

近几年国内沙尘暴研究的初步评述

张瑞军^{1,2}, 何清¹, 孔丹^{1,2}, 杨兴华^{1,2}

(1. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘 要:从沙尘暴的成因、特征、输送、影响和防治等方面总结了近年来国内的研究进展, 并对今后沙尘暴研究的方向提出建议。

关键词:沙尘暴; 研究进展; 中国

中图分类号:P445+.4

文献标识码:A

引 言

我国有史记载沙尘暴最早可以追溯到周代《山海经》,“类雾赴云浮,寡见天日”,另有土黄雨、雨砂、土霾、黄雾、红雾等记载。《朔方通志》载天启元年(公元1621年)“四月乙亥午宁夏洪广堡,风霾大作,坠灰片如瓜籽,纷纷不绝,逾时而止,日将沉,作红黄色”^[1]。沙尘暴是一种灾害性天气,带来的经济损失不可忽略。如发生于1993年5月5日(“93.5.5”沙尘暴)和1988年4月16日(4.16沙尘暴)的特大强沙尘暴,是我国近100 a来所罕见,损失极其惨重。“93.5.5”沙尘暴锋面前移速度14~17 m/s,最大19.5 m/s,瞬时最大风速34 m/s,黑霾墙高度300~400 m,最高700 m,能见度0~100 m,横扫甘肃河西走廊、宁夏、陕西、内蒙古4省区72个县100多万km²,造成85人死亡,31人失踪,200多人受伤,70万人受灾,丢失伤亡牲畜6万多头(只),30多万hm²农田受灾。遭灾严重的河西走廊局部农田风蚀深度达10~50 cm,吹失土量平均近3 150 m³/hm²,1万多hm²林果受灾,11万株防护林及用材林被连根拔起或折断,直接经济损失达2.36亿元人民币^[2]。

随着经济的迅速发展,沙尘暴带来的损失也在持续增加,越来越受到政府和民间的关注。近年来,

在沙尘暴的研究方面取得了一些可喜的成果,为政府决策提供了依据。本文旨在总结目前国内沙尘暴的研究进展,为沙尘暴及其相关研究提供借鉴。

1 沙尘暴成因

1.1 沙尘暴形成的动力因素

沙尘暴发生虽然有很复杂的原因,但很多研究指出足够强劲的风力是沙尘暴爆发必要的动力条件。最近40 a西北地区大风与沙尘暴发生次数随时间变化基本呈线性减少趋势,说明在下垫面状况不变或变化不大的情况下,近年来沙尘暴次数减少可能主要是由于大风天气减少而造成的^[3]。

我国北方的西北风主要由冷空气引起,较强风主要由强冷空气(即寒潮)引起。中国北方强沙尘暴天气主要与蒙古气旋的发展移动有关,气旋冷锋后的大风是强沙尘暴天气发生的主要动力因子^[4-5]。就一次沙尘暴过程而言,风速的急速增大为起沙提供了必要的动力条件,沙尘暴发生前风速很小,但在沙尘暴发生前的10 min内,风速迅速增大,而后风速呈波动式减小^[6]。

1.2 下垫面因素

沙尘暴的发生频次除了受到区域大风日数的影响外,同样受下垫面的地形地貌、植被覆盖等条件的

收稿日期:2007-07-27;改回日期:2007-09-07

基金项目:干旱气象科学研究基金项目(IAM200601),中国沙漠气象科学研究基金(Sq2005001),中国气象局多轨道业务建设项目(QY20070201),新疆师范大学2007年研究生科技创新基金及国家自然科学基金(40775019)共同资助

作者简介:张瑞军(1982-),男,汉族,山西石楼人,在读硕士研究生,主要从事资源开发与环境灾害研究。

通讯作者:何清,男,研究员,主要从事沙漠气象研究。E-mail:qinghe@idm.cn

影响。

将中国大风日数空间分布图与沙尘暴年日数空间分布图对比,发现2者在空间上的分布并不完全一致。在内蒙古中西部、甘肃省北部和新疆东北部地区,大风日数与沙尘暴日数有较好的一致性;而在新疆的塔克拉玛干沙漠,虽然这里是我国西北地区沙尘暴发生的高频区,但年大风日数在20 d以下,是西北地区大风日数分布的低值区域^[7]。这种空间分布上的不一致说明下垫面性质对沙尘暴分布的影响较为显著。

裸露于地表的沙尘是形成沙尘暴的物质基础,蒙古国南部和我国的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠和毛乌素沙地为沙尘暴提供沙源。这些地方降水稀少、空气干燥、冷空气活跃等重要气候背景,就很容易形成沙尘暴^[5-8]。

植被覆盖对沙尘暴的形成有一定作用,植被覆盖程度越差,表层土壤为强风提供沙尘的可能性就越高。经过对内蒙古中西部地区在1981~2000年沙尘暴日数与植被覆盖率资料做对比,20世纪80年代多为正距平,90年代多为负距平。植被覆盖率是80年代多为负距平,90年代多为正距平。沙尘暴日数与植被覆盖率之间呈现负相关关系,这种关系在不同地貌类型区和不同季节有所差异。沙化地区的夏季(7、8、9月平均)植被覆盖率与第2年沙尘暴日数之间的负相关最为显著^[9]。

对沙尘暴与冻土深度关系研究表明:沙尘暴多发中心总与当月冻深极小值或相对低值区对应,且冻深越小(大),沙尘暴日数越大(小)^[10]。

1.3 温度和降水条件

温度和降水是沙尘暴形成的气候背景。沙尘暴发生前期和同期,在沙尘暴发生区上游地区,是一个热汇区,即热量的积聚区;而在沙尘暴发生区(除沙尘暴发生区的东侧外)则是一热源区,有能量的散失^[11]。沙尘暴过程及过后的温度、气压、湿度等都具有一定特征,并且有明显的变化^[6,12-13]。在沙尘来源区,沙尘暴主要活动期的温度比年均温高2~3℃。在沙尘堆积区,沙尘暴主要活动期的温度比当地年平均温度低1~2℃。降水少,沙尘暴活动强。沙尘暴活动期的降水量一般比同一地区月平均降水量低约30%^[4]。在内蒙古中部地区,冬季与初春沙尘天气发生日数与积雪日数之间呈现负相关,冬季积雪日数与沙尘天气发生日数之间的负相关较

初春积雪日数与沙尘天气发生日数之间的负相关更为显著,在中温带温凉半干旱气候区初春积雪日数与沙尘天气发生日数间的负相关也比较显著^[14]。

何清^[15]研究指出,南疆沙尘暴、扬沙、浮尘总日数之和与同期的温度、降水在春季有相对较好的线性相关关系。而影响北疆沙尘天气的主要因子有平均风速和气温日较差、降水量,春季明显受气温和平均风速的影响,夏季主要受平均风速和气温日较差的影响^[16]。

1.4 天气系统

天气系统也是造成沙尘暴天气的原因之一,对2002年3、4月我国沙尘暴发生的环流形势特征分析表明,东亚大槽发展和加深是造成该年沙尘暴偏北路径多的主要成因,并且是影响华北、东北甚至华中的一种主要环流形势。东北低涡维持期间生成的副冷锋次天气尺度系统,可以产生强局地沙尘暴^[17]。沙尘天气的出现与扰动涡旋也有很大关系,表现为沙尘天气频次与春季850 hPa上的扰动涡旋有显著的正相关^[18]。同时,中- α 尺度涡线系统、中- β 尺度强对流系统和中尺度对流复合体的形成和发展促使强沙尘暴形成^[19]。

高空急流是影响沙尘暴形成的又一因素,主要有单急流、双急流和3急流。单急流型沙尘暴多发生于北支急流下沉支的南侧,双急流型沙尘暴发生于双急流合并下沉支的下方。上升气流和下沉气流均有可能产生沙尘暴,低层辐合、高层辐散导致的抽吸作用,可在近地层形成大风和沙尘暴,强的下沉气流可导致高层动量有效下传有利于沙尘暴的产生;在南、北支高空急流之间往往会形成一支环流促进沙尘暴的形成^[20]。对宁夏春季沙尘暴过程与200 hPa急流研究发现,宁夏强沙尘暴和特强沙尘暴过程发生前后,高空急流表现为3种类型:一是西风急流型;二是副热带急流型;三是西风急流与副热带急流振荡合并型^[21]。对宁夏4月平均大气环流特征研究表明:多沙尘暴年,500 hPa东半球极涡偏强,大气环流的经向度加大,我国北方高空纬向西风偏强;少沙尘暴年,极涡弱,大气环流经向度减小,我国北方高空纬向西风偏弱;西太平洋副高北侧的位势高度距平在偏多年和偏少年也发生了截然相反的分布^[22]。王锡稳^[23]对2003年7月20日甘肃河西走廊一次历史上少见的区域性夏季沙尘暴天气分析发现:高空小槽、切变线、热低压是引发夏季沙尘暴的

主要天气系统。

新疆春季的沙尘天气不仅与中纬度地区西风带上的经向环流、东亚槽有关,与中低纬地区的副热带高压及高纬地区的极涡等系统的月环流特征量也有关,与前一年夏、秋季的大气环流之间存在明显的隔季相关现象^[24]。

1.5 其它因素

还有研究表明南方涛动(SOI)、厄尔尼诺与沙尘暴的发生有关。春季 SOI 与滞后 1 a、2 a 的北方春季平均沙尘暴发生频数的相关系数分别为 0.349 和 0.350,置信度达到 95% 以上,表明春季 SOI 偏高时,翌年和第 3 年的春季沙尘暴偏多;夏季 SOI 与滞后 2 a 的北方春季平均沙尘暴发生频数的相关系数为 0.381,达到 99% 的置信度。与秋季和冬季的 SOI 相关不显著^[25]。另外,2000 年强沙尘天气陡增是因为处于反厄尔尼诺事件的高峰期所致^[26]。

20 世纪 80 年代以来太阳活动加强,全球变暖,青藏高原地面加热场强度加强,欧亚西风急流轴北移,西太平洋副热带高压偏北偏西,强度加强,蒙古气旋减弱,西北西部的沙尘源区降水增加,是中国北方沙尘暴减少的主要原因。21 世纪初太阳活动进入新一轮的减弱期,预计未来中国北方沙尘暴将在波动中逐渐增加,进入新一轮的相对活跃期^[27]。

沙尘暴的减少趋势与不同年代特有的气候因素有关外,还与人为活动有着直接关系。自 20 世纪 70 年代中期以来,由于气候的波动变化和人类活动的干扰,使荒漠环境也在不同区域受到不同程度影响,直接影响着沙尘暴的发生和发展^[28]。进入 20 世纪 90 年代,宁夏北部通过加大植树造林和防护林带建设规模,有效地遏制土地荒漠化,使沙地面积有所缩小,在大风次数正常偏多的情况下,沙尘暴却明显减少,起沙的风速阈值呈增大趋势,说明人为改变下垫面的自然环境,使其良性发展,有效地增加地表粗糙度,对抑制区域性沙尘暴的出现是可行的^[29]。

沙尘暴是多种因素共同作用的产物,其成因机制的研究不可忽视地球外部环境的影响。分析沙尘暴发生日的月球黄经 λ_m 、太阳黄经 λ_s ,月相角 $D = (\lambda_m - \lambda_s)$,发现沙尘暴的发生频次与月相角有明显的相关关系;沙尘暴发生频次的极大值区在 $[30^\circ, 42^\circ]$ 和 $[306^\circ, 318^\circ]$ 的月相角区间内,低值区在 $[78^\circ, 90^\circ]$ 和 $[258^\circ, 270^\circ]$ 的月相角区间内;沙尘暴发生有明显的小周期(1/4 月波)^[30]。

2 沙尘暴特征

2.1 时空分布特征

我国沙尘暴主要发生在与北方沙漠及沙漠化土地相联系的极干旱、干旱和半干旱区内^[31]。其中西北、华北大部、青藏高原和东北平原地区沙尘暴年发生日数一般超过 1 d,是沙尘暴的主要影响区,110°E 以西、天山以南大部分地区沙尘暴超过 10 d,是沙尘暴的多发区;塔里木盆地及其周围地区、阿拉善和河西走廊东北部是沙尘暴的高频区,达 20 d 以上,局部接近或超过 30 d,如新疆民丰 36 d、柯坪 32 d、甘肃民勤 30 d 等^[32]。除上述地区之外,青藏高原东北部也是沙尘暴发生的主要分布区之一^[31]。

新疆南疆沙尘暴以塔里木盆地为中心,出现的几率向四周递减,高发区在塔克拉玛干沙漠,沙漠南缘、昆仑山北麓出现的沙尘暴多于其它周边地区;焉耆盆地次高发区,出现在山区的沙尘暴明显少于平原^[33];北疆沙尘暴的高发区在古尔班通古特沙漠,沙漠南缘、天山北麓发生的沙尘暴多于其他周边地区^[34]。

沙尘暴同时具有一些明显的时间分布特征,在 1954~1998 年的 45 a 间,我国除青海、内蒙古和新疆的小部分地区扬沙和沙尘暴日数呈增长趋势外,北方大部分地区扬沙和沙尘暴日数在减少^[32]。新疆各类沙尘天气年际变化趋势基本相似,20 世纪 80 年代以来呈减少趋势^[15]。在我国西北地区,20 世纪 50 年代沙尘暴发生日数最多;60 年代前期略有降低,1967 年和 1968 年降到最低,即发生日数最少;70 年代略有增加,80 年代又处于逐渐减少的趋势。90 年代又有明显的增加。我国沙尘暴的季节和月份变化特点是:春季最多、约占全年总数的 1/2,夏季次之,秋季(新疆地区为冬季)最少;按月份来看,4 月份发生频率最高,3 月和 5 月次之,秋季的 9 月(新疆为 12 月或 1 月)最低^[35]。沙尘暴也具有明显的日变化特征:沙尘暴主要发生在午后到傍晚时段内,占总数的 65.4%;清晨到中午时段内,仅占 34.6%^[36]。

2.2 沙尘源地和降尘特征

对准噶尔中南部沙尘暴源区的地表沉积物研究表明:艾比湖流域及克拉玛依开发区广泛分布的沙质、粘土质、盐土荒漠区,特别是春季翻耕的裸露农田地表物质含有大量 $<0.063 \text{ mm}$ 的粉砂和黏土,粒

度分维值较高,是沙尘暴的丰富物源。古尔班通古特沙漠风成沙粒径较粗,分维值较低,加之较好的植被状况,沙尘暴发生频数相对较低^[37]。

不同程度沙漠化土地的风沙活动强度不同,输沙率随风速增加成非线性增大,相同风速下,随着土地沙漠化程度的增加,输沙率成指数式增加;植被覆盖度<10%与覆盖度>25%的沙地,对风场的响应也表现出不同的风沙流结构;不同程度的沙漠化土地上,发生风蚀搬运的物质组成也明显不同^[38]。不同地类的地表温度时序变化与观测点沙尘干量TSP时序变化具有较好的对应关系,沙尘暴过程地表温度变化现象与沙尘有密切的关系^[39]。

中国主要沙尘源区沙尘气溶胶中高岭石与绿泥石的比率存在明显差异,西部沙尘源区(以阿克苏站点为代表)高岭石与绿泥石的比值较小(平均值为0.3),北部沙尘源区(以榆林站点为代表)的比值相对较高(平均值为0.7)^[40]。一次亚洲特大沙尘暴样品中,沙尘暴颗粒中矿物颗粒达94%。沙尘暴颗粒的矿物组成主要有黏土(40.3%)和石英(19.5%),其次有方解石、斜长石、钾长石、赤铁矿、黄铁矿、角闪石和石膏,但其含量都<10%。黏土组分中伊/蒙混层矿物占78%、伊利石9%、高岭石6%、绿泥石7%。除了检测到那些主要类型矿物外,还检测出痕量的白云石、黄铁矿、盐类矿物芒硝、重矿物、金红石、钦铁矿和磷灰石等矿物。此次亚洲沙尘暴颗粒和非洲撒哈拉大沙漠的沙尘羽颗粒的矿物类型相似,但是黏土矿物组成有很大的差别,前者以伊/蒙混层矿物为主,后者以伊利石为主^[41]。

对哈尔滨的沙尘暴沉降物的粒度组成和化学成分分析表明,沙尘含有大量的粗颗粒物,表现出明显的3峰分布特征。其粒度组成以粉砂(4-8Φ)为主,占71.18%,平均粒径 M_z 为5.14Φ。主要化学成分为 SO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ,三者之和达77.8%。 Mg 、 K 、 Si 、 Fe 、 Mn 、 P 、 Ti 、 Co 、 Ni 、 V 等元素的富集因子都在1左右,主要是地壳来源; Cu 、 Pb 、 Zn 、 Cr 、 Se 等元素有一部分来自于地壳源之外的其他污染源;而 As 、 Cd 和 Sb 元素主要来自于大气污染源^[42]。

3 沙尘暴模式与预报

3.1 沙尘输送的模式

沙尘暴的模式研究日益成熟,并且对沙尘暴预测、输送等研究都有很大贡献。周秀骥^[43]用HYS-

PLIT-4模式对2000年3、4月份影响北京的8次沙尘暴后向轨迹研究表明:影响北京的沙尘天气在1000 m上空主要呈3个主体输送方向:第1条为西北偏北方向;第2条为西北方向;第3条为偏西方向。这与卫星监测结果较为一致。对2003年4月9日发生在我国西北的强沙尘暴长距离输送的数值模拟结果显示:强沙尘暴过程的沙尘来源并非某一地区,在长距离输送过程中,主要有2个高浓度中心向东传输。一个在35°N附近,主要在1500~3000 m高空传输,另一个在40°N附近,主要在1500 m以下传输,后期两者合二为一^[44]。

刘毅^[45]运用MM4中尺度动力学模式结合沙尘气溶胶传输模式,模拟1次沙尘暴天气及沙尘输送过程。显示蒙古气旋冷锋后的大风是沙尘扬起的主要动力,锋区强烈的上升气流将沙尘输送到高层,沙尘的水平输送主要随冷锋一起向下游扩散。

孙建华^[46]建立了一个较完整的沙尘暴起沙和输送过程的预测系统,并对影响我国北方大部分地区的沙尘(暴)天气的起沙和输送过程进行了模拟试验,模拟沙尘浓度的结果与地面天气现象及卫星云图的沙尘天气范围比较一致。王夕华^[47]模拟不同沙尘源对我国城市沙尘暴爆发的影响作用,与实况资料比较具有较好的模拟性,反映出颗粒的分布规律。

3.2 沙尘暴预报

不断提高沙尘暴的预测预警以及防治水平,已成为科研界和政府部门共同关注的问题。利用遥感观测和地面实测手段对亚洲沙尘暴进行监测。通过对多元数据进行分析和综合,建立了遥感监测结果与地面观测结果之间的关系,为沙尘暴的预警预报提供基础数据和客观依据^[48]。

徐希慧^[49]、杨东贞^[50]等对卫星云图的可见光特征进行分析,为沙尘暴提供了一种单通道遥感数据监测方法。

方宗义等^[51]利用气象卫星上的可见光、短波红外和红外窗区的辐射测值对沙尘暴监测进行了研究。也有学者^[52]利用偏振激光雷达对沙尘暴观测数据进行解析。范一大等^[53]利用NOAA/AVHRR数据研究了沙尘暴图像的查找表(Lookup Table)增强法和沙尘暴信息提取的经验模型。

胡隐樵等^[54]利用RAMS中尺度模式设计了考虑辐射过程和沙尘过程的强沙尘暴发展的动力学模

式,揭示了强沙尘暴发展辐射冷却的正反馈机制,展示了强沙尘暴预报的良好前景。

西西伯利亚地区大风的逐日变化与我国北方地区的强沙尘暴天气存在较高的相关和明显的先兆反映。该区域的风速也可以作为中国北方地区强沙尘暴天气短期预报的一个重要预警指标^[55]。

4 沙尘暴影响与防治

4.1 沙尘暴的影响研究

对黑河沙尘暴的研究表明^[56],春季(3~5月)受沙尘暴天气的影响,本区大气的平均状况明显浑浊。明显浑浊的沙尘大气,白天减小地面净辐射能收入,夜间减小地面净辐射能的支出。

对2000年春季北京市大气气溶胶研究表明,发生沙尘暴时TSP和PM₁₀的质量浓度极高,大气气溶胶的污染还表现出沙尘暴的污染特征,同时在一定程度上遏制酸性降水的形成^[57]。同时沙尘暴可以影响地空路径卫星通信的传输性能^[58]。

也有研究结果^[59]表明,沙尘暴和扬沙天气与呼吸、循环系统疾病日门诊人数的增加有联系,且均表现为滞后效应,其影响程度为沙尘暴大于扬沙天气,沙尘天气对健康的影响因年份不同,同时沙尘暴对健康的影响有性别差异。

沙尘暴同时给人们的生活及生产活动也产生巨大影响,主要表现在:(1)风沙流通过沙埋、风蚀、沙割、狂风袭击和降温霜冻等方式,使大片农田遭破坏,农作物大幅减产。(2)对交通和供电线路产生影响,还可掩埋居民区、工矿区及其他设施,严重影响人们的生活。(3)大量沙尘进入高空,可随风飘散到数千km以外,对大气环境造成严重污染,同时加剧土地沙漠化。

4.2 沙尘暴的防治研究

我国沙尘暴虽然有减少趋势,但沙尘暴所带来的损失却在逐年增加。以内蒙古为例,20世纪50年代沙尘暴造成的经济损失为1 184.4万元,60年代中期损失1 439.2万元,70年代中期损失32 718.3万元,到90年代中期损失达到113 610.7万元。该区自50年代后沙尘暴呈波动减少趋势,沙尘暴造成的经济损失却在明显增加,因此沙尘暴的预防和治理显得非常重要^[60]。我国学者通过对沙尘暴多年的研究^[26-29,61-62],总结出下面一些防御和治理措施:

(1)建立和完善北方地区沙尘天气的监测、预警系统。尽快建立、完善沙尘天气的动态监测、预警系统,应用气象卫星、雷达、自动气象站及各种常规观测手段,对沙尘暴的形成、发展和传播进行跟踪监测,建立相关要素资料数据库,探索将传统的天气学方法和现代数值预报方法有效结合的沙尘天气长、中、短期预报方法,以形成沙尘暴监测、预警和服务系统,为政府部门决策提供可靠的科学依据;

(2)做好科学的还林还草工作,大范围地恢复自然植被。治理沙尘至关重要的措施是实施以保护和发展林草植被为核心的治沙工程,保护好现有沙区植被,严禁乱砍滥伐、乱采滥挖和乱垦滥牧。做好生态规划,指导科学还林还草,建立起遏制沙漠推进的生态屏障。对已沙化的地区开展综合治理,扩大林草植被。在干旱和半干旱地区种草植树时,一定要考虑水资源的制约,选择好合适的品种和合理的密度;

(3)切实控制沙源地人口的持续增长,提高沙源地人口素质,要在广大干部和群众中广泛开展防沙、治沙、保护生态环境、爱我家园的科学普及教育工作。

此外,还有学者^[63]提出海水西调工程,恢复和增加西北湿地,治理沙漠和沙尘暴。其依据是满足增加内陆盆地降水量的3项必要和充分条件,即西风带、高山山脉冷凝作用和广大湿地提气源。

5 展望

沙尘暴的研究在我国已经取得很多成果,在研究方法上已经突破传统,研究手段上也有了很大改进,利用最先进的仪器进行观测和检测沙尘暴。研究所涉及的范围也越来越广,从沙尘暴的气候特征到起因,从起沙到降尘,从检测预报到治理,各方面的研究都已有了很大的进步。沙尘暴给人民生产和生活带来的影响已经引起了政府部门的高度关注,预防和治理沙尘暴成为了今后研究工作的重点。为此,作者提出3点建议:

(1)加强对沙尘暴起沙动力机制及沙源地特征的分析研究;

(2)注重在研究方法和手段方面的改进和提高;

(3)着手研究沙尘暴监测和防治的具体措施。

参考文献:

- [1] 韩茂莉,程龙. 大漠狂风——沙尘暴历史、现实的思考[M]. 太原:山西人民出版社,2002.
- [2] 吴学玲,李玉平,张玉兰. 我国沙尘暴的危害及防御系统[J]. 山西气象,2006,(3):12-14.
- [3] 李耀辉,张存杰,高学杰. 西北地区大风日数的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2004,24(6):715-723.
- [4] 赵景波,杜娟,黄春长. 沙尘暴发生的条件和影响因素[J]. 干旱区研究,2002,19(1):58-62.
- [5] 张高英,赵思雄,孙建华. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究[J]. 气候与环境研究,2004,9(1):101-115.
- [6] 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.
- [7] 范一大,史培军,朱爱军,等. 中国北方沙尘暴与气候因素关系分析[J]. 自然灾害学报,2006,15(5):12-18.
- [8] 王耀庭,赵燕华,杨新兴,等. 沙尘暴传输机理及源地环境特征[J]. 安全与环境学报,2002,2(6):18-22.
- [9] 顾日,蔡雪鹏,谢锋,等. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例[J]. 地球科学进展,2002,17(2):273-277.
- [10] 赵建华,俞亚勋,孙国武. 冻土对沙尘暴的影响研究[J]. 中国沙漠,2005,25(5):658-662.
- [11] 王劲松,刘贤. 西北地区春季沙尘暴地面加热场基本特征[J]. 干旱区资源与环境,2003,17(5):1-6.
- [12] 李宁,杜子璇,刘忠阳,等. 沙尘暴发生过程中的风速和土壤湿度变化[J]. 自然灾害学报,2006,15(6):28-32.
- [13] 何清,向鸣,唐淑娟. 塔克拉玛干沙漠腹地两次强沙尘暴天气分析[J]. 中国沙漠,1998,18(4):320-327.
- [14] 郝璐,李影俊,郭瑞清. 冬季积雪与沙尘天气发生日数关系的探讨——以内蒙古中部地区为例[J]. 中国沙漠,2006,26(5):797-801.
- [15] 何清,杨青,李红军. 新疆40a来气温、降水和沙尘大气变化[J]. 冰川冻土,2003,25(4):423-427.
- [16] 马禹,王旭,黄镇,等. 新疆沙尘天气的演化特征及影响因子[J]. 干旱区地理,2006,29(2):178-185.
- [17] 方宗义,王伟. 2002年我国沙尘暴的若干特征分析[J]. 应用气象学报,2003,14(5):513-521.
- [18] 全林生,时少英,朱亚芬,等. 2001年中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J]. 地理学报,2001,56(4):477-483.
- [19] 项续康,江吉喜. 西北地区强沙尘暴成因的中尺度分析[J]. 高原气象,1996,5(4):448-455.
- [20] 程海霞,丁治英,帅克杰,等. 沙尘暴天气的高空急流统计特征及动力学分析[J]. 南京气象学院学报,2006,29(6):806-814.
- [21] 陈晓光,纪晓玲,刘庆军,等. 200hPa高空急流与宁夏春季沙尘暴过程的特征分析[J]. 中国沙漠,2006,26(2):238-242.
- [22] 彭维联,陈楠. 宁夏多、少沙尘暴年4月平均环流特征的对比分析[J]. 高原气象,2002,21(6):599-603.
- [23] 王锡稳,刘治国,黄玉霞,等. 河西走廊盛夏一次强沙尘暴天气综合分析[J]. 气象,2006,32(7):102-109.
- [24] 毛炜峰,艾力·买买提明,陈胜,等. 新疆春季沙尘天气与前期月环流特征量的关系[J]. 干旱区地理,2005,28(2):171-175.
- [25] 李威. 中国北方春季沙尘暴的变化与 ENSO 的关系[J]. 气候变化研究进展,2006,2(6):296-300.
- [26] 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[J]. 地理学报,2000,55(5):513-521.
- [27] 李栋梁,钟海玲. 我国沙尘暴的气候成因及未来发展趋势[J]. 中国环境科学,2007,27(1):14-18.
- [28] 魏文寿,张璞,高卫东,等. 新疆沙尘暴源区的气候与荒漠环境变化[J]. 中国沙漠,2003,23(5):483-487.
- [29] 姚宗国,赵光平,陈晓光,等. 宁夏北部自然环境对沙尘暴天气的影响分析[J]. 中国沙漠,2006,26(3):375-379.
- [30] 吴绍华,周生路,叶玮. 中国北方强沙尘暴受月相调制现象初探[J]. 干旱区地理,2006,29(2):201-206.
- [31] 王式功,王金艳,周自江,等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. 地理学报,2003,58(2):193-200.
- [32] 周自江. 近45年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究,2001,21(1):9-17.
- [33] 王旭,马禹,陈洪武,等. 南疆沙尘暴气候特征分析[J]. 中国沙漠,2003,23(2):147-151.
- [34] 王旭,马禹,汪宏伟,等. 北疆沙尘暴天气气候特征分析[J]. 北京大学学报(自然科学版),2002,38(5):681-687.
- [35] 王式功,董光荣,杨德保,等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. 自然灾害学报,1996,5(2):86-94.
- [36] 王式功,杨德堡,周玉素,等. 我国西北地区“94·4”沙尘暴成因探讨[J]. 中国沙漠,1995,15(4):332-338.
- [37] 钱亦兵,吴兆宁,陈冬梅,等. 准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠,2005,25(6):831-837.
- [38] 刘树林,王涛,郭坚. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. 中国沙漠,2006,26(3):356-361.
- [39] 刘志丽,张小曳. 沙尘源区 AVHRR 数据地表温度时序变化与沙尘干量 TSP 数据的对比分析——以2001年春季北方强沙尘过程为例[J]. 干旱区地理,2003,26(1):89-96.
- [40] 沈振兴,张小曳,曹军骥,等. 粘土矿物比率对沙尘源区的指示[J]. 环境科学,2005,26(4):30-34.
- [41] 邵龙义,李卫军,杨书申,等. 2002年春季北京特大沙尘暴颗粒的矿物组成分析[J]. 中国科学D辑:地球科学,2007,37(2):215-221.
- [42] Xie Yuanyun, Zhang Yan, He Kui, et al. Features of Sand - dust Deposits in Harbin City, China [J]. Chinese Geographical Science, 2006, 16(4):327-333.
- [43] 周秀骥,徐祥瑞,颜鹏,等. 2000年春季沙尘暴动力学特征[J]. 中国科学(D辑),2002,32(4):327-334.
- [44] 戚丹青,谭季青,孙长. 一次强沙尘暴长距离输送的数值模拟研究[J]. 浙江大学学报(理学版),2006,33(2):216-222.
- [45] 刘毅,张华,周明煜. 一次沙尘暴天气及沙尘输送过程的数值模拟[J]. 南京气象学院学报,1997,20(4):511-517.

- [46] 孙建华,赵琳娜,赵思雄. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验[J]. 气候与环境研究,2003,8(2): 125-142.
- [47] 王夕华,顾瑶. 沙尘暴(气体-颗粒)两相流数值模拟-II个例分析[J]. 工程热物理学报,2004,25(2):262-264.
- [48] 刘志刚,马建文,张国平,等. 沙尘暴过程观测数据与实测数据的综合分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2005,41(3):26-30.
- [49] 徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究[A]. 见:方宗义编. 中国沙尘暴研究[C]. 北京:气象出版社,1997. 88-91.
- [50] Yang Dongzhen. A case study on sandstorms[J]. Acta Meteorologica Sinica,1991,5(2):150-155.
- [51] 方宗义,张运刚,郑新江,等. 用气象卫星遥感监测沙尘的方法和初步结果[J]. 第四纪研究,2001,21(1):48-55.
- [52] 董旭辉,祁辉,任立军,等. 偏振激光雷达在沙尘暴观测中的数据解析[J]. 环境科学研究,2007,20(2):106-111.
- [53] 范一大,史培军,潘耀忠,等. 基于 NOAA/ AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测[J]. 自然灾害学报,2001,10(4):46-51.
- [54] 胡隐樵,孙淑芬,郑元润,等. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展[J]. 高原气象,2001,23(3):281-296.
- [55] 杨续超,刘晓东. 中国北方强沙尘暴活动与亚洲地区对流层风场的联系[J]. 气候与环境研究,2006,11(1):94-100.
- [56] 沈志宝,文军. 沙漠地区春季的大气浑浊度及沙尘大气对地面辐射平衡的影响[J]. 高原气象,1994,13(3):330-338.
- [57] 王玮,王英,苏红梅,等. 北京市沙尘暴天气大气气溶胶酸度和酸化缓冲能力[J]. 环境科学,2001,22(5):25-28.
- [58] 徐英霞,杜廷,黄际英,等. 沙尘暴对地空路径上 Ka 频段电波传播的影响[J]. 电波科学学报,2003,18(3):328-331.
- [59] 孟紫强,张剑,耿红,等. 沙尘暴对呼吸及循环系统疾病日门诊量的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(1):116-120.
- [60] 马燕,郭玉华,高永强. 沙尘暴的危害成因及减灾对策[J]. 科技园地,2004(1):34-35.
- [61] 邹旭恺,王守荣,陆均天. 气候异常对我国北方地区沙尘暴的影响及其对策[J]. 地理学报,2000,55:169-176.
- [62] 高国雄. 中国北部沙尘暴现状、成因与防治对策[J]. 水土保持研究,2005,12(5):178-180.
- [63] 陈昌礼. 海水西调与我国沙漠和沙尘暴的根治[J]. 中国工程科学,2001,3(10):13-21,27.

Preliminary Summary on Sand - dust Storm Research in Recent Years in China

ZHANG Ruijun^{1,2}, HE Qing¹, KONG Dan^{1,2}, YANG Xinghua^{1,2}

(1. Institute of Desert and Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China;

2. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: This article summarized domestic scholars' research results on sand - dust storm in recent years from its origin, characteristics, transportation, influence and prevention countermeasures. Some proposal is put forward for sand storm research in the future.

Key words: sand - dust storm; advance; China