

## 米散射浑浊水体偏振成像模型仿真研究

路淑芳, 张然, 陈永台, 褚金奎\*

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116086

**摘要** 为了研究浑浊水体对成像质量的影响,利用单次 Mie 散射理论和蒙特卡罗法,在融合几何光学成像的基础上提出一种理论分析方法。该方法分析不同波长的点光源在不同粒径不同浓度的浑浊水体环境传输时的成像特征。结果表明:波长分别为 456 nm、524 nm、620 nm 的点光源经相同的水体环境和无散射环境进行偏振成像传输时,波长为 456 nm 的点光源的成像效果最好;波长为 456 nm 的点光源经过散射粒径大小分别为 1  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$  的浑浊水体时,线偏振光的成像效果优于圆偏振光,圆偏振光优于自然光;当穿过散射粒径为 3  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、5  $\mu\text{m}$  的浑浊水体时,自然光成像效果最好,线偏振光成像效果最差。从理论上分析了不同波段的点光源经过不同水体进行偏振成像传输的成像效果,为水下偏振成像技术提供了新的思路和方法。

**关键词** 偏振传输; 可见光波段; 蒙特卡罗法; 水下成像; 偏振保持性

中图分类号 O435 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230709

## Simulation Study of Polarization Imaging Model for Mie Scattering Turbid Water Bodies

Lu Shufang, Zhang Ran, Chen Yongtai, Chu Jinkui\*

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

**Abstract** Based on fused geometric optical imaging, this thesis proposes a theoretical analysis method considering single Mie scattering theory and the Monte Carlo method to study the influence of turbid water on imaging quality. The proposed method analyzes the imaging characteristics of a point light source with different wavelengths (456 nm, 524 nm, and 620 nm) is transmitted through a turbid water environment with different particle sizes and concentrations. The results show that the point light source with wavelength of 456 nm exhibits the best imaging effect when subjected to polarization imaging transmission in the same water environment and nonscattering environment. In addition, when the 456-nm light passes through turbid water with scattering particle sizes of 1  $\mu\text{m}$  and 2  $\mu\text{m}$ , the imaging effect of linear polarized light is better than that of circular polarized light, which is better than natural light. However, while passing through turbid water with particle sizes of 3  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ , and 5  $\mu\text{m}$ , the natural light and linearly polarized light exhibit the best and the worst imaging effects, respectively. Overall, this paper provides new ideas and methods for underwater polarization imaging technology.

**Key words** polarization transmission; visible band; Monte Carlo method; underwater imaging; polarization retention

## 1 引言

发展和壮大海洋经济,有助于维护国家安全和提高国家综合实力。海洋是生命的摇篮,孕育着万千物种,为人类的可持续发展提供资源。水下光学成像技术是人类认识海洋和开发海洋资源的重要手段,水下光学成像技术可以有效地探测海洋环境,观察海洋生

物<sup>[1]</sup>。但是海水中含有叶绿素和悬浮颗粒物,其中某些悬浮颗粒物的大小与波长相当<sup>[2]</sup>,当光源穿过浑浊水体进行成像时,会发生散射,造成光强减弱使得成像模糊,对比度下降<sup>[3]</sup>。

偏振是光的固有属性之一<sup>[4]</sup>。光的偏振特性使得光学成像不仅可以获得传统成像技术可以获得的光强信息,而且还可以获得图像上每一个像素点的偏振信

收稿日期: 2023-02-27; 修回日期: 2023-03-13; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(52175265)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51621064)、中央高校基础研究基金(DUT21GF308)

通信作者: \*chujk@dlut.edu.cn

息,这些偏振信息使得图像更清晰,具有更高的对比度。目前有许多学者对偏振光在浑浊水体中的偏振传输成像展开了研究。1967年,Gilbert等<sup>[5]</sup>为了提高水下光学成像的能见度,在美国海军试验站分别进行了有圆偏振光和无圆偏振光传输成像实验,实验结果表明圆偏振光在浑浊的水中传输时,图像的可见距离是传统光强成像的2倍。1989年,MacKintosh等<sup>[6]</sup>发现,当入射光为圆偏振光并且经过多次散射传输时,圆偏振光表现出了偏振记忆性,而线偏振光会随着散射介质中粒径的增大而逐渐失去偏振记忆性。1994年,Bicout等<sup>[7]</sup>利用Mie散射理论,结合蒙特卡罗法研究了波长为670 nm的偏振光分别通过散射粒子粒径为0.22 μm、0.48 μm和1.05 μm的散射介质时偏振特性受粒子尺寸的影响,分析结果表明当散射介质中的粒子尺寸比波长小时,入射圆偏振光的去偏振度要大于线偏振光的去偏振度。1999年,Sankaran等<sup>[8]</sup>研究偏振光在生物组织中传播时受传输距离的影响,研究结果表明线偏振光在生物组织中的传播距离要比圆偏振光长。2010年,Gay等<sup>[9]</sup>为研究偏振光源在散射介质中的辐射传输问题,提出了一种积分矢量蒙特卡罗模型,并将其应用于偏振成像配置。分析了散射介质中的颗粒大小和形态对穆勒矩阵成像的影响,分析表明偏振图像 $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $m_{21}$ 和 $m_{22}$ 不会受粒子尺寸和形状的影响,但是 $m_{13}$ 、 $m_{23}$ 、 $m_{33}$ 、 $m_{31}$ 、 $m_{32}$ 和 $m_{44}$ 会受散射粒子尺寸和形状的影响。2018年,西北工业大学张莹璐等<sup>[10]</sup>采用米散射理论和蒙特卡罗法,研究了水下光通信链路受海洋悬浮粒子的影响,研究表明当粒径尺寸增大时,粒子的散射系数和衰减系数也会随之增大,使得在相同传输距离时接收的光强减小。

目前偏振光在散射介质中传输时对传输特性的研究包含仿真研究和实验研究,其中仿真研究用到了蒙特卡罗法,但主要集中于偏振传输特性的理论研究,没有应用到成像上,缺乏关于散射介质中的散射对成像质量的影响的研究,并且基于偏振传输特性的研究大多是基于前向散射和后向散射的。本文首先利用单次米散射理论,结合蒙特卡罗法,再融合几何光学成像,提出了一种理论分析方法,分析自然光和偏振光在散射介质中传输时包含前向散射、后向散射及侧向散射在内的散射对成像质量的影响。

## 2 蒙特卡罗传输模型和几何光学成像模型

### 2.1 基于蒙特卡罗法的米散射传输模型

海水含有矿物颗粒、浮游生物及其他微生物。其中矿物颗粒近似球形,直径小于10 μm,主要集中于2~5 μm,该直径大于入射光源波长<sup>[11]</sup>,会使得光源进行水下偏振传输成像时发生米散射。对于一个均匀球形的散射颗粒,米散射是一个麦克斯韦方程的解析解。在散射平面内,可以将入射光 $E_i$ 和散射光 $E_s$ 分别分解

为该平面内的 $E_1^0$ 和 $E_s^0$ 以及与该平面垂直的 $E_1^{\perp}$ 和 $E_s^{\perp}$ ,散射电场表示为

$$\begin{cases} E_1^{\perp} = -E_i^{\perp} \frac{i}{kR} \exp[-i(kR - \omega t)] S_1(\theta) \\ E_s^0 = -E_1^0 \frac{i}{kR} \exp[-i(kR - \omega t)] S_2(\theta) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为圆频率; $R$ 为散射体粒子到观测镜头之间的距离。 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 是由贝塞尔函数和勒让德函数组成的无穷级数,表达式分别为

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

式中: $a_n$ 和 $b_n$ 为米散射系数,由球形颗粒半径和颗粒相对于周围介质的折射率决定; $\pi_n$ 和 $\tau_n$ 与散射角有关,可由勒让德函数表示。当光强为 $I_0$ 的自然光入射到各向同性的球形颗粒上时,散射光强 $I$ 可以由 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 表示,为

$$I = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} [ |S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2 ] I_0, \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 是入射光在颗粒周围介质中的波长。入射光为偏振光时,散射光强可表示为

$$I = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} [ i_1(\theta) \sin^2 \varphi + i_2(\theta) \cos^2 \varphi ] I_0, \quad (4)$$

式中: $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 为散射光的强度函数,分别表示平行和垂直于散射面的强度分量; $\varphi$ 为方位角,表示入射偏振光的电矢量相对于散射平面的夹角。

蒙特卡罗法是一种数值模拟的随机统计方法,可以用来仿真浑浊水体的光学特性。通过对足够多的光子在浑浊水体中的传播过程进行模拟,可以较准确地获取光子在浑浊水体中的散射特征。本文在Linux环境下使用C++语言编写的蒙特卡罗程序<sup>[12]</sup>,基本原理如下:光子以某一确定位置和某一角度范围内随机进入浑浊水体容器,当光子与浑浊水体中的粒子发生碰撞时会发生散射和吸收,根据随机变量产生光子运动路程,根据相函数产生光子散射角,根据吸收概率确定光子是否被吸收,当光子被吸收或者超出散射介质容器范围,统计光子的出射位置、出射角度及偏振信息。

### 2.2 光线追迹模型

几何光学是以光线为基础的,以几何的形式来研究光线在介质中的传输规律和成像规律。在研究中将一个自身发光的物体看成是一个点光源,该点光源既没有大小,也没有体积,并且会向四周辐射能量,最终形成一个球面波。当入射光的波长远小于散射体尺寸时,可应用几何光学原理对光线进行追踪,以实现光线定位。

光线追迹的过程:追踪与散射体发生散射或者吸收的光线并且使这些光线通过光学成像模型。经光学

模型传输的光线符合几何光学的基本规律<sup>[13]</sup>:光在各向同性均匀介质中沿着直线传播;不同光源的光在空间中相遇时,彼此互不影响;在两种不同的介质表面,光线会发生反射和折射。目前光线追迹技术已广泛应用于显微镜、双目镜等成像设备。

基于光线追迹理论搭建的光路传输模型的原理是充分运用光线追迹理论,采用光学仿真系统进行光学零部件建模,最终得到光线通过此模型之后的成像信息。本文采用 COMSOL Multiphysics 软件以及参考双高斯透镜参数,搭建了一款焦距为 100.2 mm、视场角为 19°的几何光学光线追迹模型,该模型主要由透镜和光阑组成<sup>[14]</sup>。模型如图 1 所示,模型中的每个零部

件的参数如表 1 所示,点光源发出的光线经过散射传输后,依次经过透镜 1、透镜 2、透镜 3、光阑、透镜 4、透镜 5、透镜 6,最后在成像面上呈现光斑。

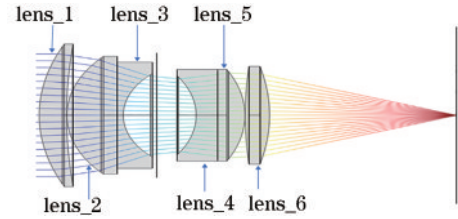


图 1 光线追迹模型的结构

Fig. 1 Structure of the light tracing model

表 1 各个透镜的参数

Table 1 Parameters of each lens

Name	Radius of curvature of the surface 1 /mm	Radius of curvature of the surface 2 /mm	Centre thickness /mm
Lens_1	75.05	270.7	9
Lens_2	39.27	0	16.51
Lens_3	0	25.65	2
Lens_4	-31.87	0	7.03
Lens_5	0	-43.51	8.98
Lens_6	221.14	-88.79	7.98

### 3 基于偏振成像传输模型的仿真结果

#### 3.1 散射传输成像模型测试

为了验证理论模型的正确性,进行了无散射偏振传输观测实验,通过将实际观测结果与理论结果作对比,验证理论模型的正确性,为此,搭建了一个偏振成像的封闭实验装置,该实验装置如图 2 所示。该装置包含光源和偏振片。偏振片用于产生偏振光,光照射

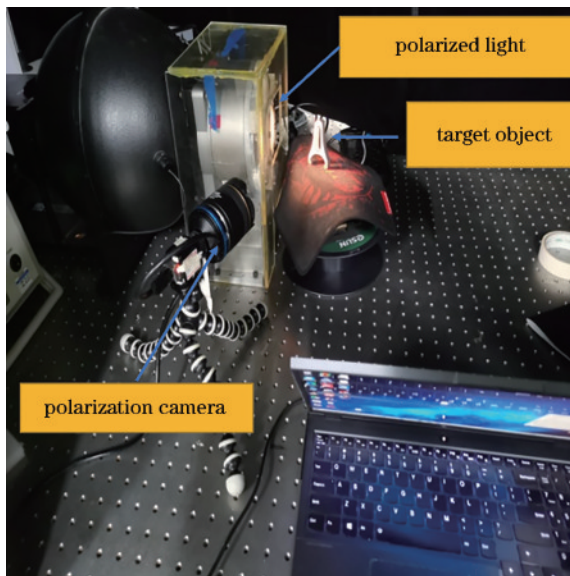


图 2 仿真模型实验装置图

Fig. 2 Diagram of the simulation model experimental setup

到成像元件上,最终由 LUCID Vision Labs 公司推出的 PHX050S 型偏振相机(镜头为“Nikon AF DX Fisheye 10.5 mm f/2.8G ED”镜头,视场角为 50°)拍摄元件,得到偏振图像和灰度图像,其中灰度图像用于仿真成像实验中的光源,之后使用搭建的基于 Mie 散射蒙特卡罗法的偏振成像传输模型在无散射条件下进行偏振成像传输。由于得到的偏振图和灰度图的分辨率较高,像素为 1024×1224,如图 3(a)所示,数据量较大,相邻两行或两列的数据相近,故采用对行数据中相邻两行留取一行、列数据中相邻两列留取一列的数据优化方式进行 4 次降采样,每次降采样时都是选取相邻两行留取一行,相邻两列留取一列的方式进行降采样。图像本身大小为 1024×1224,第一次降采样后,图像大小为 512×612,第二次图像降采样后图像大小为 256×306,第三次降采样后图像大小为 128×153,由于图像中的样品为主要研究对象,最终为使图片美观,便于后续分析,故在第四次降采样时,采取的起始行为第 5 行,结束行为第 124 行,对于该区间内的相邻两行留取一行,采取的起始列为第 17 列,结束列为第 136 列,对于该区间内的相邻两列留取一列。降采样之后获得图像尺寸为 60×60,这样既保证了图像的美观,又保留了图像中的重要信息,最后进行数据分析并得到偏振角图和偏振度图。

对实际观测结果与仿真结果进行对比,结果如图 4 所示,其中图 4(b)是经过仿真传输成像模型之后得到的偏振角图。由此可见,对于偏振相机拍摄的样

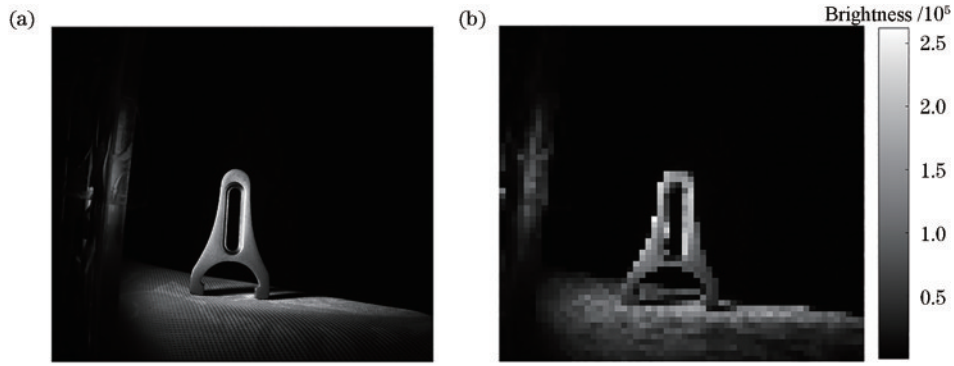


图 3 仿真实验像图。(a)实际观测实验得到的灰度图;(b)数据优化后得到的灰度图  
Fig. 3 Simulated experimental images. (a) Grayscale image obtained from the actual observation experiment;  
(b) grayscale image obtained after data optimization

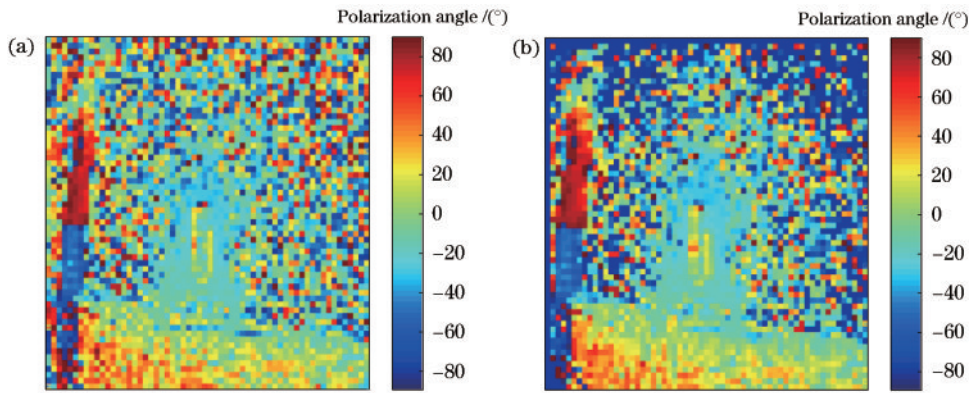


图 4 偏振角图。(a)实际观测实验得到的偏振角图;(b)模型仿真传输得到的偏振角图  
Fig. 4 Polarization angle diagrams. (a) Polarization angle diagram obtained from the actual observation experiment;  
(b) polarization angle diagram obtained from the model simulation transmission

品,经计算得到的偏振角为 $0\sim-30^\circ$ ,而该图在没有散射介质的环境下传输时,得到的偏振角为 $0\sim-30^\circ$ ,与偏振相机拍摄的样品的偏振角一致。由以上比较可得建立的仿真模型正确可靠。

之后对比了图 5(a)实际观测的偏振度图和图 5(b)

经过模型传输之后的偏振度图。对于偏振相机拍摄的样品,经计算得到偏振度在 0.6 左右,当光源在没有散射介质环境下传输时,得到的偏振度在 0.6 左右,与偏振相机拍摄的样品的偏振度一致。由以上比较可得仿真模型正确可靠。

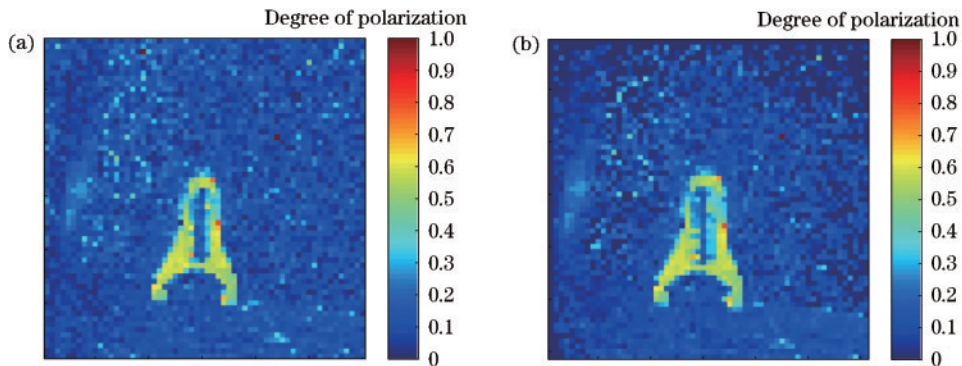


图 5 偏振度图。(a)实际观测实验得到的偏振度图;(b)模型仿真传输得到的偏振度图  
Fig. 5 Polarization degree plots. (a) Polarization degree diagram obtained from the actual observation experiment;  
(b) polarization degree diagram obtained from the model simulation transmission

采用偏振成像传输模型进行仿真计算,分析了自然光、线偏振光和圆偏振光点光源经过不同的水体环境进行偏振成像传输时该散射环境对光斑的影响。点

光源最终形成的光斑为高斯光斑<sup>[15-16]</sup>,本文从两个方面对光斑进行分析:一是选取光斑中心点所在横截面的最大振幅为峰值,表示光斑中心点的光强;二是以选

取的光强为原点,当光强下降到原点光强的 0.36788,即  $1/e$  的地方为光斑直径,计算光强与光斑直径的比即纵横比,表示光斑中心处的聚集程度。仿真传输原理如图 6 和图 7 所示,含有位置和偏振角度信息的点光源先进行米散射传输,水体中的散射粒子的粒径分别为 1, 2, 3, 4, 5  $\mu\text{m}$ ,质量浓度为 25, 50, 75, 100  $\text{g}/\text{m}^3$ ,散射介质的厚度为 3 cm,仿真实验的光子数目为 100000。之后进行光线追迹模型传输,在成像面上得到含有偏振信息、位置和散射角度的光斑。

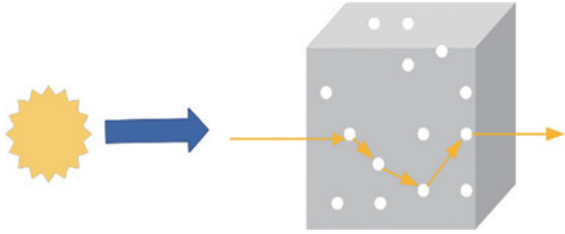


图 6 基于蒙特卡罗法的米散射传输模型仿真图

Fig. 6 Simulation of Mie scattering transmission model based on Monte Carlo method

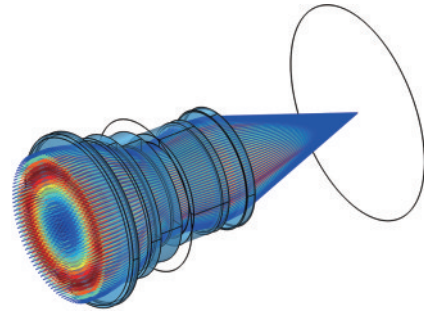


图 7 光线追迹模型仿真图

Fig. 7 Simulation diagram of light tracing model

### 3.2 不同波长不同类型的点光源对成像的影响

点光源经过不同浑浊水体进行偏振成像传输时,得到了不同类型的点光源成像后的光斑的光强和纵横比,分别如图 8 和图 9 所示,每张图中的球体代表自然光,方块代表线偏振光,五角星代表圆偏振光。根据光强图和纵横比图分析波长、散射粒子粒径和散射粒子质量浓度(LWC)对光强和纵横比的影响。

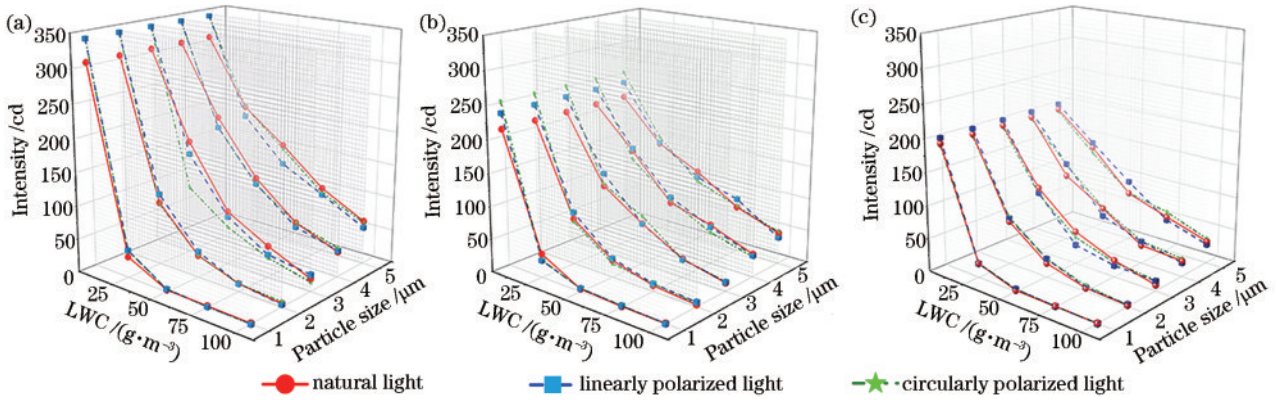


图 8 不同波段的光强。(a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

Fig. 8 Light intensity for different wavelength bands. (a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

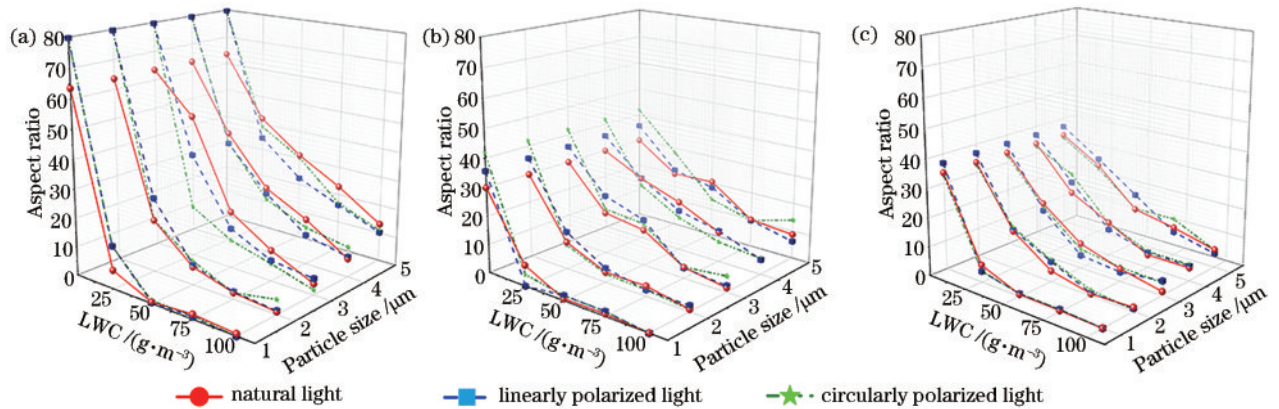


图 9 不同波段的纵横比。(a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

Fig. 9 Aspect ratio for different wavelength bands. (a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

#### 1) 波长对光斑的影响

不同类型的点光源在无散射介质中传输时,光强和纵横比随着波长的增加而减小,其中在各个波段处,自然光的光强和光斑峰值不如偏振光,在波长为 524 nm

时,圆偏振光的光强和光斑峰值高于线偏振光。

不同类型的点光源在相同的散射介质中传输时,光强和光斑纵横比随着波长的增加而减小,故在有散射环境进行偏振成像传输时,宜选取蓝光波段。

2) 粒径对光斑的影响

当波长为 456 nm 的光源在散射介质环境中进行传输时,不同类型的点光源形成的光斑光强和纵横比均随散射介质中粒径的增大而增大。其中在散射粒径较小的浑浊水体中进行偏振成像传输时,点光源为偏振光时所形成的光斑光强和纵横比高于自然光,但随着粒径的增大,点光源为自然光时所形成的光斑光强和纵横比高于偏振光。故在散射粒径较小的浑浊水体中进行偏振成像时宜选用偏振光,反之选用自然光。点光源为圆偏振光和线偏振光时,在粒径较小时,线偏振光所形成的光强和纵横比大于圆偏振光,随着粒径的增大,圆偏振光所形成的光强和纵横比大于线偏振光,即在散射粒径较小时,点光源宜选用线偏振光进行偏振成像传输,在散射粒径较大时点光源宜选用自然光进行偏振成像传输。

3) 质量浓度对光斑的影响

当波长为 456 nm 的光源在浑浊水体中进行偏振

成像传输时,光斑光强和纵横比随着散射介质中散射颗粒质量浓度的增大而减小。当质量浓度较大时,三种类型的光源经浑浊水体传输后成像光强和纵横比差别不大。在散射颗粒质量浓度较小并且散射粒径较小时,线偏振光的光斑光强和纵横比大于自然光和圆偏振光,在散射颗粒质量浓度较小并且粒径较大时,圆偏振光和自然光的光斑峰值和纵横比大于线偏振光。

3.3 不同波长不同类型的点光源的偏振度保持性

为了研究偏振光经过散射偏振成像模型进行偏振成像传输时偏振度信息的保持性,筛选经过偏振成像传输后偏振度大于 0.9 的光子进行成像,图 10 和图 11 表示光斑光强和纵横比,图中的球体和方块分别代表线偏振光和圆偏振光。从波长、散射粒径和散射颗粒质量浓度三个方面分析偏振度大于 0.9 的光子所形成的光斑情况。

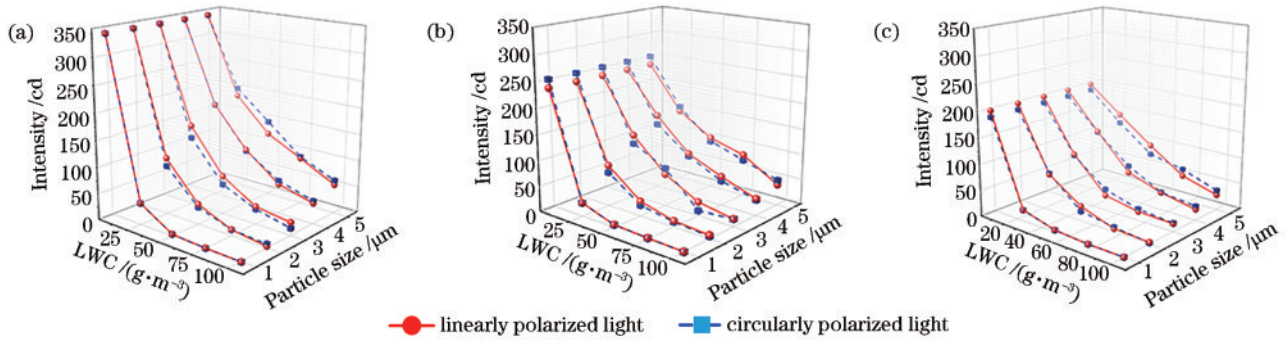


图 10 偏振度大于 0.9 的光子所形成的光斑光强。(a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

Fig. 10 Spot light intensity formed by photons with polarization degree greater than 0.9. (a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

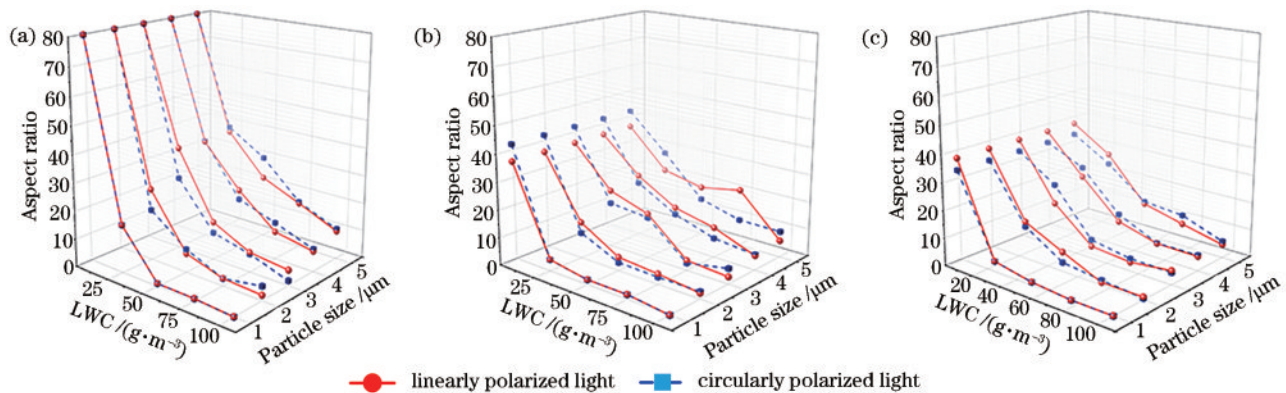


图 11 偏振度大于 0.9 的光子形成的光斑纵横比。(a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

Fig. 11 Aspect ratio of the spot formed by photons with polarization degree greater than 0.9. (a) 456 nm; (b) 524 nm; (c) 620 nm

在无散射环境中进行偏振成像传输时,随着波长的增加,偏振度大于 0.9 的光子所形成的光斑光强在逐渐减小,其中在波长较小时,线偏振光所形成的光斑光强峰值和纵横比高于圆偏振光,在红光波段,圆偏振光所形成的光斑光强峰值和纵横比高于线偏振光。波长为 456 nm 的光源在散射粒子粒径小于 4 μm 的散射

环境中进行偏振成像传输时,圆偏振光所形成的光斑的光强峰值和纵横比高于线偏振光。当光源在散射粒子粒径大于 4 μm 的散射环境中进行偏振成像传输时,线偏振光所形成的光斑的光强和纵横比要小于圆偏振光。波长为 456 nm 的光源在同一粒径组成的散射环境中进行偏振成像传输时,光斑的光强峰值和纵横比

随着散射颗粒质量浓度的增大而减小。故在散射粒子质量浓度较小的散射环境中进行偏振成像传输时,偏振度的保持性较好。

### 3.4 不同波长的线偏振光的偏振角保持性

为了研究不同波段的线偏振点光源经偏振成像模型进行传输时的偏振角保持性,选取经过传输后偏振角度为 $(-2^\circ, 2^\circ)$ 范围内的光子进行成像,结果如图 12 和图 13 所示,图 12 代表光强峰值,图 13 代表光强纵横比,其中球体、方块及五角星分别代表 456 nm、524 nm、620 nm 光源波长。

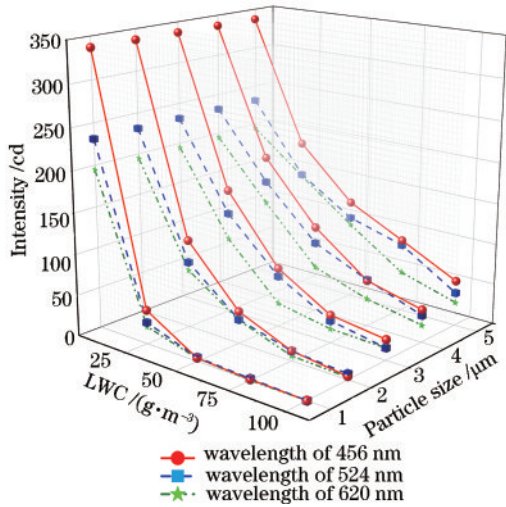


图 12 偏振角为 $(-2^\circ, 2^\circ)$ 的光子所形成的光斑光强  
Fig. 12 Spot light intensity formed by a photon with a polarization angle of $(-2^\circ, 2^\circ)$

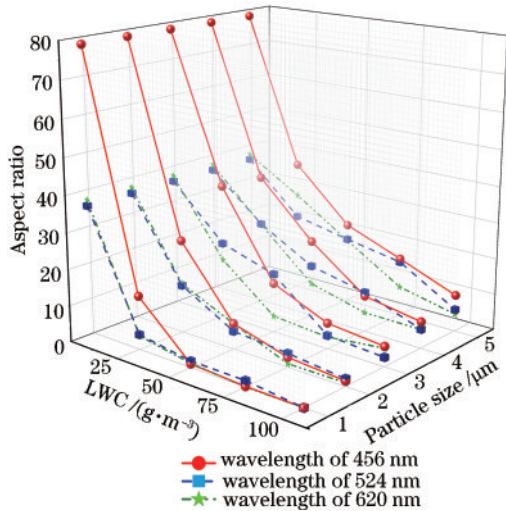


图 13 偏振角为 $(-2^\circ, 2^\circ)$ 的光子所形成的光斑纵横比  
Fig. 13 Aspect ratio of the spot formed by a photon with a polarization angle of $(-2^\circ, 2^\circ)$

不同波长的点光源在无散射环境下进行偏振成像传输时,随着光源波长的增大,光斑峰值和纵横比逐渐减小。当不同波长的点光源经过相同的散射环境进行偏振成像传输时,光斑峰值和光斑纵横比随着波长的

增加而减小。故宜采用蓝光波段的点光源在散射环境中进行偏振成像传输。

## 4 结 论

为探究散射环境对偏振成像传输的影响,选用不同粒径不同质量浓度的浑浊水体作为散射环境,利用单次米散射理论,结合蒙特卡罗法,在融合几何光学成像的基础上构建了一个理论分析方法。该方法分析了不同波段的光在经过不同粒径不同质量浓度的散射介质时的光斑情况。结果表明:在散射环境下进行偏振成像传输时,光源波长为蓝光波段时,光斑的聚集效果较好;在该波段,在散射粒径较小并且散射颗粒质量浓度较小时,宜选用线偏振光进行偏振成像传输,此时光斑的偏振度和偏振角保持性都较好;在散射浓度较小且散射粒径较小时,宜选用线偏振光,在散射浓度较小且粒径较大时,应选用圆偏振光和自然光。

### 参 考 文 献

- [1] 全向前, 陈祥子, 全永前, 等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 153-165.  
Quan X Q, Chen X Z, Quan Y Q, et al. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 153-165.
- [2] Shi P, Zhao S C, Gu Y J, et al. Channel analysis for single photon underwater free space quantum key distribution[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(3): 349-356.
- [3] Schechner Y Y, Karpel N. Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(3): 570-587.
- [4] 赵永强, 潘泉, 程咏梅. 成像偏振光谱遥感及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
Zhao Y Q, Pan Q, Cheng Y M. Imaging spectropolarimetric remote sensing and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [5] Gilbert G D, Pernicka J C. Improvement of underwater visibility by reduction of backscatter with a circular polarization technique[J]. Applied Optics, 1967, 6(4): 741-746.
- [6] MacKintosh F C, Zhu J X, Pine D J, et al. Polarization memory of multiply scattered light[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1989, 40(13): 9342-9345.
- [7] Bicout D, Brosseau C, Martinez A S, et al. Depolarization of multiply scattered waves by spherical diffusers: influence of the size parameter[J]. Physical Review E, 1994, 49(2): 1767-1770.
- [8] Sankaran V, Everett M J, Maitland D J, et al. Comparison of polarized-light propagation in biological tissue and phantoms[J]. Optics Letters, 1999, 24(15): 1044-1046.
- [9] Gay B, Vaillon R, Mengüç M P. Polarization imaging of multiply-scattered radiation based on integral-vector Monte Carlo method[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2010, 111(2): 287-294.
- [10] 张莹璐, 王英民, 黄爱萍. 米氏理论下悬浮粒子对水下

- 激光传输的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0505002.
- Zhang Y L, Wang Y M, Huang A P. Influence of suspended particles based on Mie theory on underwater laser transmission[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0505002.
- [11] 胡文焯. 西北太平洋悬浮颗粒物的分布、组成及环境演变的初步研究[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016: 6-8.
- Hu W Y. Preliminary study on the distribution, composition and environmental evolution of suspended particulate matter in the northwest Pacific Ocean[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography (TIO) of the Ministry of Natural Resources, 2016: 6-8.
- [12] 厉祥, 张然, 路淑芳, 等. 基于米散射蒙特卡罗法的紫外偏振透云研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1701001.
- Li X, Zhang R, Lu S F, et al. Ultraviolet polarization employing Mie scattering Monte-Carlo method for cloud-based navigation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1701001.
- [13] 王仁义. 薄透镜成像的几何光学规律及其傅里叶解释[J]. 安徽教育学院学报, 2002, 20(3): 22-25, 31.
- Wang R Y. Geometrical optical law of thin lens imaging and its Fourier interpretation[J]. Journal of Hefei Normal University, 2002, 20(3): 22-25, 31.
- [14] Smith W J. Modern lens design[M]. New York: McGraw-Hill, 2004: 409-490.
- [15] 田园, 周勖. 高斯光束强度分布特性研究[J]. 无线互联科技, 2018, 15(19): 108-109.
- Tian Y, Zhou X. Research on intensity distribution characteristics of Gaussian beams[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(19): 108-109.
- [16] 于志文, 周昌群. 高斯光束与几何光束的区别与联系探讨[J]. 四川兵工学报, 1997, 18(3): 1-8.
- Yu Z W, Zhou C Q. Discussion on the difference and connection between Gaussian beam and geometric beam [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 1997, 18(3): 1-8.