

黄土高原地区沙尘气溶胶对降水的影响

— 以 2004 年 3 月 9~11 日沙尘暴天气过程为例

罗双^{1,2}, 王鑫¹

1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃兰州 730000 ;

2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要

本文利用携带有CERES和MODIS的TERRA\AQUA卫星所获得的联合探测资料以及地面台站资料, 分析黄土高原地区有沙尘区域和无沙尘区域, 即沙尘区和纯云区云的微物理特性。通过对2004年沙尘天气个例进行不同区域的对比分析, 研究了沙尘气溶胶—云—降水的相互作用系统, 进一步明确了沙尘气溶胶影响气候变化的物理机制。研究结果表明: (1) 沙尘气溶胶对云的冰晶核直径和有效粒子半径的影响作用为减小作用, 其原因在于沙尘气溶胶作为云的凝结核, 它的出现可以使云凝结核数量明显增大, 又由于水汽总量不变, 导致附着在每个云凝结核上的水含量普遍减小, 从而使得云的冰晶核直径普遍减小, 这种变化进而会影响云的其他光学特性及云的生命周期; (2) 沙尘气溶胶对冰晶云的光学厚度所起的减小作用, 其原因可能为随着沙尘气溶胶数量的增多, 冰晶云粒径变小, 且云滴衰减截面减小的影响程度大于云滴数量增多的影响程度, 从而导致云的光学厚度变小; (3) 沙尘气溶胶的存在使云中的云水路径减小, 这是由于在中低大气层中, 沙尘气溶胶和云混合后, 干的沙尘减少了云中湿度, 进而改变了云的云水路径; (4) 由于沙尘的高度明显比云低, 因此有沙尘区域比纯云区有效云顶温度高; (5) 沙尘云集中在较小的云粒径、云水路径和光学厚度范围内, 而较大的云粒径、云水路径和光学厚度值在纯云区出现的频率远高于沙尘云区, 这可以作为判别沙尘区和纯云区的参考因子。总而言之: 沙尘天气增加了大气中的气溶胶, 也增加了云凝结核的数目, 导致小云滴浓度增大, 云滴半径显著减少而无法达到形成降水的阈值, 且影响云滴碰并, 阻碍降水的发展, 抑制了降水, 改变了降水形成的物理过程和降水量分布, 这就是扬沙、沙尘暴等沙尘天气对黄土高原半干旱地区气候产生的重要影响。研究证实沙尘气溶胶粒子浓度的变化会影响云的微物理特性, 进而改变降水形成的物理过程和降水量分布。由于气溶胶同云滴之间的关系复杂, 所以具体的定量关系还有待于更多的观测和对微物理过程的进一步研究。

关键词: 黄土高原地区, 沙尘气溶胶, MODIS, CERES, 云物理量, 降水

1 引 言

气溶胶是由悬浮在大气中直径小于 $10\ \mu m$ 的固态和液态粒子组成的多相体系。大气气溶胶作为大气水圈循环中的一个有机部分, 主要影响云和降水的微物理过程, 同时也影响大气稳定度和云的反照率。气溶胶粒子可以作为一种云凝结核和冰核在云雨形成和增长过程中起

重要作用,它不但可以增强或减弱降雨量,并且可以改变云雨的类型,如可使非降水性云转换成降水性云(丁一汇,2009)。

沙尘气溶胶是由于沙尘天气造成的一种大气气溶胶,同时也是对流层气溶胶的主要成分。我国沙尘气溶胶主要来源于新疆、甘肃、内蒙的沙漠以及黄土高原等干旱和半干旱地区(王鑫,2009)。每年春季大量沙尘气溶胶随沙尘天气进入到大气中,并且在一定的大气环流背景下输送到上千公里以外的人口密集地区。

沙尘气溶胶对气候的影响通过以下三种方式来对气候进行反馈:第一种是沙尘气溶胶的直接效应(Jaffe等,2003),包括散射和吸收太阳辐射、吸收和发射红外辐射。沙尘气溶胶悬浮在大气中,通过散射和吸收太阳辐射,从而冷却大气,并会使大气的能见度变坏;另一方面却能通过微粒散射、漫射和吸收一部分太阳辐射,减少地面长波辐射的外逸,使大气升温。其对气候系统、环境和人类健康具有重要影响。第二种是沙尘气溶胶的间接效应(Huang等,2006),沙尘气溶胶与水相云相互作用改变其散射特性,对云量和云生存周期产生影响。沙尘气溶胶还可以作为云的凝结核,在大气中改变云滴的浓度和云滴在大气中存在的时间,改变云形成的微观结构,从而改变云的光学特性和云的分布,间接影响气候。第三种是近年来关于沙尘气溶胶的半直接效应(王鑫,2009)的研究,沙尘气溶胶能够吸收太阳辐射,加热沙尘气溶胶本身,使得低层大气中的水汽可以被沙尘气溶胶蒸发,导致低层大气中的水汽含量降低。

贾璇等(2010)采用 CERES SSF MODIS Edition 1B 和 CALIPSO 卫星探测资料结合地面台站沙尘观测资料,研究了我国华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响;黄梦宇等(2005)对1990和1991年春秋两季层状云探测的分析结果表明,云下气溶胶数浓度与云滴数浓度存在正相关;Givati 和 Rosenfeld(2004)利用高山站及其附近的平原站的降水量之比—地形强化因子(Ro)研究了 California 和以色列冷季的地形云降水受气溶胶的影响,研究表明受气溶胶的影响,其降水量减少了15 %-25 %;Lynn等(2007)利用显式微物理云模式模拟气溶胶对内华达山脉地形云降水的抑制作用,证明了 Givati 和 Rosenfeld(2004)提出的影响机制的可信性;California 的飞机探测(Rosenfeld,2006)表明人类活动产生的气溶胶确实与云发生了相互作用,抑制了降水的形成过程;韩永翔等(2008)从天气学理论上研究得到,降水和沙尘暴天气相伴而生,而在年际时间尺度以上,沙尘暴发生日数与降水存在显著的负反馈机制;Levi等(1996)以及Sassen(2002)认为,沙尘天气的爆发使大气冰核浓度增加;Huang等(2006)对受沙尘影响和未受沙尘影响地区的云进行研究认为,干燥地区沙尘气溶胶参与云中的微物理过程可减小冰晶的有效半径,缩减卷云的冰水通道,降低云的光学厚度;Levin等(2005)和Teller等(2006)结合地中海地区观测到的沙尘暴过程,采用云模式研究认为,当沙尘天气增加IN浓度时,抑制了大陆性降水的发展;陈丽等(2007)采用二维分档云模式模拟扬沙和沙尘暴天气对云宏微观物理过程及降水形成的影响;康凤琴等(2009)利用数值模拟研究方法探讨不同干燥程度的大气背景环境下,沙尘气溶胶数浓度对混合云形成和发展的可能影响,其结果表明:沙尘气溶胶的增加导致降水减少、延长了云在空中存在的时间,改变了云的空间结构和微观结构。

此外,不同区域气象条件的不一致,会造成气溶胶间接效应的差异,这一点已被模拟所证实。如Takemura等(2007)利用全球模式的模拟结果指出云水随气溶胶的变化具有明显的地域性。本文讨论的仅是黄土高原半干旱地区气溶胶的间接气候效应,即扬沙、沙尘暴天气对云微物理量进而对降水造成的影响。

2 资料及处理方法

2.1 资料简介

地面台站资料来自中国气象科学数据共享服务网提供的中国沙尘暴序列及其支撑数据集,从而获得了2004年沙尘天气概况以及2004年3月9~11日沙尘暴天气过程的历史实况气象要素和影响范围。

此外,研究所采用的卫星资料来源于美国 NASA(美国航天宇航局的简称)网站。由于气溶胶间接效应涉及到气溶胶和云两种不同物理量,并且它们无法完全被卫星同步观测。为避免这种局限性,本文采用美国极轨卫星 TERRA\AQUA 获取的 CERES(云和地球辐射能量系统)和 MODIS(中分辨率成像光谱仪)探测资料,并对其进行处理后获得 CERES_MODIS 联合数据。该数据集提供了地球表面和大气层顶辐亮度、地表反射率和辐射通量的瞬时观测值,以及卫星扫描范围内晴空参数和云参数(刘玉洁等,2001)。

2.2 处理方法简介

要从影响降水的诸多因素中找出沙尘气溶胶对降水的影响量,需在受沙尘气溶胶影响程度高的地方选择一个影响站,再在其附近受气溶胶影响程度低的地方选取对比站。由于影响站和对比站的天气和环流形势非常相似,影响站与对比站云微物理量特征参数的变化就可以反映沙尘气溶胶对降水的影响。

利用气象卫星沙尘监测图像和地面台站资料相结合选取了2个区域,对无沙尘条件下和沙尘天气过程中伴随的云的微物理特性的变化进行对比分析。这2个区域分别是:有沙尘存在的大量云区,用COD表示和不受沙尘影响的云区,用CLD表示。文中涉及的云的微物理特征参数包括:云冰晶核直径(De)、冰晶云的光学厚度(ICE_OPD)、云水路径(IWP)、有效粒子半径(Re)、有效云顶温度(Te)。

3 个例分析

春季是我国沙尘天气的多发期,每年春季影响我国北方地区冷空气的势力和频次的不同及地表条件的差异,造成各年春季沙尘天气的多发时段也有明显差异。2004年春季由于我国北方地区冷空气活动比较活跃,气温异常偏高、大部分地区气温回暖迅速以及同期降水少数气候条件影响(牛若芸,2007),我国北方地区沙尘天气过程次数接近近5年同期平均值,且比去年同期偏多。总体而言,2004年春季(3~5月),我国共出现了18次沙尘天气过程,其中1次强沙尘暴天气过程、5次沙尘暴天气过程、12次扬沙天气过程(矫梅燕,2005)。我国北方大部地区出现了沙尘天气,沙尘暴主要发生在南疆盆地、青海西北部和东部、甘肃西部、宁夏北部、内蒙古大部以及吉林西部等地(牛若芸,2007)。

选取2004年3月9~11日的一次沙尘暴天气过程作为分析个例。

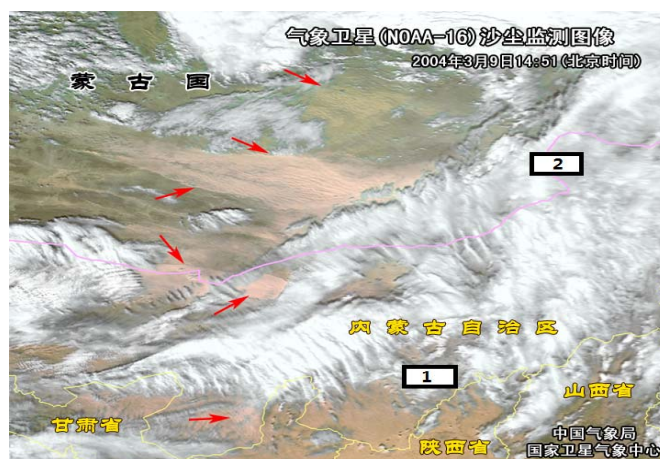


图1 2004年03月09日气象卫星沙尘监测图像

Figure 1. The satellite image of sandstorm monitoring On March 9, 2004 by NOAA-16

图1是2004年03月09日气象卫星沙尘监测图像。图中的白色区域是雪和云,黄褐色区域是沙尘区,在监测图上还可以清晰的看到成片的云漂浮在成片的黄色沙尘之上。受蒙古气旋冷锋的影响,青海西北部、内蒙古大部、甘肃中北部、宁夏、陕西北部、山西北部等地出现了扬沙。其中青海西北部、内蒙古中西部和东部偏南地区、甘肃西北部、宁夏北部等地出现了沙尘暴或强沙尘暴(曾庆存等,2006)。2004年3月9~11日为该年影响范围最广的一次沙尘天气过程,该过程的最大风速为20米/秒,最小能见度只有100米,沙尘暴先后影响了南疆盆地东部、青海西北部、内蒙古中西部和东部偏南地区、甘肃西北部、宁夏北部等地以及辽吉两省西部的局部地区,涉及到我国北方大部分地区以及长江中下游的部分地区,其中在甘肃:鼎新,内蒙古:苏尼特左旗、海力素、乌拉特中旗出现强沙尘暴(矫梅燕,2005)。

为对无沙尘条件下和沙尘天气过程中伴随的云的微物理特性的变化进行对比分析,选取两个区域,其中图1中所画区域1代表有沙尘存在的大量云区,用COD表示;图1中所画区域2表示不受沙尘影响的云区,用CLD表示。

图2~图6分别为从2004年03月09日数据资料得到的云冰晶核直径(De)、冰晶云的光学厚度(ICE_OPD)、云中云水路径(IWP)、云的有效粒子半径(Re)和有效云顶温度(Te)频率分布图。(备注:下列柱状图中深色部分表示COD,浅色表示CLD)。

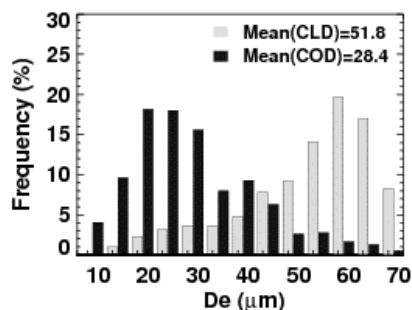


图2 CLD和COD关于 De 的频率分布比较

Figure 2. Comparison of frequency distribution over the pure cloud region(CLD) and cloud over dust region(COD) for ice diameter(De)

图 2 是所选两个区域云的冰晶核直径 D_e 分布频率。可以看出, CLD 区 D_e 平均值为 $51.8 \mu m$, COD 区 D_e 平均值为 $28.4 \mu m$, 前者比后者大了 $23.4 \mu m$ 。而且大的 D_e 值在 CLD 区比较密集, 即出现的概率稍大一些, 在 COD 区比较少, 即出现的概率稍小一些; 而小的 D_e 值在 CLD 区出现的概率则相对偏小一些, 在 COD 区出现的概率相对偏大一些。这说明沙尘气溶胶可以作为云的凝结核使云滴尺寸变小。

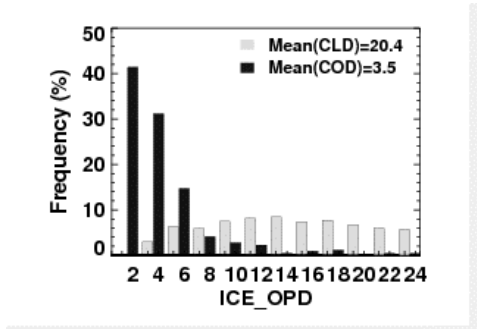


图 3 CLD 和 COD 关于 ICE_OPD 的频率分布比较

Figure 3. Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD) and cloud over dust region (COD) for optical depth (ICE_OPD)

在图 3 中, CLD 区冰晶云的光学厚度平均值为 20.4, COD 区冰晶云的光学厚度平均值为 3.5, 前者比后者分别大了 16.9。可以看出, CLD 区 ICE_OPD 值在各区间分布频率变化不大; 同时, 冰晶云的光学厚度值越小, 在 COD 区出现的概率越大, 最大达到 40% 左右; 冰晶云的光学厚度值越大, 在 CLD 区出现的概率较 COD 区就越大。

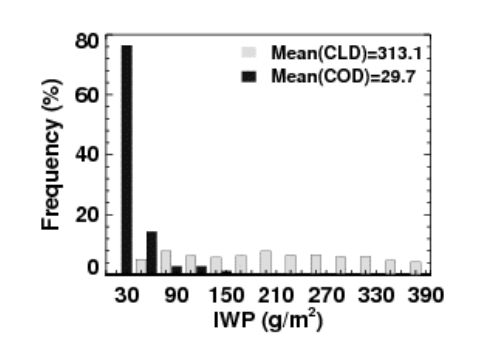


图 4 CLD 和 COD 关于 IWP 的频率分布比较

Figure 4. Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD) and cloud over dust region (COD) for ice water path (IWP)

中尺度水分和动力条件是云水路径形成和增长的重要因素, 他们决定了云水路径的强度和大小, 而沙尘气溶胶的存在必然会影响到中尺度的水分和动力条件, 也就导致了云水路径的变化。为了更清楚的了解沙尘气溶胶对云水路径的影响, 我们分析在卫星云图上 CLD 和 COD 两个区域上 IWP 的差异对于固态水微物理特征的影响。

由 2004 年 03 月 09 日的卫星观测资料分析所得到 IWP 的图表 (图 4) 可知: CLD 区的 IWP 均值为 $313.1 g/m^2$, COD 区中的 IWP 均值为 $29.7 g/m^2$, 也就是 CLD 区中的 IWP 比 COD 中大 $283.4 g/m^2$ 。很明显, IWP 越小, 在 COD 区中出现的概率就越大。这说明在中低大气层中, 沙尘气溶胶和云混合后, 干的沙尘减少了云中湿度, 进而改变了云的云水路径, 因此沙尘气溶胶的存在使云中

的云水路径减小，从而改变了云的微物理特征。

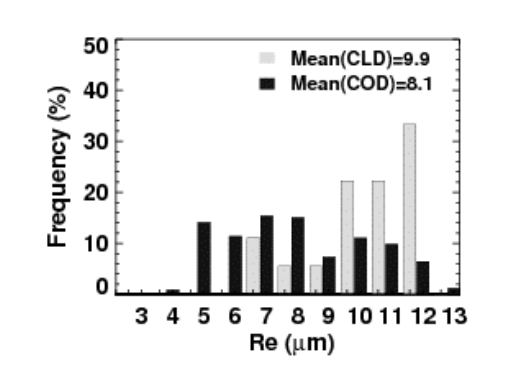


图5 CLD 和 COD 关于 Re 的频率分布比较

Figure 5. Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD) and cloud over dust region (COD) for effective radius (Re)

在图 5 中，CLD 区 Re 平均值为 $9.9 \mu m$ ，COD 区 Re 平均值为 $8.1 \mu m$ ，前者比后者大了 $1.8 \mu m$ 。可以看出大的 Re 值在 CLD 区比较密集，即出现的概率稍大一些，在 COD 区比较少，即出现的概率稍小一些；而小的 Re 值在 CLD 区出现的概率则相对偏小一些，在 COD 区出现的概率相对偏大一些。

从上述分析可知：沙尘气溶胶对云粒子有效半径的影响作用为减小作用。其原因为沙尘天气向大气中输送的沙尘气溶胶颗粒可分为可溶性和不可溶性，当把不可溶矿物气溶胶粒子作为有效的云凝结核参与云降水形成的物理过程时，它的出现使云凝结核数量明显增大，又由于水汽总量不变，导致附着在每个云凝结核上的水含量普遍减小，从而使得云粒子的有效半径普遍减小。云滴粒径变小将影响粒子间的碰并，使云的生命史延长，那么云滴长大到能形成降水的粒径大小需要更长的时间，甚至造成不能形成降水，这就是沙尘气溶胶对降水的抑制作用。

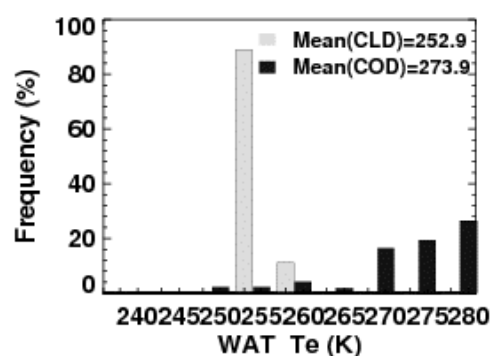


图6 CLD 和 COD 关于 Te 的频率分布比较

Figure 6. Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD) and cloud over dust region (COD) for effective cloud top temperature (Te)

在图6中，CLD区Te平均值为 $252.9K$ ，COD区Te平均值为 $273.9K$ ，后者比前者分别大 $21.0K$ ，两者非常接近，但COD区比CLD的Te值稍大。实际上Te是红外光区的亮温，由于COD区以沙尘为主，沙尘的高度明显比云低，因此COD区均值要高于CLD区的均值。此外，李建云（2010）

对这种区别的解释是沙尘层中短波辐射加热率大于长波辐射冷却率,从而导致沙尘层及以下大气增温。由于两者之间的关系存在着许多不确定因素,因而还需要更多的观测资料进行更加深入的研究。

4 结论和讨论

4.1 结论

本文利用卫星探测资料,分析讨论了2004年的沙尘天气个例中沙尘气溶胶对云的五个微物理特性参数的影响作用。由于CLD区和COD区的气象条件相似,因此初步考虑云物理量的不同源于沙尘的影响是可行的。在研究中得到以下结论:

- (1) 沙尘气溶胶使云的冰晶核直径减小。
- (2) 沙尘气溶胶使云的光学厚度减小。
- (3) 沙尘气溶胶使云中云水路径减少。
- (4) 沙尘气溶胶使云粒子的有效半径减小。
- (5) 沙尘气溶胶使有效云顶温度增大,但增幅并不十分明显。
- (6) 沙尘云集中在较小的云粒径、云水路径和光学厚度范围内,而较大的云粒径、云水路径和光学厚度值在纯云区出现的频率远高于沙尘云区,这可以作为判别沙尘区和纯云区的参考因子。

气溶胶对降水的影响主要是通过云凝结核实现的,沙尘天气增加了大气中的气溶胶,也增加了云凝结核的数目,导致小云滴浓度增大,云滴半径显著减少而无法达到形成降水的阈值,且影响云滴碰并,阻碍降水的发展,从而抑制了降水,改变了降水形成的物理过程和降水量分布,这就是扬沙、沙尘暴等沙尘天气对黄土高原半干旱地区气候产生的重要影响。

4.2 讨论

本文只是将沙尘监测图像划分了两个区域,即只对不受沙尘影响的云区和有沙尘存在的云区进行了分析,但实际上,还存在无云存在的沙尘区和有少量云存在的沙尘区未列入讨论,所以本研究存在一定的局限性。而且由于气象卫星遥感监测沙尘受众多因素的影响,这会使作者划分出不太准确的沙尘云区,最终造成计算结果产生偏差。

云图是一个平面结构,没有垂直信息,所以不能保证沙尘气溶胶和云是同一高度,可能它们是在不同高度混合在一起的,这也将给研究带来一定的不确定性。

本文只是对个例进行了分析,针对沙尘对降水的作用缺乏系统性的总结。这一部分在以后的工作中将会进一步完善,同时由于云滴同气溶胶之间的关系复杂,所以具体的定量关系还有待于更多的观测和对微物理过程的进一步研究。

备注: 此篇文章为2009年以后完成的科研成果,被第五届海峡两岸遥感/遥测会议(2011)作为会议论文接收(非密级),未在其他学术刊物上公开发表。

参考文献

- 1 丁一汇. 大气气溶胶通过改变水循环实现在水资源的影响. CHINA WATER RESOURCES, 2009. 2009. 19
- 2 王 鑫. 黄土高原地区沙尘气溶胶的综合观测研究. 研究生学位论文. 兰州大学, 中国. 2009.
- 3 Jaffe, D., J. Snow, O. Cooper, The 2001 Asian dust events: transport and impact on surface aerosol concentrations in the US, 2003: Eos., 84, 501-506
- 4 Huang J-P., B. Lin, p. Minnis, et al., Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia, Geophys. Res. Lett., 2006a: 33, doi: 10.1029/2006GL026561
- 5 贾 璇等. 华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响. 中国环境科学, 2010. 30(8): 1009—1014
- 6 黄梦宇, 赵春生, 周广强, 等. 华北地区层状云微物理特性及气溶胶对云的影响. 南京气象学院学报, 2005. 28: 360~368
- 7 Givati A, Rosenfeld D. Quantifying precipitation suppression due to air pollution. J. Appl. Meteor., 2004. 43: 1038~1056
- 8 Lynn B, Khain A, Rosenfeld D, et al. Effects of aerosols on precipitation from orographic cloud. J. Geophys. Res., 2007. 112, D10225, doi: 10.1029/2006JD007537
- 9 Rosenfeld D. Aerosols suppressing precipitation in the sierra nevada: Results of the 2006 winter field campaign. 2006. <http://www.climatechange.ca.gov/events>
- 10 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. 中国环境科学, 2008. 28(2): 102-106
- 11 Levi Y, Rosenfeld D. Ice nuclei, rainwater chemical composition, and static cloud seeding effects in Israel [J]. J Appl Meteorol, 1996. 35 (9) : 1494-1501.
- 12 Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms [J]. Geophys Res Lett, 2002. 29 (10) : 1465, doi:10.1029/2001GL014051.
- 13 Huang J P., Minnis P, Lin B, et al., Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [J].: Geophys Res Lett, 2006b 33 (5) :L06824, doi: 10.1029/2005GL024724.
- 14 Levin Z, Teller A, Ganor E, et al. On the interactions of mineral dust, sea salt particles and clouds – Measurements and Modeling study from the MEDEX campaign [J]. J Geophys Res, 2005. 110, D20202, doi: 10.1029/2005JD005810.
- 15 Teller A, Levin Z. The effects of aerosols on precipitation and dimensions of subtropical clouds: A sensitivity study using a numerical cloud model[J]. AtmosChemPhys, 2006. 6: 67280.
- 16 陈 丽, 银 燕, 杨 军, 等. 沙尘气溶胶对云和降水影响的模拟研究. 南京气象学院学报, 2007. 第30卷, 第5期
- 17 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. 气象, 2009. 第35卷, 第6 期
- 18 Takemura, T., et al. Two competing Pathways of aerosol effects on cloud and Precipitation formation, Geophys Res Lett, 2007. 34, doi:10.1029/2006GL028349.
- 19 刘玉洁, 杨忠东等. 《MODIS遥感信息处理原理与算法》. 北京: 科学出版社, 2001: 1-3
- 20 牛若芸. 2004年春季沙尘天气分析. 气象科技, 2007. 第35 卷第1 期
- 21 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 《千里黄云—东亚沙尘暴研究》. 北京: 科学出版社, 2006.
- 22 矫梅燕等. 《沙尘天气年鉴-2004年》. 北京: 气象出版社, 中国气象局编. 2005. 1-7
- 23 李建云. 中国地区春季沙尘气溶胶短波辐射气候效应数值模拟研究. 气象与减灾研究, 2010. 第33卷第4期 1007-9033 (2010) 04-0023-08