近 10 a 西北地区沙尘气溶胶研究综述

康富贵^{1,2}, 李耀辉²

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 沙尘气溶胶对气候的影响效应是目前全球气候变化研究的热点之一。在简单综述近 10 a 我国西北地区科研人员在沙尘源区的研究、起沙机制、沙尘气溶胶的光、化学特性和辐射气候效应等方面科研成果的基础上, 对今后沙尘气溶胶研究中所面临的一些科学问题进行了展望。

关键词: 沙尘气溶胶; 起沙机制; 光、化学特性; 辐射气候效应

中图分类号: P425.5⁺5

文献标识码: A

引言

气溶胶是指悬浮在大气中的固体和液体颗粒的总称。主要包括 6 大类 7 种气溶胶粒子: 硫酸盐气溶胶、碳气溶胶(黑炭气溶胶和有机碳气溶胶)、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶、海盐气溶胶和沙尘气溶胶等。在这几种气溶胶里面, 沙尘气溶胶含量最高, 对环境的变化影响显著^[1-4]。当前世界范围内主要有中非、北美、澳大利亚和中亚 4 大沙尘源区。我国的西北地区是中亚沙尘源的一部分, 是东亚主要的沙尘源区之一^[5]。据估计每年有 8 亿 t 的沙尘气溶胶被输送到大气中^[2]。每年全球输入大气层的气溶胶总量在 10~30 亿 t 左右^[6]。进入大气的沙尘粒子对环境有显著影响: 首先使空气中颗粒物浓度增加, 对环境造成污染; 其次是通过散射和吸收太阳辐射, 使到达低层大气和地面的太阳辐射减少; 沙尘气溶胶自身也可以发射和吸收长波辐射, 使大气层加热, 从而改变大气能量平衡, 对气候产生影响^[7]; 此外, 沙尘粒子的远距离输送对海洋生态环境和其他国家居住环境也会产生一定的影响^[8-9]。

国外对沙尘气溶胶的研究起步较早, 从 20 世纪 20 年代就开始了沙尘气溶胶的研究。但这些研究都是相对简单的: 如 hankin^[10] 首先对印度的“*Andhi*”型沙尘暴的上升和下沉气流进行分析; Id-

so^[11] 和 Josepl^[12] 先后对沙尘暴气候特征、沙尘暴与雷雨中湿度场的差异等做了多方面研究。我国的相关研究起步略晚, 始于 20 世纪 70 年代。当时主要集中在粒子的谱分布、沙尘暴的成因、分布特征、沙尘暴演变规律的研究^[13-15]; 针对沙尘暴发生影响系统方面的研究, 也开展了一些简单的模拟方面的工作^[16]。1993 年 5 月 5 日民勤地区特大沙尘暴的发生造成了巨大的生命和财产损失。沙尘气溶胶的研究才引起政府部门和科研人员的高度重视, 使沙尘暴的研究进入了一个新的时期。

近年来我国的科研人员在沙尘气溶胶及沙尘暴研究方面取得了很大的成就。本文主要从沙尘源的观测研究、起沙机制^[17]、沙尘气溶胶光化学特性、辐射特性、远程输送、气候效应和数值模拟等多方面总结近 10 a 来科研工作者在西北地区沙尘气溶胶研究方面所取得的成就, 并对今后研究所面临的科学问题进行展望。

1 沙尘气溶胶产生及输送

1.1 沙尘源区

西北沙尘源区主要包括沙漠、干枯的河床、半干旱沙漠地带边缘及广大的荒漠地区, 以及受人类活动干扰严重植被稀少的半干旱地区。对沙尘源区观

收稿日期: 2011-01-26; 改回日期: 2011-03-10

基金项目: “973”项目“资源利用与环境安全的基础研究”子课题“民勤的生态变化对(风蚀)起沙影响的特征观测与数值基础研究(2008CB417213)”资助

作者简介: 康富贵(1986-), 男, 甘肃省西和县人, 硕士, 主要从事沙尘气溶胶研究. E-mail: kfq2009@126.com

测和研究的主要内容包括地面特征、沙尘粒子的物理化学特性以及随波长而变的复折射指数^[18]。

中国沙尘暴源区主要集中在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2个区域,也是东亚沙尘气溶胶的主要源地^[19-20]。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和戈壁地带^[21]。此外,也有学者证明青藏高原也是远程传输最高效的沙尘源区地之一^[22-23]。

现有的研究表明,西北地区沙尘源区的划分可分为内蒙古源区、以塔克拉玛干沙漠为中心的中国西部沙漠源区、以巴丹吉林为中心的中国北部沙漠高粉尘区及青藏高原粉尘区^[21-22]。其中前3个区域贡献了亚洲粉尘释放量的70%,可视为亚洲沙尘气溶胶3个贡献量最大的源区^[21,24]。

1.2 起沙机制

风蚀起沙是开展沙尘气溶胶和沙尘天气研究的基本问题^[25]。周秀骥等^[26]认为沙尘粒子的起运、搬运过程及其动力条件是研究沙尘暴及其影响的关键问题,指出沙尘暴活动特征可用起沙、扬沙、远距

$$F_s(d_i, d_s) = c_y [(1 - C) + C \frac{p_m(d_i)}{p_f(d_i)}] \frac{Q_g}{u^{*2}} (Q_B G_f \delta + G_c m)$$

其中, $c_y = c_s/7$; d_i 是第 i 个粒子的直径; $p_m(d)$ 是地表土壤受最小破坏时粒子尺度分布的概率密度函数, $p_f(d)$ 是地表受最大程度破坏时粒子尺度分布的概率密度函数; C 和 $(1 - C)$ 分别是 $p_m(d)$ 和 $p_f(d)$ 所占权重, $C = \exp[-t(u^* - u^* t)n]$, t 和 n 为经验系数; m 是直径为 d_s 的粒子质量; G_f 是土壤能排放的尘粒的质量分数; G_c 是覆盖于集合体表面的尘粒的质量分数; δ 是沙粒碰撞土壤表面时产生的凹坑的体积,根据 Lu 等^[30]方法确定。以上研究成果为沙尘暴的数值预报和起沙量的估算提供了更为有效的手段。

曾庆存等^[31]对大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理进行了研究,用动量原理导出水平沙尘通量 Q 的 Bagnold 型公式,由此反推出使 Q 达到统计平衡态所需的气流水平动量下传的作用时间。导出准常定下沉急流情况下的公式 Q , 用 u^{**} 代替公式中摩擦速度 u^* , 得出: $u^{4**} = u_m^{4**} + u^{4**}$, u_m^{**} , u^{**} 各指由下沉平均急流和脉动的动量垂直通量所对应的特征速度(习惯上称为摩擦速度)。其后指出,在研究风蚀和计算沙尘通量时,应以 1 min 做

离输送综合物理模型来描述,揭示了沙尘暴天气在起沙、扬沙、水平输送以及沉降过程中的关键动力学问题。他还指出,沙粒起动后,随着风力的加大,产生沙粒群跳跃、滚动等非常复杂的运动,形成近地面沙粒群的水平移动。

Shao Yaping 等^[27-28]丰富了前人的理论与实验结果,进一步阐述了风速风沙物理学中最新揭示起沙机制的方法,介绍了将大气模式、地理信息系统和风沙模式耦合在一起的风蚀数值模式,在不考虑人为因素的情况下,提出了临界摩擦速度的计算方法:

$$u_i^* = h(w) R(K) \sqrt{A_N (A_N (R_Q g d + \frac{E}{Q d}))}$$

式中, $H(w)$ 、 $R(K)$ 分别表征地表土壤水分和植被覆盖对风蚀起沙的阻碍作用; A_N 为经验常数; R_Q 为土壤微粒密度和空气密度 Q 的比值,根据土壤类型和气压情况取值; d 为粒径; g 为重力加速度。并且在充分考虑地表风蚀起沙的物理机制和起沙过程中地表土壤粒子尺度分布的基础上,提出了起沙计算方案^[29]:

统计平均,最后指出,不同频率的扰动和脉动的起沙尘效率是不同的,以适中的频率效率最高,从而在非常定急流作用下,用 u_e^{**} 代替 u^{**} , 得出: $u_e^{4**} = u_m^{4**} + u_e^{4**} + (1 + A^4) u_g^{4**}$, 其中, u_m^{**} , u_e^{**} , u_g^{**} 则各为由平均急流、湍流脉动和阵风所导致的相应摩擦速度, A 为阵风增益系数。

1.3 沙尘气溶胶的远距离输送

沙尘气溶胶可以通过大气环流输送到遥远的地区。早在 20 世纪 80 年代初, Duce^[32] 等就认为来源于亚洲的春季粉尘主要被 500 hPa 的西风急流所携带沉积在北太平洋地区。最近研究显示除倒灌入南疆盆地的偏东风沙尘暴易在南疆盆地滞留外,随高空西风或西北气流,中蒙地区沙尘暴的沙尘 2 d 后常东传到我国华北或东南沿海地区。若 700 hPa 东亚沿海低槽发展,则将利于沙尘向东南沿海输送^[33-34]。

Zhao Tianliang 等^[35]通过对 2000~2006 年间亚洲沙尘暴与北美洲西部地区环境粉尘粒子(PM)浓度水平的年际变化特征研究发现,亚洲沙尘暴与北美洲西部地区环境粉尘粒子(PM)浓度水平之间有

很好的相关性,相关系数 R^2 达到了 0.83,证明了亚洲沙尘粒子跨过太平洋传输到北美洲西部地区。

2 沙尘气溶胶光、化学特性和辐射特性

2.1 沙尘气溶胶化学特性

对局地沙尘气溶胶化学特性的研究,将有助于对沙尘气溶胶来源分析和光学特性的研究。牛生杰等^[36]对贺兰山地区沙尘样本分析得出:沙尘以地壳类元素浓度最高,一般为 $10^{-1} \sim 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$,沙尘暴发生时达峰值,一般为 $10^1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级,特强沙尘暴发生时高达 $10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 量级;变化最明显的元素主要有 Al、Ca、Mg、Ti、Fe、Sc、Cr 等。高卫东^[33]通过对新疆不同地区的土壤样品进行 PIXE 分析发现,土壤中 Al、Si、Ca 和 Fe 等元素的含量较高,不同地区的土壤元素含量又各有差异。通过对沙尘气溶胶中的元素分析,为新疆乃至中国东部、亚洲和太平洋地区的沙尘气溶胶来源提供科学依据,同时也为沙尘气溶胶对海洋生态系统的营养输送的估算提供依据。

庄国顺等^[34]通过对 2000 年我国沙尘暴的组分研究发现,沙尘暴期间主要污染元素 As、Sb、Se 的富集系数比平日更高,北京地区污染源不仅来自于北京局部地区,而且来自于其长距离传输过程中的区域污染源。污染源元素 Pb、Zn、Cd、Cu 相比于平日富集系数下降,主要来源于北京地区自身。Al、Fe、Sc、Mn 比平常高出 4 倍,主要来源于长期传输过程中由气体到气溶胶的转化。

2.2 沙尘气溶胶光学、辐射特性

沙尘气溶胶光学特性的研究是目前国内外研究的热点和难点。因为通过对沙尘气溶胶的光学等特性研究可以更好地了解其辐射特性。在沙尘气溶胶光学特性的估算中复折射指数是一个非常重要的因子,它可引起对沙尘气溶胶辐射强迫估算明显的差别。当前通过太阳光度计,激光雷达等地面探测手段对沙尘气溶胶光学厚度、复折射指数等进行了大量的观测。然而这些观测、分析还不能够对其深层机理进行全面详细的分析。

张文煜等^[37]在沙坡头站利用多波段太阳光度计对腾格里沙漠气溶胶开展了 6 个月(2001 年 4~9 月)的研究,研究表明腾格里沙漠气溶胶光学厚度随季节而变化:观测期间,4~5 月的 550 nm 光学厚度明显偏大,平均为 0.72;6~7 月次之,平均为 0.

45;8~9 月则最小,平均为 0.30。此外,腾格里沙漠地区沙坡头站点的气溶胶光学厚度变化较大,平均在 0.5~0.57 之间;沙尘天气与干洁天气下的气溶胶光学厚度有很大差别,气溶胶的分布特征也有明显的不同,但各波段的变化趋势是一致的;在干洁天气下气溶胶有其特定的谱分布形式^[38]。Xia x A^[39]利用地基辐射计资料反演得出敦煌和内蒙古沙尘的复折射指数的实部为 1.5 左右,虚部的平均分别为 0.0008 和 0.001,研究表明腾格里沙漠气溶胶光学厚度存在着季节变化。目前,常常用在撒哈拉沙漠测量的复折射指数估计全球尺度的沙尘辐射强迫,然而不同作者使用的数值仍有很大差别^[40-46]。

沙尘气溶胶通过吸收和散射太阳辐射及地面长波辐射对大气有加热和制冷的作用,改变大气的热力状况,进而影响大气的动力结构^[47-48];同时也影响着地面能量收支平衡。沙尘气溶胶的辐射特性是目前气候研究中最大的不确定因子之一,也是气候变化研究的热点问题。这一问题研究的困难是对沙尘气溶胶粒子物理、化学以及光学特性了解的欠缺,缺乏相应的观测资料;不同地区沙尘粒子的光、化学特性不同以及传输过程中的可变性等。

目前的研究多集中在对单一源区沙尘气溶胶辐射强迫的观测研究^[49]。在观测和模拟的气溶胶资料的基础上,很多作者利用辐射传输模式和气候模式对气溶胶的辐射强迫进行了估算^[50-52]。研究发现,沙尘气溶胶在白天对地面起冷却作用,夜间起保温作用^[52]。具体辐射强迫的数值,可以通过观测或模拟白天到达地面总辐射强迫减少量和夜间地面长波辐射损失减少量来进行计算。

3 沙尘气溶胶的气候环境效应

沙尘气溶胶通过吸收和散射太阳辐射使地面冷却;吸收地面长波辐射使沙尘层以下大气加热来影响大气动力和热力平衡。同时,由于沙尘气溶胶的存在,大气中的云滴数量和云滴的增长速度发生变化,对降水产生影响,使云寿命变长,增加云的反照率,对地—气能量平衡产生影响^[48]。张强等^[53]将沙尘暴气候效应分为短期效应(主要包括动力效应和辐射效应)和长期效应以及间接效应。由于大粒径粒子较小粒径粒子更容易沉降从空气中清除^[54],所以他指出在长期气候效应中起作用的主要是尺度在 $0.3 \mu\text{m}$ 附近的沙尘粒子。以下将长、短期效应均归结为直接效应。

3.1 直接效应

由于沙尘气溶胶粒子的存在,大大增加了大气环境中的 TSP 浓度,对环境造成严重污染。另外,沙尘气溶胶粒子通过散射和吸收太阳辐射,从而影响大气吸收太阳辐射;使到达地面的净辐射减少,到达外太空的太阳辐射发生变化,进而影响地气系统的能量平衡。

3.1.1 空气污染

沙尘暴的发生造成空气污染。刘治国等^[55]对兰州市区 2002 年春季 3~4 月近地层大气气溶胶的监测与研究表明:兰州市区 TSP 的质量浓度随着沙尘天气的发生而显著增加;沙尘天气越强,TSP 的质量浓度越高,对兰州市区的空气污染越严重。

3.1.2 阳伞效应

沙尘气溶胶粒子可使到达地面的太阳辐射能量减少,由此导致地表和大气低层温度的降低^[56]。这种反射阳光降低地面气温的作用,好比给地球撑了一把伞,故被称为阳伞效应。

胡隐樵等^[49]对甘肃一次沙尘暴时的太阳辐射研究表明:平川出现沙尘暴时太阳辐射下降,0.5 h 后太阳辐射降至 100 W/m^2 以下,并长时间维持这一水平。同一沙尘暴到达民勤时,当地太阳辐射下降迅速,约 30 min 后太阳辐射下降为零。由此可见,沙尘暴对太阳辐射的消减作用可以是非常明显的。

3.2 间接效应

沙尘气溶胶粒子可以改变云的物理和微物理特征进而改变云的特性。沙尘气溶胶和云有多种作用方式,既可以作为云的凝结核或冰核,从而使非降水云通过凝结产生降水;沙尘气溶胶也可以通过吸收辐射使云内部能量增加改变云内部的结构^[57]。

3.2.1 云反照率效应

在云内液态水不变的情况下,沙尘气溶胶粒子的增加会增加云滴的数量,使云滴粒子变小,从而增加云的反照率。在一个给定液态水含量的体系中,云滴半径的减少将同时减少降水的形成,从而增加云的寿命。云寿命的增加又会导致时间平均或区域平均云反照率的增加^[58],最终影响地—气能量收支。

3.2.2 铁肥料效应

沙尘气溶胶中含有大量铁元素,这些粒子可以随着气溶胶的沉降,为海洋中一些高营养低叶绿素地区的海洋植物提供所需要的元素。研究表明,某

些地区的海洋初级生产力主要受“铁”的限制,而“铁”的主要来源是大陆粉尘^[59]。如中亚沙尘暴为北太平洋地区提供了 95% 的铁元素参加地球海洋化学循环^[60]。中亚地区频繁发生的沙尘暴通过大气环流为这一地区提供了丰富的铁元素,且大大提高了当地海域的初级生产力,而地球上 50% 以上的光和作用是由海洋的浮游植物进行的,海洋中浮游生物的增加可通过消耗更多的碳,进而使大气中的 CO_2 浓度降低,并减少大气中温室气体含量,最终可能减轻全球变暖效应^[32]。尽管这一观点有一定的猜想成分。如今,经过大批科学家的不断研究已经慢慢证实了这一假设的合理性^[61-62]。

通过上面大量分析可以看出,沙尘气溶胶对气候环境的影响有弊亦有利。石广玉等人就曾评价沙尘气溶胶是一把双刃剑^[48]。因此我们必须对各个影响效应的机理做深入的研究,趋利避害。

3.3 沙尘对降水的影响

由于冰面和水面的蒸汽压不同,冰核的增多将导致过冷液态水的冰核化。与云滴不同的是,这些冰晶成长于一个高度过饱和环境中,可以很快到达降水所需要的尺度,从而将非降水性云转化为降水性云从而增加降水量。这一过程可通过数值模拟得到支持^[58]。然而,在水汽量一定的情况下,沙尘气溶胶粒子的增加,会使云滴粒径大大变小,达不到降水所需要的尺度,从而抑制降水的产生。这种观点也得到很多验证^[58-59]。

总之,沙尘气溶胶数浓度和大气环境湿度对云的累计降水量的影响是复杂的。一般认为,在干旱背景环境下空气中沙尘气溶胶粒子浓度的增加将抑制降水的产生;在湿润背景环境下,增加沙尘气溶胶粒子的浓度将有利于降水的产生^[59]。

3.4 冰雪中沙尘浓度对地表冰雪覆盖的影响

据统计,20 世纪 50 年代,甘肃境内发生沙尘暴 5 次,60 年代发生 8 次,70 年代发生 13 次,80 年代发生 14 次,90 年代发生 23 次。沙漠化造成了河西沙区来水量减少,致使祁连山冰川局部地区雪线有所上升,最严重的地区雪线年均后退 $12.5 \sim 22.5 \text{ m}$,其它地区也以年均 $2 \sim 6.5 \text{ m}$ 的速度后退。

然而目前国内在沙尘对冰雪覆盖方面的影响的研究很少。国外,Sunil Adhikary^[63]等通过对喜马拉雅山尼泊尔地区冰川,在沙尘的覆盖下的消融状况进行研究发现,在相对比较平坦的冰面上,当初始的沙尘浓度从 0 kg/m^2 增加到 0.112 kg/m^2 时,总的

消融速度增加了大约4~5倍,然而当沙尘浓度超过 0.112 kg/m^2 时,消融速度又开始减小,这说明冰川消融最有效的沙尘浓度是 0.112 kg/m^2 ,并且这一数值不随天气状况变化而变化。这一数值也比之前一些沙尘浓度对雪消融速度的影响研究得到的最有效沙尘浓度 0.08 kg/m^2 要大^[64]。通过对返照率的研究,得出在沙尘浓度 $0 \sim 0.112 \text{ kg/m}^2$ 范围内反照率减小到 $0.15 \sim 0.22$,这一数值大大小于裸冰时的 0.39 ,并且沙尘对坡面冰川消融的影响大于平原地区。在雪的消融过程中,随着雪的消融沙尘粒子开始聚集,太阳光的加强促进了这一过程,雪表面反照率逐渐增加,雪的消融速度相应逐渐减小。

Gerhard Krinner^[65]等通过气候模式对亚洲北部地区冰雪覆盖状况与沙尘浓度关系模拟同样发现,由于矿物粉尘粒子在雪表面的沉积,导致了雪表面的反照率降低,进而促进了雪的融化,解释了亚洲北部夏季出现雪峰消失现象严重的原因。同时 John J. Drake^[66]等对沙尘覆盖对雪消融速度的影响进行了研究,得出高的沙尘浓度、低太阳辐射和大的风速降低了雪的融化速度;相反,低的沙尘浓度、强的太阳辐射和低的风速可以加快雪的消融速度。Thomas H. Painter^[67]等对雪的消融持续时间和沙尘浓度的关系研究发现,由于沙尘的作用美国圣胡安山积雪消融的持续时间缩短了 $18 \sim 35 \text{ d}$ 。

4 问题与讨论

从目前研究人员所取得的成就和现状发现,有如下几个值得科学家关注的科学问题。

(1) 起沙机制

起沙过程是十分复杂的力学过程,它涉及到重力、粘性力、碰撞、摩擦、湍流应力和对流活动等一系列力学因素^[68]。赵建华等^[69]基于风沙两相流的相互作用和气块质量变化的观点,考虑沙尘粒子与空气之间的热动力相互作用、气块质量变化造成的影响以及沙尘和空气各自独立系统的热动力变化等过程,推导出了闭合的沙尘大气物理约束方程组,得出沙尘云要比被动标量方程组揭示的更高大、内部对流更强、内部结构更复杂,边界处夹卷也更活跃。总之,对起沙机理的研究目前还是相对薄弱的,今后可以加强这方面研究,建立起相应的起沙模式。

(2) 沙尘气溶胶光学和辐射特性

IPCC 评估报告指出,在众多的气候变化影响因素中,最不确定和亟待深入认识的是气溶胶的辐射

强迫作用。而沙尘气溶胶辐射特性主要与沙尘气溶胶物理、化学和光学等自身性质有关。通过上述分析,由于来自不同区沙尘气溶胶的复折射指数不同,以及地面反照率的区域性差别,沙尘气溶胶的间接辐射强迫估算还存在很大的困难。如果今后能够精确地知道某一地区沙尘气溶胶粒子的物理、化学和光学特性及其空间分布。我们就可以从理论上对上述参数进行计算。然而这是很难精确知道的。这就要求我们一定要加强这方面的观测研究。

(3) 沙尘气溶胶的气候生态效应

前面已经讨论了沙尘气溶胶对降水的影响,但由于受各种因素的影响对气溶胶冰相云效应的观测和研究依然很不充分。对气溶胶传输过程中的内部混合问题,即气溶胶之间相互影响也需要进一步的研究。

在对海洋生态环境的影响方面,沙尘气溶胶粒子携带铁元素,经过风蚀扬升—远程输送,然后经过沉降为海洋提供营养物质,影响海洋初级生产力。影响空气中 CO_2 含量,从而对全球气候产生影响,这是一个非常复杂的过程。它涉及沙尘释放、远程输送到沉降等过程。有好多问题等待解决,如:各个海域沙尘气溶胶来源的分析、远程输送的大气环流分析、在输送过程中的沉降和粒子性质的变化以及沙尘气溶胶对区域气候的影响机理还缺乏深入研究。

参考文献:

- [1] 成天涛,吕达仁,陈洪滨,等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的粒谱特征[J]. 大气科学, 2005, 29: 147 - 153.
- [2] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学分析[J]. 中国科学, 1984(3): 278 - 288.
- [3] 张小曳,沈志宝,张光宇,等. 青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(2): 147 - 153.
- [4] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asiandust emission [J]. Geophys Res, 2003, 30(24): 2272. doi: 10.1029/2003GL018206.
- [5] 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.
- [6] Duce R A. Sources, distributions and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate [A]. Aerosol Forcing of Climate [M]. Charlson R J, Heintzenberg J, Eds. New York: John Wiley, 1995. 43 - 72.
- [7] Ridgwell A J. Feedback in the earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea [J]. IGBP Global Change Newsletter, 2002, 360: 2905 - 2924.
- [8] Martin J H. Glacial - interglacial CO_2 change: The iron hypothesis

- [J]. *Paleoceanography*, 1990, 199(5): 1-13.
- [9] 黄美元,王自发. 东亚地区黄河长距离输送模式设计[J]. *大气科学*, 1998(22): 625-637.
- [10] Hankin E H. On dust raining wind sad descending currents[A]. *India Met Memoirs*[C]. 1921, 22.
- [11] Idso S B, Ingram R S, Pritchard J M. An Ameriean Haboob[J]. *Bull*, 1972, 50: 930-935.
- [12] Josepl P V, Ralpal D K, Deka S N. "Andhl". the convective dast storms of Northwesr India[J]. *J Mausam*, 1980, 31: 431-442.
- [13] 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.
- [14] 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[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(2): 106-111.
- [15] 钱正安,贺慧霞,瞿章,等. 我国西北沙尘暴的分级标准: 中国沙尘暴研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997. 1-10.
- [16] Zhou M Y, Chen Z, Hunag R, et al. Effects of two dust storms on solar radiation in the Beijing-Tianjin area[J]. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(24): 2697-2700.
- [17] 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.
- [18] 石广玉,赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题[J]. *大气科学*, 2003, 27(4): 591-603.
- [19] Zhang X Y, Gong S L, Zhen Z X. Characterization of soil dust qerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia 2: 1. Network observations[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108, (D9): 8032-8039.
- [20] Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. Characterization of soil dust aerosol in China and its tuansprot/distribrion during 2001 ACE-Asia :2. Model Simulation and Validation[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(D9): 4262. doi: 10.1029/2002JD002633.
- [21] 周自江,章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954-2002)[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 1224-1228.
- [22] 方小敏,韩永翔,马金辉,等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积—以2003-03-04拉萨沙尘天气过程为例[J]. *科学通报*, 2004, 49(11): 1082-1090.
- [23] 韩永翔,奚晓霞,宋连春,等. 青藏高原沙尘及其可能的气候意义[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(5): 588-592.
- [24] Zhang Xiaoye. Review on sources and transport of loess materials on the Chinese loess plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 181-186.
- [25] 王存忠,牛生杰,周悦. 中国风蚀起沙研究进展[J]. *气象*, 2009, 11(35): 107-116.
- [26] 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): 2327-2334.
- [27] Shao Yaping. *Physics and Modeling of Wind Erosion*[M]. London: Kluwer Academic Publishers. 2000.
- [28] Shao Y, Lu H. A simple ex pression for wind erosion threshold friction velocity [J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 224372-22443.
- [29] Shao Y. A model for mineral dust emission [J]. *J Geophys Res*, 2001, 106: 20239-20254.
- [30] Lu H, Shao Y. A new model for dust emission by salt at ion bombardment [J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 168272-16841.
- [31] 曾庆存,程雪玲,胡非. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理气候与环境研究[J]. 2007, 3(12): 244-250.
- [32] Duce R A, Unni C K, Ray B J, et al. Long range at mospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: temporal variability[J]. *Science*, 1980, 209: 1522-1524.
- [33] 高卫东. 新疆土壤元素含量特征及其对沙尘气溶胶贡献分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(8): 155-158.
- [34] 庄国顺,郭敬华,袁蕙,等. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响[J]. *科学通报*, 2001, 46(03): 191-197.
- [35] Zhao T L, Gong S L, Zhang X Y, et al. Asian dust storm influence on North American ambient PM levels: observational evidence and controlling factors[J]. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 2717-2728.
- [36] 牛生杰,章澄昌,孙继明. 贺兰山地区沙尘暴若干问题的观测研究[J]. *气象学报*, 2001, 59(2): 196-205.
- [37] 张文煜,辛金元,袁九毅,等. 腾格里沙漠气溶胶光学厚度多波段遥感研究[J]. *高原气象*, 2003, 22(6): 613-617.
- [38] 成天涛,沈志宝. 中国西北大气沙尘光学特性的数值实验[J]. *高原气象*, 2001, 20(3): 291-297.
- [39] Xia x A, Chen H B, Wang P C, et al. Aerosol properties and their spatial and temp oral variations[J]. *Tellus*, 2005, 57(1): 28-39.
- [40] Costa M J. Aerosol optical thickness determination and classification; rse of Meteosat GOME and modeled data[A]. *Proceedings of "The 2000 ERMETSAT Meteorological Satellite Data Users Conference*[C]. EUMETSAT", 420-427.
- [41] Higurashi A. Asrudy of global aerosol optical climatology wihe two-channel AVHRR remote sensing[J]. *CLMATE*, 2001, 13, 2011-2027.
- [42] Kanfman Y J, Taner, Didier, et al. Absorption of sunlight by dust as inferred from satellite and ground based remote sensing, geophysical research[J]. *Letters*, 2001, 28: 1479.
- [43] Torres, Bhartia P K, Herman J R, et al. A long term record of aerosol optical thickness from TOMS observations and comparison to AERONET measurements[J]. *Atmos Sci*, 2002, 59: 398-413.
- [44] Levin Z, Joseph J H, Mekler Y. Properties of Sharav (khamsein) dust - comparison of optical and direct sampling data, 1980[J]. *Atmos Sci*, 1980, 37: 882-891.
- [45] Penner J E, S Y Zhang. Comparison of the TOMS AL and model results for biomass burning [J]. *AGU 2002 Fall Meeting*, F191, 2002.
- [46] Huang Jianping, Minnis Patrick, Yi Yuhong, et al. Summer dust-aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34. L18805, doi: 10.1029/2007GL029938.
- [47] Tegen I, Lacis A A, Fung I. The influence on climate forcing of mineral aerosols from disturbed soils [J]. *Nature*, 1996, 380: 419-422.
- [48] 石广玉,王标,张华,等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.
- [49] 胡隐樵,光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. *大气科学*, 1997, 21(5): 581-589.
- [50] 孔丹,何清,张瑞军,等. 塔克拉玛干沙漠腹地春季一次沙尘暴沙尘气溶胶的辐射特性[J]. *干旱气象*, 2008, 26(2): 36-41.

- [51] 成天涛,沈志宝. 中国西北大气沙尘的辐射强迫[J]. 高原气象, 2002(10): 473-479.
- [52] 成天涛,吕达仁,徐永福. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的辐射强迫[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 920-926.
- [53] 张强,王胜. 特强沙尘暴(黑风)的形成及其效应[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 675-681.
- [54] 康富贵,李耀辉. 2010年春季民勤沙地近地面沙尘气溶胶浓度特征[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(6): 6-12.
- [55] 刘治国,奚晓霞. 兰州市区 2002年春季3~4月近地层大气气溶胶的监测与分析[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 49-54.
- [56] 辛金元,张文煜,袁九毅,等. 沙尘气溶胶对直接太阳辐射的衰减研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 311-315.
- [57] Yin Y, Levin Z, Reisin T G, et al. The effects of giant cloud condensation nuclei on the development of precipitation in convective clouds—a numerical study[J]. Atmos Res, 2000, 53: 91-116.
- [58] 康凤琴,银燕,张逸轩. 中国北方沙尘气溶胶对云和降水影响的数值模拟研究[J]. 气象, 2009, 35(6): 36-45.
- [59] 韩永翔,陈勇航,方小敏,等. 沙尘气溶胶对塔里木盆地降水的可能影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 102-106.
- [60] Ridgwell A J. Feedback in the earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea[J]. IGBP Global Change Newsletter, 2002, 360: 2905-2924.
- [61] 韩永翔,宋连春,赵天良,等. 北太平洋地区沙尘沉降与海洋生物兴衰的关系[J]. 中国环境科学, 2006, 26(2): 157-160.
- [62] 邓祖琴,韩永翔,白虎志,等. 中国大陆沙尘气溶胶对海洋初级生产力的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(10): 872-876.
- [63] Sunil Adhikary, Masa yoshi Nakawo, Katsumoto Seko, et al. Dust influence on the melting process of glacier ice: experimental results from Lirung Glacier, Nepal Himalayas [A]. Debris - Covered Glaciers (Proceedings of a workshop held at Seattle, Washington, USA, September 2000). IAHS Publ. no. 264, 2000.
- [64] Adhikary S Seko, Nakawo K, Ageta M, et al. Effect of surface dust on snow melt. Bulletin of Glacier Research [J]. Bull Glac Res, 1997, 15: 85-92.
- [65] Gerhard Krinner, Olivier Boucher, Yves Balkanski. Ice-free glacial northern Asia due to dust deposition on snow [J]. Climate Dynamics, 27(6): 613-625. DOI: 10.1007/s00382-006-0159-z.
- [66] John J Drake. The effects of surface dust on snowmelt rates [J]. Arctic and Alpine Research, 1981, 13(2): 219-223.
- [67] Thomas H Painter, Andrew P Barrett, Christopher C. Landry et. Impact of disturbed desert soils on duration of mountain snow cover. Geophysical Research Letters, Vol. 34, L12502, 6. 2007 doi: 10.1029/2007GL030284.
- [68] 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.
- [69] 赵建华,张强. 沙尘大气物理约束方程研究[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8954-8967.

Review of Study on Dust Aerosol in Northwest China

KANG Fugui^{1,2}, LI Yaohui²

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change and disaster Reducation, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The effect of dust aerosol on climate has become one of the hot topics about global climate change. The thesis summarized all-sidedly the research achievements of Chinese north-west researchers in the dust area over the past 10 years, including dust resource area, start-up mechanism of sand particles, light and chemical properties and radiative climate effects of dust aerosol. Some scientific problems prospected in the future study of dust aerosol.

Key words: dust aerosol; start-up mechanism of sand particles; light and chemical properties; radiative climate effects