

文章编号 1004-924X(2012)03-0520-07

气溶胶对天空偏振辐射影响的测量

褚金奎*, 王威, 崔岩, 支炜, 高启升

(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 116024)

摘要:研究了气溶胶光学特性对天空偏振辐射的影响以获得实际的天空偏振分布模式。采用自主搭建的天空偏振辐射测量系统,于不同日期、同一地点在太阳子午面内进行了若干实验,分别测量了太阳高度角约为 60° 时,435~465 nm,535~565 nm,685~715 nm 3个波段光在散射角为 90° 时对应的偏振度和辐射强度。用大气压强、能见度等参数进行理论计算获得了气溶胶光学厚度。当气溶胶光学厚度在0.2~0.55间逐渐增大时,3个波段对应的最大偏振度分别从43%减小到22%、从41%减小到21%、从38%减小到19%,而对应的辐射量不断增大。实验结果表明:随着气溶胶光学厚度的增大,偏振度不断减小,尤其是对长波长,偏振度的衰减更明显,从而不利于偏振光导航。

关键词:大气光学;大气散射;天空偏振辐射;气溶胶;气溶胶光学厚度

中图分类号:O436.3;P407.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122003.0520

Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance

CHU Jin-kui*, WANG Wei, CUI Yan, ZHI Wei, GAO Qi-sheng

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

Abstract: The influence of the optical properties of aerosols on polarized sky radiance was researched to obtain the actual polarized sky radiance distribution model. Using the polarized sky radiance measuring system set up by ourselves, a lot of experiments were done at the same place but different dates. The degree of polarization and polarized sky radiation were acquired through these measurements in the solar altitude angle about 60° and the scattering of 90° for three wave bands of 435–465 nm, 535–565 nm and 685–715 nm. The aerosol optical depth was calculated by theory formula according to atmospheric pressure and visibility. When the aerosol optical depth increases from 0.2 to 0.55, the degrees of polarization for the three different wave bands decrease separately from 43% to 22%, 41% to 21% and 38% to 19%, but the radiation shows a trend of increase. Experimental results indicate that as the increase of aerosol optical depth, the degree of polarization will decrease, especially more significantly reduction for the longer wavelength. Therefore, the increase of aerosol optical depth is not conducive for the navigation according to polarized light.

收稿日期:2011-10-31;修订日期:2011-12-30.

基金项目:国家973重点基础研究发展计划资助项目(No. 2011CB302101, No. 2011CB302105);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. DUT10ZD104)

Key words: atmospheric optics; atmospheric scattering; polarized sky radiance; aerosol; aerosol optical depth

1 引言

偏振现象是天空散射光的重要特性之一,可以解释多种自然现象、探测大气污染或物体表面特性等^[1]。太阳辐射在进入地球大气之前是非偏振的自然光,经过大气分子或气溶胶的散射后成为了部分偏振光^[2]。自从 Arago 在 1809 年首次发现天空散射光的偏振辐射现象以来,国内外很多学者对其进行了深入研究^[3-8]。研究表明,当太阳位置一定时,在不同天气下具有较为一致的天空散射光偏振分布模式。在散射理论方面,1870 年, Lord Rayleigh 创立了 Rayleigh 散射理论; 1908 年, G. Mie 给出了关于均匀球状粒子散射问题的 Mie 散射理论。基于分子散射的 Rayleigh 散射理论,主要考虑了分子单次散射,过程相对简单,目前应用非常广泛,依据该理论,国内外学者已经建立了天空偏振辐射的理论模型;而 Mie 散射对应的是悬浮质点的散射,主要包括云的散射和气溶胶散射,事实上,米氏散射的研究还仅限于理论上,目前建立的天空偏振模式很少考虑云和气溶胶的散射。

沙蚁、飞蝗等一些动物能够利用天空散射光的偏振特性实现导航,它们利用光谱的紫外和蓝绿波段电矢量的分布特性来确定方向^[9]。受此启发,近年来利用天空偏振模式的导航成为了导航领域研究的一个新课题^[10-11]。然而,实际天空偏振模式受到诸多外界因素的影响,例如云、气溶胶等是影响天空偏振分布的主要因素。

一般地,在高空中同时存在分子散射与气溶胶散射,而在地面和低空中主要发生的是气溶胶散射,气溶胶的散射使得太阳光经过大气层后变成了部分偏振光。同时气溶胶随天气变化,晴天空气中的气溶胶含量低,而阴天时的含量明显增加。气溶胶、云层对太阳光的散射使得大部分太阳光反射回高空,而少量穿过云层到达地面的光由于受到严重 Mie 散射的作用而几乎成为了无偏振光,因此偏振度大大削弱^[12],不利于偏振光导航。

为建立实际天空偏振辐射模型和提高偏振导

航方位精度,本文针对气溶胶对天空偏振特性的影响进行了研究。首先,在国内外研究现状的基础上自主搭建了一套偏振辐射测量系统;然后,进行了若干次可比性实验测量,获得了一些气溶胶对天空偏振特性的影响规律。

2 气溶胶及其光学特性

大气气溶胶是指大气与悬浮在其中的固体和液体微粒共同组成的多相体系。习惯上也称大气气溶胶与大气气溶胶粒子、大气颗粒物等同使用,气溶胶的粒径在 0.001~10 μm。它主要是指六大类七种气溶胶粒子,分别为:沙尘气溶胶、碳气溶胶(元素碳和有机碳)、硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶和海盐气溶胶。

气溶胶的光学特性主要有光学厚度、消光系数、单次散射反照率以及负折射率等。其中气溶胶光学厚度是气溶胶最基本的光学特性,是研究气溶胶作用的基本参数。

气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)或(Aerosol Optical Thickness, AOT),定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分,它是衡量气溶胶粒子对太阳辐射衰减能力强弱的一个重要参数,为无量纲量。大气气溶胶通过散射、吸收对太阳辐射产生衰减。气溶胶光学厚度随波长、天气的变化而变化。

本文采用了由邱金桓、林耀荣等提出的综合应用地面气象能见度和大气压信息反演大气柱气溶胶光学厚度的参数化方法^[13],其表达式如下:

$$\tau_{\lambda} = f \left[\frac{3.912}{V} - 0.0116 \right] \frac{0.55}{\lambda} \left[e^{\frac{Z}{H_1}} - e^{\frac{5.5}{H_1}} + 12.5e^{\frac{5.5}{H_1}} + H_2 e^{\frac{5.5}{H_1}} \right], \quad (1)$$

式中, $H_1 = 0.886 + 0.222 V$, $H_2 = 3.77 \text{ km}$, λ 为选定的波长,单位为 μm, f 为订正系数。 V 表示从海平面观测的能见度,单位为 km。对于海拔高度为 $Z(\text{km})$ 的气象台站观测的能见度 V_Z 可以按照公式(2)订正到 V :

$$V_Z = \frac{3.912}{0.0116 - 0.00099 Z + \left(\frac{3.912}{V} - 0.0116 \right) e^{0.886 + 0.222 V} \frac{Z}{V}}. \quad (2)$$

对于大连等东北地区, f 可以按照下式计算

$$f = e^{-0.32+0.02 V_z} \quad (3)$$

大连市气象台海拔高度 $Z=0.097\ 361\ \text{km}$, 能见度信息由大连气象局网站获得, 选定特定波长 λ , 即可得到标准大气压下相应波长对应气溶胶的光学厚度。然后根据大气压比例关系, 折算出实际大气压强下光学厚度值。表 1 是大连地区标准大气压下不同能见度不同波长对应的气溶胶光学厚度。

表 1 标准气压下不同能见度对应的气溶胶光学厚度
Tab. 1 AOD corresponding different visibilities under standard atmospheric pressure

能见度/km	光学厚度(1)	光学厚度(2)	光学厚度(3)
8	0.538 0	0.436 7	0.349 1
10	0.469 4	0.381 0	0.304 6
12	0.426 8	0.346 4	0.276 9
15	0.388 8	0.315 6	0.255 2
20	0.360 9	0.292 9	0.234 1
25	0.355 2	0.288 3	0.230 4

注: 光学厚度(1)、(2)、(3)对应的中心波长分别为 450 nm、550 nm、700 nm。

3 天空偏振辐射测量系统及测量方法

3.1 测试系统工作原理

本文使用 Stokes 矢量法来描述一束光的偏振状态, 它是 Stokes 在 1852 年研究偏振光时提出的。Stokes 矢量表示为 $\mathbf{S}=(I, Q, U, V)^T$ 。其中 I 为总光强, Q, U 分别代表两个正交方向上的线偏振光, V 代表圆偏振光。另外, 在大气偏振测量与研究中, 因为圆偏振分量往往可以忽略, 即取 $V=0$, 所以主要研究的是大气散射光的线性偏振特性。

偏振器对入射光的改变可以用 Muller 矩阵表示, 如果入射光的 Stokes 矢量为 \mathbf{S} , 偏振器件的 Mueller 矩阵为 \mathbf{M} , 则出射偏振光的 Stokes 矢量为:

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (4)$$

如果使用线性偏振片进行偏振检测, 那么当线性偏振片的主透光轴方向与垂直于散射面的参考光轴方向成 θ 角时, 理想光学检测系统的 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

测试系统的 Mueller 矩阵是可知的, 对于给定的人射光, 出射光的总光强可以通过光强敏感设备来检测。因为 Stokes 矢量中, 只有第一行用来表示光的总强度, 所以这里只关心式(5)的第一行。对于配备了线性偏振片的理想光学系统, 由式(4)、(5)可得^[14]

$$I'(\theta) = s_0' = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\theta + U\sin 2\theta), \quad (6)$$

通过改变偏振镜的偏振化方向, 使 θ 分别为 $0, 60$ 和 120° , 可求得入射光 Stokes 矢量的各分量值为

$$\begin{cases} I = \frac{2}{3}[(I'(0^\circ) + I'(60^\circ) + I'(120^\circ))] \\ Q = \frac{2}{3}[(2I'(0^\circ) - I'(60^\circ) - I'(120^\circ))] \\ U = \frac{2}{\sqrt{3}}[I'(60^\circ) - I'(120^\circ)] \end{cases} \quad (7)$$

进而可以得到入射光的偏振度 P 为^[14-15]

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (8)$$

3.2 测试系统构成

根据测量原理, 自主搭建的天空偏振辐射测量装置硬件结构如图 1 所示。它由偏振测量头(I)、望远光学系统(II)、光纤光谱仪系统(III)和计算机(IV)组成。

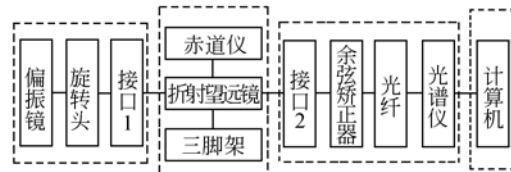


图 1 测试系统硬件结构示意图

Fig. 1 Sketch map of hardware configuration of measuring system

其中,偏振测量头(I)由偏振镜、旋转头和接口1组成,用以产生3个不同的角度 $\theta(0,60$ 和 $120^\circ)$;望远光学系统(II)由赤道仪、折射望远镜和三脚架组成,用以实现对天空中任意位置点的准确对准;光纤光谱仪系统(III)主要用于实现对光强信息的采集处理;计算机(IV)主要用于实现对入射光偏振信息的计算、处理和分析。图2为测试系统实物图。

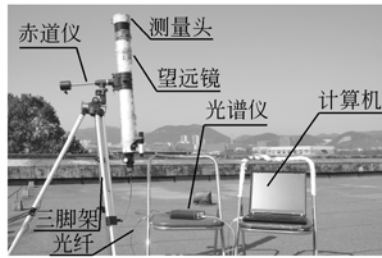


图 2 测量系统实物图

Fig. 2 Real map of measuring system

3.3 测量方法

利用现有天空偏振光的辐射光谱测量系统进行多次测量实验,测量地点为大连理工大学机械学院东楼楼顶,地理坐标是东经 $121^\circ 36'$,北纬 $38^\circ 55'$,每次测量都在同一地点、太阳高度角约 60° 时进行的。

表 2 不同日期的天气实况

Tab. 2 Weather conditions on different dates

日期	能见度/km	大气压/hPa	天气现象
10. 11. 23	25	1 011. 4	多云
11. 3. 11	15	1 009. 9	多云
11. 4. 20	12	1 002. 4	多云
11. 4. 22	10	1 002. 5	晴
11. 4. 25	20	995. 3	多云
11. 5. 11	15	994. 5	多云
11. 5. 12	8	992. 6	局部浮沉
11. 6. 20	12	997. 2	少云
11. 6. 21	10	996. 5	晴
11. 7. 04	25	993. 4	晴
11. 7. 05	12	991. 8	晴
11. 7. 14	10	997. 6	晴
11. 7. 15	10	996. 7	晴
11. 8. 24	12	1 002. 5	多云
11. 8. 25	10	1 005. 2	多云
11. 8. 26	10	1 005. 9	晴
11. 8. 27	10	1 005. 2	多云

为了保证数据的可靠性与可对比性,先是在太阳子午面内进行天空散射光偏振特性的测量,然后再提取散射角为 90° 时对应点的偏振信息。太阳子午面在天空散射光偏振特性研究中经常作为参考平面,同时该平面的偏振分布特性具有非常强的原理性,当散射角为 90° 时偏振度可获得最大值。

实验分别针对3个波长435~465 nm、535~565 nm以及685~715 nm进行,能见度及大气压强等天气实况来源于大连市气象局网站,关于实时天气实况该网站每小时更新一次,每一次实验都会记录实时天气状况。表2给出了一些测量实验对应的实时天气状况。

4 测量结果与分析

实验测量的3个中心波长450,550,700 nm对应的实际大气压强下的气溶胶光学厚度可以按照下面公式计算得到^[16]

$$\tau = \tau_0 \frac{P}{P_0}, \quad (9)$$

其中, P 是做实验时记录的实时大气压强,标准大气压 $P_0 = 1\ 013.25$ hPa, τ_0 为标准大气压下相应波长的光学厚度。

太阳子午面内散射角为 90° 处辐射量及偏振度信息由测试系统测量获得。

实验中,3个中心波长450,550,700 nm对应的最大偏振度 P_{\max} 随气溶胶光学厚度的变化关系如图3、图4、图5所示。随着气溶胶光学厚度的增大,蓝光波段435~465 nm、绿光波段535~565 nm以及红光波段685~715 nm 3个波段对应的最大偏振度分别从43%减小到22%,从41%减小到21%,从38%减小到19%,同时下降趋势随波长的增大而越来越明显。

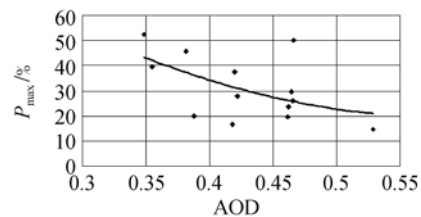


图 3 波长为 450 nm 时 P_{\max} 与 AOD 的变化关系

Fig. 3 Relationship between P_{\max} and AOD when the central wavelength is 450 nm

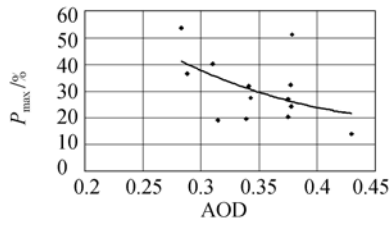


图 4 波长为 550 nm 时 P_{max} 与 AOD 的变化关系

Fig. 4 Relationship between P_{max} and AOD when the central wavelength is 550nm

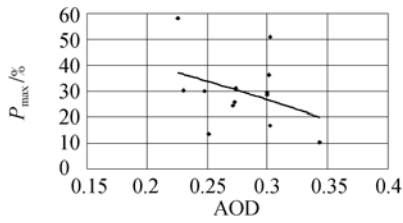


图 5 波长为 700 nm 时 P_{max} 与 AOD 的变化关系

Fig. 5 Relationship between P_{max} and AOD when the central wavelength is 700 nm

实验中,3 个中心波长 450,550,700 nm 对应的辐射量随气溶胶光学厚度的变化关系如图 6、图 7、图 8 所示。在 3 个测试波段,随着气溶胶光

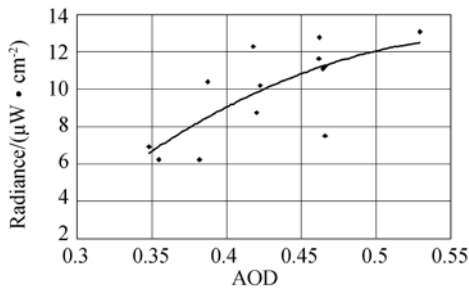


图 6 波长为 450 nm 时辐射量与 AOD 的变化关系

Fig. 6 Relationship between radiance and AOD when the central wavelength is 450 nm

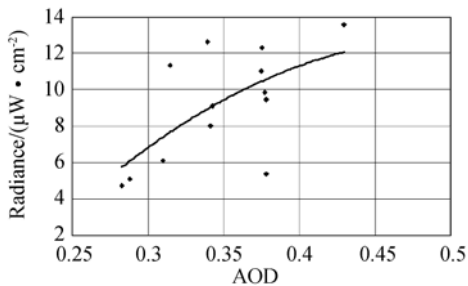


图 7 波长为 550 nm 时辐射量与 AOD 的变化关系

Fig. 7 Relationship between radiance and AOD when the central wavelength is 550 nm

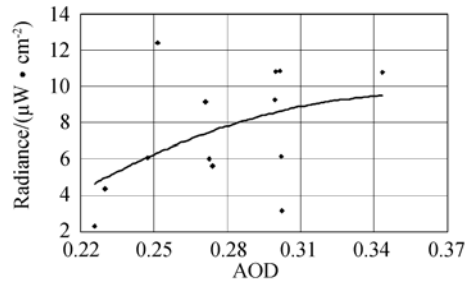


图 8 波长为 700 nm 时辐射量与 AOD 的变化关系

Fig. 8 Relationship between radiance and AOD when the central wavelength is 700 nm

学厚度的增大,天空偏振辐射量呈上升趋势,同时上升趋势随波长的增大越来越缓慢。

一般地,晴朗天空气溶胶含量要明显小于多云天空。在晴朗和有云的天气情况下,天空的最大偏振度随波长的变化趋势分别如图 9、图 10 所示。晴朗天气下, P_{max} 随波长的增大而增大;多云天气下, P_{max} 随波长的增大而减小,并且长波长对偏振度的衰减程度大,短波长处的偏振度较为稳定。

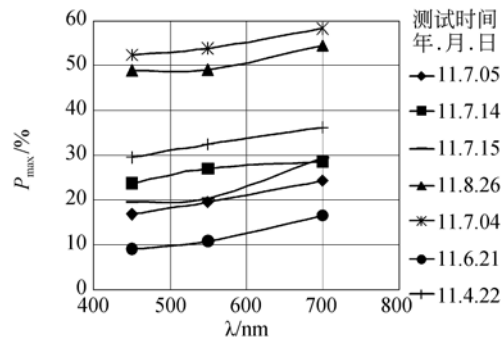


图 9 晴朗天气下 P_{max} 与波长的变化关系

Fig. 9 Relationship between P_{max} and AOD under cloud-free conditions

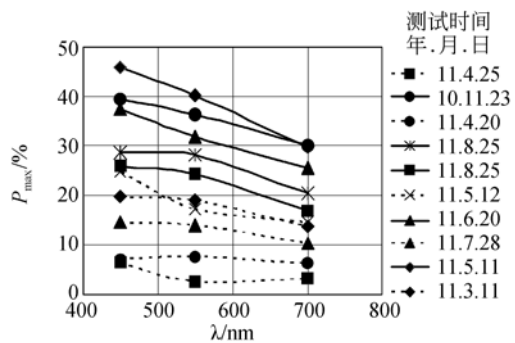


图 10 多云天气下 P_{max} 与波长的变化关系

Fig. 10 Relationship between P_{max} and AOD under cloudy conditions

5 结 论

本文通过实验测量,获得了不同能见度同一太阳高度角情况下3个典型波段大气气溶胶光学厚度对天空偏振辐射的影响。由于目前气溶胶的观测研究还不成熟,这里气溶胶的光学厚度计算采用了理论计算的方法,在误差允许的情况下可以得出如下结论:

(1)随着气溶胶光学厚度的增大,偏振度不断减小,并且随波长的增大,下降趋势越来越明显。当气溶胶光学厚度在0.25~0.55之间逐渐增大时,最大偏振度下降了约50%,所以较大的气溶胶光学厚度和较高的波长都是非常不利于偏振光

导航的;

(2)气溶胶光学厚度越大,辐射强度越大,因为此时天空散射的比较明显;同时气溶胶光学厚度越大,辐射强度随波长的变化率越小;

(3)晴朗天气下,偏振度随波长的增大而增大;多云天气下,偏振度随波长的增大而减小,并且长波长对偏振度的衰减程度较大,由此验证了可见光中的蓝光波段更适合偏振光导航^[17]及多云等气溶胶含量高的天气不利于偏振导航这一结论。

本文通过大量测量实验,获得了一些实际天空偏振辐射的数据,这是弄清实际天空偏振辐射模式的基础。下一步工作是引入更多气溶胶特性,并研究其对天空偏振辐射的影响,从而建立实际天空偏振辐射模型,提高偏振导航精度。

参考文献:

- [1] COULSON K L. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere* [M]. Hampton, VA: A. Deepak Pub, 1988.
- [2] 孙晓兵,洪津,乔廷利. 大气散射辐射偏振特性测量研究[J]. 量子电子学报, 2005, 22(1): 111-115.
SUN X B, HONG J, QIAO Y L. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(1): 111-115. (in Chinese)
- [3] SMITH G S. The polarization of skylight: An example from nature [J]. *Am. J. Phys*, 2007, 75(1): 25-35.
- [4] CHENG X, WANG X ZH. Numerical study on the wavelength-dependent polarization of light scattered by aqueous droplets for RGB spectrums [J]. *Opt. Int. J. Light Electron. Opt*, 2010, 121(11): 974-979.
- [5] 曹楠楠. 应用于仿生导航的天空散射光的偏振特性研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008.
CAO N N. *Research on polarized characteristics of scattering skylight for the bionic navigation* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [6] HEGEDUS R, AKESSON S, HORVATH G. 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.
- [7] HEGEDUS R, AKESSON S, WEHNER R, *et al.*. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies [J]. *Proc. R. Soc. A*, 2007, 463: 1081-1095.
- [8] HORVATH G, BARTA A, GAL J, *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection [J]. *Appl. Opt*, 2002, 41(3): 543-559.
- [9] BARTA A, HORVATH G. Why is it advantageous to perceive the polarization of down welling light under clouds and canopies in the UV [J]. *Theor Biol*, 2004, 226(4): 429-437.
- [10] CHU J K, ZHAO K CH. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation [J]. *Sensors and Actuators*, 2008, 148(1): 75-82.
- [11] 晏磊,关桂霞,陈家斌,等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 616-620.
YAN L, GUAN G X, CHEN J B, *et al.*. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4): 616-620. (in Chinese)
- [12] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 1997.
SHENG P X. *Atmospheric Physics* [M]. Beijing: Beijing University Press, 1997. (in Chinese)
- [13] 邱金桓,林耀荣. 关于中国大气气溶胶光学厚度的

一个参数化模式[J]. 气象学报, 2001, 59(3):368-372.

QIU J H, LIN Y R. A parameterization model of aerosol optical depths in China [J]. *Meteorological Journal*, 2001, 59(3):368-372. (in Chinese)

- [14] 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.

CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1431-1435. (in Chinese)

- [15] 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.

YAO H Y. *Research on skylight polarisation for the bionic micro-nano navigation system* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)

- [16] ALLEN C W. *Astrophysical Quantities* [M]. U. K.: Athlone Press, London, 1963:291-295.

- [17] 关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 等. 天空偏振光分布的实验研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(4):459-463.

GUAN G X, YAN L, CHEN J B, *et al.*. Research on sky polarized light distribution [J]. *Bing Gong Journal*, 2011, 32(4):459-463. (in Chinese)

作者简介:



褚金奎(1965—),男,辽宁大连人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



支 炜(1983—),女,辽宁锦州人,博士研究生,2009年于大连交通大学获得硕士学位,主要从事偏振导航系统研究。E-mail: zhiweihappy@163.com



王 威(1986—),男,河南周口人,硕士研究生,2010年于郑州大学获得学士学位,主要从事天空光偏振测试技术及仪器的研究。E-mail: weiwangtianxia111@163.com



高启升(1986—),男,辽宁大连人,硕士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事天空光偏振测试技术及仪器的研究。E-mail: achan_123@126.com



崔 岩(1967—),女,辽宁大连人,硕士,副教授,1989年于大连理工大学获学士学位,2003于德国卡尔斯鲁厄应用科学大学获第二硕士学位,主要从事传感器和精密测量技术等方面的研究。E-mail: yanc@dlut.edu.cn