

风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展*

郑晓静 黄宁 周又和
兰州大学力学系, 甘肃 730000

03 A

摘要 土壤风蚀以及沙尘暴是人类面临的重大自然灾害之一, 它直接关系着人类的生存环境和生活质量。许多国家和政府以及科学家们对此一直十分关注并开展了大量研究。由于大气和地表条件的多样性以及地表沙粒的运动与风场作用的相互耦合, 导致风沙运动问题研究的复杂性。除此之外, 伴随着对风沙运动机理的研究和对沙尘暴的观测, 人们发现在风沙跃移运动和沙尘暴中的沙粒带有电荷并形成风沙电场。沙粒的运动不仅导致沙粒带电和风沙电场形成, 而且也直接受到沙粒带电和风沙电场的影响。为了弄清风沙电的起因以及揭示其影响规律, 研究人员对此进行了野外观测、实验室测量和理论推测等。本文将就这一问题重点介绍有关风沙运动中沙粒带电的机理、风沙电场分布规律、沙粒带电对风沙运动的微宏观物理量以及沙尘暴中沙粒带电对电磁波散射的影响等方面实验和理论研究的基本概况和进展以及作者等人在此方面的研究工作。主要内容有: 沙粒带电及其电场的基本实验测量, 沙粒带电对风沙运动的影响, 沙尘暴对电磁波衰减的影响研究以及有关风沙起电的机理研究等。同时, 对这一研究领域中目前关注与存在的主要问题给予评述。

关键词 风沙电场, 沙粒带电机理, 宏微观影响, 实验测量, 理论分析

1 引言

近些年来, 频繁发生的沙尘暴, 特别是能见度几乎为零的强沙尘暴, 对我国北方乃至更大范围地区的工、农业与人民生活造成了严重影响。与此相随, 日益严重的土地沙漠化趋势所导致的草场和耕地沙化、村镇被流沙掩埋等, 对我国的可持续发展构成了严重威胁。风沙运动造成的危害不仅引起了我国政府的高度重视和公众的日益关注, 也吸引许多科技工作者对风沙运动的成因与发展规律展开深入研究, 以期通过不断了解并揭示风沙运动的基本规律和机理, 来达到对沙尘暴开展有效预报和对沙漠化进行防治的目的。

人类对风沙运动现象与机理的研究可追溯到20世纪早期土壤风蚀和沙尘暴灾害对人类生产活动产生明显影响的时期。在Bagnold等许多学者对风沙运动所进行的大量野外观测和风洞实验的基础上^[1~6], 人们对沙粒在风场作用下发生沙粒起动、碰撞、击溅、反弹和自反馈平衡等现象以及蠕移、跃移、悬移

等主要运动形式有了一定的了解, 详见文[1, 7]。与此同时, 建立了一系列用于描述风沙运动基本过程和主要运动形式的数学模型^[8~18]。然而, 正如Anderson等^[19]在20世纪90年代的综述文章中所指出的: 已有模型还远未达到能够准确预报人们所关注的风沙运动宏观量如输沙率、风速廓线等的程度, 同时也缺乏足够的实验来规范理论模型。究其原因主要在于风沙运动系统为涉及大气、地理环境、生物植被和土壤物理与化学等过程的强非线性耦合性以及时间和空间跨尺度的复杂性系统。这样, 就使得对风沙运动带电现象的描述和对其影响规律的揭示研究出现一定的滞后, 还远未像风沙运动的研究那样广泛和深入^[20~29]。这里除了“电”因素的加入增加了原有问题的复杂性外, 还受到太空探索活动需求的推动。研究发现: 太空其它星球地貌形成过程中静电力作用是影响风沙活动的主要因素之一; 此外, 在20世纪末美国宇航局制定的登陆火星计划中为了保证探测仪器设备免遭静电干扰, 考虑了火星地表层内风沙流中的风沙电效应及其影响规律^[30~36]。

收稿日期: 2002-04-27, 修回日期: 2003-09-06

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G2000048702)、国家杰出青年科学基金(10025208)、教育部重点科学技术基金、教育部高校博士点专项基金资助项目。

我们知道,风沙灾害的主要核心为大量沙粒在风力载荷作用下的运动。当沙粒带电后,风沙流中的带电沙粒一方面产生电场,同时带电沙粒也受到电场力的作用而改变沙粒的基本运动,进而影响到沙粒的宏观运动物理量。到目前为止,由于人们对风沙电现象的认识还非常有限,多数描述风沙运动的数学模型与理论分析几乎都没有考虑静电力的影响^[12~17],从而有关风沙运动的理论模型和理论分析研究的准确程度必然会影响到影响。

作者近年来对伴随风沙运动的沙粒带电现象及其影响开展了一些实验和理论研究,获得了一些初步结果^[23~29,37~38]。以下将结合作者等人在这一领域的研究工作,就沙粒带电的基本规律及其所产生的主要影响等方面的研究概况给予介绍和评述。

2 沙粒带电和风沙电场的实验测量

人们很早就发现,沙粒从不同材料制成的漏斗中落下时会带有正电荷或者负电荷,由此来解释风沙流中的沙粒也会带电^[39~41]。例如,Shaw等^[42]通过采用喷气机将沙粒吹过沙纸带,发现在室温下沙粒带负电而沙纸带正电;同时,随着喷出气体温度的升高,各自所带电荷量都有明显增加。限于当时的实验条件,人们还很难知道为什么沙粒有时带正电,有时带负电。在20世纪60年代,随着人类对宇宙和其它星球研究与探测的需要,人们一方面需要了解沙粒带电对风沙运动的影响,另一方面也需要解释地球、火星、金星等地表风沙地貌的形成与发展过程,由此激发了许多科学家对风沙带电现象的实验测试与理论分析研究^[43~51]。研究发现,风沙流中沙粒所带正电荷还是负电荷同沙粒粒径有很大关系。一般来说,大沙粒带正电荷,小沙粒带负电荷。对此,Lathem^[52]从沙粒带电机理的角度给出推测:风沙运动中的沙粒带电主要由不同粒径沙粒在运动过程中经碰撞的瞬时摩擦产生。由于沙粒粒径和质量的不同而导致经碰撞摩擦过程中两沙粒温度的差别,即大沙粒具有低的温度而小沙粒具有高的温度。于是,小沙粒上的正离子在接触过程中被传递到大沙粒上,从而导致小沙粒带负电荷而大沙粒带正电荷(详细介绍和评述将在本文第5节给出)。对于“均匀沙”(即:粒径分布某一相对窄小范围内的沙样),将存在一临界粒径,当沙粒粒径大于这一临界值时,沙粒带正电;而当沙粒粒径小于其临界值时,沙粒带负电。Greeley & Leach^[36]通过风洞试验,给出的临界粒径为60 μm。后来的研究结果表明:对不同地区的沙样,其临界粒径是有所不同的^[53~55]。

在对沙粒带电现象进行观测和实验研究的同

时,作为沙粒带电的主要外在反映,研究者们也注意到了风沙电场的存在。Gill^[20]观测到沙尘暴过境地带有强电场和电火花现象出现,同时还对无线电信号产生干扰。Freier^[56]在对Sahara沙漠的一次强沙尘暴中测量电场时发现,带负电的沙粒一般位于风沙流层的上部,而带正电的沙粒位于贴近地表的下方,它们形成的风沙电场与晴天电场方向相反、强度远大于晴天电场。Crozier^[57]在新墨西哥州对尘暴所进行的电场记录没有发现与Freier的测量相类似的现象,只是观测到一个大的负电荷中心。Kamra^[46]在对美国西南部某处发生的沙尘暴的测量中发现,在离地面1.25 m高度处正电场和负电场都有可能出现,且一般可达几kV/m。而在如此高的风沙电场强度下,一般来说,可引起仪器的尖端发生电晕和尖端放电现象^[58]。在我国沙尘暴的频发地区,由于通讯线路大多为裸线,在强沙尘暴发生时,往往会产生很高的静电电压。如在甘肃民勤观测站,就曾在通讯线路上观测到由沙尘暴产生的附加电压高达2700 V^[59]。我国学者还观察到尖端放电和“火线”现象,并指出这会使通讯线路受到很大干扰,甚至可发生设备击穿和人身事故^[60]。在上述风沙电场的观测研究基础上,Schmidt & Schmidt^[22]采用大气电场仪对野外风沙电场进行了定量测定。他们的结果证实风沙电场方向垂直地面向上,即:与晴天电场方向相反;在离地表面1.5 m高处的风速接近12 m/s时,在离地面0.017 m处的电场强度为166 kV/m;从Schmidt & Schmidt^[22]给出的风沙电场计算公式可以发现,风沙电场的强度沿高度是单调减小的。在实验测量结果的基础上,他们给出了拟合风沙电场的解析表达式,并推测运动沙粒应带负电。可是他们用集沙仪对粒径为150 μm的“均匀沙”在风速较强时于离地高度0.05 m处测得的沙粒平均荷质比为+60 μc/kg,即此处运动沙粒带正电荷。他们对这一看似矛盾的结果一直没有给出合理的解释。

从上面介绍的有关沙粒带电和风沙电场的已有工作不难看到,这些工作主要是对沙粒带电现象和风沙电场存在的观测和实验检测,而对沙粒带电的规律(如:所带电荷量和带电符号与粒径、风速、高度的关系等),以及风沙电场特征的定量揭示还远远不够。为此,本文作者在位于我国腾格里沙漠东部的中科院寒区旱区环境与工程研究所风沙物理与沙漠环境实验室沙坡头野外风洞中对风沙流中的沙粒带电和风沙电场进行了实验测量研究^[23~24]。我们首先对3种不同粒径范围的“均匀沙”在不同风速下吹起后离沙层表面(0.02~0.22)m高度范围内的沙粒所带平均电量或荷质比进行了测量,得到:当沙粒粒径小于250 μm时,沙粒带负电;而当沙粒粒径大

于 $500 \mu\text{m}$ 时, 沙粒带正电; 且随着风速的增加, 其各高度测得的荷质比均减小; 在给定的风速下, 沙粒荷质比随高度的上升而增大。对于混合沙(即粒径分布较宽的自然沙)情形, 实验测量除了展示出沙粒荷质比随风速增大而减小、随高度上升而增加的变化规律外, 沙粒带电的荷质比要比“均匀沙”对应同等情形要大得多, 而且在来流风速增大到 20 m/s 时, 在近地层附近的风沙流内才出现沙粒带正电的测量结果, 这与 Schmidt & Schmidt^[22] 的在野外的测量结果有些类似。与此同时, 作者等人还测量了风沙流内的电场分布情况。有关电场强度大小随高度变化的测量结果示于图 1 和图 2。实验结果表明: 电场强度的测量值均为负值, 即风沙电场与晴天大气电场方向相反, 且电场强度的绝对值在一定高度范围内随高度的上升而增大; 在相同风速下, 由小粒径沙粒形成的风沙流, 其电场强度要大于大粒径沙粒情形的电场强度。同时, 在相同沙粒粒径范围内, 电场强度随轴线来流风速的增大而上升。风沙电场呈现的这些规律与小粒径沙粒数目随离地面高度上升和随风速增大而增多是一致的(参见图 1); 对于混合沙情形, 风沙电场随高度上升而增大, 除地表附近小部分高高度范围的绝大部分测量高度段上风沙电场随风速增加而增大, 在近地层内却出现随风速增大而减小的实验测量结果(参见图 2)。作者等人的测量结果还显示: 混合沙的风沙电场要比“均匀沙”的风沙电场大得多。在 20 m/s 的风速情形前者的最大值要比后者

高出 20 倍以上。

为了从这些实验结果中揭示出风沙运动的一些规律, 作者在文 [24] 中对此给予了详细的阐述。我们知道: 在一般情形下, 小沙粒较大沙粒容易在风力作用下运动(包括跃移运动的高度和距离)。那么, 如果根据 Lathem^[52] 的推测, 在两不同粒径沙粒经碰撞摩擦起电后小沙粒的荷质比显然要比大沙粒的大(因为两沙粒带电量相同而小沙粒的质量却比大沙粒的质量要小)。于是, 随着风速的增大, 一方面起跳沙粒增多导致沙粒间的碰撞机会增加, 进而使反映带电量的荷值比的数值增大; 同时, 由于大沙粒进入近地表面附近的跃移层机会增多, 而大沙粒带正电荷, 从而在来流风速很大时, 带正电荷的大沙粒在近地表面附近层内占主导地位。因此, 在来流风速上升到一定强度时, 沙粒带电的测量值呈现出正的荷质比; 在来流风速不太强时, 跃移层内各处仍以带负电荷的相对小沙粒为主导而呈现出测量值为负的荷质比。这样, 在同一风速下荷质比测量值随高度增大正好表明了小沙粒的上升高度大于大沙粒的上升高度。这就是为什么在跃移层内绝大多数荷值比的测量值为负而极少情形于近地层附近为正的原因。其次, 混合沙情形的风沙电场强度远大于对应风速下“均匀沙”的风沙电场强度的实验测量结果也从另一个方面说明: 沙粒带电主要是由粒径不同的沙粒经碰撞摩擦产生。这正好与 Lathem^[52] 有关沙粒带电是不同粒径沙粒发生摩擦所致的推测是一致的。

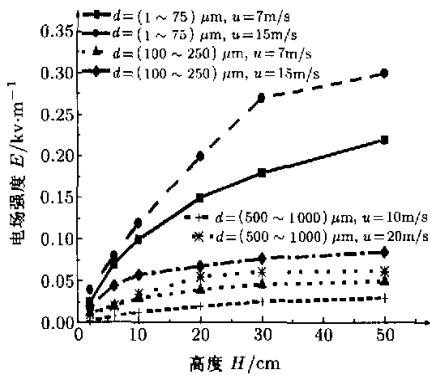


图 1 不同风速下 3 种“均匀”粒径风沙流中电场强度随高度变化的曲线

文 [23, 24] 的这些测试结果还表明风沙流中的电场主要是由被吹起的运动带电沙粒形成的。这不同于 Schmidt & Schmidt^[22] 认为电场主要由静止在沙层地表上的带电沙粒产生的观点。除了在风洞内的

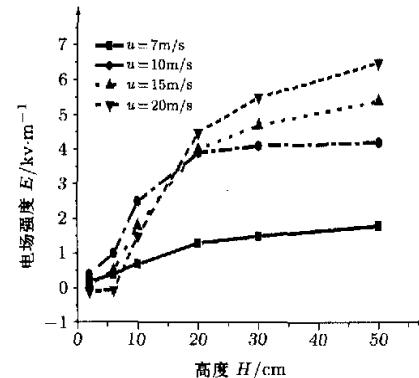


图 2 4 种风速下混合风沙流中电场强度随高度变化的曲线

风沙电场与 Schmidt & Schmidt^[22] 的野外风沙电场在定量方面的差别(这可解释为风洞内的沙床情况与野外不同, 沙源不如野外充分)外, 二者在风沙电场沿高度的分布规律上也不一致: 风洞内的电场强度

随高度上升，野外电场强度随高度下降。为了分析这一原因，本文作者等人对风沙流中的风沙电场开展了理论模拟^[61]，如图 3 展示了沙漠边缘地带风沙电场的理论模拟结果。从图 3 可见，电场强度在风沙流层中于贴近地表层附近随高度急速升高，随后趋于平缓。随着高度的继续升高，电场强度将下降到与晴天电场一致（图 3 中没有给出下降的部分）。而对于沙漠中部地区，风沙电场强度由某一电场值开始随高度一直下降。这些结果对了解风沙电场的一般规律是十分有益的。

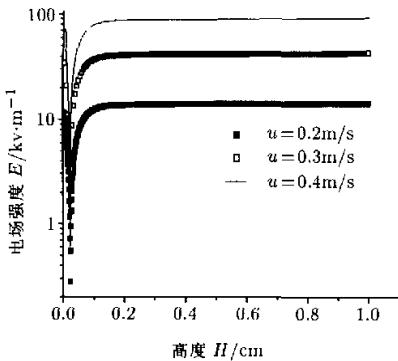


图 3 沙漠边缘地区的风沙电场理论模拟结果^[61]

3 沙粒带电对风沙运动的影响

目前，风沙运动主要分为与沙床地面的碰撞起跳、蠕移、跃移和悬移等基本形式^[60,62]。在风力作用下，沙粒的这些基本运动始终相互耦合在一起，从而给完整的风沙流运动定量研究带来很大困难。除了作为突发事件的沙尘暴展示出以悬移运动为主外，在绝大多数时间与空间尺度内，土壤风蚀的过程是以风沙的跃移运动为主导形式伴随着蠕移运动进行的。为此，关于风沙运动机理的定量模拟多数都是针对沙粒的跃移运动进行的^[8,9,12~15]。然而，在已有的对沙粒跃移所进行的定量模拟中，几乎都没有考虑沙粒带电的影响。

当风沙运动中沙粒带电并产生足够强的风沙电场被揭示和证实后，依电磁学基本理论知道，带电沙粒在电场中的运动会受到电场力的作用而改变其运动。这样人们自然会提出的显而易见问题为：沙粒的带电及其风沙电场在多大程度上影响着风沙运动中的沙粒运动以及相关的宏观物理量？由于这一研究难以用实验来直接测量，于是从风沙运动机理研究的理论模拟上来回答这类问题成为基本途径之一。然而，在缺乏沙粒带电和风沙电场的定量测量的情况下，在很长一段时间内，有关沙粒带电和风沙电场

对风沙基本运动影响的问题一直停留在推测阶段。如 Greeley & Iversen^[51] 推测：沙粒的起动风速以及沙粒跃移轨迹将受到沙粒带电和风沙电场的影响。同时他们还认为^[51]，由于在其它星球上重力和气压环境的变化，沙粒带电和风沙电场对其它星球，如火星、土星等的沙粒运动和地貌形成的影响要比地球上的更为重要。直到 1998 年，沙粒带电对风沙跃移运动的定量影响研究才由 Schmidt & Schmidt^[22] 给出。他们利用在野外风沙流中测得的沙粒带电量及风沙电场强度，采用 Anderson 等建立的风沙跃移等轨迹运动模型计算了静电力对沙粒跃移轨迹的影响。结果表明：静电力对沙粒跃移轨迹有明显的影响，即当沙粒分别带同量正、负电荷时，跃移轨迹的长度与沙粒不带电时相比分别增加了 110% 和减少了 67%；跃移高度与沙粒不带电时相比分别增加了 67% 和减少了 46%。Schmidt & Schmidt^[22] 的理论模型没有考虑沙粒运动与气流之间的相互非线性耦合作用。而理论分析表明沙粒运动对气流的反作用是不容忽略的^[1,8~9,19,62]，因为在近地风沙流跃移层内的所谓反馈自平衡机制^[8] 完全是建立在风与沙的运动相互耦合作用基础上才能得到，并已被实验和理论分析所证实。

本文作者几乎与 Schmidt & Schmidt^[22] 在同一时期开始了沙粒带电对风沙运动影响的研究。在野外风洞对沙粒带电规律和风沙电场定性测量的基础上，通过考虑沙粒运动与气流之间的相互影响以及作用在带电沙粒上的电场力，于 1999 年 3 月初步完成了沙粒带电对沙粒跃移轨迹的影响的定量计算^[28,29]，随后又进行了一些改进^[24]。与 Schmidt & Schmidt^[22] 的定量讨论相比，我们的定量分析不仅给出沙粒 - 风场相互耦合作用时沙粒带电对风沙流中沙粒跃移运动的影响，同时还给出了沙粒带电对风场风速分布、床面起沙率以及对风沙跃移层内的输沙率的影响结果。在与 Schmidt & Schmidt^[22] 的模拟结果进行比较后发现，Schmidt & Schmidt^[22] 的定量模拟结果夸大了静电力对沙粒跃移轨迹长度的影响，而低估了静电力对沙粒跃移高度的影响（见图 4）。图 4 中“不考虑耦合”表示采用 Schmidt & Schmidt^[22] 的模拟方法得到的结果，而“耦合”则表示考虑了相互耦合后得到的结果^[24]。当沙粒带电时，跃移层内的风速廓线、床面起沙率、和输沙率等宏观量也受到明显影响^[24]。当沙粒带正电荷时，与沙粒不带电相比起沙率降低，而沙粒带负电荷时起沙率上升；同时沙粒带正电荷时的输沙率比带负电荷时的输沙率要大。除此之外，Bagnold^[1] 曾在实测中发现，不管沙床上来流速度多大，在跃移层内总存在这样一个高度，在此高度处风速为一固定值，即不同风速分布曲线在此高度上相交。

速 - 高度图中将汇聚于一点, 该点被称为“Bagnold 焦点”^[9,63,64]。“Bagnold 焦点”的存在说明风场与沙粒运动是相互耦合的。Bagnold 的实验结果表明焦点的坐标为 (2.5,0.003), 即在高度为 0.003 m 处的风速为 2.5 m/s 将不随来流风速变化。在不考虑静电力影响时的理论预测结果却为 (3.2,0.007)^[9], 与实测值相比在风速值方面相差 30%, 在高度上却高出 130% 以上。在考虑静电力的影响与沙粒运动对气流的反作用后, 当沙粒带电的荷质比取为 $q = -60 \mu\text{C}/\text{kg}$ 时, 焦点坐标的理论预测结果为 (2.8,0.003), 这与 Bagnold 的实测值非常接近。上述有关风沙电的实验和理论分析研究结果^[24]已在地学界国际著名权威学术期刊《Journal of Geophysical Research》发表, 其论文评阅人对此项研究给予了充分肯定, 认为“这一研究处理了一个极其重要的课题, 并且是对颗粒带电荷作出重要解释并将其与临界风速和输沙率标准方程联系起来的少有的研究之一。在这一论文中, 展现了许多极其重要的贡献。”

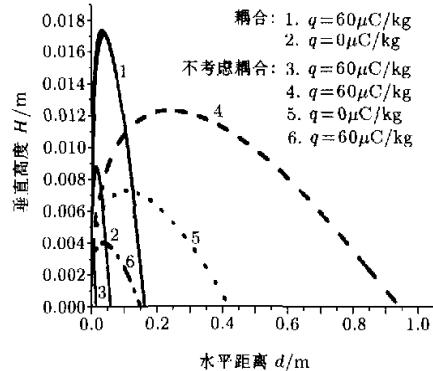


图 4 静电力对沙粒平均跃移轨道的影响^[24]

在上述研究工作的基础上, 作者等人又进一步定量分析了静电力对风沙跃移运动从起始阶段到风沙流达到自平衡状态整个发展过程的影响^[25]。在这一研究工作中, 通过改进 Anderson & Haff^[17] 的模型, 得到的数值模拟结果表明: 当沙粒带正电荷时, 风沙流达到稳定状态的时间比不考虑静电力的时间缩短了约 21%; 而当沙粒带负电荷时, 则相应延长了 6%。在沙粒带正电荷时, 我们的理论预测结果与 Shao 等^[62] 的实测结果仅相差 7.4%, 得到的有关输沙率的理论预测值^[25]与实测值^[62]也仅相差 8%。

Greeley & Iversen^[51] 曾推测沙粒的起动摩阻风速将会受到沙粒带电因素的影响, 但究竟其影响规律如何, 一直没有定性和定量方面的研究。作者等人的理论分析表明^[66]: 静电力对沙粒的起动风速的确有明显的影响且一般使得起动摩阻风速降低, 沙粒粒径

越大, 起动摩阻风速降低越明显。如当粒径为 0.001 米时, 理论分析得到沙粒带电时的起动摩阻风速比不带电时可低 50%。同时考虑沙粒带电得到的沙粒起动摩阻风速比不带电情形更接近实验测量结果^[65,66]。

4 沙尘暴沙粒带电对微波散射的影响

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突发事件。有关沙尘暴的启动机制、输运过程和沙尘暴的内部结构的认识与了解, 目前无论在实验测量还是理论分析方面都还处于非常有限的认识阶段, 缺乏对其较为完整的把握, 进而影响到对沙尘暴源头及其途经地区的灾害进行有效的监测和预报。对沙尘暴的监测主要依靠气象观测网络系统或沙尘观测网站和卫星遥感系统来进行。由于沙尘暴是突发事件, 其发生源头往往很难及时观测和捕捉。事实上, 目前能观测的均是在沙尘暴启动后发展到一定程度于途经地区测得的一些参数, 而源头则是采用气象条件或沙质的相关性进行反推估算的。由于问题的复杂性, 这些方法虽然已用于实际的推测中, 但其准确程度还有待提高。在理论模拟方面, 目前主要是通过建立空间大尺度输沙通量且与大气流动相连结的专用软件来模拟沙尘暴的启动与发展过程。但由于模拟中所使用的参数需要针对具体沙质和气象条件进行, 且需要足够的实际观测测量数据才可能取得对沙尘暴的成功预报。为此, 采用电磁波信号进行测量不仅是遥感观测中采用的主要手段, 而且也将是地面观测的一种有效方法。它具有较大尺度范围内进行全场测量的优点。由传统散射理论知道, 当电磁波穿越沙尘暴的沙尘电介质时, 沙尘电介质将引起电磁波的散射衰减, 进而希望通过其散射衰减的测量来反推出沙尘暴的强弱。除此之外, 随着对卫星及地面无线电系统使用的持续增长, 所用的频率有提高的趋势。沙尘暴对无线电通讯可能产生的影响已引起不少学者的重视。特别是在我国, 沙漠腹地的石油开采和公路建设等, 保障无线电通讯的畅通尤显重要。

已有研究表明: 沙尘暴的沙粒浓度、沙尘介质的介电常数、及所使用的无线电波频率等因素都直接影响电磁波的衰减。由于沙尘暴对无线电波, 特别是对微波信号的干扰主要源自于沙尘电介质, 因此, 人们尝试着用不同方法来测量沙尘的介电常数。有关沙粒的介电常数测量主要方法有短路波导法^[67]、开口谐振腔法^[68]以及标准谐振腔法^[69]等。通过采用一定频率电磁波来测量不同沙样的介电常数, 然后由非统一系的介电常数推出统一系的介电常数。在传统散射理论中, 当已知散射粒子的电介质常数、粒径以及浓度后, 首先建立单个粒子对电磁波的散射

模型以及在一定条件下采用 Rayleigh 近似^[70](也可以不采用这一近似处理, 只是分析起来要复杂些) 对无线电信号能量的衰减进行计算, 然后采用与散射粒子浓度或能见度相联系的经验公式就可给出散射粒子介质对电磁波散射系数的预测值。最早估计沙粒对电磁波传播影响的是 Ryed^[71]。他通过估计悬移沙粒的质量密度, 并把沙粒视为石英, 计算了半径为(1~25) μm 的沙粒对雷达的折射率。随后, Ahmed & Auchterlonie^[72] 和 Ahmed^[73] 通过测量沙粒的介电常数, 估算了当沙粒浓度为 10 g/m³ 情况下, 10GHz 电磁波的衰减约为 0.1 dB/km。Ghobrial^[74] 计算了沙粒浓度为 10⁶ 颗 / m³、介电常数为 3.7+j0.01 ($j = \sqrt{-1}$) 时 9.4 GHz 电磁波的衰减为 10⁻³ dB/km。由于沙尘暴的强弱在气象学中通常是采用能见度来衡量的(例如, 将能见度为 50m 以下的沙尘现象定义为强沙尘暴)。为此, Chu^[67] 建立了沙尘暴能见度与沙粒浓度的经验关系, 并对给定能见度时不同粒径情形下无线电波的衰减进行了计算, 得到其衰减与沙粒粒径成正比。在此基础上, Ghobrial^[74] 理论预测了 X-band 波在能见度仅有 (4~5) m、沙粒浓度约为 10⁸ 颗 / m³ 的强沙尘暴时电磁波的衰减为 1 dB/km。Haddad 等^[69] 对 9.4 GHz 的电磁波在能见度为 10 米的强沙尘暴中的散射衰减系数在采用上述散射理论计算得到的衰减系数为 1 dB/km。由这些理论计算结果似乎看不出沙尘暴对无线电波有明显的影响。

然而, 实际测量却并非如此。Al-Hafid 等^[75] 测量了强沙尘暴情况下电磁波的衰减; Haddad 等^[69] 采用 9.4 GHz 的电磁波在能见度为 10 米的强沙尘暴中测得的散射衰减为 34 dB/km, 这远远高出他采用传统散射理论对此给出 1 dB/km 的理论值。实测值与理论值之间如此之大的差别引起了科学家们的关注。许多学者从不同的角度分析了实测值与理论值存在较大差异的原因。如 Ghobrial^[76]、Ansari & Evans^[77] 分析了沙粒的含水量对沙粒介电常数的影响, 发现沙粒的介电常数会因为沙尘介质的含水量而发生改变, 他们具体计算了干沙情况下 10 GHz 的电磁波的衰减为 0.58 dB/km, 当含水量达 16.8% 时, 衰减提高为 1.73 dB/km; 并且随着无线电波频率和沙粒随含水量的增加, 散射衰减将随之增加。但是, 这种增加量没有使散射衰减的理论预测值上升到实测值的量级。尽管如此, Bashir 和 McEwan^[78] 在综述这方面研究时仍认为所存在的这类差别还不能足以说明传统散射理论在分析方法上存在问题。

周又和等在对这一问题的研究中, 通过考虑沙粒的带电因素^[37,38], 在采用 Rayleigh 近似^[70] 并假设沙粒上的电荷分布为局部区域后, 采用传统的散射理论分析方法^[70], 求得了带电沙粒对电磁波散射的解

析解, 所得结果与 Haddad 等^[69] 的实测结果一致。研究结果表明: 沙尘暴中的沙粒带电量对电磁波的散射有明显影响, 理论结果发现^[37,38]: 沙尘暴对电磁波散射的影响程度除了与通常所知的沙尘暴的沙粒浓度(或能见度)、沙粒的平均粒径以及沙粒介电常数等因素有关外, 还与沙粒带电量, 即: 沙粒的荷质比或表面电荷密度, 和电荷分布区域的大小有关。在前者各因素一定的条件下, 通过选取不同的荷质比或面电荷密度, 所得到的计算结果与 Haddad 等^[69] 实测结果所对应的电荷分布区域如图 5 所示。在图 5 中, 纵坐标 A 表示风沙介质对电磁波的衰减系数, σ 表示沙粒表面的面电荷密度, θ_0 为分布在球形沙粒表面的球冠角度。理论研究还表明: 当沙粒电荷均匀分布在整个沙粒表面时, 理论预测的散射衰减系数与不考虑沙粒带电时的沙尘暴散射理论给出的预测结果完全一样, 即: 此时沙粒带电与否均没有差别。由此, 我们可以推断: 沙粒表面所带电荷只可能是局部分布。由图 5 可见, 衰减系数除了与沙粒浓度等

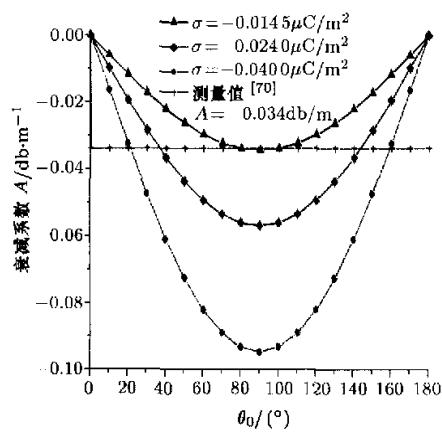


图 5 考虑沙粒带电的沙尘暴对电磁波的衰减系数的理论预测值随局部面电荷分布角的变化曲线

因素有关外, 还与表面电荷密度、电荷分布区域等有关。电荷密度和电荷分布区域与沙粒带电的荷质比相关联, 后者可以由实验测得。依照这些关系, 根据 Haddad 等^[69] 的电磁波散射系数实测值可以得到对应于不同沙粒荷质比随局部分布电荷角的关系曲线示于图 6, 即可以由风沙介质的电磁波衰减实验与带电的荷质比实验来确定沙粒表面电荷分布区域的平均值。而目前的实验还几乎无法对沙粒所带电荷的分布区域进行测量或观测。因此, 作者等人的这一考虑沙粒带电的沙尘暴散射模型除了能有效预测由沙尘引起的电磁波的散射特征外, 还为测量沙粒表面带电的分布特征提供了一种可能的途径。同时, 沙粒表面所带电荷只可能是局部分布的推论也从另一方

面支持了 Lathem^[52] 有关沙粒带电是不同粒径沙粒发生摩擦所致的推测 (详见下节).

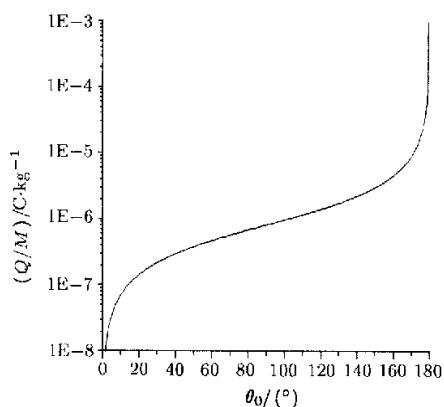


图 6 在沙尘暴散射系数一定时, 沙粒带电的局部区域随沙粒带电荷质比的变化曲线 ($A = -0.034 \text{ db/m}$)

5 关于沙粒带电的产生机理

在人们从自然界观测和实验测量中认识并证实了风沙运动的电现象后, 有关沙粒带电的产生原因与机理的研究就成为人们关注的基本课题. 由于受实验测量能力与仪器的限制, 目前还难以对沙粒带电的过程进行直接观测与定量测量, 甚至连测量风沙流中单一沙粒上的电荷量也几乎是不可能的. 在此情形下, 对沙粒带电的机理研究目前还一直停留在各种推测和假说阶段. 正如本文第 2 节所指出的, Lathem^[52] 是较早开始尝试对沙粒带电进行解释的一位学者. 他注意到: Workman & Reynolds^[79] 在研究雷电机理时所发现的水滴和冰面碰撞而导致冰面带负电荷和溅起的水滴带正电荷的现象. 这一现象与在风吹雪研究中小颗粒带正电、大颗粒带负电的现象^[53] 相一致. Lathem 认为: 沙粒带电主要是由于大小不同的两个沙粒间的非对称碰撞所致, 并在碰撞瞬间由于沙粒表面积的差异使两沙粒间有一温度差, 这种温度差导致某种离子沿温度梯度方向进行转移, 因此两个沙粒就分别带有异号电荷. 这一假说虽然在他后来关于雪粒的温度梯度可以产生电荷分离^[80] 以及当雪粒比较粗糙且碰撞速度比较大时由热电现象引起的电荷分离将会增强等基本实验结果^[81] 研究得到了支持, 但尚未直接得到实验验证. 主要困难在于很难对两个不同粒径的沙粒测量其碰撞瞬间的温度差和电荷量. 另外, 两颗细小沙粒的瞬间碰撞的温度差是否足以导致离子转移还不得而知. 从本文的介绍可以看出, 本文作者在风洞中的风

沙电实验结果和有关沙粒带电对电磁波影响的研究间接支持了 Lathem^[52] 的沙粒带电假说.

除了 Lathem 的沙粒带电成因解释外, 人们对沙粒带电的成因还提出许多另外的猜测和解释. Kanay & Mann^[53] 将众多的物理解释归纳为七种: (1) 大气电场对沙粒的极化作用. 斯捷格尔在解释这一观点时认为^[60]: 处于大气电场中的沙粒作为一电介质被极化后, 电荷被拉到颗粒的两端, 然后碰撞、雾化等作用使沙粒分离而不再显示电中性; (2) 两个起初不带电的沙粒在摩擦后都带上了电荷. 凌裕泉等^[59] 认为风沙电场形成的直接原因是沙尘暴中沙粉尘的不规则运动产生的摩擦起电现象; (3) 两种不同材料的物质相接触, 在离开时会使两者都带电; (4) 晶体裂解为多块时, 各部分都会带上电荷; (5) 光子撞击或宇宙射线中的带电粒子入射到沙粒的表面; (6) 晶体加热后会在晶轴的两端产生异号电荷; (7) 晶体受到应力后会在两端积累电荷. 在上述 7 种物理解释中, 第(1)、第(5)~第(7) 种解释都意味着沙粒不运动也可能带电, 而作者等人的实验^[23,24] 发现风沙活动的强弱不同可导致风沙带电及其风沙电场发生明显的变化, 这表明沙粒带电与沙粒的运动相关联. 因此, 第(1)、第(5)~第(7) 种解释虽然可能是风沙运动中沙粒带电的一种方式, 但可以断言它们都将不是起决定性作用的起电方式. 不仅如此, 这些解释涉及的极化作用、雾化作用、宇宙射线作用以及热电作用和压电作用也很难解释实验观测到的大沙粒带正电荷, 小沙粒带负电荷的现象. 至于第(3) 种解释, 在一般情形下, 同一地区的沙粒一般来说性质的差异较小. 而沙粒的主要成分是二氧化硅, 这样由材料不同而导致带电的可能性不大, 进而用晶体裂解来解释沙粒带电的第(4) 种推测似乎也不妥. 剩下仅第(2) 种解释在某种程度上与 Lathem^[52] 的解释有相近之处, 只要我们将第(2) 种解释所提到的摩擦理解由沙粒间的碰撞引起, 且两沙粒粒径不同就可以了.

6 结束语

风沙电现象是伴随风沙运动经由沙粒运动起电而产生的一种自然现象. 对沙粒带电及其所产生的风沙电场的研究, 不仅在揭示风沙电的一些自然现象、弄清风沙运动的机理研究等方面是极其重要的, 而且作为认识风沙流和沙尘暴内部结构特征的基本工具和手段, 将是极具潜力的一种重要途径. 从前面的介绍我们可以看出, 风沙电及其基本规律的研究仍然处于初期阶段, 特别对于沙粒带电与风沙运动之间相互影响的耦合关系, 虽然是风沙运动与风沙电机理研究的重点, 但目前对其还几乎没有认识和了解. 实际

上，还存在着大量的基础性研究需要进一步推进和深入，包括可控条件下的基础性实验测量（如风洞实验）、理论建模和野外观测等。前者将为揭示风沙电现象的产生机制与规律提供基础，通过理论建模可望实现风沙自然现象和将风洞实验结果推广到复杂自然环境的定量模拟，野外观测将为检验上述研究途径的合理性提供依据。风沙电现象将不仅作为自然现象为人们所认识，更重要的是在掌握规律的基础上，将趋利避其害，以达到使其成为对风沙运动和沙尘暴监测与检测的一种有用工具的目的。

致谢 本文作者所在的兰州大学电磁固体力学与智能结构研究所多位研究生参与了本文相关部分的研究工作，以及论文批阅人对本文初稿提出了许多很好的建议，在此作者一并表示衷心的感谢！

参 考 文 献

- 1 Bagnold R A. *The physics of blown sand and desert dune.* Methuen, London, 1941
- 2 Zingg A W. A study of the movement of surface wind. *Agr Eng*, 1949, 30: 11~13
- 3 Chepil W S. An air elutriator for determining the dry aggregate soil structure in relation to erodibility by wind. *Soil Sci*, 1951, 71: 197~207
- 4 Werner B T, Haff P K. A simulation study of the low energy ejecta resulting from single impacts in eolian saltation. In: Arndt R E A, Stefan H G, et al, eds. *Advancements in Aerodynamics, Fluid Mechanics, and Hydraulics*, ASCE, New York. 1986. 337~345
- 5 Dong Z, Wang X, Zhao A, Liu L, and Liu X. Aerodynamic roughness of fixed sandy beds. *Journal of Geophy Res*, 2001, 106(6): 11001~11011
- 6 Zhou Y H(周又和), Guo X(郭翔), Zheng X J(郑晓静). Experimental measurement of wind-sand flux and sand transport for naturally mixed sands. *Physical Review E*, 2002, 66: 021305.
- 7 董飞, 刘大有, 贺大良. 风沙运动的研究进展和发展趋势. 力学进展, 1995, 25: 368~391
- 8 Owen P R. Saltation of uniform grains in air. *J Fluid Mech*, 1964, 20: 225~242
- 9 Ungar J, Haff P K. Steady state saltation in air. *Sedimentology*, 1987, 34: 289~299
- 10 戚隆溪、王柏麟. 土壤侵蚀的流体力学机制 (II)——风蚀. 力学进展, 1996, 26(1): 41~55
- 11 刘振兴. 关于风沙问题的研究 (1): 近地层湍流大气中沙的传输. 气象学报, 1960, 31: 75~83
- 12 Anderson R S, Haff P K. Simulation of eolian saltation. *Science*, 1988, 241: 820~823
- 13 McEwan I K, Willetts B B. Numerical model of the saltation cloud. *Acta Mech, Suppl*, 1991, 1: 53~66
- 14 McEwan I K, Willetts B B. Adaptation of the near-surface wind to the development of sand transport. *J Fluid Mech*, 1993, 252: 99~115
- 15 Shao Y, Li A. Numerical modeling of saltation in atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol*, 1999, 91: 199~225
- 16 McEwan I K, Jefcoate B J, Willetts B B. The grain-fluid interaction as a self-stabilizing mechanism in fluvial bed transport. *Sedimentology*, 1999, 46: 407~416
- 17 Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air. *Acta Mech*, 1991, (Supp) 1: 21~25
- 18 Livingstone I, Warren A. *Aeolian Geomorphology: An Introduction.* London: Addison Wesley Lonman Limited, 1996. 211
- 19 Anderson R S, Sorensen M, Willetts B B. A review of recent progress in our understanding of Aeolian sediment transport. *Acta Mech supp1*, 1991, 1: 1~19
- 20 Gill E W B. Frictional electrification of sand. *Nature*, 1948, 162: 568~569
- 21 Schmidt D S, Dent J D. A theoretical prediction of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles. *Ann Glaciol*, 1993 18: 234~239
- 22 Schmidt D S, Schmidt R A. Electrostatic force on saltating sand. *J Geophy Res*, 1998, 103: 8997~9001
- 23 Huang N, Zheng X J. A laboratory test of the electrification phenomenon in wind-blown sand flux. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46: 417~420
- 24 Zheng X J(郑晓静), Huang N(黄宁), Zhou Y H(周又和). Laboratory measurement of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D10): 4322
- 25 Huang N, Zheng X J. Theoretical simulation of developing process of wind-blown sand movement. *Key Engineering Materials*, 2003, 243: 589~594
- 26 黄宁, 郑晓静, 陈广庭, 屈建军. 沙尘暴对无线电波的影响的研究. 中国沙漠, 1998, 18: 350~353
- 27 黄宁, 郑晓静. 带电沙粒的跃移云数值模型. 兰州大学学报, 2002, 38: 30~35
- 28 Huang N, Zheng X J. A theoretical prediction of the effects of electrostatic force on saltating particles. In: Proc in Experimental and Computational Mechanics in Engineering and Material Behaviour, Urumqi, China, Sep. 1999. 358~363
- 29 郑晓静, 黄宁. 风沙流中沙粒带电规律及其影响. “力学2000”学术大会论文集. 北京: 气象出版社, 2000. 219~220
- 30 Leach R N. Effect of Pressure on Electrostatic Processes on Mars. Sand and Dust on Mars. NASA CP-10074, 1991. 36
- 31 White B R, Lacchia B M, Greeley R, Leach R N. Aeolian behavior of dust in a simulated martian environment. *J Geophys Res*, 1997, 102: 25629~25640
- 32 Leach R N. Effect of pressure on electrostatic process on Mars, sand and dust on Mars. NASA CP-10074, 1991. 36
- 33 Grard R. Solar photon interaction with the Martian surface and related electrical phenomenon. *Icarus*, 1995, 114: 136~137

- 34 Landis G A. Mars dust removal technology. *J Propulsion and Power*, 1998, 14(1): 126~128
- 35 Sickafuse A A, Colwell J E, Horanyi M, Robertson S. Experimental investigations on photoelectric and triboelectric charging of dust. *J Geophys Res*, 2001, 106
- 36 Greeley R, Leach R. 1978. A preliminary assessment of the effects of electrostatics on Aeolian process. Rep Planet Geol Program, 1977~1978, NASA TM 79729, 1978. 236~237
- 37 Zhou Y H, He Q S, Zheng X J. A theoretical modeling of scattering attenuation of microwave propagating in sand-storm. In: Proc VIII International Congress of Ecology, 02-08-11-18, Seoul, Korea, 2002
- 38 He Q S, Zhou Y H, Zheng X J. Scattering and attenuation of electromagnetic waves in sand storm. *Key Engineering Materials*, 2003, 243/244: 577~582
- 39 Gill E W B, Alfrey G F. Frictional electrification. *Nature*, 1949, 163: 172.
- 40 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
- 41 Peterson J W. The influence of piezo-electrification on tribo-electrification. *Phys Rev*, 1949 76, Ser 2: 1882~1883
- 42 Shaw P E, J N Chubb. Tribo-electricity and friction IV-Electricity due to air-blown particles. *Proc R Soc London Ser A*, 1929, 122: 48~58
- 43 Kunkel W B. The static electrification of dust particles on dispersion into a cloud. *J Appl Phys*, 1950, 21: 820~832
- 44 Eden H F, Vonnegut B. Electrical breakdown caused by dust motion in low-pressure atmospheres: considerations for Mars. *Science*, 1973, 180: 962~963
- 45 Greeley R. Silt-clay aggregates on Mars. *J Geophys Res*, 1979, 84(B11): 6248~6254
- 46 Kamra A K. Measurements of the electrical properties of dust storms. *J Geophys Res*, 1972, 77: 5856~5869
- 47 Kamra A K. Electrification in an India dust storm. *Weather*, 1969, 24(4): 145~146
- 48 Mill A A. Dust clouds and frictional generation of glow discharges on Mars. *Nature*, 1977, 268: 614
- 49 Stow C D. Dust and sand storm electrification. *Weather*, 1969, 24(4): 134~140
- 50 Singer S F, Walker E H. Electrostatic dust transport on the lunar surface. *Icarus*, 1962, 1: 112~120
- 51 Greeley R, Iverson J D. Wind as a geological process. *Cambridge University Press*, 1985, 322
- 52 Latham J. The electrification of snow storms and sand-storms. *Q J R Meteorol Soc*, 1964, 90: 91~95
- 53 Kanagy II S P, Mann C J. Electrical Properties of aeolian sand and silt. *Earth-Science Reviews*, 1994, 36: 181~204
- 54 Israelsson S. Measurements of surface-air space charges carried by dry wind~driven dust. *J of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1994, 56: 1551~1556
- 55 Horanyi M, and G Lawrence. Charged dust currents on the surface of Mars. *Physica Scripta*, 2001, T89: 130~132
- 56 Freier G D. The electric field of a large dust devil. *J Geophys Res*, 1960, 65: 3504
- 57 Crozier W D. The electric field of a New Mexicow dust devil. *J Geophys Res*, 1964, 69: 5427~5429
- 58 赵凯华, 陈熙谋. 地球学 (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1985
- 59 凌裕泉, 贺大良, 李长治. 风沙电现象实验研究. 见: 中科院兰州沙漠所治沙会议论文集, 1984
- 60 刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995
- 61 Guo X, Zheng X J, Zhou Y H. Research on theoretical predictions of electric field generated by wind-blown sand. *Key Engineering Materials*, 2003, 243: 583~588
- 62 Shao, Y. Physics and Modeling of Wind Erosion. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000
- 63 McEwan I K. Bagnold's kink: a physical feature of a wind velocity profile modified by blown sand. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1993, 18: 145~156
- 64 McKenna Neuman C, Nickling W G. Momentum extraction with saltation: implications for experimental evaluation of wind profile parameters. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 68: 35~50
- 65 Shao Y, Raupach M R. The overshoot and equilibration of saltation. *J Geophys Res*, 1992, 97: 20559~20564
- 66 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987
- 67 Chu T S. Effects of sandstorms on microwave propagation. *Bell Syst Tech J*, 1979, 58: 549~555
- 68 Al-Bader S J, Dawoud M M. Measurements of the complex refractive index of soils and airborne particles. In: Proc. URSI Commission F Symposium. Louvain-la-Neuve, Belgium: ESA publication SP-194, 1983. 149~152
- 69 Haddad S, Salman M J H, Jha R K. Effects of dust/sand storms on some aspects of microwave propagation. In: Proc. URSI Commission F Symposium. Louvain-la-Neuve, Belgium: ESA publication SP-194, 1983. 153~161
- 70 金亚秋. 电磁散射和热辐射的遥感理论. 北京: 科学出版社, 1993
- 71 Ryde J W. Echo intensities and attenuation due to clouds, rain, hail, sand and dust storms at centimetre wavelengths. Report 7831, Research Laboratories of General Electric Company Ltd. 1941. 22~24
- 72 Ahmed I Y, Auchterlonie L J. Microwave measurements on dust, using an open resonator. *Electron Lett*, 1976, 12: 445
- 73 Ahmed I Y. The effects of sand and dust storms on microwave propagation. *Arab States Broadcast Union Tech Rev*, 1977, 1: 23~29
- 74 Ghobrial S I. Effects of sandstorms on microwave propagation. In: IEEE National Telecomms Conf, Houston, Texas, 1980. 4351~4354
- 75 Al-Hafid H T, Gupta S C, Ibrahim M. Propagation of microwaves under adverse sand storm conditions of Iraq. In: Proc North American Radio Science Meeting. URSI F. 5 AP-S 1980. 274
- 76 Ghobrial S I. Effects of hydroscopic water on dielectric constant of dust at X-band. *Electron Lett*, 1980, 16(10): 393~394
- 77 Ansari A J, Evans B G. Microwave propagation in dust and

- sand storms. *IEE Proc F, Commun, Radar & Signal Process*, 1982, 129: 315~322
- 78 Bashir S O, McEwan N J. Crosspolarisation and gain reduction due to sand or dust on microwave reflector antennas. *Electron. Lett.*, 1985, 21: 379~380
- 79 Workman E J, Reynolds S E. A suggested mechanism for the generation of thunderstorm electricity. *The Phys Rev*, 1948, 74(1-6): 709
- 80 Lathem J, Saunders C P R. Experiments of the collection efficiencies of ice crystals in electric fields. *Quart J R Met Soc*, 1948, 96: 257~265
- 81 Lathem J, Stow C D. The influence of impact velocity and ice specimen geometry on the charge transfer associated with temperature gradients in ice. *Quart J R Met Soc*, 1965, 91: 462~470

ADVANCES IN INVESTIGATION ON ELECTRIFICATION OF WIND-BLOWN SANDS AND ITS EFFECTS*

ZHENG Xiaojing HUANG Ning ZHOU Youhe

Departhemt of Mechanics, Lanzhou Univeristy, Gansu 730000, China

Abstract The wind erosion of soil and sandstorms are severe natural disasters for human beings, which have a direct influence on people's living environment and living quality. Many countries and their governments with their scientists have been paid much attention to these problems and done a lot of researches. Various atmospheric and earth surface conditions and the coupling interaction between the movements of wind-blown sand particles and the wind flow lead to complex sand movements. Besides that, it was found that there is an electric charges on wind-blown sand particles and there is an electric field an by charged sand particles. The movements of sand particles not only result in electric charges on sand particles and an electric field, but also are influenced by the charges and the electric field. In order to understand better the electrification of wind-blown sands and reveal its influences, many observations in fields, measurements in laboratories, and analyses in theory have been made. In this paper, we review some recent advances in experimental and theoretical researches as well as the authors' work on the electrification of wind-blown sands, and the electric field generated by wind-sand movements, the effect on micro- and macro-physical quantities of wind-blown sand motions and the effect of charged sand particles in sandstorms on the scattering of electromagnetic waves propagating through the sandstorms, which include some measurement results on the electrification in wind-blown sand flux and its electric field, the effect of electrification of wind-sands on movement of wind-blown sand particles, the scattering of electromagnetic waves propagating in sandstorms with charged sand particles, and some discussions on the mechanism of electrification in wind-blown sand flux. Meanwhile, some main problems that should be taken into account in this research area are also reviewed in this paper.

Keywords electric field of wind-blown sands, electrification mechanism of moving sands, effect on micro- and macro-quantities, experimental measurement, theoretical analyses

* The project supported by the National Key Basic Research and Development Fund of the Ministry of Science and Technology of China (G2000048702), the National Natural Science Foundation of China for Outstanding Young Researchers (10025208), the Key Fund of Science and Technology and the PhD Program Fund of the Ministry of Education of China.