

非均匀带电沙粒的电磁散射特性研究

李兴财^{1,2} 胡田立¹ 刘彦军^{3,1}

¹宁夏大学物理电气信息学院,宁夏沙漠信息智能感知重点实验室,宁夏 银川 750021

²兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000

³金鹰重型工程机械有限公司,湖北 襄樊 441001

摘要 基于瑞利近似推导了平面波入射下非均匀带电球形粒子的散射场及其散射截面,并通过数值仿真讨论了电荷非均匀分布对沙粒微分散射截面、散射效率的影响。数值结果表明:当沙粒表面电荷非均匀分布时,其微分散射截面呈明显空间分布,而电荷均匀分布时近似为各向同性散射;另外给定面电荷密度且电荷非均匀分布时带电沙粒散射效率远小于电荷均匀分布时的对应值,但在某些电荷分布角时恰好相反,随着沙粒带电量的增加其散射效率显著增加。由此说明在利用微波进行沙尘暴遥感或监测中需要同时考虑沙粒表面电荷分布规律及其携带电荷量的影响。

关键词 物理光学;电磁波散射;瑞利近似;沙粒带电;非均匀分布

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1229001

Electromagnetic Scattering by Non-uniformly Charged Sand

Li Xingcai^{1,2} Hu Tianli¹ Liu Yanjun^{3,1}

¹Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for the Desert Information, School of Physics & Electrical Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

²Key Laboratory of Mechanics on Western Disaster and Environment, Department of Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China

³Gemac Engineering Machinery Co., Ltd, Xiangfan, Hubei 441001, China

Abstract A new Rayleigh approximation for the scattering of electromagnetic wave by spherical sand with non-uniformly distributing charge is proposed, and some numerical simulation results on the differential scattering cross section (DSCS) and the scattering efficiency are discussed. The results show that, the DSCS presents an obviously spatial distribution while the charge is non-uniformly distributing on particles, but it shows an isotropic scattering property while the charge uniformly distributes on the sand. In addition, for a given charge density, the scattering efficiency for the former is much smaller than the one when the charge uniformly distributes on sand, but in some charged angle the law becomes contrary to the former law. These results illustrate that it is needed to consider the effect of the surface charge and its distribution form while using the microwave radar to monitor the dust storms.

Key words physical optics; electromagnetic scattering; Rayleigh approximation; charged sand; non-uniformly distributing charge

OCIS codes 290.1310; 290.5825; 290.5850; 290.5870

1 引 言

沙尘天气中沙粒颗粒会对电磁波的传输过程产生严重影响^[1-2]。为此,较为准确地预测不同条件下沙尘

收稿日期: 2015-05-25; 收到修改稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(11302111、41305035、11562017、41305027), 科技部国际合作项目(2011DFA11780), 上海交通大学先进光通信系统与网络国家重点实验室开放课题(2013GZKF031306), 宁夏自然科学基金联合基金项目(NZ12117)

作者简介: 李兴财(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要从事风沙电现象及其与电磁波相互作用机理、随机介质中的辐射传输等方面的研究。E-mail: nxulixc2011@126.com

暴对电磁波传输过程的影响显得尤为重要,尤其是在工作于沙尘环境下的无线通信系统的设计,沙尘暴的遥感监测等方面。许多学者基于瑞利近似和米氏理论讨论了不同强度沙尘暴对电磁波传输过程的影响,其中包括沙尘颗粒对电磁波的散射、吸收、去极化等效应^[13-19]。研究表明:在一定条件下基于瑞利近似和米氏理论均可以获得与实验测量较为符合的结果,但是有些条件下理论预测值与实验测量值却可能产生近30倍的差别^[6,11]。早在上世纪初就有学者注意到沙粒运动过程中是带电的^[12],且在沙尘天气产生强度高达数百千伏每米的静电场^[13],而其带电量最大约 $-890 \mu\text{C}/\text{kg}$ (沙粒面电荷密度极难测量,常用其电荷质量比值——荷质比来表征其带电量),主要受风速、沙粒粒径和湿度的影响^[14]。Zhou等^[15]认为这是由于沙粒表面携带大量静电荷引起的。在假定粒子表面电荷在局部区域均匀分布的前提下,他们基于瑞利近似分析了带电圆球形沙粒对电磁波的散射和吸收作用,结果表明沙粒表面带电会显著增强其对电磁波的散射作用,并可解释已有文献报道的沙尘暴中电磁波衰减程度的理论预测值与实验测量结果不符的矛盾。Xie等^[16]基于米氏理论讨论了较大带电沙粒的电磁散射问题, Li等^[17-20]讨论了沙粒内部杂质及介电常数沿半径方向梯度变化或呈各向异性分布时对其电磁散射特性的影响,另外,他们还讨论了环境电场对沙粒电磁散射性质的影响^[21-22]。

需要特别指出的是,现有基于颗粒表面电荷均匀分布假定的计算表明:带电沙粒的电磁消光效率远大于沙粒不带电情形对应值。这一结果意味着目前基于微波遥感技术反演沙尘暴浓度的相关研究远远高估了沙尘暴的浓度(在不考虑颗粒间多次散射的条件下,假定单位体积沙尘暴对电磁波的衰减率为 A ,而单个沙粒对电磁波的衰减率为 A_p , N 为沙尘暴中沙粒浓度,则 $A=N \times A_p$ 。对于同一个 A ,由于单个沙粒对电磁波的衰减率 A_p 远大于人们预测值,因此将导致反演得到的沙尘浓度值偏大)。然而,这一问题并未被科研人员所认识。究其原因可能与沙尘颗粒表面电荷的真实分布规律有关。

目前关于运动沙粒起电机制的猜想多达7种^[23-24],但大多数学者认为:沙粒表面带电是由于颗粒之间的不对称碰撞引起表面间的温度梯度,导致颗粒表面微观带电离子(如由水离解产生的氢离子和氢氧根离子、颗粒表面其它杂质电离产生的离子、颗粒物质自身电子等)的迁移率发生不同程度的变化,进而发生平面间的非平衡迁移,从而使得颗粒带电^[25-28]。粒子碰撞时,在接触区域内由于粒子压缩量不同,表面温度的变化也不同。这意味着接触面中心温度变化量远大于外围,接触面中心区域微观离子的迁移速率变化量远大于外围离子迁移速率的变化,从而导致颗粒分离后其表面电荷非均匀分布,且可能呈马赛克式非均匀分布^[29]。表面电荷非均匀分布时如何影响沙粒的电磁散射性质?对此并无相关文献讨论。鉴于这一问题在沙尘暴中电磁波衰减预测、沙尘等气溶胶颗粒浓度、粒径、形状等参量的遥感反演研究^[30-32]中的重要意义,本文将基于瑞利近似讨论表面电荷非均匀分布时带电沙粒电磁散射特性的变化,并与电荷均匀分布时的对应值进行比较,以此阐明颗粒表面电荷分布状态对沙粒光学性质的影响。

2 非均匀带电颗粒电磁散射的瑞利近似

与相关文献[15]类似,仍假定沙尘粒子为球体,并假设其半径为 R ,介电常数为 ϵ_s 。沙粒表面电荷以球冠形式分布,故设沙粒所带电荷分布在球心角 $2\theta_0$ 所对应的球面区域,其面电荷分布形式为 $\sigma_0 \cos \theta H(\theta - \theta_0)$,式中 $\theta_0 \in [0, \pi]$, $H(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ 。假定波沿 z 轴传播,而其电极化分量沿 x 轴。入射场为 $\mathbf{E}_i = E_0 \exp(ikr \cos \theta) \mathbf{x}$ 。

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 是波数。由于沙尘暴中沙粒粒径远小于微波波长,可通过静电学理论求解其内场。为了计算的方便,进行简单的坐标变换,使得 $\mathbf{E}_i = E_0 \mathbf{x}$ 为 $\mathbf{E}_i = E_0 \mathbf{z} = E_0(\cos \theta \mathbf{r} - \sin \theta \boldsymbol{\theta})$ 。粒子内外电势满足拉普拉斯方程:

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi_1 = 0, & r < R \\ \nabla^2 \phi_2 = 0, & r < R' \end{cases} \quad (1)$$

边界条件:

$$\begin{cases} r = R: \phi_1 = \phi_2, \epsilon_s \frac{\partial \phi_1}{\partial r} - \epsilon_0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \sigma_0 \cos \theta H(\theta - \theta_0) \\ r \rightarrow \infty: \mathbf{E} = E_0 \mathbf{z} = E_0(\cos \theta \mathbf{r} - \sin \theta \boldsymbol{\theta}) \\ r \rightarrow 0: \phi_1 \text{ is finite} \end{cases} \quad (2)$$

考虑到边界条件 $r \rightarrow 0: \phi_1$ is finite 的影响, (1)式的通解可表示为:

$$\begin{cases} \phi_1 = a_0 + a_1 r \cos \theta \\ \phi_2 = c_0 + \frac{d_0}{r} + (c_1 r + \frac{d_1}{r^2}) \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

基于边界条件可得粒子内外电势,

$$\begin{cases} \phi_1 = -\frac{3E_0 \varepsilon_0 + \sigma_0 H_{\theta-\theta_0}}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_s} r \cos \theta \\ \phi_2 = -E_0 r \cos \theta + \frac{E_0(\varepsilon_s - \varepsilon_0) - \sigma_0 H_{\theta-\theta_0} \cos \theta}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_s} \frac{\cos \theta}{r^2} \end{cases} \quad (4)$$

进而可得颗粒内部电场为:

$$\mathbf{E}_{\text{int}} = \left[\frac{3E_0 \varepsilon_0}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_0 H(\theta - \theta_0)}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} \right] \mathbf{z} + \frac{\sigma_0 \delta(\theta - \theta_0)}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} \cos \theta \boldsymbol{\theta}, \quad (5)$$

将坐标轴恢复, 最终可得粒子内场为:

$$\mathbf{E}_{\text{int}} = \left[\frac{3E_0 \varepsilon_0}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_0 H(\theta - \theta_0)}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} \right] \mathbf{x} + \frac{\sigma_0 \delta(\theta - \theta_0)}{\varepsilon_s + 2\varepsilon_0} \cos \theta \boldsymbol{\theta}, \quad (6)$$

总的电偶极矩为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \int_0^R \int_0^\pi \int_0^{2\pi} (\varepsilon_s - \varepsilon_0) \mathbf{E}_{\text{int}} r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi = \\ &= \pi R^3 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \left\{ \left[4E_0 \varepsilon_0 + \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - \cos \theta_0) \right] \mathbf{x} + \frac{1}{3} \sigma_0 \sin 2\theta_0 \boldsymbol{\theta} \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

考虑到散射场与颗粒内部电偶极矩存在关系: $\mathbf{E}_{\text{sca}} = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \frac{ik^3}{4\pi\varepsilon_0} (-P_\theta \boldsymbol{\theta} - P_\varphi \boldsymbol{\varphi})$,

则粒子散射场为:

$$\mathbf{E}_{\text{sca}} = \frac{k^2 \exp(ikr)}{4\pi\varepsilon_0 r} \pi R^3 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \left\{ \left[4E_0 \varepsilon_0 + \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - \cos \theta_0) \right] \cos \theta \cos \varphi \boldsymbol{\theta} + \frac{1}{3} \sigma_0 \sin 2\theta_0 \boldsymbol{\theta} - \left[4E_0 \varepsilon_0 + \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - \cos \theta_0) \right] \sin \varphi \boldsymbol{\varphi} \right\}, \quad (8)$$

令 $A = 4E_0 \varepsilon_0 + \frac{2}{3} \sigma_0 (1 - \cos \theta_0)$, $B = \frac{1}{3} \sigma_0 \sin 2\theta_0$ 则

$$\mathbf{E}_{\text{sca}} = \frac{k^2 \exp(ikr)}{4\pi\varepsilon_0 r} \pi R^3 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \left[(A \cos \theta \cos \varphi + B) \boldsymbol{\theta} - A \sin \varphi \boldsymbol{\varphi} \right], \quad (9)$$

微分散射截面可表示为:

$$\sigma_d = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |\mathbf{E}_{\text{sca}}|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} = \frac{k^4 R^6}{16\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 \left(A^2 \cos^2 \theta \cos^2 \varphi + B^2 + 2AB \cos \theta \cos \varphi + A^2 \sin^2 \varphi \right), \quad (10)$$

则由此可得粒子散射截面为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{sca}} &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sigma_d \sin \theta d\theta d\varphi = \\ &= \frac{\pi k^4 R^6}{12\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 \left\{ 8 \left[2E_0 \varepsilon_0 + \frac{1}{3} \sigma_0 (1 - \cos \theta_0) \right]^2 + \frac{1}{3} \sigma_0^2 \sin^2 2\theta_0 \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

当颗粒不带电时,

$$\sigma_{\text{sca}} = \frac{\pi k^4 R^6}{12\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 32E_0^2 \varepsilon_0^2 = \frac{8\pi}{3} k^4 R^6 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2, \quad (12)$$

与不带电小颗粒的散射截面完全一致, 说明推导的正确性。

粒子散射效率 Q_{sca} 为:

$$Q_{\text{sca}} = \frac{\sigma_{\text{sca}}}{\pi R^2}. \quad (13)$$

3 数值仿真与结果分析

为了比较电荷均匀分布与非均匀分布时带电沙粒对入射电磁波的衰减作用,必须保证沙粒携带电荷量相同。假定电荷均匀分布时面电荷密度为 $\sigma_0 = -2 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 则颗粒带电量 $Q = \sigma_0 \times A = \sigma_0 \times 2\pi R^2(1 - \cos \theta_0)$ 。若电荷非均匀分布,如呈 $\sigma \times |\cos \theta| \times H(\theta - \theta_0)$, 则对应的面电荷密度为:

$$\sigma = \begin{cases} 0, & \theta_0 < 0^\circ \\ 2Q/[\pi R^2(1 - \cos 2\theta_0)], & \theta_0 < 90^\circ \\ 2Q/[\pi R^2(3 + \cos 2\theta_0)], & \theta_0 \geq 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

在数值仿真中选择的参数如下:入射波频率为 9.4 GHz, $E_0 = 50 \text{ V/m}$, 沙粒半径 $R = 40 \mu\text{m}$, 颗粒表面电荷分布角为 90° , 面电荷密度 $\sigma_0 = -2 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 相对介电常数^[15] $\epsilon_r = 2.634 + 0.734i$ 。在后面的计算中,如无特殊说明相关参数保持不变。

首先讨论电荷均匀分布与非均匀分布时带电沙尘颗粒微分散射截面随电荷分布角度的变化,计算结果见图(1),其中图 1(a)是基于本文理论计算的电荷非均匀分布时带电沙粒的微分散射截面(DSCS),图 1(b)是基于文献[15]结果计算所得电荷均匀分布时带电沙粒的微分散射截面。由图可见,电荷非均匀分布与均匀分布时带电沙粒的微分散射截面沿 θ, ϕ 方向的分布规律及其量值均存在明显差异,文献结果中带电粒子的微分散射截面几乎保持为常数(其值约为 1.045×10^{-10}),即近似为各向同性散射,而模型所得结果与不带电粒子微分散射截面分布规律极其相似,体现出明显的空间变化规律,但结果比文献结果偏小。这说明表面电荷分布规律对带电沙粒电磁散射性质具有很大影响。

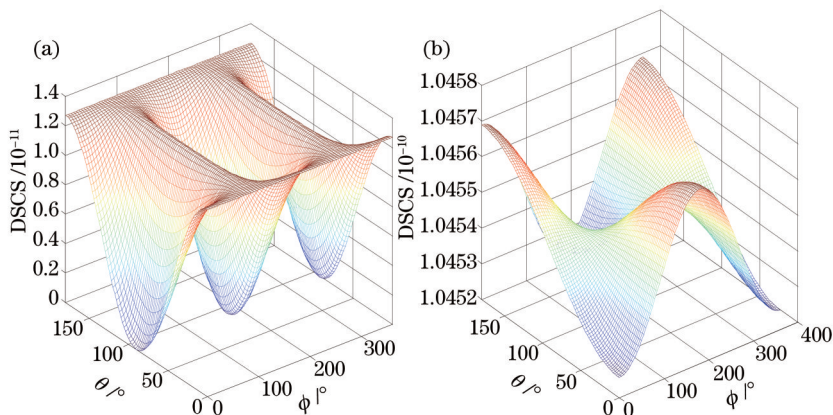


图 1 局部带电沙粒微分散射截面的分布规律。(a) 电荷非均匀分布; (b) 电荷均匀分布

Fig.1 Differential scattering cross section for the partially charged sand. (a) Charge non-uniformly distribution; (b) charge uniformly distribution

图 2 中讨论了颗粒表面电荷分布角对其电磁波散射效率的影响,并对电荷均匀分布与非均匀分布时的结果进行比较。由图可见,电荷非均匀分布时沙粒对电磁波的散射效率远小于电荷均匀分布情形对应值,且

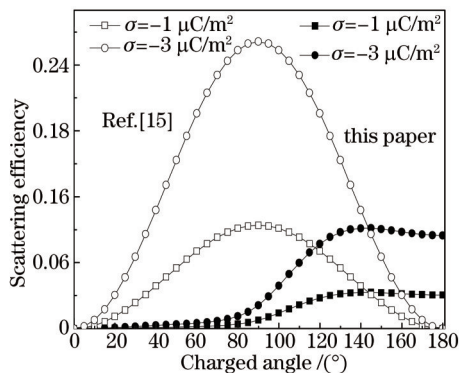


图 2 沙粒电荷分布角对电磁波散射效率的影响

Fig.2 Effect of the charge distribution angle on the scattering efficiency of sand

不再随着电荷分布角的增加呈正弦函数变化。但是当电荷分布角超过 145°时结果远大于文献结果,这是电荷非均匀分布时带电粒子散射特性与电荷均匀分布时的最大区别。另外,随着面电荷密度的增加,两种模型所得沙粒散射效率均显著增加。

由于沙粒面电荷密度极难准确测量,风沙静电现象研究中常用沙粒的荷质比来代表它的带电量。图 3(a)中讨论了沙粒荷质比及电荷分布角对非均匀局部带电沙粒电磁散射效率的影响。由图可见,随着沙粒荷质比的增加,沙粒电磁散射效率不断增加,但是在给定沙粒荷质比时,随着沙粒电荷分布角的增加,沙粒电磁散射效率先减小后增加,分别在带电角度约 90°和 120°时达到极小值和次极大值,并再次不断减小,这与电荷均匀分布时带电沙粒的散射效率随电荷分布角变化曲线显著不同。图 3(b)中给出了电荷均匀分布时局部带电沙粒电磁散射效率随电荷分布角变化的曲线。由图可见随着电荷分布角的增加,带电沙粒的散射效率指数减小。导致这种差别的原因在于:1) 给定沙粒荷质比时随着电荷分布角增加沙粒面电荷密度不断减小,因此沙粒散射效率同时也应显著减小;2) 在给定电荷密度时,非均匀带电沙粒的散射效率呈现先增加后减小的规律,但面电荷密度对沙粒散射效率的影响远远大于电荷分布角对它的影响。由此可见,给定沙粒荷质比时沙粒面电荷密度随电荷分布角变化规律对沙粒电磁散射性质预测的重要性。为此,图 3(c)中给出了电荷均匀分布与非均匀分布(即呈 $|\cos \theta|$ 形式分布)时对应的面电荷密度比值随电荷分布角变化规律,从中可见电荷密度达到极大值时对应的电荷分布角与图 3(a)中散射效率达到此极值时电荷分布角一致。

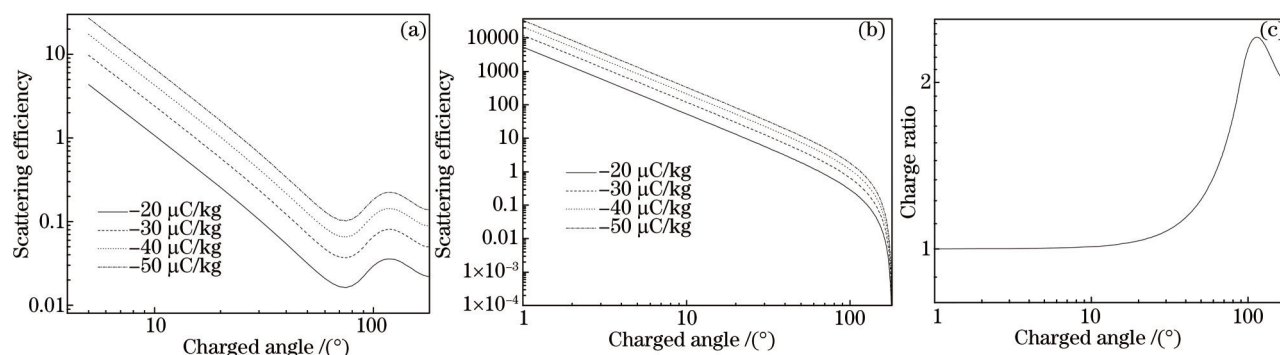


图 3 沙粒荷质比对沙粒散射效率的影响

Fig.3 Effect of the charge-mass ratio on the scattering efficiency of sand

4 结 论

基于瑞利近似讨论了表面电荷非均匀分布时带电沙粒对电磁波的散射作用,并与颗粒表面电荷均匀分布情形对应值进行了比较。结果表明:表面电荷非均匀分布与电荷均匀分布时带电沙粒对电磁波的散射特性呈现完全不同的特点,主要表现在:1) 电荷非均匀分布时带电沙粒的微分散射截面呈现明显的空间变化,而电荷均匀分布时其几乎为各向同性散射;2) 在给定面电荷密度时,在某些电荷分布角内非均匀带电沙粒散射效率远小于均匀带电情形对应值,但在另外一些情形下恰好相反;3) 在给定荷质比时随着带电角度的增加非均匀带电沙粒的散射效率呈现较为复杂的变化,而均匀带电粒子的散射效率呈幂函数规律迅速减小。结果对于正确认识风沙电现象对电磁波传播过程影响及沙尘暴的微波遥感反演等研究具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- 1 Y A Eltbaakh, M H Ruslan, M A Alghoul, *et al.*. Solar attenuation by aerosols: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 4264-4276.
- 2 R L Heinisch, F X Bronold, H Fehske. Mie scattering by a charged dielectric particle[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(24): 243903.
- 3 N K Uzunoglu, B G Evan, A R Holt. Scattering of electromagnetic radiation by precipitation particles and propagation characteristics of terrestrial and space communication systems[J]. Institution of Electrical Engineers, 1977, 124(5): 417-424.
- 4 T Wriedt. A review of elastic light scattering theories[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 1998, 15: 67-74.
- 5 M I Mishchenko, L D Travis, A A Lacis. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles[M]. Cambridge: Cambridge

- University Press, 2002.
- 6 Dong Qingsheng, Zhao Zhenwei, Cong Hongjun. The mm-wave attenuation due to sand and dust[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(2): 29–32.
董庆生, 赵振维, 丛洪军. 沙尘引起的毫米波衰减[J]. 电波科学学报, 1996, 11(2): 29–32.
- 7 Dong Qunfeng, Xu Jiadong, Li Yingle, *et al.*. Attenuation effects of microwave through charged sand particles[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1517–1520.
董群锋, 许家栋, 李应乐, 等. 微波在带电沙粒中的衰减效应[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1517–1520.
- 8 Zheng Xiaojing, Li Xingcai, Xie li. Cross depolarization effect of electromagnetic wave by partially charged spherical sands in sandstorms [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(3): 567–570.
郑晓静, 李兴财, 谢 莉. 沙尘暴中球形沙粒局部带电对电磁波的交叉去极化效应[J]. 中国沙漠, 2011, 31(3): 567–570.
- 9 Yin Wenyan, Xiao Jingming. Effects of cross polarization of millimetre wave propagation in dust storm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1990, 8(2): 226–233.
尹文言, 肖景明. 毫米波在沙尘暴中传播的交叉去极化效应[J]. 西北工业大学学报, 1990, 8(2): 226–233.
- 10 Xu Yingxia, Du Yan, Huang Jiying, *et al.*. Effect of sand and dust storms on Ka-band electromagnetic wave propagation along earth-space paths[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(3): 328–331.
徐英霞, 杜 延, 黄际英, 等. 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响[J]. 电波科学学报, 2003, 18(3): 328–331.
- 11 S O Bashir , N J Mc Ewan. Microwave propagation in dust storms: a review[J]. IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation, 1986, 133(3): 241–247.
- 12 W A D Rudge. Atmospheric electrification during South African dust storms[J]. Nature, 1913, 91(2263): 31–32.
- 13 E Williams, N Nathou, E Hicks, *et al.*. The electrification of dust-lifting gust fronts (‘haboobs’) in the Sahel[J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2–4): 292–298.
- 14 N Huang, X J Zheng. A laboratory test of the electrification phenomenon in wind-blown sand flux[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5): 417–420.
- 15 Y H Zhou, Q S He, X J Zheng. Attenuation of electromagnetic wave propagation in sandstorms incorporating charged sand particles[J]. The European Physical Journal E, 2005, 17: 181–187.
- 16 L Xie, X Li, X Zheng. Attenuation of an electromagnetic wave by charged dust particles in a sandstorm[J]. Applied Optics, 2010, 49(35): 6756–6761.
- 17 Li Xingcai , Zhang Beidou. The electromagnetic scattering of the charged inhomogeneous sand particle[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 119: 150–154.
- 18 Li Xingcai, Zhang Beidou. An equivalent solution for the electromagnetic scattering of multilayer particle[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2013, 129: 236–240.
- 19 B Zhang, X Li. Electromagnetic scattering by a partially charged multilayered sphere[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 148: 228–232.
- 20 X Li, X Min, D Liu. Rayleigh approximation for the scattering of small partially charged sand particles[J]. Journal Opt Soc Am A, 2014, 31(7): 1495–501.
- 21 Li Xingcai, Liu Dandan , Min Xing. The electric field in sandstorm can strongly affect the sand’s scattering properties[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2014, 149: 103–107.
- 22 Min Xing, Li Xingcai, Li Xinwan, *et al.*. Effects of charged sandstorm on electromagnetic wave propagation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0129001.
闵 星, 李兴财, 李新碗, 等. 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0129001.
- 23 S P Kanagy, C J Mann. Electrical properties of eolian sand and silt[J]. Earth-Science Review, 1994, 36: 181–204.
- 24 X J Zheng. Electrification of wind-blown sand: recent advances and key issues[J]. Eur Phys J E, 2013, 36: 138.
- 25 Xiaojing Zheng, Rui Zhang, Haojie Huang. Theoretical modeling of relative humidity on contact electrification of sand particles[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4399.
- 26 Lu Luyi, Gu Zhaolin, Luo Xilian, *et al.*. An electrostatic dynamic model for wind-blown sand system[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 6939–6945.
鲁录义, 顾兆林, 罗昔联, 等. 一种风沙运动的颗粒动力学静电起电模型[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6939–6945.
- 27 Z Gu, W Wei, J Su, *et al.*. The role of water content in tribo-electric charging of wind-blown sand[J]. Scientific Reports, 2013, 3: 1337.

- 28 L Xie, G Li, N Bao, *et al.*. Contact electrification by collision of homogenous particles[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(18): 184908.
- 29 H T Baytekin, A Z Patashinski, M Branicki, *et al.*. The mosaic of surface charge in contact electrification[J]. Science, 2011, 333(6040): 308-312.
- 30 Bu Yichuan, Zhao Yongkai, Chen Zhengyan, *et al.*. Research on real-time aerosol particle shape identification based on scattered light detection[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0413003.
卜一川, 赵永凯, 陈正岩, 等. 基于光散射的实时气溶胶粒子形状识别技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413003.
- 31 Chen Linghong, Jiang Yiqi, Sun Yangyang, *et al.*. Analysis of absorption and scattering properties of water host haze droplet with insoluble solid inclusion[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308001.
陈玲红, 蒋一奇, 孙洋洋, 等. 不可溶性固态内核霾滴的散射及吸收特性分析[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308001.
- 32 Liu Cong, Su Lin, Zhang Chaoyang, *et al.*. Comparative analysis of vertical distribution of aerosols by using spaceborne Lidar[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0413001.
刘 聪, 苏 林, 张朝阳, 等. 星载激光雷达对气溶胶垂直分布的对比分析[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0413001.

栏目编辑: 刘丰瑞