

海洋混合悬浮颗粒对蓝绿激光的散射特性研究

王明军^{1,2,3}, 王主玉¹, 黄朝军²

1. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

2. 陕西理工大学物理与电信工程学院, 陕西 汉中 723001

3. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室, 陕西 西安 710126

摘要 激光在水下的传输很大程度上会受到海水中悬浮颗粒物的影响,而目前对于海洋中悬浮颗粒物光散射的理论研究大多是针对单一成分的悬浮粒子而进行的,但是在真实海洋中悬浮颗粒物都是以多种成分混合的颗粒群形式而存在的,因此研究真实海洋中混合悬浮颗粒物对蓝绿激光的散射特性具有重要意义。该研究选取了对蓝绿激光传输产生较大影响的浮游藻类植物、悬浮泥沙、碎屑、悬浮气泡和矿物质这五种常见的悬浮颗粒物作为研究对象,充分考虑真实海况中这五种悬浮颗粒物的不同混合情况,构建了海水中混合球形悬浮颗粒物对蓝绿激光的散射特性模型。数值计算了海水中五种物质混合的球形悬浮颗粒物对 532 nm 蓝绿激光的统计平均光散射参量和平均散射相函数,分析不同混合悬浮颗粒物的混合比对平均散射、吸收和消光系数以及单次反照率随着粒子有效半径和粒子数浓度变化的影响,同时分析了不同粒子尺寸下的不同混合比对混合悬浮颗粒物的平均散射相函数随着角度变化的影响。数值结果表明,当悬浮泥沙在整个混合模型中占比越大时,平均散射系数越大,而当悬浮藻类粒子在整个混合模型中占比增大时,平均吸收系数增大,由此可知海洋中对光造成主要影响的五种常见悬浮颗粒物中,悬浮泥沙对光散射作用影响最大,悬浮藻类粒子对光吸收作用影响最大。随着悬浮颗粒物浓度的增大,混合粒子的单次反照率保持不变,由此可知混合悬浮颗粒物的平均光散射参量随着粒子浓度的增长速率是一致的。海洋中混合悬浮颗粒物的平均散射相函数随着粒子的有效半径的增大而增大,散射作用最大的混合比下的悬浮颗粒物其平均散射相函数最大,悬浮颗粒物的前向散射较强。该工作对蓝绿激光在海水中传输、信道建模,水下无线光通信的研究以及激光探测都具有重要的理论指导意义。

关键词 蓝绿激光; 混合悬浮颗粒物; 统计平均光散射参量; 散射相函数

中图分类号: O436.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1749-06

引言

地球约百分之七十的面积被海洋所覆盖,近些年来,研究人员的目光逐渐聚焦到海洋中,海洋的军事战略地位也倍受各国关注,研究蓝绿激光在海水中的散射和传输特性对水下激光目标探测、水下无线光通信以及海洋遥感等方面^[1-3]都具有重要的意义。在研究的过程中,人们发现海水中的悬浮颗粒物对蓝绿激光的散射作用显著,在很大程度上影响着水下激光的传输,因此研究海水中的悬浮颗粒物对蓝绿激光的散射特性显得尤为重要。

近些年对海水中悬浮粒子光散射特性的研究也一直在进行中,冯鹏等^[4]依据 Mie 理论研究了紫外-可见光照射下水

体中藻类和泥沙悬浮颗粒物的光散射特性。俞雪平等^[5]以海洋浮游微生物为例,研究分析了双层均匀粒子的不同参数对散射特性的影响。张莹璐等^[6]将 Mie 理论和蒙特卡罗数值模拟相结合,建立了水下光子的传输模型,用于分析海水悬浮粒子对归一化接收能量和信道延迟的影响。程谦等^[7]采用等效球形粒子 Mie 散射理论模拟方法研究了水下散射光的偏振特性,分析了水下悬浮颗粒的特性与光学特性的关系。

虽然已有许多研究者对海洋中悬浮颗粒光散射进行研究,但是大多是针对单一成分的悬浮粒子而进行,然而真实海洋环境中悬浮颗粒物都是以多种成分混合的颗粒群形式而存在,因此本文构建了混合悬浮颗粒物的蓝绿激光散射模型,数值计算分析海水中混合球形悬浮颗粒物对 532 nm 蓝绿激光的光散射特性。本文所建立的模型更加贴近真实海

收稿日期: 2021-05-09, 修订日期: 2021-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(61771385), 陕西省杰出青年科学基金项目(2020JC-42)资助

作者简介: 王主玉, 1995年生, 西安理工大学硕士研究生 e-mail: wangmingjun@xaut.edu.cn

况,对水下蓝绿激光目标探测、水下无线光通信信道的建模以及海水遥感等理论研究有着重要的意义。

1 理论部分

海水中的悬浮颗粒物不是单一个体存在的,而是符合一定的尺寸分布以粒子群的形式存在。悬浮颗粒统计平均的散射系数 b_{sca} 、消光系数 b_{ext} 和吸收系数 b_{abs} 与效率因子 Q 的关系如式(1)表示^[8]

$$b_{\text{ext, sca, abs}} = \pi \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} n(r) Q_{\text{ext, sca, abs}} r^2 dr \quad (1)$$

式(1)中, $n(r)$ 为海洋中的悬浮颗粒粒径分布,常采用的是 Junge 分布模型^[9]进行仿真计算,其表达为

$$n(r) = N_0 (r/r_0)^{-s} \quad (2)$$

式(2)中, r 为等效球形粒子半径, r_0 是参考粒子半径,一般选取参考粒子半径为 $1 \mu\text{m}$, N_0 是个常数一般取 10^9 , s 表示粒径分布律的斜率为 4。

忽略粒子的多次散射作用,本文用每种成分的单粒子归一化的消光效率因子作为混合粒子模型的光散射的贡献率,并考虑不同成分的粒子混合的占比,对统计平均的光散射参量和散射相函数进行建模,如图 1 所示为混合悬浮颗粒物蓝绿激光散射模型。

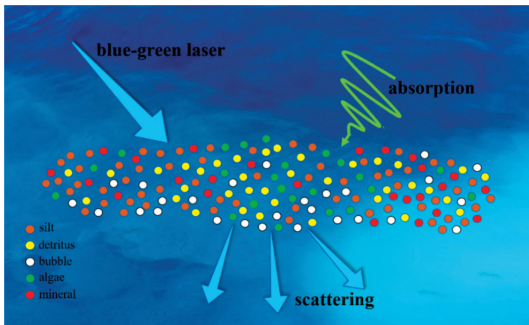


图 1 混合悬浮颗粒物蓝绿激光散射模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blue-green laser scattering model of mixed suspended particles

计算了不同成分的悬浮单个球形粒子的消光效率因子如图 2 所示。不同的悬浮颗粒的消光效率因子都是呈现震荡状态的,由于水下粒子的散射作用显著,吸收作用较小,因此消光主要由散射造成,随着粒子半径的变大,振幅越来越小,最后都趋于稳定。

利用式(3)对不同的悬浮颗粒的消光效率因子进行归一化的处理,并将归一化的参量作为不同粒子对混合系统的贡献率 a 。

$$a = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} \quad (3)$$

由每种成分在混合悬浮颗粒物中所占的不同比例,得到不同类别的悬浮颗粒的粒子数浓度,

$$n_i(r) = n_i n(r) = n_i N_0 (r/r_0)^{-s} \quad (4)$$

式(4)中, n_i 为第 i 种成分的混合百分比,同时考虑不同成分的悬浮颗粒物的贡献率 a_i 对混合模型的影响,代入式(1)得

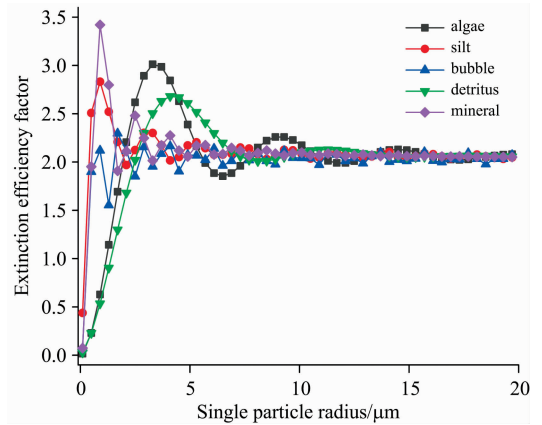


图 2 不同成分的悬浮颗粒物的消光效率因子

Fig. 2 Extinction efficiency factors of suspended particulate matter with different compositions

到混合粒子的散射、吸收和消光系数,

$$K_{\text{ext, sca, abs}} = \pi \sum_i \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} a_i n_i(r) Q_{\text{ext}(i), \text{sca}(i), \text{abs}(i)} r^2 dr \quad (5)$$

单次反照率是分析激光散射特性的一个重要的参量,其定义是散射损失占总衰减损失的百分比,即可表示为,

$$\omega = \frac{K_{\text{sca}}}{K_{\text{ext}}} \quad (6)$$

散射相函数反映了悬浮颗粒物在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间各个散射角方向上对光波的散射能力。用 $P(\theta, \lambda)$ 表示混合悬浮颗粒物的平均相函数,

$$P(\theta, \lambda) = \frac{\lambda^2}{\pi K_{\text{sca}}} \int_{r_{\text{min}}}^{r_{\text{max}}} n(r) \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{2} dr \quad (7)$$

2 结果与讨论

海水中多数的悬浮粒子呈现球型趋向,在平静海域悬浮的颗粒物粒径多为 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ ^[10],选定波长为 532 nm 的蓝绿激光为入射波,悬浮泥沙和浮游藻类植物的折射率^[11]分别为 $1.54 \sim 10^{-4}i$ 和 $1.05 \sim 0.045i$,悬浮气泡的折射率^[12]为 0.75 ,悬浮矿石和碎屑的折射率^[13]分别为 $1.18 \sim 0.007954i$ 和 $1.04 \sim 0.008i$ 。根据第一小节建立的混合球形悬浮颗粒物蓝绿激光散射模型,结合上述参数计算不同混合比下悬浮颗粒物的统计平均光散射参量随着有效半径的变化。

由图 3(a)可知,悬浮泥沙占比越大平均散射系数越大,表示其对光的散射作用更强,在这五种常见的海洋悬浮颗粒中悬浮泥沙的折射率实部最大,与悬浮粒子折射率实部越大粒子散射作用越大的理论相符合。实验测量海水中悬浮颗粒物的折射率值大部分位于 $1.07 \sim 1.24$ 之间^[14],选取折射率为 1.15 并计算其平均散射系数,由图可知建立的混合悬浮颗粒物模型计算出来的结果与实验数据计算出来的曲线走势基本一致。由图 3(b)可知,在这五种悬浮粒子的混合状态下对光的吸收有很大影响的是悬浮藻类粒子,当悬浮藻类粒子占比增加的时候,混合悬浮粒子对光的吸收作用增加。由图 3(c)可知,混合悬浮颗粒物平均消光系数随粒子的有效半径的增大而增大,曲线的走势与平均散射系数基本一致,这是

由于 532 nm 波长对应的不同成分的悬浮颗粒物折射率虚部较小, 对光的吸收作用较小, 衰减主要是由于散射造成的。

由图 3(d)可知, 不同混合比下悬浮颗粒物的平均吸收系数越小, 其单次反照率越接近 1。

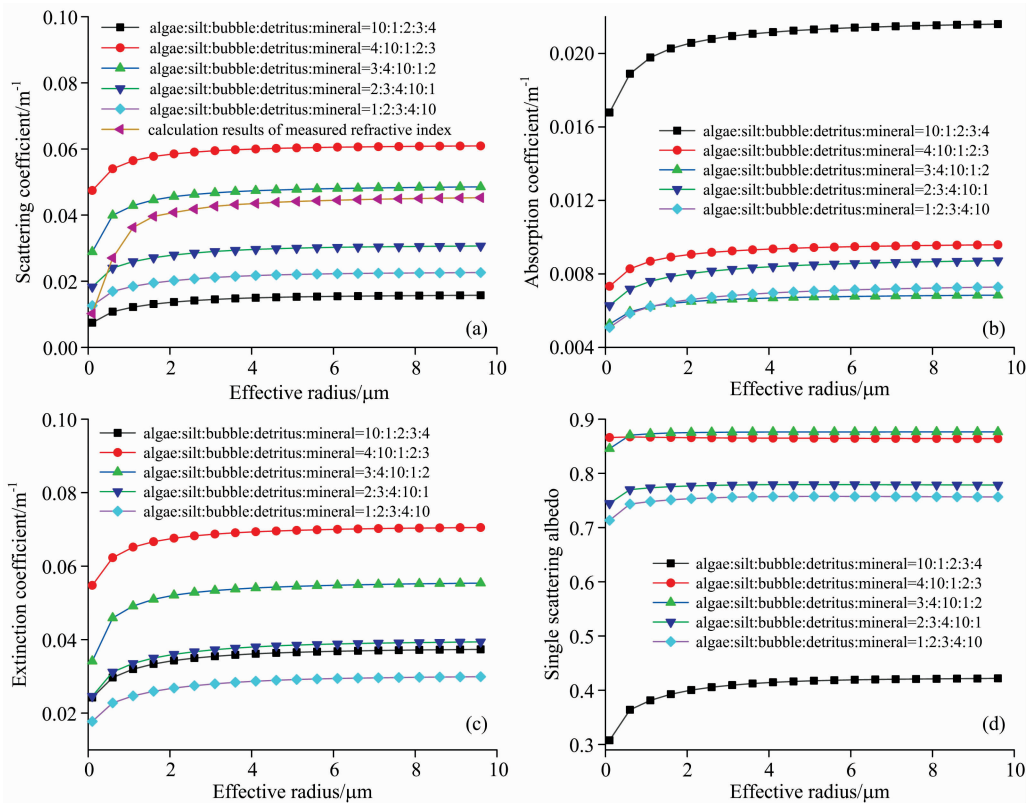


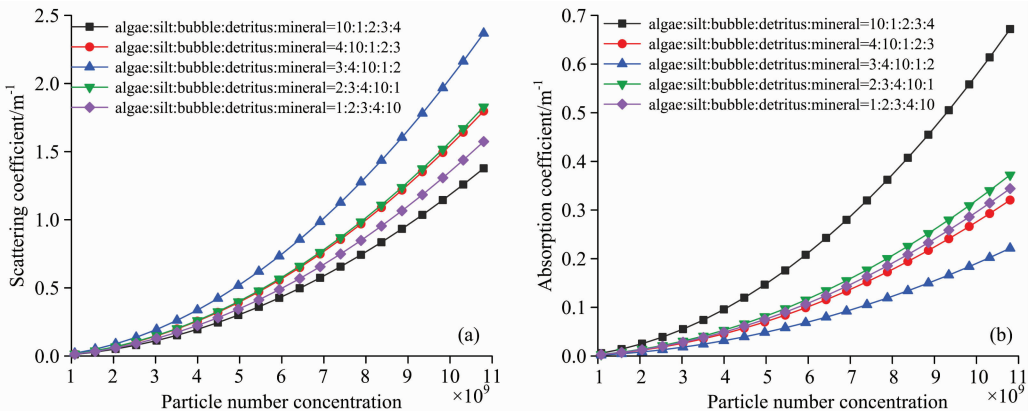
图 3 悬浮颗粒物不同的混合比对 (a) 平均散射系数; (b) 平均吸收系数; (c) 平均消光系数; (d) 单次反照率的影响

Fig. 3 The effect of different mixing ratios of suspended particles on (a) average scattering coefficient; (b) average absorption coefficient; (c) average extinction coefficient; (d) single albedo

根据文献[15]所给出的实际海水中悬浮颗粒物的含量为 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, 假设悬浮颗粒物的半径都为 $2 \mu\text{m}$, 根据单位体积质量对应单位体积悬浮粒子数分布换算, 最终得到实测海水中单位体积悬浮粒子数为 $1.08 \times 10^9 \sim 1.08 \times 10^{10}$. 由图 4 可知随着悬浮颗粒物总浓度的增大, 不同成分的悬浮颗粒物占比对总平均光散射参量的影响也会增大. 由图 4(a)可知, 悬浮气泡和泥沙的总体混合比例较大的时候, 平均散射系数最大, 这是由于悬浮气泡的贡献率最大, 当其

所占混合比例较大时粒子数浓度也较大, 其计算出来的平均散射系数也会较大, 同时悬浮泥沙由于其折射率实部最大, 其散射作用最强, 因此这种比例混合下其散射系数最大。

由图 4(b)可知, 悬浮气泡和泥沙的总体混合比例较大的时候, 平均吸收系数最小. 由图 4(c)可知, 平均消光系数的总体走势与平均散射系数是基本一致的, 由于海洋中悬浮颗粒物对光的散射特性要大于吸收特性. 由图 4(d)可知, 随着悬浮颗粒物粒子数浓度的增大, 悬浮颗粒物的单次反照率并



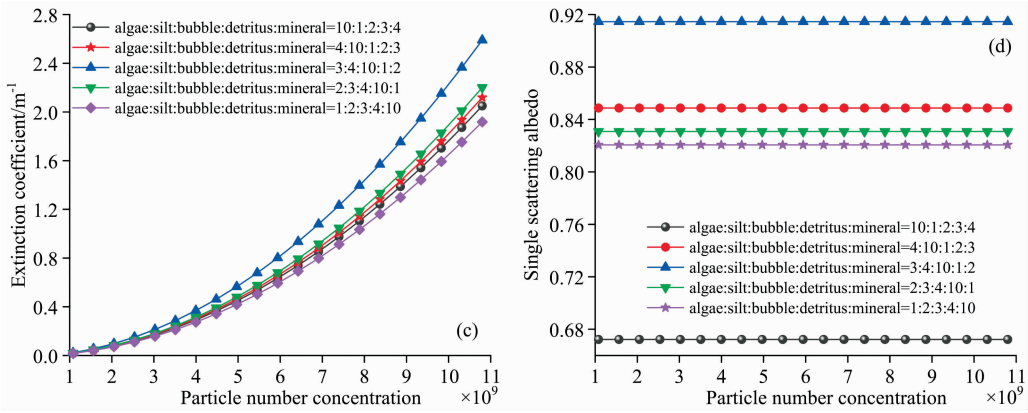


图 4 混合悬浮颗粒 (a) 平均散射系数; (b) 平均吸收系数; (c) 平均消光系数; (d) 单次反照率随着粒子数浓度的变化

Fig. 4 Mixed suspended particles (a) average scattering coefficient; (b) average absorption coefficient; (c) average extinction coefficient; (d) single albedo changes with particle number concentration

不随着粒子浓度而变化。

图 5 对比计算了不同尺度下的混合悬浮颗粒物的混合比对平均散射相函数角分布的影响, 图 5(a)–(d) 分别假定了不同的球形悬浮颗粒物的有效半径为 1, 4, 7 和 10 μm 进行计算分析。由图可知, 不同的混合比对平均散射相函数的角

分布曲线走势几乎没有影响, 主要影响的是平均散射相函数的数值, 散射作用最大的混合比下的悬浮颗粒物其平均散射相函数也是最大的。对比图 5(a)–(d) 可知, 平均散射相函数随着粒子有效半径的增大而增大, 并都表现出了粒子较强的前向散射特性。

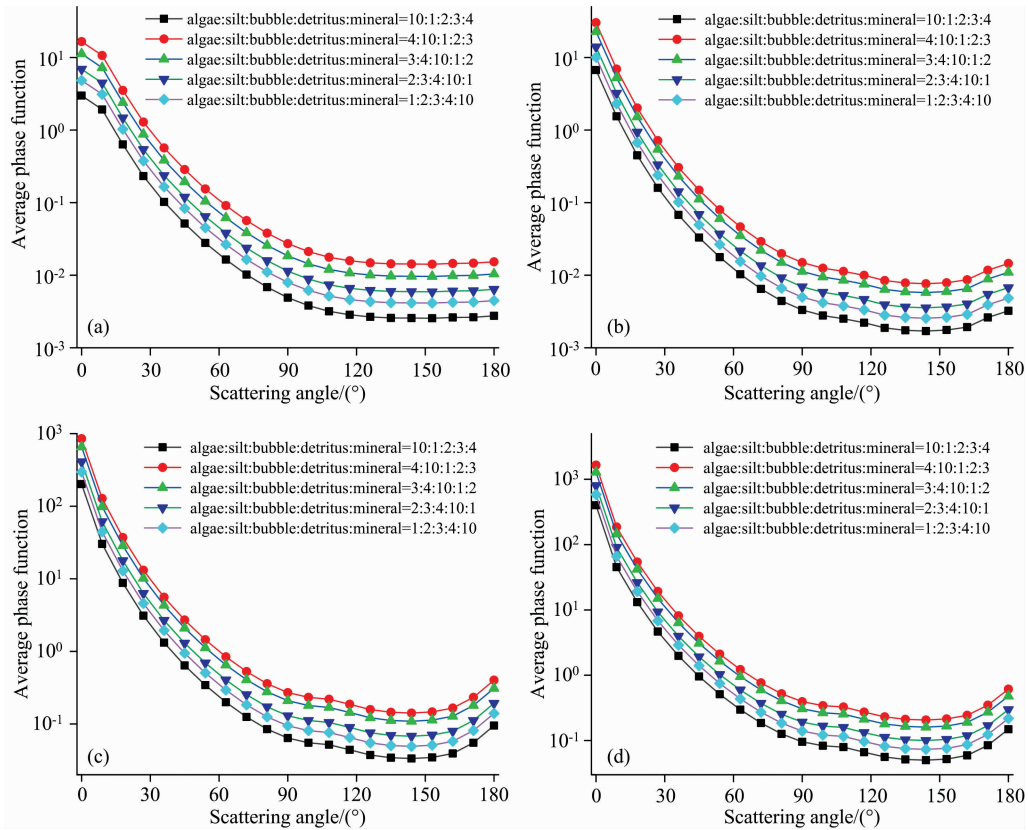


图 5 不同混合比下悬浮颗粒物有效半径 (a) 1 μm ; (b) 4 μm ; (c) 7 μm ; (d) 10 μm 的平均散射相函数随散射角度的变化

Fig. 5 The effective radius of suspended particles under different mixing ratios (a) 1 μm ; (b) 4 μm ; (c) 7 μm ; (d) 10 μm average scattering phase function changes with scattering angle

3 结 论

根据真实海水背景建立了更贴近实际海水的混合悬浮颗粒蓝绿激光散射模型,考虑了海水中对激光产生主要影响的五种常见悬浮颗粒物,数值计算这五种物质不同的混合比对平均散射、吸收和消光系数以及单次反照率随着粒子有效半径和粒子数浓度变化的影响,并分析了不同粒子尺寸下的

不同混合比对混合悬浮颗粒物的平均散射相函数随着角度变化的影响。结果表明:悬浮泥沙对光散射作用影响最大,悬浮藻类粒子对光吸收作用影响最大;混合悬浮颗粒物的平均光散射参量随着粒子浓度的增长速率是一致的;混合球形悬浮粒子前向散射较强,随着粒子有效半径的增大散射相函数也随之增大。本文工作进一步推广应用于激光在海水中的目标探测识别、水下无线光通信的研究中,同时可以为反演海水中的悬浮颗粒物成分实验研究提供理论支持和新的思路。

References

- [1] Gkoura L K, Roumelas G D, Nistazakis H E, et al. Underwater Optical Wireless Communication Systems: A Concise Review, 2017.
- [2] Zheng Q, Klemas V V, Yan X H. Progress in Ocean Remote Sensing: Overview, 2017.
- [3] Alem N, Pellen F, Le Brun G, et al. Applied Optics, 2017, 56(26): 7367.
- [4] Vo Quang Sang, FENG Peng, TANG Bin, et al(Vo Quang Sang, 冯 鹏, 汤 斌, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2015, 52(1): 013001.
- [5] YU Xue-ping, HU Yun-an, LIU Liang, et al(俞雪平, 胡云安, 刘 亮, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2015, (1): 0129002.
- [6] ZHANG Ying-luo, WANG Ying-min, HUANG Ai-ping(张莹路, 王英民, 黄爱萍). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2018, 45(5): 0505002.
- [7] Cheng Qian, Wang Yingmin, Zhang Yingluo. Optoelectronics Letters, 2021, 17(4): 252.
- [8] Van de Hulst H C. Light Scattering by Small Particles. New York: John Wiley, 1957.
- [9] Buonassissi C J, Dierssen H M. Journal of Geophysical Research Oceans, 2010, 115: C10028.
- [10] Moran S B, Buesseler K O. Nature, 1992, 359(6392): 221.
- [11] Jonasz M, Fournier G. Light Scattering by Particles in Water: Theoretical and Experimental Foundations: Theoretical and Experimental Foundations. New York: Academic Press, 2011.
- [12] SUN Chun-sheng(孙春生). Doctoral Dissertation(博士论文). National University of Defense Technology(国防科学技术大学), 2008.
- [13] Stramski D, Bricaud A, et al. Applied Optics, 2001, 40(18): 2929.
- [14] LI Min-min(李敏敏). Master Dissertation(硕士论文). National Ocean Technology Center(国家海洋技术中心), 2013.
- [15] LIN Shao-ying(林绍迎). Doctoral Dissertation(博士论文). Ocean University of China(中国海洋大学), 2007.

Scattering Characteristics of Marine Mixed Suspended Particles to Blue and Green Lasers

WANG Ming-jun^{1,2,3}, WANG Zhu-yu¹, HUANG Chao-jun²

1. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. School of Physics and Telecommunications Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China

3. Shaanxi Civil-Military Integration Key Laboratory of Intelligence Collaborative Networks, Xi'an 710126, China

Abstract The transmission of laser underwater is largely affected by suspended particles in seawater. At present, most theoretical studies on the light scattering of suspended particles in the ocean are carried out on single-component suspended particles. However, suspended particles in the real ocean exist in a group of particles mixed with multiple components. Therefore, it is of great significance to study the scattering characteristics of blue-green lasers by mixed suspended particles in the real ocean. In this paper, five common suspended particles which have a greater impact on the transmission of blue-green lasers are planktonic algae, suspended sediments, debris, suspended bubbles, and minerals as the research objects. Fully considering the different mixing situations of these five suspended particles in real sea conditions, a model of the scattering characteristics of blue-green lasers by mixed spherical suspended particles in seawater is constructed. The statistical average light scattering parameters and average scattering phase function of 532 nm blue-green lasers of spherical suspended particles mixed with five seawater substances are calculated numerically. They are analyzing the influence of the mixing ratio of different mixed suspended particles on the average scattering, absorption and extinction coefficients and single albedo with the effective radius of the particles and the change of the particle number concentration. At the same time, the influence of different mixing ratios

under different particle sizes on the average scattering phase function of mixed suspended particles with angle changes is analyzed. Numerical results show that the average scattering coefficient increases when the proportion of suspended sediment in the entire mixed model increases, while the average absorption coefficient increases with the proportion of suspended algae particles in the entire mixed model. It can be seen that among the five common suspended particles that have a major impact on the light in the ocean, suspended sediment has the greatest impact on light scattering, and suspended algae particles have the greatest impact on light absorption. As the concentration of suspended particles increases, the single albedo of the mixed particles remains unchanged. One can see that the average light scattering parameters of the mixed suspended particles are consistent with the increase in particle concentration. The average scattering phase function of mixed suspended particles in the ocean increases with the increase of the effective radius of the particles. The average scattering phase function of suspended particles under the mixing ratio with the largest scattering effect is the largest, and the forward scattering of suspended particles is strong. This work has important theoretical significance for the blue-green laser transmission in seawater, channel modeling, the research of underwater wireless optical communication and the laser target detection in seawater.

Keywords Blue-green laser; Mixed suspended particles; Statistical average light scattering parameters; Scattering phase function

(Received May 9, 2021; accepted Jul. 8, 2021)

关于《光谱学与光谱分析》调整审稿费收费标准的通知

尊敬的《光谱学与光谱分析》广大作者、读者：我刊自 2018 年 7 月 1 日以后登记的稿件向投稿作者收取审稿费 200 元/篇，在您投稿之前，为免受经济损失，请您必须考虑：

1. 没有创新的一般性稿件，请您不要投稿。
2. 没有国家级基金资助的稿件，请您不要投稿。
3. 不是光谱专业的稿件，请您不要投稿。
4. 与其他文章重合率超过 10% 的稿件，请您不要投稿。

所投稿件经初审通过后，作者会收到缴纳审稿费的通知。请作者及时从我刊网站 (<http://www.gpxygpfx.com>) 查询稿件是否处于交审稿费状态，在收到通知后，请及时缴纳审稿费；如在 10 天之内没有收到您的审稿费，被视为自动放弃，我刊不再受理。交费后我刊开据增值税电子普通发票，并传至作者提供的电子邮箱，作者可自行打印。

联系电话：010-62181070, 62182998

电子邮箱：chngpxygpfx@vip.sina.com

感谢您多年来对《光谱学与光谱分析》的支持和厚爱！

《光谱学与光谱分析》期刊社

2018 年 6 月 30 日