0254-6124/2025/45(1)-0135-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CHEN Zhixing, GOU Wanxiang, TONG Shuai, ZHANG Mengyao, LI Chonghui. Research and Experimental Verification of Atmospheric Polarization State in the Near-infrared Band (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 135–148. CSTR:32142.14.cjss.2024–0063. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024–0063

近红外波段大气偏振态研究及实验验证*

陈智兴　勾万祥　佟　帅
张梦瑶　李崇辉

(信息工程大学地理空间信息学院　郑州　450001)

摘　要　大气偏振态研究是开展偏振探测、偏振遥感、偏振成像等应用的前提和基础. 相较于可见光波段, 近红外波段大气偏振态研究相对滞后. 已有研究多以理论分析为主, 缺乏实验验证. 为此, 本文采用短波红外图像传感器、红外镜头、红外偏振片、红外滤光片等搭建了近红外波段大气偏振测量系统, 在晴朗天气条件下对全天空900～1700 nm 近红外波段大气偏振态进行了测量. 结果表明, 在近红外波段大气呈现稳定偏振模式, 其中大气偏振角分布稳定性明显优于大气偏振度分布; 大气偏振模式与瑞利散射表征模型符合较好, 全天区 83% 的点位模型偏振角误差小于 10°, 79% 点位模型偏振度误差小于 0.1, 依托瑞利散射表征模型可有效预测各方位大气偏振态. 此外, 全天区大气整体偏振度不高, 均值为 0.13, 正午时段仅为 0.1, 与以往文献理论推导和假设存在差异, 偏振滤光技术是否适用于白昼目标探测应结合具体应用深入研究.

关键词　大气偏振模式, 瑞利散射, 近红外, 偏振度, 偏振角

中图分类号　P322

Research and Experimental Verification of Atmospheric Polarization State in the Near-infrared Band

CHEN Zhixing　GOU Wanxiang　TONG Shuai
ZHANG Mengyao　LI Chonghui

(*School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou* 450001)

Abstract　The study of atmospheric polarization is the prerequisite and foundation for polarization detection, polarization remote sensing, polarization imaging and other applications. Compared with the visible wavelength, the research on atmospheric polarization state in the near-infrared wavelength is relatively lagging behind. The existing literature is dominated by theoretical analysis and lacks experimental verification. In this paper, a short-wave infrared image sensor, an infrared lens, an infrared polarizer,

* 国家自然科学基金面上项目 (U23A20280) 和河南省自然科学基金项目 (212300410421) 共同资助

2024-04-28 收到原稿, 2024-05-21 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

an infrared filter, *etc.* are used to build a near-infrared atmospheric polarization measurement system, and the polarization state of the atmosphere in the near-infrared band of 900～1700 nm is measured in the whole sky under the sunny weather conditions. The results show that the atmosphere shows stable polarization patterns in the near-infrared band, in which the stability of the atmospheric polarization angle distribution is obviously better than that of the atmospheric polarization degree distribution; the atmospheric polarization patterns are in good agreement with the Rayleigh scattering characterization model, with 83% of the points in the whole sky area having a polarization angle error of less than 10°, and 79% of the points having a polarization degree error of less than 0.1, which makes it possible to predict the atmospheric polarization states in various directions effectively by relying on the Rayleigh scattering characterization model. In addition, the overall polarization of the atmosphere in the whole daytime area is not high, with an average value of 0.13, and only 0.1 at noon, which is different from the theoretical derivation and assumption of the previous literature, and the applicability of polarization filtering technology to the detection of daytime targets should be investigated in depth in the context of specific applications.

Key words Atmospheric polarization mode, Rayleigh scattering, Near-infrared, Degree of polarization, Angle of polarization

0 引言

太阳光经过大气层时, 因大气分子、气溶胶粒子的散射作用, 会形成具有一定分布规律的偏振光, 在全天域内呈现出稳定的大气偏振态[1]. 大气偏振态主要通过偏振度和偏振角两个属性进行描述, 是大气背景光强度信息的重要补充[2], 在目标探测、遥感、成像、导航定位等领域具有重要的应用价值, 因此也一直是广泛研究的热点问题[3–5].

近年来, 由于红外传感器技术的飞速发展[6], 研究发现在近红外波段进行目标探测、图像去雾、导航定位等具有独特优势[7–9], 近红外波段的大气偏振态也成为新的研究热点[10–12]. Zhang 等[12] 通过偏振滤光、偏振成像实验证明了大气在红外波段具有明显的偏振态; Sun 等[13] 从求解 Mueller 矩阵的角度进行了分析, 认为近红外波段光线发生瑞利散射的概率会随着波长变长而增大; Guan 等[14] 通过分析红、蓝、紫 3 个波段的天空偏振态, 认为天空偏振度会随着波长变长而增大; 但 Eshelman 等[15] 却认为, 近红外波段受气溶胶、地表反射等因素影响, 大气偏振度会随波长变长有所减弱. 上述研究都是通过可见光波段实验数据间接对近红外波段大气偏振态进行的理论推测, 缺少直接实验数据支撑, 不仅结论有效性存疑, 甚至会得出相矛盾的结论. 实际上, 随着波长变长, 大气散射模式及地表反射特性均会发生明显变化 (在近红外波段), 由于大气散射的太阳光较少, 而地表反射及气溶胶散射产生的光强保持不变, 情况与可见光波段有明显差异, 并不能简单使用可见光波段相关实验数据进行外推分析.

因此, 为了更深入准确研究近红外波段的大气偏振态, 利用短波红外相机、红外偏振片、红外镜头等设备搭建实现了一套近红外波段大气偏振测量系统, 对 900～1700 nm 典型近红外波段的全天空大气偏振情况进行测量, 基于实测数据对近红外波段大气偏振态分布特点、瑞利表征模型符合度以及全天偏振度等问题进行了深入分析, 为近红外波段的大气偏振模式理论研究及应用研究等提供了参考和依据.

1 表征模型及测量方法

1.1 大气散射特点

太阳光经过大气时会发生强烈的散射效应, 形成天空背景光. 根据大气粒子尺寸与光波长的相关关系可以将大气散射分为瑞利散射、米氏散射和几何光学散射[16]. 设入射光波长为 λ、粒子半径为 a, 令 $x=2\pi a/\lambda$, 当 $x<0.1$时, 发生瑞利散射; 当 $0.1<x<50$发生米氏散射; 当$x>50$时, 发生几何光学散射[17].

晴朗天气条件下, 大气主要成分是氮气、氧气等气体及微量的气溶胶[18]. 由于气体分子尺寸明显小于入射光波长, 大气散射主要以瑞利散射为主; 并且随

着波长λ增大, 尺度因子x变小, 发生瑞利散射概率会继续增大[13]. 根据瑞利散射理论, 设发生散射的球形粒子半径为r, 光学折射率为n, 当强度为I_0、波长为λ的太阳光入射时, 在散射角为θ, 与粒子距离为d的观测点上, 单个粒子散射光的强度为[19]

$$I(\theta)=\frac{I_0}{d^2}\times\frac{8\pi^4r^6}{\lambda^4}\left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2(1+\cos^2\theta). \tag{1}$$

由式 (1) 可知, 大气对入射光的散射与光强I_0成正比、与波长 4 次方λ^4成反比. 因此, 相比可见光波段, 近红外波段大气背景光强度较弱且偏振规律性更好. 然而受地表反射及气溶胶等因素的影响, 天空偏振态存在正极化、负极化现象, 且大气米氏散射概率也随着波长变长而增大, 因此相较于可见光波段, 大气在近红外波段偏振态将变得更为复杂.

1.2 瑞利散射表征模型

大气偏振态具有一定的规律性, 通常采用大气表征模型进行表征[20]. 目前主要的大气表征模型有瑞利散射模型[21]、Berry 模型[22]、Hannay 模型[23] 等, 其中瑞利散射表征模型形式简洁, 应用最广, 具体表达如图 1 所示. 设正南方向为 x 轴, 正西方向为 y 轴, 天顶方向为 z 轴, 建立地平坐标系$Oxyz$; 在观察点P建立以弧NP切线方向为 x 轴, P 点法线方向为 z 轴的切平面 (左手) 坐标$O_ix_iy_iz_i$系.

根据瑞利散射理论, 当太阳S的方位角、高度角为(A_s,h_s)时, 空间任意一点 $P(a_p,\ h_p)$ 的大气偏振度P、偏振角ψ及散射角θ可表示为[24]

$$\begin{cases} P(\theta)=\dfrac{I_\perp-I_\parallel}{I_\perp+I_\parallel}=\dfrac{\sin^2\theta}{1+\cos^2\theta}P_{\max},\\ \tan\psi=\dfrac{\sin h_s\cos h_p-\cos h_s\sin h_p\cos(a_p-A_s)}{\cos h_s\sin(a_p-A_s)},\\ \cos\theta=\sin h_s\sin h_p+\cos h_s\cos h_p\cos(a_p-A_s). \end{cases} \tag{2}$$

其中, $P_{\max}$表示全天空大气最大偏振度, ψ取值范围为 [–90°, 90°], 式 (2) 即为瑞利散射表征模型.

1.3 偏振态测量方法

偏振光的表示方法有三角表示法、琼斯矢量法、Stokes 矢量法和图示法, 其中 Stokes 矢量法具有方便分析、易于计算等优点[25]. 设偏振光$S=(I,Q,U,V)^{\mathrm{T}}$, I为总光强, Q 和 U 分别为两个正交方向上的线偏振光强, V 为圆偏振光强, 当入射光S_{in}穿过光学器件时, 出射光S_{out}可以表示为[26]

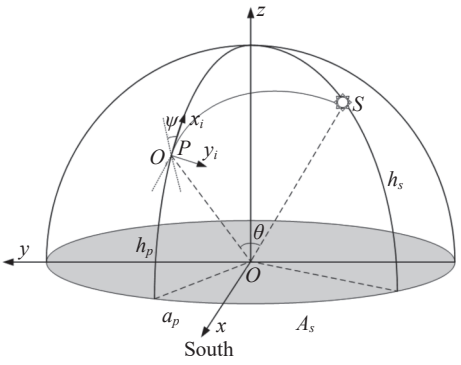


图 1 大气偏振表征模型坐标系

Fig. 1 Coordinate system of atmospheric polarization characterization mode

$$S_{\mathrm{out}}=\boldsymbol{M}\times S_{\mathrm{in}}. \tag{3}$$

式中, $\boldsymbol{M}$为4×4矩阵, 称为 Mueller 矩阵, 偏振片的 Mueller 矩阵$\boldsymbol{M}_p$为

$$\boldsymbol{M}_p=\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos2\theta & \sin2\theta & 0\\ \cos2\theta & \cos^2\!2\theta & \cos2\theta\sin2\theta & 0\\ \sin2\theta & \cos2\theta\sin2\theta & \sin^2\!2\theta & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{4}$$

式中, θ为偏振片透光轴与参考轴夹角, 于是有

$$I_{\mathrm{out}}=\frac{1}{2}(I_{\mathrm{in}}+Q_{\mathrm{in}}\cos2\theta+U_{\mathrm{in}}\sin2\theta). \tag{5}$$

式中, 下标 in 和 out 分别为入射光、出射光. 依据式 (5) 可知, 若测出三个不同方向的出射光强I_{out}, 即可检测出入射光的 Stokes 矢量. 为了便于计算, 通常可采用目标方位 $I(0°)$, $I(60°)$, $I(120°)$ 的天空背景灰度图, 计算大气背景光 Stokes 参量$[I,Q,U]^{\mathrm{T}}$为

$$\begin{cases} I=\dfrac{2}{3}\left[I(0°)+I(60°)+I(120°)\right],\\ Q=\dfrac{2}{3}\left[2I(0°)-I(60°)-I(120°)\right],\\ U=\dfrac{2}{\sqrt{3}}\left[I(60°)-I(120°)\right]. \end{cases} \tag{6}$$

依据式 (6) 计算目标方位偏振度和偏振角为[27]

$$\begin{cases} P=\dfrac{\sqrt{Q^2+U^2}}{I},\\ \psi=\dfrac{1}{2}\arctan\left(\dfrac{U}{Q}\right). \end{cases} \tag{7}$$

若以观测方位子午线为参考方向, 对图像计算得到的偏振角值ψ进行归算, 则各像元对应偏振角为

$$\psi(i,j)=\begin{cases}\psi(i,j)-\arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right), -90^\circ\leqslant\psi(i,j)\leqslant+90^\circ;\\ \psi(i,j)-\arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right)-180^\circ, \psi(i,j)>+90^\circ;\\ \psi(i,j)-\arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right)+180^\circ, \psi(i,j)<-90^\circ.\end{cases} \tag{8}$$

式中, i和j分别为图像的行列坐标, h和ω分别为以像元数表示图像的高和宽.

2 实验与数据

2.1 测量平台构建

为准确测量近红外波段全天空各方位大气偏振态, 采用 QHY990 短波红外相机、Spectrogon 900～1700 nm 红外滤光片、Thorlabs LP NIR 050 红外偏振片、Navitar optistar SWIR lenses 119180 红外镜头 (视场角为 11°×11°), 搭建大气偏振态测量平台如图 2 所示.

2.2 测量流程

2024 年 3 月 2 日在郑州某楼顶进行全天 900～1700 nm 波段大气偏振态数据采集, 天气条件如表 1 所示. 数据采集步骤如下.

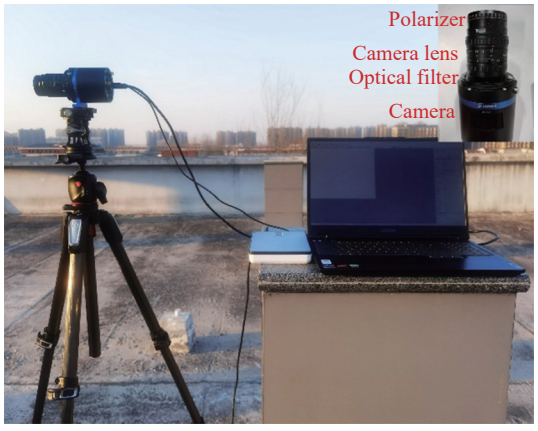


图 2 大气偏振态测量平台

Fig. 2 Measurement platform of atmospheric polarization state

步骤 1 整平仪器, 使测量平台初始方位刻度对准正北, 并将偏振片透光轴置为竖直方向.

步骤 2 依次旋转偏振片至 0°, 60°, 120°测得目标方位天区背景灰度图 I (0°), I (60°), I (120°), 并记录图像拍摄时间.

步骤 3 利用式 (6)～(8) 计算目标天区偏振度及偏振角, 取图像中心 100 pixel ×100 pixel 对应偏振度及偏振角均值作为观测天区大气偏振度、偏振角值.

步骤 4 以高度 20°, 40°, 60°, 80°, 方位角 0°, 30°, 60°, … , 330°为一测量组, 测量计算全天空各方位偏振态.

2.3 数据获取

从 07:06 LT－17:37 LT 共采集全天空偏振态数据 15 组, 每组包含 144 张图片, 具体各组测量时间段及太阳高度角、方位角变化情况如表 2 所示.

由表 2 可知, 测量时间贯穿全天各个时间段, 基本覆盖太阳方位角、高度角变化的全部情况, 可以很好地表征全天空大气偏振情况. 分别计算的各时段各天区大气偏振角值如表 3 所示.

综合表 2 和表 3 可知, 全天区各方位大气偏振角随时间不断变化, 在同一时间段全天区各方位大气偏振角差异明显, 在 1°～90°范围变动, 即使同一方位在不同时间段偏振角也会有明显不同, 例如 07:06 LT－07:38 LT 时段 (0°, 20°) 方位大气偏振角为 5°, 而 12:00 LT－12:29 LT 时段, 该方位大气偏振角为 84°. 可见准确判断、预测各方位各时间段大气偏振角大小对于开展偏振滤光、探测应用十分重要. 分别计算的各时段、各天区偏振度统计结果如表 4 所示.

由表 4 可知, 同一时间段, 不同天区对应的大气偏振度存在明显差异, 在散射角约为 90°时, 大气偏振

表 1 测量时段天气参数

Table 1 Weather parameters during measurement period

天气	日出时间	日中时间	日落时间	大气能见度	风速
晴朗无云	06:52 LT	12:37 LT	18:22 LT	9 km	西风三级
相对湿度	日间温度	AQI	PM2.5	PM10	气压
31%	3～15℃	73 (良)	37 μg·m^{-3}	95 μg·m^{-3}	1015 kPa

表 2　各测量组信息统计

Table 2　Information statistics of each measurement period

序号	时间(LT)	太阳高度角	太阳方位角	序号	时间(LT)	太阳高度角	太阳方位角
1	07:06－07:38	1°57′ ～8°12′	99°50′ ～104°30′	9	14:06－14:36	43°25′ ～39°52′	210°49′ ～219°34′
2	07:47－08:26	9°58′ ～17°31′	105°51′ ～112°02′	10	14:37－14:59	39°44′ ～38°02′	219°51′ ～222°10′
3	08:34－09:04	19°02′ ～24°34′	113°23′ ～118°44′	11	15:05－15:27	35°47′ ～32°21′	227°05′ ～232°12′
4	09:12－09:43	26°00′ ～31°19′	120°15′ ～126°35′	12	15:34－15:58	31°12′ ～27°06′	233°44′ ～238°41′
5	10:04－10:37	34°41′ ～39°26′	131°20′ ～139°41′	13	16:13－16:35	24°26′ ～20°24′	241°34′ ～245°32′
6	10:49－11:17	40°59′ ～44°06′	143°01′ ～151°26′	14	16:42－17:04	19°05′ ～14°54′	246°44′ ～250°22′
7	11:27－11:52	45°02′ ～46°54′	154°40′ ～163°11′	15	17:14－17:37	12°58′ ～8°27′	251°58′ ～255°29′
8	12:00－12:29	47°20′ ～48°15′	166°02′ ～176°40′				

表 3　各时段全天区大气偏振角实测值

Table 3　Measured values of polarization angle at each period

序号	高度角/(°)	方位角/(°)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	20	5	–5	–20	–67	39	13	1	–8	–23	–65	43	17
	40	9	–9	–33	–78	60	26	4	–13	–39	–79	65	31
	60	11	–13	–34	–84	75	32	7	–16	–41	–83	78	41
	80	11	–14	–44	–80	75	38	10	–16	–48	–80	75	45
2	20	14	6	–5	–30	39	6	–3	–11	–26	–60	63	29
	40	17	1	–21	–79	65	24	2	–14	–39	–73	75	43
	60	18	–6	–31	–82	80	32	10	–15	–42	–82	86	52
	80	24	–13	–30	–82	88	56	19	–14	–36	–90	86	52
3	20	25	16	9	0	0	–7	–13	–16	–30	–58	82	47
	40	30	14	–4	–11	76	22	–2	–16	–37	–67	90	57
	60	30	8	–18	–51	87	33	16	–15	–39	–70	90	61
	80	31	0	–28	–69	89	44	24	–9	–29	–70	89	61
4	20	36	24	18	0	83	–20	–19	–19	–32	–56	–89	59
	40	39	23	6	–25	90	16	–4	–21	–36	–63	–88	67
	60	37	22	–10	–25	–83	9	19	–18	–31	–65	–90	73
	80	33	18	–19	–51	–85	65	30	0	–27	–57	88	78
5	20	49	36	30	31	90	12	–29	–29	–38	–46	–75	84
	40	54	31	22	14	0	11	–45	–23	–30	–55	–86	87
	60	56	32	11	–17	–71	82	48	–14	–28	–50	–83	83
	80	29	24	–9	–57	–85	88	35	15	–23	–22	–78	89
6	20	63	46	37	37	81	–78	–36	–29	–38	–46	–72	85
	40	72	46	32	25	12	–39	–45	–24	–30	–52	–86	87
	60	73	32	23	–55	–29	0	25	–3	–25	–29	–78	90
	80	65	36	11	–20	–53	–89	34	21	–9	–29	–65	–89
7	20	78	56	45	41	48	25	–56	–34	–35	–50	–66	–86
	40	80	56	33	30	–61	0	–31	–25	–30	–40	–71	–87

续表 3

序号	高度角/(°)	方位角/(°)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
7	60	84	51	33	13	–13	0	–14	5	–20	–28	–61	–87
	80	86	41	20	–19	4	–81	65	33	3	–27	–47	–85
8	20	84	65	51	43	47	74	–65	–43	–38	–47	–59	–77
	40	90	70	46	36	32	90	0	–28	–29	–34	–59	–87
	60	89	66	34	23	25	–31	90	11	–13	–30	–41	–84
	80	89	60	34	7	–23	–53	84	45	19	–13	–33	–79
9	20	–68	–90	69	52	41	39	45	25	–25	–30	–33	–49
	40	–72	–88	75	51	28	25	19	0	–27	–21	–31	–43
	60	–63	–87	81	33	28	7	–25	–6	5	9	–23	–27
	80	–25	–87	90	27	28	–25	–45	–79	65	32	0	–28
10	20	–58	–82	73	53	40	35	37	65	–25	–33	–28	–40
	40	–60	–84	80	55	33	24	74	0	0	–13	–26	–36
	60	–57	–87	81	48	31	11	–20	–15	7	20	–21	–26
	80	–28	–89	90	25	28	–25	–25	–89	87	37	13	–21
11	20	–51	–76	77	53	39	31	31	34	23	–30	–26	–32
	40	–52	–75	90	90	55	28	23	–16	0	–13	–18	–28
	60	–47	–78	90	57	31	15	–16	20	81	28	–3	–25
	80	–23	–89	89	37	27	–28	–27	–88	74	22	31	–23
12	20	–43	–65	83	55	37	28	24	20	–58	–25	–23	–25
	40	–45	–74	90	59	38	23	5	57	90	11	–14	–23
	60	–41	–75	90	64	31	22	–22	–65	83	37	14	–19
	80	–27	–76	88	60	31	3	–27	–65	90	17	26	–18
13	20	–29	–54	–88	57	34	23	19	0	0	–14	–16	–16
	40	–32	–58	–89	64	38	20	2	–25	–16	30	3	–15
	60	–32	–61	–90	71	39	20	–27	–36	–84	29	29	–9
	80	–26	–57	–90	73	30	9	–22	–53	–88	65	31	2
14	20	–21	–45	27	58	31	19	15	18	0	0	–7	–10
	40	–23	–51	–86	67	38	17	0	–23	–88	25	19	–7
	60	–24	–53	–90	80	40	16	–27	–24	–83	65	28	0
	80	–22	–52	–90	77	37	13	–24	–36	–89	80	30	8
15	20	–13	–32	–69	60	27	14	6	0	0	0	3	–5
	40	–16	–43	–78	69	36	14	–2	–25	–61	7	22	0
	60	–17	–46	–87	80	42	13	–19	–25	–89	79	30	8
	80	–15	–45	–88	85	45	14	–16	–36	–85	56	36	12

度普遍较大, 其中观测方位 (0°, 20°) 偏振度最大达 0.37, 如图 3(a) 所示; 在太阳位置附近, 大气偏振度普遍较小, 观测方 (90°, 20°) 偏振度最低为 0.02, 如图 3(b) 所示, 说明同一时间条件下天空偏振态与观测方位密切相关.

3 分析讨论

3.1 大气偏振态分布特点

由于在各测量时间段内太阳位置变化较小 (方位角及高度角变化均小于 8°), 因此将测量时间段的大

气偏振态视为测量时段中间时刻的大气偏振态, 并对各测量时间段数据, 采用内插方法绘制全天区的偏振度、偏振角分布如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和图 5 可知, 全天空大气偏振模式与观测时段 (实际为太阳位置) 密切相关. 随着太阳视运动, 大气偏振模式整体发生对应旋转. 从偏振度分布来看, 偏振度较大区域为与太阳方位呈 90°散射角的方位, 例如, 07:06 LT－07:38 LT 时段, 太阳位于正东

表 4　全天各时段全天区大气偏振度实测值

Table 4　Measured values of polarization degree at each period of the whole day

序号	高度角/(°)	方位角/(°)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
1	20	0.37	0.19	0.05	0.02	0.03	0.14	0.36	0.33	0.13	0.02	0.06	0.22
	40	0.36	0.17	0.07	0.05	0.04	0.14	0.34	0.36	0.2	0.14	0.15	0.26
	60	0.32	0.18	0.1	0.11	0.07	0.16	0.3	0.34	0.21	0.29	0.24	0.27
	80	0.29	0.23	0.15	0.15	0.19	0.19	0.28	0.31	0.26	0.25	0.2	0.24
2	20	0.32	0.17	0.04	0.01	0.01	0.08	0.26	0.32	0.17	0.05	0.06	0.17
	40	0.31	0.11	0.06	0.02	0.02	0.08	0.17	0.34	0.22	0.17	0.17	0.23
	60	0.27	0.1	0.09	0.06	0.06	0.11	0.15	0.31	0.26	0.23	0.27	0.26
	80	0.19	0.11	0.13	0.11	0.15	0.11	0.15	0.18	0.2	0.13	0.26	0.14
3	20	0.26	0.19	0.06	0	0	0.05	0.16	0.31	0.18	0.08	0.05	0.15
	40	0.25	0.14	0.05	0.03	0.02	0.05	0.08	0.29	0.24	0.21	0.14	0.23
	60	0.22	0.1	0.08	0.03	0.05	0.07	0.08	0.18	0.24	0.29	0.2	0.24
	80	0.15	0.07	0.11	0.06	0.12	0.05	0.12	0.09	0.16	0.11	0.23	0.09
4	20	0.21	0.2	0.08	0.04	0	0.03	0.11	0.27	0.21	0.11	0.09	0.15
	40	0.22	0.16	0.04	0.03	0	0.02	0.05	0.2	0.24	0.2	0.24	0.22
	60	0.18	0.11	0.05	0.04	0.05	0.04	0.06	0.1	0.21	0.22	0.26	0.22
	80	0.13	0.06	0.09	0.04	0.1	0.03	0.09	0.03	0.13	0.05	0.18	0.1
5	20	0.19	0.2	0.12	0.03	0	0.04	0.08	0.2	0.22	0.16	0.15	0.17
	40	0.22	0.17	0.07	0.04	0.01	0	0.04	0.12	0.31	0.12	0.21	0.21
	60	0.1	0.12	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.13	0.11	0.22	0.25
	80	0.06	0.08	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.07	0.1	0.09	0.11
6	20	0.19	0.2	0.13	0.06	0.03	0.02	0.06	0.13	0.2	0.13	0.17	0.17
	40	0.18	0.14	0.09	0.03	0.03	0	0.03	0.08	0.15	0.21	0.14	0.28
	60	0.11	0.1	0.06	0.04	0.03	0.01	0.03	0.04	0.1	0.1	0.12	0.17
	80	0.03	0.06	0.03	0.05	0.03	0.06	0.05	0.05	0.04	0.1	0.02	0.1
7	20	0.15	0.19	0.15	0.08	0.02	0.03	0.03	0.1	0.18	0.18	0.16	0.18
	40	0.23	0.16	0.11	0.05	0.03	0	0.01	0.06	0.12	0.15	0.12	0.26
	60	0.16	0.07	0.07	0.04	0.03	0	0.01	0.02	0.09	0.12	0.08	0.2
	80	0.08	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.04	0.07	0.04	0.1
8	20	0.19	0.21	0.2	0.11	0.05	0.03	0.02	0.08	0.15	0.2	0.19	0.21
	40	0.25	0.15	0.12	0.09	0.06	0	0	0.03	0.09	0.14	0.13	0.22
	60	0.19	0.08	0.09	0.05	0.04	0.01	0	0.03	0.05	0.09	0.07	0.14
	80	0.1	0.03	0.05	0.03	0.06	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.07	0.05
9	20	0.15	0.15	0.17	0.18	0.13	0.07	0.02	0.03	0.04	0.11	0.17	0.17
	40	0.17	0.25	0.23	0.15	0.12	0.05	0.04	0	0.25	0.06	0.12	0.18

续表 4

序号	高度角/(°)	方位角/(°)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
9	60	0.08	0.24	0.15	0.09	0.08	0.03	0.05	0.02	0.03	0.03	0.07	0.13
	80	0.05	0.12	0.07	0.08	0.05	0.05	0.04	0.07	0.03	0.05	0.03	0.09
10	20	0.16	0.15	0.16	0.19	0.18	0.1	0.04	0.02	0.03	0.09	0.18	0.19
	40	0.23	0.25	0.25	0.22	0.15	0.07	0.04	0	0.01	0.04	0.12	0.2
	60	0.11	0.23	0.24	0.09	0.1	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05	0.15
	80	0.08	0.13	0.1	0.09	0.07	0.05	0.06	0.07	0.05	0.08	0.04	0.09
11	20	0.16	0.15	0.15	0.18	0.22	0.14	0.05	0.02	0.02	0.07	0.17	0.22
	40	0.23	0.23	0.17	0.21	0.2	0.17	0.07	0.01	0	0.05	0.1	0.22
	60	0.17	0.27	0.2	0.15	0.15	0.04	0.05	0.04	0.03	0.05	0.03	0.16
	80	0.11	0.11	0.16	0.07	0.1	0.05	0.08	0.06	0.08	0.09	0.07	0.09
12	20	0.16	0.12	0.13	0.16	0.22	0.17	0.06	0.03	0.02	0.05	0.15	0.23
	40	0.22	0.2	0.18	0.19	0.22	0.12	0.02	0.02	0	0.02	0.06	0.23
	60	0.2	0.22	0.25	0.24	0.18	0.07	0.05	0.03	0.05	0.06	0.05	0.15
	80	0.14	0.09	0.19	0.05	0.12	0.03	0.09	0.04	0.09	0.07	0.1	0.06
13	20	0.2	0.1	0.09	0.12	0.22	0.23	0.08	0.04	0	0.02	0.09	0.25
	40	0.25	0.15	0.18	0.21	0.25	0.18	0.04	0.04	0.01	0.03	0.04	0.22
	60	0.25	0.19	0.09	0.19	0.22	0.12	0.07	0.04	0.07	0.06	0.08	0.12
	80	0.18	0.1	0.19	0.13	0.17	0.07	0.13	0.04	0.13	0.03	0.13	0.07
14	20	0.24	0.11	0.07	0.1	0.21	0.28	0.09	0.03	0	0.02	0.07	0.28
	40	0.28	0.19	0.17	0.17	0.25	0.26	0.03	0.06	0.03	0.04	0.07	0.2
	60	0.29	0.24	0.26	0.17	0.26	0.2	0.09	0.07	0.08	0.04	0.11	0.13
	80	0.27	0.2	0.2	0.21	0.19	0.15	0.14	0.09	0.15	0.08	0.17	0.14
15	20	0.29	0.13	0.05	0.08	0.19	0.33	0.12	0.04	0	0.02	0.07	0.28
	40	0.33	0.2	0.16	0.17	0.26	0.34	0.08	0.05	0.04	0.04	0.08	0.22
	60	0.35	0.25	0.26	0.25	0.28	0.33	0.11	0.1	0.09	0.05	0.14	0.23
	80	0.32	0.27	0.29	0.26	0.26	0.28	0.26	0.15	0.2	0.15	0.19	0.28

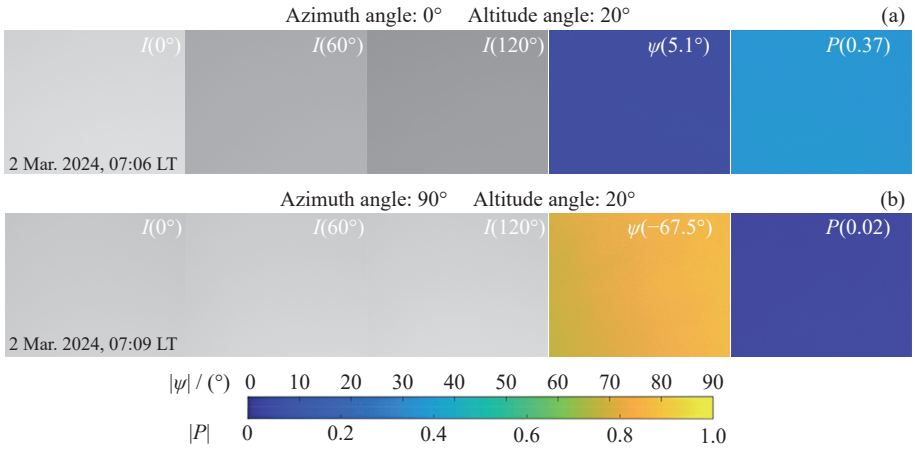


图 3 大气偏振态测量

Fig. 3 Measured map of atmospheric polarization state

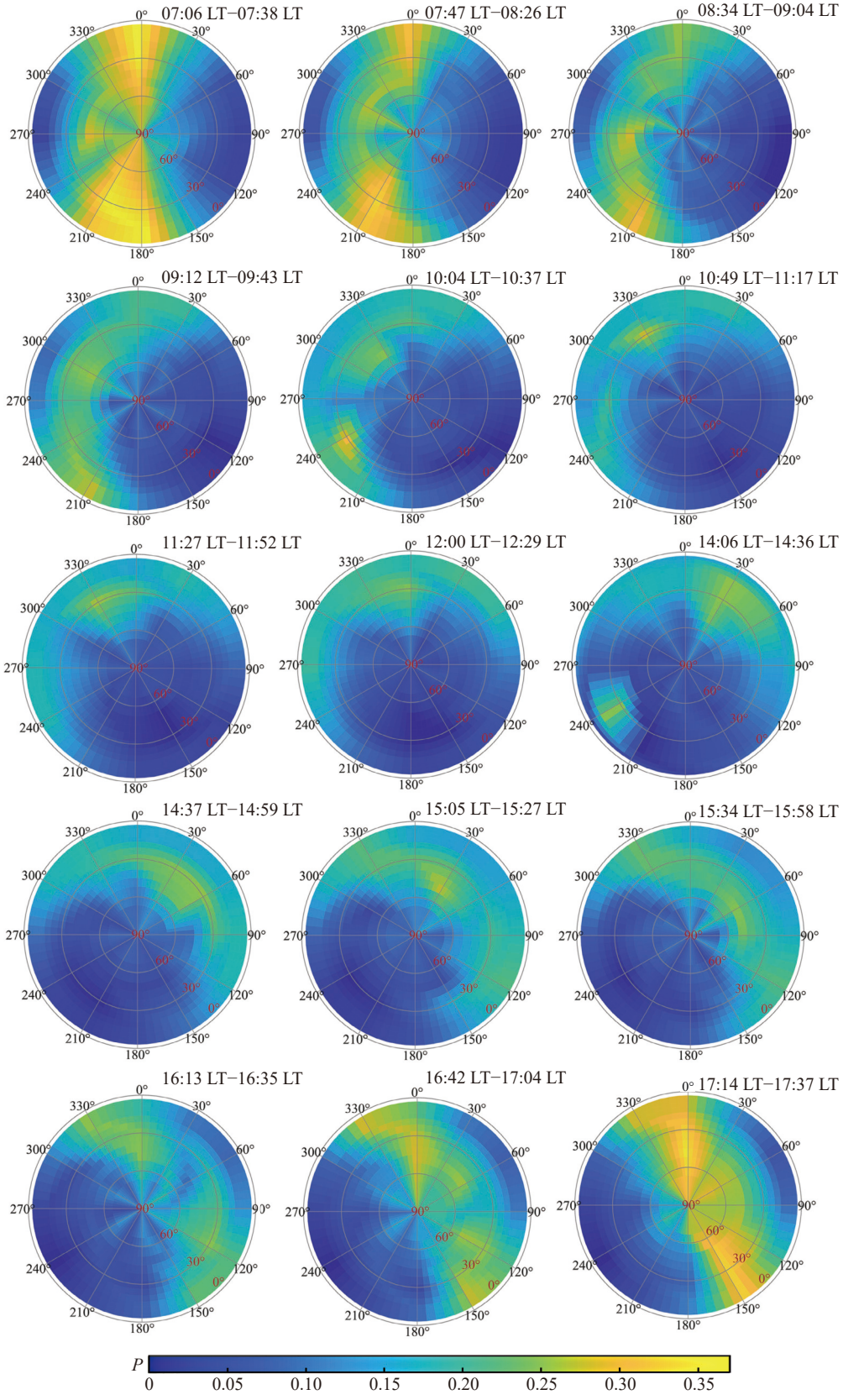


图 4　各时间段全天区大气偏振度分布

Fig. 4　Polarization degree distribution of the entire sky atmosphere at different time periods

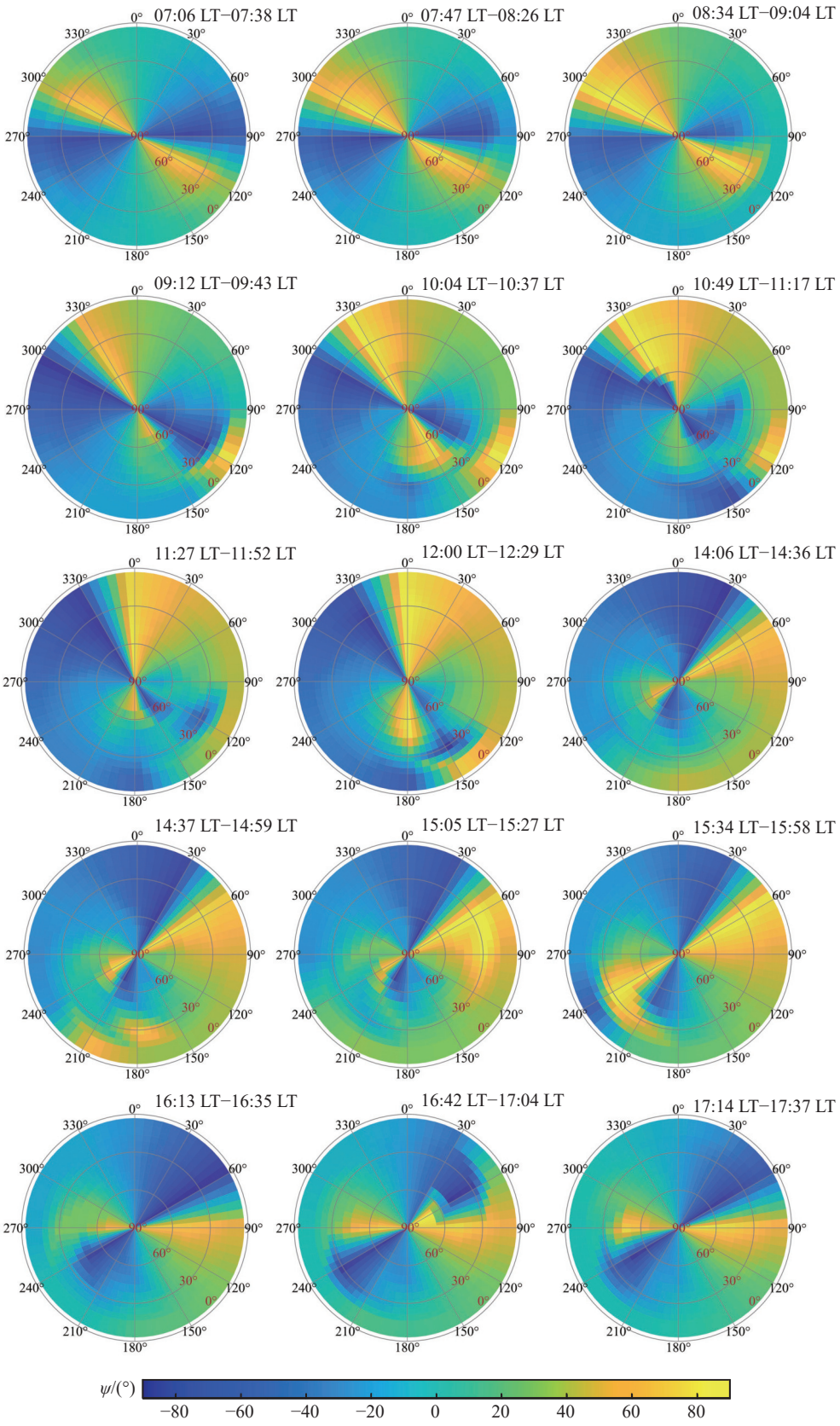


图 5 各时间段全天区大气偏振角分布

Fig. 5 Polarization angle distribution of the entire sky atmosphere at different time periods

方位, 此时南北子午线方位天区偏振度较大; 15:05 LT－15:27 LT 时段, 太阳位于西南方位, 此时东北方位天区偏振度较大. 综合各时段偏振度分布可以发现, 位于太阳上方 20°附近的 Babinet 中性点较为明显, 而位于反日点上方 25°左右的 Arago 中性点只有在早晚太阳高度角较低时才能出现, 例如 07:06 LT－07:38 LT 时段、17:14 LT－17:37 LT 时段, 这与可见光波段偏振中性点理论相吻合[28].

从偏振角分布来看, 全天空偏振角呈现明显的横 8 型, 且横 8 型的方位分布随太阳位置发生对应变化, 例如, 10:04 LT－10:37 LT 时段横 8 型位于东南方位, 而 15:05 LT－15:27 LT 时段横 8 型位于西南方位. 从分布细节上来看, 在靠近地平方位偏振角分布并不稳定, 这是受地表反射退偏影响, 造成分布规律变化. 综上所述在 900～1700 nm 的近红外波段全天空仍有稳定的偏振态, 利用偏振度、偏振角也可实现太阳子午线方位确定, 进而实现偏振导航.

3.2 瑞利表征模型符合度分析

取各时段最大偏振度测量值作为该时段理论最大偏振度值$P_{\max}$, 根据 1.2 节测站瑞利散射表征模型计算方法按照每组照片精确测量时刻计算各方位偏振态理论值, 并计算实际各方位偏振度、偏振角测量值与瑞利散射表征模型理论值差值分布情况, 以 07:06 LT－07:38 LT 时段为例, 计算其差值数据如表 5 所示.

由表 5 可知, 该时段中, 900～1700 nm 近红外波段的全天空大气偏振模式与瑞利散射表征模型符合较好, 其中偏振度误差在 0.2 以内, 偏振角误差在 6°以内, 且误差较大位置处于太阳附近方位或反对称位置, 这主要是由于大气散射退偏产生的偏振中性点导致的, 而实际应用中太阳方位通常也为测量规避方位, 不会在这两处误差较大的方位进行观测. 以相同方式统计全部时段 15 组数据与瑞利散射理论模型误差如表 6 所示.

综合分析表 5 和表 6 数据可以得到以下结果.

(1) 从全天偏振模式整体来看, 无论偏振度还是偏振角均与瑞利散射表征模型有较好的符合性. 对于偏振角而言, 全天 720 组观测数据中 66% 以上的观测点位数据偏振角模型误差优于 5°, 83% 以上点位模型误差小于 10°, 89% 以上点位模型误差小于 15°; 对于偏振度而言, 49% 以上观测点位偏振度模型误差优于 0.05, 79% 以上点位模型误差优于 0.1, 96% 以上点位模型误差优于 0.15. 说明依托瑞利散射在 900～1700 nm 的近红外波段对全天空偏振态进行建模具有可行性, 根据瑞利散射表征模型构建的大气背景光旋转滤光模型可以有效消除大气背景光中的偏振成分.

(2) 从全天各测量时段来看, 在偏振角方面, 各时段 50% 以上的观测点位模型误差小于 5°, 73% 以上模型点位误差小于 10°, 81% 以上点位模型误差小于 15°; 在偏振度方面, 44% 以上观测点位偏振度模型误差优于 0.05, 65% 以上点位模型误差优于 0.1, 88% 以上点位模型误差优于 0.15. 说明在晴朗天气条件下, 全天各个时段偏振角与瑞利散射表征模型的符合性均优于偏振度, 也实际验证了在近红外波段采用偏振角导航模式优于偏振度导航方法.

表 5 07:06 LT－07:38 LT 时段瑞利散射模型误差

Table 5 Error of Rayleigh scattering model during 07:06 LT－07:38 LT

高度角/(°)		方位角/(°)											
		0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
20	ψ	0.0	0.1	–0.2	–6.4	0.3	0.0	0.0	2.0	1.9	–0.1	2.1	3.4
	P	0.0	–0.1	–0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	ψ	1.6	0.0	–0.1	–6.2	0.0	0.2	0.2	2.7	0.0	–5.3	–0.1	3.5
	P	0.0	–0.2	–0.1	0.0	–0.1	–0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60	ψ	2.9	–1.2	4.6	–5.5	–4.4	4.9	1.6	1.1	4.1	–7.2	–6.0	1.2
	P	–0.1	–0.2	–0.2	–0.1	–0.1	–0.1	–0.1	0.0	–0.1	0.0	0.0	–0.1
80	ψ	3.5	0.0	0.3	–4.6	–1.2	4.6	2.6	0.6	–1.6	–3.9	–0.4	0.1
	P	–0.1	–0.1	–0.2	–0.2	–0.1	–0.1	–0.1	–0.1	–0.1	–0.1	–0.2	–0.1

表 6 偏振度及偏振角的误差统计 (%)

Table 6 Error statistics of polarization degree and polarization angle (%)

误差大小	序号															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均
$\|\psi\|<5°$	88	73	83	73	50	67	54	65	60	60	50	67	75	56	65	66
$\|\psi\|<10°$	100	90	92	92	73	83	81	83	73	75	69	85	90	79	81	83
$\|\psi\|<15°$	100	94	98	96	81	88	88	92	81	83	73	92	92	90	90	89
$\|\psi\|>15°$	0	6	2	4	19	13	13	8	19	17	27	8	8	10	10	11
$\|P\|<0.05$	44	44	44	38	46	52	56	56	58	63	58	53	54	50	48	49
$\|P\|<0.1$	65	71	79	81	88	77	85	90	90	96	94	83	83	25	83	79
$\|P\|<0.15$	88	90	96	98	94	100	98	100	98	100	100	94	98	98	92	96
$\|P\|>0.15$	13	10	4	2	6	0	2	0	2	0	0	6	2	2	8	4

(3) 对比各观测时段模型误差可以发现, 早晚太阳高度角较低时, 偏振角模型准确度优于正午时间段, 例如 07:06 LT－07:38 LT 时段 88% 的观测点位模型误差优于 5°, 而 15:05 LT－15:27 LT 时段只有 50% 的观测点位误差优于 5°; 而偏振度模型准确度正好相反, 例如 07:06 LT－07:38 LT 时段只有 44% 的观测点位模型误差优于 0.05, 15:05 LT－15:27 LT 时段却有 58% 的观测点位模型误差优于 0.05. 分析原因, 可能是太阳高度角较低时经过地表大气路径长度变长, 受地表气溶胶、漫反射等多种因素影响, 大气退偏效应、米氏散射效应增强, 使瑞利散射产生的偏振光占比减小, 因此瑞利散射偏振度吻合性下降, 这与文献 [15] 理论推导现象相吻合. 而偏振角更多的是反映偏振光的偏振态, 与偏振光占比相关性并不强.

3.3 全天偏振度分析

从图 4 可知, 全天空大气偏振度分布模式随着太阳视运动发生旋转, 随着太阳高度角的变化, 全天区的偏振度分布模式会发生明显变化, 导致全天空整体偏振度的变化. 分别统计各时段全天空最大偏振度值和平均偏振度值, 如图 6 所示.

由图 6 可知, 早晚太阳高度角较低时全天空整体偏振度较大, 最大值达 0.37, 均值达 0.2, 而正午期间太阳高度角较高, 全天空无论最大偏振度还是平均偏振度都明显减弱, 分别为 0.26, 0.09. 分析原因主要是早晚太阳高度角较低时, 与太阳方位呈 90°瑞利散射方位天区高度角较高, 而高度角较高天区大气受地表气溶胶、地表反射等因素影响较小; 而正午时分太阳高度角较高时, 偏振度较高天区普遍高度角较低, 受气溶胶、地表反射等因素影响较大. 同时, 太阳高度角较低时, 太阳光经过大气路线距离较长 , 光线发生散射概率较大; 太阳高度角较高时, 太阳光穿过大气层的路线较短, 光线发生散射概率较小, 这也是早晚太阳呈偏红色的原因.

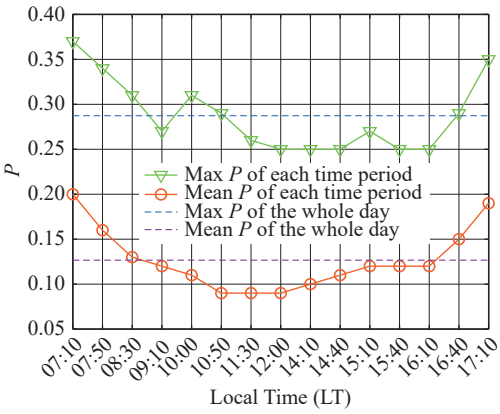


图 6 全天各时段偏振度情况

Fig. 6 Degree of polarization at different periods throughout the day

从各时段全天空偏振度大小来看, 在 900～1700 nm 的近红外波段大气散射形成的背景光具有明显偏振效应, 但整体偏振度并不高, 均值为 0.13, 尤其当正午时段全天整体偏振度均值大小仅为 0.1 左右; 同时, 全天空最大偏振度在 0.26～0.37, 对应目标信噪比可提升 35%～59%, 说明在特殊的观测方位采用偏振滤光方法具有一定价值. 但综合来看, 近红外波段全天空最大偏振度值与以往文献理论推导和假设认为的 0.6～1 存在明显差距[10,29,30], 说明以往基于偏振度置为 0.6～1 的假设应用结论并不严谨. 因此在近地空间, 利用偏振滤光增强信噪比的价值意义还需深入探究.

4 结论

大气偏振模式是地表大气固有属性, 研究分析大气偏振模式, 对开展偏振导航、目标探测等领域的研究具有重要意义. 采用短波红外相机、红外偏振片、红外镜头搭建了近红外波段大气偏振测量系统, 对晴朗天空 900～1700 nm 波段的近红外波段大气偏振态进行实测和分析研究, 得出以下结论.

(1) 在晴朗天气条件下, 近红外波段大气背景偏振态与可见光波段相一致, 在全天空均呈现稳定的偏振模式, 位于太阳子午线方位存在明显的偏振中性点及横 8 型结构, 利用该性质在近红外波段可以进行偏振导航, 且采用基于偏振角模式的导航方法在精度、稳定性方面会明显优于基于偏振度模式的导航方法.

(2) 在 900～1700 nm 的近红外波段, 大气偏振模式与瑞利散射表征模型符合较好, 利用瑞利散射表征模型预测全天空大气偏振态, 偏振角误差优于 5°, 10°, 15°的区域分别占比 66%, 83%, 89%, 偏振度误差优于 0.05, 0.10, 0.15 的区域分别占比 49%, 79%, 96%, 依据瑞利散射表征模型可以有效地预测、滤除大气背景光中的偏振成分.

(3) 在近红外波段大气整体偏振度不高, 全天大气偏振度均值为 0.13, 正午时段仅为 0.1 左右, 偏振滤光信噪比可提升 11%, 就全天区而言偏振滤光效能并不明显; 全时段全天偏振度最大值均值 0.29, 早晚时段可达 0.37, 对应偏振滤光可以增强目标信噪比 59%, 故对于偏振滤光技术是否适用于白昼目标探测应结合实际应用需求深入研究.

本文研究是在晴朗天气、空气质量较好的环境条件下开展的, 但实际大气偏振模式与空气状况、天气条件等均密切相关, 因此未来需要对不同天气及空气状况条件下的大气偏振态进一步开展深入研究.

参考文献

[1] POMOZI I, HORVÁTH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**: 2933-2942

[2] LUO Haibo, ZHANG Junchao, GAI Xingqin, *et al*. The development status and prospects of polarization imaging technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(1): 20210987 (罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望 (特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, **51**(1): 20210987)

[3] ZHAO H J, XU W J, ZHANG Y, *et al*. Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(22): 28589-28603

[4] FAN Zhiguo, CHEN Manli, WANG Bo, *et al*. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1248-1256 (范之国, 陈曼丽, 王波, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态信息获取 [J]. 光学精密工程, 2016, **24**(6): 1248-1256)

[5] CHENG Qian, GAO Xinjian, GAO Jun, *et al*. A generative method for atmospheric polarization modelling based on neighborhood constraint[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, **49**(6): 210423 (程前, 高欣健, 高隽, 等. 基于邻域约束的大气偏振模式生成网络 [J]. 光电工程, 2022, **49**(6): 210423)

[6] ROGALSKI A. Next decade in infrared detectors[C]//Proceedings Volume 10433, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. Warsaw, Poland: SPIE, 2017: 128-152

[7] CHU Junhao, HU Zhigao. Recent progress on infrared polarization effect and polarization remote applications[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(6): 926-934 (褚君浩, 胡志高. 红外偏振效应和偏振遥感研究进展 [J]. 遥感学报, 2018, **22**(6): 926-934)

[8] ZHANG Hui, ZHOU Xiangdong, WANG Xinmei, *et al*. Survey of technology status and development of all-time star sensors in near-earth space[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(8): 623719 (张辉, 周向东, 汪新梅, 等. 近地空间全天时星敏感器技术现状及发展综述 [J]. 航空学报, 2020, **41**(8): 623719)

[9] ZOU Xiaofeng, WANG Xia, JIN Weiqi, *et al*. Atmospheric effects on infrared polarization imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(2): 304-308 (邹晓风, 王霞, 金伟其, 等. 大气对红外偏振成像系统的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(2): 304-308)

[10] HAN Li, CAI Hong. Analysis of stargazing capability of star sensors from the atmosphere in daytime[J]. *Journal of Spacecraft TT& C Technology*, 2015, **34**(3): 291-297 (韩礼, 蔡洪. 白天大气层内星敏感器观星能力分析 [J]. 飞行器测控学报, 2015, **34**(3): 291-297)

[11] SUN Xiaobing, HONG Jin, LUO Donggen, *et al*. Research on the technique of spectro-polarimetric imaging of celestial bodies and its experiments in the daytime[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 499-503 (孙晓兵, 洪津, 骆冬根, 等. 白天天体光谱偏振成像技术及实验研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(6): 499-503)

[12] ZHANG Ruijin, XIAN Hao, RAO Changhui, *et al*. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0501003 (张锐进, 鲜浩, 饶长辉, 等. 偏振滤波白天抑制天光

背景作用分析 [J]. 光学学报, 2012, **32**(5): 0501003)

[13] SUN Xuejin, LI Hao, TANG Liping. Study on atmosphere volume scattering polarization degree characteristics in visible and infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501001 (孙学金, 李浩, 唐丽萍. 可见光和红外波段大气体散射偏振度特性研究 [J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0501001)

[14] GUAN Guixia, YAN Lei, CHEN Jiabin, *et al*. Research on sky polarized light distribution[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, **32**(4): 459-463 (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)

[15] ESHELMAN L M, SHAW J A. The VIS–SWIR spectrum of skylight polarization[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(27): 7974-7986

[16] MISHCHENKO M, TRAVIS L, LACIS A. Radiation transfer in the atmosphere | Scattering[M]//Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2nd ed. London: Academic Press, 2015: 27-36

[17] GAŁAJ T, PIETRUSIAK F, GALEWSKI M, *et al*. Hybrid integration method for sunlight atmospheric scattering[J]. *IEEE Access*, 2021, **9**: 40681-40694

[18] GATES D M. Spectral distribution of solar radiation at the earth's surface: The spectral quality of sunlight, skylight, and global radiation varies with atmospheric conditions[J]. *Science*, 1966, **151**(3710): 523-529

[19] PRADHAN R K. Does Rayleigh scattering explain the Blueness of Sky[J]. *Science Horizon*, 2015, **28**-31

[20] 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

[21] BUCHOLTZ A. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(15): 2765-2773

[22] BERRY M V, DENNIS M R, LEE R L. Polarization singularities in the clear sky[J]. *New Journal of Physics*, 2004, **6**: 162

[23] HANNAY J H. Polarization of sky light from a canopy atmosphere[J]. *New Journal of Physics*, 2004, **6**: 197

[24] SUHAI B, HORVÁTH G. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, **21**(9): 1669-1676

[25] QI Shuxia, LIU Sheng, LI Peng, *et al*. Measurement methods on polarization distribution of light fields and their applications (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, **51**(8): 0851502 (齐淑霞, 刘圣, 李鹏, 等. 光场偏振分布测量方法及其应用 (特邀)[J]. 光子学报, 2022, **51**(8): 0851502)

[26] ZHANG Ran, CAI Hong, GUAN Le, *et al*. Polarization orientation method for cloudy sky[J]. *Optical Precision Engineering*, 2021, **29**(7): 1499-1510 (张然, 蔡弘, 关乐, 等. 多云天气天空偏振定向方法 [J]. 光学精密工程, 2021, **29**(7): 1499-1510)

[27] MIYAZAKI D, AMMAR M, KAWAKAMI R, *et al*. Estimating sunlight polarization using a fish-eye lens[J]. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 2009, **1**: 288-300

[28] GÁL J, HORVÁTH G, MEYER-ROCHOW V B, *et al*. Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full–sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, **457**(2010): 1385-1399

[29] FU Q, ZHAO F, CHEN H Y, *et al*. Space object and background polarization models and detectability analysis[J]. *Applied Sciences*, 2022, **12**(21): 10714

[30] WANG B W, WANG H Y, MAO X N, *et al*. Optical system design method of near-earth short-wave infrared star sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, **22**(22): 22169-22178

作者简介



陈智兴 男, 2003 年 3 月出生于福建省漳州市, 信息工程大学学员, 研究方向为全天时天文导航、图像处理等.
E-mail: zxzxzzxx666@163.com



李崇辉 (通信作者) 男, 1987 年 2 月出生, 博士学位, 现为信息工程大学副教授, 研究方向为自主导航与组合导航.
E-mail: lichonghui6501@126.com