

张天航, 廖宏, 常文渊, 等. 2016. 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, 40 (6): 1242–1260.  
Zhang Tianhang, Liao Hong, Chang Wenyuan, et al. 2016. Direct radiative forcing by dust in China based on atmospheric chemistry and climate model intercomparison project (ACCMIP) datasets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (6): 1242–1260, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15275.

## 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

张天航<sup>1,2</sup> 廖宏<sup>1</sup> 常文渊<sup>1</sup> 刘瑞金<sup>1,2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘 要** 目前气候模式对沙尘气溶胶直接辐射强迫模拟仍有很大不确定性, 多模式对比有助于定量评估不确定范围。国际大气化学—气候模式比较计划 (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project, ACCMIP) 旨在评估当前模式对短寿命大气成分辐射强迫和气候效应的模拟能力。基于 7 个 ACCMIP 模式模拟的中国地区沙尘气溶胶浓度, 我们评估了中国区域沙尘气溶胶直接辐射强迫和不确定性范围。结果显示, 中国区域沙尘气溶胶年排放总量为  $215 \pm 163 \text{ Tg a}^{-1}$ , 区域年均地表浓度为  $41 \pm 27 \mu\text{g m}^{-3}$ , 柱浓度为  $9 \pm 4 \text{ kg m}^{-2}$ , 光学厚度为  $0.09 \pm 0.05$ 。中国区域年均沙尘气溶胶产生的大气顶短波、长波和总辐射强迫分别为  $-1.3 \pm 0.8 \text{ W m}^{-2}$ 、 $0.7 \pm 0.4 \text{ W m}^{-2}$  和  $-0.5 \pm 0.7 \text{ W m}^{-2}$ ; 地表短波、长波和总的辐射强迫值为  $-1.5 \pm 1.0 \text{ W m}^{-2}$ 、 $1.8 \pm 0.9 \text{ W m}^{-2}$  和  $0.2 \pm 0.2 \text{ W m}^{-2}$ 。沙尘气溶胶长波辐射强迫对沙尘浓度的垂直分布敏感。高层沙尘气溶胶浓度越大, 其在大气顶产生更强的正值长波辐射强迫。然而, 沙尘气溶胶短波辐射强迫主要受整层沙尘柱浓度控制, 对沙尘浓度的垂直分布较不敏感。本文结果可为中国沙尘气溶胶的气候模拟提供参考。

**关键词** 大气化学—气候模式比较计划 (ACCMIP) 中国 沙尘气溶胶 直接辐射强迫

文章编号 1006-9895(2016)06-1242-19

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15275

## Direct Radiative Forcing by Dust in China Based on Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) Datasets

ZHANG Tianhang<sup>1,2</sup>, LIAO Hong<sup>1</sup>, CHANG Wenyuan<sup>1</sup>, and LIU Ruijin<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Large uncertainties exist in simulated direct radiative forcing by dust in climate models. Multi-model comparisons quantify the range of uncertainties in current climate models. The Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) is set up to evaluate the radiative forcing and climate effect of short-lived chemical species in the atmosphere. Based on simulated dust concentrations from 7 ACCMIP models, we quantify in this

收稿日期 2015-09-23; 网络预出版日期 2015-12-16

作者简介 张天航, 男, 1987 年出生, 博士研究生, 从事气溶胶数值模拟研究。E-mail: sharp@mail.iap.ac.cn

通讯作者 廖宏, E-mail: hongliao@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2014CB441200

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2014CB441200)

work the direct radiative forcing by dust in China and the range of uncertainties. Our results show that annual total emission, annual mean surface-layer concentration, burden, and AOD (Aerosol Optical Depth) of dust averaged over China are  $215 \pm 163 \text{ Tg a}^{-1}$ ,  $41 \pm 27 \mu\text{g m}^{-3}$ ,  $9 \pm 4 \text{ kg m}^{-2}$ , and  $0.09 \pm 0.05$ , respectively. Simulated annual mean short-wave, long-wave, and net (short-wave plus long-wave) direct radiative forcings by dust averaged over China are, respectively,  $-1.3 \pm 0.8 \text{ W m}^{-2}$ ,  $0.7 \pm 0.4 \text{ W m}^{-2}$ , and  $-0.5 \pm 0.7 \text{ W m}^{-2}$  at the top of the atmosphere and  $-1.5 \pm 1.0 \text{ W m}^{-2}$ ,  $1.8 \pm 0.9 \text{ W m}^{-2}$ ,  $0.2 \pm 0.2 \text{ W m}^{-2}$  at the surface. Long-wave radiative forcing by dust is found sensitive to vertical distribution of dust concentrations. Dust aerosol in high altitudes contributes largely to long-wave radiative forcing at the top of the atmosphere. However, short-wave radiative forcing by dust is dependent on dust burden but not sensitive to its vertical distribution.

**Keywords** Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP), China, Dust aerosol, Direct radiative forcing

## 1 引言

沙尘气溶胶通过吸收和散射太阳短波辐射和地表红外辐射影响气候 (Huang et al., 2006; Mikami et al., 2006; Yue et al., 2010a), 直接辐射强迫值是对这种影响的定量表达。研究表明 (表 1), 全球年均沙尘气溶胶在大气顶的总直接辐射强迫 (短波+长波) 为  $-0.9 \sim 0.1 \text{ W m}^{-2}$  (Jacobson, 2001; Myhre and Stordal, 2001; Liao et al., 2004; Reddy et al., 2005; Mikami et al., 2006; Yue et al., 2010a, 2010b; Albani et al., 2014), 地表强迫为  $-1.5 \sim -0.5 \text{ W m}^{-2}$  (Liao et al., 2004; Yue et al., 2010a, 2010b; Albani et al., 2014), 具有很大的不确定性。

我国西北是东亚重要的沙尘源区, 表 1 总结了文献中估算的该区域沙尘气溶胶直接辐射强迫。一些研究得到了该区域春季的值。比如, 基于 Gong et al. (2003) 利用 NARCM (Northern Aerosol Regional Climate Model) 模式模拟的 2001 年春季东亚和北太平洋区域 ( $16^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ ,  $75^\circ \text{E} \sim 225^\circ \text{W}$ ) 沙尘气溶胶浓度, 王宏等 (2004) 利用 k 分布辐射传输模式计算了其区域平均沙尘气溶胶大气顶总辐射强迫为  $-0.9 \text{ W m}^{-2}$ , 其中短波和长波辐射强迫分别为  $-1.7 \text{ W m}^{-2}$  和  $0.8 \text{ W m}^{-2}$ ; 地面总辐射强迫为  $-5.4 \text{ W m}^{-2}$ , 其中短波和长波辐射强迫分别为  $-6.3 \text{ W m}^{-2}$  和  $0.8 \text{ W m}^{-2}$ 。Sun et al. (2012) 利用 RegCM4 (Regional Climate Model version 4) 模拟了 2000~2009 年中国沙尘春季晴空辐射强迫, 显示大气顶短波辐射强迫在塔克拉玛干和戈壁沙漠沙尘源区为  $-6.0 \sim -2.0 \text{ W m}^{-2}$ , 在中国东部为  $-8.0 \sim -4.0 \text{ W m}^{-2}$ ; 大气顶长波辐射强迫在源区为  $1.2 \sim 2.0 \text{ W m}^{-2}$ , 中国其他区域为  $0.4 \sim 0.8 \text{ W m}^{-2}$ 。地面短波辐射强迫在源区为  $-25.0 \sim -15.0 \text{ W m}^{-2}$ , 中国其他

区域为  $-15.0 \sim -10.0 \text{ W m}^{-2}$ ; 地面长波辐射强迫在源区为  $4.0 \sim 8.0 \text{ W m}^{-2}$ , 中国其他区域为  $2.0 \sim 4.0 \text{ W m}^{-2}$ 。

另外一些研究报道了中国沙尘气溶胶直接辐射强迫的年均值。沙尘气溶胶大气顶总辐射强迫在塔克拉玛干和戈壁沙漠为  $-1.9 \sim 9 \text{ W m}^{-2}$ , 华北为  $-6.3 \sim -1 \text{ W m}^{-2}$ , 中国其他区域为  $-6 \sim -0.6 \text{ W m}^{-2}$  (Jacobson, 2001; Myhre and Stordal, 2001; Liao et al., 2004; Mikami et al., 2006; Yue et al., 2010b; Albani et al., 2014)。地表总辐射强迫在中国源区为  $-15 \sim 0.5 \text{ W m}^{-2}$ , 华北为  $-10 \sim -0.5 \text{ W m}^{-2}$ , 中国其他区域为  $-5 \sim 0.6 \text{ W m}^{-2}$  (Liao et al., 2004; Yue et al., 2010b; Albani et al., 2014)。可见, 由于模式选择沙尘光学特性的不同, 沙尘在中国源区辐射强迫的正、负号也不确定。此外, 吴润等 (2005) 利用 RegCM3 得到了 2001 年 3 月~2002 年 3 月东亚 ( $20^\circ \sim 60^\circ \text{N}$ ,  $60^\circ \sim 160^\circ \text{E}$ ) 沙尘气溶胶大气顶和地表年均总直接辐射强迫分别为  $0.7 \text{ W m}^{-2}$  和  $-2.8 \text{ W m}^{-2}$ 。综上所述, 上述研究均基于单个数值模拟结果, 观测或模拟沙尘浓度以及辐射传输方案存在显著差异, 使得辐射强迫估算有很大不确定性。

本文旨在评估我区域沙尘气溶胶直接辐射强迫的多模式不确定性。研究基于国际大气化学—气候模式比较计划 (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project, ACCMIP) (Lamarque et al., 2013b) 的多模式模拟结果。ACCMIP 模式模拟结果被政府间气候变化委员会第五次报告 (Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report, IPCC-AR5) 广泛采用, 其宗旨在于评估大气短寿命辐射成分 (如气溶胶、臭氧、甲烷等) 及其化学过程在当前气候模式中的模拟水平。目前, 已有许多研究对 ACCMIP

表 1 文献报道的全球和中国平均沙尘气溶胶辐射强迫 (单位:  $W m^{-2}$ )<sup>①</sup>  
Table 1 Global and China mean dust radiative forcing (units:  $W m^{-2}$ )

参考文献	模式名称	大气顶短波	大气顶长波	大气顶短波+长波	地表短波	地表长波	地表短波+长波
全球 年均	Jacobson (2001) GATORG Myhre and Stordal (2001) 多流道辐射传 输模式	-0.2	0.1	-0.1	-	-	-
	Liao et al. (2004) GISS GCMII'	-0.2	0.3	0.1	-1.1	0.5	-0.5
	Reddy et al. (2005) LMDZT GCM	-0.3	0.1	-0.1	-	-	-
	IPCC-AR4 GISS GCMII'	-0.8	0.2	-0.6	-	-	-
	AeroCom GISS	-	-	-	-	-	-
	IPCC-AR4 LSCE	-0.6	0.3	-0.3	-	-	-
	AeroCom LSCE	-	-	-	-	-	-
	IPCC-AR4 UIO-CTM	-0.6	0.2	-0.4	-	-	-
	AeroCom	-	-	-	-	-	-
	UIO-CTM	-	-	-	-	-	-
	IPCC-AR4 UMI	-0.5	0.2	-0.4	-	-	-
	AeroCom UMI	-	-	-	-	-	-
	Mikami et al. MASINGAR (2006)	-	-	-0.9	-	-	-
	Yue et al. (2010a) NCAR-CAM3	-0.5	0.1	-0.4	-1.8	0.3	-1.5
	Yue et al. (2010b) GMOD	-0.3	0.3	0.0	-2.0	0.6	-1.3
	Albani et al. NCAR-CAM4 (2014)	-0.2	0.2	-0.2	-1.2	0.6	-0.6
中国 年均	Jacobson (2001) GATORG Myhre and Stordal (2001) 多流道辐射传 输模式	-	-	源区 0~1, 华北-2~0, 其他区域-2~0 KHSS97 试验: 源区-1~5, 华北 8~14, 其他区域-1~5; TF95 试验: 源区 1~2, 华北-1~0, 其 他区域-1~0 源区 1~2, 华北-1~0, 其他区域 0~0.5	-	-	-
	Liao et al. (2004) GISS GCMII'	-	-	源区 0~1, 华北-2~0, 其他区域-2~0 KHSS97 试验: 源区-1~5, 华北 8~14, 其他区域-1~5; TF95 试验: 源区 1~2, 华北-1~0, 其 他区域-1~0 源区 1~2, 华北-1~0, 其他区域 0~0.5	-	-	源区 0~0.5, 华北-2~ -0.5, 其他区域-0.5~0 -5.4
	王宏等 (2004) <sup>②</sup> k 分布辐射传 输模式	-1.7	0.8	-0.9	-6.3	0.8	-
	吴润等 (2005) <sup>③</sup> RegCM3	-	-	0.7	-	-	-2.8
	Mikami et al. MASINGAR (2006)	-	-	源区 0~9, 华北-6~0, 其他区域-6~0	-	-	-
	Yue et al. (2010a) NCAR-CAM3	-	源区 0.2~0.5	-	全国 -5~-1	源区 0.5~1	-
	Yue et al. (2010b) GMOD	-	源区 0.5~1, 华北 0.5~1, 其他区域 其他区域 0~0.5	源区 0.5~1, 华北 0.5~1, 其他区域 -0.5~0.5	源区-10~-5, 华北-5~-3, 源区 1~3, 华北 0~1, 其 他区域 0~1	源区-5~-3, 华北-3~-1, 其他区域-3~-1	-
	Sun et al. (2012) <sup>④</sup> RegCM4	源区-6~-2, 东部-8~-4	源区 1.2~2.0, 其他区域 0.4~0.8	-	源区-25~-15, 其他区域 -15~-10	源区 4~8, 其他区域 2~4	-
	Albani et al. NCAR-CAM4 (2014)	源区-3.1~-1.9, 华北 -1.9~-0.6, 其他区域 -0.6~0	源区 0.6~1.9, 华北 0~ 0.6, 其他区域 0~0.6	源区-0.6~-1.9, 华北-0.6~-1.9, 其他 区域-0.6~0.6	源区-6.2~-1.9, 华北-6.2~ -1.9, 其他区域-1.9~-0.6	源区 1.9~6.2, 华北 0.6~ 1.9, 其他区域 0~0.6	源区 -1.9~-3.1, 华北 -0.6~-1.9, 其他区域 -0.6~0

注: ①表中源区指中国塔克拉玛干和戈壁沙漠地区; ②2001年春季东亚和北太平洋区域(16~70°N, 75°E~225°W)平均值; ③2001年3月至2002年3月东亚(20°~60°N, 60°~160°E)平均值; ④2000~2009年春季平均值

多模式模拟的不同时期 (1750~2100 年) 的臭氧 (Bowman et al., 2013; Stevenson et al., 2013; Young et al., 2013)、羟基自由基与甲烷 (Naik et al., 2013; Voulgarakis et al., 2013)、黑碳 (Lee et al., 2013) 和氮硫元素 (Lamarque et al., 2013a) 的时空变化和辐射强迫进行了评估, 但利用 ACCMIP 多模式对中国区域沙尘浓度和辐射强迫的研究仍然缺乏。

## 2 数据与模式

### 2.1 模拟沙尘浓度

ACCMIP 包含不同的大气环流模式, 分别耦合不同的化学模块。其中 7 个模式模拟了沙尘气溶胶浓度, 分别是 GFDL-AM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Atmospheric Model version 3)、GISS-E2-R (Goddard Institute for Space Studies General Circulation Model)、GISS-TOMAS (Implemented Two-Moment Aerosol Sectional aerosol microphysics mode into GISS-E2-R)、HadGEM2 (Hadley Centre Global Environmental Model version 2)、MIROC-CHEM (atmospheric chemistry coupled version of Model for Interdisciplinary Research on Climate)、NCAR-CAM3.5 (National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model version 3.5) 和 NCAR-CAM5.1 (National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model version 5.1)。所有模拟试验使用再分析资料海温, 大气环流与气溶胶辐射在线双向耦合。气候模式采用参数化起沙方案, 即根据地表下垫面类型和地表风场在线计算起沙量, 但各 ACCMIP 模式使用的参数化方案略有不同。本文使用的 ACCMIP 模式基本参数见表 2, 模式详细描述见 Lamarque et al. (2013b)。ACCMIP 模拟数据来自 <https://badc.nerc.ac.uk>

[2015-05-01]。

### 2.2 沙尘辐射强迫的计算

沙尘气溶胶辐射强迫是根据有无沙尘情形试验辐射强迫的差值计算得到, 即有无沙尘对地气系统辐射通量的影响。由于并不是所有 ACCMIP 模式都直接输出了沙尘辐射强迫值, 本文采用各 ACCMIP 模式模拟的气溶胶质量浓度, 统一使用 GISS GCM II' (Goddard Institute for Space Studies General Circulation Model II') 大气环流模式的辐射传输方案计算沙尘直接辐射强迫。此外, 由于 ACCMIP 模式只提供了沙尘气溶胶的总浓度, 并未提供各粒径段浓度, 因此我们根据 GISS GCM II' 的 2000 年参照试验中沙尘各粒径段的浓度比例, 将 ACCMIP 模式的沙尘浓度分配到 GISS GCM II' 的粒径段中, 并保持总浓度不变。GISS GCM II' 模式采用单高斯点倍加—累加辐射传输方案 (Lacis and Hansen, 1974; Hansen et al., 1983), 计算 6 个短波和 25 个长波波段的辐射通量。气溶胶光学特性 (消光系数、散射系数和不对称因子) 根据米散射理论, 基于沙尘粒子的谱分布和复折射指数计算得到。沙尘粒子从 0.0316~31.6  $\mu\text{m}$  分为 6 个档 (0.0316~0.1、0.1~0.316、0.316~1.0、1.0~3.16、3.16~10 和 10~31.6  $\mu\text{m}$ )。各波段沙尘气溶胶光学参数参见 Liao et al. (2004), 其中 550 nm 中国地区沙尘气溶胶年均单次散射反照率 (Single Scattering Albedo, SSA) 如图 1 所示。西北沙漠地区 SSA 值在 0.872~0.878 范围内, 与 Huang et al. (2009) 报道 670 nm 的值 0.89 相当。模式中每个积分步长的地表反照率是根据气象和地表参数变化计算得出 (Hansen et al., 1983)。陆地的反照率是植被类型的函数, 随波段和季节变化。当有降雪的时候, 地表反照率根据积雪厚度、沉积时间、植被覆盖量和无雪地面反照率计算。陆冰在可见光波段和近红外波

表 2 国际大气化学—气候模式比较计划 (ACCMIP) 中有沙尘模拟的各模式基本信息

Table 2 ACCMIP (Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project) models with dust simulation

模式	资料时间段	分辨率 (纬度/经度/垂直层数), 顶层气压		沙尘粒径范围 (直径)	沙尘模块参考文献	模式参考文献
		分辨率 (纬度/经度/垂直层数), 顶层气压	分辨率 (纬度/经度/垂直层数), 顶层气压			
GFDL-AM3	2001~2010 年	2°/2.5°/L48, 0.017 hPa		0.2~20 $\mu\text{m}$ 分为 5 档	Li et al. (2008)	Donner et al. (2011)
GISS-E2-R	2000~2005 年	2°/2.5°/L40, 0.14 hPa		0.2~16 $\mu\text{m}$ 分为 4 档	Miller et al. (2006)	Koch et al. (2006), Shindell et al. (2013)
GISS-TOMAS	2000~2009 年	2°/2.5°/L40, 0.14 hPa		0.01~10 $\mu\text{m}$ 分为 12 档	Lee et al. (2009)	Lee and Adams (2012)
HadGEM2	2000~2009 年	1.24°/1.87°/L38, 39 km		0.06~60 $\mu\text{m}$ 分为 6 档	Woodward et al. (2011)	Collins et al. (2011)
MIROC-CHEM	2000~2010 年	2.8°/2.8°/L80, 0.003 hPa		0.2~20 $\mu\text{m}$ 分为 10 档	Takemura et al. (2000)	Watanabe et al. (2011)
NCAR-CAM3.5	2002~2009 年	1.875°/2.5°/L26, 3.5 hPa		0.1~10 $\mu\text{m}$ 分为 4 档	Mahowald et al. (2006)	Lamarque et al. (2011, 2012)
NCAR-CAM5.1	2000~2009 年	1.875°/2.5°/L30, 3.5 hPa		0.1~10 $\mu\text{m}$ 分为 2 档	Zender 2003	Liu et al. (2012)

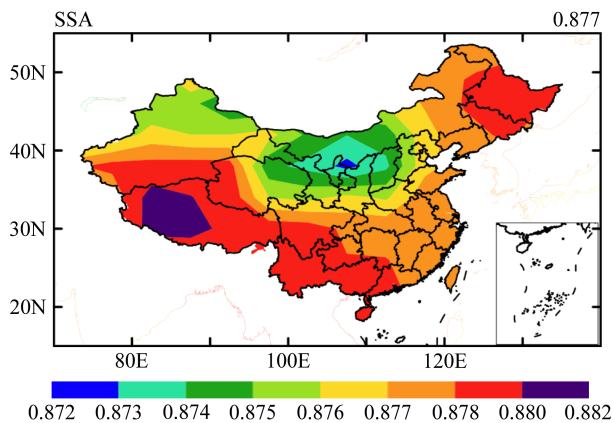


图1 GISS GCM II' (Goddard Institute for Space Studies General Circulation Model II') 模拟的 550 nm 沙尘气溶胶年均单次散射反照率 (SSA), 右上角为中国平均值

Fig. 1 SSA (Single Scattering Albedo) of dust aerosol at 550 nm simulated by GISS GCM II' (Goddard Institute for Space Studies General Circulation Model II'). The averaged value over China is given at the top right corner of the panel

段反照率分别为 0.60 和 0.31。塔克拉玛干沙漠的全波段中国年均地表反照率在 0.2~0.25 之间, 与 Aoki et al. (2005) 于 2002 年 4 月 4 日在塔里木盆地观测的值 0.273 相当。GISS-E2-R 模式和本文中 GISS GCM II' 模式为同一个动力框架下的不同版本, 通过对比 ACCMIP 提供的和本文计算的 GISS-E2-R 模式沙尘气溶胶大气顶短波和长波辐射强迫, 发现它们模拟的辐射强迫空间分布和量值接近, 中国平均沙尘大气顶短波和长波辐射强迫差异均小于  $0.3 \text{ W m}^{-2}$ , 总辐射强迫相当 (图未显示), 说明本文的 GISS GCM II' 模式有较好的合理性和可靠性。由于 IPCC-AR5 只报道了人为沙尘气溶胶的辐射强迫, 所以本文的结果主要 IPCC-AR4 中的值相比较。Liao et al. (2004) 利用此辐射传输方案计算的全球平均沙尘气溶胶大气顶和地表辐射强迫分别为  $0.1 \text{ W m}^{-2}$  和  $-0.5 \text{ W m}^{-2}$ , 处于 IPCC-AR4 合理范围内, 说明本文使用的辐射传输方案具有很好的代表性。

### 2.3 观测数据

本文利用中国气象局大气观测网 (Chinese Meteorological Administration Atmosphere Watch Network, CAWNET) 于 2006~2007 年在全国 14 个站点观测的月平均沙尘地表浓度 (Zhang et al., 2012) 来评估 ACCMIP 模式模拟的结果。其中敦煌站点地处西北沙尘源区。所有站点观测的沙尘浓度是  $\text{PM}_{10}$  中沙尘的浓度, 跟大多数模式的粒径范围

一致。

由于沙尘气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 在中国西北总气溶胶 AOD 中占主导地位, 我们利用 MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) 卫星观测的 2000~2010 年中国西北地区 555 nm 总气溶胶 AOD 来评估 GISS GCM II' 模拟的 550 nm 沙尘气溶胶 AOD。

## 3 ACCMIP 模拟的中国区域沙尘排放和浓度

### 3.1 沙尘排放

图 2 显示了 7 个 ACCMIP 模式模拟的中国地区沙尘年排放通量。中国沙尘源区主要集中在西北沙漠地区。总体来说, 大多数模式均模拟出内蒙古西部的戈壁沙漠和新疆塔克拉玛干沙漠的强起沙源区, 但各模式有显著差异。例如 HadGEM2 模式不能再现塔克拉玛干沙漠源区, 而 MIROC、CAM3.5 和 CAM5.1 模拟的塔克拉玛干沙漠沙源位置偏东。不同模式的起沙通量也有很大差异。其中, GFDL 模拟的最大起沙通量仅为  $40\sim 50 \times 10^{-10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 而 CAM5.1 模拟的最大起沙通量则高达  $400\sim 850 \times 10^{-10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。7 个 ACCMIP 模式模拟的中国沙尘年排放总量的变化范围是 67 (GISS-TOMAS)~510 (CAM5.1)  $\text{Tg a}^{-1}$ , 平均值为  $215 \pm 163 \text{ Tg a}^{-1}$ , 说明 ACCMIP 中气候模式模拟的沙尘排放有很大不确定性。这是由于各模式在线模拟的气象场和起沙方案的不同造成的。

### 3.2 沙尘浓度

图 3 显示了各模式模拟的中国地区沙尘年平均地表浓度。所有模式合理模拟出中国西北地区的地表沙尘高浓度, 年均值为  $15\sim 200 \mu\text{g m}^{-3}$ 。大多数模式模拟的源区浓度为  $200\sim 500 \mu\text{g m}^{-3}$ , 但 CAM3.5 和 CAM5.1 模拟的源区浓度相对较高, 其中 CAM5.1 模拟最大值达到  $2500 \mu\text{g m}^{-3}$ 。CAM5.1 模拟的中国平均沙尘年均地表浓度最大, 为  $89 \mu\text{g m}^{-3}$ , 而 MIROCss 模拟的值最小, 仅为  $21 \mu\text{g m}^{-3}$ , 7 个 ACCMIP 模式的平均值为  $41 \pm 27 \mu\text{g m}^{-3}$ 。

图 4 对比了 CAWNET 站点 (图 4h) 观测和 7 个 ACCMIP 模式模拟的月平均地表沙尘浓度, 结果表明, GFDL、GISS、GISS-TOMAS、HadGEM2 和 MIROC 模拟的沙尘地表浓度显著低于观测值, 平均偏低 65.3%~78.6%。CAM3.5 模拟值低估较小, 平均偏低 12.3%。而 CAM5.1 相对于观测值高

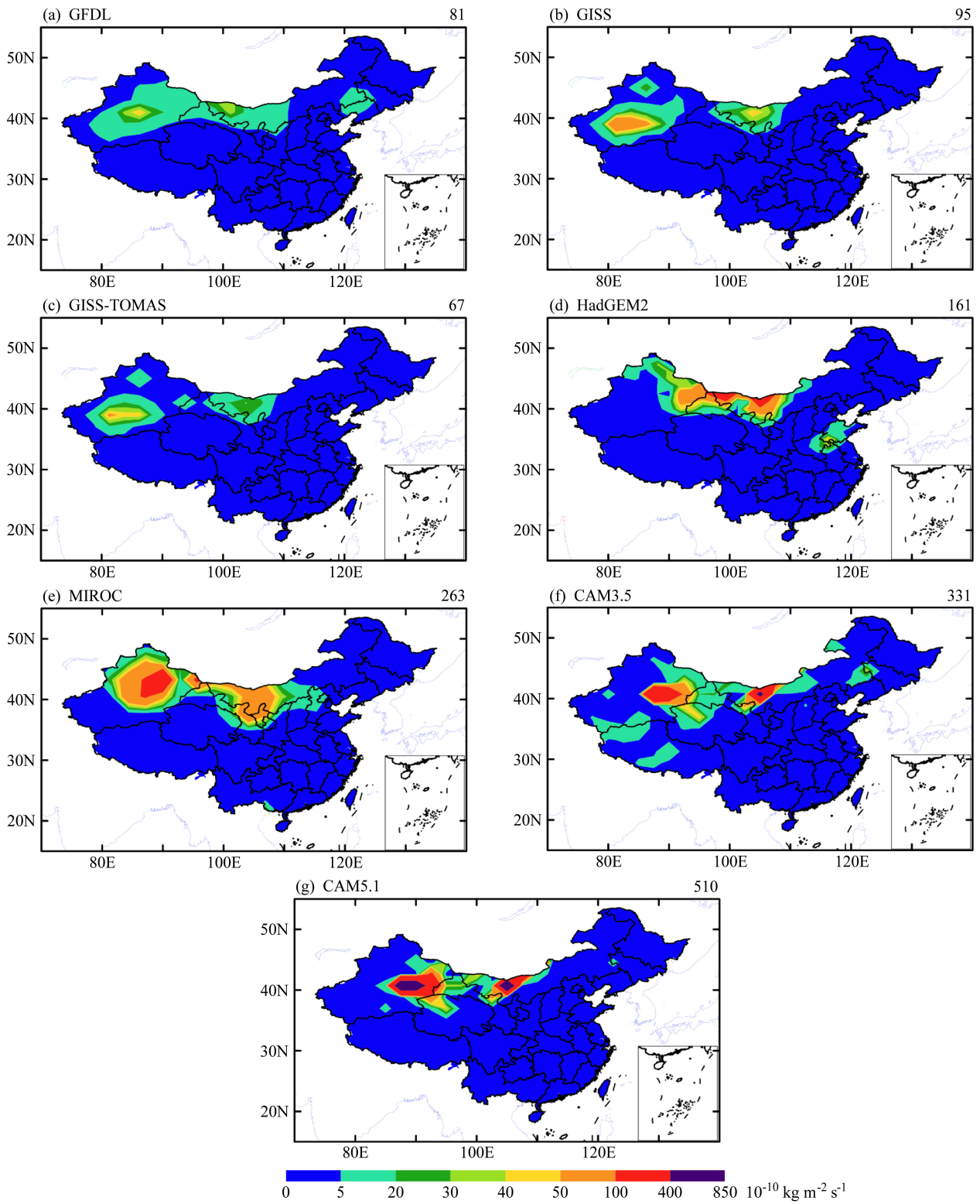


图2 各模式模拟的沙尘年排放通量 (单位:  $10^{-10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), 每图右上角为中国年排放总量 (单位:  $\text{Tg a}^{-1}$ )

Fig. 2 Annual mean emission flux (units:  $10^{-10} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) of dust simulated by each ACCMIP model. Annual emission (units:  $\text{Tg a}^{-1}$ ) over China is given at the top right corner of each panel

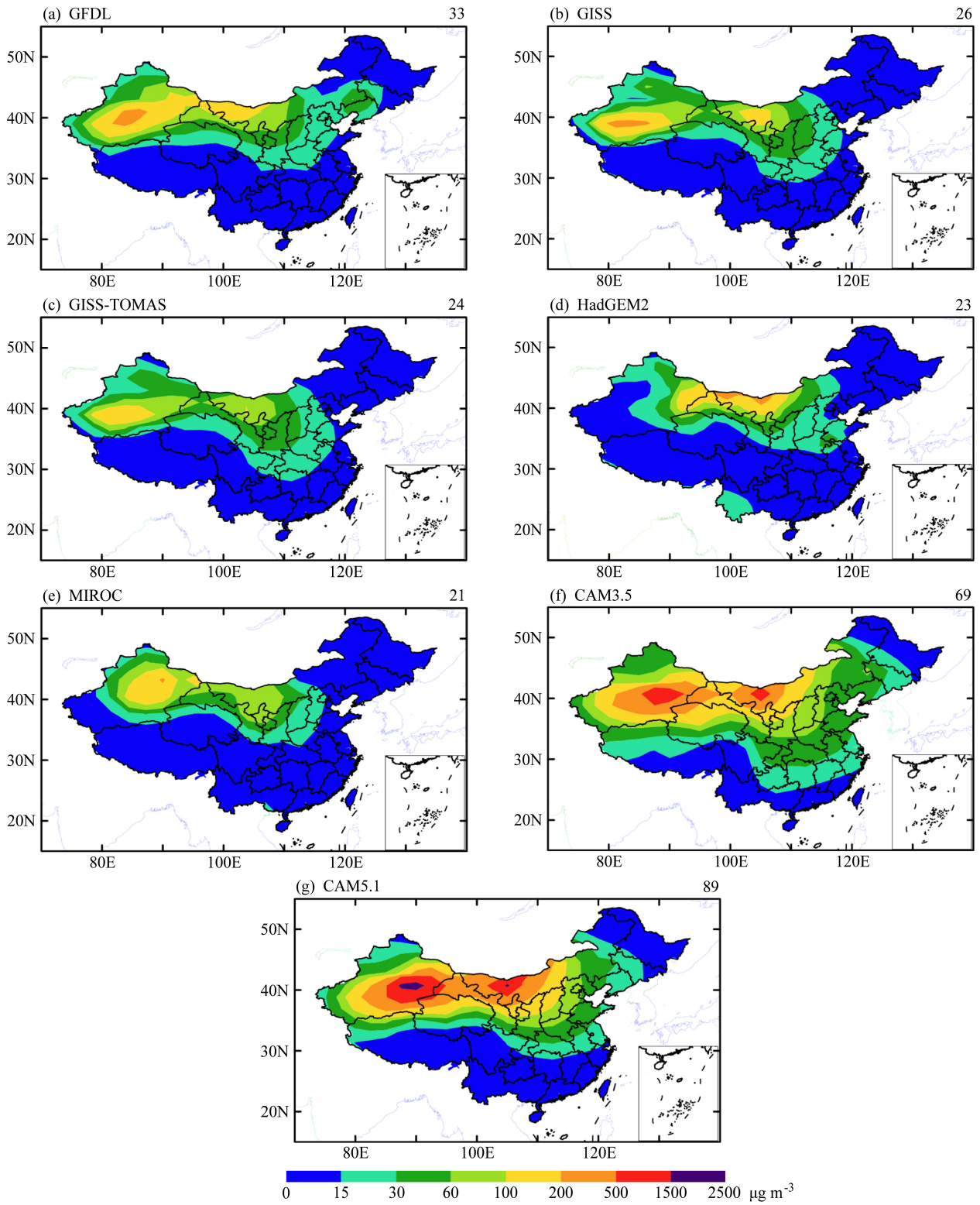


图3 各模式模拟的年平均沙尘地表浓度 (单位:  $\mu\text{g m}^{-3}$ ), 每图右上角为中国平均值

Fig. 3 Annual mean surface-layer concentrations (units:  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) of dust simulated by each ACCMIP model. The averaged concentration over China is given at the top right corner of each panel

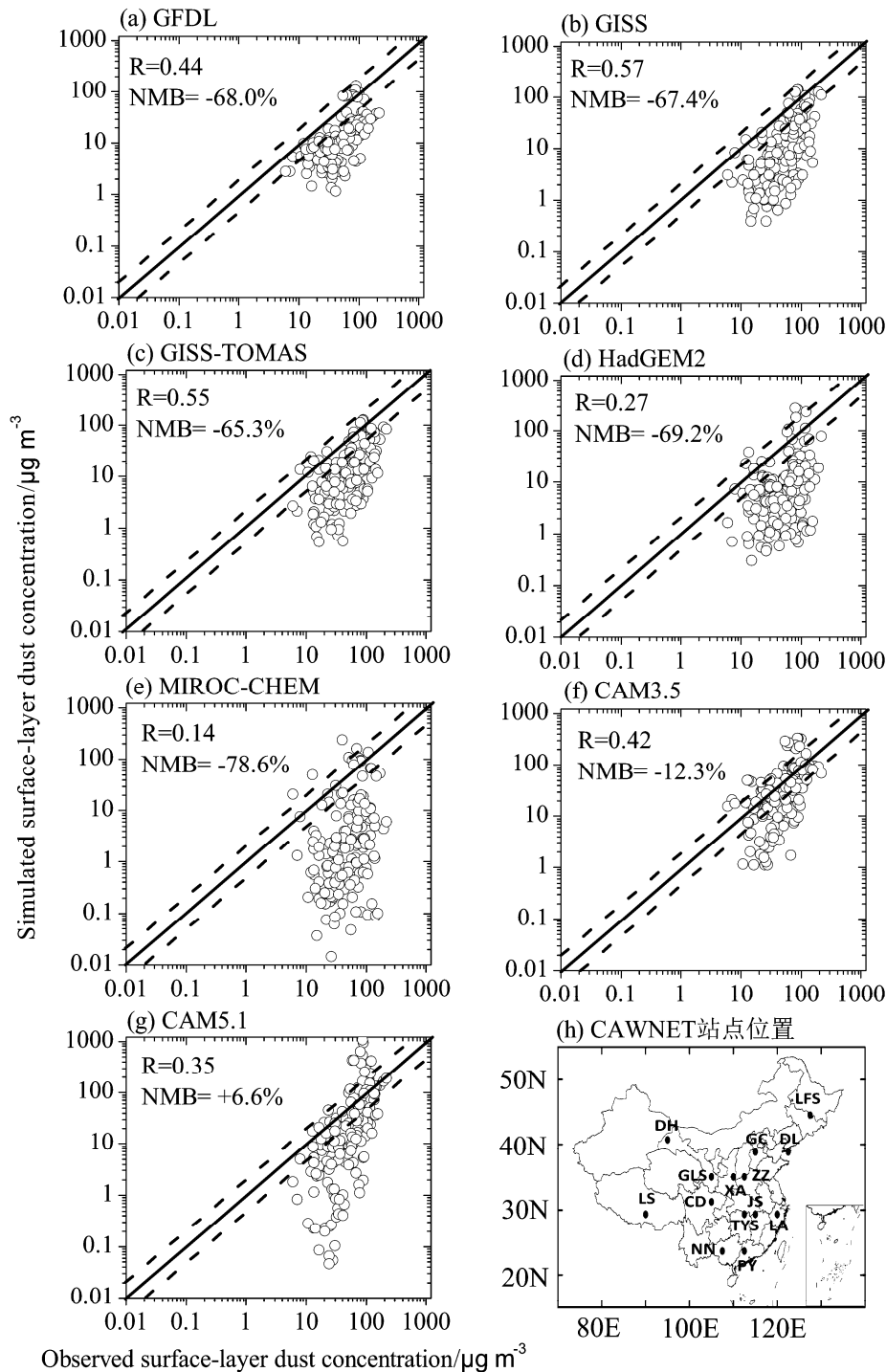


图4 在14个中国气象局大气观测网(CAWNET)站点,(a-g)观测(x轴)和模拟(y轴)的各模式月平均地表沙尘浓度(单位: $\mu\text{g m}^{-3}$ )的对比(实斜线为1:1比例线,虚斜线为2:1和1:2比例线)。(h)14个CAWNET站点位置,分别为成都(CD,  $30^{\circ}39'N$ ,  $104^{\circ}2.4'E$ )、敦煌(DH,  $40^{\circ}9'N$ ,  $94^{\circ}40.8'E$ )、大连(DL,  $38^{\circ}54'N$ ,  $121^{\circ}37.8'E$ )、顾城(GC,  $39^{\circ}7.8'N$ ,  $115^{\circ}48'E$ )、皋兰山(GLS,  $36^{\circ}0'N$ ,  $105^{\circ}51'E$ )、金沙(JS,  $29^{\circ}37.8'N$ ,  $114^{\circ}12'E$ )、临安(LA,  $30^{\circ}18'N$ ,  $119^{\circ}44'E$ )、龙风山(LFS,  $44^{\circ}43.8'N$ ,  $127^{\circ}36'E$ )、拉萨(LS,  $29^{\circ}40.2'N$ ,  $91^{\circ}7.8'E$ )、南宁(NN,  $22^{\circ}49.2'N$ ,  $108^{\circ}21'E$ )、番禺(PY,  $23^{\circ}0'N$ ,  $113^{\circ}21'E$ )、太阳山(TYS,  $29^{\circ}10.2'N$ ,  $111^{\circ}42.6'E$ )、西安(XA,  $34^{\circ}25.8'N$ ,  $108^{\circ}58.2'E$ )和郑州(ZZ,  $34^{\circ}46.8'N$ ,  $113^{\circ}40.8'E$ )

Fig. 4 (a-g) Comparisons of observed (x axis) and simulated (y axis) monthly mean surface-layer concentrations (units:  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) of dust at 14 CAWNET (Chinese Meteorological Administration Atmosphere Watch Network) sites for each ACCMIP model (solid lines indicate 1:1 ratio, and dashed lines indicate 2:1 and 1:2 ratios). The 14 CAWNET sites shown in (h) include Chengdu (CD,  $30^{\circ}39'N$ ,  $104^{\circ}2.4'E$ ), Dunhuang (DH,  $40^{\circ}9'N$ ,  $94^{\circ}40.8'E$ ), Dalian (DL,  $38^{\circ}54'N$ ,  $121^{\circ}37.8'E$ ), Gucheng (GC,  $39^{\circ}7.8'N$ ,  $115^{\circ}48'E$ ), Gaolanshan (GLS,  $36^{\circ}0'N$ ,  $105^{\circ}51'E$ ), Jinsha (JS,  $29^{\circ}37.8'N$ ,  $114^{\circ}12'E$ ), Lin'an (LA,  $30^{\circ}18'N$ ,  $119^{\circ}44'E$ ), Longfengshan (LFS,  $44^{\circ}43.8'N$ ,  $127^{\circ}36'E$ ), Lasa (LS,  $29^{\circ}40.2'N$ ,  $91^{\circ}7.8'E$ ), Nanning (NN,  $22^{\circ}49.2'N$ ,  $108^{\circ}21'E$ ), Panyu (PY,  $23^{\circ}0'N$ ,  $113^{\circ}21'E$ ), Taiyangshan (TYS,  $29^{\circ}10.2'N$ ,  $111^{\circ}42.6'E$ ), Xi'an (XA,  $34^{\circ}25.8'N$ ,  $108^{\circ}58.2'E$ ), and Zhengzhou (ZZ,  $34^{\circ}46.8'N$ ,  $113^{\circ}40.8'E$ )



估了 6.6%。此外, GFDL、GISS、GISS-TOMAS 和 CAM3.5 模拟的月均沙尘浓度和观测的相关性较好, 相关系数在 0.42~0.57 之间, 说明这些模式基本能够模拟出中国沙尘地表浓度的季节变化。其他 3 个模式 (HadGEM2、MIROC 和 CAM5.1) 较差, 其中 MIROC 模拟和观测之间的相关系数仅为 0.14。综合 7 个模式的表现, 与观测相比, CAM3.5 模拟的中国地区沙尘地表浓度最好, 而 MIROC 模式最差。

图 5 显示了各模式模拟的中国地区沙尘年均柱浓度。柱浓度的空间分布与地表浓度相似 (图 3)。大多数模式模拟的最大沙尘柱浓度位于塔克拉玛干沙漠, 达到 20~50 kg m<sup>-2</sup>, 其中 CAM3.5 和 CAM5.1 模拟的最大值相对偏高, 分别为 50~100 和 150~300 kg m<sup>-2</sup>。与其他模式不同, HadGEM2 模拟的最大值位于戈壁地区, 为 20~50 kg m<sup>-2</sup>。7 个模式模拟的中国平均柱浓度大小顺序与年排放总量的大小顺序类似, CAM5.1 模拟的中国平均柱浓度最大 (15 kg m<sup>-2</sup>), GFDL 最小 (6 kg m<sup>-2</sup>), 7 个模式的平均值为 9±4 kg m<sup>-2</sup>。值得注意的是, MIROC 和 HadGEM2 模式模拟的年排放总量和柱浓度在所有模式中较高, 而地表浓度较低, 说明这两个模式中除排放以外垂直输送对模拟的沙尘地表浓度影响很大。

## 4 沙尘直接辐射强迫

### 4.1 光学厚度

利用各 ACCMIP 模式模拟的气溶胶质量浓度, 统一使用 GISS GCM II 模式模拟的沙尘 AOD 如图 6a-g 所示。其空间分布与沙尘柱浓度的空间分布相似。大多数模式模拟的中国西北沙尘 AOD 在 0.05~0.3 范围内, 最大值出现在塔克拉玛干沙漠或内蒙古西部, 值在 0.1~0.3 之间。而 CAM3.5 和 CAM5.1 模拟值相对偏高, 最大值分别为 0.4~0.5 和 0.7~0.8。7 个模式模拟的中国年均沙尘 AOD 在 0.05 (GFDL)~0.18 (CAM5.1) 范围内, 平均值为 0.09±0.05。

我们利用图 6h 所示的 MISR 卫星观测的 2000~2010 年年均中国 555 nm 总 AOD 来评估各模式模拟的沙尘 AOD。为减少沙尘以外其他气溶胶的影响, 我们仅评估中国西北沙尘高浓度区域 (36°N 以北和 110°E 以西的中国区域) 的情况。中国西北 MISR 卫星观测的总 AOD 在 0.1~0.5 范围

内, 最大值出现在塔克拉玛干沙漠地区, 值为 0.4~0.5, 区域平均值为 0.24。GFDL、GISS、GISS-TOMAS、HadGEM2 和 MIROC 模拟的沙尘 AOD 在中国西北的平均值为 0.10~0.14, 相对观测值平均偏低 42%~58%。CAM3.5 和 CAM5.1 模拟的沙尘 AOD 在中国西北的平均值分别为 0.31 和 0.44, 相对观测值平均偏高 27%和 80%。

### 4.2 大气顶辐射强迫

图 7 显示了各模式模拟的中国沙尘气溶胶年均大气顶短波辐射强迫。可以看出, 模拟的大气顶短波辐射强迫的空间分布和柱浓度的空间分布类似。整体而言, 除了青藏高原和青海以外的其他中国地区, 所有模式模拟沙尘气溶胶对短波在大气顶产生负强迫, 沙尘浓度越高负强迫越大, 这和 Albani et al. (2014) 利用 CAM4 (Community Atmosphere Model version 4) 模拟的中国情况相同。在青藏高原和青海地区, 沙尘产生正强迫, 值为 0.0~0.3 W m<sup>-2</sup>。GFDL、GISS、GISS-TOMAS 和 MIROC 模拟的最小值位于塔克拉玛干沙漠, 为-5.0~-2.0 W m<sup>-2</sup>, 在其他西北地区值为-2.0~-1.0 W m<sup>-2</sup>。在中国中部、南部和东北部地区的值分别为-2.0~-0.5 W m<sup>-2</sup>, -1.0~-0.5 W m<sup>-2</sup>和-1.0~0.0 W m<sup>-2</sup>。CAM3.5 和 CAM5.1 模拟的最小值也位于塔克拉玛干沙漠, 但负强迫更大, 为-15.0~-5.0 W m<sup>-2</sup>。此外, 它们模拟的中国北部的值为-5.0~-2.0 W m<sup>-2</sup>, 南部和东北部的值为-2.0~0.0 W m<sup>-2</sup>。然而, HadGEM2 模拟的最小值位于戈壁, 值为-5.0~-15.0 W m<sup>-2</sup>, 在中国中部、南部和东北部的值分别为-2.0~-0.5 W m<sup>-2</sup>, -5.0~-2.0 W m<sup>-2</sup>和-1.0~-0.5 W m<sup>-2</sup>。各模式模拟的中国平均大气顶短波辐射强迫与柱浓度呈线性关系, CAM5.1 的模拟值最大 (-2.5 W m<sup>-2</sup>), GFDL 的模拟值最小 (-0.6 W m<sup>-2</sup>)。表 3 总结了各模式模拟的中国和全球平均辐射强迫值。7 个 ACCMIP 模式模拟的中国大气顶短波辐射强迫的平均值为-1.3±0.8 W m<sup>-2</sup>, 强于全球平均值-0.9±0.5 W m<sup>-2</sup>和 IPCC-AR4 (2007) 报道的范围-0.2~-0.8 W m<sup>-2</sup>。

各模式模拟的中国沙尘气溶胶年均大气顶长波辐射强迫如图 8 所示。模拟的大气顶长波辐射强迫的空间分布也和柱浓度的空间分布类似。所有模式模拟的中国沙尘气溶胶对长波在大气顶产生正强迫, 浓度越高正强迫越大, 从中国西北至东南逐渐降低。所有模式模拟的最大值均出现在塔克拉玛

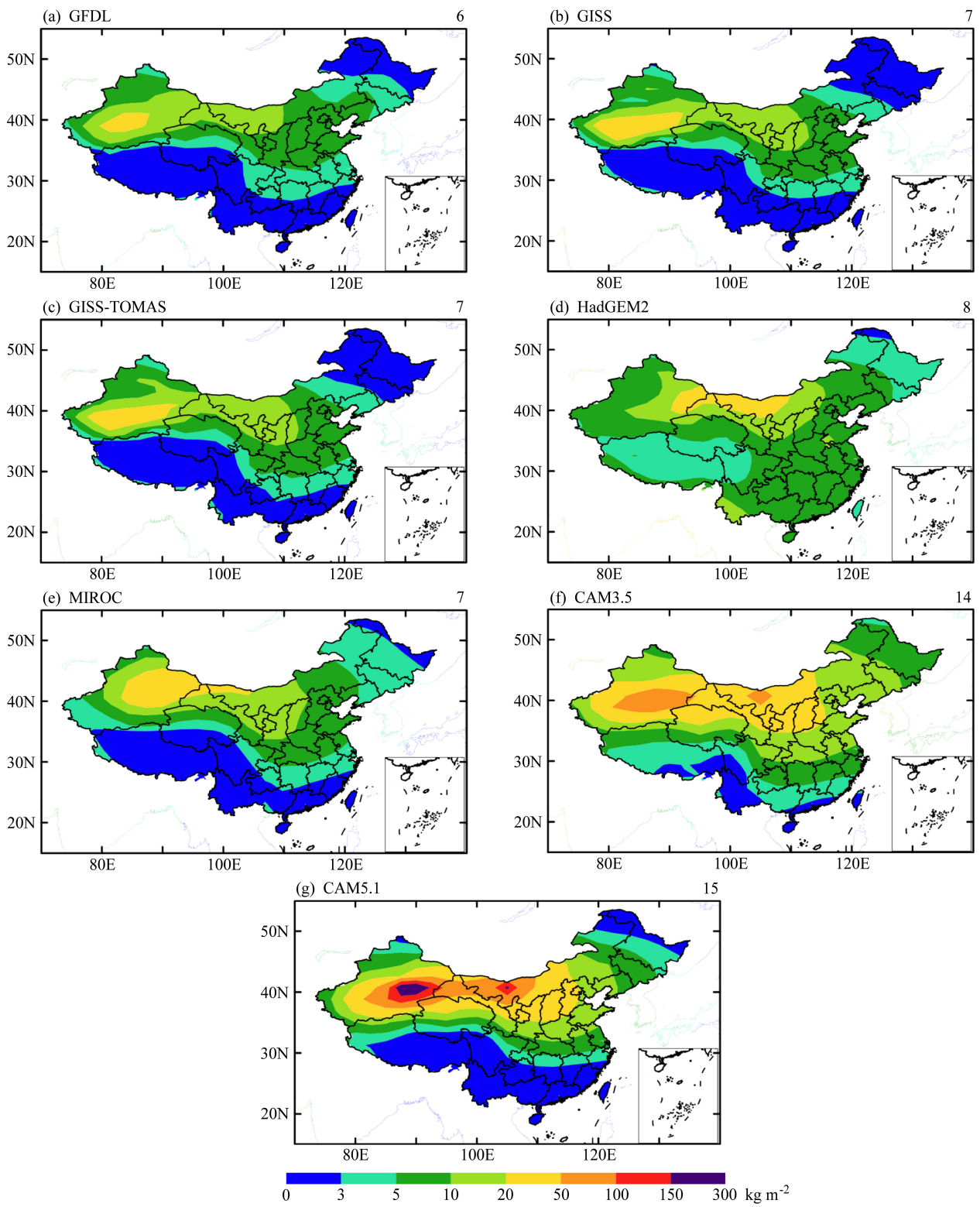


图5 各模式模拟的沙尘年平均柱浓度 (单位:  $\text{kg m}^{-2}$ ), 每图右上角为中国平均值

Fig. 5 Annual mean burden (units:  $\text{kg m}^{-2}$ ) of dust simulated by each ACCMIP model. The averaged value over China is shown at the top right corner of each panel

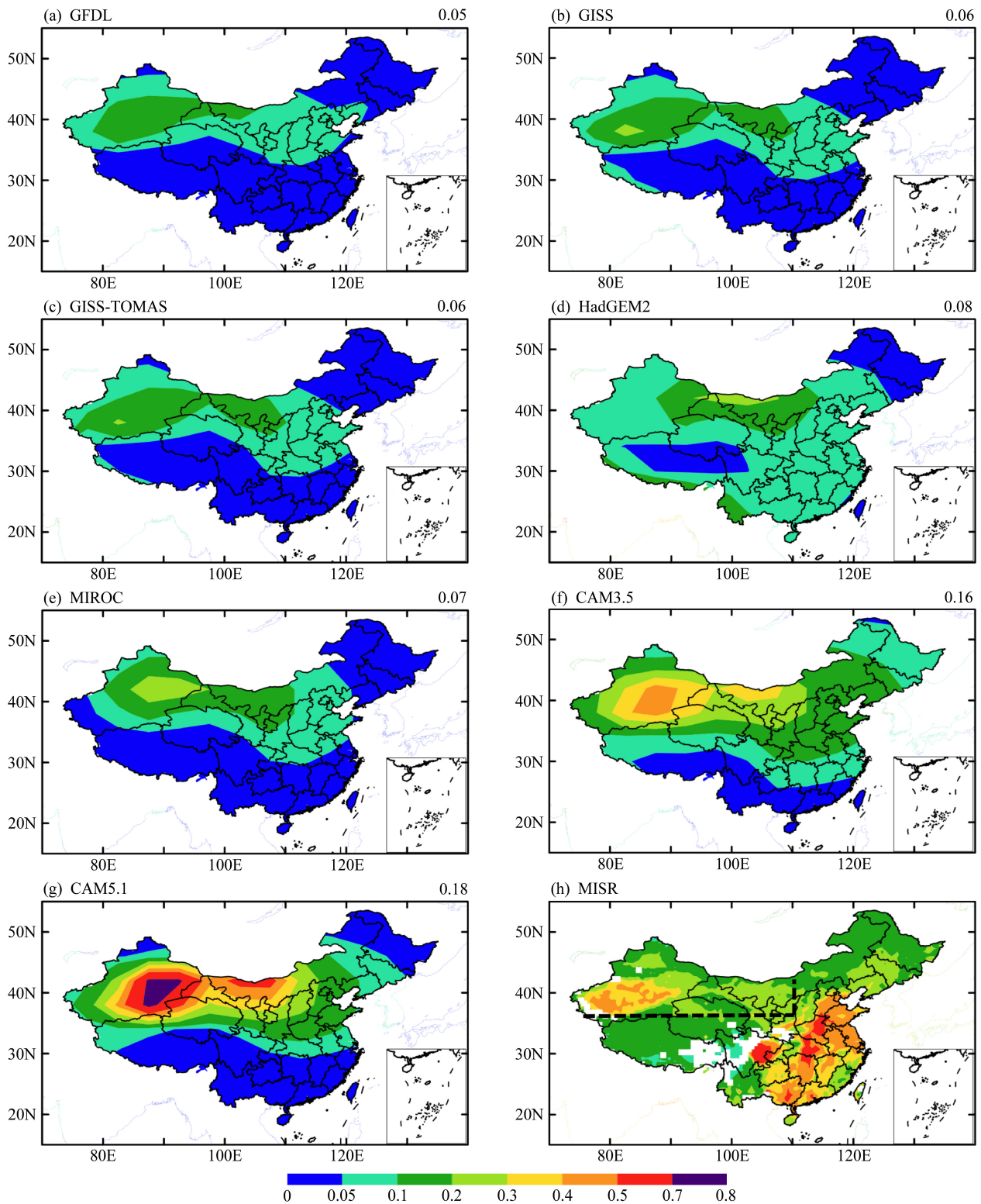


图6 (a-g) 各模式模拟的 550 nm 沙尘年均气溶胶光学厚度 (AOD) 和 (h) MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) 卫星观测的 2000~2010 年年均 555 nm 总 AOD。每图右上角值为中国平均值。(h) 中黑色虚线区域 (36°N 以北和 110°E 以西的中国区域) 为沙尘高浓度区  
 Fig. 6 (a-g) Annual mean AOD (Aerosol Optical Depth) of dust at 550 nm simulated by each ACCMIP model and (h) observed annual mean AOD of total aerosols at 555 nm over 2000~2010 retrieved from MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer). The averaged value over China is given at the top right corner of each panel. The region with high dust concentrations in China (to the north of 36°N and west of 110°E) is denoted by black lines in (h)

干地区, GFDL 模拟的最大值为  $0.6 \sim 1.0 \text{ W m}^{-2}$ , GISS 和 GISS-TOMAS 模拟的最大值为  $1.0 \sim 1.5 \text{ W m}^{-2}$ , HadGEM2、MIROC、CAM3.5 和 CAM5.1

模拟的最大值为  $2.0 \sim 5.0 \text{ W m}^{-2}$ 。大多数模式模拟的值均由西北至东南逐渐降低至  $0.2 \sim 0.4 \text{ W m}^{-2}$ , 而 HadGEM2 模拟的值在中国东部相对其他模式较

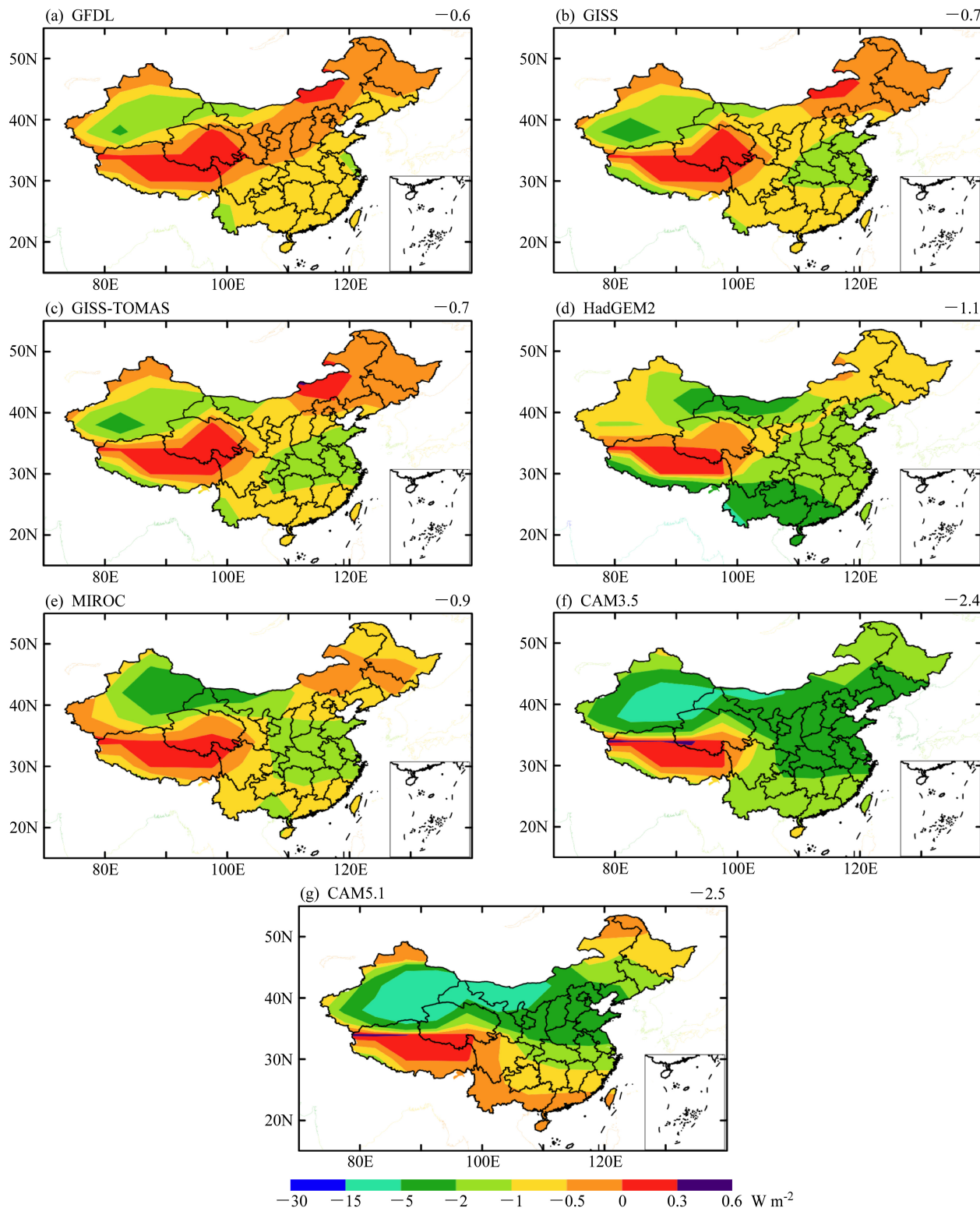


图 7 各模式模拟的沙尘气溶胶大气顶短波辐射强迫 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ ), 每图右上角为中国平均值

Fig. 7 Annual mean short-wave direct radiative forcing (units:  $\text{W m}^{-2}$ ) by dust at the top of the atmosphere in each ACCMIP model. The averaged value over China is given at the top right corner of each panel

大, 为  $1.0 \sim 1.5 \text{ W m}^{-2}$ 。和表 1 中文献报道的值对比发现, GFDL、GISS 和 GISS-TOMAS 模拟源区的值与文献报道源区的值  $0.2 \sim 1.9 \text{ W m}^{-2}$  (Yue et al.,

2010a, 2010b; Albani et al., 2014) 相当, 其他模式均偏大。但是, 各模式在中国东南的值均和文献报道的  $0 \sim 0.7 \text{ W m}^{-2}$  接近。7 个 ACCMIP 模式模拟的中

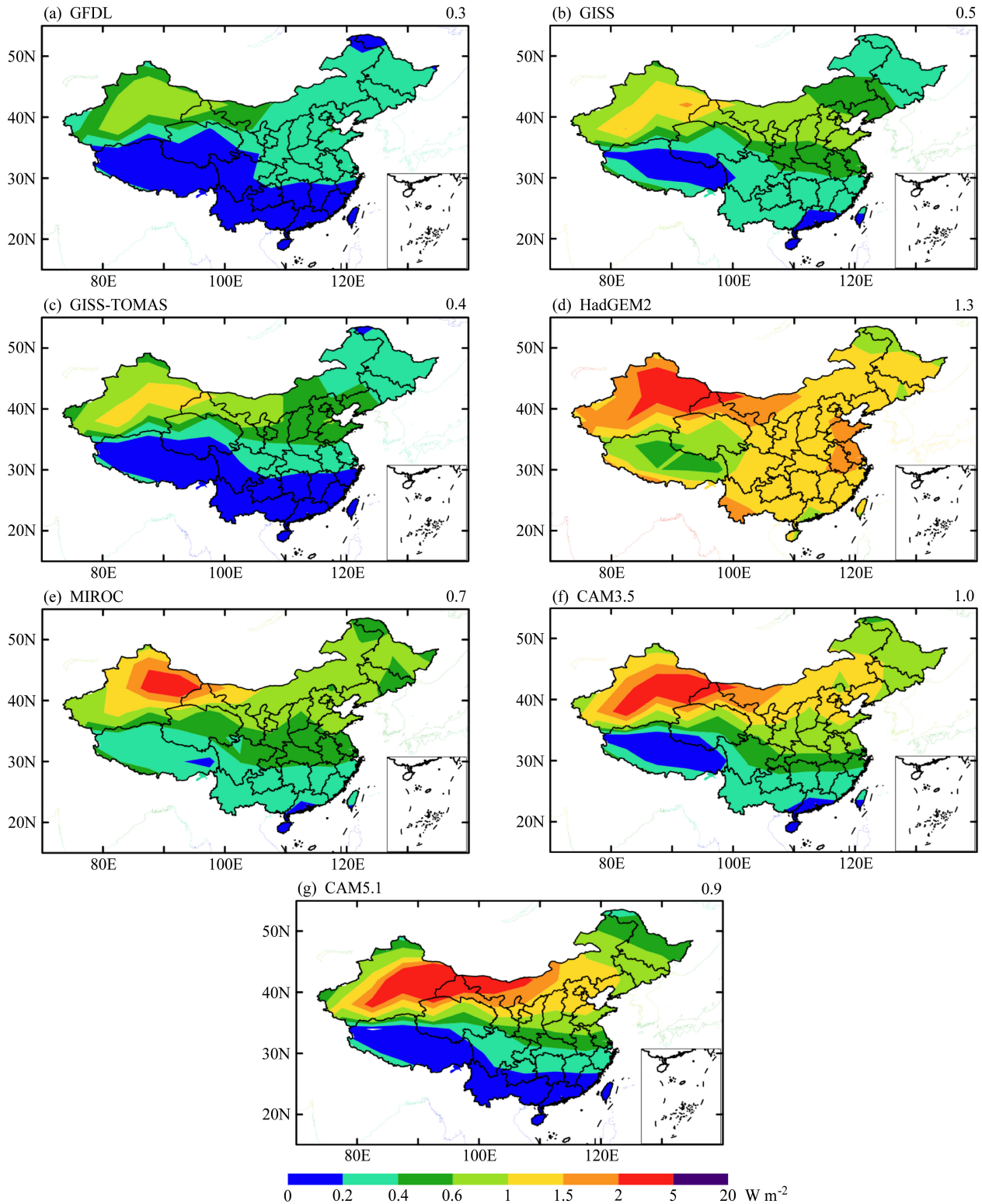


图 8 各模式模拟的沙气溶胶大气顶长波辐射强迫 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ ), 每图右上角为中国平均值

Fig. 8 Simulated annual mean long-wave direct radiative forcing (units:  $\text{W m}^{-2}$ ) by dust at the top of the atmosphere in each ACCMIP model. The averaged value over China is given at the top right corner of each panel

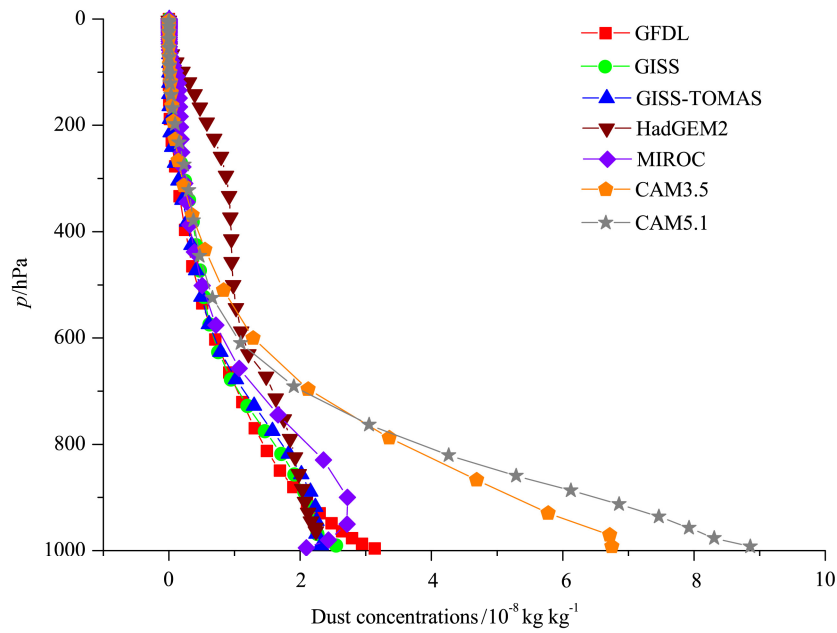


图9 各模式模拟的中国年平均沙尘浓度(单位:  $10^{-8} \text{kg kg}^{-1}$ )的垂直分布

Fig. 9 Vertical distributions of annual mean dust concentrations (units:  $10^{-8} \text{kg kg}^{-1}$ ) averaged over China simulated by each ACCMIP model

表 3 各模式模拟的沙尘气溶胶全球和中国平均各辐射强迫(单位:  $\text{W m}^{-2}$ )

Table 3 Global and China mean radiative forcing (units:  $\text{W m}^{-2}$ ) by dust in each ACCMIP model

模式	大气	大气	大气顶	地表		地表短
	顶短波	顶长波	短波+长波	地表短波	地表长波	波+长波
全球						
GFDL-AM3	-0.6	0.2	-0.4	-0.7	0.3	-0.3
平均						
GISS-E2-R	-0.7	0.3	-0.4	-0.8	0.5	-0.3
GISS-TOMAS	-0.6	0.2	-0.5	-0.8	0.5	-0.3
HadGEM2	-1.9	1.1	-0.8	-2.1	0.7	-1.4
MIROC-CHEM	-0.6	0.3	-0.3	-0.7	0.4	-0.3
NCAR-CAM3.5	-1.1	0.3	-0.8	-1.3	0.6	-0.6
NCAR-CAM5.1	-0.8	0.3	-0.5	-1.0	0.7	-0.2
平均	-0.9	0.4	-0.5	-1.0	0.5	-0.5
偏差	0.5	0.3	0.2	0.5	0.2	0.4
中国						
GFDL-AM3	-0.6	0.3	-0.3	-0.8	1.2	0.4
平均						
GISS-E2-R	-0.7	0.5	-0.2	-0.9	1.3	0.4
GISS-TOMAS	-0.7	0.4	-0.3	-0.9	1.3	0.4
HadGEM2	-1.1	1.3	0.2	-1.3	1.1	-0.1
MIROC-CHEM	-0.9	0.7	-0.2	-1.0	1.2	0.2
NCAR-CAM3.5	-2.4	1.0	-1.5	-2.8	3.1	0.2
NCAR-CAM5.1	-2.5	0.9	-1.6	-3.1	3.2	0.1
平均	-1.3	0.7	-0.5	-1.5	1.8	0.2
偏差	0.8	0.3	0.7	1.0	0.9	0.2

国平均值在  $0.3$  (GFDL)  $\sim 1.3$  (HadGEM2)  $\text{W m}^{-2}$  范围内, 平均值为  $0.7 \pm 0.3 \text{W m}^{-2}$ ; 全球平均值较小为  $0.4 \pm 0.3 \text{W m}^{-2}$ , 比 IPCC-AR4 (2007) 报道的范围  $0.07 \sim 0.3 \text{W m}^{-2}$  略大。值得注意的是, 虽然

HadGEM2 模拟的中国平均柱浓度在 7 个模式中居中, 却产生了最大的大气顶长波辐射强迫。从图 9 各模式模拟沙尘浓度的垂直分布中可以看出, 这是由于 HadGEM2 模式模拟的高层沙尘气溶胶浓度相对于其他模式较高, 说明大气顶长波辐射强迫不仅和气溶胶的柱浓度有关, 还与气溶胶的垂直分布密切相关。

综上所述, 7 个 ACCMIP 模式模拟的中国沙尘气溶胶大气顶总辐射强迫(短波+长波)平均值为  $-0.5 \pm 0.7 \text{W m}^{-2}$  (表 3), 说明沙尘气溶胶在中国大气顶起降温作用。该值与王宏等 (2004) 模拟的东亚和北太平洋区域 2001 年春季平均值  $-0.9 \text{W m}^{-2}$  符号相同, 但负强迫略小。与 Chang and Liao (2009) 计算的 1850~2000 年中国硝酸盐 ( $-0.8 \text{W m}^{-2}$ ) 和黑碳 ( $0.6 \text{W m}^{-2}$ ) 气溶胶的辐射强迫在数值上相当。此外, 7 个 ACCMIP 模式模拟的全球大气顶总辐射强迫平均值为  $-0.5 \pm 0.2 \text{W m}^{-2}$ , 和 IPCC-AR5 (2013) 报道的 1750~2010 年硫酸盐 ( $-0.4 \text{W m}^{-2}$ ) 和黑碳 ( $0.4 \text{W m}^{-2}$ ) 气溶胶的辐射强迫在数值上相当。这说明在研究气溶胶对全球或中国气候的影响时, 除了人为气溶胶之外, 自然沙尘气溶胶的作用也不容忽视。

#### 4.3 地表辐射强迫

图 10 显示了各模式模拟的中国沙尘气溶胶年均地表短波辐射强迫。各模式模拟的沙尘地表短波辐射强迫的大小和空间分布与大气顶短波辐射强

迫的情况类似。不同的是，在青藏高原大部分地区沙尘在地表模拟出负强迫，值为 $-0.5 \sim -0.0 \text{ W m}^{-2}$ ，只有 GFDL、GISS 和 GISS-TOMAS 模式在青海南部模拟出弱正强迫，值为  $0.0 \sim 0.3 \text{ W m}^{-2}$ 。7 个

ACCMIP 模式模拟的中国平均值在  $-3.1$  (CAM5.1)  $\sim -0.8$  (GFDL)  $\text{W m}^{-2}$  范围内，平均值为  $-1.5 \pm 1.0 \text{ W m}^{-2}$ ，比大气顶的负强迫略大；全球平均值为  $-1.0 \pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$ ，小于文献报道的范围

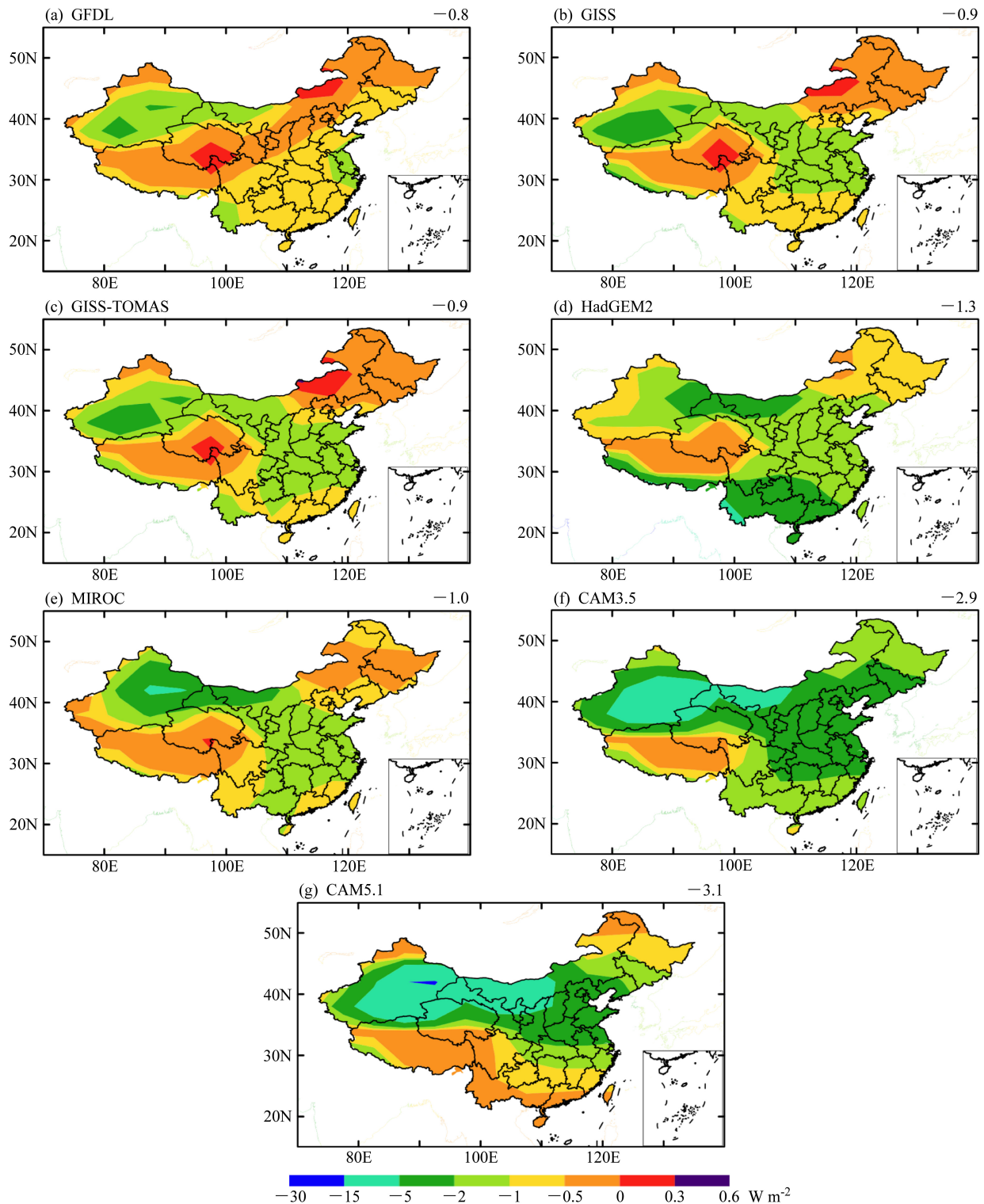


图 10 各模式模拟的沙尘气溶胶地表短波辐射强迫 (单位:  $\text{W m}^{-2}$ )，每图右上角为中国平均值

Fig. 10 Annual mean surface short-wave direct radiative forcing (units:  $\text{W m}^{-2}$ ) by dust simulated in each ACCMIP model. The averaged value over China is shown at the top right corner of each panel

-2.0~-1.1 W m<sup>-2</sup> (Liao et al., 2004; Yue et al., 2010a, 2010b)。

图 11 显示了各模式模拟的中国沙尘气溶胶年

均地表长波辐射强迫。与大气顶长波辐射的情况类似，在地表，沙尘也产生正强迫，浓度越高正强迫越大，从中国西北至东南逐渐降低。但是地表长波

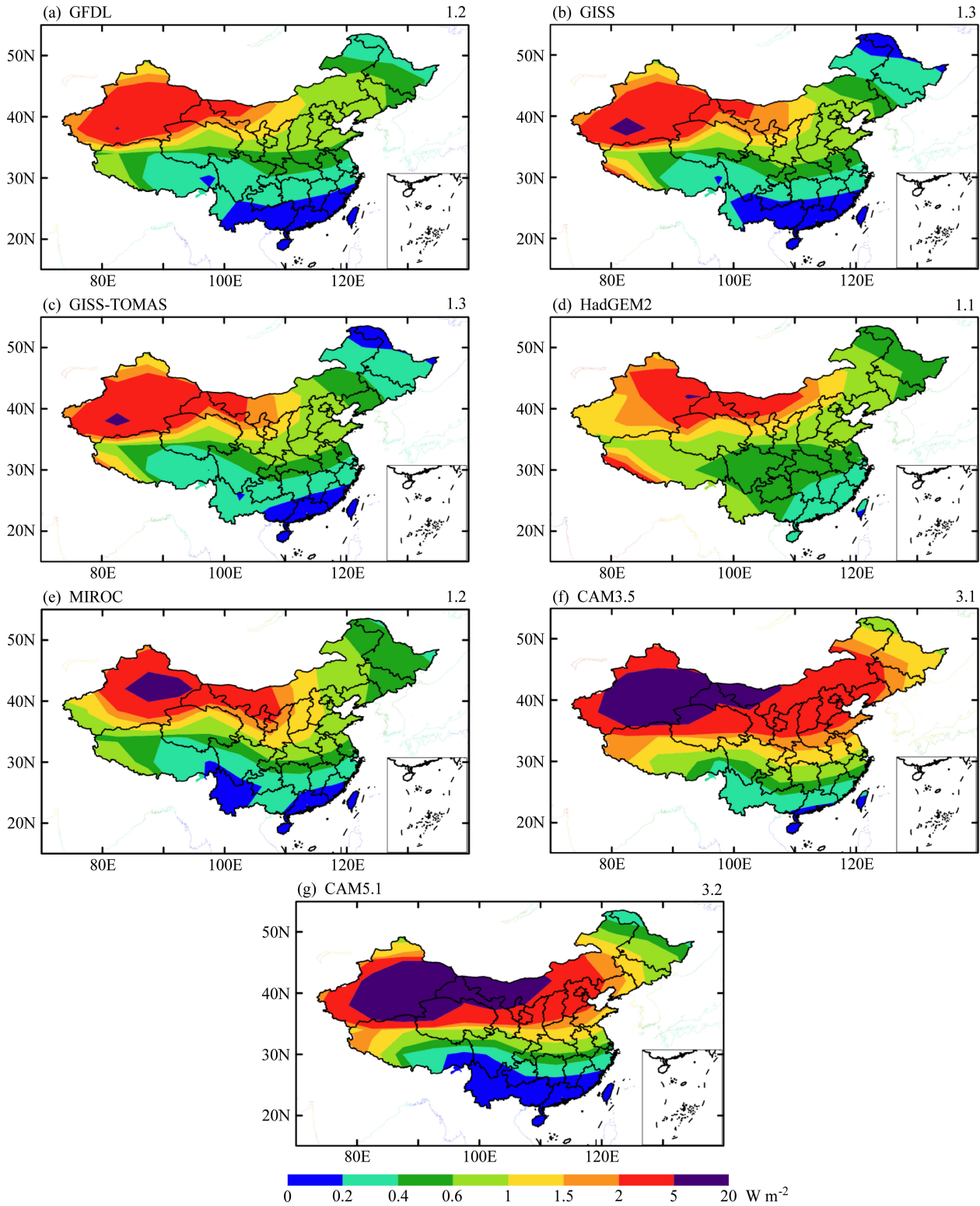


图 11 各模式模拟的中国沙尘气溶胶地表长波辐射强迫 (单位: W m<sup>-2</sup>), 每图右上角为中国平均值  
Fig. 11 Annual mean surface long-wave direct radiative forcing (units: W m<sup>-2</sup>) by dust simulated in each ACCMIP model. The averaged value over China is given at the top right corner of each panel



辐射强迫的值却比大气顶的辐射强迫大。GFDL、GISS、GISS-TOMAS、HadGEM2 和 MIROC 模拟的值在中国西北大部分地区为  $2.0\sim 5.0\text{ W m}^{-2}$ ，大多数模式的最大值达到  $5.0\sim 20.0\text{ W m}^{-2}$ ，在中国东南的值为  $0.2\sim 0.4\text{ W m}^{-2}$ 。CAM3.5 和 CAM5.1 模拟西北大部分地区的值相对较大，为  $5.0\sim 20.0\text{ W m}^{-2}$ 。中国平均而言，各模式模拟的地表长波辐射强迫与地表浓度大体上呈线性关系，CAM5.1 模拟值最大 ( $3.2\text{ W m}^{-2}$ )，HadGEM2 模拟值最小 ( $1.1\text{ W m}^{-2}$ )。7 个模式的中国平均值为  $1.8\pm 0.9\text{ W m}^{-2}$ ，全球平均值为  $0.6\pm 0.2\text{ W m}^{-2}$ ，后者处于文献报道的  $0.3\sim 0.6\text{ W m}^{-2}$  范围内(Liao et al., 2004; Yue et al., 2010a, 2010b)。

综上所述，由于 7 个 ACCMIP 模式模拟的中国沙尘气溶胶在地表对长波表现出了很强的吸收，导致模拟的中国地表总辐射强迫（短波+长波）为  $0.2\pm 0.2\text{ W m}^{-2}$ ，使沙尘在中国地表总体上产生升温效应。7 个 ACCMIP 模式模拟的全球平均值为  $-0.5\pm 0.4\text{ W m}^{-2}$ ，该负强迫略小于文献报道的范围  $-1.5\sim -0.53\text{ W m}^{-2}$  (Liao et al., 2004; Yue et al., 2010a, 2010b)。

以上辐射强迫的计算结果基于 GISS GCM II' 模式，虽然和其他模拟结果相比处于合理范围内，但值得注意的是，沙尘的辐射强迫还受到多种因素的影响，包括云量、沙尘的垂直分布、粒子大小、SSA、复折射指数和 AOD(Liao and Seinfeld, 1998)。

## 5 结论

7 个 ACCMIP 模式模拟的中国沙尘气溶胶的排放主要集中在西北塔克拉玛干和戈壁沙漠及其周边地区。中国沙尘年排放总量在  $67$  (GISS-TOMAS)  $\sim 510$  (CAM5.1)  $\text{Tg a}^{-1}$  范围内，平均值为  $215\pm 163\text{ Tg a}^{-1}$ 。沙尘年平均地表浓度和柱浓度的最大值出现在塔克拉玛干和戈壁沙漠，随后从中国西北至东南逐渐降低。中国平均年均地表浓度在  $21$  (MIROC)  $\sim 89$  (CAM5.1)  $\mu\text{g m}^{-3}$  范围内，平均值为  $41\pm 27\mu\text{g m}^{-3}$ 。与 2006~2007 年 CAWNET 观测的地表沙尘浓度对比发现，大多数模式的结果低于观测值，低估了  $12.3\%\sim 78.6\%$ ，而 CAM5.1 模式高估了  $6.6\%$ 。中国平均年均柱浓度在  $6$  (GFDL)  $\sim 15$  (CAM5.1)  $\text{kg m}^{-2}$  范围内，平均值为  $9\pm 4\text{ kg m}^{-2}$ 。值得注意的是，各模式模拟的中国柱浓度和排放之间大体呈线性关系，而地表浓度和

排放之间并不完全呈线性关系，例如 HadGEM2 和 MIROC 模拟的中国年排放总量在 7 个模式中较大，但地表浓度却较小，说明垂直输送对这两个模式地表浓度的影响很大。

基于 7 个 ACCMIP 模式模拟的中国地区沙尘气溶胶浓度，本文统一使用 GISS GCM II' 大气环流模式的辐射传输方案计算中国沙尘气溶胶的直接辐射强迫。结果显示，7 个模式模拟的中国年均沙尘 AOD 在  $0.05$  (GFDL)  $\sim 0.18$  (CAM5.1) 范围内，平均值为  $0.09\pm 0.05$ 。和 MISR 卫星观测的总气溶胶的 AOD 对比发现，大多数模式模拟的中国西北平均沙尘 AOD 低估了  $42\%\sim 57\%$ ，而 CAM3.5 和 CAM5.1 分别高估了  $28\%$  和  $82\%$ 。中国沙尘气溶胶辐射强迫的空间分布和沙尘浓度的空间分布类似，并且在大多数中国地区沙尘浓度越高产生的辐射强迫越大。7 个模式模拟的中国区域年均沙尘气溶胶大气顶短波辐射强迫的范围是  $-0.6$  (GFDL)  $\sim -2.5$  (CAM5.1)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $-1.3\pm 0.8\text{ W m}^{-2}$ ；大气顶长波辐射强迫的范围是  $0.3$  (GFDL)  $\sim 1.3$  (HadGEM2)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $0.7\pm 0.4\text{ W m}^{-2}$ ；总的（短波+长波）大气顶辐射强迫的范围是  $-1.6$  (CAM5.1)  $\sim 0.2$  (HadGEM2)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $-0.5\pm 0.7\text{ W m}^{-2}$ 。地表短波辐射强迫的范围是  $-3.1$  (CAM5.1)  $\sim -0.8$  (GFDL)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $-1.5\pm 1.0\text{ W m}^{-2}$ ；地表长波辐射强迫的范围是  $1.1$  (HadGEM2)  $\sim 3.2$  (CAM5.1)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $1.8\pm 0.9\text{ W m}^{-2}$ ；总的（短波+长波）地表辐射强迫的范围是  $-0.1$  (HadGEM2)  $\sim 0.4$  (GFDL)  $\text{W m}^{-2}$ ，平均值为  $0.2\pm 0.2\text{ W m}^{-2}$ 。值得注意的是，高层沙尘气溶胶浓度越大，产生的大气顶长波辐射强迫越大，地表长波辐射强迫和地表沙尘浓度基本呈线性关系。说明中国平均沙尘气溶胶长波辐射强迫对沙尘浓度的垂直分布较敏感。而短波辐射强迫对垂直分布较不敏感，受整层柱浓度控制。

## 参考文献 (References)

- Albani S, Mahowald N M, Perry A T, et al. 2014. Improved dust representation in the Community Atmosphere Model [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 6 (3): 541–570, doi:10.1002/2013MS000279.
- Aoki T, Tanaka T Y, Uchiyama A, et al. 2005. Sensitivity experiments of direct radiative forcing caused by mineral dust simulated with a chemical transport model [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83A: 315–331, doi:10.2151/JMSJ.83A.315.
- Bowman K W, Shindell D T, Worden H M, et al. 2013. Evaluation of

- ACCMIP outgoing longwave radiation from tropospheric ozone using TES satellite observations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (8): 4057–4072, doi:10.5194/ACP-13-4057-2013.
- Chang W Y, Liao H. 2009. Anthropogenic direct radiative forcing of tropospheric ozone and aerosols from 1850 to 2000 estimated with IPCC AR5 emissions inventories [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 2 (4): 201–207.
- Collins W J, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, et al. 2011. Development and evaluation of an earth-system model—HadGEM2 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 4 (4): 1051–1075, doi:10.5194/GMD-4-1051-2011.
- Donner L J, Wyman B L, Hemler R S, et al. 2011. The dynamical core, physical parameterizations, and basic simulation characteristics of the atmospheric component AM3 of the GFDL global coupled model CM3 [J]. *J. Climate*, 24 (13): 3484–3519, doi:10.1175/2011JCLI3955.1.
- Gong S L, Zhang X Y, Zhao T L, et al. 2003. Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during 2001 ACE-Asia: 2. Model simulation and validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D9): 4262, doi:10.1029/2002JD002633.
- Hansen J, Russell G, Rind D, et al. 1983. Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (4): 609–662, doi: 10.1175/1520-0493(1983)111<0609:ETDGMF>2.0.CO;2.
- Huang J P, Lin B, Minnis P, et al. 2006. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (19): L19802, doi:10.1029/2006GL026561.
- Huang J, Fu Q, Su J, et al. 2009. Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (12): 4011–4021, doi:10.5194/acp-9-4011-2009.
- IPCC. 2007. *The Physical Science Basis of Climate Change: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing* [M]. Piers F, Venkatachalam R, Paulo A, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- IPCC. 2013. *The Physical Science Basis of Climate Change: Clouds and Aerosols* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Jacobson M Z. 2001. Global direct radiative forcing due to multicomponent anthropogenic and natural aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D2): 1551–1568, doi:10.1029/2000JD900514.
- Koch D, Schmidt G A, Field C V. 2006. Sulfur, sea salt, and radionuclide aerosols in GISS ModelE [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D6): D06206, doi:10.1029/2004JD005550.
- Lacis A A, Hansen J E. 1974. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31 (1): 118–133, doi: 10.1175/1520-0469(1974)031<0118:APFTAO>2.0.CO;2.
- Lamarque J F, Kyle G P, Meinshausen M, et al. 2011. Global and regional evolution of short-lived radiatively-active gases and aerosols in the representative concentration pathways [J]. *Climatic Change*, 109 (1–2): 191–212, doi:10.1007/SL0584-011-0155-0.
- Lamarque J F, Emmons L K, Hess P G, et al. 2012. CAM-chem: Description and evaluation of interactive atmospheric chemistry in the Community Earth System Model [J]. *Geosci. Model Dev.*, 5 (2): 369–411, doi:10.5194/GMD-5-369-2012.
- Lamarque J F, Dentener F, McConnell J, et al. 2013a. Multi-model mean nitrogen and sulfur deposition from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): Evaluation of historical and projected future changes [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (16): 7997–8018, doi:10.5194/ACP-13-7997-2013.
- Lamarque J F, Shindell D T, Josse B, et al. 2013b. The Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP): Overview and description of models, simulations and climate diagnostics [J]. *Geosci. Model Dev.*, 6 (1): 179–206, doi:10.5194/GMD-6-179-2013.
- Lee Y H, Chen K, Adams P J. 2009. Development of a global model of mineral dust aerosol microphysics [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9 (7): 2441–2458, doi:10.5194/acp-9-2441-2009.
- Lee Y H, Adams P J. 2012. A fast and efficient version of the Two-Moment Aerosol Sectional (TOMAS) global aerosol microphysics model [J]. *Aerosol Sci. Technol.*, 46 (6): 678–689, doi:10.1080/02786826.2011.643259.
- Lee Y H, Lamarque J F, Flanner M G, et al. 2013. Evaluation of preindustrial to present-day black carbon and its albedo forcing from Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (5): 2607–2634, doi:10.5194/ACP-13-2607-2013.
- Li F Y, Ginoux P, Ramaswamy V. 2008. Distribution, transport, and deposition of mineral dust in the Southern Ocean and Antarctica: Contribution of major sources [J]. *J. Geophys. Res.*, 113 (D10): D10207, doi:10.1029/2007JD009190.
- Liao H, Seinfeld J H. 1998. Radiative forcing by mineral dust aerosols: Sensitivity to key variables [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24): 31637–31645, doi:10.1029/1998JD200036.
- Liao H, Seinfeld J H, Adams P J, et al. 2004. Global radiative forcing of coupled tropospheric ozone and aerosols in a unified general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 109 (D16): D16207, doi:10.1029/2003JD004456.
- Liu X H, Easter R C, Ghan S J, et al. 2012. Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Description and evaluation in the Community Atmosphere Model CAM5 [J]. *Geosci. Model Dev.*, 5 (3): 709–739, doi:10.5194/GMD-5-709-2012.
- Mahowald N M, Muhs D R, Levis S, et al. 2006. Change in atmospheric mineral aerosols in response to climate: Last glacial period, preindustrial, modern, and doubled carbon dioxide climates [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D10): D10202, doi:10.1029/2005JD006653.
- Mikami M, Shi G Y, Uno I, et al. 2006. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan–China joint project ADEC [J]. *Global Planet. Change*, 52 (1–4): 142–172, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.03.001.
- Miller R L, Cakmur R V, Perlwitz J, et al. 2006. Mineral dust aerosols in the NASA Goddard Institute for Space Sciences ModelE atmospheric general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D6): D06208, doi:10.1029/2005JD005796.
- Myhre G, Stordal F. 2001. Global sensitivity experiments of the radiative forcing due to mineral aerosols [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D16): 18193–18204, doi:10.1029/2000JD900536.
- Naik V, Voulgarakis A, Fiore A M, et al. 2013. Preindustrial to present-day

- changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (10): 5277–5298, doi:10.5194/ACP-13-5277-2013.
- Reddy M S, Boucher O, Balkanski Y, et al. 2005. Aerosol optical depths and direct radiative perturbations by species and source type [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (12): L12803, doi:10.1029/2004GL021743.
- Shindell D T, Pechony O, Voulgarakis A, et al. 2013. Interactive ozone and methane chemistry in GISS-E2 historical and future climate simulations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (5): 2653–2689, doi:10.5194/ACP-13-2653-2013.
- Stevenson D S, Young P J, Naik V, et al. 2013. Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (6): 3063–3085, doi:10.5194/ACP-13-3063-2013.
- Sun H, Pan Z T, Liu X D. 2012. Numerical simulation of spatial-temporal distribution of dust aerosol and its direct radiative effects on East Asian climate [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D13): D13206, doi:10.1029/2011JD017219.
- Takemura T, Okamoto H, Maruyama Y, et al. 2000. Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D14): 17853, doi:10.1029/2000JD900265.
- Voulgarakis A, Naik V, Lamarque J F, et al. 2013. Analysis of present day and future OH and methane lifetime in the ACCMIP simulations [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (5): 2563–2587, doi:10.5194/ACP-13-2563-2013.
- 王宏, 石广玉, Aoki T, 等. 2004. 2001年春季东亚—北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫 [J]. *科学通报*, 49 (19): 1993–2000. Wang Hong, Shi Guangyu, Aoki T, et al. 2004. Radiative forcing due to dust aerosol over east Asia–North Pacific region during spring, 2001 [J]. *Chinese Sci. Bull. (in Chinese)*, 49 (20): 2212–2219, doi:10.1007/BF03185790.
- Watanabe S, Hajima T, Sudo K, et al. 2011. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments [J]. *Geosci. Model Dev.*, 4 (4): 845–872, doi:10.5194/GMD-4-845-2011.
- Woodward S. 2011. Mineral dust in HadGEM2 [R]. Hadley Centre Technical Note. 87.
- 吴润, 符淙斌, 蒋维楣, 等. 2005. 东亚地区矿物气溶胶直接辐射强迫的初步模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 48 (6): 1250–1260. Wu Jian, Fu Congbin, Jiang Weimei, et al. 2005. A preliminary simulation study of direct radiative forcing of mineral dust aerosol over the East Asia region [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 48 (6): 1250–1260, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.06.005.
- Young P J, Archibald A T, Bowman K W, et al. 2013. Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 13 (4): 2063–2090, doi:10.5194/ACP-13-2063-2013.
- Yue X, Wang H J, Liao H, et al. 2010a. Direct climatic effect of dust aerosol in the NCAR Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (2): 230–242, doi:10.1007/S00376-009-8170-Z.
- Yue X, Wang H J, Liao H, et al. 2010b. Simulation of dust aerosol radiative feedback using the GMOD: 2. Dust-climate interactions [J]. *J. Geophys. Res.*, 115 (D4): D04201, doi:10.1029/2009JD012063.
- Zender C S, Bian H S, Newman D. 2003. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14): 4416, doi:10.1029/2002JD002775.
- Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, et al. 2012. Atmospheric aerosol compositions in China: Spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 12 (2): 779–799, doi:10.5194/ACP-12-779-2012.