

复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究

张肃, 战俊彤*, 付强, 姜会林

长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 基于矢量辐射传输方程的基本理论, 考虑不同性质云层和不同海雾浓度的影响, 将现有简化的两层大气结构细化为三层进行处理, 采用倍加累加法仿真天空光经过多层大气环境的散射过程, 基于 Rayleigh 散射和 Mie 散射算法分别对每层粒子分布特性进行描述, 建立适用于不同典型海洋环境下天空光的偏振分布模式。在太阳子午线位置处, 研究海面观测高度角与下行辐射偏振特性的变化关系, 研究结果表明, 天空光偏振度随观测高度角呈规律性变化, 随着云层和海雾粒子的增大及光学厚度的增加, 偏振度逐渐增大。本研究为复杂海洋环境下垂直探测时天气环境及观测位置的选择提供了理论参考。

关键词 大气光学; 辐射传输; 倍加累加法; 多层海雾环境; 天空光; 偏振特性

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2201001

Simulation Research on Sky Polarization Characteristics Under Complicated Marine Environment

Zhang Su, Zhan Juntong*, Fu Qiang, Jiang Huilin

Space Opto-Electronics Technology Institute, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract Based on the basic theory of vector radiative transfer equation, considering the influence of different kinds of cloud layers and different concentrations of advection fog, we developed a simplified two-layer atmosphere structure to a three-layer one and applied an adding-doubling method to simulate the scattering process of skylights through multilayer atmosphere. Furthermore, with the Rayleigh and Mie theory, the distribution characteristics for atmosphere, cloud, and fog layers were described, respectively, and the adding-doubling method was utilized to build the polarization distribution model of skylights under different typical marine environments. In addition, we investigated the relationship between the degree of polarization (DOP) and the observed altitude angle on the meridian of the sun. The results show that the skylight DOP varied regularly with the observed altitude angle. Moreover, with the rise in the optical thickness and with the increase of the cloud size and advection fog particles, DOP gradually increased. In conclusion, this study provides theoretical references for the selection of weather conditions and observation locations in the vertical polarization detection under complicated marine environments.

Key words atmospheric optics; radiative transfer; adding-doubling method; multilayer advection fog; skylight; polarization characteristics

OCIS codes 010.1290; 010.1310; 290.4210; 290.1090

1 引 言

雾是由悬浮在近地面空气中缓慢沉降的水滴或冰晶质点组成的一种气溶胶系统, 海雾是在特定的海洋环境和天气条件下形成并维持的气溶胶^[1]。大气海雾介质对天空光的影响主要体现在微粒的散射作用上, 微粒与非偏振的太阳光相互作用产生偏振

光, 使天空光具有稳定的偏振分布模式^[2-3]。对大气海洋环境下天空偏振分布规律的研究在天文遥感、环境监测、激光通信等领域具有重要的意义^[4-5]。

浑浊介质中光传播的研究以求解辐射传输方程为中心, 问题的本质是小粒子的光散射问题^[6-7]。在雾天辐射传输的研究中, 关于矢量辐射传输方程的解法主要有球谐函数法^[8]、倍加累加法^[9]、逐次散射

收稿日期: 2020-06-15; 修回日期: 2020-07-07; 录用日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(61905025, 61890963, 61705017)、吉林省科技厅项目(20200201261JC)

* E-mail: zhanjuntong@cust.edu.cn

法^[10]以及蒙特卡罗方法^[11-12],基于以上研究方法,许多研究者做出了相应的研究。文献[13]针对雾天环境,采用蒙特卡罗方法研究辐射雾和平流雾中圆偏光的保偏性能,为雾天环境不同波段下偏振探测中偏振器件的选择做出理论指导;文献[14]采用蒙特卡罗方法重点研究波段及探测距离变化下雾天环境中偏振传输对探测范围的影响,为偏振探测中相应探测模式的选择提供了依据。但以上方法都局限在对水平方向雾天环境中的偏振传输,对于垂直方向经过大气、海雾多层海洋环境的偏振分布的情况并未见报道。针对垂直方向的多层介质,Evans等^[15]提出的基于矢量辐射传输方程的RT3方法是计算非均匀多层介质传输特性时使用最广泛的方法之一,该方法基于直观物理过程采用倍加累加方法求解两层间的辐射和透射性质,进而求得整个全天空偏振分布模式。文献[16]采用该方法对简化的双层大气光波的Stokes参量进行求解,分别模拟晴天、多云及阴天情况下全天空的偏振信息。文献[17]采用基于倍加累加法的辐射传输模型研究可见光波段至近红外波段下多种天气条件的天空偏振模型,并由实测验证,仿真结果在80%的区域内与实测结果一致。但以上方法都局限于模拟陆地环境下天空光的偏振分布模式。

基于此,在现有研究的基础上,为了进一步研究复杂海洋环境下海面对天空偏振探测及通信时天空光偏振特性对测试结果的影响,采用基于矢量辐射传输方程的RT3方法仿真从大气顶层到海面下行辐射的传输过程,将目前研究中简化的双层大气结构扩展为更为复杂的三层结构,分别以晴朗天气下大气-海雾双层结构以及阴天环境下大气-云层-海雾三层结构作为研究对象,根据云层、海雾粒子尺寸分布特点,由Mie散射方法计算该层粒子的分布特性,以变化规律较明显的太阳子午线位置为基准,研究在不同云层、海雾浓度下观测高度角随天空下行辐射偏振度(DOP)的变化,掌握复杂海洋环境下天空光偏振分布模式的变化规律,为海洋环境下偏振探测的研究提供了参考。

2 基于倍加累加方法的天空偏振建模

2.1 基于RT3的大气偏振建模

辐射传输方程可描述为单色辐射量与大气的相互作用过程,包含了大气与电磁辐射的吸收、散射和热辐射等,解决大气介质中的光波或辐射传播问题就是求解满足边界条件的辐射传输方程,各种辐射

传输问题可采用不同的处理方法。

RT3模型采用的是倍加累加法求解矢量辐射传输方程,两层间相互作用的基本原理是:若两个介质层的反射和透射矩阵已知,则组合层的辐射和透射矩阵可通过两层间的连续反射过程得到。层间作用过程如图1所示,其中 I_0^+ 和 I_1^- 为入射辐射, I_0^- 和 I_1^+ 为出射辐射,上角标“+”和“-”分别代表下行和上行辐射, R 和 T 分别为反射、透射矩阵, S 为内部辐射源。层间作用原理可表示为

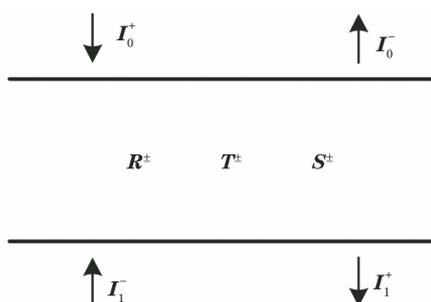
$$\begin{cases} I_1^+ = T^+ I_0^+ + R^+ I_1^- + S^+ \\ I_0^- = T^- I_1^- + R^- I_0^+ + S^- \end{cases} \quad (1)$$


图1 介质层间相互作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the interaction principle between the medium layers

基于RT3的大气偏振建模的基本流程如图2所示,首先将垂直不均匀的散射大气划分为若干个垂直均匀大气层;根据每一层粒子的特点,选择相应的散射算法,如Mie散射算法、Rayleigh散射算法、T矩阵算法等,用于粒子层散射特性的分析,计算每层粒子的散射特性;之后,对基于RT3的矢量辐射传输方程进行求解,采用倍加法计算每个均匀层间的反射和透射性质;最后,由已知的介质层反射和透射矩阵,采用累加法得到整个非均匀组合层的反射和透射性质,进而求得整层大气的辐射性质。

2.2 单次散射传输过程

由相位矩阵 F 到散射Mueller矩阵 M 的偏振传输过程可表示为

$$M = L(i_2 - \pi) \cdot F(\cos \Theta) \cdot L(i_1), \quad (2)$$

式中: i_1 和 i_2 分别表示入射光线所在散射平面与子午面的夹角和出射光线所在散射平面与子午面的夹角; Θ 为散射角; L 为偏振旋转矩阵,其中

$$L(i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2i & -\sin 2i & 0 \\ 0 & \sin 2i & \cos 2i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

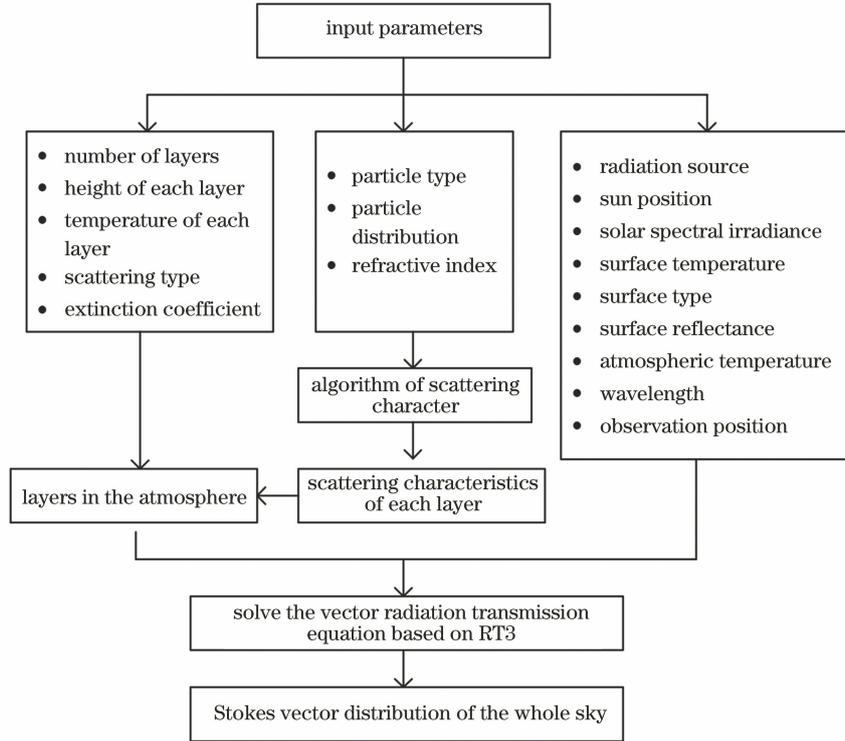


图 2 基于 RT3 的大气偏振建模的基本流程

Fig. 2 Basic procedure of atmospheric polarization mode based on RT3

对于旋转对称粒子, 散射相位矩阵中 16 个元素中只有 6 个独立元素, 表示为

$$\mathbf{F}(\cos \Theta) = \begin{bmatrix} a_1(\cos \Theta) & a_5(\cos \Theta) & 0 & 0 \\ a_5(\cos \Theta) & a_2(\cos \Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_3(\cos \Theta) & a_6(\cos \Theta) \\ 0 & 0 & -a_6(\cos \Theta) & a_4(\cos \Theta) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, 若粒子为球形粒子, 则可应用 Mie 散射求解散射相位矩阵中各元素 $a_1 \sim a_6$ 。 $a_1 \sim a_6$ 分别由勒让德多项式及广义勒让德多项式展开, 表示为

$$\begin{cases} a_1(\cos \Theta) = a_2(\cos \Theta) = \sum_{l=0}^L \beta_l P_l(\cos \Theta), \beta_0 = 1 \\ a_3(\cos \Theta) = a_4(\cos \Theta) = \sum_{l=0}^L \delta_l P_l(\cos \Theta) \\ a_5(\cos \Theta) = - \sum_{l=2}^L \left[\frac{(l-2)!}{(l+2)!} \right]^{1/2} \gamma_l P_l^2(\cos \Theta) \\ a_6(\cos \Theta) = \sum_{l=2}^L \left[\frac{(l-2)!}{(l+2)!} \right]^{1/2} \epsilon_l P_l^2(\cos \Theta) \end{cases}, \quad (5)$$

其中, β 、 δ 、 γ 和 ϵ 分别为散射相位矩阵中各元素的勒让德多项式的系数, l 表示勒让德多项式的级数, $P_l(\cos \Theta)$ 和 $P_l^2(\cos \Theta)$ 分别为勒让德多项式和连带勒让德多项式, 两者的关系为 $P_l^2(\cos \Theta) = (1 -$

$$\cos^2 \Theta) \frac{d^2}{d \cos^2 \Theta} P_l(\cos \Theta)。$$

当采用基于 RT3 的偏振建模方法时, 需将上述 Mie 散射方法求得的散射相位矩阵中各元素全部展开为勒让德多项式, 得到

$$a_j(\cos \Theta) = \sum_{l=0}^L \alpha_l P_l(\cos \Theta), \quad (6)$$

其中, $j=1, 2, \dots, 6$ 表示散射相位矩阵中各元素, α 为勒让德多项式系数。

3 大气-海雾复杂环境的多层粒子分布特性

3.1 大气-海雾复杂环境的分层

采用按大气温度场的垂直结构进行分层, 将大气从地面起依次分为对流层、平流层、中层、热层以及外大气层。基本上所有的天气现象都发生在对流层内, 其含有地球大气总质量的 80%, 以及几乎所

有的水汽,是产生偏振现象的主要层。在大气偏振模式的研究中,根据散射粒子的不同将对流层进行划分,主要分为 Rayleigh 散射层和 Mie 散射层。其中,5~15 km 的大气层水汽含量较少,气体粒子半径小,主要由大气分子组成,可用 Rayleigh 散射进行模拟;在 0~5 km 高度,除作为主体的气体成分之外,大气中还存在着各种液态和固态,以及液态和固态混合的粒子,其中最常见的是液态水构成的云和雾粒子,雾和各种高低层水云都是接近球形的水滴,当地表环境为海面时,海面平流运动的空气与海面之间的显热和潜热的交换作用,形成平流雾,该雾

粒子直径较大,散射过程复杂,主要由 Mie 散射进行计算。

根据实际海面上海雾天气的情况对大气-海雾环境进行划分时需考虑的情况极其复杂,为了在简化计算的同时,突出海洋环境作用下最下层海雾层与中间云层对大气偏振模式作用的区别,研究晴朗天气无云条件下和有云条件下的海雾环境大气偏振模式,参考美国标准大气分别将大气简化为两层和三层的模式进行计算,如图 3 所示,其中大气分子层的散射特性由 Rayleigh 散射计算,云层和海雾层的散射特性都由 Mie 散射进行计算。

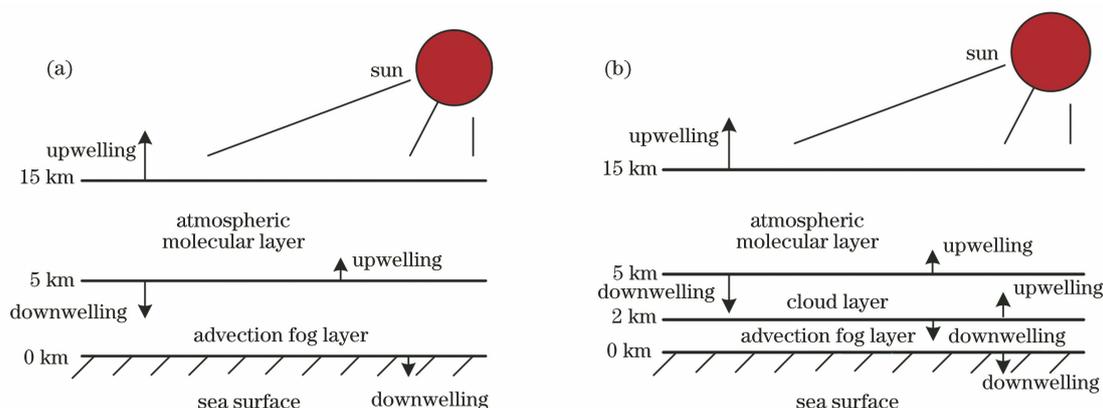


图 3 大气-海雾环境分层情况。(a)晴朗天气无云情况;(b)有云情况

Fig. 3 Stratification of the atmosphere and advection fog environment. (a) Clear sky without cloud; (b) cloudy sky

3.2 海雾和水云层粒子分布特性

海雾和水云的外观和几何特征在空间和时间上的复杂可变性,使得海雾和水云层中球形水滴的尺寸大小不一。实际应用中,海雾和水云在单位体积内的粒径谱分布 $n(r)$ 一般用修正的 Gamma 分布进行描述(Deirmendjian, 1969)^[18],即

$$n(r) = Ar^{\alpha'} \exp(-br^{\gamma'}) = Nar^{\alpha'} \exp\left[-\frac{\alpha'}{\gamma'} \left(\frac{r}{r_{\text{mod}}}\right)^{\gamma'}\right], \quad (7)$$

其中, N 为粒子每立方厘米中总的数量密度, a, b, α', γ' 均为正实数, a 是归一化常数,用于确保尺寸分布的积分在所有粒径产生的数量密度 N 之内, α' 和 γ' 用于描述粒子尺寸分布的斜率, r_{mod} 为模半径,

$$b = \alpha' / r_{\text{mod}}^{\gamma'} \cdot \gamma', A = Na.$$

修正的 Gamma 分布适用于描述具有单峰分布的粒子谱分布,表 1 所示为云层和海雾层中气溶胶粒子对应的修正 Gamma 分布常数,其中云层选取典型的海洋性层云和积云为例,主要参考 Hess 等^[19]的气溶胶和云粒子光学性质软件包 OPAC (Optical Properties of Aerosol and Cloud) 中的云粒子尺寸分布数据;海雾层中选取两种典型浓度的海雾粒子,修正 Gamma 分布常数的数据来自于大气软件 MODTRAN,其中浓海雾的模半径为 $10 \mu\text{m}$,中海雾的模半径为 $8 \mu\text{m}$ ^[13]。云层和海雾层天气下归一化粒子尺寸分布情况如图 4 所示。

表 1 云层和海雾层的修正 Gamma 分布参数

Table 1 Parameters of modified Gamma distribution for cloud and advection fog layer

Weather condition		A	α'	γ'	b	$r_{\text{mod}}/\mu\text{m}$
Cloud layer	Maritime stratus	0.305	3	1.3	0.193	6.75
	Maritime cumulus	0.00369	4	2.34	0.00713	10.4
Advection fog layer	Heavy advection fog	0.0659	3	1	0.3	10
	Moderate advection fog	0.027	3	1	0.375	8

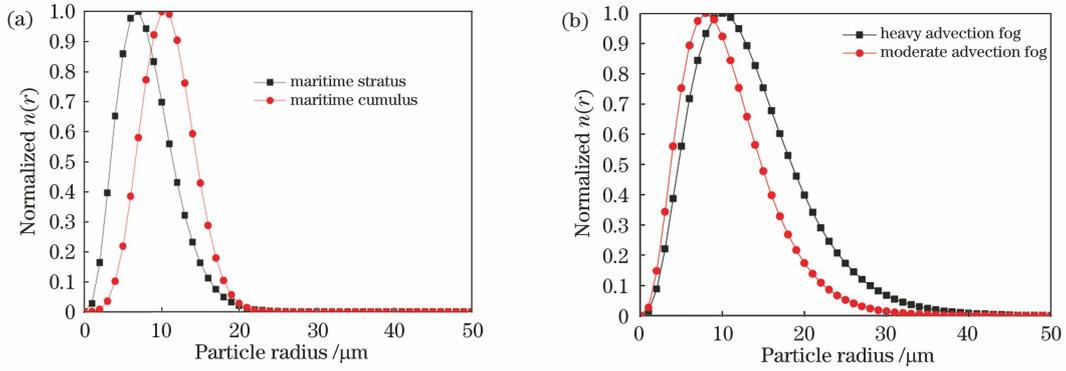


图 4 云层和海雾层天气情况下归一化粒子尺寸分布情况。(a)云层；(b)海雾层

Fig. 4 Normalized particle size distribution for cloud layer and advection fog layer. (a) Cloud; (b) advection fog

根据表 1 中云层和海雾层粒子粒径的分布特性,采用 Mie 散射算法分别得到海洋性积云、海洋性层云、浓海雾和中海雾的散射特性,其中单次反照率都为 0.99。由于光学厚度 $\tau = \mu_e \cdot L$,即消光系数 μ_e 与层厚 L 的乘积,故可采用光学厚度对各层厚度和消光系数进行描述。设海洋性积云、海洋性层云、浓海雾和中海雾的光学厚度分别为 1.0、0.2、1.2 和 0.5,对以上环境基于 RT3 进行仿真,由于环境中存在较大尺寸的粒子,故在仿真中积分角的数量会增加^[15]。根据散射特性,可知计算时需要增加积分角数量的选择,但为了简化计算,未保留全部的分解级数。对于高斯积分方法,根据 $L_{max} = 4N_\mu - 5$ 选择最大的级数,其中 N_μ 为每半球积分角的数量,仅保留对(6)式中贡献较大的勒让德多项式系数的级数,忽略系数较小的部分,以满足 RT3 仿真方法的计算条件。

4 大气-海雾偏振仿真结果与分析

4.1 大气环境仿真结果及验证

由于目前未见对大气海雾分层环境偏振模式的

研究,基于经典的 Rayleigh 散射理论,针对晴朗天空,假设大气粒子是均匀分布的大气分子,将整个大气层看作为一层进行处理,满足 Rayleigh 散射条件。将基于 RT3 的仿真建模方法得到的大气散射天空偏振分布与基于 Rayleigh 散射的大气理论模型^[4]得到的分布结果进行对比,如图 5 所示,其中黑色箭头方向为正南方向,S 表示太阳的位置,天顶角为 60° ,方位角为 0° ,由于天空的偏振光测试主要采用可见光的探测方式,大气分子对短波段可见光的散射要比长波段可见光的散射大得多,故选择优势波段 480 nm 进行研究,以验证本文基于 RT3 大气偏振仿真方法的正确性。在 480 nm 波长下的太阳光谱辐照度为 $2035 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ^[20],地表温度为 300 K,大气层顶温度为 0 K。在对大气偏振传输的研究中,主要研究从大气上层到最下层垂直方向的下行辐射情况,不考虑地表的辐射和反射特性。

从图 5 可知,两种方法下得到的大气散射天空偏振分布情况基本相同,且都可在太阳位置取得偏振度的最小值,在方位角为 0° ,天顶角为 -30° ,即与太阳位置的天顶角相差 90° 时取得最大值,整体分

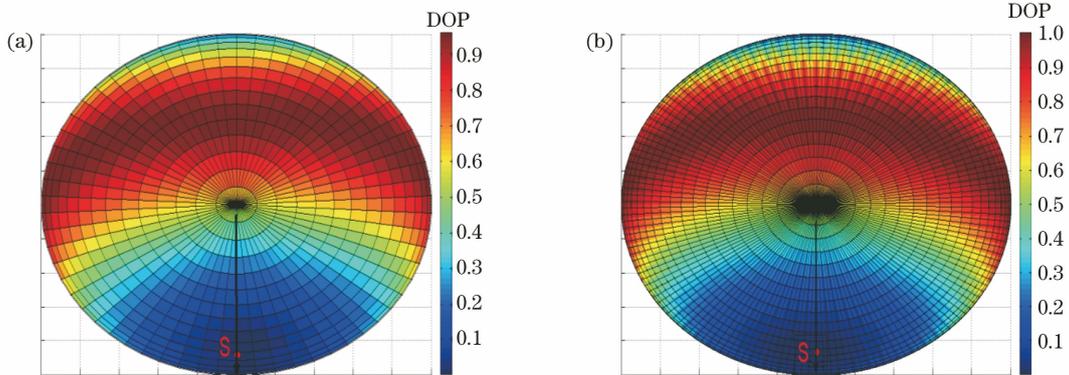


图 5 大气散射天空偏振分布。(a)基于 RT3 的仿真方法；(b)基于 Rayleigh 散射的大气理论模型

Fig. 5 Sky polarization distribution of atmosphere scattering. (a) Simulation method based on RT3; (b) atmospheric theory model based on Rayleigh scattering

布以太阳子午线为对称轴对称,与实际天顶分布一致。为了更清晰地描述图 5 中的各数据点,以太阳子午线位置为例,给出偏振度数值与太阳高度角的变化关系,如图 6 所示。但由于在基于 Rayleigh 散射的大气理论模型中将偏振光理想化为 100% 的线偏振光,因此在偏振度最大值处可得最大偏振度为 1[如图 5(b)所示],而本文所提的仿真建模方法考虑了太阳通量、热源等多种实际因素,得到的最大偏振度为 0.9581,与理想偏振度最大值稍有差距(偏振度值相差 0.0419)。比较两种方法,可知大气散射天空偏振分布趋势完全一致,由此证明基于 RT3 大气偏振仿真方法的可行性。对于海雾及云层等天气环境,基于 RT3 的仿真建模方法的计算过程不变,只是通过经典的 Mie 散射理论改变了该层介质的散射性质而已。

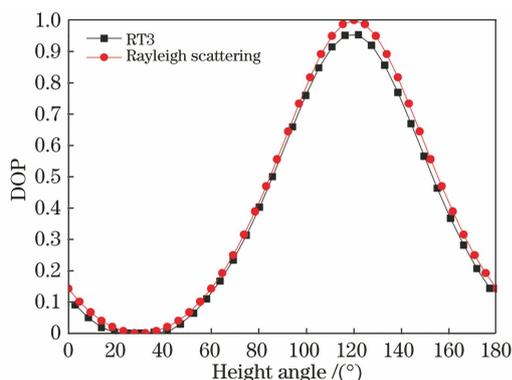


图 6 子午线上偏振度与观测高度角的关系

Fig. 6 Relationship between DOP and observed altitude angle on the meridian of the sun

4.2 大气-海雾环境仿真结果

4.2.1 晴朗无云天气下天空偏振特性的研究

在晴朗无云天气条件下,根据 3.1 节中对大气的分层情况,将其分为大气-海雾两层进行研究,如图 3(a)所示。其中大气层输入参数条件与 4.1 节中完全相同,海雾粒子的散射特性由 Mie 散射计算,分别输入 3.2 节中浓海雾和中海雾的分布函数、波长 480 nm,以及海雾粒子折射率 $1.335 + 9.69 \times 10^{-10}$ 。由于在对天空偏振模式的观测中,主要以海面设备仰视的方式,研究从大气上层到最下层垂直方向的下行辐射情况。以变化规律较为明显的太阳子午线观测位置为例,得到浓海雾和中海雾环境下的太阳子午线上偏振度与观测高度角的变化关系,如图 7 所示。在太阳子午线上偏振度随观测高度角的变化趋势与大气散射天空偏振分布(如图 6 所示)基本一致,在太阳高度角

与观测高度角相差 90° ,即观测高度角为 120° 时,可得到最大偏振度值,在大气 Arago 中性点(观测高度角 145° 附近,即在反太阳点 $20^\circ \sim 30^\circ$ 的位置)处,可得到偏振度的谷值,这一现象与文献[16]中的结果一致,进一步验证了结果的正确性。对比浓海雾和中海雾下的偏振传输特性,可以看出,浓海雾中下行辐射的偏振度优于中海雾的偏振特性,这是由于在浓海雾中存在较大尺寸的粒子,且雾粒子数目增多,大粒子相比于小粒子的前向散射明显,使偏振度的值增大^[13],且粒子数目的增多导致散射次数的增加,使非偏振的自然光向偏振光转化,从而使偏振度增加。

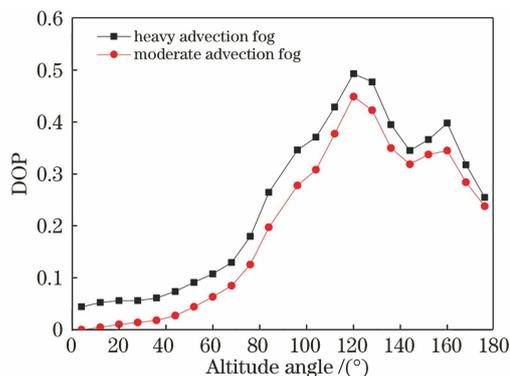


图 7 浓海雾和中海雾环境下偏振度与观测高度角的变化关系

Fig. 7 Relationship between DOP and observed altitude angle under heavy and moderate advection fog

4.2.2 有云影响下天空偏振特性研究

在对大气海雾环境天空偏振特性的研究中,海洋复杂环境多伴有云层的影响,如图 3(b)所示,将大气简化为大气层、云层和海雾层三层进行计算,其中大气层输入条件不变,将 4.2.1 节中的海雾层进一步细化为云层和海雾层两层,分别研究海洋性层云和积云下的浓海雾,以及海洋性层云和积云下的中海雾环境中天空偏振特性随观测高度角的变化关系,其中层云和积云粒子的散射特性由 Mie 散射计算,层云和积云的修正 Gamma 分布的参数如表 1 所示。

图 8 为海洋性积云和海洋性层云影响下海雾环境偏振度随观测高度角的变化,其中图 8(a)为海洋性积云和海洋性层云对大气浓海雾偏振传输特性的影响,在大气和海雾层环境相同的情况下,积云环境下的偏振度明显优于层云的偏振度,这是由于海洋性积云环境中的大粒子以及高光学厚度对太阳光散射的影响,使得非偏光转化成偏振光的概率增加,从

而使偏振度增大。图 8(b)为海洋性积云和海洋性层云对大气中海雾偏振传输的影响,与图 8(a)中浓海雾环境得到的趋势相同,都在中间层积云情况下得到了较好的偏振特性。

为了进一步研究中海雾和浓海雾对偏振特性的影响,在相同云层下对比中海雾和浓海雾所得的结果,如图 9 所示。图 9(a)为海洋性积云影响下浓海

雾和中海雾环境偏振度随观测高度角的变化,其中在大气层和云层相同的情况下,浓海雾的偏振度优于中海雾,这与 4.2.1 节中得到的结论相同,进一步验证了该结果。但相比于 4.2.1 中的结果,由于海雾层厚度减小,则相同云层影响下浓海雾和中海雾的偏振度差距减小,相同海雾环境下海洋性积云和层云(如图 8 所示)对偏振特性影响间的差距较大。

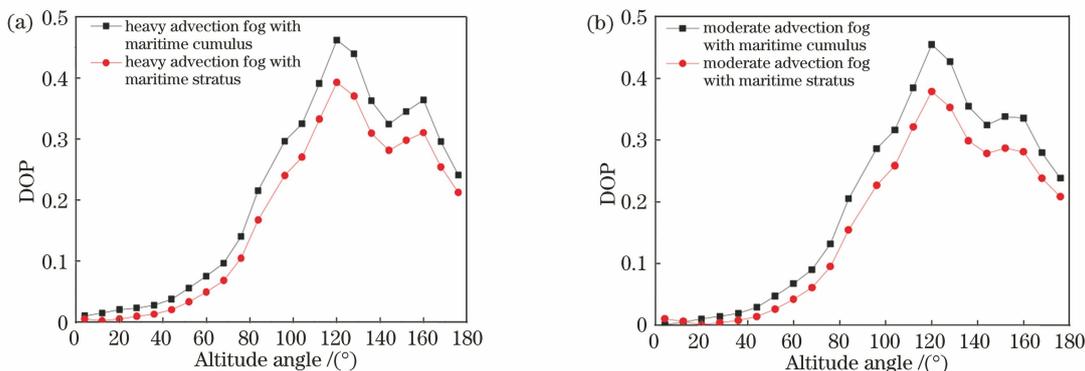


图 8 海洋性积云和海洋性层云影响下海雾环境偏振度随观测高度角的变化。(a)海洋性积云和海洋性层云影响下浓海雾; (b)海洋性积云和海洋性层云影响下中海雾

Fig. 8 Relationship between DOP and observed altitude angle under advection fog with maritime cumulus and stratus. (a) Heavy advection fog with maritime cumulus and stratus; (b) moderate advection fog with maritime cumulus and stratus

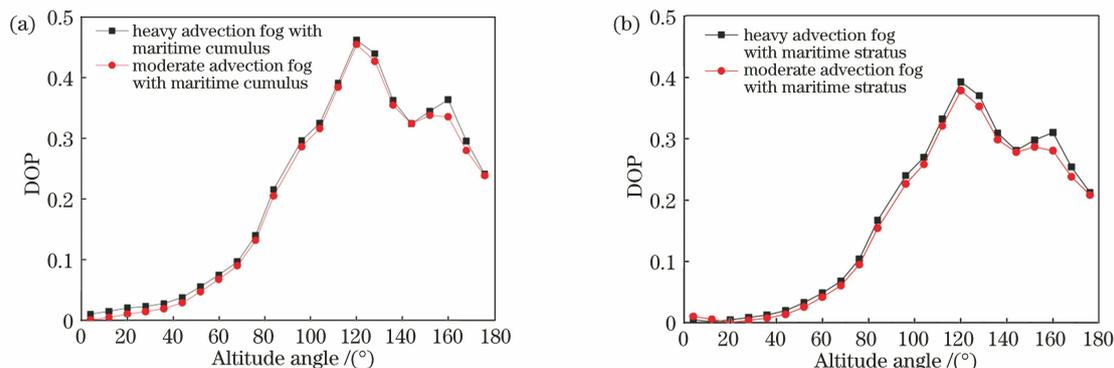


图 9 浓海雾和中海雾在云层环境下偏振度随观测高度角的变化。(a)海洋性积云影响下浓海雾和中海雾; (b)海洋性层云影响下浓海雾和中海雾

Fig. 9 Relationship between DOP and observed altitude angle under heavy and moderate advection fog with cloud layer. (a) Heavy and moderate advection fog with maritime cumulus; (b) heavy and moderate advection fog with maritime stratus

5 结 论

从地面对天空进行偏振探测时,天空光的偏振分布对探测结果存在着不可忽视的影响。针对传统天空光偏振分布的研究不适用于复杂海洋环境的问题,对海雾环境进行研究,将传统简化的两层大气结构扩展为三层,由 Mie 散射算法对云层、海雾层粒子分布特性进行描述,采用基于矢量传输方程的

RT3 方法仿真天空光经过大气、云层、海雾层的下行辐射过程,研究不同性质云层和不同海雾浓度环境下太阳子午线位置处偏振度与观测高度角的变化关系。研究结果表明:1) 采用基于 RT3 的仿真建模方法得到的大气散射天空偏振分布与基于 Rayleigh 散射的大气理论模型得到的分布趋势完全一致。2) 在太阳与观测高度角间的散射角为 90° 时,可得到最大偏振度值;相反地,在太阳位置处,可

得最小偏振度值;在大气 Arago 中性点处,可得到偏振度的谷值。3) 在波段 480 nm 下,随着云层和海雾粒子尺寸的增大,以及光学厚度的增加,偏振度逐渐增大。以上研究表明在海面对天空进行偏振观测时,太阳高度角、观测高度角及天气环境等条件的选择至关重要。

在实际的应用中,可用海面上搭载光谱仪与偏振片组合的方式,通过调节仪器的观测位置,测量不同观测方位下天空中某一点的下行辐射偏振度值,最终用仿真结果加以验证。但由于海洋环境复杂多变,需通过大量的测试实验对天空光偏振模式的仿真结果进行修正。本研究对典型海洋环境下天空偏振特性进行了研究,给出了天空偏振特性的变化趋势,为下一步复杂海洋环境下天空光偏振模式的测试提供了理论支撑。

参 考 文 献

- [1] Wang J C, Qiao Y L, Yang S Z, et al. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101005.
王家成, 乔延利, 杨世植, 等. 海洋大气气溶胶光学模型参数的相关性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1101005.
- [2] 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.
- [3] 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.
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.
- [4] Cui Y, Zhao J Y, Guan L, et al. Simulation and measurement of skylight polarization distribution in Yellow Sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001004.
崔岩, 赵金勇, 关乐, 等. 黄海海域天空光偏振分布仿真与测试[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001004.
- [5] Zhao H J, Ji Z, Zhang Y, et al. Mid-infrared imaging system based on polarizers for detecting marine targets covered in sun glint [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16396-16409.
- [6] Chorfi H, Ayadi K, Gader R, et al. Morphological characterization of particles by the intensity and polarization of the scattered radiation [J]. *Optik*, 2018, 154: 251-257.
- [7] Jin Z, Charlock T P, Rutledge K, et al. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere-ocean system with a rough surface [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7443-7455.
- [8] Tapimo R, Kamdem H T T, Yemele D. Discrete spherical harmonics method for radiative transfer in scalar planar inhomogeneous atmosphere [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(7): 1081-1090.
- [9] Oelkrug D, Brun M, Hubner P, et al. Penetration of light into multiple scattering media: model calculations and reflectance experiments. Part II: the radial transfer [J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(4): 385-395.
- [10] 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.
- [11] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Propagation of linear and circular polarization in a settling smoke environment: theory and experiment [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(17): 4687-4694.
- [12] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of inhomogeneous smog environment on transmission characteristics of polarized light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0729002.
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 非均匀烟雾环境对偏振光传输特性的影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0729002.
- [13] van der Laan J D, Wright J B, Kemme S A, et al. Superior signal persistence of circularly polarized light in polydisperse, real-world fog environments [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5464-5473.
- [14] Zeng X W, Chu J K, Cao W D, et al. Visible-IR transmission enhancement through fog using circularly polarized light [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(23): 6817-6822.
- [15] Evans K F, Stephens G L. A new polarized atmospheric radiative transfer model [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1991, 46(5): 413-423.
- [16] Wang W, Chu J K, Cui Y, et al. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.
王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气

- 偏振建模[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513001.
- [17] Zhang Y, Zhang Y, Zhao H J. A skylight polarization model of various weather conditions[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(4): 453-459.
- 张颖, 张熠, 赵慧洁. 多种天气条件下的天空光偏振模型[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(4): 453-459.
- [18] Rao R Z. Modern atmospheric optics [M]. 3rd ed., Beijing: Science Press, 2015: 152-155.
- 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 152-155.
- [19] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(5): 831-844.
- [20] Shi G Y. Atmospheric radiation [M]. Beijing: Science Press, 2007: 389-390.
- 石广玉. 大气辐射学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 389-390.