

华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响

贾璇^{1,2}, 王文彩³, 陈勇航^{1*}, 黄建平³, 陈建民², 张华⁴, 白鸿涛¹, 张萍¹ (1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 3. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000; 4. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 采用 CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C 和 CALIPSO 卫星探测资料结合地面台站沙尘观测资料, 通过对强沙尘天气过程中纯云区与沙尘云区大气层顶处辐射强迫值的对比分析, 研究了我国华北地区沙尘气溶胶对云辐射强迫的影响。研究发现, 2006 年 4 月 16 日、5 月 16 日、2007 年 3 月 30 日 3 次过程沙尘云区大气层顶云的净辐射强迫绝对值比纯云区分别减小了 7.1%、17.2% 和 3.1%, 云的冷却效应受到不同程度抑制。纯云区与沙尘云区云的光学特性参量的对比分析结果表明, 绝大部分沙尘云区的云粒径、云水路径和光学厚度值均比纯云区的小。

关键词: 沙尘气溶胶; 云; 辐射强迫; 云光学特性

中图分类号: X16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2010)08-1009-06

Influence of dust aerosols on cloud radiative forcing over Northern China. JIA Xuan^{1,2}, WANG Wen-cai³, CHEN Yong-hang^{1*}, HUANG Jian-ping³, CHEN Jian-min², ZHANG Hua⁴, BAI Hong-tao¹, ZHANG Ping¹ (1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2010,30(8): 1009~1014

Abstract: Influence of dust aerosols on top-of-atmosphere (TOA) radiative forcing (RF) of clouds over Northern China was analyzed by comparing that of pristine cloudy regions with that of dust contaminated cloudy regions using data from CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C, CALIPSO satellite and dust observations from meteorological stations. The results show that for the three episodes of April 16, 2006, May 16, 2006 and March 30, 2007, the TOA net RF over dusty clouds was 7.1%, 17.2% and 3.1% less than that over pure clouds. The cooling effect of clouds was weakened to varying degrees. The comparison of cloud optical properties between pristine cloudy regions and dust contaminated cloudy regions showed that in most cases the particle radius/diameter, water path and optical depth of dusty clouds were less than the same parameters of pure clouds.

Key words: dust aerosol; cloud; radiative forcing; cloud optical property

我国华北地区的大气环境往往受到来自蒙古国及我国内蒙古西部、新疆地区、甘肃西部等地区沙尘的严重影响^[1-4]。研究表明, 沙尘天气过程是影响北京市春季空气质量的主要因素并对颗粒物年均浓度有明显贡献^[5-7]。沙尘天气发生时, 大量沙尘滞留在大气中, 成为对流层气溶胶的主要成分之一, 据估计, 全球每年进入大气的沙尘气溶胶达 10~20 亿 t^[8], 约占对流层气溶胶总量的一半。

沙尘气溶胶通过散射、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, 从而影响区域和全球的气候及生态环境。沙尘气溶胶粒子作为云的凝结核影响云的光学特性、云量、云的寿命, 进而影响气候^[9-10]。近年来, 沙尘气溶胶粒子与云的相互作用引起了广泛的研究^[11-13], 结果表明, 沙尘和云的相互作用对区域和

收稿日期: 2009-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40875073, 40725015); 科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036)

* 责任作者, 副教授, yonghangchen@dhu.edu.cn

全球气候环境变化会产生重要影响,但由于沙尘气溶胶的辐射效应是一个很复杂的过程,加之观测手段和资料的局限,其间接影响被公认为辐射强迫的最不确定源之一,目前这方面仍存在很大的不确定性^[14]。近年来,以美国为首,欧洲、日本等国参与的“全球对地观测计划(EOS)”,通过发射多颗卫星对地球环境进行长期而全面的观测,为更好地解决这一问题提供了有力的手段。

本研究采用卫星探测资料结合地面台站观测资料,尝试通过对3次强沙尘天气过程的分析,进行一些研究方法的探索,以期为了解我国华北地区沙尘气溶胶影响云光学特性和辐射强迫提供参考。

1 资料与方法

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,其强沙尘暴标准见表1。该数据集以天气过程为单元给出了1954~2007年中国强沙尘暴的序列,根据强沙尘暴标准选出了3次较典型的强沙尘过程作为研究对象(表2),并着重分析了2007年3月27~4月3日的这次典型个例。

表1 单站强沙尘暴标准

Table 1 Criterion of strong dust storm for single station

强度	最小能见度 $V(\text{m})$	瞬时极大风速 $f(\text{m/s})$
强	0级、1级 或 $V < 200$	$f > 20$
中等	2级 或 $200 < V < 500$	$17 \leq f < 20$
一般	3级 或 $500 < V < 1000$	$10 \leq f < 17$

注:在气象观测中,当极大风速缺测时,看十分钟平均最大风速;当两者都缺测时,只看能见度;优先考虑能见度条件,当风速条件不满足时,该条记录也视为参考记录,并参与统计

采用美国宇航局(NASA)地球观测系统(EOS)的首要组成部分“云与地球辐射能量系统(CERES)”的单扫描仪(SSF)和加载在Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)获取的辐射和云反演数据集 CERES SSF Aqua MODIS Edition 2B/2C。CERES观测数据的分析处理方法是在以往的科学实验奠定的基础之上经过改进而来的,因此准确性更高,其产品包含了从大气顶

到地表大气反射的太阳辐射和地球发射的红外辐射,其传感器能测量可见光直到远红外光谱区的辐射,并采用宽带测量仪获得大气层顶的辐射通量资料,同时引进了新的角分布模式^[15-16]。

表2 强沙尘过程个例气象要素

Table 2 Meteorological elements of strong dust events

起止时间	最小能见度(m)	最大极大风速(m/s)
2006年4月16~17日	200	24.5
2006年5月16日	200	22.9
2007年3月27~4月3日	0	28.5

本研究计算的是大气层顶处的辐射强迫,根据前人^[17-18]的定义,云的短波(SW)辐射强迫 C_{sw} 是晴空反射回的太阳辐射通量(F)与有云时反射回的太阳辐射通量(F_{clr})之差,这个量给出了云对太阳辐射影响的一个定量估计;而其长波(LW)辐射强迫 C_{lw} 是晴空发射的红外辐射通量(F)与有云天空发射的红外辐射通量(F_{clr})之差,为云对热红外辐射影响的一个度量。以上2者之和为云的净辐射强迫(C_{net}),即:

$$C_{\text{sw}} = K_{\text{clr}}^{\text{sw}} - F^{\text{sw}} \quad (1)$$

$$C_{\text{lw}} = F_{\text{clr}}^{\text{lw}} - F^{\text{lw}} \quad (2)$$

$$C_{\text{net}} = C_{\text{sw}} + C_{\text{lw}} \quad (3)$$

由于沙尘气溶胶是通过改变云的光学特性参量来改变云的辐射强迫,从而间接对气候产生影响,所以选取光学厚度、云水路径、云粒径来探讨分析沙尘气溶胶对云的影响:

首先采用传统方法,即利用环境卫星(Aqua/MODIS)沙尘监测图像和地面台站资料相结合的方法进行2006年4月16~17日和2006年5月16日2次沙尘过程的研究区域的选取。为了减少传统方法在对沙尘云区与纯云区进行选取时可能导致的误差,本研究在2007年3月27~4月2日沙尘过程的分析中采用了气溶胶激光雷达和红外开拓者卫星观测(CALIPSO)数据进行沙尘云区和纯云区的区分。CALIPSO是由NASA的兰利研究中心和法国国家空间研究中心(CNES)联合开展的一项对地探测小卫星研制项目,其主要任务是观测研究大气中的气溶胶粒子,它不仅能提供气

溶胶和云随经纬度变化的特性,还能提供气溶胶和云的垂直分布信息,并能识别气溶胶类型及云的水/冰相态、获取辐射通量和大气状态等至关重要的数据^[19-20]。利用 CALIPSO 数据可以从垂直角度识别云和沙尘气溶胶的优势,从而能够较以往更准确地确定云和气溶胶层的交叠区。此外,在选取过程中,为了尽量避免纯云区和沙尘云区的宏观动力、水汽条件等气象因素和下垫面的可能差异对结果造成影响,对区域内的云的有效云温、云量、云高和湿度条件进行了比对,并尽量选取了时间和经纬度范围相近的区域作为研究对象。

2 结果与讨论

由表 3 可见,2006 年 4 月 16 日~4 月 17 日及 2006 年 5 月 16 日 2 次沙尘天气下,沙尘云区的云粒径、云水路径和光学厚度 3 个云光学特性参量平均值大多比纯云区的要小,但是也出现了一些

不同的情况,4 月 16 日沙尘区的水云光学厚度大于纯云区;5 月 16 日沙尘区水云的云粒子半径大于纯云区,且沙尘区冰云的光学厚度大于纯云区。这种情况的出现可能是由于传统的研究方法无法判别纯云区下大气垂直层里存在沙尘的情况,从而在选取纯云区时可能导致误判。此外,云滴粒子数浓度的变化、沙尘气溶胶是否有效转化为云中凝结核也可能是导致这种情况的原因。

为了减少传统方法在选取沙尘云区与纯云区时可能导致的误差,对 2007 年 3 月 27 日~4 月 2 日一次罕见的大范围(我国新疆、甘肃、青海、陕西、内蒙古、北京、天津、山东、辽宁、江苏、上海等地均受影响)强沙尘天气过程利用 CALIPSO 卫星垂直观测数据进行沙尘云区和纯云区的筛选,并将这次沙尘过程作为典型个例,对纯云区与沙尘云区的云光学特性参量和辐射强迫进行对比分析。

表 3 2006 年 4 月 16 日及 5 月 16 日沙尘过程云参量平均值

Table 3 Cloud parameters of dust cases during April 16 and May 16, 2006

云相态	云区	2006-04-16			2006-05-16		
		光学厚度 (无量纲)	云水路径 (g/m ³)	水云粒子半径/冰云粒子直径(μm)	光学厚度 (无量纲)	云水路径 (g/m ³)	水云粒子半径/冰云粒子直径(μm)
水云	纯云区	5.88	53.32	15.67	18.16	95.23	10.72
	沙尘云区	7.04	49.81	13.59	4.38	31.16	10.96
冰云	纯云区	7.12	82.94	35.87	9.66	240.66	69.65
	沙尘云区	3.79	40.00	32.48	9.77	235.52	52.62

表 4 2007 年 3 月 27 日~4 月 2 日个例研究范围选取

Table 4 Selection of study area of the case during March 27 to April 2, 2007

云区	编号	时刻	纬度(°N)	经度(°E)
纯云区	1(P)	2007-03-29T05:16:02	38.723~40.813	122.8~123.46
	2(P)	2007-03-30T05:58:09	42.101~44.363	121.6~122.38
	3(P)	2007-04-02T04:50:36	39.404~42.914	125.2~126.34
	4(P)	2007-04-02T04:51:35	42.958~44.997	124.47~125.18
沙尘云区	1(D)	2007-03-31T05:03:32	33.966~41.269	119.567~121.762
	2(D)	2007-03-31T05:04:31	30.075~37.217	110.010~111.992
	3(D)	2007-04-02T04:51:44	36.509~38.826	126.52~127.21
	4(D)	2007-04-02T04:52:17	41.715~42.381	125.38~125.60

针对这次过程,在华北地区选出沙尘云区和纯云区各 4 个,统计了像素点在不同的云粒径、云水路径和光学厚度值范围内出现的频率(图

1~3),统计样本包括了纯云区和沙尘云区内的所有符合条件的像素点,共 852 个,具体观测时间及经纬度范围见表 4。然后对表 4 中列出的沙尘云

区与纯云区分别计算了空间区域内各像素点光学特性参量及辐射强迫的平均值(表 5)。

从图 1~图 3 可看出,无论水云还是冰云,沙尘云的高频率区集中在粒径、云水路径和光学厚度值的小值区,而纯云区的这些光学特性参量值的分布范围相对更宽。

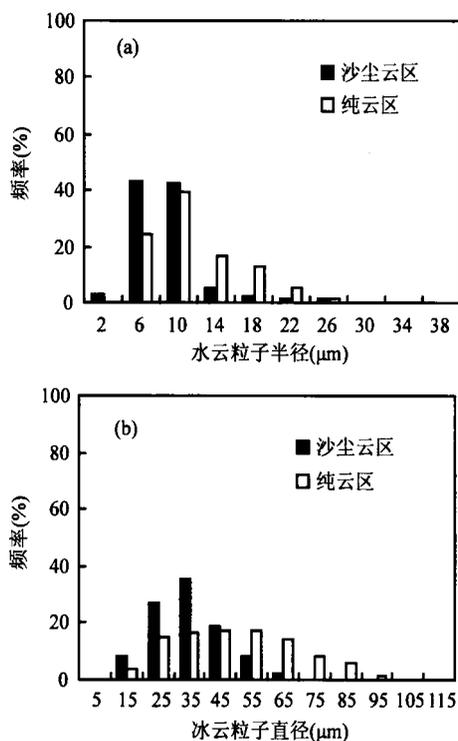


图 1 沙尘云区与纯云区的云粒径频率分布

Fig.1 Comparison of the frequency distribution of water particle radius and ice particle diameter over the pure clouds and clouds over dust

从水云和冰云的粒径来看,水云粒子半径平均值由纯云区的 $11.65\mu\text{m}$ 降到了沙尘云区的 $8.95\mu\text{m}$,而冰云粒子直径平均值也由纯云区的 $49.62\mu\text{m}$ 降到了沙尘云区的 $34.52\mu\text{m}$ (表 5)。同时,不管对于冰云还是水云,沙尘云区的粒径集中在较小的粒径范围内,而较大的云粒径值在纯云区出现的频率远高于沙尘云区(图 1)。这可能是由于沙尘增加了云的凝结核,导致了云滴尺寸变小,进而会影响云的其他光学特性及云的生命周期。从水云和冰云的云水路径(WP)值来看(表 5),水云 WP 平均值由纯云区的 $107.35\text{g}/\text{m}^2$ 减小到了沙尘云区的 $53.46\text{g}/\text{m}^2$,冰云 WP 平均值也由纯云区的

$236.83\text{g}/\text{m}^2$ 降到了沙尘云区的 $39.66\text{g}/\text{m}^2$ 。另外,从图 2 可以看出较大的 WP 值仅出现在纯云区,而沙尘云区云的 WP 值均集中在较小范围内。

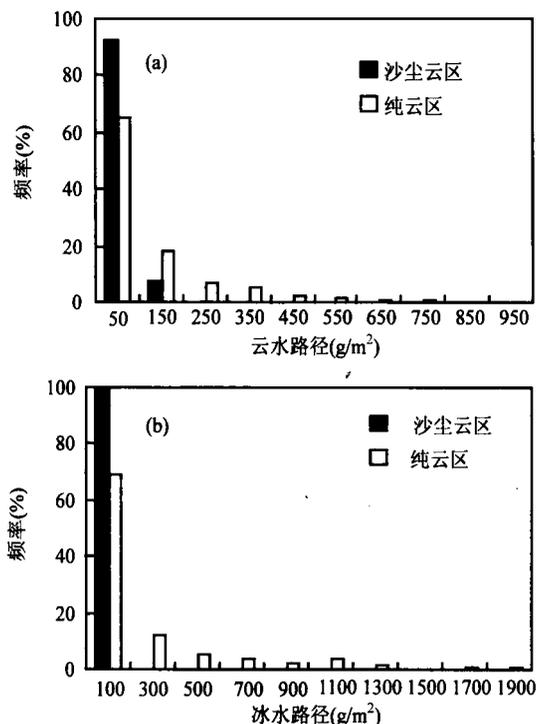


图 2 沙尘云区与纯云区云的云水路径的频率分布

Fig.2 Comparison of the frequency distribution of liquid water path and ice water path over the pure clouds and clouds over dust

与粒子半径和云水路径的规律一致,对于水云/冰云,越小的光学厚度(OD)值在沙尘云区出现的频率越高,而大的 OD 值仅出现在纯云区(图 3)。纯云区的水云和冰云的 OD 均值分别比沙尘云区的 OD 均值减小了 7.23 和 10.33(表 5)。云的光学厚度的变化受到云中凝结核尺度、云水路径及云滴数浓度等特性参数的影响,因此,OD 值的变化可能是由于沙尘气溶胶对云的粒径和云水路径的影响导致,也可能是由于云滴数浓度的变化所致,但由于目前观测手段的限制,这里尚无法准确给出云滴数浓度的变化情况。

由表 5 可见,沙尘云区云的光学厚度、云水路径和云粒径的均值都比纯云区小,同时反映出沙尘导致大气层顶处云的净辐射强迫绝对值减小,云的冷却效应受到抑制。还可看出,沙尘云

区云的长波辐射强迫较纯云区有所增加. 总体来说, 沙尘云区和纯云区的辐射强迫绝对值相差较大, 从而反映出沙尘气溶胶对气候造成较大的影响.

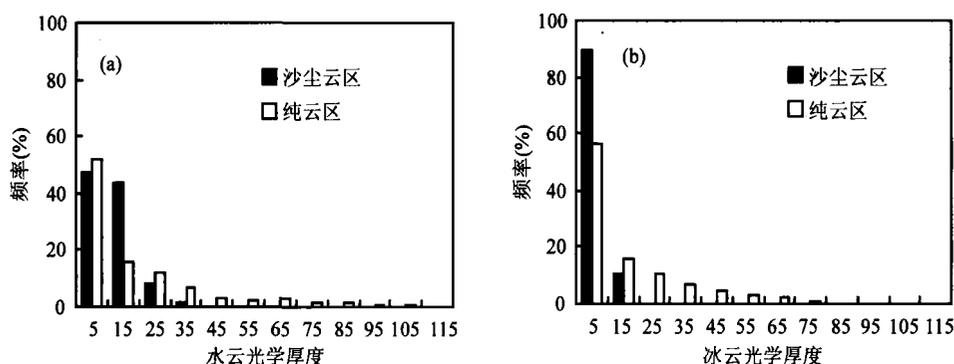


图3 沙尘云区与纯云区云光学厚度的频率分布

Fig.3 Comparison of the frequency distribution of cloud optical depth over the pure clouds and clouds over dust for water clouds and ice clouds

表5 2007年3月27日~4月2日云参量及辐射强迫均值

Table 5 Cloud parameters and the mean radiative forcing of the strong cases during March 27 to April 2, 2007

云相态	云区	光学厚度	云水路径 (g/m^2)	水云粒子半径/冰云 粒子直径(μm)	辐射强迫(W/m^2)		
					短波	长波	净辐射
水云	纯云区	18.54	107.35	11.65	-176.78	38.40	-138.38
	沙尘云区	11.31	53.46	8.95	-190.80	60.94	-129.86
冰云	纯云区	14.34	236.83	49.62	-204.88	47.31	-157.57
	沙尘云区	4.01	39.66	34.52	-193.53	69.96	-123.57

表6 3次沙尘过程辐射强迫均值

Table 6 Mean radiative forcing of three cases

日期	纯云区辐射强迫(W/m^2)			沙尘云区辐射强迫(W/m^2)		
	短波	长波	净辐射	短波	长波	净辐射
2006-04-16	-191.30	69.99	-121.31	-169.23	56.48	-112.75
2006-05-16	-222.71	71.43	-151.29	-190.99	65.75	-125.24
2007-03-30	-243.78	88.71	-155.08	-227.77	77.46	-150.31

由表6可看出,3次沙尘过程纯云区和沙尘云区大气层顶处云的辐射强迫的结果是一致的,只是数量上有所差别.2006年4月16日、5月16日及2007年3月30日沙尘云区大气层顶云的净辐射强迫比纯云区分别减小了7.1%、17.2%和3.1%,云的制冷效应受到了抑制.Huang等^[21]分析了东亚中纬度地区的多次沙尘过程,发现沙尘云的净辐射强迫比纯云小42.1%,王玉洁等^[22]通过研究我国西北地区一次沙尘暴过程,发现沙尘气溶胶明显改变了云的物理特性,使得云的净辐射强迫减小了30%左右.Su等^[23]利用CERES数据和Fu-Liou辐射传输模式研究了2003~2006年亚洲沙尘对云特性及辐射强迫的影响,并计算得到4年的平均沙尘云短波、长波、净辐射强迫值分别为-138.9,69.1,-69.7 W/m^2 ,其分别为纯云区对应值的57.0%,74.2%和46.3%,沙尘的存在削弱了云的制冷效应;此外,他们发现辐射强迫与云的光学厚度具有良好的相关性,其中,沙尘云的光学厚度比纯云减少了34%左右,水云和冰云粒径则分别减少了30%和17%,这与本文对云参量变

化的研究是基本一致的。

3 结论

3.1 2006年4月16日、5月16日、2007年3月30日三次过程中,沙尘云区大气层顶云的净辐射强迫绝对值比纯云区分别减小了7.1%,17.2%和3.1%,云的冷却效应不同程度受到抑制。

3.2 采用CALIPSO判别云区的研究结果表明,沙尘云集中在较小的粒径、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。

3.3 本研究对沙尘气溶胶的间接效应的定量研究还存在着不确定性。在沙尘云区与纯云区的选取手段上的局限、云滴粒子数浓度的改变、沙尘气溶胶是否有效转化为云中凝结核等因素都会导致这种不确定性。

参考文献:

- [1] 高庆先,李令军,张运刚,等.我国春季沙尘暴研究[J].中国环境科学,2000,20(2):495-500.
- [2] 高庆先,苏福庆,任阵海,等.北京地区沙尘天气及其影响[J].中国环境科学,2002,22(5):468-471.
- [3] 陈勇航,毛晓琴,黄建平,等.一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究[J].中国环境科学,2009,29(5):449-454.
- [4] 邱玉琚,牛生杰,岳平,等.半干旱区春季沙尘气溶胶谱分布的观测研究[J].中国环境科学,2009,29(10):1021-1028.
- [5] 任晰,胡非,胡欢陵,等.2000-2002年沙尘现象对北京大气中PM₁₀质量浓度的影响评估[J].环境科学研究,2004,17(1):51-55.
- [6] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等.北京PM_{2.5}浓度的变化特征及其与PM₁₀、TSP的关系[J].中国环境科学,2002,22(6):506-510.
- [7] 章文星,吕达仁,王普才.北京地区大气气溶胶光学厚度的观测和分析[J].中国环境科学,2002,22(6):495-500.
- [8] 邓祖琴,韩永翔,白虎志,等.沙漠地区沙尘气溶胶含量变化的原因分析[J].中国环境科学,2009,29(12):1233-1238.
- [9] 毛节泰,张军华,王美华.中国大气气溶胶研究综述[J].气象学报,2002,65(5):625-634.
- [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[J].中国环境科学,2008,28(2):102-106.
- [11] 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.
- [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 Jian-ping, Minnis Patrick, Lin Bing, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES [J]. Geophysical Research Letters, 2006,33,L06824,doi:10.1029/2005GL024724.
- [14] 王明星,张仁健.大气气溶胶研究的前沿问题[J].气候与环境研究,2001,6(1):119-124.
- [15] Minnis P, Kratz D P, Coakley J A, et al. Cloud optical property retrieval (Subsystem 4.3). clouds and the earth's radiant energy system (CERES) algorithm theoretical basis document [M]. Volume III: Cloud Analyses and Radiance Inversions (Subsystem 4). NASA RP 1376,1995,3:135-176.
- [16] 陈勇航,白鸿涛,黄建平,等.西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究[J].中国环境科学,2008,28(2):97-101.
- [17] 陈勇航,毛晓琴,黄建平,等.西北典型地域条件下云量的对比分析[J].气候与环境研究,2009,14(1):1-8.
- [18] LIOU K.N.大气辐射导论[M].北京:气象出版社,2004.
- [19] 刘刚,史伟哲,尤睿.美国云和气溶胶星载激光雷达综述[J].航天器工程,2008,17(1):78-84.
- [20] 肖昊.美国发射“云卫星”和“卡利普索”“地球观测系统”再添2颗重要卫星[J].国际太空,2006,(6):1-5.
- [21] Huang Jianping, Wang Yujie, Wang Tianhe, et al. Dusy cloud radiative forcing derived from satellite data for middle latitude regions of East Asia [J]. Progress in Natural Science, 2006,16(10):1084-1089.
- [22] 王玉洁,黄建平,王天河.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[J].干旱气象,2006,24(3):14-18.
- [23] Su Jing, Huang Jiangping, Fu Qiang, et al. Estimation of Asian dust aerosol effect on cloud radiation forcing using Fu-Liou radiative model and CERES measurements [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008,(8):2763-2711.

致谢: 本文资料来自美国 NASA Langley Distributed Active Archive Center 和中国气象科学数据共享服务网,在论文修改时得到成天涛老师的帮助,在此表示感谢。

作者简介: 贾璇(1987-),女,安徽铜陵人,复旦大学环境科学与工程系硕士研究生,主要从事大气科学研究。