

独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得宁夏大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：闵星

时间： 2015 年 5 月 29 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解宁夏大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意宁夏大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名：闵星

时间： 2015 年 5 月 29 日

导师签名：李兴财

时间： 2015 年 5 月 29 日



摘要

恶劣天气对于无线通信的影响是一个客观存在的世界性问题,具有普遍性。自然环境条件下颗粒物对电磁波传播特性的研究,对于风沙环境下的无线电通讯系统设计、沙尘、雾霾等气溶胶现象的遥感监测与反演、气溶胶的辐射强迫效应等研究都具有十分重要的现实意义。已有大量研究表明:自然条件下运动颗粒(如沙尘、雨雪、雾霾等)都是带电的,并因此会产生强度最高达 200kV/m 的静电场。已有部分学者针对颗粒表面电荷对电磁波传播过程的影响开展了大量理论研究,但对于强度极高的环境电场对颗粒光学性质的影响并无讨论。鉴于此,本论文以西北常见的沙尘暴现象为例,考虑沙粒带电及沙尘暴中的强环境电场等多种因素的前提下,围绕局部带电球体沙粒对电磁波传播过程的衰减作用展开研究,并讨论了相关散射特性在风沙物理学研究中的潜在应用价值。主要工作如下:

首先针对局部带电球形沙粒对入射电磁波的散射和吸收问题,基于极化面电荷密度和Rayleigh 散射理论,导出了局部带电球形沙粒对入射电磁波的散射场、散射截面、吸收截面及消光截面,同时就不同电荷分布角、表面电荷密度、环境电场作用下基于两种模型所得沙粒散射场强空间分布形式进行比较分析。

其次推导出环境电场作用下粒子的微分散射截面,散射、吸收及消光效率,雷达反射系数,讨论颗粒表面电荷分布角、表面电荷密度、入射波频率分别对其的影响。发现:随着颗粒电荷分布角、面电荷密度的增加,粒子散射效率分别呈正弦函数、指数规律变化,而其吸收效率基本保持不变。入射波频率对沙粒电磁散射性质的影响为:不同面电荷密度下,随着入射波频率的增加,沙粒散射效率呈指数增加,而其吸收效率呈线性增加。接着分析比较两种模型下沙尘暴中沙粒浓度、湿度对电磁波衰减特性的影响,并讨论沙尘颗粒粒径分布对电磁波传播的影响。

最后讨论环境电场、沙粒浓度等对微波雷达反射率的影响。

关键词:风沙静电场,局部带电球形沙粒,瑞利散射,散射强度,微分散射截面,衰减系数,粒径分布,雷达反射率

Abstract

The effects of bad weather on wireless communication are an objective existence of the universal worldwide problems. Research on the electromagnetic wave propagation characteristics of particulate matter under the condition of natural environment has a very important practical significance, such as radio communication system design under sand environment, remote sensing monitoring and inversion for dust, fog aerosol phenomenon and the research on radiation forcing effect of aerosol. There are a large number of studies shown that: the motional particles (such as dust, rain, snow, fog, haze, etc.) are charged under natural conditions, and it will produce an electrostatic field which will be reached up to the highest intensity of 200kV/m. Some scholars have carried out a large number of theoretical researches and analyzed how the electric charge on the particle surface affect the electromagnetic wave propagation. But there is less discussion on the high intensity of the environment electric field effects the particle optical properties. In view of this, this thesis takes common phenomenon of sandstorm in northwest China as an example, under consideration charged sand and dust storms in the strong electric field environment and other factors of the premise, the main research is based on the scattering process of electromagnetic waves attenuation acted by partially charged sand particles, and discusses the relevant scattering characteristics potentially apply in the sand physics research. The main work is as follows:

Firstly, in view of the partial charged spherical sand of the incident electromagnetic wave scattering and absorption problems, based on the polarization surface charge density and Rayleigh scattering theory, we have derived the partial charged spherical sand of incident electromagnetic wave on the scattering field, scattering cross section, absorption cross section and extinction cross section. At the same time under the factors of different charge distribution angle, the surface charge density and environmental field, we have compared sand in the form of the spatial distribution of the scattered field based on the two models.

Secondly, under the environmental electric field, the particle differential scattering cross section, particle scattering and absorption and extinction efficiency, radar reflection coefficient have been deduced. We also give the discussion about the effects respectively from the particle surface charge distribution angle, the surface charge density and the incident electromagnetic wave frequency. The results showed that: with the increase of the particle charge distribution Angle and the surface charge density, particle scattering efficiency respectively is changed as in sine function and exponential rule, but its absorption efficiency basic remains unchanged. The effects of incident wave frequency on sand electromagnetic scattering properties as follows: for the different surface charge density, with the increases of the incident wave frequency, sand scattering efficiency increases exponentially, and its absorption efficiency increases linearly. Then, in both two modes, we have analyzed and compared the impacts of the concentration of sand in the sandstorm and the humidity on the electromagnetic wave attenuation characteristic, and discussed the influence of sand particle size distribution on

electromagnetic wave propagation.

Finally, some discussion about the environmental electric field and the sand concentration for the influence of microwave radar reflectivity are given.

Keywords: wind and sand electrostatic field, partially charged sand particles, Rayleigh scattering, scattering intensity, the differential scattering cross section, attenuation coefficient, particle size distribution, the radar reflectivity

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究现状及进展	2
1.3 问题的提出	5
1.4 本论文内容安排	5
第二章 沙尘气溶胶基本物理性质	7
2.1 沙尘颗粒的成分	7
2.2 沙尘颗粒的粒子谱	8
2.3 本章小结	9
第三章 球形颗粒物电磁散射性质求解的 RAYLEIGH 近似	10
3.1 基本物理模型	10
3.2 数值仿真与分析	13
3.4 本章小结	18
第四章 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响	20
4.1 一些关键参量的推导	20
4.2 数值仿真与分析	24
4.3 本章小结	32
第五章 结论及其展望	34
5.1 主要结论	34
5.2 研究展望	36
参考文献	37
致谢	41
个人简介	42

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

沙尘暴是一种发生在沙漠或干旱沙漠化地带由强风从地面卷起大量沙尘,使得能见度极度恶化的灾害性天气现象,大量沙尘颗粒通过热对流等方式进入空中,并沿着特定的方向长距离输运,其影响可波及全球^[1,2,3]。这种极端天气的出现,一方面加速局部地区的沙漠化进程,另一方面,沙粒对太阳辐射及空中游离带电离子的吸收以及沙尘颗粒的大规模沉降过程会影响局部地区气候、改变空中悬浮物成分、改变海洋微生物浓度,进而给人类赖以生存的环境带来严重影响^[4]。

随着土地荒漠化的加剧(全球 1/4 的陆地面积都存在土地荒漠化现象),沙尘暴天气增多,频繁发生的沙尘暴对某些地区或国家的工、农业等造成极大的威胁,直接影响着人民的生存环境与生活质量。如 2010 年 4 月 24 日甘肃省武威、张掖、酒泉、白银、金昌、嘉峪关 6 个市遭遇强沙尘暴袭击,期间伴随 10-11 级大风,致使超过 130 万人受灾,直接经济损失达 9.37 亿元。2015 年 4 月 27 日,新疆兵团第 8 师 136 团遭遇了今春以来最大一次强沙尘暴天气袭击,风力最大时达到八级。大风致使 6 万亩棉田受灾,其中重灾棉花面积达 5 万亩,4 万亩棉苗被大风刮死,大片树林超过 10 年的直径 40 厘米的大杨树被刮倒,当地直接经济损失约两千万。另外,天山北部乌鲁木齐、昌吉、石河子以及天山以南的和田、喀什地区均出现了不同程度的沙尘暴。因此研究沙尘暴的形成及输运过程对于有效应对沙尘灾害极为重要。

20 世纪 30 年代,我国开始在野外通过风洞实验研究了沙粒的运动过程,包括沙粒跃移运动的特征轨迹以及引起沙粒运动的临界风力点^[5]。随后,许多研究者相继对风沙运动过程进行数学建模,并展开相应的数值模拟计算^[6~8]。Schmidt 等人研究发现沙粒在跃移运动过程中不仅会受到电场力的作用,同时也会受到 Magums 力的作用,二者的作用力与沙粒的重力相当^[9]。在此基础上,我国中科院院士郑晓静带领团队进行了大量的实验研究,综合考虑了风场、电场、热对流三者对风沙运动的影响,建立理论模型,对电场、单宽输沙率以及风速等变量进行了数值分析,总结出风沙静电场以及热扩散过程对风沙运动的影响^[10~12]。这一多场耦合模型(风-沙-电-热对流相互耦合)“改进了与实验测量结果吻合的程度”^[13]。

研究发现,沙粒在运动过程中由于相互的接触碰撞等原因而携带有不同数量的正或负电荷^[14~17]。这些净电荷会增强沙尘粒子对电磁波的衰减,如 Zhou 等人基于 Rayleigh 提出带电沙尘对电磁波衰减影响的新模型,发现沙粒携带电荷会明显增强电磁波在沙漠中的传播衰减^[18]。Xie 等人基于 Mie 理论讨论了较大圆球形带电沙粒的电磁散射特性^[19]。然而,目前对沙粒运动对电磁波传输过程影响的系统的相关研究甚少。理论上讲,粒子的运动会导致电磁波的频移,从而影响无线信号的准确传输;带电粒子的运动(如平移、旋转)使得表面电荷产生等效电流,从而改变粒子内部电磁场分布,进而影响其电磁散射性质等。因此,人们开始逐步重视沙尘暴中微波的传播、沙尘暴预警监测以及沙尘暴的形成传输过程。在风蚀、风沙流过程的研究中,基于颗粒物对电磁波散射、吸收机理的仪器正越来越多的被用于实验测量中,如微波/激光雷达、PDA、PIV 等,沙粒的光学性质必然影响到实验测量结果的可靠性^[20]。基于电磁辐射的发射与传输原理,对沙尘暴及大气污染物进行遥感监测和内部结构参数进行测量是目前极为普遍使用的方法,这些技术的

实施都与沙尘粒子对光或者电磁波信号传播过程影响的理论预测精度密切相关。除此以外,伴随科技的发展,人类对无线通讯需求急剧增加,尤其是对沙尘暴现象发生更为频繁、强度和规模都远大于地球沙尘暴的火星、月球等地球外星球的探测,使得人们对沙尘暴期间无线电波的传播规律的认识更为深刻。因此,对真实环境下沙尘颗粒电磁散射性质的准确认识具有非常广泛而深入的意义^[1, 20]。

1.2 研究现状及进展

1.2.1 风沙电现象研究进展

早在 1910 年就有学者注意到运动的沙粒是带电的,且从不同材料制成的漏斗中落下时会带有正或负的电荷。如 Phillips 发现:与滤纸进行摩擦后玻璃棒会带负电^[21]。Rudge 测量了溅射出的沙粒的带电情况,发现大沙粒带正电,悬浮的小沙粒或空气带负电^[22]。Whitman 发现当沙粒通过金属管道时,大沙粒与小沙粒携带不同极性的电荷,且电荷量与沙粒质量成正比^[23]。而 Shaw 通过对两玻璃棒摩擦实验发现,当材料相同时,摩擦后二者均不会带电,不过在它们相互发生碰撞的过程中,将会产生一部分电荷^[24]。Shaw 发现自砂纸上吹起的沙粒带负电,且空气速度或空气温度都会对沙粒带电量产生影响^[25]。Debeau 发现硅石从镍质漏斗中落下后带负电^[26]。Gill 发现从金属漏斗中倒出的沙粒总是带负电^[27]。Gill and Aifrey 通过实验发现,当沙粒沿着倾斜的金属板表面向下滑落时,沙粒携带负电荷,同时外加一电场后,该电场的大小与方向都影响沙粒的带电量以及电荷极性。另外,黄宁等人通过风洞试验发现,粒径小于 250 μm 的沙粒倾向于带负电荷,而粒径大于 500 μm 的沙粒更倾向于带正电荷^[28]。谢莉等人认为沙粒碰撞过程中的速度、碰撞角以及含水量均会影响沙粒带电量,且其表面电荷呈马赛克式分布。

在对沙粒带电现象进行实验研究的同时,部分学者将视线放在了风沙电场对沙粒带电的影响上。如 Rudge 发现沙尘天气大气电场存在明显畸变,其方向和大小均发生明显改变, Gill 观测到在沙尘暴过境地带可能出现强电场和电火花现象^[29]。Freier 在实地观测沙尘暴过程时发现,风沙电场强度普遍高于晴朗天气下的大气电场,且与其方向相反^[30]。刘贤万等人通过实验观察到的尖端放电及“火线”现象使得通讯线路受到强大干扰,甚至可使设备击穿,发生人身事故^[31]。Schmidt 等人^[32]通过对野外风沙电场的定量测定结果,证实了风沙电场方向与垂直向下的晴天电场方向相反,为垂直地面向上。在 Schmidt & Schmidt 给出的风沙电场计算公式中可以发现:风沙电场的强度沿着高度单调递减,并可推测出运动的沙粒带负电,然而他在对 150 μm 的均匀粒径沙粒在较强风速下离地 0.05m 处测得的平均荷质比却为正,表面沙粒带正电,作者并没有对此矛盾给出合理的解释。随后, Huang and Zheng 不仅对风沙流内部电场分布进行了测量还针对沙粒带电的具体规律给出了实验测量结果^[33]:不同粒径、不同风速以及不同高度范围下沙粒的荷质比。实验结果与 1988 年 Schmidt and Schmidt 在野外测量的结果相符,同时证实了摩擦起电学说。屈建军等人基于风洞模拟沙尘暴起电实验发现:随着沙粒湿度的增加,风沙电场呈现先急剧增加后迅速减小的变化规律^[17]。Bo 等人对民勤一次沙尘暴过程中的风沙静电场进行测量时发现:风沙电场呈现三维分布,即不仅有垂向电场,还存在水平方向的分量^[34],并基于数值模拟再现了风沙流过程中风沙电场的三维分布^[35]。

对于沙粒带电的成因问题,目前存在许多假定和推测。文献[36]将其归纳为以下七种:(1)

大气电场的极化作用；(2) 沙粒间的摩擦起电；(3) 不同材料间的接触起电；(4) 晶体裂解产生电荷；(5) 光子撞击或大气带电离子吸附在沙粒的表面；(6) 晶体的热电效应；(7) 晶体的压电效应。郑晓静等人^[37]认为只有第(2)种带电机理可能是风沙电现象的主要起源机制。目前，学术界更能接受的是碰撞或接触带电的理论，尤其是在本世纪初期，许多相关颗粒接触起电的模型被提出，用来解释沙粒带电的形成原因及带电过程^[38, 39]。2009年，Forward等通过实验证实了第(3)种可能，即在颗粒系统中颗粒间的接触使得小颗粒带负电大颗粒带正电^[40]。然而，通过仔细分析我们发现：(2) - (3) 本质上一致，都是颗粒接触起电，只是一种属于静态接触，另一种属于动态接触，其差别在于促使带电小离子发生交换转移的能量来源不同而已，如前者属于颗粒自身表面态存在差异，而后者属于摩擦生热导致的热激发而已。

1.2.2 沙尘气溶胶散射、吸收特性进展

大气气溶胶是由大气介质及混合在其中的固体或液体颗粒物所组成的体系，是悬浮在大气中的直径在几纳米到几十微米之间的固体和液体颗粒的总称。主要包括：硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶、碳气溶胶（黑炭气溶胶和有机碳气溶胶）、海盐气溶胶和沙尘气溶胶等。在这几种气溶胶里面，沙尘气溶胶含量最高，对环境的变化影响显著^[41]。据估计，全球每年进入大气的沙尘气溶胶达到 10~20 亿吨^[42]。气溶胶粒子能够反射、吸收和散射太阳辐射，使到达低层大气和地面的太阳辐射减少。除此之外，沙尘气溶胶本身是可以发射长波辐射的，使大气层加热，从而产生气溶胶的直接辐射强迫效应^[43, 44]。此外，沙尘粒子的远距离输送会给海洋生态环境和各国居住环境带来一定的影响。因此，大气中气溶胶对研究大气辐射和气候的变化中的影响极其重要。

有关研究发现，沙尘气溶胶在地面和大气顶对辐射平衡的影响主要依赖于气溶胶浓度、化学成分、谱分布、垂直分布和光学参数。然而，目前对沙尘气溶胶光学特性的了解比较少，对气溶胶辐射效应的研究也存在不足。从二十世纪二十年代起，国外开始研究沙尘气溶胶。例如，在 1921 年 Hankin^[45]先研究了印度地区出现的“*Andhi*”型沙尘暴，并分析了沙尘暴过程中气流的上升和下降过程。随后，Idso et al. 关于沙尘暴气候特征等做了多方面研究。到七十年代后，在大气沙尘气溶胶的物理光学特性和辐射气候效应方面，国内外学者取得了很大的成就。如 Tegen 等人^[47]利用 General Circulation Model 模型，对不同粒径的粒子进行模拟，并从粒子的谱分布和垂直分布两个方面分析了粒子对辐射的影响。Claquin 等人^[48]通过研究发现：沙尘气溶胶折射指数的虚部的变化使得辐射强迫的计算存在 40% 的误差；粒子谱的分布对沙尘气溶胶的光学特性具有很大的影响。除此之外，温度和沙尘气溶胶的垂直分布对长波辐射强迫的计算也存在很大的影响，从而给沙尘气溶胶的辐射计算带来很大的不确定性。

在我国，对沙尘气溶胶的系列研究起步比较晚。近年来，我国学者在沙尘气溶胶光学特性方面做了很多的研究，例如申彦波等人^[49]、牛生杰等人^[50]通过使用太阳光度计，观测不同沙尘天气，主要讨论了我国北方沙漠地区的大气气溶胶的光学特性。在散射特性方面，杨莲梅等人^[51]选择了塔克拉玛干沙漠腹地作为实验地点，利用气象站现有的积分浑浊度仪和能见度仪进行观测，分析了在不同程度的沙尘天气中粒子的散射系数。而柯宗建等人^[52]则依据北京观象台所采集的散射系数数据以及部分 PM10 质量浓度数据，对观测期内散射系数的变化特征及散射系数与 PM10 质量

浓度以及能见度的关系进行了分析。张玉洁等人^[53]对黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征进行了分析。延昊等人^[54]使用积分浊度计和 PM10 浓度监测仪,对塔克拉玛干沙漠、浑善达克沙漠、腾格里沙漠等沙尘气溶胶源地开展了一系列的沙尘气溶胶光学和辐射气候效应的观测研究^[55~57],王宏等人^[58]对中国西北部沙漠区域对气溶胶进行了采样,获得该地区沙尘气溶胶的光学特性,并于二零零一年,模拟分析了东亚北太平洋区春季平均辐射强迫。吴润等人^[59]通过研究得到沙尘气溶胶大气顶直接辐射强迫的分布特征是:海洋上正负均有,但大陆上仅为正。总而言之,由目前的研究发现:对沙尘气溶胶的作用机制研究具有一定的挑战性,其对气候的影响具有很大的不确定性。

1.2.3 沙尘暴对电磁波传播过程的影响

随着沙尘天气的增多及土地沙漠化的加剧,电磁波信号在沙尘中的准确传输是保证无线电通讯的重要因素。随着无线电技术的发展,电磁波可以在更为恶劣的环境中传播,如沙尘环境中的无线通信、雷达探测、电视、广播信号的传输等。对于沙尘暴对电磁波衰减的研究工作,首先是通过实验进行研究。Ryde 最早讨论了沙尘暴中的微波散射特征,发现当 $f_{\text{雷达}} \leq 30\text{GHz}$ 时,沙尘暴对雷达波的影响较小,甚至可以忽略不计^[60],但是他仅讨论了沙尘暴对雷达反射率的影响。但是他仅讨论了沙尘暴对雷达反射率的影响。此外,有部分学者估算了沙尘暴对电磁波传播过程的影响。例如 Gary 通过理论计算认为沙尘暴对微波的衰减是可以忽略的^[61]。随后,Goldhirsh、Ali 等人分别研究了沙尘对雷达等系统性能的影响,发现当在沙尘暴浓度较低的环境中,对低频率电磁波不会产生影响,但是当沙尘暴浓度较低时,电磁波会发生明显地衰减,甚至会出现信号中断的现象^[62]。Adel 等和 Kevin 均指出沙尘暴对雷达性能具有很大影响^[63,64]。陈祥占等人直接在野外进行实验,观测了沙尘暴对电磁波的实际衰减。Al-Hafid 等人通过观测沙尘暴对 11GHz 的微波通讯的影响,发现接收信号的衰减程度达到每几十分钟可衰减 10~15 分贝,并且 10 分贝的衰减可持续 150 分钟,26 分贝的衰减可持续约 40 分钟^[65]。陈祥占等人通过观测发现对于频率高于 10GHz 的电磁波,其衰减程度与沙粒的浓度呈正比关系,且当 $\lambda \approx R$ 时,衰减达到峰值^[66]。Mohammed 等人认为:要估计沙尘暴中电磁波衰减程度,必须考虑沙粒粒径和含水量的影响^[67]。

在沙粒对电磁波传播影响的理论计算研究中,许多学者主要采用 Rayleigh 近似或 Mie 理论对沙粒的电磁消光作用给出理论预测,并且主要讨论沙粒形状、组份、粒径、粒径分布形式等的影响。如 Ahmed 对 10GHz 电磁波在质量浓度为 10^{-5} g/cm^3 的颗粒系统中的衰减进行估计,发现在沙质材料颗粒系统中其衰减值为 0.1dB/km,而木质材料颗粒系统中其值为 0.4dB/km^[68]。Chu 采用小沙粒的 Rayleigh 近似,计算了 11GHz 电磁波在能见度为 100m、沙粒粒径为 0.1mm 的沙尘暴中的最大衰减值为 0.03dB/km^[69]。这一结果与 Ahmed 的结果比较一致。Haddad 等人利用 Chu 提出的计算方法估算出能见度为 100m 条件下干沙对 9.4GHz 电磁波的衰减值约为 0.03dB/km,含水 10%的湿沙对电磁波的衰减值为 0.8dB/km^[70]。Ali、Ahmed、Abdulla 等人对沙尘暴中沙粒粒径分布情况及其大小对电磁波传播过程的影响进行分析^[71~73],发现粒径分布为指数分布时的估计值最大,对数正态分布、正态分布、Gamma 分布三种情形下获得的衰减值几乎一致。Dong 等人基于等效介电常数讨论了不同能见度沙尘暴对微波传播的影响^[74]。Ghobrial 发现浓度为 10^8 颗/m^3 的颗粒系统中 X 波段电磁波的吸收率为 1dB/km^[75]。

一般而言,利用已有的理论模型可以较为准确的预测沙尘对电磁波的衰减强度^[18],但也有一些情形会出现理论预测值远小于实验测量值的问题。如 Haddad 发现频率为 9.4GHz 微波在能见度相当于 10m 的沙尘暴中的衰减率的理论计算值仅为 0.001dB/m,而实测值为 0.034 dB/m^[76],两者相差 30 多倍。Adel 等人发现频率为 40GHz 的入射波,其在沙尘暴中的衰减率测量值是理论计算值的 4 倍,而对于波长为 0.88mm 的近红外波,测量值反而仅为理论预测值的 0.3 倍^[64]。中国电波科学研究所的董庆生等人发现沙尘暴中毫米波的衰减率的理论计算值远小于实际测量值,他们将这一结论归咎于没有准确地掌握沙尘粒子信息,例如形状、浓度以及分布等^[77]。部分学者认为需要考虑运动沙粒表面携带静电荷的影响,并成功解释了沙尘暴中微波衰减率的理论预测值远小于实测值的问题,由此说明,沙粒运动过程中产生的静电荷对其光学性质具有非常重要的影响^[18,19]。Li 等人讨论了介质不均匀性、湿度等因素对带电沙粒电磁散射性质的影响^[78-80]。另外,大量实验研究表明:沙尘暴或者尘卷过程中,大气静电场会发生畸变,其方向与晴天大气电场逆转,且强度最高可达 200kV/m。在如此强的静电场作用下沙粒表面会出现大量静电荷,从而可能影响颗粒的光学性质,但目前并无相关文献对此进行报道。

1.3 问题的提出

通过以上对已有相关研究的回溯,我们发现,沙尘颗粒对电磁波的传输有着极其复杂的影响。已有研究仅仅关注到沙尘表面电荷、粒径、成分、含水量等因素对其光学性质的影响,但并未注意到强度高达 200kV/m 静电场对其电磁散射性质的影响。鉴于对沙粒光学性质的准确认识和预测在大气遥感、深空探测、复杂环境下通讯系统设计等领域的重要意义,开展有关真实环境下沙尘颗粒电磁散射性质预测的理论研究显得尤为重要。

1.4 本论文内容安排

基于此,本学位论文在考虑沙粒表面带电的前提下,附加考虑环境电场对沙粒的极化作用,利用 Rayleigh 近似讨论环境电场作用下带电沙粒的电磁散射性质,并分析环境电场强度、沙粒带电量及粒径分布形式对其电磁散射特性的影响,同时讨论了带电沙尘暴的雷达反射率及其对电磁波的衰减影响。各章节内容安排如下:

第二章中首先介绍沙尘气溶胶的基本物理性质及其测量方法,对沙尘颗粒的成分、及沙尘颗粒的粒子谱进行整理研究。为后续章节的内容提供理论基础。

第三章中主要基于 Rayleigh 近似,考虑环境电场作用与否,球形颗粒物电磁散射性质求解的基本方法,即本文模型。通过考虑环境电场的作用,对风沙静电场作用下沙粒表面极化电荷进行推导,进而推导该条件下带电粒子的电磁散射场、散射截面、吸收截面及消光截面。给出沙粒不带电时、不同电荷分布角下两种模型下的带电颗粒散射场强分布特点,并对两种模型下的计算结果进行比较分析。

第四章中主要基于 Rayleigh 近似,考虑环境电场作用时,进一步推导该条件下带电粒子的微分散射截面极其光学特性,从而分析局部带电球形沙粒对电磁波的强度衰减影响。讨论两种模型下沙粒电荷分布角、面电荷密度、沙粒粒径等因素对入射电磁波的强度散射、吸收及消光效率的影响,同时就能见度、入射波频率及不同入射波频率下沙粒含水量对电磁波衰减量的影响进行研

究。说明考虑环境电场的作用使得各个影响因素对电磁波传播的影响存在差异。然后对沙尘颗粒粒径分布对电磁波传播的影响进行讨论,考虑两种模型下沙尘暴中沙粒荷质比、能见度在六种沙粒粒径分布下对电磁波衰减系数的影响。说明不同的粒径分布形式的确会对入射波的强度衰减影响产生差异。最后讨论环境电场、沙粒浓度对微波雷达反射率的影响。

第五章为结束语,给出本文的主要结果:依据电介质的极化理论,采用 Rayleigh 近似理论,分析风沙静电场对沙粒电磁散射性质的影响,对不同条件下带电沙尘暴对电磁波的衰减作用进行分析,并与已有文献给出的模型结果进行了比较。通过对本论文的研究,所得到的计算结果给沙尘等气溶胶所引发的对环境气候影响的研究、沙尘暴遥感监测研究等提供了一些理论基础,具有一定的指导意义。

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。

第二章 沙尘气溶胶基本物理性质

2.1 沙尘颗粒的成分

沙尘颗粒,作为空气中气溶胶的主要成分之一,会给大面积区域的环境气候带来严重的影响。近年来,随着各国在沙漠化治理方面的投入,沙尘天气呈现逐年减少的趋势,但局部地区沙尘现象却更为严重,其灾害性更强。如当大量的沙尘被大风吹起时,通过向上漂浮从而抵达空气中,跟随高空中气流流向远处地区并进行传输^[81]。由研究得到在整个亚洲的空气中的沙尘,其主要来自于中国北方的沙漠以及大面积的土地荒漠化。据有关数据统计,每年通过西北地区传入空气中的沙尘的总量达到 800Mt,大约为全球总量的 1/3^[82];然而,来自中国以及其他地区沙漠的沙尘,大约有一半会跟着大气传送至中国领海等区域^[83]。我们知道,在海洋中生活的浮游生物,它们是通过大气上沉、下降从而获取营养物质的,然而,通过对沙尘气溶胶的长距离输送,可以为生活在海洋中的一些浮游水生物提供大量的 Fe 元素,从而使一大部分在海区生物链底层的生产力变得强大,最终会给温室效应以及全球气候变暖带来一定的影响^[84]。由于在各个地区的沙源会存在各不相同的理化特性和浮尘条件,它们之间相互替代相当难,而且由于目前在对沙尘的源汇、大气承载及其与气候系统的反馈机制的认识上布局完整性,换句话说,即为在对沙尘的诸如理化性质、光学特性以及含有这些特性演变的一些对大气过程认识的欠缺^[85],从而使得通过沙尘气溶胶进行对气候的变化的评估仍然不是十分精确。

总体而言,除少量沙尘气溶胶粒子会因为静电吸引或范德华力作用而发生团簇聚合外,绝大多数的沙尘粒子是一个一个孤立地悬浮在大气中的。张代洲等人^[86]通过采用试剂薄膜法和 X 射线能谱,通过研究得到了典型的单颗沙粒所具有的形态特征以及他的 X 射线能谱。在外形上,沙粒所具有的形态不具特殊性,其所表现出的外部特征不具有一定的规律性。在元素组成上,沙尘颗粒的成分主要有 Na、Mg、Al、Si、K、Ca 和 Fe,其他的地壳元素(如 Ni、Ti 和 Mn 等)则相对较少。对于此,有相关研究者通过对研究地点的大气气溶胶进行外场样品采集以及得到的元素分析资料,从而对沙尘气溶胶的物理化学性质进行了分析研究^[87, 88]。结果表明:Al 和 Fe 等地壳元素主要来自局地土壤源,Pb 和 S 等污染元素主要来自外部污染源,Mo, V 和 Co 来自外部沙尘源。局地土壤源、远距污染源和外部沙尘源是沙尘气溶胶的主要来源。张仁健等人^[89]通过对样品进行化学成分的分析:对收集到的样品在北京低能核物理研究所的 2×1.7MV 串列加速器上进行了质子激发 X 荧光(PIXE)的分析,得到了 Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Br 和 Pb 共 20 种元素的浓度。

通过多种渠道研究探索沙尘颗粒,虽然通过地基、卫星遥感反演沙尘粒谱技术测量会不因地域的差异而存在一定的局限性,并且与辐射强迫存在直接的相关性。但是,由于在云雾等天气现象影响下,反演的结果仅能在沙尘气溶胶的浓度相对较小时所得到的效果比较好^[90]。因此,在对地面的外场观察测量以及采样分析依然是探究沙尘颗粒的有效手段。

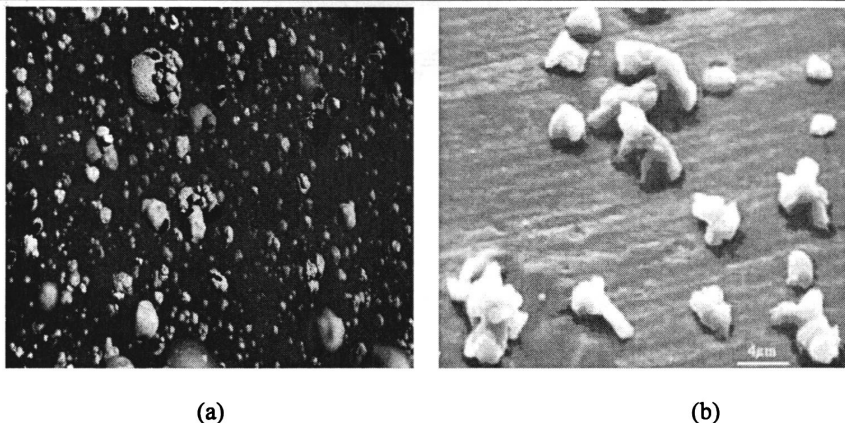


图 2.1 沙尘粒子形态图 ((a)毫米级沙尘颗粒 (b)电镜下的沙尘颗粒)

2.2 沙尘颗粒的粒子谱

在实际的大气中,气溶胶由各个粒径大小不一的沙尘粒子构成,并且其大小不均一,对于粒径不同的气溶胶粒子,其光学特性也不同。对于粒子群,粒径尺度分布繁杂并且不具有一定的稳定性,因此需要考虑用一种粒子分布函数来表示气溶胶粒子的实际分布,从而通过积分得到整体气溶胶的光学特性。另外,各个地区颗粒物的尺寸大小及其分布情况存在极大的差别。鉴于此,常应用粒谱分布来表示颗粒尺寸的分布情况。粒谱分布是沙尘气溶胶的一个重要物理特征。粒子谱分布指的是在不同的粒子半径范围内所含有的粒子数量,通常采取现场采样并利用激光粒度仪进行测量,也有部分学者利用计算机图像处理方法或激光雷达反演技术来获取。

在具体研究中,通常利用一些经验公式来描述谱分布,常用的气溶胶粒径谱分布主要有 6 种^[71-73]:均匀分布、指数分布、麦克斯韦分布、瑞利分布、正态分布、对数正态分布,其表达式分别如下:

均匀分布:

$$p(r) = 1/2a, 0 < r < 2a \quad (2-1)$$

指数分布:

$$p(r) = \frac{1}{a} e^{-r/a}, r > 0 \quad (2-2)$$

麦克斯韦分布:

$$p(r) = \frac{\sqrt{2}}{\alpha^3 \sqrt{\pi}} r^2 e^{-r^2/2\alpha^2}, r \geq 0 \quad (2-3)$$

瑞利分布:

$$p(r) = \frac{r}{\alpha^2} e^{-r^2/2\alpha^2}, r \geq 0 \quad (2-4)$$

正态分布:

$$p(r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-(r-a)^2/2\sigma^2}, -\infty < r < +\infty \quad (2-5)$$

对数正态分布:

$$p(r) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln r - \nu)^2 / 2\sigma^2}, r > 0 \quad (2-6)$$

其中 ν 、 σ 是 $\ln r$ 的均值和标准方差, r 为沙粒半径, a 为沙粒的平均半径, $\alpha = \frac{a}{\sqrt{\pi/2}}$, 为了

确保 (2-6) 中不会出现负值, 选择 $\sigma/a \approx 4$ 。

另外, 据成天涛等人^[88]基于春季内蒙古浑善达克沙地的实测结果, 观测期间, 在强沙尘暴过程中, 平均沙尘数浓度达 1079cm^{-3} ; 扬沙天气时, 相比沙尘暴天气时, 其沙尘粒子数浓度相对要小得多; 而在晴天时, 大气中的沙尘粒子数浓度不超过 50cm^{-3} 。小粒子占沙尘绝大多数, 沙尘天气半径小于等于 $4.0\mu\text{m}$ 的粒子数浓度占到总浓度的 93.7%。沙尘数浓度较大时, 粒子谱分布为双峰, 而较小时却为单峰。由此可见这一问题的复杂性。

2.3 本章小结

本章节中我们根据已有文献总结出沙尘气溶胶的基本物理性质: 即沙尘粒子从外形来看是不规则的, 其成分主要有 Na、Mg、Al、Si、K、Ca 和 Fe, 其他的地壳元素 (如 Ni、Ti 和 Mn 等) 相对较少。并给出常用的 6 种气溶胶粒径谱分布: 均匀分布、指数分布、麦克斯韦分布、瑞利分布、正态分布、对数正态分布, 为后续章节对沙尘暴中颗粒粒径分布形式对电磁波衰减过程的影响研究提供理论基础。

第三章 球形颗粒物电磁散射性质求解的 Rayleigh 近似

散射现象,是指电磁波束在真空介质中传播时其强度和极化态并不会发生任何明显的改变,而当电磁波束在大气中传播时,一旦遇到空气分子、气溶胶、沙粒等悬浮颗粒,入射电磁波的部分能量会从这些颗粒上向四周分散传播的现象。沙尘暴对电磁波传播的影响实际上是众多沙粒对电磁波散射、吸收作用的合效应,因此就单个沙粒对电磁波传播过程的散射作用的研究是沙尘暴系统对电磁波传播影响研究的基础。关于沙尘暴对微波传播过程的影响,其实质是由许多沙粒组成的沙粒系对电磁波的散射与吸收的共同作用的影响,因此,对于研究单颗沙粒对微波传播过程的散射作用是沙尘暴系统对微波传播过程影响的基础性研究。在对不带电小沙粒电磁散射问题进行求解时,通常运用 Rayleigh 近似直接求解。Rayleigh 近似方法最早由 Rayleigh 于 1871 年提出,起初是被用于解释一些大气光学现象。现在,该理论已被广泛用于对球形颗粒的电磁散射特性进行求解。这一方法的理论基础是:在沙粒粒径小于 0.05 倍入射波波长的情况下,可以忽略沙粒内部电磁场的变化,用静电学的方法求解沙粒内部电场,进而求得颗粒物散射场。在求解小粒子电磁散射性质方面,与基于波动方程解的 Mie 理论相比, Rayleigh 近似解具有非常显著的优点。

对于带电小沙粒电磁散射问题的求解,2005 年,周又和教授课题研究小组^[91]等首次给出了局部带电沙粒对电磁波衰减作用的预测模型和方法。他们认为:局部带电的球形沙粒带电对电磁波的衰减作用受到带电范围、电荷量的影响。当面电荷密度一定时,沙粒半球带电使得衰减最强,当带电范围大于半球时,尽管带电量相应的增加了,然而衰减系数却减小,且随着带电范围增加衰减系数逐渐减小;当整个沙粒均匀带电时,其衰减系数与不带电时的衰减系数相同。如果考虑风沙静电场的作用时,变化规律会如何?

为了解决以上问题,在本章中,我们先推导出电磁波在沙粒表面的极化电荷,然后计算了局部带电球形颗粒的散射截面、吸收截面以及消光截面。并试着对电磁波对局部带电沙粒的散射机理进行解释。

3.1 基本物理模型

3.1.1 风沙静电场作用下沙粒表面极化电荷

已有研究表明:风沙静电场方向向上,平均静电场强度最高可达 200kV/m,瞬时值甚至可超过 2500kV/m^[92, 93]。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 3.1 所示,与 Zhou 等人^[18]相同,将沙粒处理为均质球形粒子^[94],假定沙粒半径为 R ,其介电常数为 ϵ_1 ,相对真空的介电常数为 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 。电荷分布函数为 $F(\theta, \varphi)$, θ, φ 的定义同球坐标系的基矢量定义。

在风沙静电场 E_e 作用下,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 ,其与电场的关系为 $E = -\nabla \phi$, ∇ 和 ∇^2 分别为球坐标系下的梯度算子和 Laplace 算子。由静电学知识,颗粒内外电势表达式可用 Legendre 函数表示为:

$$\phi_1 = \sum_n a_n r^n P_n(\cos \theta) \quad (3-1)$$

$$\phi_2 = \sum_n (c_n r^n + d_n r^{-(n+1)}) P_n(\cos \theta) \quad (3-2)$$

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, 同文献[18]:

$$r = R: \phi_1 = \phi_2, \epsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} - \epsilon_0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} = \sigma_1 H_{(\theta-\theta_0)} \quad (3-3)$$

$$r \rightarrow \infty: E = E_e z = r E_e \cos \theta - \theta E_e \sin \theta \quad (3-4)$$

式中 ϵ_0 为背景介质的介电常数, 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:

$$F(\theta, \varphi) = H_{(\theta-\theta_0)} = \begin{cases} 1, & \theta \leq \theta_0 \\ 0, & \theta > \theta_0 \end{cases} \quad (3-5)$$

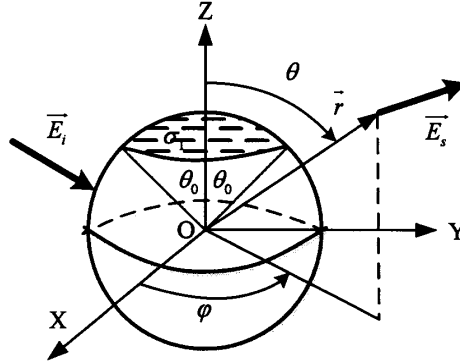


图 3.1 带电沙粒在电磁波入射下的示意图

按照与文献[18]最终可得颗粒内外电势分别为:

$$\phi_1 = \frac{\sigma_1 R}{\epsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - \frac{3}{\epsilon_r + 2} E_e r \cos \theta \quad (3-6)$$

$$\phi_2 = \frac{\sigma_1 R^2}{r \epsilon_0} H_{(\theta-\theta_0)} - E_e r \cos \theta + \frac{\epsilon_r - 2}{\epsilon_r + 2} \frac{E_e R^3 \cos \theta}{r^2} \quad (3-7)$$

粒子内部电场为:

$$\begin{aligned} E_1 = -\nabla \phi_1 &= \frac{3E_0 \cos \theta}{\epsilon_r + 2} \mathbf{r} - \left[\frac{\sigma_1 R}{r \epsilon_0} \delta_{(\theta-\theta_0)} + \frac{3E_0 \sin \theta}{\epsilon_r + 2} \right] \boldsymbol{\theta} \\ &= \frac{3}{\epsilon_r + 2} E_e \mathbf{x} + \frac{\sigma_1 R}{r \epsilon_0} \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (3-8)$$

式中, 粗体表示矢量, $\delta_{(\theta-\theta_0)} = dH_{(\theta-\theta_0)} / d\theta$, $\mathbf{x} = \sin \theta \cos \varphi \mathbf{r} + \cos \theta \cos \varphi \boldsymbol{\theta} - \sin \varphi \boldsymbol{\phi}$ 。

球内极化强度为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \lambda_e \epsilon_0 E_1 \\ &= \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} 3E_e \epsilon_0 \mathbf{x} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{r \epsilon_0} \sigma_1 R \delta_{(\theta-\theta_0)} \boldsymbol{\theta} \end{aligned} \quad (3-9)$$

据此, 可得沙粒表面极化电荷面密度为:

$$\begin{aligned}\sigma_p &= \mathbf{r} \cdot \mathbf{P} \\ &= \mathbf{r} \cdot \left[\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} 3E_0 \varepsilon_0 (\cos \theta \mathbf{r} - \sin \theta \boldsymbol{\theta}) + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_0 r} \sigma_1 R \delta_{(\theta - \theta_0)} \boldsymbol{\theta} \right] \\ &= 3E_0 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \cos \theta\end{aligned}\quad (3-10)$$

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 120V/m, 电场方向向下^[1], 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。

3.1.2 带电小粒子电磁散射的 Rayleigh 近似

在此, 令频率为 f 的平面电磁波沿 z 轴方向入射, 极化方向沿 x 轴方向, 其对应入射波电场分量为:

$$\mathbf{E}_{in} = E_0 e^{ikr \cos \theta} \mathbf{x} \quad (3-11)$$

其中, $\mathbf{x}$ 是单位基矢量, 其与球坐标系基矢量 $\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\phi}$ 间有如下关系: $\mathbf{x} = \sin \theta \cos \phi \mathbf{r} + \cos \theta \cos \phi \boldsymbol{\theta} - \sin \phi \boldsymbol{\phi}$; $k = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ 为真空中的波数 (μ_0 为沙粒的磁导率, $\omega = 2\pi f$ 为入射波的角频率)。在本论文中, 我们采用下标 “in”: 入射场分量, 下标 “s”: 散射场分量, 下标 “1”: 沙粒内部场, 下标 “2”: 沙粒外部场, 外部场包括入射场与沙粒的散射场两部分。在满足 Rayleigh 近似的条件下, 可以忽略入射波的 $e^{ikr \cos \theta}$ 项, 将沙粒附近的入射场视为均匀场, 此时可以利用静电学方法来求解沙粒内部电场。因此 (3-11) 式所表示的入射场可改写为:

$$\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{x} \quad (3-12)$$

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 $\sigma = \sigma_1 H_{(\theta - \theta_0)} + \sigma_p$ 。

在入射波作用下局部带电小粒子内外电势满足的边界条件变为:

$$r = R: \phi_1 = \phi_2, \varepsilon_1 \frac{\delta \phi_1}{\delta r} - \varepsilon_0 \frac{\delta \phi_2}{\delta r} = \varepsilon_1 H_{\theta - \theta_0} + \sigma_p \quad (3-13)$$

为了计算的方便, 令 $\sigma_p = \sigma_2 \cos \theta$, 为环境电场对带电沙粒的极化作用产生的极化电荷密度,

其中 $\sigma_2 = 3E_0 \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2}$ 。

重新求解拉普拉斯方程, 可得颗粒内外电势分别为:

$$\phi_1 = \frac{\sigma_1 R}{\varepsilon_0} H_{(\theta - \theta_0)} - \frac{3}{\varepsilon_r + 2} E_0 r \cos \theta \quad (3-14)$$

$$\phi_2 = \frac{\sigma_1 R^2}{r \varepsilon_0} H_{(\theta - \theta_0)} - E_0 r \cos \theta + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \frac{E_0 R^3 \cos \theta}{r^2} \quad (3-15)$$

由于电场为其对应电势的梯度的相反数, 因此由球体内部电势可得到颗粒内部电场强度为:

$$E_1 = -\nabla\phi_1 = \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \mathbf{x} + \frac{\sigma_1 R}{r\varepsilon_0} \delta_{(\theta-\theta_0)} \theta \quad (3-16)$$

球内极化强度为:

$$\mathbf{p} = \frac{(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{\varepsilon_r + 2} \mathbf{x} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{r} \sigma_1 R \delta_{(\theta-\theta_0)} \theta \quad (3-17)$$

将 $\theta = \cos\theta \cos\varphi \mathbf{x} + \cos\theta \sin\varphi \mathbf{y} - \sin\theta \mathbf{z}$ 代入上式, 进而可得球内总电偶极矩为:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^R \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \mathbf{p} r^2 \sin\theta dr d\theta d\varphi \\ &= \int_0^R \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta \left[\frac{(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{(\varepsilon_r + 2)} \mathbf{x} + \frac{\sigma_1 R (\varepsilon_r - 1)}{r} \delta_{(\theta-\theta_0)} \right. \\ &\quad \left. (\cos\theta \cos\varphi \mathbf{x} + \cos\theta \sin\varphi \mathbf{y} - \sin\theta \mathbf{z}) \right] dr d\theta d\varphi \quad (3-18) \\ &= \frac{(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{(\varepsilon_r + 2)} \frac{4}{3} \pi R^3 \mathbf{x} - \pi R^3 \sigma_1 (\varepsilon_r - 1) \sin\theta_0 \mathbf{z} \end{aligned}$$

从而可得颗粒散射场强为:

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{\exp(ikr)}{-ikr} \frac{ik^3}{4\pi\varepsilon_0} (-P_0\theta - P_\varphi\varphi) \\ &= \exp(ikr) \frac{k^2 \pi R^3}{4\pi\varepsilon_0 r} \left\{ \begin{aligned} &\left[\frac{4(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{3(\varepsilon_r + 2)} \cos\theta \cos\varphi + \sigma_1 (\varepsilon_r - 1) \sin\theta_0 \sin\theta \right] \theta \\ &- \frac{4(\varepsilon_r - 1)(3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{3(\varepsilon_r + 2)} \sin\varphi\varphi \end{aligned} \right\} \quad (3-19) \end{aligned}$$

按照文献[18]给出的方法, 最终可得粒子散射截面为:

$$\sigma_s = \frac{8\pi k^4 R^6}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{\pi}{6} k^4 R^6 \sigma_1^2 \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0 \quad (3-20)$$

粒子吸收截面为:

$$\sigma_a = k\varepsilon_r \int_0^R \int_0^\pi \int_0^{2\pi} r^2 \sin\theta |E_m|^2 / |E_i|^2 dr d\theta d\varphi = \frac{4\pi R^3 k\varepsilon_r}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right| \quad (3-21)$$

则粒子的消光截面为:

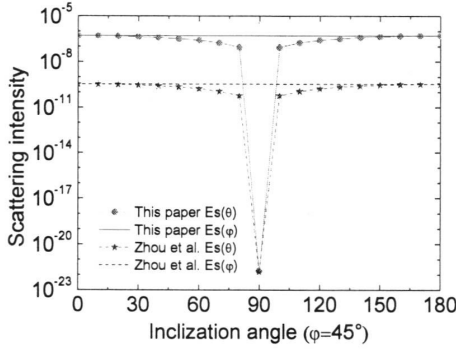
$$\begin{aligned} \sigma_{ext} &= \sigma_s + \sigma_a \\ &= \frac{8\pi k^4 R^6}{27\varepsilon_0^2 E_0^2} \left| \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} \right|^2 (3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{\pi}{6} k^4 R^6 \sigma_1^2 \sin^2 \theta + \frac{4\pi R^3 k\varepsilon_r}{3E_0^2} \left| \frac{3\varepsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_0} \right| \quad (3-22) \end{aligned}$$

3.2 数值仿真与分析

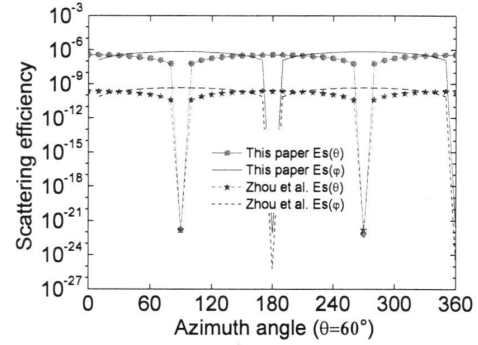
本节中我们将利用本文推导出的散射场强表达式和 Zhou^[18]等人推导出的散射场强表达式分别对单个沙粒内外的散射场强分布情况进行计算和比较分析, 并计算风沙静电场作用下带电小粒子对电磁波的散射和衰减效率。计算中采用的参数如下: 入射波频率 $f = 9.4\text{GHz}$, 沙粒半径 $R = 40\mu\text{m}$, 相对介电常数为 $\varepsilon_r = 2.634 + 0.734i$, 表面电荷密度 $\sigma = -1\mu\text{C}/\text{m}^2$, 入射波电场强度分量振幅 $E_0 = 50\text{V}/\text{m}$, 环境电场强度 $E_e = 200\text{kV}/\text{m}$, 电荷分布角 $\theta_0 = 90^\circ$ 。在图中的坐

标注中, $(r-z)$ 为球坐标系中 θ 角变量, $(x-y)$ 为球坐标系中 φ 角变量。

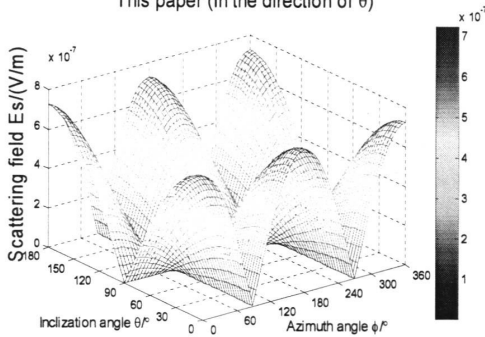
我们首先讨论了两种模型下颗粒散射场强分布规律, 计算结果如图 3.2 所示。如图所示, 由上文中, 在同一物理参数下, 当沙粒不带电时, 采用 Rayleigh 近似, 无论是考虑沿倾角 θ 方向还是沿方位角 φ 方向, 考虑环境电场的作用所得的结果远大于不考虑环境电场作用时的散射强度值, 约为 3 个数量级, 而散射场强的分布规律不变。因此, 在此基础上, 我们讨论沙粒带电后考虑环境电场的作用与不考虑环境电场作用时所得带电颗粒散射场强分布特点。



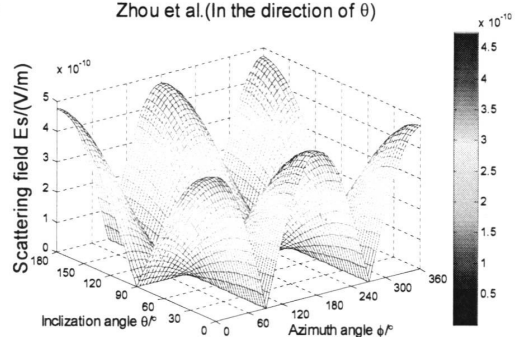
(a) 给定方位角 $\varphi = 45^\circ$



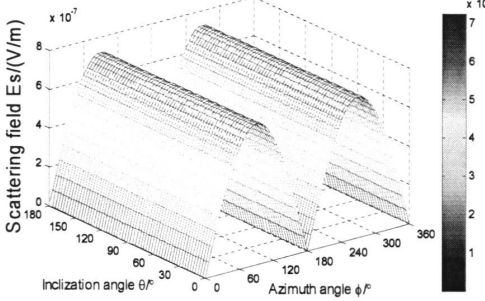
(b) 给定倾角 $\theta = 60^\circ$



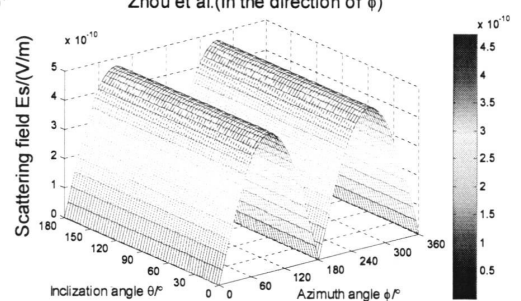
This paper (In the direction of θ)

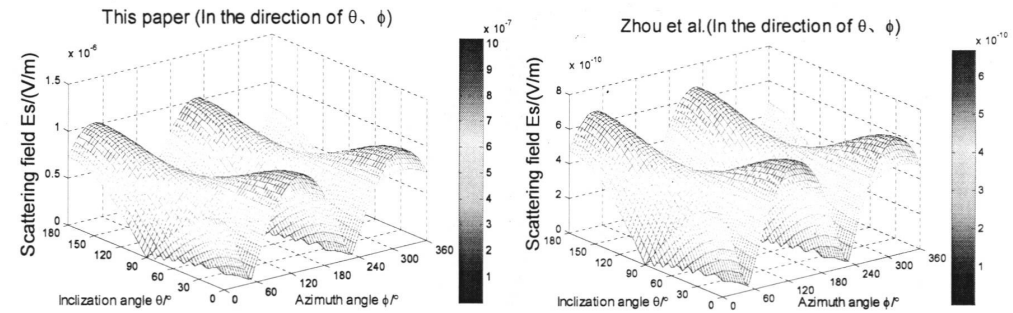


Zhou et al. (In the direction of θ)



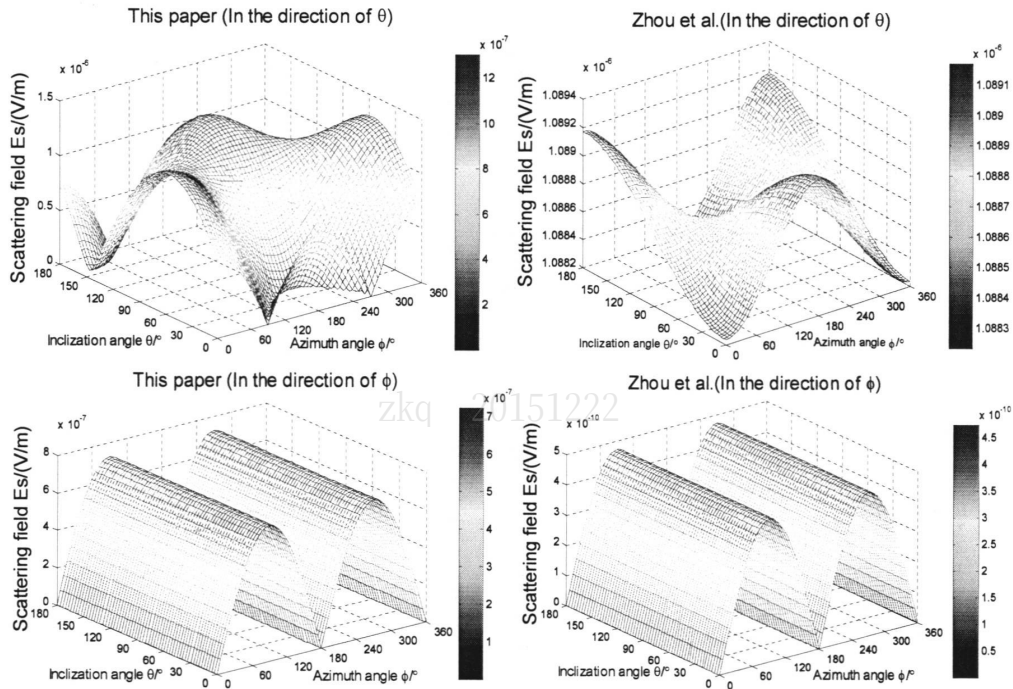
(c) 散射场强两角分量 (θ 、 φ) 强度的表面分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)



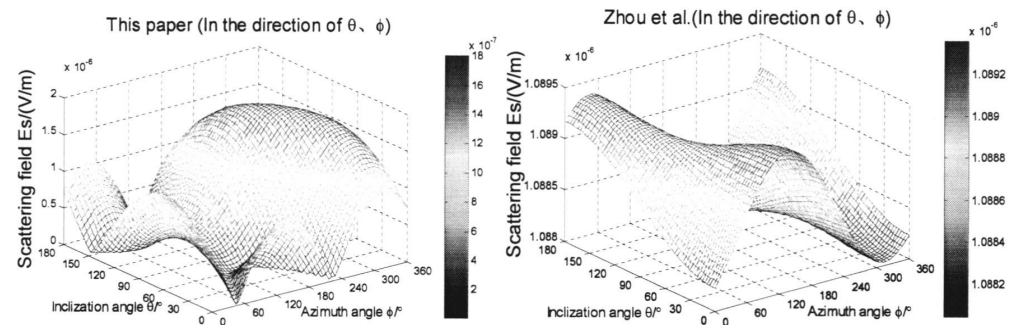


(d) 沙粒总散射场强度分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

图 3.2 不带电时散射场强度在沙粒表面分布情况示意图

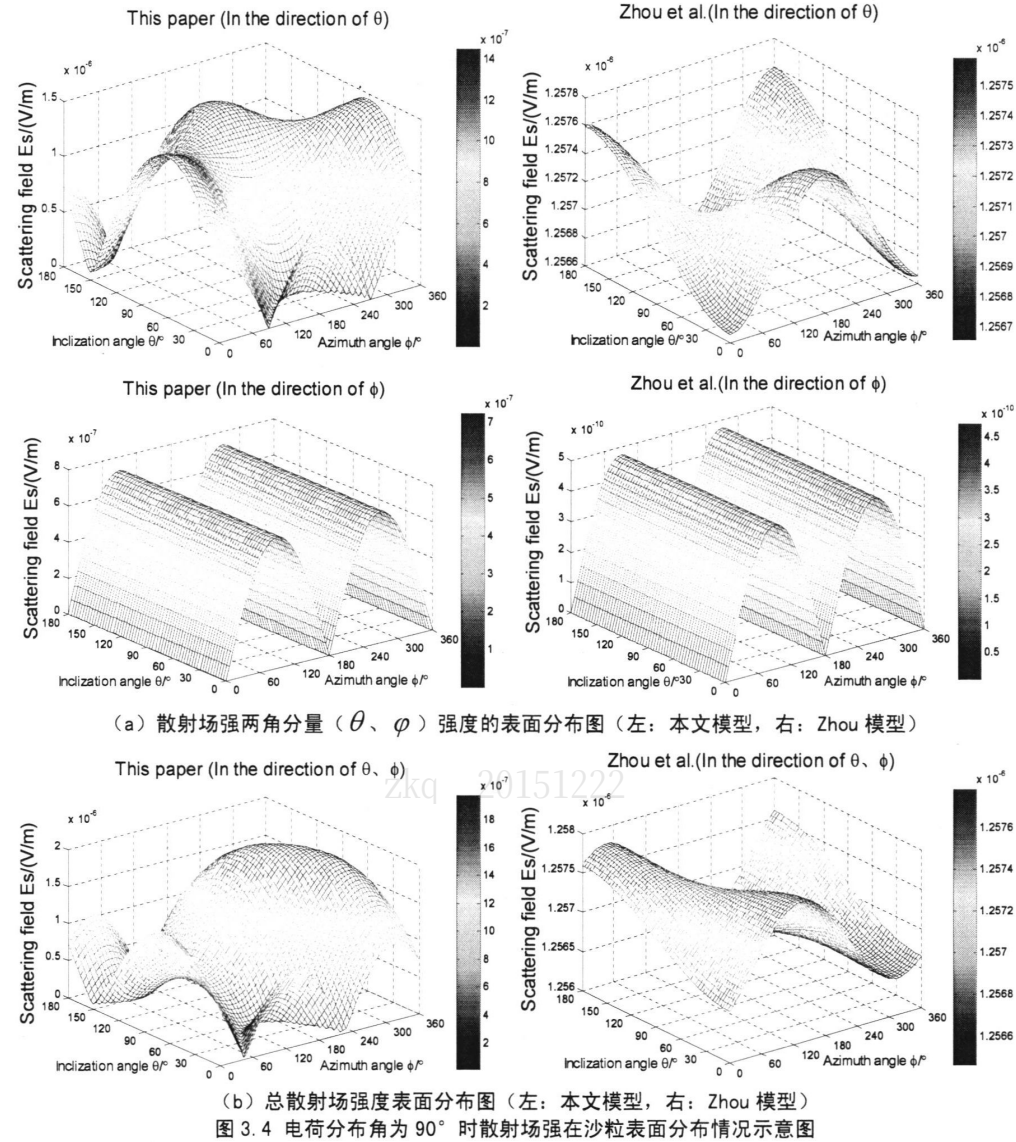


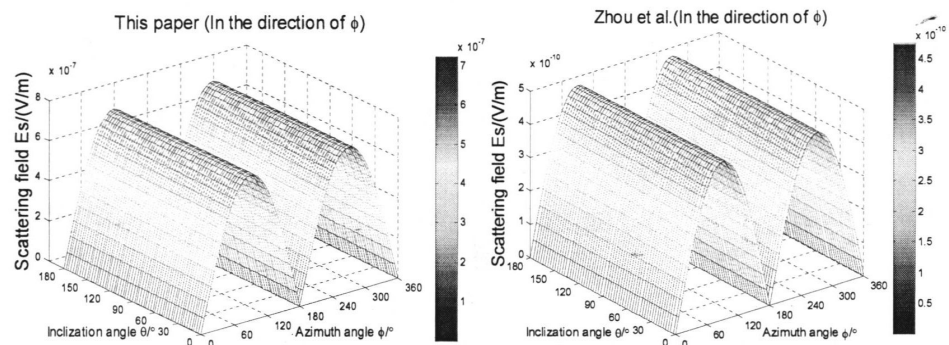
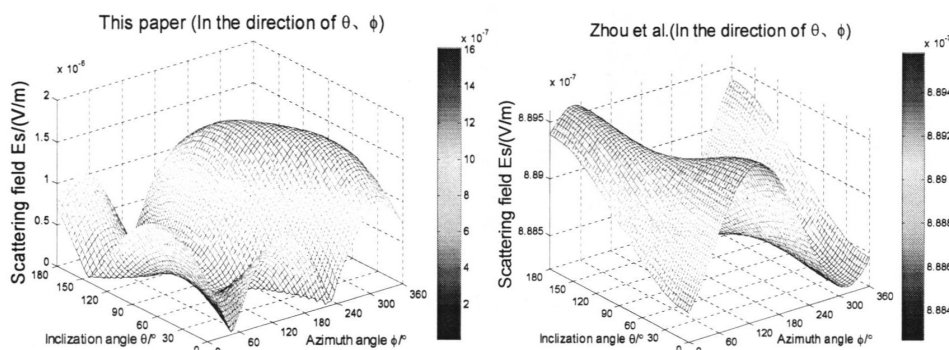
(a) 散射场两角分量 (θ 、 ϕ) 强度的表面分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)



(b) 总散射场强度表面分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

图 3.3 电荷分布角为 60° 时散射场强在沙粒表面分布情况示意图



(a) 散射场强两角分量 (θ 、 ϕ) 强度的表面分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

(b) 总散射场强度表面分布图 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

图 3.5 电荷分布角为 135° 时散射场强在沙粒表面分布情况示意图

图 3.3~3.5 中给出了沙粒局部带电时, 基于本文推导模型与 Zhou et al. 推导模型, 求解颗粒表面散射场强度两角分量分布规律的结果比较, 令 $\sigma = -1\mu\text{C}/\text{m}^2$, 电荷分布角分别选择为 60° 、 90° 、 135° , 其它物理参数不变。根据仿真计算结果图可得: 当沙粒带电后, 考虑风沙静电场的极化作用时, 沿着倾角 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。而沿着方位角 ϕ 方向上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 et al. 模型的计算结果 (约为 3 个量级)。两种模型下 (本文模型, 即考虑环境电场的作用; Zhou et al. 模型, 即不考虑环境电场作用), 随着电荷分布角的增大, 颗粒表面散射场强度大小呈正弦规律变化, 在电荷分布角为 90° 时达到最大值。可以看出, 环境电场 (风沙静电场) 对沙粒的散射场强分布规律影响明显。

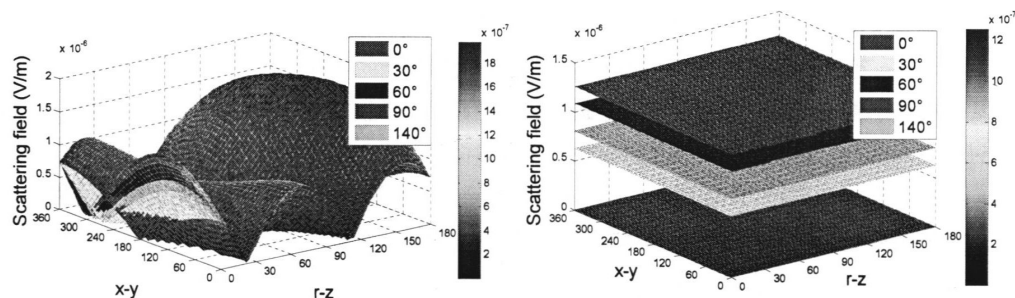


图 3.6 电荷分布角对局部带电沙粒的散射场强的影响 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

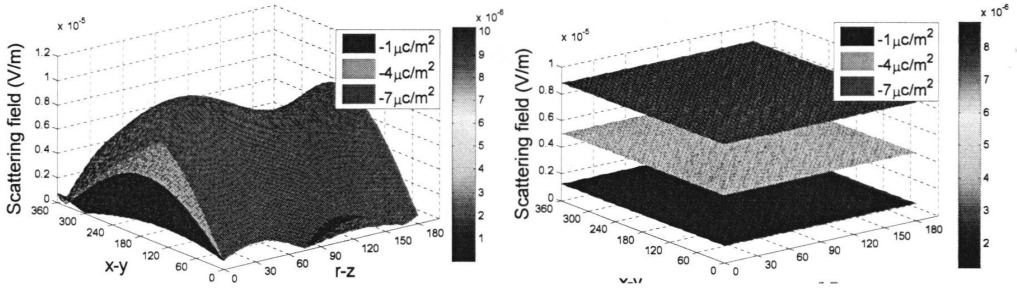


图 3.7 面电荷密度对局部带电沙粒的散射场强的影响 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

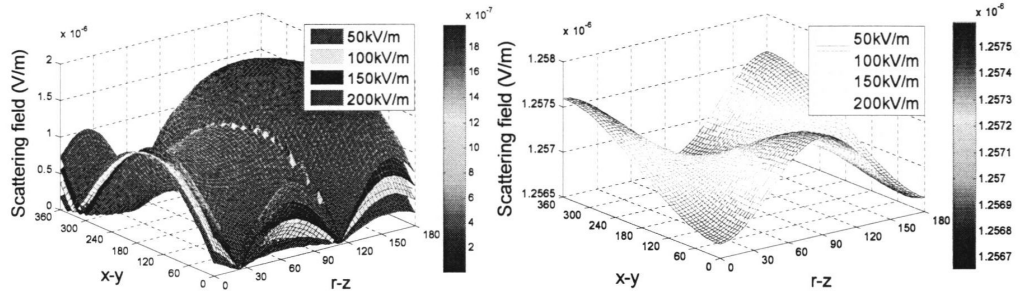


图 3.8 环境电场对局部带电沙粒的散射场强的影响 (左: 本文模型, 右: Zhou 模型)

图 3.6 中我们给出了电荷分布角取值为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 140° 时沙粒散射场强的空间分布图。由图可见, 对于两种模型, 当电荷分布角增大时, 散射场强度也随之增大, 当 $\theta_0 = 90^\circ$ 时, 散射场强达到最大, 且 $E_s(0^\circ) < E_s(30^\circ) < E_s(140^\circ) < E_s(60^\circ) < E_s(90^\circ)$ 。

图 3.7 中我们给出了两种模型下沙粒表面电荷密度 σ 分别取值 $-1\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-4\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-7\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时沙粒散射场强的空间分布, 取 $\theta_0 = 90^\circ$ 。由图可见, 对于两种模型, 随着面电荷密度的增加, 电荷分布区域的散射场强度整体性均不断增加。

图 3.8 中我们给出了两种模型下沙粒环境电场 E_e 分别取值 $50\text{kV}/\text{m}$ 、 $100\text{kV}/\text{m}$ 、 $150\text{kV}/\text{m}$ 、 $200\text{kV}/\text{m}$ 时沙粒散射场强的空间分布。在 $\theta_0 = 90^\circ$ 时, 由图可见, 基于本文模型, 随着环境电场的增加, 散射场强度不断增加。而由 Zhou et al. 模型所得结果显示无论环境电场取何值, 其散射场强度不变, 说明 Zhou et al. 模型与环境电场无关。

3.4 本章小结

本章节中我们首先基于静电学理论求解了风沙静电场作用下带电沙粒表面的极化电荷, 然后利用 Zhou 等人给出的求解局部带电小粒子电磁散射问题的瑞利近似, 推导了风沙静电场作用下局部带电小粒子的散射场强及其对电磁波的散射截面、吸收截面以及消光截面, 并通过数值仿真讨论了带电小粒子的散射场强及其电磁波衰减截面随表面电荷分布情况的变化规律。结果表明:

1. 当沙粒不带电时, 运用 Rayleigh 近似, 无论是考虑沿着倾角 θ 方向还是沿着方位角 φ 方向, 考虑环境电场的作用所得的结果远大于不考虑环境电场作用时的散射强度值, 而散射场强的分布规律不变。当沙粒带电后, 考虑风沙静电场的作用时, 沿着倾角 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。而沿着方位角 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 et al.模型的计算结果。

2. 在两种模型下，当电荷分布角增大时，颗粒表面散射场强度的大小也呈正弦规律变化，在电荷分布角为 90° 时达到最大值。考虑面电荷密度对其的影响时，对于两种模型，当面电荷密度增大时，电荷分布区域的散射场强度也持续增大。考虑环境电场的影响时，基于本文模型，随着环境电场的增加，散射场强度不断增加，而由 Zhou et al.模型所得结果显示无论环境电场取何值，其散射场强度不变。

zkq 20151222

第四章 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响

当电磁波束在大气中传播时,空气中悬浮的颗粒,如空气分子、气溶胶等,会使得入射电磁波的部分能量因为颗粒的散射作用而发生损失,还有一部分能量因为颗粒的吸收作用而转化为热能,这样便损耗了入射电磁波的能量。本章中我们将基于前一章节建立的理论,讨论带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响。同时也分析了沙尘带电对其雷达反射率的影响。

4.1 一些关键参量的推导

4.1.1 带电沙粒的微分散射截面

与散射场强相比,研究者们更关心的是微分散射截面的影响。媒质对入射电磁波的微分散射截面,即为单位立体角内散射波的辐射能量与通过单位面积的入射电磁波的能量比值,它反映了媒质对电磁波散射程度的角分布。对于在一些实际的应用中,它具有极其重要的价值,如:微分散射截面在遥感测量沙尘暴、云雨天气都有着重要作用;在进行雷达测量中,可以通过对雷达目标有效截面的测量,然后通过雷达接收机进行计算,从而得出雷达探测的结果,并探测出目标的空间位置和运动状态。本节中我们将基于 Rayleigh 近似理论给出考虑环境电场的作用与不考虑环境电场作用时带电沙粒的微分散射截面解析表达式。

设定 σ_d 为沙粒的微分散射截面,由其定义式:

$$\sigma_d = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |E_s|^2}{|E_m|^2} \quad (4-1)$$

可以看出,若要求得沙粒的微分散射截面,只需得到沙粒远场区散射场强 E_s 及入射场强度 E_m 。

对于 Rayleigh 近似下的散射场,已有文献中[18]不考虑环境电场作用时所得的沙粒微分散射截面为:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |E_s|^2}{|E_m|^2} \\ &= \frac{k^4}{(4\pi\epsilon_0)^2} \left[\left(4\pi\epsilon_0 R^3 \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right| \cos\theta \cos\varphi + \frac{\sigma(\epsilon_r - 1)}{E_0} \pi R^3 \sin\theta_0 \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(4\pi\epsilon_0 R^3 \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right| \sin\varphi \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4-2)$$

我们考虑环境电场的作用,其散射场强如上节(3-19)式所示,将其代入可得:

$$\sigma_d = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |E_s|^2}{|E_{in}|^2}$$

$$= \frac{k^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 E_0^2} \left\{ \left[\frac{4}{3} \pi R^3 \frac{(\epsilon_r - 1)(3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{\epsilon_r + 2} \cos \theta \cos \varphi + \pi \sigma_1 R^3 (\epsilon_r - 1) \sin \theta_0 \sin \theta \right]^2 + \left[-\frac{4}{3} \pi R^3 \frac{(\epsilon_r - 1)(3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2)}{\epsilon_r + 2} \sin \varphi \right]^2 \right\} \quad (4-3)$$

可见二者存在极大地差别。

4.1.2 带电沙粒的散射效率、吸收效率及衰减效率

电磁波的衰减系数也叫消光系数，直接反映了沙粒对入射电磁波的衰减能力或对电磁波的衰减程度。在单次散射近似条件下，根据消光系数也可以反推出入射波照射区域的颗粒数目，这一点在某些颗粒流浓度在线监测系统中有着非常重要的应用^[95]。

如第三章中所描述，沙粒的消光截面 σ_{ext} 为其散射截面 σ_{sca} 与吸收截面 σ_{abs} 之和，即：

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sca} + \sigma_{abs} \quad (4-4)$$

一般情况下，对于沙粒对电磁波的衰减作用，我们采用其消光效率（即：衰减效率）来表达，即为：沙粒的消光效率为其消光截面与其几何截面的比值，如下所示：

$$Q_{ext} = \frac{\sigma_{ext}}{S} = \frac{\sigma_{ext}}{\pi R^2} \quad (4-5)$$

将沙粒的几何截面积 πR^2 将上节（3-20~3-22）式进行归一化处理，便得到颗粒的散射效率、吸收效率及其消光效率，分别为：

$$Q_s = \frac{8k^4 R^4}{27\epsilon_0^2} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right| (3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{6} k^4 R^4 \sigma_1^2 \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r E_0} \right| \sin^2 \theta_0 \quad (4-6)$$

$$Q_a = \frac{4Rk\epsilon_r}{3\epsilon_0^2} \left| \frac{3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_0} \right|^2 \quad (4-7)$$

$$Q_{ext} = \frac{8k^4 R^4}{27\epsilon_0^2} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2 (3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{6} k^4 R^4 \sigma_1^2 \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r E_0} \right|^2 \sin^2 \theta_0 + \frac{4Rk\epsilon_r}{3\epsilon_0^2} \left| \frac{3\epsilon_0 E_0 - \sigma_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_0} \right|^2 \quad (4-8)$$

4.1.3 带电沙尘暴对电磁波的衰减系数

对于颗粒系统，通常使用衰减系数来反映沙粒系统对电磁波的衰减作用。可将其定义为：沙粒消光截面与沙粒数目 N 的乘积。当在沙粒系统中，沙尘颗粒的粒径均一时，其衰减系数可表达为：

$$A = \sigma_{ext} N \quad (4-9)$$

即电磁波的衰减系数为沙粒消光截面与颗粒数目的乘积。一般情况下，沙尘暴或者扬沙天气过程是由空中悬浮的多个沙粒组成的宏观系统，对于多分散颗粒系统，其可由下式获得：

$$A = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(r) N(r) dr \quad (4-10)$$

其中 $\sigma_{ext}(r)$ 表示半径为 r 的局部带电颗粒物的消光截面, $N(r)dr$ 表示沙尘暴或颗粒系统中粒径位于 $[r, r+dr]$ 范围的沙尘颗粒数目。

然而, 沙尘暴等环境中沙粒粒径并不是均一的, 一般情况下, 沙尘暴中沙尘粒子的粒径在 0.002-0.2mm 之间, 其分布满足诸如正态分布、瑞利分布、均匀分布等。在已有研究中, 在沙尘暴时, 沙粒粒径的分布形式偏向为对数正态分布^[96], 本节中, 我们考虑沙粒粒径分布为正态分布(下节中我们将对沙粒粒径分布形式进行讨论), 不同半径颗粒的数目浓度分布函数为:

$$N(r) = N_0 p(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(D-r_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4-11)$$

这里 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, $r_m = -2.96$ 为均值, $\sigma = 0.38$ 是标准方差。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 来描述沙尘暴的数目浓度, 表达式如下^[97]:

$$N_0 = \frac{15}{8.868 \times 10^3 \pi V_b \int_0^{\infty} r^2 p(r) dr} \quad (4-12)$$

下一小节中我们将基于 (2.1-2.6) 式讨论沙尘暴中颗粒粒径分布形式对电磁波衰减过程的影响。

在实际问题中, 沙尘粒子的介电常数与很多因素有关, 其中, 含水量对其的影响最为明显。一般情况下, 我们采用等效介质理论来计算湿沙的介电常数, 用如下公式表示^[98]:

$$\epsilon_m^* = \epsilon_s \left[1 + \frac{3p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)}{1 - p(\epsilon_w - \epsilon_s)/(\epsilon_w + 2\epsilon_s)} \right] \quad (4-13)$$

其中 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。

基于以上各式我们即可对沙尘暴中电磁波强度的衰减程度进行计算分析与预测。

4.1.4 带电沙尘暴的雷达反射率

雷达反射率是空间单位体积中的大气颗粒物质对雷达发射的微波的总后向散射截面, 其定义为: $\eta = \sum_{i=1}^N \sigma_i$, σ_i 是半径为 r_i 颗粒后向散射截面, N 是单位体积内颗粒个数。考虑到颗粒粒径非均一, 因此引入粒径分布函数 $n(D)$, 其含义为颗粒尺寸位于 $D \sim D+dD$ 之间的粒子数目之和。那么雷达反射率的积分表达式为:

$$\eta = \int_0^{\infty} n(D) \sigma(D) dD \quad (4-14)$$

可见只要已知颗粒粒径分布函数及对应颗粒的后向散射截面, 即可得到粒子群体的雷达反射率。实际上作为雷达反演本身就是个反问题, 也就是说我们已知雷达反射率及颗粒微分散射截面, 通过上式反演颗粒粒径谱, 这也是气象雷达测量雨滴谱的基本原理。

在上节中, 我们给出了在环境电场作用下带电沙粒的微分散射截面, 本节中我们给出了沙粒不带电、沙粒带电不考虑环境电场作用及考虑环境电场作用时带电小球体颗粒后向散射截面表达

式分别如下：

(1) 当沙粒不带电时及沙粒带电不考虑环境电场的作用：

$$\sigma(D)_1 = 4\pi \left(\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |E_s|^2}{|E_m|^2} \right) = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \quad (4-15)$$

(2) 沙粒带电并考虑环境电场的作用：

$$\sigma(D)_2 = 4\pi \left(\lim_{r \rightarrow \infty} \frac{r^2 |E_s|^2}{|E_m|^2} \right) = \frac{\pi^5 D^6}{9\lambda^4 \epsilon_0^2} \left| \frac{(\epsilon_r - 1) \left(3\epsilon_0 - \frac{\sigma_2}{E_0} \right)}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \quad (4-16)$$

我们将其代入雷达反射率表达式，并进行简化：

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \int_0^\infty n(D) \sigma(D) dD = \int_0^\infty n(D) \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2 dD \\ &= \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \int_0^\infty D^6 n(D) dD \\ &= \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \times Z = K_1 \times Z \end{aligned} \quad (4-17)$$

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \int_0^\infty n(D) \sigma(D) dD \\ &= \int_0^\infty n(D) \frac{\pi^5 D^6}{9\lambda^4 \epsilon_0^2} \left| \frac{(\epsilon_r - 1) \left(3\epsilon_0 - 3E_e \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{(\epsilon_r + 2)E_0} \right)}{\epsilon_r + 2} \right|^2 dD \\ &= \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{(\epsilon_r - 1) \left(1 - \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{E_e}{E_0} \right)}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \int_0^\infty D^6 n(D) dD \\ &= \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{(\epsilon_r - 1) \left(1 - \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{E_e}{E_0} \right)}{\epsilon_r + 2} \right|^2 \times Z = K_2 \times Z \end{aligned} \quad (4-18)$$

这里 $\sigma_2 = 3E_e \epsilon_0 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}$ 。我们定义 $K_1 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right|^2$ ， $K_2 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{(\epsilon_r - 1) \left(1 - \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{E_e}{E_0} \right)}{\epsilon_r + 2} \right|^2$ ，

$Z = \int_0^\infty D^6 n(D) dD$ 为雷达反射率因子。

由此可见,如果可以通过其他方法获得雷达反射率因子 Z ,代入上式即可获得环境电场强度 E_e 。

4.2 数值仿真与分析

4.2.1 带电沙粒的微分散射截面

本节中我们拟对不同的沙粒电荷分布角、面电荷密度下带电沙尘颗粒微分散射截面的空间分布情况进行研究分析。其中图 4.1 是沙粒不带电时的微分散射截面。当沙粒不带电时,考虑环境电场作用与不考虑环境电场作用时的微分散射截面分布规律相同,但其微分散射截面值远大于不考虑环境电场时所对应值,环境电场的极化作用可以增强沙粒的微分散射截面。

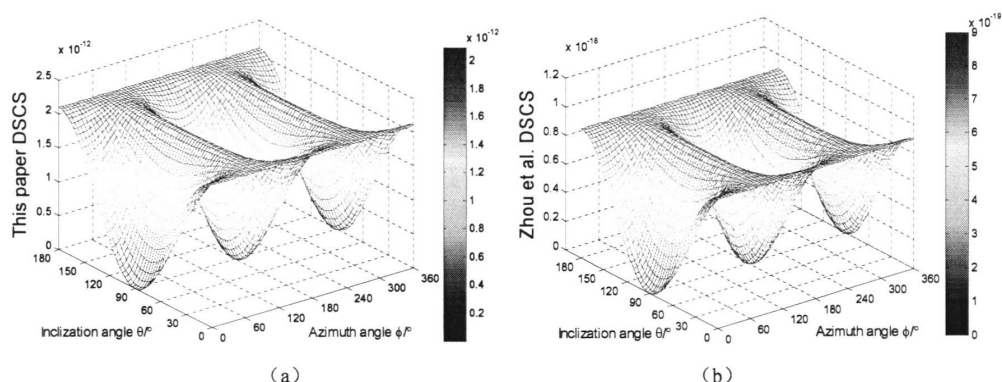


图 4.1 不带电沙粒的微分散射截面 ((a) 本文模型解 (b) Zhou et al. 模型解)

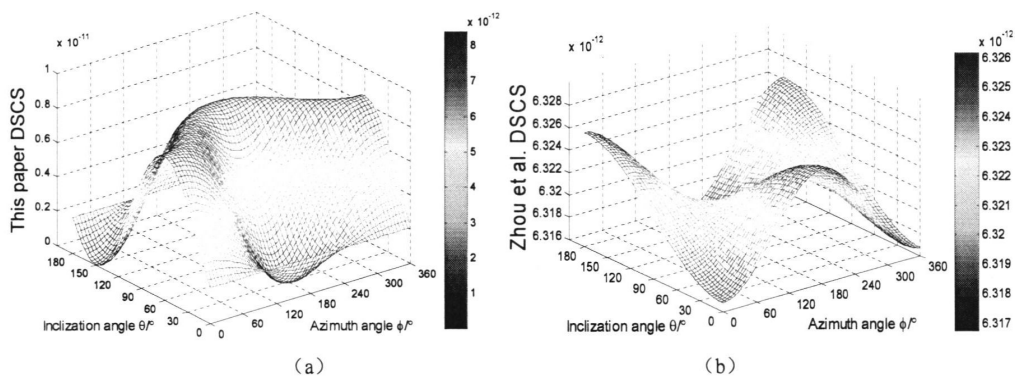


图 4.2 局部带电沙粒的微分散射截面 ((a) 本文模型解 (b) Zhou et al. 模型解)

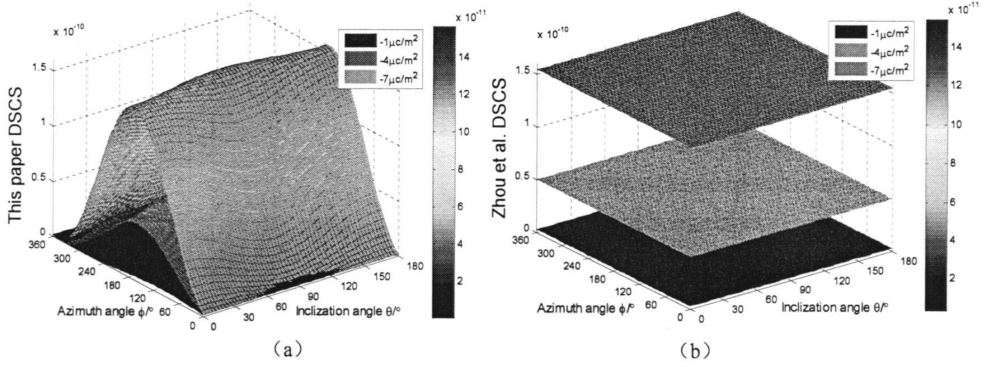


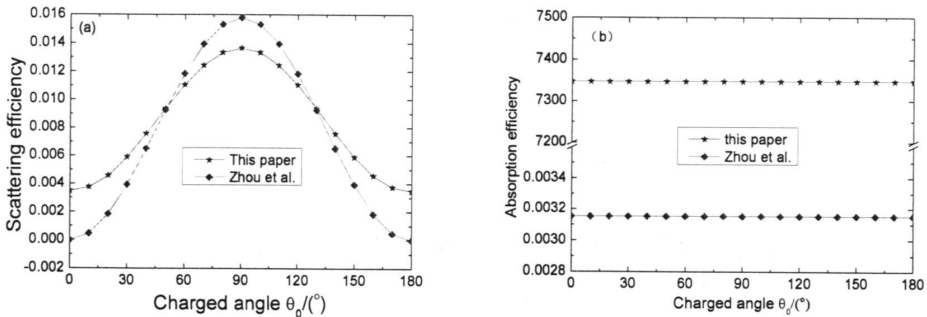
图 4.3 面电荷密度对局部带电沙粒的微分散射截面的影响 ((a) 本文模型解 (b) Zhou et al. 模型解)

图 4.2 给出了电荷分布角为 90° 、面电荷密度为 $-1 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 时局部带电沙粒微分散射截面的空间分布图。由图可见，对于本文模型结果与 Zhou et al. 的模型结果，其局部带电沙粒的微分散射截面（本文用 DSCS 表示）与不带电沙粒的微分散射截面差异显著。沙粒局部带电时，不考虑环境电场的作用时（即 Zhou et al. 模型）微分散射截面在 φ 方向关于 180° 角对称，对于相同的 φ 其对应的微分散射截面相同，即沿着 θ 方向微分散射截面保持恒定。然而，在本文给出的模型，当在环境电场的作用下时，计算出的局部带电沙粒的微分散射截面结果与 Zhou et al. 模型的计算结果不同，如在 θ 、 φ 方向均不存在对称性，且其值大于 Zhou et al. 模型所对应的微分散射截面值，可见环境电场对带电沙粒的微分散射截面有明显的作用。

图 4.3 给出了电荷分布角为 90° ，面电荷密度为 $-1 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-4 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-7 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 时局部带电沙粒的微分散射截面的空间分布图。由图可见，在两种模型下，当面电荷密度增大时，沙粒微分散射截面均逐渐变大，考虑环境电场作用时，沙粒微分散射截面的空间分布变化明显。

4.2.2 带电情况对沙粒消光效率的影响

本节中我们讨论沙粒带电情况对其电磁波散射效率、吸收效率的影响，同时对是否考虑环境电场影响的两种结果进行比较。计算中选择沙粒粒径 $u = 40 \mu\text{m}$ ，相对介电常数为 $\epsilon_r = 2.634 + 0.734i$ ，表面电荷密度 $\sigma = -1 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 入射波频率 $f = 9.4 \text{GHz}$ ，入射波电场强度分量为 $E_0 = 50 \text{V}/\text{m}$ ，环境电场强度 $E_e = 20 \text{kV}/\text{m}$ ， $\theta = 60^\circ$ ， $\varphi = 45^\circ$ 。电荷分布角 $\theta_0 = 90^\circ$ 。如无特别说明，这些参数保持不变。



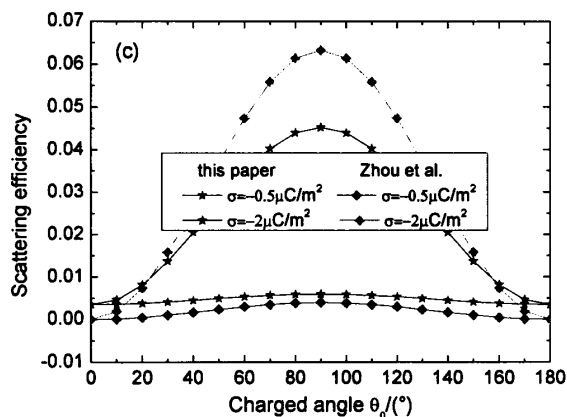


图 4.4 两种模型下电荷分布角对带电沙粒的 (a) 散射效率 (b) 吸收效率的影响 (c) 不同面电荷密度的影响

图4.4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(a)可知,当颗粒电荷分布角增大时,沙粒散射效率的变化为正弦函数规律,但是其吸收效率基本保持不变(如图(b))。通过数值仿真计算可得:在电荷分布角位于 $50^{\circ}\sim 130^{\circ}$ 范围内时,由本文推导模型所得的颗粒散射效率小于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值,而在此范围之外则恰好相反。进而分别对面电荷密度为 $-0.5\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-2\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,粒子散射效率随颗粒表面电荷分布角的变化进行分析,如图(c)所示,当面电荷密度为 $-0.5\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,由本文推导模型所得的颗粒散射效率大于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值;当面电荷密度为 $-2\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,在电荷分布角位于 $20^{\circ}\sim 160^{\circ}$ 范围内时由本文推导模型所得的颗粒散射效率小于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值,而在此范围之外则恰好相反,并且随着面电荷密度的增大,此范围逐渐增大。另外,当电荷分布角增大时,颗粒的吸收效率不变,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)。

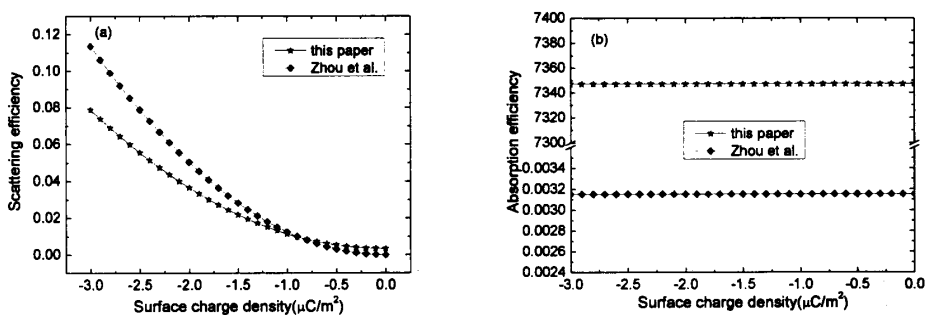


图 4.5 两种模型下沙粒面电荷密度对带电沙粒的 (a) 散射效率 (b) 吸收效率的影响

图4.5中讨论了两种模型下(考虑沙尘暴下环境电场作用及不考虑环境电场作用)沙粒表面电荷密度对带电沙粒散射效率和吸收效率的影响。由图(a)可知,随着面电荷密度的增加,沙粒散射效率呈指数增加,而其吸收效率基本保持不变(如图(b))。数值仿真结果表明:在沙粒面电荷密度值大于 $-0.9\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,由本文推导模型所得的颗粒散射效率小于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值,而在沙粒面电荷密度值小于 $-0.9\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,其结果恰恰相反。另外,颗粒的吸收效率不

随面电荷密度的变化而变化，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）。

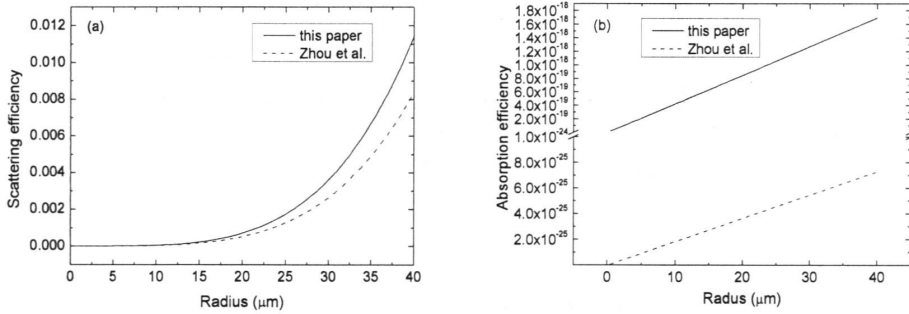


图 4.6 两种模型下沙粒粒径对带电沙粒的 (a) 散射效率 (b) 吸收效率的影响

图4.6 中讨论了两种模型下（考虑沙尘暴下环境电场作用及不考虑环境电场作用）沙粒粒径对带电沙粒散射效率和吸收效率的影响。由图(a)可知，随着沙粒粒径的增大，两种模型下的散射效率均呈指数形式增加，数值仿真结果表明：由本文推导模型所得的颗粒散射效率大于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值；对于颗粒的吸收效率，随着沙粒粒径的增加呈线性增加，由本文推导模型所得的颗粒的吸收效率较Zhou et al.模型下的计算结果的对应值大，约为6个数量级。

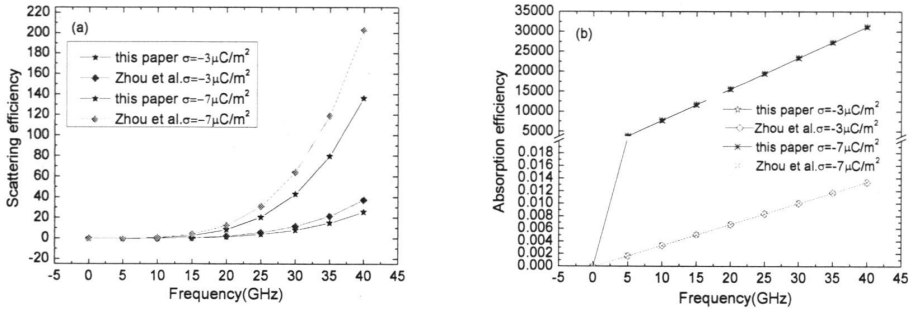


图 4.7 两种模型下入射波频率对带电沙粒的 (a) 散射效率 (b) 吸收效率的影响

由于入射波频率对沙粒电磁散射性质具有重要的影响。在此，由图4.7给出了当面电荷密度、给定电荷分布角不同时，入射波频率对带电沙粒散射效率、吸收效率的影响。这里，我们取 σ 分别为 $\sigma = -3\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $\sigma = -7\mu\text{C}/\text{m}^2$ 。由于在图4.4中我们发现，在电荷分布角 $\theta_0 = 90^\circ$ 时，带电沙粒的散射效率最大，因此，此处选择的电荷分布角为 $\theta_0 = 90^\circ$ 。由图可以看出，由本文推导的模型，在面电荷密度不同时，当入射波频率增大，沙粒散射效率也随之呈指数规律增加，但是，其吸收效率呈线性增大。对于Zhou et al.模型，当面电荷密度不同时，入射波频率对散射效率、吸收效率的影响呈现同样趋势。当入射波频率增大时，由本文推导出的模型所得的散射效率小于Zhou et al.推导出的模型计算结果所对应的值。另外，图4.7的结果亦表明：当频率不同时，面电荷密度均不会对带电沙粒对入射电磁波的吸收效率产生影响，但是由本文推导模型所得的颗粒的吸收效率远大于Zhou et al.模型下的计算结果的对应值。

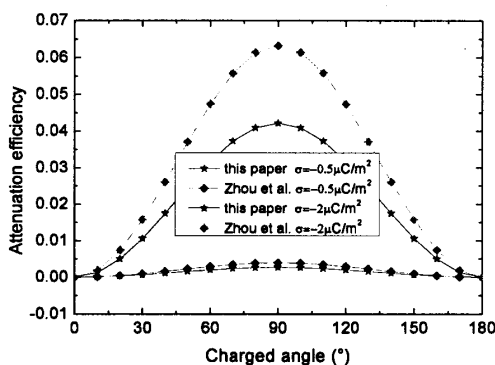


图 4.8 两种模型下电荷分布角对带电沙粒消光效率的影响

图 4.8 中讨论了环境电场即风沙静电场作用及不考虑环境电场作用下颗粒表面电荷分布角对粒子消光效率的影响。由图可知,当颗粒电荷分布角增大时,粒子消光效率呈正弦函数规律变化。这里取 σ 分别为 $-0.5\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-2\mu\text{C}/\text{m}^2$ 。数值仿真结果表明:当面电荷密度为 $-0.5\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,由本文推导出的模型所得的颗粒消光效率小于 Zhou et al. 推导出的模型计算结果所对应值;当 σ 为 $-2\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,在电荷分布角位于 $20^\circ \sim 160^\circ$ 范围内时,由本文推导出的模型所得的颗粒消光效率小于 Zhou et al. 推导出的模型计算结果的对值,而在此范围之外则恰好相反,并且当面电荷密度增大时,此范围也逐渐增大。

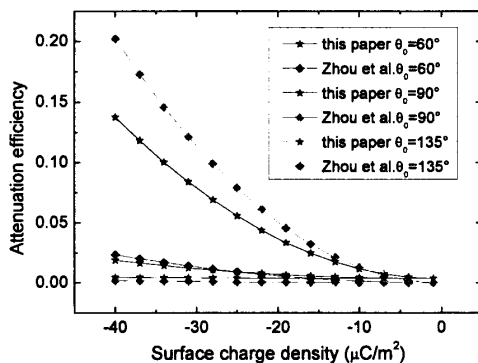


图 4.9 两种模型下面电荷密度对带电沙粒消光效率的影响

由图4.8的结果可知,面电荷密度对沙粒消光性质有重要的影响。因此,图4.9中我们讨论了两种模型下(考虑沙尘暴下环境电场作用及不考虑环境电场作用)不同电荷分布角下沙粒表面电荷密度对带电沙粒消光效率的影响。由图可知,当面电荷密度的增大时,沙粒消光效率呈指数增加。这里分别取电荷分布角为 60° 、 90° 、 135° ,数值仿真结果表明:随着电荷分布角的增大,沙粒的消光效率逐渐增大,在电荷分布角为 90° 时所得的带电沙粒消光效率最大,电荷分布角为 60° 时所得结果次之,此时由本文推导出的模型所得的颗粒消光效率小于 Zhou et al. 推导出的模型计算结果的对值,而在电荷分布角为 135° 时,所得的带电沙粒消光效率最小,但此情况下由本文推导出的模型所得的颗粒消光效率大于 Zhou et al. 推导出的模型计算结果的对值。

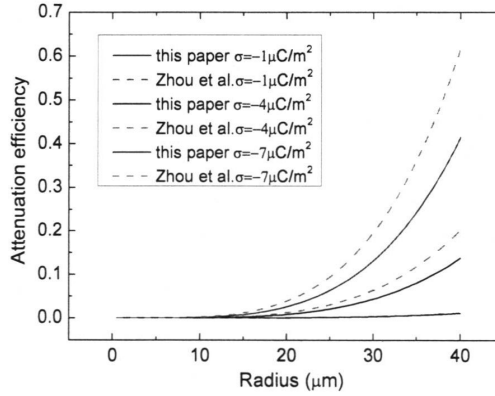


图 4.10 两种模型下沙粒粒径对带电沙粒的消光效率的影响

接下来, 由图4.10我们讨论了两种模型下不同沙粒表面电荷密度下沙粒粒径对带电沙粒消光效率的影响。由图可知, 随着沙粒粒径的增加, 沙粒消光效率呈指数增加。这里分别取 σ 为 $-1\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-4\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、 $-7\mu\text{C}/\text{m}^2$, 数值仿真结果表明: 随着沙粒表面电荷密度增大, 沙粒的消光效率逐渐增大, 在沙粒面电荷密度为 $-1\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时, 所得的带电沙粒消光效率最小, 而此时考虑环境电场作用所得结果大于不考虑环境电场所得结果, 当沙粒面电荷密度为 $-4\mu\text{C}/\text{m}^2$ 、为 $-7\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时考虑环境电场作用所得结果小于不考虑环境电场所得结果。

4.2.3 带电沙尘暴对电磁波的衰减系数

下边我们将对两种模型下带电沙粒的电磁衰减特性进行比较分析, 以讨论环境电场因素对带电沙粒的电磁波衰减性质的影响程度。在已有文献[18]中已对局部带电球体沙粒消光性质的近似解进行讨论, 这里我们仅直接引用其结论, 并与本文模型的计算结果进行比较。

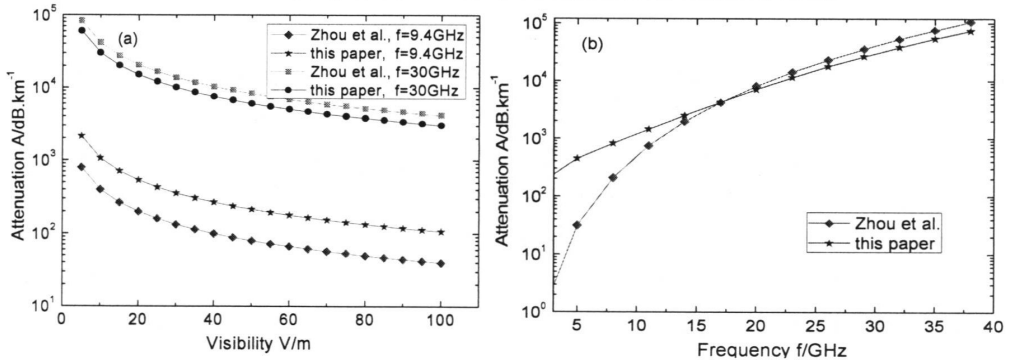


图 4.11 电磁波衰减量随能见度及入射波频率变化关系曲线。(a)能见度的影响 (b)入射波频率的影响

在实际应用中, 沙粒的浓度、湿度对电磁波衰减特性的影响尤为明显。因此接下来我们继续考虑在环境电场的作用下, 采用本文建立的模型对其重新进行分析和讨论。我们令 $\sigma = 1.5\text{C}/\text{m}^2$, 沙粒含水量为 0.05, 其它参数保持不变。

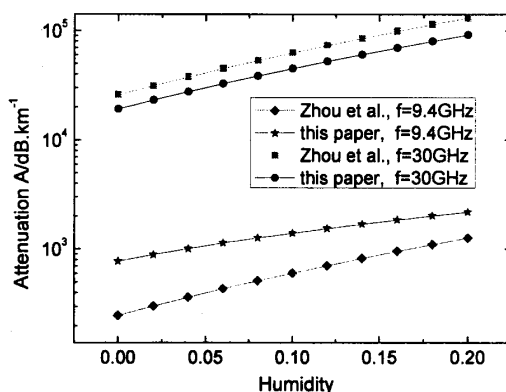


图 4.12 不同入射波频率下电磁波衰减量随沙粒含水量变化曲线

图 4.11 中我们讨论了沙尘浓度对电磁波的影响。由图可见，当沙尘暴能见度的增大时，电磁波衰减量线性减小，并且在入射波频率的变化下，考虑环境电场作用时的预测结果与不考虑环境电场作用时的结果的大小差异发生显著变化：当 $f < 20\text{GHz}$ 时，由本文推导的模型预测结果远大于 Zhou et al. 所推导模型的计算值，但是当 $f > 20\text{GHz}$ 时，由本文推导的模型预测结果小于 Zhou et al. 所推导模型的计算值，说明当入射波频率增大时，环境电场的影响逐渐减小。对此现象产生的物理原因尚需进行进一步研究讨论。

图 4.12 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。如图所示：当沙粒含水量的增大时，带电沙尘暴对电磁波的衰减线性增强。其原因是：当含水量增大时，改变含水沙粒介电常数，使得其虚部逐渐增大，从而使电磁波衰减不断增强。

已有研究表明，沙粒粒径分布函数（粒子谱）对沙尘暴系统的电磁波衰减性质具有非常重要的影响，因此本节中我们拟讨论均匀(Uniform)分布、指数(Exponential)分布、麦克斯韦分布(Maxwell)、瑞利(Rayleigh)分布、正态(Log-normal)分布、对数正态(Log-normal)分布 6 种粒径分布形式下带电沙尘暴对电磁波的衰减系数，各粒径分布函数的表达式见本论文第二章。

由于颗粒表面电荷密度这一参量很难通过试验直接测量。为此，本文也采用“荷质比”来近似表征沙粒带电量，在给定电荷分布角且假定电荷均匀分布时，据此可反解出沙粒面电荷密度。试验测量发现，沙粒荷质比可能位于 $[0, \pm 300\mu\text{C}/\text{kg}]$ 之间，不同实验条件、不同地区样本间的差异极大。考虑到沙尘暴期间空中沙粒粒径很小，其应该带负电荷的事实，我们假定沙尘粒子荷质比为 $[-200\mu\text{C}/\text{kg}, 0]$ ，基于此我们讨论沙尘暴中沙粒荷质比对电磁波消光系数的影响。

由图 4.13 可见，随着颗粒荷质比的增加，电磁波消光系数呈指数增加。另外，在给定颗粒荷质比及其电荷分布角的前提下，基于对数正态(Log-normal)分布所得电磁波消光系数最大，基于瑞利(Rayleigh)分布形式所得结果最小，均匀(Uniform)分布与对数(Normal)分布形式所得结果相近，大于指数(Exponential)分布形式，且远大于麦克斯韦(Maxwell)分布形式。以上结果说明：沙尘暴中颗粒物粒径分布形式对其宏观电磁波衰减性质具有非常重要的影响，且随着颗粒表面电荷密度的不同其影响程度不同。

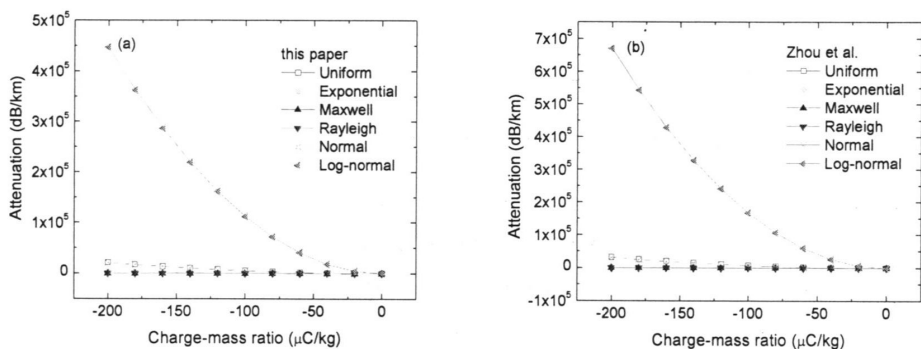


图4.13 沙尘暴中沙粒荷质比对电磁波消光系数的影响

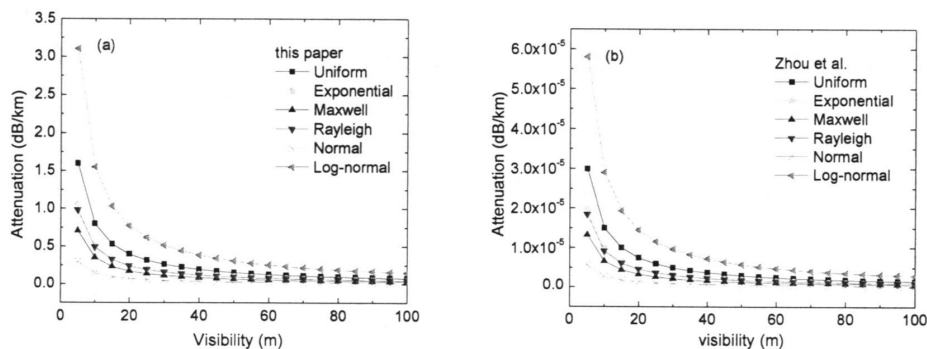


图4.14 沙尘暴能见度对电磁波消光系数的影响

此外, 讨论沙尘浓度对电磁波传播过程的衰减影响。计算结果见图 4.14, 对于两种模型下, 随着能见度增加, 六种粒径分布形式的沙尘暴对电磁波衰减效应呈指数减弱趋势变化。就沙粒粒径分布形式对电磁波衰减系数而言, 对数正态 (Log-normal) 分布所得结果最大, 均匀 (Uniform) 分布、指数 (Exponential) 分布、瑞利 (Rayleigh) 分布结果次之, 麦克斯韦 (Maxwell) 分布所得结果略小于前者, 而正态 (Normal) 分布形式所得结果最小。由图(a)、(b)可得, 对于考虑环境电场的作用所得到的电磁波的衰减明显增强。

4.2.4 带电沙尘暴的雷达反射率

雷达反射率因子是微波雷达遥感中一个非常重要且实用的参量。本节主要是从理论上讨论环境电场、沙粒浓度对微波雷达反射率的影响。选用参数为: 颗粒表面电荷密度为 $1.51.5\text{C/m}^2$, 沙粒含水量为 0.05, 其它参数保持不变。

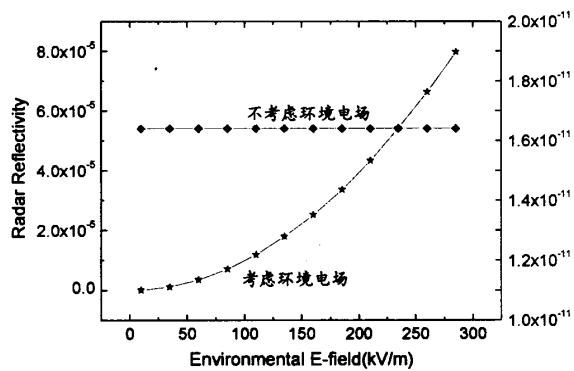


图 4.15 环境电场强度对颗粒系雷达反射率的影响

图 4.15 我们讨论了环境电场强度对颗粒雷达反射率的影响。由图可见，考虑环境电场作用所对应的颗粒系雷达反射率随着环境电场强度的增强而增大，并且在环境电场强度大于 250kV/m 时大于不考虑环境电场所对应的值。另外，当考虑颗粒不带电以及颗粒带电但不考虑环境电场的影响时，所得到的颗粒后向散射截面值为 1.1316×10^{-17} ，而当颗粒带电且考虑环境电场的影响时，所得到的颗粒后向散射截面值远大于不考虑环境电场的影响值，为 2.6360×10^{-11} ，由此可见，环境电场可以显著增加颗粒系统的后向散射截面。

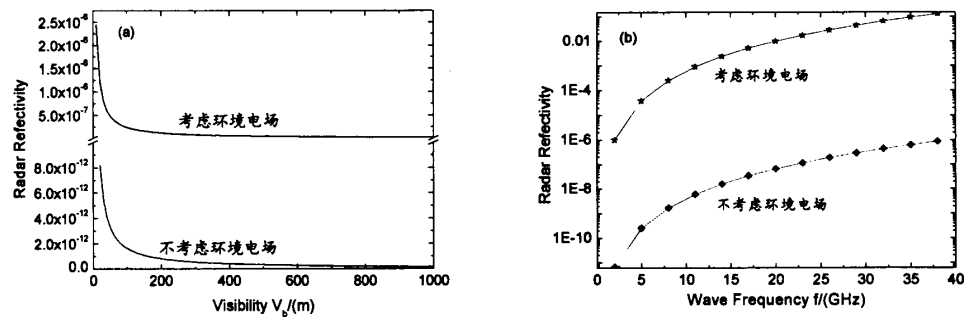


图 4.16 能见度、入射波频率对颗粒系雷达反射率的影响 (a) 雷达反射率随能见度的变化曲线 (b) 雷达反射率随入射波频率的变化曲线

由图 4.16 可见，随着沙尘暴能见度的增加，雷达反射率线性减小，且考虑环境电场作用所对应的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值。由图(b)，随着入射波频率的增加，雷达反射率缓慢增加，考虑环境电场作用时所得到的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值。可见，在表面电荷的作用下，带电沙尘暴对雷达波的反射作用增强，有可能产生有效回波。

4.3 本章小结

本章中，我们分析并讨论了带电沙粒的微分散射截面、带电沙尘暴对微波的衰减率及其雷达反射率因子的影响，并讨论了沙粒带电量、浓度等因素对其的影响。结果表明：

- 1. 当沙粒不带电时，考虑环境电场作用与不考虑环境电场作用时的微分散射截面分布规律相同，但其微分散射截面值远大于不考虑环境电场时所对应值，环境电场的极化作用可以增强沙粒

的微分散射截面；对于给定电荷分布角、面电荷密度时，当沙粒局部带电时环境电场对带电沙粒的微分散射截面有明显的作用；随着面电荷密度的增加沙粒微分散射截面均不断增大，考虑环境电场作用时，沙粒微分散射截面的空间分布变化明显。

2. 对于电荷分布角、沙粒粒径、入射波频率、对沙粒的散射、吸收及消光效率的影响：带电沙粒对入射波散射效率、消光效率随着颗粒电荷分布角的增加均呈正弦函数规律变化，而其吸收效率保持不变；带电沙粒对入射波的散射效率、消光效率随着沙粒粒径的增大均呈指数增加，对于本文推导的模型所得到的颗粒散射效率大于Zhou et al.推导的模型所得计算结果对应值，对于颗粒的吸收效率，随着沙粒粒径的增加呈线性增加，由本文推导的模型所得到的颗粒吸收效率较Zhou et al.推导的模型所得计算结果对应值大，约为6个数量级；在面电荷密度不同时，随着入射波频率的增加，沙粒散射效率随之呈指数增加，而其吸收效率也随之呈线性增加；不同面电荷密度下频率对散射效率、吸收效率的影响呈现同样趋势，但吸收效率值保持不变，随着入射波频率的增加，由本文推导的模型所得到的颗粒散射效率小于Zhou et al.推导的模型所得计算结果对应值；对于在沙尘暴中，沙粒浓度、湿度对电磁波衰减系数的影响为：当沙尘暴能见度增大时，电磁波衰减量线性减小，且随着入射波频率的改变，在两种模型下所得结果差异变化明显：当 $f < 20\text{GHz}$ 时，由本文推导的模型所计算结果远远大于Zhou et al.所推导模型的计算值，而当 $f > 20\text{GHz}$ 时，由本文推导的模型所计算结果小于Zhou et al.所推导模型的计算值。这说明：当频率增大时，环境电场对其的影响不断变小；当沙粒含水量增大时，带电沙尘暴对电磁波的衰减线性增强。

3. 对于沙尘颗粒粒径分布对电磁波传播的影响：随着颗粒荷质比的增加，电磁波消光系数呈指数增加。另外，在给定颗粒荷质比及其电荷分布角的前提下，基于对数正态(Log-normal)分布所得电磁波消光系数最大，基于瑞利(Rayleigh)分布形式所得结果最小，均匀(Uniform)分布与对数(Normal)分布形式所得结果相近，大于指数(Exponential)分布形式，且远大于麦克斯韦(Maxwell)分布形式。对于沙尘浓度对电磁波传播过程的衰减影响：随着能见度增加，六种粒径分布形式的沙尘暴对电磁波衰减效应呈指数减弱趋势变化。就沙粒粒径分布形式对电磁波衰减系数的影响而言，对数正态(Log-normal)分布所得结果最大，均匀(Uniform)分布、指数(Exponential)分布、瑞利(Rayleigh)分布结果次之，麦克斯韦(Maxwell)分布所得结果略小于前者，而正态(Normal)分布形式所得结果最小。这些结果对于沙尘等气溶胶颗粒引起的气候影响研究、沙尘暴遥感监测以及沙尘环境下的无线通讯研究具有非常重要的理论指导意义。

4. 环境电场强度对颗粒雷达反射率的影响。考虑环境电场作用所对应的颗粒系雷达反射率随着环境电场强度的增强而增大，环境电场可以显著增加颗粒系统的后向散射截面；随着沙尘暴能见度的增加，雷达反射率线性减小，且考虑环境电场作用所对应的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值；随着入射波频率的增加，雷达反射率缓慢增加，考虑环境电场作用时所得到的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值。可见，在表面电荷的作用下，带电沙尘暴对雷达波的反射作用增强，有可能产生有效回波。

第五章 结论及其展望

5.1 主要结论

在沙尘暴环境下,沙粒带电对微波传播过程的影响研究具有特殊的应用意义。对于沙尘颗粒的带电现象,很早就被相关研究者们所探索研究。然而,目前很少有研究文献报道关于在沙尘暴中风沙静电场对沙粒所产生的极化电荷对电磁波传播影响的理论和实验研究。在本学位论文中,我们考虑环境电场(即风沙静电场)的作用,对带电圆球沙粒散射问题的 Rayleigh 散射解进行建模分析,并对局部带电球形沙粒对电磁波传播过程的影响进行分析讨论,主要结论如下:

对于在沙尘暴环境下,考虑环境电场作用时沙粒局部带电后散射场强度的变化:

1. 基于极化面电荷密度和 Rayleigh 散射理论的计算结果表明,沙粒带电可以显著增强其散射场强度、微分散射截面,且与不带电时相比,其空间分布规律变化明显。

2. 考虑到风沙静电场的作用时,即对于本文所推导出的模型,沿着倾角 θ 方向上的散射场强的空间分布规律有明显的变化,对于该方向上的散射场强度分量也整体变大。然而,对于在方位角 φ 方向上的散射场强空间分布规律没有明显的变化,但是在此方向上的散射场强度分量远远大于 Zhou 等人模型(即不考虑环境电场作用时)所得出的结果。由此可见,环境电场的极化作用使得沙尘颗粒内部的极化强度增加从而增加了颗粒对入射波的散射作用,说明环境电场对沙粒的散射场强分布规律具有显著影响。

3. 在两种模型下,随着电荷分布角的增大,颗粒表面散射场强度大小呈正弦规律变化,在电荷分布角为 90° 时达到最大值;当面电荷密度增大时,电荷分布区域的散射场强度也持续增大。在这两种情况下,基于本文模型,随着环境电场的增加,散射场强度不断增加,而由 Zhou 模型所得结果显示无论环境电场取何值,其散射场强度不变。

考虑环境电场与否时带电沙粒对电磁波的散射、衰减作用:

1. 当沙粒不带电时,考虑环境电场作用与不考虑环境电场作用时的微分散射截面分布规律相同,但其微分散射截面值远大于不考虑环境电场时所对应值,环境电场的极化作用可以增强沙粒的微分散射截面;对于给定电荷分布角、面电荷密度时,当沙粒局部带电时环境电场对带电沙粒的微分散射截面有明显的作用;随着面电荷密度的增加沙粒微分散射截面均不断增大,考虑环境电场作用时,沙粒微分散射截面的空间分布变化明显。

2. 环境电场作用下,沙粒电荷分布角对颗粒散射效率和吸收效率的影响显著。当颗粒电荷分布角增大时,沙粒散射效率的变化为正弦函数规律,但是其吸收效率基本保持不变。通过数值仿真计算可得:在电荷分布角位于 $50^\circ \sim 130^\circ$ 范围内时,由本文推导模型所得的颗粒散射效率小于 Zhou 等人模型下的计算结果的对应值,而在此范围之外其结果则恰好相反。另外,当电荷分布角增大时,颗粒的吸收效率不变,但由本文推导模型所得的颗粒的吸收效率明显增加(约为6个数量级)。

3. 当面电荷密度增大时,沙粒散射效率也随之增加,但是其吸收效率基本保持不变。由数值计算结果可以看出:当 $\sigma > -0.9\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,由本文推导的模型所计算的颗粒散射效率小于 Zhou et al. 所推导模型的计算结果所对应的值;而 $\sigma < -0.9\mu\text{C}/\text{m}^2$ 时,由本文推导的模型所计算的颗粒散

射效率大于 Zhou et al.所推导模型的计算结果所对应的值。另外, 当面电荷密度变化时, 即由本文推导出的模型所得的颗粒的吸收效率变化显著, 增大约 6 个数量级。颗粒不同面电荷密度下, 当入射波频率增大时, 沙粒散射效率随之呈指数增加, 而其吸收效率呈线性增加。但是考虑环境电场作用时计算所得的散射效率小于不考虑环境电场时所对应值。在不同频率下, 面电荷密度均不会影响带电沙粒对入射电磁波的吸收效率, 但是由本文推导的模型所计算的颗粒散射效率远大于 Zhou et al.所推导模型的计算结果。

4. 带电沙尘暴对电磁波的衰减系数与其能见度呈反比关系, 与面电荷密度、沙粒粒径、荷质比、沙粒含水量呈正比关系。对于入射波频率, 当沙尘暴能见度增大时, 电磁波衰减量随之线性减小, 并且在入射波频率的变化下, 本文模型预测结果与 Zhou et al.模型预测结果的大小差异发生显著变化, 具体表现为: 当 $f < 20GHz$ 时, 由本文推导的模型所计算结果远远大于 Zhou et al.所推导模型的计算值, 而当 $f > 20GHz$ 时, 由本文推导的模型所计算结果小于 Zhou et al.所推导模型的计算值。这说明: 当, f 增大时, E_c 对其的影响不断变小。当沙粒含水量增大时, 带电沙尘暴对电磁波的衰减线性增强。

对于沙尘颗粒粒径分布对电磁波传播过程的影响:

1. 颗粒粒径分布形式对其具有非常重要的影响, 且与其表面电荷密度有关;

2. 在给定颗粒荷质比及其电荷分布角的前提下, 基于对数正态(Log-normal)分布所得电磁波消光系数最大, 基于瑞利(Rayleigh)分布形式所得结果最小, 均匀(Uniform)分布与对数(Normal)分布形式所得结果相近, 大于指数(Exponential)分布形式, 且远大于麦克斯韦(Maxwell)分布形式。以上结果说明: 沙尘暴中颗粒物粒径分布形式对其宏观电磁波衰减性质具有非常重要的影响, 且随着颗粒表面电荷密度的不同其影响程度不同。

3. 对于两种模型下, 随着能见度增加, 六种粒径分布形式的沙尘暴对电磁波衰减效应呈指数减弱趋势变化。就沙粒粒径分布形式对电磁波衰减系数的影响而言, 对数正态(Log-normal)分布所得结果最大, 均匀(Uniform)分布、指数(Exponential)分布、瑞利(Rayleigh)分布结果次之, 麦克斯韦(Maxwell)分布所得结果略小于前者, 而正态(Normal)分布形式所得结果最小。

由此说明: 沙尘暴中沙尘颗粒的粒径分布形式对入射电磁波的衰减作用具有非常重要的影响, 且不同条件下(沙尘带电信息、颗粒浓度等)基于各粒径分布函数所得入射电磁波衰减的预测值呈现不同的变化趋势。

对于环境电场对颗粒系雷达反射率的影响:

1. 考虑环境电场作用所对应的颗粒系雷达反射率随着环境电场强度的增强而增大, 当考虑颗粒不带电以及颗粒带电但不考虑环境电场的影响时, 所得到的颗粒后向散射截面值为 1.1316×10^{-17} , 而当颗粒带电且考虑环境电场的影响时, 所得到的颗粒后向散射截面值远大于不考虑环境电场的影响值, 环境电场可以显著增加颗粒系统的后向散射截面。随着沙尘暴能见度的增加, 雷达反射率线性减小, 且考虑环境电场作用所对应的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值。随着入射波频率的增加, 雷达反射率缓慢增加, 考虑环境电场作用时所得到的雷达反射率大于不考虑环境电场作用时所对应的值。可见, 在表面电荷的作用下, 带电沙尘暴对雷达波的反射作用增强, 有可能产生有效回波。

2. 雷达反射率与颗粒粒径、浓度、入射波频率、环境电场强度有关。可以通过已有沙尘暴遥

感监测的相关手段（如激光雷达等）获得沙粒浓度、粒径信息。在此基础上再利用微波雷达在沙尘暴期间获得的雷达反射率来获取空中风沙静电场强度信息。

5.2 研究展望

通过本论文的研究工作，在考虑环境电场的作用下，对带电沙尘暴对微波传播过程影响的规律有了进一步的认识，为沙尘暴遥感研究中环境电场的作用对微波传播过程的影响提供更有效的理论基础。但是在本论文中只是将沙粒处理为均匀圆球颗粒，与真实的沙粒（不规则形）存在一定的区别。然而，由于实验条件的限制，本论文仅仅做了理论的推导与分析，并没有深入的对实验方面的相关知识进行讨论，这使得本文的一些结论没有进行实验的验证，对于这一方面的研究尚需进行更深入的研究。

参考文献

- [1] Zheng X J, Mechanics of Wind-Blown Sand Movements [M]. Springer, 2009. 111~112
- [2] Shao Y, Shao Y. Physics and Modelling of Wind Erosion [J]. Springer Netherlands, 2000.
- [3] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. 中国沙漠, 2005,25(5):675-681.
- [4] Wang P, Sun Z, Vuran M C, et al. On Network Connectivity of Wireless Sensor Networks for Sandstorm Monitoring [J]. Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking, 2011, 55(5):1150-1157.
- [5] 薄天利. 沙丘场时空演化跨尺度动力学模型及其仿真研究[D]. 兰州大学, 2010.
- [6] Ungar J E, Haff P K. Steady State Saltation in Air [J]. Sedimentology, 1987, 34(2):289-299.
- [7] RS A, PK. H. Simulation of Eolian Saltation [J]. Science, 1988, 241(4867):820-823.
- [8] Huang N, Zheng X J, Zhou Y, et al. Simulation of Wind-blown Sand Movement and Probability Density Function of Liftoff Velocities of sand particles [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D20):4653-4658.
- [9] Schmidt D S, Schmidt R A, Dent J D. Electrostatic Force on Salting sand [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103(D8):8997-9001.
- [10] Yue G, Zheng X. Electric Field in Windblown Sand Flux with Thermal Diffusion [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D16):3505-3515.
- [11] Zheng X, Xie L, Zou X. Theoretical Prediction of Liftoff Angular Velocity Distributions of Sand Particles in Windblown Sand Flux [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D11):3029-3030.
- [12] 岳高伟, 郑晓静. 热扩散和电场对风沙流发展过程的影响[J]. 应用数学和力学, 2007, 28(2):165-175.
- [13] Kok J F, Renno N O. Electrostatics in Wind-blown Sand [J]. Physical Review Letters, 2007, 100(1):145-150.
- [14] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000, 45(20):2232-2235.
- [15] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. Laboratory Measurement of Electrification of Wind-blown Sands and Simulation of its Effect on Sand Saltation Movement [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D10):231-231.
- [16] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1):77-86.
- [17] 屈建军, 言穆弘, 董光荣等. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003, 33:593-601.
- [18] Zhou Y H, He Q S, Zheng X J. Attenuation of Electromagnetic Wave Propagation in Sandstorms Incorporating Charged Sand Particles [J]. European Physical Journal E, 2005, 17(2):181-187.
- [19] Xie L, Li X C, Zheng X J. Attenuation of an Electromagnetic Wave by Charged Dust Particles in a Sandstorm [J]. Appl Opt, 2010, 49(35):6756-6761.
- [20] 何琴淑. 沙尘暴的沙粒带电对电磁波传播的影响研究[D]. 兰州大学, 2005.
- [21] Phillips, C E S, Electrical and Other Properties of Sand. Nature, 1910.84(2130):P255-261.
- [22] Rudge W A D, on the Electrification Produced During the Raising of a Cloud of Dust, Proc. R. Soc. Ser. A, 1914, 90:256-272.
- [23] Whitman V E, Studies in the Electrification of Dust Clouds. Physical Review, 1926.28:p. 1287-1300.
- [24] Shaw P E, The Electrical Charges from Like Solids [J]. Nature, 1926, 118(2975):659-660.
- [25] Shaw P E, J N C, Tribo-electricity and Friction IV-Electricity due to Air-blown Particles. Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Containing Paper sofa Mathematical and Physical Character, 1929.122:P.48-53.
- [26] Debeau D E. The Effect of Adsorbed Gases on Contact Electrification [J]. Physical Review, 1944, 66(1-2):9-16.
- [27] Gill E W B. Frictional Electrification of Sand [J]. Nature, 1948, 162(4119):568-569.
- [28] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. Laboratory Measurement of Electrification of Wind-blown Sands and Simulation of its Effect on Sand Saltation Movement [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D10):231-231.
- [29] Gill. Frictional Electrification of Sand [J]. Nature, 1948, 162(4119):568-569.

- [30] Freier G D. The Electric Field of a Large Dust Devil [J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65(10):3504-3504.
- [31] 刘贤万.实验风沙物理与风沙工程学.北京:科学出版社,1995.
- [32] Schmidt D S, Schmidt R A, Dent J D. Electrostatic Force on Salting Sand [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 103(D8):8997-9001.
- [33] Huang N, Zheng X. A Laboratory Test of the Electrification Phenomenon in Wind-blown Sand Flux [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5):417-420.
- [34] Bo T, Zheng X. A Field Observational Study of Electrification within a Dust Storm in Minqin, China [J]. Aeolian Research, 2013, 8(431):39-47.
- [35] Bo T, Zhang H, Zhu W, et al. Theoretical Prediction of Electric Fields in Wind-blown Sand [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(10):4494-4502.
- [36] Kanagy II S P, Mann C J. Electrical Properties of Eolian and Sand Silt .Earth-Science Reviews, 1994, 36:181-204.
- [37] Zheng X J, Huang N, Zhou Y. Laboratory Measurement of Electrification of Wind-blown Sands and Simulation of its Effect on Sand Saltation Movement [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(D10):231-231.
- [38] Kok J F, Lacks D J. Electrification of Granular Systems of Insulators. [J]. Physical Review E, 2009, 79(5):711-715.
- [39] 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.
- [40] KM F, DJ L, RM. S. Charge Segregation Depends on Particle Size in Tribo-electrically Charged Granular Materials [J]. Physical Review Letters, 2009, 102(2).
- [41] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. 大气科学, 2005, 29(1):147-153.
- [42] 王明星, 张仁健. 大气气溶胶研究的前沿问题[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(1):119-124.
- [43] 刘立超, 王涛, 周茅先等. 沙坡头地区沙尘气溶胶质量浓度的试验观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3):336-341.
- [44] 沈建国, 李嘉鹏, 牛生杰等. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3):495-501.
- [45] Hankin E H. On Dust Raining Wind Sand Descending Currents [A] Idia Met Memoirs[C].1921, 22.
- [46] Josepl P V, Ralpal D K, Deka S N."Andhl".the Conveective Dast Storms of Northwesr India[J].J Mausam,1980, 31: 431-442
- [47] Tegen I, Lacis A A. Modeling of Particle Size Distribution and its Influence on the Radiative Properties of Mineral Dust Aerosol [J]. J.geophys.res, 1996, 101(D14):244.
- [48] Claquin T, Schulz M 1, Balkanski Y 2, et al. Uncertainties in Assessing Radiative Forcing by Mineral Dust [J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 1998, 50(5):491-505.
- [49] 申彦波, 沈志宝, 汪万福. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气[J]. 高原气象, 2003, 22(2):185-190.
- [50] 牛生杰, 孙继明. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. 高原气象, 2001, 20(3):298-301.
- [51] 杨莲梅, 张广兴, 魏文寿等. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, (3):380-383.
- [52] 柯宗建, 汤洁, 王炳忠等. 积分浊度计在沙尘暴监测网试验中应用分析[J]. 气象科技, 2004, 32(4):258-262.
- [53] 张玉洁, 张武, 陈艳等. 黄土高原半干旱地区气溶胶光学厚度变化特征的初步分析[J]. 高原气象, 2008, (6):1416-1422.
- [54] 延昊, 矫梅燕, 赵琳娜等. 中国北方气溶胶散射和 PM₁₀浓度特征[J]. 高原气象, 2008, 27(4):852-858.
- [55] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵等. 塔克拉玛干沙漠中心的沙尘气溶胶观测研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3):389-393.
- [56] 刘立超, 王涛, 周茅先等. 沙坡头地区沙尘气溶胶质量浓度的试验观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3):336-341.
- [57] 沈建国, 李嘉鹏, 牛生杰等. 沙尘天气中气溶胶光学特性的时空分布特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(3):495-501.

- [58] 王宏, 石广玉, Aoki T 等. 2001 年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫[J]. 科学通报, 2004, 49(19):1993-2000.
- [59] 吴润, 符斌斌, 蒋维楣等. 东亚地区矿物尘气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究[J]. 地球物理学报, 2005, (6):1250-1260.
- [60] Ryde J W. Echo Intensities and Attenuation Due to Clouds, rain, hail, sand and dust storms at centimetre wavelengths [J]. General Electric company research Laboratories, Wembley, England, 1941, Report 7831:22-24.
- [61] Gary C. the Impact of Dust and Foliage on Signal Attenuation in the Millimeter Wave Regime. Proc. SPIE Vol., 1968, P.81-94, Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, Anton Kohnle; Walter B. Miller; Eds.
- [62] Ryde J W. Echo Intensities and Attenuation Due to Clouds, rain, hail, sand and dust storms at centimetre wavelengths, Rep. 7831, General Electric company research Laboratories, Wembley, England, October 1941 [J]. 1941. Inferred from 何琴淑(2005).
- [63] Ali A A, Alhaider M A. Millimeter Wave Propagation in Arid land-a Field Study in Riyadh [J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1992, 40(5):492 - 499.
- [64] Greeley R, Williams K K. Laboratory and Field Measurements of the Modification of Radar Backscatter by Sand [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(1):29-40.
- [65] Al-Hafid, H T GuPta S C, and M Ibrahim, Propagation of Microwave under Adverse Sand Storm Conditions of Iraq. In: Proc North American Radio Science Meeting, URSI.5 AP-S 1980.
- [66] 陈祥占. 从海海战争看沙尘对无线电通信的影响[J]. 全球定位系统, 1991, (6):1-4.
- [67] Alhaider M A. Radio Wave Propagation into Sandstorms-system Design based on ten-year Visibility Data in Riyadh, Saudi Arabia [J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1986, 7(9):1339-1359.
- [68] Ahmed I Y. Microwave Propagation through Sand and Dust Storms (haboobs) [J]. University of Newcastle upon Tyne, 1976.
- [69] Chu S T. Effects of Sandstorms on Microwave Propagation [J]. Bell System Technical Journal, 1979, 58(2):549-555.
- [70] Haddad S, Salman M J, Jha R K. Effects of Dust/Sandstorm on Some Aspects of Microwave Propagation[J]. In ESA Wave Propagation and Remote Sensing p 153-162, 1983, 194.
- [71] Ali A A. Effect of Particle Size Distribution on Millimeter Wave Propagation into Sandstorms [J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 1986, 7(6):857-868.
- [72] Ahmed A S. Role of Particle-size Distributions on Millimetre-wave propagation in sand/dust storms [J]. IEE Proceedings H, 1987, 134(1):55 - 59.
- [73] Abdulla S A A, Al-Rizzo H M, Cyril M M. Particle-size Distribution of Iraqi Sand and Dust Storms and Their Influence on Microwave Communication Systems [J]. Antennas & Propagation IEEE Transactions on, 1988, 36(1):114 - 126.
- [74] Dong X, Chen H, Guo D. Microwave and Millimeter-wave Attenuation in Sand and Dust Storms [J]. Antennas & Wireless Propagation Letters IEEE, 2012, 10(1):469 - 471.
- [75] Ghobrial S I. Effects of Sandstorms on Microwave Propagation. In: IEEE National Telecomm Conf., Houston, Texas, (IEEE, 1980), 1980: p. 4351-4354.
- [76] Haddad S, Salman M J, Jha R K. Effects of Dust/Sandstorm on Some Aspects of Microwave Propagation[J]. In ESA Wave Propagation and Remote Sensing, 1983, p: 153-162.
- [77] 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, (2):29-32.
- [78] Li X C, Zhang B D. The Electromagnetic Scattering of the Charged Inhomogeneous Sand Particle [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 119(4):150-154.
- [79] Li X C, Zhang B D. An Equivalent Solution for the Electromagnetic Scattering of Multilayer Particle [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2013, 129(11):236-240.
- [80] Li X C, Min X, Liu D D. Rayleigh Approximation for the Scattering of Small Partially Charged Sand Particles. [J]. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2014, 31(7):1495-1501.
- [81] Duce R A, Arimoto R, Ray B J, et al. Atmospheric Trace Elements at Eniwetok Atoll:1, concentrations, sources, and temporal variability [J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(C9):5321-5342.
- [82] Zhuang G, Guo J, Yuan H, et al. The Compositions, Sources, and Size Distribution of the Dust Storm from China in Spring of 2000 and its Impact on the Global Environment [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(11):895-900.

- [83] Cullen U T, Lewis N F, Ray B J. Relationships among Aerosol Constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West[J]. *A J.geophys.res*, 1996, 101(D1):2011–2023.
- [84] Zhuang G, Ying-Lie Z. Link between Iron and Sulphur Cycles Suggested by Detection of Fe(II) in Remote Marine Aerosols[J]. *Nature*, 1992, 355(36): 537–539.
- [85] Sokolik I, Toon O. Direct Radiative Forcing by Anthropogenic Airborne Mineral Aerosols [J]. *Nature*, 1996, 381(6584):681–683.
- [86] 张代洲, 赵春生, 秦瑜. 沙尘粒子的成分和形态分析[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(5).
- [87] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的物理化学特性[J]. *科学通报*, 2005, 50(5):469–472.
- [88] 成天涛, 吕达仁, 陈洪滨等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. *大气科学*, 2005, 29(1):147–153.
- [89] 张仁健, 王明星, 浦一芬等. 2000 年春季北京特大沙尘暴物理化学特性的分析[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(3):259–266.
- [90] Tanré D, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of Dust Aerosol Size Distribution and Optical Properties Derived from Remotely Sensed Data in the Solar Spectrum [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D16):18205–18217.
- [91] 何琴淑, 周又和, 郑晓静. 带电沙粒的散射场及其对电磁波传播的影响[J]. *中国科学*: , 2005, 35(3):308–317.
- [92] Bo T, Zheng X. A Field Observational Study of Electrification within a Dust Storm in Minqin, China [J]. *Aeolian Research*, 2013, 8(431):39–47.
- [93] Zhang H F, Wu T, Qu J J, et al. An Experimental and Observational Study on the Electric Effect of Sandstorms [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(1):53–60.
- [94] Li X C, Zhang B D. The Electromagnetic Scattering of the Charged Inhomogeneous Sand Particle [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, 119(4):150–154.
- [95] 田贻丽, 谢利利, 徐如瑜. 粉尘浓度测量的研究[J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2003, 26(6):30–31.
- [96] Zeng Z H, Gong F, Pan D L. Scattering and Polarization Characteristics of Dust Aerosol Particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1):0101002–146.
- [97] He Q S. The Influence of Charged Sand in Sandstorm on the Propagation of Electromagnetic Wave [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005, p: 14–20.
- [98] Dong Q F, Xu J D, Li Y L, et al. Attenuation Effects of Microwave through Charged Sand Particles [J], *High Power Laser and particle beams*. 2009. 21(10): 1517–1520.

致谢

时光飞逝，三年的硕士研究生学习生活已接近尾声。在宁夏大学求学的五年，我度过了人生最重要的一段时光，给我留下最美好的一段回忆。回首这些年的学习生活，我要感谢那些曾经引导过我、激励过我、以及帮助过我的人。

首先我要特别感谢我的导师李新碗教授。感谢老师让我有机会到上海交大访学交流。在这样的一个前沿的平台，我接收到了许多新的信息与知识，开阔眼界，并且努力的提高自己。感谢老师对我的科研工作的悉心指导，您对科研的严谨、负责、认真的态度同时又具有批判的眼光，高效、创新，对事情的周全规划、考虑、守诺守时，这些都让我受益匪浅。在老师的指导下，我体会到了做科研的乐趣。在学习生活的路上老师给了我莫大的帮助。同时还要感谢我的另一位导师李兴财老师，他性格随和、学识渊博让人佩服，他对科研的勤奋、严谨、实事求是的态度时刻影响着我，给我留下了深刻的印象。在科研指导、讨论方面，他给了我很多机会可以到野外进行实践试验并给了我许多意见，让我体会到了科研探讨的自由，使我对研究内容倍感兴趣，同时，感谢他对我的指导和帮助，值此论文完成之际，我要向李新碗和李兴财老师致以最诚挚的谢意和由衷的敬意！

同时，我还要感谢在交大学习时课题组所有老师、同门们的帮助，感谢马鑫师兄的照顾。感谢在宁夏大学智能沙漠项目组所有老师及兄弟姐妹们的关照，感谢杨泽林老师、李春树老师提供的学习场所。感谢外审老师—北方民族大学电信学院毛建东教授及内审老师—高华老师抽出时间对本论文的审阅并提出了宝贵的意见。

除此之外，还要感谢与我一起奋斗的朋友丁晓花、朱鹏、宋佳乾以及我的师妹刘丹丹等为本论文的顺利完成提供的相关帮助！

最后，特别感谢我的父母、姨妈，是他们对我的无私的关爱和默默的支持使得我能够如期的完成论文，在此向他们致以深深的感谢！

感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们！

此外，本硕士论文工作的开展和完成得到了国家科技部国际合作项目（2011DFA11780）、国家自然科学基金青年基金项目（11302111）、宁夏自然科学基金重点项目（NZ12117）的资助，在此一并表示感谢。

个人简介

闵星，女，1990年5月出生于宁夏回族自治区灵武市。于2008年9月考入宁夏大学物理电气信息学院（专业：电气工程与自动化）学习，2010年9月到华中科技大学电气与电子工程学院访学交流一年。2012年9月被保送至宁夏大学物理电气信息学院电磁场与微波技术专业攻读硕士学位，导师李新碗教授，李兴财副教授。并于2013年9月至2014年6月到上海交通大学电子信息与电气工程学院交流学习一年。研究生期间从事的工作有：参与沙粒振动传感器的方案讨论与设计、带电沙粒对电磁波传播过程的影响以及先进光电子器件与新能源等方面的理论研究。

科研经历与成果

一、发表论文：

- 1) Xingcai Li, Xing Min, and Dandan Liu, Rayleigh approximation for the scattering of small partially charged sand particles[J]. JOSA A, 2014, 31 (7) :1495~1501.
- 2) Li Xingcai, Liu Dandan, and 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.
- 3) 闵星, 李兴财, 李新碗, 马鑫, 带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响[J]. 光学学报, 2015, 35 (1) :0129001-1~8.
- 4) Xingcai Li, Xing Min, and Minzhong Wang, Theoretical Analysis for the Potential Applications of Microwave Radar in the Sandstorm Research. 已投稿《Journal of Geophysical Research - Atmospheres》.

二、参与课题：

- 1) 沙漠腹地沙尘监测与信息获取技术合作研究，国家科技部国际合作项目（2011DFA11780），研究期限：2011.12-2014.12
- 2) 风沙静电场作用下带电沙尘暴对电磁波传播过程的影响，国家自然科学基金青年基金项目（11302111），研究期限：2014.1-2016.12
- 3) 沙尘暴中的风沙电现象及其应用基础研究，宁夏自然科学基金重点项目（NZ12117），研究期限：2013.10-2014.10
- 4) 风沙电现象机理及其对光传播过程的影响，上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室”开放课题（2013GZKF031306），研究期限：2013.10-2015.10
- 5) 沙漠边缘地表植被的环境胁迫及其旱作恢复技术研究，宁夏科技支撑计划项目，研究期限：2013.10-2015.10