

大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响

吴良海 高 隽 范之国* 何均均

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

摘要 利用米氏散射理论分析 O_2 , N_2 , CO_2 , 水滴和气溶胶等粒子的散射与偏振特性, 通过随机传输理论仿真不同粒子影响下的偏振分布, 并与检测结果进行比对, 对粒子散射特性及其对空间偏振特性分布的影响进行了系统的理论研究。计算了不同粒子的散射系数和吸收系数随尺寸和复折射率的变化规律, 研究了典型气态分子和非气态粒子偏振度及散射光强随散射角度的变化规律。通过检测结果与气态分子与非气态粒子影响下的模型之间的对比, 得到空间中的偏振分布主要由气态分子决定, 而地平附近中性点的出现与太阳高度角较低时刻偏振度的衰减与非气态粒子密切相关的结论。

关键词 大气光学; 偏振; 米氏散射; 非气态粒子

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0701005

Scattering of Particles in the Atmosphere and their Influence on Celestial Polarization Patterns

Wu Lianghai Gao Jun Fan Zhiguo He Junjun

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract Scattering and polarization properties of particles, such as O_2 , N_2 , CO_2 , water droplets and aerosol, were analyzed by the Mie scattering theory. The theoretical skylight polarization patterns were simulated with different particles and analyzed by making comparisons with real-time measured results. Systematic theoretical studies on the particle's scattering and their influence on celestial polarization patterns were performed. The absorption and scattering coefficients of different particles were diagnosed with different sizes and complex refractive indices, also were the polarization degree and intensity with different scattering angles. Through the comparisons between measured results and theoretical models determined by gaseous and non-gaseous particles, the conclusion was got that the celestial skylight polarization patterns were mainly decided by gaseous particles while the appearance of neutral point near horizon and the attenuation of polarization degree at low sun elevation were induced by non-gaseous ones.

Key words atmospheric optics; polarization; Mie scattering; non-gaseous particle

OCIS codes 010.1310; 010.0010; 010.1290

1 引 言

太阳光在到达地面之前必须要穿过大气层, 当太阳光穿过大气层与其中的 O_2 , N_2 , 尘埃等微粒发生散射时, 就会产生具有特定偏振特性的散射光。天空中存在许多不同偏振度、不同偏振化方向的散射光, 便

形成了特定的包含大量偏振信息的偏振分布模式 (skylight polarization pattern)^[1], 这种偏振分布模式蕴含丰富的方位信息和大气参数信息, 自然界中的许多生物如蜜蜂、蝗虫和鸽子等能够利用这种偏振分布模式进行觅食、迁徙甚至导航定位与通讯交流等

收稿日期: 2010-12-29; **收到修改稿日期**: 2011-02-24

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z309)和安徽省青年基金(11040606Q41)资助课题。

作者简介: 吴良海(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理与大气偏振等方面的研究。

E-mail: wulianghai1227@gmail.com

导师简介: 高 隽(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事图像理解、视觉传感器和大气偏振等方面的研究。

E-mail: gaojun@hfut.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: 9210364@qq.com

等^[2],这种分布模式在海洋、大气和病虫害监测等方面也有重要的应用^[3]。因此相关的研究对探索生物偏振感知机理、研制仿生导航机器人、分析大气光学特性和偏振遥感探测等都有重要的意义^[4,5]。

Horváth 等^[6,7] 长期以来致力于与天空偏振感知相关的生物学研究;近年来,国内很多学者和机构也在开展相关的探索,研究的热点主要集中在仿生偏振视觉传感器研制,大气偏振光学与偏振探测领域^[8~13];相关研究主要关注于与大气偏振分布模式相关的应用研究,有限的理论研究则主要专注于用图形学的方法反演出与实际接近的分布模型^[4,14]。因此,现有的理论研究缺乏从微观散射机理分析到宏观分布仿真及影响因素分析,本文正是针对理论研究的不足,主要从大气粒子散射特性出发,重点关注微观粒子散射与偏振特性及其对全天域偏振特性分布的影响,分析了气态分子、水滴和气溶胶等粒子的散射与偏振特性,仿真分析了受不同粒子影响下的全天域偏振特性分布,并从实际天空中的偏振特性分布与理论仿真结果的对比中,分析了空间偏振特性分布的影响因素。

2 大气粒子散射机理

图 1 给出的是大气粒子散射示意图。按粒子与入射波波长 λ 的相对大小不同,可以采用不同的处理方法。一般采用无量纲尺度参数 $k = 2\pi r/\lambda$ 作为判别标准:当 $k < 0.1$ 时,可用瑞利散射;当 $k \geq 0.1$

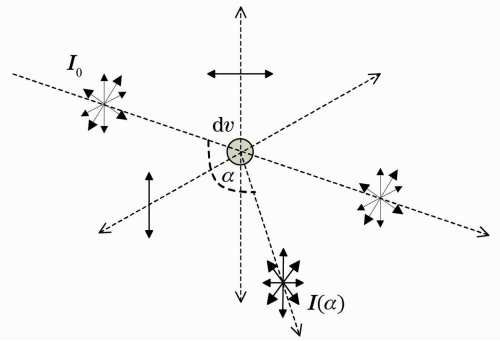


图 1 大气粒子散射示意图

Fig. 1 Light scattering by atmospheric particle

时,需用米氏散射;当 $k > 50$ 时,可用几何光学^[3,15]。

如图 1 所示,当一束无偏振光线 I_0 照射到单位体积 dv 粒子上,散射角度 α 上距离粒子 R 处的散射光 I 和入射光 I_0 关系满足

$$I = \frac{1}{k^2 R^2} \mathbf{F} I_0, \quad (1)$$

式中 $I_0 = [I_0, Q_0, U_0, V_0]$ 和 $I = [I, Q, U, V]$ 为光线的 Stokes 矢量,光的偏振状态可以由 Stokes 矢量完全描述。每一束光都可以分解为两部分,偏振光和无偏振光 $I = I_{\text{unpol}} + I_{\text{pol}}$,偏振光光强 $I_{\text{pol}} = (Q^2 + U^2 + V^2)^{\frac{1}{2}}$,偏振光光强占总的光强的比例称之为偏振度(degree of polarization),记为 P 。根据(1)式,在入射光线已知的条件下,散射光由与散射矩阵 S 相关的传输矩阵 F 决定。(1)式中的传输矩阵 F 与散射矩阵 S 的各个分量之间满足^[3]

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(S_1 S_1^* - S_2 S_2^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_1^* + S_2 S_2^*) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) & \frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) \\ 0 & 0 & -\frac{i}{2}(S_1 S_2^* - S_2 S_1^*) & \frac{1}{2}(S_1 S_2^* + S_2 S_1^*) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

大气中的粒子一般均是满足各向同性的均匀圆形粒子,对于这些粒子而言,散射系数矩阵 S 的对角元素为

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

式中 π_n 和 τ_n 是散射角度 α 的勒让德多项式

$$\begin{cases} \pi_1 = 1 & \tau_1 = \cos \alpha \\ \pi_2 = 3 \cos \alpha & \tau_2 = 3 \cos 2\alpha, \\ \dots & \dots \end{cases} \quad (4)$$

大气粒子散射系数求解的核心问题是系数 a_n 和 b_n 的计算,这些系数是复折射率 $m = n + in'$ (球形粒子相对于外界环境的折射系数)以及尺寸参数 x 的函数, a_n 和 b_n 是粒子尺寸的球贝塞尔函数。

3 大气粒子的散射与偏振

纯净大气的主要成分是 N_2 占 78.1%、 O_2 占 20.9%、还有少量的 CO_2 、稀有气体和水蒸气,这些气体存在一定的各向异性,对散射光的偏振度起到了削弱作用,各向异性的差异用去极化系数描述,这些气体的去极化系数分别为:空气为 0.03, O_2 为 0.06, N_2 为 0.03, CO_2 为 0.09 和 H_2 为 0.02 等^[15]。图 2 给出了根据第 2 节散射理论,仿真得出的无偏振的入射光与不同粒子发生散射时,不同角度上散射光的偏振度变化曲线。

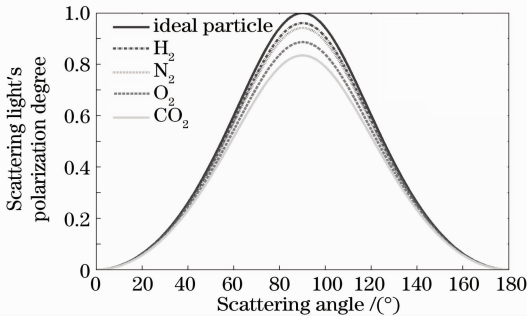


图 2 气态粒子散射光偏振度分布

Fig. 2 Degree of polarization of gaseous particles' scattering light

由图 2 可以看出,散射光的偏振度先随着散射角度的增加而增加,并在 90° 达到最大值,随后又不断减小。散射光的偏振度最大值随着气态分子的去极化系数的增加而减小,而且其他散射角度所对应的偏振度也均被削弱。从图 2 中还可以看出,理想条件下,大气中主要成分 N_2 和 O_2 散射光的最大偏振度分别为 95% 和 90%,而 CO_2 的最大偏振度约为 80%,因此 CO_2 在一定程度上削弱了散射光的偏振度。

实际大气中除了 O_2 , N_2 等气体外,还悬浮着水滴(如云滴、雾滴)、冰晶和固体微粒(如尘埃、孢子、花粉),这些悬浮物是气溶胶的主要组成部分,此外

表 1 粒子不同尺寸下的散射和吸收系数

Table 1 Q_{sca} and Q_{abs} of particles with typical sizes

| Radius / μm | 1.5+i0.5 | | 1.5+i0.12 | | 1.5+i0.041 | | 1.5+i0.01 | |
|------------------|----------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Q_{sca} | Q_{abs} | Q_{sca} | Q_{abs} | Q_{sca} | Q_{abs} | Q_{sca} | Q_{abs} |
| 0.1120 | 2.3×10^{-9} | 0.0083 | 1.15×10^{-9} | 6.86×10^{-4} | 1.14×10^{-9} | 1.67×10^{-4} | 1.14×10^{-9} | 1.67×10^{-5} |
| 0.2800 | 0.0029 | 0.2877 | 0.0014 | 0.0239 | 0.0014 | 0.0058 | 0.0014 | 0.0006 |
| 0.5600 | 0.0452 | 0.6192 | 0.0230 | 0.0532 | 0.0229 | 0.0130 | 0.0229 | 0.0013 |
| 0.8400 | 0.1928 | 0.9480 | 0.1117 | 0.0911 | 0.1125 | 0.0225 | 0.1129 | 0.0023 |

图 3(b)中入射光波长为 $0.4 \mu m$,复折射率 $m = 1.342 + i0$,水滴半径为 $6.25 \mu m$ 。从图中可以看出,散射角度从 0° 变化到 90° 时,散射光的强度以局部振荡的趋势以指数形式下降,并在 90° 附近达到

随着工业的发展和化石燃料耗量的增多,污染性颗粒物也日渐增多。这些非气态粒子的含量虽然不高,但是它们对大气光学特性以及物理状况的影响却非常大。此外,与气态分子相比,这些粒子的尺寸变化范围较大,且物理属性复杂。

为了详细分析这些粒子的光学特性,首先引入两个重要的光学参数。当单位能量的一束光线照射到粒子上时,被散射到各个方向上的光能量的总和与粒子横截面积(πa^2)的比值称为散射系数 Q_{sca} ,被粒子吸收的光能量总和与横截面积比值称为吸收系数 Q_{abs} ,这两个系数都与(3)式中的 a_n 和 b_n 相关:

$$\begin{cases} Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n a_n^* + b_n b_n^*) \\ Q_{abs} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \end{cases} \quad (5)$$

图 3 给出了非气态粒子不同角度上的散射与偏振特性变化的仿真曲线,其中图 3(a)为粒子尺寸与散射系数、吸收系数关系曲线,其中 a 为粒子尺寸, λ 为光线波长;图 3(b)为水滴散射光强度和偏振度变化曲线;图 3(c)为气溶胶粒子散射光强度与偏振度变化曲线。

由图 3(a)中可知,相同尺寸的粒子随着复折射率虚部 n' 的增加,吸收系数 Q_{abs} 在增大,散射系数 Q_{sca} 则在减小。当粒子尺寸较小时,吸收系数 Q_{abs} 明显大于散射系数 Q_{sca} 。典型数值如表 1 所示,当粒子半径在 $0.1120 \mu m$ 时,吸收系数相差 5~6 个数量级,大部分能量都被吸收,这也是为什么环境污染比较严重的地区天空呈现黑色的原因。随着粒子尺寸的增加,不同粒子的吸收系数 Q_{abs} 与散射系数 Q_{sca} 均趋于一致,当粒子尺寸大于 $0.5600 \mu m$ 时,吸收系数趋近于散射系数,并开始略小于后者,主要由于随着粒子尺寸的增加渐渐趋近于几何光学部分。

最小值。散射角度大于 90° 之后光强又不断增加,在 140° 左右达到一个区域峰值,这也正是实际天空中雨后彩虹与太阳之间的夹角。对比强度和偏振度分布图可以看出,在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间散射光引入了很强

的负偏振(negative polarization),即垂直分量小于平行分量。在 $100^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 之间,偏振度呈振荡式变化,在 140° 左右的区域均为强烈的正偏振区域,这与彩虹的偏振特性^[5]一致。从水滴散射光强度和偏振度分布的总体趋势来说,水滴对天空中的偏振分布起到削弱作用。

图3(c)中入射光波长为 $0.6\ \mu\text{m}$,粒子半径为 $1\ \mu\text{m}$,复折射率为 $m=1.57+i0.012$ 的典型大陆环境下气溶胶粒子。从图中可以看出,气溶胶粒子各

个角度上的散射光强度,从 0° 开始以全局振荡的趋势以指数形式衰减,在 140° 附近出现最小值,这与水滴的光学特性差异很大,随后散射光强度逐渐上升。由于气溶胶粒子的偏振特性是一种全局振荡分布,因此在很多散射角度上也引入了偏振度很高的负偏振,这些负偏振极大地削弱了实际天空中不同角度上的偏振度,使得即使在非常晴朗的天气下偏振度最大值也低于70%,而在地平附近气溶胶粒子分布密集的区域,偏振度一般都非常小。

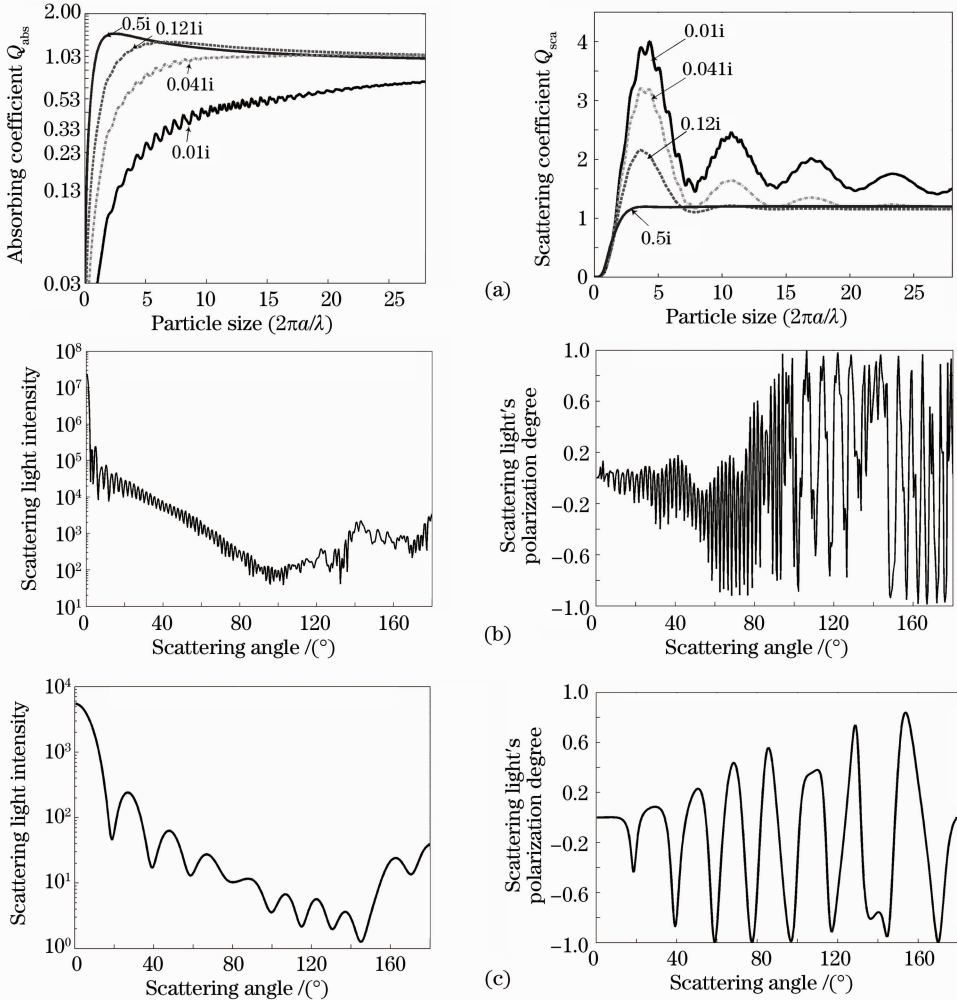


图3 非气态粒子的散射特性与偏振特性。(a)粒子尺寸与吸收和散射系数关系曲线,(b)水滴散射光强度和偏振度变化曲线,(c)气溶胶粒子散射光强度与偏振度变化曲线

Fig. 3 Scattering and polarization properties of non-gaseous particles. (a) Variation trends of Q_{abs} and Q_{sca} of particles with different size, (b) intensity and degree of polarization of water droplet's scattering light, (c) intensity and degree of polarization of aerosol's scattering light

4 不同粒子对空间偏振分布的影响

为了分析不同粒子对实际空间偏振分布的影响,在粒子的散射特性基础上,利用随机传输理论^[16~18],仿真全天域偏振特性分布,并将受不同粒

子影响下的仿真结果与实验获取的实际天空中的偏振特性分布进行对比。实际检测结果是利用检偏器件对入射光的偏振调制机制,通过数字 CCD 感光阵列记录出射光强度从而求解获取的。

如图 4 所示是日落时分天空区域偏振度分布检测结果与考虑不同粒子影响的全天域仿真结果。其中图 4(a), (b) 是 2010 年 3 月 10 日 18:15, 日落时刻太阳高度角为 0° 时, 天顶区域与反太阳子午线地平区域的偏振度分布, 图中横纵坐标代表实际空间方位角和高度角。当天天气晴朗无云, 实验地点为合肥工业大学逸夫科教楼(北纬 31.52° , 东经 117.17°), 图 4(b) 中高度角 5.7° 以下区域为周围建筑。

为了分析实际天空中散射光线的偏振特性与组

成粒子之间的关系, 根据传输理论仿真了相同时刻, 日落时分太阳高度角为 0° 时全天域散射光线的偏振度分布, 其中图 4(c) 为只考虑气态分子散射与偏振特性的仿真结果, 图 4(d) 同时考虑气态分子和气溶胶粒子(半径 $1 \mu\text{m}$, 复折射率 $m=1.57+i0.012$) 的仿真结果, 仿真结果为以天顶为中心的俯视图, 图中标出了对应的空间方位角, 为了便于对比, 将实测结果所对应的区域在仿真结果中用虚线框标出。

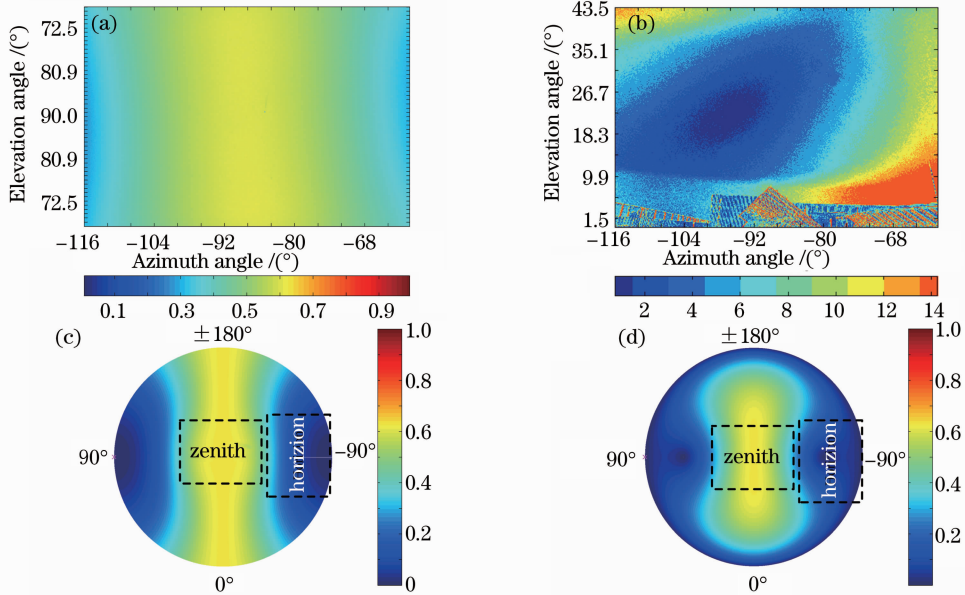


图 4 天空区域偏振度分布检测结果与对应的全天域仿真结果。(a) 实测天顶区域, (b) 实测地平区域, (c) 只考虑气态分子的全天域仿真结果, (d) 考虑气态分子与气溶胶的全天域仿真结果

Fig. 4 Measured skylight polarization patterns and corresponding celestial simulated result. (a) Measured zenith area, (b) measured horizontal area, (c) simulated result of gaseous particles only, (d) simulated result of gaseous and non-gaseous particles

在图 4(a) 中, 实际天空中偏振度随着与天顶角度距离的增加而减小, 并在天顶即距离太阳 90° 区域达到最大值(62%), 整体分布是以过天顶的子午线(过天顶高度角 90° 的直线)为轴对称的, 且相对于子午线的垂线也是对称的。而在图 4(b) 地平线附近区域存在一个偏振度为零的椭圆形集合区域, 这些偏振度为 0 的集合点的中心位置也被称为中性点(neutral point), 图 4(b) 中中性点所在位置为高度角 21° , 方位角 -95° , 随着距离中性点角度距离的增加偏振度不断增加。

从图 4(c), (d) 可以看出, 两种仿真结果中的偏振度分布模式和变化趋势是基本一致, 都随着距离太阳高度角的增加而增加, 并在距离太阳 90° 区域达到最大值, 整体分布是以太日子午线为轴对称的, 这与实测天顶区域的分布是一致的。图 4(c) 与

图 4(d) 的仿真结果相比存在一个明显的区别, 图 4(d) 中出现了图 4(b) 中实测地平附近的中性点, 不难看出, 在这一区域只考虑气态分子影响的仿真结果与实际差异很大。

从图 4(c) 和图 4(d) 与实测结果的一致性, 可以得出, 气态分子对大气偏振特性分布的总体趋势起主导作用, 实际分布与第 3 节中气态分子的偏振特性一致, 偏振特性随着散射角度呈正弦变化, 并在 90° 区域达到最大值; 从图 4(d) 仿真结果与图 4(b) 之间的一致性可以得出, 中性点的出现是由于大气中非气态分子散射作用对偏振度的削弱作用引起的, 而地平附近由于人为活动的影响, 非气态粒子的含量一般非常高, 气溶胶粒子是导致中性点出现的主要原因。

为了进一步研究实际天空中不同时刻偏振度的

变化趋势和影响因素,2010年3月12号,从10:33至18:30,实验获取8h之内天顶区域光谱波长为 $0.6\ \mu\text{m}$ 附近区域光线的偏振度变化趋势,当天天气晴朗,实验地点为合肥工业大学逸夫科技楼,实验结果如图5所示。为了便于对比分析,图中还给出了对应时刻的考虑气态分子与非气态分子的仿真曲线,其中非气态分子的介质复折射率 $n' = 1.5 + i0.015$ 。

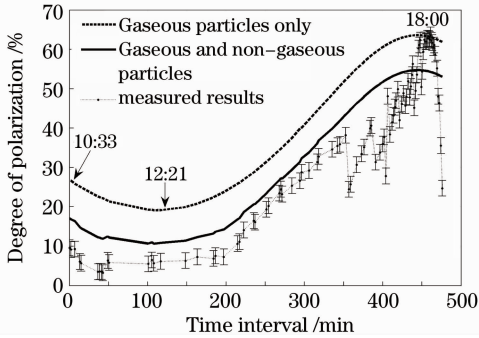


图5 8h内天顶区域实测偏振度与仿真结果对比
Fig. 5 Comparison between measured and simulated polarization degree of zenith area in 8 h

从图5中可以看出,当天天顶实测偏振度最大值 $P_{\max} = 61\%$ 出现在18:00日落时刻,此时太阳高度角为 0° ,偏振度在日落之后30min内迅速衰减至20%左右;当天实测偏振度最低值6%,出现在12:21前后,此时太阳高度角为 46° ,这也是实验8h内的最大太阳高度角;就整体趋势而言,天顶区域的实测偏振度从10:33~12:21是逐渐降低的,而从12:21~18:00是逐渐升高的,只是在日落前一小时范围内略有下降,下降幅度在10%左右。其中12:21前后偏振度的衰减和日落时分出现的峰值,是由于太阳高度角的影响带来的,偏振度随着太阳与天顶角度距离的增加而增加,当天顶与太阳角度距离为 90° 时达到最大值。日落之前偏振度的衰减主要是由于非气态分子散射特性的影响,此时太阳高度角较低,太阳光穿过的大气层时主要受到地表附近非气态分子的影响。

从仿真结果可以看出,除了日落时刻的峰值区域以外,考虑非气态分子的仿真结果与实测结果之间吻合的很好,尤其是在10:33~17:50之间,与实测结果之间的差异小于6%,而只考虑气态分子影响的理想仿真结果在总体分布趋势上与检测结果也是吻合的,但是其仿真结果数值要明显高于实测结果。从天顶8h的实测与仿真结果的对比,可以进一步看出,实际天空的偏振度分布的主要受气态分子影响,整体分布是与之一致的,但是在某些空间位

置或特定时刻,考虑非气态分子影响的仿真结果与实际结果更为接近。

5 结 论

大气中包括气态分子与非气态分子,从本文的分析可以看出,气态分子如 O_2 , N_2 , CO_2 等散射光的偏振特性以正弦式分布,非气态分子如水滴、气溶胶、尘埃等受尺寸和复折射系数影响,偏振特性变化较为复杂,并在很多方向上引入很强的负偏振。

从考虑不同粒子影响下的全天域仿真结果与实际检测结果之间的对比中可以得出:

1)实际天空中的偏振特性分布的总体变化趋势主要受气态分子影响,空间偏振度分布随散射角度呈正弦函数变化,并在距离太阳 90° 区域达到最大值;

2)在非气态粒子的影响下,空间不同位置,同一位置不同时刻,均会出现偏振度特性差异较大的区域,主要是受非气态分子引入的负偏振影响;

3)考虑非气态分子的仿真结果,在空间分布和时间数值分布上均要比只考虑气态分子的仿真结果与实际更为接近,这也反映了非气态分子对实际空间偏振特性的影响。

参 考 文 献

- 1 K. Coulson. Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere[M]. Hampton, VA: A. Deepak Pub, 1988
- 2 R. Wehner. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *J. Exp. Biol.*, 2001, **204**: 2589~2596
- 3 E. Hansen, L. Travis. Light scattering in planetary atmospheres [J]. *Space Sci. Rev.*, 1974, **16**(4): 527~610
- 4 I. Pomozi, G. Horváth, R. Wehner. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation [J]. *J. Exp. Biol.*, 2001, **204**: 2933~2942
- 5 D. Lambrinos, R. Möller, T. Labhart *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Rob. Auton. Syst.*, 2000, **30**(1-2): 39~64
- 6 G. Horvath, R. Wehner. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry [J]. *J. Comp. Phys. A*, 1999, **184**(1): 1~7
- 7 J. Gál, G. Horváth, M. Rochow *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 [C]. *Proc. R. Soc. Lond.*, 2001, **457**: 1385~1399
- 8 Fan Zhiguo, Gao Jun, Wei Jinming *et al.*. Investigation of atmospheric polarization information measurement method imitating POL-neurons of cataglyphis [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(4): 745~749
范之国, 高 隽, 魏靖敏等. 仿沙蚁POL-神经元的偏振信息检测方法的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(4): 745~749
- 9 Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing *et al.*. Polarization method for atmospheric scattering correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 999~1003

- 叶松, 方勇华, 孙晓兵等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(6): 999~1003
- 10 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 241~245
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. 光学学报, 2005, **25**(2): 241~245
- 11 Huang Xufeng, Bu Yang, Wang Xiangzhao. Skylight polarization patterns based on Mie theory for scattering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3002~3006
黄旭锋, 步扬, 王向朝. 基于米氏散射理论的太阳光散射偏振特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3002~3006
- 12 Zhao Yiming, Jiang Yuesong, Lu Xiaomei. The numerical analysis on the concentration of the scattering medium and the ratio of the impurity with the method of polarization degree[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2110~2116
赵一鸣, 江月松, 路小梅. 利用偏振度研究散射介质浓度及杂质比的数值分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(12): 2110~2116
- 13 Rao Ruizhong. Vision through atmosphere and atmospheric visibility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2486~2492
饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2486~2492
- 14 M. Berry, M. Dennis, R. Lee. Polarization singularities in the clear sky [J]. *New J. Phys.*, 2004, **6**(1): 1~14
- 15 H. Van. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Dover Publications, 1957. 100~120
- 16 G. Kattawar, G. Plass. Radiance and polarization of multiple scattered light from haze and clouds [J]. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(8): 1519~1527
- 17 X. Wang, L. V. Wang. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study [J]. *Biomed Opt.*, 2002, **7**(3): 279~290
- 18 K. Voss, Y. Liu. Polarized radiance distribution measurements of skylight 1: system description and characterization[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(33): 6083~6094