

万灵,姚凤梅,张佳华. 华北及临近海域夏季不同降雨量下气溶胶光学厚度与云滴有效半径的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 725-730. [WAN Ling, YAO Fengmei, ZHANG Jiahua. Relationship Between Aerosol Optical Depth and Cloud Effective Radius Under Different Rainfall Conditions in Summer over North China and Its Adjacent Sea Area[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4): 725-730], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0725

华北及临近海域夏季不同降雨量下气溶胶光学厚度与云滴有效半径的关系

万灵^{1,3}, 姚凤梅¹, 张佳华²

(1. 中国科学院大学, 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 中国科学院数字地球重点实验室, 北京 100094; 3. 福建省气象服务中心, 福建 福州 350001)

摘要:利用2008—2012年MODIS和TRMM卫星遥感数据产品逐日资料,分析华北地区及临近海域气溶胶光学厚度的月变化,以及夏季不同降雨量下气溶胶光学厚度与云滴有效半径的关系。结果表明:华北地区及邻近海域气溶胶光学厚度呈明显的季节性变化,陆地上夏季最大、冬季最小,海洋上春季最大、秋季最小;海洋上的气溶胶光学厚度小于陆地。陆地上,夏季气溶胶光学厚度与水云云滴有效半径呈显著正相关,在海洋上二者呈显著负相关,且相关性随降雨量的增加均增大。陆地上,夏季气溶胶光学厚度与冰云云滴有效粒子半径在小雨下呈显著负相关,在中雨和大雨下呈正相关;海洋上,气溶胶光学厚度和冰云有效粒子半径呈显著负相关,且相关性随降雨量的增加而减小。

关键词:AOD; 云滴有效半径; 降雨量; MODIS; TRMM

文章编号:1006-7639(2016)-04-0725-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-04-0725

中图分类号:P421

文献标识码:A

引言

气溶胶主要来源于污染粒子、海盐粒子、沙尘和烟雾等。气溶胶可以通过直接效应和间接效应等途径影响气候^[1]。关于气溶胶与云相互作用的研究,国际上已开展了大量的工作^[2-4],发现大尺度模式模拟结果和观测结果的差异非常大^[5]。对我国陆地及沿海地区开展的研究表明^[6-8],气溶胶和云相互作用受很多因素影响,包括云类型、气溶胶类型和降水类型,不同的云、气溶胶光学厚度和降水类型将表现出截然不同的相互作用。Jin等^[9]利用MODIS和TRMM数据研究发现,中国东部沿海地区的云滴有效粒子半径与气溶胶光学厚度呈显著负相关。石睿等^[10]研究发现东亚地区夏季在水汽含量较低的情况下气溶胶光学厚度和云滴有效粒子半径呈负相关。Wang等^[11]发现中国东部气溶胶污染区域内的气溶胶光学厚度和云滴有效粒子半径呈正相关,而

在东海上空二者呈显著负相关。Zhao等^[12]利用MODIS气溶胶产品和台站降水资料,分析指出中国东部地区的气溶胶对小雨有抑制作用。因此不同区域和时间尺度上气溶胶光学厚度和云滴有效半径之间存在复杂关系,不同区域尺度、不同时间尺度的天气气候条件(如温度、降水、气压和湿度等)下气溶胶和云之间相互关系仍然存在很大的不确定性,有待进一步深入探讨。

华北地区是我国污染较为严重的区域之一,气溶胶光学厚度比较高,且气溶胶易被输送到近海。该区域降水主要集中在夏季,大气气溶胶在大气过饱和或接近饱和的情况下,可作为云凝结核或冰核形成降水粒子胚胎。在这个过程中,大气气溶胶参与了云微物理过程,同时也间接影响了云的辐射特性。目前,对该区域不同气溶胶光学厚度与云滴有效半径的相互关系,以及不同降雨量下气溶胶和云相互作用的研究较少。因此,本文利用MODIS卫星

收稿日期:2015-10-26; 改回日期:2016-01-13

基金项目:中国科学院百人计划项目(Y24002101A)、中国科学院1-3-5创新培育项目(Y3ZZ15101A)和国家自然科学基金项目(31571565)共同资助

作者简介:万灵(1989-),男,硕士研究生,主要从事气候变化研究. E-mail:wanling.1989@qq.com

通讯作者:姚凤梅,副教授,主要从事全球变化与遥感应用研究. E-mail:yaofm@ucas.ac.cn

长期探测资料和 TRMM 雷达降水数据,分析华北地区及其临近海域气溶胶光学厚度的时间分布特征,以及夏季不同降水量下气溶胶光学厚度与云滴有效半径的关系,为进一步认识我国华北夏季气溶胶间接气候效应提供科学依据。

1 研究区域

相关研究指出,华北地区是一典型的气溶胶光学厚度高值区,是研究气溶胶与云相互作用的热点区域^[10]。由于人类活动,气溶胶被大量输送到近海海域,所以近海是气溶胶间接作用最明显的海域。中国近海受中国内陆气溶胶的影响,是全球气溶胶浓度最大的区域之一。由于内陆气溶胶和气象要素的季节性变化影响,海域气溶胶分布也具有明显的季节特征。本文选取华北地区(108°E—120°E、33°N—43°N,以下简称陆地)及其临近海域(125°E—135°E、25°N—35°N,以下简称海洋)作为研究区域(图1)。

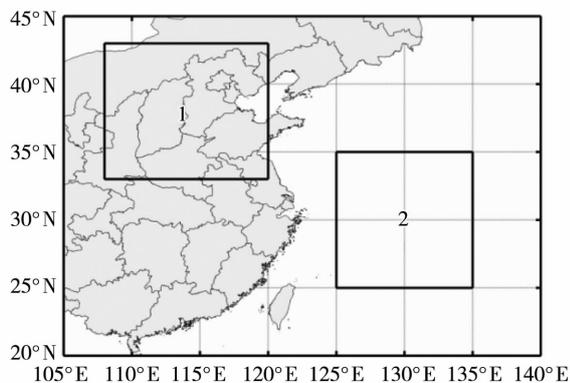


图1 研究区位置

(矩形框1表示华北地区,矩形框2表示相邻海域)

Fig. 1 Location of study area

(The rectangle 1 for the North China, the rectangle 2 for the adjacent sea area)

2 资料和方法

卫星遥感数据能够为区域尺度上研究气溶胶、云和降水的相互关系提供可靠的重要数据源,云滴有效半径和气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, 简称 AOD)资料来源于 MODIS 产品,相关研究表明 MODIS 气溶胶和云产品在中国区域有良好的适用性^[13-16]。MODIS 卫星资料来源于美国国家宇航局(NASA)EOS 观测计划中的 Terra 和 Aqua 两颗太阳同步极轨卫星。选取 2008—2012 年 MODIS 的冰云有效粒子半径和水云云滴有效半径以及气溶胶光学

厚度逐日资料(产品编号 MYD08)。MYD08 数据是大气 3 级标准数据产品,1 km 空间分辨率,每日、每旬、每月合成数据。热带降水测量计划 TRMM 是由美国和日本合作开展,其搭载的 PR 降水雷达可以提供 50°S—50°N 范围内的降水信息。选取同一时期的 TRMM 卫星降水资料(<http://trmm.gsfc.nasa.gov>,产品编号为 3B43),3B43 数据能够保证不同海拔高度降水数据的均一性,且融合 TMI、PR、VIRS 多个卫星数据,数据质量较高,随尺度增加 TRMM 估测精度大幅度提高。

为探讨华北地区及相邻海域在不同降雨量下气溶胶光学厚度与云滴有效半径的相互关系,选取夏季降水量最大的 7 月进行分析。参考气象学中雨量大小的界定,把降雨量从小到大分为 3 类:小雨($<10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)、中雨($10 \sim 25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)和大雨($>25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。

3 结果分析

3.1 气溶胶光学厚度月变化

图2是2008—2012年华北地区及其邻近海域陆地和海洋上空气溶胶光学厚度的逐月变化。可以看出,陆地和海洋上空的气溶胶光学厚度都呈现出明显的季节性变化,陆地 AOD 夏季最大,冬季最小,而海洋 AOD 春季最大,秋季最小。可能原因是陆地夏季,温度和湿度都比较高,有利于“气—粒”转化过程中气溶胶的生成;海洋春季主要受沙尘天气和季风气候的影响。另外在夏季,混合层发展较高,水溶性气溶胶吸湿膨胀也会导致气溶胶光学厚度增加。另一重要原因是人为排放也可导致气溶胶光学厚度的增加^[17]。2008—2012 年各月 AOD 值陆地大于海洋。陆地上,AOD 最大值通常出现在 6 月,值在 0.6 ~ 0.8 范围,最小值出现在 11 月,值在 0.2 ~ 0.4 范

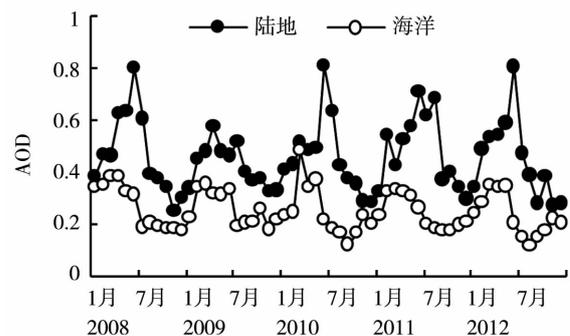


图2 2008—2012 年陆地和海洋上空气溶胶光学厚度的逐月变化

Fig. 2 Monthly variations of aerosols optical depth over the land of North China and adjacent ocean during 2008 - 2012

围;海洋上,AOD 最大值在 0.3~0.5 范围,最小值在 0.1~0.2 范围。相对于海洋,陆地 AOD 变化表现出滞后性,其最大值、最小值总是比海洋晚 1~2 个月。这表明,海洋区域气溶胶的来源不仅仅是陆源人为活动释放,还有其他自然源。研究指出,海洋区域春季浮游藻类活动旺盛,向海水表层释放大量二甲基硫(dimethylsulfide, DMS),经过一系列氧化反应最终影响到气溶胶的分布^[18]。

3.2 夏季 AOD 与云滴有效粒子半径的相关性

3.2.1 陆地

气溶胶光学厚度是云凝结核的一种表征,同时气溶胶粒子作为云凝结核,又可以影响改变云的形成(如云滴有效半径)。云滴有效粒子半径分为冰云和水云 2 种,在不同的相态下,这 2 种参数有一定的差异:水云,完全由水滴组成;冰云,完全由冰晶组成。图 3 是夏季 7 月陆地 AOD 与水云有效粒子半径的关系。在小雨、中雨和大雨的情况下,陆地上空夏季 AOD 与水云有效粒子半径存在显著正相关关系,相关系数分别是 0.45、0.48 和 0.53(通过 $\alpha=0.01$ 的信度检验),且随着降雨量的增加,AOD 和水云有效粒子半径的相关性增强。这表明,华北陆地上空夏季气溶胶光学厚度的增加促进了水云有效粒子半径的增大,且这种促进作用随着降雨量的增加而增强。这一结果与 Twomey 效应相反,称为反 Twomey 效应,这种看似矛盾的反 Twomey 效应在前人研究中也发现^[19-21]。导致这一结果的原因可能是云三维结构或不同地表类型的影响。有研究指出,反 Twomey 效应的出现有可能是气象条件的影响,大气热力条件对气溶胶和云相互作用的影响非常明显,在热力静稳条件下,陆地也能得到 Twomey 效应的结论,但在大气不稳定条件下,将出现反 Twomey 效应^[11]。

反 Twomey 效应的物理机制可以用一个耦合了辐射—气象条件—云—气溶胶的缓冲系统来解释,这个缓冲系统中还存在一些相互竞争的机制^[22]。中国华北地区陆地的反 Twomey 效应说明华北地区的气溶胶和云相互作用不能用一个“简单”相互关系来描述,需要进一步剔除其它可能影响因素,如气象条件(大气热力、动力和水汽条件)、影响大气动力和热力条件的地表类型,以及气溶胶粒子化学成分及其垂直分布等。另一可能原因是吸收性气溶胶的辐射效应,加热大气,促进气溶胶层附近云的蒸发,也可能是由于气溶胶粒子的增多,使陆地上水汽条件不再成为云形成的限制条件,而云宏观物理特性对水汽条件变得不敏感^[23]。

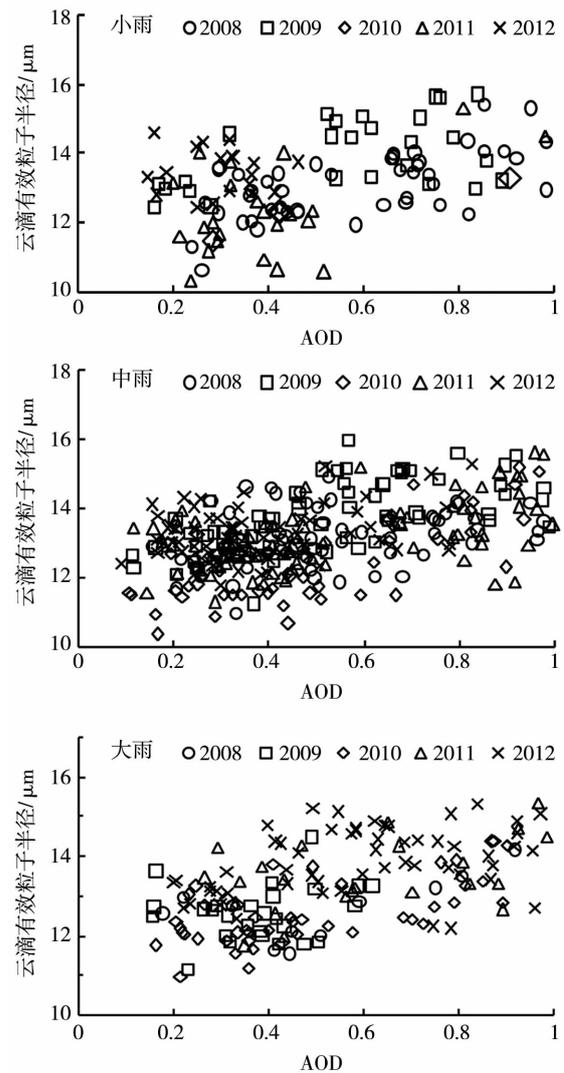


图 3 夏季 7 月中国华北陆地上 AOD 与水云有效粒子半径的关系

Fig. 3 The correlation between AOD and water cloud effective radius over the land of North China in July

图 4 是夏季 7 月不同降雨量下华北地区陆地 AOD 与冰云有效粒子半径的关系。总体来看,相对于水云,陆地上空夏季 AOD 与冰云有效粒子半径相关系数都不大,冰云有效粒子半径对 AOD 的变化不敏感。在小雨情况下,和水云表现相反,AOD 与冰云有效粒子半径呈现负相关,相关系数为 -0.16 (通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验)。表明在小雨情况下,陆地上空夏季 AOD 的增加抑制冰云有效粒子半径的增大。在中雨和大雨情况下,AOD 与冰云有效粒子半径呈正相关,仅有大雨情况下二者的相关系数通过 $\alpha=0.05$ 的信度检验。表明在中雨和大雨情况下,华北地区陆地上空夏季气溶胶光学厚度的增加促进冰云有效粒子半径的增大,但促进作用不及水云强。可见,陆地上空冰云有效粒子半径对气溶胶

光学厚度的变化敏感性较弱。其原因可能有 2 种：一是冰云一般出现在高而冷的高云中,在大气抬升过程中,较少气溶胶能够上升到高云中,和云滴接触发生相互作用的机会相应较少;二是高云的形成过程比较复杂,生命周期较长,成熟期较稳定,气溶胶对冰云的影响甚微^[24]。

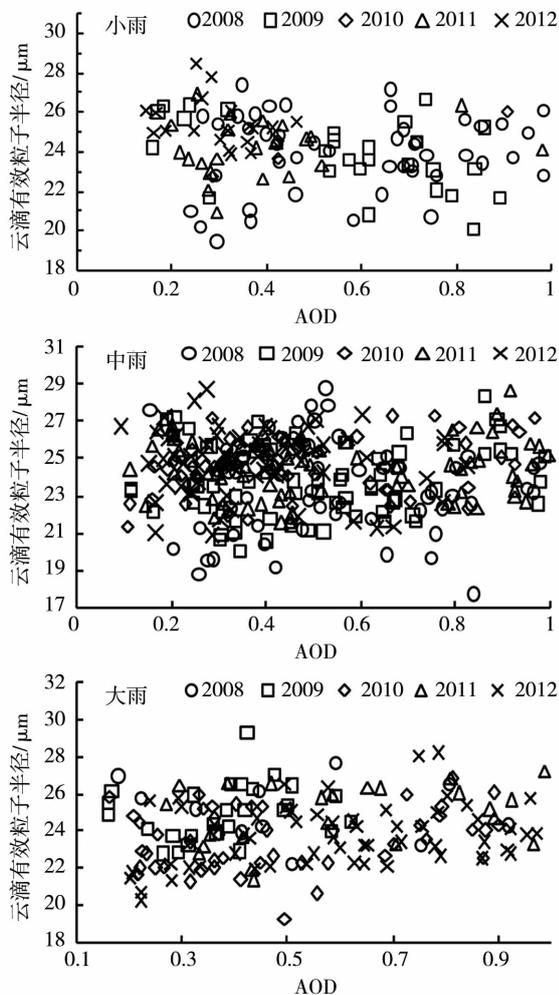


图 4 夏季 7 月中国华北陆地上 AOD 与冰云有效粒子半径的关系

Fig. 4 The correlation between AOD and ice cloud effective radius over the land of North China in July

3.2.2 海洋

图 5 是夏季 7 月不同降雨量下海洋 AOD 与水云云滴有效粒子半径的相关性。总体来看,海洋上夏季 AOD 与水云云滴有效粒子半径在 3 种降雨量下都表现出显著负相关,即云滴有效粒子半径随着 AOD 的增加而减小,且二者的相关性随降雨量的增加而增强,相关系数分别为 -0.55 (小雨)、 -0.65 (中雨)和 -0.66 (大雨)(通过 $\alpha = 0.01$ 的信度检验)。表明海洋上夏季气溶胶光学厚度的增加抑制

水云有效粒子半径的增大,且这种抑制作用随降雨量的增加而增强。另外还发现,海洋上夏季 AOD 基本在 0.6 以下,相对陆地较清洁。当 AOD 值 < 0.2 时,水云云滴有效粒子半径能迅速增长到 $20 \mu\text{m}$,变化幅度较大,说明水云云滴有效粒子半径对 AOD 低值的变化非常敏感;而当 AOD 值 > 0.2 时,水云云滴有效粒子半径趋于 $13 \mu\text{m}$,变化幅度很小,说明水云云滴有效粒子半径对 AOD 高值的变化不敏感。

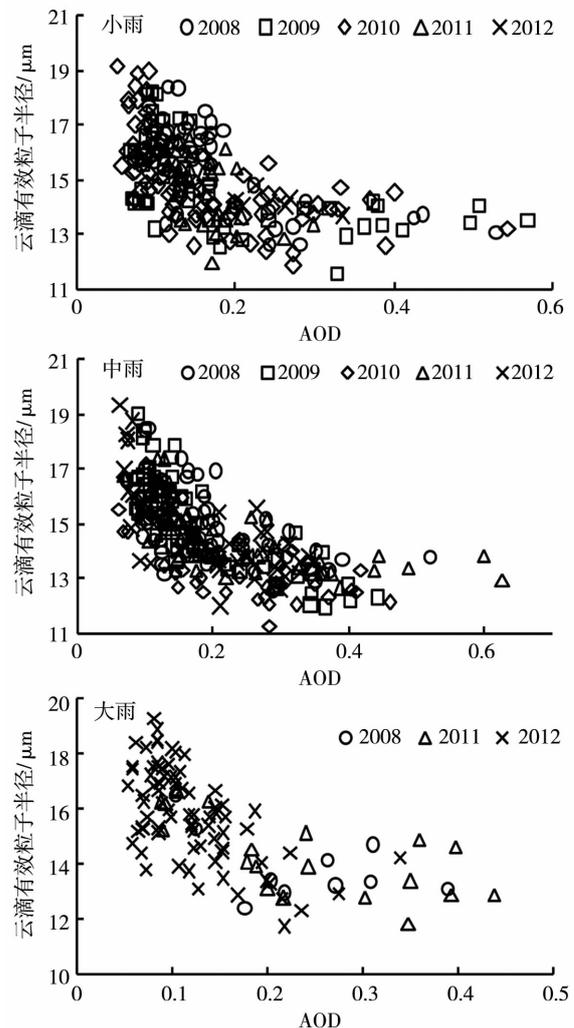


图 5 夏季 7 月海洋上 AOD 与水云有效粒子半径的关系

Fig. 5 The correlation between AOD and water cloud effective radius over the ocean in July

图 6 是夏季 7 月不同降雨量下海洋 AOD 与冰云有效粒子半径的关系。和水云一样,夏季 AOD 与冰云有效粒子半径也呈显著负相关,相关系数分别为 -0.45 (小雨)、 -0.36 (中雨)和 -0.32 (大雨),表明夏季气溶胶光学厚度的增加对冰云有效粒子半径有明显的抑制作用,且随着降雨量的增加抑制作用逐渐减弱。AOD 受数浓度、化学组分和消光系数

的影响,在 AOD 增加时,数浓度不一定随之线性增加;同时,云滴有效粒子半径的影响因素相对较为复杂,不同区域气象要素(云中液态水含量、云底高度等)差异较大,因此 AOD 和云滴有效粒子半径的相关性在不同区域差异较大^[25]。AOD 与雨滴有效粒子半径的关系海陆差异较大,有可能是陆地上云发展高度高,且云底也比较高,气溶胶和云相互接触少,相互作用较弱;海洋上云底高度较低,云和气溶胶接触可能性更大,相互作用更强^[26]。

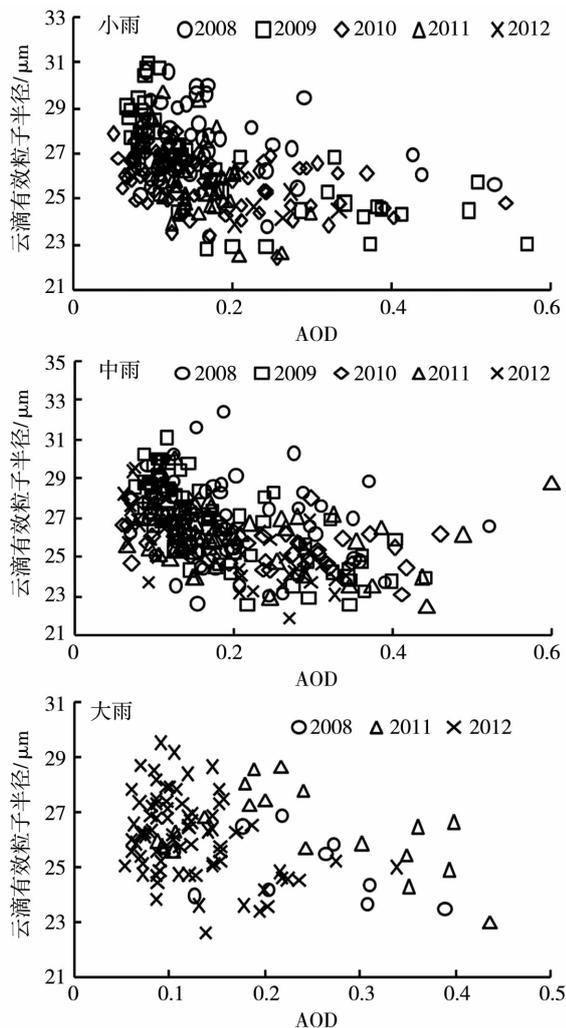


图6 夏季7月海洋上 AOD 与冰云有效粒子半径的关系

Fig. 6 The correlation between AOD and ice cloud effective radius over the ocean in July

4 结论与讨论

(1) 华北地区及其邻近海域,海洋上气溶胶光学厚度月均值均小于陆地,气溶胶光学厚度分布呈明显的季节性变化特征:陆地上,气溶胶光学厚度高值区出现在夏季,低值区出现在冬季;海洋上,气溶

胶光学厚度高值区出现在春季,低值区出现在秋季。

(2) 夏季气溶胶光学厚度与云滴有效粒子半径的相互关系在陆地和海洋上表现不同。陆地上,夏季气溶胶光学厚度的增加促进水云有效粒子半径的增大,且这种促进作用随着降雨量的增加而增强;而冰云有效粒子半径对夏季气溶胶光学厚度变化不敏感。海洋上,夏季气溶胶光学厚度的增加抑制水云和冰云有效粒子半径的增大,且对水云的抑制作用随降雨量的增加而增强,而对冰云的抑制作用随降雨量的增加而减弱。

致谢:感谢 SACOL 中心站的吕巧谊博士和国家卫星气象中心的王富博士在论文研究过程中提供的绘图以及编程的建议和指导

参考文献

- [1] 秦大河,罗勇,陈振林,等. 气候变化科学的最新进展:IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展,2007,3(6): 311-314.
- [2] Painemal D, Zuidema P. The first aerosol indirect effect quantified through airborne remote sensing during VOCALS-REx[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(9):25441-25485.
- [3] Costantino L, Bréon F M. Aerosol indirect effect on warm clouds over South-East Atlantic, from co-located MODIS and CALIPSO observations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(6):14197-14246.
- [4] Yuan T, Remer L A, Yu H. Microphysical, macrophysical and radiative signatures of volcanic aerosols in trade wind cumulus observed by the A-Train[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(14):7119-7132.
- [5] Quaas J, Ming Y, Menon S, et al. Aerosol indirect effects - general circulation model intercomparison and evaluation with satellite data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009,9(22):8697-8717.
- [6] Lee S S, Donner L J, Phillips V T J, et al. The dependence of aerosol effects on clouds and precipitation on cloud-system organization, shear and stability[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D16):797-801.
- [7] Fan J, Zhang R, Li G, et al. Effects of aerosols and relative humidity on cumulus clouds[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007,112(D14):928-935.
- [8] Wang Y, Wan Q, Meng W, et al. Long-term impacts of aerosols on precipitation and lightning over the Pearl River Delta megacity area in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011,11(23):12421-12436.
- [9] Jin M, Shepherd J M. Aerosol relationships to warm season clouds and rainfall at monthly scales over east China: Urban land versus ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D24): DOI: 10.1029/2008JD010276.
- [10] 石睿,王体健,李树,等. 东亚夏季气溶胶-云-降水分布特征及其相互影响的资料分析[J]. 大气科学,2015,39(1):12-

- 22.
- [11] Wang F, Guo J, Wu Y, et al. Satellite observed aerosol - induced variability in warm cloud properties under different meteorological conditions over eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 84(1):122 - 132.
- [12] Zhao C, Tie X, Lin Y. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(11):229 - 239.
- [13] 段婧, 毛节泰. 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.
- [14] 韩永翔, 孙海波, 刘建慧, 等. 青藏高原黑碳气溶胶传输及沉降的季节特征模拟分析[J]. *干旱气象*, 2014, 32(3):319 - 325.
- [15] 胡向军, 张镭, 郑飞, 等. 基于激光雷达资料的气溶胶辐射效应研究[J]. *干旱气象*, 2014, 32(2):248 - 255.
- [16] 王莉莉. MODIS 气溶胶产品在中国陆地区域适用性的评估[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 2007.
- [17] 关佳欣, 李成才. 我国中、东部主要地区气溶胶光学厚度的分布和变化[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(2):185 - 191.
- [18] 何玉辉. 中国近海大气气溶胶中水溶性离子的组成与来源分析[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011.
- [19] Bulgun C E, Palmer P I, Thomas G E, et al. Regional and seasonal variations of the Twomey indirect effect as observed by the ATSR - 2 satellite instrument[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(2):168 - 182.
- [20] Loeb N G, Schuster G L. An observational study of the relationship between cloud, aerosol and meteorology in broken low - level cloud conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D14):762 - 770.
- [21] Yuan T, Li Z, Zhang R, et al. Increase of cloud droplet size with aerosol optical depth: An observation and modeling study[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D4):DOI: 10.1029/2007JD008632.
- [22] Bjorn S, Graham F. Untangling aerosol effects on clouds and precipitation in a buffered system[J]. *Nature*, 2009, 461(7264):607 - 613.
- [23] 王富. 中国东部地区气溶胶-云相互作用卫星遥感建模研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [24] 彭杰. 云的垂直重叠和热带地区气溶胶间接效应[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2013.
- [25] Grandey B S, Stier P. A critical look at spatial scale choices in satellite - based aerosol indirect effect studies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(23):11459 - 11470.
- [26] Niu F, Li Z. Systematic variations of cloud top temperature and precipitation rate with aerosols over the global tropics[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(18):8491 - 8498.

Relationship Between Aerosol Optical Depth and Cloud Effective Radius Under Different Rainfall Conditions in Summer over North China and Its Adjacent Sea Area

WAN Ling¹, YAO Fengmei¹, ZHANG Jiahua²

(1. *University of Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Computational Geodynamics, Beijing 100049, China*; 2. *Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Digital Earth Science, CAS, Beijing 100094, China*; 3. *Meteorological Service Center of Fujian Province, Fuzhou 350001, China*)

Abstract: Based on the daily aerosol optical depth and cloud effective radius from MODIS and the daily precipitation from TRMM during 2008 - 2012, the monthly variation of aerosol optical depth (AOD) was analyzed over North China and its adjacent sea area, and the relationships between AOD and cloud effective radius under different rainfall condition in summer were researched. The results showed that the seasonal changes of AOD were obvious over North China and its adjacent sea area, the maximum and minimum AOD appeared in summer and winter over the land, while they occurred in spring and autumn over the ocean, respectively. And the monthly AOD over the ocean was less than that over the land during 2008 - 2012. The relation between AOD and cloud effective radius in summer over North China and its adjacent sea area was significantly different. For water cloud, their correlation was significantly positive over the land in summer, AOD could promote the increase of water cloud effective radius, while it was significantly negative over the ocean, and the correlation all enhanced with precipitation increase. As for ice cloud, AOD was negative related with cloud effective radius for small rain but positive for moderate rain and heavy rain in summer over the land, however the relation presented an obvious negative over the ocean, and the correlation decreased with precipitation increase.

Key words: aerosol optical depth; cloud effective radius; precipitation; MODIS; TRMM