

刘红年, 张力. 中国不同排放情景下人为气溶胶的气候效应. 地球物理学报, 2012, 55(6): 1867-1875, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 06. 007.

Liu H N, Zhang L. The climate effects of anthropogenic aerosols of different emission scenarios in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(6): 1867-1875, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 06. 007.

中国不同排放情景下人为气溶胶的气候效应

刘红年, 张 力

南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 本文利用区域气候模式 RIEMS2.0 (Regional Integrated Environmental Model System) 和 2006 年以及 2020 年三种排放情景下的排放资料, 研究了 2006 年气候背景下的人为气溶胶的浓度分布特征及辐射效应, 估算了未来不同排放情景下人为气溶胶的主要成分硫酸盐、硝酸盐、黑碳、有机碳(含二次有机碳)的综合气候效应. 结果表明: (1) 2006 年中国地区人为气溶胶浓度硫酸盐 > 有机碳 > 硝酸盐 > 黑碳, 其区域柱浓度平均值分别为 6.0、4.0、1.3 和 0.3 mg/m². (2) 2006 年硫酸盐、硝酸盐、有机碳和黑碳的平均辐射强迫分别为 -1.32、-0.60、-0.40 和 0.28 W/m². 硫酸盐、硝酸盐和有机碳的负辐射强迫超过黑碳的正辐射强迫, 人为气溶胶总辐射强迫为 -1.96 W/m². (3) 人为气溶胶的辐射效应及引起的地面气温变化对排放源非常敏感, 未来采取不同排放政策导致的人为气溶胶的含量及辐射效应有较大差异. 在未来排放增加的情景下, 各区域的气溶胶浓度、辐射强迫、气温下降幅度和降水减少幅度也相应加大.

关键词 排放情景, 人为气溶胶, 气溶胶气候效应, RIEMS2.0

doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 06. 007

中图分类号 P461

收稿日期 2011-01-11, 2012-04-01 收修定稿

The climate effects of anthropogenic aerosols of different emission scenarios in China

LIU Hong-Nian, ZHANG Li

School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract The Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS2.0) and the emission data of 2006 and 2020 were used to simulate the distributions and climate effects of anthropogenic aerosols sulfate, nitrate, black carbon and organic carbon for the entire year of 2006. The results show that: (1) The regional average column burdens of sulfate in 2006 are the largest among the anthropogenic aerosols, followed by organic carbon, nitrate, and black carbon, with the regional average value of 6.0, 4.0, 1.3 and 0.3 mg/m², respectively. (2) The regional average radiative forcing (RF) of sulfate, nitrate, organic, and black carbon are -1.32, -0.60, -0.40, and 0.28 W/m², respectively. The negative RF of sulfate, nitrate, and organic carbon are larger than the positive RF of black carbon. The net RF of anthropogenic aerosol is -1.96 W/m². (3) The radiative effects and temperature change caused by anthropogenic aerosols are sensitive to emission inventory. The column burdens and climate effects of anthropogenic aerosols are strongly influenced by the emission scenarios. In future, the larger emission intensity may cause

基金项目 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB428501)、公益性行业科研专项(GYHY201206011)和江苏高校优势学科建设工程项目资助.

作者简介 刘红年,男,1968年生,毕业于南京大学,教授,主要从事气溶胶气候效应以及边界层等方面的研究. E-mail: liuhn@nju.edu.cn

more considerable negative RF, temperature drop and precipitation reduction.

Keywords Emission scenario, Anthropogenic aerosol, Aerosol climate effect, RIEMS2.0

1 引言

在众多气候变化影响因子中,气溶胶的气候效应是很不确定和亟待深入认识的因子^[1].虽然就全球平均而言人为气溶胶仅占气溶胶总量的大约10%,但对不同类型的气溶胶,不同区域这一比例差异巨大.对于硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶,人为排放可占80%左右^[2-3].人为气溶胶是人类活动影响区域以致全球气候的重要因子,总体上人为气溶胶的气候效应和以CO₂为主的温室气体的气候效应基本相反,气溶胶能部分地抵消温室气体的全球增暖作用,因此在估算未来由温室气体排放造成的增温时不能忽略人为气溶胶的影响,因为总体上未来气溶胶排放的增加,意味着对温室效应的抵消作用增强,反之,未来气溶胶浓度减少,则气溶胶抵消温室效应的作用减弱,未来全球增温幅度可能更大.

在区域尺度上,气溶胶粒子对辐射强迫的效应非常显著.在部分地区,气溶胶的辐射冷却效应甚至可能超过温室气体的增温效应.印度洋试验(INDOEX)^[3-4]表明,在南亚的旱季(1—4月),主要由人类活动产生的气溶胶粒子形成的霾层可能掩盖了温室气体的效应.在这期间,霾层可以对地表产生约 $14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的净冷却效应,相反,温室气体对地表的辐射强迫据估计为 $2 \sim 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

对气候有影响的人为气溶胶主要包括硫酸盐、硝酸盐、黑碳(BC)、有机碳气溶胶(OC),其中OC可分为一次有机碳(POC)和二次有机碳气溶胶(SOC).印度洋试验(INDOEX)中发现的亚洲棕色云(ABC,后改称大气棕色云)由硫酸盐(32%)、铵盐(8%)、有机物(26%)、硝酸盐(10%)、黑碳(14%)、飞灰(5%)、灰尘(10%)和钾(2%)的混合物组成^[3].北半球极地冰雪中的硫酸盐和硝酸盐气溶胶粒子源自矿物燃料的燃烧和熔炼,它们自20世纪初就开始增加了^[5-6].从工业革命前到当代,阿尔卑斯高山冰川站的含碳粒子浓度已经增加了几倍,其中黑碳、元素碳、有机碳和总碳分别增加了3.7, 3.0, 2.5和2.6倍^[7].

中国能源消耗主要以煤炭为主,近几十年的经济快速发展使煤炭的消耗量持续增长,被认为是全球最大的碳气溶胶排放国家,Streets等^[8]对中国黑

碳排放量进行了估算,提出全球约1/4的人为排放来自中国,这些黑碳气溶胶可以通过输送对周围地区的气候和环境造成影响. IPCC^[9]指出,在北美、欧洲和东亚等工业密集区域,硫酸盐和碳气溶胶的人为排放量非常大.中国由于增长较快的温室气体排放及黑碳排放承受了很大的“减排”外交压力,关于中国人为气溶胶对气候的影响,目前多数的研究集中在某一成分,如硫酸盐、黑碳等气溶胶的气候效应. Menon等^[10]就提出,黑碳气溶胶可能对中国近几十年来南涝北旱的降水变化趋势产生影响. Liu等^[11]认为黑碳气溶胶总体上有增温效应,同时使北方地区降水减少,南方地区降水增加,但综合考虑硫酸盐、有机碳和黑碳的气候效应后,则使南方和北方地区降水都呈减少趋势,中国平均气温下降,可见硫酸盐和有机碳的气候效应超过了黑碳.张美根等^[12]研究发现,中国东部黑碳浓度可达 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.柳艳香等^[13]发现硫酸盐等外强迫因子对夏季中国区域的短期气候的影响是不容忽视的.

目前利用区域气候模式研究东亚地区人为气溶胶的气候效应已有很多工作^[14-19].但同时考虑人为气溶胶主要成分的综合气候效应的研究仍很缺乏,如果要较为准确地评估人为气溶胶的气候效应,必须同时考虑主要的人为气溶胶成分.

在可预见的未来,温室气体排放造成的全球变暖仍将持续,但在预估未来温室气体造成的全球增温时,应考虑未来气溶胶的变化可能对气候的影响.为了解人为气溶胶在现在以及未来可能造成的综合辐射效应,本文利用一个中尺度区域气候和气溶胶化学耦合模式(RIEMS2.0),考虑人为硫酸盐、硝酸盐、有机碳和黑碳气溶胶的直接和间接辐射效应,模拟研究了2006年以及未来2020年不同排放情景下中国人为气溶胶成分的浓度分布特征和辐射效应.

2 模式简介和模拟方案设计

2.1 模式简介

本文所用到的区域气候模式RIEMS2.0(Regional Integrated Environmental Model System)是中国科学院大气物理研究所东亚中心在MM5version3的基础上发展起来的区域环境系统集成模式^[20],基于该模式的大量模拟研究认为其可以较好地用于东亚区域

的气候模拟^[21-23]。

在 RIEMS2.0 中耦合了大气化学-气溶胶模式,该模式中的化学模式采用 CBM4 化学反应机制^[24],包含 36 个物种,83 个化学反应,其中 11 个光解反应,72 个热反应,气相反应中的光解率随辐射和温度等变化。模式中含有 1 个零维云雨模式,考虑了液相化学反应和降水对各物种的清除作用。

RIEMS2.0 中气溶胶模式包含硫酸盐、硝酸盐、黑碳、有机碳、二次有机碳、沙尘和海盐气溶胶。其中黑碳、一次有机碳、沙尘和海盐气溶胶为一次气溶胶,不考虑化学过程,只有排放、输送、扩散和干(湿)沉积过程。RIEMS2.0 模式中引入了气溶胶热力学平衡模式 ISORROPIA(CMAXS)^[25]和二次有机气溶胶模式,本文所用的二次有机气溶胶模式取自美国环保局(EPA)开发的一个空气质量模式 REMSAD 中的模块^[26-27]。利用以上气溶胶模式,可以计算无机气溶胶硫酸盐和二次有机气溶胶。

RIEMS2.0 模式中考虑了硫酸盐、硝酸盐和黑碳这三种气溶胶的外部混合、完全内部混合和部分内部混合三种混合方式。本文采用的气溶胶混合方式为外部混合。由大气化学-气溶胶模式计算得到的气溶胶浓度分布,传递给区域气候模式 RIEMS2.0 中的辐射传输模式 CCM3,从而在辐射过程中考虑这些人为气溶胶的直接辐射效应,在没有人人为气溶胶的算例中,辐射传输模式 CCM3 只考虑背景气溶胶。关于辐射传输模式 CCM3 的框架和效能已有大量文献可参考^[28-29],在此不再叙述。各气溶胶成分的光学参数,如单次散射反照率、不对称因子、消光系数采用美国大学大气科学研究联盟(UCAR)的气溶胶数据库(<http://www.cesm.ucar.edu/models/atm-cam/download/>)。

RIEMS2.0 模式中考虑了人为气溶胶的第一间接气候效应,采用 Hegg(1994)^[30]的方案,根据人为气溶胶质量浓度确定云滴有效半径,改变云的辐射特性。

2.2 模拟方案设计和初始资料

本文模拟区域范围为 93.4°E—132.4°E,16.2°N—44.1°N,网格中心为(32°N, 107°E),网格距为 60 km;模式垂直方向为 16 层,层顶气压为 100 hPa;积分时间为 2006 全年。

本文使用的气象初始资料为 2006 年美国国家环境预报中心 NCEP 再分析资料,分辨率为 1°×1°;侧边界则采用 NCEP 资料外强迫方法,每 6 小时更新一次;下垫面使用 NCAR 的分辨率为 30'×30'的

全球地形和土地类型资料。

本文采用了 2006 年以及未来 2020 年共四种排放源资料。2006 年污染源排放资料取自 Zhang 等^[31]在 NASA's INTEX-B 计划研究中提出的亚洲排放资料,精度为 0.5°×0.5°。未来 2020 年污染源三种排放情景参考 Ohara 等^[32]结果,分别为 REF、PSC 和 PFC 排放情景,其中 REF 情景(Reference scenario)为最佳估计,PSC 情景(Policy Succeed Case scenario)为低排放情景,对应减排政策成功实施情景,PFC 情景(Policy Failed Case scenario)为高排放情景,对应减排政策失败情景。图 1 是未来三种情形下各成分排放量与 2006 年排放量的比例。

本文共进行了 9 个个例的模拟(表 1),其中 BASE 个例不考虑人为气溶胶,C2006、REF、PSC 和 PFC 个例分别对应 2006 年排放源与 2020 年的

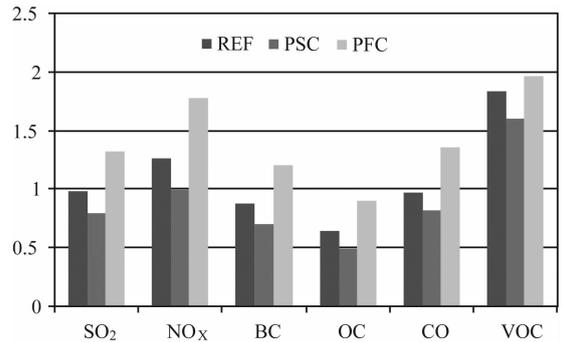


图 1 未来排放量与 2006 年排放量之比

VOC 是挥发性有机物。

Fig. 1 The ratio of emission of REF, PSC, and PFC to the emission in 2006

表 1 模拟个例设计

Table 1 Experiment designs

个例名称	气溶胶成分	排放源
BASE	无人人为气溶胶成分	无排放源
C2006	硫酸盐、硝酸盐、BC、OC (含 SOC)	2006 年排放源
C2006-S	硝酸盐、BC、OC(含 SOC)	2006 年排放源
C2006-N	硫酸盐、BC、OC(含 SOC)	2006 年排放源
C2006-BC	硫酸盐、硝酸盐、OC(含 SOC)	2006 年排放源
C2006-OC	硫酸盐、硝酸盐、BC	2006 年排放源
REF	硫酸盐、硝酸盐、BC、OC (含 SOC)	2020 年 REF 排放情景
PSC	硫酸盐、硝酸盐、BC、OC (含 SOC)	2020 年 PSC 排放情景
PFC	硫酸盐、硝酸盐、BC、OC (含 SOC)	2020 年 PFC 排放情景

REF、PSC 和 PFC 排放情景,其中考虑了四种人为气溶胶成分硫酸盐、硝酸盐、BC 和 OC(含 SOC). C2006-S、C2006-N、C2006-BC、C2006-OC 个例分别在 C2006 个例基础上不考虑硫酸盐、硝酸盐、BC 和 OC. 通过个例 C2006、REF、PSC、PFC 分别与 BASE 的结果比较可以分析 2006 年及未来情景下四种人为气溶胶成分硫酸盐、硝酸盐、BC 和 OC 的综合气候效应,通过 C2006 个例分别与 C2006-S、C2006-N、C2006-BC、C2006-OC 结果的比较可以分别得到 2006 年硫酸盐、硝酸盐、BC 和 OC 的气候效应.

3 结果与分析

3.1 2006 年人为气溶胶浓度分布及气候效应

图 2 是 C2006 个例中硫酸盐、硝酸盐、黑碳和有机碳气溶胶的柱浓度分布,人为气溶胶主要分布在四川、中国东部地区以及印度等地. 但各成分并不完全相同,硫酸盐柱浓度高值区位于印度、四川地区,硝酸盐高值区位于华北、四川地区,黑碳、有机碳高值区位于四川及长江中游地区. 主要人为气溶胶柱浓度一般是硫酸盐 > 有机碳 > 硝酸盐 > 黑碳,其最高值分别为 38.5、12.2、2.5 和 1.9 mg/m^2 . 区域平均值分别为 6.0、4.0、1.3 和 0.3 mg/m^2 ,硫酸盐平均柱浓度远高于全球平均结果 1.7~3 mg/m^2 ^[1]. 硫酸盐、黑碳的区域平均地面浓度分别为 2.94 和 0.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分布及量级与 Huang 等^[33]的相似. 在有机碳 OC 中,二次有机碳 SOC 所占比例平均 43.5%.

图 3 是 2006 年人为气溶胶总光学厚度和辐射强迫分布. 光学厚度的分布形式与气溶胶浓度分布特征类似,高值区位于四川、印度和长江、黄河的中下游地区. Chung 等^[34]将 MODIS 气溶胶光学厚度观测数据使用地面 AERONET 观测数据同化后得到 2001—2003 年华东地区光学厚度值约为 0.3~0.4,四川盆地约 0.4~0.5. 图 3 中模拟的四川和华东地区人为气溶胶光学厚度略小于卫星反演结果,这是因为卫星反演的光学厚度还包含了自然气溶胶,但与印度洋试验中发现的主要由人类活动产生的霾层平均光学厚度 0.3 接近^[3]. Yu 等^[35]使用 MODIS 观测资料反演得到全球陆地平均光学厚度 0.23,并根据 MODIS 得到的亚微米粒子光学厚度贡献率反演得到人为气溶胶对总光学厚度贡献率在陆地上大约为 47%±9%,而用 AERONET 观测资料得到东亚地区全模态粒子的光学厚度平均值为 0.35,亚微米粒子光学厚度平均值为 0.25,本文模

拟得到的全区域光学厚度平均为 0.13,与其量级相当.

人为气溶胶产生的大气顶辐射强迫为负值,即造成对流层净辐射能量收入减少,中国东部及四川地区辐射强迫可达 $-4 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上,气柱辐射强迫为正值,四川和长江、黄河中游地区为高值区,黑碳气溶胶对太阳短波辐射有比较强的吸收是气柱辐射强迫为正的主要原因,地面辐射强迫为负,且大于大气顶辐射强迫以及气柱辐射强迫,地面辐射强迫与气柱辐射强迫之和即大气顶辐射强迫,辐射强迫分布的特征说明人为气溶胶造成地面或低层净辐射能量收入减少,高层净辐射能量收入增加,整个对流层净辐射能量收入减少.

图 4 是区域平均的气溶胶各成分年平均辐射强迫,硫酸盐、硝酸盐、有机碳和 BC 的平均辐射强迫分别为 -1.32 、 -0.60 、 -0.40 和 $0.28 \text{ W}/\text{m}^2$,硫酸盐负辐射强迫最大,其次是硝酸盐,有机碳辐射强迫为 $-0.4 \text{ W}/\text{m}^2$,高于 IPCC(2007)^[9]估计的 OC 平均辐射强迫值 $-0.22 \text{ W}/\text{m}^2$. 黑碳平均辐射强迫为正,表明黑碳总体上造成对流层净辐射能量增加,这将使对流层总体上增温,有研究结果认为^[36],黑碳气溶胶是仅次于 CO_2 的重要的大气增温成分. 但 BC 的正辐射强迫小于其他主要人为气溶胶成分的负辐射强迫,由于黑碳和有机碳有比较相似的排放源,其源排放、浓度分布有很好的相关性,因此可以认为碳气溶胶总体上是负辐射强迫,在区域平均辐射强迫 $-1.96 \text{ W}/\text{m}^2$ 中,硫酸盐贡献最大. 由于气候系统的复杂性,人为气溶胶平均辐射强迫并不等于各成分辐射强迫之和.

3.2 2020 年人为气溶胶浓度分布及气候效应

2020 年不同排放情景下气溶胶的浓度分布特征同图 1 类似,其区域平均柱浓度见图 5,与 2006 年相比,REF 情景下,硫酸盐、POC、SOC 含量略有减小,BC 含量略有增加,硝酸盐含量基本不变. PSC 情景下,硫酸盐含量明显减小,区域平均值约为 $4 \text{ mg}/\text{m}^2$,硝酸盐基本不变,BC 略有增加,POC、SOC 略有减少. PFC 情境下, SO_2 排放源强度明显高于 2006 年,因此与 2006 年相比,硫酸盐含量增加明显. 图中总人为气溶胶为硫酸盐、硝酸盐、BC 和 OC 之和,2006 年和 2020 年 REF、PSC 和 PFC 情景下,人为气溶胶柱含量分别为 11.6、10.6、8.6 和 $14.8 \text{ mg}/\text{m}^2$.

图 6 是不同排放情景下气溶胶的辐射强迫,REF 和 PSC 情景下辐射强迫平均值和极值都明显小于 2006 年. 这和 REF 和 PSC 情景下人为气溶胶

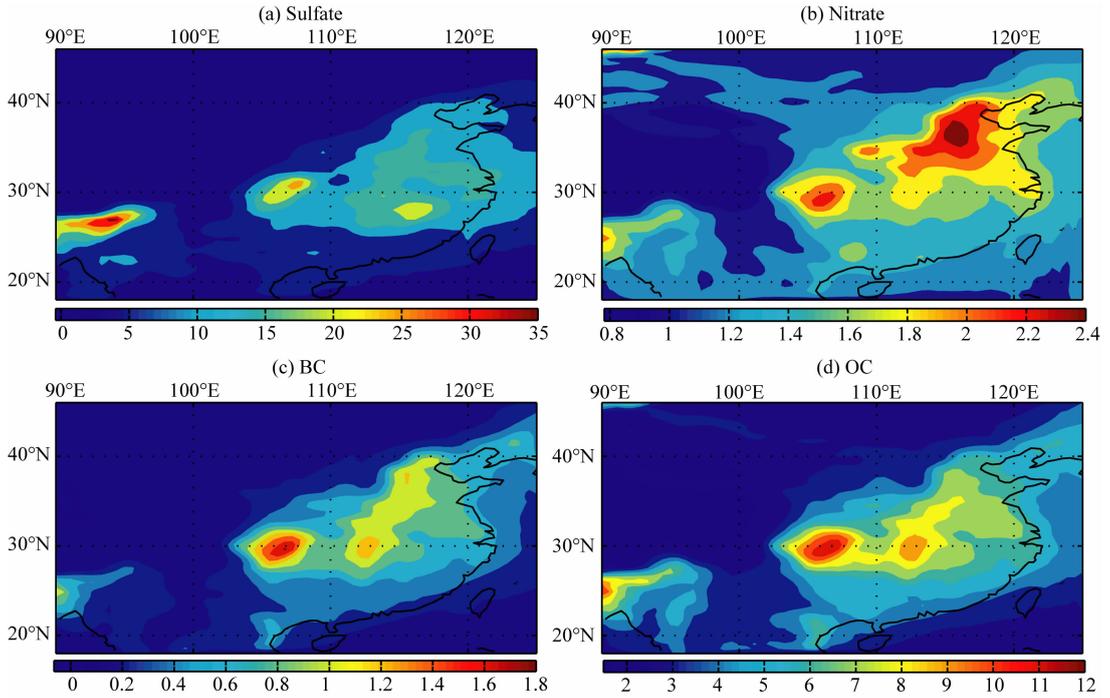


图 2 2006 年硫酸盐、硝酸盐、黑碳和有机碳气溶胶柱浓度分布(mg/m^2)

Fig. 2 The column burden of sulfate, nitrate, black carbon and organic carbon in 2006 (mg/m^2)

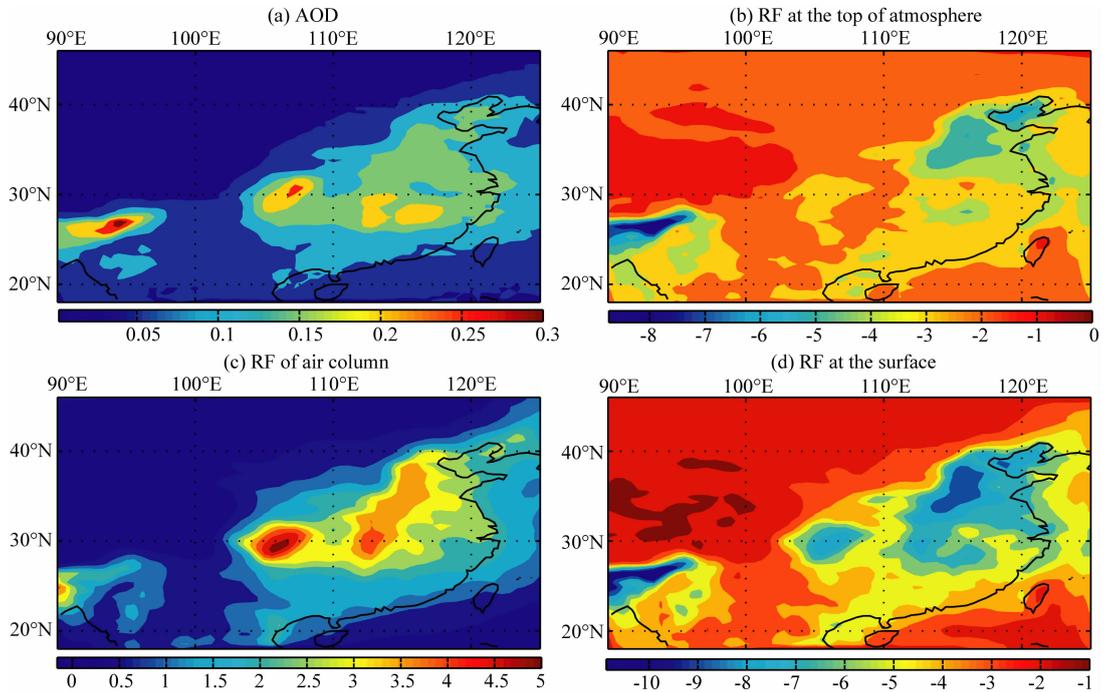


图 3 2006 年人为气溶胶光学厚度(AOD)和辐射强迫(W/m^2)

(a) AOD; (b)大气顶辐射强迫; (c)气柱辐射强迫; (d)地面辐射强迫.

Fig. 3 The radiative forcing and aerosol optical depth (AOD) of anthropogenic aerosol in 2006 (W/m^2)

(a) AOD; (b)RF at the top of atmosphere; (c)RF of air column; (d)RF at the surface.

浓度下降是对应的. PFC 情景下平均辐射强迫为 $-2.1 \text{ W}/\text{m}^2$, 大于 2006 年的辐射强迫 $-1.96 \text{ W}/\text{m}^2$, 但极值小于 2006 年, 由于气候系统中各因子非常复杂的非线性作用, 气溶胶辐射强迫和气溶胶浓度分

布及源排放强度并不完全对应.

不同排放情景下人为气溶胶引起的地面气温变化见图 7, 总体上, 人为气溶胶引起地面气温下降, 但气温下降的高值区有明显差异, 2006 年, 印度和

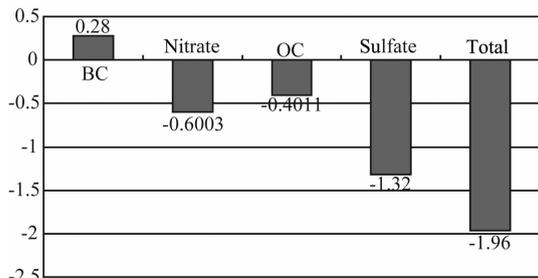


图 4 各人为气溶胶成分年平均辐射强迫 (W/m^2)
Fig. 4 Annual mean radiative forcing of each aerosol species (W/m^2)

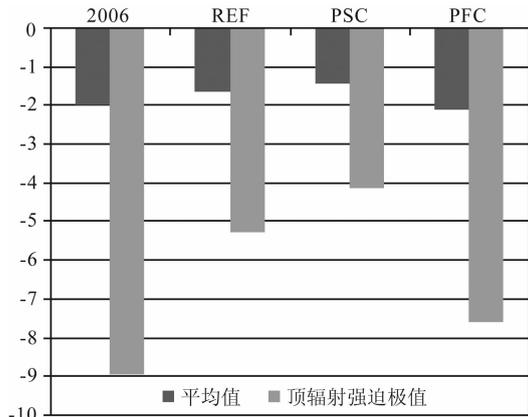


图 6 不同排放源情景下人为气溶胶辐射强迫平均值和极值 (W/m^2)

Fig. 6 The average and extreme RF of anthropogenic aerosols of different emission scenario (W/m^2)

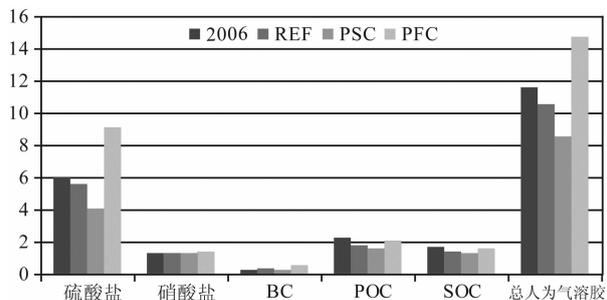


图 5 不同排放源情景下人为气溶胶区域平均柱浓度 (mg/m^2)
Fig. 5 Regional average column burdens of anthropogenic aerosols of different emission scenario (mg/m^2)

四川地区气温下降幅度最大,而 2020 年三种排放情景下,中国南部地区气温下降幅度最大. 2006 年和 2020 年 REF、PSC、PFC 人为气溶胶引起的区域平均地面气温变化分别为 -0.083 、 -0.065 、 -0.065 、

-0.087 K,地面气温变化极大值分别为 -0.41 、 -0.35 、 -0.36 、 -0.50 K.

人为气溶胶的浓度分布、辐射强迫及气候效应的空间分布很不均匀,本文分别统计了中国东部 7 个地区的平均气溶胶辐射强迫和气候效应,这 7 个地区分别为东北(A)、华北北部(B1)、华北南部(B2)、西北东部(C)、长江中下游地区(D)、华南区(E)和西南区(F),区域的具体划分见朱亚芬^[37].

在 2006 年及 2020 年各种情景下,各地区平均人为气溶胶辐射强迫皆为负值,都导致平均气温下

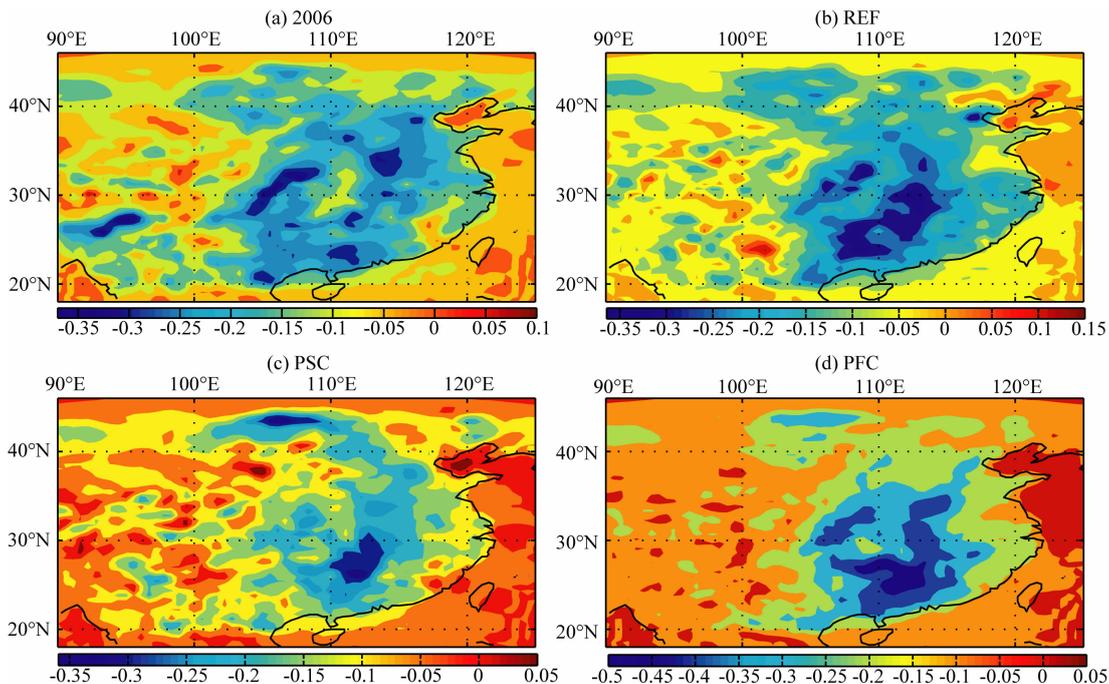


图 7 四种排放情景下人为气溶胶引起的地面气温变化(K)

Fig. 7 The annual average surface air temperature variation caused by anthropogenic aerosols of four emission scenarios (K)

表 2 不同区域的人为气溶胶平均辐射强迫(RF)、地面气温变化(ΔT)和年总降水变化(ΔRain)Table 2 Average RF, surface temperature variation (ΔT) and precipitation variation (ΔRain) of anthropogenic aerosols in different area

		A	B1	B2	C	D	E	F
2006	RF/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	-1.45	-1.24	-3.19	-1.22	-2.8	-2.4	-1.62
	$\Delta T/\text{K}$	-0.06	-0.07	-0.18	-0.13	-0.17	-0.15	-0.14
	$\Delta \text{Rain}/\text{mm}$	-27.1	-30.5	-47.9	5.5	-38.3	-65.0	-40.1
2020 REF	RF/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	-1.11	-1.07	-2.69	-1.14	-2.67	-2.27	-1.64
	$\Delta T/\text{K}$	-0.02	-0.06	-0.13	-0.11	-0.17	-0.17	-0.10
	$\Delta \text{Rain}/\text{mm}$	-47.3	-6.6	-86.4	-13.0	-9.7	-26.6	-49.1
2020 PSC	RF/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	-1.04	-1.04	-2.28	-1.12	-2.21	-1.66	-1.23
	$\Delta T/\text{K}$	-0.05	-0.07	-0.13	-0.09	-0.15	-0.14	-0.09
	$\Delta \text{Rain}/\text{mm}$	1.5	-25.1	-56.9	-12.4	-9.5	-77.5	-50.7
2020 PFC	RF/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	-1.23	-1.13	-3.45	-1.27	-3.96	-3.70	-1.93
	$\Delta T/\text{K}$	-0.04	-0.08	-0.17	-0.13	-0.22	-0.27	-0.13
	$\Delta \text{Rain}/\text{mm}$	-19.2	-3.2	-114.3	-16.7	-31.6	-93.9	-85.0

降,除在 2006 年西北东部和 2020 年 PSC 情景下的东北地区外,各区域平均降水都呈减少趋势,在 2006 年,华北南部地区气溶胶辐射强迫最强,达 $-3.19 \text{ W}/\text{m}^2$,降温幅度也大于其他地区,年平均降温 0.18 K ,但降水减少最多的地区却是华南地区,年总降水量减少 65 mm ,在 2020 年的情景模拟中也可以发现,辐射强迫、气温变化和降水变化的高值区也并不完全相同.在 2020 年 REF 情景下,华北南部降水减少最多,但长江中下游地区和华南地区降温幅度最大,总体而言,华北南部、长江中下游地区和华南地区气溶胶辐射强迫、气温和降水变化较大.在 2020 年 PFC 排放情景下,基本上各区域辐射强迫、气温变化、降水变化都大于 PSC 情景和 REF 情景,REF 情景下的各区域辐射强迫大于 PSC 情景,但部分地区的气温变化和降水变化小于 PSC 情景,可见人为气溶胶的气候效应及其空间分布与其排放源存在非常复杂的非线性关系.

由以上分析可知,人为气溶胶的辐射效应及引起的地面气温变化对排放源非常敏感,未来采取不同排放政策导致的人为气溶胶的含量及辐射效应有较大差异,总体上,排放减少即意味着人为气溶胶含量减小,所导致的地面降温效应亦减小,反之亦然.这意味着,如果不考虑温室气体排放的影响,在将来如果采取严格的污染物排放限制措施,将使人为气溶胶对温室气体增温效应的部分抵消作用下降.但这并不意味对污染物排放的限制将导致未来的温室气体的增温效应更大,因为对 SO_2 、 NO_x 、BC、OC 等

成分排放的限制也许将同时导致 CO_2 排放的减少.

需要指出的是,本文的研究中只改变了区域内的气溶胶排放,没有考虑未来全球排放改变所产生的大尺度气候效应及其可能的反馈,因此,估算的温度、降水变化,可能更多的只是局地的效应.另外,本文是在 2006 年同一气候背景下不同排放情景下的人为气溶胶气候效应的敏感性研究,对未来气候的准确预估需要在气候模式中同时考虑温室气体和气溶胶的作用.

4 结 论

本文利用 RIEMS2.0 研究 2006 年以及 2020 年 REF、PSC、PFC 三种排放情景下人为气溶胶的浓度分布特征及辐射效应,得到主要结论如下:

(1) 中国地区人为气溶胶浓度硫酸盐 > 有机碳 > 硝酸盐 > 黑碳,其区域平均值分别为 6.0 、 4.0 、 1.3 和 $0.3 \text{ mg}/\text{m}^3$,在有机碳 OC 中,二次有机碳 SOC 所占比例平均 43.5% .

(2) 人为气溶胶产生的大气顶辐射强迫为负值,气柱辐射强迫为正值,地面辐射强迫为负,且大于大气顶辐射强迫以及气柱辐射强迫,硫酸盐、硝酸盐、有机碳和 BC 的平均辐射强迫分别为 -1.32 、 -0.60 、 -0.40 和 $0.28 \text{ W}/\text{m}^2$. 人为气溶胶平均辐射强迫为 $-1.96 \text{ W}/\text{m}^2$,并不等于各成分辐射强迫之和.

(3) 与 2006 年相比,REF 情景下,硫酸盐、POC、SOC 含量略有减小,BC 含量略有增加,硝酸

盐含量基本不变. PSC 情景下, 硫酸盐含量明显减小, 硝酸盐基本不变, BC 略有增加, POC、SOC 略有减少. PFC 情景下, 硫酸盐含量增加明显. 2006 年和 2020 年 REF、PSC 和 PFC 情景下, 人为气溶胶含量分别为 11.6、10.6、8.6 和 14.8 mg/m^2 .

(4) REF 和 PSC 情景下辐射强迫平均值和极值都明显小于 2006 年. PFC 情景下平均辐射强迫为 $-2.1 \text{ W}/\text{m}^2$, 大于 2006 年的辐射强迫, 但极值小于 2006 年.

(5) 2006 年和 2020 年 REF、PSC、PFC 人为气溶胶引起的区域平均地面气温变化分别为 -0.083 、 -0.065 、 -0.065 、 -0.087 K , 地面气温变化极大值分别为 -0.41 、 -0.35 、 -0.36 、 -0.50 K .

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Third Assessment Report, Climate Change 2001: The Scientific Basis. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [2] Heintzeberg J, Raes F, Schwartz S E, et al. The changing Atmosphere; An Integration and Synthesis of A Decade of Tropospheric Chemistry Research. The International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC), IGPB Global Change Series. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2003.
- [3] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. The Indian Ocean experiment: An Integrated assessment of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(22): 28371-28398.
- [4] Lelieveld J, Crutzen P J, Ramanathan V, et al. The Indian Ocean experiment: Widespread air pollution from south and southeast Asia. *Science*, 2001, 291(5506): 1031-1036.
- [5] Mayewski P A, Lyons W B, Spencer M J, et al. An ice-core record of atmospheric response to anthropogenic sulphate and nitrate. *Nature*, 1990, 346(6284): 554-556.
- [6] Legrand M, Hammer C, De Angelis M, et al. Sulfur-containing species (methanesulfonate and SO_4) over the last climatic cycle in the Greenland Ice Core Project (central Greenland) ice core. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(C12): 26663-26679.
- [7] Lavanchy V M H, Gaggeler H W, Schotterer U, et al. Historical record of carbonaceous particle concentrations from a European high-alpine glacier (Colle Gnifetti, Switzerland). *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D17): 21227-21236.
- [8] Streets D G, Gupta S, Wakedhoff S T, et al. Black carbon emissions in China. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(25): 4281-4296.
- [9] IPCC. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [10] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297(5590): 2250-2253.
- [11] Liu H N, Zhang L, Wu J. A modeling study of the climate Effects of sulfate and carbonaceous aerosols over China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2010, 27(6): 1276-1288.
- [12] 张美根, 徐永福, 张仁健等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布. 地球物理学报, 2005, 48(1): 46-51. Zhang M G, Xu Y F, Zhang R J, et al. Emission and concentration distribution of black carbon aerosol in East Asia during springtime. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 46-51.
- [13] 柳艳香, 郭裕福. 外强迫因子变化在 2003 年夏季旱涝预测中的作用. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1001-1005. Liu Y X, Guo Y F. Impact of extra-forcing for prediction of drought and flood in summer 2003. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4): 1001-1005.
- [14] Zhou X J, Li W L, Luo Y F. Numerical simulation of the aerosol radiative forcing and regional climate effect over China. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1998, 22(4): 418-427.
- [15] 罗云峰. 中国地区气溶胶光学厚度特征及其辐射强迫和气候效应的数值模拟[博士论文]. 北京: 北京大学, 1998. Luo Y F. Study on the characteristics of aerosol optical depth and numerical simulation of aerosol radiative forcing and regional climate response over China [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Peking University, 1998.
- [16] Qian Y, Giorgi F. Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D6): 6477-6499.
- [17] Wu J, Fu C B. Simulation research of distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol in recent five spring seasons over East Asia Region. *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2005, 29(1): 111-119.
- [18] Han Z W, Zhang R J, Wang Q G, et al. Regional modeling of organic aerosols over China in summertime. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: D11202, doi: 10.1029/2007JD009436.
- [19] 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. *Adv. Atmos. Sci.*, 2009, 26(1): 57-66.
- [20] Fu C B, Wei H L, Qian Y. Documentation on Regional Integrated Environmental Model System (RIEMS). TEACOM Science Report No. 1, Beijing: Start Regional Committee for Temperate East Asia, 2000: 1-26.
- [21] Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z M, et al. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze river valley during 11-30 June 1998 using RIEMS. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, 20(5): 815-824.
- [22] Xiong Z. The multiyear surface climatology of RIEMS over East Asia. *Climatic and Environmental Research*, 2004, 9(2): 251-260.
- [23] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional climate model

- intercomparison project for Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, 86(2): 257-266.
- [24] Gery M W, Whitten G Z, Killus J R, et al. A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94 (D10): 12925-12956.
- [25] Hildemann L M, Russell A G, Cass G R. Ammonia and nitric acid concentrations in equilibrium with atmospheric aerosols: experiment vs. theory. *Atmospheric Environment*, 1984, 18(9): 1737-1750.
- [26] Odum J R, Hoffmann T, Bowman F, et al. Gas/particle partitioning and secondary organic aerosol yields. *Environ Sci. Technol.*, 1996, 30(8): 2580-2585.
- [27] Griffin R J, Cocker D R III, Flagan R C, et al. Organic aerosol formation from the oxidation of biogenic hydrocarbons. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(D3): 3555-3567.
- [28] Filippo G, Marinucci M R, Bates G T. Development of a second generation regional climate model (RegCM2), boundary layer and radiative transfer processes. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121(10): 2794-2813.
- [29] Giorgi F, Marinucci M R, Bates G T, et al. Development of a second generation regional climate model (RegCM2), convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121(10): 2814-2832.
- [30] Hegg D A. Cloud condensation nucleus-sulphate mass relationship and cloud albedo. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99 (D12): 25903-25907.
- [31] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmos. Chem. Phys.*, 2009, 9(14): 5131-5153.
- [32] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980—2020. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, 7(16): 4419-4444.
- [33] Huang Y, Chameides L W, Tan Q, Dickinson R E. Characteristics of anthropogenic sulfate and carbonaceous aerosols over East Asia: regional modeling and observation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2008, 25(6): 946-959.
- [34] Chung C E, Ramanathan V, Kim D, et al. Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: D24207, doi: 10.1029/2005JD006356.
- [35] Yu H, Kaufman Y J, Chin M, et al. A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, 6(3): 613-666.
- [36] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107 (D19): 4410, doi: 10.1029/2001JD001376.
- [37] 朱亚芬. 530年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变. *地理学报*, 2003, 58(Z1): 100-107.
Zhu Y F. The regional division of dryness/wetness over eastern China and variations of dryness/wetness in northern China during the last 530 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, 58(Z1): 100-107.

(本文编辑 何 燕)