

# 激光与光电子学进展

## 基于米散射蒙特卡罗法的紫外偏振透云研究

厉祥, 张然, 路淑芳, 林木音, 褚金奎\*

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116086

**摘要** 自然界中许多生物进化出利用天空偏振光进行导航的能力。天空光中紫外波段的能量和偏振度远低于可见光波段, 一些生物却选择紫外波段进行导航, 这被称为“生物偏振导航紫外悖论”。为了探究紫外波段天空光偏振优势, 首先基于米散射理论分析了单粒子散射规律, 然后采用蒙特卡罗法研究了云层的光传输特性, 最后完成全天空偏振模式的仿真。仿真结果表明: 紫外波段穿透云层散射介质后具有更高的偏振保持性, 在多云阴天等不利天气条件下仍可利用紫外波段完成导航。从理论上分析了紫外波段在天空偏振导航中具备优势的原因, 对仿生偏振导航目标波段的选取具有一定指导意义。

**关键词** 大气光学; 偏振导航; 米散射; 蒙特卡罗法; 全天空偏振模式; 偏振保持性

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1701001

### Ultraviolet Polarization Employing Mie Scattering Monte-Carlo Method for Cloud-Based Navigation

Li Xiang, Zhang Ran, Lu Shufang, Lin Muyin, Chu Jinkui\*

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116086, China

**Abstract** Many organisms have developed the ability to navigate using polarized ultraviolet light of the sky. The energy and polarization of the ultraviolet (UV) band of skylight are much lower than those of the visible light, yet organisms utilize the UV band for navigation; this phenomenon is known as the “ultraviolet paradox of biological polarized light navigation”. To explore the advantages of skylight polarization in the UV band, we first analyzed the single-particle scattering law based on the Mie scattering theory, studied the light transmission characteristics of clouds using the Monte-Carlo method, and finally completed the simulation of the full-sky polarization mode. The simulation results show that the UV band has a higher polarization retention after penetrating the cloud layer, and can still be used to complete navigation in unfavorable weather conditions such as cloudy and overcast skies. In this study, we demonstrate why the UV band in skylight polarization navigation is advantageous. Furthermore, the analysis of our hypothesis and study results provide guidance for the selection of the target waveband for bionic polarization navigation.

**Key words** atmospheric optics; bionic polarization navigation; Mie scattering; Monte-Carlo method; full-sky polarization mode; polarization retention

**OCIS codes** 010.1290; 010.1310; 010.1615

收稿日期: 2020-12-27; 修回日期: 2021-01-11; 录用日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51675076)、中央高校基本科研业务费(DUT19LAB11)

通信作者: \*chujk@dlut.edu.cn

## 1 引言

无偏振的太阳光经过大气层散射后成为有着特定偏振模式的天空偏振光,天空偏振光导航是自然界中某些生物的导航策略。研究发现,某些昆虫可利用复眼的背部边缘区域(DRA)来探测天顶的偏振信息,最终完成导航<sup>[1-3]</sup>。在晴朗天气下,天空偏振光以可见光为主,然而许多昆虫却利用紫外波段进行偏振探测、导航<sup>[4-6]</sup>,比如蜜蜂使用 345~350 nm 波段,沙蚁使用 380 nm 波,蜘蛛使用 350 nm 波等,形成了“生物偏振导航紫外悖论”。研究者们对此提出了各种解释。

1969年,Bulter<sup>[7]</sup>认为,紫外天空光偏振模式对大气的扰动具有“不敏感性”,天空光的紫外偏振模式在大气的扰动下具有更强的“稳定性”,生物以紫外波段作为偏振导航目标波段,可以适应更复杂的天气条件。1982年,Brines等<sup>[8]</sup>提出,生物进化出天空光偏振探测器时,天空光中紫外波段成分可能比现在要高。他们认为古代大气成分与目前地球大气差别很大,大气中吸收紫外波段的成分(比如O<sub>3</sub>)可能含量比较低,造成古代紫外波段辐照度比现在要高得多,在此时进化出偏振探测器的生物自然就选择了紫外波段。1992年,Hawryshyn<sup>[9]</sup>认为,在天空的散射光中,紫外波段相对散射光强最大,生物以紫外波段探测偏振更有优势。2004年,Barta等<sup>[10]</sup>认为当天空被云不完全遮盖的时候,太阳直射光会通过云之间的间隙照射到云层下面的空气柱,由此在形成的云下偏振中紫外波段占据优势。

生物天空光偏振导航为人类导航提供了一种新的思路,研究者开展了仿生天空光偏振导航的研究<sup>[11-15]</sup>。而“生物偏振导航紫外悖论”问题涉及利用天空偏振信息进行探测目标波段的选取,对仿生天空光偏振导航目标波段选取具有指导意义。

本文主要对紫外波段偏振光透云特性进行研究,首先分析单粒子米散射的能量分布规律,初步说明紫外波段透射特性;然后通过蒙特卡罗法进行云层光传输特性的研究,分析不同波段光穿透云层的能力;最后使用蒙特卡罗法仿真得到全天空偏振模式,并通过不同天气条件下天顶方向各波段偏振度的对比,解释了紫外波段的偏振探测优势。

## 2 米散射和蒙特卡罗法仿真

### 2.1 云微粒子米散射

云层中悬浮和漂移的水滴粒子能吸收和散射

天空光能量,这些水滴粒子近似为球形,可以采用米散射理论来求解其散射行为。云微物理研究结果表明,构成普通层云的水滴粒子半径符合特定的Gamma分布<sup>[16]</sup>:

$$f(x, k, \theta) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right), \quad (1)$$

式中: $k$ 为谱形参数; $\theta$ 为尺度参数; $x$ 为粒子的半径。对于典型的层云的拟合谱,可选取 $k$ 值为3, $\theta$ 值为0.3。由Gamma分布可知,典型的层云水滴粒子的半径为4~12  $\mu\text{m}$ ,且滴谱密度曲线中密度最大位置在6  $\mu\text{m}$ 左右。

对于一个均匀球形的散射粒子,米散射的最终结果是一个球坐标形式的解析解,可以将其转换成一种比较容易理解的形式。将入射光 $E_0$ 和散射光 $E_{sc}$ 分解为互相垂直的两组偏振分量,分别是在散射平面内的 $E_0^i, E_{sc}^i$ 和与散射平面垂直的 $E_0^r, E_{sc}^r$ 。由麦克斯韦方程组和边界条件求得散射电场为

$$\begin{cases} E_{sc}^r = -E_0^r \frac{i}{kR} \exp[-i(kR - \omega t)] S_1(\theta) \\ E_{sc}^i = -E_0^i \frac{i}{kR} \exp[-i(kR - \omega t)] S_2(\theta) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\omega$ 为圆频率; $R$ 为粒子和观测位置之间的距离。 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 是两个复振幅函数,表达式为

$$\begin{cases} S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)] \\ S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos \theta) + b_n \pi_n(\cos \theta)] \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $a_n$ 和 $b_n$ 是复数函数,由粒子的尺度参数、复折射指数等决定,分别反映了电场和磁场对散射的影响; $\pi_n$ 和 $\tau_n$ 也是两个函数,是散射角的函数,可以分解为勒让德多项式。(2)式取平方,就可以得到散射电场的两个分量的光强表达式为

$$\begin{cases} I_{sc}^r = -\frac{I_0^r}{k^2 R^2} |S_1(\theta)|^2 = -\frac{I_0^r}{k^2 R^2} i_1 \\ I_{sc}^i = -\frac{I_0^i}{k^2 R^2} |S_2(\theta)|^2 = -\frac{I_0^i}{k^2 R^2} i_2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:强度分布函数 $i_1 = |S_1(\theta)|^2, i_2 = |S_2(\theta)|^2$ 。

图1是420 nm波长光在8  $\mu\text{m}$ 半径水滴粒子下的米散射强度分布函数( $|S(\theta)|^2$ )的对数极坐标图,极坐标范围从0°到360°。

强度分布函数的对数极坐标图显示,散射能量主要集中于前向0°附近,而能量在前向0°的集中程

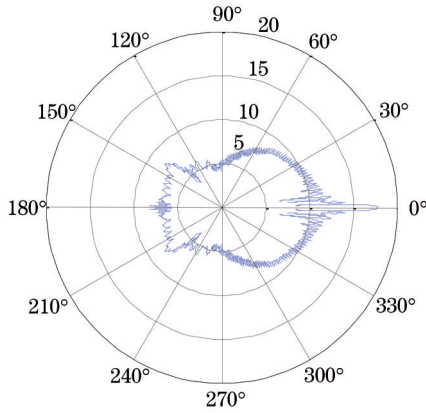


图 1 云水滴粒子的散射能量分布

Fig. 1 Scattering energy distribution of cloud droplet particle

度又反映了光透过水滴粒子的能力。为考查不同波段的单粒子散射特性,计算不同波段光经水滴粒子散射后前向 $-1^\circ\sim 1^\circ$ 范围内的能量占总散射能量之比,并绘制相应曲线,如图 2 所示。能量占比越高,表示能量越集中于前向,即光对粒子的透射性越强。从各波段能量对比可以看出,水滴粒子半径为 $4\sim 12\ \mu\text{m}$ 时,波长越短,前向散射能量占比越高,水滴粒子的透射能力越强。

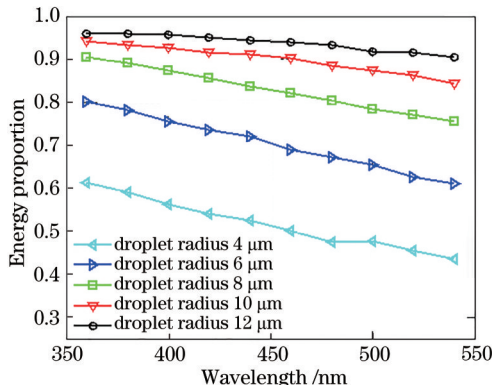


图 2 各波段前向 $-1^\circ\sim 1^\circ$ 范围的能量占比曲线

Fig. 2 Forward  $-1^\circ\sim 1^\circ$  range energy proportion for each waveband

## 2.2 蒙特卡罗法求解多粒子散射介质的光学行为

蒙特卡罗方法是一种基于概率的随机模拟方

法,可以用来仿真云层介质的光学特性,将散射过程看成是光子和介质粒子的碰撞过程,用随机变量的频率作为相应的概率,从而可以得到散射介质光学行为的近似结果。计算时使用的光子数目越多,结果越接近真实发生的情况,当光子数目足够多时,结果收敛于某一确定值,此时可以认为计算的结果就是实际真实的结果<sup>[17]</sup>。

对于大气辐射传输部分,使用 libRadtran 软件包,采用 Buras 等<sup>[18]</sup>提出和改进的 Monte-Carlo for the physically correct tracing of photons in cloudy atmospheres (MYSTIC) 矢量辐射传输模型。对于云层介质传输部分,则采用 Linux 环境下 C++ 语言编写的蒙特卡罗法仿真程序进行参量的设定和运算。蒙特卡罗算法流程如图 3 所示。

蒙特卡罗算法中,光子循环是从光子初始化开始的,循环持续进行直到光子被吸收或超出介质范围,统计相应信息然后结束光子循环。每一个光子都需要进行光子循环过程,实际运算时间与光子数目、云层参数的设置(包括厚度和粒子数浓度等)都有关。蒙特卡罗法的几个关键运算节点如下。

1) 光子初始化:包括入射光状态的初始化和坐标系的初始化。入射光可初始化为无偏振的自然光,即 Stokes 矢量 $(1, 0, 0, 0)$ ;也可初始化为已具有一定偏振的天空光(自然光和偏振光的叠加)。坐标系包括全局坐标系和光子坐标系,初始化时光子坐标系与全局坐标系平行。

2) 光子新坐标:光子经过 $n$ 次碰撞之后,位置为 $P_n = (x_n, y_n, z_n)$ ,方向向量为 $D_n = (u_n, v_n, w_n)$ 。光子的单步位移长度为

$$\Delta s = -\left(\frac{1}{\mu_e}\right) \ln \xi, \quad (5)$$

式中: $\xi$ 是 $(0, 1)$ 区间上均匀分布的随机数; $\mu_e$ 是体衰减系数(体散射系数和体吸收系数之和)。由此可知第 $n+1$ 次碰撞的位置为

$$P_{n+1} = P_n + \Delta s D_n = (x_n + \Delta s u_n, y_n + \Delta s v_n, z_n + \Delta s w_n). \quad (6)$$

3) 状态变换:光子和粒子碰撞,发生米散射作用,可以通过单粒子米散射的穆勒矩阵 $M(\theta)$ 来获得光子碰撞之后的 Stokes 矢量。而对每次散射来说,发生散射的平面与入射面并不一定重合,因此对每一次散射都定义一个夹角 $\phi$ ,引入旋

转矩阵 $L(\phi)$ ,在散射前将入射光的 Stokes 矢量转换到散射面,而散射之后,将散射光的 Stokes 矢量再旋转变换回全局坐标系中。这样经过 $n$ 次散射之后,光子相对于全局坐标系的 Stokes 矢量为

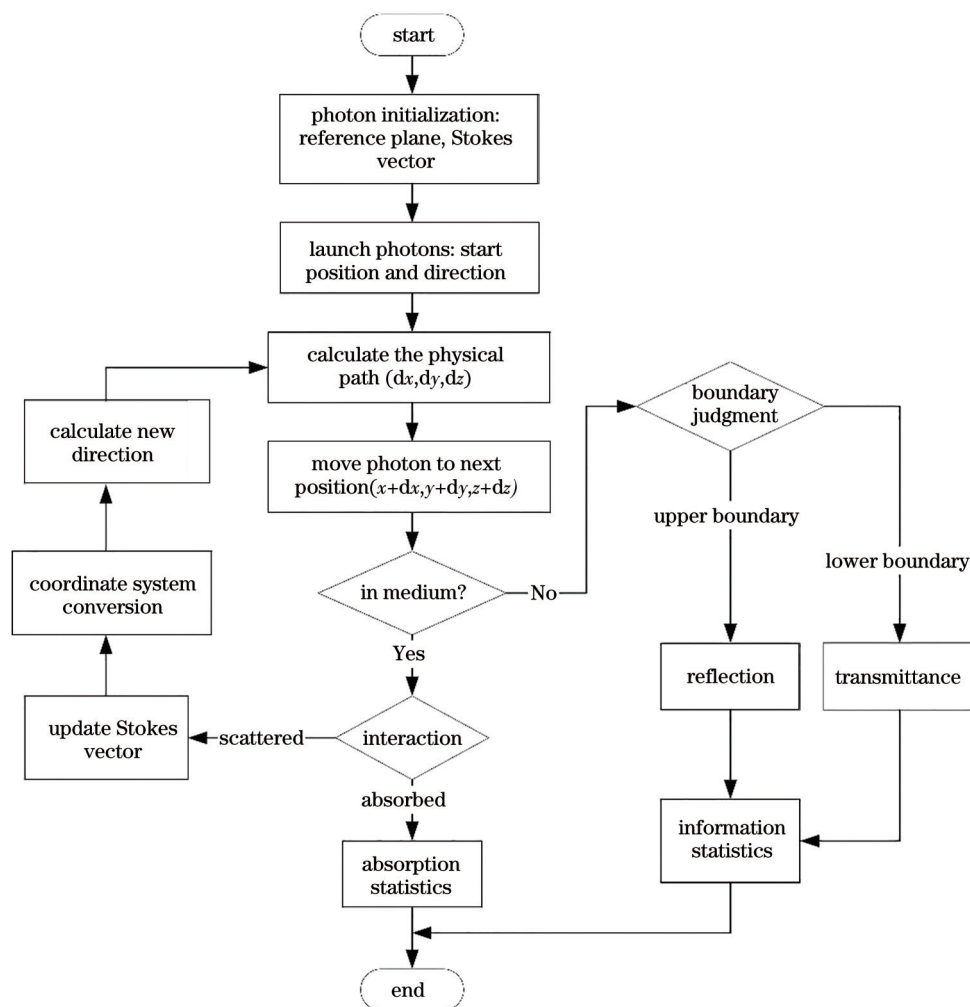


图 3 蒙特卡罗算法流程

Fig. 3 Flow chart of Monte-Carlo algorithm

$$S_n = L(-\phi_n)M(\theta_n)L(\phi_n)L(-\phi_{n-1})M(\theta_{n-1})L(\phi_{n-1}) \cdots L(-\phi_1)M(\theta_1)L(\phi_1)S_0 \quad (7)$$

4) 吸收判断:在光子和粒子发生“碰撞”的时候,通过计算吸收的概率,来确定光子是否被吸收,如果光子被吸收,那么循环结束,否则会继续进行散射循环直到被吸收或者位置判断到达设定范围之外。吸收概率的计算公式为

$$p = \frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{\text{ext}}} \quad (8)$$

式中:  $Q_{\text{abs}}$  是吸收效率因子;  $Q_{\text{ext}}$  为消光效率因子。

5) 位置判断和信息统计:每一次光子碰撞之后都需要进行位置判断,统计非相干光 Stokes 矢量叠加 ( $S = \sum_{i=1}^n S_i$ ) 和光子的位置和方向,若光子仍在散射介质内,则继续循环;若超出设定的边界,则循环结束。

### 3 基于米散射蒙特卡罗法的云层偏振传输仿真及结果

#### 3.1 云散射介质光透射能力仿真

采用蒙特卡罗法对云层介质的散射行为进行仿真计算,验证多粒子散射中各波段的透射特性。实验原理如图 4 所示,云层水滴粒子半径为  $6 \mu\text{m}$ ,云水含量<sup>[19]</sup>为  $0.2 \text{ g/m}^3$ ,云层厚度为  $500 \text{ m}$ ,仿真实验中探测角度范围取为  $0^\circ \sim 5^\circ$ ,实验光子数目为 100000。

仿真实验中,探测器得到的光子数目表示  $\alpha$  角度内最终统计得到的光子数目  $m$ ,总入射光子数目  $N=100000$ ,则  $m/N$  表示此方向的散射能量占入射能量的百分比,表征该波段的云层透射能力。计算得各波段前向散射能量对比曲线如图 5 所示。由



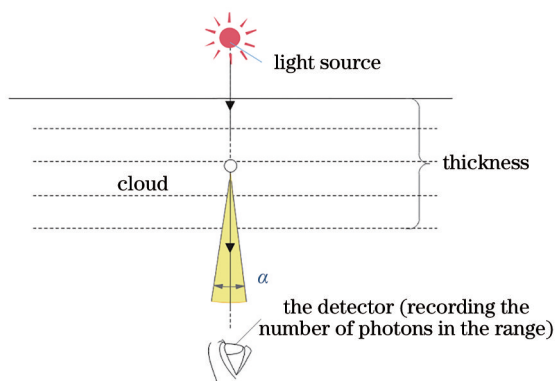


图 4 云层介质光透射仿真原理示意图

Fig. 4 Simulation principle schematic of light transmission through cloud medium

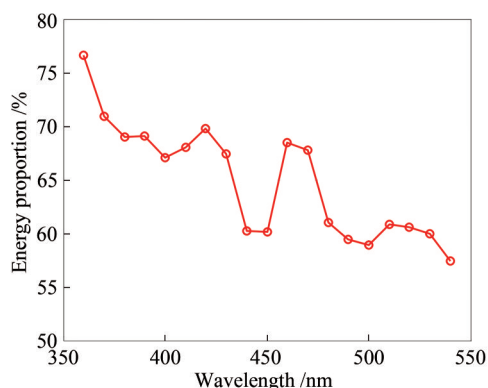


图 5 各波段前向散射能量对比曲线

Fig. 5 Forward scattering energy comparison curve for each waveband

曲线可知, 360 nm 波前向透射能量占比最高, 其透射能力是 420 nm 波的 1.1 倍, 是 540 nm 波的 1.33 倍, 显然紫外波段透射能力要强于可见光波段。

### 3.2 全天空偏振模式仿真

为分析各波段天空偏振分布模式, 现采用全天空大气的蒙特卡罗法来仿真计算天空偏振, 研究在晴天和云层覆盖两种情况下各波段的天空偏振模式和区别。仿真实验设置的云层厚度为 1000 m, 水滴粒子半径为 6  $\mu\text{m}$ , 云水含量为 0.2  $\text{g}/\text{m}^3$ , 太阳高度角为 30°, 太阳方位角为 30°。仿真实验得到的全天空偏振度模式如图 6 所示, 上部分 6 张图片为晴空条件下不同波段的偏振度模式, 下部分 6 张图片为阴云条件下不同波段的偏振度模式, 右侧的偏振度标尺为实际偏振度的 100 倍。

观察晴空偏振度模式图可以看出, 偏振度图呈以太阳为半径的环状分布。从数值上来看, 360 nm 紫外波段偏振度低于可见光波段, 最大偏

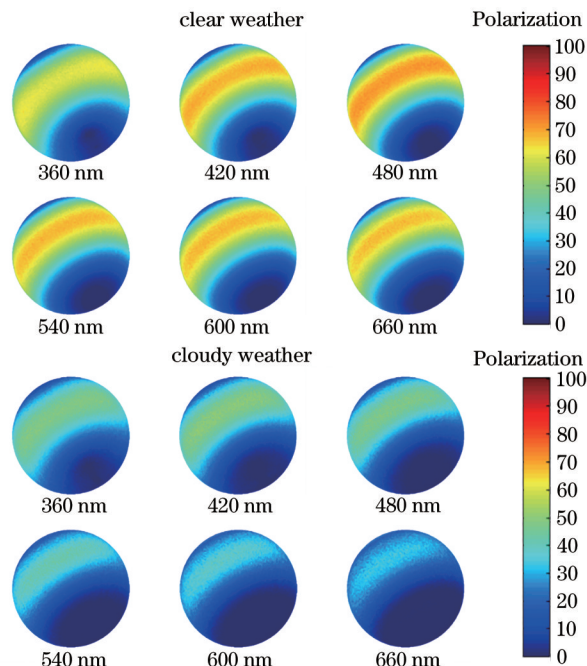


图 6 有云和无云时各波段全天空偏振度模式对比

Fig. 6 Comparison of full-sky polarization patterns for each waveband in the presence and absence of clouds

振度在 0.5 到 0.6 之间; 可见光各波段偏振度在数值上无明显差异, 最大偏振度在 0.7 左右。观察阴云条件偏振度模式图可以看出, 360 nm 紫外波段偏振度最高, 可见光波段偏振度远低于紫外波段, 并且随着波长的增加, 偏振度降低。总体来看: 晴朗天气条件下, 紫外波段偏振度不占优势, 但在阴云条件下, 紫外偏振度最高; 从晴朗天气到阴云天气的转换中, 紫外波段天空偏振度变化最小。

为定量分析偏振度变化, 取天顶方向的偏振度进行各波段对比, 得到天顶方向无云和有云时的偏振度对比曲线和偏振度保持曲线, 如图 7 所示, 其中以天顶方向有云时的偏振度和无云时的偏振度比值  $H$  作为偏振保持性衡量指标。

由图 7(a) 结果可知, 无云时, 紫外波段偏振度明显低于可见光波段; 而云层存在时, 紫外波段天顶方向偏振度远高于可见光波段。图 7(b) 纵坐标为  $H$ 。  $H$  表示天空光透过云层之后的偏振度占透过云层之前的偏振度的比值, 取值在 0 到 1 之间, 若  $H$  为 0, 表示云层下方无偏振, 即云层将天空光偏振度削减为 0; 若  $H$  为 1, 表示偏振特性不受云层影响。由图 7(b) 结果可知, 紫外波段光经过云层之后, 偏振保持性最好, 偏振度受云层影响最小。

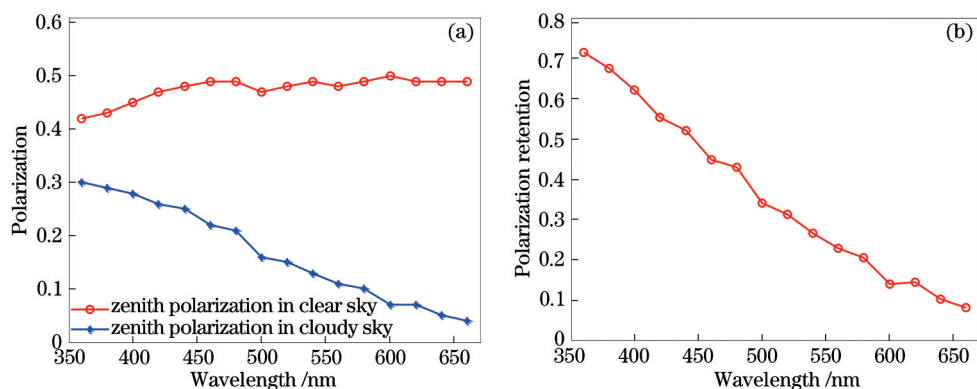


图 7 晴空和有云时各波段光沿天顶方向的偏振信息。(a)偏振度曲线;(b)各波段光经过云层后的偏振保持性

Fig. 7 Zenith polarization of each waveband light in clear and cloudy weathers. (a) Polarization curves; (b) polarization retention of each waveband light through cloud

## 4 结 论

为了对“生物偏振导航紫外悖论”进行解释,探究紫外偏振透云特性,研究了单粒子散射规律和云层的光传输特性,完成了全天空偏振模式的仿真。蒙特卡罗仿真结果表明,紫外波段的云层穿透能力约为可见光波段的 1.3 倍。全天空偏振模式仿真结果表明:晴朗天气下,天顶方向紫外波段偏振度为 0.42,比可见光波段低 12% 左右,紫外波段作为导航目标波段无优势,但仍满足导航需求;多云天气下,天顶方向紫外波段偏振度为 0.3,是可见光波段平均偏振度的 2 倍左右。云层存在的情况下,紫外波段更高的云层穿透性导致紫外天空偏振模式更稳定,生物选择紫外波段作为导航目标波段更利于在多云天气下进行偏振导航。

## 参 考 文 献

- [1] Labhart T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system[J]. *Nature*, 1988, 331(6155): 435-437.
- [2] 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.
- [3] Chu J K, Zhang R, Wang Z W, et al. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(23): 2568-2577.  
褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(23): 2568-2577.
- [4] Mappes M, Homberg U. Behavioral analysis of polarization vision in tethered flying locusts[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2004, 190(1): 61-68.
- [5] Wehner R. Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(8): 579-588.
- [6] Dacke M, Nordström P, Scholtz C, et al. A specialized dorsal rim area for polarized light detection in the compound eye of the scarab beetle *pachysoma striatum*[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2002, 188(3): 211-216.
- [7] Bulter C G. The dance language and orientation of bees [J]. *Animal Behaviour*, 1969, 17: 394-395.
- [8] Brines M L, Gould J L. Skylight polarization patterns and animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 96(1): 69-91.
- [9] Hawryshyn C W. Polarization vision in fish[J]. *American Scientist*, 1992, 80(2): 164-175.
- [10] Barta A, Horváth G. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, 226(4): 429-437.
- [11] Cui Y, Zhang X G, Zhou X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of skylight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601001.  
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.
- [12] Jin R C, Xie L D, Chu J K, et al. Navigation attitude optimization solution method based on skylight polarization mode[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(1): 39-45.  
金仁成, 谢林达, 褚金奎, 等. 基于天空光偏振模式

- 的导航姿态最优化解算方法[J]. 航空兵器, 2020, 27(1): 39-45.
- [13] Wang Y N, Xiao M. Study on transmission characteristics of polarized light in turbid media[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141101.  
王燕妮, 校曼. 偏振光在浑浊介质中的传输特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141101.
- [14] Cui Y, Zhou X C, Liu Y F, et al. Solar meridian extraction method based on Hough transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 1701002.  
崔岩, 周鑫昌, 刘亚飞, 等. 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 1701002.
- [15] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2201001.  
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2201001.
- [16] Yin J F. The study on observation and parameterization of cloud-precipitation microphysical properties over East Asia[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.  
尹金方. 东亚区域云和降水微物理特征及云微物理参数化方案构建[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [17] Wang X F, Zhang X, Zhang J Z, et al. Ultraviolet light atmospheric scattering propagation model based on Monte Carlo method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 110102.  
王晓芳, 张新, 张继真, 等. 基于蒙特卡罗方法的紫外光大气散射传输模型[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 110102.
- [18] 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.  
Buras R, Mayer B. 云雾大气辐射传输蒙特卡罗模拟方法的高效无偏技术的解决[J]. 定量光谱学与辐射传输杂志, 2011, 112(3): 434-447.
- [19] Ding X, He J, Wang P, et al. Experimental results and cloud microphysical parameters retrieval of THz-band cloud profiling radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(2): 189-194.  
丁霞, 何静, 王平, 等. 太赫兹云雷达的外场试验结果及反演算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(2): 189-194.