

带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响

闵 星^{1,2} 李兴财^{1,2} 李新碗^{1,3} 马 鑫^{1,2,4}

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上海交通大学密西根学院,上海 200240

⁴上海交通大学电子信息与电气工程学院,上海 200240

摘要 基于极化面电荷密度和瑞利散射理论,通过数值计算与仿真讨论了风沙静电场对沙粒光学性质的影响。数值结果表明:在考虑风沙静电场作用的情况下,沙粒对电磁波的散射效率随着电荷分布角的增加先增加后减小,而其对电磁波的吸收效率保持恒定,但其值远大于不考虑环境电场作用时的对应值。另外,随着沙尘浓度及其含水量的增加,沙尘暴对电磁波的衰减率增强。结果说明在沙尘暴遥感的研究中必须考虑到沙尘暴中的静电场作用。

关键词 大气光学;风沙静电场;瑞利散射;表面电荷;局部带电

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi 10.3788/AOS201535.0129001

Effects of Charged Sandstorm on Electromagnetic Wave Propagation

Min Xing^{1,2} Li Xingcai^{1,2} Li Xinwan^{1,3} Ma Xin^{1,2,4}

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

²*Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, The Ministry of Education of China, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*

³*University of Michigan-Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai 200240, China*

⁴*School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*

Abstract Based on the polarization charge density and Rayleigh scattering theory, the impact of wind and sand electrostatic field on the optical properties of sand is discussed through numerical calculation and simulation. The results show that in considering the effects of sand electrostatic field, the sand scattering efficiency to electromagnetic waves firstly increases and then decreases with the charge distribution angle increasing, and the absorption efficiency to electromagnetic waves keeps a constant, but its magnitude is much larger than that of not considering the environmental electric field. In addition, the sandstorm attenuation to electromagnetic waves increases with the increase of particle concentration and humidity. Those results illustrate that it is necessary to consider the function of sandstorm electrostatic field in the remote sensing of sandstorm.

Key words atmospheric optics; wind and sand electrostatic field; Rayleigh scattering; surface charge; partially charged

OCIS codes 290.1310; 290.5825; 290.5850; 290.5870

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-08-06

项目基金: 国家自然科学基金(11302111)、科技部国际合作项目(2011DFA11780)、宁夏自然科学基金与宁夏大学联合资助项目(NZ12117)、西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学)开放课题

作者简介: 闵 星(1990—),女,硕士研究生,主要从事先进光电子器件与新能源方面的研究。E-mail: MXingJDI@163.com

导师简介: 李兴财(1984—),男,博士,副教授,主要从事随机介质中的电磁波传播方面的研究。

E-mail: nxulixc2011@gmail.com(通信联系人)

1 引 言

沙尘暴是大气流动与地面沙床相互作用而形成的强烈风沙运动的突发事件,频繁发生的沙尘暴给人类的生产生活带来极大的威胁。因此,对沙尘暴发生、扩散、输运、沉降过程与机理的研究正成为一大研究热点,而对沙尘暴内部结构性质的监测与参数反演是其中的重点课题之一^[1]。在此过程中,地基、地基雷达及部分基于光散射原理的实验仪器得到极为广泛的应用^[2-5],并基于此建立了沙尘暴观测网络^[6]。然而,相关系统的有效运行或运用均与人们对电磁波在不同气象条件下的散射和衰减特性的准确认识密切相关^[7]。

对于沙尘暴环境下沙粒对电磁波传输过程影响的研究可以追溯至1941年,Ryde^[8]通过估计悬移沙粒的质量密度,将沙粒视为石英,计算了半径为1~25 μm的沙粒对雷达的折射率,研究发现,对于频率低于30 GHz的雷达波通过数密度较低的沙尘暴时,沙尘暴对雷达波不会产生影响。Gary^[9]基于瑞利近似的理论计算结果认为沙尘暴对微波通信信号的衰减可以忽略。然而,后续研究表明,沙尘暴对电磁波传播的影响是不能忽略的,并且基于现有理论模型所得的预测结果与试验测量值之间可能存在极大差异^[10]。如Haddad等^[11]通过实验测得能见度为10 m的沙尘暴中沙粒对频率为9.4 GHz微波的衰减为34 dB/km,这远远高出他的理论计算值1 dB/km。沙尘环境下电磁波衰减的实测值与理论值之间存在三十多倍的差别的问题一直受到众多研究者的关注,但是基于颗粒成分、湿度、粒径等因素差异的理论仿真均无法回答这一问题^[12]。

大量野外实验测量结果表明:风沙流及沙尘暴过程中存在强度高达数百千伏每米的静电场^[13]。Zhou等^[12]考虑到沙粒局部带电及沙尘颗粒粒径远小于微波波长的事实,基于瑞利近似从理论上解释了Haddad所发现的理论估计值与实验测量值之间的差异,并且验证了沙粒带电对沙粒电磁散射特性的重要影响。Xie等^[14]基于Mie理论讨论了带电粒子的电磁散射问题,发现随着入射波频率的增加颗粒表面电荷对其电磁散射性质的影响不断减弱,当入射波频率超过50 GHz时粒子带电的影响基本可以忽略。Li等^[15-18]分别讨论了介质分层结构及其各向异性对颗粒电磁消光性质的影响。然而已有文献均没有讨论风沙静电场对沙粒光学性质的影响。

鉴于此,本文基于电极化理论讨论了风沙静电场作用下局部带电球形沙粒表面电荷密度的变化,进而利用瑞利近似^[12,19]求解了局部带电沙粒对入射电磁波的散射场及其散射、消光截面,并讨论了风沙静电场作用下沙尘暴中带电沙尘颗粒的浓度、含水量等因素对不同频率电磁波的衰减作用。

2 理论建模

2.1 风沙静电场作用下沙粒表面极化电荷

已有大量研究结果表明:风沙静电场方向向上,平均静电场强度最高可达200 kV/m,瞬时值甚至可超过2500 kV/m^[13,20]。在如此强的静电场作用下,沙粒表面会产生极化电荷,其大小可由粒子内外静电场分布获得。如图1所示,与已有文献相同,将沙粒处理为均质球形粒子^[12,16-17,21]。假定沙粒半径为 R ,介电常数为 ε_1 ,相对介电常数为 ε_r ,由于相互间的碰撞使得粒子表面携带的净电荷密度为 σ_1 ,电荷分布角为 θ_0 。

在风沙静电场 E_e 作用下,考虑频率为 f 的平面电磁波沿 z 轴方向入射,极化方向沿 x 轴方向,粒子内外电势满足拉普拉斯方程 $\nabla^2\phi=0$,假定粒子内外电势分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 ,其表达式可用Legendre函数表示为

$$\phi_1 = \sum_n a_n r^n P_n(\cos\theta), \quad (1)$$

$$\phi_2 = \sum_n [c_n r^n + d_n r^{-(n+1)}] P_n(\cos\theta), \quad (2)$$

式中 a_n , c_n , d_n 为待定系数, $P_n(\cos\theta)$ 是Legendre函数, n 为阶数, (r, θ, φ) 是以沙粒球心为坐标系原点建立的球坐标系的三个基本变量。

在颗粒表面处电势满足边界条件^[12]:

$$r \rightarrow R: \quad \phi_1 = \phi_2, \varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} - \varepsilon_0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \sigma_1 F(\theta, \varphi), \quad (3)$$

$$r \rightarrow \infty: \quad \mathbf{E} = E_e \mathbf{z} = r E_e \cos\theta - \theta E_e \sin\theta, \quad (4)$$

式中 ε_0 为背景介质的介电常数, \mathbf{E} 为球形粒子附近的入射场, r 、 θ 、 φ 为球坐标系基矢,假定沙粒表面的电荷均匀分布,并且电荷分布区域对称轴与 z 轴平行,则沙粒表面电荷分布函数 $F(\theta, \varphi)$ 可用Heaviside函数

$H_{(\theta-\theta_0)}$ 表示为

$$F(\theta, \varphi) = H_{(\theta-\theta_0)} = \begin{cases} 1, & \theta \leq \theta_0 \\ 0, & \theta > \theta_0 \end{cases}$$

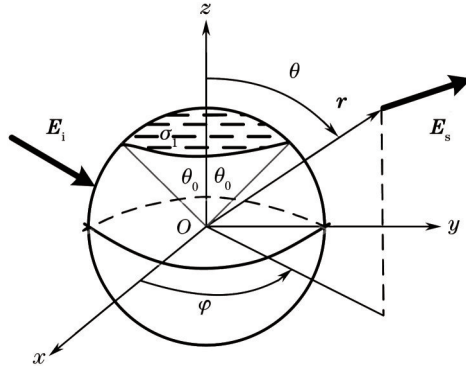


图1 带电沙粒在电磁波入射下的示意图

Fig.1 Schematic drawing of a charged sand particle under the effects of the incident electromagnetic wave

按照与文献[12]相同的方法最终可得颗粒内外电势分别为

$$\phi_1 = \frac{\sigma_1 R}{\epsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - \frac{3}{\epsilon_r + 2} E_c r \cos \theta, \quad (5)$$

$$\phi_2 = \frac{\sigma_1 R^2}{r \epsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - E_c r \cos \theta + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{E_c R^3 \cos \theta}{r^2}. \quad (6)$$

粒子内部电场为

$$E_m = -\nabla \phi_1 = \frac{3}{\epsilon_r + 2} E_c \mathbf{x} + \frac{\sigma_1 R}{r \epsilon_0} \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta}, \quad (7)$$

式中 $\delta_{(\theta-\theta_0)} = dH_{(\theta-\theta_0)}/d\theta$, $\mathbf{x} = \sin \theta \cos \varphi \mathbf{r} + \cos \theta \cos \varphi \boldsymbol{\theta} - \sin \varphi \boldsymbol{\phi}$. 球内极化强度为

$$\mathbf{P} = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} 3E_c \epsilon_0 \mathbf{x} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{r \epsilon_0} \sigma_1 R \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta}. \quad (8)$$

据此可得沙粒表面极化电荷面密度为

$$\sigma_p = \mathbf{r} \cdot \mathbf{P} = 3E_c \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \cos \theta. \quad (9)$$

可见,颗粒表面极化电荷与环境电场的强度成正比。净空晴天条件下大气环境静电场仅为 120 V/m,电场方向向下^[22],在此电场作用下颗粒表面的极化电荷量远小于颗粒自身携带的净电荷。但是,风沙静电场强度高达数百千伏每米,由此产生的极化电荷可能与颗粒净电荷量级相当,从而会显著影响颗粒对电磁波的散射作用。

2.2 风沙静电场作用下带电粒子的电磁散射场

由于环境电场的极化作用,沙尘颗粒表面电荷应包括两部分:1)粒子自身携带的净电荷 $\sigma_1 H_{(\theta-\theta_0)}$;2)外电场极化作用下诱发的极化电荷 σ_p 。因此颗粒表面总的电荷密度为 $\sigma = \sigma_1 H_{(\theta-\theta_0)} + \sigma_p$ 。考虑到本文仅讨论微波散射情形且沙粒粒径远小于微波波长的事实,基于瑞利近似求解风沙静电场作用下局部带电粒子的电磁散射场,并分析讨论其对电磁波传播过程的影响。

在风沙静电场的极化作用下,局部带电小粒子内外电势满足的边界条件变为

$$r = R: \quad \phi_1 = \phi_2, \quad \epsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} - \epsilon_0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \sigma_1 H_{(\theta-\theta_0)} + \sigma_p. \quad (10)$$

为了计算的方便,令 $\sigma_p = \sigma_2 \cos \theta$, 即 $\sigma_2 = 3E_c \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$ 。

重新求解拉普拉斯方程,可得颗粒内外电势分别为

$$\phi_1 = \frac{\sigma_1 R}{\varepsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - \frac{\sigma_2 - 3E_0 \varepsilon_0}{\varepsilon_r + 2} r \cos \theta, \quad (11)$$

$$\phi_2 = \frac{\sigma_1 R^2}{r \varepsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - E_0 r \cos \theta + \frac{(\varepsilon_r - 1)E_0 + \sigma_2 R^3 \cos \theta}{\varepsilon_r + 2} \frac{1}{r^2}, \quad (12)$$

式中 E_0 为入射波电场强度分量的振幅。颗粒内部电场为

$$\mathbf{E}_{in} = -\nabla \phi_1 = \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \mathbf{x} + \frac{\sigma_1 R}{r \varepsilon_0} \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta}. \quad (13)$$

球内极化强度为

$$\mathbf{p} = \frac{(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{\varepsilon_r + 2} \mathbf{x} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{r} \sigma_1 R \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta}. \quad (14)$$

将 $\boldsymbol{\theta} = \cos \theta \cos \varphi \mathbf{x} + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{y} - \sin \theta \mathbf{z}$ 代入(14)式,进而可得球内总电偶极距为

$$\mathbf{P} = \iiint_0^{R\pi 2\pi} \mathbf{p} r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi = \frac{(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{\varepsilon_r + 2} \frac{4}{3} \pi R^3 \mathbf{x} - \pi R^3 \sigma_1 (\varepsilon_r - 1) \sin \theta_0 \mathbf{z}. \quad (15)$$

从而可得颗粒散射场强为

$$\mathbf{E}_s = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \frac{ik^3}{4\pi\varepsilon_0} \mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \mathbf{p}) = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \frac{ik^3}{4\pi\varepsilon_0} (-P_\theta \boldsymbol{\theta} - P_\varphi \boldsymbol{\varphi}) = \exp(ikr) \frac{k^2 R^3}{4\varepsilon_0 r} \left\{ \left[\frac{4}{3} \frac{(\varepsilon_r - 1)(3E_0 \varepsilon_0 - \sigma_2)}{\varepsilon_r + 2} \cos \theta \cos \varphi + \sigma_1 (\varepsilon_r - 1) \sin \theta_0 \sin \theta \right] \boldsymbol{\theta} - \frac{4}{3} \frac{(\varepsilon_r - 1)(3E_0 \varepsilon_0 - \sigma_2)}{\varepsilon_r + 2} \sin \varphi \boldsymbol{\varphi} \right\}, \quad (16)$$

式中 $k = w \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ 表示真空波数, $w = 2\pi f$ 表示入射波角频率, μ_0 为磁导率。按照文献[12]给出的方法,最终可得粒子散射截面为

$$\sigma_s = \frac{8\pi k^4 R^6}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{\pi}{6} k^4 R^6 \sigma_1^2 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_0 E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0. \quad (17)$$

粒子吸收截面为

$$\sigma_a = k \varepsilon_r' \iiint_0^{R\pi 2\pi} r^2 \sin \theta |\mathbf{E}_{in}|^2 / |\mathbf{E}_0|^2 dr d\theta d\varphi = \frac{4\pi R^3 k \varepsilon_r'}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right|^2. \quad (18)$$

式中 ε_r' 为散射颗粒相对介电常数的虚部。则粒子的消光截面为

$$\sigma_{ext} = \sigma_s + \sigma_a = \frac{8\pi k^4 R^6}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{\pi}{6} k^4 R^6 \sigma_1^2 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_0 E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0 + \frac{4\pi R^3 k \varepsilon_r'}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right|^2. \quad (19)$$

通过颗粒几何面积 πR^2 对(17)~(19)式进行归一化处理,即可得到颗粒的散射效率、吸收效率及其消光效率,分别为

$$\begin{aligned} Q_s &= \frac{8k^4 R^4}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{6} k^4 R^4 \sigma_1^2 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_0 E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0, \\ Q_a &= \frac{4Rk\varepsilon_r'}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right|^2, \\ Q_{ext} &= \frac{8k^4 R^4}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{k^4 R^4}{6} \sigma_1^2 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_0 E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0 + \frac{4Rk\varepsilon_r'}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right|^2. \end{aligned} \quad (20)$$

2.3 沙尘暴环境下的电磁波衰减计算

沙尘暴对电磁波传播过程的影响主要受沙尘粒子的浓度、半径、介电常数(湿度、成分)等因素的影响。一般情况下,沙尘暴中沙尘粒子的粒径在 0.002~0.2 mm 之间,且呈正态分布^[23-24]。不同半径颗粒的数目浓度分布函数为

$$N(r) = N_0 p(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left[-\frac{(D - r_m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (21)$$

式中 N_0 是总的颗粒数, $p(r)$ 是粒子尺寸分布函数, r 是粒子半径, D 为粒子直径, $r_m = -2.96$, $\sigma = 0.38$ 。对于沙尘颗粒的数目浓度极难准确测量, 通常利用光学能见度 V_b 来描述沙尘暴的颗粒数目浓度, 相关式为^[25]

$$N_0 = \frac{15}{8.868 \times 10^3 \pi V_b \int_0^\infty r^2 p(r) dr} \quad (22)$$

沙尘粒子的介电常数与很多因素有关, 但尤以含水量的影响最明显。对于湿沙的介电常数通常采用等效介质理论进行计算, 所采用的公式为^[26]

$$\varepsilon_m^* = \varepsilon_s \left[1 + \frac{3p(\varepsilon_w - \varepsilon_s)/(\varepsilon_w + 2\varepsilon_s)}{1 - p(\varepsilon_w - \varepsilon_s)/(\varepsilon_w + 2\varepsilon_s)} \right] \quad (23)$$

式中 ε_m^* 是湿沙尘的复介电常数, ε_s 和 ε_w 分别为干沙和水的复介电常数, p 为沙粒中水的体积分数。

综上所述, 沙尘暴中电磁波的总衰减可由下式得到:

$$A = \int_0^\infty N(r) \sigma_{ext}(r) dr, \quad (24)$$

式中 $\sigma_{ext}(r)$ 是半径在 $r \sim r + dr$ 范围内的颗粒的消光截面。

3 数值仿真与比较分析

为了分析风沙静电场对沙粒电磁散射性质的影响, 利用推导出的散射场强表达式和 Zhou 等^[12] 推导出的散射场强表达式分别对单个沙粒内外的散射场强分布情况进行计算和比较分析。计算中采用的参数如下: 入射波频率 $f = 9.4$ GHz, 沙粒半径 $R = 40 \mu\text{m}$, 相对介电常数为 $\varepsilon_r = 2.634 + 0.734i$, 表面电荷密度 $\sigma = -1 \mu\text{C}/\text{m}^2$, 入射波电场强度分量振幅 $E_0 = 50$ V/m, 环境电场强度 $E_e = 20$ kV/m, 电荷分布角 $\theta_0 = 90^\circ$ 。如无特别说明, 以下计算中相关参数保持不变。

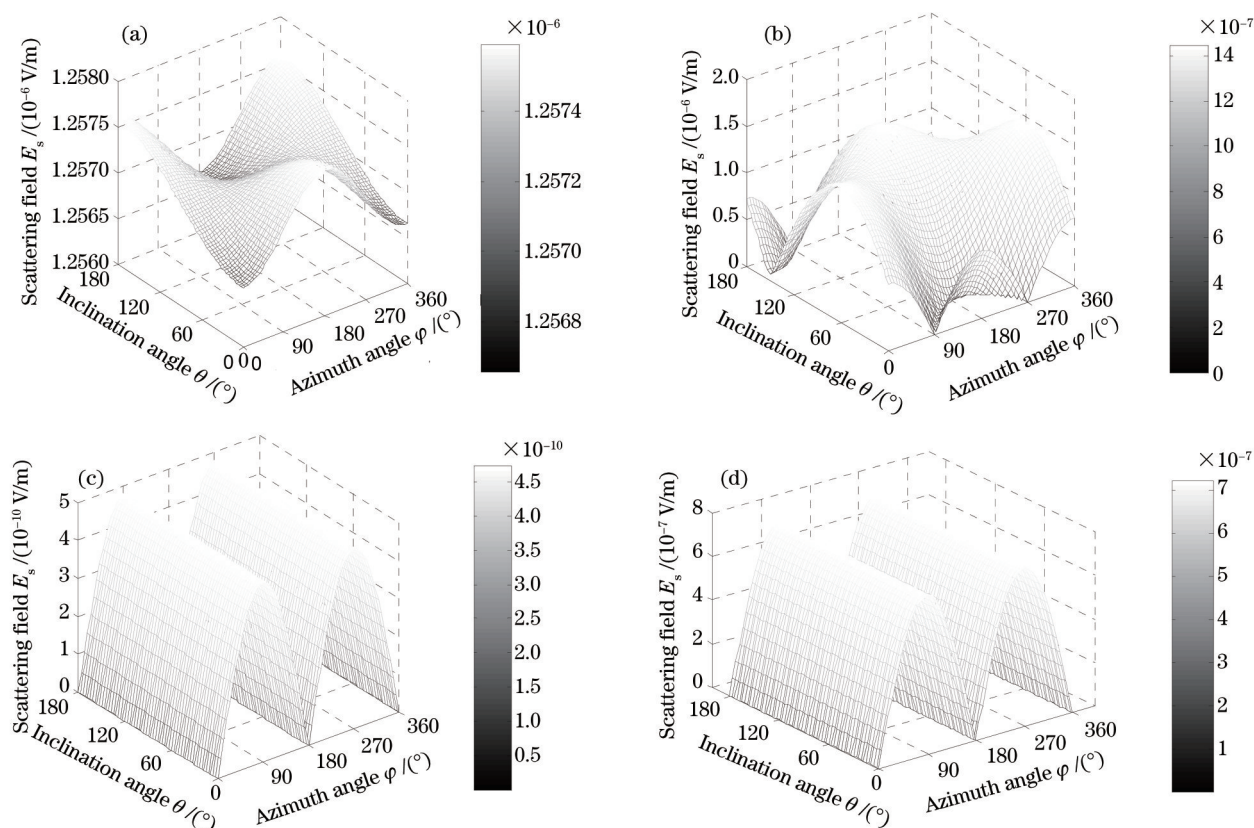


图2 带电沙粒散射场强度分布。(a) Zhou模型, θ 方向; (b) 本文模型, θ 方向; (c) Zhou模型, φ 方向; (d) 本文模型, φ 方向
Fig.2 Distributions of scattering field intensities of charged sand. (a) Zhou model, in the direction of θ ; (b) this paper model, in the direction of θ ; (c) Zhou model, in the direction of φ ; (d) this paper model, in the direction of φ

单个颗粒散射场强分布的数值仿真结果如图2、图3所示,其中图2给出了相同条件下文献[12]模型与本文新建模型所得颗粒散射场两角分量的分布规律。图3给出了基于两种模型所得带电沙粒在入射波作用下散射场强度的分布规律。由图2可知,考虑环境电场的极化作用时,沿极角 θ 方向上的散射场强空间分布规律发生明显改变,并且该分量的散射场强度增大。而沿方位角 φ 方向的散射场强空间分布规律基本未变,但是该分量的散射场强远高于Zhou等的计算结果(约为3个量级)。由此可见,环境电场对沙粒的散射场强分布规律具有显著影响。

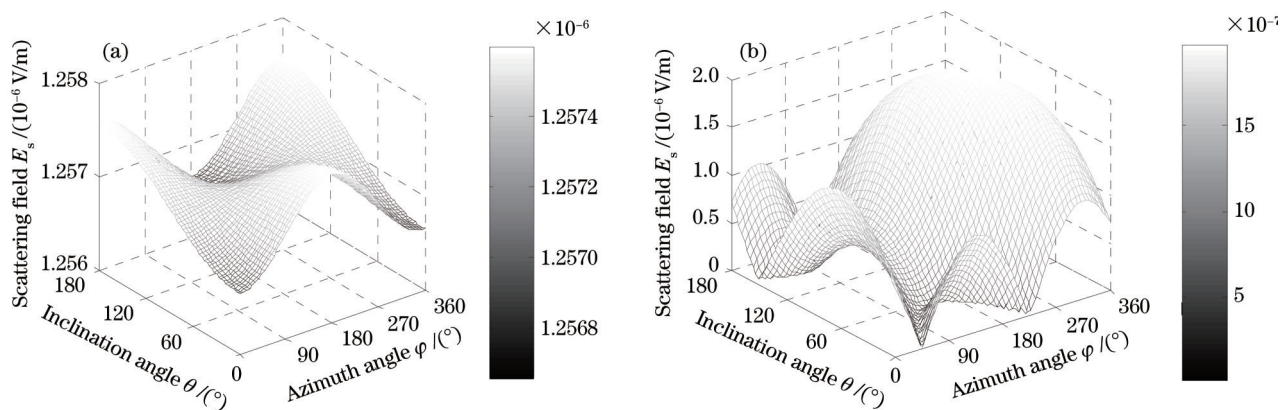


图3 带电沙粒散射场强度在沙粒表面分布情况。(a) Zhou模型; (b) 本文模型

Fig.3 Scattering field intensity distributions on the surface of sand particle for charged sand. (a) Zhou model; (b) this paper model

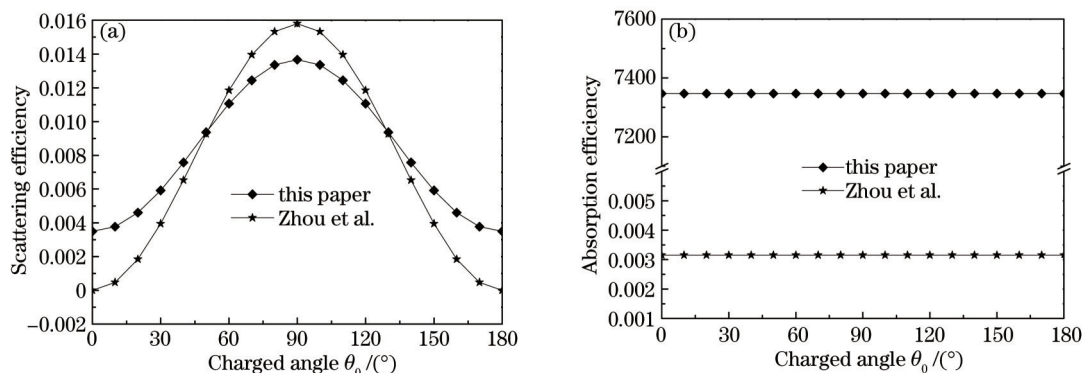


图4 电荷分布角对带电沙粒(a)散射效率和(b)吸收效率的影响

Fig.4 Effects of charge distribution angle on (a) scattering efficiency and (b) absorption efficiency of charged sand

图4中讨论了风沙静电场作用下颗粒表面电荷分布角对粒子散射效率和吸收效率的影响。由图4可知,随着颗粒电荷分布角的增加,粒子散射效率呈正弦函数规律变化,而其吸收效率基本保持不变。数值仿真结果表明,在电荷分布角位于 $50^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 范围内时考虑环境电场作用下的颗粒散射效率小于不考虑环境电场作用下的对应值,而在此范围之外则恰好相反。另外,颗粒的吸收效率不随电荷分布角的变化而变化,但在考虑环境电场作用下颗粒的吸收效率明显增加(约为6个数量级)。

实际应用中更多的是关注沙尘暴对电磁波传播过程的影响。考虑到沙尘暴中沙粒浓度、湿度对电磁波衰减特性具有显著影响,因此接下来利用本文建立的模型对其重新进行分析和讨论。这里,选用参数为:颗粒表面电荷密度 1.5 mC/m^2 ,沙粒含水量 0.05 ,其他参数保持不变。图5中讨论了沙尘浓度对电磁波的影响。由图5可见,随着沙尘暴能见度的增加,电磁波衰减量线性减小,且随着入射波频率的改变,本文模型预测结果与文献[12]结果的大小差异发生显著变化,表现为:当入射波频率小于 20 GHz 时本文模型预测结果远大于文献结果,但是当频率超过 20 GHz 时本文模型所得结果略小于文献模型的预测值,说明随着入射波频率的增加,环境电场的影响逐渐减小。此现象产生的物理原因尚需进一步研究讨论。

图6给出了带电沙尘暴中入射电磁波的衰减量随沙粒含水量变化的曲线,这里采用等效介质理论来计算湿沙颗粒的等效介电常数。由图6可见随着沙粒含水量的增加,带电沙尘暴对电磁波的衰减线性增强。这主要是由于随着含水量的增加,含水沙粒介电常数发生显著变化,且其虚部逐渐增加,从而导致电磁波衰

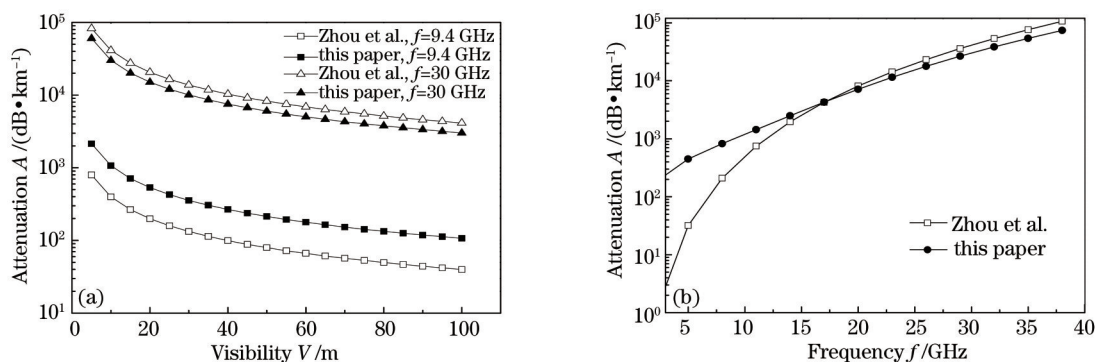


图 5 电磁波衰减量随能见度及入射波频率变化关系曲线。(a)能见度的影响;(b)入射波频率的影响

Fig.5 Curves of the attenuation coefficient of electromagnetic wave changing with visibility and wave frequency. (a) Effect of visibility; (b) effect of frequency of incident wave

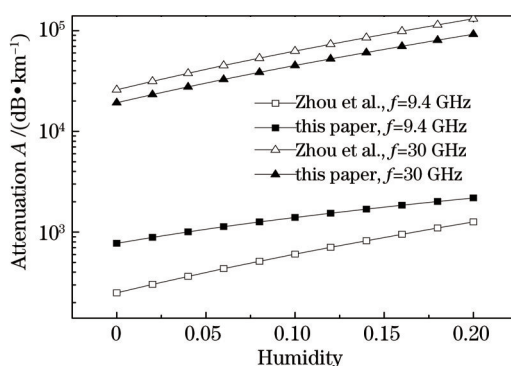


图 6 不同入射波频率下电磁波衰减量随沙粒湿度变化曲线

Fig.6 Curves of the attenuation coefficient of different frequency incident electromagnetic waves changing with sand humidity

减不断增强。

4 结 论

基于电介质的极化理论,采用瑞利近似分析了风沙静电场对沙粒电磁散射性质的影响,讨论了不同条件下带电沙尘暴对电磁波的衰减作用,并与已有文献给出的模型结果进行了比较。结果表明:1)环境风沙静电场会显著改变颗粒电磁散射场强的分布规律,从而影响其对电磁波的衰减作用;2)考虑风沙静电场作用时颗粒对微波的消光效率远大于不考虑风沙静电场作用的对应值,但这种变化受到入射波频率的影响;3)随着沙尘暴能见度的增加,电磁波衰减量线性减小,而随着沙粒含水量的增加,带电沙尘暴对电磁波的衰减线性增强。研究结果有助于提高沙尘暴结构参数微波遥感反演结果的准确性,同时也有助于正确认识沙尘环境对电磁波传播过程的影响。

参 考 文 献

- 1 A Muhammad, T R Sheltami, H T Mouftah. A review of techniques and technologies for sand and dust storm detection [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2012, 11(3): 305-322.
- 2 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Zhenzhu, *et al.*. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0801003.
- 3 Yan Baodong, Song Xiaoquan, Chen Chao, *et al.*. Beijing atmospheric boundary layer observation with lidar in 2011 spring [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s128001.
闫宝东, 宋小全, 陈超, 等. 2011春季北京大气边界层的激光雷达观测研究[J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s128001.
- 4 Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.*. Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0113001.

- 5 Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli. Validation of retrieving aerosol optical parameters over the sea using airborne directional polarized camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601004.
黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601004.
- 6 Y Shao, K-H Wyrwoll, A Chappell, *et al.*. Dust cycle: An emerging core theme in earth system science [J]. *Aeolian Research*, 2011, 2(4): 181-204.
- 7 S S Fredrick, V Jothiram. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water, vapor, hydrometers and other particulates [J]. *Journal of Geophysical Research D*, 1999, 104(8): 9663-9670.
- 8 J W Ryde. Echo Intensities and Attenuation Due to Clouds, Rain, Hail, Sand and Dust Storms at Centimetre Wavelengths [R]. Wembley: General Electric Company Research Laboratories, 1941.
- 9 C Gary. The impact of dust and foliage on signal attenuation in the millimeter wave regime [C]. SPIE, 1993, 11(1): 81-94.
- 10 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.
- 11 S Haddad, M J H Salman, R K Jha. Effects of dust/sand storms on some aspects of microwave propagation [C]. Proc Ursi Commission F Symposium, Belgium, 1983. 153-161.
- 12 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(2): 181-187.
- 13 T L Bo, X J Zheng. A field observational study of electrification within a dust storm in Minqin, China [J]. *Aeolian Research*, 2013, 8: 39-47.
- 14 L Xie, X Li, X Zheng. Attenuation of an electromagnetic wave by charged dust particles in a sandstorm [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(35): 6756-6761.
- 15 X Li, X Min, D D Liu, *et al.*. Rayleigh approximation for the scattering of small partially charged sand particles [J]. *J Opt Soc Am A*, 2014, 31(7): 1495-1501.
- 16 X Li, B Zhang. The electromagnetic scattering of the charged inhomogeneous sand particle [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 119: 150-154.
- 17 X Li, B Zhang. An equivalent solution for the electromagnetic scattering of multilayer particle [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 129: 236-240.
- 18 Li Yingle, Li Jin, Wang Mingjun, *et al.*. Investigation of scattering for a uniformly anisotropic dielectric sphere [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0429002.
李应乐, 李 瑾, 王明军, 等. 均匀各向异性介质球散射的解析研究[J]. *光学学报*, 2013, 32(4): 0429002.
- 19 C F Bohren, D R Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1983. 136.
- 20 Zhang Hongfa, Wang Tao, Qu Jianjun, *et al.*. An experimental and observational study on the electric effects of sandstorms [J]. *Chinese J Geophys*, 2004, 47(1): 47-53.
张鸿发, 王 涛, 屈建军, 等. 沙尘暴电效应的实验观测研究[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(1): 47-53.
- 21 X Li, L Xie, X Zheng. The comparison between the Mie theory and the Rayleigh approximation to calculate the EM scattering by partially charged sand [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(3): 251-258.
- 22 X J Zheng. *Mechanics of Wind-Blown Sand Movements* [M]. Berlin: Springer, 2009. 111-112.
- 23 G Hong, P Yang, F Weng, *et al.*. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(4): 684-702.
- 24 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚 芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 25 He Qinshu. *The Influence of Charged Sand in Sanstorm on the Propagation of Electromagnetic Wave* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005. 14-20.
何琴淑. 沙尘暴的沙粒带电对电磁波传播的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005.14-20.
- 26 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.