

文章编号:1000-694X(2007)05-0843-08

# 尘卷风的研究进展

顾兆林<sup>1</sup>, 邱剑<sup>2</sup>, 鲁录义<sup>2</sup>, 赵永志<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学人居学院环境科学与技术系, 陕西 西安 710049; 2. 西安交通大学能动学院, 陕西 西安 710049; 3. 清华大学化工系, 北京 100084)

**摘要:** 尘卷风是一种发生在大气对流边界层内, 能将沙尘或者碎屑等物体扬到高空、具有温度较高的低压核心和较短生命周期的旋风, 是自然界中一种最常见的自然现象, 也是气象学中最独特的内容。回顾尘卷风的研究历史, 主要包括尘卷风的气象要素与环境效应, 尘卷风研究的三种方法及取得的成果, 粉尘颗粒在尘卷风中的悬移运动及其分层机制, 粉尘活动与颗粒荷电, 提出了进一步研究的主要内容。

**关键词:** 尘卷风; 沙尘暴; 颗粒荷电; 气固两相流

**中图分类号:** P445.4      **文献标识码:** A

粉尘活动与大陆干旱度、地表状况及局部大气运动有密切关系, 在一定程度上可作为环境变化的预警信号。粉尘的产生、输送和沉降体现了各层圈物质和能量传输与转换过程的耦合作用, 并具有不同的表现形式。源于西北干旱半干旱地区的粉尘活动是西北地区土壤风蚀的结果, 那里沙漠化严重, 扬尘和扬沙, 乃至尘暴、强沙尘暴事件不时发生, 而且对其他地区的环境质量有重要影响<sup>[1-2]</sup>。认识粉尘活动的形成过程和机理是西部环境系统的演化及未来趋势研究的关键科学问题之一。能够启动和搬运地表粉尘的强风发生在许多不同的气象条件下, 并且具有各种尺度。

## 1 粉尘活动的基本形式

每年的春季或秋季, 锋面低压过境可能是大范围扬沙的主要原因, 粉尘经常被冷锋前或后的大风扬起, 而且高空急流在粉尘搬运中起着重要的作用。对于西北干旱、半干旱地区, 每年的春季为尘暴事件多发期, 大范围扬沙、沙尘暴天气等大气边界层内的粉尘活动为大家所重视<sup>[3-11]</sup>。在科学方面, 1997年以前主要进行沙尘暴成因分析、沙尘暴监测预报方法研究、沙尘暴天气预警服务系统设计等, 并且以定性和半定量研究为主。随着20世纪90年代末我国北方地区大范围沙尘天气频繁出现, 沙尘灾害研究进入了新时期, 开始进行沙尘长距离输送机制、沙尘对全球气候系统的影响等相关研究。由中

国气象局组织建立的国家级沙尘暴监测预警服务业务系统已于2001年3月1日投入业务试运行。中国气象局又从2002年2月开始启动国家沙尘暴监测预警服务系统首期工程, 组建了一个自动化程度较高的沙尘暴天气综合监测网, 增加对沙尘天气的特种观测项目和观测密度, 在第一时间获得沙尘暴形成、移动、分布以及有关环境变化的数据, 提高了沙尘暴天气预报的准确性和时效性<sup>[12]</sup>。研究风沙作用机制的风沙物理学作为一门学科正在蓬勃发展<sup>[13-14]</sup>。

沙尘暴, 特别是强沙尘暴, 是一种带有巨大破坏力的自然现象, 在其过境前后, 气象要素变化十分剧烈<sup>[15]</sup>。据报道, 在1977年4月22日发生在甘肃河西走廊的黑风暴天气过程中, 张掖站黑风暴过后10 min内, 气压猛升2.8 hPa, 气温下降6.8 K, 风向由偏东转为西北偏西, 平均风速猛增到20 m·s<sup>-1</sup>以上, 瞬时最大风速超过30 m·s<sup>-1</sup><sup>[16]</sup>。在1993年5月5日的黑风暴天气过程中, 甘肃省的金昌市, 10 min内气压涌升3.1 hPa, 永昌3 min内气压涌升2 hPa, 并且气压曲线都出现涌升后又降低的“气压鼻”现象<sup>[17]</sup>。一些初步研究表明, 黑风暴形成机制类似于龙卷风, 是一种旋转热泡对流发展起来的强对流天气。文献[18]指出, “93.5”黑风暴的发展与一个中尺度气旋性涡旋的发生和发展直接相关; 总涡源的产生、发展及柱状垂直结构的形成和演变与黑风暴中尺度涡旋发展的涡度垂直结构和演变是一

收稿日期: 2006-06-14; 改回日期: 2006-07-25

基金项目: “973”计划课题(2004CB720208); 国家自然科学基金项目(40675011); 重大基础研究前期专项(2003CCC01500)资助

作者简介: 顾兆林(1965—), 男(汉族), 江苏人, 教授, 工学博士, 主要从事环境与化工多相流模型及环境流体力学研究。

E-mail: guzhaoln@mail.xjtu.edu.cn

万方数据

致的。这说明初始涡源对强沙尘暴这种气旋性天气有重要作用。

另一方面,西北干旱、半干旱地区在非尘暴事件多发期(如夏季、秋季)里大气边界层内粉尘活动也很频繁<sup>[19]</sup>。大气边界层内平时的浮尘活动与近地面湍流有很大的关系,它们可以在微风、甚至无风条件下生成<sup>[20]</sup>。由于较强的大阳热辐射被地面吸收继而传递给底层空气,造成接近地面的空气温度急剧上升。热空气的密度相对较低,在浮力的作用下迅速上升而形成对流。在一定的条件下,一种以垂直涡形式存在的特殊对流经常发生在大气对流边界层内,即尘卷风,它对地表微小粉尘的垂直迁移起着关键性的作用。根据观测<sup>[21-22]</sup>,尘卷风的气象要素特征是温升4~8 K,压降2.5~4.5 hPa,最大切向速度和垂直上升速度分别大约 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Sinclair观测Arizona地区的尘卷风直径一般为数十米,尘柱高度小于600 m<sup>[21]</sup>,而据Hess和Spillane在澳大利亚的观测<sup>[22]</sup>,尘卷风的直径在32~141 m,尘柱高度在300~660 m。虽然尘卷风是小尺度的局地现象,但是在某些地区频繁的发生暗示着它们在尘暴的演化过程中可能具有重要的作用<sup>[23]</sup>,尽管这种看法还没有得到观测证实<sup>[24]</sup>。

尽管强沙尘暴天气通常是一个中尺度天气现象,而尘卷风是小尺度天气现象,而且两者的诱发条件有差异,尘卷风的诱发与地面局部增热不均匀以

及水平切变相关,而强沙尘暴的诱发与上空的低速冷云团密切相关,但是根据前述的观测数据<sup>[16-17,21-22]</sup>,黑风暴和尘卷风发生前后的气象要素数据有很好的一致性,这是否意味着强沙尘暴内空气流场的细部结构与尘卷风的结构具有相似性,也即地表在太阳辐射下存在热泡对流,单个尘卷风起源于热泡,而导致沙尘暴的低速冷云团内部的不均匀温度场也会导致热泡对流的发生,并诱发群体性集中涡的产生,从而进一步验证前述的黑风暴形成机制类似于龙卷风。龙卷风的诱发与上空的低速冷云团密切相关,涉及到云团中的水汽转换及加热。

## 2 尘卷风及其环境效应

图1是观测到的在不同表面(如灌木丛、沙地以及机场跑道)上的地球尘卷风。其中,A是常见的近地外形呈典型倒锥状的尘卷风;B是中心呈柱状、外侧有斜抛气流的尘卷风,这类尘卷风的切向速度高,地表比较粗糙;C是所示的尘卷风近地外形的倒锥的锥角较大,呈碗型扁平状,这类尘卷风发生的地表粗糙度较小;D是所示的尘卷风发生在比较光滑的表面上,尘卷风外形呈规则的圆柱状。由于其中心气压较低且气流旋转,尘卷风气流将地表颗粒物携带升空使得尘卷风可见。从图1发生在不同表面的尘卷风可以看出,尘卷风的演化、外形和强度与地表性质有关。

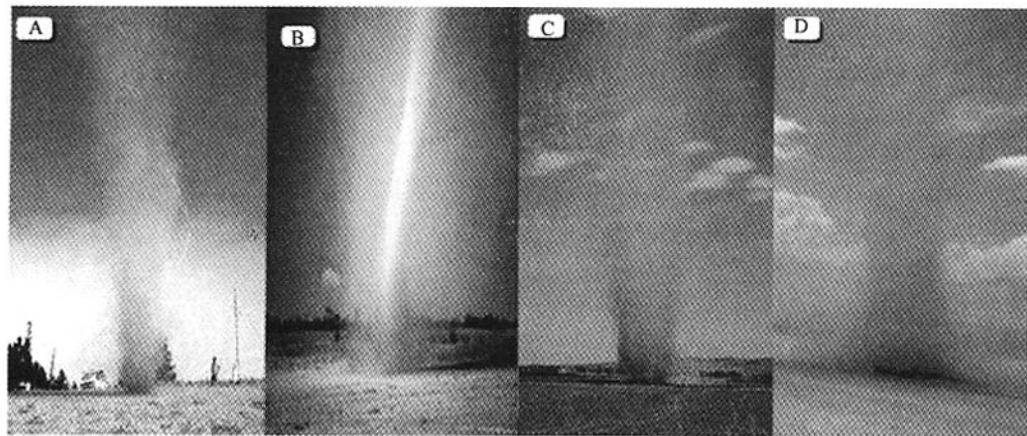


图1 地球尘卷风的类型

Fig. 1 Patterns of Earth's dust devils

尘卷风按照移动方式可以分为两类,驻留式和迁移式。Ives曾观察到在较平坦的地区,尘卷风有时会迁移到或者发生在地形上的小高地,如义冢,然后持续相当一段时间,并从其邻近卷走大量松散的尘土和其他轻的碎屑<sup>[25]</sup>。迁移的尘卷风,其路径变化很大,有些本质上是随机性的,而另一些则取直线

式或规则的螺旋式。Ives认为当环境风速低时(小于 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )时,其路径好像是受局部的地形控制;而风速大于 $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,则风向几乎是主要的控制因素。尘卷风向下风向移动的速度和环境风速几乎相同。

尘卷风搬运风沙的潜力是巨大的,一些较大较

强烈的尘卷风高达几千米,能把大量的沙尘旋起而后被平流风带到很远的地方<sup>[22,25]</sup>。Metzger 曾经对尘卷风的扬沙能力进行过一个估计<sup>[26]</sup>,一个较大的尘卷风能够把大约 2 000 kg 的沙尘带到空中。Hall 通过计算指出,在 1.5 m 和 300 m 高度上,对升离地面的气携粉尘进行测量的结果表明,亚利桑那州图森附近沙漠地区的尘卷风在炎热的夏日可升离粉尘 250 kg·km<sup>-2</sup>;尘卷风作用于裸露的泥灰路面可使多达 250 μg·m<sup>-3</sup> 的粉尘被带入亚利桑那州皮马县 1 km 厚的大气下层,比车辆交通的贡献要大约一个数量级<sup>[27]</sup>。搬运粉尘的小尺度风系可以任何季节的任何时候单独存在,特别容易发生在春夏季的午后或凌晨,对平时空气中的粉尘浓度有很大贡献。K. Pye 在其著作论述搬运粉尘的风系统一章开篇指出:在极为局部的尺度上,直径只有一二十米的小尘暴就可把粉尘升空几分钟到几小时;小型尘卷风可以把沙尘卷到几十米的空中,而大型的龙卷型尘卷风足以把沙尘卷到数千米的高空,高空的粉尘由湍流混合作用不断扩散,并可被全球风系搬运到几千公里之远,扩散过程通常经历两三个星期<sup>[28]</sup>。

为什么尘卷风能够旋起如此多的沙尘?它的发生机理是什么?它具有什么样的结构?都已经成为地学或者气象学的重要研究课题。

### 3 尘卷风流场的国内外研究进展

关于尘卷风的研究,自从 20 世纪中期以来一直都在进行,研究方法主要可以分为三类:观测研究、试验研究以及数值研究。与国外的研究相比,我国的尘卷风的观测、试验与数值模拟工作开展均不多,观测研究几乎空白,但是近几年的数值模拟取得明显进展,形成了一定的特色。

在对尘卷风研究的早期,观测是最基本的一种研究方式。Ives<sup>[25]</sup> 和 Sinclair<sup>[29]</sup> 应该是最早对尘卷进行系统观测研究的学者(图 2)。他们总结得到了尘卷的一些基本特征参数。由于尘卷风的发生具有偶然性,对它的观测不能进行事先的安排和计划,必须靠长时间的野外考察和观测,因此,试验研究成为非常重要的手段。

试验研究通常可分为两类:一类是在实验室里用风扇制造小型的旋风(图 3),通过对实验模型的观测来研究尘卷风;另一类是在沙漠地区建造利于尘卷风生成的试验场,观测在试验场内产生的尘卷来进行研究。Ryan 和 Carroll 对尘卷风的发育进行万方数据

了实验研究<sup>[30]</sup>,实验场地是 Mojave 沙漠中 300 m × 500 m 清理过的地基,在 30 d 的观测中,有 11 d 天气晴朗,风速低,总共记录了 1 119 次尘卷风,约相当于每天 250 次·km<sup>-2</sup>。在实验室里用风扇制造小型的旋风,通过对实验模型的观测来研究尘卷。图 3 是亚利桑那州立大学的干冰旋涡制造器,在顶部安装一个风扇吸气,气流就会汇聚而上在地面上形成类似于尘卷风的旋涡,桌面上放置一定量的干冰使旋涡变得可见。这种方法简单实用,对于研究自然界中的集中涡有重要的意义。亚利桑那州立大学的众多学者通过该装置研究尘卷风取得了众多的成果,如尘卷风扬尘的阈值速度<sup>[31]</sup>。

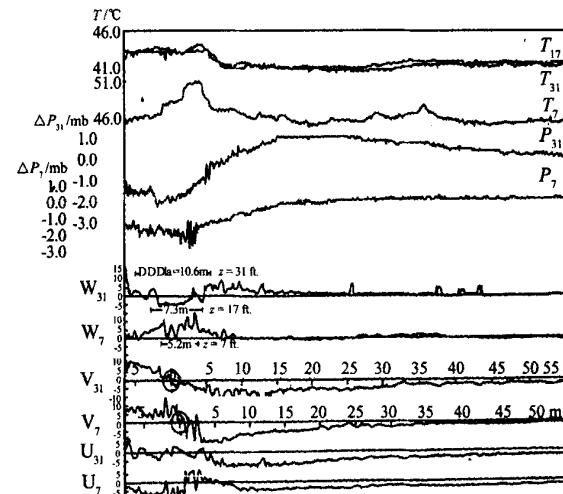


图 2 尘卷风的水平面气象要素<sup>[32]</sup>

Fig. 2 Horizontal profiles of the meteorological parameters of the observed dust devil

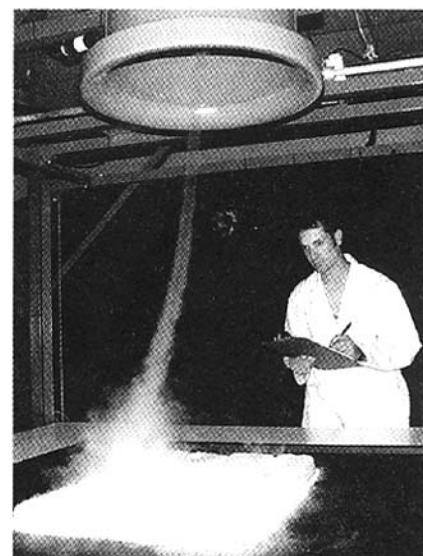


图 3 亚利桑那州立大学的干冰旋涡制造器

Fig. 3 Dry ice vortex simulator in Arizona University

Sinclair 认为尘卷通常发育在白天地面被强烈加热,紧靠地面形成一层过热空气的地方,尘卷风从地表吸收了碎屑和沙尘而变得可见,但夹带尘土对旋涡的动力学几乎没有什么影响<sup>[32]</sup>。到目前为止,绝大多数的数值模拟针对空气流场。关于尘卷风的成因也有多种理论,但大部分学者<sup>[30, 33-40]</sup>认同于热对流泡理论,如 Carroll 和 Ryan<sup>[30]</sup>; Cortese 和 Balachandar<sup>[33]</sup>; Shapiro 和 Kogan<sup>[34]</sup>; Kanak 等<sup>[35]</sup>; Toigo 等<sup>[36]</sup>; Michael 和 Rafkin<sup>[37]</sup>; Kanak<sup>[38]</sup>; 赵永志和顾兆林等<sup>[39]</sup>; 顾兆林和赵永志等<sup>[40]</sup>。

正如美国华盛顿大学 Leovy 教授 2003 年在 Nature 撰文指出的那样,尘卷风的数学模拟给试验与观测研究的结果提供了解释机理的工具,能够给边界层内的涡动力学提供洞察力<sup>[41]</sup>。因此,数值研究方法一直是尘卷风研究的一种重要方法。例如,火星尘卷风发生的频度和强度比地球尘卷风要大得多,但由于观测手段的限制,数值模拟工作显得更为重要。1998 年 Renno 等人提出了关于尘卷风的热动力学理论,可以估计尘卷风的最大旋转速度、上升速度和最大压降<sup>[42]</sup>。

2000 年, Kanak 等运用大涡模拟的方法研究垂直旋涡在大气对流边界层中的产生,在模拟的大气对流边界层中发现了多个垂直旋涡,给尘卷风的涡源提供了证据<sup>[35]</sup>。Willis 和 Deardorff 在实验室进行 Rayleigh-Benard 对流试验发现垂直旋涡,如果按比例放大到大气对流边界层,这些垂直旋涡比尘卷风大一些<sup>[43]</sup>。

目前大多数的数值模拟可以称为对流边界层尺度(CBL)的模拟,数值求解的网格尺度,如文献<sup>[35]</sup>水平方向采用 35 m 的网格,接近于尘卷风本身的尺度,虽然可以模拟初始旋涡,但在模拟的结果中不能得到清晰详细的尘卷风结构,不能进一步揭示尘卷风的物理机制。因此,需要减小网格尺度,如作者课题组与 Kanak 等最新的工作,采用所谓的尘卷风尺度的模拟<sup>[38-40]</sup>。尘卷风尺度的小尺度模型与 CBL 尺度的模型是为了解决不同的问题而建立的,用 CBL 尺度的模型来研究尘卷风主要是为了揭示尘卷风涡源生成的机制,其重点在于研究尘卷风的发生地和发生原因,而用尘卷风尺度的小尺度模型来研究尘卷风主要是为了揭示探讨尘卷风的流场结构以及环境参数的影响。

作者在文献<sup>[39]</sup>中报道的主要工作包括:在大气边界层尺度(CBL 尺度),用大涡模拟方法,进行了尘卷风的诱发过程研究,验证了 Kanak 等的工作<sup>[35]</sup>;在

尘卷风尺度,利用尘卷风演化模型,研究了旋转对流热泡在地面持续的辐射加热下快速孕育并发展成尘卷风的过程,分析了典型阶段尘卷风的结构,提出其结构可划分为 4 个部分—外围、核、转角及汇流层;把尘卷风的演化分为弱涡、单元涡和双单元涡三个不同阶段,提出尘卷风在不同阶段的动力学特征是由作用在气流上的浮力、轴向压力梯度力、离心力和径向压力梯度力共同作用所决定的,计算所得到的流场参数与 Renno 等的热动力学理论的结果进行了比较<sup>[42]</sup>,一致性很好;应用 Lagrangian 坐标系下的颗粒轨道模型,初步研究了颗粒相在尘卷风中的迁移过程。

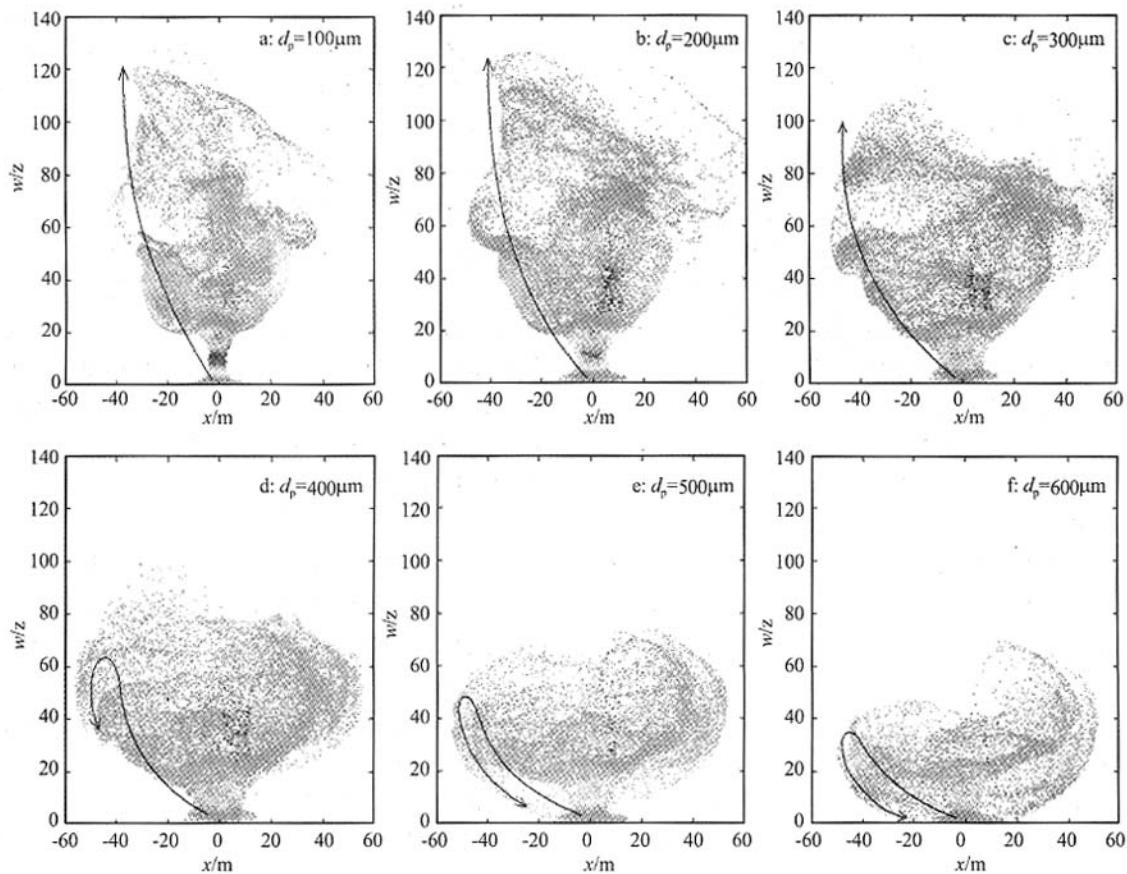
#### 4 粉尘颗粒在尘卷风中的悬移运动

关于粉尘在尘卷风流场的悬移机理,存在两种机制<sup>[44-47]</sup>,近地面的水平风切导致地面粗大沙粒跃移离开地面,升空的大直径沙粒随后降落,与地面的细小沙粒碰撞,将能量传给细小沙粒,导致细小沙粒升空,尘卷风形成的低压中心的抽吸作用,使得细小沙粒运动至高处。但是,前述的悬移机理,不能解释尘卷风的沙粒分层现象,尘卷风上部是细颗粒富集区,中下部是较大颗粒富集区,这种分层机制是尘卷风形成电场的基本条件<sup>[48]</sup>。

本课题组利用拉格朗日模型<sup>[39-40, 49-50]</sup>,在尘卷风流场中研究了不同直径沙粒的运动轨迹。从图 4 可以看出,较小的沙尘颗粒的运动轨迹与气流的运动方向基本吻合,而较大的沙尘颗粒的运动轨迹则偏离主流向外运动,造成这种现象的原因是在同一个尘卷风中大颗粒受到的离心力大于小颗粒受到的离心力。较大的沙尘颗粒受到的离心力较大而偏离主流向外运动,由于外围气流的上升速较低,托不住较大的颗粒,于是沙尘便在旋风的外围开始沉降,如图 4d, e, f 所示,在沉降过程中,这些沙尘又被汇流层的高速空气携带到旋风中心处,而后又被扬起,这些沙尘就一直在转角区循环直到上升气流的强度下降到无法扬起它们为止。因为这些较大的沙尘颗粒都被抛到尘卷风的外围,它们的分布情况决定着尘卷风转角区的外形。与大颗粒的运动轨迹不同,由于小颗粒重量较轻,受到的离心力也比较小,极易被上升气流携带而运动到高空(图 4a, b, c)。

值得一提的是,图 4 所示的颗粒运动只包含了颗粒的径向和轴向运动,如果加上旋转分量,所有的颗粒轨迹曲线呈螺旋线。

图 5 是不同直径颗粒在尘卷风流场的相互作用关系图。图中标记为 2 的箭头曲线表示具有中等粒

图4 尘卷风内不同直径颗粒的运动<sup>[39]</sup>Fig. 4 The movements of the particles with different diameters in dust devils<sup>[39]</sup>

径的沙尘颗粒的运动轨迹,与图4d,e中表示沙尘运动轨迹的箭头曲线基本一致;图5中标记为3的箭头曲线表示粒径较大的沙尘颗粒的运动轨迹,与图4f中表示沙尘运动轨迹的箭头曲线基本一致。中等大小的沙尘颗粒在外围发生沉降的区域正是大颗粒上升的区域。在这个区域,下沉着的中等大小沙尘颗粒

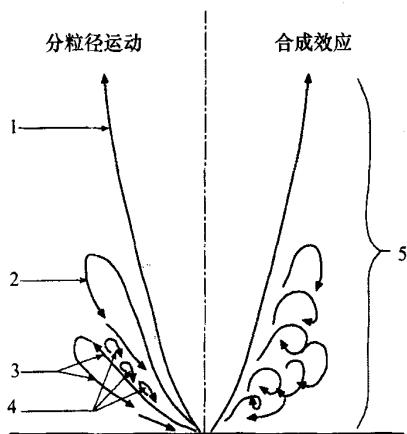
与上升着的大颗粒相遇,二者相互作用便会展成很多小型的沙涡(图5中标记为4的箭头)。图5的右侧为沙尘颗粒相互作用后形成的外形示意图。尘卷风旋涡的上部和核心附近由细沙组成,但在转角区浓密的大颗粒沙尘组成了尘卷的基部,好像是一个“裙子”<sup>[51-52]</sup>。中等大小沙尘颗粒与大沙尘颗粒在转角区的循环运动是决定尘卷风寿命的重要因素之一,因为其中的沙尘总量很大,对尘卷的强度有较大的消减作用。

在真实的尘卷风中,沙尘颗粒的材质、大小、质量和形状都不相同,且各种沙尘颗粒共存在同一个尘卷风中,各种颗粒之间的相互作用比上述的更为复杂,含有沙尘的尘卷风内部气流的流动也比不含沙尘的尘卷更为复杂和紊乱。因此,需要进一步发展气固两相流模型来研究尘卷风。

## 5 粉尘活动与颗粒荷电

由于沙尘颗粒间的不对称摩擦起电,沙尘剧烈活动的一个结果将产生电场,试验与观测证实沙尘暴过程伴随强烈的电场,同样,尘卷风的电场也值得关注。

Gill 观测到沙尘暴过境地带有强电场和电火花

图5 尘卷风内不同直径颗粒的相互作用示意图<sup>[40]</sup>Fig. 5 The dust lifting patterns in a dust devil<sup>[40]</sup>

现象出现,同时对无线电信号产生干扰<sup>[53]</sup>。Freier 在对 Sahara 沙漠的一次大型尘卷风过程测量电场时发现,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,它们形成的电场与晴天电场方向相反,强度远大于晴天电场<sup>[54]</sup>。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 2 700 V<sup>[55]</sup>。Farrell 等在大型尘卷风的电场测量中发现<sup>[48]</sup>,在 50 m 的范围内电场强度达到  $4 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,远远高于人们的预期。初步估计电场力与沙粒的重力在一个量级<sup>[56]</sup>。因此,静电场产生以及对固体颗粒的运动的影响不可忽视。

风沙带电现象的实验测试与理论研究可以追溯到 20 世纪 50—60 年代,这是由于对宇宙和其他星球研究与探测的需要,需要弄清沙粒带电对风沙运动的影响,也需要合理解释地球、火星以及金星等地表风沙地貌的形成与发展过程<sup>[57—59]</sup>。特别是火星尘卷风的强度与范围比地球尘卷风要大得多。

目前人们对于风沙运动的基本过程按其离开地面的程度有了大致的分类:在地表滚动的沙粒蠕移运动;在近地风沙流层内沙粒离开地面的跃移运动;离开地面升空的尘埃的悬移运动。在风场作用下,沙粒的这些基本运动形式相互耦合在一起,加上不同阶段的颗粒荷电作用,给风沙运动的定量研究带来一定的困难。

在沙粒荷电对沙粒跃移轨迹的影响的定量研究方面,我国学者和国外学者开展了卓有成效的研究工作<sup>[60—64]</sup>,得到了沙粒-风场相互耦合作用时沙粒带电对风沙流中沙粒跃移的影响,同时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等<sup>[62]</sup>。我国学者对于静电力在风沙跃移运动从开始阶段到风沙流达到自平衡阶段整个发展过程的影响方面的研究也取得了重要进展,并有望继续取得进展。

在沙粒的悬移上升运动及其荷电的研究方面,由于沙尘暴、尘卷风等沙尘活动过程的空气流场内部结构特征及机理研究的缺乏<sup>[60]</sup>,进展一直不显著<sup>[65]</sup>,是一个亟待加强的研究方向。

## 6 今后工作的几点展望

对于尘卷风的小尺度气象模拟,下垫面的陆面过程作用不能忽视。陆面过程包括地表辐射和地表粗糙度<sup>[2,66]</sup>等,但是这些陆面过程的参数如何影响风力数据

尘卷风以及尘旋风的演化,研究工作开展很少,或者是初步的。如图 1 所示,尘卷风、尘旋风的流场特征与地表条件有很大关系,可以表现为圆柱状(在机场的跑道上生成)或倒圆锥状(沙漠边缘上生成)。课题组在尘卷风尺度模型中,尝试引入环境涡量、地表温度及地表粗糙度等热力或物理参数来研究下垫面的影响,取得了初步成功。热对流泡理论的基础是地球尘卷风起源于大气对流边界层内的弱垂直旋涡,故可以引入环境涡量来表示初始状态;引入地表粗糙度的概念反映地表特征,特别是用地面摩擦造成的环境涡量的降低(垂直变化)来间接表示地面粗糙度的影响及效果。地面和在其上部的空气之间的温差是形成对流的根本原因,也是形成尘卷风的基本动力。

尘卷风以及尘旋风生成后,地面的粉尘、沙粒等在尘卷风以及尘旋风中的垂直迁移过程以及对空气动力过程的影响等涉及到气固两相流理论,粉尘、沙粒的参数影响到尘卷风以及尘旋风的消亡过程,也是需要进一步研究的问题,这有助于弄清强沙尘过程的电场产生机制以及西部干旱、半干旱地区的粉尘的空中远距离输送的机理。与研究气体运动不同,研究固体颗粒的运动包括单个颗粒(粗大颗粒)的运动与颗粒群(细小颗粒)的运动。处理单个颗粒的运动,可以采用在 Lagrangian 坐标系下的颗粒轨道模型。颗粒轨道模型是在 Euler 坐标系中处理连续的流体相,进而在 Lagrangian 坐标系下处理单个的颗粒相,同时对大量颗粒轨迹进行统计分析就能得到颗粒群运动的概貌<sup>[39]</sup>。对于尘卷风中存在大量的不同直径分布的颗粒群问题,数量平衡方程已经呈现出很好的应用前景<sup>[67—69]</sup>,有望与流体动力学方法耦合,处理颗粒群的运动问题。

由于数值模拟中没有考虑静电场对颗粒运动的影响,尘卷风上部聚集的颗粒直径比实际观测的数据大一个数量级<sup>[49]</sup>,这也进一步说明了静电场对颗粒运动的影响。Renno 等估计一个强尘卷风中心 10 m 内近地电场最大达到  $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。虽然 Farrell 等在最近的工作中对静电场大小与流体动力学之间的整合方面进行了研究<sup>[65]</sup>,但作者继续引用文献<sup>[48]</sup>指出,关于静电场的产生机制以及静电场对尘卷风内沙尘颗粒的运动的影响目前研究不够。

由于发生在边界层内的局地严重污染对人类活动的巨大危害,对行星边界层和空气污染的数值模拟,如热泡对流,也越来越为大气物理学研究人员所重视。因此,大气对流边界层内近地层内小尺度风

系数值模式研究具有重要的理论研究价值<sup>[38]</sup>。

## 参考文献(References):

- [1] 韩永翔, 张强, 董光荣, 等. 沙尘暴的气候环境效应研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 307—311.
- [2] 鲍艳, 吕世华. 干旱、半干旱区陆气相互作用的研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 454—460.
- [3] 卢琦, 杨有林. 全球沙尘暴警示录[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [4] 夏训诚, 杨根生. 中国西北地区沙尘暴灾害与防治[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.
- [5] 潘耀忠, 范一大, 史培军, 等. 近 50 年来中国沙尘暴空间分异格局及季相分布—初步研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 1—8.
- [6] 李耀辉. 近年来我国沙尘暴研究的新进展[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 616—622.
- [7] 王涛, 赵哈林. 中国沙漠科学的五十年[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 145—165.
- [8] 李艳春, 赵光平, 陈楠, 等. 宁夏沙尘暴天气研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 137—141.
- [9] 李平, 刘勇, 杜继稳, 等. 陕北地区沙尘暴天气分析及预报[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 295—299.
- [10] 白虎志, 马振峰, 董文杰, 等. 西藏高原沙尘暴气候特征及成因研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 249—253.
- [11] 岳平, 牛生杰, 王连喜, 等. 一次夏季强沙尘暴形成机理的综合分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 370—374.
- [12] 李海萍, 熊利亚, 庄大方. 中国沙尘灾害遥感监测研究现状及发展趋势[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 45—52.
- [13] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 293—305.
- [14] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究五十年(II)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 795—815.
- [15] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 沙尘暴研究的进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349—356.
- [16] 徐国昌. 甘肃“4·22”特大沙暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(4): 26—35.
- [17] 陈敏连, 郭清台, 徐建芬, 等. 黑风暴天气的研究和探讨[J]. 甘肃气象, 1993, 11(3): 16—27.
- [18] 张小玲, 程麟生. “93·5”黑风暴期间中尺度涡旋发生发展的涡源诊断[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 123—131.
- [19] Renno N O, Abreu V J, Koch J, et al. MATADOR 2002: A pilot field experiment on convective plumes and dust devil[J]. J Geophys Res, 2004, 109 (E07001), doi: 10.1029/2003JE002219.
- [20] Kanak K M, Lilly D K, Snow J T. The formation of vertical vortices in the convective boundary layer[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2000, 126: 2789—2810.
- [21] Sinclair P C. The lower structure of dust devils[J]. J Atmos Sci, 1973, 30: 1599—1619.
- [22] Hess G D and Spillane K T. Characteristics of dust devils in Australia[J]. J Appl Meteorol, 1990, 29: 498—507.
- [23] Ronald G M, Balme R, Iversen J D, et al. Martian dust devils: laboratory simulations of particle threshold[J]. J Geophys Res, 2003, 108(E5): 7—1—7—12.
- [24] Cantor B, Malin M, Edgett K S. Multiyear Mars Orbiter Camera (MOC) observations of repeated Martian weather phenomena during the northern summer season[J]. J Geophys Res, 2002, 107(E3), doi: 10.1029/2001JE001588.
- [25] Ives R L. Behavior of dust devils[J]. Am Met Soc Bull, 1947, 28: 168—174.
- [26] Metzger S M. Dust devils as aeolian transport mechanisms in southern Nevada and in the Mars Pathfinder landing site[D]. Ph. D. thesis, Univ. of Nev., 1999.
- [27] Hall F F. Visibility reductions from soil dust in the western United States[J]. Atmos Env, 1981, 15: 1929—1933.
- [28] 肯尼思. 风魔粉尘及粉尘沉积物[M]. 台益和, 张选阳(译). 北京: 海洋出版社, 1991.
- [29] Sinclair P C. Some Preliminary dust devil measurement[J]. Month Weath Rev, 1964, 92: 363—367.
- [30] Ryan J A, Carroll I J. Dust devils wind velocities: mature state[J]. J Geophys Res, 1970, 75: 531—541.
- [31] Ronald G M, Balme R, Iversen J D, et al. Martian dust devils: laboratory simulations of particle threshold[J]. J Geophys Res, 2003, 108(E5): 7—1—7—12.
- [32] Sinclair P C. A quantitative analysis of the dust devil[D]. Ph. D. thesis, Univ. of Arizona, 1966.
- [33] Cortese T, Balachandar S. Vertical nature of thermal plumes in turbulent convection[J]. Phys Fluids, 1993, A5: 3226—3232.
- [34] Shapiro A, Kogan Y. On vortex formation in multicell convective clouds in a shear-free environment[J]. Atmos Res, 1994, 33: 125—136.
- [35] Kanak K M, Lilly D K, Snow J T. The formation of vertical vortices in the convective boundary layer[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2000, 126: 2789—2810.
- [36] Toigo A D. Numerical simulation of Martian dust devils[J]. J Geophys Res, 2003, 108(E6): 1—1—1—14.
- [37] Michaels T I, Rafkin S C R. Large eddy simulation of atmospheric convection on Mars[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2004, 130: 1251—1274.
- [38] Kanak K M. Numerical simulation of dust devil-scale vortices [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 2005, 131: 1271—1292.
- [39] Zhao Yongzhi, Gu Zhaolin. Mechanism and large eddy simulation of dust devils[J]. Atmosphere-Ocean, 2004, 42: 61—84.
- [40] Gu Zhaolin, Zhao Yongzhi, Li Yun, et al. Numerical simulation of dust lifting within dust devils—simulation of an intense vortex[J]. J Atmos Sci, 2006, 63: 2630—2641.
- [41] Leovy C B. The devil is in the dust[J]. Nature, 2003, 424: 1008—1009.
- [42] Renno N O, Burkett M L, Larkin M P. A simple thermodynamical theory for dust devils[J]. J Atmos Sci, 1998, 55: 3244—3252.
- [43] Willis G E, Deardorff J W. Laboratory observations of turbulent penetrative convection platforms[J]. J Geophys Res, 1979, 84: 296—301.
- [44] Balme M, Greeley R, Mickelson B, et al. Dust devils on mars: results from threshold test using a vortex generator[J]. Lunar and Planetary Science, 2002, XXXIII: 1048.
- [45] Ringrose T J, Towner M C, Zarnecki J C. Convective vortices

- [on mars: a reanalysis of Viking Lander 2 meteorological data, sols 1–60[J]. ICARUS, 2003, 163: 78–87.]
- [46] Greeley R, Balme M R, Iversen J D, et al. Martian dust devil: Laboratory simulations of particle threshold[J]. J Geophys Res, 2003, 108(E5): 7–1–7–12.
- [47] Greeley R, Lancaster N, Lee S, et al. Martian eolian processes, sediments and features, in Mars[M]. Tucson: Univ. of Ariz. Press, 1992: 730–766.
- [48] Farrell W M, Smith P H, Delory G T, et al. Electric and magnetic signatures of dust devils from the 2000–2001 MATA-DOR desert tests[J]. J Geophys Res, 2004, 109(E03004): 1–13.
- [49] 赵永志. 尘卷风形成、演化及结构的理论分析和数值研究[D]. 西安交通大学博士学位论文, 2004.
- [50] 顾兆林, 赵永志, 郁永章, 等. 尘卷风的形成、结构和卷起沙尘过程的数值研究[J]. 气象学报, 2003, 61(6): 751–760.
- [51] Gierasch P J, Goody R M. A model of a Martian great dust storm[J]. J Atmos Sci, 1973, 30: 169–178.
- [52] Gierasch P J. Martian dust storms[J]. Rev Geophys, 1974, 12: 730–745.
- [53] Gill E B. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 162: 568–569.
- [54] Freier G D. The electric field of a large dust devil[J]. J Geophys Res, 1960, 65: 3504–3510.
- [55] 凌裕泉, 贺大良, 李长治. 风沙电现象实验研究[C]//中国科学院兰州沙漠所治沙会议论文集. 1984.
- [56] 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:D辑, 2003, 33(6): 593–601.
- [57] Eden H F, Vonnegut B. Electrical breakdown caused by dust motion in low pressure atmospheres: considerations for Mars[J]. Science, 1973, 180: 962–963.
- [58] Kamra A K. Measurements of the electric properties of dust storms[J]. J Geophys Res, 1972, 77: 5856–5869.
- [59] Kanagy II S P, Mann C J. Electrical properties of eolian sand and silt[J]. Earth-science Review, 1994, 36: 81–204.
- [60] 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.
- [61] Schmidt D S, Schmidt R A. Electrostatic force on saltating sand[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 8997–9001.
- [62] Zheng X J, Huang N, Zhou Y H. Laboratory measurements of electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. J Geophys Res, 2003, 108(D10): 4322.
- [63] 郑晓静, 周又和. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003, 25(2): 1–11.
- [64] 赵建华, 张强, 袁铁, 等. 沙粒启动机制的理论分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 853–862.
- [65] Farrell W M, Renno N O, Delory G, et al. Integration of electrostatic and fluid dynamics within a dust devil[J]. J Geophys Res, 2006, 111(E01006), doi:10.1029/2005JE002527.
- [66] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 337–346.
- [67] Marchisio D L, Fox R O. Solution of population balance equations using the direct quadrature method of moments[J]. Aerosol Science, 2005, 36: 43–73.
- [68] McGraw R, Wright D L. Chemically resolved aerosol dynamics for internal mixtures by the quadrature method of moments[J]. Aerosol Science, 2003, 34: 189–209.
- [69] 苏军伟, 顾兆林, 李云. 各向同性颗粒系统数量平衡方程直接矩积分求解法的研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2006, 22(4): 310–316.

## Advances in Study of Dust Devils

GU Zhao-lin<sup>1</sup>, QIU Jian<sup>2</sup>, LU Lu-yi<sup>2</sup>, ZHAO Yong-zhi<sup>3</sup>

(1. Department of Environmental Science and technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an 710049, China; 3. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Dust devils are unique meteorological phenomena, occurring in the atmosphere boundary layer. Dust devil, usually of short duration, has a low pressure and warm-core, swirling dust, debris, and sand to high levels. This paper reviews the advances of dust devil studies, including the physical characteristics of dust devils and their environmental effect; some results obtained through three kinds of research tools-observation, experiment and numerical simulation; the particle transportation in the air flow field of dust devil and the dust stratification; the electrostatic field by particulate impact. Some aspects are finally summarized for further investigations.

**Keywords:** dust devil; dust storm; particulate electrostatic effect; gas-solid two-phase flow