

地表反照率对天空偏振模式的影响

崔岩*, 刘亚飞, 刘康, 褚金奎

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 研究了地表反照率对天空偏振模式的影响。针对目前缺乏实际环境下不同时间、不同地点单一影响因素的定量测试研究,先运用 libRadtran 二次开发软件,仿真分析不同地表反照率下的天空偏振模式,然后利用图像式测试系统,分别在草地和沥青地表、海洋和沥青地表进行同步异地测试,定量分析地表反照率对偏振方位角和偏振度的影响。结果表明:地表反照率对偏振方位角分布基本没有影响,分布始终稳定;而地表反照率对偏振度数值有较大的衰减作用,在同一天内同一时刻下,地表反照率越大,最大偏振度值越小;地表反照率相差越大,最大偏振度值的平均减小量越多,最大偏振度值减小的幅度越大。

关键词 大气光学; 地表反照率; libRadtran; 定量测试; 最大偏振度值

中图分类号 P427.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1701002

Effect of Surface Albedo on Sky Polarization Mode

Cui Yan*, Liu Yafei, Liu Kang, Chu Jinkui

Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract The effect of the surface albedo on the sky polarization mode is studied. At present, there is a lack of research on quantitative tests with a single influencing factor at different time and locations in the actual environment. In view of this, the re-developed libRadtran software is used to simulate and analyze the sky polarization mode at different surface albedos. Then, synchronous remote tests are conducted in group on meadow and asphalt surfaces, ocean and asphalt surfaces with the imaging test system and the influence of surface albedo on the polarization azimuth and polarization degree is analyzed quantitatively. The results show that the surface albedo has little effect on the polarization azimuth distribution, which is always stable. However, it has a strong attenuating effect on the polarization degree. At the same time on the same day, a greater surface albedo entails a smaller maximum polarization degree; a bigger difference of surface albedo means a sharper average decrease and a larger decreasing extent in maximum polarization degree.

Key words atmospheric optics; surface albedo; libRadtran; quantitative test; maximum polarization degree

OCIS codes 010.1290; 290.5855; 010.1310

1 引言

偏振导航技术通过检测和分析天空偏振模式来获取方向信息,从而进行导航。天空偏振模式受到大气模式、气体分子、气溶胶、云、地表、时间以及地理位置信息等因素的影响,是一个复杂的多次散射

过程^[1]。地表的反射会改变散射光的偏振特性^[2],其取决于反射介质的固有属性、入射光的偏振状态以及入射角度等。不同地表类型的反射特性不同,故可通过地表反照率表示不同地表类型引起的反射效应。地表反照率是指地表对入射光辐射的反射通量与入射光的辐射通量的比值,决定了地面对光辐

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-03-09; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51675076)

通信作者: *yanc@dlut.edu.cn

射的吸收和反射能力。由于地质和环境特征的不同,地表的变化很大,地表反照率存在很大差异。因此,地表反照率是研究实际大气下天空偏振模式的一个重要因素。

Liu 等^[3]定性研究了光强和偏振数据对波长、太阳天顶角和地表反照率的影响。Kreuter 等^[4]研究了大范围的气溶胶和地表反照率情况对偏振度和天空辐射度的影响。Dahlberg 等^[5]研究了最大偏振度的变化与下垫面反射率和上升流辐射数据起伏的关系。姚彤等^[6]研究表明地表反照率随着太阳高度角的增大而减小,当太阳高度角大于 40° 时,地表反照率基本不变。程天海等^[7]研究了地表反照率对偏振辐射强度的影响。王威等^[8]研究了地表反射特性对不同天气下大气偏振模式的影响。刘琦等^[9]研究了不同波长下地表反照率对偏振度的影响。张西光等^[10]研究了在不同地表反照率下偏振度和偏振方位角随观测高度角的变化规律。杨太平等^[11]证明城区地表反照率大于农田,且城区中心比边缘地表反照率大 0.014 左右。郭镭力等^[12]研究了球形和平面平行大气模式下冰云大气反射率的差异。杨巨鑫等^[13]分析了全球地表反射率的分布特征。

目前研究主要是针对地表反照率进行理论层面的仿真研究,但是实际大气条件复杂多变,进行实际环境下地表反照率的定量测试研究尤为重要。本文首先运用 libRadtran 二次开发软件对不同地表反照率下的天空偏振模式进行仿真,其次利用图像式天空偏振模式测试系统,在不同地点不同地表下进行同步测试,定量地分析地表反照率对天空偏振模式的影响规律,为偏振导航的实际应用提供了理论支撑。

2 基本原理

2.1 天空偏振模式形成机理

在大气辐射传输过程中,太阳光进入大气层

之前是没有偏振特性的自然光,经过大气层后拥有了偏振特性。一方面太阳光经过大气分子、气溶胶和雾霾等粒子的散射成为部分偏振光,另一方面地表的反射也改变了原来散射光的偏振状态,最终经过大气粒子散射和地表反射形成的偏振光充满整个天空,形成了稳定分布的天空偏振模式。图 1 为天空偏振模式形成示意图^[14],太阳光在进入大气层后,在 B 点受 N_2 、 CO_2 、 O_3 等分子气体散射,在 C 点受水滴、云雾、气溶胶等大尺度粒子散射,然后 B 、 C 两点散射光到达地表 A 后,一部分被地表吸收,另一部分被地表反射,最终地表反射的偏振光与大气粒子散射产生的偏振光相互叠加共同影响天空偏振模式。

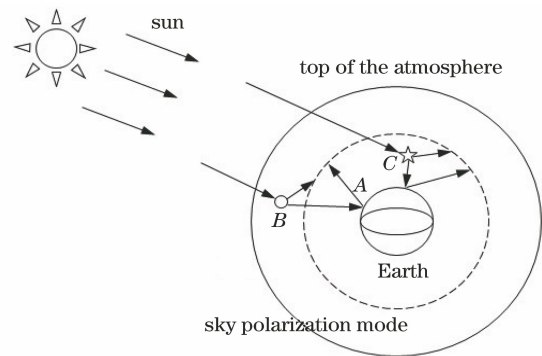


图 1 天空偏振模式形成示意图^[14]

Fig. 1 Schematic diagram of sky polarization mode formation^[14]

2.2 仿真原理

利用 libRadtran^[15] 软件包模拟地球大气辐射传输过程,采用 Buras 等^[16] 提出的蒙特卡罗法的 MYSTIC 矢量辐射传输模型,建立接近实际大气下的天空偏振模式。

通过 MYSTIC 矢量辐射传输模型,计算包含地表反照率、气溶胶等参数的矢量辐射传输方程,进而通过矢量辐射传输方程描述太阳光在大气中入射、吸收、散射等特性,大气中的矢量辐射传输形式可表示为^[17]

$$\mu \frac{d\mathbf{I}_{\text{atm}}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = -\mathbf{I}_{\text{atm}}(\tau, \mu, \varphi) + \frac{\omega}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \varphi') \mathbf{I}_{\text{atm}}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' + \frac{\omega}{4\pi} F_0 \exp\left(\frac{-\tau}{\mu_0}\right) \mathbf{M}(\tau, \mu, \varphi; -\mu_0, \varphi_0) [1, 0, 0, 0]^T + (1 - \omega) B(T) [1, 0, 0, 0]^T, \quad (1)$$

式中, \mathbf{I}_{atm} 是大气辐射强度, τ 是大气光学厚度, ω 是单次散射反照率, F_0 是大气顶太阳光平行入射辐射通量密度, (μ, φ) 是反射光的天顶角余弦和方位角, (μ', φ') 是漫射光的天顶角余弦和方位角, (μ_0, φ_0) 是

太阳直射光的天顶角余弦和方位角, \mathbf{M} 是散射相矩阵 (Mueller 矩阵), $B(T)$ 是关于温度 T 的普朗克函数。

采用蒙特卡罗法求解矢量辐射传输方程,通过模拟大量光子的传播过程,获取光子的最终统计特

征。光子碰到地表时,根据地表性质会出现吸收和散射两种情况,故可通过地表反照率得到光子被反射的概率。最后通过统计到达地面的光子数量及其方向,计算出 Stokes 矢量。

Stokes 矢量 $\mathbf{S}=[I, Q, U, V]^T$ 表示偏振光分布特性,其中 I 代表总光强, Q 和 U 表示两个方向上的线偏振光, V 是圆偏振光,一般只考虑线偏振光的特性,认为 $V=0$ 。利用蒙特卡罗法计算得到的 Stokes 矢量,可得天空偏振光的偏振度 P 和偏振方位角 χ ,其表达式为

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

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (3)$$

2.3 测试原理

基于 Stokes 矢量法进行天空偏振光检测,检测得到的总光强 $I'(\psi)^{[8]}$ 为

$$I'(\psi) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\psi + U \sin 2\psi), \quad (4)$$

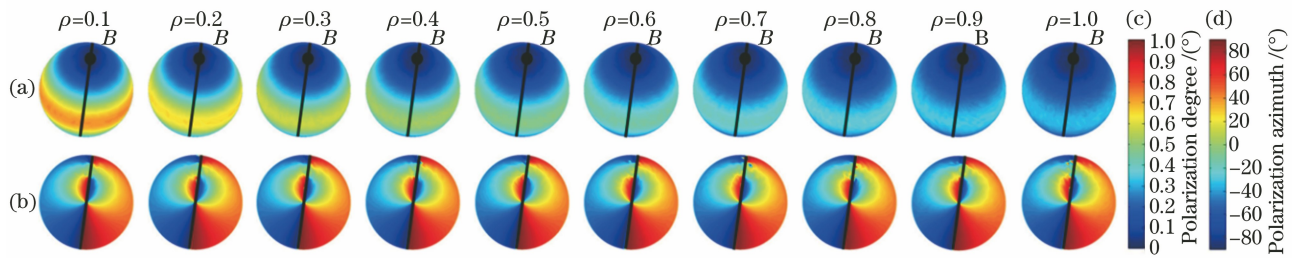


图 2 不同地表反照率下天空偏振模式仿真图。(a)偏振度图;(b)偏振方位角图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 2 Simulation diagrams of sky polarization mode under different surface albedos. (a) Polarization degree; (b) polarization azimuth; (c) polarization degree legend; (d) polarization azimuth legend

由图 2(a)可知,地表反照率对最大偏振度值有较大的衰减作用。在 B 中性点位置偏振度值为 0,沿着子午线方向偏振度值先增大后减小。地表反照率为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 时,对应的最大偏振度值依次为 0.7325、0.6496、0.5870、0.5272、0.4822、0.4440、0.4097、0.3810、0.3580、0.3369,最大偏振度值随地表反照率的增大而减小。

由图 2(b)可知,地表反照率对偏振方位角基本没有影响,偏振方位角的分布变化规律基本一致,分布始终稳定,沿太阳子午线方向成 $\pm 90^\circ$ 分布。

最大偏振度值随地表反照率的变化如图 3 所示,随着地表反照率不断增大,最大偏振度值的减小量越来越少。

式中, ψ 为偏振片主透光轴与参考轴的夹角。选取的三个不同夹角, ψ 分别为 0° 、 45° 、 90° ,代入(4)式求解得到 Stokes 矢量为

$$\begin{cases} I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ Q = I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \\ U = 2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \end{cases}. \quad (5)$$

将求解得到的 I, Q, U 代入(2)式和(3)式即可得到天空偏振光的偏振度 P 和偏振方位角 χ 。

3 仿真结果与分析

对 libRadtran 软件包进行二次开发,实现天空偏振模式的自动化仿真,计算包含地表反照率的大气辐射传输模式,分析地表反照率对天空偏振模式的影响。以 2020 年 10 月 12 日 11 时的天空偏振模式为例,地表反照率 ρ 依次设置为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0。仿真结果如图 2 所示,图中 ρ 表示地表反照率,黑色线段表示太阳子午线,黑色圆点表示 B 中性点。

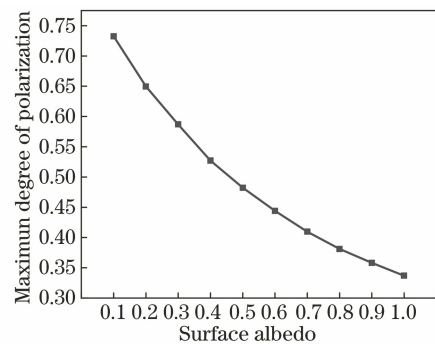


图 3 不同地表反照率下最大偏振度值
Fig. 3 Maximum polarization degree value under different albedos

4 测试结果与分析

利用课题组搭建的图像式测试系统^[18],进行天空偏振模式测试。分别进行了两组地表反照率的对

比测试。第一组为草地和沥青地表,地表反照率分别为 0.15~0.25 和 0.05~0.10。第二组为海洋和沥青

地表,地表反照率分别为 0.10~0.20 和 0.05~0.10。常见地表类型的反照率数值如表 1^[19]所示。

表 1 地表反照率

Table 1 Surface albedo

Surface	Asphalt	Concrete	Sandy soil	Dark soil	Meadow	Rice, wheat	Ocean	Ice	Fresh snow
Albedo	0.05~0.10	0.17~0.27	0.25~0.45	0.05~0.15	0.15~0.25	0.10~0.25	0.10~0.20	0.15~0.35	0.80~0.95

4.1 草地和磨损沥青地表对比测试结果与分析

分别选择草地地表(38°53'N, 121°20'E)和沥青地表(38°53'N, 121°31'E)两个位置进行天空偏振模式测试,测试地理位置为辽宁省大连市旅顺口区三寰牧场,三寰牧场占地 1.6 km²,地处方圆 200 km² 的国家级森林公园绿色生态核心区,森林覆盖率达 65% 以上。测试日期为 2020 年 11 月 13 日,天气晴朗无云,测试时间为 09:00—16:00,每间隔 30 min 测试一次。草地测试位置如图 4 所示,磨损沥青测试位置如图 5 所示。



图 5 磨损沥青测试位置

Fig. 5 Wearing asphalt test location



图 4 草地测试位置

Fig. 4 Meadow test location

测试结果如图 6 和图 7 所示,其中黑色线段表示太阳子午线,黑色圆点表示 *B* 中性点。图 6(a1)(a2)和图 7(a1)(a2)是偏振度测试图,偏振度值在 *B* 中性点位置为 0,沿着子午线方向先增大后减小,各测试时刻下最大偏振度值不同。图 6(b1)(b2)和图 7(b1)(b2)是偏振方位角测试图,偏振方位角分布始终稳定,沿太阳子午线方向成±90°分布。

由于草地和沥青地表反照率不同,同一时刻下最大偏振度值不同,草地和沥青地表最大偏振度值如图 8 所示。在各测试时刻下草地地表的偏振度

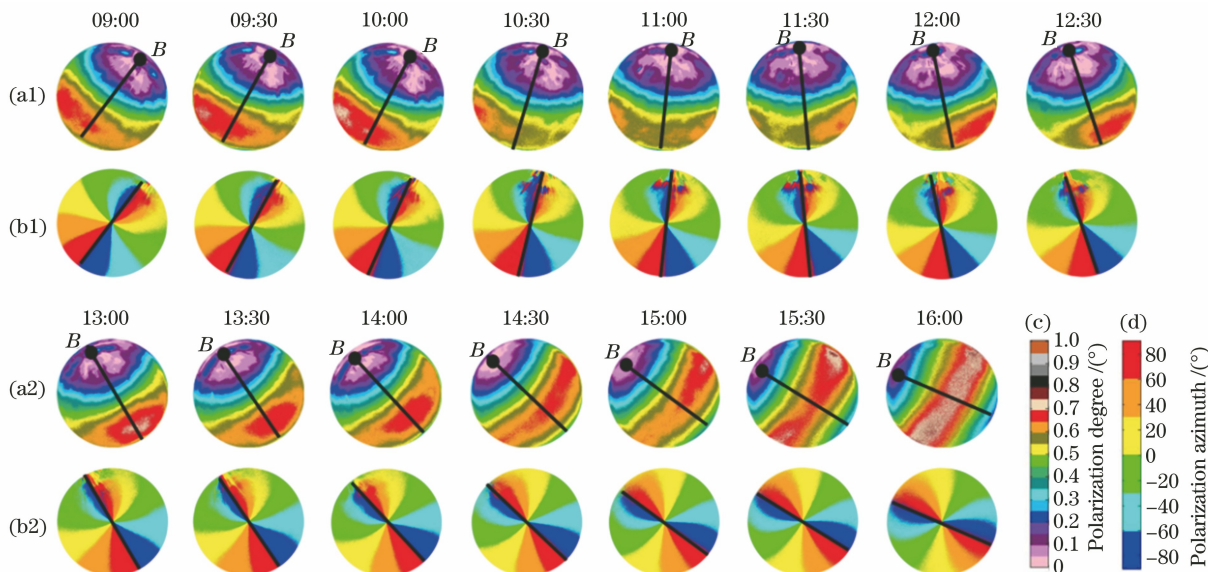


图 6 草地地表天空偏振模式测试图。(a1)(a2)偏振度图;(b1)(b2)偏振方位角图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 6 Test charts of sky polarization mode of meadow surface. (a1)(a2) Polarization degree; (b1)(b2) polarization azimuth; (c) polarization degree legend; (d) polarization azimuth legend

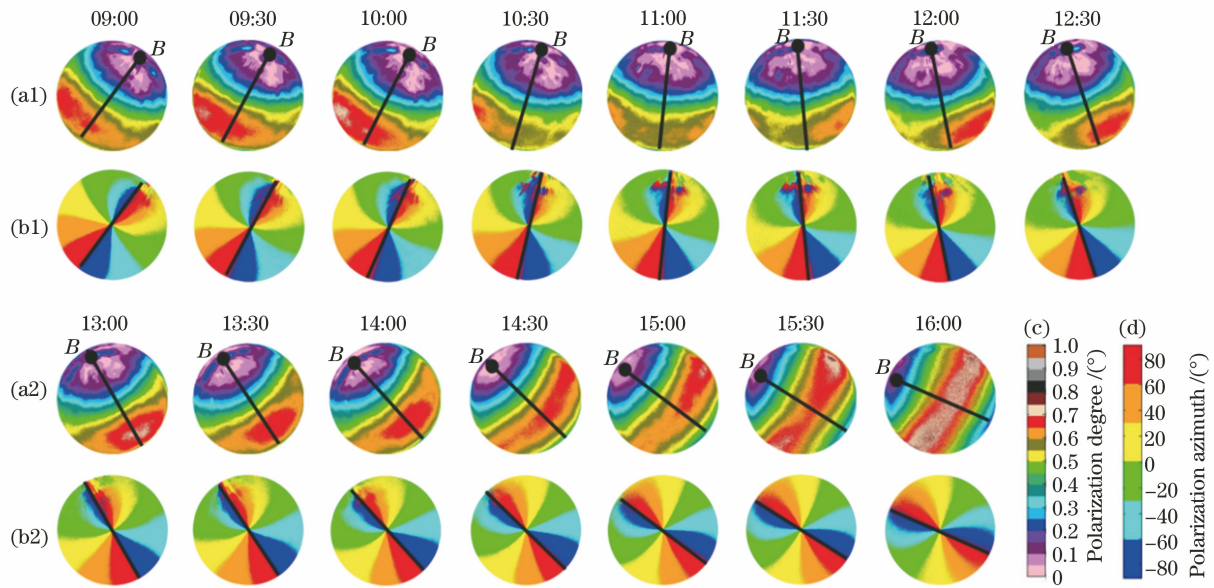


图 7 磨损沥青地表天空偏振模式测试图。(a1)(a2)偏振度图;(b1)(b2)偏振方位角图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例
 Fig. 7 Test charts of sky polarization mode of wearing asphalt surface. (a1)(a2) Polarization degree;
 (b1)(b2) polarization azimuth; (c) polarization degree legend; (d) polarization azimuth legend

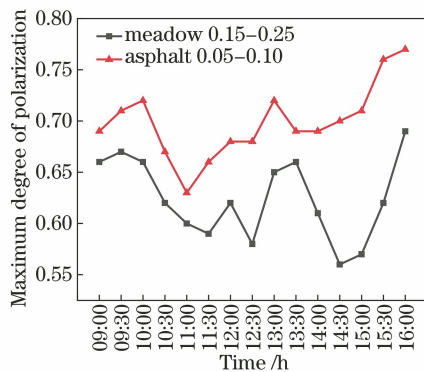


图 8 不同时刻下草地和磨损沥青最大偏振度值
 Fig. 8 Maximum polarization degree values of meadow
 and wearing asphalt at different time

度值均小于沥青地表,结果表明在同一天内同一时刻下,地表反照率越大,最大偏振度值越小。由图 8 数据计算可知,草地地表最大偏振度值平均为 0.62,沥青地表最大偏振度值平均为 0.70,相比于沥青地表,草地地表的偏振度值平均减小 11.43%。同其他测量时刻相比,09:00 时,两地表最大偏振度值相差最小,此时相比于沥青地表,草地地表的偏振度值减小 4.35%;14:30 时,两地表最大偏振度值相差最大,此时相比于沥青地表,草地地表的偏振度值减小 20.00%,故草地地表的偏振度值减小幅度为 4.35%~20.00%。

4.2 海洋和新鲜沥青地表对比测试结果与分析

分别选择海洋地表(38°51'N, 121°33'E)和沥

青地表(38°53'N, 121°35'E)两个位置进行天空偏振模式测试,测试地理位置为辽宁省大连市沙河口区星海湾大桥,星海湾大桥是中国辽宁省大连市境内连接沙河口区与西岗区的跨海通道,位于星海广场南侧 1 km 处的黄海海域上。测试日期为 2020 年 10 月 12 日,天气晴朗无云,测试时间 10:30—16:00,每间隔 30 min 测试一次。海洋测试位置如图 9 所示,新鲜沥青测试位置如图 10 所示。



图 9 海洋测试位置
 Fig. 9 Ocean test location

测试结果如图 11 和图 12 所示,其中黑色线段表示太阳子午线,黑色圆点表示 B 中性点。图 11(a1)(a2)和图 12(a1)(a2)是偏振度测试图,偏振度值在 B 中性点位置为 0,沿着子午线方向先增大后减小,各测试时刻下最大偏振度值不同。午时前后受到少量云层干扰,偏振度环状分布受到一定



图 10 新鲜沥青测试位置

Fig. 10 Fresh asphalt test location

影响,但依然可以确定最大偏振度值。图 11(b1)(b2)和图 12(b1)(b2)是偏振方位角模式图,偏振方位角分布始终稳定,沿太阳子午线方向成 $\pm 90^\circ$ 分布。午时前后少量云层导致太阳子午线有一定发散和扭曲,但依然能够获取太阳子午线位置。

由于海洋和沥青地表反照率不同,同一时刻下最大偏振度值不同,海洋和新鲜沥青地表最大偏振度值如图 13 所示。在各测试时刻下海洋地表的偏振度值均小于沥青地表,结果表明在同一天内同一时刻下,地表反照率越大,最大偏振度值越小。由图 13 数据计算可知,海洋地表最大偏振度值平

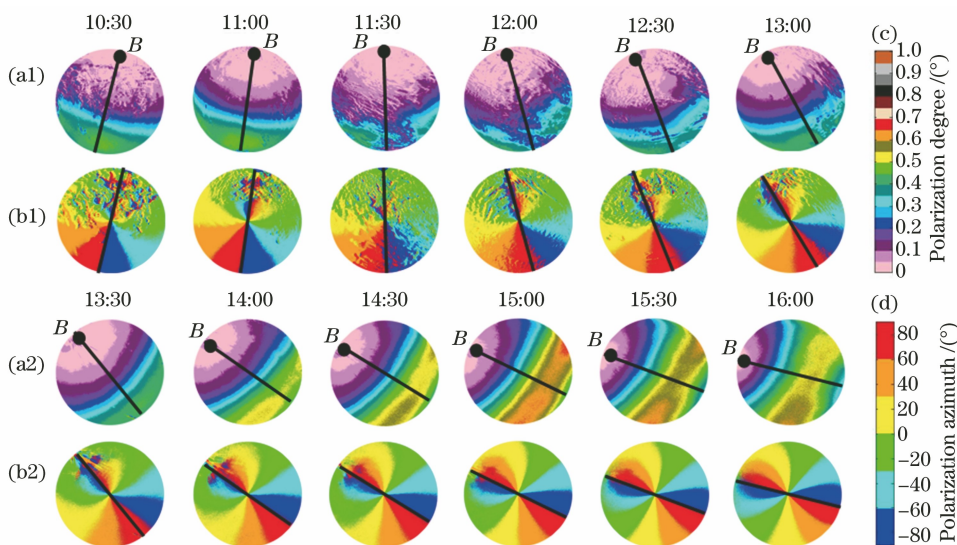


图 11 海洋地表天空偏振模式测试图。(a1)(a2)偏振度图;(b)偏振方位角图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 11 Test charts of sky polarization mode of ocean surface. (a1)(a2) Polarization degree; (b1)(b2) polarization azimuth;

(c) polarization degree legend; (d) polarization azimuth legend

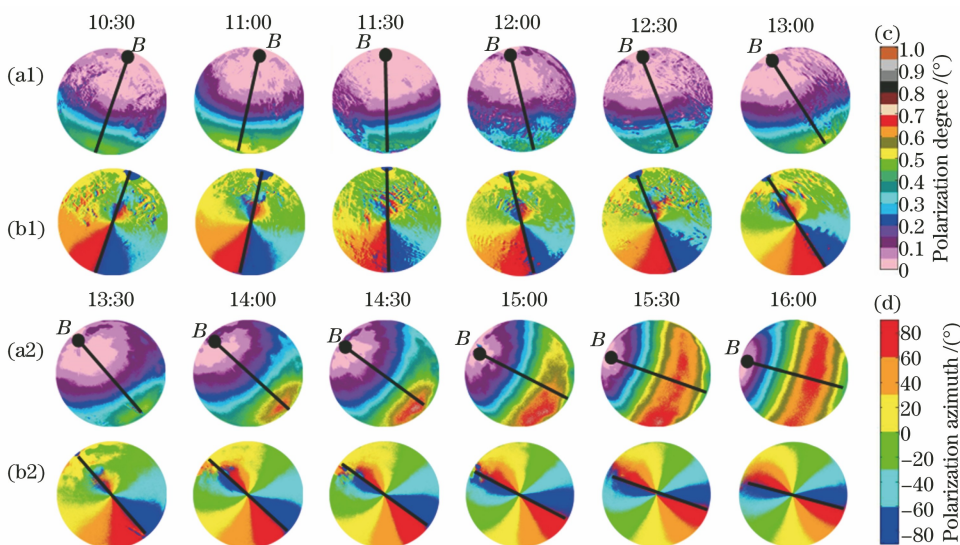


图 12 新鲜沥青地表天空偏振模式测试图。(a1)(a2)偏振度图;(b1)(b2)偏振方位角图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 12 Test charts of sky polarization mode of fresh asphalt surface. (a1)(a2) Polarization degree;

(b1)(b2) polarization azimuth; (c) polarization degree legend; (d) polarization azimuth legend

均为 0.52, 沥青地表最大偏振度值平均为 0.57, 相比于沥青地表, 海洋地表最大偏振度值平均减小 8.77%。同其他测量时刻相比, 10:30 时, 两地表最大偏振度值相差最小, 此时相比于沥青地表, 海洋地表的偏振度值减小 2.08%; 14:30 时, 最大偏振度值相差最大, 此时相比于沥青地表, 海洋地表的偏振度值减小 18.31%, 故海洋地表的偏振度值减小幅度为 2.08%~18.31%。

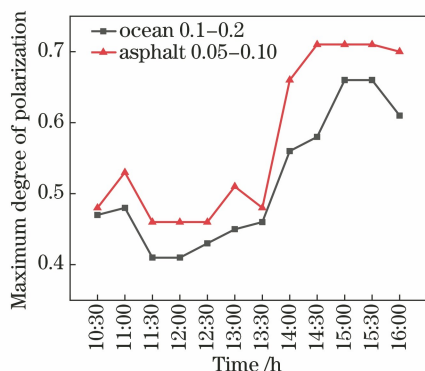


图 13 不同时刻下海洋和新鲜沥青最大偏振度值

Fig. 13 Maximum polarization degree values of ocean and fresh asphalt at different time

综合图 8 和图 13 结论可以得出, 地表反照率相差越大, 最大偏振度值平均减小量越多, 最大偏振度值减小的幅度越大。

5 结 论

目前研究主要集中在理论层面, 分析地表反照率对偏振分布模式的影响, 但是实际大气条件复杂多变, 需要在实际环境下进行单一影响因素的同步异地定量测试, 为偏振导航的实际应用提供重要支撑。本文重点研究不同地表反照率的实际测试结果对偏振度和偏振方位角的影响规律。首先运用蒙特卡罗法解算矢量辐射传输模型, 分析地表反照率变化对天空偏振分布模式的影响; 其次利用图像式天空偏振模式测试系统, 分别在草地和沥青地表、海洋和沥青地表进行定量测试。结果表明: 地表反照率的变化对偏振方位角的分布基本没有影响, 分布始终稳定, 沿太阳子午线方向成 $\pm 90^\circ$ 型分布。地表反照率的变化对偏振度数值有较大的衰减作用, 在同一天内同一时刻下, 地表反照率越大, 最大偏振度值越小; 地表反照率相差越大, 最大偏振度值平均减小量越多, 最大偏振度值减小幅度越大。对其他因素进行实际测试, 定量研究其对天空偏振模式的影响是下一步工作重点。

参 考 文 献

- [1] Chu J K, Guan L, Li S Q, et al. Atmospheric polarization field pattern distribution and polarization navigation technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(6): 969-979.
褚金奎, 关乐, 李世奇, 等. 大气偏振模式图分布及仿生偏振导航技术 [J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 969-979.
- [2] Zhang J P, Chen J W, Zou B, et al. Modeling and simulation of polarimetric hyperspectral imaging process [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2238-2253.
- [3] Liu Y, Voss K. Polarized radiance distribution measurement of skylight. II. Experiment and data [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8753-8764.
- [4] Kreuter A, Emde C, Blumthaler M. Measuring the influence of aerosols and albedo on sky polarization [J]. *Atmospheric Research*, 2010, 98(2/3/4): 363-367.
- [5] Dahlberg A R, Pust N J, Shaw J A. Effects of surface reflectance on skylight polarization measurements at the Mauna Loa observatory [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16008-16021.
- [6] Yao T, Zhang Q. Study on land-surface albedo over different types of underlying surfaces in North China [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(8): 089201.
姚彤, 张强. 我国北方不同类型下垫面地表反照率特征 [J]. *物理学报*, 2014, 63(8): 089201.
- [7] Cheng T H, Gu X F, Yu T, et al. Multi-angular polarized radiation characteristics of water clouds [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(4): 267-271.
程天海, 顾行发, 余涛, 等. 水云多角度偏振辐射特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(4): 267-271.
- [8] Wang W. Research on atmospheric polarization pattern and its influencing factors of different weather conditions [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 15, 37-38.
王威. 不同天气下的大气偏振模式及其影响因素研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 15, 37-38.
- [9] Liu Q. Research on skylight polarization properties and sensitive spectrum under complex atmosphere [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 28.
刘琦. 复杂大气下的天空光偏振特性及敏感光谱研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 28.
- [10] Zhang X G. Research on polarization characteristics of sky based on vector radiative transfer [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 28-30.
张西光. 基于矢量辐射传输的天空偏振特性研究

- [D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 28-30.
- [11] Yang T P, Si F Q, Zhao M J, et al. Method for measuring surface albedo based on airborne platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1228001.
杨太平, 司福祺, 赵敏杰, 等. 基于机载平台测量地表反照率的方法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1228001.
- [12] Guo L L, Wang M J. Polarized radiative transfer characteristics of ice cloud atmospheres at large zenith angles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1101002.
郭镭力, 王明军. 大天顶角入射下冰云大气偏振辐射传输特性 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1101002.
- [13] Yang J X, Zhu Y D, Wang Q, et al. Influence of surface reflectance and aerosol optical depth on performance of spaceborne integral path differential absorption lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0910001.
杨巨鑫, 朱亚丹, 王勤, 等. 地表反射率及气溶胶光学厚度对星载路径积分差分吸收激光雷达性能的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0910001.
- [14] Pust N J, Shaw J A. Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(34): H190-H198.
- [15] Emde C, Buras-Schnell R, Kylling A, et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1647-1672.
- [16] Buras R, Mayer B. Efficient unbiased variance reduction techniques for Monte Carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmospheres: the solution [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112(3): 434-447.
- [17] Li J, Duan M Z, Qin J. A coupled successive order scattering vector radiative transfer model for ocean-atmosphere system [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(2): 181-188, 211.
李姣, 段民征, 覃军. 基于逐次散射法的海洋-大气矢量辐射传输模式 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(2): 181-188, 211.
- [18] Cui Y, Zhao J Y, Zhang X G, et al. Automatic image type sky polarized light testing system: CN107131956A [P]. 2017-09-05.
崔岩, 赵金勇, 张西光, 等. 一种全自动图像式天空偏振光测试系统: CN107131956A [P]. 2017-09-05.
- [19] Chen X Q. *Physical geography* [M]. Beijing: Peking University Press, 2001: 28.
陈效逖. *自然地理学* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2001: 28.