

激光与光电子学进展

曙暮光影响的大气偏振模式建模方法研究

韦坤¹, 范之国^{1*}, 金海红^{1,2}, 桂策定¹, 董万卷¹¹合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601;²安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601

摘要 针对现有大气偏振模式理论模型单独考虑太阳或月亮的影响, 无法充分描述晴朗天气下黎明和黄昏过渡期间天空偏振模式的问题, 提出了一种曙暮光影响的大气偏振模式建模方法。该方法引入太阳和月亮的影响, 以太阳和月亮位置求解的 Stokes 矢量为基础, 同时考虑了实际天空中大气粒子多次散射的因素, 对 Stokes 矢量优化; 分析太阳和月亮对大气偏振模式的影响, 确定了太阳和月亮的影响权重; 利用偏振角表征大气偏振模式。结果表明, 所提模型的仿真结果与实测偏振角具有相同的分布和变化特性, 且保持着较高的相似度, 能够有效地表征曙暮光影响的大气偏振模式。

关键词 大气偏振模式; 曙暮光; Stokes 矢量; 偏振角; 偏振光导航

中图分类号 P427.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230748

Skylight Polarization Patterns Modelling Method Under Influence of Dawn and Twilight

Wei Kun¹, Fan Zhiguo^{1*}, Jin Haihong^{1,2}, Gui Ceding¹, Dong Wanjuan¹¹School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology,

Hefei 230601, Anhui, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract Existing theoretical models of skylight polarization patterns have problems that only consider the influence of the sun or the moon alone and could not adequately describe the polarization patterns of the sky during the transition between dawn and dusk in clear weather. Therefore, a modelling method of skylight polarization patterns under the influence of dawn and twilight is proposed. The method introduces the influence of the sun and the moon and calculates the Stokes vectors using the position of the sun and the moon. Considering the factors of multiple scattering of atmospheric particles in the actual sky, the influence weights of the sun and the moon are determined by Stokes vector optimization. In addition, the obtained angle of polarization is used to characterize the skylight polarization patterns. The experimental results show that the simulation results of the proposed model and the measured angle of polarization have the same distribution and variation characteristics, and maintain a high degree of similarity, which can effectively characterize the skylight polarization patterns influenced by dawn and twilight.

Key words skylight polarization patterns; dawn and twilight; Stokes vector; angle of polarization; polarized light navigation

1 引言

当无偏的自然光与大气中的气体分子、气溶胶、水滴等发生散射、折射、反射等诸多相互作用时, 形成了偏振光, 偏振光在大气中形成的稳定分布称为大气偏振模式。大气偏振模式在实际的大气中呈现时空连续分布规律, 其蕴含着丰富的信息, 自然界的许多生物,

如沙蚁、粪甲虫、大鼠耳蝠等都能感知大气偏振模式从而进行觅食、导航、迁徙^[1-3]。大气偏振模式的研究在大气探测^[4-5]、偏振遥感^[6-7]、自主导航^[8]等方面有重要的理论意义和应用前景。

大气偏振模式按照全天的时间变化主要分为曙光、白天太阳光、暮光和夜间月光等时段, 其中, 曙暮光是指日出前或日落后的一段时间, 此时天空光强较弱,

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-04-19; 录用日期: 2023-04-26; 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61571177)

通信作者: *fzg@hfut.edu.cn

微光环境下的大气研究是研究者关注的重点^[9]。近年来,关于大气偏振模式的研究不再局限于白天,国内外学者开始关注曙暮光时分甚至夜晚各个阶段的大气偏振模式并取得一系列丰硕的成果:2001年,Gál等^[10]使用全天空成像偏振仪,选择白天和满月夜晚几乎相同的太阳和月亮天顶角进行测量,结果表明如果太阳和月亮的天顶角相同,太阳光和月光下的 Arago 和 Babinet 中性点位置都是相同的;2004年,Ugolnikov等^[11]在 550 nm 和 700 nm 波段下对暮光天空开展了偏振测量,并将结果与不同气溶胶模式的大气辐射数值模拟数据进行了比较;2006年,Cronin等^[12]获取黄昏时天空的偏振度(DOP)和偏振角(AOP)信息,通过分析得到天空最大 DOP 值出现在距离太阳 90°处,在波长大于 600 nm 时接近 80%;2011年,Kyba等^[13]通过比较城市和乡村夜间的大气偏振模式,分析了夜晚城市光对月光偏振信息的影响;2013年,崔岩等^[14]获取了曙暮光偏振模式的分布图像,通过分析偏振模式中的子午线 and 中性点,确定了晴朗天气下太阳在曙暮光天空偏振模式形成中所起的作用;2014年,Barta等^[15]在红、绿、蓝三个波段下,使用全天空偏振成像装置分析了 72%、78% 月亮和满月出现时以及日出和黄昏时天空 DOP 和 AOP 的变化情况;2020年,Yang等^[16]获取了“超级蓝血月”的天空偏振模式,通过对比瑞利散射模型仿真的天空偏振模式,分析了 DOP、AOP 和中性点的变化情况。通过分析上述文献,对曙暮光期间的大气偏振模式研究主要集中在外场实验的观测与分析,并没有考虑晴朗天气下的建模问题。

在晴朗天气下,曙暮光期间的大气偏振模式是太阳和月亮共同影响的结果,然而现有的建模方法仅考虑太阳或者月亮的影响,无法有效表征大气偏振模式。因此本文同时考虑太阳和月亮的影响,提出了一种曙暮光影响的大气偏振模式建模方法。该方法基于地基对空观测模式,通过求解给定太阳和月亮位置的 Stokes 矢量,并考虑多次散射对其进行优化;分析太阳和月亮对大气偏振模式的影响,确定了太阳和月亮的影响权重;从 Stokes 矢量中计算出 AOP 模式,实现了对曙暮光影响的大气偏振模式建模,并通过开展外场测量实验验证方法的有效性和稳定性。

2 曙暮光影响的大气偏振模式建模

2.1 Stokes 矢量的求解和优化

晴朗天气下当黎明或者黄昏阶段太阳低于地平线时,阳光虽然不能直射到地球的表面,但是可以直接照射到高空的大气层,并且与大气分子等散射粒子作用形成散射光,散射光向下传播会照亮低空的大气层,仍然会对天空的光照强度有所影响,天空因此呈现出一定的亮度。当天空无月时,大气偏振模式的分布完全由散射阳光决定;当天空有月时,在日落过程中,月光

作为天空的光源之一会影响大气偏振模式的分布,散射在大气中的阳光的强度会逐渐减弱,逐渐被月光的强度所压制,由散射阳光影响的大气偏振模式逐渐转变为由月光影响的大气偏振模式,日出阶段的变化过程与之相反。因此在黎明和黄昏过渡阶段,随着太阳和月亮相对位置的变化,大气偏振模式的主导因素也在随之改变。

大气偏振模式三维空间坐标系如图 1 所示,其中: S 点表示太阳位置; M 点表示月亮位置; Z 轴正方向的无穷远处为天顶;坐标原点 O 表示观察者的位置; X、Y 和 Z 轴的正方向分别指向正东、正北和天顶方向; γ_s 、 γ_m 分别为太阳、月亮与被观测点之间的散射角。太阳在坐标系中的坐标为 $S(r, \theta_s, \varphi_s)$, θ_s 为太阳的天顶角, φ_s 为太阳的方位角。月亮在坐标系中的坐标为 $M(r, \theta_m, \varphi_m)$, θ_m 为月亮的天顶角, φ_m 为月亮的方位角。 $A(r, \theta, \varphi)$ 是天球面上任意一点,其中: θ 为 A 点处的天顶角; φ 为 A 点处的方位角,此时天空的偏振模式受到太阳和月亮的共同影响。

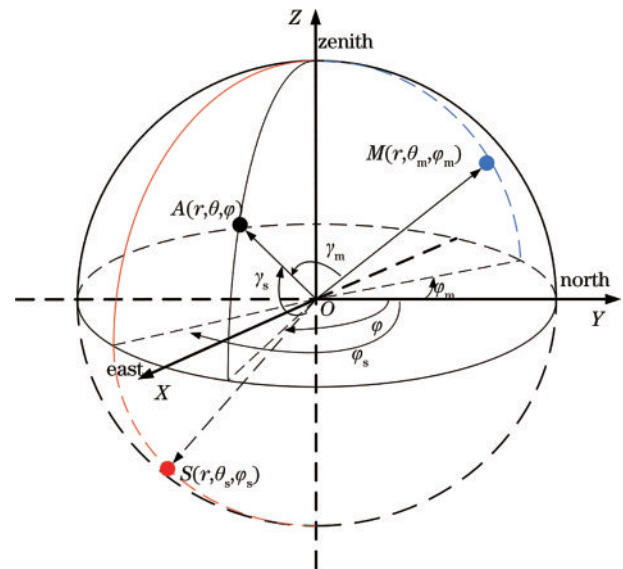


图 1 大气偏振模式三维空间坐标系

Fig. 1 Three-dimensional spatial coordinate system of skylight polarization patterns

Stokes 矢量可用于描述光波的强度和偏振态,利用 S_s 、 S_m 分别表示由太阳和月亮产生的 Stokes 矢量。由于 Stokes 矢量的分量是具有强度的量纲实数,可以直接叠加,利用 α 、 β 分别表示太阳光和月光对大气偏振模式的影响权重,因此天空中各点处的 Stokes 矢量 S_{total} 表示为

$$S_{\text{total}} = \alpha S_s + \beta S_m. \quad (1)$$

Stokes 矢量包含 4 个分量 $S = (I \quad Q \quad U \quad V)^T$, 其中: I 为原始的光强; Q 为 0° 与 90° 方向上的偏振分量之差; U 为 45° 与 135° 方向上的偏振分量之差; V 为右旋与左旋圆偏振分量之差。自然界大气中的圆偏振含

量极少,一般忽略不计,则式(1)表示为

$$\mathbf{S}_{\text{total}} = \begin{bmatrix} I_{\text{total}} \\ Q_{\text{total}} \\ U_{\text{total}} \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} I_m \\ Q_m \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha I_s + \beta I_m \\ \alpha Q_s + \beta Q_m \\ \alpha U_s + \beta U_m \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: I_s 和 I_m 分别为太阳和月亮的原始光强; Q_s 、 Q_m 、 U_s 、 U_m 是由太阳和月亮产生的 Q 、 U 分量。

DOP和AOP是大气偏振模式显著的特征,受太阳和月亮共同影响的AOP(χ_{total})、DOP(P_{total})可表示为

$$\chi_{\text{total}} = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\alpha U_s + \beta U_m}{\alpha Q_s + \beta Q_m} \right), \quad (3)$$

$$P_{\text{total}} = \frac{\sqrt{(\alpha Q_s + \beta Q_m)^2 + (\alpha U_s + \beta U_m)^2}}{\alpha I_s + \beta I_m}. \quad (4)$$

相关研究表明,DOP对大气环境变化更为敏感,容易被环境变化干扰^[17],同时在实际大气中,由于一些不符合瑞利散射的粒子的存在,以及粒子间的多次散射和环境等因素的影响,天空中的实际最大DOP难以定量确定。而AOP信息更为稳定,大气中的气溶胶对AOP几乎没有影响^[18],等AOP线呈现出明显的“∞”字形分布,因此通过式(3)计算AOP以表征大气偏振模式。当式(3)中的 $\alpha=1$ 、 $\beta=0$ 时,即为曙暮光天空无月时的天空AOP模式,计算前需要获取分别由太阳和月亮产生的 Q 、 U 分量。

根据瑞利散射模型,只有太阳影响大气偏振模式时,可计算出天空中任意一点 $A(r, \theta, \varphi)$ 的DOP(P)与AOP(χ):

$$P = P_{\text{max}} \frac{\sin^2 \gamma_s}{1 + \cos^2 \gamma_s}, \quad (5)$$

$$\tan \chi = \frac{\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s}{\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s}, \quad (6)$$

式中: P_{max} 为天空中实际的最大DOP值,理想情况下

$$Q_s = \frac{3}{4} P_{\text{max}} \sin^2 \gamma_s \frac{[\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2 - [\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2}{[\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2 + [\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2}, \quad (11)$$

$$U_s = \frac{3}{4} P_{\text{max}} \sin^2 \gamma_s \frac{2 \sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s [\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]}{[\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2 + [\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s]^2}. \quad (12)$$

晴朗夜空中的气体分子的体积较小,主要发生瑞利散射,符合瑞利散射理论模型^[19-20],因此当月亮单独影响天空偏振模式时,天空中任意一点的 Q_m 、 U_m 分量可由式(11)和式(12)求解,但需要将式中的太阳位置信息换成相应的月亮位置信息。

虽然瑞利散射模型能够很好地描述晴朗天气下大气偏振模式的分布特征、变化趋势和对称性等,但是无法描述实际大气偏振模式中存在的中性点特征。在实

际的天空中,大气偏振模式分布会受到大气中粒子多次散射的作用,形成DOP为0的中性点。此外,在日出、日落阶段,太阳高度角较低,天空偏振光还会受到大气分子、气溶胶粒子多次散射的影响。对Stokes矢量 Q 、 U 分量进行优化^[21],具体表示为

$$\cos \gamma_s = \cos \theta \cos \theta_s + \sin \theta \sin \theta_s \cos(\varphi - \varphi_s). \quad (7)$$

图2给出了当太阳高度角为 45° 、方位角为 0° 时的散射角分布,其中: φ 为方位角,沿着顺时针方向从 0° 到 360° 变化; θ 为天顶角,与高度角互余,沿着半径方向变化;其他极坐标也遵守此规范。在太阳位置处的散射角为 0° ,随着天空中的被观测点远离太阳位置,其与太阳之间的散射角也逐渐增大。

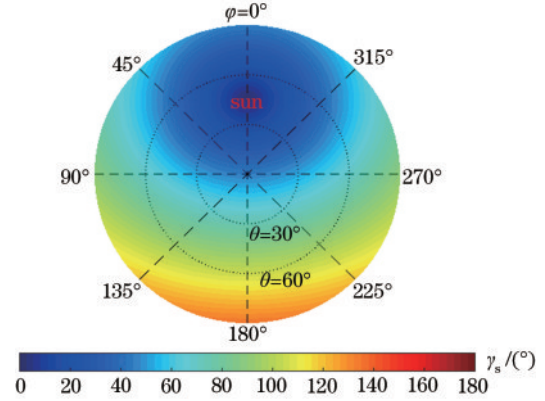


图2 散射角空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of scattering angle

考虑大气分子之间的单次散射,空间上不同散射角的光强分布为

$$I = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \gamma_s). \quad (8)$$

天空中DOP、AOP通过Stokes矢量计算的公式为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad (9)$$

$$\chi = \arctan(U/Q) / 2. \quad (10)$$

将瑞利散射模型、DOP与AOP的计算公式联立,求得天空中任意一点的 Q_s 、 U_s 分量,表示为

$$U^* = (1 - c) \cdot U + c \int_n \mathbf{M}(3, :) Id\gamma, \quad (14)$$

式中： Q^* 和 U^* 由单次散射分量和多次散射分量共同决定； c 为散射系数比，反映单次散射和多次散射

影响所占的权重；积分项表示引入的多次散射分量，描述的是观测方向上 Stokes 矢量分量受空间其他方向上散射光的影响， Ω 为除观测方向以外的空间其他方向， \mathbf{M} 为粒子散射的 Muller 矩阵^[22]，表示为

$$\mathbf{M}(\gamma) = \Delta \begin{bmatrix} 3(1 + \cos^2\gamma)/4 & -3\sin^2\gamma/4 & 0 & 0 \\ -3\sin^2\gamma/4 & 3(1 + \cos^2\gamma)/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3\cos\gamma/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta'3\cos\gamma/2 \end{bmatrix} + (1 - \Delta) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中： $\Delta = (1 - \delta)/(1 + \delta/2)$ ， δ 为去极化系数； $\Delta' = (1 - 2\delta)/(1 - \delta)$ 。对于各向同性粒子，满足 $\delta = 0$ ，而实际大气气态分子的去极化系数范围是 $\delta \in [0, 0.5]$ 。

图 3 给出了方位角为 0° 、高度角分别为 0° 、 10° 、 20° 时，考虑多次散射优化前后的 Q 、 U 分量和 AOP、DOP 仿真结果。其中， Q 、 U 分量的子午线有着明显的对称分布特性， Q 分量呈对称分布， U 分量呈反对称分布。

随着高度角的增大，其偏振特性逐渐减弱，正负偏振的分布特性保持平衡。与图 3(a) 相比，由于多次散射的退偏作用，图 3(b) 中相同高度角下 Q 、 U 分量的偏振特性减弱， P_{\max} 达不到理想情况下的 100%，Babinet、Arago 中性点分别出现在 AOP 的“ ∞ ”字形两端。在 DOP 中 Babinet、Arago 中性点是两个 DOP 为零的特殊点，在中性点区域同时以等 DOP 线呈环状分布。

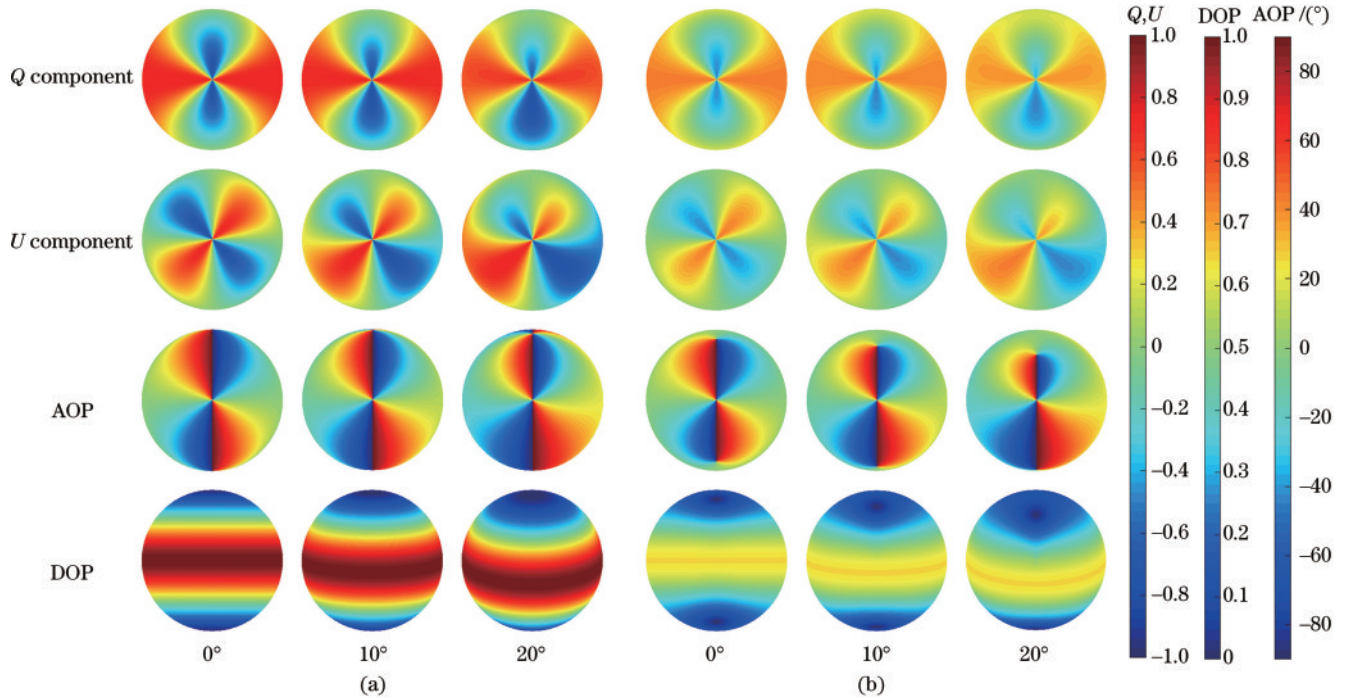


图 3 方位角为 0° 时不同高度角下的 Q 、 U 分量和 AOP、DOP。(a) Q 、 U 分量及 AOP、DOP；(b) 考虑多次散射后的 Q 、 U 分量及 AOP、DOP

Fig. 3 Q , U components and AOP, DOP at different height angles with a zimuth of 0° . (a) Q , U components and AOP, DOP; (b) Q , U components and AOP, DOP after considering multiple scattering

2.2 日月影响权重的计算

为了确定任一时刻太阳光与月光对天空偏振模式影响的权重，分别计算散射太阳光照强度和月亮光照强度占整个天空光照强度的比例，来衡量曙暮光影响下太阳和月亮对整个天空偏振模式的贡献，太阳和月亮对天空偏振模式影响的权重 α 、 β 为

$$\beta = \frac{E_{\text{moon}}}{E_{\text{moon}} + E_{\text{sun}}}, \quad (16)$$

$$E_{\text{moon}} = E_f(f) \cdot E_{\text{full}}, \quad (17)$$

$$\alpha + \beta = 1, \quad (18)$$

式中： E_{sun} 、 E_{moon} 分别表示某时刻太阳、月亮的光照强度； E_{full} 表示月亮圆盘被完全照亮时的光照强度， E_{sun} 、 E_{full} 可通过文献[23]的方法确定； $E_f(f)$ 与月亮被照明的部分有关^[24]，表示为

$$E_f(f) = 1 - [\cos(f\pi/2)]^{0.29}, \quad (19)$$

式中: f 为地球上看到的月球被太阳照明的部分, 具体表示为

$$f = \frac{1}{2}(\cos \phi + 1), \quad (20)$$

式中, ϕ 为月球的相位角, $\phi = 0^\circ$ 表示满月, $\phi = 180^\circ$ 表示新月。

综上所述, 由已知的太阳和月亮的位置求解出 Q 、 U 分量后, 根据上述方法确定太阳和月亮对天空偏振模式影响的权重, 再通过式(3)计算 AOP, 由 AOP 分布表示曙暮光影响下的大气偏振模式。

3 外场测量实验与分析

为了验证所提模型的有效性和稳定性, 分析其与实际天空偏振模式分布的一致性与差异性, 根据曙暮光期间月亮在地平线以上或以下的不同情况, 开展了外场测量实验。实验装置为一套全天候大气偏振模式测量系统^[25], 由 Sigma8 mm F/3.5 鱼镜头、中继透镜、微距镜头、滤光片旋转器、三通道相机组成。鱼镜头的成像方式为等距成像, 有效视场角为 142° 。

外场测量实验主要步骤为:

- 1) 调节设备水平, 使鱼镜头的成像中心正对着天顶方向;
- 2) 将设备的体轴与地理的正北方向对齐, 并固定

设备;

3) 根据实验时间、光强、周围环境等情况, 设置相机的参数并获取 0° 、 60° 、 120° 偏振方向的大气光强图像 I_0 、 I_{60} 、 I_{120} ;

4) 计算得到 Stokes 矢量的 I 、 Q 、 U 分量:

$$\begin{cases} I = 2(I_0 + I_{60} + I_{120})/3 \\ Q = 2(2I_0 - I_{60} - I_{120})/3; \\ U = 2\sqrt{3}(I_{60} - I_{120})/3 \end{cases} \quad (21)$$

5) 分别利用式(9)、式(10)计算出当前观测时刻天空的 DOP 和 AOP。

3.1 无月时曙暮光期间实验

实验地点选择合肥工业大学翡翠湖校区图书馆前操场(东经 $117^\circ 19' 72''$ 、北纬 $31^\circ 77' 10''$), 曙光实验的时间为 2022 年 3 月 10 日, 天气晴朗, 早晨日出时间为 06:32、月出时间为 10:57; 暮光实验的时间为 2022 年 11 月 10 日, 天气晴朗, 傍晚日落时间为 17:14、月出时间为 18:27。在上述时间内太阳升起前和落山后, 月亮均未出现在地平线以上, 此时的天空偏振模式由太阳光主导。根据文献[21], 仿真实验选取的气溶胶参数的组分半径 $r = 0.692 \mu\text{m}$ 、复折射系数 $m = 1.53 + 0.008i$, 图 4 为波长 488 nm 时所选气溶胶和瑞利散射的散射相位函数和偏振相位函数。

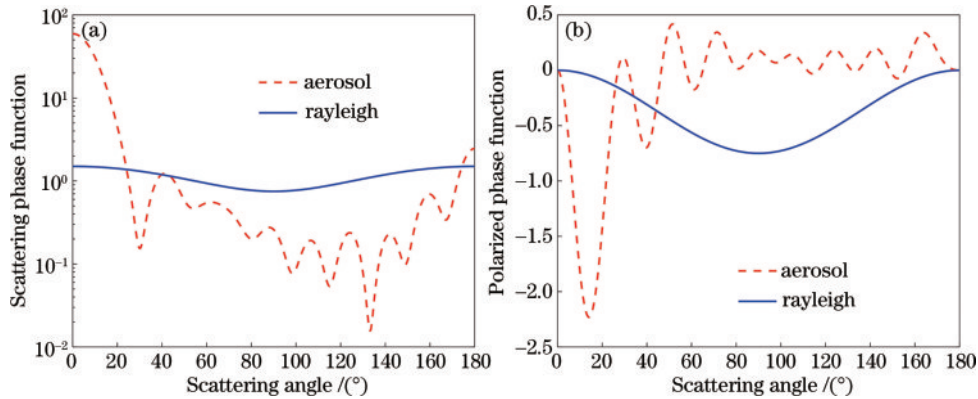


图 4 粒子的散射相位函数与偏振相位函数。(a) 散射相位函数; (b) 偏振相位函数

Fig. 4 Scattering phase function and polarization phase function of particles. (a) Scattering phase function; (b) polarized phase function

图 5、图 6 为天空无月时曙暮光阶段部分时刻仿真和实测的 AOP, 在太阳升起前和落山后的一段时间内, 实测的 AOP 形态清晰, 仿真结果与实测 AOP 形态上相似度高, 具有相同的分布和变化特性, 等 AOP 线呈现出明显的“∞”字形分布。为了定量比较所提方法仿真的 AOP 与实测 AOP 之间的一致性和差异性, 定义 $\chi_{\text{measurement}} - \chi_{\text{simulation}}$ 的误差绝对值在 ζ 之间的像素点作为相似的数据, 计算这些像素点占所有有效像素点的比例, 仿真 AOP 与实测 AOP 相似度的指标为

$$\chi_{\text{similarity}} = \frac{N(|\chi_{\text{measurement}} - \chi_{\text{simulation}}| < \zeta)}{N(A_{\text{All}})}, \quad (22)$$

式中: $N(A_{\text{All}})$ 为所有有效像素点数量; $N(\cdot)$ 为像素点个数。AOP 的周期为 180° , ζ 使用周期的 5% 作为判定阈值。

图 7 为天空无月时仿真 AOP 与实测 AOP 之间的相似度变化曲线, 该时间段内相似度保持着较高的水平, 但是在 06:05 前和 17:50 后相似度有所下降, 主要因为此时太阳距离地平线较远, 天空整体的亮度较暗。为了弥补采集装置的曝光不足, 需要增加曝光时间或设置更高的相机感光度的数值。但是随着曝光时间的增加, 周围环境的杂光也更容易被设备采集; 而设置较高的相机感光度数值, 会增加传感器带来的热噪声, 从而使解算的 AOP 中存在许多噪声, 导致与实测 AOP

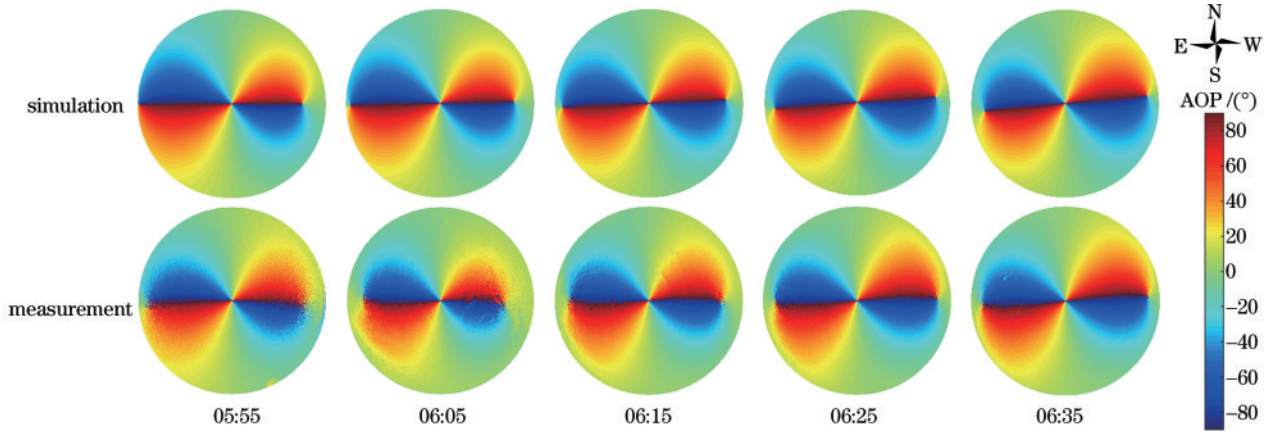


图 5 天空无月时曙光阶段仿真和实测的 AOP

Fig. 5 Simulated and measured AOP of the dawn period when the sky is moonless

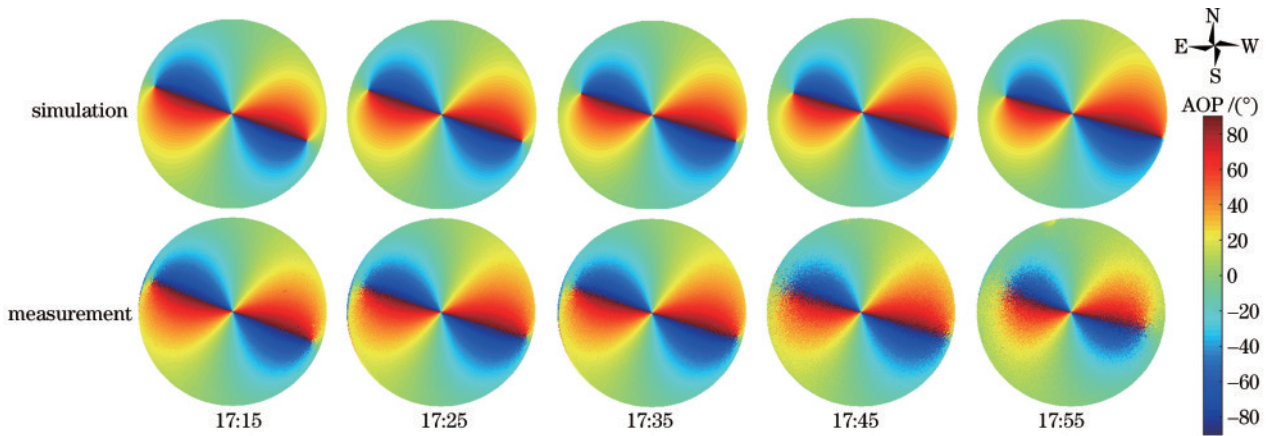


图 6 天空无月时暮光阶段仿真和实测的 AOP

Fig. 6 Simulated and measured AOP of the twilight period when the sky is moonless

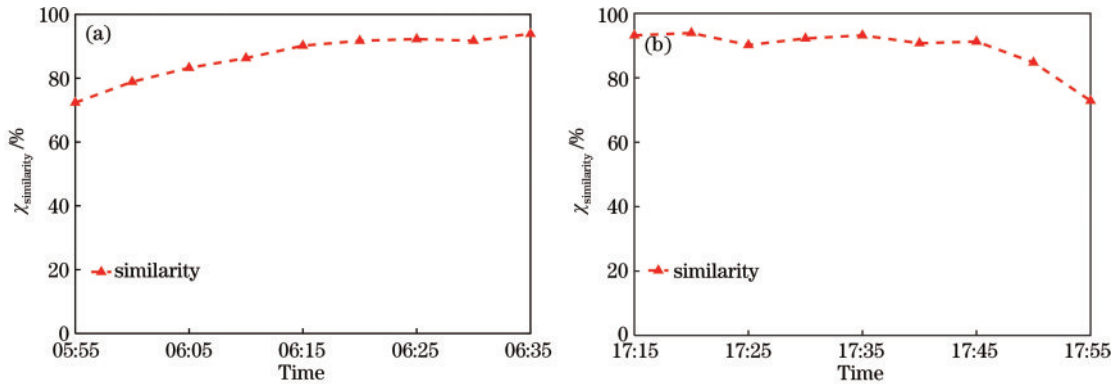


图 7 曙暮光无月期间相似度曲线。(a)曙光期间相似度曲线;(b)暮光期间相似度曲线

Fig. 7 Similarity curves during dawn and twilight when the sky is moonless. (a) Similarity curve during dawn; (b) similarity curve during twilight 之间的相似度降低。

3.2 有月时曙暮光期间实验

实验地点选择济南市槐荫区席家庄村(东经 116° 82' 32"、北纬 36° 70' 20"), 实验时间为 2021 年 5 月 26 日 18:30 到 5 月 27 日 06:00, 天气晴朗, 部分时刻的大气偏振模式 AOP、DOP 如图 8 所示。

暮光阶段, 根据太阳和月亮的位置信息, 计算太阳和月亮对大气偏振模式影响权重, 结果如表 1 所示, 实

测和仿真的 AOP 结果如图 9 所示, 太阳与月亮影响权重、仿真与实测 AOP 的相似度变化曲线如图 10 所示。

从表 1 和图 10 可以得出: 在开始阶段太阳的余晖完全影响着天空偏振模式; 至 20:00, 太阳高度角降至 -7.4° , 月亮开始对天空偏振模式有所影响; 随着时间的推移, 太阳对天空偏振模式的影响逐渐降低, 至 20:50, 天空偏振模式完全转变为由月亮主导。开始阶段由于太阳和月亮光照强度的量级差别较大, 短时间

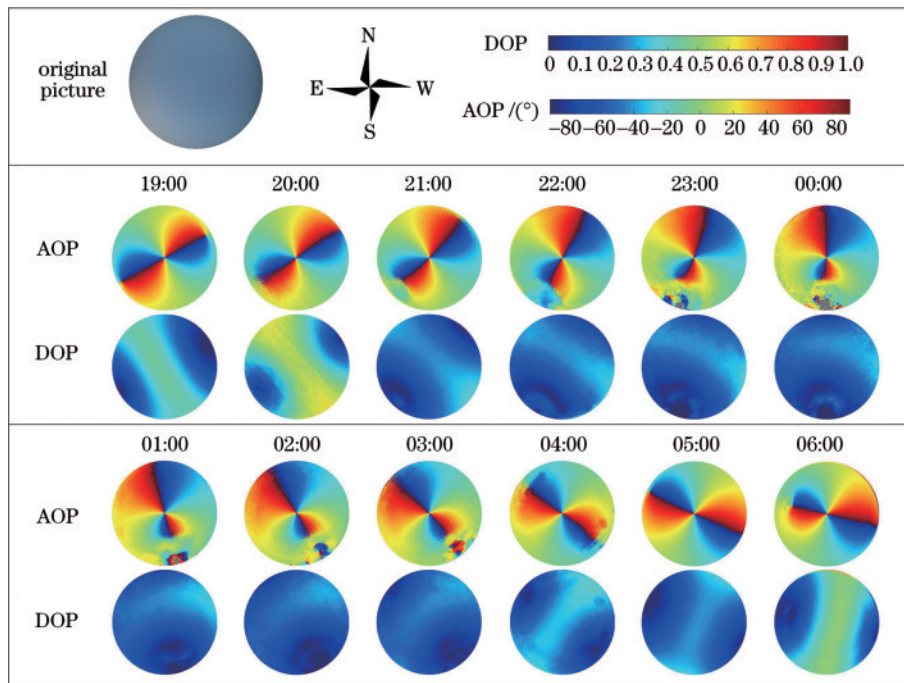


图 8 部分时刻大气偏振模式图像

Fig. 8 Images of skylight polarization patterns at some moments

表 1 暮光时期太阳和月亮的位置和影响权重

Table 1 Positions and influence weights of the sun and the moon during twilight

Time	Sun postion	Moon postion	α	β
20:00	(-7.4°, 303.5°)	(6.3°, 122.9°)	0.970	0.030
20:05	(-8.3°, 304.4°)	(7.1°, 123.7°)	0.919	0.018
20:10	(-9.1°, 305.2°)	(7.9°, 124.5°)	0.821	0.179
20:15	(-9.9°, 306.0°)	(8.7°, 125.3°)	0.661	0.339
20:20	(-10.7°, 306.9°)	(9.4°, 126.5°)	0.472	0.528
20:25	(-11.5°, 307.8°)	(10.2°, 125.5°)	0.290	0.710
20:30	(-12.3°, 308.6°)	(11.0°, 127.8°)	0.180	0.820
20:35	(-13.1°, 309.5°)	(11.7°, 127.0°)	0.106	0.894
20:40	(-13.8°, 310.4°)	(12.5°, 129.6°)	0.067	0.933
20:45	(-14.6°, 311.3°)	(13.2°, 130.4°)	0.040	0.960
20:50	(-15.3°, 312.3°)	(13.9°, 131.3°)	0	1.000

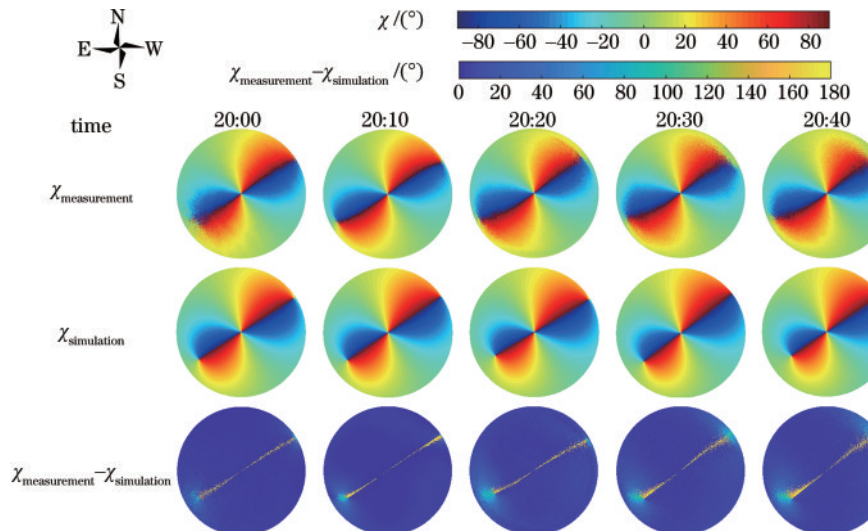


图 9 暮光期间部分时刻实测与仿真的 AOP

Fig. 9 Measured and simulated AOP for some moments during twilight

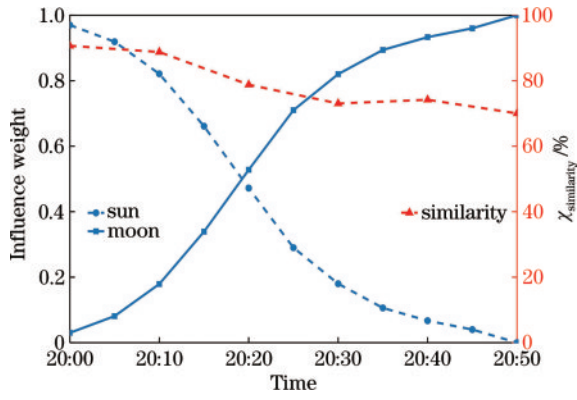


图 10 暮光期间影响权重和相似度变化情况

Fig. 10 Changes in influence weight and similarity of twilight

内日月光照强度的相对变化不会引起二者影响权重的快速变化,但是随着太阳逐渐远离地平线,日月的光照强度逐渐趋于同一量级,短时间内光强相对变化使二者影响权重的变化加快。从图 9 和图 10 可以得出,实测与仿真 AOP 之间形态相似,变化趋势和分布基本一致,20:00 时两者的相似度最高,可达 90.66%。随着太阳高度角的降低,相似度逐渐下降,主要原因是天空光强逐渐变弱,采集图像时需要调节相机的光圈、曝光时间、增益等参数,在放大天空偏振信号的同时,也会将周围环境无关的噪声信息放大,导致实测与仿真

AOP 相似度的降低。

曙光阶段,根据太阳和月亮的位置信息,计算太阳和月亮对大气偏振模式的影响权重,结果如表 2 所示,实测和仿真的 AOP 结果如图 11 所示,太阳与月亮影响权重、仿真与实测 AOP 的相似度变化曲线如图 12 所示。

表 2 曙光时期太阳和月亮的位置和影响权重

Table 2 Positions and influence weights of the sun and the moon during dawn

Time	Sun postion	Moon postion	α	β
03:40	(-13.7°, 49.6°)	(15.3°, 225.2°)	0.051	0.949
03:45	(-13.0°, 50.5°)	(14.6°, 226.1°)	0.080	0.920
03:50	(-12.2°, 51.4°)	(13.9°, 226.9°)	0.137	0.863
03:55	(-11.4°, 52.3°)	(13.1°, 229.5°)	0.235	0.765
04:00	(-10.6°, 53.1°)	(12.4°, 228.7°)	0.381	0.619
04:05	(-9.8°, 54.0°)	(11.7°, 229.5°)	0.566	0.434
04:10	(-9.0°, 54.8°)	(10.9°, 230.4°)	0.791	0.209
04:15	(-8.2°, 55.7°)	(10.2°, 231.5°)	0.875	0.125
04:20	(-7.3°, 56.5°)	(9.4°, 232.0°)	0.961	0.039
04:25	(-6.5°, 57.3°)	(8.6°, 232.8°)	0.981	0.019
04:30	(-5.7°, 58.1°)	(7.9°, 233.6°)	1.000	0

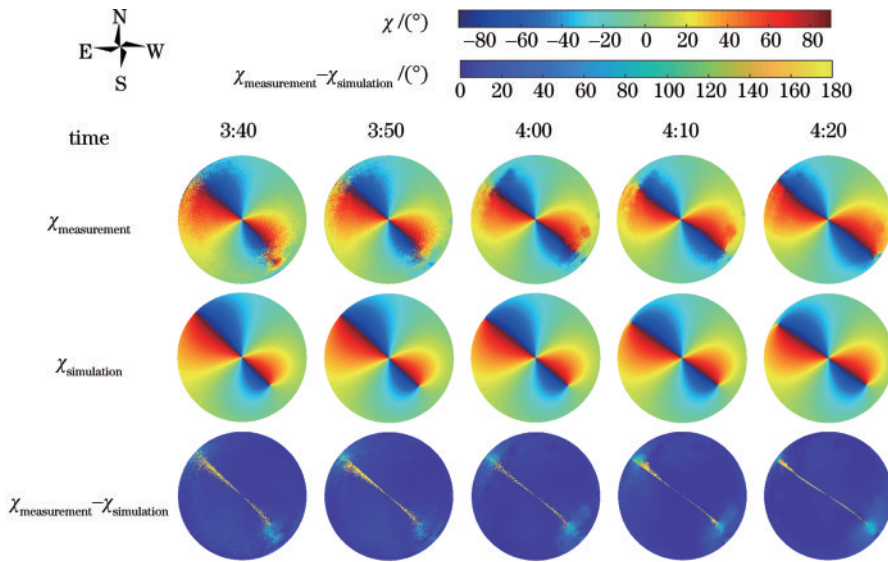


图 11 曙光期间部分时刻实测与仿真的 AOP

Fig. 11 Measured and simulated AOP for some moments during dawn

从表 2 和图 12 可以得出:至 03:40,太阳高度角升至 -13.7°,太阳开始对天空偏振模式有所影响;随着太阳高度角逐渐增大,对天空偏振模式的影响越来越明显;至 04:30,整个天空的偏振模式完全由太阳主导,虽然此时月亮高度角仍保持一定的高度,但是月亮所发出的光照强度相对于太阳来说可以忽略不计。两者

影响权重的变化速度与暮光阶段类似,开始和结束阶段权重变化的较慢,中间一段时间内变化较快。从图 11 和图 12 可以得出,实测与仿真 AOP 之间具有相同的分布和变化特性,04:30 时两者的相似度最高,可达 91.87%,相似度随太阳高度角的变化规律与暮光期间相似。

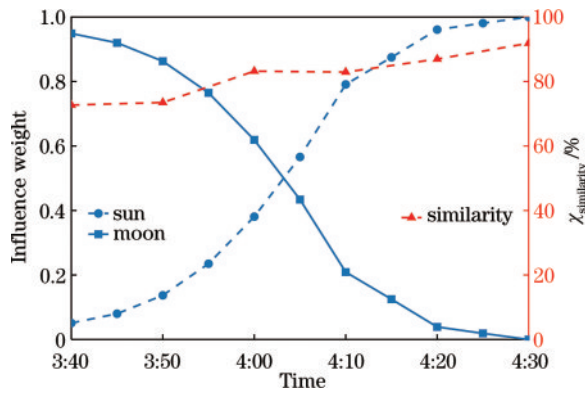


图 12 曙光期间影响权重和相似度变化情况

Fig. 12 Changes in influence weight and similarity of dawn

4 结 论

在晴朗天气下,曙光期间大气偏振模式是太阳和月亮共同影响的结果,现有大气偏振模式理论模型单独考虑太阳或月亮的影响,无法充分描述黎明和黄昏过渡期间的天空偏振模式。本文同时考虑了太阳和月亮的影响,通过求解给定太阳和月亮位置的 Stokes 矢量并考虑多次散射的因素,对 Stokes 矢量优化;分析太阳和月亮对大气偏振模式的影响,确定太阳和月亮的影响权重;利用 AOP 表征大气偏振模式,并且开展了曙光期间天空有月和无月情况下的外场测量实验。结果表明,仿真 AOP 与实测 AOP 具有相同的分布和变化特性。该方法提高了仿真结果与实测数据的一致性,完善了大气偏振模式建模理论,对仿生偏振光导航的后续研究有重要的意义。此外,未来可以通过模型的仿真实验研究微光环境下气溶胶粒子对大气偏振模式的影响,以实现大气环境变化的感知。

参 考 文 献

[1] Lebardt F, Ronacher B. Interactions of the polarization and the Sun compass in path integration of desert ants[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2014, 200(8): 711-720.

[2] Dacke M, el Jundi B. The dung beetle compass[J]. *Current Biology*, 2018, 28(17): R993-R997.

[3] Greif S, Borissov I, Yovel Y, et al. A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4488.

[4] 提汝芳, 樊依哲, 黄红莲, 等. 基于高分五号卫星 DPC 和 AERONET 站点数据的地表 BPDF 模型对比分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1828003.

Ti R F, Fan Y Z, Huang H L, et al. Comparative analysis of BPDF land surface models based on DPC measurements of Gaofen-5 satellite and data of AERONET sites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1828003.

[5] 孟宇飞, 王晓玲, 刘畅, 等. 四分暗通道均值比较法的双角度偏振图像去雾[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 0411001.

Meng Y F, Wang X L, Liu C, et al. Dehazing of dual angle polarization image based on mean comparison of quartering dark channels[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(4): 0411001.

- [6] Yan L, Li Y F, Chen W, et al. Temporal and spatial characteristics of the global skylight polarization vector field[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2193.
- [7] Hou W Z, Li Z Q, Wang J, et al. Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: information content analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(4): 2215-2243.
- [8] 华豆, 范之国, 金海红, 等. 成像系统中偏振片初始方向对大气偏振模式测量精度的影响与校正方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2211003.
- Hua D, Fan Z G, Jin H H, et al. Influence of initial direction of polarizer on measurement accuracy of atmospheric polarization mode in imaging system and its correction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2211003.
- [9] 胡秀清, 徐寒列, 雷松涛, 等. 风云三号黎明星微光探测及应用综述[J]. *光学学报*, 2022, 42(12): 1200003.
- Hu X Q, Xu H L, Lei S T, et al. Overview of low light detection and application of FY-3 early morning satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(12): 1200003.
- [10] Gál J, Horváth G, Barta A, et al. Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full Moon: comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D19): 22647-22653.
- [11] Ugolnikov O S, Postylakov O V, Maslov I A. Effects of multiple scattering and atmospheric aerosol on the polarization of the twilight sky[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, 88(1/2/3): 233-241.
- [12] Cronin T W, Warrant E J, Greiner B. Celestial polarization patterns during twilight[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5582-5589.
- [13] Kyba C C M, Ruhtz T, Fischer J, et al. Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116 (D24): D24106.
- [14] 崔岩, 高启升, 褚金奎, 等. 太阳光与月光对曙光偏振模式的影响[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 34-39.
- Cui Y, Gao Q S, Chu J K, et al. Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 34-39.
- [15] Barta A, Farkas A, Száz D, et al. Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5193-5204.
- [16] Yang Y T, Hu P W, Yang J A, et al. Clear night sky polarization patterns under the super blue blood moon[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 372-385.
- [17] Hegedüs R, Åkesson 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]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463(2080): 1081-1095.
- [18] 崔岩, 张西光, 周鑫昌, 等. 气溶胶对天空光偏振分布的影响[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601001.
Cui Y, Zhang X G, Zhou X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of sky light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601001.
- [19] 崔岩, 陈小龙, 褚金奎, 等. 晴朗天气下满月偏振模式的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1012002.
Cui Y, Chen X L, Chu J K, et al. Study on polarization pattern of full moonlight in clear sky[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012002.
- [20] 陈辰. 晴朗天气下满月月光偏振模式的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
Chen C. Study on polarization pattern of full moonlight in clear sky[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [21] 吴良海, 张骏, 范之国, 等. 多次散射因素影响下天空偏振光模式的解析模型[J]. *物理学报*, 2014, 63(11): 114201.
Wu L H, Zhang J, Fan Z G, et al. An analytical model for skylight polarization pattern with multiple scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(11): 114201.
- [22] Hansen J E, Travis L D. Light scattering in planetary atmospheres[J]. *Space Science Reviews*, 1974, 16(4): 527-610.
- [23] Janiczek P M, DeYoung J A. Computer programs for sun and moon illuminance: with contingent tables and diagrams[M]. Washington, D. C.: U. S. Naval Observatory, Nautical Almanac Office, 1987.
- [24] Palmer G, Johnsen S. Downwelling spectral irradiance during evening twilight as a function of the lunar phase[J]. *Applied Optics*, 2014, 54(4): B85-B92.
- [25] 孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实时测量系统[J]. *光电工程*, 2016, 43(9): 45-50, 55.
Sun J, Gao J, Huai Y, et al. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(9): 45-50, 55.