 90° 时,晴天的散射光偏振度为0.4691,薄云条件下偏振度减小到0.3673,多云条件下偏振度达到最小,仅为0.2160,不到晴朗条件下偏振度的1/2。当散射角为其他值时,大气散射光偏振度值的变化情况类似。

图 3 详细显示了各种天气情况下散射角与偏振度之间的变化关系。当天气晴朗无云时,大气散射光偏振度与散射角之间关系曲线为抛物线[图 3(a)与(b)]。当散射角小于 90° 时,偏振度随散射角增大而增大;散射角为 90° 时,偏振度达到最大值;当散射角继续增大时,偏振度开始变小。在薄云情况下,散射光偏振度比天气晴朗时要小,散射光偏振度

开始抖动,其关系曲线依然为抛物线[图 3(c)与(d)].同晴天相比,散射光偏振度达到最大时所对应的散射角有了很小的偏移。当散射角分别为 88.5° [图 3(c)]与 88.7° [图 3(d)]时,其大气散射光偏振度就达到最大值。当云增多时,大气散射光偏振度值比前两种情况更小,且抖动加剧[图 3(e)与

(f)].从长时间观测曲线可知,偏振度与散射角仍然呈现抛物线关系。同晴天、薄云相比,散射光偏振度达到最大时所对应的散射角有了更大的偏移。当散射角为 87.5° [图 3(e)]与 87.4° [图 3(f)]时,偏振度就达到最大值。

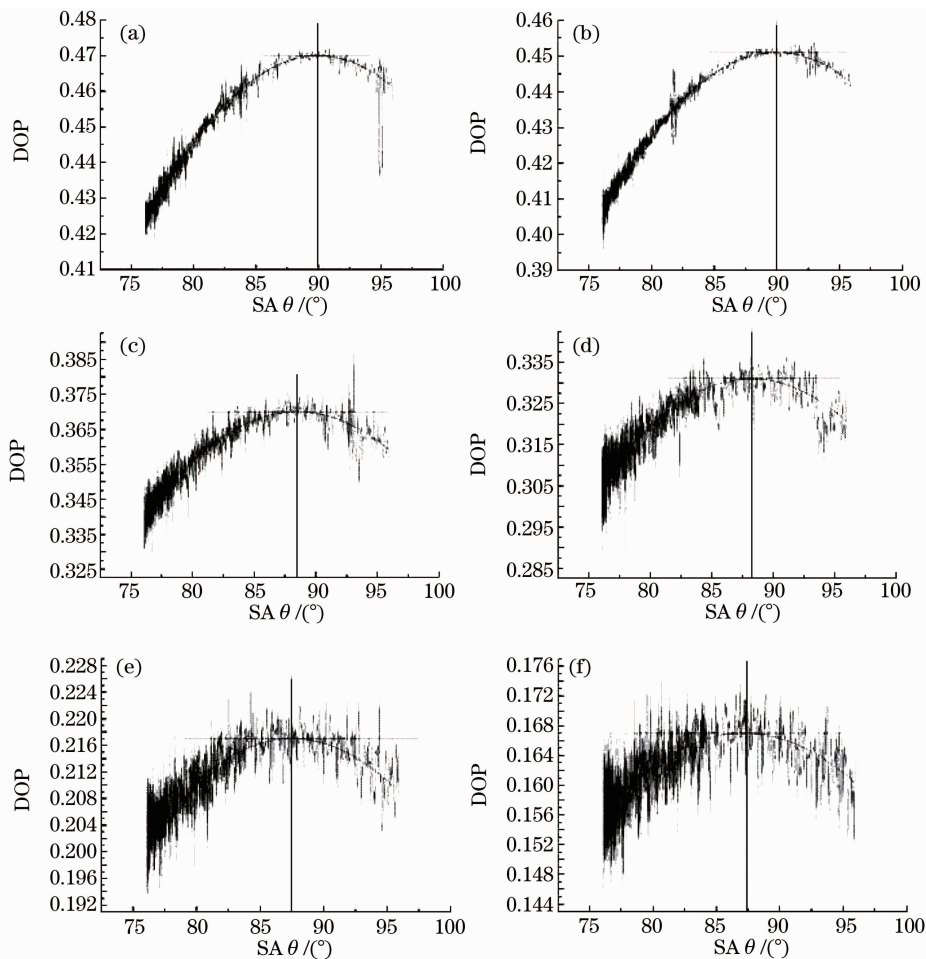


图 3 各种天气情况下,DOP 与 SA θ 之间的关系。(a),(b)分别为晴天时测量结果,(c),(d)分别为薄云时的测量结果,(e),(f)分别为多云时的测量结果

Fig. 3 Relationship between DOP and SA θ under different sky conditions. (a) and (b) are the measurement results under cloudless sky conditions, (c) and (d) are the measurement results under thin light cloud sky conditions, (e) and (f) are the measurement results under cloudy sky conditions

3 理论分析

从上述实验结果可知,当考虑太阳散射角影响时,不同天气条件下天空偏振图景仍具有相似性,但是大气散射光偏振图景发生了不同的变化,已经变得不稳定。这与以往的研究结果并不一致。现有大气散射光偏振理论已无法对此进行解释和分析。本文应用米氏散射理论提出光散射偏振机理对此进行分析。

不失一般性,假设波长为 λ 的自然光被折射率

为 m 的粒子散射, θ 为散射角,则观测点的偏振度为

$$P = \frac{|S_1(\theta)|^2 - |S_2(\theta)|^2}{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}, \quad (1)$$

式中 $S_1(\theta)$ 与 $S_2(\theta)$ 为散射振幅函数。其函数定义为

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (\pi_n a_n + \tau_n b_n), \quad (2)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (\tau_n a_n + \pi_n b_n), \quad (3)$$

式中 a_n 和 b_n 为米氏函数。其函数定义为

$$a_n = \frac{\psi_n(x)\psi'_n(mx) - m\psi'_n(x)\psi_n(mx)}{\zeta(x)\psi'_n(mx) - m\zeta'_n(x)\zeta(mx)}, \quad (4)$$

$$b_n = \frac{m\psi_n(x)\psi'_n(mx) - \psi'_n(x)\psi_n(mx)}{m\zeta(x)\zeta'_n(mx) - \zeta'_n(x)\psi_n(mx)}, \quad (5)$$

式中 $\psi_n(x), \zeta_n(x)$ 为 Riccati-Bessel 函数。其函数定义为

$$\psi_n(x) = (\pi x/2)^{1/2} \cdot J_{n+1/2}(x), \quad (6)$$

$$\zeta_n(x) = (\pi x/2)^{1/2} \cdot H_{n+1/2}^{(2)}(x), \quad (7)$$

式中 $J_{n+1/2}(x)$ 和 $H_{n+1/2}^{(2)}(x)$ 分别为半奇阶的第一类贝塞尔函数和第二类汉开尔函数。 π_n, τ_n 与 x 分别定义为

$$\pi_n = \frac{dP_n(\cos \theta)}{d(\cos \theta)}, \quad (8)$$

$$\tau_n = \frac{dP_n^{(1)}(\cos \theta)}{d\theta}, \quad (9)$$

$$x = 2\pi \frac{r}{\lambda}, \quad (10)$$

式中 $P_n(\cos \theta)$ 为第一类勒让德函数; $P_n^{(1)}(\cos \theta)$ 为一阶 n 次第一类缔合勒让德函数。利用(1) ~ (10) 式即可得到散射粒子半径与波长比值 r/λ , 散射角 θ , 折射率 m 与散射光偏振度 P 之间的关系^[4,15~18]。

考虑多次散射情况,引入矢量传输方程^[19]

$$\cos \frac{d}{dz} \mathbf{I}(\theta, \varphi, z) = -\kappa_e(\theta) \mathbf{I}(\theta, \varphi, z) + \mathbf{I}_e(\theta, \varphi) + \int d\Omega' \mathbf{P}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') \mathbf{I}(\theta', \varphi', z), \quad (11)$$

式中 $d\mathbf{I}$ 是来源于散射粒子消光,体积元中辐射源与周围 $\int d\Omega'$ 的多次散射贡献。 κ_e 为消光函数, $\mathbf{I}_e(\theta, \varphi)$ 为辐射源, $\mathbf{P}(\theta, \varphi; \theta', \varphi')$ 为入射场强与散射场强之间的耦合相函数,求解二阶解及以上即可得到多次散射对偏振的影响。经计算得到大气散射偏振主要来源于一次散射,多次散射的退偏振对整个散射场的偏振分布基本可以忽略^[19,20]。因此本文应用定值折射率的圆形粒子的米氏单次散射情况作为散射体模拟天空散射情况。

在不同的散射粒子半径与波长比值 r/λ 条件下,偏振度 P 与散射角 θ 的关系如图 4 所示。对于不同的 r/λ 比值,偏振度与散射角都是对称抛物线关系。当该比值变化时,抛物线的形状与位置发生变化。当散射粒子半径比波长小得多时,偏振度主要由散射角大小决定,并且散射角为 90° 时偏振度达到最大值。随着散射粒子半径的增加,偏振度达到最大值时所对应的散射角向小于 90° 的方向偏移。如表 1 所示,在散射粒子半径与波长比值 r/λ 为 $1/10^5$ 时,

偏振度在散射角为 90° 时达到最大值 1.0。当 r/λ 进一步增加时,偏振度最大值却逐渐减小,与此相对应的散射角偏移程度逐渐加剧。当 $r/\lambda = 1/10$,偏振度在 85.04° 时,达到最大值 0.999985。当 r/λ 增加到 $1/4$ 时,偏振度最大值为 0.959968,与此相对应的散射角仅为 54.75° 。当散射角为 90° 时,散射光偏振度与粒子半径和散射光波长之间的关系如图 5 所示。当 r/λ 增加时,大气散射光的偏振度逐渐减小。

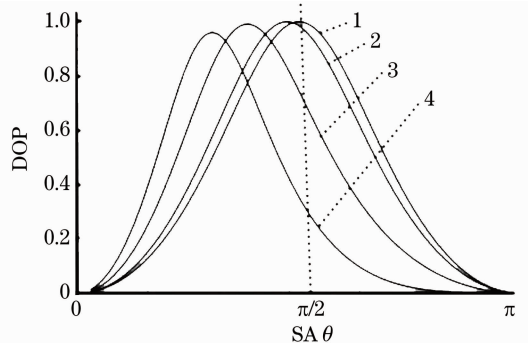


图 4 在不同 r/λ 比值条件下,DOP 与 SA θ 的关系。

曲线 1,2,3,4 分别对应于 $r/\lambda=1/10^5, 1/10, 1/5, 1/4$

Fig.4 Relationship curve between DOP and SA θ when r/λ is different. The curves 1, 2, 3 and 4 are the relationship curves when $r/\lambda=1/10^5, 1/10, 1/5$ and $1/4$

表 1 当散射粒子 r/λ 不同时,偏振度最大值 (MVDOP) 与所对应的散射角值(CSA)

Table 1 Maximum value of degree of polarization (MVDOP) and its corresponding scattering angle(CSA) when r/λ is different

| r/λ | MVDOP | CSA /($^\circ$) |
|-------------|---------|-------------------|
| $1/10^5$ | 1.000 | 90.00 |
| $1/10$ | 0.99998 | 85.04 |
| $1/5$ | 0.99114 | 69.10 |
| $1/4$ | 0.95997 | 54.75 |

实际天空散射比上述散射模型要复杂得多,该散射模型仍然反映出散射粒子与散射角对偏振度的影响趋势。在天气晴朗条件下,散射粒子主要为大气粒子,大气粒子半径比可见光波长要小得多,散射光偏振度和散射角之间关系如图 4 中曲线 1 所示,散射角为 90° 时,偏振度达到最大值。这与图 3(a), (b)所显示的实际测量结果一致。在薄云情况下,小水滴等其他悬浮粒子参与散射。由于参与散射的悬浮粒子半径较大,对同样的散射波长,当粒子半径与波长比增大时,散射光偏振度要减小(图 5)。散射角在略小于 90° 时,偏振度就达到最大(图 4 中曲线 2)。这与图 3(c), (d)所显示的实际测量结果相

符合。在多云情况下,随着散射粒子半径进一步增大,偏振度变得更小(图 5),同时最大偏振度所对应的散射角向小于 90° 的方向漂移更厉害(图 4 中曲线 3)。该结果与图 3(e),(f)所显示的实际测量结果相一致。

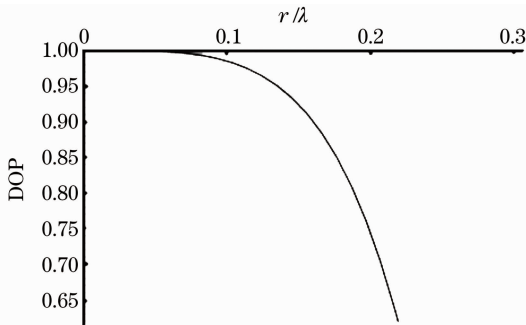


图 5 SA 为 90° 时,散射粒子的 r/λ 与 DOP 之间的关系

Fig. 5 Relationship curve of r/λ and DOP when SA is 90°

4 结 论

采用矢量偏振分析装置测量了不同天气情况下大气的散射光信息,研究了大气散射光偏振度和太阳光单次散射角及散射粒子形态之间的关系。结果表明,在不同天气条件下,散射光偏振度与太阳光散射角之间为抛物线型关系,散射光偏振度随散射粒子半径变化而变化。散射光偏振度变化主要由大气散射粒子大小变化引起。当散射粒子半径增大时,散射光偏振度减小,并且偏振度最大值所对应的散射角值发生偏移。基于米氏散射理论建立了单次光散射偏振模型对实验结果进行了理论分析。数值仿真结果与实验一致,显示大气偏振特性不仅与天气,还与太阳散射角及散射粒子形态相关。该研究对于降低自然因素对偏振光导航系统的误差影响,提高系统测量精度具有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, **30**(1-2): 39~64
- 2 T. Labhart, E. P. Meyer. Neural mechanisms in insect navigation: polarization compass and odometer [J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2002, **12**(6): 707~714
- 3 Kuonan Liou. An Introduction to Atmospheric Radiation[M]. California: Academic Press, 1980. 9~33

- 4 H. C. Van de Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: Dover, 1981. 40~57
- 5 K. L. Coulson. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere[M]. Hampton: Deepak, 1988. 3~29
- 6 G. P. Können. Polarized Light in Nature [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 7~19
- 7 Gábor Horváth, Dezső Varjú. Polarized Light in Animal Vision: Polarization Patterns in Nature [M]. Berlin: Springer, 2003. 15~62
- 8 D. T. Phillips, P. J. Wyatt. Single-particle light-scattering measurement: photochemical aerosols and atmospheric particulates[J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(9): 2082~2087
- 9 Z. Sekera. Light scattering in the atmosphere and the polarization of sky light[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1957, **47**(6): 484~490
- 10 D. L. Hofeldt. Full-field measurements of particle size distributions: polarization ratio method[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(36): 7551~7558
- 11 Ma Lizhen, Gu Yongjian, Shi Peng *et al.*. Analysis of the effects of atmosphere scattering on photon polarization degree[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 68~71
- 马丽珍, 顾永建, 史鹏等. 光子偏振度受大气散射影响的分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 68~71
- 12 Shen Changzhi, Sun Guoyuan. Celestial Navigation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1987. 5~32
- 沈长治, 孙国元. 天文导航[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987. 5~32
- 13 Zhou Xiujie, Tao Shanchang, Yao Keya. Advanced Atmospheric Physics[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 81~85
- 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 81~85
- 14 S. K. Mitra. The Upper Atmosphere[M]. Calcutta: The Royal Asiatic Society of Bengal, 1947. 13~21
- 15 J. R. Probert-Jones. Resonance component of backscattering by large dielectric spheres[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(8): 822~830
- 16 Zhu Yingbin, Du Xinyue, Zhao Daomu. Generalized Stokes parameters for polarization properties of stochastic electromagnetic beams on propagation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2332~2336
- 朱映彬, 杜新悦, 赵道木. 基于广义 Stokes 参量的随机电磁光束偏振态传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2332~2336
- 17 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo *et al.*. Research on the depolarization ratio characteristic of the aerosol in the atmosphere with the CALIPSO satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 2943~2951
- 赵一鸣, 江月松, 张绪国等. 利用 CALIPSO 卫星数据对大气气溶胶的去偏振度特性分析研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 2943~2951
- 18 D. C. Look, Y. R. Chen. Muller matrix representing backscattering: A progress report [C]. Denver, CO, USA: AIAA 34th Thermophysics Conference, 2000. 2368
- 19 Jin Yaqui. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission [M]. Beijing: Science Press, 1993. 13~21
- 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 13~21
- 20 Zhenzhu Wang, Ruli Chi, Bo Liu *et al.*. Depolarization properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 235~237