

文章编号 :1001-8166(2002)04-0572-04

风沙电研究的现状及展望*

李 芳, 屈建军

(中国科学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, 甘肃 兰州 730000)

摘要 括要回顾了风沙电研究现状, 主要内容包括研究动态:主要是从风沙电的野外实地观测和室内实验模拟测试, 来揭示风沙电这一自然现象的规律;风沙电对电波传播影响研究:主要从折射效应、吸收、散射和带电沙粒的散射影响进行探讨。并提出了研究中存在的问题和发展趋势。

关键词 风沙电 沙尘暴 无线电波

中图分类号 P427.3 **文献标识码** :A

风沙电是沙尘暴过程中产生的一种物理现象。近年来, 我国沙尘暴天气肆虐, 尤其是 2000 年春天以来已发生了 12 次强沙尘暴, 不仅袭击了西北、华北地区, 而且波及江苏、山东、安徽、湖北等省, 其特征是发生时间早、频率高、强度大、范围广。形成沙尘暴天气需要 3 个基本条件:①气象条件 强大而持续的风, $V \geq 25 \text{ m/s}$; ②环境条件:地表有丰富的沙源, 植被稀少, 空旷裸露; ③系统过境区局地温湿层结构不稳定。

沙尘暴是一种猛烈的天气过程, 与中小尺度风暴相比, 它只是缺少了降水过程, 而且有特别强烈的风动力过程, 同时伴随有强烈的电活动过程。

1 历史回顾

沙风过境常观察到高压打火、输电网络跳闸、通讯干扰等, 这种风沙电现象早在 20 世纪 40 年代就已引起 Gil^[1] 的注意, 此后 Latham^[2] 和 Greeley 等^[3] 逐渐关注沙尘暴电结构形成的原因, 最早提出不对称摩擦起电概念:在吹沙过程中, 不同尺度沙粒发生相对运动而碰撞摩擦, 接触表面形成温度梯度, 小粒子温度高, 大粒子温度低。附着于沙粒表面的水分子会游离出正氢离子(H^+)和负氢氧根离子(OH^-), 表面温差便更大, H^+ 聚集于大粒子上而带正电荷, 小粒子留下 OH^- 带负电荷, 从而形成电荷分离。90

年代以来, Schmidt 等^[4] 进行了一些试验性研究, 在 12 m/s 风速流沙地面上测量到地面最大电场达到 166 kV/m(1.7 cm 高度), 荷质比为 60 $\mu\text{C/kg}$, 并从理论模式上研究了沙粒所受的静电场力, 也研究了风沙对无线电通讯传播的影响。这些研究证实了一点, 即吹沙过程或沙尘暴中的粒子都带有某种特性的电荷, 而且细沙粒的荷质比远大于粗沙粒, 但仅局限于沙粒本身对波传播的影响, 而没有考虑沙粒带电的作用, 并且, 这些研究多偏重于实验测量, 理论研究薄弱, 尤其是沙粒在电场环境中运动研究较少。

2 研究动态

本节仅介绍风沙电研究两个方面的动态:

第一 野外实地观测。主要集中在关于风沙运动的物理方面的研究, 即将风沙运动作为一个两相流的动力学系统进行研究, 从浅渐深的探讨沙粒运动的力学机制、临界风力、沙粒跃移的运动轨迹特性、风力输沙的单位面积输沙率等基本问题。有关风沙运动的初步探讨可以追溯到 19 世纪末和 20 世纪初, 随后国内外诸多学者在风沙物理学的理论和实验方面做了大量的研究工作, 主要有宏观和准微观两种方式相结合的方面发展。由于风沙运动的复杂性, 只是对现有的理论模型从不同角度的风沙运动进行了一些描述, 尚未达到对风沙离子的起跳、输

* 收稿日期 2001-06-05, 修回日期 2001-11-07。

* 基金项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程项目“沙尘暴电结构及其影响研究”(编号 210027)资助。

作者简介: 李芳(1970-), 女, 汉族, 陕西蒲城人, 博士研究生, 主要从事风沙物理研究。E-mail: ffamber@sina.com

运等物理过程给与完全有效的结论。

关于沙暴对微波传播直接影响的观测研究并不是很多,最典型的就是伊拉克在巴格达附近的纳西里亚一代拉吉(Darraqi)间45km、11GHz微波电路上进行过的沙暴直接影响的研究^[5]。观测时采用一种开口谐振器记录下6月1日8月15日间伊拉克经常发生沙暴的3个月的接收信号强度,分析计算了电磁波通过不同沙尘粒子浓度时的衰减,并用方程式表示出由散射引起的衰减和由吸收造成的衰减。

根据现场测试得的数据和理论分析,得出以下结论:短期(几十分钟)的沙暴会衰减微波接收信号1015dB,观测到一次10dB的衰减持续150min,另一次26dB的衰落持续40min,在某些严重沙暴情况下,信号衰减会导致一连几小时的完全衰落。对高于10GHz频率的微波信号来说,沙粒浓度越大衰减越大,当波长接近沙粒大小时,衰减达到最大值。

第二 室内实验模拟。主要取决于实地测量和实验室风洞模拟测试。运用其方法来揭示自然现象规律强有力的方式,它除了有助于对风沙电影响进行直观、全面了解外。还在于为建立理论模型进行分析计算、提供依据和基本参数,如沙粒的形状、尺寸分布、介电常数以及沙粒流过导线产生的电位等。

Ali和Alhaider^[68]在利雅得(Riyadh)附近对微米波的传播进行了实地测量,对沙粒尺寸分布、复介电常数等提出假设以简化计算的直接依据。董庆生等^[9]也报道了在腾格里沙漠对毫米波传播所进行的实地测量。结果发现,悬浮在空中的沙尘粒子的直径小于0.3mm,沙粒尺寸的分布服从对数正态分布特性且不受离地高度和浓度变化的影响;沙尘含水量的增大能引起沙尘的复介电常数的虚部的显著增大。但在同样的风速下,含水量较大的沙尘粒子不易被风刮起,所以沙尘暴中通常引起毫米波衰减的原因主要是干沙和比较干的风沙粒,一般含水量都小于1%~1.5%。最早运用风洞模拟试验测试对无线电通讯影响是Rudy^[10],他针对微波在沙尘暴中的散射,讨论了沙尘暴对微波的反射率,发现当频率 $f \leq 30$ GHz时,浓度较高的沙尘暴将对微波产生影响。我国学者赵树宗^[11]、陈占详^[5]和尹文言等^[12]也在风洞中作了沙尘暴的模拟试验,测量了沙粒尺寸分布以及对无线电波通讯线路的影响。而风沙对输电线方面的影响,凌裕泉等^[13]在1984年运用不同材料、不同长度的导线在风洞模拟试验中,测量了风沙流经导线后的风沙电位的变化情况。结果测量后得出:风沙电位值随风速的增大而增大,风沙电位

值与导线的长度成正比;风沙电位值与导线和风沙流的接触面积成正比;皮线上风沙电位数值比裸线上的要小得多。我国邮电科学院曾对甘肃民勤县的野外观测中,测得其风沙电位高达2700V,国外曾报道了甚至可达几万伏特,在实地测量中,还观测到“尖端放电”现象等。可见,风沙电现象对人身财产安全造成危害程度。

3 风沙电对电波传播的影响

风沙环境对电波传播的影响主要表现在以下几个方面:

(1) 折射效应。风沙环境折射指仅大尺度不均匀性引起电波折射效应。我国西北沙尘暴多发区,通常一年四季日温差较大,可达1520℃,容易形成大气辐射逆温,当大气逆温达到 $dT/dh > 133$ ℃/km时,对陆地微波、毫米波通信线路来说,会出现超折射现象,这也能导致信号的多径传播效应,使得接收到的信号干涉衰落严重。沙尘暴期间,沙尘土在天线上的沉积,国外学者Kumar^[14]和McEwan等^[15]初步测量了沙尘土的沉积效应。堆积的尘土可能严重削弱反射面天线的性能,使得天线增益严重下降,使轴交叉极化电平变坏,方向图畸变。因此,沙尘暴期间,及时消除天线上沉积的沙尘,是减少沙尘暴对陆地微波、毫米波通信线路影响的有效措施。

(2) 吸收。沙尘暴可分为沙暴和尘暴。沙暴是由大沙粒组成的低飞的沙云,沙粒典型尺度0.15mm,有明显的上界,高度一般不超过2m,上面的空气仍是清澈的。而尘暴是由细沙及粘土粒子组成的浓云,粒子典型尺度为0.08mm,无明显上界,高度可达数千米,遮天蔽日,风停以后还能持续相当长时间且能飘到很远的地方^[1618]。由于构成沙尘粒子的主要材料为非磁性物质,沙尘对电波的影响程度主要取决于构成沙尘粒子的材料的介质特性、粒子的尺度分布、空间分布密度及工作频率。

对于沙尘粒子的介质特性,通过实测表明^[1921],含水量对介电常数影响很大,因为从干沙增加水5%(复介电常数 ϵ' 表示) ϵ' 可增大25%以上,而 ϵ'' 可增大100%以上。当土壤含水量较高时,被风吹起后,有相当一部分水分蒸发变为水汽,从而沙尘含水量变低,如果空气湿度过大,干的沙尘粒子表面会吸附一层水,其作用相当于云或雨滴,对毫米波段的传播影响很大。

(3) 散射。沙粒的散射效应,在这方面著名学者Mie通过野外观测和风洞实验推理计算后得出以

下结论 散射引起的附加衰减,在毫米波段,对沙尘粒子, $r \ll \lambda$, s 吸收衰减与 r^3/λ 成比例(r 为粒子半径 λ 为波长, m)。Goldhirsh 用典型的 S 波段($\lambda = 10$ cm) 雷达参数计算了 $\epsilon = 4.56 - j 0.251$, $N = 10^8/m^3$, 平均分布及最大分布情况下的沙尘暴的等效散射截面及回波功率。最大分布情况下, $R = 100$ km 时, σ_e 达 $2m^2$ 。由于 $\sigma_e \propto f^6$, 对微波高端及毫米波段, 以及粒子尺度大时, σ_e 将大大增加, 即沙尘造成的雷达杂波更为严重。这将使信噪比降低。另外, 传播路径上的沙尘会对信号产生衰减, 从而影响雷达的探测距离。如对上述的沙尘暴, 当 S 波段雷达信号通过沙尘暴距离为 20 km 时, 双程衰减可达 13.2 dB, 假定雷达对 444 km 远的 $2 m^2$ 的固定目标发现概率为 0.75, 则 13 dB 的衰减将使雷达的探测距离下降 210 km。由于沙尘贴近地面, 对地面视距通信及雷达影响较大。同时, 对于地空卫星通信及电视广播线路, 仰角较低时, 也会有明显影响。另外, 当沙尘浓度随高度分布存在较大梯度时, 由于相移不同, 会产生波束的散焦和射线的弯曲, 这在地面电路中会产生多径干扰。

(4) 带电沙粒的散射影响。上节讨论沙粒的散射问题是考虑沙粒为“电中性”, 即沙粒本身不带电荷, 在磁场作用下被极化, 粒子表面在电力线方向上形成不同极性电荷, 即“极化电荷”, 该电荷受迫于电磁场产生加速运动, 从而产生辐射即散射。风沙对电的干扰是基于这类风沙粒子的作用。这类研究没有考虑沙粒本身携带电荷的作用。事实上, 沙粒本身携带着大量电荷, 这些电荷在电磁场作用下也会产生加速运动, 从而产生辐射影响无线电波传播, 但是, 综观这方面研究动态, 无论在实际上, 或者理论计算上, 还是一个空白, 有待于深入研究, 例如在风洞实验中, 让微粒通过吹沙同时测主波的传播特性、沙粒电荷和环境电场, 实验研究各类关系。

4 存在的问题和发展趋势

综观对风沙运动的研究, 可以发现, 风沙运动的理论与实际有一定的距离, 风沙电研究仍然是很粗浅的, 还存在很多问题, 如到目前为止对沙尘暴还没有很有效的高科技监测手段, 无法很好地建立沙尘暴天气过程的数值模式; 虽然在利用卫星资料监测沙尘暴有了新的起点, 但至今还没有采用激光雷达监测工具, 因而无法探测沙尘暴天气期间大气中含沙量的垂直廓线。因此对沙尘暴的成因及其发展运动和影响程度尚需进一步探索。由于风沙电现象的

研究涉及到地貌、大气力学和电磁场等多种学科, 其研究需要许多学科的科学工作者共同努力, 来真正揭示出风沙运动与风沙电现象的规律, 以在沙尘暴的监测、提高沙尘暴的预警和预报能力上取得更好的成果。运用理论与实际相结合, 来扼制沙尘暴的侵蚀, 从而对人类生活环境、社会环境(包括人的生命财产、交通、铁路、航运、海运、通讯设备等) 提供安全的保障, 为防灾减灾作出更大的贡献。

参考文献(References):

- [1] Gill M. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 9: 568-659.
- [2] Latham J. The eletrication of snowstorms and sandstorms[J]. Q J R Meteorol, 1964, 90: 91-95.
- [3] Greeley, Iversen. Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan[M]. New York: Cambridge Univ Press, 1985.
- [4] Schmidt D S, Schmidt R S. Electrostatic force on saltation sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(4): 8997-9001.
- [5] Chen Xiangzhan. Observe the influence of sand dust-storm on radio communication in Gulf War[J]. Electric wave and antenna, 1991, (6)2. [陈详占. 从海湾战争看沙尘暴对无线电通信的影响[J]. 电波与天线, 1991(6)2.]
- [6] Liu Xianwan. Experimental Wind-sand Physics Sand and Sand Drift Control Engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995. [刘贤万. 实验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [7] Ali A A, Alhaider M A. Millimeter wave propagation and communication-a field study in Riyadh[R]. SANCST Project No. AR-5-29. First and Second Progress Reports, 1984.
- [8] Alhaider M A. Radio wave propagation into sandstorms system design based on ten-years visibility data in Riyadh, Saudi Arabia[J]. Int J Infrared TEE Proc, 1986, 13(3): 241-247.
- [9] Dong Qingsheng, Zhao Zhenxiong, Cong Hongjun. Microwave attenuation caused by sand-dust[J]. Journal of Electric Wave Science, 1996, 11(2): 29-32. [董庆生 赵振雄 丛洪军. 沙尘引起的微米波衰减[J]. 电波科学学报, 1996, 11(2): 29-32.]
- [10] Rudy W. Echo Intensities and Attenuation Due to Clouds, Rain, Hail, Sand and Dust Storms at Centimetre Wavelengths, Report 7831 [R]. Research Laboratories of General Electric Company Ltd, 1941.
- [11] Zhao Shuzong. The effects of sand-dust storm on microwave propagation, 1985, (2): 43-51. [赵树宗. 沙尘暴及烟雾对微米波毫米波传播的影响[J]. 电波与天线, 1985, (2): 43-51.]
- [12] Yin Wenyan, Xiao Jingming. The effects of sand and dust storms on microwave links[J]. Journal of China Institute of Communications, 1995, 5: 93-95. [尹文言 肖景明. 沙尘暴对微波通讯线路的影响[J]. 通信学报, 1995, (5): 93-95.]
- [13] Ling Yuquan, He Daliang, Li Changzhi. Experimental research of wind-sand electricity[A]. The corpus of controlling sand movement, CAS[C]. 1984. [凌裕泉 贺大梁 李长治. 风沙电现象实验研究[A]. 见: 中国科学院治沙会议文集[C]. 1984.]

[14] Kumar. Attenuation due to accretion of sand and dust on reflector antennas at microwave frequencies[J]. IEE Conf Publ , 1981 , 155 (17):518-525.

[15] McEwan N J , Bashir S O. Microwave propagation in sand dust storms:the theoretical basis of partial alignment[J]. IEE Conf Publ , 1983 , 219(7):40-44.

[16] Radio meteorological data. CCIR Report , 1982 , 2 :563.

[17] Ansari A J , Evans B G. Microwave propagation in sand and dust storms[J]. IEE Proc Commun Radar & Signal Process , 1982 , 129 (5):315-322.

[18] Chu T S. Effects of sandstorms on microwave propagation[J]. Bell System Technical J , 1979 , 58 :549-555.

[19] Ghobrial S , Ali I A , Hussien H M. Microwave propagation in sand storms[J]. Proc Int Symp Antennas and Propagation , Sendai , Japan , 1978 , 8 :447-450.

[20] Goldhirsh J. A parameter reviews and assessment of attenuation and backscatter Properties associated with dust storms over desert regions in the frequency range of 1 to 10 GHz[J]. IEEE Trans , 1982 , 30 :1 121-1 127.

[21] Ghobrial S I. Effects of hydroscopic water on dielectric constant of dust at X-band[J]. Electronic Letter , 1980 , 5 :393-394.

CURRENT SITUATION AND PROSPECT OF SOME RESEARCH ON WIND-SAND ELECTRICITY

LI fang , QU Jian-jun

(*Lab of the Blown Sand Physics and Desert Environment , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , CAS , Lanzhou 730000 , China*)

Abstracts : This paper overviewed the current situation on some research fields in wind-sand electricity. The main contents include : ①the trends of study , based on the practical observation in field and the experimental imitation indoors , explored the law of the natural phenomena of wind-sand electricity ; ②the study in wind-sand electricity influence on electric wave , which was revealed mainly on the basis of refraction effect , absorption , scattering , the influence of the scattering of electrified sand , and so on. Meanwhile , the problems and trends in research were pointed out.

Key words : Wind-sand electricity ; Sand-dust-storm ; Radio wave .