

钱正安,蔡 英,刘景涛等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展. 地球物理学报, 2006, 49(1) 83~92
Qian Z A , Cai Y , Liu J T , et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 2006, 49(1) 83~92

中蒙地区沙尘暴研究的若干进展

钱正安¹,蔡 英¹,刘景涛²,柳中明³,李栋梁¹,宋敏红¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,兰州 730000
2 内蒙古自治区气象局,呼和浩特 010015
3 台湾大学大气科学系,台北 106

摘 要 本文首先回顾了近 20 多年来我国沙尘暴研究的 3 个主要阶段,然后从沙尘观测、沙尘暴气候学、沙尘暴爆发和沙尘传输的环流型、沙尘暴活动的年代际变化和原因、以及待深入研究的问题等 5 方面简要评述了它的研究进展和问题. 指出中蒙沙尘主要来源于中国西北及蒙古国南部和西北部地区,随沙尘天气强度逐渐加强(即从背景大气到浮尘、扬沙、沙尘暴、强及特强沙尘暴),它们的地面沙尘浓度约按 3 倍的比率依次递增,揭示了我国北方及蒙古国南部的七大沙尘暴多发区,沙尘暴主要出现在春季午后至傍晚间,丰富的沙源,强风和不稳定的大气层结是形成沙尘暴的 3 个主要因子;中蒙地区沙尘暴爆发的环流主要有低压冷锋型和低压、冷锋加中尺度系统的强对流程型两类,前者占绝大多数,后者是极少数,但为沙尘暴爆发短期预报的难点,沙尘的传输主要决定于低空环流型;近 50 年来中蒙地区的沙尘暴活动呈波动变化,而且中蒙中、东及西区三区系的变化不完全相同. 它们与北方风沙区生态环境恶化,特别是蒙古及日本海附近气旋频数的年代际变化有关;防御沙尘暴重点要抓上述七大多发区生态环境的治理及沙尘暴预警系统的建立,治理措施要因地制宜,要加强沙尘暴爆发和沙尘输送的数值预报和模拟研究.

关键词 中蒙地区,沙尘浓度,沙尘暴多发区,沙尘暴爆发环流,沙尘暴的年代际变化

文章编号 0001-5733(2006)01-0083-10 **中图分类号** P445 **收稿日期** 2004-04-06,2005-06-25 收修定稿

Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas

QIAN Zheng-An¹, CAI Ying¹, LIU Jing-Tao², LIU Chung-Ming³, LI Dong-Liang¹, SONG Min-Hong¹
1 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2 Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Bureau, Hohhot 010015, China
3 Department of Atmospheric Sciences, Taiwan University, Taipei 106

Abstract To give a up-to-data review of the present status of dust storm(hereafter DS) research over China-Mongolia Areas(CMA), first, the three stages of China DS research in the last 20 years are reviewed. Then the main advances in dust aerosol observations, DS climatology, circulation patterns of DS outbreak and dust transport, DS activity changes in the past five decades and their causes, as well as some problems remain to be solved are presented. It is pointed out that the DS in CMA originates mainly from both the Northwest China and South- and Northwest-Mongolia. With the intensifying of the dust weathers, the dust thickness, total suspended particulates(TSP) of dust at the surface will increase in geometric series at the rate of 3 times. There exist seven high DS frequence regions in CMA, which are the Gansu Corridor, Tarim Basin, Mid-and West-Inner

Mongolia, Hunshandake sand region in China and Dalanzadgad and Zamin Uud in Mongolia. Most of DS events occur between 13:00 to 20:00 Beijing time in spring. There are briefly two kinds of DS outbreak circulation patterns in CMA, i.e., the low pressure plus cold front and the low, cold front plus meso-scale system. The former makes up the most of them; the latter a few percent only, but the latter is one of the most important disaster weathers to forecast. The dust transporting toward downwind mainly depends on the circulation on lower-levels. In the past five decades the DS activities in CMA change in a wavy way, first gradually increase from the 1950s to the 1970s, get its peak frequency in the 1970s; then gradually decrease from the 1980s to the 1990s; again then increase suddenly in 2000 and 2001 and still decrease suddenly from 2003 to 2005. The main factors which cause the DS interdecadal changes may be related closely to the interdecadal changes of East Asia atmospheric circulation, not the desertification condition. Finally three aspects which need to be further studied are suggested.

Keywords China-Mongolia Area, Dust concentration, DS high frequency region, DS outbreak circulation, Interdecadal change of DS

1 引 言

沙尘暴是强风卷起大量沙尘,使地面能见度小于 1km 的强沙尘天气。它主要出现在北非、西南亚、中亚、中蒙、澳大利亚及美国西南部等干旱荒漠化区。各地有不同的俗称。

虽然远自公元前 16 世纪以来,我国就不断见到史书、地方志及古诗中有“风霾大作”、“黄雾下尘”及“边风猎猎卷晴沙”等沙尘现象的描述记载和诗句^[1,2],但是,仅近 20 多年来的一次次强沙尘暴事件才真正推动了它的深入研究。如 1977 年 4 月 22 日(以下记为“1977.04.22”,下同)甘肃张掖特强沙尘暴后,大气科学家才较详细地研究它^[3]。“1993.05.05”甘肃金昌特强沙尘暴后,我国才出现了大气、沙漠等多学科联合研究它的局面。对它形成的气象及下垫面条件,沙尘气溶胶的理化特性,它的监测、预报和数值模拟,以及荒漠化环境的治理等进行全面研究。《中国沙尘暴研究》一书就是对这一时期,特别是对“1993.05.05”金昌特强沙尘暴研究的较好总结^[4,5]。2000 年以来,再度活跃的沙尘暴又把它推向国际合作研究的新阶段。如我国大陆及台湾地区已经完成或正在执行近 10 个相关的项目^[6,7];作为全球大气化学计划(IGAC)的一部分,中、日、韩、美等国科学家在太平洋地区进行了亚洲气溶胶特性实验(ACE-Asia)^[8];中日及中韩间正在执行“风送沙尘的形成、输送机制及其对气候与环境影响”等双边研究计划^[9]。近年来的研究包括大量的沙尘暴个例分析^[10,11],各地沙尘气溶胶的观测分析^[12~21],我国荒漠化和沙尘暴活动趋势的分

析^[6,22,23],更有大量的沙尘暴防御及我国西北生态环境治理的对策和建议见诸期刊和报端。为及时交流沙尘暴的研究成果,大陆地区已于 1993 年 9 月和 2001 年 2 月先后两次在兰州召开了沙尘暴学术会议;大陆和台湾也先后于 2002 年 6 月及 2004 年 6 月在呼和浩特和台北召开了海峡两岸沙尘暴学术研讨会。近几年中蒙沙尘暴问题成了全球瞩目的热点环境问题之一。

在作了如上简要回顾后,下面就中蒙地区沙尘观测、沙尘暴气候学、沙尘暴爆发和沙尘传输的环流型、沙尘暴活动的变化及原因等方面的主要研究进展,以及待深入研究的问题作简要评述。

2 沙尘气溶胶的观测研究

沙尘是大气气溶胶的重要成分,特别是世界多沙尘区。为了了解沙尘被吹起的气象及下垫面条件、沙尘浓度及物理化学特性,为沙尘暴爆发和沙尘输送的数值预报和模拟提供参数化方案和实测值,自 20 世纪 80 年代初周明煜^[24]、王明星^[25]等率先进行大气沙尘采样观测以来,已在各地进行了许多观测研究^[12~21,24,25],最近石广玉和赵思雄^[21]对此已有综述。

2.1 沙尘的化学成分

据蔡晨霞^[12]、陈佩娟^[18]、Choi^[19]、杨东贞^[20]、周明煜^[24]、王明星^[25]等分别在北京、常州、台湾等地区,不同沙尘天气时的观测,大气沙尘以 Si、Al、Ca、Fe 及 K 等地壳元素为主,很接近中蒙边界中、西段附近地区黄绵土的成分;再结合气团质点轨迹及卫星图片上沙尘区的移动方向,说明这些风送沙尘主要来源于我国西北及蒙古国南部和西北部。

2.2 沙尘的粒径谱

观测表明 ,与各地背景大气相比 ,沙尘天气时 , $1 \sim 10\mu\text{m}$ 间粒径的沙尘浓度都有成倍的增长 .其中 ,源地处的优势粒径依次为 $4.7 \sim 7.0\mu\text{m}$, $3.3 \sim 4.7\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$ 及 $1 \sim 2\mu\text{m}$;因途中粗颗粒沙尘的重力沉降明显 ,传输到韩国和日本则多剩下 $3.3 \sim 4.7\mu\text{m}$ 或更细的粉尘了 .这种沙尘粒径的地区差异是分谱段建立并简化沙尘浓度预报方程时应注意的 .

2.3 沙尘浓度和光学厚度

沙尘浓度等直接影响地球大气的辐射平衡 ,进而影响气候 .气象学上主要按地面能见度及风速等 ,将沙尘天气由轻到重依次区分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强及特强沙尘暴 5 级^[26] .

值得注意的是 ,牛生杰等^[15]近 4 年春季在腾格里等沙漠边缘区的吉兰泰等 4 站的多次观测表明 ,该地区背景大气、浮尘、扬沙及沙尘暴天气时 ,地面平均的沙尘总悬浮颗粒物(TSP)浓度分别为 0.083 、 0.356 、 1.206 mg/m^3 和 3.955 mg/m^3 (表 1) ,即随沙尘天气强度加强 ,其沙尘浓度依次按约 3 倍的比率递增 .根据其他作者在不同地点对不同强度沙尘天气的观测 ,如“ 1993.05.05 ”特强沙尘暴盛期 ,金昌的沙尘浓度高达 1016 mg/m^3 ;待它东移至石嘴山(已减弱

为强沙尘暴)的浓度为 18.43 mg/m^3 ;再待它东传到北京(已为浮尘)的沙尘浓度仅为 1.051 mg/m^3 ^[20] ;又如北京“ 1980.04.18 ”沙尘暴及“ 2002.03.20 ”强沙尘暴时的 TSP 分别为 6.13 mg/m^3 ^[24]和 12.06 mg/m^3 ^[27] .有趣的是 ,即使将上述 3 倍递增的规律扩展到强和特强沙尘暴时依然有效(见表 1 括弧中的值) .由于沙尘传输过程中的扩散稀释、重力沉降及降水清洗等对沙尘浓度的强烈减弱作用 ,一般说来 ,沙尘暴东移到我国东部 ,多已减弱为浮尘 ,其地面的沙尘浓度 $\leq 1 \text{ mg/m}^3$,再传输到韩国、日本及中国台湾地区的沙尘浓度常 $\leq 0.3 \text{ mg/m}^3$,已为很弱的浮尘了(故日本和韩国称“ 黄沙 ”) .即不同强度沙尘天气的沙尘浓度是不同的 .

光学厚度是表征大气气溶胶浓度和混浊度的重要变量 .它常以有代表性的波长 575 (或 570)nm 的光学厚度 τ_{575} (τ_{570})来度量 ,牛生杰等^[15]得到对应于背景大气、浮尘、扬沙及沙尘暴等不同沙尘天气时的平均光学厚度的观测值为 0.417 、 0.604 、 0.830 及 1.274 (表 1) ,依次按约 1.5 倍的比率递增 ,即扬沙天气的光学厚度大体与 1997 年秋印尼干旱野火烟尘时的光学厚度值(0.7)相当^[8] .申彦波等^[16]显示了沙尘暴时偏大的 τ_{570} 值 .

表 1 不同沙尘天气时地面沙尘浓度和沙尘气溶胶光学厚度

Table 1 Surface dust concentration and dust aerosol optical depth under different dust weathers							
		多尘区背景大气	浮尘	扬沙	沙尘暴	强沙尘暴	特强沙尘暴
TSP	实测值	0.083	0.35(1.051)	1.206	3.9(6.13)	(12.06 ,18.43)	(1016)
(mg/m^3)	综合值	~ 0.1	0.3 ~ 1	1 ~ 3	3 ~ 10	10 ~ 30	> 30
τ_{575}	实测值	0.417	0.604	0.830	1.274		

这些平均差别说明 ,主要以地面能见度来区分不同沙尘天气 ,方法简便、客观 ,能反映它们含尘量不同的物理本质 .

为了给沙尘的数值模拟提供 TSP 及 τ_{575} 等的初、边值场及检验值 ,按前述沙尘浓度依次以 3 倍比率递增的关系 ,我们综合了各地的观测值 ,初步得到不同强度沙尘天气时地面沙尘浓度的综合值(表 1 加粗字体) .这样从稠密的地面站不同沙尘天气的报告 ,可粗略地推测出各站的地面沙尘浓度 .遗憾的是 ,目前还缺少我国不同沙尘天气时气柱各高度含尘量的观测值 ;也无法给出强和特强沙尘暴时 τ_{575} 的综合值 ,也未见蒙古国这类观测的报道 .

3 沙尘暴气候学

沙尘暴多发区和季节变化等应该根据历年出现

沙尘暴的实际频数客观地确定 .钱正安^[23,26]、周自江^[28]及刘景涛^[29]等先后对此作了许多工作 .

3.1 沙尘暴多发区

人们自然更关注强和特强沙尘暴 .最近我们在以前工作的基础上^[23,26,28] ,增补了刘景涛等^[29]的新资料后 ,又得到第三份更完整的我国北方强和特强沙尘暴的个列表 ,共 292 例(表略) .该资料序列长 ,更能反映我国北方地区强和特强沙尘暴分布和变化的全貌 .

图 1 是 1952 ~ 2001 年间我国北方强和特强沙尘暴的频数分布 .如图所示 ,虽然我国西北和华北许多地区 ,以及东北个别地区都可能出现强或特强沙尘暴 ,但总频数在 20 次以上的多发区仅有 5 大片 :以民勤为中心(53 次)的河西走廊区 ;以和田为中心(42 次)的南疆盆地区 ;以拐子湖为中心(25 次)的内蒙古阿拉善高原区 ;以伊克乌素镇为中心(27

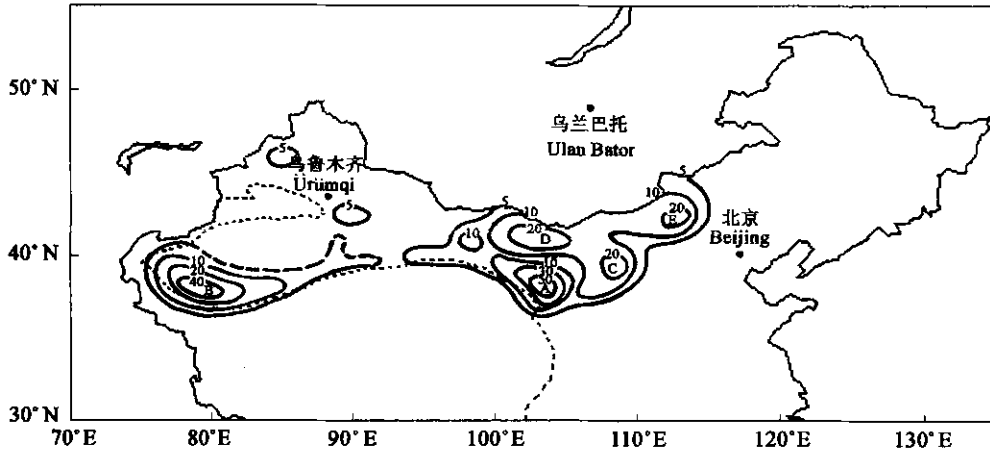


图 1 1952 ~ 2001 年间中国北方强和特强沙尘暴总频数(次)分布

A、B、C、D 及 E 站分别是民勤、和田、伊克乌素、拐子湖及朱日和等 5 大沙尘暴多发区中心。

Fig.1 Strong and very strong duststorm total frequencies (time) over North China (1952 ~ 2001)

A , B , C , D and E are Minqin , Hotan , Yikewusu , Guaizihu and Zhurihe stations , respectively .

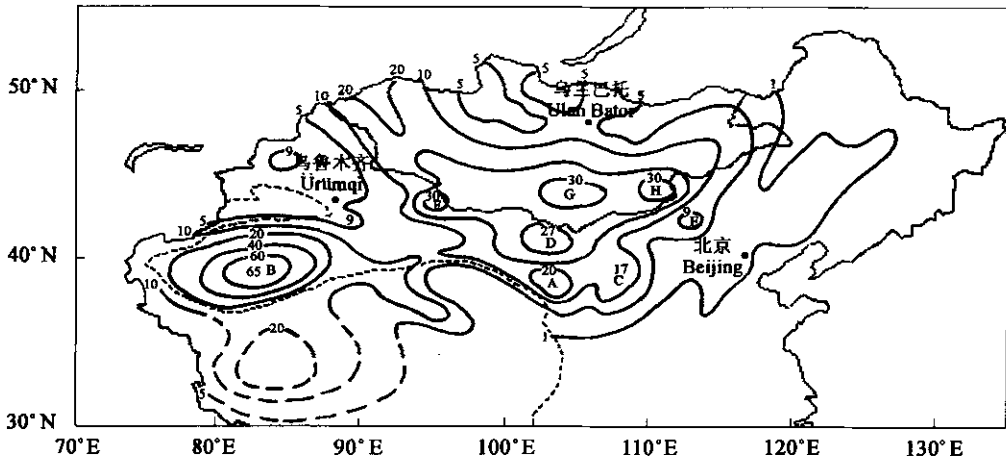


图 2 1964 ~ 2000 年间中蒙地区年平均沙尘暴日数分布

中国境内的日数根据李栋梁等^[30],蒙古国的日数引自 Mandakh and Khaulenbek^[31].

A ~ H 分别为中国的民勤、塔中 1 井、伊克乌素、拐子湖、朱日和、淖毛湖和蒙古国的达兰扎达嘎德及扎门乌德等沙尘暴多发区中心。

Fig.2 Yearly mean day numbers of duststorms over China-Mongolia areas (1964 ~ 2000)

The data are after Li D L et al.^[30] in the China part , after Mandakh and Khaulenbek^[31]

in the Mongolia part. A ~ H are the stations at Minqin , Oil well No.1 in the center of the Tarim basin , Yikewusu , Guaizihu , Zhurihe , Naomaohu in China and Dalanzadgad and Zamin Uud in Mongolia , respectively .

次)的鄂尔多斯高原区;以及以朱日和为中心(22次)的浑善达克沙地区。与我们前两次的分布图相比^[23-26],这里要强调内蒙古中西部多发区的重要性,那里的强及特强沙尘暴几乎占我国北方总频数的2/3。当然,其中不少是从蒙古国南部移来的。我们虽缺蒙古国的强沙尘暴资料,但是下面将说明,那里也多沙尘暴。

多年平均的年沙尘暴(也包括弱沙尘暴在内)日数图(图2)。其中,民勤、和田、拐子湖、伊克乌素及朱日和的多年平均沙尘暴日数分别为25、24、27、17天及9天。除南疆盆地外,图1和图2中的高频数中心的分布大体是一致的。根据Mandakh and Khaulenbek^[31]的资料,蒙古国南部东戈壁省的扎门乌德及南戈壁省的达兰扎达嘎德的年平均沙尘暴日数达30天,也是两多发区,且与内蒙古中西部的多

李栋梁等^[30]曾得到1964~2000年间我国北方

发区是连片分布的,还需要指出,过去仅知道南疆盆地南缘多沙尘暴,随着塔中 1 井($83^{\circ}40'E, 38^{\circ}40'N$),满参($84^{\circ}21'E, 40^{\circ}06'N$)等南疆盆地腹地 6 个油田气象站的建立,得知塔中 1 井是该盆地也是我国沙尘暴最多的地区,因那里多细沙、流沙,春季和初夏又多热低压发展,近 10 年平均的年沙尘暴日数可达 65 天^[32],仅比世界最高频数的伊朗扎布尔南站(Zabol, 81 天),次高频数的乌兹别克斯坦来别梯克站(Repetek, 66 天)稍低^[33],所幸南疆盆地因其地形封闭,盆地东缘开口处又常吹东风,沙尘暴常滞留于盆地中,对下游地区的影响小些^[34]。另外,青藏高原上也会出现沙尘暴,那是春季高空副热带西风急流北进过程中的产物,属高空急流型沙尘暴,多出现于 2~3 月份,因高空强风的扩散作用,对下游地区的影响也小些,它有别于前述地面强风型沙尘暴,不在本文关注之列。

3.2 沙尘暴的年、季及日变化

统计表明,我国北方每年平均出现 6 次左右的强或特强沙尘暴,最多年达 13、14 次,如 1959、1966 年和 1976 年,内蒙古中、西部及河西走廊地区的沙尘暴主要出现在春季(3~5 月,占 63%),特别是 4 月(占 30%),而 7~10 月最少发生,其他地区略有不同,青藏高原上要早些(2~3 月);南疆盆地主要在 4~7 月,各地近 80% 的强和特强沙尘暴出现在午后至傍晚间^[26,29],日变化明显,这与世界各地的情况相同^[33]。

3.3 沙尘暴形成的三要素

沙源、强风及热力不稳定的空气层结是产生沙尘暴的 3 个主要条件^[26],可以注意到上述 7 个沙尘暴多发区分别处于我国西北的巴丹吉林、腾格里、塔克拉玛干、乌兰布和沙漠及蒙古国南部戈壁等荒漠化地区,春季地表裸露,表层疏松,沙源丰富;它们正好位于入侵我国的西北、北、西及东北路冷空气通道上(图略),有的更兼有局地地形的加强作用,也多强风,再加上春季午后地面受热增温快,空气层结常很不稳定。这样,同时具备上述三条件的我国西北及蒙古国南部等 7 个地区自然成了沙尘暴的多发区,而冷空气活跃又多风的春季和气柱最不稳定的春季午后也分别成了沙尘暴的多发季节和时段。所以,沙尘暴是特定的荒漠化环境和气象条件相结合的产物,上述中蒙 7 个多发区应是生态环境治理和沙尘暴监测的重点地区,春季(特别是午后)应是沙尘暴监测的重点季节。

4 沙尘暴爆发和沙尘输送的环流型

注意识别沙尘暴爆发和沙尘输送的环流型,是因为它们仍是各地进行沙尘暴预报的基础。

4.1 沙尘暴爆发的环流型

沙尘暴常是大范围强冷空气入侵的结果,常在特定的环流型下爆发,以中蒙中区(包括北疆、河西、内蒙古中、西部及蒙古国西部和南部)为例,根据许宝玉和钱正安等^[35]对历史上该区 5 次特强沙尘暴爆发环流的合成分析,也根据其他强沙尘暴事件的分析^[10,11],该区沙尘暴爆发常由西北路及北路冷空气入侵引起,在沙尘暴爆发日上午 08:00(北京时间,下同),对流层中、低层乌拉尔山东侧有强高压脊,该脊前的强槽在新疆北部;在同时次的地面图上,蒙古国有低压发展,中哈边境有高于 1025hPa 的强冷高压,其前缘冷锋已到达哈密—若羌一线(图 3a)^[35]。结果,蒙古低压西部和南部的冷空气随冷锋东南移,直接造成当日午后河西及内蒙古中、西部的沙尘暴,即地面蒙古低压加冷锋是该区沙尘暴的诱生系统,而中蒙东区(包括蒙古国东部及华北北部)的沙尘暴由日本海及我国东北低压加冷锋造成,常由北路及东北路冷空气入侵所致,2000 年及 2001 年春季的强沙尘活动就属这种情况,而中蒙西区(包括南疆及柴达木盆地等)的沙尘暴常由南疆低压加冷锋造成,系西路冷空气入侵造成,以上是中蒙三区系最常见的低压加冷锋型沙尘暴。

钱正安^[35~37]、江吉喜^[38]及胡隐樵^[39]等根据卫星云图、地面单站要素,并对比国外强沙尘暴事件后揭示,“1993.05.05”金昌特强沙尘暴属另一类低压加冷锋和干飚线的强对流型沙尘暴,我们总结了它形成的概念模型(图 3)。在前述典型低槽 DT 加冷锋 FF 的天气尺度形势背景下,锋前暖气团中有中尺度干飚线 SS 的强烈发展(图 3a),在卫星云图上,它发生在冷锋云系 F_1F_1 和由青藏高原向东北伸的中尺度云系 F_2F_2 间的结合部 SS 一线(图 3b),干飚线是由多个干雷暴单体组成的雷暴群集合体,一个个干雷暴单体云中后部的强冷下曳气流抵达地面时,快速向外流散,分别形成一段段弧状的阵风锋 SS,此即地面见到的弧状推进的沙尘墙(图 3c 和 3d)。所以,是干飚线首先触发强风和沙尘暴,待其后大尺度冷锋 FF 加速赶上干飚线 SS,大风及沙尘暴又再度加强,故该沙尘暴更强,持续时间更长^[37]。Takemi and Satomura^[40]的数值模拟较好地再现了这

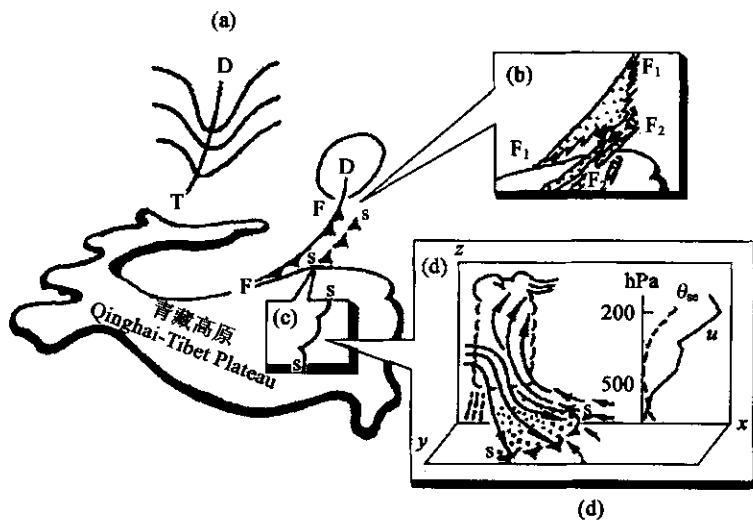


图3 “1993.05.05”金昌低压加冷锋和干飑线的强对流型沙尘暴概念模型

(a)低槽 DT+冷锋 FF 的天气尺度背景 (b)中尺度干飑线 SS 的卫星云图特征 (c)由多段弧状沙尘墙组成的干飑线雷暴群 (d)一段弧状沙尘墙对应一雷暴单体,其中的 u 、 θ_{se} 垂直廓线引自胡隐樵等。

Fig.3 Schematic diagram showing the severe convection duststorm type with dry squall lines and a cold front in Jinchang, Gansu on 5 May, 1993

(a) Background on a synoptic scale of the storm: 700hPa North Xinjiang trough DT, surface cold front FF in the Gansu Corridor and the squall line in the front of it; (b) The sketch of satellite image of the storm, F_1F_1 , SS and F_2F_2 are the cold front cloud belts, squall line and the cloud cluster on meso-scale, respectively; (c, d) The squall line in the shape of arc is a combination body of several thunderstorm cells, each arc section corresponds to a thunderstorm cell. The vertical profiles of θ_{se} and u show the dynamic and thermal unstable air column at the Minqin station in that morning.

些特征。最近钱莉等^[41]认为“2000.04.12”河西沙尘暴也属这一类,只是其锋前的中尺度系统是中低压。这类强对流型沙尘暴所占比例虽小(仅占5%左右),却是强度强、危害重、最难预报的,应是今后强沙尘暴爆发预报研究的重点。

4.2 沙尘输送的环流型

除中蒙西区的沙尘暴常易在南疆盆地滞留外,中蒙中区及东区沙尘暴的沙尘1、2天后常东传到我国东部沿海、韩国及日本地区,这主要决定于低空环流型。若盛行蒙古或日本海气旋,则沙尘易向华北、韩国及日本输送;若东亚低槽发展,则沙尘易向东南沿海及台湾输送^[12]。Chen et al.^[34]进一步指出,中蒙地区沙尘常随850hPa的平均风向移动,平均输送速度为6~12m/s。1963年春季上海地区浮尘异常偏多^[42],2000年和2001年春季东北亚沙尘次数显著增加,就与这些年春季盛行蒙古气旋或日本海气旋有关^[43,44]。

5 沙尘暴的年代际变化及原因

人们关心中蒙地区沙尘暴活动的变化。张德二^[11]早就指出我国东部历史时期曾交替出现过多次强、弱降尘期的变化事实,更多人讨论了近50年的

变化^[6,22,23,26,28,43,45]。由于用了不同地区及时间的资料,其统计结果不完全一致。有的更因误用了相关资料,造成了国外的一些负面报导。

5.1 沙尘暴活动的年代际变化

根据我们的最新个例表统计(表略),我国北方20世纪50~90年代逐年代强和特强沙尘暴的频数依次是48,68,89,47次和36次。因包括了内蒙古中西部这一主要的沙尘暴多发区^[29],又增补了民勤及和田两站的资料^[28],所以各年代的频数均比早期的统计明显增加了^[26]。由图4黑直方柱图可见,中国北方50~70年代的频数波动增加,70年代达最高,但80~90年代则明显减少,1998年(特别是2000年)后突然增加,2003~2005年又急剧减少。图4的空白直方柱系我国民勤等5个多发区中心站平均的年沙尘暴总日数,两组直方柱反映的沙尘暴频数波动变化的特征一致。图4反映了整个中国北方(但主要反映了中蒙中区)沙尘暴的变化。

Liu et al.^[46]最近指出,中蒙地区三分区沙尘暴活动的年代际变化还不完全一样。我们根据产生沙尘暴的直接诱生系统、沙尘源地、入侵路径及主要影响区的不同,将中蒙沙尘暴分为中蒙中、东及西区三个区系。过去50年中主要盛行中蒙中区沙尘暴活

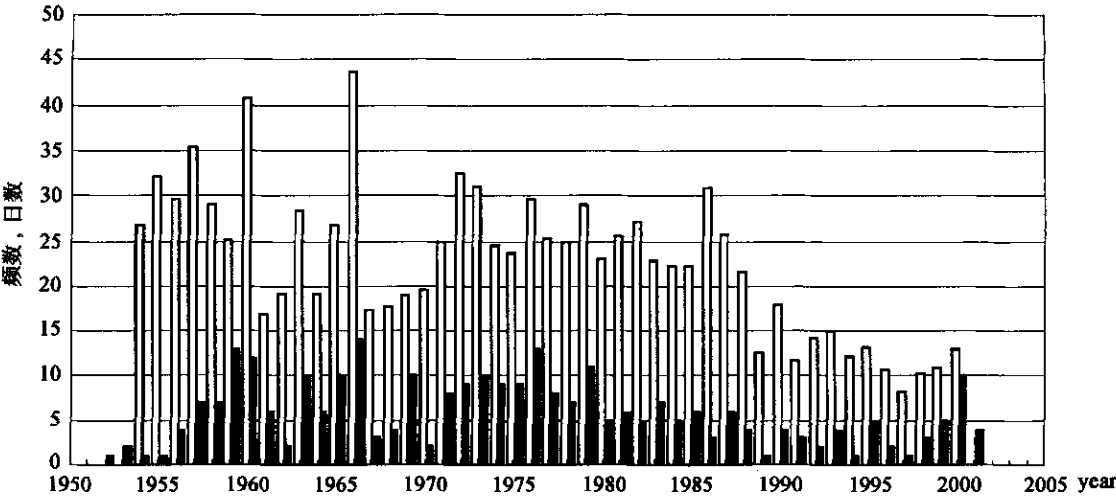


图 4 我国北方强和特强沙尘暴频数(次,黑直方柱)及 5 个多发区中心站平均的年沙尘暴日数(天,白直方柱)逐年变化

Fig. 4 Year to year frequency variations (time) of strong and very strong duststorms (black histogram) and averaged duststorms over 5 stations (open one) over North China

动,有时是其中二区系的结合,例 1963 年春季同时盛行中、西二区沙尘暴。要特别指出 2000 年和 2001 年转而盛行中蒙东区沙尘暴^[43],但同期内,中、西两区的沙尘暴仍在减弱中。换言之,对沙尘暴的预报及其年代际变化,都应该分区系讨论它们。

5.2 沙尘暴年代际变化的原因及变化趋势

人们常从荒漠化环境和大气环流变化两方面解释沙尘暴活动的年代际变化。

从荒漠化环境来说,近 50 年来我国北方荒漠化区的生态环境治理虽在局部地区卓有成效,但从整体看,迫于人口增长及增产粮食等的压力,上述沙尘暴多发区还普遍存在过垦、过牧、过采地下水、乃至过樵、滥挖药材等现象,王涛^[6]的统计表明,荒漠化面积还在扩大(表略)。这一背景和中蒙地区 50~70 年代沙尘暴活动波动上升的事实吻合,但它难以解释 80~90 年代沙尘暴活动明显减弱,特别是 2000~2002 年中蒙东区沙尘暴急剧增强,2003~2005 年东区沙尘又急剧减弱的事实。因生态环境的变化是一慢变过程,它的滞后效应明显。这启示荒漠化环境虽是形成沙尘暴不可缺少的因子,却还不是影响它变化的主要因子。

相反,环流的变化是一快变过程。因而许多人从东亚大气环流的年代际变化来分析^[23 44 45]。值得注意的是近期的一些低层环流的分析。Qian et al.^[47]首先建立了我国北方沙尘暴频数与蒙古气旋等及冬季地面气温间的联系。Yoshino et al.^[43]指出东北亚地区近年沙尘活动增强与春季日本海气旋增

多有关,东北亚的沙尘暴频数变化不同于中国西北地区。张德二和陆风^[48]从 10 个冷冬年和暖冬年间沙尘暴频数的差异,指出与历史时期一样,多强冷空气活动的冷冬年沙尘暴更多的事实。Liu et al.^[46]更具体分析了自 50 年代以来各年代及近年春季 850hPa 高度距平场的变化和沙尘暴活动的关系,指出 50~70 年代期间,随着亚洲地区负高度距平区范围逐渐缩小,收缩到蒙古中部,但强度增强(即蒙古气旋盛行并增强),中蒙中区因多西北路或北路冷空气入侵,其沙尘暴活动也不断增强,于 70 年代达到它的最强期。80~90 年代期间,由于全球增暖,中蒙边界地区增暖更显著,那里的等压面明显升高,于是蒙古气旋迅速减弱,转而盛行蒙古脊,结果,中蒙中区少西北路或北路冷空气活动,其沙尘暴明显减弱;2000~2002 年春季中蒙脊依然存在,中区及西区的沙尘活动仍在减弱中。但因突然盛行日本海及东北低压,转而多北路及东北路冷空气入侵,故多中蒙东区沙尘暴;当 2002 年(特别是 2003~2005 年)春季日本海气旋急剧减弱(并转为脊区)时,中蒙三区系的沙尘暴活动又都平静了。这些较好的对应关系清楚地启示,蒙古国或东北亚地区的环流变化能较好地解释近 50 年中各阶段中蒙三区系沙尘暴的波动变化,因而大气环流的变化才是影响沙尘暴活动的主要因子。我国学者在这方面的研究颇有特色。

这样,从环流观点而言,由于全球增暖仍将持续,中蒙边境地区仍将是亚洲陆上冬、春季的主要增暖中心处,因而未来蒙新脊仍将维持,中蒙中区及西

区的沙尘暴可能仍持续偏弱 ;但在蒙新脊维持的背景下 ,从近 6 年日本海低压时而加强时而减弱的情况看 ,要密切注意东区未来沙尘暴活动的变化 .

6 待深入研究的问题

如前述 ,近 20 多年来国内外学者对中蒙沙尘暴的研究已涉及它的各个方面 .国内注重沙尘暴源地处的沙尘观测 ,沙尘暴的监测和预报 ,以及防御对策的讨论 ;国外注重沙尘的长距离输送、下游区沙尘的观测及对大气和海洋环境影响等的数值模拟研究 .国内外的研究各有侧重 ,相互补充 ,也都取得了明显进展 .

当然 ,下列几方面还待深入研究 (1)应加强沙尘暴爆发、沙尘输送及其气候效应的数值模拟研究 .这方面已有不少工作^[27 A3 A4 A6 ~ 53] ,但以引用北非及澳大利亚的起沙及沙尘传输模型为主 .为此 ,模式工作者应和沙尘观测者密切配合 ,共同发展有中纬度干旱区地域特色的起沙及输送方案 ,为取得一批不同沙尘天气时沙尘浓度等的三维分布的实测数据而努力 . (2)要建立有效的沙尘暴预警系统 ,加强强对流性沙尘暴的预报研究和强、弱沙尘暴年际变化的短期气候预测方法的研究 .要分区系(不是整体地)考虑中蒙地区的沙尘暴预测及变化 . (3)要继续注重生态环境的综合治理 ,特别是前述 7 个沙尘暴多发区的重点治理 ,治理措施要因地制宜 ,这是最终减少沙尘暴危害的根本措施 .

限于篇幅和我们的知识 ,本文侧重于沙尘暴的大气过程方面的评述 .

致 谢 感谢两位匿名审稿人宝贵的修改意见 .

审图号 GS(2005)1034 .

参考文献(References)

[1] 张德二 . 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析 . 中国科学(B 辑) , 1984 , 2 : 278 ~ 288
Zhang D E . Preliminary analyses of synoptic climatology of dust descent in China in historic period . *Science in China* (Series B) (in Chinese) , 1984 , 2 : 278 ~ 288

[2] 黄兆华 . 我国西北地区历史时期的风沙尘暴 . 方宗义等编 . 中国沙尘暴研究 . 北京 : 气象出版社 , 1997 . 31 ~ 36
Huang Z H . Strong wind and duststorm in Northwest China in historic period . In : Fang Z Y , et al . ed . *China Duststorm Research* (in Chinese) . Beijing : Meteorological Press , 1997 . 31 ~ 36

[3] 徐国昌 , 陈敏连 , 吴国雄 . 甘肃省特大沙尘暴分析 . 气象学报 , 1979 , 37 (4) : 26 ~ 35
Xu G C , Chen M L , Wu G X . Analyses of very strong duststorm in

Gansu Province . *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese) , 1979 , 37 (4) : 26 ~ 35

[4] 方宗义 , 朱福康 , 江吉喜等 . 中国沙尘暴研究 . 北京 : 气象出版社 , 1997
Fang Z Y , Zhu F K , Jiang J X , et al . *China Duststorm Research* . Beijing : Meteorological Press , 1997

[5] 杨之远 , 李佩翰 , 柳中明 . 长程输送黄沙与本地污染空气品质监测比较——1995 年 3 月 12 日 - 16 日资料分析 . (台湾) 中华民国环境保护学会会志 , 1997 , 20 : 1 ~ 38
Yang Z Y , Li K H , Liu Z M . Comparisons of long-distance transport yellow sand with local air pollution quality monitor-data analyses on 12-16 March , 1995 . *J. Enviro. Prote. Soc.* (Taiwan) , 1997 , 20 : 1 ~ 38

[6] 王 涛 . 走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践 . 中国沙漠 , 2001 , 21 (1) : 1 ~ 3
Wang T . Research and practice of China desertification countering going towards the world . *Journal of Desert Research* (in Chinese) , 2001 , 21 (1) : 1 ~ 3

[7] 柳中明 . 影响台湾空气品质的大陆沙尘天气 . 沙尘暴学术研讨会 . 2002 年 6 月 28 ~ 30 日 . 台北 . 41 ~ 62
Liu Z M . Mainland dust weather affecting Taiwan air quality . Workshop on Duststorm , held in Taipei on 28 ~ 30 June , 2002 . 41 ~ 62

[8] Gallon Z . Preliminary results from ACE-Asia , UCAR Quarterly , winter 2001 . 5

[9] 石广玉 . 中日沙尘合作研究专案(ADEC)情况简介 . 沙尘暴学术研讨会 . 2002 年 6 月 28 ~ 30 日 . 台北 . 39 ~ 40
Shi G Y . Simply introduction to the China-Japan joint dust research scheme . Workshop on Duststorm , held in Taipei on 28 ~ 30 June , 2002 . 39 ~ 40

[10] 郑新江 , 徐建芬 , 罗敬宁等 . 1998 年 4 月 14 ~ 15 日强沙尘暴过程分析 . 高原气象 , 2001 , 20 (2) : 180 ~ 185
Zheng X J , Xu J F , Luo J N , et al . Analyses on severe dust storm process on April 14 ~ 15 , 1998 . *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 2001 , 20 (2) : 180 ~ 185

[11] 徐建芬 , 陶建红 , 杨 民 . 2000 年 4 月 12 日特强沙尘暴天气分析 . 陈晓光等编 . 西北重要天气成因及数值预报方法研究 . 北京 : 气象出版社 , 2002 . 163 ~ 167
Xu J F , Tao J H , Yang M . Synoptic analyses of very strong duststorm on 12 April in 2000 . In : Chen X G , et al . ed . *Research on Important Weather Causes and Numerical Prediction Methods* (in Chinese) . Beijing : Meteorological Press , 2002 . 163 ~ 167

[12] 蔡晨霞 , 蒋维楫 , 黄世鸿等 . 我国东南沿海两次沙尘的化学特征及其源地探讨 . 高原气象 , 2000 , 19 (2) : 179 ~ 186
Cai C X , Jiang W M , Huang S H , et al . Chemical characteristic of two duststorms off coast of the Southeast China and its possible origin . *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 2000 , 19 (2) : 179 ~ 186

[13] 牛生杰 , 孙继明 , 陈 跃等 . 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析 . 高原气象 , 2001 , 20 (1) : 82 ~ 87
Niu S J , Sun J M , Chen Y , et al . Observation and analysis of mass concentration of dust and sand aerosol in Helanshan area spring . *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 2001 , 20 (1) : 82 ~ 87

[14] 刘明哲,魏文寿,周宏飞等. 亚洲沙尘源区大气气溶胶粒子理化特征及对比. 中国沙漠, 2003, **23**(4): 408 ~ 414
Liu M Z, Wei W S, Zhou H F, et al. Physiochemical properties of atmospheric aerosol particles over sand-dust source areas in Asia. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2003, **23**(4): 408 ~ 414

[15] 牛生杰,孙继明. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究. 高原气象, 2001, **20**(3): 298 ~ 301
Niu S J, Sun J M. Researches on optical properties of atmospheric aerosol in Helan Mountain area. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2001, **20**(3): 298 ~ 301

[16] 申彦波,沈志宝,汪万福. 2001 年春季中国北方大气气溶胶光学厚度与沙尘天气. 高原气象, 2003, **22**(2): 185 ~ 190
Shen Y B, Shen Z B, Wang W F. Atmospheric aerosol optical thickness and dusty weather in Northern China in spring of 2001. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22**(2): 185 ~ 190

[17] Zhang X Y. An overview of research on dust storm in China. International Workshop on Dust Storm, Beijing, China, Oct. 31 – Nov. 2, 2002

[18] 陈佩娟,杨锡贤,纪子文. 沙尘暴微粒与硝酸盐关系研究. 沙尘暴学术研讨会. 2002 年 6 月 28 ~ 30 日. 台北. 97 ~ 110
Chen P J, Yang X X, Ji Z W. Relationship between duststorm particles and nitrate. Workshop on Duststorm, held in Taipei on 28 ~ 30 June, 2002. 97 ~ 110

[19] Choi J C, La M, Chun Y, et al. Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul, Korea. *J. Geo. Res.*, 2001, **106**(D16): 18067 ~ 18074

[20] 杨东贞,王超,颜鹏等. 春季沙尘暴的发生源地及输送沉降的探讨. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社, 1997. 111 ~ 117
Yang D Z, Wang C, Yan P, et al. Approach to genesis source of spring duststorm and transport descent. In: Fang Z Y, et al, ed. China Duststorm Research (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1997. 111 ~ 117

[21] 石广玉,赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. 大气科学, 2003, **27**(4): 591 ~ 603
Shi G Y, Zhao S X. Several scientific issues of studies on the dust storms. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**(4): 591 ~ 603

[22] 叶笃正,丑纪范,刘纪远等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报, 2001, **55**(5): 513 ~ 522
Ye D Z, Chou J F, Liu J Y, et al. Causes of sand-stormy weather in Northern China and control measures. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, **55**(5): 513 ~ 522

[23] 钱正安,宋敏红,李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布和变化趋势分析. 中国沙漠, 2002, **21**(2): 106 ~ 111
Qian Z A, Song M H, Li W Y. Analyses on distribution and variation trend of sand-dust storms in North China in recent 50 years. *Journal of Desert Research* (in Chinese), 2002, **21**(2): 106 ~ 111

[24] 周明煜,曲绍厚,宋锡铭等. 北京地区尘暴过程的气溶胶特征. 科学通报, 1981, **10**: 609 ~ 611
Zhou M Y, Qu S H, Song X M, et al. Aerosols characteristic of duststorm in Beijing areas. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1981, **10**: 609 ~ 611

[25] 王明星, J W 温彻斯特, T A 开希尔等. 北京一次尘暴的化学成分及其谱分布. 科学通报, 1982, **7**: 419 ~ 422
Wang M X, Winchester J W, Kasher T A, et al. Chemical composition and particle size spectrum distribution of a duststorm process in Beijing. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1982, **7**: 419 ~ 422

[26] 钱正安,贺慧霞,瞿章等. 我国西北地区沙尘暴的分级标准、个例谱及其统计特征. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社, 1997. 1 ~ 10
Qian Z A, He H X, Qu Z, et al. Classification criterion of duststorm in Northwest China, case list and their statistical features. In: Fang Z Y, et al, ed. China Duststorm Research. Beijing: Meteorological Press, 1997. 1 ~ 10

[27] 张仁健,韩志伟,王明星等. 中国沙尘暴天气的新特征及成因分析. 第四纪研究, 2002, **22**(4): 374 ~ 380
Zhang R J, Han Z W, Wang M X, et al. Dust storm weather in China: New characteristics and origins. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2002, **22**(4): 374 ~ 380

[28] 周自江,王锡稳,牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴和扬沙天气. 第二次全国沙尘暴学术会议. 兰州, 2001 年 2 月 23 ~ 25 日
Zhou Z J, Wang X W, Niu R Y. Duststorm and blowing sand weather in China in recent 47 years. the 2nd Workshop on Duststorm, held in Lanzhou on 23 ~ 25 February, 2001

[29] 刘景涛,郑明倩. 内蒙古中西部强和特强沙尘暴的气候学特征. 高原气象, 2003, **22**(1): 51 ~ 64
Liu J T, Zheng M Q. Climatic characteristics of strong and very strong sandstorms in the mid-and west-parts of Inner Mongolia. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22**(1): 51 ~ 64

[30] 李栋梁,钟海玲,魏丽等. 中国沙尘暴的气候特征及其异常分析. 高原气象, 2003, **22**(4): 337 ~ 345
Li D L, Zhong H L, Wei L, et al. Climatic characteristics of annual sand-dust storm days in Northern China and its response to surface sensible heat in spring of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22**(4): 337 ~ 345

[31] Mandakh N, Khaulenbek A. Research activities of dust storm in Mongolia: Transportation process of dust storm and its temporal-spatial distribution in Gobi. International Workshop on Dust Storm (IWDUST, 2002). Beijing on Oct. 31 to Nov. 2, 2002

[32] 何清,沙拉买提. 塔里木盆地沙暴的分布特征及危险性评价. 新疆气象, 1996, **2**: 23 ~ 27
He Q, Shara M T. Distribution feature and assessment of duststorm over Tarim Basin. *Xinjiang Meteorology* (in Chinese), 1996, **2**: 23 ~ 27

[33] Thomas D S G. Arid Zone Geomorphology – Process, Form and Change in Dryland (2nd Ed). Chichester, New York etc.: John Wiley & Sons House, 1997. 413 ~ 436

[34] Chen G T-J, H-J Chen. Study on large-scale features of dust storm systems in East Asia. *Papers Meteor. Res.*, 1987, **10**: 57 ~ 80

[35] 许宝玉,钱正安,焦彦军. 西北地区五次特强沙尘暴前期形势和要素场的综合分析 with 预报. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京:气象出版社, 1997. 44 ~ 51

Xu B Y , Qian Z A , Jiao Y J. Composite analyses and prediction of antecedent circulation and element fields for five extremely duststorms over Northwest China. In : Fang Z Y , et al , ed. China Duststorm Research(in Chinese). Beijing : Meteorological Press , 1997. 44 ~ 51

[36] 钱正安,胡隐樵,龚乃虎等. “ 93.5.5 ”特强沙尘暴的调查报告及其分析. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京 :气象出版社 , 1997. 37 ~ 43

Qian Z A , Hu Y Q , Gong N H , et al. Survey report and analyses on “93.5.5 ” extremely duststorm. In : Fang Z Y , et al , ed. China Duststorm Research(in Chinese). Beijing : Meteorological Press , 1997. 37 ~ 43

[37] 钱正安,焦彦军. 中、美和苏丹强沙尘暴的对比分析. 甘肃气象 , 1996 , **15** (1) : 1 ~ 5

Qian Z A , Jiao Y J. Contrast analyses and discussion of severe dust devil in China , America and Sudan. *Gansu Meteorology* (in Chinese) , 1996 , **15** (1) : 1 ~ 5

[38] 江吉喜,项续康,王子厚等. 以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探. 方宗义等编. 中国沙尘暴研究. 北京 :气象出版社 , 1997. 98 ~ 102

Jiang J X , Xiang X K , Wang Z H , et al. Approach to now casting methods of strong duststorm mainly utilizing satellite data. In : Fang Z Y , et al , ed. China Duststorm Research(in Chinese). Beijing : Meteorological Press , 1997. 98 ~ 102

[39] 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线 – 黑风暴形成的一个机理分析. 高原气象 , 1996 , **15** (2) : 178 ~ 185

Hu Y Q , Mitsata Y. Analyses of forming mechanics of a strong duststorm with dry squall line. *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 1996 , **15** (2) : 178 ~ 185

[40] Takemi T , Satomura T. Numerical experiments on the mechanisms for the development and maintenance of long-lived squall lines in dry environments. *J. Atmos. Sci.* , 2000 , **57** : 1718 ~ 1740

[41] 钱 莉,李 英. 武威地区‘ 4.12 ’黑风天气成因分析. 甘肃气象 , 2001 , **19** (3) : 23 ~ 25

Qian L , Li Y. An Analysis of factors causing the ‘ 4.12 ’ black storm in Wuwei. *Gansu Meteorology* (in Chinese) , 2001 , **19** (3) : 23 ~ 25

[42] 陈叔卿. 从一次浮尘现象谈起. 气象 , 1985 , **11** (8) : 29

Chen S Q. Talking about a suspended dust. *Meteorology* (in Chinese) , 1985 , **11** (8) : 29

[43] Yoshino M , Shimizu G , Yamamoto T , et al. A synoptic climatological study on the change of yellow sand in the recent years. International Workshop on Dust Storm (IWDUST , 2002) , held in Beijing on October 31 – November 2 , 2002

[44] 杨 民,蔡玉琴,王式功等. 2000 年春季中国北方沙尘暴天气气候成因研究. 第二次全国沙尘暴学术会议. 兰州 , 2001 年 2 月 23 – 25 日

Yang M , Cai Y Q , Wang S G , et al. Forming causes of duststorm over North China in spring of 2000(in Chinese). The 2nd Workshop on Duststorm , held in Lanzhou on 23 ~ 25 February , 2001

[45] 陈晓光,张 华,李耀辉等. 我国西北沙尘暴分析. 第二次全国沙尘暴学术会议. 兰州 , 2001 年 2 月 23 – 25 日

Chen X G , Zhang H , Li Y H , et al. Analyses of duststorm over Northwest China(in Chinese). The 2nd Workshop on Duststorm , held in Lanzhou on 23 ~ 25 February , 2001

[46] Liu C M , Qian Z A , Wu M J , et al. A composited study of the synoptic differences between major and minor duststorm springs over China-Mongolia areas. *TAO* , 2004 , **15** (5) : 999 ~ 1018

[47] Qian W H , Quan L S , Shi S Y. Variations of the dust storm in China and its climatic control. *J. Climate* , 2002 , **15** (10) : 1216 ~ 1229

[48] 张德二,陆 风. 我国北方的冬季沙尘暴. 第四纪研究 , 1999 , **19** (5) : 441 ~ 447

Zhang D E , Lu F. Winter sandstorm events in Northern China. *Quaternary Sciences* (in Chinese) , 1999 , **19** (5) : 441 ~ 447

[49] 刘春涛,程麟生. 黑风暴的沙尘形成与输送参数化及中尺度数值模拟. 气象学报 , 1997 , **55** (6) : 726 ~ 739

Liu C T , Cheng L S. Parameterization of the formation and transportation for the black storm and mesoscale numerical experiments. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese) , 1997 , **55** (6) : 726 ~ 739

[50] 黄美元,王自发. 东亚地区黄沙长距离输送模式设计. 大气科学 , 1998 , **22** (4) : 625 ~ 637

Huang M Y , Wang Z F. A model for long-range transport of yellow-sand in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese) , 1998 , **22** (4) : 625 ~ 637

[51] 刘广英,王自发,萧荆凤. 起沙机制对沙尘暴影响之敏感度检测研究. 沙尘暴学术研讨会. 2002 年 6 月 28 ~ 30 日. 台北. 11 ~ 38

Liu G Y , Wang Z F , Xiao L F. Sensitivity investigation into the impact of rising sand mechanics on duststorm(in Chinese). Workshop on Duststorm , held in Taipei on 28 ~ 30 June , 2002. 11 ~ 38

[52] 周秀骥,徐祥德,颜 鹏等. 2000 年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D 辑) , 2002 , **32** : 327 ~ 334

Zhou X J , Xu X D , Yan P , et al. Dynamics feature of duststorm in Spring of 2000. *Science in China (Series D)* (in Chinese) , 2002 , **32** : 327 ~ 334

[53] 赵琳娜,孙建华,赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘暴天气起沙机制的数值模拟研究. 气候与环境研究 , 2002 , **7** : 279 ~ 294

Zhao L N , Sun J H , Zhao S X. Numerical simulation of a dust emission in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2002 , **7** : 279 ~ 294

(本文编辑 何 燕)