

# 热力洼地与沙尘暴的形成

◆ 匡耀求 黄宁生

沙尘天气自古以来就有,而且影响范围很广。我国长江以北几乎所有的地区都不同程度遭受沙尘天气的影响。2002年3月18日至21日的大风沙尘天气横扫我国北方和蒙古国,在我国的影响范围达140多万公里<sup>2</sup>,新疆、青海、甘肃、内蒙古、宁夏、陕西、山西、河北、北京、天津、辽宁、吉林、黑龙江,以及山东、河南、湖北、湖南西北部、四川东部等地的部分地区先后出现了大范围沙尘天气,其中内蒙古、甘肃中部、宁夏北部、河北北部、北京、吉林西北部等地出现了强沙尘暴,甘肃鼎新、内蒙古乌拉特后旗能见度曾经为零,受其影响的人口达1.3亿。2006年3月至5月频繁发生的沙尘暴强度之大,影响范围之广更给人们留下了深刻印象。2006年4月17日的尘暴使北京笼罩在漫天的浮尘之下,当日每平方米的降尘超过20克,按全市16807.8公里<sup>2</sup>计算,全市降尘总量超过33万吨。尘暴袭来,首都上空一片灰黄,白昼如同黄昏。

## 认识沙尘暴

沙尘暴也称沙暴或尘暴,是一种由狂风携带着沙粒和尘土长距离飘扬而出现的灾害性天气现象,其影响所及的区域所见到的与此有关的各种天气现象统称为沙尘天气。我国气象部门将沙尘天气分为浮尘、扬沙、沙尘暴和强沙尘暴四类。狂风将地面尘土和沙粒吹起使空气混浊,当水平能见度小于10公里时称为浮尘;当水平能见度在1公里至10公里之间时称为扬沙;水平能见度小于1公里时称为沙尘暴;水平能见度小于500米时称为强沙尘暴。其实这种以水平能见度为依据的分类并不十分严谨,因为影响能见度的因素

除了空气中浮尘和扬沙之外,还有水汽、其他微细颗粒物和气溶胶等,后者通常称为雾、霾。由其他微细颗粒物和气溶胶造成的能见度降低的天气现象最早出现在世界工业革命的先行地——伦敦,曾被称之为“伦敦雾”,后来发现其形成与工业排放的烟(smoke)有关,而看起来又具有雾(fog)的特点,英语中为此创造了一个新的单词smog表示这种现象。smog近年来在我国南方已非常普遍,广东称之为灰霾,香港称之为烟霞。

同一沙尘暴事件在其影响范围的不同区域可能表现为不同的天气现象:在源区附近表现为扬沙,而在离源区较远的地方表现为浮尘,在其影响最严重的中心区域表现为沙尘暴或强沙尘暴。国外通常根据沙尘暴中心区域空气中是否含沙将沙尘暴区分为沙暴或尘暴。沙暴通常见于干旱荒漠地区,是由强风卷起表层松散沙土至离地面0.5米以上的低空漂移的天气现象;而尘暴则是强风卷起轻质、细粒尘土进入3000米以上的高空随气流长距离漂移的天气现象。沙暴影响的范围有限,通常离源区较近,常见于在沙漠附近;而尘暴影响的范围可以很广,甚至可以跨洋过海。从蒙古高原扬起的尘土可以席卷我国华北和东北、朝鲜半岛,跨越日本和太平洋,甚至影响到北美洲大陆。

对我国沙尘暴发展演变趋势的认识,学术界出现了截然不同的两种观点。一种是以气象部门和林业部门有关观测与研究机构的学者为代表,认为近50年来我国北方地区的沙尘天气总体上呈现逐渐减少的趋势,其中以20世纪50至60年代最为频发,从80年代中期起呈现显著的持续下降趋势,从90年代初到日前为止的20多年间,一直保持在50多年来的最低水平。并强调沙尘暴是一种自然现象,天气和气候因素主导了亚洲沙尘暴的发生。我国部分地区有所发展的沙漠化过程虽对沙尘暴有所贡献,但它不是沙尘暴发生的控制性因素,不应夸大沙化土地对沙尘暴的影响。他们也承认2006年春季的沙尘暴发生的次数多、影响的范围大,但强调沙尘天气主要产生于极端干旱的荒漠

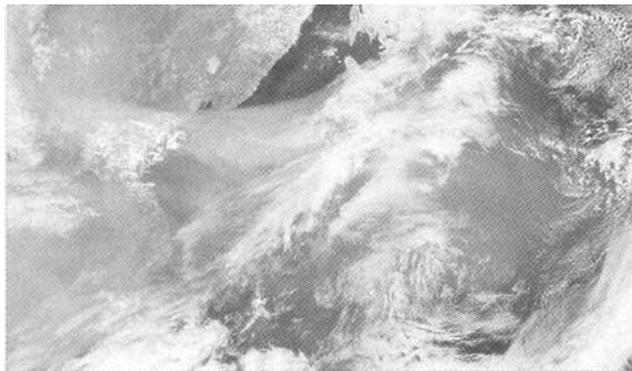
匡耀求,研究员;黄宁生,研究员;中国科学院广州地球化学研究所可持续发展研究中心,广州510640。

Kuang Yaoqiu, Professor; Huang Ningsheng, Professor; Center for Sustainable Development Research, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640.

半荒漠地带，不能说今年沙尘暴天气偏多是生态恶化的必然结果。

另一种观点是以大学和独立研究机构的学者为代表，中国科学院和水利部水土保持研究所的彭珂珊研究员指出，我国的特大沙尘暴（风速大于等于25米/秒，能见度小于等于50米，甚至降为0米）发生频率在最近50年来有明显的增加，20世纪50年代5次、60年代8次、70年代13次、80年代14次、90年代23次，呈上升趋势。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的陈广庭研究员指出近50年来我国沙尘暴频数的年代际变化的特征是：20世纪60—70年代波动上升，80—90年代明显减少，2000年以来又急剧增加，近几年处在新一轮沙尘暴活动的活跃期。尤其是西北干旱区，从1993年的黑风暴以后，每年都有几次强沙尘暴过程，并且有发生时间逐年提前的趋势，仅2000年西北地区就发生强沙尘暴3次，2006年强沙尘暴5次。可以说，从20世纪中期以来进入了新一轮沙尘暴活动的活跃期，并指出与我国北方地区生态恶化、沙漠化土地大面积扩展有直接关系。国家林业局副局长赵学敏指出湿地退化是导致沙尘暴频繁发生的一个重要原因，干涸的罗布泊和居延海就是典型的例子。拿2006年3月9日出现的强沙尘暴来说，从卫星遥感图像上可以看到一些主要的沙尘源区，其中有一片大的沙尘源区位于蒙古共和国境内，另一片大的源区则位于我国内蒙古自治区的额济纳旗，即黑河流域下游的古居延海区域，在甘肃民勤县与金昌市接壤区域也有一片小的沙尘源区，即被红崖山水库截流而干涸的石羊河流域下游地区。位于我国境内的这些沙尘源区均不是极端干旱的荒漠半荒漠地带，而是原来的绿洲区域，是人类活动原因形成的沙化土地区域。

来自专业气象部门的学者对我国沙尘暴发展演变



沙尘暴从我国东北跨越日本海进入太平洋时的卫星影像（2002年3月18日）

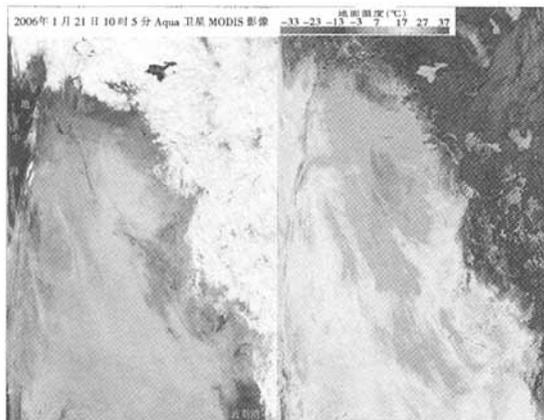
趋势的认识与独立研究机构的学者分歧如此之大，这可能与我国气象部门对沙尘暴的定义和观测站点的分布密度有关。按照我国气象部门的定义，水平能见度小于1公里时才称为沙尘暴，而对水平能见度的测定又是以观测点为基础的，只要在观测点以外1公里半径范围内都“能见”，就不能称为沙尘暴。至于离观测点1公里以外的水平能见度是多少，并不能成为该观测站的观测记录。这样一个观测站能控制的面积只有3.14公里<sup>2</sup>，由于许多观测站位于山上或人为影响较少的郊区，这种地区并不一定是沙尘暴中心的必经之地。因此，当沙尘暴出现或经过时，如果观测站在1公里之外，它记录下来的是扬沙天气；如果观测站离沙尘暴中心的距离在1至10公里之间，它记录的就只能是浮尘天气了；如果观测站在10公里之外，它根本不会留下沙尘暴的观测记录。也就是说，观测站完全观测不到在观测站周围314公里<sup>2</sup>范围以外出现的沙尘暴的任何迹象。而且垂直方向的能见度多少也与其定义的沙尘暴无关，因此，即使遮天蔽日的尘暴从其头顶经过，观测站也会视而不见，因为观测站观测的是水平方向的能见度。

对于沙尘暴的监测，观测站实际上是采用的“守株待兔”的方式。这样就难怪为什么在2006年4月17日早晨北京居民一出门就看到黄尘遮天蔽日，天地间弥漫着灰尘的味道，地上、车上覆盖着厚厚的一层尘土，气象观测部门却认为北京只是出现了一次严重的浮尘天气。气象部门得出的近50年来我国北方地区的沙尘天气总体上是逐渐减少的认识，是基于全国559个站点的观测资料。尽管看起来非常权威，但其实这559个站点的覆盖范围即使无缝连接的话，最多也只能控制1756公里<sup>2</sup>范围内发生的沙尘暴不被遗漏地记录下来，不到我国沙尘暴影响范围（180万公里<sup>2</sup>）的千分之一；最多可以控制17.56万公里<sup>2</sup>范围内出现的沙尘天气不被遗漏，只占我国沙尘天气覆盖面积的十分之一，也就是说有90%的地区出现的沙尘天气不在这些观测站的观测范围之内。况且这559个站点的覆盖范围根本不可能做到无缝连接，也不是随机布设，有相当一部分选点在“沙尘暴不常光顾”的山上。因此，这样的观测记录是会有与老百姓的感受出现偏差的情况。

### 沙尘暴的形成

沙尘天气是干旱地区的一种常见自然现象，是大气与地面相互作用的产物。很多人以为沙尘从沙漠里来，其实不完全是这样，有的沙漠只是

沙尘的落脚地，并不一定是沙尘的发源地。过去只能根据沙尘的来向判断沙尘源地所在的大致方向，现在有了很多的地球观测卫星在太空日夜不停地监视地球表面的动向。借助安装在卫星上的高分辨率照相机可以清楚地将沙尘的产生过程记录下来。通过卫星观测人们已发现了一些重要的沙尘暴发源地，如非洲的尼日尔和尼日利亚，亚洲的塔里木盆地，幼发拉底河上游叙利亚东部与伊拉克交界地区，以及美国新墨西哥州东部与得克萨斯州交界地区等。这里列举的4个沙尘暴发源地中前两个位于沙漠地区，后两个就并不是沙漠地区。



**幼发拉底河流域沙尘暴** 2006年1月21日幼发拉底河流域的区域遥感影像与地面热力景观图，该次沙尘暴发生在流域上游叙利亚东部与伊拉克交界地区，从热力景观图上可以看出该地区的地面温度在5~7℃左右，明显低于周边地区。

2006年1月21日，安装在Aqua卫星上的MODIS照相机捕捉到了幼发拉底河流域上游叙利亚东部与伊拉克交界地区的一次沙尘暴的影像。对比同时获得的地面热力景观图像，可以看到沙尘暴源地的地面温度明显低于周边地区，该区域地面温度在5~7℃左右，而周边地区地面温度均在10℃以上。从卫星图像中还可以看到位于沙特阿拉伯北部的沙漠地带地面温度达20℃以上，该沙漠并没有扬起沙尘，只是沙尘的堆积场所。因此，沙尘暴的发源地在地表热力景观图像上是一个温度明显较低的“洼地”，这种地面温度明显低于周边区域的大气下垫面称为“热力洼地”。大气系统下垫面出现这种热力洼地是导致大气系统不稳定的重要因素之一，正是相对周边明显较低的低温牵引了气流的下沉而扬起了地面的沙粒和尘土，沙尘被吹走后在当地留下了各种奇形怪状的风蚀地貌。

沙尘暴源地的地面温度之所以会明显低于周边

地区，主要是由于地球内部的热流在地表分布的不均匀性造成的。由于地球内部的结构和物质组成在不同的区域有显著的不同，来自地球内部的热流的强度在不同的区域差异明显：地壳性质比较活跃的地区大地热流较高，通常在100毫瓦/米<sup>2</sup>以上，而地壳性质比较稳定的地区，大地热流明显较低，通常低于50毫瓦/米<sup>2</sup>，有的区域（如非洲的尼日尔）甚至低于30毫瓦/米<sup>2</sup>。

2006年1月1日的MODIS影像记录到了美国新墨西哥州东部与得克萨斯州交界地区发生的一次沙尘暴。这是美国经常发生沙尘暴的一个区域。对比这个区域的大地热流图，发现沙尘暴的发源地就是大地热流低值区域，大地热流值低于50毫瓦/米<sup>2</sup>，而其西边则是一个明显的大地热流高值区域，其大地热流值在90毫瓦/米<sup>2</sup>以上。另外，从美国本土区域4公里深部地温等值线图上还发现新墨西哥州东部与得克萨斯州交界地区是美国中南部地区地内最冷的一个区域。4公里深处的温度低于70℃，而其西边区域同一深度处的温度高达180℃。可能就是这块“冷地”牵引了大气的下沉而扬起了大范围的沙尘，引发了这个区域频繁不断的沙尘天气。

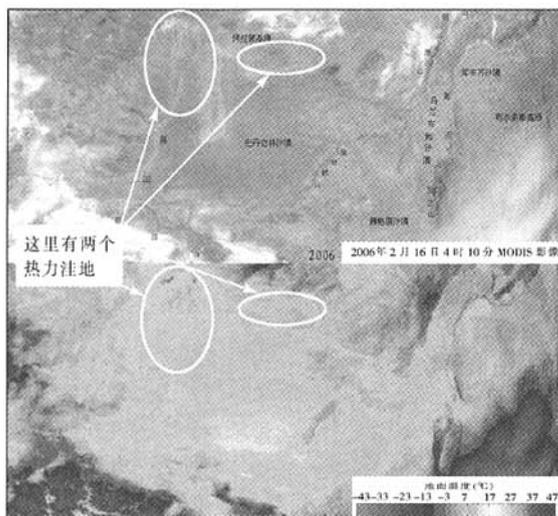
### 热力洼地及其对大气运动的影响

景观就是看到的景象，肉眼看到的景观是指物体在可见光谱波段表现出的景象，而热力景观是物体在红外光谱波段表现出的景象。地表热力景观指温度高低起伏在地面的分布格局。热力洼地即是地表热力景观的一种。根据不同区域的地面海拔高程数据，可以圈出等高线，绘制出地形图来反映地面的高低起伏，通常称之为地貌景观。如果把绘制地形图的地面高程数据置换为地面温度数据，就可以圈出地面等温线，得到地表热力景观图。就像利用普通照相机可以拍摄到地面景观图像一样，利用热红外摄影技术可以直接拍摄到地表热力景观图像。热力洼地就是热力景观图上的低温区域，是地面温度低于正常状态的负异常区；与之相对应的是热力景观图上的高温区域，称为热力隆起，是地面温度高于正常状态的正异常区。

大气的运动受温度和气压两方面的因素影响：温度升高会使空气膨胀上升，同时该区域的气压降低；而在水平方向上，空气会从高压区域向低压区域流动。在近地表处，空气在水平方向的流动会受到地面高低起伏的影响；而在数百米至数千米的高空，大气的水平运动往往是沿着等温面由高压区向低压区流动。而在大气圈的对流层里，空气的温度随着高度的上升而降低，高度每升高1000米，气温下降5~7℃，高度每上升

150~200米左右,气温下降1℃。如果一个区域的地面温度比周围区域低4℃,那么这个区域的气温等温面就比周围区域低600~800米,冷空气经过时就会从600~800米高处向下俯冲,产生强烈的下沉气流。如果其下垫面没有水面或植被覆盖,这种气流就会卷起地面的沙粒和尘土,形成沙尘暴。

因此,沙尘暴是突发强烈的下沉气流扬起来的,造成气流下沉的一个重要因素是地内热流较低的区域形成的热力洼地对大气气流产生的牵引作用。非洲的尼日尔和尼日利亚、印度与巴基斯坦交界地带的塔尔沙漠、美国新墨西哥与得克萨斯交界地区、蒙古共和国的戈壁地区、中国的塔里木盆地、准噶尔盆地、内蒙古额



**内蒙古额济纳旗的热力洼地** 图为2006年2月16日内蒙古额济纳旗古居延海区域的地貌影像和热力景观。一般地势最低的地方应该温度最高,但是图中用椭圆标示的两个区域尽管是地势最低的地方,其温度却明显低于周边地区,是典型的热力洼地。

济纳旗的古居延海区域,以及鄂尔多斯高原的库布齐沙漠西段和毛乌素沙地均是这样的热力洼地,这些区域是重要的沙尘暴发源地。

内蒙古额济纳旗的古居延海区域,是一个典型的热力洼地,在1950年代以前该区域是黑河流域下游的一个湖泊,水面面积达260公里<sup>2</sup>,周围水草丰美,被水和草覆盖的这个热力洼地不会牵引气流下沉,也不会卷起地面的尘土而形成沙尘暴。但是,自1950年代后期以来,黑河流域上游的河西走廊区域利用黑河的水建设人造绿洲,使得流向下游的水量逐年减少,1961年西居延海首先干涸,至1990年代时经常断流,1992

年东居延海也彻底干涸。从1993年开始不断有沙尘暴从这里卷起。2003年黑河流域降水较多,加上采取了一些节水措施并控制了上游的用水量,下游的东居延海得以蓄水,湖泊面积曾恢复到26公里<sup>2</sup>,2003—2005年沙尘暴明显减少,不过,2005年8月后湖泊又彻底干涸,结果2006年沙尘暴又显著增加。

## 防治沙尘暴

长期以来,我国防治沙尘暴的思路主要放在城市周围的防护林体系建设上,这虽然对改善城市区域的生态环境起到了一定作用,但是在抵御沙尘暴方面则没有起到实质性的作用。随着全球温室效应增强,整个地球表面温度提高,热力洼地效应将越来越强。按照传统思路防治沙尘暴的做法,不仅没有改善现状,还可能使环境更为恶化,造成沙尘暴将越来越严重,实行的放矢的防治已越来越迫切。

沙尘暴防治的重点应放在热力洼地上,采取必要的措施防止热力洼地上的沙土在地表裸露。不能全部靠植树造林来防治沙尘暴,应增加热力洼地地区的植被覆盖度和湿度,以提高区域地面的保温能力。对于人口压力超出生态承载能力的地区要采取一定的生态移民措施,严格控制热力洼地上的人口规模和人类活动,凡是在热力洼地地区开垦的耕地应全部退耕还草,以减缓这些热力洼地对下沉气流的牵引作用。例如,黑河流域上游用水太多是导致居延海区域产生沙尘暴的重要因素,因此可把黑河流域的粮食生产基地适当迁移,并实行生态移民政策,尽量做到居民外迁,力争减少黑河流域上游的用水,以保证下游土壤的湿润,提高下游热力洼地地区的地表温度。

[本文研究得到广东省社会发展科技攻关项目(04201163、2003C32604和2004A30401001)及中国科学院广州地球化学研究所创新项目(GIGCX-04-01)资助]

- [1] 匡耀求,黄宁生,朱照宇,等.试论大地热流对地表环境与生态演变的影响.中国地质,2002,29(1):86-95.
- [2] 匡耀求.为何沙尘从非沙漠地区扬起.百科知识,2006(4):16-17.
- [3] 彭珂珊.中国西部沙尘暴的成因、危害及其防御对策.水利水电科技进展,2002,22(2):18-21.
- [4] 赵永新,刘毅.今年沙尘暴为何如此之凶.人民日报,2006-5-25(16).

**关键词:** 沙尘暴 热力洼地 地表热力景观 大地热流 古居延海