

Mie-T矩阵耦合的沙尘多次散射效应表征与Monte Carlo验证

汤牧云 朝克夫 华文成 崔存森

Characterization of multiple scattering effects in dust particles via Mie-T-Matrix coupling and Monte Carlo verification

TANG Mu-yun, CHAO Ke-fu, HUA Wen-cheng, CUI Cun-sen

引用本文:

汤牧云, 朝克夫, 华文成, 崔存森. Mie-T矩阵耦合的沙尘多次散射效应表征与Monte Carlo验证[J]. 中国光学, 2026, 19(1): 85-95. doi: 10.37188/CO.2025-0126

TANG Mu-yun, CHAO Ke-fu, HUA Wen-cheng, CUI Cun-sen. Characterization of multiple scattering effects in dust particles via Mie-T-Matrix coupling and Monte Carlo verification[J]. Chinese Optics, 2026, 19(1): 85-95. doi: 10.37188/CO.2025-0126

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0126>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

偏振光在椭球细粒子中多次散射传输特性

Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 348 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0144>

基于视觉显著性加权与梯度奇异值最大的红外与可见光图像融合

Fusion of infrared and visible light images based on visual saliency weighting and maximum gradient singular value

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 675 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0124>

运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0028>

舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究

Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1333 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0043>

紫外偏振敏感的CsPbBr₃纳米薄膜的可见光发射

Visible light emission of ultraviolet polarization sensitive CsPbBr₃ nano-films

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 202 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0152>

大气气溶胶消光后向散射比反演方法研究

Retrieval methods for extinction-to-backscatter ratio of atmospheric aerosols

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1305 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0135>

文章编号 2097-1842(2026)01-0085-11

Mie-T 矩阵耦合的沙尘多次散射效应 表征与 Monte Carlo 验证

汤牧云^{1,2}, 朝克夫^{1,2*}, 华文成^{1,2}, 崔存森^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学 人工智能学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;
2. 内蒙古自治区功能材料物理与化学重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要:为精确量化沙尘天气对城市光电系统可见光传输的衰减影响,本研究以呼和浩特地区为例,构建了融合非球形粒子修正的光传输预测模型。基于 Mie 散射理论,结合本地沙尘样品的扫描电镜与能谱分析数据,计算三基色红绿蓝波段的沙尘粒子消光特性;进而采用 T 矩阵法对非球形粒子的散射参数进行修正,并利用 Monte Carlo 方法模拟光子的多次散射过程,系统比较单次与多次散射模型下的衰减率差异。结果表明,单次散射模型会系统性高估衰减率,蓝光波段最大误差达 18.3%;经多次散射修正后,衰减率平均降低 12.4%。在本例中,能见度为 400 m,蓝光衰减率约为 95 dB/km,显著高于红光的衰减率(约 70 dB/km)。本研究构建的混合模型显著提升了沙尘环境下可见光衰减的预测精度,明确多次散射效应的关键影响,为城市光电系统在沙尘天气下的可见光传输提供了可靠的理论依据与数据支持。

关键词:沙尘天气;消光系数;Mie 散射理论;T 矩阵法;Monte Carlo 模拟;可见光

中图分类号:TP394.1;TH691.9 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2025-0126 CSTR:32171.14.CO.2025-0126

Characterization of multiple scattering effects in dust particles via Mie-T-Matrix coupling and Monte Carlo verification

TANG Mu-yun^{1,2}, CHAO Ke-fu^{1,2*}, HUA Wen-cheng^{1,2}, CUI Cun-sen^{1,2}

(1. College of Artificial Intelligence, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory for Physics and Chemistry of Functional Material, Hohhot 010022, China)

* Corresponding author, E-mail: phyerick@imnu.edu.cn

Abstract: To accurately quantify the attenuation of visible light in urban optoelectronic systems during dust weather, we establish a predictive model that integrates corrections for non-spherical particles, using the Hohhot region as a case study. Utilizing Mie scattering theory alongside scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy data from local dust samples, the extinction characteristics of dust particles in typical red green and blue wavebands were calculated. Scattering parameters for non-spherical particles were corrected via the T-matrix method. Photon multiple scattering was then simulated with the Monte Carlo method to systematically compare attenuation rates between single and multiple scattering mod-

收稿日期:2025-09-30; 修订日期:2025-10-29

基金项目:国家自然科学基金(No. 12164034), 鄂尔多斯市重点研发计划(No. YF20240032)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12164034); Key Research and Development Program of Ordos (No. YF20240032)

els. The results demonstrate that the single-scattering model systematically overestimates the attenuation rate, with a maximum error of 18.3% in the blue band. After multiple scattering correction, the attenuation rate decreased by an average of 12.4%. In this case, when the visibility is 400 meters, the attenuation rate for blue light was approximately 95 dB/km, significantly exceeding the value of 70 dB/km for red light. The hybrid model developed significantly enhances the prediction accuracy for visible light attenuation in dusty environments, elucidating the critical roles of multiple scattering effects. This work provides a reliable theoretical and data-driven foundation for optimizing urban optoelectronic systems in dust-prone conditions.

Key words: dust weather; extinction coefficient; Mie scattering theory; T-matrix method; Monte Carlo simulation; visible light propagation

1 引 言

沙尘天气造成的气溶胶污染会使可见光传播产生显著的能量衰减,这对城市光环境管理与公共安全构成了持续挑战^[1-3]。近年来,受周边地区气候环境变化影响,我国北方沙尘天气发生频率明显增加,影响强度也有所增强^[4]。根据《沙尘天气等级》(GB/T 36535—2018)国家标准,沙尘天气按照水平能见度划分为扬沙(能见度 1~10 公里)、浮尘(能见度小于 10 公里)和沙尘暴(能见度小于 1 公里)三个等级。特别是沙尘暴天气,其能见度往往降至 1 公里以下,对可见光传播产生显著影响。以北方典型沙尘影响区呼和浩特市为例,2010~2022 年期间该地区年平均沙尘日数达到 27.6 天^[5]。频繁的沙尘天气导致 LED 显示屏等设备的光信号的消光系数明显增大,对城市光环境质量产生不利影响。自 20 世纪 40 年代起,国外学者便对沙尘天气的物理特性及其对无线电传播的影响开展了理论研究和实验测量工作,建立了不同条件下的电磁波衰减模型。T.Müller 团队^[6]通过现场测量,系统分析了沙尘颗粒的吸收系数与粒径分布、复折射率虚部的关联,通过光谱吸收系数分离沙尘与 soot 吸收,获取 300~800 nm 波长范围用于光学特性分析的复折射率虚部。R.Wagner 团队^[7]通过实验室实验,重点测量了沙尘颗粒的消光系数,分析其与粒径分布、复折射率虚部的关联情况,并结合椭球体模型反演,获取 305~955 nm 波长的复折射率虚部。我国对沙尘天气光学特性的研究始于 20 世纪 80 年代后期。李学彬团队^[8]基于 Mie 散射理论,结合激

光雷达观测,量化了可见光波段沙尘气溶胶的消光系数垂直分布,发现沙尘层消光系数可达 1.08,且与地面 PM₁₀ 浓度显著相关。冯倩团队^[9]针对可见光波段非球形沙尘气溶胶,利用 T 矩阵等方法模拟其散射特性,发现粒子形状对散射相函数影响显著。李曙光团队^[10]基于 Mie 散射理论研究了可见光范围内沙尘气溶胶的散射和吸收特性及其对大气消光和能见度的影响。孙琦云团队^[11]基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 法,研究了部分可见光波长在沙尘型等气溶胶中的传输衰减特性,分析了消光效率因子随波长变化及多次散射效应。王惠琴团队^[12]基于 Mie 散射理论和 Monte Carlo 法,重点研究了沙尘天气下可见光波段激光信号在单次与多次散射中光强与能见度的关系及变化规律。徐强团队^[13]研究了灰霾和沙尘等高浓度气溶胶的散射传输问题,探讨了气溶胶粒子的尺寸分布和吸湿变化对光学散射的影响,指出复折射率、粒径和湿度的变化对散射特性有显著影响。为贴近工程应用背景,本文以 LED 显示屏常用的三基色发光单元为研究对象,选取红(623 nm)、绿(517 nm)与蓝(470 nm)三种典型可见光波长进行模拟分析。三基色光构成为可见光谱的基础颜色,通过不同强度的线性叠加可生成全部可见颜色,因而在表征显示设备的光学传输特性时具有代表性与完备性。基于此,本文以红绿蓝 RGB 三色为研究波段,既可反映可见光范围内沙尘对光传输的典型规律,也与 LED 显示设备的实际光谱特性相一致,从而提高研究结论在工程应用场景中的可用性与针对性。尽管已有研究取得了诸多进展,但在沙尘天气对可见光传输的精确预测方面仍存在诸多不足。现有研究多依赖

单次散射模型,忽略了多次散射效应对光学传输的影响。此外,传统的 Mie 散射理论多假设沙尘粒子为球形,未能充分考虑实际沙尘粒子的复杂形态。因此本研究通过引入 T 矩阵法对非球形沙尘粒子进行修正,并结合 Monte Carlo 法模拟多次散射效应,提供了一种更为精确的沙尘天气下光学衰减预测方法,能够更好地反映沙尘粒子形态和多次散射效应对光学特性的影响。

2 单个粒子消光特性

2.1 Mie 散射理论

为具体演示本模型的构建与应用,2025 年春季在呼和浩特市盛乐地区一次沙尘暴中于离地 3 m 高度使用湿法采集沙尘样品作为示例性输入数据。由 Hitachi SU8000 场发射扫描电镜拍摄分析发现,沙尘粒子虽形态不规则,但其等效直径主要分布于 0.1~10 μm ,如图 1 所示,其尺度参数多落在 Mie 散射区内,因此本文采用 Mie 散射理论分析其光学特性。

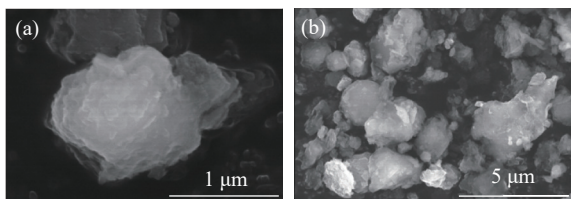


图 1 呼和浩特市沙尘颗粒的扫描电镜图像。(a) 50.0 k 倍率单个沙尘粒子;(b) 20.0 k 倍率群沙尘粒子

Fig. 1 Scanning electron microscopy images of dust particles from the Hohhot region. (a) Individual dust particle at 50.0k magnification; (b) group of dust particles at 20.0 k magnification

Mie 散射理论^[14-15]为均匀球体电磁散射提供了严格的解析解,适用于可见光波段(380~750 nm)沙尘粒子的光学特性分析。当入射光波长 λ 与粒子直径 D 满足 $0.1 < \frac{\pi D}{\lambda} < 50$ 时,该理论可准确表征粒子与光波的相互作用。通过求解电磁场边界条件方程,可获得 3 个关键效率因子,消光效率因子 Q_{ext} 、散射效率因子 Q_{sca} 和吸收效率因子 Q_{abs} 分别为:

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1)$$

$$Q_{\text{sca}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2)$$

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{sca}} \quad (3)$$

式中 $\alpha = \frac{\pi r}{\lambda}$, 其中 r 为粒子半径, λ 为入射波长。Mie 散射系数 a_n 和 b_n 是描述球形粒子电磁散射行为的核心参数,其值可通过求解电磁场边界条件方程获得。

在分析沙尘粒子的单次散射特性时,其整体的吸收和散射特性本质取决于粒子物质分子组成所固有的光学常量。对于气溶胶,复折射率 m 是其最核心的光学常量。这是一个无量纲的复数,其值随入射光波长的变化而变化。复折射率是计算沙尘气溶胶光学性质的重要参数,由实部 m_r 和虚部 m_i 两部分组成,其中实部 m_r 主导相位传播,虚部 m_i 表征光能耗散,二者均具有波长依赖性,实部 m_r 表征粒子对入射光的散射能力,其值越大意味着粒子的散射能力越强;虚部 m_i 则表征粒子对入射光的吸收能力,其绝对值的增大量化反映了粒子吸收能力的增强。效率因子的计算直接依赖于沙粒的复折射率,该参数综合反映了粒子的物质构成、尺寸以及入射光波长等关键因素。

根据 Mie 散射理论和沙尘颗粒的复折射率,选取 LED 显示屏三原色灯珠的典型发光波长。沙尘的复折射率实部在可见光波段相对稳定,而虚部则表现出显著的波长依赖性,尤其在短波波段由于沙尘中铁氧化物的增强吸收而显著增大,虚部主要与吸收特性相关。本研究对象呼和浩特市沙尘主要源自蒙古国南部戈壁、浑善达克沙地等富含铁氧化物的矿质沙源区^[16],为精确量化其光学特性,使用 Hitachi SU8000 场发射扫描电镜进行扫描电子显微镜(SEM)观测与 X 射线能谱(EDS)分析,如表 1 所示。

表 1 EDS 分析沙尘样本元素组成

Tab. 1 EDS analysis of the elemental composition of the dust sample

| 元素 | wt% | σ_1 |
|----|-------|------------|
| O | 58.91 | 0.08 |
| Si | 29.82 | 0.07 |
| Al | 6.10 | 0.03 |
| Fe | 2.56 | 0.04 |
| Ca | 1.73 | 0.02 |
| K | 0.89 | 0.02 |

表中 wt% 为重量百分比, σ_1 为标准偏差。如表 1 所示, 沙尘样本总铁含量为 2.56%, 铁含量是决定沙尘吸收特性的关键参数。这一数值显著低于源区地表物质的平均铁含量预期, 在沙尘源区的沙尘进行长距离传输中, 密度较大的富铁颗粒因沉降速度较快而更早沉降, 故能够悬浮于本市空中的主要是密度较小的硅酸盐细颗粒。可见光波段复折射率实部就元素含量而言相对稳定, 而虚部与铁含量呈正相关, 尤其在短波波段因铁氧化物的强吸收而显著增大^[6-7]。本研究基于

EDS 分析所得的主要矿物成分, 并参照文献 [6-7] 中针对类似矿质沙尘的实验测量数据, 最终确定 LED 显示屏典型 RGB 波段的复折射率分别为 $m_R = 1.50 + i0.002$ 、 $m_G = 1.52 + i0.005$ 、 $m_B = 1.53 + i0.008$ 。

2.2 MATLAB 仿真结果

利用 MATLAB 编程计算得到 Q_{ext} 、 Q_{sca} 和 Q_{abs} 三个效率因子与沙尘颗粒粒径的变化关系, 结果如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。

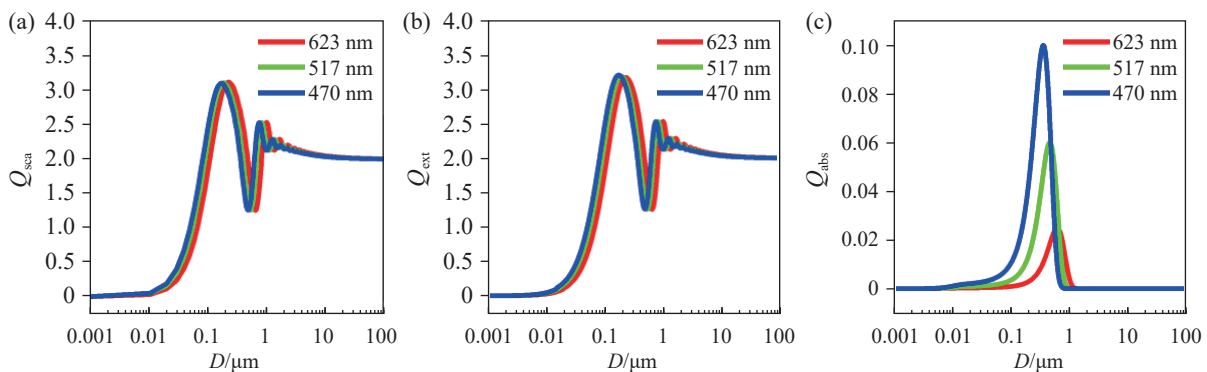


图 2 RGB 波段下的各效率因子随沙尘颗粒粒径的变化情况。(a) Q_{sca} 、(b) Q_{ext} 、(c) Q_{abs} 与沙尘颗粒粒径的变化关系图

Fig. 2 Variation of the efficiency factors with dust particle size in the RGB Bands. (a) Q_{sca} , (b) Q_{ext} , (c) Q_{abs} versus dust particle size

由图 2(a) 可以看出, 在粒径较小时, Q_{ext} 趋近于 0; 随着粒径增大, 三种波长对应的消光效率因子均先快速上升, 蓝光、绿光、红光在小粒径区间均出现明显峰值, 且峰值大小存在差异, 蓝光、绿光峰值相对更突出。当粒径进一步增大, 消光效率因子逐渐下降并向几何光学极限趋近。由图 2(b) 可以看出 Q_{sca} 变化与 Q_{ext} 相似。由图 2(c) 可以看出随粒径增大, Q_{abs} 逐渐上升, 吸收效应逐渐显著; Q_{abs} 增长速率为蓝光最大、绿光次之、红光最小, 反映了长波长光被沙尘吸收的相对滞后性。沙尘粒子是典型的散射型粒子, 无论粒径多大, 其消光主要由散射主导。大粒径时, 吸收效应虽然存在, 但相对于散射, 贡献较小。由图 2 可见, 散射效率因子比吸收效率因子大 1 到 2 个数量级, 且随着波长的减小, 散射在消光中的比重增大。

效率因子量化了沙尘粒子对光能的衰减、散射和吸收份额。为全面表征单次散射行为, 揭示散射能量的空间角分布特性, 基于 Mie 散射理论, 通过数值求解电磁场边界条件, 计算得到了不同

粒径沙尘粒子在 RGB 波段下的归一化散射相函数 $P(\theta)$ ^[17-18], 结果如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示 (其最大值已归一化为 1)。由图 3 可以看出, 所有场景中散射能量均高度集中于前向角度, 形成显著峰值, 后向散射能量占比较低, 体现出沙尘粒子强烈的前向散射主导特性。随着粒径的增大, 前向散射峰变得愈发尖锐, 方向性更强, 后向散射占比进一步降低。对于图 3(a) 所示的蓝光, 当粒径从 0.2 μm 增至 5.0 μm 时, 其前向 30°~60°区间的散射强度占比从约 45% 提升至 75%, 后向散射占比则从约 30% 降至不足 5%。这表明大粒径粒子的散射行为更符合几何光学特征, 光子极大概率会沿原方向或以极小角度偏向前方散射。同一粒径下, 不同波长对应的相函数整体形状相似, 但图 3(a) 中短波长蓝光的前向散射峰值通常略低于图 3(c) 中的长波长红光, 这与前述沙尘中氧化铁等成分对短波光的吸收增强有关, 即复折射率虚部更大, 部分短波光子在发生散射前即被吸收, 导致参与散射的能量相对减少。为进一步验证前向

散射峰值的变化是否仅由吸收增强引起, 本研究在粒径与波长条件固定的情况下, 对复折射率虚部进行了多组计算。结果表明: 随着复折射率虚部从-0.001 增至-0.05, Q_{abs} 逐步升高; 同时, 平均余弦 g 值由 0.83 降至 0.73, 非归一化相函数的前向散射峰强度下降约 40%。这一趋势说明, 在波长固定的条件下, 吸收增强会显著削弱参与散射的有效能量, 从而导致前向峰降低。另一方面, 在固定复折射率虚部下改变波长的计算结果, 波

长变化同样会影响前向散射的集中程度。短波光由于尺寸参数较大, 前向峰更尖锐, 但其能量易受吸收削弱。由此可见, 图 3 中蓝光与红光峰值的差异应是由尺寸参数与吸收特性共同作用导致的, 而非单一的复折射率因素所致。以上基于 Mie 理论计算的相函数精确描述了沙尘粒子的散射角分布, 在后文将采用的 Monte Carlo 模拟中, 为平衡计算精度与效率, 将采用参数化的 Henyey-Greenstein(HG) 相函数模型。

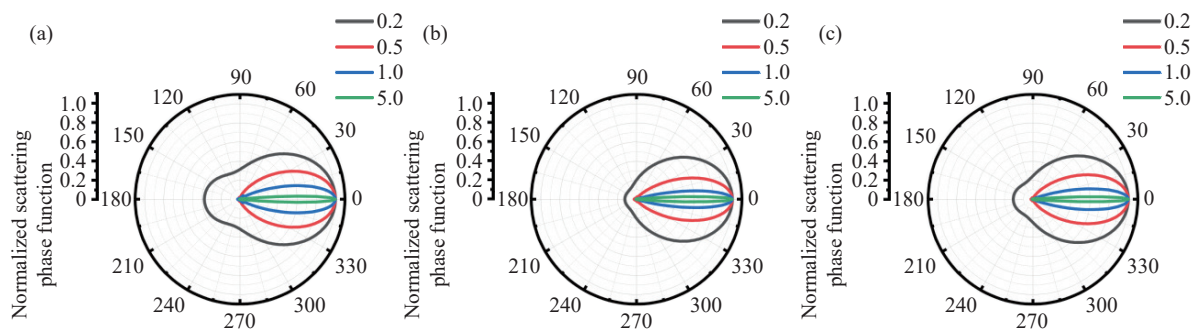


图 3 不同粒径沙尘粒子在 RGB 波段下的归一化散射相函数。(a) 470 nm 波长相位图; (b) 517 nm 波长相位图; (c) 623 nm 波长相位图

Fig. 3 Normalized scattering phase functions of dust particles with different sizes in the RGB bands. Scattering phase function at (a) 470 nm, (b) 517 nm and (c) 623 nm

3 沙尘天气光学参数计算模型

3.1 沙尘粒径参数

对数正态分布函数常用来表示粒子尺度分布密度函数, 其表达式为^[15]:

$$p(r) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(2r) - m_0]^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (4)$$

式中: m_0 和 σ 分别为 $\ln(2r)$ 的均值和标准偏差。本研究采用对数正态分布函数描述沙尘粒子尺度谱, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示。基于采集的沙尘样品, 使用 Hitachi SU8000 场发射扫描电镜及图像分析功能对随机选取的 1000 个沙尘颗粒进行了统计分析。由于沙尘颗粒形态不规则, 采用等效圆直径作为表征参数, 该方法将不规则颗粒的投影面积等效为等面积的圆形直径, 是后续应用 T 矩阵法计算修正因子的基础。计算得出 $m_0=0.79$ 和 $\sigma=0.88$ 。

沙尘粒子尺度分布表达式为:

$$N(r) = N_0 p(r), \quad (5)$$

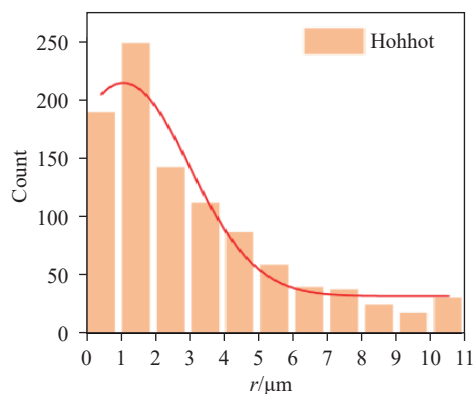


图 4 RGB 波段下的单次散射和多重散射的衰减率与可见度关系

Fig. 4 The relationship between attenuation rate and visibility for single and multiple scattering under RGB bands

式中: N_0 为粒子数密度, 其是一个难以测量的物理量, 通常根据光学能见度 V_b 来确定, 光学能见度与粒子数密度的关系如下:

$$N_0 = \frac{12.8}{4.343 \cdot V_b \cdot \int_0^{\infty} 2\pi r^2 p(r) dr}. \quad (6)$$

基于沙尘粒子群的多粒径分布特性,总消光系数 μ 描述了沙尘对光的综合衰减能力,定义为全粒径粒子消光贡献的积分叠加:

$$\mu = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r) N_0 p(r) dr \quad (7)$$

3.2 T 矩阵法

由于实际情况中沙尘形状是不规则的,而 Mie 散射严格适用于均匀球形粒子,直接采用 Mie 理论计算非球形沙尘粒子的散射特性会引入显著误差。为解决这一难题,研究者们发展了 T 矩阵法^[19-21]、离散偶极子近似^[22]和时域有限差分^[23]等数值方法以精确计算非球形粒子的光学特性,但这些方法通常计算成本极高。因此,本研究引入了一种兼顾计算效率与物理精度的混合建模策略:保留 Mie 理论粒径依赖关系的高效计算框架,但采用更精确的非球形方法,即 T 矩阵法对关键散射参数进行局部修正。引入 T 矩阵法针对散射效率修正因子 f_{sca} 和相函数修正因子 f_p 做局部修正,应用于相应粒径区间的 Mie 理论计算结果中,不对全粒径、全参数进行 T 矩阵计算,从而大幅降低计算复杂度,但同时保证了计算结果的精确度。单次散射反照率 ω 、不对称因子 g 计算公式如下:

$$\omega = \frac{\int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot f_{\text{sca}}(r) \cdot Q_{\text{sca}}(r) \cdot N_0 p(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 [f_{\text{sca}}(r) \cdot Q_{\text{sca}}(r) + Q_{\text{abs}}(r)] N_0 p(r) dr} \quad (8)$$

$$g = \frac{\int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot f_{\text{sca}}(r) \cdot Q_{\text{sca}}(r) \cdot g_T(r) \cdot N_0 p(r) dr}{\int_0^{\infty} \pi r^2 \cdot f_{\text{sca}}(r) \cdot Q_{\text{sca}}(r) \cdot N_0 p(r) dr} \quad (9)$$

式中 f_{sca} 为非球形粒子的散射效率与同体积等效球形粒子的 Mie 散射效率的比值,量化非球形形状对粒子散射能力的影响效果; f_p 为非球形粒子的相函数与同体积等效球形粒子的 Mie 相函数的比值,描述非球形形状对散射角分布的调制作用; $g_T(r)$ 为单个非球形粒子的不对称因子,定义为相函数关于散射角的余弦加权积分,用于衡量粒子散射能量分布的方向性。由 T 矩阵法计算得到的非球形粒子相函数 $P_T(\theta)$ 经归一化后,可通过下式计算:

$$g_T(\theta) = \frac{1}{2} \int_0^{\pi} P_T(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (10)$$

式中: $P_T(\theta)$ 为归一化后的散射相函数, $\cos \theta$ 为散射角方向余弦。 g_T 的取值范围为 $[-1,1]$, $g_T > 0$ 表示散射以前向为主, $g_T < 0$ 表示后向散射占优, $g_T = 0$ 则近似各向同性。通过对不同粒径、形状与折射率的 T 矩阵计算,可得到随粒径 r 变化的 $g_T(r)$,从而定量反映非球形粒子的散射角分布特征。在参数定义的基础上,为进一步确定非球形粒子的几何特征,本文结合样品的 EDS 元素分析结果进行建模。结果表明,样品主要由硅酸盐类矿物组成,含少量 Al、Fe 等元素,表明颗粒主要来源于风化断裂过程形成的碎屑矿物,其形态普遍表现为不规则或略拉长的椭球状,而非理想球体。基于此,本文采用随机取向的旋转长轴椭球体作为非球形粒子的几何近似,轴比取 1.8 作为主要计算参数,并对轴比 1.5 和 2.2 进行了敏感性分析,以评估形状参数对散射结果的影响。该设定既符合 EDS 所揭示的矿物形态特征,也能在保证 T 矩阵计算稳定性与收敛性的同时较好地反映实际沙尘粒子的非球形效应。

3.3 消光参量计算

基于上述模型,在光学能见度 V 分别为 400、600、800、1000 时,计算得出沙尘天气在 RGB 波段的三个消光参量随光学能见度的变化情况,如表 2 所示。

表 2 不同光学能见度下的消光参量

Tab. 2 Extinction parameter as a function of optical visibility

| 光学能见度 | 红光(623 nm) | | |
|-------|------------|----------|-------|
| | μ | ω | g |
| 1000 | 0.055 | 0.872 | 0.743 |
| 800 | 0.069 | 0.867 | 0.739 |
| 600 | 0.092 | 0.861 | 0.734 |
| 400 | 0.138 | 0.852 | 0.728 |
| 光学能见度 | 绿光(517nm) | | |
| | μ | ω | g |
| 1000 | 0.065 | 0.858 | 0.772 |
| 800 | 0.082 | 0.853 | 0.768 |
| 600 | 0.109 | 0.846 | 0.763 |
| 400 | 0.163 | 0.837 | 0.756 |
| 光学能见度 | 蓝光(470 nm) | | |
| | μ | ω | g |
| 1000 | 0.075 | 0.840 | 0.802 |
| 800 | 0.094 | 0.834 | 0.798 |
| 600 | 0.125 | 0.827 | 0.793 |
| 400 | 0.187 | 0.817 | 0.786 |

根据表 2 所示 μ 、 ω 、 g , 沙尘天气在 RGB 波段(红光 623 nm、绿光 517 nm、蓝光 470 nm)的消光参量随光学能见度的变化规律可知: 随着光学能见度降低, 三个波段的消光系数 μ 均明显增大, 且同一能见度下, 波长越短, μ 值越大, 表明短波长光在沙尘中更易被消光; 反照率 ω 随能见度降低呈缓慢下降趋势, 同一能见度下, 波长越长, ω 值越高, 反映长波长光由散射主导的效应更明显; 不对称因子 g 也随能见度降低略有减小, 同一能见度下, 波长越短, g 值越大, 说明短波长光的前向散射更突出。综上所述, 光学能见度降低时, RGB 波段的消光效应增强, 且消光参量呈现显著的波长依赖性: 蓝光即短波长光受沙尘中氧化铁等成分吸收增强影响, 消光系数较高, 前向散射峰更加集中; 而红光即长波长光的吸收相对较弱, 散射在总消光中所占比例更大, 角分布趋于平缓, 后向散射分量相对增加。

4 基于 Monte Carlo 的多次散射衰减率计算

4.1 多次散射模拟方法

在沙尘天气下计算沙尘天气消光率, 高浓度的颗粒物会导致光子发生多次散射, 单一的散射事件不能真实反映光子的传输路径和最终的能量衰减, 必须考虑多次散射的影响。而 Monte Carlo^[24-26] 法通过模拟光子与随机分布沙尘粒子间的相互作用过程, 能够有效表征可见光在沙尘介质中的多次散射效应, 其基本思想是将电磁辐射视为由大量光子组成的光子束, 将辐射传输问题转化为光子传输问题。该方法能够综合考虑边界条件、沙尘粒子消光特性、多次散射角、旋转角等影响, 因此适用于分析沙尘天气可见光多次散射影响下的消光率。在 Monte Carlo 方法中, 偏振光的模拟需跟踪光子偏振态, 并通过散射相函数计算偏振状态的演化, 非偏振光可通过正交偏振分量的等权叠加处理; 但 LED 光源基于半导体材料中电子-空穴复合的自发辐射, 光子跃迁方向具有随机性, 使其发射光在垂直于传播方向的平面内呈各向同性分布, 无特定偏振取向, 偏振信息不影响总能量衰减, 因此本文采用更高效的标量近似模型。该模型计算可省略偏振分解过程, 仅需

统计光子能量衰减与路径演化。

光子能量衰减通常遵循 Lambert-Beer 定律, 该定律描述了准直单色光在均匀介质中的指数衰减规律: 当光强 I_0 穿透几何厚度为 L 的介质时, 透射光强满足:

$$I = I_0 \exp(-\mu \cdot L) \quad , \quad (11)$$

其单次散射衰减率为:

$$A = 4.343\mu \quad . \quad (12)$$

然而沙尘天气条件下高粒子数密度导致消光系数显著增大, 光子平均自由程降至米级。当实际传输路径 $S > L$ 时, 光子平均散射次数大于一次; 当实际传输路径 $S > 3L$ 时, 多重散射成为主导机制, 此时单次散射衰减率法无法表征真实衰减, 需通过 Monte Carlo 法定量表征真实的散射衰减率, 通过计算机生成随机数确定每个光子在沙尘天气中的传递过程, 对光子的散射方向、行进路径进行抽样以实现跟踪, 光子权重随散射次数逐渐减小, 直至小于阈值、离开沙尘暴或到达接收界面。通过对到达接收界面的大量光子权重进行统计, 可获得稳定的透过率及衰减率估值。

光子在某位置与沙尘颗粒相撞后的后续运动方向可以通过辐射传输与粒子散射研究中广泛使用的经典经验模型——HG 散射相函数来描述^[27]。该模型虽无法精确复现 Mie 相函数的所有细节, 但其单参数形式能高效地捕捉前向散射主导的核心特征, 可提升计算效率而不影响最终衰减率的统计结果, 计算式如下:

$$P_{\text{HG}}(\cos \theta) = \frac{1 - g^2}{2(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad . \quad (13)$$

采用 HG 相函数模型描述散射方向, 并利用其解析可逆的累积分布函数特性进行散射角抽样。

当光波沿 z 方向垂直进入厚度为 H 的沙尘暴时, 光子在两次碰撞间的随机运动步长由平均自由程的累积概率分布所确定, 由于光子的自由程遵循指数分布, 其抽样公式为:

$$L = -\frac{1}{\mu} \ln(1 - \xi + \epsilon) \quad , \quad (14)$$

式中: ϵ 是保证数学严谨性的边界修正项, 用于避免数值奇点, 以确保鲁棒性, 其值趋向于无穷小正量时, $-\ln(1 - \xi + \epsilon)$ 与 $-\ln \xi$ 严格同分布, 既保持了

与经典公式的物理等价性,又消除了数值计算的边界风险,本文取 $\epsilon = 10^{-10}$ 。

在沙尘天气的 Monte Carlo 光传输模拟中,光子与沙尘粒子碰撞后,能量权重因吸收过程呈指数衰减,其演化规律为:

$$W_i = W_{i-1} \exp(-\ln \omega) \quad (15)$$

式中: ω 为单次散射反照率; W_{i-1} 为第 i 次碰撞前的权重; W_i 为碰撞后的权重,光子的初始权重值 $W_0=1$ 。

光子碰撞后新方向的确定,需通过 HG 相函数将抽样得到的局部散射方向转为全局坐标系。以光子入射方向为基准构建局部坐标系,利用该局部坐标系与全局坐标系的基向量变换关系,可得出碰撞后光子的全局方向余弦。当光子位置矢量的轴向分量 $z' < 0$ 或 $z' > H$, (其中 H 为沙尘层厚度,单位 km) 时,即光子从下边界或上边界逸出,则表示光子脱离沙尘介质,终止跟踪计算;当光子权重满足 $W_i < 10^{-6}$ 时,光子被吸收,同样终止跟踪计算。若未触发终止条件,光子将重复位置平移与方向旋转变换,直至到达接收界面。对 N 个光子的传输过程进行统计,透过率由到达接收界面的光子权重均值定义:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N W_n \quad (16)$$

式中: W_n 为第 n 个光子射出时的权重; N 取值为 10^8 ,经计算得,当光子数 $N \geq 10^7$ 时,透过率 T 的计算结果波动小于 0.5%,已充分收敛。为保证统计稳健性,模拟时取 $N = 10^8$ 。在该样本量下, Monte Carlo 模拟结果的统计误差可忽略不计。基于 Lambert-Beer 定律,光波在沙尘天气中传播单位距离的衰减率为:

$$A = -\frac{10}{H} \lg T \quad (17)$$

图 5(彩图见期刊电子版)是比较红光 623 nm、绿光 517 nm、蓝光 470 nm 单次散射和多重散射相应的衰减率与可见度的关系。如图 5 所示,在能见度为 400 m 的典型条件下,蓝光单次散射衰减率高达 95.0 dB/km,显著高于红光 (70.0 dB/km) 与绿光 (83.5 dB/km),凸显了短波光在沙尘介质中的强衰减特性。随着能见度从 200 m 提升至 1200 m,各波段衰减率均呈下降趋势,其中蓝

光衰减率的降幅最为剧烈,从 109.6 dB 降至 31.5 dB,而红光衰减率从 85.8 dB 降至 23.2 dB,变化相对平缓。通过对比两种模型发现,多次散射修正后的衰减率普遍低于单次散射计算结果,且该差异随能见度的降低而增大。这一现象在蓝光波段尤为突出,在 400 m 能见度处,单次散射模型的相对误差最大,达 18.3%;经多次散射修正后,蓝光波段衰减率平均降低 12.7%,显著高于绿光的 9.68% 与红光的 7.74%。这明确表明,在低能见度沙尘条件下,传统单次散射模型会系统性高估衰减率,尤其对蓝光短波光误差更为显著。

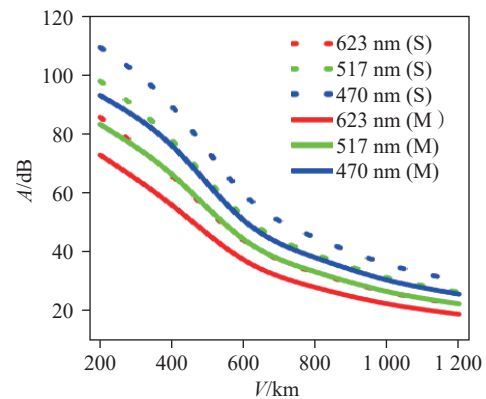


图 5 RGB 波段下的单次散射(S)和多重散射(M)的衰减率与可见度关系

Fig. 5 The relationship between the attenuation rate and visibility for single (S) and multiple (M) scattering under RGB bands

4.2 模型分析与验证

本研究的人射光源为 LED 显示屏发光单元,其辐射光场通常呈近似朗伯体分布,光强在半空间内基本均匀扩散,不具有激光光束那样显著的空间相位结构或涡旋特征。因此,采用平面波或准均匀光场作为入射条件能够有效近似 LED 光源的发射特性,不会对散射角分布及衰减规律造成显著偏差。

为系统地总结从基础参数到最终衰减率的完整技术路线,本文沙尘天气可见光传输衰减研究的流程如图 6 所示。

为验证 Monte Carlo 模型的可靠性与数值稳定性,本文对其计算结果进行了对比分析。首先,在单次散射条件下,将 Monte Carlo 模拟得到的散射角分布与 Mie 理论计算的归一化相函数 $P(\theta)$ 进行比较,结果显示两者在主要散射角范围内拟合良好。

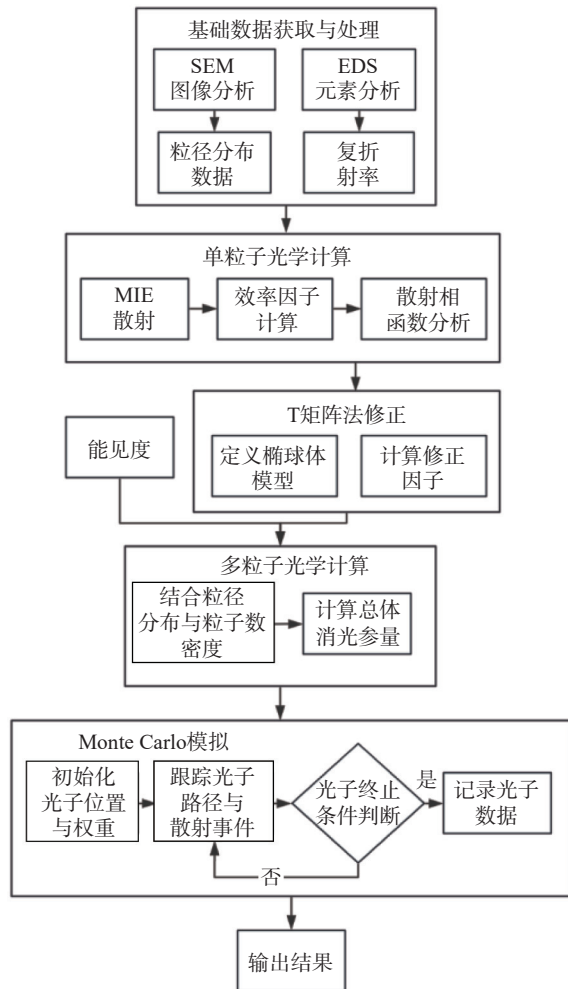


图 6 沙尘天气可见光传输衰减研究的流程图

Fig. 6 Flowchart of visible light transmission-attenuation in dust weather

其中, g_{MC} 表示 Monte Carlo 模拟统计得到的平均散射方向余弦, g_{Mie} 为 Mie 理论解析计算的不对称因子, 两者偏差低于 1%, 说明模型能够准确反映理论散射方向性。其次, 在纯吸收情形下, Monte Carlo 计算的透射率与解析解一致, 表明该模型对于吸收过程的处理是可靠的。在多次散射条件下, 计算结果满足透射、反射与吸收能量的守恒关系, 验证了算法的稳定性与能量一致性。此外, 对比 T 矩阵法得到的相函数与 HG 近似模型

参考文献:

- [1] MEZAAL M T, ARIPI N B M, OTHMAN N S, *et al.*. Empirical modelling of dust storm path attenuation for 5G mmWave[J]. *Results in Engineering*, 2024, 22: 102092.
- [2] 饶瑞中. 现代大气光学及其应用[J]. *大气与环境光学学报*, 2006, 1(1): 2-13.
RAO R ZH. Modern atmospheric optics and its applications[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, 1(1): 2-13. (in Chinese).
- [3] 汪杰君, 刘小燕, 张玉婷, 等. 偏振光在气溶胶中的传输特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080103.

发现, 当前向散射占主导时, HG 模型对透射率略有低估, 但总体误差较小。综合分析表明, 本文所建立的 Monte Carlo 模型在不同散射与吸收条件下均具有良好的精度与数值一致性, 可为后续沙尘多次散射效应的光学衰减分析提供可靠支撑。

5 结 论

沙尘天气下可见光传输衰减的精确预测是城市光电应用中的关键问题。本研究以呼和浩特地区为例, 通过构建一种耦合 T 矩阵法与 Monte Carlo 法的混合光学模型, 系统揭示了沙尘粒子对 RGB 波段的衰减机制。相较于传统模型考虑了真实非球形沙尘粒子的影响以及光子多次散射对传输能量的重要贡献, 能够更好地反映沙尘粒子形态和多次散射效应对光学特性的影响。

研究结果显示, 沙尘衰减存在明显的波长依赖性。在能见度为 400 m 的典型沙尘条件下, 蓝光衰减率达到 95 dB/km, 显著高于红光的 70 dB/km。这一差异主要源于小粒径沙尘粒子对短波光的强烈散射作用, 以及沙尘中铁氧化物成分对蓝光波段的增强吸收。随着粒径增大, 吸收效应逐渐凸显, 进一步加剧了短波光的衰减。

通过对比单次散射模型与多次散射修正模型, 发现传统方法会系统地高估衰减率, 尤其在低能见度条件下误差更为明显。在蓝光波段, 单次散射模型的最大相对误差达 18.3%, 而经多次散射修正后, 衰减率平均降低 12.4%。实际工程应用中, 研究成果可为北方沙尘影响区的 LED 显示屏亮度校正提供可靠的理论支持。应对蓝光通道施加最大补偿, 绿光次之, 红光最小, 通过这种非均衡的亮度增强策略, 可补偿因沙尘引起的波长选择性衰减, 确保显示屏的色彩真实性与可视性。未来研究可进一步考虑沙尘湿度、混合气溶胶类型等复杂因素对模型进行完善。

- WANG J J, LIU X Y, ZHANG Y T, *et al.*. Transmission characteristics of polarized light in aerosol[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080103. (in Chinese).
- [4] 高晶, 陈金琪, 石茹琳, 等. 近 23 a 中国北方强沙尘暴时空分布特征及环流分析[J]. *山地气象学报*, 2025, 49(3): 93-98.
- GAO J, CHEN J Q, SHI R L, *et al.*. Spatio-temporal distribution characteristics and circulation analysis of strong sandstorms in northern China in the nearly 23 years[J]. *Journal of Mountain Meteorology*, 2025, 49(3): 93-98. (in Chinese).
- [5] 王志楠, 王萌萌, 朱嘉毅. 呼和浩特市沙尘天气预报指标分析[J]. *内蒙古科技与经济*, 2025(1): 117-120,129.
- WANG ZH N, WANG M M, ZHU J Y. Analysis of forecast indicators for sand-dust weather in Hohhot City[J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2025(1): 117-120,129. (in Chinese)
- [6] MÜLLER T, SCHLADITZ A, MASSLING A, *et al.*. Spectral absorption coefficients and imaginary parts of refractive indices of Saharan dust during SAMUM-1[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2009, 61(1): 79-95.
- [7] WAGNER R, AJTAI T, KANDLER K, *et al.*. Complex refractive indices of Saharan dust samples at visible and near UV wavelengths: a laboratory study[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(5): 2491-2512.
- [8] 李学彬, 徐青山, 魏合理, 等. 1 次沙尘暴天气的消光特性研究[J]. *激光技术*, 2008, 32(6): 566-567,575.
- LI X B, XU Q SH, WEI H L, *et al.*. Extinction character of one sand and dust blowing[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 566-567,575. (in Chinese).
- [9] 冯倩, 邹斌, 赵威. 可见光波段非球形沙尘气溶胶散射和辐射特性的理论模拟[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(1): 1-10.
- FENG Q, ZOU B, ZHAO W. Theoretical simulation of scattering and radiative properties of nonspherical dust aerosols at visible wavelength[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(1): 1-10. (in Chinese).
- [10] 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田, 等. 沙尘暴对大气能见度影响的数值模拟与分析[J]. *应用激光*, 2003, 23(2): 87-90.
- LI SH G, LIU X D, HOU L T, *et al.*. Theoretical calculation about influence of sand storm on atmospheric visibility[J]. *Applied Laser*, 2003, 23(2): 87-90. (in Chinese).
- [11] 孙琦云, 徐军, 高昞, 等. 可见光在不同类型气溶胶中的传输特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110103.
- SUN Q Y, XU J, GAO Y, *et al.*. Transmission characteristics of visible light in different types of aerosols[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110103. (in Chinese).
- [12] 王惠琴, 王彦刚, 曹明华, 等. 沙尘天气下大气能见度对激光光强的影响[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0229001.
- WANG H Q, WANG Y G, CAO M H, *et al.*. Impact of atmospheric visibility on laser intensity in sand and dust weather[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0229001. (in Chinese).
- [13] 徐强, 王东琴, 吴振森. 大气灰霾高浓度气溶胶光学散射传输特性研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(6): 437-444.
- XU Q, WANG D Q, WU ZH S. Research progress of optical scattering transmission properties of haze and other high concentration of atmospheric aerosol[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(6): 437-444. (in Chinese).
- [14] MA O J, TIAN Y L, REN Y ZH, *et al.*. Long-term (2017-2020) aerosol optical depth observations in Hohhot city in Mongolian plateau and the impacts from different types of aerosol[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 737.
- [15] AHMED A S. Role of particle-size distributions on millimetre-wave propagation in sand/dust storms[J]. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, 1987, 134(1): 55-59.
- [16] 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 CH, ZHANG S, SHEN CH B, *et al.*. Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 348-357. (in Chinese).
- [17] 宗思光, 张鑫, 杨劲鹏, 等. 舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(6): 1333-1342.
- ZONG S G, ZHANG X, YANG S P, *et al.*. Laser backscattering characteristics of ship wake bubble targets[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2023, 16(6): 1333-1342. (in Chinese).
- [18] 陈洁, 童奕澄, 肖达, 等. 大气气溶胶消光后向散射比反演方法研究[J]. *中国光学 (中英文)*, 2021, 14(6): 1305-1316.
- CHEN J, TONG Y C, XIAO D, *et al.*. Retrieval method of extinction-to-backscatter ratio for atmospheric aerosols[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2021, 14(6): 1305-1316. (in Chinese).

- [19] BI L, YANG P, KATTAWAR G W, *et al.*. Efficient implementation of the invariant imbedding T-matrix method and the separation of variables method applied to large nonspherical inhomogeneous particles[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 116: 169-183.
- [20] PAN H L, HUANG J, KUMAR K R, *et al.*. The CALIPSO retrieved spatiotemporal and vertical distributions of AOD and extinction coefficient for different aerosol types during 2007-2019: a recent perspective over global and regional scales[J]. *Atmospheric Environment*, 2022, 274: 118986.
- [21] BI L, YANG P. Accurate simulation of the optical properties of atmospheric ice crystals with the invariant imbedding T-matrix method[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 138: 17-35.
- [22] LODGE M G, WAKEFORD H R, LEINHARDT Z M. Aerosols are not spherical cows: using discrete dipole approximation to model the properties of fractal particles[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 527(4): 11113-11137.
- [23] 何欣波, 魏兵. 基于悬挂变量的显式无条件稳定时域有限差分亚网格算法[J]. *物理学报*, 2024, 73(8): 080202.
HE X B, WEI B. Explicit and unconditionally stable finite-difference time-domain subgridding algorithm based on hanging variables[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(8): 080202. (in Chinese).
- [24] 郭旭, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 基于蒙特卡罗法的星载太阳辐照度光谱仪对日指向误差分析[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(3): 474-483.
GUO X, HU C H, YAN C X, *et al.*. Analysis of sun-pointing error for spaceborne solar irradiance spectrometer based on Monte Carlo method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(3): 474-483. (in Chinese).
- [25] 张合勇, 王挺峰, 邵俊峰, 等. 基于 Mie 散射的 CO₂ 激光大气传输特性测量[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(4): 353-362.
ZHANG H Y, WANG T F, SHAO J F, *et al.*. Measurement of CO₂ laser atmospheric transmission property based on Mie scattering[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 353-362. (in Chinese).
- [26] 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(02): 348-357.
WANG P C, ZHANG S, SHEN C B, *et al.*. Multiple scattering transmission characteristics of polarized light in ellipsoidal fine particles[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2023, 16(02): 348-357. (in Chinese).
- [27] 陈鹏, 赵继广, 杜小平, 等. 基于粒子群优化的近似散射相函数拟合方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(12): 120300.
CHEN P, ZHAO J G, DU X P, *et al.*. Approximate scattering phase function fitting method based on particle swarm optimization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(12): 120300. (in Chinese).

作者简介:



朝克夫(1979—), 男(蒙古族), 内蒙古锡林郭勒人, 博士, 2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事稀土掺杂微纳米发光材料, LED显示和照明研究。
E-mail: phyerick@imnu.edu.cn