

引用格式:邵思雅,张晶,周丽花,等.基于Fu-Liou辐射传输模式和卫星观测资料的气溶胶对全球地表太阳辐射影响的研究[J].资源科学,2017,39(3):513-521. [Shao S Y, Zhang J, Zhou L H, et al. Aerosol effects on global surface solar radiation based on Fu-Liou modeling and satellite observations[J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 513-521]. DOI: 10.18402/resci.2017.03.13

基于Fu-Liou辐射传输模式和卫星观测资料的气溶胶对全球地表太阳辐射影响的研究

邵思雅^{1,2}, 张晶^{1,2}, 周丽花^{1,2}, 薛文皓^{1,2}

(1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 100875 北京;

2. 全球变化研究协同创新中心, 100875 北京)

摘要:气溶胶可以吸收和散射太阳辐射,影响地表辐射收支平衡,使到达地表的太阳总辐射减少,同时散射辐射在总辐射中所占的比例增加。本文基于MODIS气溶胶产品和CERES云产品等大气遥感资料,利用Fu-Liou辐射传输模式对全球地表辐射进行了有无气溶胶的两组模拟试验。将考虑气溶胶的试验模拟值与BSRN站点观测值进行对比,结果显示地表总辐射模拟的 R 值达到0.92,地表散射辐射模拟的 R 值达到0.84,模拟值与观测值有着比较好的一致性。比较两组模拟结果显示,2007年气溶胶导致全球地表总辐射平均减少了 9.16W/m^2 ,降低幅度较大的地区往往气溶胶光学厚度(AOD)也较高。对于散射辐射来说,气溶胶在全球不同地区却有着不同的正负效应:地表反照率高的地区,气溶胶往往使得散射辐射大幅增加;而云分数较高的地区,气溶胶往往导致散射辐射大幅度下降。2007年气溶胶导致全球地表散射辐射平均增加了 8.17W/m^2 。

关键词:气溶胶;气溶胶光学厚度;大气辐射传输;直接辐射效应;散射

DOI: 10.18402/resci.2017.03.13

1 引言

大气气溶胶粒子吸收、散射太阳辐射,造成到达地面的太阳辐射和大气层顶反射回外空的太阳辐射通量发生变化,从而影响地-气辐射收支。排除其他作用,在有无气溶胶存在时辐射通量的变化被称为气溶胶的直接辐射效应。

气溶胶可减少地表太阳总辐射,但也能够增加散射辐射在总辐射中的比例^[1-3]。Kanniah等研究发现,澳大利亚北部2002-2005年气溶胶光学厚度从0.1增加到0.4时,地表观测的散射辐射总量增加 100W/m^2 (50%),同时直射辐射减少 180W/m^2 (24%),散射辐射在总辐射中的比例也相应地从11%增加到21%^[4]。Steiner等基于地表散射辐射观测结果发现,随着MODIS AOD的增加,散射辐射也

是线性增加的^[5]。张小玲等基于地基和卫星遥感观测数据对中国华北地区大气污染引起的气溶胶光学厚度及辐射效应进行了分析,发现2011年10月污染期间气溶胶光学厚度AOD达到0.60~1.00,地表入射太阳辐射下降 $(100\sim 300)\text{W/m}^2$ ^[6]。张凤霞等利用遥感观测资料,结合辐射传输模型,对2012年3月京津唐地区气溶胶直接辐射强迫进行了研究,发现地表气溶胶平均辐射强迫分别为北京 $(-30.14\pm 13.21)\text{W/m}^2$ 、塘沽 $(-39.11\pm 20.50)\text{W/m}^2$ 、唐山 $(-28.06\pm 13.34)\text{W/m}^2$ ^[7]。由于地表太阳辐射的观测站点有限,基于观测数据研究气溶胶对地表太阳辐射的影响存在较大的局限性。模型模拟的方法则是一种很好的弥补手段,尤其在大区域以及全球范围内。如Yu等对全球陆地表面晴朗天空情况下的气

收稿日期:2016-09-30;修订日期:2017-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41575144)。

作者简介:邵思雅,男,安徽淮北市人,博士生,主要研究领域为陆面过程与生物地球化学循环。E-mail: siyashao1310@gmail.com

通讯作者:张晶, E-mail: jingzhang@bnu.edu.cn

溶胶直接辐射效应进行了综述,采用卫星观测与模型模拟综合方法得到的总辐射变化为年均 $(-10.6\sim-13.5)\text{W/m}^2$,而只采用模型模拟方法获得的总辐射变化为年均 $(-5.1\sim-9.7)\text{W/m}^2$,有较大的不确定性^[8]。张华等利用辐射传输模式和全球气溶胶数据集,计算了晴空条件下沙尘气溶胶辐射效应在冬夏两季的全球分布,发现全球平均(短波)地表辐射效应冬季为 -1.362W/m^2 ,夏季为 -1.559W/m^2 ^[9]。这些采用模型模拟方法的研究中,大部分只考虑晴天无云条件下的气溶胶直接辐射效应,而未考虑有云天气下的情况^[10]。少数考虑云天情况的研究中,有的只对总辐射的变化进行了分析计算,未对地表散射辐射进行讨论^[11]。有的只考虑了晴天的太阳辐射传输的机制,而云天则只以一种云透过率算法替代,未考虑云的性质对辐射的影响^[12]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次工作报告^[13]估算的全球范围内气溶胶的直接辐射效应的平均值约为 $-0.45(-0.95\sim+0.05)\text{W/m}^2$ 。由此可见,全球地表气溶胶辐射效应的不确定性很大,需要在全天候情况下,针对实际观测气溶胶光学厚度进行地表太阳辐射及其分量的分析研究。

本研究基于MODIS气溶胶产品和CERES云产品等大气遥感资料,利用Fu-Liou大气辐射传输模式对全天候下的全球地表太阳辐射和散射辐射进行模拟试验,估算全球气溶胶的直接辐射效应。近些年来,由于各类污染物排放不断加剧,中国的大气气溶胶浓度尤其高^[14-16]。中国环境状况公报(<http://www.zhb.gov.cn/hjzl/>)显示,2005-2007年期间为21世纪以来(2000-2015年)中国二氧化硫(SO_2)排放量最高时期,年排放超过2450万t。同期烟尘(及工业粉尘)排放量也相对较高,年排放量超过1600万t。2008年后 SO_2 和烟尘(及工业粉尘)排放量均下降(其中烟尘及工业粉尘排放量在2011年后的中国环境状况公报中未公布)。因而,为便于比较中国和全球其他地区气溶胶的直接辐射效应,本文以2007年为例,研究气溶胶对地表太阳辐射的影响。

2 模型与数据来源

2.1 Fu-Liou 大气辐射传输模型

Fu-Liou 辐射传输模型最先于20世纪90年代

开发完成^[17,18],此后经过改进提高性能^[19,20];Fu-Liou模型可计算 $175\text{nm}\sim 4.0\mu\text{m}$ 内的15个波段的短波辐射,及 $(2200\sim 10)/\text{cm}$ 内的12个波段的长波辐射。Fu-Liou模型已经在世界范围内得到了广泛的应用,其最显著的优点是Fu-Liou有一套完整的云光学性质的参数化方案,可以利用输入的云的物理参数来计算云对辐射的影响,而且其计算过程具有物理意义,从机理上来说是十分合理的。

Fu-Liou模型的气溶胶性质输入参数包括气溶胶光学厚度(AOD)和气溶胶成分。云性质输入参数包括云水含量,云冰含量,云水粒子有效半径,云冰粒子有效尺度,云底高度和云顶高度。其他的输入参数还有地表反照率、太阳高度角、臭氧以及温度、湿度和气压的垂直廓线等。

本文采用Fu-Liou模型中的Delta四流近似辐射方案,对2007年全球范围内的地表辐射进行两组模拟实验:第一组中的气溶胶光学厚度使用2007年的卫星遥感数据,模拟实际的地表辐射;第二组中的气溶胶光学厚度统一设置为0,模拟没有气溶胶时的地表辐射。

2.2 数据来源

2.2.1 气溶胶数据

气溶胶数据来自美国国家宇航局NASA公开发布的中分辨率成像光谱仪MODIS数据产品:分辨率为 $1^\circ\times 1^\circ$ 的三级产品气溶胶光学厚度AOD^[21]。其中,缺测值的补齐采用离散余弦变换方法^[22,23]。气溶胶成分数据取自Goddard化学气溶胶辐射与传输模型(GOCART)的结果^[24-29]。

2.2.2 云数据

云卫星数据来自高时空分辨率的云与地球辐射能量系统测量仪CERES三级产品^[30]。

2.2.3 其他数据

除了气溶胶和云数据外,Fu-Liou模型输入还需要气象参数廓线、地表反照率和臭氧廓线。在本研究中,地表反照率取自MODIS 8天一次的数据产品^[31],在此假设在这8天时间里地表反照率是稳定不变的。臭氧廓线取自NCEP平流层监测臭氧混合分析产品(SMOBA)^[32]。气压、温度与湿度这三个大气参数的廓线则来自NCEP/NCAR再分析资料^[33]。所有这些资料在空间上都线性插值到 $1^\circ\times 1^\circ$,以匹

2017年3月

配气溶胶数据的空间分辨率。

3 结果与分析

3.1 AOD数据验证

图1所示为2007年全球MODIS数据产品平均气溶胶光学厚度分布。可以看出,中国东部地区的气溶胶光学厚度要远远高于全球平均水平,说明了中国气溶胶污染情况的严重性;而其他部分地区如中亚、非洲中部和南美洲中部的气溶胶光学厚度也比较高。

全球自动观测网 AERONET(AERosol RObotic NETwork)站点通过地基监测的方法,对气溶胶的性质进行观测。本研究选取中国北京、太湖, Lannion, Cabauw, Canberra, Chapais 和 Harvard Forest 共7个站点的经过云过滤处理和质量验证的二级每日AOD数据,与MODIS AOD数据进行对比验证。这7个站点分布于全球各大洲,并对气溶胶光学厚度进行了长期连续观测。结果如图2所示。

由图2a可以看出,MODIS AOD与AERONET观测值呈现出较好的相关性,相关系数 R 值接近0.8;但两者误差为0.29,偏大。MODIS卫星数据产品AOD精度可能与AOD大小存在一定的关联:在AOD值较大(≥ 0.7)的区域,MODIS的反演数据值存在较大的偏差,尤其在AOD值很高时(>2.0)偏差更大(图2c);而AOD值较小(<0.7)时,MODIS的反演数据值偏差较小,但仍存在少数MODIS AOD偏

高的情况(图2b)。总体而言,MODIS数据产品AOD与地基观测值之间具有良好的一致性,可以用作Fu-Liou辐射传输模型的输入。

3.2 地表辐射模拟

3.2.1 地表辐射值验证

本研究选取全球能量与水循环试验(GEWEX) Baseline Surface Radiation Network(BSRN)中9个站点的高时间分辨率地表太阳短波总辐射和散射辐射观测资料对Fu-Liou模型计算的全球辐射进行对比验证,这些站点分布于全球各大洲,并对太阳辐射进行了长期连续观测。为了便于分析,按站点所属地区将其划分为北美站点、欧洲站点和其他大陆站点。为减少云带来的不确定性,采用站点每日所有辐射数据平均后的日均辐射参与验证;且为保证验证的可靠性,只有在有效观测率达到90%时,当日数据才可参与验证。类似的,将前面Fu-liou模型计算得到的全球3h辐射资料进行平均得到模拟的日均辐射。模拟与观测的日均辐射对比结果如表1。

由表1可以看出,Fu-Liou模型模拟的日均辐射与观测结果具有很好的一致性。欧洲地区的模拟结果最好,总辐射和散射辐射的 R 值均在0.9以上。北美和其他大陆的模拟结果也较为良好,均在比较合理的范围内。这些结果说明,Fu-liou模型可以较好地模拟太阳总辐射与散射辐射。

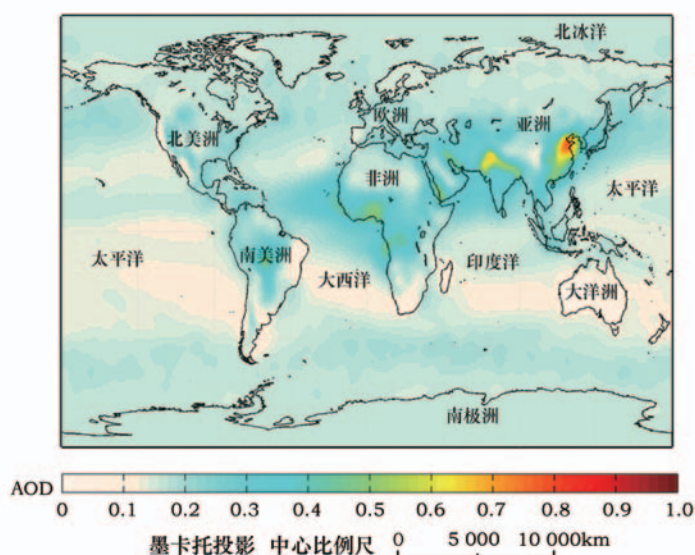


图1 2007年全球平均气溶胶光学厚度分布

Figure 1 Global distribution of annual mean aerosol optical depth (AOD) in 2007

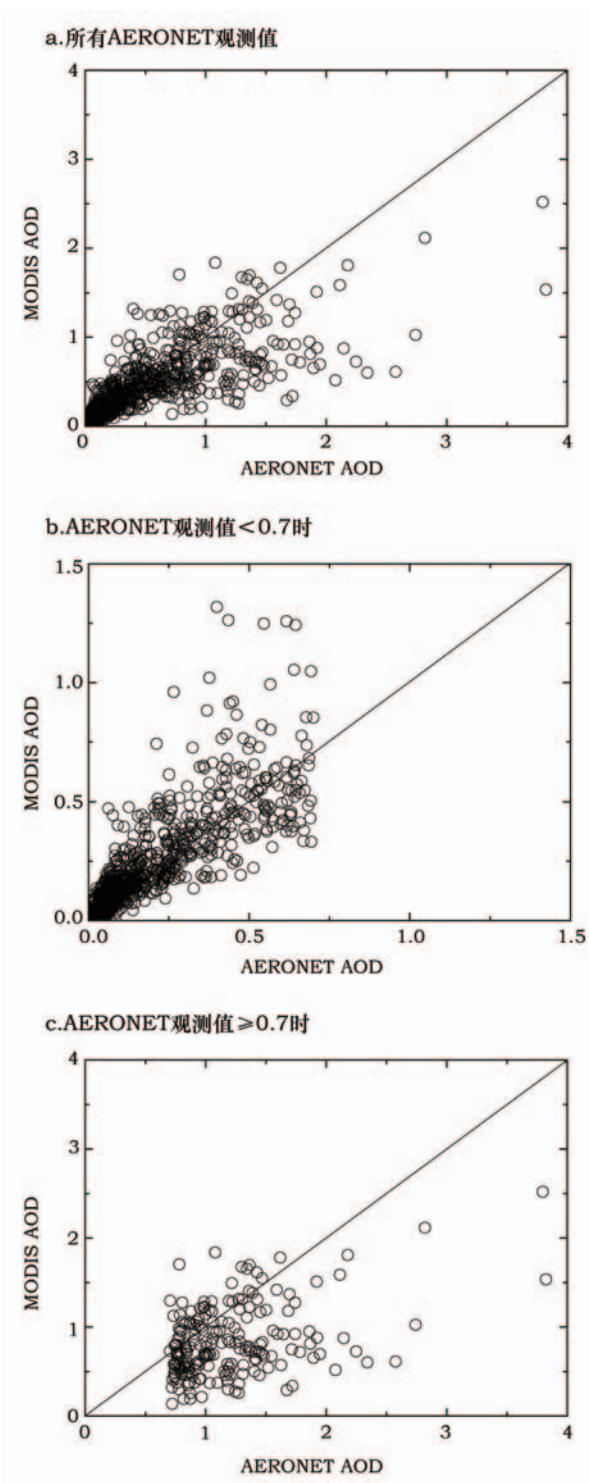


图2 MODIS AOD与AERONET AOD对比

Figure 2 Comparison of AOD observations by MODIS and AERONET

3.2.2 气溶胶直接辐射效应

利用Fu-liou模型分别计算有气溶胶和无气溶胶情况下的2007年地表总辐射(图3a、图3b)和散射辐射(图3c、图3d),两者的差值即为气溶胶导致

表1 Fu-Liou模拟与BSRN观测日均辐射对比

Table 1 Comparison of daily average radiation between

		BSRN observations and Fu-Liou simulations			
		北美	欧洲	其他大陆	所有站点
总辐射	<i>R</i>	0.91	0.95	0.87	0.92
	<i>RMSE/%</i>	24	32	24	26
散射辐射	<i>R</i>	0.77	0.93	0.82	0.84
	<i>RMSE/%</i>	34	33	34	34

的地表辐射变化(图3e、图3f)。

从图3a、图3b和图3e可以看出,气溶胶会明显减少到达地面的太阳总辐射。结合图1还可以发现,总辐射减少较多的地区,如中国东部地区、中西亚以及非洲中部和南美中部地区,往往AOD也较高。可见对于地表总辐射来说,气溶胶的直接辐射效应与其光学厚度存在一定程度的正相关。而图3c、图3d和图3f显示,对于散射辐射来说,气溶胶在全球不同地区却有着不同的正负效应。从整体上看,气溶胶会增加全球散射辐射。尤其是在中西亚、非洲撒哈拉地区、美国中西部以及靠近南北两极的地区,这种增加效应最为强烈。原因很可能在于这些地区常年干旱或者被冰雪所覆盖,地表反照率较高,导致天空和地表之间发生多次散射而使散射辐射增加。但在非洲中部、亚马逊地区以及东南亚靠近赤道的地区,气溶胶的存在却使地表散射辐射不同程度地减少。结合图4(见第518页)可以看出,这些地区的云分数都相对较高。云对太阳辐射存在强烈的反射和散射效应。在云天散射辐射比例已经很高的情况下,气溶胶的存在无法使得该比例再有效增加;而此时气溶胶会导致总辐射减少从而最终使散射辐射降低。因此云的存在可以大大抑制气溶胶增加散射辐射的效应,甚至会导致该效应变为负值。

计算结果显示,2007年气溶胶使全球平均地表总辐射减少了9.16W/m²,使全球平均散射辐射增加了8.17W/m²。Shao等利用相同的大气辐射传输模型对2007年北京和上海城市类型气溶胶在全天候情况下的直接辐射效应进行了估算^[34],发现北京市气溶胶导致年均总辐射减少37.4W/m²,上海市则减少30.7W/m²,而气溶胶造成北京市散射辐射增加14.8W/m²,上海市增加5.5W/m²。相比本研究结果,气溶胶在北京和上海的直接辐射效应要强一些,这

2017年3月

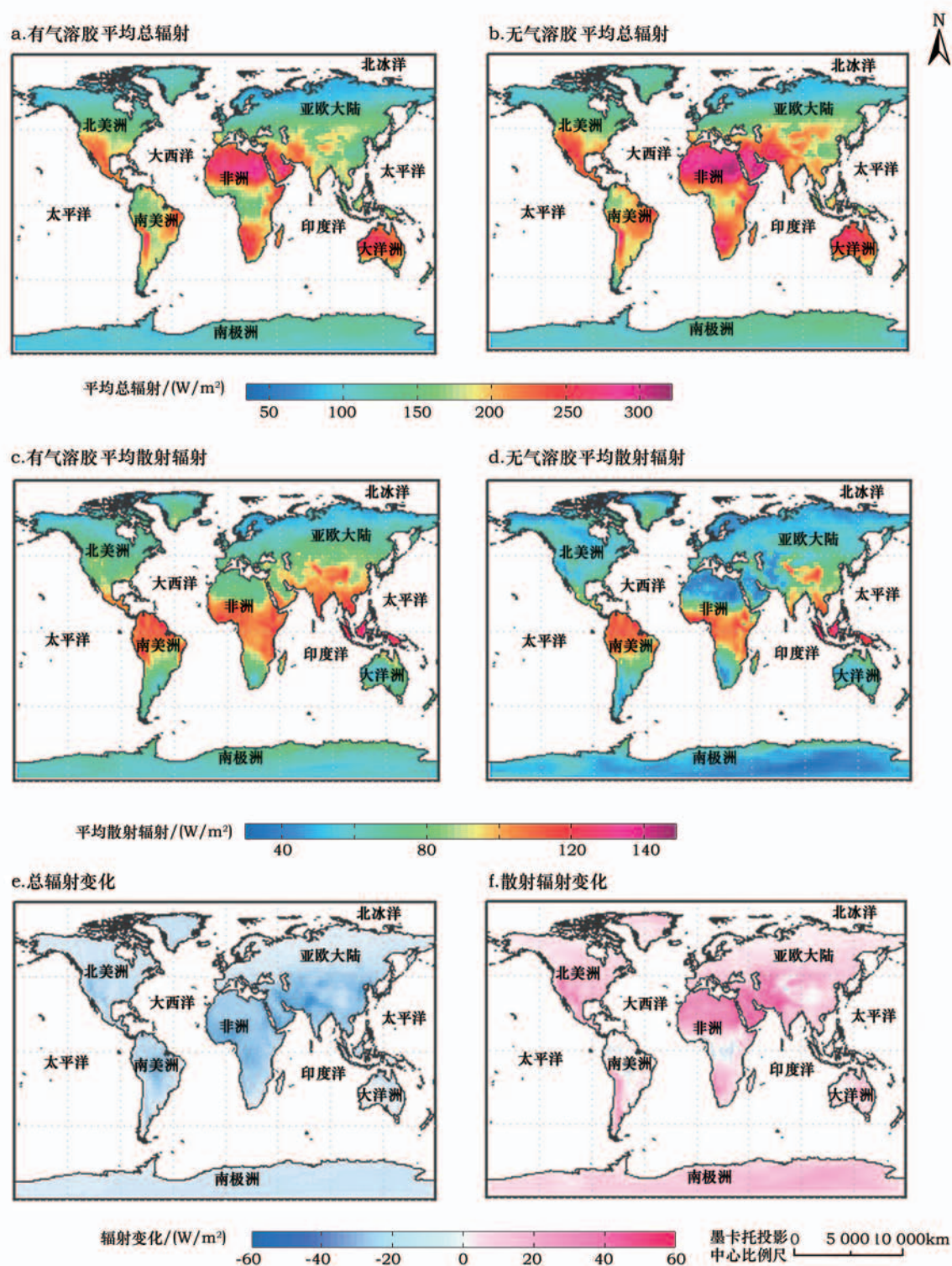


图3 2007年全球地表有无气溶胶情况下的平均总辐射、平均散射辐射及气溶胶直接辐射效应导致的辐射变化

Figure 3 Global distributions of average surface solar radiation, surface diffuse radiation with and without aerosols and changes in them caused by aerosols in 2007

是因为北京和上海的气溶胶光学厚度均高于全球平均水平。Matsui 等对美国东部的研究发现,气溶

胶散射效应使地表总辐射减少($14.9\sim 16.0$) W/m^2 ,同时散射辐射增加 $2\%\sim 5\%$ [35]。Chen 等评估全球气溶

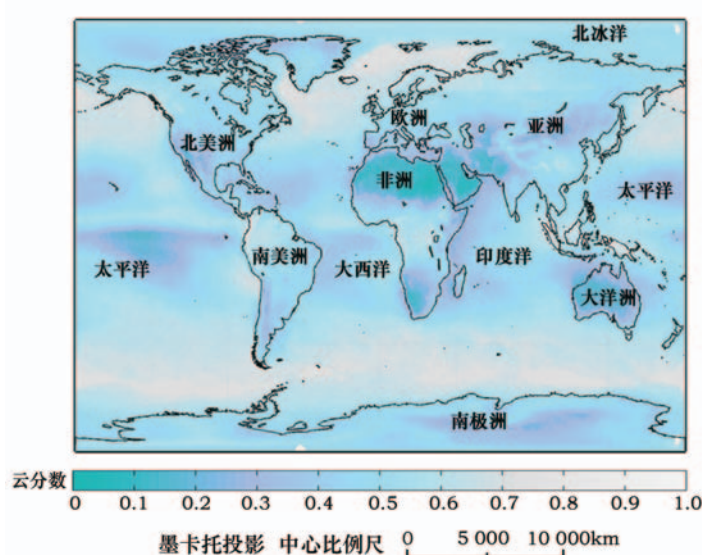


图4 2007年全球平均云分数分布

Figure 4 Global distribution of annual mean cloud fraction in 2007

胶的直接辐射效应发现,气溶胶导致2003-2010年年均地表总辐射减少 $21.9\text{W}/\text{m}^2$,散射辐射增加 $5.2\text{W}/\text{m}^2$ ^[19],与本研究的模拟结果接近。由于本研究只对2007年全球气溶胶的直接辐射效应进行了分析,要了解气溶胶直接辐射效应的长期变化规律,需要进行更长时间的模拟研究。

散射辐射是地表总辐射中重要组成部分,散射辐射具有各向同性的特点,其光合利用率高于直射辐射,能够被植被更有效地利用。尽管气溶胶导致的全球平均地表总辐射减少可能不利于陆地生态系统植被的生长,但是能够被植被更有效利用的散射辐射增加了,即光合有效辐射增加了,因此这一辐射效应可能会对全球陆地生态系统碳循环产生影响。尤其近几十年来中国经济高速发展,工农业生产和人们生活活动排放的气溶胶也增多,因此中国地表的散射辐射也增多,气溶胶直接辐射效应对中国陆地生态系统生产力的影响很可能是正面的。

4 结论

本文利用Fu-Liou大气辐射传输模型,基于MODIS气溶胶数据、CERES云数据等遥感卫星产品对2007年全球气溶胶的直接辐射效应进行了探讨与分析。主要结论如下:

(1) MODIS气溶胶光学厚度反演结果与

Aeronet观测值具有良好的一致性。其反演效果与AOD值具有一定关联,当AOD值较大时,MODIS的反演结果的偏差较大。

(2)以MODIS气溶胶光学厚度、CERES云数据等遥感资料作为输入,Fu-Liou模型可以比较理想地模拟地表总辐射与散射辐射,模拟值与BSRN站点观测值具有比较好的一致性。

(3)气溶胶使全球的地表总辐射降低,降低幅度较大的地区往往AOD也较高。对于散射辐射,气溶胶在全球不同地区有着不同的正负效应。地表反照率高的地区,气溶胶往往使得散射辐射大幅增加;而云分数较高的地区,气溶胶往往导致散射辐射大幅度下降。2007年,气溶胶导致全球平均地表总辐射减少了 $9.16\text{W}/\text{m}^2$,全球平均散射辐射增加了 $8.17\text{W}/\text{m}^2$ 。

(4)本研究基于遥感卫星数据,针对2007年全球气溶胶的直接辐射效应进行了分析。更长时间的模拟研究将有助于了解气溶胶直接辐射效应的长期变化规律。

(5)大气气溶胶的直接辐射效应增加了光合有效辐射,可能会对全球陆地生态系统碳循环产生影响,增加陆地生态系统的碳汇。这是下一步的研究目标。

2017年3月

参考文献(References):

- [1] Badarinath K V S, Kharol S K, Kaskaoutis D G, *et al.* Influence of atmospheric aerosols on solar spectral irradiance in an urban area[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, 69(4-5):589-599.
- [2] Kaskaoutis D G, Kambezidis H D, Jacovides C P, *et al.* Modification of solar radiation components under different atmospheric conditions in the Greater Athens Area, Greece[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2006, 68(10):1043-1052.
- [3] Mahowald N, Ward D S, Kloster S, *et al.* Aerosol impacts on climate and biogeochemistry[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2011, 36(1):45-74.
- [4] Kanniah K D, Beringer J, Tapper N J, *et al.* Aerosols and their influence on radiation partitioning and savanna productivity in Northern Australia[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 100(3-4):423-438.
- [5] Steiner A L, Mermelstein D, Cheng S J, *et al.* Observed impact of atmospheric aerosols on the surface energy budget[J]. *Earth Interactions*, 2013, 17(14):1-22.
- [6] 张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 等. 区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(7):2439-2448. [Zhang X L, Xia X A, Che H Z, *et al.* Observation study on aerosol optical properties and radiative forcing using the ground-based and satellite remote sensing at background station during the regional pollution episodes[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7):2439-2448.]
- [7] 张凤霞, 李正强, 李凯涛, 等. 京津唐地区气溶胶直接辐射强迫的遥感观测[J]. *中国科学院大学学报*, 2016, 33(2):155-161. [Zhang F X, Li Z Q, Li K T, *et al.* Aerosol direct radiative forcing in Beijing-Tianjin-Tangshan region based on remote sensing measurements[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 33(2):155-161.]
- [8] Yu H, Kaufman Y, Chin M, *et al.* A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11):613-666.
- [9] 张华, 马井会, 郑有飞. 沙尘气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究[J]. *气象学报*, 2009, 67(4):510-521. [Zhang H, Ma J H, Zheng Y F. A modeling study of global radiative forcing due to dust aerosol[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4):510-521.]
- [10] Yu H, Dickinson R, Chin M, *et al.* Direct radiative effect of aerosols as determined from a combination of MODIS retrievals and GOCART simulations[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109(D03206):293-305.
- [11] Su W, Loeb N, Schuster G, *et al.* Global all-sky shortwave direct radiative forcing of anthropogenic aerosols from combined satellite observations and GOCART simulations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(2):655-669.
- [12] Chen M, Zhuang Q. Evaluating aerosol direct radiative effects on global terrestrial ecosystem carbon dynamics from 2003 to 2010[J]. *Tellus Series B- Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66(1):81-89.
- [13] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [14] Tie X, Cao J. Aerosol pollution in China: Present and future impact on environment[J]. *Particulate Flows and Reaction Engineering*, 2009, 7(6):426-431.
- [15] Cao J, Shen Z, Chow J C, *et al.* Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, 62(10):1214-1226.
- [16] Qu W, Arimoto R, Zhang X, *et al.* Spatial distribution and inter-annual variation of surface PM₁₀ concentrations over eighty-six Chinese cities[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2010, 10(12):5641-5662.
- [17] Fu Q, Liou K N. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1992, 49(22):2139-2156.
- [18] Fu Q, Liou K N. Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1993, 50(13):2008-2025.
- [19] Rose F G, Charlock T P. New Fu-Liou Code Tested with ARM Raman Lidar Aerosols and CERES in Pre-CALIPSO Exercise [C]. Ogden, Utah, USA: 11th Conference on Atmospheric Radiation (AMS), 2002.
- [20] Kato S, Rose F G, Charlock T P. Computation of domain-averaged irradiance using satellite-derived cloud properties[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(2):146-164.
- [21] Goddard Space Flight Center, National Aeronautics and Space Administration (NASA). The Level-3 MODIS Atmosphere Daily Global Product[EB/OL]. [2008-02-01]. http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD08_D3/index.html
- [22] Garcia D. Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing values[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2010, 54(4):1167-1178.
- [23] Garcia D. A fast all-in-one method for automated post-pro-

- cessing of PIV data[J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50 (5) : 1247-1259.
- [24] Chin M, Ginoux P. Tropospheric aerosol optical thickness from the GOCART model and comparisons with satellite and sun photometer measurements[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3):461-483.
- [25] Chin M, Chu A, Levy R, *et al.* Aerosol distribution in the northern hemisphere during ACE- Asia: Results from global model, satellite observations, and sun photometer measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, 109 (D23):2401-2423.
- [26] Chin M, Diehl T, Ginoux P, *et al.* Intercontinental transport of pollution and dust aerosols: Implications for regional air quality [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, 7 (21) : 5501-5517.
- [27] Chin M, Diehl T, Dubovik O, *et al.* Light absorption by pollution, dust, and biomass burning aerosols: A global model study and evaluation with AERONET measurements[J]. *Annales Geophysicae*, 2009, 27(9):3439-3464.
- [28] Ginoux P, Chin M, Tegen I, *et al.* Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART Model [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106 (D17) : 20255-20273.
- [29] Ginoux P, Prospero J, Torres O, *et al.* Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: Correlation with North Atlantic Oscillation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2):113-128.
- [30] Clouds and the Earth' Radiant Energy System (CERES) , National Aeronautics and Space Administration (NASA). The Level- 3 CERES SYN1deg Product[EB/OL]. [2008- 02- 01]. <https://ceres.larc.nasa.ov/products.php?product-SYN1deg>.
- [31] Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) , U.S. Geological Survey (USGS). The MODerate- resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Albedo Product[EB/OL]. [2008-02-01]. <https://lpdaac.usgs.gov/mode/80>.
- [32] Climate Prediction Center, National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Stratosphere Monitoring Ozone Blended Analysis (SMOBA) [EB/OL]. [2008- 02- 01]. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/SMOBA/smoba_doc.shtml.
- [33] Earth System Research Laboratory (ESRL) , National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). NCEP/NCAR Reanalysis 1: Summary[EB/OL]. [2008- 02- 01]. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>.
- [34] Shao S, Zhang J. All-sky direct radiative effects of urban aerosols in Beijing and Shanghai, China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 8(5):295-300.
- [35] Matsui T, Beltrán-Przekurat A, Niyogi D, *et al.* Aerosol light scattering effect on terrestrial plant productivity and energy fluxes over the Eastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(D14):762-770.

Aerosol effects on global surface solar radiation based on Fu-Liou modeling and satellite observations

SHAO Siya^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, ZHOU Lihua^{1,2}, XUE Wenhao^{1,2}

(1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875, China)

Abstract: Aerosols can absorb and scatter solar radiation and cause the total solar radiation reaching the surface to drop and the fraction of diffuse radiation to increase, influencing the surface radiation budget. Here, MODIS Aerosol Optical Depth (AOD) was compared with AERONET AOD observations for 2007 and good agreement was found, except when AOD is larger than 0.7 the uncertainty of MODIS AOD increases. Then global surface radiation with and without consideration of aerosols was calculated by the Fu-Liou atmospheric radiative transfer model based on MODIS aerosol products, CERES cloud products and other remote sensing data. The model calculated surface solar radiation with consideration of aerosols was compared to observations made at Baseline Surface Radiation Network (BSRN) sites. Good correlations exist between the calculated and measured total radiation with an R of 0.92, and between the calculated and measured diffuse radiation with an R of 0.84. The aerosol direct radiative effect was calculated based on the two scenarios of aerosols. Our calculations showed that in 2007, aerosols decreased global total radiation by 9.16 W/m^2 on average. Large decreases generally occurred in places with high AOD. For diffuse radiation, aerosol-induced changes were either positive or negative. Large increases generally occurred in places with high surface albedo, while large decreases generally occurred in places with high cloud fraction. The global aerosol-induced diffuse radiation change averaged 8.17 W/m^2 in 2007. Aerosol direct radiative effects cause photosynthetic active radiation to increase, which may influence the global carbon cycle of terrestrial ecosystems and result in an increase in the carbon sink function of terrestrial ecosystems.

Key words: aerosol; aerosol optical depth (AOD); atmospheric radiative transfer; direct radiative effect; scattering