



基于 MODIS 的春、夏季中国近海气溶胶 对于云参数的影响差异研究

摘要

通过分析中国近海 MODIS 数据中气溶胶参数与云参数的相互关系,讨论了该区域气溶胶的间接效应及其对于云的可能影响.结果表明,在中国近海,气溶胶具有明显的间接效应,而且由于气溶胶种类和水汽的季节变化,使得气溶胶的间接作用具有很强的时间变化特征.在夏季,由于人为气溶胶占主导,它作为有效的云凝结核,使得气溶胶光学厚度(AOT)分别与云凝结核数(CCN)有正相关、与云滴有效半径(CER)有负相关性、与云光学厚度(COT)也存在着正相关,气溶胶的间接效应明显;在春季,由于沙尘气溶胶盛行,同时沙尘并不是很好的云凝结核,使得气溶胶光学厚度(AOT)分别与云凝结核数(CCN)的正相关减弱、与云滴有效半径(CER)则由夏季的负相关变为正相关、与云光学厚度(COT)存在弱的负相关,气溶胶的间接效应不明显.

关键词

中分辨率成像光谱仪(MODIS);气溶胶;云;中国近海

中图分类号 P401

文献标志码 A

收稿日期 2012-10-23

资助项目 安徽省自然科学基金(1308085MD55);国家自然科学基金(40905046);江苏省高校自然科学研究面上项目(10KJB170007);气象灾害省部共建教育部重点实验室开发课题(KLME1104)

作者简介

邓学良,男,博士生,从事气溶胶气候效应研究.dengxueliang9989@aliyun.com

1 安徽省气象科学研究所,合肥,230031

2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室,合肥,230031

3 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京,210044

4 国家气候中心,北京,100081

0 引言

大气气溶胶通常是指悬浮在大气中直径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的液态或固态的微小粒子.对流层气溶胶是陆地-大气-海洋系统的重要组成部分^[1],它通过直接或间接辐射强烈地影响着地-气系统的辐射收支平衡,进而影响全球环境和气候,是气候变化研究的一个重要因子^[2].

近年来,由于人类活动的加剧,大量的人为气溶胶和自然气溶胶被排放到大气中,使得气溶胶的浓度不断增加.研究表明,气溶胶可以吸收和反射太阳入射光,对于地球来说是一个冷室作用^[3],称为气溶胶的直接效应.气溶胶还通过对云的作用,实现它的间接效应.小颗粒气溶胶($r < 1.0\ \mu\text{m}$),尤其是硫酸盐,可以很好地作为云凝结核^[4].观测和模式结果都显示,在液态水含量不变的情况下,人为气溶胶浓度增加,会使云凝结核数量增加,导致云滴半径的减小^[5],这就是气溶胶的一次间接作用,也叫做 Twomey 效应^[6-7].变小的云滴减小了云滴粒子间碰并的几率,使得降雨量减少,延长了云的寿命,增加了云量,这是气溶胶的二次间接作用^[8].由于气象条件和气溶胶种类的变化,气溶胶的间接作用表现出区域变化和时间变化的特征^[9-10].

小颗粒吸湿性的人为气溶胶是最好的云凝结核.由于人类活动,它们被大量的输送到近海海域,所以近海是气溶胶间接作用最明显的海域^[11-12].在远海,大颗粒的海盐气溶胶也可以作为云凝结核,但是其形成的云滴尺度要大于近海^[13].因此,在近海,气溶胶的间接效应主要是指人为气溶胶的间接效应,而对于其他类型气溶胶的间接效应很少有研究,如沙尘.但是有研究表明,如果在非吸湿性的沙尘气溶胶外包裹一层可溶性物质,如硫酸盐,沙尘也是可以作为云凝结核的^[14].

中国近海受到中国内陆气溶胶的影响,是世界上气溶胶浓度最大的区域之一.由于内陆气溶胶和气象场的季节性变化的影响,该海域气溶胶的分布也具有明显的季节特征^[15].在春季,受西北气流和陆源沙尘的共同作用,该海域以沙尘气溶胶为主;在夏季,受到南风和降雨的共同作用,该海域主要是人为气溶胶.

前人对于气溶胶间接效应的研究主要局限于很小的区域^[16]或全球区域^[9],而对于同一区域内由于气溶胶种类的变化导致的气溶胶

间接效应的变化研究较少.本文正是利用 MODIS 数据分析了中国近海由于气溶胶种类的季节变化引起的气溶胶间接效应的变化.

1 资料和方法

本文选取的研究区域为我国渤海、黄海和东海的大部海域(120~135°E, 25~40°N), 该区域受到陆源气溶胶的影响, 在夏季以人为气溶胶为主, 而在春季则受到沙尘气溶胶的控制^[17].

研究数据选取的是该海域 2006 年 4 月和 8 月的 Terra MODIS 日平均的 1°×1°的气溶胶和云参数数据.其中气溶胶参数包括 550 nm 处气溶胶光学厚度(AOT)和小颗粒比例(FMF);云参数包括云凝结核数(CCN)、云滴有效半径(CER)和云光学厚度(COT)等.先对各月的数据在格点上进行月平均, 然后对各月月平均的气溶胶参数和云参数作相关分析, 这样能更好地反应它们之间的统计关系, 避免异常值的影响.

气溶胶光学厚度(AOT)定义为气溶胶对太阳光通过整层大气的衰减系数, 是表征大气浑浊度的重要物理量^[18], 在一定程度上反映了气溶胶浓度.陈本清等^[19]利用 AERONET 数据对 MODIS 的 550 nm 处气溶胶光学厚度在中国海域的精度进行了验证, 结果表明 MODIS 的 AOT 误差控制在 $\pm 0.05\tau$ 内.小颗粒比例(FMF)定义为 550 nm 处小于 1.0 μm 的小颗粒气溶胶光学厚度与总气溶胶光学厚度的比例. FMF 越大, 则小颗粒气溶胶的比例越大; FMF 越小, 则小颗粒气溶胶的比例越小.由于人为形成的气溶胶如硫酸盐等, 主要是小颗粒气溶胶, 而自然气溶胶如沙尘和海盐, 主要是大颗粒气溶胶, 所以 FMF 还可以用来区分人为气溶胶和自然气溶胶. Remer 等^[20]和 Anderson 等^[21]已经做了大量而权威的验证工作, 得到了一致的结果, FMF 在海洋上误差控制在 30% 以内.

云凝结核(CCN)指空气相对湿度在过饱和度小于等于 1% 的条件下, 便能使水汽在其上凝结的大气凝结核.它是云形成的必要条件, 是真正成为造云致雨的大气凝结核, 在海洋空气中占气溶胶总数的 10~20%.云滴有效半径(CER)反应了云滴粒子的尺度信息, 当 CER 小于 20 μm 时, MODIS 的 CER 的误差控制在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ^[22].云光学厚度(COT)是云对入射太阳光的衰减作用, 和 AOT 类似. MODIS 数据中根据云的微结构特征把云分为水云、冰云和冰水混

合云 3 类, 因为气溶胶主要作用于低层的水云, 所以本文只对水云进行研究, 不考虑其他 2 种情况.

下面通过比较和分析 AOT、FMF、CCN、CER 和 COT 之间的关系, 来研究中国近海海域气溶胶的间接作用的时间变化特征.

2 结果分析

2.1 全年总体情况

图 1 是 2006 年在中国近海海域(120~135°E, 25~40°N), AOT、FMF、CCN 和 CER 的 12 个月时间序列.可以看出 4 个参数都有明显的时间变化规律.在春季, AOT 达到最大, 在 4 月出现极大值 0.66, 而 FMF 则达到最小, 在 4 月出现极小值 0.45, 这主要是由于春季西风气流(图 2)把陆源沙尘大量输送到中国近海, 引起 AOT 的增大和 FMF 的减小; 与之同时, CCN 在春季也达到一年中的最大值, 而 CER 则出现最小值.在夏季, 情况则相反, AOT 达到最小, FMF 则达到最大, 这是由于夏季降雨的增多使得大颗粒的气溶胶粒子减少, 同时风向的转变(图 2)把大量的人为气溶胶输送到中国近海, 使得 AOT 减小和 FMF 增大; CCN 在夏季由于 AOT 的减小, 也达到一年中的最小, 而 CER 则出现最大值.

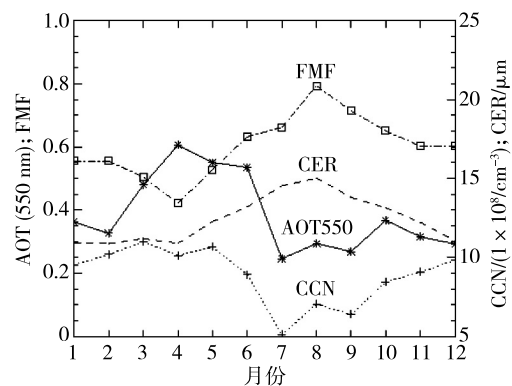


图 1 2006 年 AOT、FMF、CCN 和 CER 的 12 个月时间序列

Fig. 1 Monthly time series of MODIS AOT, FMF, CCN and CER in 2006

通过分析可以看出, 在春季和夏季, 由于风向的转变以及陆源气溶胶种类的变化, 使得中国近海气溶胶的特性存在明显的时间变化, 而气溶胶作为云形成的重要条件, 它的变化必定引起云的变化. 从图 1 可以很清楚地看到: AOT 与 CCN 存在明显的正相关性, 而与 CER 存在显著的负相关性, 这一结果与前人的研究一致^[5]. 气溶胶粒子是云凝结核的主要

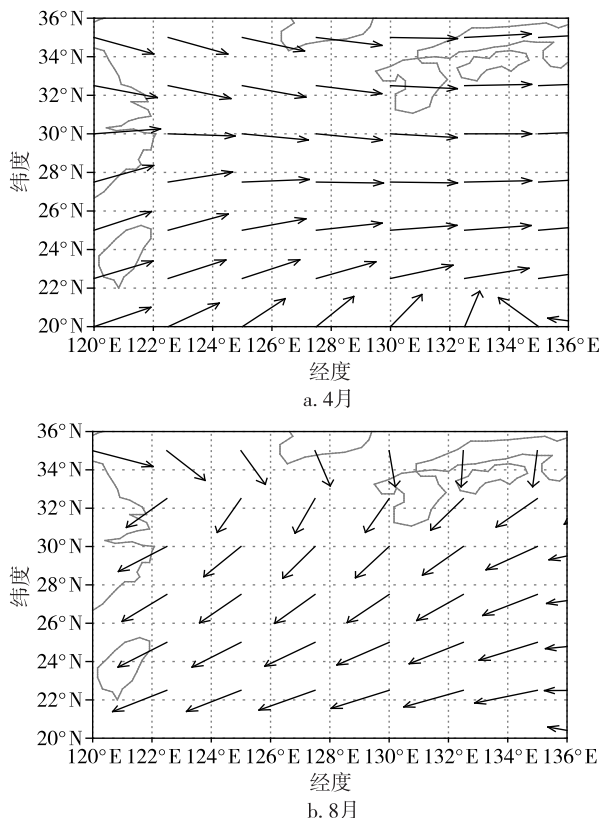


图2 2006年4月和8月的850 hPa风矢量
Fig. 2 Wind vector at 850 hPa in April and August, 2006

来源,当气溶胶数量增加,云凝结核数量跟着增加,导致云滴半径的减小,实现对云的影响.从2006年全年来看,气溶胶对云的作用是很明显的.

同时要注意到,在夏季和春季,由于陆源气溶胶种类和气象场条件的变化,中国近海气溶胶种类存在着明显的变化.在夏季以小颗粒的人为气溶胶为主,而在春季则以大颗粒的沙尘气溶胶为主.不同类型的气溶胶对于云的作用是不同的.为了弄清中国海域由于气溶胶种类的时间变化引起的气溶胶间接效应的变化,本文选取4月和8月2个典型的月份进行分析.

2.2 夏季

夏季以8月为例,在北风的作用下(图2),中国近海气溶胶主要来自日本、韩国和中国北部沿岸的工业排放,同时8月是一年中降雨最多月份,大颗粒气溶胶大多被雨水清除,小颗粒气溶胶的比例达到最大,FMF出现极大值.Jones等^[23]的研究显示,典型人为气溶胶的FMF值是 0.84 ± 0.04 ,而图3中8月的FMF值大多在这个范围内,说明8月中国近海气溶胶的主要成份是小颗粒的人为气溶胶.

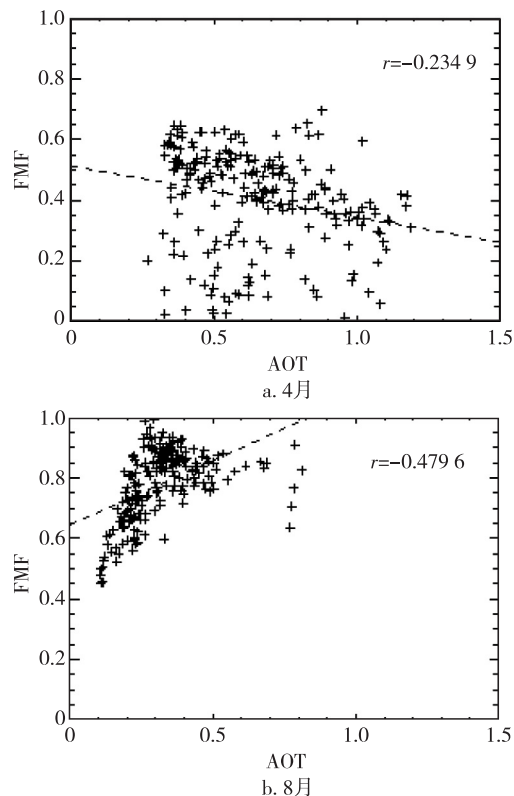


图3 气溶胶光学厚度(AOT)与小颗粒比例(FMF)散点
(相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)

Fig. 3 Distribution of AOT at 550 nm and FMF in April and August, with correlation coefficient passes significance test at $\alpha=0.05$

研究表明,直径大于 $0.05 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子,特别是硫酸盐粒子,为云滴和冰晶的形成贡献了大部分凝结核和冰核^[24],而硫酸盐粒子主要来自人为过程^[1].图4是AOT与CCN的线性回归,在8月,AOT与CCN具有极好的正相关,相关系数达到0.7970.气溶胶浓度的增大引起大气中的云凝结核数量的增加,说明了小颗粒的人为气溶胶可以很好地充当云凝结核的作用.但是也要看到,在 $\text{AOT} < 0.4$ 的相关性要明显好于 $\text{AOT} > 0.5$,说明随着气溶胶浓度的增加,气溶胶成为云凝结核的比例是不断下降的.

同时小颗粒气溶胶对云凝结核数量的影响,必然造成云的微物理特性的变化.图5是AOT与CER的线性回归,在8月AOT与CER存在着显著的负相关,相关系数达到 -0.6074 .当气溶胶浓度不断增加时,云滴半径是减小的,说明小颗粒气溶胶浓度的增大使云凝结核数量增加,在同一个月水汽变化不大的前提下,云凝结核的增多必然减小云滴有效半径,使得云滴尺度变小,这就是气溶胶的一次间接效

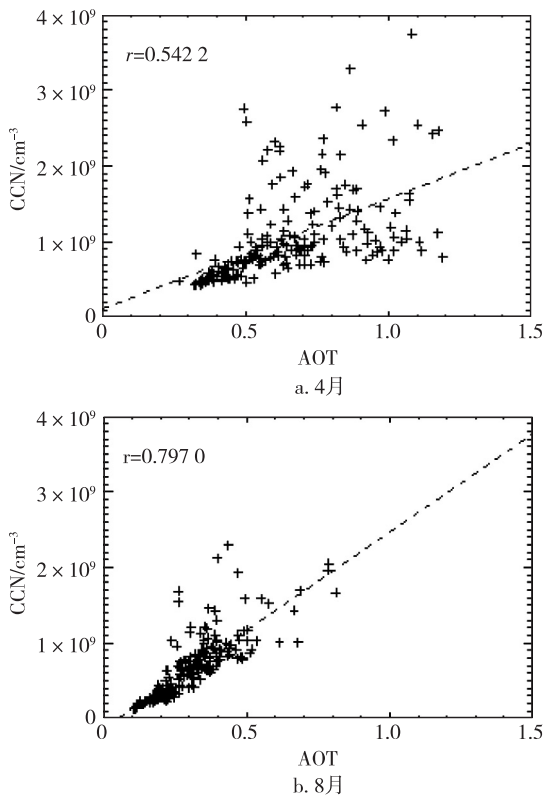


图4 气溶胶光学厚度(AOT)与云凝结核数(CCN)线性回归(相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)

Fig. 4 Linear relationship between AOT and CCN in April and August, with correlation coefficient passes significance test at $\alpha=0.05$

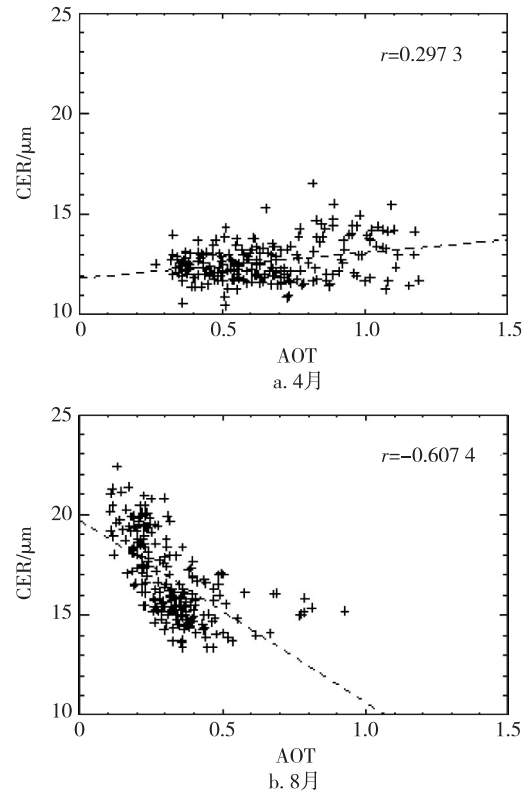


图5 气溶胶光学厚度(AOT)与云滴有效半径(CER)线性回归(相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)

Fig. 5 Linear relationship between AOT and CER in April and August, with correlation coefficient passes significance test at $\alpha=0.05$

应.再看 FMF 与 CER 的线性拟合关系(图 6),小颗粒比例和云有效半径相关系数达到 -0.7587 , FMF 越大, CER 就越小,再次说明了小颗粒气溶胶粒子是非常有效的云凝结核,小颗粒气溶胶的比例越大,对云的一次间接效应越明显.所以,可以看出 8 月由于气溶胶主要是小颗粒的人为气溶胶,可以很好充当云凝结核的角色,从而影响云滴尺度,所以它对云具有显著的一次间接作用.

气溶胶浓度引起云滴有效半径的变化,势必会影响云滴粒子间相互作用.图 7 是 AOT 与 COT 的线性回归关系,气溶胶光学厚度与云光学厚度存在着弱的正相关,气溶胶浓度的增加使得云光学厚度的增大,这可能是由于气溶胶浓度增加,通过一次间接作用引起云滴有效半径的减小,因此降低了云滴粒子间的碰并几率,使得大量的云滴粒子悬浮在空气中,无法形成降雨,导致降雨量的减少和云量的增加,最终使云光学厚度变大,这就是气溶胶的二次间接效应.通过分析可以看出,在 8 月的中国近海,这

种二次间接效应是存在的.

2.3 春季

春季选择沙尘最严重的 4 月进行研究.在 4 月,借助西北气流(图 2),大量的陆源沙尘气溶胶输送到我国近海.从图 3 可以看出,4 月由于沙尘的注入, AOT 大于 8 月,但 FMF 却明显小于 8 月.根据 Jones 等^[23]对于典型沙尘气溶胶 FMF 的计算,典型沙尘气溶胶的 FMF 值为 0.45 ± 0.05 ,而图 3 中 4 月的 FMF 大多在这范围内,甚至更小,说明在 4 月,中国近海气溶胶类型主要是大颗粒的沙尘气溶胶.下面的分析和夏季的类似,主要是为了研究同一海域由于气溶胶类型的时间变化,对云的作用的差异.

根据国外的研究结果,沙尘气溶胶在表层包裹一层硫酸盐后可以作为云凝结核^[25].从图 4 可以看出,在 4 月, AOT 与 CCN 也具有很好的正相关,这也证明大颗粒气溶胶可以作为云凝结核,但是也要看到它们的相关系数要小于 8 月,只有 0.5422,说明大颗粒沙尘成为云凝结核的比例要小于小颗粒人为

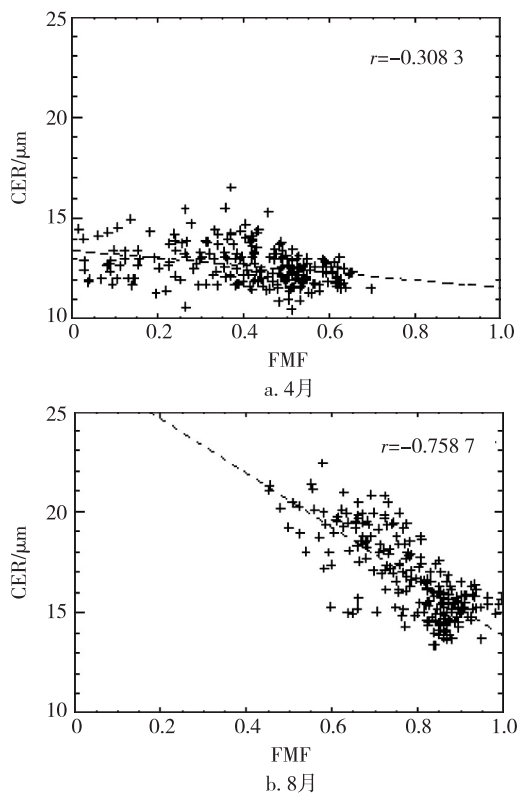


图6 小颗粒比例(FMF)与云滴有效半径(CER)线性回归(相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)

Fig. 6 Linear relationship between FMF and CER in April and August, with correlation coefficient passes significance test at $\alpha=0.05$

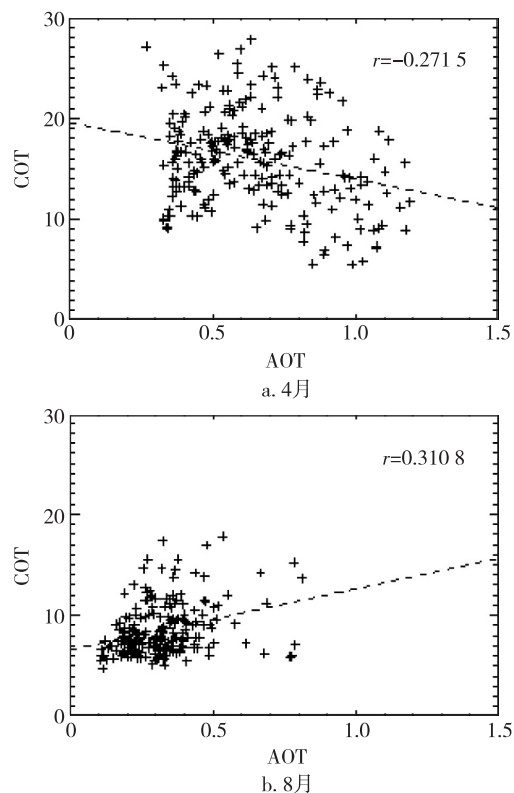


图7 气溶胶光学厚度(AOT)与云光学厚度(COT)线性回归(相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验)

Fig. 7 Linear relationship between AOT and COT in April and August, with correlation coefficient passes significance test at $\alpha=0.05$

气溶胶,这是由于大颗粒气溶胶的粒子半径较大,要求更多的水汽才能被激活成为云凝结核,而春季并不是水汽含量最大的季节,所以虽然 AOT 达到一年中的最大,但 CCN 数量在 4 月和 8 月却是相当的,说明大量的沙尘气溶胶未被激活,沙尘成为云凝结核的效率远低于人为气溶胶。

沙尘成为云凝结核后和人为气溶胶一样,可能会影响云滴尺度,但是从图 5 看,这种影响很小。在 4 月, AOT 与 CER 由 8 月的负相关变为正相关,而相关系数只有 0.297 3,随着 AOT 的增加, CER 却缓慢增加,这与 8 月是不同的。这可能是由于春季空气中的水汽含量不足,无法大量地激活沙尘气溶胶成为云凝结核,使得有限的水汽被少量的沙尘粒子消耗,导致云滴有效半径的增加。再从图 6 看, FMF 与 CER 虽然也还是负相关,但相关性却要远小于 8 月。综合以上分析可知, 4 月, 由于中国近海被大颗粒沙尘气溶胶控制,且空气中水汽含量大幅减少,使得该海域气溶胶对于云的作用很小,气溶胶的一次间接效应

不明显。

再来看气溶胶的二次间接效应。在图 7 中, 4 月的 AOT 与 COT 为负相关,而在 8 月则是正相关,虽然相关系数都很小,但是从符号上的改变可以看出, 4 月沙尘气溶胶对于云的二次间接作用不同于夏季。由于大颗粒的沙尘粒子自身具有很大的质量,在它成为云凝结核并吸附有限的水份后,很容易沉淀形成降雨,从而减小了云滴的寿命和云量,导致云光学厚度的减小。这与夏季是不同的,本文称其为负二次间接作用。

3 结论

以上的分析可以看出,在中国近海,气溶胶对云的影响是显著的,但在不同季节由于气溶胶种类的变化和水汽条件的不同,气溶胶对于云的作用又是不同的:1)夏季,气溶胶以小颗粒人为气溶胶为主,且水汽充足,气溶胶对于云的间接作用明显,气溶胶浓度的增加可能通过改变云滴尺度,进而影响了云

的持续时间和光学特性;2)春季,气溶胶的间接效应不同于夏季,气溶胶以沙尘为主,气溶胶对于云的间接作用并不明显.本文只是通过气溶胶与云参数的相关关系进行了简单分析,但是缺乏物理解释,为了更好地说明气溶胶的间接效应,还需要大量的观测分析进行下一步的研究和证明.

参考文献

References

- [1] 章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995
ZHANG Chengchang, ZHOU Wenxian. Introduction to atmospheric aerosols [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995
- [2] 王明星.气溶胶与气候[J].气候与环境研究,2000,5(1):1-5
WANG Mingxing. Aerosol in relation to climate change [J]. Climatic and Environmental Research, 2000, 5 (1): 1-5
- [3] Christopher S A, Zhang J L. Cloud-free shortwave aerosol radiative effect over the oceans: Strategies for identifying anthropogenic forcing from Terra satellite measurements [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31 (18): L181
- [4] Quaas J, Boucher O, Bréon F M. Aerosol indirect effects in POLDER satellite data and the Laboratoire de Meteorologie Dynamique-Zoom (LMDZ) general circulation model [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109 (D8): D08205
- [5] Bennartz R. Global assessment of marine boundary layer cloud droplet number concentration from satellite [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D2): D02201
- [6] Twomey S A. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1977, 34 (7): 1149-1152
- [7] Kaufman Y J, Fraser R S. The effect of smoke particles on clouds and climate forcing [J]. Science, 1997, 277 (5332): 1636-1639
- [8] Albrecht B. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness [J]. Science, 1989, 245 (4923): 1227-1230
- [9] Matsui T, Masunaga H, Kreidenweis S M, et al. Satellite based assessment of marine low cloud variability associated with aerosol, atmospheric stability, and the diurnal cycle [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111 (D17): D17204
- [10] Li Z Q, Niu F, Fan J W, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. Nature Geoscience, 2011, 4 (12): 888-894
- [11] Jones A, Roberts D L, Slingo A A. A climate model study of indirect radiative forcing by anthropogenic sulphate aerosols [J]. Nature, 1994, 370 (6489): 450-453
- [12] Li S M, Banic C M, Leaitch W R, et al. Water-soluble fractions of aerosol and their relations to number size distributions based on aircraft measurements from the North Atlantic regional experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101 (D22): 29111-29121
- [13] Lohmann U, Lesins G. Comparing continental and oceanic cloud susceptibilities to aerosols [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30 (15): 1791
- [14] Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 98 (11): 5975-5980
- [15] 郝增周,潘德炉,白雁. SeaWiFS 遥感资料分析中国海域气溶胶光学厚度的季节变化和分析特征 [J]. 海洋学研究, 2007, 25 (1): 80-87
HAO Zengzhou, PAN Delu, BAI Yan. Characteristics of the spatial distribution and monthly variation of aerosol optical thickness derived from SeaWiFS over the China Seas [J]. Journal of Marine Sciences, 2007, 25 (1): 80-87
- [16] 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]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, 104 (D6): 6145-6153
- [17] 邓学良,潘德炉,何冬燕,等.卫星遥感中国海域人为和沙尘气溶胶时空分布的研究 [J]. 海洋学报, 2009, 31 (4): 58-68
DENG Xueliang, PAN Delu, HE Dongyan, et al. Anthropogenic and dust aerosol components estimated by satellite data over the China's seas [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31 (4): 58-68
- [18] 李正强,赵凤生.利用静止气象卫星数据确定大气气溶胶光学厚度 [J].量子电子学报,2001,18(4):381-384
LI Zhengqiang, ZHAO Fengsheng. Retrieval atmospheric aerosol optical thickness from geostationary meteorological satellite data [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18 (4): 381-384
- [19] 陈本清,杨燕明.台湾海峡及周边海区MODIS气溶胶光学厚度有效性验证 [J]. 海洋学报, 2005, 27 (6): 170-176
CHEN Benqing, YANG Yanming. Validation of MODIS aerosol optical thickness in the Taiwan Strait and its circumjacent sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27 (6): 170-176
- [20] Remer L A, Kaufman Y J, Tanré D, et al. The MODIS aerosol algorithm, products and validation [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2005, 62 (4): 947-973
- [21] Anderson T L, Wu Y H, Chu D A, et al. Testing the MODIS satellite retrieval of aerosol fine-mode fraction [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005, 110 (D18): D18204
- [22] Tripathi S N, Pattnaik A, Dey S. Aerosol indirect effect over Indo-Gangetic plain [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41 (33): 7037-7047
- [23] Jones T A, Christopher S A. MODIS derived fine mode fraction characteristics of marine, dust and anthropogenic aerosols over the ocean, constrained by GOCART, MOPITT and TOMS [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112 (D22): D22204
- [24] 段婧,毛节秦.气溶胶与云相互作用的研究进展 [J].

地球科学进展,2008,23(3):252-261

DUAN Jing, MAO Jietai. Progress in researches on interaction between aerosol and cloud[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(3): 252-261

[25] Levin Z, Ganor E, Gladstein V. The effects of desert particles coated with sulfate on rain formation in the eastern Mediterranean[J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(9): 1511-1523

Difference of indirect aerosol effect on cloud in spring and summer over China offshore region based on MODIS

DENG Xueliang^{1,2} DENG Weitao³ NIE Suping⁴

1 Anhui Meteorological Institute, Hefei 230031

2 Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Based on analysis of linear relationship between aerosol parameters and cloud parameters in MODIS data, indirect aerosol effect was discussed over the China offshore region. The result showed that indirect aerosol effect indeed exists over the China offshore region. Meanwhile, indirect aerosol effect varies with time, which is a result of the changing of aerosol variety and water vapor content during different seasons. During the summer (e.g. August) time, anthropogenic aerosol is the most important component of aerosol in cloud, which is an effective cloud condensation nuclei. The dominance of anthropogenic aerosol, coupled with sufficient water vapor, contributes to the remarkable indirect aerosol effect in summer. The analysis results show that strong positive correlation exists between aerosol optical thickness (AOT) at 550nm and number of cloud condensation nuclei (CCN), negative correlation exists between AOT and cloud effective radius (CER), and positive correlation exists between AOT and cloud optical thickness (COT). While during the spring (e.g. April) time, dust is the dominant component of aerosol, which is a bad cloud condensation nuclei, and the water vapor content decreases. As a result, both the positive correlation between AOT and CCN, and the negative correlation between AOT and COT, turn to be weak. While the correlation between AOT and CER changes from negative in summer to weakly positive in spring. The indirect aerosol effect is not pronounced in spring over china offshore region.

Key words MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer); aerosol; cloud; China offshore region