

引用格式:LIU Jia,WANG Ren,LI Longhui.Numerical simulation of different types of aerosols direct radiation effect based on community earth system model[J].Remote Sensing Technology and Application,2023,38(4):880-891.  
[刘甲,王壬,李龙辉.基于通用地球系统模式的不同类型气溶胶直接辐射效应的数值模拟[J].遥感技术与应用,2023,38(4):880-891.]

DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2023.4.0880

## 基于通用地球系统模式的不同类型气溶胶直接辐射效应的数值模拟

刘甲<sup>1,2,3</sup>,王壬<sup>1,2,3</sup>,李龙辉<sup>1,2,3</sup>

(1.江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,江苏 南京 210023;

2.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏 南京 210023;

3.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

**摘要:**气溶胶可以通过直接效应来影响地气系统的辐射平衡,然而目前气溶胶直接辐射效应的研究主要集中于总气溶胶,缺乏不同类型气溶胶直接辐射效应研究。利用通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)模拟研究了晴空和有云条件下总气溶胶、硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶在大气层顶和地表的直接辐射强迫,并利用多源数据对模拟结果进行验证。结果表明,CESM模拟总气溶胶光学厚度与气溶胶自动观测网(Aerosol Robotic Network, AERONET)有较好的相关性( $R^2=0.44$ ),但模拟数值整体偏小;与MERRA-2(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2)对比发现,高估了含碳气溶胶光学厚度,低估了硫酸盐气溶胶光学厚度;CESM模拟的辐射通量与基线地表辐射观测网(Baseline Surface Radiation Network, BSRN)的模拟效果良好( $R^2=0.93$ )。在晴空条件下,CESM模拟的总气溶胶以及硫酸盐气溶胶、含碳气溶胶在大气层顶的直接辐射强迫分别为 $-1.37$ 、 $-0.46$ 、 $-0.45$   $\text{W/m}^2$ ;有云条件下分别为 $-0.30$ 、 $-0.25$ 、 $+0.04$   $\text{W/m}^2$ ,云削弱了气溶胶在大气层顶负的辐射效应,但加强了含碳气溶胶的吸热作用从而呈现出正效应;晴空条件下地表的直接辐射强迫分别为 $-5.60$ 、 $-0.53$ 、 $-2.21$   $\text{W/m}^2$ ,有云条件下分别为 $-4.38$ 、 $-0.32$ 、 $-1.64$   $\text{W/m}^2$ ,气溶胶的直接辐射效应在地表均为负效应,云对沙尘气溶胶的辐射效应影响不大,但却能削弱硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶的直接辐射效应强度。研究结果有利于进一步理解不同类型气溶胶的直接辐射效应,并为未来改进CESM提供依据。

**关键词:**气溶胶;CESM;模式评估;直接辐射强迫

**中图分类号:**P407 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2023)04-0880-12

### 1 引言

大气气溶胶是悬浮于大气中的固态和液态颗粒物,直径大约为 $0.002\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ ;在垂直方向上主要分布在 $5\text{ km}$ 以下的大气中,在水平方向上主要分布在亚洲、非洲和南美洲<sup>[1-2]</sup>。气溶胶按照来源可分

为自然源气溶胶和人为源气溶胶,按照化学成分的不同可分为沙尘、海盐、黑碳、有机碳、硫酸盐和硝酸盐气溶胶等,其中沙尘气溶胶和海盐气溶胶主要来源于自然源,黑碳、有机碳和硫酸盐气溶胶主要来源于人为源。气溶胶在大气中存在的时间较短,因此被称为短生命气候强迫物质<sup>[3]</sup>。虽然气溶胶在

收稿日期:2021-12-06;修订日期:2022-02-26

基金项目:国家重点研发计划“全球变化及应对”专项项目(2017YFA0603603)。

作者简介:刘甲(1996—),女,江西九江人,硕士研究生,主要从事气溶胶辐射效应研究。E-mail:13182875966lj@gmail.com

通讯作者:李龙辉(1978—),男,陕西商南人,教授,主要从事陆地生态系统与全球气候变化研究。E-mail:Longhui.Li@nynu.edu.cn

大气中存在的时间短,但却能够通过直接辐射效应、半直接辐射效应和间接辐射效应对全球气候造成重要影响<sup>[4-6]</sup>。其中,直接辐射效应是指气溶胶通过吸收和散射太阳辐射来直接影响辐射能量收支<sup>[7]</sup>;半直接辐射效应是指具有强吸收性的气溶胶(如:沙尘、黑碳气溶胶)通过吸收太阳辐射并向外释放辐射能,从而加热大气并使云滴增加,减少云量<sup>[8]</sup>。气溶胶辐射强迫是衡量气溶胶辐射效应的重要指标<sup>[9]</sup>,辐射强迫在数值上定义为某种辐射强迫因子发生变化时净辐射的改变量,定量地表示为大气层顶和地表单位面积的辐射通量变化,单位为 $W/m^2$ 。当辐射强迫为正值时,这种强迫因子将对大气层顶和地面起加热作用;当辐射强迫为负值时,这种强迫因子将对大气层顶和地面起冷却作用<sup>[10-11]</sup>。

目前,数值模拟是研究气溶胶辐射效应的主要方式之一<sup>[12-13]</sup>。Alvim等<sup>[14]</sup>利用CAM5(Community Atmosphere Model 5)中的MAM3(Modal Aerosol Module 3)气溶胶机制对巴西上空气溶胶光学厚度进行模拟,并利用AERONET(Aerosol Robotic Network)观测数据和MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)卫星遥感数据进行验证,发现CAM5-MAM3整体低估了气溶胶光学厚度。胡志远<sup>[15]</sup>利用WRF-Chem(Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry)模式模拟太平洋地区的气溶胶光学特性,发现气溶胶光学厚度与卫星反演的结果基本一致,能较好模拟沙尘、硫酸盐和硝酸盐气溶胶,但明显低估了含碳气溶胶。Yu等<sup>[16]</sup>结合不同卫星及模式模拟气溶胶在全球陆地的直接辐射强迫,在大气层顶的辐射强迫约为 $-4.9 \pm 0.7 W/m^2$ ,地表的辐射强迫约为 $-11.8 \pm 1.9 W/m^2$ 。Park等<sup>[17]</sup>对亚洲地区不同类型的气溶胶直接辐射强迫进行估算,得到气溶胶在亚洲地区大气层顶的辐射强迫约为 $-2.9 W/m^2$ ,地表辐射强迫约为 $-6.8 W/m^2$ 。Zhang等<sup>[18]</sup>研究全球大气顶、地表、大气的年均直接辐射强迫分别为 $-0.4$ 、 $-1.46$ 和 $1.86 W/m^2$ 。Raji等<sup>[19]</sup>利用区域气候模式针对沙尘气溶胶进行辐射效应模拟,发现冬季和春季沙尘气溶胶在大气层顶的短波辐射强迫为正效应。

目前国内外在对气溶胶直接辐射效应的模拟研究中,主要集中于研究总气溶胶的直接辐射效应。然而,不同类型气溶胶的光学特性具有较大的差异性,因而产生的直接辐射效应也不同<sup>[20-22]</sup>。本

文在对总气溶胶直接辐射效应研究的基础上,探究了以人类活动为主导的硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶的直接辐射效应。此外,针对现有研究对模型的模拟能力验证比较单一的缺陷,本研究将分别利用AERONET和MERRA-2(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2)气溶胶数据,验证CESM(Community Earth System Model)对气溶胶光学厚度的模拟能力,并利用BSRN(Baseline Surface Radiation Network)和CERES(The Clouds and the Earth's Radiant Energy System)辐射数据验证CESM对辐射通量的模拟能力。

## 2 模式与数据

### 2.1 模式简介

本研究利用地球系统耦合模式第一版CESM1.2,该模式是美国国家大气研究中心(National Center Atmospheric Research, NCAR)于2010年7月份推出的地球系统模式。CESM主要包括大气模块(Community Atmosphere Model, CAM)、海洋模块(Parallel Ocean Program, POP)、陆面模块(the Community Land Model, CLM)、陆冰模块(Land-Ice Component)和海冰模块(Community Ice Code, CICE)5个子模块。CESM考虑了气溶胶的直接和间接效应、碳-氮循环的相互作用、全球植被的动态变化、人类活动引起的土地利用变化情况。本研究选用大气模块第五版(CAM5),陆面模块第四版(CLM4),海洋模块第二版(POP2)。大气模块以 $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ 的水平分辨率运行,垂直方向分为26层,其中对流层和平流层的气溶胶数据集分开处理,将气溶胶分为黑碳气溶胶、一次有机碳气溶胶、二次有机碳气溶胶、硫酸盐气溶胶、沙尘气溶胶、海盐气溶胶。CESM中包含了气溶胶机制、对流层化学机制、辐射传输机制、云的微观和宏观机制<sup>[23]</sup>,这些机制为模拟气溶胶的直接和间接效应提供了基础。本文使用的三模态气溶胶方案MAM3中包含积聚模态、粗模态、爱根模态,不同模态假设为外部混合,同一模态假设为内部混合。其中积聚模态中包含硫酸盐、一次有机碳、二次有机碳、黑碳、沙尘、海盐气溶胶;粗模态中包含硫酸盐、沙尘、海盐气溶胶;爱根模态中包含硫酸盐、二次有机碳、海盐气溶胶<sup>[24]</sup>。陆面模块以 $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ 的水平分辨率运行,使用CLM4.0-CN模式,该模式中的

植被光合作用模型是基于 Farquhar 等<sup>[25]</sup>和 Collarz 等<sup>[26]</sup>提出。CLM4.0 对比之前版本有着更加详细的植被功能类型,并且考虑了地表覆盖和土地利用变化的影响<sup>[27]</sup>。

### 2.2 试验设计

为了得到总气溶胶、硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶在全球范围的直接辐射效应。本研究设计了 4 组平行试验:①所有外强迫随时间变化;②去掉所有气溶胶的直接辐射效应;③去掉硫酸盐气溶胶的直接辐射效应;④去掉含碳气溶胶的直接辐射效应(表 1)。S1 试验积分 70 a,前 50 a 为模式 spin-up 的时间,取后 20 a 做平均分析,试验 S2、S3、S4 分别以 S1 为参照案例积分 20 a 做平均分析。试验 S1 与 S2 的差为总气溶胶的直接辐射效应,试验 S1 和 S3 的差为硫酸盐气溶胶的直接辐射效应,试验 S1 和 S4 的差为含碳气溶胶的直接辐射效应。

表 1 气溶胶的直接辐射强迫试验设计  
Table 1 Experimental design of aerosol direct radiative forcing

试验名称	外强迫条件
S1	所有外强迫条件随时间变化
S2	去掉所有气溶胶的直接辐射效应
S3	去掉硫酸盐气溶胶的直接辐射效应
S4	去掉含碳气溶胶的直接辐射效应

### 2.3 气溶胶数据

(1)AERONET 站点数据:本研究采用的气溶胶地面观测数据为来源于 AERONET 气溶胶自动观测网的实测数据<sup>[28]</sup>。AERONET 目前已经覆盖全球的主要区域,在全球分布着 600 多个观测站点,采用 CIMEL 太阳光度计观测仪器,地基观测误差为 0.01~0.02。AERONET 提供了 3 个级别的产品:lever1.0(未自动云去除、未校准处理)、lever1.5(自动云去除、未校准处理)、lever2.0(自动云去除和校准处理)<sup>[29]</sup>。本研究选取了全球样本数量较多的 22 个站点的 lever2.0 月均数据,站点信息如表 2。

(2)MERRA-2 数据:MERRA-2 是由美国国家航空航天局全球模式和同化办公室提供的大气实时再分析资料。MERRA-2 数据集优化了原来的 MERRA 数据集,同化了卫星观测资料和地基观测资料。原始分辨率为  $0.625^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ (经度 $\times$ 纬度),提供了从 1980 年开始至今的数据。本研究采用 2001~2019 年全球范围的黑碳、硫酸盐、有机碳和总气溶胶光学厚度的月数据。

表 2 AERONET 选取的站点样本数和观测时段  
Table 2 Number of site samples and observation period selected from AERONET

序号	国家	站点	观测时段	样本数
1	中国	Beijing-CAMS	201208~201806	63
2	中国	XiangHe	200103~201705	148
3	中国	Taihu	200509~201608	88
4	中国	SACOL	200608~201305	79
5	中国	Hong_Kong_PolyU	200511~201703	103
6	中国	Xinglong	200602~201408	68
7	印度	Gandhi_College	200604~201706	92
8	印度	Bhola	201304~201705	39
9	印度	Kanpur	200301~201803	170
10	巴基斯坦	Karachi	200609~201409	89
11	巴基斯坦	Lahore	200701~201504	81
12	日本	Osaka	200301~201902	165
13	越南	Bac_Lieu	200303~201709	94
14	泰国	Silpakorn_Univ	200711~201802	111
15	赞比亚	Mongu	200101~201001	109
16	巴西	Alta_Floresta	200101~201903	207
17	尼日尔	Zinder_Airport	200905~201810	102
18	尼日尔	Banizoumbou	200101~201812	213
19	阿根廷	CEILAP-BA	200301~201701	156
20	墨西哥	Mexico_City	200101~201807	183
21	巴西	CUIABA-MIRANDA	200103~201903	177
22	印度尼西亚	Bandung	200905~201807	86

### 2.4 辐射通量数据

(1)BSRN 站点数据:本研究采用的辐射观测数据来自基线地表辐射观测网 BSRN 的地表净辐射数据。BSRN 是由 WCRP(World Climate Research Programme)支持下的全球能源和水循环试验中的一个项目,在全球设有多个站点覆盖范围为  $80^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 。研究选取了全球样本数量较多的 22 个站点的数据,具体信息如表 3。

表 3 BSRN 选取的站点信息  
Table 3 Site information selected from BSRN

地表类型	站点数量	样本数
城市	7	852
草地	11	1 779
森林	4	594

(2)CERES 辐射和云资料(Synoptic TOA and surface fluxes and Clouds, SYN):研究采用的辐射数据来自云和地球辐射能量系统(CERES)的遥感数据,CERES 搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上,对全球的大气顶和地表辐射能量收支进行观测。CERES

(SYN)数据利用Fu-Liou辐射传输模型模拟得到气溶胶和无气溶胶情景下的辐射通量<sup>[30]</sup>,用于验证气溶胶直接辐射效应的空间分布特征。研究选取了CERES三级数据产品 SYN1deg Ed4A,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为3 h,时间段为2001~2019年,选取的物理量有:Clearsky(无云无气溶胶)、Pristine(无云有气溶胶)两种情景的大气层顶和地表的短波辐射通量。

### 3 结果分析

#### 3.1 气溶胶光学厚度模拟效果验证

为验证CESM对气溶胶光学厚度的模拟能力,将模拟得到的总气溶胶光学厚度、硫酸盐气溶胶光学厚度、含碳气溶胶光学厚度与AERONET观测数据和MERRA-2再分析数据进行了对比。AERONET AOD一般提供1 020、870、670、500、440、380、340 nm波段的气溶胶光学厚度,而MERRA-2 AOD和CESM模拟值仅提供550 nm波段的气溶胶光学厚度,所以需要对比AERONET数据进行插值运算。通过式(1)对440 nm和657 nm两个波段进行插值运算得到AERONET的550 nm处气溶胶光学厚度<sup>[31]</sup>。式(1)中 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 分别为440 nm和657 nm波长, $\tau_{\lambda_2}$ 为 $\lambda_2$ 处的AOD, $\alpha_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 处的波长指数。由于MERRA-2 AOD产品的分辨率为 $0.625^\circ \times 0.5^\circ$ ,而CESM模拟的AOD分辨率为 $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ ,所以在比较时需对MERRA-2 AOD进行重采样,保持两者栅格大小一致,均为 $0.9^\circ \times 1.25^\circ$ 。

$$\tau_{550} = \tau_{\lambda_2} \times \left( \frac{550}{\lambda_2} \right)^{-\alpha_{\lambda_1 \sim \lambda_2}} \quad (1)$$

图1是利用AERONET观测数据对CESM的模拟结果进行精度评估的结果,结果显示CESM对总气溶胶光学厚度的模拟整体偏小,决定系数 $R^2$ (Coefficient of Determination)为0.44, RMSE(Root Mean Squared Error)为0.28, MAE(Mean Absolute Error)为0.20。图2利用MERRA-2资料对CESM的模拟结果进行对比分析,通过MERRA-2与CESM模拟的总气溶胶光学厚度、含碳气溶胶光学厚度和硫酸盐气溶胶光学厚度对比发现,CESM整体上高估了沙尘气溶胶和含碳气溶胶的光学厚度,低估了硫酸盐气溶胶光学厚度。导致这种偏差的原因是在CESM的MAM3气溶胶机制中将沙尘气溶胶和海盐气溶胶合并成一个粗模态,并被假定为内部混合,从而导致了沙尘气溶胶高估;而硫酸盐气溶胶有一部分被铵盐以 $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ 的形式存在,被

忽视掉的这一部分的硫酸盐气溶胶导致模拟的硫酸盐气溶胶明显低估。但整体空间分布上,CESM的模拟效果与MERRA-2资料的空间分布相一致,模拟的气溶胶光学厚度分布的高值区与资料高值区的分布基本相同。

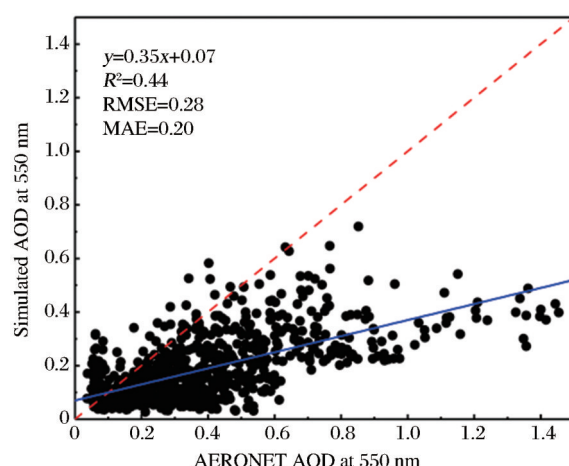


图1 CESM模拟结果与AERONET AOD观测数据对比验证

Fig.1 The comparison of AERONET observational AOD and CESM simulation results

#### 3.2 辐射通量模拟效果验证

为了验证CESM对气溶胶辐射强迫的模拟能力,本节首先利用BSRN数据对辐射通量进行站点验证,然后利用CERES(SYN)资料对气溶胶辐射强迫进行空间分布特征的对比。在利用CERES(SYN)资料对CESM的模拟结果进行对比分析之前,需要利用站点数据对其进行验证。图3利用BSRN站点数据对CERES(SYN)资料和CESM模拟的短波向下辐射通量(Shortwave Downward, SWD)进行验证。图中显示CERES(SYN)和CESM模拟的SWD与观测值均有较好的相关性,CERES(SYN)与BSRN的决定系数 $R^2$ 达到0.94, RMSE为 $16.32 \text{ W/m}^2$ , MAE为 $10.55 \text{ W/m}^2$ ,拟合系数为0.94,当SWD小于 $100 \text{ W/m}^2$ 时,CERES的模拟值偏小;CESM模拟结果与BSRN的 $R^2$ 达到0.93, RMSE为 $33.27 \text{ W/m}^2$ , MAE为 $23.95 \text{ W/m}^2$ ,拟合系数为0.93,两种模拟结果整体上均略微低于观测值。

利用CERES(SYN)计算得到的总气溶胶直接辐射强迫与CESM模拟计算得到的结果进行对比分析。根据图4(a)、图4(b)可知,两种结果均显示气溶胶在大气层顶的辐射效应为负,其中CESM模拟的气溶胶大气层顶直接辐射强迫约为 $-1.37 \text{ W/m}^2$ , CERES为 $-3.31 \text{ W/m}^2$ 。在全球范围,CESM对气

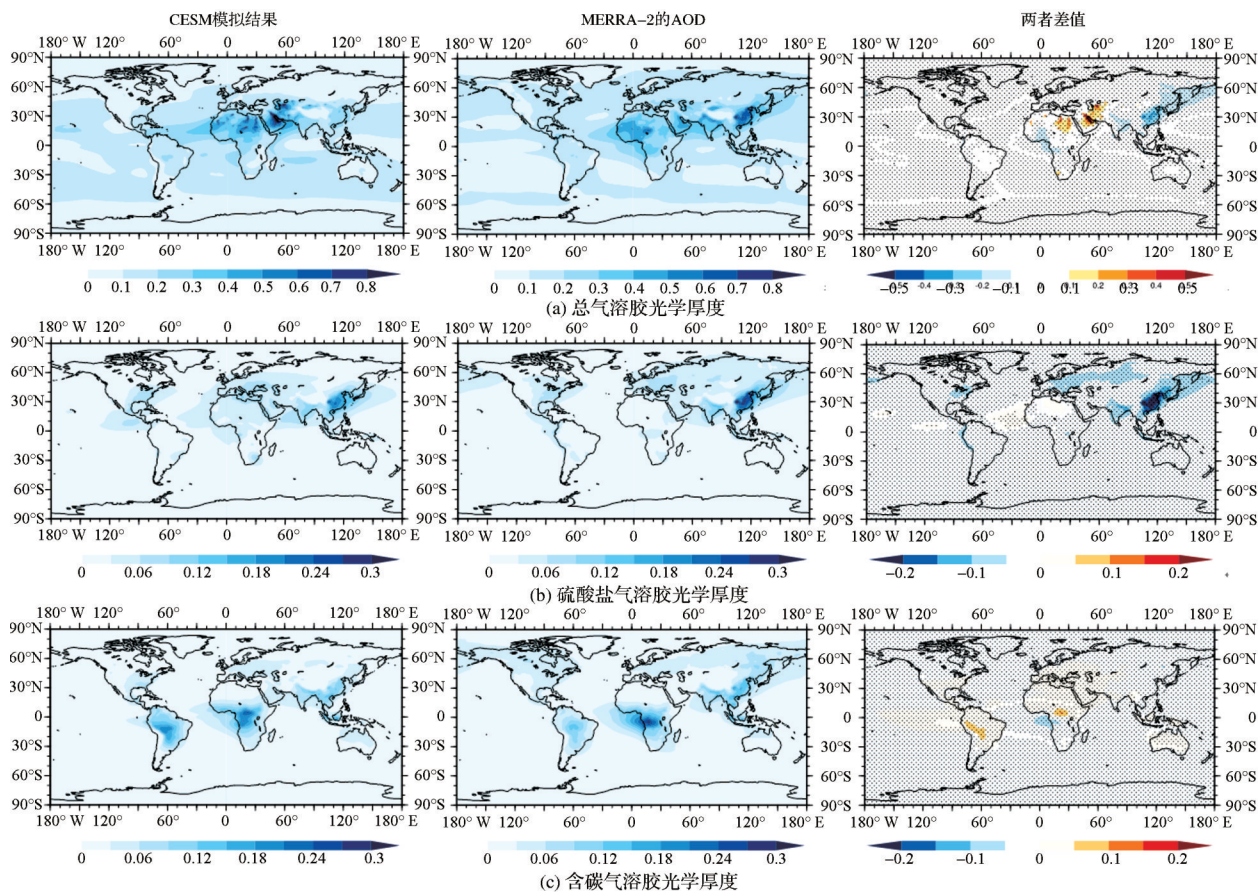


图2 CESM模拟结果和MERRA-2数据的对比验证

Fig.2 The comparison of MERRA-2 and CESM simulation results

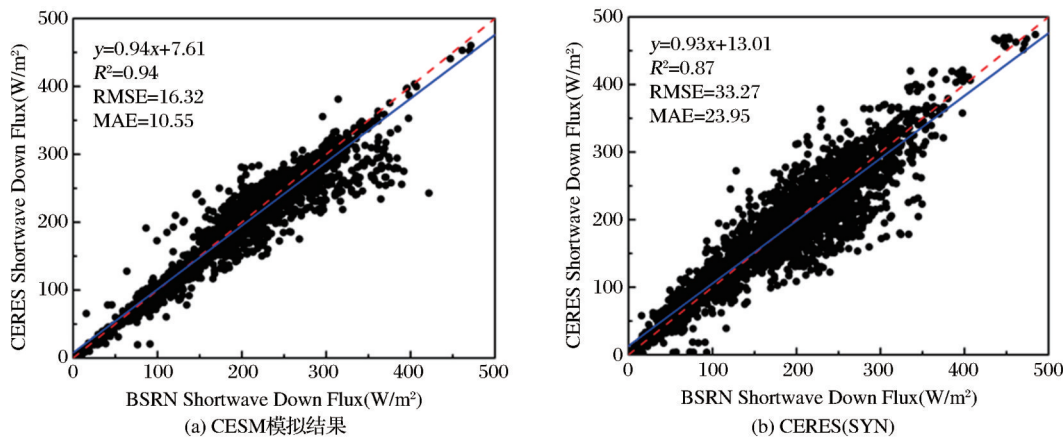
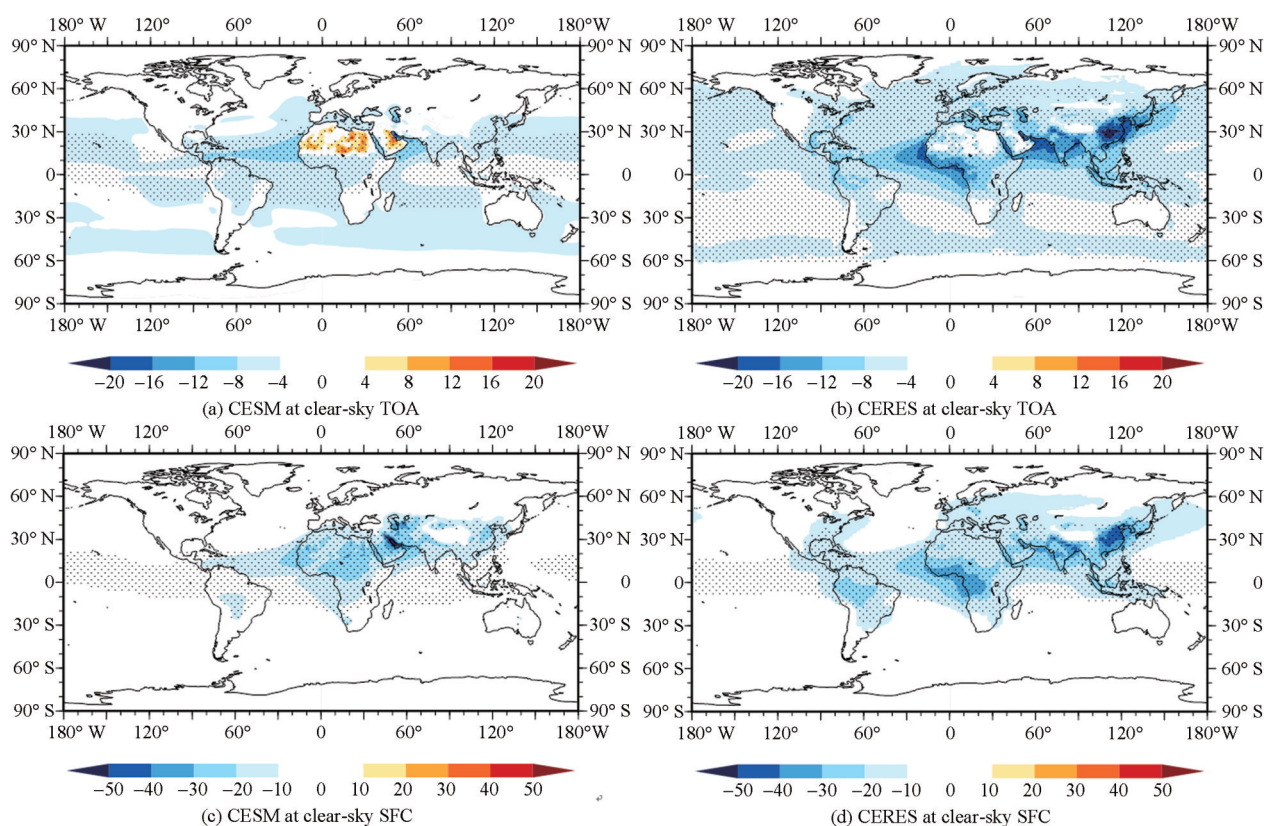


图3 CESM模拟结果(a)和CERES(SYN)(b)与BSRN观测数据对比验证

Fig.3 The comparison of BSRN observations and CESM simulation results and CERES(SYN)

溶胶辐射效应的模拟小于CERES,尤其是在印度以及中国东部地区,CESM模拟值明显小于CERES。但是整体而言CESM和CERES在空间上的分布一致性较高,均在南美北部、非洲中部、印度和中国东部地区产生明显的负效应。CESM模拟的大气层顶辐射强迫在沙尘气溶胶的高值区产生明显正效应,尤其是非洲北部和阿拉伯半岛。由于

MAM3机制对沙尘气溶胶的模拟值偏高,从而导致其产生的辐射效应较为明显。图4(c)、图4(d)是总气溶胶在地表的直接辐射强迫,两种结果均显示气溶胶能够削弱到达地表的辐射。在平均水平上,CESM模拟计算的总气溶胶的地表直接辐射强迫为 $-5.60\text{ W/m}^2$ ,略低于CERES资料计算得到的 $-6.93\text{ W/m}^2$ 。区域上,在非洲北部CESM模拟的辐



(第一列:CESM模拟结果;第二列:CERES计算的辐射强迫(右上角为全球平均值,打点区域表示通过0.05显著性检验))

图4 CESM模拟结果和CERES(SYN)的气溶胶直接辐射强迫对比验证

Fig.4 The comparison of CERES(SYN) and CESM simulation results

射强迫高于CERES,而在中国东部的辐射强迫低于CERES,这是CESM对沙尘气溶胶光学厚度的高估和对硫酸盐气溶胶光学厚度的低估导致的。

### 3.3 大气层顶辐射强迫

图5所示为总气溶胶、硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶在晴空和有云条件下模拟的大气层顶直接辐射强迫的空间分布。总气溶胶在晴空条件下大气层顶的短波直接辐射强迫约为 $-1.37 \text{ W/m}^2$  ( $-0.73\%$ ),强迫值的高值区出现在中国东部和刚果雨林,强迫值分别约为 $-5.20 \text{ W/m}^2$  ( $-1.74\%$ )、 $-5.30 \text{ W/m}^2$  ( $-1.51\%$ ) (括号中百分比为变化百分比)。整体而言,总气溶胶对大气层顶产生负的辐射强迫,但是在非洲北部和阿拉伯半岛北部产生明显的正效应,这主要是因为这两个区域属于沙尘气溶胶的高值区,并且地表反照率较高。沙尘气溶胶的吸收能力较强,导致了在大气层顶产生明显的正效应<sup>[32]</sup>。有云条件下总气溶胶在大气层顶的直接辐射强迫约为 $-0.30 \text{ W/m}^2$  ( $-0.19\%$ ),部分地区由负强迫变为弱正强迫,例如刚果雨林、四川盆地和塔里木盆地,这与前人<sup>[33]</sup>研究结论相一致。

硫酸盐气溶胶在晴空条件下大气层顶的直接

辐射强迫为 $-0.46 \text{ W/m}^2$  ( $-0.25\%$ ),与李剑东等<sup>[34]</sup>估算得到的 $-0.62 \text{ W/m}^2$ 接近。强迫值的高值区出现在中国东部地区,强迫值约为 $-3.50 \text{ W/m}^2$  ( $-1.77\%$ )。其次是印度半岛和马来群岛地区,强迫值在分别约为 $-1.24 \text{ W/m}^2$  ( $-0.41\%$ )、 $-1.26 \text{ W/m}^2$  ( $-0.36\%$ )。有云条件下大气层顶的直接辐射强迫约为 $-0.25 \text{ W/m}^2$  ( $-0.16\%$ ),与Koch等<sup>[35]</sup>估算得到的 $-0.29 \text{ W/m}^2$ 接近,但要小于Reddy等<sup>[36]</sup>估算得到的 $-0.62 \text{ W/m}^2$ ,模拟结果处于IPCC (2007)<sup>[37]</sup>估算的( $-0.4 \pm 0.2 \text{ W/m}^2$ )范围内。有云条件下的硫酸盐直接辐射强迫明显小于晴空条件,这表明云的存在很大程度上削弱了硫酸盐气溶胶直接辐射效应,其高值区均分布在中国东部、印度半岛和马来群岛地区。

含碳气溶胶在晴空条件下大气层顶的直接辐射强迫约为 $-0.45 \text{ W/m}^2$  ( $-0.24\%$ ),高于张华等<sup>[38]</sup>估算得到的 $-0.24 \text{ W/m}^2$ 。强迫高值区在南美亚马逊雨林、非洲刚果雨林以及马来群岛附近,强迫值分别为 $-3.04 \text{ W/m}^2$  ( $-0.87\%$ )、 $-3.38 \text{ W/m}^2$  ( $-0.96\%$ )、 $-1.29 \text{ W/m}^2$  ( $-0.37\%$ )。这些地区属于热带雨林地区,常年气候炎热利于生物质燃烧,属

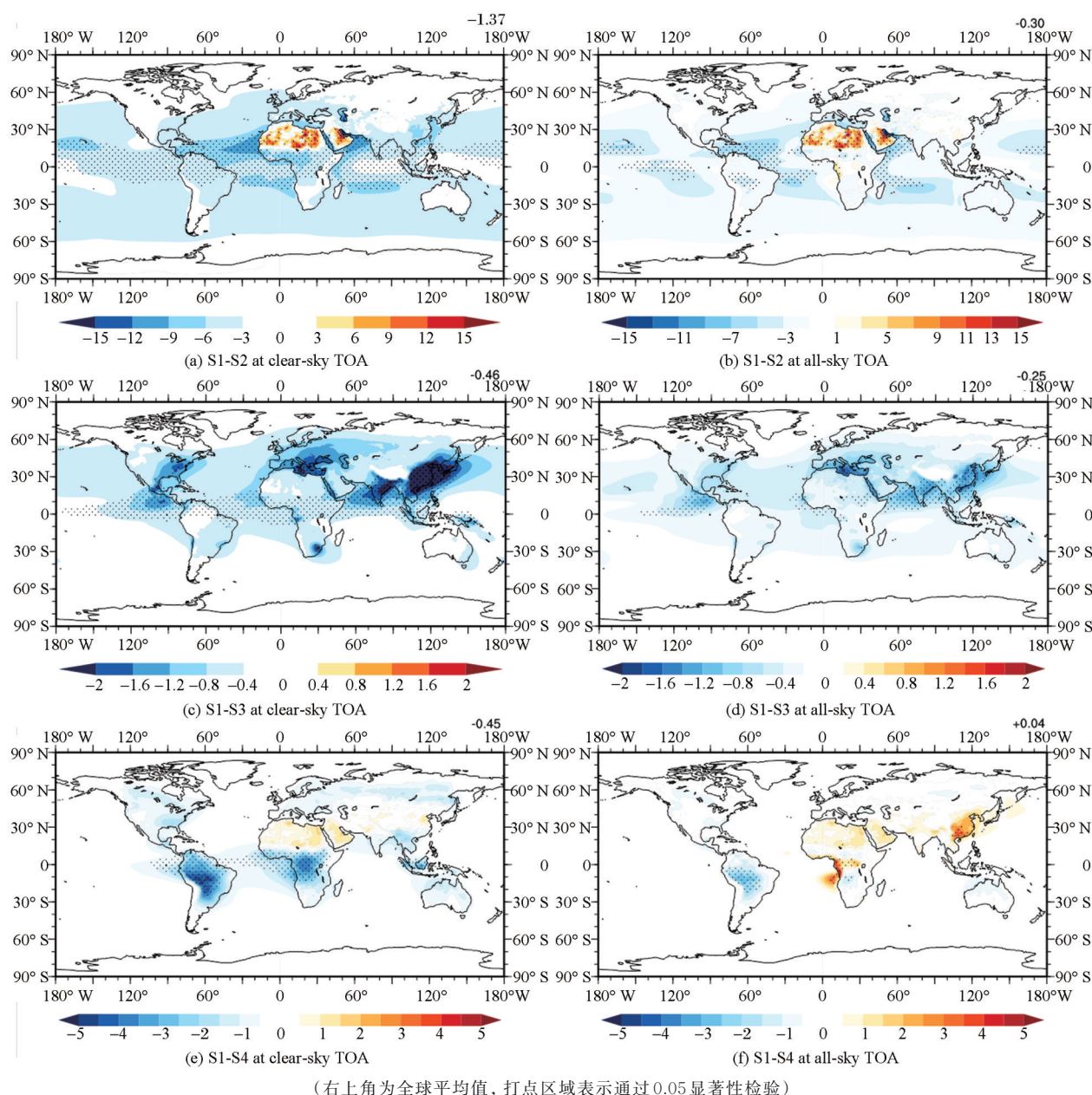


图5 总气溶胶、硫酸盐气溶胶、含碳气溶胶在晴空和有云条件下大气层顶的直接辐射强迫(单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

Fig.5 Direct radiative forcing of total aerosol, sulfate aerosol and carbonaceous aerosol at the top of the atmosphere under clear sky and all sky conditions(units:  $\text{W}/\text{m}^2$ )

于含碳气溶胶的高值区,在晴空条件下含碳气溶胶对大气层顶产生负的辐射强迫。在非洲北部、阿拉伯半岛含碳气溶胶的辐射强迫则呈现正辐射强迫,出现这种正辐射效应的原因有两种:①与气溶胶的光学特性有关,当气溶胶的单次散射反照率较低时,大气层顶会出现正强迫<sup>[39]</sup>;②由于地表的高反照率,导致辐射强迫的符号逆转从而出现正值<sup>[40]</sup>。

特别地,中国大部分地区也出现正辐射强迫,这是由于黑碳气溶胶的强吸收作用加热了大气层顶。在有云条件下含碳气溶胶大气层顶的直接辐

射强迫约为  $+0.04 \text{ W}/\text{m}^2$  ( $+0.03\%$ ), 低于张华等<sup>[38]</sup>估算得到的  $+0.08 \text{ W}/\text{m}^2$ 。含碳气溶胶的有云条件下大气层顶的辐射效应在全球陆地出现大范围的正效应,特别是非洲刚果雨林和中国东部地区,强迫值分别为  $+1.54 \text{ W}/\text{m}^2$  ( $+0.60\%$ )、 $+2.10 \text{ W}/\text{m}^2$  ( $+0.92\%$ ),这两个区域是黑碳气溶胶的高值区,由于云层对太阳辐射的反射,导致云层上黑碳气溶胶吸收的太阳辐射增多,从而对大气层顶起到加热作用<sup>[33]</sup>。

### 3.4 地表辐射强迫

图6为总气溶胶、硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶在晴空和有云条件下模拟的地表直接辐射强迫的空间分布。与大气层顶辐射强迫相比,地面的辐射强迫分布比较单一,因为气溶胶的吸收和散射作用都能导致到达地面的太阳辐射变少。总气溶胶在晴空条件下地表的直接辐射强迫为 $-5.60\text{ W/m}^2$

( $-4.22\%$ ),有云条件下地表的直接辐射强迫为 $-4.38\text{ W/m}^2$ ( $-4.38\%$ )。强迫高值区均在出现在北非撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛以及中国东部地区。撒哈拉沙漠和阿拉伯半岛是沙尘气溶胶的高值区,所以沙尘气溶胶能够明显削弱地表辐射,并且对比发现沙尘气溶胶对地表辐射的削弱受云的影响较小。

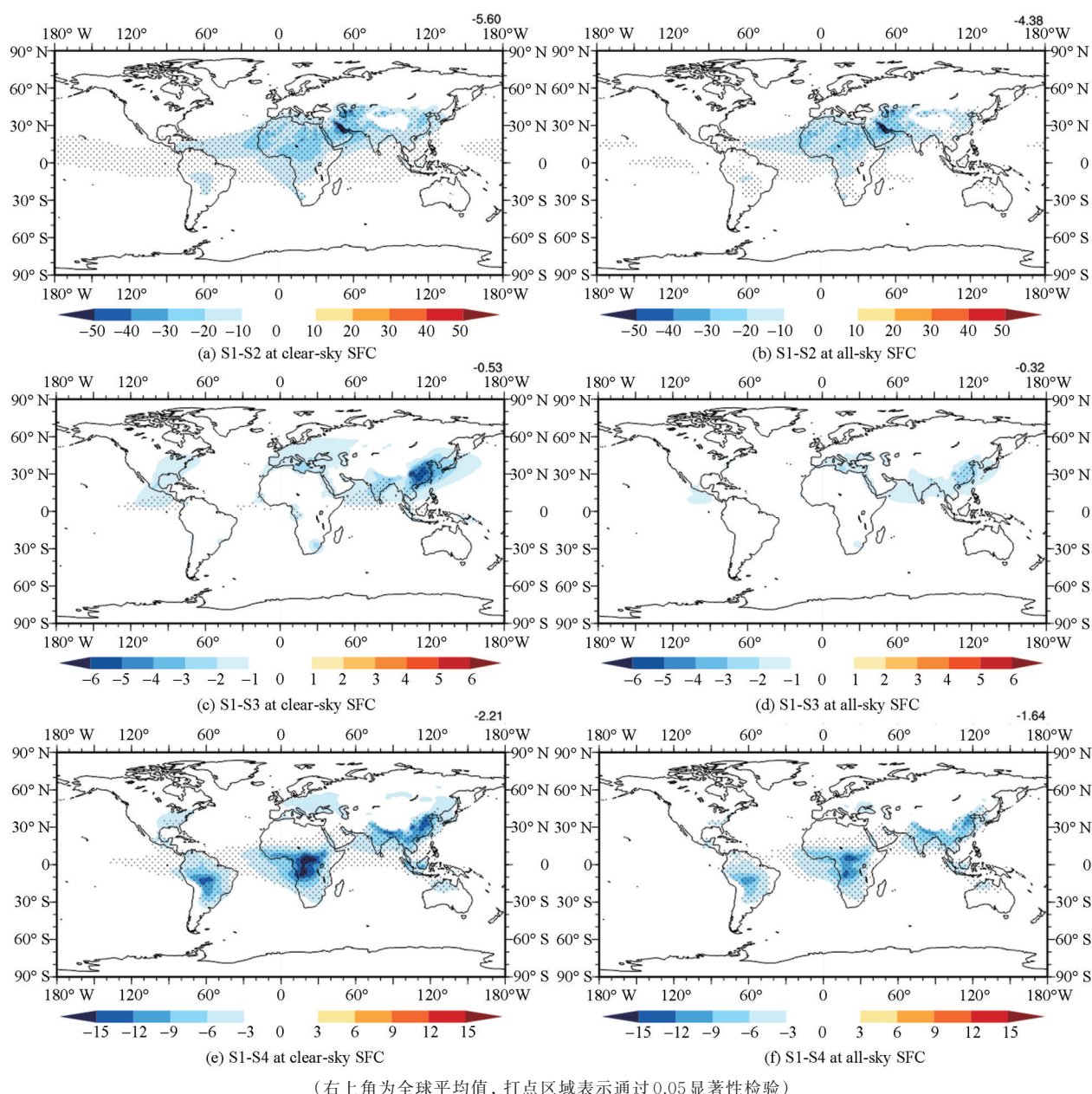


图6 总气溶胶、硫酸盐气溶胶、含碳气溶胶在晴空和有云条件下地表的直接辐射强迫(单位: $\text{W/m}^2$ )

Fig.6 Direct radiative forcing of total aerosol, sulfate aerosol and carbonaceous aerosol on the surface under clear sky and all sky conditions (units is  $\text{W/m}^2$ )

硫酸盐气溶胶在晴空条件下地表的直接辐射强迫约为 $-0.53\text{ W/m}^2$ ( $-0.40\%$ ),强迫高值区在中国东部地区,强迫值为 $-5.0\text{ W/m}^2$ ( $-2.36\%$ ),其次是印

度半岛,强迫值为 $-1.58\text{ W/m}^2$ ( $-0.71\%$ )。有云条件下硫酸盐气溶胶的地表辐射强迫为 $-0.32\text{ W/m}^2$ ( $-0.32\%$ ),强迫高值区同样在中国东部和印度半

岛,强迫值分别约为 $-2.54 \text{ W/m}^2$  ( $-1.85\%$ )、 $-1.05 \text{ W/m}^2$  ( $-0.61\%$ )。根据硫酸盐气溶胶在大气层的直接辐射强迫的空间分布特征可知,硫酸盐气溶胶既能削弱大气层顶的太阳辐射也能削弱到达地表的太阳辐射,并且对地表的削弱强度略大于大气层顶。

含碳气溶胶在晴空条件下地表的直接辐射强迫约为 $-2.21 \text{ W/m}^2$  ( $-1.67\%$ ),含碳强迫高值区位于非洲刚果雨林和中国东部地区,强迫值分别为 $-14.34 \text{ W/m}^2$  ( $-5.73\%$ )、 $-12.16 \text{ W/m}^2$  ( $-5.74\%$ ),其次南美亚马逊雨林、马来群岛和印度半岛,强迫值分别为 $-6.71 \text{ W/m}^2$  ( $-2.61\%$ )、 $-6.33 \text{ W/m}^2$  ( $-2.50\%$ )、 $-5.81 \text{ W/m}^2$  ( $-2.60\%$ )。有云条件下含碳气溶胶的地表辐射强迫为 $-1.64 \text{ W/m}^2$  ( $-1.64\%$ ),强迫高值区同样出现在非洲刚果雨林和中国东部地区,强迫值分别为 $-9.74 \text{ W/m}^2$  ( $-6.51\%$ )、 $-8.8 \text{ W/m}^2$  ( $-6.42\%$ )。

#### 4 结论与展望

本文首先利用 AERONET 和 BSRN 站点数据对 CESM 模拟能力进行评估,然后利用 MERRA-2 和 CERES 资料从空间分布特征进行了验证,最后,利用 CESM 模拟不同气溶胶情景下的辐射通量,模拟计算了晴空和有云天气条件下大气层顶和地表的直接辐射强迫,分析了不同类型气溶胶直接辐射效应的时空变化特征。本研究的模拟结果和发现,有利于进一步理解气溶胶的直接辐射效应,并为未来改进和控制通用地球系统模式的模拟结果提供依据。主要研究结论如下:

(1) 将 CESM 模拟的气溶胶光学厚度与 AERONET 进行对比验证发现,模拟的总气溶胶光学厚度整体上低于 AERONET 观测数据,这与 Alvim 等<sup>[14]</sup>用 CAM5-MAM3 模式模拟了南美洲大陆的气溶胶光学厚度的发现一致,即 CESM-MAM3 模拟结果存在低估。将模拟结果与 MERRA-2 产品对比发现,CESM 高估了沙尘气溶胶的光学厚度,低估了硫酸盐气溶胶的光学厚度,这主要是由于 CESM 中沙尘气溶胶与海盐气溶胶被合并成一个粗模态,被假定为内部混合,从而导致了沙尘气溶胶高估的现象,这与张天航<sup>[41]</sup>和李鑫等<sup>[42]</sup>的结论相一致;而硫酸盐气溶胶在 CESM 中有一部分被铵盐以  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  的形式存在,从而导致硫酸盐气溶胶的模拟值较低。在空间分布上,CESM 的模拟值与

MERRA-2 资料基本一致。

(2) 将 CESM 模拟的辐射通量与 BSRN 站点数据对比,得到 CESM 模拟的短波向下辐射通量与观测值具有良好的相关性, $R^2$  达到 0.93, RMSE 为  $33.27 \text{ W/m}^2$ , MAE 为  $23.95 \text{ W/m}^2$ , 拟合系数为 0.93。将 CESM 的模拟计算得到的直接辐射强迫与 CERES(SYN) 资料对比发现,CESM 对大气层顶的气溶胶辐射强迫的模拟小于 CERES,但整体空间分布一致性较高,均在南美北部、非洲中部、印度和中国东部地区产生明显的负效应。由于 MAM3 机制对沙尘气溶胶的模拟值偏高,从而导致其产生的辐射效应较为明显。

(3) 模拟的总气溶胶以及硫酸盐气溶胶、含碳气溶胶在晴空条件下大气层顶的直接辐射强迫的平均值分别为 $-1.37 \text{ W/m}^2$  ( $-0.73\%$ )、 $-0.46 \text{ W/m}^2$  ( $-0.25\%$ )、 $-0.45 \text{ W/m}^2$  ( $-0.24\%$ );有云条件下大气层顶的直接辐射强迫的平均值分别为 $-0.30 \text{ W/m}^2$  ( $-0.19\%$ )、 $-0.25 \text{ W/m}^2$  ( $-0.16\%$ )、 $+0.04 \text{ W/m}^2$  ( $+0.03\%$ )。因此,云的存在削弱了气溶胶负的辐射效应,加强了含碳气溶胶的吸热作用从而呈现正效应。

(4) 模拟的总气溶胶以及硫酸盐气溶胶、含碳气溶胶在晴空条件下地表的直接辐射强迫的全球陆地平均值分别为 $-5.60 \text{ W/m}^2$  ( $-4.22\%$ )、 $-0.53 \text{ W/m}^2$  ( $-0.40\%$ )、 $-2.21 \text{ W/m}^2$  ( $-1.67\%$ )。有云条件下地表的直接辐射强迫的平均值分别为 $-4.38 \text{ W/m}^2$  ( $-4.38\%$ )、 $-0.32 \text{ W/m}^2$  ( $-0.32\%$ )、 $1.64 \text{ W/m}^2$  ( $-1.64\%$ )。由于气溶胶的吸收和散射作用导致到达地面的太阳辐射减少,所以气溶胶的辐射效应在地表均呈现负效应。因此,云的存在对沙尘气溶胶的辐射效应影响不大,但却能削弱硫酸盐气溶胶和含碳气溶胶的直接辐射效应强度。

本文在研究 CESM 对气溶胶光学厚度模拟能力评估中发现,模型中的 MAM3 气溶胶机制对硫酸盐气溶胶存在低估同时对沙尘气溶胶高估的现象,所以对辐射效应的模拟因此会有偏差。在今后的研究中需要考虑通过改进 CESM 的气溶胶机制,从而提高对气溶胶的模拟精度;同时本文只探讨了气溶胶的直接辐射效应,而气溶胶也可以通过间接影响云的物理性质来改变云的辐射特征,从而影响天气系统的辐射平衡,在今后的研究中将要考虑这一点。

## 参考文献(References):

- [1] ENGLING G, GELENCSEER A. Atmospheric brown clouds: from local air pollution to climate change[J]. *Elements* (Quebec), 2010, 6(4): 223-228. DOI: 10.2113/gselements.6.4.223
- [2] CHEN L J, FEI Y, WANG R, *et al.* Retrieval of high temporal resolution aerosol optical depth using the GOCI remote sensing data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2376. DOI: 10.3390/rs13122376
- [3] FU B, GASSER T, LI B G, *et al.* Short-lived climate forcers have long-term climate impacts via the carbon-climate feedback[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(9): 851-855. DOI: 10.1038/s41558-020-0841-x
- [4] HUANG J P, WANG T H, WANG W C, *et al.* Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11398-11416. DOI: 10.1002/2014JD021796
- [5] ZHANG H, MA J H, ZHANG Y F. Modeling study of the global distribution of radiative forcing by dust aerosol[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 24(5): 558-570.
- [6] LIU Z Y, HUANG J B, SHI G Y, *et al.* Aerosol optical properties and radiative effect determined from sky-radiometer over Loess Plateau of Northwest China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(22): 11455-11463. DOI: 10.5194/acp-11-11455-2011
- [7] HAYWOOD J M, RAMASWAMY V. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1998, 103(D6): 6043-6058. DOI: 10.1029/97JD03426
- [8] ACKERMAN S, TONN O B, STEVENS D E, *et al.* Reduction of tropical cloudiness by soot[J]. *Science*, 2000, 288(5468): 1042-1047. DOI: 10.1126/science.288.5468.1042
- [9] SHI G Y, WANG B, ZHANG H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.11
- [10] LUO Yunfeng, ZHOU Xiuji, LI Weiliang. Advances in the study of atmospheric aerosol radiative forcing and climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 1998, 13(6): 63-72. [罗云峰, 周秀骥, 李维亮. 大气气溶胶辐射强迫及气候效应的研究现状[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 63-72.]
- [11] SHI G M. Radiative forcing and greenhouse effect due to the atmospheric trace gases[J]. *Science China-chemistry*, 1992, 35(2): 217-229. DOI: 10.1360/YB1992-35-2-217
- [12] SHAO Y P. A model for mineral dust emission[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D17): 20239-20254. DOI: 10.1029/2001JD900171
- [13] HAN Tian, PAN Xiaoduo, WANG Xufeng, *et al.* Application of remote sensing data in WRF-Chem model simulating sandstorm[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(4): 808-819. [韩天, 潘小多, 王旭峰, 等. 遥感资料在 WRF-Chem 沙尘模拟中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(4): 808-819.]
- [14] ALVIM D S, PENDHARKAR J, CAPISTRANO V B, *et al.* Aerosol distribution over Brazil with ECHAM-HAM and CAM5-MAM3 simulations and its comparison with ground-based and satellite data[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(4): 718-728. DOI: 10.1016/j.apr.2017.01.008
- [15] HU Zhiyuan. Numerical simulation of aerosol in atmosphere and snow[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. [胡志远. 大气和积雪中气溶胶的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.]
- [16] YU H, KAUFMAN Y J, CHIN M, *et al.* A review of measurement-based assessment of aerosol direct radiative effect and forcing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 27(6): 613-666. DOI: 10.5194/acp-6-613-2006
- [17] PARK S U, JEONG J I. Direct radiative forcing due to aerosols in Asia during March 2002[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 407(1): 394-404. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.041
- [18] ZHANG L, LIAO H, LI J P. Impacts of Asian summer monsoon on seasonal and interannual variations of aerosols over eastern China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D7). DOI: 10.1029/2009JD012299
- [19] RAJI K B, OGUNJOBI K O, AKINSANOLA A A. Radiative effects of dust aerosol on West African climate using simulations from RegCM4[J]. *Modeling Earth Systems & Environment*, 2017, 3(1): 34. DOI: 10.1007/s40808-017-0295-y
- [20] HE Xin, LU Chunsong, ZHU Jun. A study of the spatiotemporal variation in aerosol types and their radiation effect in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(11): 4070-4080. [贺欣, 陆春松, 朱君. 中国地区气溶胶类型变化及其辐射效应研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(11): 4070-4080.]
- [21] WANG H, TAN S C, WANG Y, *et al.* A multisource observation study of the severe prolonged regional haze episode over eastern China in January 2013[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 89: 807-815. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.004
- [22] ZHOU C, ZHANG H, ZHAO S Y, *et al.* On effective radiative forcing of partial internally and externally mixed aerosols and their effects on global climate[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(1): 401-423. DOI: 10.1002/2017JD027603
- [23] WANG Dongdong, ZHU Bing, JIANG Zhihong, *et al.* A modeling study of effects of anthropogenic aerosol on East

- Asian winter monsoon over eastern China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2017, 40(4): 541-552.[王东东, 朱彬, 江志红, 等. 人为气溶胶对中国东部冬季风影响的模拟研究[J]. 大气科学学报, 2017, 40(4): 541-552.]
- [24] LI Xin, LIU Yu. Assessment of two aerosol modules of CAM5 [J]. Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2013, 24(1): 75-86.[李鑫, 刘煜. CAM5 模式中两气溶胶模块的评估[J]. 应用气象学报, 2013, 24(1): 75-86.]
- [25] FARQUHAR G D, CAEMMERER S V, BERRY J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90. DOI: 10.1007/BF00386231
- [26] COLLATZ G J, BALL J T, GRIVET C, *et al.* Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54 (2-4): 107-136. DOI: 10.1016/0168-1923 (91) 90002-8
- [27] OLESON K W, LAWRENCE D M, BONAN G B, *et al.* Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [Z]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA, 2010. DOI: 10.5065/D6FB50WZ
- [28] HOLBEN B N, ECK T F, SLUTSKER I, *et al.* AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16. DOI: 10.1016/S0034-4257(98) 00031-5
- [29] LU Tianwei, ZHANG Jing, QIAO Yan, *et al.* Effects of aerosols on radiation and precipitation in the Yangtze River Delta[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(1): 135-144.[陆天蔚, 张晶, 乔岩, 等. 长三角地区气溶胶对辐射和降水影响的分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 135-144.]
- [30] DOELLING D R, LOEB N G, KEYES D F, *et al.* Geostationary enhanced temporal interpolation for CERES Flux products[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30(6): 1072-1090. DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00136.1
- [31] Lü Rui. Aerosol optical properties and direct radiative forcing over eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018.[吕睿. 中国东部大气气溶胶光学特性及直接辐射强迫研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.]
- [32] MA Jinghui. The optical properties and global radiative forcing simulation of black carbon and dust aerosols [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.[马井会. 黑碳和沙尘气溶胶光学特性及全球辐射强迫的模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.]
- [33] ZHANG H, WANG Z L, WANG Z Z, *et al.* Simulation of direct radiative forcing of aerosols and their effects on east Asian climate using an interactive AGCM-aerosol coupled System[J]. Climate Dynamics, 2012, 38(7-8): 1675-1693. DOI: 10.1007/s00382-011-1131-0
- [34] LI Jiandong, MAO Jiangyu, WANG Weijiang. Anthropogenic Eastern Asian radiative forcing due to sulfate and black carbon aerosols and their time evolution estimated by an AGCM [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1103-1120.[李剑东, 毛江玉, 王维强. 大气模式估算的东亚区域人为硫酸盐和黑碳气溶胶辐射强迫及其时间变化特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1103-1120.]
- [35] KOCH D, BOND T C, STREETS D, *et al.* Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D2). DOI: 10.1029/2005JD007024
- [36] REDDY M S, BOUCHER O, BALKANSKI Y, *et al.* Aerosol optical depths and direct radiative perturbations by species and source type[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(12): 21743-21746. DOI: 10.1029/2004GL021743
- [37] DENMAN K, BRASSEUR G. The physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95-123.
- [38] ZHANG H, WANG Z L, GUO P W, *et al.* A modeling study of the effects of direct radiative forcing due to carbonaceous aerosol on the climate in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(1): 57-66. DOI: 10.1007/s00376-009-0057-5
- [39] ABDUL R H. Atmospheric aerosols regional characteristics chemistry and physics[J]. 2012, 10.5772/2695 (Chapter 6).
- [40] SU Xingtao, WANG Hanjie, SONG Shuai, *et al.* Radiative force and temperature response of dust aerosol over East Asia in recent decade[J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(5): 1300-1307.[宿兴涛, 王汉杰, 宋帅, 等. 近 10 年东亚沙尘气溶胶辐射强迫与温度响应[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1300-1307.]
- [41] ZHANG Tianhang, LIAO Hong, CHANG Wenyuan, *et al.* Direct radiative forcing by dust in China based on Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACC-MIP) Datasets[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40(6): 1242-1260.[张天航, 廖宏, 常文渊, 等. 基于国际大气化学—气候模式比较计划模式数据评估中国沙尘气溶胶直接辐射强迫[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1242-1260.]
- [42] LI Xin. Assessment of CAM5 and climate effect of primary organic aerosol [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2012.[李鑫. CAM5 模式的评估与一次有机碳气溶胶的气候效应[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.]

## Numerical Simulation of Different Types of Aerosols Direct Radiation Effect based on Community Earth System Model

LIU Jia<sup>1,2,3</sup>, WANG Ren<sup>1,2,3</sup>, LI Longhui<sup>1,2,3</sup>

(1.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China;

2.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

3.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Aerosols can affect the radiation balance of the earth atmosphere system through direct effects. However the research on aerosol direct radiation effect mainly focuses on total aerosol, and there is a lack of research on different types of aerosol direct radiation effect. In this study, the Community Earth System Model (CESM) is used to simulate the direct radiative forcing of total aerosols, sulfate aerosols and carbonaceous aerosols on the top of the atmosphere and the surface, and the simulation results are verified by multi-source data. The results show that there is a good correlation between the total Aerosol Optical Depth (AOD) simulated by CESM and the AERONET ( $R^2 = 0.44$ ), but the simulation value is relatively small. Compared with MERRA-2, it is found that the optical depth of carbonaceous aerosol is overestimated and the optical depth of sulfate aerosol is underestimated; The radiation flux simulated by CESM and the simulation effect of BSRN are good ( $R^2 = 0.93$ ). The simulation results show that the direct radiative forcing of total aerosol, sulfate aerosol and carbon aerosol at the top of the atmosphere under clear sky conditions are  $-1.37$ 、 $-0.46$  and  $-0.45$   $\text{W/m}^2$ , and  $-0.30$ 、 $-0.25$  and  $+0.04$   $\text{W/m}^2$  under cloudy conditions, respectively. Therefore, the existence of clouds weakens the negative radiation effect of aerosols at the top of the atmosphere and strengthens the endothermic effect of carbonaceous aerosols, showing a positive effect; Under clear sky conditions, the direct radiation forcing on the surface is  $-5.60$ 、 $-0.53$ 、 $-2.21$   $\text{W/m}^2$ , and it is  $-4.38$ 、 $-0.32$ 、 $-1.64$   $\text{W/m}^2$  under cloudy conditions, respectively. Thus, the direct radiation effect of aerosols presents a negative effect on the surface, and the presence of clouds has little effect on the radiation effect of dust aerosols, but it can weaken the direct radiation effect intensity of sulfate aerosol and carbon aerosol. The results of this study are helpful to further understand the direct radiation effects of different types of aerosols and provide a basis for improving CESM in the future.

**Key words:** Aerosol;CESM;Model evaluation;Direct radiation forcing