

激光与光电子学进展

三非环境偏振传输研究综述

孙鑫栋, 孟峰旭, 徐文森, 王栋, 陈雪叶, 曾祥伟*

鲁东大学交通学院, 山东 烟台 264025

摘要 微粒非规则、微粒非各向同性和介质非均匀的三非环境普遍存在。三非环境中受微粒散射和吸收作用的影响, 光信号的传输性能与作用距离会减弱。例如, 雾、霾和云等低能见度环境会降低飞机、汽车和轮船出行的安全性, 在浑浊水域中搜寻与潜航作业困难, 而将偏振特性用于表征光在三非环境中的传输过程可为提取良好的光信号和增加作用距离提供可行方案。阐述微粒非规则、微粒非各向同性和介质非均匀等 3 种情形下偏振传输特性; 分析多种非球形微粒的国内外发展; 列举等效多层同心粒子模型的相关数据并解释雾霾散射特性等问题的有效性; 对非均匀介质开展分类研究并分析光线的传输过程中介质环境的影响。综述三非环境中偏振光的散射偏振特性的发展历程和研究现状, 阐明三非环境中偏振传输特性研究的重要性, 展望三非环境偏振传输问题的发展趋势。

关键词 散射; 三非环境; 偏振传输

中图分类号 TN211 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/LOP231374

Summary of Research on Polarization Transmission in Three Atypical Environments

Sun Xindong, Meng Fengxun, Xun Wensen, Wang Dong, Chen Xueye, Zeng Xiangwei*

Jiaotong College, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China

Abstract The existence of three atypical environments involving irregular particles, nonisotropic particles, and nonuniform media is quite common. However, the transmission performance and operating distance of optical signals are badly affected due to particle scattering and absorption in the three atypical environments. For instance, low-visibility environments, such as fog, haze, and clouds, can reduce the safety of aircraft, cars, and ships, making it difficult to search and navigate in turbid waters. However, using polarization characteristics to characterize the transmission process in these atypical environments can provide feasible solution for extracting high-quality light signals and increasing operational distances. In this study, we explore the polarization transmission characteristics in three situations: irregular particles, nonisotropic particles, and nonuniform media. We analyze the domestic and international development of various nonspherical particles, present relevant data from the equivalent multilayer concentric particle model, and explain the effectiveness of addressing issues such as haze-scattering characteristics. Furthermore, we conduct a classification study on nonuniform media and analyze the impact of the medium on light transmission. By summarizing the development progress and current research status regarding scattering polarization characteristics of polarized light in the three atypical environments, we aim to clarify the importance of studying polarization transmission characteristics in such settings. Finally, we look forward to the development trend of polarization transmission problems in the three atypical environments.

Key words scattering; three atypical environments; polarization transmission

1 引言

介质非均匀、微粒非规则和微粒非各向同性的三

非环境普遍存在, 诸如云、雾、霾、沙暴、浑浊水域等。三非环境中光信号受微粒散射和吸收作用而损耗, 致使传输性能下降、作用距离变短。例如, 雾、霾、云、沙

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2023-06-15; 录用日期: 2023-06-28; 网络首发日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金专项支持资金(CN)(62105136)、烟台市级以上领军人才专项支持资金(220-20230002)、鲁东大学引进人才并启动资助项目(LD22065)

通信作者: *zengxw163@163.com

暴等导致能见度降低,这直接影响飞机起降、交通驾驶、轮船航行的安全性,浑浊水域对水下目标搜寻、潜航器作业造成影响。散射环境中偏振光传输具有一定的偏振状态保持能力,将偏振特性用于表征光在三非环境中的传输,这有利于从散射介质中提取良好的光信号并增加作用距离,因此,研究三非环境中偏振传输特性是当前热点问题^[1]。

随着偏振成像技术在散射介质去雾成像中的应用^[2],基于光的偏振传输特性的技术正在成为一种流行的探测方法,前期的研究工作主要测量均匀的散射介质,研究其散射和吸收特性,但面临不均匀介质有种种局限性,尤其是在三非环境下,散射光通过许多随机路径通过不同的层传播,增大了测量难度。结合现有的研究基础,把“一非”问题逐渐扩展到“三非”综合问题,建立仿真数学模型,为真实传输环境下偏振特性的获取提供可靠的理论依据。不同环境下的散射偏振成像系统需要研究散射介质作为理论支撑^[3-5]。

偏振光通常可更有效地携带目标信息,在传输过程中与复杂散射粒子的相互作用会改变光传输的信息量,使得对比度、信噪比下降,最终导致成像模糊。因此,研究粒子的偏振光传输特性,实现高效和高保真的信息传输至关重要^[6],这也就要求对三非环境中偏振传输原理要有更充分的认识、更深入的探究。

偏振光在三非环境中的传输特性较为复杂,但应用越来越广泛。国内外很多学者都对此领域进行了详尽研究,主要包含两个方面:1)入射偏振态不同,作用介质相同;2)入射偏振态相同,作用介质不同。

2 微粒非规则

粒子的散射偏振特性与我们的生活息息相关,单粒子通常可等效为球形,球形结构能够更好地建立数

学模型,便于进行模拟仿真。球形粒子在不同光束以及散射角下会表现出不同的性质,研究球形粒子在多种情境下的性质能够更好地掌握散射偏振特性。由于等效于球形粒子在某些方面不能完全表达出其性质以及一些粒子采用球形描述不够精确,可等效为非球形粒子,比如说研究沙尘粒子^[7]时,深入问题本质,总结出多种模型。沙尘、黑炭、团聚核壳蓝藻粒子等都为球形^[8-9]。

非球形粒子主要分为回转对称形和非对称形两类:回转对称形包括椭球形粒子、圆柱形粒子等,其多种参数比如有效半径、折射率、粒子形状等会对光的偏振特性产生影响;非对称形没有固定的形状,外观上也不对称,主要研究其表面的光滑程度对偏振传输特性产生的影响。

为了研究自然界中典型的非球形粒子,张肃等^[10]采用 T 矩阵算法对不同形状的非球形粒子的偏振传输特性的影响进行了分析。用 T 矩阵法建立非球形粒子仿真模型,通过计算说明了非球形粒子与球形粒子在不同条件下的偏振特性的差异。对于切比雪夫粒子来说,其前向散射偏振特性和后向散射偏振特性受形变参数和级次这两种参数的影响,但是前向散射偏振特性和后向散射偏振特性受到这两种参数影响的程度却不相同,粒子后向散射偏振特性所受到的影响是比较大的,与之相反,其对粒子前向散射偏振特性影响较小。对椭球粒子、圆柱形粒子和切比雪夫粒子进行了尺寸分布计算和仿真分析,为后续对 3 种粒子的研究提供了理论基础。斯托克斯偏振测量是获取光的偏振特性的重要手段,唐凡春等^[11]提出一种利用达曼光栅快照式测量偏振光束斯托克斯参量的方法,如图 1 所示,实验测量结果和理论仿真结果能够很好吻合。

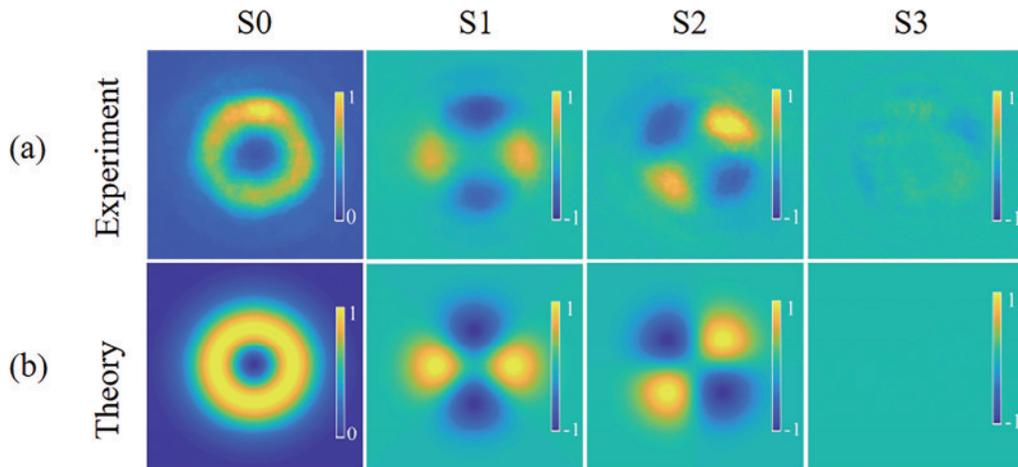


图 1 径向偏振光的斯托克斯参量^[11]。(a)实验测量结果;(b)理论仿真结果

Fig. 1 Stokes parameters of the radially polarized beam^[11]. (a) Experimental measurement results; (b) theoretical simulation results

王颖等^[12]建立基本散射矩阵,对非球形粒子光散射数值方法和测量及实验室测量方法进行了详细的介

绍,介绍了非球形粒子各种基础理论的发展史,给出不同方法的优缺点以及非球形粒子光散射的应用。在球

形粒子的基础上,越来越多的学者开始研究非球形粒子的散射偏振特性并模拟散射特性建立更精准的计算模型,对我国国防事业有着非常大的意义。

储晨曦等^[13]研制了一种偏振云粒子探测器,通过对比几种模拟方法,得出使用几何光学近似的方法模拟云粒子的光散射特性效果最佳,对几种非球形粒子在探测器中的散射特性进行了模拟,验证了所研制探测器用于云粒子探测的可行性,并为其实现非球形粒子的尺度谱和形状探测提供了反演依据。

宋强等^[14]等模拟光在单气泡传输过程中辐射强度和偏振状态的变化趋势,得出:当入射角小时,光线更易穿透,辐射强度衰减缓慢;随着传输距离的增加,前向传输和后向传输的偏振度变化呈现相反趋势,为水下复杂环境目标偏振成像提供理论支撑。曾祥伟等^[15]提出一种基于偏振子午面蒙特卡罗法的优化算法,能够反映光子偏振态的变化情况,统计偏振保持特性良好的光子占比,这改善了求解过程中难以知晓光子传输情况的问题。

2.1 椭球形粒子

Asano 等^[16]提出椭球粒子边界条件的处理方法,该方法能够有效解决边界问题,提高了椭球粒子模型的计算精度,为后续椭球粒子相关参数的研究提供了一种处理思路。在自然界中,多数微粒并非理想的球形,对于大气环境中沙尘、烟煤粒子的形状,Hill 等^[17]就对此进行了分析与研究,并证实了沙尘粒子是椭球形。

由于椭球粒子在很多情况下更接近于某些实际存在的微粒,所以当学者研究非球形粒子与电磁(光)波相互作用时常常选用椭球粒子为模型来探究,这样能够更加贴切地表达出某些实际存在的微粒。Barton^[18-19]首次在近场与内场对椭球粒子与高斯波束的相互作用进行了讨论,为研究高斯波作用下的椭球形粒子提供了理论基础。与球形粒子在高斯波束作用下不同的是,他所提出的理论会带来误差,且这种误差会对后续计算产生影响。

长春理工大学于婷等^[20]针对偏振光在椭球形粒子烟雾中的传输特性进行了研究,针对不同入射光波长、不同偏振初始状态下的偏振光在不同椭球形粒子烟雾浓度下的变化规律进行了实验测试,实验结果表明,随介质浓度升高,不同状态的偏振光都出现了明显的退偏现象,相同条件下,圆偏振光有更好的保偏特性,不同起偏角度的线偏振光对偏振传输特性无明显影响,可见光波段范围内的 3 个波长对偏振传输特性的影响差异不大。这说明了研究椭球粒子对光偏振影响的重要性,这也是国内为数不多的针对椭球粒子偏振传输的研究。

王鹏程等^[21]采用燃烧产生黑碳气溶胶粒子的方式制备椭球细粒子,采用 T 矩阵和蒙特卡罗相结合的方法进行椭球细粒子多次散射偏振传输特性测试并建立半实物模拟测试平台对仿真方法进行验证,为非球形

颗粒物环境下偏振探测研究提供理论支撑。由于非球形粒子的环境变化多样,不同环境及状态会产生大量不同结果以及大量仿真验证。

Fu 等^[22]建立了海雾环境下偏振传输特性仿真模型,并在 3 种不同浓度的盐雾和水雾环境下进行了偏振传输特性测试,盐对海雾的形成和分布有显著影响,并且对于给定的光学厚度,盐雾中的偏振光透射偏振大于水雾中的偏振。在海雾背景下,圆偏振光会引起旋转对称,提高其偏振维持性能,使得穿透更大,波长更长。这为多层海雾环境中偏振光的透射特性奠定了理论基础。

由于自然界中大多数微粒都是非球形粒子,其中又以椭球形粒子居多。近年来,国内对于偏振技术的研究多了起来。但从国内外研究现状可以发现,针对偏振传输的研究仍较少,尤其是椭球形粒子的传输特性,大多数停留在粒子的单次散射的仿真和模拟计算上。因为非球形粒子环境的复杂多变性,室外实验无法开展,仅有少数人针对传输特性开展实验。

2.2 圆柱形粒子

Wait^[23]给出了斜入射情况下无限长圆柱散射的解析。Kerker 等^[24]对这个问题深入研究并提出了垂直入射情况下无限长双层圆柱的电磁散射问题。杨平等^[25]提出了一种处理弯曲表面大粒子散射问题的数值方法,计算空间随机取向的旋转椭球形和有限长圆柱形大粒子散射相矩阵,开始了我国对圆柱形大粒子的研究。2009 年,宫纯文等^[26]为了对卷云中圆柱状粒子取向比对散射偏振特性影响进行研究,利用 T 矩阵方法计算小尺度范围内圆柱状冰晶粒子的散射特征量,结果表明:在体积和投影面积之比相等时圆柱形冰晶粒子的散射特征量最接近于真实的数值;对于不同尺度柱状粒子散射特性,取向比对其的影响也具有相似之处;另外,不同大小的取向比、等表面积粒子的散射相函数存在交点。西安电子科技大学尚庆超^[27]研究了距离无限远的圆柱形粒子对以任何角度入射高斯回波信号的散射,提出研究远区散射场性质的一般公式。在强会聚高斯波信号入射时,远区散射场明显不同于平面波入射场的三维性质。圆柱形粒子是典型非球形粒子,其散射偏振特性区别于其他非球形粒子。

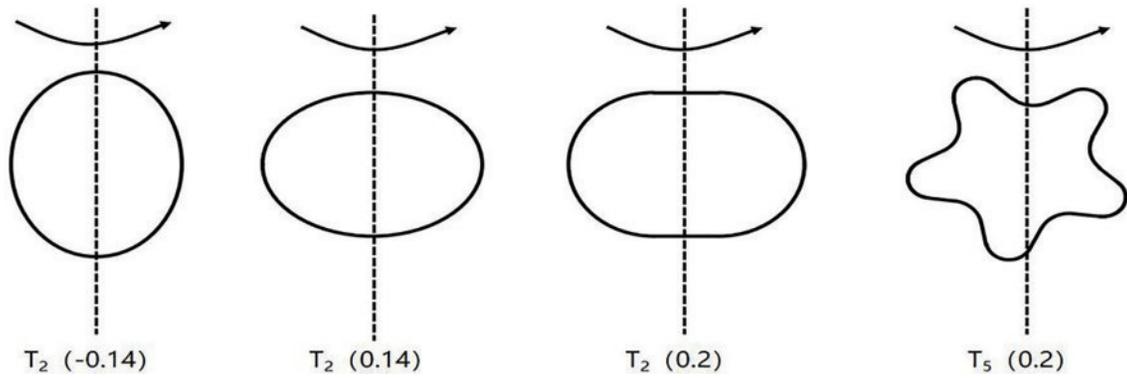
2.3 切比雪夫粒子

由于切比雪夫粒子是凹陷面,与圆柱体和球体的凸面结构有着较大的差距,难以通过球形粒子的 Mie 散射方法来进行计算。

图 2 展示了切比雪夫粒子形状平面图,按照 m 阶切比雪夫多项式连续形变的球状粒子的直径就是切比雪夫粒子的直径,切比雪夫粒子形状平面图可以描述为

$$r(\theta) = r_0 [1 + T_m \xi(\cos \theta)], |\xi| \leq 1, \quad (1)$$

式中: r_0 是球形量化半径; ξ 是一种形变参数; $T_m(\cos \theta) = \cos m\theta$ 是 m 级切比雪夫多项式。当 $m \geq 2$

图 2 切比雪夫粒子模型^[28]Fig. 2 Chebyshev particle model^[28]

时切比雪夫粒子部分凹陷,且 m 的线性增加,粒子周围的波纹增加,因此它可以叫作波纹参数,形变参数 ξ 绝对值的增加使粒子周边形成波纹状的粗糙表面。切比雪夫粒子形状和尺寸可以定义为 $\{\xi, r(\theta)\}$ 。近年来,我国对切比雪夫粒子的研究逐渐完善,赵太飞等^[28]通过实验分析了紫外光的散射偏振特性,以切比雪夫粒子作为标准模型分析灰尘粒子、矿物粒子等雾霾颗粒,雾霾颗粒的形态学特征均有小规模表面粗糙度,通过对这种粒子进行模拟仿真以紫外光直视单次散射模型为基础,以不同散射角为变量,说明复杂折射率虚部对散射光偏振特性随散射角的变化影响,粒径对散射光 Stokes 矢量和对散射光偏振度的影响。针对散射光偏振特性随形变的变化、切比雪夫粒径、复杂折射率虚部的变化等多方面具体分析切比雪夫雾霾粒子的偏振传输特性。

2.4 非对称形粒子

Yang 等^[29]讨论了 $0.2 \sim 100 \mu\text{m}$ 光谱范围内冰晶粒子的散射、吸收和偏振。对于冰晶粒子,考虑 3 种粗糙度条件(即光滑、适度粗糙和严重粗糙的表面)来解释具有相对较大尺寸参数的颗粒的表面纹理。观察结果和对冰云偏振特性的理论模拟表明,假设严重粗糙冰晶的冰云光学模型明显优于假设光滑冰晶的冰云光学模型。

蔡嘉晗^[30]对双球系统与两个六棱柱冰晶粒子的多次散射进行了仿真计算,对冰晶粒子进行了深层次研究。冰晶粒子等非对称形粒子在国内的研究比较少见,主要是其研究模型不够明确,难以开展相关实验与计算,需要持续探索并不断完善非球形粒子的计算方法,使之适用于更复杂的模型。

3 微粒非各向同性

在粒子的非各向同性的研究中主要以内核-外壳模型作为基础,内核-外壳结构模型也叫作“双层球形结构模型”,这种双层球形模型的研究受到广泛关注,目前已被应用于工业、生产、医药、化工、环保和日常生活等各个领域。因此,关于双层或者多层球形

粒子的光学特性,如散射强度分布、散射系数、消光系数、吸收系数等的研究就显得越来越重要了。

3.1 双层同心粒子结构模型

双层球形结构模型是内混合气溶胶的一种结构模型。通过二次气溶胶以及有机物在气溶胶表面的冷凝或者成云过程,气溶胶几天内就可以形成内混型气溶胶,为研究其偏振传输特性,王雷等^[31]利用光腔衰荡光谱,对比丁二酸包覆二乙胺前后消光性质的变化,并与 Mie 散射理论计算值进行了对比,结果表明:由于酸性气溶胶“内核”包覆上碱性的“外壳”,产生包覆型结构内混的同时,还有可能发生化学反应形成“硬壳”,从而导致混合气溶胶的消光截面得到明显的增强。

Makita 等^[32-33]研究了双膜层散射介质,并证明偏振的背散射光对光学性质很敏感。此外,圆偏振光对深层较为敏感而线性偏振光对表层更为敏感,这适用于描述烧伤和黑色素瘤的特征。

武汉大学严赵军等^[34]基于 Quirantes 等^[35]所提出的同心散射理论,将众多的冰水同心球粒子所组成的团体看作冰-水混合云,讨论了冰水所占比例以及粒子尺寸分布这两种参数的大小对冰-水混合云散射特性所能造成的后果与影响,并计算出冰-水混合云的各种重要数据,包括吸收效率因子、消光、单次散射反照率以及散射特性,研究了冰-水混合云的光辐射特性,基于同心球模型的冰水混合云的散射特性所处的状态可以判断出该状态在冰云和水云之间。对于纯水云,随着散射角的变化,纯水云的反射函数会呈现出单峰线形。对于冰水混合云,透射函数和反射函数的大小与冰水含量的比例变化存在着一定的关系。在散射角较大时,冰水含量的变化会对反射函数影响较大,但是会对透射函数产生相反的影响,但影响并不会很大。随后为探索一种利用同心球模型来反演冰水混合云的方法^[36],利用图 3 所示的冰水同心球模型,使用查照表方法利用 MODIS1B 数据反演卷云的光学厚度和粒子尺度,并使用 MOD06 相应数据来验证反演结果的准确性,结果表明,该方法的反演结果是可信的。

Battaglia 等^[37]在非各向同性介质中研究全极化微

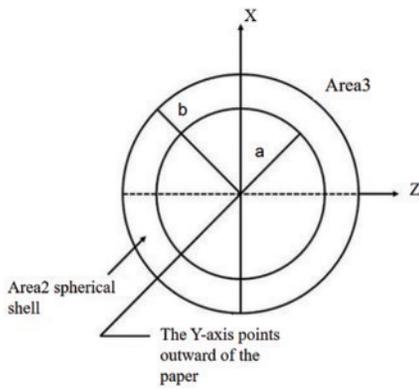


图 3 同心球模型^[36]

Fig. 3 Concentric sphere model^[36]

波辐射的正向蒙特卡罗计算。在蒙特卡罗辐射传递中,为了有效地解决极化问题,采用偏置技术开发了代码辐射传递方程以适应笛卡儿几何中的平面平行、三维垂直、水平非均匀散射大气。随机处理各向异性介质,特别适用于包含完全或部分定向粒子的云。通过正向蒙特卡罗算法可以解决在非各向同性介质中全极化微波辐射的问题。

Zhao 等^[38]研究了量子化高斯谢尔光束通过海洋-大气通道各向异性非科尔莫戈洛夫湍流传播的偏振和空间相干特性,推导了线性偏振量化高斯谢尔光束的空间相干长度和偏振度,与波长对偏振度的影响一样,外尺度对横向相干长度的影响并不明显。偏振度随着光源横向相干宽度、各向异性因子、接收光子数、光谱指数、湍流涡旋内部尺度和光源横向半径的减小或随

广义折射率结构参数的增大而减小。折射率结构参数,光谱指数内部尺度对横向相干长度的变化也有影响。这些结果表明,建立具有各向异性非科尔莫戈洛夫湍流谱的海洋大气信道中 GSM 光束偏振起伏的理论模型,可用于改善偏振编码量子通信系统的性能。

西安电子科技大学王康等应用内核-外壳的双层散射 Gustav Mie 理论,选取了可见 $0.55 \mu\text{m}$ 波长下沙尘粒子和煤烟粒子等两种雾霾粒子作为研究对象,研究不同混合比下两种结构模式的散射特性^[39]。将煤烟粒子作为内核,外层包裹一层沙尘粒子的外壳。从图 4(a)可以看出, m 的吸收与消光曲线分别和 m_1 的吸收曲线以及 m_2 的消光曲线重合,不易看出 m 代表平均值的效果。图 4(b)、(c)都是在可见光波段均匀混合下的计算,将计算的等效折射率值代入 Gustav Mie 公式得到上述图中结果,能够看出, m 代表的曲线可以表示两者混合的平均值。同样选取均匀混合结构球形粒子中的雾霾粒子作为研究对象,来计算黑炭粒子作为内核、沙尘粒子作为外壳的双层球模型的散射特性问题。图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)分别计算并对比了均匀混合结构与内核-外壳结构的结果,可以看出,在体积混合比为 1/20 和 1/10 时,均匀混合结构和内核-外壳结构得到的结果比较接近,在体积混合比为 1/2 时,两种方法差距较大,而当混合比为 9/10 时,计算结果不太吻合。随着混合的不断增大,两种方法之间的误差就会不同程度变大。通过比较分析两种混合方式计算得到的结果可知,这些方法在研究雾霾散射特性等问题时非常有效。

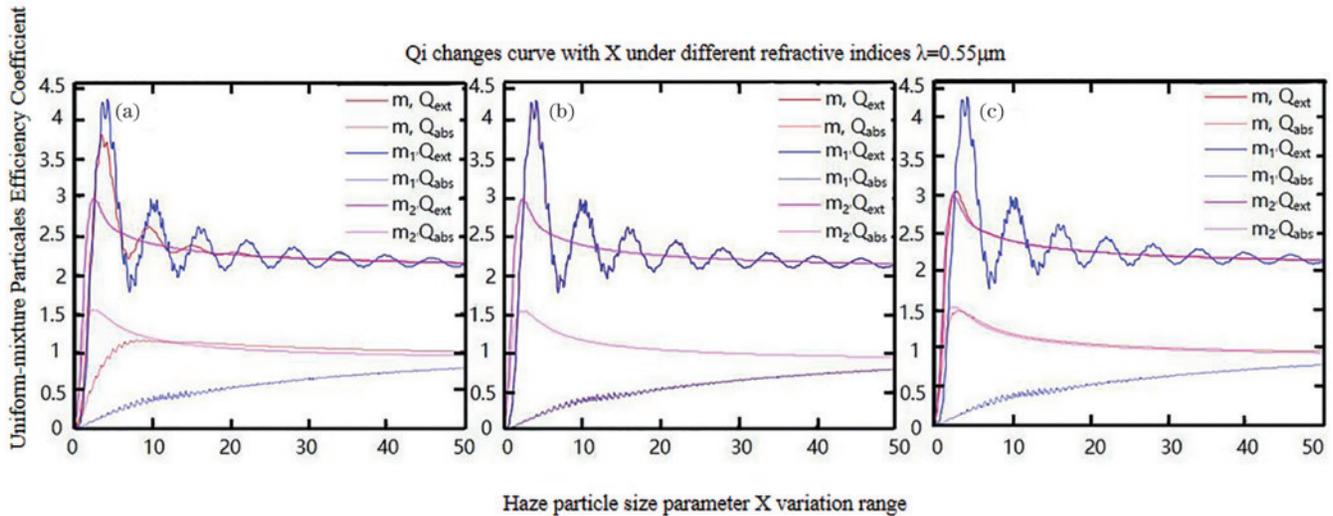


图 4 可见波段均匀混合模型不同混合比时的消光、吸收效率曲线^[39]。(a) $f=1.25 \times 10^{-4}$; (b) $f=0.125$; (c) $f=0.729$

Fig. 4 Extinction and absorption efficiency curves of visible band uniform mixing model with different mixing ratios^[39]. (a) $f=1.25 \times 10^{-4}$; (b) $f=0.125$; (c) $f=0.729$

3.2 其他粒子结构模型

粒子的光学特性主要由粒子的大小尺度、形状、组成粒子的成分及其混合态决定。由于粒子形状千差万别,其光散射特性也有较大差异,其中,以同心球形粒

子结构为主要研究对象,其他结构研究较少。表 1 列举了近十几年来其他结构模型的研究进展,图 6 给出了同心含椭球核的切比雪夫形粒子结构模型、多层球型模型结构示意图。

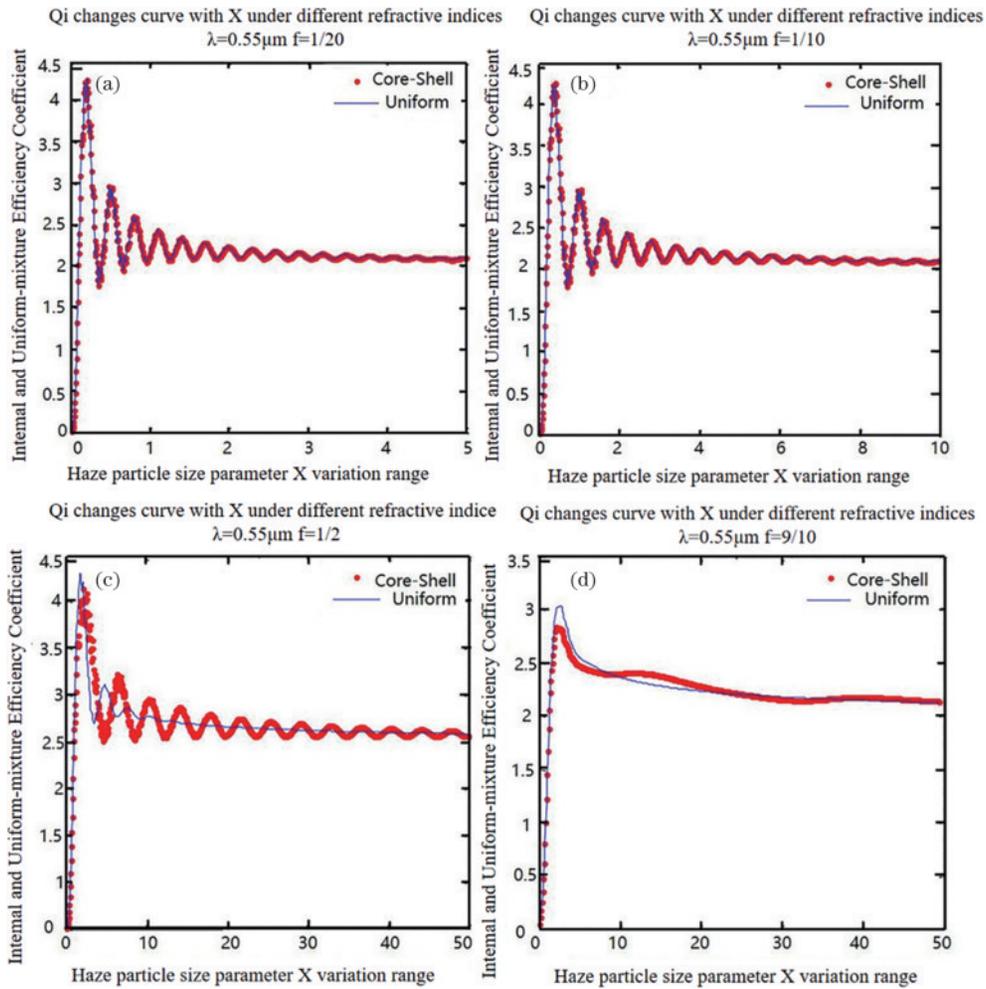


图 5 均匀混合与内核-外壳在不同混合比时消光图^[39]。(a) $f=1/20$;(b) $f=1/10$;(c) $f=1/2$;(d) $f=9/10$

Fig. 5 Extinction diagram for uniform mixing with core-shell mixing ratios^[39]. (a) $f=1/20$;(b) $f=1/10$;(c) $f=1/2$;(d) $f=9/10$

表 1 不同粒子结构模型

Table 1 Different structural models

Proposed time	Type	Presenter	Application
2004	Multi-layer confocal ellipsoid particle model	Zhang Huayong ^[40]	The far-field scattering field and scattering cross-section were calculated using this model
2009	Non-concentric bilayer spherical particle model	Yan Bing ^[41]	Non-concentric spherical particles have studied the scattering intensity and efficiency of scattering on the axis Gaussian beam
2019	Concentric Chebyshev-shaped particle model with ellipsoidal nuclei	Ye Kuntao ^[42]	In the actual physiological environment of the human body, affected by the disturbance of extracellular fluid, the outer layer of the granulocyte spherical shape is deformed, which is a non-standard spherical shape, and it is more suitable to describe it by Chebyshev shape
2022	Multi-layer spherical particle model	Pan Yongle ^[43]	Simulate the geometry of spherical cells and calculate their phase function

4 非均匀介质

光线在介质中传输会产生吸收和散射问题,导致光线在传输过程中出现能量损失、光能量下降等现象。介质环境会对光线的传输过程有着极大的影响,在自然界中介质环境往往是不可控制的,整体显现出无规

则的介质环境^[44],受到各种不可控因素的影响,在自然界中介质环境大部分处于非均匀状态。

非均匀介质根据其介质中的粒子分布状态的不同,大致可以分为两种:一种是随机分布,介质中的粒子分布没有规律可循;另一种是函数分布,函数分布又可以分为等比分布、高斯分布和对数正态分布。

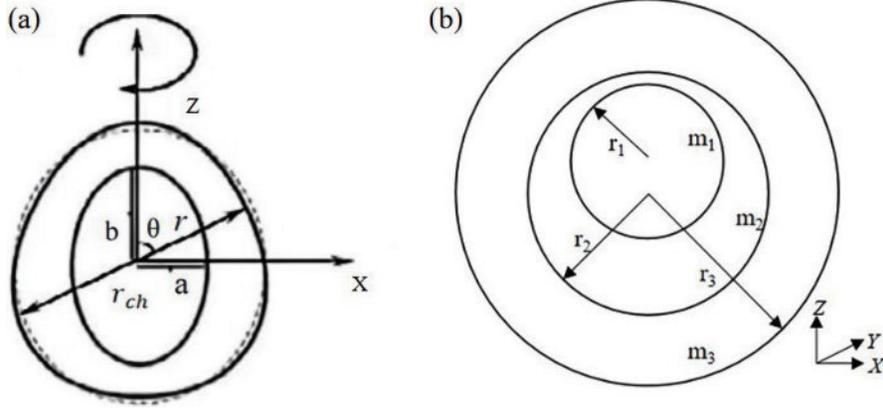


图 6 其他粒子结构模型。(a)同心含椭球核的切比雪夫形粒子模型^[42]；(b)多层球型粒子模型^[43]
 Fig. 6 Other particle structure models. (a) Concentric Chebyshev-shaped particle model with ellipsoidal nuclei^[42];
 (b) multi-layer spherical particle model^[43]

对于偏振光在非均匀介质环境的传输特性,国内外都有着较为详细的研究,Mishra等^[45]从理论上研究了气溶胶在垂直方向上的非均匀分布对气溶胶辐射效应的影响,在研究中将具有不同气溶胶垂直廓线的4种气溶胶模型(粉尘、被污染的粉尘、污染和纯散射气溶胶)引入辐射传输模型。结果表明:在紫外光波段和红外光波段,随气溶胶层高度增加,气溶胶的辐射效应逐渐增大;而在可见-近红外波段,随气溶胶层高度增加,气溶胶的辐射效应逐渐减弱。Xue等^[46]通过高斯、指数和幂函数分别表征浮游植物浓度在垂直方向上的非均匀分布特性,研究了浮游植物非均匀分布对水体遥感反射光谱的影响,并提出了反演算法。2018年,Zhang等^[47]在云和雪的辐射传输研究中考虑了介质光学特性的非均匀性,提出一种基于标准摄动方法的辐射传输方法来处理具有垂直非均匀特性的非齐次辐射传输方程,使云雪反射分布的计算误差由20%降至4%以内。Li等^[48]基于蒙特卡罗方法研究了非均匀云层中的光子传输过程,在垂直方向上将云层划分成许多薄云层,每一薄云层内的光学特性则视为均匀,与忽略云层垂直非均匀特性计算得到的反射率结果差异达到10%。

4.1 随机分布

在随机分布介质环境中,介质的粒子分布整体呈现混乱状态,粒子颗粒的大小及分布情况无法寻求规律。2020年,西安建筑科技大学王燕妮等^[49]对浑浊介质的非均匀介质环境展开了研究:首先,使用马尔文粒度仪测量脂肪乳颗粒,得出其粒径大小和分布数据;然后,测量并记录了实验中所需要的偏振度,以保证实验的准确性,并将其与理想的偏振光偏振度进行比较,计算出它们之间的误差;最后,分别从线、圆偏振光两种方向研究不同浓度的浑浊介质中产生的前向、后向散射光的退偏现象,并且通过分析还可以得到脂肪乳颗粒和光子的散射类型。

从图7的线偏振光、圆偏振光在混沌媒质中传播特征的改变可以看出,在混沌媒质中,同一浓度下,由圆偏振光入射形成的前向散射比由线偏振光入射形成的前向散射具有更大的偏振度,这是因为圆偏振的记忆作用,也就是说,当圆偏振光在前向散射时,其前向散射光会具有恒定的偏振性质,而当线偏振光前向散射时,则会有退偏现象,所以圆偏振光入射时形成的前向散射光偏振程度稍微高一些。结果表明,在混沌介质含量较少的情况下,圆偏振光入射时比线偏振光入

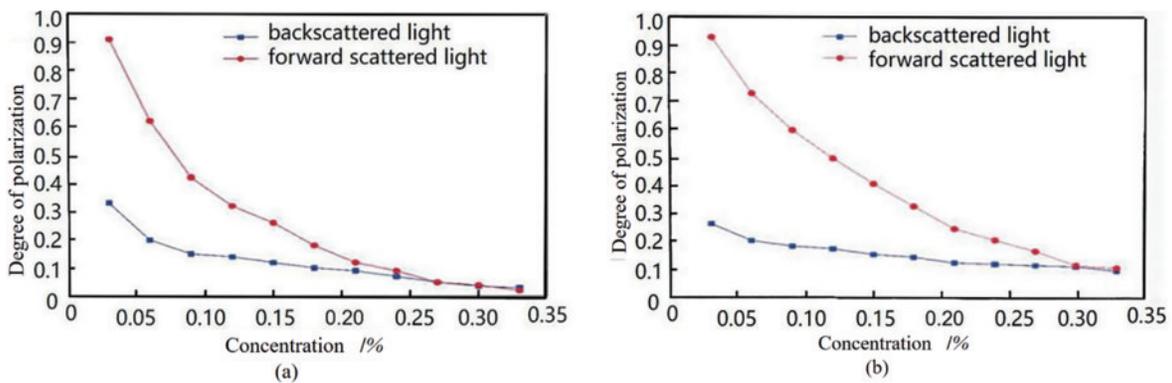


图 7 不同振光入射时散射光偏振特性与浑浊介质浓度的关系^[49]。(a)线偏振光;(b)圆偏振光
 Fig. 7 Relationship between polarization characteristics of scattered light and concentration of turbid medium at different incidence of vibrating light^[49]. (a) Linearly polarized light; (b) circularly polarized light

射时的偏振度要小。由于混沌介质的单位体积内含有量少,后向散射光主要是与浑浊介质颗粒发生碰撞后直接改变运动方向进入探测器的直接后向散射光子,而圆偏振光经反向散射后会出现比线偏振更强的退偏现象,所以在混沌物质中,圆偏振光的入射点会出现偏振很小的现象。然而,当混沌介质质量分数较高时,圆极化光入射所引起的背散射光极化比直线极化光入射所引起的背散射光极化要大。这是由于在介质浓度较高的情况下,由于其中的颗粒较多,大部分入射光子需要在其中经历多次小角度的正向散射,才能使其运动方向发生改变,成为反向散射。与线性偏振光相比,在高浓度浑浊介质中,圆偏振光正向散射的保偏性更好,因此,当圆偏振光入射到高浓度浑浊介质中时,将会得到具有较大偏振度的背向散射光^[50]。

4.2 函数分布

4.2.1 等比分布

烟雾环境在自然界中极为常见,理想情况下烟雾环境中的粒子是均匀分布的,但在自然环境中由于重力作用的影响会出现烟雾沉降,烟雾环境的浓度分布将呈现明显的空间非均匀特性,随着高度的逐渐降低,空气中的粒子浓度会逐渐升高,烟雾粒子的直径也会随之增加,整体的介质环境呈现出等比分布的特征。2018年,长春理工大学张肃等^[51]为研究烟雾环境下偏振光的传输特性,并能够在烟雾沉降时间内实时测量烟雾的光学厚度,避免传统非均匀环境中的延时问题,提出一种可以同时测量环境参数变化与偏振传输特性的方法,该方法让偏振传输特性的模拟仿真在非均匀烟雾环境下得以实现^[52-53]。实验结果表明:随着烟雾密度的不断增加,偏振光束的偏振度逐渐降低,而圆偏振光比线性偏振光具有更好的保偏性能;而且,圆偏光的偏振特性会随着波长的继续增大而变得更为明显,从图7可以看出,在沉淀时间比较长、检测波长比较长的时候以及在等比分布的不均匀环境下,具有更好的保偏特性的是圆偏振光,而具有更为明显的偏振特性的是线偏光。

2022年,山东大学冯业鑫^[54]从烟幕浓度的非均匀特性出发,建立了发烟罐和烟幕弹两种典型的烟幕场景,以高斯扩散模型和Mie散射理论为基础,基于矢量蒙特卡罗系统研究了偏振光在浓度非均匀烟幕环境下的偏振传输问题,并在烟幕弹场景下实现了目标偏振成像仿真,在浓度非均匀烟幕环境下研究了入射光偏振度、大气稳定度、烟幕弹源强、风速等不同因素对目标偏振成像的影响。研究表明:与基于强度的传统红外成像技术相比,红外偏振成像技术可以显著提高目标背景对比度,具有突显目标的优势;采用圆偏振光进行偏振探测能够获取更丰富的偏振信息,有利于烟雾等复杂环境下的目标探测。

4.2.2 对数正态分布

在非均匀介质环境中存在大小不同的粒子尺

寸,但这些粒子尺寸会遵循一定的分布,因为对数正态分布适用于所有的随机过程,所以假设粒子尺寸符合对数正态分布,这样就可以更好反映雾粒子的分布特征,因此,在非均匀多分散散射系统中,将粒子大小的分布设定为对数正态分布:

$$N_s = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma r} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln R)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中: σ 和 R 分别代表粒子的标准差和均值; r 代表雾滴的半径; N_s 为每种粒子的具体数密度。

合肥工业大学王棚飞^[55]基于水云粒子服从对数正态分布的分布特征模拟出了不同偏振光入射的偏振度变化,分别单独入射圆偏振光和线偏振光到非均匀多分散体系中,得出传输的偏振度图。通过偏振图可以定性看到:在中红外波段下,不管是圆偏振光还是线偏振光都随着传输距离的增加而发生变化,从偏振图的中心聚集程度可以看出,偏振度(DoP)都随着传输距离的增加而逐渐减小;在长红外波段,随着传输距离的增加,DoP的变化并不明显,保持性较好。此外,在中红外波段下,随着标准差的增加,粒径分布更宽时,到达探测面的退偏光子先减少后增多。同时随着波长的增加,偏振光退偏效应增大。对于线偏振光,粒径分布所带来的退偏差异同样存在,只是这种差异性没有圆偏振光入射时那样明显,且相比之下,圆偏振光优于线偏振光。

为了更清楚地探究偏振光的变化,入射了4种偏振光,得到不同散射体系的Mueller矩阵,经过进一步的计算,从Mueller矩阵特征分解中获取介质的相应光学特征,得到表征散射体系下的相应的偏振纯度指数,并分别入射圆偏振光和线偏振光进行比较,如图8所示。

从图中可以看出:在多分散散射系统中,分别入射圆偏振光和线偏振光,随着传输距离的增加,圆偏振度和线偏振度都在下降;随着标准差的增加粒子分布模式展宽,粒子谱密度也随之改变,因为大小粒子的共同叠加作用导致了退偏效应,在中红外波段下偏振度随标准差的增加先增大后减小;长红外波段下,偏振度随标准差的增加而减小。但是可以看到,线偏振度在不同标准差下几乎重合,不能区分不同标准差的变化特征,而圆偏振度在不同标准差有不同的差异,但也不能很好描述标准差的变化特征;而从图8(b)、(d)中可以看出,介质偏振纯度(P)在不同的标准差和传输距离下都可以很好地描述多分散散射体系的变化特性。在中红外波段下,随着标准差的增加,介质的偏振纯度是增加的,也就是说中红外波段下的散射介质的退偏性能是下降的;在长红外波段下,随着标准差的增加,介质的偏振纯度在一定范围内是来回波动的,可以有效地描述多分散介质的退偏特性。因此,介质偏振纯度提供了一个有效的指标来表征介质的退偏特性。

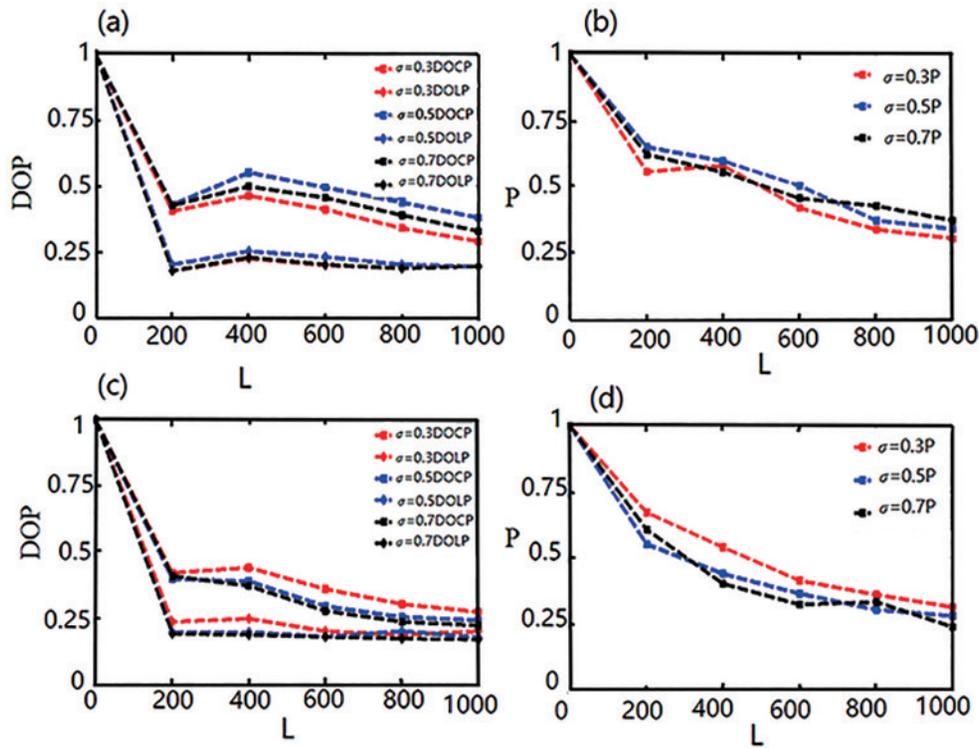


图 8 偏振度和偏振纯度指数随标准差的变化曲线^[55]。(a)(b)中红外波段;(c)(d)长红外波段

Fig. 8 Curves of polarization degree and polarization purity index with standard deviation^[55]. (a)(b) The middle infrared bands; (c)(d) long infrared bands

5 总结与展望

本文对三非环境中偏振光的散射偏振特性研究展开综述。针对偏振传输介质的复杂多样,从微粒非球形、微粒非各向同性和非均匀介质等 3 个不同的角度对偏振光在介质中的传输特性进行归纳和总结。

目前国内外对与偏振光在三非环境的传输特性有了较为详细的研究,对于微粒的非球形、非各向同性的研究,众多科学家在各种微粒环境中进行了多次的实验和探究,并在多种非均匀介质中进行各种实验,并总结出了偏振光在非均匀介质中的传输特性。

通过国内外学者对三非环境中偏振光的散射偏振特性研究的总结,得出以下几点未来的发展方向。

1) 国内外对于复杂环境偏振光传输特性的研究将按照由简入繁的方向逐渐发展:对于粒子的散射模型将由过去简单的规则球形粒子向非球形粒子方向发展;从简单的各向同性的例子模型向非各向同性的例子模型方向发展;从理想状态的均匀介质向非均匀传输介质方向发展。

2) 如何建立起完整的三非环境下的偏振传输特性模型,做好仿真计算是现在研究阶段的关键问题,这也将是国内外研究的一大发展趋势。

3) 如何解释和预测复杂散射介质中的圆偏振记忆效应;如何有效利用线偏振、圆偏振特性进行目标图像增强;是否在线、圆偏振的某种结合或融合能够获

得更好的成像效果;如何利用线、圆偏振退偏速度比强度衰减速度慢的特点,增加探测成像作用距离,将成为今后中的主要研究方向。

我国三非环境的偏振传输特性研究还在起步阶段,与国外学者研究的等效模型的散射偏振特性还存在一定程度上的差异,由于真实大气粒子形状是不规则的,其散射特性模拟尚存在较大的不确定性,进行相关实验探究能更好地解决问题,但是实验条件有限以及大气中粒子模拟的复杂性,开展相关实验难度比较大,所以国内相关粒子的实验比较少,主要集中在国外实验室。

采取“针对目标,逐个击破”的方法把复杂问题简单化,从某“一非”入手。非球形粒子形状多种多样,制约着研究非球形粒子传输特性,为了简化非球形粒子问题,可针对典型的粒子进行研究,例如椭圆形粒子、圆柱形粒子、切比雪夫粒子。对于非各向同性环境重点研究多层同心结构的传输特性,由于各向异性材料的特殊性,与电磁波相互作用比较复杂,其实验和仿真结果多种多样,难以开展。非均匀介质中,沉降带来分层,导致非均匀,以烟雾、霾、云、沙尘介质作为非均匀传输环境研究传输特性,需考虑到光子发射、散射角以及介质的随机性。湿度、浓度等因素也会对三非环境中偏振传输特性产生影响。

目前仍然需要对三非环境下的粒子偏振特性进行研究,继而有效地提出实际问题解决措施,尽管国内外

大气粒子研究的相关已经开始了很长一段时间,但是未来还有很长一段路需要学者们携手共进,不断开创新方法,进行新探究,探索出大气粒子的普遍规律。

参 考 文 献

- [1] 段锦,付强,张肃. 烟雾环境下偏振光传输特性研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Duan J, Fu Q, Zhang S. Study on transmission characteristics of polarized light in smoke environment [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [2] 王姬,卫毅,杨奎,等. 基于散射光场偏振特性的透雾霾成像技术发展及展望(特邀)[J]. 光电技术应用, 2022, 37(5): 20-32, 81.
Wang J, Wei Y, Yang K, et al. Development and prospect of smog-penetrating imaging technology based on polarization characteristics of scattered light field (invited)[J]. Electro-Optic Technology Application, 2022, 37(5): 20-32, 81.
- [3] 金欣,王泉宇,杜东宇,等. 散射成像研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811002.
Jin X, Wang X Y, Du D Y, et al. Progress and prospect of scattering imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811002.
- [4] 周强国,黄志明,周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. 红外技术, 2021, 43(9): 817-828.
Zhou Q G, Huang Z M, Zhou W. Research progress and application of polarization imaging technology[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 817-828.
- [5] 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.
Luo H B, Zhang J C, Gai X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210987.
- [6] 提汝芳,孙晓兵,李树,等. 近地面水平方向大气偏振辐射传输仿真与验证[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 1111001.
Ti R F, Sun X B, Li S, et al. Simulation and validation of atmospheric polarized radiative transfer in horizon orientation near ground[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 1111001.
- [7] 姬宁,王宇婷,徐强. 沙粒群对太赫兹波散射特性的研究[C]//第十七届全国电波传播年会会议论文集. 北京: 中国电子学会, 2022: 512-515.
Ji N, Wang Y T, Xu Q. Study on the scattering characteristics of sand particles in terahertz waves [C]// Proceedings of the 17th National Radio Propagation Annual Conference. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2022: 512-515.
- [8] 张秀再,翟梦思,周丽娟. 黑碳气溶胶对星地量子链路通信性能的影响[J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1127001.
Zhang X Z, Zhai M S, Zhou L J. Influence of black carbon aerosol on performance of satellite-ground quantum link communication[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1127001.
- [9] 贺锦涛,王明军,张佳琳. 团聚核壳蓝藻粒子的蓝绿激光散射和吸收特性研究[J]. 光学学报, 2021, 41(17): 1729001.
He J T, Wang M J, Zhang J L. Blue-green laser scattering and absorption properties of agglomerated core-shell cyanobacteria particles[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(17): 1729001.
- [10] 张肃,战俊彤,付强,等. 不同形状的非球形粒子对偏振传输特性的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0629001.
Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Influence of non-spherical particles with different shapes on polarization transmission characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0629001.
- [11] 唐凡春,步扬,吴芳,等. 基于达曼光栅的快照式斯托克斯偏振测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(13): 1312002.
Tang F C, Bu Y, Wu F, et al. Snapshot stokes polarimetry method based on Dammann grating[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(13): 1312002.
- [12] 王颖,刘东. 非球形粒子光散射计算、测量及其应用[J]. 量子电子学报, 2020, 37(5): 601-614.
Wang Y, Liu D. Light scattering calculation and measurement of non-spherical particles and its application [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2020, 37(5): 601-614.
- [13] 储晨曦,周红根,刘娟,等. 用于云粒子探测器的非球形粒子的光散射特性模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0529003.
Chu C X, Zhou H G, Liu J, et al. Light scattering characteristic simulation of nonspherical particles for cloud particle probe[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0529003.
- [14] 宋强,孙晓兵,刘晓,等. 水中气泡环境偏振光学矢量辐射传输特性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1210001.
Song Q, Sun X B, Liu X, et al. Study on transmission characteristics of polarized vector radiation in bubble environment in water[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1210001.
- [15] 曾祥伟,张燕,杨钧秀. 基于偏振蒙特卡罗法的散射环境前向传输优化算法[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 1829001.
Zeng X W, Zhang Y, Yang J X. Optimization algorithm for forward propagation in scattering environment based on polarization Monte Carlo method [J]. Journal of Optics, 2023, 43(18): 1829001.
- [16] Asano S, Yamamoto G. Light scattering by a spheroidal particle[J]. Applied Optics, 1975, 14(1): 29-49.
- [17] Hill S C, Hill A C, Barber P W. Light scattering by size/shape distributions of soil particles and spheroids[J]. Applied Optics, 1984, 23(7): 1025-1031.
- [18] Barton J P. Internal and near-surface electromagnetic fields for a spheroidal particle with arbitrary illumination [J]. Applied Optics, 1995, 34(24): 5542-5551.
- [19] Barton J P. Internal and near-surface electromagnetic fields for an absorbing spheroidal particle with arbitrary illumination[J]. Applied Optics, 1995, 34(36): 8472-8473.
- [20] 于婷,战俊彤,马莉莉,等. 椭球形粒子浓度对激光偏

- 振传输特性的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0208002.
- Yu T, Zhan J T, Ma L L, et al. Effect of ellipsoidal particle concentration on laser polarization transmission characteristics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0208002.
- [21] 王鹏程, 张肃, 申成彪, 等. 偏振光在椭球细粒子中多次散射传输特性[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 348-357.
- Wang P C, Zhang S, Shen C B, et al. Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles[J]. Chinese Optics, 2023, 16(2): 348-357.
- [22] Fu Q A, Luo K M, Song Y, et al. Study of sea fog environment polarization transmission characteristics[J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 8892.
- [23] Wait J R. Scattering of a plane wave from a circular dielectric cylinder at oblique incidence[J]. Canadian Journal of Physics, 1955, 33(5): 189-195.
- [24] Kerker M, Cooke D, Farone W A, et al. Electromagnetic scattering from an infinite circular cylinder at oblique incidence. I. Radiance functions for $m=1.46$ [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(4): 487-491.
- [25] 杨平, 蔡启铭. 椭球和圆柱形大粒子的光散射相矩阵[J]. 大气科学, 1990, 14(3): 342-353.
- Yang P, Cai Q M. Light scattering phase matrix of ellipsoid and cylindrical large particles[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1990, 14(3): 342-353.
- [26] 宫纯文, 魏合理, 李学彬, 等. 取向比对圆柱状冰晶粒子光散射特性的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1155-1159.
- Gong C W, Wei H L, Li X B, et al. The influence of the aspect ratio to the light scattering properties of cylinder ice particles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1155-1159.
- [27] 尚庆超. 手征介质球/圆柱粒子对平面波与高斯波束的散射[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016.
- Shang Q C. Scattering of plane wave and Gaussian beam by chiral medium sphere/cylindrical particles[D]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [28] 赵太飞, 王婵, 冷昱欣, 等. 切比雪夫雾霾粒子的紫外光散射偏振特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7): 2149-2156.
- Zhao T F, Wang C, Leng Y X, et al. The study of polarization characteristics of ultraviolet light scattering from Chebyshev haze particles[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2149-2156.
- [29] Yang P, Bi L, Baum B A, et al. Spectrally consistent scattering, absorption, and polarization properties of atmospheric ice crystals at wavelengths from 0.2 to 100 μm [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(1): 330-347.
- [30] 蔡嘉哈. 大气粒子多层、多次散射及带电效应对散射特性的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- Cai J H. Study on the influence of multilayer and multiple scattering of atmospheric particles and charged effect on scattering characteristics[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2021.
- [31] 王雷, 王炜罡, 葛茂发. 内混型气溶胶光学性质研究[C]//第十七届全国分子光谱学学术会议论文集. 北京: 北京大学出版社, 2012: 319-320.
- Wang L, Wang W G, Ge M F. Study on the optical properties of internally mixed aerosol[C]//Proceedings of the 17th National Molecular Spectroscopy Academic Conference. Beijing: Peking University Press, 2012: 319-320.
- [32] Makita S, Miura M, Azuma S, et al. Synthesizing the degree of polarization uniformity from non-polarization-sensitive optical coherence tomography signals using a neural network[J]. Biomedical Optics Express, 2023, 14(4): 1522-1543.
- [33] Morgan S P, Ridgway M E. Polarization properties of light backscattered from a two layer scattering medium[J]. Optics Express, 2000, 7(12): 395-402.
- [34] 严赵军, 韩芳芳, 易凡, 等. 冰水混合云红外辐射传输特性研究[J]. 红外技术, 2013, 35(1): 56-60.
- Yan Z J, Han F F, Yi F, et al. Study on ice-water mixed cloud radiation properties[J]. Infrared Technology, 2013, 35(1): 56-60.
- [35] Quirantes A, Bernard S. Light scattering by marine algae: two-layer spherical and nonspherical models[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2004, 89(1/2/3/4): 311-321.
- [36] 严赵军, 何超, 石俊强, 等. 利用冰水同心球模型反演冰水混合云[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(6): 35-39.
- Yan Z J, He C, Shi J Q, et al. Ice-water mixed cloud are retrieved based on ice-water concentric spheres model[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(6): 35-39.
- [37] Battaglia A, Mantovani S. Forward Monte Carlo computations of fully polarized microwave radiation in non-isotropic media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2005, 95(3): 285-308.
- [38] Zhao Y H, Zhang Y X, Hu Z D, et al. Polarization of quantization Gaussian Schell-beams through anisotropic non-Kolmogorov turbulence of marine-atmosphere[J]. Optics Communications, 2016, 371: 178-183.
- [39] Gu H Y, Wang C X, Fu Q A, et al. Experimental study on polarization transmission characteristics by $\text{PM}_{2.5}$ effection[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12343: 123430W.
- [40] 张华永. 多层椭球粒子对高斯波束的散射[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.
- Zhang H Y. Scattering of Gaussian beams by multi-layer ellipsoidal particles[D]. Xi'an: Xidian University, 2004.
- [41] 颜兵. 非同轴球对高斯波束散射的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- Yan B. Study on Gaussian beam scattering by non-concentric sphere[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [42] 叶坤涛, 夏雪婷, 吉俄木沙. 受细胞外液扰动的白细胞散射偏振特征[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 205-212.
- Ye K T, Xia X T, Musha J. Scattering polarization characteristics of white blood cells disturbed by extracellular fluid[J]. Laser & Optoelectronics Progress,

- 2019, 56(5): 205-212.
- [43] Pan Y L, Aptowicz K, Arnold J, et al. Review of elastic light scattering from single aerosol particles and application in bioaerosol detection[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 279: 108067.
- [44] 陈鸣, 胡帅, 高太长, 等. 气溶胶空间非均匀性对近红外辐射传输的影响分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0101003.
- Chen M, Hu S, Gao T C, et al. Study on the effect of inhomogeneous aerosol fields on radiative transfer process in near-infrared band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0101003.
- [45] Mishra A K, Koren I, Rudich Y. Effect of aerosol vertical distribution on aerosol-radiation interaction: a theoretical prospect[J]. *Heliyon*, 2015, 1(2): e00036.
- [46] Xue K, Zhang Y C, Ma R H, et al. An approach to correct the effects of phytoplankton vertical nonuniform distribution on remote sensing reflectance of cyanobacterial bloom waters[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, 15(3): 302-319.
- [47] Zhang F, Yan J R, Li J N, et al. A new radiative transfer method for solar radiation in a vertically internally inhomogeneous medium[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(1): 41-55.
- [48] Li J, Geldart D J W, Chýlek P. Solar radiative transfer in clouds with vertical internal inhomogeneity[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, 51(17): 2542-2552.
- [49] 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.
- Wang Y N, Xiao M. Study on transmission characteristics of polarized light in turbid media[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(14): 141101.
- [50] Xu Q A, Guo Z Y, Tao Q Q, et al. Transmitting characteristics of polarization information under seawater[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6584-6588.
- [51] 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.
- 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.
- [52] Sahani P, Vijaya R. Polarization state of transmitted and emitted light in homogeneous and inhomogeneous medium[J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(2): 1-13.
- [53] Nguyen C T, Khlynov R D, Ryzhova V A, et al. Calibration methods of a portable polarizing system for monitoring optically inhomogeneous media[J]. *Computation*, 2022, 10(8): 131.
- [54] 冯业鑫. 考虑非均匀分布的烟幕偏振辐射特性及传输模拟[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Feng Y X. Polarized radiation characteristics and transmission simulation of smoke screen considering non-uniform distribution[D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [55] 王棚飞. 复杂云雾散射体系中红外偏振信息传输性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- Wang P F. Study on transmission performance of infrared polarized information in complex cloud scattering system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.