

一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理量和辐射强迫的影响

王玉洁^{1,2}, 黄建平¹, 王天河¹

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省专业气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘要:利用 MODIS Aqua 卫星反演和装载在 Aqua 上的 CERES 仪器观测资料, 讨论了我国北方地区 2004 年 3 月 26~28 日沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理特性和辐射强迫的影响。初步结果表明, 沙尘气溶胶明显改变了云的物理特性, 使云滴变小, 含水量及光学厚度减少, 减弱了云的净辐射强迫, 云的冷却效应受到了抑制, 相当于大气层顶沙尘气溶胶的增温作用。

关键词:沙尘气溶胶; MODIS; Aqua 卫星; CERES; 云物理特性和辐射强迫

中图分类号:P458

文献标识码:A

引言

沙尘暴天气是在特定地理环境和下垫面条件下, 由特定的大尺度环境背景和某种天气系统发展所诱发的一种小概率、危害大的灾害性天气。沙尘暴主要发生在沙漠及其邻近的干旱、半干旱地区, 中亚、北美、中非和澳大利亚是全球 4 大沙尘暴高发区。包括新疆、甘肃、宁夏以及内蒙古西部在内的戈壁、沙漠众多的我国西北干旱区, 自然环境恶劣, 是沙尘暴的高频区, 是中亚沙尘暴的组成部分。年均沙尘暴日数在 20 d 以上, 扬沙天气在 40 d 以上^[1]。近年来, 气候变化异常, 我国西北地区沙尘暴呈加重趋势。频繁的沙尘暴使得大气中沙尘持续存在, 在当地产生的这些大量沙尘被强风吹卷进入大气, 并随高空气流向下游陆地及海洋地区远程传输。中国北方每年输入大气的沙尘达 800 Mt, 约占全球总量的 1/3^[2]。沙尘作为对流层气溶胶的主要成分, 对区域甚至全球的生态环境和气候变化具有重大影响。

除了可影响大气辐射加热结构而改变大气环流对气候造成影响外, 沙尘气溶胶主要通过直接散射太阳辐射, 吸收地—气长波辐射而对气候产生直接效

应; 同时又可作为云中凝结核的组成部分而影响云滴数浓度, 改变云的微物理特性和生命周期^[3], 从而产生更加复杂不确定的间接效应。云是气候变化的另一个重要因子。地球表面的 60% 被云所覆盖, 云的存在使地球的反射率从 17% (无云状况) 增到 30%, 而地球反射率每增加 0.5%, 因 CO₂ 倍增引起的增暖就会减少一半^[4]。云的反照率与云滴数浓度密切相关, 而云滴数浓度又决定于云凝结核浓度和云内水汽状况等云的微物理特性。云的微物理特性也决定了不同的云存在不同的辐射强迫, 中低云反射太阳辐射, 高云阻挡地球长波辐射。

沙尘气溶胶的凝结核作用对云滴的形成和分布都十分重要, 对流层中的降水过程又决定了沙尘气溶胶的生命期, 而且, 沙尘气溶胶直接辐射强迫中最终辐射强迫的正负也取决于天空云的状态和地表反照率。总之, 两者的关系密不可分, 是诸多影响气候变化因子中 2 个非常重要却又最不确定的因子。近年来, 对云和沙尘气溶胶相互作用的研究引起了国内外学者的关注: 国外 Rosenfeld 等^[5]通过卫星和航空观测分析发现在含有沙尘气溶胶的云滴中很少发生碰撞而产生降水。Sassen^[6]发现来自于中国的沙尘与

收稿日期:2006-07-20; 改回日期:2006-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(40575036)资助

作者简介: 王玉洁(1971-), 女, 浙江杭州市人, 在读硕士研究生, 主要从事大气科学研究. E-mail: wang-yujie@163.com

高积云中冰粒的形成相关关系很高。不过,由于云和沙尘气溶胶辐射强迫机制的复杂性以及受到观测手段和观测资料的限制,目前,有关云和沙尘气溶胶辐射强迫和气候效应的问题仍有待更好解决。尤其,关于西北沙尘气溶胶与云的辐射强迫的相互作用的研究甚少。本文通过一次沙尘暴过程中沙尘气溶胶对云物理特性和辐射强迫影响的个例分析,来尝试揭示沙尘暴对西北干旱气候的重要影响。但是,本文的结论只是通过一次沙尘暴的个例分析得出的,还需要通过大量资料来进行验证。

1 2004年3月26~28日的沙尘暴

2004年3月26~28日,受蒙古气旋南侧偏西大风的影响,蒙古国东南部和中国内蒙古中部地区出现了大范围的沙尘暴。同时,甘肃省河西走廊和青海柴达木盆地也出现了沙尘天气。

2 资料和分析方法

图1是2004年3月27日环境卫星(Aqua/MODIS)沙尘监测图像。在监测图上,能清楚看到中国

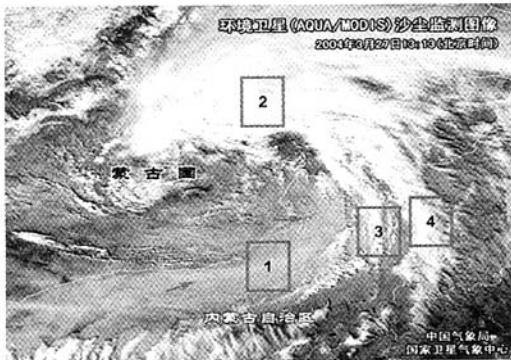


图1 2004年3月27日环境卫星(Aqua/MODIS)沙尘监测图像

Fig. 1 The satellite image of sandstorm monitoring on March 27, 2004 by Aqua/MODIS

内蒙古中部与蒙古国交界处有一大片东北—西南走向的沙尘区,这片沙尘区西面还有一些小范围的沙尘带,甘肃河西走廊和柴达木盆地也有较大范围的

沙尘区存在。图中能够看到绿洲和河流,白色区域是雪和云,整个沙漠和内蒙古中部由于覆盖沙尘而变暗,表面特征模糊。东部沙尘区与西部和南部沙尘颜色上有较大差异,表明东部是沙尘暴,西部和南部是浮尘或扬沙天气。

在图1中选取了4个区域,对无沙尘条件下的云和沙尘暴过程中伴随的云的微物理特性及辐射强迫进行了对比分析。这4个区域分别是:□1代表无云存在的沙尘区,以后称其为DUST;□2表示不受沙尘影响的云区,用CLD表示;□3则代表沙尘区域里存在的部分云量,用PCOD表示;□4代表有沙尘存在的大量云区,用COD表示。文中涉及的云的微物理特性包括:云的冰晶核直径(D_e),光学厚度(OPD),有效云顶温度(T_e),云水通量(IWP)。

本文采用2004年3月26~28日美国极轨环境遥感卫星Aqua(EOS-PM1)获取的CERES SSF MODIS Edition 1B资料。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^[7]。由于该资料不仅空间分辨率高、而且把云参数的反演与相同时刻大气层顶(TOA)的宽带辐射通量计算匹配了起来,从而改进了云辐射强迫计算的准确性^[8~9]。

除此之外,为了改善扫描图像的分辨率和从卫星测量的辐射资料得到更精确的TOA通量,SSF引进了新的CERES角分布模式。在复杂的CERES的观测域内,利用高光谱分辨率和高空间分辨率处理云图像资料以确定云和地面特征,这是CERES对ERBE(地球辐射收支实验)辐射收支分析的一个主要的改进,因为ERBE短波通量的最大的误差来源于角取样。CERES云特征精确度的不断改进以及新的角分布模式的采用将会使这些误差减小3~4倍。每一个CERES扫描区域的云的特征和辐射通量也是为大气层内辐射通量提供更精确估计的关键。在地球的辐射平衡中,为了更好地估计云的辐射效应,宽带测量仪所测到的大气层顶的辐射通量资料是必不可少的。总之,以上这些观测优势使该数据集对云的辐射通量的观测达到前所未有的精确度^[10]。我们利用大气层顶向上的短波(SW)和长波(LW)通量来检测云的辐射强迫,云辐射强迫即大气层顶晴空区和云区辐射通量的差值^[11]:

$$\begin{aligned}
 C_{sw} &= F_{clr}^{sw} - F^{sw} \\
 C_{lw} &= F_{clr}^{lw} - F^{lw} \\
 C_{net} &= C_{sw} + C_{lw}
 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 F_{clr}^{sw} 和 F_{clr}^{lw} 分别是大气层顶 CERES 晴空宽带短波和长波辐射通量。 F^{sw} 和 F^{lw} 分别是大气层顶有云(包括伴有沙尘的云)存在下的短波和长波辐射通量。

3 结果分析

图 2~4 分别是 CLD, PCOD 和 COD 在 D_e , OPD, IWP 方面的频率分布图。

在图 2 中 D_e 的平均值由 CLD 区的 $61.3 \mu\text{m}$ 降到了 COD 区的 $53.6 \mu\text{m}$ 。由于 PCOD 区的沙尘含量比 COD 区高, 因而, PCOD 区的 D_e 平均值更低, 为 $51.5 \mu\text{m}$ 。在图中可以清楚看到, D_e 值越小, 在 PCOD 区和 COD 区出现的频次就越高于 CLD 区。这说明沙尘气溶胶可以作为云的凝结核, 导致云滴尺寸变小。

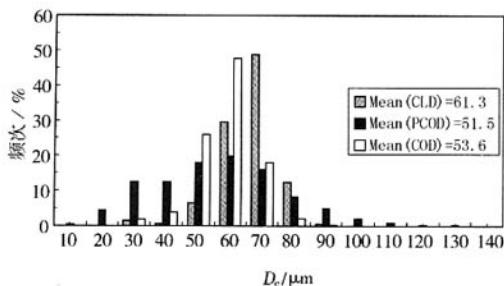


图 2 CLD, PCOD 和 COD 关于 D_e 的频率分布比较

Fig. 2 Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD), partial cloud over dust region (PCOD) and cloud over dust region (COD) for ice diameter (D_e)

在图 3 中, CLD 区的 OPD 均值为 72.6, 分别比 PCOD 区和 COD 区的 OPD 均值大了 52.4 和 50.5。很明显, 在 PCOD 区和 COD 区 OPD 值越小, 出现的频次越高; OPD 值越大, 在 CLD 区出现的概率就越大。在图 4 中, IWP 值的规律也是如此。COD 区和 PCOD 区的 IWP 值分别比 CLD 区的小了 1005.3 g/m^2

m^2 , 1056.7 g/m^2 。IWP 值越小, 在 COD 区和 PCOD 区出现的可能性越大。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, 进而改变了云的光学厚度和云水通量。

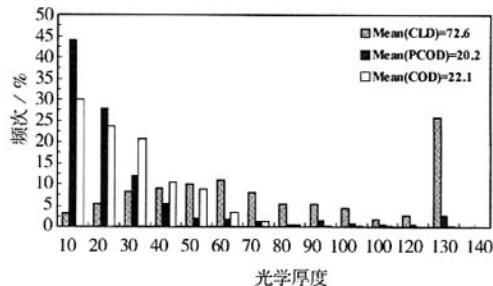


图 3 CLD, PCOD 和 COD 关于 OPD 的频率分布比较

Fig. 3 Comparison of frequency distribution over the pure cloud region (CLD), partial cloud over dust region (PCOD) and cloud over dust region (COD) for optical depth (OPD)

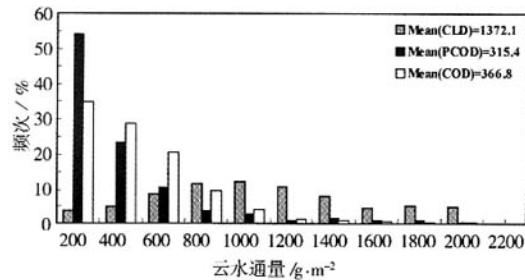


图 4 CLD, PCOD 和 COD 关于 IWP 的频率分布比较

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

在图 5 中, CLD 区和 COD 区的 T_e 平均值分别为 227.4 K 和 227.2 K , 非常接近, 这说明了对于这 2 个区域来说, 云顶高度是一致的。 T_e 实际上是红外光区的亮温, 由于 PCOD 区以沙尘为主, 沙尘的高度明显比云低, 因此 PCOD 区 T_e 均值要高于 COD 和 CLD 区的均值, 为 243.7 K 。

图6、图7和图8分别是DUST区、CLD区、PCOD区和COD区在大气层顶的长波辐射强迫、短波辐射强迫和净辐射强迫比较。在短波辐射强迫比较中,CLD区的SW值约为 -320.345 W/m^2 , COD区的SW值约为 -260.329 W/m^2 , COD区的SW绝对值比CLD区的减小了 60.016 W/m^2 ;而PCOD区的SW约

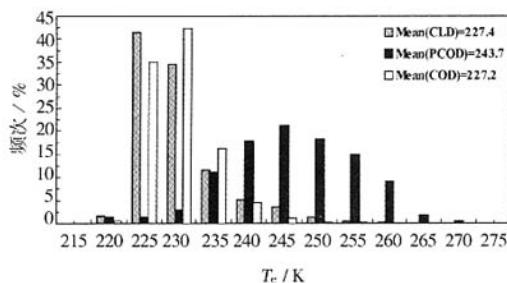


图5 CLD,PCOD 和 COD 关于 T_e 的频率分布比较

Fig. 5 Comparison of frequency distribution over the pure cloud region(CLD),partial cloud over dust region(PCOD) and cloud over dust region(COD) for effective cloud top temperature(T_e)

为 -181.466 W/m^2 ,其绝对值比COD区的减小了 78.863 W/m^2 ;DUST区SW约为 -80.149 W/m^2 ,其绝对值又比PCOD区的减小了 101.317 W/m^2 。说明沙尘云的短波辐射强迫减弱了。在长波辐射强迫比较图中,CLD区的LW值约为 121.767 W/m^2 , COD区的LW值约为 119.721 W/m^2 ,两值比较接近,约是PCOD区LW值的近1.8倍。DUST区LW值约为 38.894 W/m^2 ,接近于PCOD区LW值的 $3/5$ 。在净辐射强迫比较图中,CLD区的净辐射强迫值约为 -198.578 W/m^2 , COD区的净辐射强迫值约为 -140.608 W/m^2 , PCOD区的净辐射强迫值约为 -114.437 W/m^2 ,而DUST区的约为 -41.255 W/m^2 。可见,在这次沙尘暴个例分析里,COD区的净辐射强迫绝对值比CLD区少了近30%,而PCOD区的净辐射强迫绝对值比COD区的又略低些。到了DUST区,其净辐射强迫绝对值还不到PCOD区的40%。说明由于受到沙尘的影响,在大气层顶,云的净辐射强迫被减弱,云的冷却效应受到了抑制。

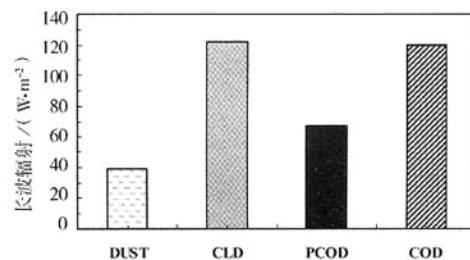


图6 DUST,CLD,PCOD 和 COD 在大气层顶的长波辐射强迫比较

Fig. 6 Comparison of the TOA radiative forcing over the pure dust region(DUST),the pure cloud region(CLD),partial cloud over dust region(PCOD) and cloud over dust region(COD) for LW forcing

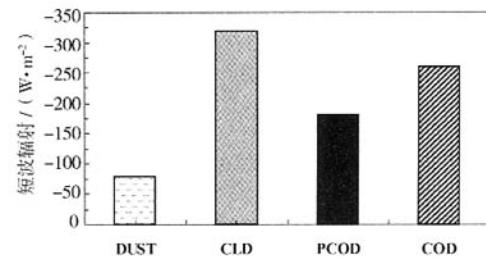


图7 DUST,CLD,PCOD 和 COD 在大气层顶的短波辐射强迫比较

Fig. 7 Comparison of the TOA radiative forcing over the pure dust region(DUST),the pure cloud region(CLD),partial cloud over dust region(PCOD) and cloud over dust region(COD) for SW forcing

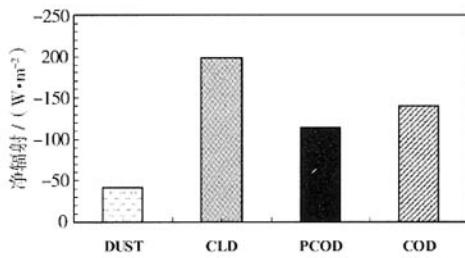


图8 DUST,CLD,PCOD 和 COD 在大气层顶的净辐射强迫比较

Fig. 8 Comparison of the TOA radiative forcing over the pure dust region(DUST),the pure cloud region(CLD),partial cloud over dust region(PCOD) and cloud over dust region(COD) for net forcing

4 结论与讨论

本文利用卫星探测资料,通过对沙尘暴的个例分析,研究了沙尘气溶胶对云微物理特性和辐射强迫的影响。在研究中发现,图1中所选的COD区和CLD区中的云的物理特性以及估算出的相应的辐射强迫值差别都很大。由于2区的气象条件相似,因此考虑这种差异源于沙尘的影响。沙尘云中凝结核的尺寸,云水含量及光学厚度等特性的部分减少,使大气层顶的净辐射强迫被削弱了,净辐射强迫绝对值减少了近30%,云的冷却效应受到抑制。由于沙尘无论是在时间上还是空间上都分布较广,沙尘和云的相互作用在区域甚至全球的气候变化中会产生重要的影响,因此,本文对沙尘气溶胶对云特性及辐射强迫的影响的尝试研究是具有一定意义的,但是,本文的结论只是从个例分析中得出的,还需要更多的资料分析验证。

参考文献:

[1] 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.

[2] 成天涛, 吕达仁, 陈洪斌, 等. 浑善达克沙地沙尘气溶胶的物理化学特性[J]. 科学通报, 2005, 50(5): 469-472.

[3] 牛生杰. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 242-252.

[4] 吴兑. 温室气体与温室效应, 全球变化热门话题丛书[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 140-141.

[5] Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: a possible desertification feedback loop [J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2001, 98(11): 5975-5980.

[6] Sassen K. Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms [J]. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1029.

[7] Minnis P, Garber D P, Young D F, et al. Parameterization of reflectance and effective emittance for satellite remote sensing of cloud properties [J]. J Atmos Sci, 1998, 55: 3313-3339.

[8] Minnis P, Co-Authors. Cloud Optical Property Retrieval (Subsystem 4.3). Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Algorithm Theoretical Basis Document, Volume III: Cloud Analyses and Radiance Inversions (Subsystem 4). NASA RP 1376, 1995, 3: 135-176.

[9] Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment [J]. Bul Amer Meteor Soc, 1996, 77: 853-868.

[10] Chambers, Lin H, Bing Lin, et al. Examination of new CERES data for evidence of tropical iris feedback [J]. J Climate, 2002, 15: 3719-3726.

[11] Ramanathan V, Cess R D, Harrison E F, et al. Cloud radiative forcing and climate: results from the Earth Radiation Budget Experiment [J]. Science, 1989, 243: 57-63.

The Influences of Dust Aerosols on Cloud Properties and Radiative Forcing in a Sandstorm Weather Process

WANG Yu-jie^{1,2}, HUANG Jian-ping¹, WANG Tian-he¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Professional Meteorological Observatory of Gansu Province, Lanzhou 730020, China)

Abstract: This paper analyzed the influences of dust aerosols on cloud properties and TOA radiative forcing in the process of the dust storm for the period of March 26 to 28, 2004 over Northwest China, using data collected by MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) and CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy Budget Scanner) instruments on the Aqua satellite. These dust aerosols decrease the ice diameter, optical depth and ice water path of clouds. Thus, the TOA net radiative forcing of clouds is reduced. This means that the cooling effect of clouds is restrained.

Key words: dust aerosols; MODIS; Aqua satellite; CERES; cloud properties and radiative forcing