

Zhang H F, WANG T, Qu J J, et al. An Experimental and observational study on the electric effect of sandstorms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(1): 47 ~ 53

## 沙尘暴电效应的实验观测研究

张鸿发 王 涛 屈建军 言穆弘

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

**摘 要** 利用国内大型风沙物理风洞实验模拟沙尘暴电现象, 研究风沙起电机理, 结果表明, 不同风速下不同沙粒会产生不同极性的电场强度和电位效应, 风沙电随风速增大而增强, 且随沙粒度增大而减小. 在沙漠区的 16m, 8m, 4m 和 1m 高度上观测到 27 次不同沙尘暴天气过程的电场和风速随时间变化. 结果表明, 在晴天 4 个高度上的电场均为小正电场值, 电场随高度降低而减小, 最大电场强度在 5kV/m 以下, 日风速变化对各层电场起伏没有较大影响. 有沙尘天气, 各高度上的电场强度随风速变化而变化. 16m 高度上电场均为负值, 平均值为  $-20\text{kV/m}$ ; 中层 8m 电场一般为较高正电场值, 达到  $10 \sim 40\text{kV/m}$ , 与 16m 高度上电场呈反相关; 下层 1m 电场值变化一般很小, 在  $1\text{kV/m}$  以下. 在强沙尘暴天气 4 个高度上的电场均为负值, 电场值随高度降低而减小, 16m 高度上最大平均电场强度达到  $-200\text{kV/m}$  以上, 瞬时值超过  $-2500\text{kV/m}$ , 与晴天电场矢量相反.

**关键词** 风洞模拟实验 风沙起电 非对称摩擦 沙尘天气电场结构 沙尘暴电效应

**文章编号** 0001-5733(2004)01-0047-07 **中图分类号** P425 **收稿日期** 2002-12-31, 2003-06-03 收修定稿

## AN EXPERIMENTAL AND OBSERVATIONAL STUDY ON THE ELECTRIC EFFECT OF SANDSTORMS

ZHANG Hong-Fa WANG Tao QU Jian-Jun YAN Mu-Hong

*Institute of Environment and Engineering for Cold and Arid Region, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

**Abstract** The results of wind tunnel experiment simulation for blown sand electrification show that the sands of different particle sizes at certain speeds can produce varied electric field intensities and electric potentials of different polarities. Blown sand electrification intensify becomes large with increase of wind velocity and weak with enlargement of sand particle size. Twenty seven times of observations to the electric field and wind velocity associated with varied sandstorms have been made at the height 16m, 8m, 4m, and 1m at a desert area. During fine days, the electric field at these four heights has positive values which decrease with reducing height with the maximum intensity less than  $5\text{kV/m}$ . And the daily change of wind speed has no major influence on the fluctuation of the electric field at each height. During days with blown sand, the intensity of electric fields at all heights change with wind speed. The electric field at the height 16m is negative, with the average value  $-20\text{kV/m}$ . At the height 8m, the electric field is positive and as large as  $10 \sim 40\text{kV/m}$ , which is oppositely correlated to that at the height 16m. At the height 1m, the electric field changes little, and its magnitude is below  $1\text{kV/m}$ . During the days of strong sandstorm, the electric field at the four height are all negative and its values decrease with reducing height. Among them the maximum average intensity of electric field at 16m

**基金项目** 国家自然科学基金项目(49975002), 中国科学院重大知识创新项目(KZCX1-SW-04), 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(210027), Jg2000048705.

**作者简介** 张鸿发, 男, 1952 年 3 月出生, 研究员, 北京大学地球物理系毕业. 主要从事云和降水物理、强对流雷暴、雷达气象、人工影响天气和防灾减灾的实验观测与计算分析研究. E-mail: zhanghf@ns.lzb.ac.cn

reaches  $-200\text{kV/m}$  or more, with the instantaneous value exceeding  $-2500\text{kV/m}$ , and is contrary to that of fine days in polarity.

**Key words** Wind tunnel simulation experiment, Blown sand electrification, Asymmetric rubbing, Electric structure of sandstorm weather, Sandstorm electric effect.

## 1 引言

近些年来,沙尘暴天气频繁出现,沙尘暴造成的危害使人们认识到人类活动对环境资源开发利用的同时,应遵循自然环境演化规律,加强对沙尘暴天气成因、监测和治理的研究. 沙尘暴作为一种极端天气现象,风吹起的流沙粒子间非线性摩擦起电和风输送沙尘暴中的电效应,至今未被人们重视.

早在 20 世纪 50~60 年代我国开发西部铁路交通建设时,就发现沙尘暴天气过程中风沙电对通讯线路作用,在电线上产生强电位(对地电位)<sup>[1]</sup>. 邮电科学院测到风沙电位达到 2700V(甘肃民勤地区),但也有文献报道达几万伏(在国外)<sup>[1]</sup>,这样高的电位可产生“电晕”,看到“火线”;有些高压输电线路周围吸附一层沙粒;气象站风杯会被风吹起的沙粒打出火花. 1993 年 5 月 5 日河西地区特强沙尘暴时,在武威、民勤及古浪等地均闻雷声,而且还是炸雷<sup>[2]</sup>. 某坦克部队进行军事演习中,当坦克快速行驶在宽敞沙土上时,坦克履带扬起浓密的沙尘,使坦克内外通讯受到干扰. 这些现象对当今开发大西北,铁路公路和通讯等基础建设,尤其是西部油气东运的输送管道是值得注意的,因裸露在风沙中的金属易被流沙撞击和摩擦产生高电位或打火花. 因此,探索风沙电现象对风沙物理研究和沙尘暴天气监测,以及沙漠地区的建设,设施安全都有重要价值.

Shaw<sup>[3]</sup>观察到大海中航行船遇到沙尘暴天气时,桅杆尖端打火花,并干扰无线电通讯. Freier<sup>[4]</sup>在撒哈拉沙漠记录到一次大扬沙尘的电场是负极性的. Rudge<sup>[4]</sup>用气流方法破坏沙面,发现大沙粒获得正电荷,气流中小的粒子是负电荷. Gill<sup>[5]</sup>通过一金属风洞灌注沙,也发现较小的沙粒获得负电荷,而大沙粒获得正电荷. Greeley 等<sup>[6]</sup>在风洞实验中发现,小于等于  $60\mu\text{m}$  小沙粒带负电荷,大粒子带正电荷. Kunkel<sup>[4]</sup>用沙喷实验测量了单个沙粒携带的电荷,发现大多数带电的粒子的电量均匀,每种尺度范围带负电沙粒的总电荷量等于带正电沙粒的总电荷量. Latham<sup>[4]</sup>注意到早期观测风沙起电和飘雪起电

有相似性,认为由于非对称摩擦产生的温度梯度造成电荷分离.

最近, Schmidt 等<sup>[7]</sup>在  $12\text{m/s}$  等风速条件下,测量到沙丘上  $1.7\text{cm}$  高度的电场达到  $166\text{kV/m}$ ,平均直径  $150\mu\text{m}$  沙粒的荷质比为  $+60\mu\text{C/kg}$ . 在假定荷质比为  $+60\mu\text{C/kg}$  和  $-60\mu\text{C/kg}$  的条件下,计算了  $150\mu\text{m}$  沙粒石英球在  $166\text{kV/m}$  电场力下的跃移运动. 模拟结果说明,具有正电荷的粒子在正电场中移动更快,轨迹高远离地面,相当于增加 magnus 效应. 兰州大学黄宁等<sup>[8]</sup>也做了类似模式试验研究,表明风沙运动粒子与地表之间的静电力会增加或减小沙粒的跃移轨迹.

上述观测实验事实和研究表明,风吹动的流沙会产生电,沙与沙进行接触时,大沙粒获得正电荷,小的获得负电荷. 说明大沙粒与小沙粒之间发生非对称摩擦,小沙粒有较小相对接触面故温度较高,沙携带的电荷是自由离子,离子浓度是随温度上升而增加的. 由于正离子( $\text{H}^+$ )要比负离子( $\text{OH}^-$ )有更大的迁移率,较小粒子(暖)和较大粒子(冷)之间接触可以产生电荷转移,这样小粒子变成带负性电荷而大粒子带正性电荷. 同时,因为较重的(正)大沙粒有重力分离,而轻(负)的细小粒子可以引起悬浮. 但至今没有定量结果.

本文利用国内大型风沙物理风洞实验设施,模拟不同沙尘暴过程中风沙起电的现象,探讨不同沙尘的形成风沙电机理,了解自然沙尘暴过程中产生风沙电现象与风速,输沙率和环境的关系,分析自然沙尘暴产生风沙电结构及其沙尘暴电的影响.

## 2 风沙起电的风洞实验研究

实验在中国科学院风沙物理风洞实验室中进行. 风洞由宽  $1.0\text{m}$ ,高  $0.6\text{m}$  的矩形木制槽构成,总长  $37.78\text{m}$ ,实验段长为  $16.23\text{m}$ . 除床底外,左右上三面是可活动的木窗,便于安装测试仪和装卸沙样及实验时观察. 风洞末端为出口,  $8^\circ$  张角  $4.6\text{m}$  长的喇叭口. 始端是  $16.0\text{m}$  长的木制构造皮老虎形状的制风设备,由  $55\text{kW}$  的电机带动木制叶片旋转产生风,并通过较长的缓冲匀速区进入风洞实验段. 风

速由电机转速可调,从 2~30m/s,风速用毕托压差仪修正。用德国生产的粒子动态激光测试器(PDS)测定风洞内流沙的运动速度(水平和垂直),通过微机软件控制操作。

风洞内离沙源不同部位安装 4 个倒挂式电场仪(见图 1),测量不同流沙的电场和极性。风洞内安有

积沙仪,可获取流沙的累积沙量,由电子天平称出重量。沙样电荷量用冲激电荷测量仪测得累积沙的电荷量。由固定在左右窗上不同金属导线和电位测量系统组成测量电位(见图 1),导线从底床按 10cm 高度间隔 5 层。风洞装置和风沙电实验各种测试仪的结构见图 1。

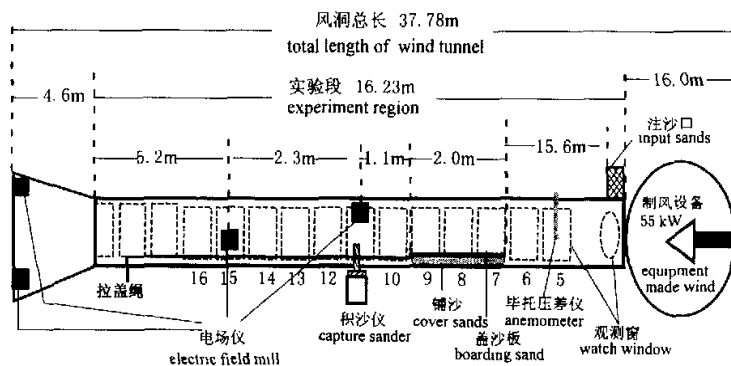


图 1 风沙电实验的风洞装置和测量设备图

Fig.1 Wind tunnel and measurement equipments for blown sand electrification

实验的沙样和混合沙是从中国科学院沙坡头站和沙尘暴源地甘肃民勤取得。沙样经筛选分成三种不同沙粒尺度 0.1~0.2mm, 0.3~0.4mm 和 0.5~0.6mm。混合沙分为从沙漠直接取得的和带有土尘的两种,有的按不同重量比进行人工加水而湿化,其湿度分别取 0.5%, 1.0%, 2.0%。风速选用 5 档,分别有 8、12、16、18 m/s 和 22m/s。模拟实验对每一组沙粒尺度和混合沙(干或湿)重复进行 5 次试验。每次试验采集 8 到 12 组瞬时数据。

铺沙实验,在风洞床底铺 3~5cm 厚沙样,上用盖板覆盖,等风速均匀并开始测量时拉开,每次测后都用强风把风洞内余沙吹净。扬沙实验是从注沙口由人工灌入,每次试验的时间根据不同风速下被测沙样流动的情况而定,时间在 30~180s 之间。

## 2.1 不同沙样在不同风速下风沙电的电场强度

图 2 是不同粒径的沙随风速变化产生电场强度的点聚图。图中每个点是一种沙样在一定风速下测得多组瞬时数据的平均值。可看出所有沙样产生的电场强度随风速增大而增强,且都趋于负极性。细沙样趋于负极电场强度要比中或粗沙样的大得多,而中等沙要比粗沙大。细沙最大平均电场强度可达到 -29kV/m,中等和粗沙最大平均值约 -10kV/m。结果说明,风吹起的流沙会产生强电场,风速越大沙粒越细产生的电场越强。实验值与国外观测到尘暴

有负极性的电结构一致。

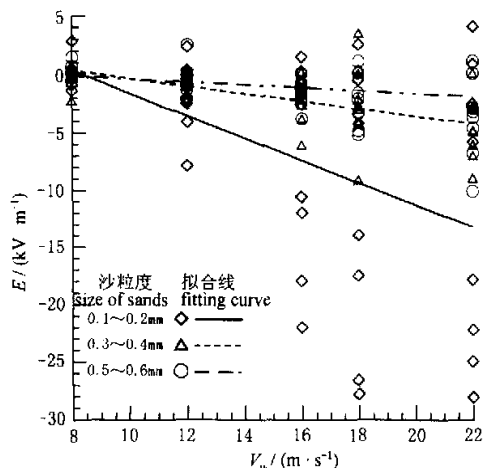


图 2 不同沙样在不同风速  $V_w$  下产生电场强度  $E$

Fig.2 Electrical field intensity produced by different sand particle size for the different wind velocity in tunnel laboratory

电场仪 1 离沙源近,测到刮起的沙粒之间非线性摩擦起电很弱,在 22m/s 的风速下最大平均值只有 3.3kV/m。而离沙源远的所有沙样都为负电场值。细沙样的起电要比中等和粗沙的强得多,并且随风输送细沙暴的距离越远其电场强度越大。电场

仪 3、4 位于风洞出口处,进行同距离不同高度的测量,由于出口处呈喇叭形,风速有较大变化且有絮乱的湍流产生,对细沙暴形成的电场更强.实验结果表明,自然沙尘暴具有不同尺度的沙尘和复杂环境将会形成更强电场强度.

## 2.2 风沙产生的电位和风沙的电荷量

不同风速下不同沙粒撞击线径为 3.12mm 的裸露铜导线测到相对地的电位的实验结果说明,不同沙粒径的流沙撞击导线都可以产生电位,电位差值大小与风速成正比,和风沙产生的电场强度特点相似.风沙电位随风速增大而增大,细沙产生的电位要比中等和粗沙粒的大,即在相同风速下流沙的粒径越大电位越小.为了说明不同风速下产生不同风沙电位的机理,图版 I 中图 3a 给出的是用粒子动态激光测试系统(PDS)测量到不同高度上 3 种沙样粒径颗粒的平均水平运动速度  $V_h$  随风速的变化.图中曲线变化可说明,细沙颗粒随风速的增大水平运动速度增大,垂直速度  $V_v$  很小(图中未给出),而粗沙颗粒随着风速增大水平运动速度很小,垂直速度逐渐增大,只有当风速达到 16m/s 以上时才有较明显增大,但不同高度层有不同变化.这说明细沙产生强电场和高风沙电位是与小粒度沙高速运动有关,表明随着风速增大它们的浓度高输沙率  $Q$  大.并且小粒度沙随风速增大的水平速度增长远比大粒度沙的快.图 3b 是不同风速下混合沙在不同高度上产生的风沙电位(2.8mm 金属线径),图 3c 是 30cm 高度上混合沙不同输沙率与产生的风沙电位关系.这些结果均为不同风沙电位效应和影响提供了依据.

不同风速下积沙仪捕获到沙样的电荷量表明,不同风速下不同沙样和混合沙(干或湿)的电荷量变化很大,积沙带最大电荷量是风速为 22m/s 时测到,为  $174 \times 10^{-9}C$  和  $-64 \times 10^{-9}C$ .根据接触沙样的表面积,算出最大风速时的荷质比为  $65.8\mu C/kg$  和  $-24.3\mu C/kg$ ,与国外测到平均的荷质比<sup>[1]</sup>为  $+60\mu C/kg$  和  $-60\mu C/kg$  比较,带正电荷沙的荷质比相同,而带负电荷的荷质比偏低,可能与我们实验中选用沙样的平均粒径较大有关.

混合沙与上述三种不同沙粒径随风速增大所带的电荷量和极性有较大不同,在低风速时有小值的正和负电荷值,随风速增大它们也趋于高值的正和负电荷量,特别是加湿的混合沙尤为明显.同样,混合沙的电场也是正负交替,电场强度随风速增大而增强.实验结果表明不同沙粒间相互作用和大小沙

粒之间的碰撞和非对称摩擦有不同起电机制,小沙粒带电荷量随风速增大趋于负极性,而大沙粒间随着风速增大趋于带正极性,并且与沙样的含水量有关,有待进一步讨论.

## 3 自然沙尘暴电效应和电结构的特征

2001 年 3 月 15 日到 6 月 12 日,我们在位于腾格里沙漠南边缘的中国科学院沙坡头站的沙漠实验区,在铁塔的 4 个不同高度的一端安装了倒挂式电场仪,分别为 16m 高度(电场仪 E1),8m(E2),4m(E3)和 1m(E4).另一端在 16m(风速仪 W1),8m(W2)和 1m(W3)高度上装有风速仪.在 2~4m 高度间竖立一根 3.0mm 直径粗裸铜导线,测量风沙电位.每秒采集 9 个参量组数据(4 个电场,3 个风速,1 个电位,1 个温度).电场观测范围为 2500 ~ -2500kV/m,风速从测风仪的最大灵敏度 0.3m/s 起,电位的测量范围为 3000 ~ -3000V,温度感应范围 -20 ~ 50℃.

3~6 月间,我们观测到 36 天的连续电场和风速随时间的变化.其中晴天 9 天,沙尘暴天气过程 5 天,扬沙和浮尘天气过程 22 天.观测资料表明,沙漠区沙尘过程十分频繁,3~4 月发生频数最高.

### 3.1 不同沙尘天气的电场特点

图版 I (图 4)给出晴天、扬沙(或浮尘)与强沙尘暴 3 种不同天气过程,在不同高度上 4 个电场仪和 3 个风速仪测到平均值随时间的变化.可清楚看出,晴天与沙尘天气的电场强度和风速随时间变化的量值有较大差别.晴天,4 个高度上的电场均为小正电场值,随高度降低电场强度减小: $E1 > E2 > E3 > E4$ ,最大电场强度出现在 16m 高度上达到 5kV/m,平均为 3.32kV/m,风速变化对各层电场起伏没有较大影响.有沙尘天气,未发生扬沙或浮尘时,各高度电场与晴天一致.发生沙尘时,各高度上的电场强度随风速变化而变化,E1 测得的电场均为负值,普遍为 -20kV/m;E2 测得的电场一般为高正值,达到 10~70kV/m,与 E1 电场呈负相关;而 E3 电场强度随 E2 变化而变化,电场强度值为 E2 的一半;E4 电场值变化很小,在 1kV/m 以下.强沙尘暴天气时,电场仪 E1、E2、E3 与 E4 均测得负电场值,最大电场强度(E1)达到 -200kV/m,每秒记录值超过我们设定的 -2500kV/m,与晴天电场矢量呈反方向.表 1 给出了不同天气过程不同高度上的平均电场强度和风速值,说明沙尘天气形成的电场效应有不同电场结构,

并且不同沙尘天气产生的电场强度和极性也有较大趋势相一致.不同,与我们风沙电的风洞模拟实验的结果和变化

表 1 不同沙尘天气过程不同高度上平均电场强度和平均风速  
Table 1 Average electric field intensity and wind velocity of the four height for the different weather

天气过程	频数 ( $\text{min}^{-1}$ )	E1 ( $\text{kV/m}$ )	E2 ( $\text{kV/m}$ )	E3 ( $\text{kV/m}$ )	E4 ( $\text{kV/m}$ )	W1 ( $\text{m/s}$ )	W2 ( $\text{m/s}$ )	W3 ( $\text{m/s}$ )
晴 天	11996	3.321	1.371	1.307	0.768	3.057	2.777	2.206
浮 尘	11495	0.956	5.229	2.756	0.832	4.407	3.927	3.179
扬 沙	9010	-9.451	3.780	2.165	0.903	4.967	4.485	3.473
强沙尘暴	2399	-36.755	-6.899	-2.571	-0.308	5.309	4.724	3.634

3.2 沙尘天气的电场强度与风速的关系

表 2 给出不同高度上不同风速区间的平均电场强度的变化.表中 E1 在各风速范围测得的电场值都是负电场值,且随着风速的增大电场值都是增强的,其余高度的各电场仪测得的都是正值,也随风速增大而增强,只有平均风速达到 9m/s 以上时从高到低层都为负值.结合表 1 中不同沙尘天气的电场强度值表明,除了浮尘和扬沙天气在 16m 高度产生小负值电场外,强沙尘暴形成后,即使风速降低也会维

持小负电场,因为强沙尘暴过后,空中还掺留着大量细沙尘,这在我们观测到的沙尘暴过后风速只有 2~3m/s,仍可维持 -10kV/m 的电场值 6 小时,且其电场幅度基本不变化.由表可见,有无沙尘天气过程的电场强度与风速之间的密切关系,当平均风速大于等于 5.0m/s 时,16m 高度有小值负电场,8m 高度出现高值电场为浮尘和扬沙天气过程,当风速平均大于 7.0m/s 时,16m 高度有高值负电场,以下高度出现负电场为强沙尘暴过程.

表 2 不同风速区间各高度电场和风速的平均值  
Table 2 The four height average value of electric field and wind velocity for different wind velocity region

风速范围 ( $\text{m/s}$ )	频数 ( $\text{min}^{-1}$ )	E1 ( $\text{kV/m}$ )	E2 ( $\text{kV/m}$ )	E3 ( $\text{kV/m}$ )	E4 ( $\text{kV/m}$ )	W1 ( $\text{m/s}$ )	W2 ( $\text{m/s}$ )	W3 ( $\text{m/s}$ )
3.0 > W1 > 2.0	6316	-1.963	1.103	1.207	0.765	2.518	2.277	1.768
4.0 > W1 > 3.0	6337	-3.505	1.119	1.212	0.768	3.500	3.162	2.448
5.0 > W1 > 4.0	6102	-4.019	1.572	1.367	0.787	4.487	4.051	3.122
6.0 > W1 > 5.0	5503	-5.192	3.281	2.000	0.843	5.491	4.935	3.851
7.0 > W1 > 6.0	4237	-8.495	6.533	3.150	0.909	6.450	5.762	4.618
8.0 > W1 > 7.0	1837	-12.512	10.096	4.071	0.852	7.401	6.566	5.477
9.0 > W1 > 8.0	291	-30.106	3.487	0.477	0.155	8.368	7.442	6.071
W1 ≥ 9.0	73	-55.251	-15.466	-7.853	-1.186	9.228	8.219	6.418

3.3 沙尘暴天气的电场结构和特征

表 3 给出不同沙尘天气过程的正负电场值的范围和相应的风速值.由表可见,正负电场值的出现频率分别为 65 % 和 35 %,正值区的最大平均值只有 12kV/m,相应的风速偏低,在低正电场值区 0~2kV/m 的平均风速反而大于 2~5 kV/m 区的风速,而 ≥5.0kV/m 的正电场区的风速明显增大.这说明晴天 E1 测得的电场为正值,普遍达到 5.0kV/m,并

且随高度的降低与对应高度的风速相一致.负电场值区的最大平均电场值可达到 -200kV/m,相应的平均风速要比正值区的大,平均大 1.2m/s.同样,在高负电场值区 0~-10kV/m 的平均风速要略大于 -10~-20kV/m 负电场值区的风速,而 -20 kV/m 以下的平均风速有明显增大,并且对应的各高度的电场均为负值,这说明强沙尘暴天产生的电场极性与晴天的呈反向,电场强度也大 1~2 量级.

表 3 不同沙尘天气过程出现正负电场值范围和风速区  
Table 3 The different sand dust weather process occurring electric sign and electric field value at different wind velocity region

电 场	频数	E1	E2	E3	E4	W1	W2	W3
(kV/m)	(min <sup>-1</sup> )	(kV/m)	(kV/m)	(kV/m)	(kV/m)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
正电场值区								
E1≥0.0	22570	2.609	2.635	1.766	0.798	3.775	3.397	2.703
0.0~1.0	6136	0.056	3.433	2.044	0.794	4.322	3.893	3.111
1.0~2.0	644	1.549	5.120	2.626	0.863	5.144	4.614	3.784
2.0~3.0	3222	2.642	2.207	1.591	0.780	3.642	3.279	2.634
3.0~4.0	8919	3.455	1.527	1.371	0.764	3.179	2.857	2.252
4.0~5.0	2626	4.348	2.095	1.585	0.803	3.542	3.196	2.523
5.0~6.0	394	5.472	9.719	4.391	1.181	6.034	5.437	4.347
6.0~8.0	500	6.887	8.466	3.959	1.113	5.841	5.228	4.175
8.0~10.0	145	8.461	6.037	3.070	1.036	5.238	4.700	3.784
10.0~12.0	3	10.129	4.131	2.342	0.936	5.014	4.586	3.461
负电场值区								
E1<0.0	12151	-18.057	2.711	1.649	0.784	4.950	4.451	3.444
-5~0.0	2290	-2.702	6.448	3.142	0.933	5.239	4.692	3.769
-10~-5	2929	-7.647	5.288	2.715	0.907	5.116	4.623	3.633
-15~-10	2758	-12.296	6.321	3.284	0.985	4.809	4.344	3.357
-20~-15	2540	-17.104	3.462	2.152	0.880	4.422	3.971	2.931
-30~-20	720	-23.382	-4.437	-1.295	0.471	5.069	4.539	3.329
-50~-30	196	-38.604	-11.528	-4.624	-0.041	5.862	5.185	3.928
-100~-50	204	-70.342	-22.814	-9.702	-0.810	7.533	6.692	5.161
-150~-100	308	-111.505	-5.114	-1.532	0.424	3.306	2.983	2.289
-200~-150	207	-195.133	-57.287	-25.807	-2.478	6.360	5.660	4.602

4 讨论和小结

通过风沙起电的风洞实验研究和自然沙尘暴的野外观测结果表明,风吹起的自带静电的流沙粒子与相对静止的沙面之间存在静电力,跃移运动沙粒在克服自身重力作用下与下层沙面会产生风压差,使得带电荷流沙粒子的形成重新分布,与沙面的不同沙粒之间形成一定电效应,这种电场强度取决于风速大小,并且起电的强弱和电极与沙尘颗粒的大小直接相关。因此不同沙样会产生不同的电极性和电场强度,它们都是随风速增大而增强,且趋于负值。从 PDS 测到引起自然沙尘天气的风速中,多数情况下,同一风速下细沙粒子的水平运动速度远比粗沙大,并且随高度有较大差别,细沙形成的电效应要比粗沙强 1~2 量级,说明不同沙尘天气有不同电场强度。实验和观测结果还表明,不同风力输送不同沙粒子之间的距离和高度上的风沙电环境中会形成不同的电效应,离沙源近的为小值正电,而离沙源

远的风沙电值增大并趋于负电,这与晴天不同高度以小正电场为主,随高度降低风沙电减小,沙尘天气以负电场为主相一致。特别是浮尘,扬沙和强沙尘暴产生的电场结构有明显不同特点,这些与它们风速大小和输送不同沙粒径输沙率以及输送的沙暴是否在已形成风沙电环境有直接关系。

自然沙尘天气过程的野外观测结果表明,沙形成风沙电环境有直接关系。沙尘天气存在强风沙电效应,电场极性和电场强度与晴天有明显不同,与晴天电场矢量呈相反方向。不同的沙尘天气:浮尘、扬沙和沙尘暴过程形成的电极性和电场强度也有较大差别。浮尘天气:E1 测得的电场强度在 0~20kV/m 之间变化,E2 测得的是小正值,为 0~10kV/m,有正有负,风速一般大于等于 5m/s。扬沙天气:E1 测得的电场强度是高负值,在-10~-80 kV/m 之间变化,E2 测得的是高正值,达到 10~70kV/m,风速普遍≥6m/s,E1 和 E2 的观测值随风速变化而变,呈反相关。强沙尘暴天气:E1、E2、E3 和 E4 均测得负电场值,E1 的电场强度是高负值,在

-40 ~ -190kV/m 之间变化, E2 在 -10 ~ -70kV/m 之间, E1 和 E2 随风速变化而变, 电场矢量方向与晴天相反, 其值有  $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$  的关系。

本工作得到程国栋院士和董治宝研究员的支持和帮助, 参加风洞实验和野外观测的有肖正华研究员, 拓万权、沮瑞平、李芳、刘宝和赵爱国高工等, 在此一并致谢。

## 参考文献

- [1] 刘万贤. 实验风沙物理与风沙工程学. 北京: 科学出版社, 1995  
Liu W X. Experiment Blown Sand Physics and Blown Sand Engineering. Beijing: Science Press, 1995
- [2] 方宗义, 朱福康, 江吉寿, 等. "93.5.5" 特强沙尘暴的调查报告及其分析. 见: 中国沙尘暴研究. 北京: 气象出版社, 1997. 37 ~ 43  
Fang Z Y, Zhu F K, Jiang J X, et al. Survey reporter and analysis for "93.5.5" extrem-sandstorm. In: China Sandstorm Research. Beijing: Meteorology Press, 1997. 37 ~ 43
- [3] Shaw P E. Tribo-electricity and friction, IV: Electricity due to air blow particles. *Proc R Soc A*, 1929, 122: 49 ~ 58
- [4] Latham J. The electrification of snowstorms and sandstorms. *Q J R Meteo Soc*, 1964, 90: 91 ~ 95
- [5] Gill E W B. Frictional electrification of sand. *Nature*, 1948, 18(4): 568 ~ 569
- [6] Greeley R, Leach R. A preliminary assessment of the effects of electrostatics on aeolian process. In: Rep Plane Geo Program, NASA TM 79729, 1978. 236 ~ 237
- [7] Schmidt D S, Schmidt R S. Electrostatic force on saltating sand. *J. Geophys. Res*, 1998, 103(4): 8997 ~ 9001
- [8] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中带电现象的实验测试. 科学通报, 2000, 45(20): 2232 ~ 2235  
Huang N, Zheng X J. Experimental determination of electric generation by wind-sand flow. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(20): 2232 ~ 2235
- [9] 杨保, 邹学勇, 董光荣. 风沙流中颗粒跃移研究的某些进展问题. 中国沙漠, 1999, 19(2): 173 ~ 178  
Yang B, Zou X Y, Dong G R. Advances and problems of study on saltation particles in wind-sand current. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 1999, 19(2): 173 ~ 178

## 启 事

1 《地球物理学报》英文网络版查询和浏览方法

请读者按以下方式查阅 AGU 上的《Chinese Journal of Geophysics》简称(CHINESE J GEOPHYS)电子版:

(1) 登录美国地球物理学会(AGU)网站, 网址为: <http://www.agu.org>

(2) 点击 AGU 首页左侧栏目中的“Publications”(出版物)项, 进入 AGU 出版物 Publication 页面, 此页面包含所有 AGU 所属刊物和由其登载的中国英文版地球物理刊物。

(3) 在此页面向下滚动至 Journals distributed on-line by AGU 栏目, 即可找到《Chinese Journal of Geophysics》, 点击可进入该刊主页面, 即可查阅摘要和全文。

(4) 阅读全文需要安装 Acrobat Reader (PDF) 软件, 可从网上许多地方下载。

2 在 AGU 阅读或下载 CHINESE J GEOPHYS 文章, 需缴纳一定费用, 每年 100 元人民币, 请跟编辑部联系购买事宜. 电话: 010-62007700, 62007696, 62007709.

通信地址: 北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编 100029

E-mail: [actageop@mail.icgas.ac.cn](mailto:actageop@mail.icgas.ac.cn)

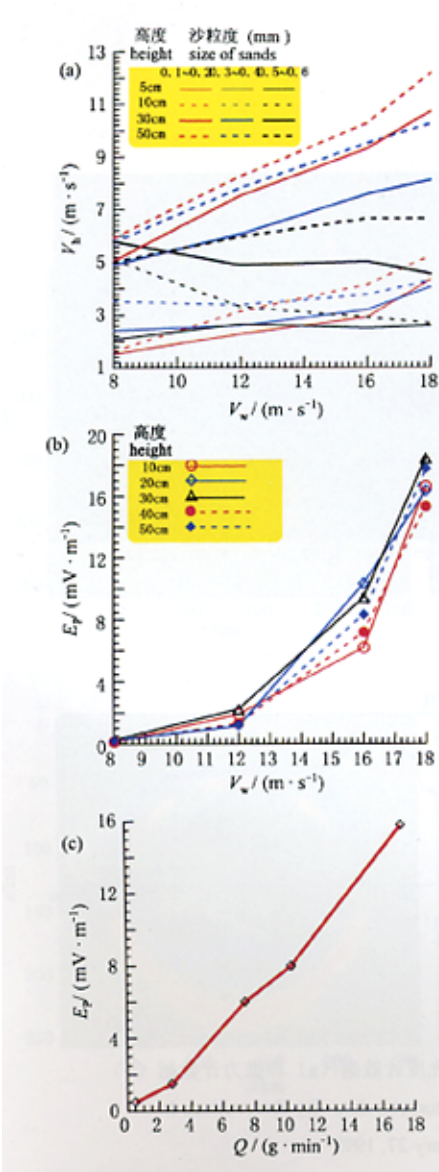


图3 不同高度与风速  $V_w$  对混合沙运动速度，  
风沙电位  $E_p$  与输沙率  $Q$  的影响

(a) 在不同高度上不同粒度沙颗粒的平均水平运动速度  $V_h$  随风速  $V_w$  变化；(b) 不同高度上混合沙的风沙电位随风速分布；(c) 30cm 高度上混合沙的风沙电位与输沙率  $Q$  关系。

Fig.3 Blown sand electric potential related with sand sample move speed at the different height and wind velocity

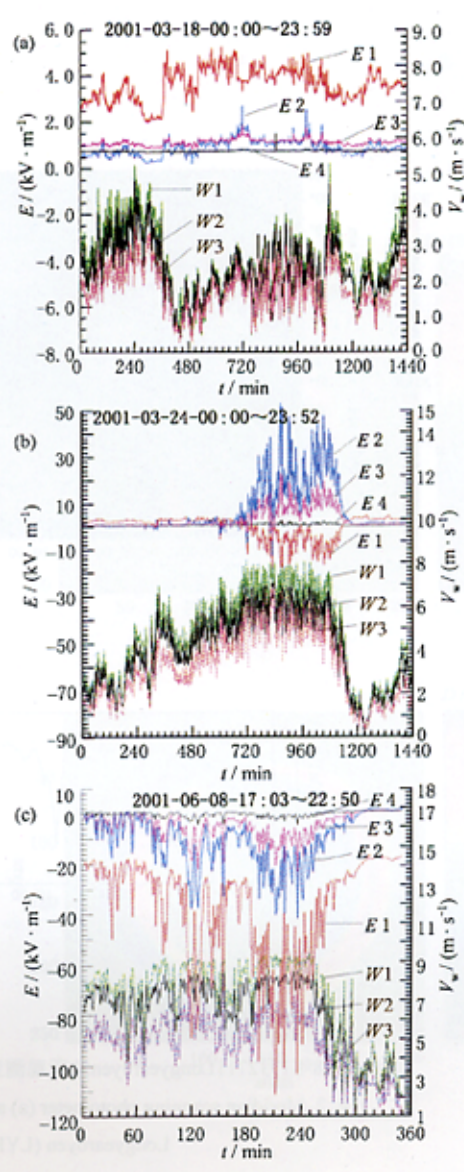


图4 晴天和不同沙尘天气过程在不同高度上产生电场  $E$   
与风速  $V_w$  随时间的变化

(a) 3月18日晴天；(b) 3月24日扬尘天气；(c) 6月8日强沙尘天气。  
图上部红线是  $E1$ ，蓝线是  $E2$ ，粉线是  $E3$ ，黑线为  $E4$ 。  
图下部绿线是  $W1$ ，黑线是  $W2$ ，紫线是  $W3$ 。

Fig.4 Clear day and different sandstorm weather process produced electric field vary with wind velocity in time series