

文章编号:1000-694X(2008)03-0586-06

## 西北地区气溶胶的源和汇与沙尘暴研究综述

李富刚<sup>1</sup>, 李仓格<sup>1</sup>, 林春英<sup>1</sup>, 王广河<sup>2</sup>, 汪晓滨<sup>2</sup>

(1. 青海省人工影响天气办公室, 青海 西宁 810001; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 西北地区是我国沙尘暴发生次数频繁、发生强度最大的地区, 近年来发生的大沙尘暴源地均位于新疆、甘肃和内蒙古的干燥沙漠或戈壁地带。由这些地区起源的沙尘既对全球气候有影响, 又对全球化学物质的循环有重要意义。该地区荒漠化严重, 已成为全球四大沙尘暴高发区之一的中亚沙尘暴区的重要组成部分, 文中综合论述了中国西北地区沙尘气溶胶的源和汇与输运过程, 概括性总结了近20多年来对西北地区沙尘暴的研究成果。

**关键词:** 气溶胶; 沙尘暴; 源与汇

**中图分类号:** X513    **文献标识码:** A

沙尘气溶胶的源地世界上有中亚、北美、中非和澳大利亚四大沙尘暴多发区, 它们大部分分布在赤道两侧( $25^{\circ}\text{S}$ — $25^{\circ}\text{N}$ )副热带低纬度地区, 即哈得莱环流圈中下沉气流所控制的干旱气候区。我国西北地区属于中亚沙尘暴区的一部分, 是东亚沙尘气溶胶的主要源区, 也是世界上惟一在中纬度( $35^{\circ}\text{N}$ — $45^{\circ}\text{N}$ )地区发生沙尘暴频率较高的区域, 且位于高原上, 因此有自身的特殊性。

亚洲的沙尘经过10 000 km以上的长途输送, 沉降于北太平洋的广大地区<sup>[1]</sup>。亚洲大陆干旱、半干旱地区的沙漠和黄土高原产生的矿物气溶胶是北太平洋深海沉积物的重要来源<sup>[2]</sup>。亚洲的沙尘暴甚至输送到美洲大陆, 并为遥感卫星的照片所证实<sup>[3]</sup>。亚洲沙尘年总量估计为800 Tg<sup>[4]</sup>约为全球沙尘总量(约1 500 Tg)<sup>[5-6]</sup>的一半, 其中400~500 Tg输入北太平洋, 约240 Tg沉降在中国沙漠, 约73 Tg在黄土高原。

西北地区是我国沙尘暴发生次数频繁、发生强度最大的地区, 特别是塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠和巴丹吉林沙漠东部经腾格里沙漠至毛乌素沙地这两个区域是中国沙尘暴集中的地区, 也是亚洲大气沙尘的主要源区之一<sup>[7]</sup>。近年来发生的大沙尘暴源地均位于西北地区的新疆、甘肃和内蒙古的干燥沙漠或戈壁地带<sup>[8]</sup>。这些地区的沙尘暴以春季最为多发, 约占全年总数的1/2, 夏季次之, 秋季最少。这些沙尘暴不仅横扫我国华北地区, 甚至远征数千公里, 沉降在遥远的北太平洋<sup>[9]</sup>。据研究, 由这些地区起源的沙尘既对全球气候有影响, 又对全球化学

物质的循环有重要意义<sup>[10]</sup>。

### 1 沙尘气溶胶的来源研究

大气沙尘是对流层气溶胶的主要成分之一, 其来源主要以自然生成为主, 受下垫面和天气状况影响较大, 尤其是沙尘暴天气发生时, 大量沙尘将滞留在大气中。大气沙尘通过散射、吸收太阳辐射和吸收、发射红外辐射直接影响地-气系统辐射能收支, 从而影响区域或全球的气候及生态环境。对此, 成天涛等<sup>[11]</sup>、牛生杰等<sup>[12]</sup>曾对干旱沙漠地区大气气溶胶的光学特性进行过观测研究和数值试验。沈志宝等<sup>[13-15]</sup>曾利用HEIFE实验中1990—1991年期间的大气混浊度及地面观测资料, 直接对该地区大气沙尘的物理特性及其辐射效应做过初步研究。

#### 1.1 沙尘气溶胶的化学组成及来源分析

大气气溶胶因其不同的来源而组分各异, 不仅在不同地域其组分各异, 而且在同一地域的气溶胶组分也随其粒子的尺度不同而不同, 我们可以利用气溶胶组分分析资料, 采取各种分析方法判断他们的来源。也就是基于多组分、多样本的气溶胶资料, 利用现代统计学的多元分析方法的源解析。

柳海燕等对1993年9月至1994年8月在青藏高原五道梁采集到的气溶胶样品中多种化学元素成分的浓度资料, 用因子分析、富集因子和稀土元素分布模态综合判断该地区低层大气气溶胶的来源, 同时还讨论了源的季节变化以及各源气溶胶质量浓度的相对贡献<sup>[16-17]</sup>。结果表明, 五道梁低层大气气溶

收稿日期:2007-04-16; 改回日期:2007-08-31

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40533015)资助

作者简介:李富刚(1978—),男,青海人,工程师,从事人工影响天气工作。Email:motoball@163.com

胶在夏、秋季有三个源：地表土壤源、海洋源和局地污染源，但春季无海洋源。同时他们分析了气溶胶化学组成的总体特征和浓度及其季节变化<sup>[18]</sup>。

谢骅<sup>[19]</sup>等尝试使用受体数学模型中的化学元素平衡法(CEB)对西安市3个不同地点和枣园大气气溶胶进行来源解析，以表明陕西地区气溶胶来源的总体水平。结果显示，土壤尘占35%~60%，煤烟尘占15%~30%，建筑尘占15%~25%，冶炼尘占4%~15%。各源贡献率的差异与工业排放和人类活动较一致。

戴树桂<sup>[20]</sup>等全面评述了室内环境中气溶胶的种类、来源、化学组成、形成和自然清除机理。认为室内环境中颗粒物质可小到由几个分子集结而成，也可大到目视可见的程度。这些气溶胶颗粒由于颗粒大小不同，在化学和物理性质上的差异是很大的。樊曙光<sup>[21]</sup>在大气背景、浮尘、扬沙和沙尘暴天气条件下，对沙尘气溶胶进行采样，并对样品进行了中子活化分析，分析了沙尘气溶胶中的35种化学组分，并与黑风暴天气条件下沙尘气溶胶化学组分进行了对比分析。得出：不论是背景值还是有沙尘浮扬现象发生，各类元素浓度均以地壳类元素为最高，地壳类和稀土类元素两次背景值可相差3倍左右。

气溶胶的主要来源可分为天然源和人为源，人为排放源有化石燃料燃烧产生的煤烟；工业生产、建筑产生的工业粉尘、金属尘、水泥尘等；汽车、飞机排气等。天然源有土壤尘、火山灰、森林火灾灰、海盐粒等。以上研究表明，在工业不发达地区，天然源是气溶胶的主要来源，且主要来源于地表土壤尘，且存在季节变化。

## 1.2 大气气溶胶光学厚度与沙尘天气

周自江<sup>[22]</sup>根据文献[23]规定的标准，用地面气象资料得到2001年1—5月中国北方沙尘暴天气（不包括浮尘、扬沙等沙尘天气）的时空分布。给出的AOT(0.5)时空分布与此较为吻合，这表明有可能利用大气气溶胶光学厚度资料来分析沙尘天气。姚济敏<sup>[24]</sup>利用中国科学院沙坡头沙漠试验研究站2001年9月至2002年5月的太阳光度计辐射资料，计算了该地区各月平均大气气溶胶光学厚度(AOT)，并对该地区秋、冬、春三季平均的光学厚度进行了比较，同时对日变化也作了分析。申彦波<sup>[24]</sup>等利用敦煌、北京等5个观测站的大气光学厚度[AOT( $\lambda$ )]资料，分析了大气气溶胶光学厚度的时空分布特征，结果表明，位于干旱沙漠地区的敦

煌，是沙尘天气（包括浮尘、扬沙和沙尘暴等）的频发区，大气气溶胶光学厚度的变化主要是受沙尘天气影响的结果，与我国北方历年在春季发生的沙尘天气的一般时空分布特征基本一致<sup>[25~27]</sup>。

## 1.3 大气混浊度系数与沙尘天气

通常情况下大气混浊度系数和水平能见度是相关的。D'Almeida<sup>[28]</sup>利用撒哈拉沙漠的实测资料得到如下经验公式：

$$\beta = C_1(VV) - C$$

式中：VV表示水平能见度，单位为km；C<sub>1</sub>和C均为常数，分别取2.26和0.73。D'Almeida认为此公式不仅适用于半径为5μm以下的微粒，亦适用于因沙尘暴而产生的半径达到100μm的粒子，其结果与实际情况相符。

## 1.4 大气本底基准观象台气溶胶来源及组成研究

温玉璞等<sup>[29]</sup>利用中子活化及PIXE可见光灰度仪，对瓦里关大气本底基准监测站的大气气溶胶样品进行了测量，讨论了瓦里关山大气气溶胶元素的组成和来源。汤洁等<sup>[30]</sup>采用美国玛基科学公司生产的AE-10型黑碳仪，分析了该地区黑碳气溶胶浓度的变化特征。

## 2 起沙机制与起沙天气过程研究

目前，许多学者已从沙尘暴成因<sup>[31~32]</sup>、天气特征<sup>[33~35]</sup>、沙尘暴演变趋势<sup>[36~38]</sup>以及理论机制<sup>[39~41]</sup>等方面进行了研究。

### 2.1 起沙机制研究

Bagnold<sup>[42]</sup>首次提出了沙粒的冲击假说，赵建华等<sup>[43]</sup>从理论上对沙粒的初始启动与垂直抬升作了理论分析。结果指出，沙粒脱离地面的位置顺序是沙平面上凸拐点处、斜面上外突较大的地方、极大值点、水平面、极小值点以及凹槽的拐点处；提出了沙丘的平化运动、缩移运动与持相运动；气动力起沙的条件是：小粒径沙粒、大风、涡度场（与水平风同符号）、不稳定（层结不稳定与切变不稳定）以及粘性流；冲击起沙的条件是：大粒径沙粒、小风、涡度场（宜与水平风反符号）、稳定大气以及湍流；最后提出了沙尘暴启动的交替循环机制：气动力（冲击）起沙沉降而冲击（气动力）起沙沉降而气动力（冲击）起沙等等。张强<sup>[44]</sup>等认为起沙过程是十分复杂的力学过程，它牵扯到重力、粘性力、碰撞、摩擦、湍流应

力和对流活动等一系列力学因素。理想的结果是获得以牛顿定律为基础的力学方程来表示的起沙过程。

## 2.2 大尺度环流形势

造成我国西北地区大范围沙尘天气的主要环流形势和天气系统主要有以下几种<sup>[45~49]</sup>。

1) 经纬向环流调整。大范围沙尘暴出现总伴随一次大尺度环流调整过程, 东亚地区上空的纬向环流转变成经向环流。这时, 位于西伯利亚的冷空气迅速从新疆沿河西走廊向我国境内爆发, 若此时我国西北地区干旱少雨则易形成沙尘暴天气。

2) 高空-脊-槽形式。在 5 500 m 高空环流图上, 亚洲西部乌拉尔山附近有一稳定的高压脊, 亚洲东部沿海地区有一稳定的深槽(即东亚大槽), 脊前至东亚大槽之间的广大区域上空盛行深厚的西北气流, 因而位于欧亚大陆西北部的冷空气就在此气流引导下向西南进入我国西北荒漠化地区。另外, 春季我国西北地区冷锋活动的频繁、河西走廊地区低空东风激流的形成和蒙古气旋后的大风等也是导致我国西北地区沙尘天气形成的主要天气系统。

丁荣<sup>[50]</sup>等统计了 1960—2004 年甘肃河西走廊中部张掖市 6 个气象站近 45 a 的实测大风沙尘暴资料, 详细分析了该市大风沙尘暴天气的时空分布及形成原因, 并归纳得出: 一般大尺度天气系统造成的偏西大风来临前, 除在对流层中上层的 500 hPa、700 hPa 环流场上都有一个共同的强风速带, 并伴有很多的冷平流等特征配合; 而地面天气图上所确定的关键区域内均有明显的气压梯度场, 24 h 变压梯度 3 h 变压梯度变温梯度场和锋面相伴随。

## 2.3 中尺度环流形势

江吉喜等<sup>[51]</sup>通过对 7 次特强沙尘暴的研究认为, 强沙尘暴天气的发生一般有三种方式:

1) 锋前飑线引起的强沙尘暴, 这是西北和华北北部地区最主要的一种强沙尘暴。

2) 锋尾强对流云团引起的强沙尘暴, 其特点是强度特强, 但影响范围相对较小。

3) 锋前强对流云团引起的强沙尘暴, 它的频率较小, 但影响范围较大。

朱福康<sup>[52]</sup>则把中国沙尘暴出现时的天气形势划分为两类: 锋前型(如 1993-05-05 甘肃, 宁夏)和锋后型(如 1977-04-22 甘肃, 河西走廊)。关于“1993-05-05”特大沙尘暴发生的中尺度背景, 江吉

喜<sup>[53]</sup>认为主要是由强冷锋前部的中尺度对流系统(MCS)及其伴随的飑线造成的。胡隐樵<sup>[54~55]</sup>进一步分析得出, 强冷锋过境时冷锋前干飑线移至被强烈太阳辐射加热的地表以及条件不稳定大气层结地区, 干飑线进一步发展而形成。除此之外, 沙尘天气发生同东亚大槽的位置和强弱、东太平洋海水水温的异常, 即厄尔尼诺、拉尼娜现象的发生有着或多或少的联系<sup>[56]</sup>, 这是值得进一步深入研究的问题。

## 3 沙尘气溶胶的输送

在我国沙尘源区多为新疆地区、甘肃西部、内蒙古西部、宁夏、青海及西藏的部分地区, 这些地区也是我国沙地、沙漠和黄土高原集中的地区。其中春季和冬季的起沙量比夏季和秋季的起沙量大很多, 而春季的起沙范围比其他三个季节都大, 可见春季为我国沙尘暴多发季节, 也是沙尘暴强度最大, 影响范围最广的季节。在春季我国北方气旋活动频繁, 因此而造成大风天气较多, 降水稀少, 空气相对湿度以及土壤的相对湿度都较小; 再加上我国西部地区土地沙漠化比较严重, 大多为植被裸露地区。从天气情况以及土壤的状况来看, 所有的这些条件都是造成起沙的极有利因素。

沙尘输送路径有北路、中路和南路三条, 北路主要影响中国的东北地区, 中路主要影响中国的华北地区, 南路主要影响中国的华中、华东地区。此外指出, 东亚沙尘灾害的三个主要源地是蒙古的戈壁、内蒙古中西部的沙漠戈壁和塔克拉玛干沙漠。

### 3.1 沙尘气溶胶粒子谱分布

在沙尘源区, 无论是沙尘暴时期还是非沙尘暴时期, 低层大气气溶胶粒子的浓度随高度的变化不明显<sup>[57]</sup>。沙尘暴期间粒子的浓度峰值与非沙尘暴期间相比有向粗粒径移动的趋势, 在沙尘源区, 大气气溶胶粒子主要是地面沙尘来源, 沙尘暴发生时气溶胶粒子的浓度大增, 浓度峰值向粗粒径范围移动<sup>[58]</sup>。

牛生杰<sup>[59]</sup>等对 1996 年在贺兰山的东西两侧沙漠地区用 APS-3310A 型激光空气动力学离子谱仪进行了大气气溶胶数浓度和质量浓度观测, 认为在不同地理位置观测到的沙尘天气气溶胶粒子谱分布有一定差异, 其数密度和质量浓度可相差 4~7 倍。

通过对兰州地区春季大气背景、浮尘、扬沙、沙尘暴天气的大气采样, 吴晓霞<sup>[60]</sup>等得到了不同天气状况下大气气溶胶的浓度、PM<sub>10</sub>的粒径分布及大气

气溶胶的分布规律<sup>[61]</sup>。沙尘天气气溶胶粒子主要集中在第0级(粒径>9 Lm),且浮尘和扬沙天气不同粒径气溶胶粒子的质量分数分布十分相似<sup>[62]</sup>。

高卫东<sup>[63]</sup>对等塔里木盆地沙尘气溶胶的分析表明,沙尘暴期间,沙尘气溶胶浓度远大于非尘暴期间。沙尘气溶胶小颗粒绝对浓度大幅度增加;百分比含量也迅速增加;小颗粒(<3.3 μm)与大颗粒(>3.3 μm)的相对浓度呈大幅度增加趋势,沙尘暴期间,在沙源丰富地区,细物质较多,细小颗粒迅速被携带到高空,成为沙尘气溶胶的主要来源。沙尘暴和扬尘天气的各地壳元素含量均高于浮尘和背景大气,而且能见度愈小,高出的比例愈大;各种沙尘天气发生时,均以亲地元素的浓度为最高。沙尘暴期间,沙尘气溶胶浓度远大于非尘暴期间。由于两地地理环境的差异,沙尘暴期间,策勒站细颗粒质量百分比呈下降趋势;阿克苏站细颗粒质量百分比呈上升趋势。同时在沙尘暴期间,由于沙尘源区的沙尘源丰富,细粒物质较多,当风速达到起沙风速时,细粒物质迅速被携带到高空,成为沙尘气溶胶的主要来源<sup>[64]</sup>。

### 3.2 沙尘暴输送研究

中国沙尘暴主要多发于中国西北干旱半干旱地区的春季,有关沙尘暴的研究始于20世纪70年代末,主要针对1977年4月17日甘肃特大沙尘暴的研究<sup>[65]</sup>。80年代有关沙尘暴的研究相对较少,1993年5月5日发生在中国西北地区的强沙尘暴,造成了巨大危害,使得沙尘暴的研究再次引起了人们的重视。1993年9月由中国气象局和中国科学院联合在兰州召开了首次沙尘暴天气研讨会,对沙尘暴产生的机制、传输、防灾救灾等方面进行了深入的探讨。

张凯<sup>[66]</sup>等从沙尘气溶胶的源地、输送及清除等几方面,论述了东亚沙尘气溶胶的源和汇及其输送过程,东亚沙尘气溶胶的源地主要集中在新疆、甘肃和内蒙古的沙漠地带,中国北部每年输入大气的沙尘气溶胶总量约为 $43 \times 10^6$  T,同时,中国西北地区每年向海洋的黄沙输送量约为 $10^6 \sim 10^7$  T。

周荣卫等<sup>[67]</sup>利用国内先进的中尺度气候模式RIEMS同步耦合一个包含起沙、输送、干湿沉降过程的气溶胶模型,研究了我国沙尘的输送的时空规律。研究表明:1月的起沙源区在我国的内蒙古、河套地区、甘肃、青海等地区。4月的起沙源区主要有内蒙古、甘肃、新疆、西藏等地区以及蒙古国中南部

的戈壁地区,其起沙范围基本覆盖了我国西部的大部分地区。7月的起沙源区有内蒙古、甘肃、新疆、西藏等地区,蒙古国南部的戈壁地区,其起沙的范围比4月略小,在蒙古国和我国新疆、青海西部没有起沙。10月的起沙源区有内蒙古、甘肃、新疆东部、西藏东北部等地区。比较1月、4月、7月和10月各地的起沙量,延昊<sup>[68]</sup>等利用SeaWiFS遥感数据分析了东亚沙尘灾害的源地、沙尘输送路径,结果显示:东亚沙尘的三个主要源地是蒙古国的戈壁、内蒙古中西部的沙漠戈壁和塔克拉玛干沙漠。

## 4 结束语

沙尘天气作为我国北方的重大灾害,其防御与治理首先要确定源地、输送路线。目前的主要研究包括沙尘天气中气溶胶粒子谱分布,以及气溶胶粒子组成等。

在研究方面,中国科学家已经进行了大量的研究工作,也提出了很多有价值的研究方法,得到了大量的有价值的结论。根据目前的研究状况,我们认为应开展以下几方面工作:

1) 大气成分浓度变化的原因极其复杂,目前仍不能准确定量地解释观测到的大气成分浓度变化,更不能准确预测其未来变化趋势,因为,对大多数大气成分的源和汇至今仍缺少准确定量的排放(吸收)通量资料,特别是生态源和汇。

2) 现阶段的研究许多事实和现象还不清楚,尤其是关于一些大气微量成分的源、汇和时空分布,它们的迁移、输送和全球循环等问题,都需要进行更加深入广泛的观测和研究。

3) 可利用的资料还不够充分,研究方法还比较简单。例如利用遥感资料对沙尘天气或沙尘暴的发生趋势进行分析存在困难。但遥感资料对沙尘灾害的严重程度可以做精确的定量描述,使其在沙尘过程研究和发生趋势分析研究等方面存在巨大潜力。

4) 部分研究结果缺乏实用意义,对于沙尘暴的防治方法和措施缺少实际的指导作用。

## 参考文献(References):

- [1] Uematsu M, Duce R A, Prospero J M, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88: 5343-5352.
- [2] Blank M, Linen M, Prospero J M. Major Asian aeolian inputs indicated by the mineralogy of aerosols and sediments in the western North Pacific[J]. Nature, 1985, 314: 84-86.
- [3] Reggie R. China's dust storms raise fears of impending catast-

- trophe[R]. National Geographic News, USA, 2001.
- [4] Zhang X Y, Arimoto R, An Z S. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 28041–28047.
- [5] Andrea M O. Climate effects of changing atmospheric aerosol levels[M]// Henderson-Sellers A, ed. World Survey of Climatology, Future Climates of the World. Amsterdam: Elsevier, 1995: 341–392.
- [6] Duce R A. Sources, distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate[M]// Heintzenberg J, ed. Aerosol Forcing of Climate. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1995: 43–72.
- [7] 王涛, 陈广庭, 钱正安, 等. 中国北方沙尘暴现状及对策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 322–327.
- [8] 张宁, 黄维, 陆萌, 等. 沙尘暴降尘在甘肃的沉降状况研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18(1): 32–37.
- [9] 陈广庭. 近 50 年北京的沙尘天气及治理对策[J]. 中国沙漠, 2001, 21(4): 402–407.
- [10] Langger J, Rodhe H. A global three-dimensional model of the tropospheric Sulfur cycle[J]. Atmos Chem, 1991, 13: 225–263.
- [11] 成天涛, 沈志宝. 中国西北大气气溶胶特征的数值试验[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 291–297.
- [12] 牛生杰, 孙继明. 贺兰山地区大气气溶胶光学特征研究[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 298–301.
- [13] 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.
- [14] 沈志宝, 魏丽. 黑河地区大气沙尘对地面辐射能收支的影响[J]. 高原气象, 1999, 18(1): 1–8.
- [15] 沈志宝, 魏丽. 中国西北大气沙尘对地气系统和大气辐射加热的影响[J]. 高原气象, 1999, 18(3): 425–435.
- [16] 柳海燕, 张小曳. 青藏高原五道梁低层大气气溶胶来源的初步分析[J]. 高原气象, 1997, 16(4): 337–344.
- [17] 沈志宝, 张小曳. 青藏高原五道梁低层大气气溶胶来源的初步分析[J]. 高原气象, 1997, 16(4): 345–352.
- [18] 柳海燕, 张小曳. 五道梁大气气溶胶的化学组成和浓度及其季节变化[J]. 高原气象, 1997, 16(2): 122–129.
- [19] 谢骅, 黄世鸿, 李联盟, 等. 陕西气溶胶总悬浮颗粒物来源解析[J]. 气象, 1998, 24(7): 25–29.
- [20] 戴桂华, 张林. 论城市室内环境中气溶胶污染问题[J]. 城市环境与城市生态, 1998, 11(1): 55–58.
- [21] 范曙先. 贺兰山地区沙尘气溶胶的化学组分[J]. 宁夏农林科技, 2000, 1: 37–39.
- [22] 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): 9–16.
- [23] 中央气象局. 地面气象观测规范[Z]. 北京: 气象出版社, 1979: 21–27.
- [24] 姚济敏, 张文煜, 袁九毅. 典型干旱区沙尘气溶胶光学厚度及粒度谱分布的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 77–80.
- [25] 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[J]. 高原气象, 2003, 22(2): 185–190.
- [26] 韩晶晶, 王式功, 祁斌, 等. 气溶胶光学厚度的分布特征及其与沙尘天气的关系[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 362–369.
- [27] 刘立超, 王涛, 周茅先, 等. 沙坡头地区沙尘气溶胶质量浓度的试验观测研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 336–341.
- [28] D'Almeida G A. A model for Saharan dust transport[J]. J Climate Appl Meteorol, 1986, 25: 903–916.
- [29] 温玉璞, 徐晓斌, 汤洁, 等. 青海瓦里关大气气溶胶元素富集特征及其来源[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 400–408.
- [30] 汤洁, 温玉璞, 周凌峰, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 应用气象学报, 1995, 10(2): 160–170.
- [31] 李岩瑛, 杨晓玲, 王式功, 等. 河西走廊东部近 50 a 沙尘暴成因、危害及防御对策[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 283–287.
- [32] 史培军, 严平, 袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 41–47.
- [33] 周秀骥, 徐祥德, 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.
- [34] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学:B 辑, 1984, 14(3): 278–288.
- [35] 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 193–200.
- [36] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近 45 a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 306–310.
- [37] 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.
- [38] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106–111.
- [39] 孙显科, 张凯, 张大治, 等. 沙纹弹道成因理论评析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 471–475.
- [40] 何丽红, 武建军, 郑晓静. 影响拜格诺结的若干因素分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 347–354.
- [41] 杨具瑞, 方铎, 毕慧芬, 等. 沟谷坡面风沙启动规律研究[J]. 力学与实践, 2003, 25(5): 14–17.
- [42] 董治宝. 拜格诺的风沙物理学研究思想[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 101–105.
- [43] 赵建华, 张强, 袁铁. 沙粒启动机制的理论分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 853–862.
- [44] 张强, 王胜. 论特强沙尘暴(黑风)的物理特征及其气候效应[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 675–681.
- [45] Zhang Renjian, Wang Mingxing. Meteorology analysis of the sand2dust storm[J]. Scientific Chinese, 2001(5): 12–13.
- [46] 王式功, 董光荣, 陈惠忠, 等. 中国沙尘暴研究进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 349–356.
- [47] 程海霞, 丁治英, 帅克杰. 近 5 a 我国沙尘暴与高空急流关系的统计分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 892–896.
- [48] 刘树林, 王涛. 浑善达克沙地地区的气候变化特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 557–562.
- [49] 杨晓玲, 丁文魁, 钱莉. 一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 702–705.
- [50] 丁荣, 张德玉, 梁俊宁. 甘肃河西走廊中部近 45 a 来大风沙尘暴气候背景分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(5): 792–796.
- [51] Jiang Jixi, Xiang Xukang, Wang Zihou, et al. A study on the short2rang forecasting method for strong sandstorm taking

- satellite cloudiness imagery data as the dominant factor[C]// Fang Zhongyi, Zhu Fukang, eds. *Studies on Sand-dust Storms in China*. Beijing: Meteorology Press, 1997:98—102.
- [52] Zhu Fukang, Jiang Jixi, Zheng Xinjiang, et al. Research about situation and development of sand-dust storm[J]. *Meteorological Science and Technology*, 1999, 27(4): 1—8.
- [53] Jiang Jixi. A study of formation for "black storm" using GMS24 imagery [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1995, 6(2): 177—184.
- [54] Hu Yinqiao, Mitsuta Y. Development of the strong dust storm and dry squall line—a mechanism analysis on generating black storm [J]. *Plateau Meteorology*, 1996, 15(2): 178—185.
- [55] Hu Yinqiao, Mitsuta Y. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm[J]. *Scientia Atmosferica Sinica*, 1997, 21(5): 581—589.
- [56] Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 9—17.
- [57] 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 408—414.
- [58] 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 沙尘源区与沉降区气溶胶粒子的理化特征[J]. 干旱区地理, 2003, 26(4): 334—339.
- [59] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱的观测研究[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 243—252.
- [60] 穆晓霞, 李杰, 权建农, 等. 兰州市春季沙尘气溶胶质量浓度的若干研究[J]. 干旱区研究, 2004, 21(2): 112—116.
- [61] 穆晓霞, 李杰. 兰州市城关区 2000 年春季大气气溶胶特征及分析[J]. 环境科学研究, 2002, 15(6): 34—38.
- [62] 穆晓霞, 郭治龙, 姚卡玲, 等. 兰州皋兰山顶春季大气气溶胶的监测与分析[J]. 兰州大学学报, 2003, 39(5): 101—104.
- [63] 高卫东, 魏文寿, 刘明哲. 塔里木盆地地区沙尘气溶胶特征分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(2): 165—169.
- [64] 高卫东, 姜巍. 塔里木盆地地区城沙尘气溶胶特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(4): 76—78.
- [65] 徐国昌, 陈敏连, 吴国雄. 甘肃省“4.22”特大沙暴分析[J]. 气象学报, 1979, 37(1): 26—35.
- [66] 张凯, 高会旺. 东亚地区沙尘气溶胶的源和汇[J]. 安全与环境学报, 2003, 3(3): 7—12.
- [67] 周荣卫, 刘红年, 蒋维楣. 中国地区沙尘气溶胶输送过程的数值模拟[J]. 气象科学, 2004(24): 16—25.
- [68] 延昊, 王长耀, 牛锋, 等. 东亚沙尘源地、沙尘输送路径的遥感研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(1): 90—96.

## Research Review on Aerosol Convergence and Divergence and Sand-dust Storm in Northwest China

LI Fu-gang<sup>1</sup>, LI Lun-ge<sup>1</sup>, LIN Chun-ying<sup>1</sup>, WANG Guang-he<sup>2</sup>, WANG Xiao-bin<sup>2</sup>

(1. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The northwest China is one of the areas suffered from high frequency and high intensity of sandstorms. In recent years the source of severe sandstorms often located in Xinjiang, Gansu and Neimenggu. These areas, due to their severe desertification status, had become the main component of the middle Asia Sandstorm Area, one of the four high frequently happening sandstorm areas in the world. The sands and dusts from these areas not only influence the global climate but also have significance on global chemical substance cycle. The convergence and divergence and the transportation of aerosol in northwest China were summarized in the paper. Moreover the research achievement on sandstorm in northwest China in the recent 20 years was reviewed.

**Keywords:** aerosol; sandstorm; convergence and divergence