

团聚核壳蓝藻粒子的蓝绿激光散射和吸收特性研究

贺锦涛^{1*}, 王明军^{1,2,3}, 张佳琳¹¹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 藻类浮游颗粒对激光的散射和吸收是水下蓝绿激光通信性能在海水中衰减的主要原因。依据离散偶极子理论,建立了双椭球、四椭球、柱型丝状、环型丝状和 S 型丝状五种主要团聚核壳蓝藻颗粒模型,数值计算了核壳藻类粒子在 532 nm 蓝绿激光波段处的消光系数、吸收系数和散射系数随核壳蓝藻粒子尺寸的变化关系;基于均匀混合层理论,对比了有无中间混合层的核壳蓝藻模型的散射强度随散射角度的变化情况,计算了五种核壳蓝藻模型的粒子尺寸对其散射矩阵元素的影响。计算结果表明:五种藻类在蓝绿激光波段处的吸收系数和散射系数随粒子尺寸的增加而递增,且前向散射强度最大;随着散射角度的增加,五个模型的散射强度都在递减,几个大尺寸藻类模型的散射矩阵元素比值振荡较多。研究结果为海洋水下悬浮藻类颗粒的蓝绿激光散射特性和吸收特性的研究及水下蓝绿激光通信信道的建模提供了参考。

关键词 散射; 蓝藻粒子; 蓝绿激光; 离散偶极子近似方法; 散射矩阵

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1729001

Blue-Green Laser Scattering and Absorption Properties of Agglomerated Core-Shell Cyanobacteria Particles

He Jintao^{1*}, Wang Mingjun^{1,2,3}, Zhang Jialin¹¹*Institute of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;*²*School of Physics and Telecommunications Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723001, China;*³*Key Laboratory of Military-Civilian Joint Construction of Intelligent Collaborative Network of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710126, China*

Abstract The laser scattering and absorption of algal particles is the main reason for the attenuation of underwater blue-green laser communication performance in seawater. In this paper, based on the discrete dipole theory, five kinds of particle models of agglomerated core-shell cyanobacteria are established, including double ellipsoidal, four ellipsoidal, columnar filamentous, ring filamentous, and S filamentous ones. The extinction absorption and scattering coefficients of the core-shell algae particles at 532 nm of the blue-green laser are calculated as a function of the size of the core-shell cyanobacteria particles. Based on the uniform mixed layer theory, the scattering intensities of the core-shell cyanobacteria models versus scattering angle with and without an intermediate mixed layer are compared, and the influence of particle size on the scattering matrix elements is calculated for the five core-shell cyanobacteria models. The calculation results show that the absorption and scattering coefficients of the five kinds of algae at the band of a blue-green laser increase with the increase of particle size, and the forward scattering intensity is the largest. In contrast, the scattering intensities of the five models decrease with the increase of scattering angle,

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-03-15; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(92052106)、国家自然科学基金(61771385)、陕西省杰出青年科学基金(2020JC-42)、固体激光技术重点实验室开放基金(6142404190301)、西安市高校人才服务企业工程项目(GXYD14.26)

通信作者: *2035158797@qq.com

and the scattering matrix element ratios of several kinds of large size algae models fluctuate more. These research results lay a foundation for the study of blue-green laser scattering and absorption characteristics of underwater suspended algae particles as well as the modeling of underwater blue-green laser communication channels.

Key words scattering; cyanobacteria particles; blue-green laser; discrete dipole approximation method; scattering matrix

OCIS codes 290.5825; 290.5850; 010.4458

1 引言

水下蓝绿激光通信具有带宽大、载波频率高、延时低等特点,因此水下蓝绿激光通信是未来水下通信发展的一个主要方向。蓝绿激光在海水中的传输衰减主要是浮游植物和非色素悬浮颗粒等对光束的散射和吸收引起的,其中浮游生物的吸收散射是蓝绿激光在海洋通信中衰减的主要原因之一,而海洋浮游藻类颗粒对蓝绿激光的散射在浮游生物散射中占了主要部分^[1-2]。藻类粒子的散射特性在水下蓝绿激光通信、水色卫星遥感的开发、优势藻光谱特征的提取以及赤潮监测等方面有着重要的应用价值^[3-5]。数以千计的光合浮游微生物在种类上被分为硅藻、绿色或红色微藻、游苔类植物、共生藻类和蓝藻^[6],其中蓝藻又称蓝绿藻,是一种光自养原核生物,能够进行光合作用^[7-8],以太阳辐射作为它们的能量来源。蓝藻可以在地球上几乎每一个陆地和水生栖息地上找到,是大气中氧气的主要产生源^[9]。虽然大多数硅藻和微藻以单细胞形式存在,但蓝藻可以是单细胞的,也可以是多细胞的^[10-11],例如集胞藻是具有哑铃形状的单细胞蓝藻,也是第一个进行全基因组测序的光合生物^[12]。Lee 等^[13]利用等效涂层球法仿真模拟了丝状蓝藻的散射特性,仿真结果与实验测量的丝状蓝藻的散射特性还是有一定差异。Lain 等^[8]利用双层核壳球理论对浮游藻类生物种群进行建模仿真,仿真结果与实际测量的浮游植物群落的散射特性比较契合,但此研究只考虑了几种简单的藻类模型。俞雪平等^[14]利用双层核壳球理论研究了不同内外球体参数以及内球和外球中心偏离情况下的海洋浮游微生物的散射特性,结果表明,除了尺寸、折射率等参数,粒子的结构对前向散射也有作用,当内外球体参数相差较大时,有必要考虑结构因素对散射特性的影响。Heng 等^[15]利用 T 矩阵方法和等效涂层球方法,模拟了多种蓝藻的光学特性,研究结果表明,具有单分散或多分散单体的随机取向蓝藻模型可以通过相同体积的等效涂层球进行近似。然而,随着单个蓝藻数目和单个蓝藻尺寸参数的增加,等效涂层球法对散射特性相关参

量的计算准确性下降。Wang 等^[16]利用偏振光散射法来检测悬浮的海洋藻类颗粒形态的敏感变化对粒子散射特性的影响,并对实验室培养的藻类颗粒进行了数天的测量。结果表明,这种藻类颗粒的光散射特性与其细胞生理形态的变化关联很大,但是研究只分析了这一种典型藻类颗粒的不同生理形态,并未对其他藻类颗粒进行计算分析。

对蓝藻颗粒团聚体的研究大多视单个蓝藻颗粒为单内核的均匀理想球体,研究结果表明,部分团聚蓝藻颗粒并非一个理想的球体,而是在生长过程中相互依附、相互挤压,在外部形态上更接近一个椭球形^[17]。本文依据大部分蓝藻颗粒的微观形态^[9]建立了以下五种典型的核壳蓝藻颗粒团聚模型,其中单细胞蓝藻模型主要包括本文的双核壳蓝藻颗粒团聚模型和四核壳蓝藻颗粒团聚模型,丝状蓝藻模型主要包括本文的柱型丝状核壳蓝藻颗粒团聚模型、环型丝状核壳蓝藻颗粒团聚模型和 S 型丝状核壳蓝藻颗粒团聚模型。利用这些模型研究了蓝藻颗粒对蓝绿激光的散射和吸收特性。

2 理论部分

2.1 研究团聚核壳蓝藻粒子散射和吸收特性的离散偶极子方法

离散偶极子近似 (DDA) 方法是计算具有小/中尺寸参数的任意形状粒子散射特性的常用数值方法之一^[18]。在 DDA 方法中,不规则粒子被离散成一个小体积的阵列,每个小体积阵列近似为电偶极子。离散偶极子近似方法常被用来计算一些单个粒子和一些小型粒子团聚体的散射吸收特性,也被广泛应用于海洋气溶胶粒子、冰晶粒子、大气气溶胶粒子的光散射特性计算^[19]。

离散偶极子近似方法的基本思想是将目标散射体用有限个离散且相互作用的偶极子阵列来替代,将阵列中单个偶极子点对电场的响应作为单个偶极子点的电偶极矩,这些点的辐射总和就构成了总的散射场。蓝藻粒子的等体积球体的等效半径 a_{eff} 为

$$a_{\text{eff}} = (3V/4\pi)^{1/3}, \quad (1)$$

式中: V 为目标散射体的体积。等效粒子半径的物

理意义就是将模型总体积等效为一个等体积的球体,这个球体的半径就是等效粒子半径^[20]。

2.2 团聚核壳蓝藻粒子的散射矩阵

散射振幅矩阵为 $\begin{pmatrix} S_2 & S_3 \\ S_4 & S_1 \end{pmatrix}$, 散射特性可用入射

参数 (I_i, Q_i, U_i, V_i) 和散射参数 (I_s, Q_s, U_s, V_s) 的 Mueller 散射矩阵^[21] 来描述 :

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: k 为相对折射率参量; r 为粒子间距; 4×4 的矩阵为散射矩阵。团聚核壳蓝藻粒子的 Muller 散射矩阵由 16 个元素组成, 它们体现了散射体所有的散射特性和极化特性。对于随机取向的具有某种对称性的团聚粒子模型, Muller 矩阵中有 8 个元素不为零, 且 $S_{12} = S_{21}, S_{43} = -S_{34}$, 因此只有 6 个矩阵元素是独立的, 分别由散射振幅矩阵的 4 个元素的模和它们之间的相位差决定。另外, S_{22} 和 S_{11}, S_{33} 和 S_{44} 的变化趋势类似, 所以散射矩阵只有 4 个独立的矩阵元素^[21]。散射特性用入射参数 (I_i, Q_i, U_i, V_i) 的 Muller 散射矩阵来描述。

$$\begin{pmatrix} I_s \\ Q_s \\ U_s \\ V_s \end{pmatrix} = \frac{1}{k^2 r^2} \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & 0 & -S_{34} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_i \\ Q_i \\ U_i \\ V_i \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} S_{11} = (|S_1|^2 + |S_2|^2 + |S_3|^2 + |S_4|^2)/2 \\ S_{12} = (|S_1|^2 - |S_2|^2 + |S_4|^2 - |S_3|^2)/2 \\ S_{33} = \text{Re}(S_1 S_2^* + S_3 S_4^*) \\ S_{34} = \text{Im}(S_2 S_1^* + S_4 S_3^*) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: $\text{Re}(\cdot)$ 表示取实部; $\text{Im}(\cdot)$ 表示取虚部。

散射矩阵元素的表达式如(4)式所示, 其中矩阵元素 S_{11} 表征的是总的入射场强度在散射发生前后的变化情况, 矩阵元素比值 $-S_{12}/S_{11}$ 表征的是平行和垂直于散射平面的线性极化程度, S_{33}/S_{11} 表征线性极化入射光相对于线性极化的散射光的变化情况, S_{34}/S_{11} 表征的是圆极化入射光相对于圆极化的散射光的变化情况^[22]。

3 五种常见团聚核壳蓝藻粒子的蓝绿激光散射和吸收特性

常见蓝藻的显微照片及其几何模型如图 1 所示, 其中图 1(a1)所示为两个蓝藻粒子的团聚照片, 图 1(b1)所示为四个蓝藻粒子的团聚照片, 图 1(c1)所示为柱型丝状蓝藻的团聚照片[图 1(a1)~(c1)来自 [http:// protist. i. hosei. ac. jp](http://protist.i.hosei.ac.jp)], 图 1(d1)所示为环型丝状蓝藻的团聚照片, 图 1(e1)所示为 S 型丝状蓝藻的团聚照片[图 1(d1)、(e1)来自 [http:// www. jyu. fi/ bio/ kasviplankton/ uusin](http://www.jyu.fi/bio/kasviplankton/uusin)]。为了研究团聚蓝藻的散射特性, 依据藻类粒子的几何形状, 本文建立了图 1(a2)~(e2)所示的五种主要几何模

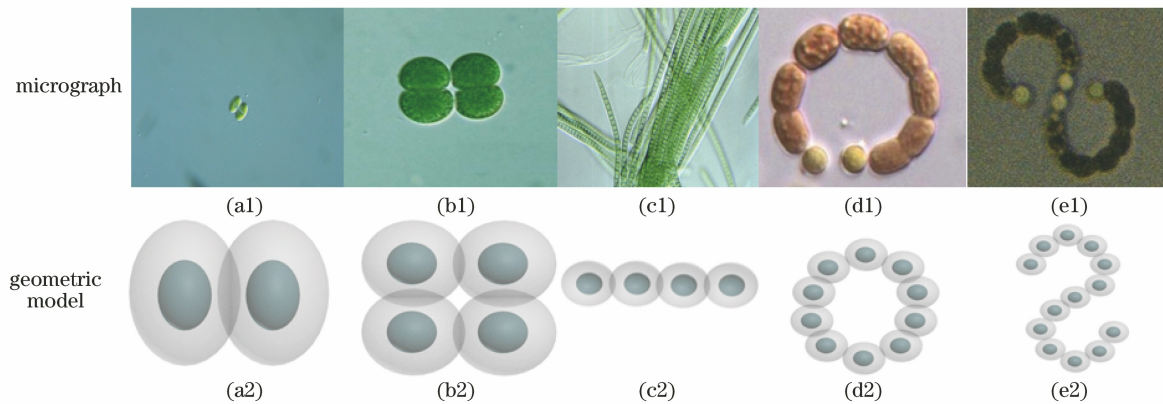


图 1 几种常见蓝藻的显微照片及其几何模型。(a1)(a2)双核壳蓝藻粒子团聚;(b1)(b2)四核壳蓝藻粒子团聚;(c1)(c2)柱型丝状核壳蓝藻粒子团聚;(d1)(d2)环型丝状核壳蓝藻粒子团聚;(e1)(e2) S 型丝状核壳蓝藻粒子团聚

Fig. 1 Micrographs and geometric models of several common cyanobacteria. (a1)(a2) Binuclear shell cyanobacteria particle aggregation; (b1)(b2) tetra-core shell cyanobacteria particle aggregation; (c1)(c2) cylindrical filamentous nuclear shell cyanobacteria particle aggregation; (d1)(d2) ring-shaped filamentous nuclear shell cyanobacteria particle aggregation; (e1)(e2) S-shaped filamentous nuclear shell cyanobacteria particle aggregation

型,其中图 1(a2)所示为用两个核壳椭球代表双蓝藻团聚的模型,图 1(b2)所示为用四个核壳椭球代表四蓝藻团聚的模型,图 1(c2)所示为用多个核壳椭球代表柱型丝状蓝藻团聚的模型,图 1(d2)所示为用多个核壳椭球代表环型丝状蓝藻团聚的模型,图 1(e2)所示为用多个核壳椭球代表 S 型丝状蓝藻团聚的模型。以上模型的单个蓝藻粒子在空间都是双层核壳结构,且随机取向。入射光沿着 +X 轴传播,即入射角为 0° ,模型位于 +X 轴上。当散射光束的方向与入射光束一致时为前向散射,当散射光束与入射光束方向相反(即沿 -X 轴方向, 180°) 时为后向散射。入射波长为蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,内核的相对复折射率为 $1.085 + 0.05i$,外层的相对复折射率为 $1.0311 + 0.004i$,依据均匀混合层理论^[23],蓝藻粒子的中间混合层折射率为 $1.085 + 0.05i$ 。以下团聚核壳蓝藻模型中每个核壳

蓝藻粒子的体积相同,本文模型适用于中小尺寸的团聚蓝藻的仿真模拟,随着粒子尺寸的增加,模型结果的误差会增大。

3.1 单个核壳蓝藻粒子尺寸对团聚核壳藻类粒子模型的散射系数、吸收系数和消光系数的影响

取单个核壳粒子的等效粒子半径 a_{eff} 为 $0.01 \sim 1.80 \mu\text{m}$,依据图 1 和相关文献^[17],本文建立了满足以下尺寸关系的单个核壳椭球结构: $A:B:a:b:d=5:4:3.5:2.8:1$,其中 A 代表外层椭球长半轴, B 代表外层椭球短半轴, a 代表内层椭球长半轴, b 代表内层椭球短半轴。图 2 给出了双椭球核壳蓝藻粒子模型、四椭球核壳蓝藻粒子模型、柱型丝状核壳蓝藻粒子模型、环型丝状核壳蓝藻粒子模型、S 型丝状核壳蓝藻粒子模型的散射系数、吸收系数和消光系数随着单个蓝藻尺寸的变化情况。

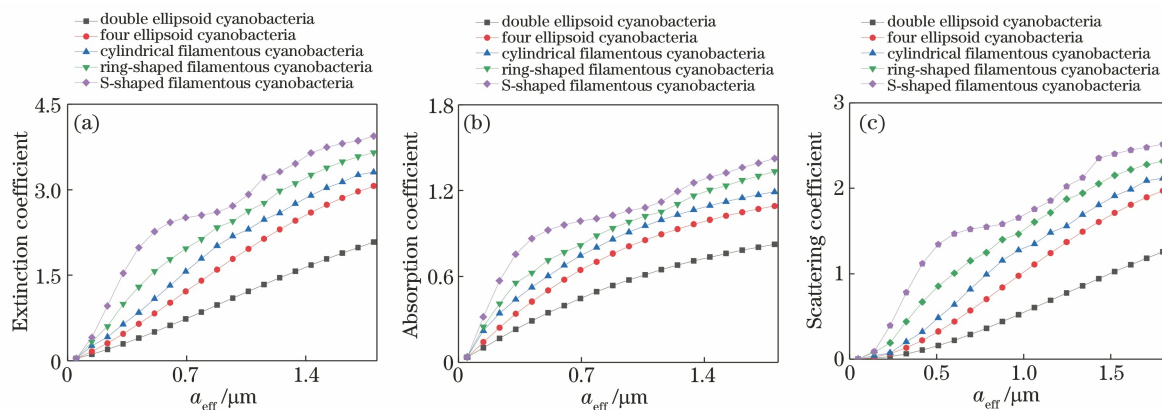


图 2 五种核壳蓝藻模型的光学参数与单个粒子尺寸的关系。(a)消光系数;(b)吸收系数;(c)散射系数

Fig. 2 Relationships between optical parameters of five core-shell cyanobacteria models and single particle size.

(a) Extinction coefficient; (b) absorption coefficient; (c) scattering coefficient

从图 2 可知,模型的吸收系数和散射系数随单个核壳蓝藻尺寸的增加而递增。这是由于蓝藻核介质的折射率实部大于外部蓝藻细胞液介质的实部,实部对散射特性的影响较大,因此随着单个蓝藻粒子尺寸的变大,散射系数变大。相比于折射率实部,折射率虚部对蓝藻粒子吸收特性的影响较大。由于细胞核介质的折射率虚部远大于外部蓝藻细胞质,因此随着蓝藻细胞核尺寸的变大,蓝藻粒子的吸收系数变大。由于散射系数和吸收系数随着单个蓝藻尺寸的增加而递增,因此消光系数也随着单个蓝藻尺寸的增加而递增。由于 S 型丝状蓝藻的模型体积大于其他四种蓝藻模型,因此 S 型丝状蓝藻模型的散射系数和消光系数大于其他四种蓝藻模型。

3.2 中间均匀混合层对五种团聚核壳蓝藻模型散射强度的影响

实际海洋蓝藻构成较为复杂,本文考虑介于蓝藻外壳和蓝藻内核的中间混合层。为了研究有无中间混合层对团聚核壳藻类散射特性的影响,取入射波长为蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,取粒子的等效粒子半径 $a_{\text{eff}} = 1.5\lambda$,依据均匀混合层理论^[18],可得中间混合层折射率为 1.061。图 3 给出了在无中间混合层($A:B:a:b=5:4:3.5:2.8$,且中间混合层厚度 $d=0$)、较薄中间混合层($A:B:a:b:d=5:4:3.5:1.8:1$)和较厚中间混合层($A:B:a:b:d=5:4:3.5:1.3:1.5$)三种情况下,双椭球、四椭球、柱型丝状、环型丝状、S 型丝状核壳蓝藻粒子的散射强度随散射角度的变化情况。

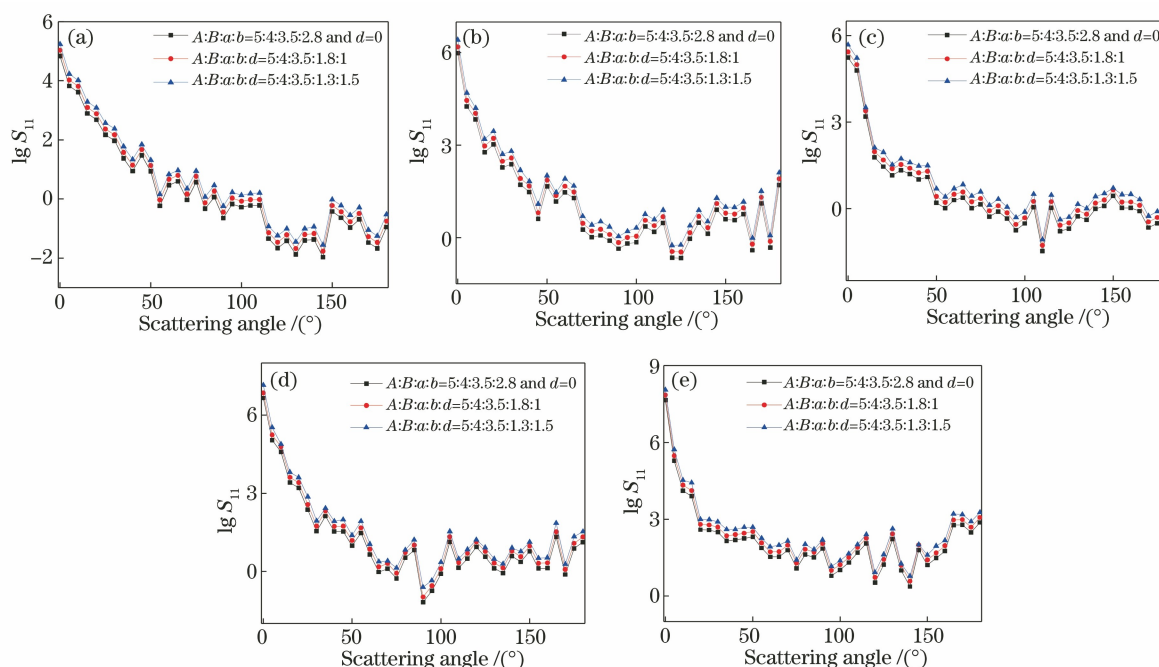


图 3 中间混合层对不同模型散射强度的影响。(a) 双椭球模型; (b) 四椭球模型; (c) 柱型丝状模型; (d) 环型丝状模型; (e) S 型丝状模型

Fig. 3 Influence of intermediate mixed layer on scattering intensity of each model. (a) Double ellipsoid model; (b) four ellipsoid model; (c) cylindrical filamentous model; (d) annular filamentous model; (e) S-shaped filamentous model

由图 3 可以看出,在蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 下,考虑中间混合层的团聚核壳蓝藻模型的散射强度大于不考虑中间混合层的团聚核壳蓝藻模型的散射强度,其中较厚中间混合层模型的散射强度大于较薄中间混合层模型的散射强度。这是由于考虑中间混合层的模型的折射率实部大于不考虑中间混合层的模型,而粒子模型的散射强度与模型介质的折射率实部关系较大,因此较厚中间混合层模型的 S_{11} 最大。图 3 所示都是前向散射强度最大,随着散射角度的增加,五个模型的散射强度都在递减,这是因为大尺寸椭球结构的前向散射强度大于后向散射强度。双椭球核壳蓝藻模型在散射角度 $\theta = 135^\circ$ 附近取得散射强度最小值,如图 3(a) 所示;四个椭球核壳蓝藻模型在散射角度 $\theta = 120^\circ$ 附近取得散射强度最小值,如图 3(b) 所示;柱型丝状蓝藻模型在散射角度 $\theta = 110^\circ$ 附近取得散射强度最小值,如图 3(c) 所示;环型丝状核壳蓝藻模型在散射角度 $\theta = 90^\circ$ 附近取得散射强度最小值,如图 3(d) 所示;S 型丝状核壳蓝藻模型在散射角度 $\theta = 140^\circ$ 附近取得散射强度最小值,如图 3(e) 所示。入射光沿着 +X (0°) 轴传播,大尺寸团聚粒子大多集中在前向散射区,所以大尺寸团聚粒子的散射强度极小值大多出现在后向散射区;又由于单个粒子会反射入射光,因此被反

射出模型的光波会干涉后续的入射光,从而形成图像的振荡,且随着模型尺寸的增加,后向散射区的振荡加剧,散射强度极值对应的散射角度不一样是每个团聚蓝藻模型的外形与体积不同造成的。

3.3 粒子尺寸对五种团聚核壳蓝藻模型散射强度的影响

取入射光波长为蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$,取粒子的等效粒子半径 $a_{\text{eff}} = \lambda$,单个核壳椭球蓝藻粒子尺寸满足 $A:B:a:b:d = 5:4:3.5:2.8:1$ 。图 4 给出了不同尺寸的双椭球蓝藻、四椭球蓝藻、柱型丝状蓝藻、环型丝状蓝藻、S 型丝状蓝藻粒子的散射强度随散射角度的变化情况。

由图 4 可知,以上五种核壳蓝藻模型在蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 下的散射强度与单个核壳蓝藻粒子的尺寸成正比,且随着单个核壳蓝藻粒子尺寸的增大,散射方向性增强,前向散射区的散射强度变大。以上五个核壳蓝藻模型的散射强度随着散射角度的增大而减小,这是由于前项散射区的大尺寸蓝藻粒子的散射强度大于后项散射区。随着散射角度的增大,以上五个核壳蓝藻模型的散射强度在散射区的振荡增多。这是因为以上五个核壳蓝藻模型的粒子内部出现了光波的干涉,来自不同方向的光因为相位不同而出现了干涉,在散射强度极小值附近

相消,在散射强度极大值附近相长,所以出现了多次振荡。此外,本文利用核壳椭球模型得到的结果与

国内外学者用涂层球法^[13,15]和其他方法得到的结果吻合较好。

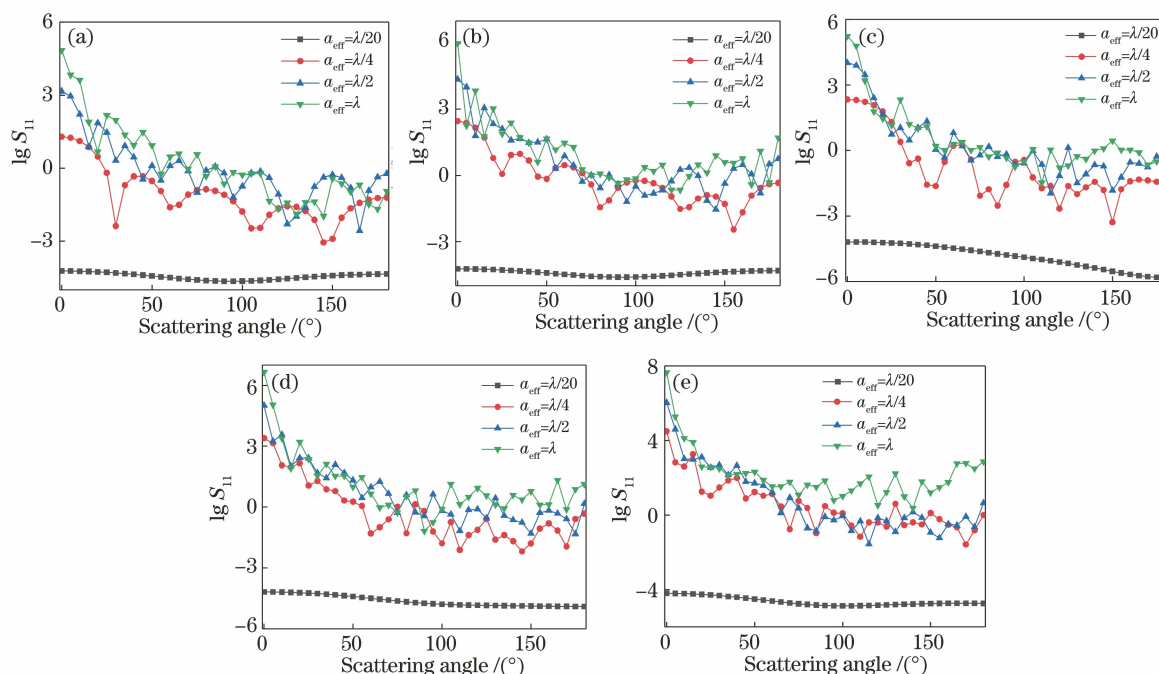


图 4 粒子尺寸对不同模型散射强度的影响。(a)双椭球模型;(b)四椭球模型;(c)柱型丝状模型;(d)环型丝状模型;(e) S 型丝状模型

Fig. 4 Effects of particle sizes on scattering intensity of each model. (a) Double ellipsoid model; (b) four ellipsoid model; (c) cylindrical filamentous model; (d) annular filamentous model; (e) S-shaped filamentous model

3.4 粒子尺寸对几种团聚核壳蓝藻模型的散射矩阵元素的影响

取入射波长为蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 取粒子的等效粒子半径 $a_{\text{eff}} = 1.5\lambda$, 单个核壳椭球蓝藻粒子尺寸满足 $A:B:a:b:d = 5:4:3.5:2.8:1$, 图 4 给出了不同尺寸的双椭球核壳蓝藻和四椭球核壳蓝藻模型的散射矩阵元素比 $-S_{12}/S_{11}$ 、 S_{33}/S_{11} 、 S_{34}/S_{11} 随散射角度的变化情况。

由图 5 可知, 在蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 下, 散射矩阵元素比 $-S_{12}/S_{11}$ 、 S_{33}/S_{11} 、 S_{34}/S_{11} 的振荡出现在 $a_{\text{eff}} = \lambda, \lambda/2$ 的双椭球蓝藻和四椭球蓝藻模型中。对于以上几个团聚核壳蓝藻模型, $-S_{12}/S_{11}$ 在 0° 和 180° 附近最小, 接近 0; 在 90° 附近最大, 接近 100%。以上几个不同尺寸的团聚核壳蓝藻模型对 S_{33}/S_{11} 的影响主要集中在后散射场, 且尺寸越大, 振荡越多。对于以上几个团聚核壳蓝藻模型, S_{34}/S_{11} 在 0° 和 180° 附近最小, 接近 0; 在中间角度处出现了大量振荡, 这是由于团聚体中的蓝藻粒子反射的光波发生了干涉。

4 结 论

利用离散偶极子近似法数值模拟了双椭球核壳

蓝藻、四椭球核壳蓝藻、柱型丝状核壳蓝藻、环型丝状核壳蓝藻、S 型丝状核壳蓝藻颗粒在蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 下的散射特性, 讨论了几种典型团聚核壳蓝藻颗粒的消光系数、吸收系数和散射系数随等效粒子半径的变化关系, 且简单比较了同一尺寸下五种形状的团聚核壳蓝藻颗粒的散射强度以及 Mueller 矩阵 S_{11} 元素随散射角度的变化情况。在蓝绿激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 下, 随着粒子尺寸的增加, 五个模型的吸收系数和散射系数递增, 这是由于蓝藻核介质的折射率实部大于外部蓝藻细胞液介质的实部, 实部对散射特性的影响较大。五个核壳蓝藻模型都是前向散射强度最大, 随着散射角度的增加, 五个模型的散射强度递减, 这是因为大尺寸椭球结构的前向散射强度大于后向散射强度。具有均匀混合层的核壳蓝藻颗粒的散射强度较无混合层的大, 这是由于均匀混合层的折射率实部大于外层介质的。模型的散射矩阵元素曲线振荡较多, 这是由于组成模型的单个粒子会反射入射光, 被反射出模型的光波会干涉后续入射光, 从而形成图像的振荡, 这种振荡现象随着模型尺寸的增加而变得更加剧烈。

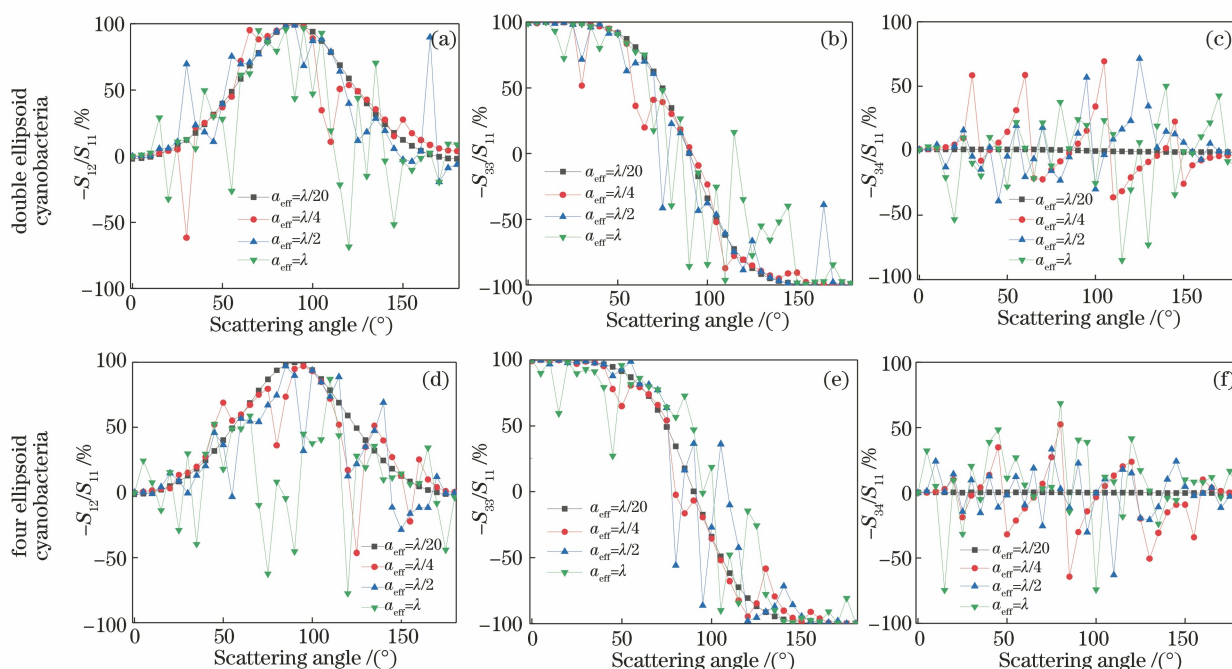


图 5 不同粒子尺寸下双椭球蓝藻模型和四椭球蓝藻模型的散射矩阵元素比值随散射角度的变化。

(a)(d) $-S_{12}/S_{11}$; (b)(e) S_{33}/S_{11} ; (c)(f) S_{34}/S_{11}

Fig. 5 Ratio of scattering matrix elements versus scattering angle for models of double ellipsoid and four ellipsoid cyanobacteria with different particle sizes. (a)(d) $-S_{12}/S_{11}$; (b)(e) S_{33}/S_{11} ; (c)(f) S_{34}/S_{11}

参 考 文 献

[1] Lin H. The study on Mie scattering and Brillouin scattering of oceanic suspended particles [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007: 3-7.
林宏. 海洋悬浮粒子的米氏散射特性及布里渊散射特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 3-7.

[2] Li T S, Gao X, Zhou X Y, et al. Characteristic analysis of underwater laser propagation based on Sahu-Shanmugam and Fournier-Forand volume scattering functions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030103.
李天松, 高翔, 周晓燕, 等. 基于 Sahu-Shanmugam 和 Fournier-Forand 体积散射函数的水下激光传输特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030103.

[3] Zhou W, Cao W X, Li C, et al. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1429-1433.
周雯, 曹文熙, 李彩, 等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1429-1433.

[4] Hao Y L, Cao W X, Ma Y, et al. Analysis of inherent optical properties in the occurrence and decline of a red tide [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101004.

郝艳玲, 曹文熙, 马毅, 等. 赤潮生消过程中的水体固有光学性质分析[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101004.

[5] Guan F, Han H W, Zhang X H. Model for visualization of laser imaging of underwater targets [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0510002.
管风, 韩宏伟, 张晓晖. 水下目标激光成像的可视化模型[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0510002.

[6] Andersen R A. Freshwater algae, their microscopic world explored [J]. Phycologia, 1996, 35(4): 372-373.

[7] Rodolfi L, Zittelli G C, Bassi N, et al. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 102(1): 100-112.

[8] Lain L R, Bernard S, Evers-King H. Biophysical modelling of phytoplankton communities from first principles using two-layered spheres: equivalent algal populations (EAP) model [J]. Optics Express, 2014, 22(14): 16745-16758.

[9] Brock T D. Biology of microorganisms [M]. London: Prentice Hall International, 1984: 12-25.

[10] Turner M. Microalgae: biotechnology and microbiology [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1994, 183(2): 300-301.

- [11] Schirrmeister B E, de Vos J M, Antonelli A, et al. Evolution of multicellularity coincided with increased diversification of cyanobacteria and the great oxidation event[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2013, 110(5): 1791-1796.
- [12] Kaneko T, Sato S, Kotani H, et al. Sequence analysis of the genome of the unicellular cyanobacterium *synechocystis* sp. strain PCC6803. II. Sequence determination of the entire genome and assignment of potential protein-coding regions [J]. *DNA Research*, 1996, 3(3): 109-136.
- [13] Lee E, Pilon L. Absorption and scattering by long and randomly oriented linear chains of spheres [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(9): 1892-1900.
- [14] Yu X P, Hu Y A, Liu L, et al. Anomalous diffraction approximation for the scattering properties of stratified homogeneous particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0129002.
俞雪平, 胡云安, 刘亮, 等. 分层均匀粒子散射特性的异常衍射近似方法 [J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0129002.
- [15] Heng R L, Sy K C, Pilon L. Absorption and scattering by bispheres, quadspheres, and circular rings of spheres and their equivalent coated spheres [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(1): 46-60.
- [16] Wang Y, Dai J C, Liao R, et al. Characterization of physiological states of the suspended marine microalgae using polarized light scattering [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(5): 1307-1312.
- [17] Sang V Q, Feng P, Mi D L, et al. Research on properties of light scattering for non-spherical suspended particles in water based on T matrix model [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(10): 2691-2696.
Vo Quang Sang, 冯鹏, 米德伶, 等. 利用 T 矩阵模型计算水体中非球形悬浮颗粒物光散射特性 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(10): 2691-2696.
- [18] Draine B T, Flatau P J. Discrete-dipole approximation for periodic targets: theory and tests [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(11): 2693-2703.
- [19] Purcell E M, Pennypacker C R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1973, 186: 705-714.
- [20] Chen P, Zhao J G, Song Y S, et al. Influence of microscopic characteristics of aerosol particles on backscattering echo [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0405001.
陈鹏, 赵继广, 宋一铄, 等. 气溶胶粒子微观特性对后向散射回波的影响 [J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0405001.
- [21] Rao R Z. *Modern atmospheric optics* [M]. Beijing: Science Press, 2012: 30-34.
饶瑞中. *现代大气光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 30-34.
- [22] Mishchenko M L, Travis L D, Lacis A A. Book review: scattering, absorption, and emission of light by small particles [J]. *Space Science Reviews*, 2002, 15(6): 442-458.
- [23] Wang X R. A calculation method of refractive index of uniformly mixed optical dielectric film [J]. *Laser Technology*, 1986, 10(4): 19-22.
王学仁. 均匀混合光学介质膜折射率的一种计算方法 [J]. *兵器激光*, 1986, 10(4): 19-22.