

文章编号:1001-8166(2010)增-0188-11

利用 MODIS 和 OMI 资料研究中国半干旱地区 沙尘气溶胶对暖云的影响*

陈思宇,黄建平,刘晶晶,于海鹏,王鑫,王蕾迪

(兰州大学大气科学学院 半干旱气候变化教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:通过分析 2006 年和 2010 年春季中国半干旱地区沙尘气溶胶对云的影响,发现这两年沙尘气溶胶对暖云的辐射强迫机制有所不同。在 2006 年春季沙尘气溶胶对云的影响主要表现为沙尘的半直接效应:随着吸收性气溶胶光学厚度的增加,云顶温度增长约 3 K,云滴有效粒子半径迅速减小约 5 μm ;当吸收性气溶胶光学厚度比较大的时候,云分数同样呈现出减少趋势。在 2010 年春季沙尘气溶胶对云的影响主要表现为沙尘的间接效应:随着吸收性气溶胶光学厚度的增加,云顶温度减小 10 K 左右,云分数增长约 0.5,云滴有效粒子半径的减小趋势很弱。发现湿度的差异使每个沙尘粒子分配得到的水汽含量不同,这是导致这两年沙尘气溶胶不同的辐射强迫机制的主要原因。值得注意的是,沙尘气溶胶不同的吸收性和垂直分布等因素也可能影响这两年春季沙尘—云的关系,但是由于 OMI 不能提供更精细的遥感数据,所以没有进一步的详细论证。

关键词:半干旱地区;沙尘气溶胶;暖云;MODIS;云微物理性质

中图分类号:P404 **文献标志码:**A

1 引言

我国约 42% 的国土面积处于干旱、半干旱区,而干旱、半干旱地区约占我国西部地区面积的 83%^[1]。这些地区降水量少,降水变化率大,年内分配不均,空气干燥,地表蒸发量大,生态系统非常脆弱,对气候变化十分敏感且调节适应能力差。异常的气候变化使我国干旱半干旱地区水资源时空分布不均,加剧了水资源供需矛盾;改变了农业生产格局^[2,3],加快草地退化^[4],让牧草产量、质量有所下降^[5],破坏草原生态系统原有平衡;荒漠化区域范围扩大,极端天气事件增多^[6,7]。近几十年来,随着人口的急剧增加以及人类社会经济活动的迅速发展,人类对干旱、半干旱地区环境的影响力愈来愈大。滥垦、滥牧、滥伐、滥采以及滥用水资源等人类活动使地表植被大面积减少和退化,再加上全球变

暖引起中国北方的气候干旱,致使该地区沙尘暴频繁发生。沙尘严重影响到人们正常的生产和生活秩序,对人类的健康也造成严重威胁,伴随沙尘天气出现的沙尘气溶胶已成为一个重要的地球环境问题。因此半干旱地区沙尘气溶胶对当地气候影响的研究是半干旱地区经济和环境可持续发展计划中极为重要的一步。

一般而言,沙尘气溶胶主要通过以下途径影响云:

(1) 间接效应:沙尘气溶胶作为云凝结核或者冰核,当沙尘气溶胶浓度增加时可导致云滴浓度增加,但使云滴粒子变小,从而导致云反照率变大。同时还可以减少降水的形成,延长云的生命期,使云量增加,进而间接影响地—气系统的能量收支^[8~13]。

(2) 半直接效应:沙尘气溶胶是一种吸收性气溶胶,它会将其吸收的太阳辐射能作为热辐射重新

* 收稿日期:2010-10-15;修回日期:2010-11-12.

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目“黄土高原半干旱区气溶胶对陆—气间相互作用影响的观测”(编号:40633017)资助.

作者简介:陈思宇(1984-),女,上海人,博士研究生,主要从事气溶胶和云、降水相互作用的研究. E-mail:chensy04@lzu.cn

向外释放,从而加热气团、增加相对于地表的静力稳定性,造成云量和云反照率的减小,进而影响气候^[14~20]。

目前有关气溶胶对云影响的研究很多,但同时也留给我们很多不确定性的问题。为什么在观测中有时可以很清晰地发现气溶胶对云的这种辐射强迫效应,有时这种影响却不存在?比如说有些观测表明,间接效应主要发生在层状云而不是在积状云中^[21,22]。但一些研究却认为这种辐射效应很明显地存在于积状云中^[23,24]。于是近年来有些学者认为,气溶胶的辐射强迫机制不仅与气溶胶的粒子尺度和成分有关,还可能和上升气流的速度、低层大气稳定度的改变以及由于气溶胶的加热作用使得饱和水汽压的增加等有很大的关系^[25,26]。一直以来人们在研究中常常忽略天气条件的影响,所以会影响人们对真实机制的判断。Kaufman 等^[27]认为大气可降水量可能是影响烟尘气溶胶的一个重要因素,在亚马孙地区的干季,烟尘气溶胶—云的辐射强迫只有 -2 W/m^2 , 远远小于模式的预测值。Yu 等^[28]利用 MODIS 资料研究了不同天气条件下,亚马孙地区干湿过渡季节(8~10月)生物燃烧气溶胶对深厚暖云的不同影响。他们认为大气结构以及大气的垂直运动会改变烟尘气溶胶活化成云凝结核的数目,进而改变烟尘对云的辐射强迫效应。

综上所述,天气条件对气溶胶气候效应的影响是一个比较重要的科学问题,但现有研究结果大多仅限于在亚马孙地区,不同天气条件下烟尘气溶胶—深厚对流云的关系。而在半干旱地区,天气条件和气溶胶类型都与亚马孙地区有非常大的差异,那么在半干旱地区不同的大尺度天气背景下沙尘气溶胶和云之间有何关系;产生这种不同的原因是什么;在以后的研究中能否忽略天气条件的影响等都是亟待解决的问题。本文采用搭载在 Aqua 卫星上的 MODIS 探测器和搭载在 Aura 卫星上的 OMI 探测器反演得到的数据,收集了大量样本来统计半干旱地区不同的大尺度天气背景对沙尘气溶胶—云关系的影响。同时还进一步揭示了沙尘产生不同辐射强迫效应的原因。

2 研究资料与方法

(1) 中分辨率成像光谱仪(MODIS)是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的一个重要仪器,水平空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。MODIS 探测器提供的扫描资料每天覆盖全球一次,在 $0.412 \sim 14.24 \mu\text{m}$ 电磁波谱范

围内有 36 个离散光谱波段,提供了可见光、近红外和红外共 36 通道的全球观测,为反演有关陆地、云、气溶胶等产品提供了丰富的信息。本文使用了 Aqua 卫星的 MODIS-Aqua Atmosphere level3 Product 资料,其中包括了云顶有效粒子半径、云分数、云顶温度、云的液态水路径、云光学厚度等云产品^[29,30]。

(2) 臭氧检测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)反演得到的吸收性气溶胶光学厚度。OMI 是搭载在 Aura 卫星上的重要传感器,用来测量地球大气和表面的后向散射辐射,传感器波长范围为 $270 \sim 500 \text{ nm}$ 。本文使用的是空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的日平均观测资料。由于 Aqua 和 Aura 都同属于 A-train 卫星群,过境时间均在当地时间 13:30 左右(相差不过 8 min),所以可以利用 OMI 反演得到的吸收性气溶胶光学厚度和 MODIS 反演得到的云参数来研究同一地点同一时间内沙尘气溶胶对云的影响。此外,由于两颗卫星的过境时间正好是大陆暖云发展旺盛的时段,所以使用这两颗卫星比早上过境的 Terra 卫星等可以更好地研究沙尘—云的关系。

(3) NCEP/NCAR 再分析日平均资料集。该资料是采用 T62L28 模式和 3DVar 同化方案对来源于地表、船舶、无线电探空仪、测风气球和飞机等的多种观测资料进行同化得到的,始于 1948 年,并一直更新至今。水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,垂直分层 17 层,包括地面层的资料以及其他附属资料。本文主要用到其中 850 和 700 hPa 的温度、比湿、风速和相对湿度等数据。

3 研究结果与分析

3.1 研究区域和时间段的选取

图 1 给出了中国地区年降水量的空间分布情况,红色区域代表年降水在 $200 \sim 500 \text{ mm}$ 间的半干旱地区。可以看出,我国干旱、半干旱区基本位于 35°N 以北和 120°E 以西的地区。为了便于后面卫星数据的读取和分析,本文将我国半干旱地区划分成了 3 个规则区域,分别是($112.5 \sim 122.5^\circ\text{E}, 42.5 \sim 45.5^\circ\text{N}$), ($105.5 \sim 115.5^\circ\text{E}, 37.5 \sim 42.5^\circ\text{N}$), ($95.5 \sim 105.5^\circ\text{E}, 34.5 \sim 37.5^\circ\text{N}$)。

图 2 给出了 2006 年和 2010 年春季吸收性气溶胶光学厚度的空间分布特征。从图 2 中可以看出,在 2006 年春季,吸收性气溶胶在半干旱地区有 2 个高值中心,一个是以宁夏、武威为高值中心向四周递减;二连浩特为另一个高值中心。大同、内蒙古东部

和黑龙江部分地区为低值区。在 2010 年春季,吸收性气溶胶光学厚度的分布特征与 2006 年春季的较相似,只是在内蒙古东部地区吸收性气溶胶光学厚度略大,平均值在 0.04 ~ 0.08 之间。从季节来看,这两年春季沙尘暴频发,所以春季吸收性气溶胶光学厚度要高于其他几个季节。此外,从地面沙尘观测记录中也可以发现(OMI 探测器自 2006 年以后开始有观测数据),2006 年和 2010 年春季沙尘暴发生的次数相差不大,沙尘暴等级基本都在一般水平(能见度为 $500\text{ m} < V \leq 1\ 000\text{ m}$, 瞬时极大风速为 $10\text{ m/s} \leq f < 17\text{ m/s}$),分布特征与卫星反演得到的基本一致。从图 3 中可以看出,在半干旱地区这两年春季吸收性气溶胶光学厚度均在 0.02 ~ 0.12 之间,季节平均值均在 0.07 左右。还可以发现,在 2006 年和 2010 年春季,半干旱地区吸收性气溶胶光学厚度的空间分布和浓度都很相似。因此本文选择沙尘暴爆发次数较多,范围较广,影响较大且沙尘含量基本相同的 2 个典型年份作为例子来研究沙尘气溶胶对云的影响。

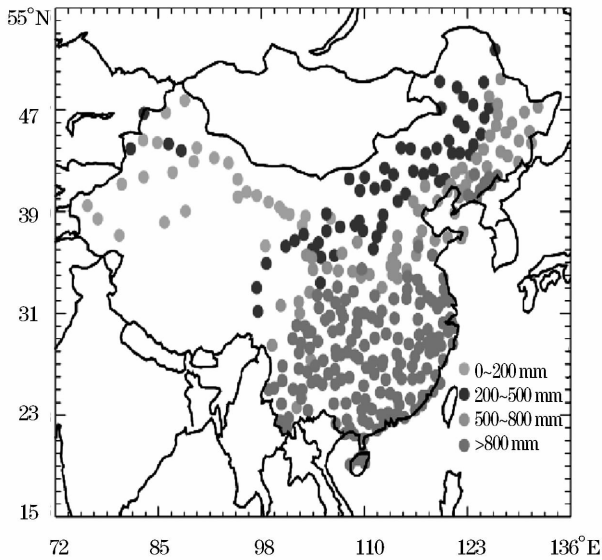


图 1 中国年降水量的空间分布

Fig. 1 Annual precipitation distribution over China

红的区域代表年降水量在 200 ~ 500 mm 之间的半干旱地区
The black color represents the semi-arid regions having annual precipitation ranging from 200 mm to 500 mm

3.2 2006 年和 2010 年春季半干旱地区吸收性气溶胶和云之间的关系

由于沙尘气溶胶是一种吸收性很强的气溶胶粒子,所以本文利用 OMI 探测器 380 nm 处的吸收性

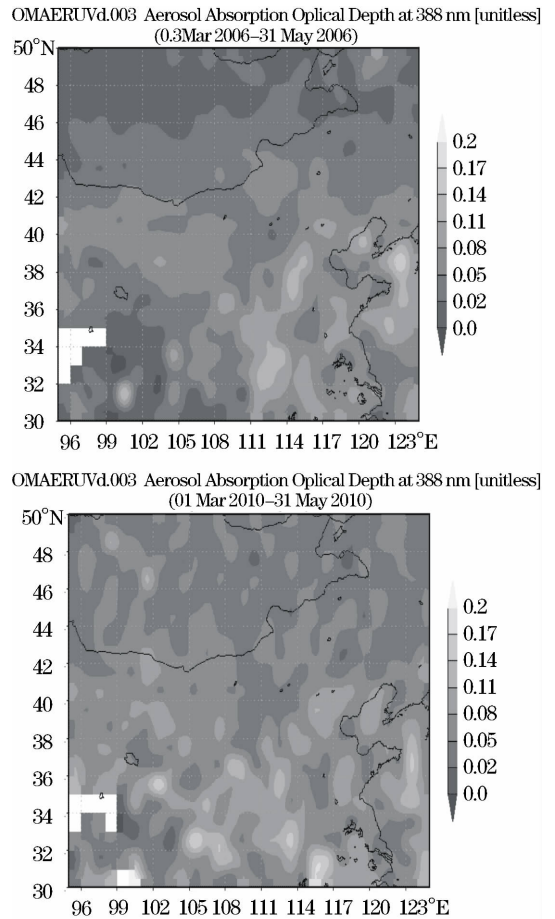


图 2 2006 年和 2010 年春季 OMI 吸收性气溶胶光学厚度的水平分布

Fig. 2 The spatial distribution of aerosol absorption optical depth in spring of 2006 and 2010

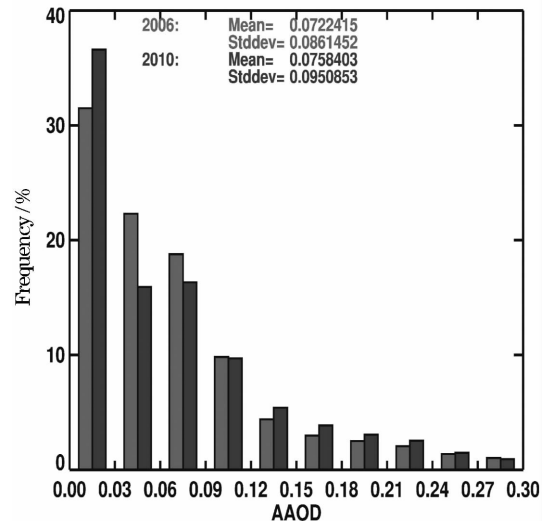


图 3 2006 年和 2010 年春季 OMI 吸收性气溶胶光学厚度的频率分布

Fig. 3 The frequency of aerosol absorption optical depth in spring of 2006 and 2010

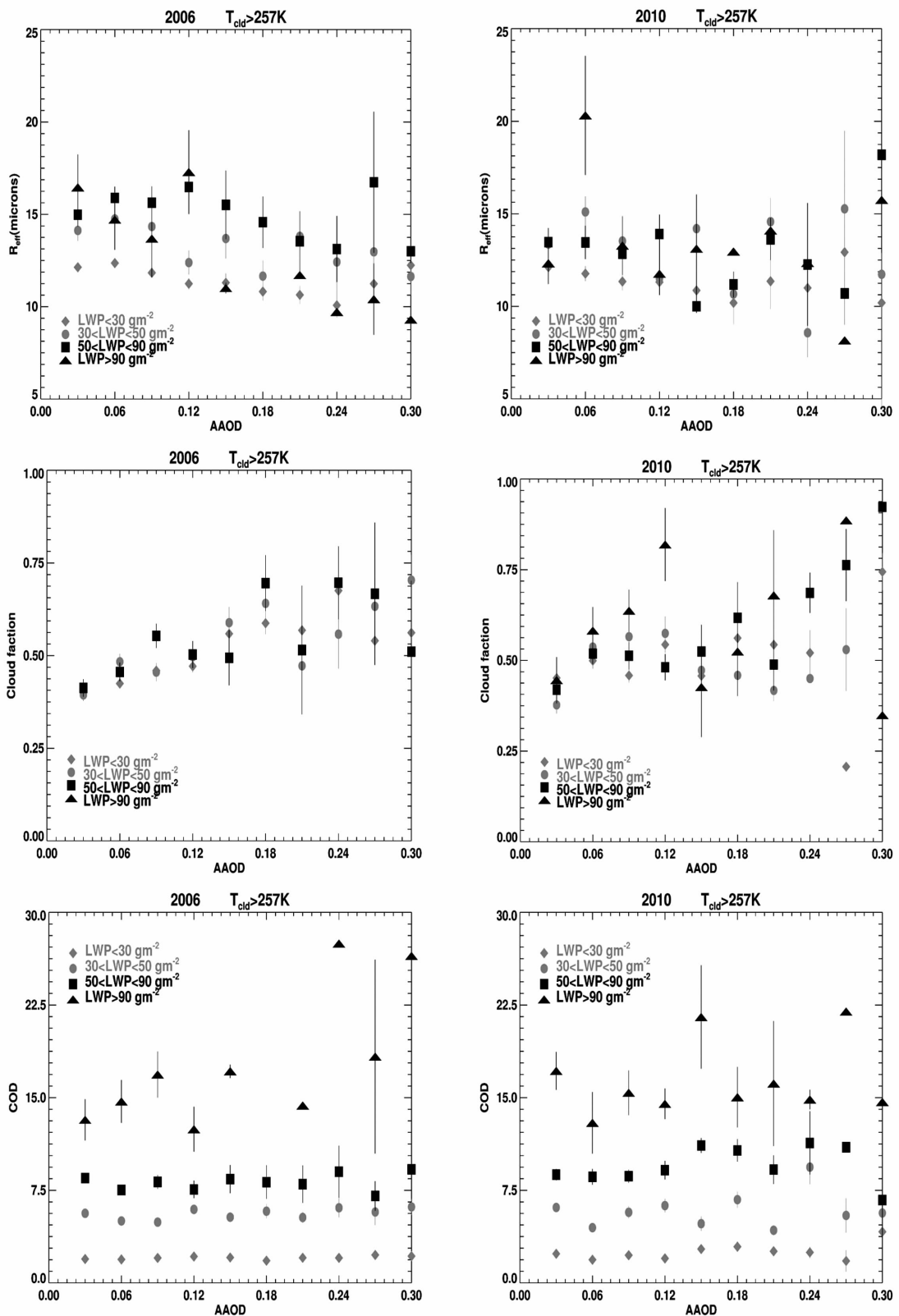


图4 2006年和2010年春季云参数(云顶有效粒子半径、云分数和云光学厚度)随着吸收性气溶胶光学厚度的改变

Fig. 4 Changes of cloud parameters (cloud top effective radius, cloud fraction and cloud optical depth) with aerosol absorption optical depth in spring of 2006 and 2010

气溶胶光学厚度来表征沙尘气溶胶含量进行下面的分析。我们将吸收性气溶胶光学厚度值从小到大分成 10 份,并将相应的云微物理特征(如云顶有效粒子半径,云的光学厚度,云顶温度等)做平均值分析和标准误差处理($\sigma/(n-1)^{1/2}$ σ 和 n 分别代表的是标准偏差和样本量)。图 4 分别给出了不同液态水路径下吸收性气溶胶光学厚度和暖云云顶有效粒子半径、云分数和云光学厚度之间的关系。需要指出的是, Sekiguchi 等^[31]指出云顶温度大于 257 K 时,云的光学、物理性质已基本和暖云没有显著差异,为了获得更多的样本,本文将云顶温度大于 257 K 的云视为暖云。从图 4 可以看出,在 2006 年春季,当吸收性气溶胶光学厚度很小的时候,云有效粒子半径随着液态水含量的增大明显增加;但随着吸收性气溶胶光学厚度的增加,这种正相关关系逐渐变得不清晰。当液态水含量小于 50 g/m^2 时,云有效粒子半径随着吸收性气溶胶光学厚度的变化并不明显,但是当液态水含量大于 50 g/m^2 时(云层比较厚的时候),云有效粒子半径随着吸收性气溶胶光学厚度的增加迅速下降约 $5 \mu\text{m}$ 。在 2010 年春季,云有效粒子半径的变化趋势并不明显。当云层比较厚的时候,云的有效粒子半径随吸收性气溶胶光学厚度的变化不如 2006 年的明显,减小趋势较弱。

从图 4 中还可以看到,在 2006 年春季,当吸收性气溶胶光学厚度比较小的时候,云分数随吸收性气溶胶光学厚度的增加而约增长 0.3,但当吸收性气溶胶光学厚度较大时,云分数却呈现减小趋势。在 2010 年春季,当液态水含量小于 50 g/m^2 时,云分数变化幅度很小,当液态水含量在 $50 \sim 90 \text{ g/m}^2$ 时,云分数随吸收性气溶胶光学厚度迅速增长 0.5 左右;此外,云光学厚度的变化主要受到云水路径的影响,云水路径越高,云光学厚度越大,吸收性气溶胶对它的影响并不大。

图 5 给出了吸收性气溶胶光学厚度和暖云云顶温度之间的关系。从图 5 可以看出,随吸收性气溶胶光学厚度的增加,与其他云微物理特征变化特征不同的是,两年暖云云顶温度都在 $264 \sim 274 \text{ K}$ 之间,但呈现出截然不同的变化趋势。随着吸收性气溶胶光学厚度的增加,在 2010 年春季,云顶温度减小 10 K 左右;而在 2006 年春季,云顶温度增长约 3 K ,说明沙尘气溶胶对云的“燃烧效应”十分明显。

上述结果表明,2006 年和 2010 年春季,在我国半干旱地区吸收性气溶胶光学厚度基本相同的条件下,云的微物理性质随着吸收性气溶胶光学厚度的

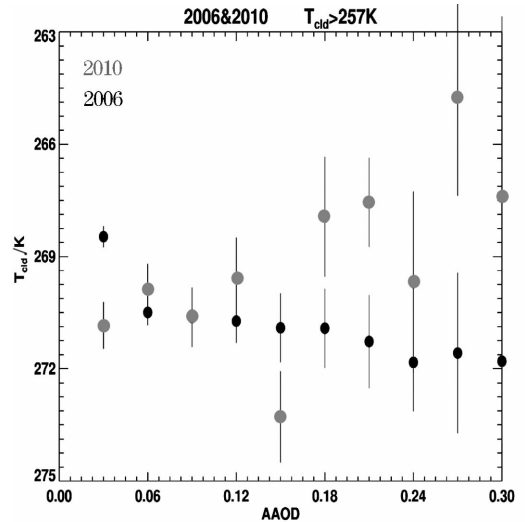


图 5 2006 年和 2010 年春季云顶温度随着吸收性气溶胶光学厚度的改变

Fig. 5 Changes of cloud top temperature with aerosol absorption optical depth in spring of 2006 and 2010

增加呈现出不同的变化,有些甚至表现出截然不同的变化趋势。我们认为,2010 年春季半干旱地区沙尘对云的辐射强迫机制主要表现为间接效应,由于沙尘气溶胶粒子的增多会增加云滴数浓度,云滴粒子变小,使得凝结滞后,致使云扩展到更低的温度,进而可能延长云的生命期,云量增加。但是在 2006 年春季,沙尘气溶胶对云的辐射强迫更多表现为半直接效应,原因是沙尘气溶胶会将其吸收的太阳辐射能作为热辐射重新向外释放,从而加热气团、增加相对于地表的静力稳定性,导致云滴的蒸发,造成云层温度升高、云滴粒子减小以及云量的减少^[32,33]。需要注意的是,事实上无法将沙尘的半直接效应与间接效应简单地分离开来,观测现象只能说明在 2006 年春季沙尘的半直接效应表现得更加突出。那么是什么因素导致了这两年沙尘气溶胶辐射强迫机制的不同?下面将尝试去探究这个问题。

3.3 2006 年和 2010 年春季半干旱地区云条件的差异

首先,分析了 2006 年和 2010 年春季云分数、云光学厚度、云的液态水路径和云顶温度在半干旱地区的空间分布特征。从图 6 中可以看出,在 2006 年春季,云分数高值区位于内蒙古东部,最高值约 0.8;低值区位于内蒙古西部、甘肃、西宁一带,最低值在 0.2 左右。云层较薄,主要表现为云的光学厚度(约为 $2 \sim 10$)、液态水路径(约为 $20 \sim 80 \text{ g/m}^2$)都较小,云顶温度较高(约为 $238 \sim 254 \text{ K}$)。在内蒙古西部

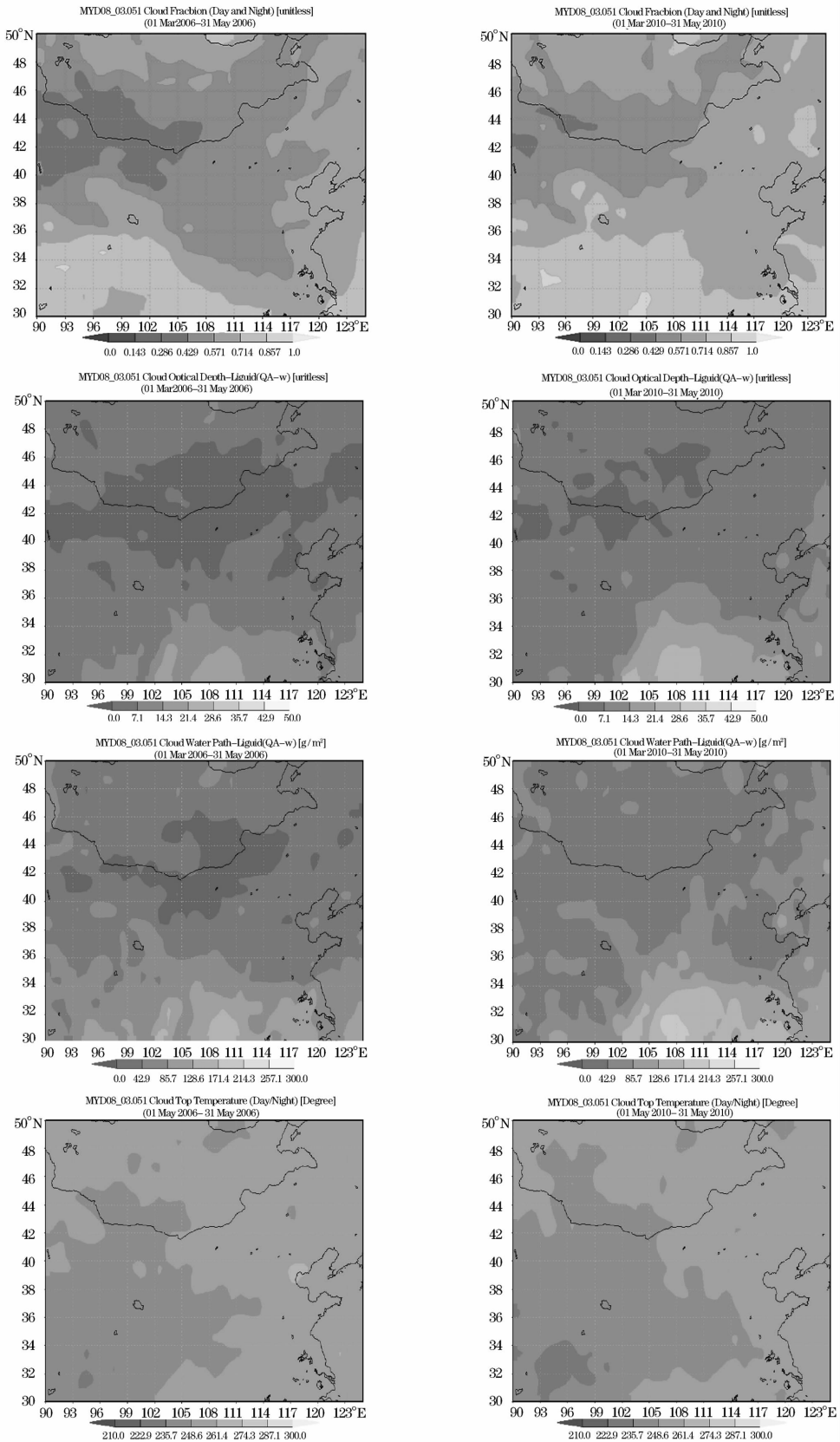


图6 2006年和2010年春季云分数、云光学厚度、云的液态水水路径和云顶温度的水平分布

Fig.6 The spatial distribution of cloud fraction, cloud optical depth, cloud liquid water path and cloud top temperature in spring of 2006 and 2010

到中部云层最薄,内蒙古东部和黑龙江部分地区云较厚。而在 2010 年春季,云分数的分布特征与 2006 年春季的很相似,但云分数较大,约在 0.5 ~ 0.8 左右。此外云发展较旺盛,云层比较厚,主要表现为云的光学厚度较大(约为 5 ~ 20),且云水路径较大(约为 40 ~ 140 g/m^2),云顶温度低(约为 235 ~ 247 K),高值区主要集中在内蒙古和黑龙江的部分区域,其余地区云层发展情况较为一致。

3.4 2006 年和 2010 年春季半干旱地区相对湿度的差异

为了研究气象条件对沙尘—云关系的影响,本文分别分析了温度、相对湿度、K 指数、垂直风切变

等多个气象要素的分布情况。研究表明,在这两年中相对湿度的差异最大,2006 年春季的相对湿度比 2010 年春季低 5% ~ 15%。图 7 给出了这两年春季在 850 hPa 和 700 hPa 相对湿度差异的空间分布特征。从图中可以看出,半干旱地区是相对湿度差异最大的区域,几乎所有区域都为负,只有在极少数地区出现微弱的正值区域。低值区域有 2 个:一个以宁夏为低值中心向四周延伸,另一个分布在内蒙古中部、山西和陕西部分等地。由于半干旱地区的相对湿度较小,一般春季在 40% 左右,所以这两年相对湿度的差异相对而言还是很大的。

所以把相对湿度作为最主要影响沙尘—云关系

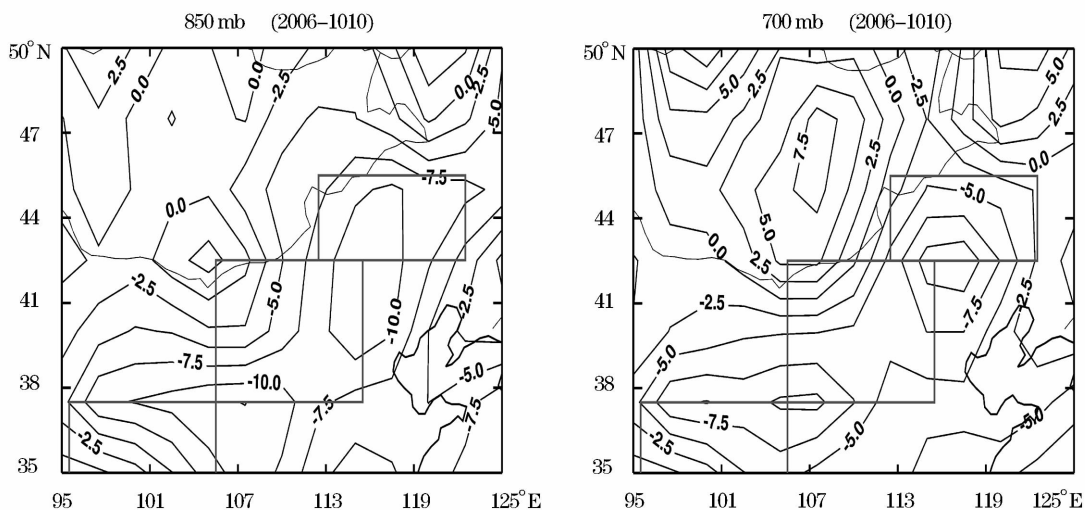


图 7 850 hPa 和 700 hPa 处 2006 年和 2010 年春季相对湿度的差异

Fig. 7 The difference of relative humidity at 850 hPa and 700 hPa levels between spring of 2006 and 2010

的气象条件进行下一步分析,其他要素作为控制条件在本文中不再赘述。Huang 等^[34]利用 CALIPSO 资料统计了半干旱地区沙尘气溶胶出现在不同垂直高度的频率,他们指出在半干旱地区观测到强沙尘暴的垂直高度一般在地表到 5 km 的范围内,因此选择 700 hPa 高度来分别讨论不同相对湿度条件下沙尘对云的辐射强迫效应。

3.5 不同相对湿度下半干旱地区吸收性气溶胶和云之间的关系

图 8 给出了不同相对湿度条件下,2006 年和 2010 年春季云参数(云顶有效粒子半径、云分数、云光学厚度和云顶温度)随吸收性气溶胶光学厚度的变化情况。在 2006 年春季,由于沙尘的半直接效应占主要地位,沙尘通过吸收太阳辐射能从而加热云层和周围大气的作用较强,使得云顶温度约增加 3

K。当相对湿度大于 50% 时,云滴有效粒子半径随着吸收性气溶胶光学厚度的增加而迅速减小;当吸收性气溶胶光学厚度较大时,这种减小趋势会变得更加显著,使云量也开始慢慢减少。我们认为,在 2006 年春季,由于相对湿度较小,每个沙尘粒子分配到的水汽较少,沙尘更容易加热云滴粒子,让云滴粒子蒸发变小甚至消失,进而减少云量,所以这年春季沙尘的半直接效应表现得更加明显一些。

在 2010 年春季,沙尘的间接效应表现得更加突出。当沙尘大量活化为云的凝结核时,云滴谱有效粒子半径减小的同时抑制降水的形成,进而可能会延长云的生命期,使云量增加,云层不断发展(云顶高度增加,云光学厚度增加),云顶温度降低。相对湿度越大,这种效应越显著。我们认为在 2010 年春季,由于相对湿度较大,每个沙尘粒子可以分配到更

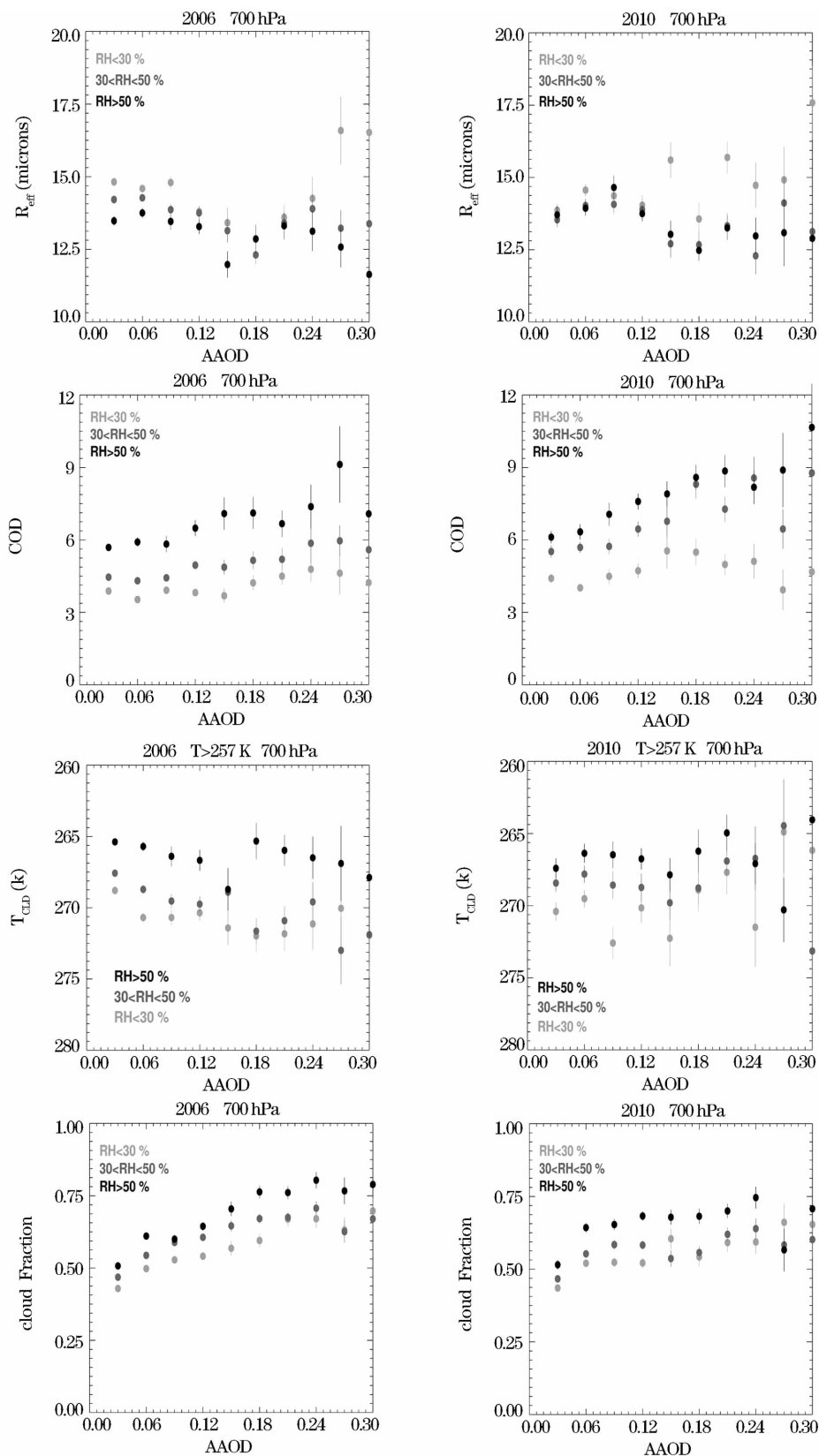


图 8 在不同相对湿度下,2006 年和 2010 年春季云参数(云顶有效粒子半径、云光学厚度、云顶温度和云分数)随着吸收性气溶胶光学厚度的改变

Fig. 8 Changes of cloud parameters (cloud top effective radius, cloud optical depth, cloud top temperature and cloud fraction and) with aerosol absorption optical depth for different relative humidity in spring of 2006 and 2010

多的水汽,加热率变小,蒸发减弱,所以沙尘的加热作用表现得不太显著,更多体现的是沙尘的 Twomey 效应和第二类间接效应。

3.6 总结

本文分析了 2006 年和 2010 年春季中国半干旱地区 OMI 吸收性气溶胶光学厚度与 MODIS 反演得到云的各种微物理特征的相关关系,并研究了各种气象要素对其的影响,确定了最主要影响沙尘—云关系的气象要素,然后选择 700 hPa 高度来分别讨论不同相对湿度条件下沙尘对云的辐射强迫效应,得到以下主要结论:

(1) 通过分析发现,我国半干旱地区 2006 年和 2010 年春季吸收性气溶胶光学厚度的分布较相似,吸收性气溶胶的季节平均值在 0.02 ~ 0.12 之间,平均值均在 0.07 左右,2010 年略大于 2006 年。结合地面观测资料发现,2006 年和 2010 年的春季沙尘爆发次数较多,范围较广,沙尘含量基本相等。

(2) 通过分析 2006 年和 2010 年云微物理性质随着沙尘的变化情况发现,云的性质随着吸收性气溶胶光学厚度的增加出现了不同的变化,有些甚至呈现出截然不同的趋势。在 2006 年,随着吸收性气溶胶光学厚度的增加,云的有效粒子半径迅速减小 5 μm 左右。但是在 2010 年,云滴有效粒子半径的减小趋势很弱。在 2010 年春季,云分数随吸收性气溶胶的增加呈现增长的趋势,但是在 2006 年春季,当吸收性气溶胶光学厚度比较大的时候,云分数呈现减少的趋势。此外,在 2010 年春季,云顶温度随着吸收性气溶胶光学厚度的增加而减小 10 K 左右,然而在 2006 年春季,云顶温度增长 3 K 左右。两年云顶温度的变化趋势截然相反。总之,对于 2006 年和 2010 年春季,云的性质随着吸收性气溶胶光学厚度的增加出现了不同的变化,我们认为 2010 年春季半干旱地区沙尘气溶胶对云的辐射强迫机制主要表现为间接效应,在 2006 年沙尘气溶胶对云的影响更多表现为半直接效应。

(3) 为了进一步探究是导致两年辐射强迫机制差异的原因,分析了半干旱地区这两年大气环境的差异。研究发现,2006 年与 2010 年相比水汽含量较小,沙尘气溶胶更加容易加热云,半直接效应较为显著。而 2010 年水汽含量较大,每一个沙尘粒子分配得到的水汽含量较多,加热率较小,蒸发较弱,与 2006 年相比,“云蒸发”效应不显著,故而沙尘气溶胶的间接效应占主导地位。所以,在 2006 年随着沙尘气溶胶的增多,云滴有效粒子半径显著减小,云量

增加不显著,云顶温度增加,云的光学厚度增加不显著。在 2010 年,随着沙尘气溶胶的增多,云滴有效粒子半径的减小与 2006 年相比较小,云量增加,云顶温度减小,云的光学厚度增加。

综上所述,本项研究工作利用观测事实揭示了不同天气条件下,沙尘气溶胶对暖云表现出不同的辐射强迫机制的现象以及其原因。根据本文分析,我们认为天气条件会直接影响沙尘—云之间的关系,在以后研究沙尘对云影响的工作中天气条件的考虑是必要的。但是要进一步了解天气条件对沙尘—云的影响,要使用更长时间的,更多的样本,包含各种天气条件对其进行分析研究。并且,由于被动式遥感不能获取如沙尘气溶胶吸收性和垂直高度分布等更加精细化的遥感数据,所以本文无法进一步探讨由于这些因素所导致的这两年春季沙尘—云之间的关系,在以后的工作中我们将借助主动式遥感的优越性能来进一步解释这个问题。

致谢:感谢甘肃省超算中心提供的操作平台和工作人员的热情帮助;感谢王天河师兄、金宏春师兄、葛颢铭师兄、阎虹如同学在本文写作过程中给予作者的鼓励和帮助。

参考文献 (References):

- [1] Yu Yousen. The dry climate and agricultural counter-measures in west China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1992, 10(1): 1-8. [余优森. 我国西部的干旱气候与农业对策[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(1): 1-8.]
- [2] Xiao Guoju, Zhang Qiang, Wang Jing. Impact of global climate change on agro-ecosystem: A review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1 877-1 885. [肖国举, 张强, 王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1 877-1 885.]
- [3] Wang Yixiang, Weng Boqi, Huang Yibin. Effects of global climate change on agriculture ecosystems and research strategy for the future[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2006, 2(3): 203-208. [王义祥, 翁伯琦, 黄毅斌. 全球气候变化对农业生态系统的影响及研究对策[J]. 亚热带农业研究, 2006, 2(3): 203-208.]
- [4] Li Qingfeng, Li Fusheng, Wu Lan. A primary analysis on climatic change and grassland degradation in Inner Mongolia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(4): 98-102. [李青风, 李福生, 乌兰. 气候变化与内蒙古草地退化初探[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 98-102.]
- [5] Zhao Huiying, Wu Liji, Hao Wenjun. Influences of climate change to ecological and environmental evolvement in the Hulun lake wetland and its surrounding area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1 064-1 071. [赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报,

- 2008, 28(3): 1 064-1 071.]
- [6] He Qingtang. Climate change and sandy desertification combating in China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2001, 23(5): 61-65. [贺庆棠. 气候变化与中国荒漠化防治[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(5): 61-65.]
- [7] Ren Zhaoxia, Yang Dayuan. Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of northwest China in recent 50 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(4): 91-95. [任朝霞, 杨达源. 50a 西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 91-95.]
- [8] Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 34: 1 149-1 152.
- [9] Feingold G, Remer L A, Ramaprasada J, et al. Analysis of smoke impact on clouds in Brazilian biomass burning regions: An extension of Twomey's approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 22 907-22 922.
- [10] Koren I, Kaufman Y J, Remer L A, et al. Measurement of the effect of Amazon smoke on inhibition of cloud formation[J]. *Science*, 2004, 303: 1 342-1 345.
- [11] Takemura T, Nozawa T, Emori S, et al. Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, (110): D02202, doi: 10. 1029/2004JD005029.
- [12] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. *Science*, 2001, 294: 2 119-2 124.
- [13] Koren L, Martins J V, Remer L A, et al. Smoke invigoration versus inhibition of clouds over the Amazon[J]. *Science*, 2008, 321: 946-949.
- [14] Huang J, Wang Y, Wang T, et al. Dusty cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of east Asia[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(10): 1 084-1 089.
- [15] Huang J, Minnis P, Lin B, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, (33): L06824, doi: 10. 1029/2005GL024724.
- [16] Huang J, Minnis P, Chen B, et al. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, (113): D23212, doi: 10. 1029/2008JD010620.
- [17] Huang J, Lin B, Minnis P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over east Asia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, (33): L19802, doi: 10. 1029/2006GL026561.
- [18] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. *Science*, 2002, 297: 2 250-2 253.
- [19] Wan Guojian, Zheng Xiangdong, Lee H N, et al. ^{21}Pb and ^7Be as tracers for aerosol transfers at center Guizhou, China; I. The explanation by weekly interval[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(5): 492-504. [万国江, 郑向东, Lee H N, 等. 黔中气溶胶传输的 ^{21}Pb 和 ^7Be 示踪: I. 周时间尺度的解释[J]. 地球科学进展, 2010, 25(5): 492-504.]
- [20] Ge Maofa, Liu Ze, Wang Weigang. Heterogeneous processes between secondary photochemical oxidants and aerosols[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4): 351-363. [葛茂发, 刘泽, 王炜罡. 二次光化学氧化剂与气溶胶间的非均相过程[J]. 地球科学进展, 2009, 24(4): 351-363.]
- [21] Novakov T, Rivera-Carpio C, Penner J E, et al. The effect of anthropogenic sulfate aerosols on marine cloud droplet concentrations[J]. *Tellus (Series B)*, 1994, 46: 132-141.
- [22] Reid J S, Hobbs P V, Rangno A L, et al. Relationships between cloud droplet effective radius, liquid water content, and droplet concentration for warm clouds in Brazil embedded in biomass smoke[J]. *Geophysical Research*, 1999, 104: 6 145-6 153.
- [23] Arends B G. Microphysics of clouds at Kleiner Feldberg[J]. *Atmospheric Chemistry*, 1994, 19: 59-85.
- [24] Raga G B, Jonas P R. On the link between cloud-top radiative properties and sub-cloud aerosol concentrations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993, 119: 1 419-1 425.
- [25] Andreae M O, Rosenfeld D, Artaxo P, et al. Smoking rain clouds over the Amazon[J]. *Science*, 2004, 303: 1 337-1 342.
- [26] Roberts G, Nenes A, Seinfeld J, et al. Impact of biomass burning on cloud properties in the Amazon Basin[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, 4062. Doi: 10. 1029/2001JD000985.
- [27] Kaufman Y J, Fraser R S. The effect of smoke particles on clouds and climate forcing[J]. *Science*, 1997, 277: 1 636-1 639.
- [28] Yu Hongbin, Fu R, Pickinon R E, et al. Interannual variability of smoke and warm cloud relationships in the Amazon as inferred from MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 111: 435-449.
- [29] Levy R C, Remer L, Mattoo S, et al. Second-generation algorithm for retrieving aerosol properties over land from MODIS spectral reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, (112): D13211, doi: 10. 1029/2006JD007811.
- [30] Remer L A. Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, (113): D14S07, doi: 10. 1029/2007JD009661.
- [31] Sekiguchi M, Teruyuki Nakajima, Kentaroh Suzuki, et al. A study of the direct and indirect effects of aerosols using global satellite data sets of aerosol and cloud parameters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108, (D22), 4699, doi: 10. 1029/2002JD003359
- [32] Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan, et al. Causes of sand-stormy weather in northern China and control measures[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 513-521. [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.]
- [33] Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot[J]. *Science*, 2000, 288: 1 042-1 047.
- [34] Huang J, Minnis P, Yan H, et al. Dust aerosol effect on semi-arid

climate over northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discus-*

sions, 2010, 10:12 465-12 495.

Effects of Dust Aerosols on Cloud in Semi-Arid Regions as Inferred from OMI and MODIS Retrievals

CHEN Siyu, HUANG Jianping, LIU Jingjing, YU Haipeng,
WANG Xin, WANG Leidi

(1. *Key Laboratory for Semi-arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Observational data reveals the difference between the impact of dust aerosol on warm cloud in spring of 2006 and 2010 over semi-arid regions. In 2006, semi-direct effect plays an important role. With aerosol absorption optical depth (AAOD) increasing, Cloud top temperature increases by 3K, and cloud effective radius decreases by 5 μm . When AAOD is larger, cloud fraction decreases. In 2010, indirect effect appears to be dominant. Cloud top temperature decreases by 10K with AAOD increasing. The cloud fraction increases by 0.5 while the decrease trend of cloud effective radius is not distinct as AAOD increases. We think that the difference of relative humidity between the two years is the main reason for the different radiative effects. In 2006, warm cloud is less extensive and thinner in the dry atmospheric conditions and dust aerosols dissipate more easily. So semi-direct effect is more important. In 2010 with humid atmospheric conditions, 'cloud heating' is not evident. The additional remark is that differences in aerosol absorption and its vertical distribution may have contributed to the observed inter-annual change of smoke-cloud relationship but could not be determined due to lack of adequate measurements.

Key words: Semi-arid region; Dust aerosol; Warm cloud; MODIS; Cloud microphysical.