

宿兴涛,王汉杰.中国黑碳气溶胶分布特征与辐射强迫的模拟研究[J].大气科学学报,2009,32(6):798-806

中国黑碳气溶胶分布特征与辐射强迫的模拟研究

宿兴涛¹,王汉杰²

(1.解放军理工大学 气象学院,江苏 南京 211101;2 中国科学院 东亚区域气候—环境重点实验室,北京 100029)

摘要:利用区域气候模式 RegCM3 模拟 2000 年我国黑碳气溶胶的分布特征和辐射强迫。结果表明,黑碳气溶胶主要分布在我国黄河以南、青藏高原以东的广大区域,柱含量由南向北递减;柱含量最大值在 0.6 mg/m^2 以上,出现在中南、四川盆地、湖南、贵州、广西、广东西部和云南南部等地区;青藏高原南侧黑碳气溶胶次高值区的存在,反映了气溶胶的跨国界输送并影响区域气候的特点。黑碳气溶胶的大气顶辐射强迫介于 $0.1 \sim 0.8 \text{ W/m}^2$ 之间,地表辐射强迫介于 $-0.1 \sim -2.0 \text{ W/m}^2$ 之间,两者分布特征与柱含量分布特征基本一致。同柱含量相似,黑碳气溶胶大气顶辐射强迫和地表辐射强迫也有明显的季节性变化,春季最大,秋、冬季次之,夏季最小。

关键词:中国;黑碳气溶胶;柱含量;辐射强迫

中图分类号: P435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)06-0798-09

A Simulation Study on Distributive Characteristics and Radiative Forcing of Black Carbon Aerosols over China

SU Xing-tao¹, WANG Han-jie²

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Regional climate model RegCM3 was applied to simulate distributive characteristics and radiative forcing of black carbon aerosols over China in 2000. The simulation results show that black carbon aerosols mostly located to the area south of the Yellow River and east of the Tibetan Plateau. There was a general decreasing trend of column burden from south to north in China. The maximum of column burden of above 0.6 mg/m^2 lay in central-south China, Sichuan Basin, Hunan, Guizhou, Guangxi, western Guangdong and southern Yunnan; and the secondary maximum lay in southern Tibetan Plateau, reflecting the internationally cross-bound transfer characteristic of aerosols that affect the climate change. The radiative forcing at the top-of-atmosphere (TOA) ranged from 0.1 to 0.8 W/m^2 , compared to the surface radiative forcing of $-0.1 \sim -2.0 \text{ W/m}^2$, the distribution characteristics of them were consistent with those of the column burden. The seasonal change pattern of the radiative forcing at the TOA and the ground surface were same with those of the column burden, i.e. the maximum appeared in spring, the secondary maximum in winter and autumn, while the minimum in summer.

Key words: China; black carbon aerosol; column burden; radiative forcing

收稿日期: 2009-09-04; 改回日期: 2009-10-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB400505); 国家自然科学基金资助项目(40675040)

作者简介: 宿兴涛(1984—), 男, 山东聊城人, 博士生, 研究方向为气溶胶与区域气候模拟, suxingtao@sina.com.

0 引言

黑碳 (Black Carbon, BC 或 Soot) 主要是含碳物质不完全燃烧产生的不定型碳质,在大气、土壤、冰雪、海洋和湖泊沉积物中都能发现它的存在。黑碳气溶胶是空气中一种重要的颗粒态污染物,其来源可分为自然源和人为源两种,自然源排放如火山爆发、森林大火等具有区域性和偶然性,而人为源排放却是长期和持续的。工业革命以来,人类大量使用煤、石油等化石燃料,其他如汽车尾气、生物燃烧等都成为大气中黑碳气溶胶的主要来源。黑碳气溶胶在偏远地区和人口众多的城市大气中它的浓度数量级分别为 10^{-9} g/m^3 和 10^{-6} g/m^3 ,在大气气溶胶中约占 0.2% ~ 1.0%^[1]。目前,全球化石燃料燃烧排放的黑碳气溶胶为 5.8 ~ 8.0 t/a^[2],而 Ito 等^[3]研究得到 2000 年的值为 2.8 t/a。

虽然存在很大不确定性^[4],但不能忽视黑碳气溶胶对气候、环境等的影响^[5]。黑碳气溶胶的气候效应已成为气候变化研究领域的热点。Kirkevåg 等^[6]研究发现当考虑黑碳气溶胶时,南非地区总气溶胶的辐射强迫达 2.0 W/m^2 ,对全球产生重要影响的北极地区也达 0.4 W/m^2 。Chuang 等^[7]运用简单模式和近似假设,估算云中黑碳气溶胶的辐射强迫为 0.07 W/m^2 。Jacobson^[8]模拟了黑碳气溶胶的直接辐射强迫,其数值是 0.54 W/m^2 ,已超过 CH_4 (0.47 W/m^2),并认为是全球大气系统中仅次于 CO_2 的增温组分。Wang^[9]用 CCM3 模式研究了黑碳气溶胶的气候效应,结果表明,黑碳气溶胶改变了大气云量和地表反照率,导致大气顶正辐射强迫减小,地表负辐射强迫增大。Hansen 等^[10]的研究结果显示:黑碳气溶胶沉积在冰雪面上会降低冰雪的反照率,并加速其融化,从而导致正的气候强迫效应并在北半球产生 0.3 W/m^2 的辐射强迫;自 1880 年以来,全球气温上升幅度的 25% 可归于它的贡献,而 Frazer^[11]认为黑碳对全球变暖贡献了 15% ~ 30%,这些都是不可忽视的数据。国内,张立盛等^[12-13]利用 GCM 模拟研究全球烟尘气溶胶(包括黑碳和有机碳)的辐射强迫,得到其全球平均的辐射强迫为 0.22 W/m^2 。张华等^[14]利用改进的辐射传输模式计算得到在对流层顶黑碳气溶胶的全球辐射强迫的平均值冬、夏季分别为 0.085 W/m^2 、 0.155 W/m^2 ,在地面分别为 -0.37 W/m^2 和 -0.63 W/m^2 。Zhang 等^[15]利用 CAM3 模式研究碳(黑碳、有机碳)气溶胶的辐射强迫,得到晴空全球

碳气溶胶直接辐射强迫在大气顶为 -0.24 W/m^2 ,地面为 -1.31 W/m^2 。

中国地处东亚,疆域广阔,由于经济水平相对落后和能源结构不尽合理,大量使用煤和生物质作燃料,被认为是排放 BC 的大值区。观测和全球模式的模拟均表明:中国是黑碳气溶胶光学厚度最大的地区之一^[16-19],而且黑碳对中国的辐射强迫可能大于全球平均水平^[20-22]。为了更有效地研究黑碳气溶胶及其辐射强迫对区域气候变化的影响,本文利用区域气候模式 RegCM3 模拟研究中国区域黑碳气溶胶的分布特征和辐射强迫,以期在区域尺度上得到黑碳气溶胶分布和辐射强迫更详细的信息。

1 数值试验设计方案

1.1 模式及气溶胶辐射方案简介

RegCM3 是意大利国际理论物理研究中心 (ICTP) 在 RegCM 和 RegCM2 基础上,研制出的第三代区域气候模式。RegCM3 引进了 CCM3 的辐射方案,CCM3 辐射方案的改进之一是在 CCM2 辐射方案的短波辐射参数化中增加了大气气溶胶的影响。采用 Kiehl 等^[23]的计算方法,在模式所划分的 18 个短波波段 ($0.2 \sim 5.0 \mu\text{m}$) 中分别给出各种气溶胶的光学特性(质量消光系数,单次散射反照率和不对称因子)。其中黑碳气溶胶的光学厚度通过以下两个公式求得

$$a_1 = 1.0 \times 10^5 \times m_r \times p_{\text{ath}} \times e_1 \times (1 - r_h)^{-0.25}, \quad (1)$$

$$a_b = 1.0 \times 10^5 \times m_r \times p_{\text{ath}} \times e_b. \quad (2)$$

式中: a_1 为亲水性黑碳气溶胶光学厚度; a_b 为非亲水性黑碳气溶胶光学厚度; e_1 为亲水性黑碳气溶胶质量消光系数; e_b 为非亲水性黑碳气溶胶质量消光系数; $p_{\text{ath}} = (p_{k+1} - p_k) / g$; p_{k+1} 、 p_k 分别为模式 $k+1$ 层和 k 层界面气压; g 为重力加速度; r_h 为相对湿度; m_r 为黑碳气溶胶质量混合比, m_r 通过公式 (3) 计算得到

$$m_r = \frac{g \times}{10^4 \times k^* \times r_{\text{fac}} \times (1 - g^*) \times (p_s - p_{\text{max}})^0} \quad (3)$$

式中: a 为黑碳气溶胶在可见光波段 (RegCM3 中为 $0.5 \sim 0.7 \mu\text{m}$) 的光学厚度; k^* 、 r_{fac} 、 g^* 分别为黑碳气溶胶在可见光波段的质量消光系数、粒子单次散射反照率及不对称因子; r_{fac} 为调节系数; p_s 为地表气压; p_{max} 为黑碳气溶胶可达最大高度的气压。

得到黑碳气溶胶的光学厚度,就可以计算出黑碳气溶胶的辐射强迫。本模式中,大气顶和地表辐

射强迫的计算方案为

$$RF_{TOA} = F_{TOA}(BC) - F_{TOA}(0), \quad (4)$$

$$RF_{SUR} = F_{SUR}(BC) - F_{SUR}(0). \quad (5)$$

式中: RF_{TOA} 、 RF_{SUR} 分别为大气顶和地表辐射强迫; $F_{TOA}(BC)$ 、 $F_{SUR}(BC)$ 分别为有黑碳气溶胶时大气顶和地表的辐射通量; $F_{TOA}(0)$ 、 $F_{SUR}(0)$ 分别为无黑碳气溶胶时大气顶和地表的辐射通量。模式运算时会分别计算有黑碳气溶胶和无黑碳气溶胶时大气顶和地表的辐射通量,黑碳气溶胶的辐射强迫作为两者的差值在输出结果直接得到。

1.2 试验设计及模式主要参数设置

模拟试验区域中心位于 (105 E, 35 N), 模式水平分辨率取为 60 km, 水平网格点数 112 × 76, 覆盖范围包括整个中国大陆及周边地区, 图 1 是模式对模拟区域地形的模拟。模式垂直方向分 18 层, 顶层高度为 50 hPa, 积分时间步长 200 s, 缓冲区为 12 圈。模式中辐射方案采用 NCAR CCM 3 方案, 陆面过程使用 BATS1e (生物圈—大气圈传输方案), 其他物理参数方案和过程采用: 侧边界条件选择指数松弛方案, Holtslag 行星边界层方案, Grell 积云参数化方案, Subex 大尺度降水方案, Zeng 海洋通量参数化方案。模式初始和边界资料采用美国环境预报中心 (NCEP) 每日 4 次、水平分辨率为 2.5° × 2.5 的再分析资料, 植被和土地利用资料选用分辨率为 10 的全球陆地覆盖特征数据集 (GLCC), 海温资料来自 NCEP Reynolds 的周平均海温。气溶胶资料通过

ICTP 获取, 该资料黑碳气溶胶源强包括人为活动排放、化石燃料燃烧以及生物质燃烧, 采用全球尺度 1° × 1 的排放清单, 其中来自 Edgar 的人为活动排放源为年平均, 来自 Liousse 的生物质排放源为月平均。试验积分时间从 1999 年 12 月 1 日 00 时至 2001 年 1 月 1 日 00 时, 第一个月作为模式的 spin-up 时间, 分析 2000 年的模拟结果。

2 柱含量分布特征

2.1 年平均分布特征

描述气溶胶分布可以采用光学厚度、瞬时源强或垂直负荷 (又称柱含量) 等特征量。图 2 为本试验模拟的 2000 年我国黑碳气溶胶柱含量分布。由图 2 可见, 黑碳气溶胶柱含量由南向北递减, 大值区主要位于黄河以南、青藏高原以东的广大区域; 最大值出现在中南、四川盆地、湖南、贵州、广西、广东西部和云南南部等地区, 柱含量在 0.6 mg/m² 以上; 东部沿海各省和江淮、黄淮流域下游黑碳气溶胶柱含量在 0.3 ~ 0.4 mg/m² 之间; 青藏高原北部、西北、东北和内蒙等地区柱含量较小, 数值在 0.1 mg/m² 以下。需要指出的是, 不同作者由于模式、参数化方案、黑碳气溶胶资料来源、模拟时期等有所不同, 计算结果也存在一定差异。

上述分布特征可以从我国黑碳气溶胶主要排放源的分布情况分析。曹国良等^[24]曾汇总基础数据, 计算出 2000 年我国黑碳气溶胶不同来源的排放

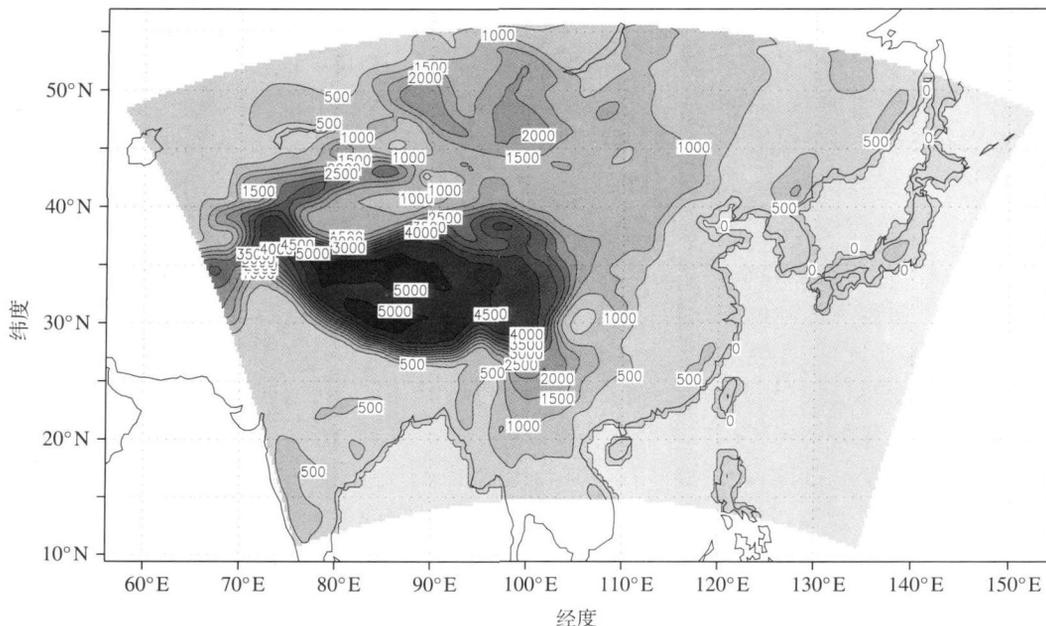


图 1 模拟区域 (阴影区) 及地形高度 (实线; 单位: m)

Fig 1 The simulation domain (shaded area) and terrain (solid line; units: m)

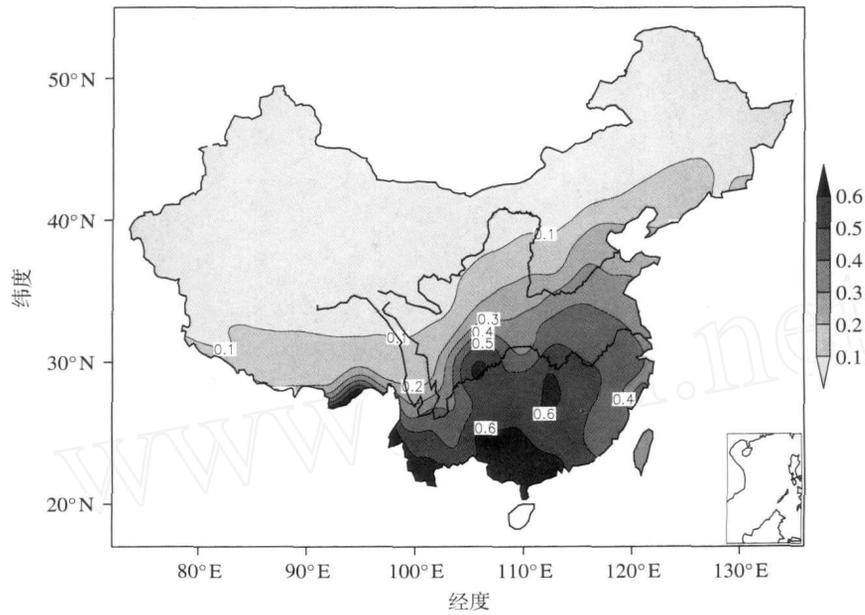


图 2 黑碳气溶胶年平均分布 (单位: mg/m^2)

Fig 2 Yearly averaged distribution of black carbon aerosols (units: mg/m^2)

量。结果指出,居民生活所产生的黑碳排放量最大,达 81.76 万 t,占排放总量的 54.5%;其次是工业生产排放 54.39 万 t,占排放总量的 36.3%。这两个途径产生的黑碳就占总排放量的 90.8%,是黑碳气溶胶的主要排放源。生物质燃烧、交通和发电产生的黑碳相对较小,只占总排放量的 9.2%。我国东、南部,特别是珠江三角洲地区,无论人口密度还是工业发展水平都较西部和北部高,居民生活和工业生产这两个主要排放源的黑碳排量比较大,造成这个地区柱含量相对其他地区要高的多;生物质燃烧产生的黑碳占总排量的 6.9%,机动车数量在经济发达的南方地区增加很快,排放的尾气含有较多的黑碳。另外,四川盆地由于地形复杂,境内多高山、丘陵,不利于污染物的扩散和输送,加之该地区风场较其他地区要弱,也抑制了污染物的扩散,从而使得该地区黑碳气溶胶柱含量较周边地区大。

观测和模拟结果表明,由于东亚地区排放源较密集,亚洲季风使不同季节大气环流特征变化显著,可以造成黑碳气溶胶的远距离输送。为了反映这种输送特点,参考吴润等^[25]的做法,将 850 ~ 700 hPa 层的平均流场与黑碳气溶胶分布图迭加(图 3)。由图可见,印支半岛和孟加拉湾地区是黑碳气溶胶分布的两个大值区,在 30°N 以南的输送方向基本自西南向东北,源自印度半岛、孟加拉湾北部的黑碳气溶胶排放,在西南气流的输送下沿青藏高原东南麓进入我国中南地区,而印支半岛的黑碳气溶胶排放

则在西南气流的输送下进入我国华南地区。近年来,印度和印支半岛的大部分国家经济发展迅速,工业和农业烧荒等排放了大量黑碳,源自这些国家的黑碳气溶胶对我国的输送不可小视。据对春季黑碳气溶胶输送量的估算^[25],这些国家对我国大陆地区的黑碳气溶胶输送量远大于我国对下游地区的输出量,这是导致我国南方黑碳气溶胶柱含量比西北和北部大部分地区要高的重要原因之一。

另一个值得注意的事实是青藏高原南侧存在一个黑碳气溶胶次高值区。青藏高原南部人口稀少,工业也不发达,但黑碳气溶胶含量却较高,显然是来自印度次大陆高强度人类活动造成的。山区易于使气溶胶堆积^[26-27],受喜马拉雅山脉和横断山脉等地形的阻挡,来自印度半岛的黑碳气溶胶在高空气流的引导下在这里堆积,形成该区气溶胶浓度的大值区。这反映了气溶胶的跨国界输送并对区域气候产生影响的特点。下文的分析可见,这里的跨国界气溶胶输送对辐射强迫的贡献还是十分明显的。

2.2 季平均分布

表 1 为由试验模拟得出的我国黑碳气溶胶主要分布区域(90 ~ 120°E, 20 ~ 40°N)各季柱含量区域平均值。由表可见,黑碳气溶胶柱含量分布具有明显的季节性。春季柱含量最大,达 0.50 mg/m^2 ;冬季略小于春季,为 0.49 mg/m^2 ;秋季为 0.36 mg/m^2 ;夏季柱含量最小,为 0.25 mg/m^2 ,只占春季 50%。下面简要分析各季黑碳气溶胶的分布特征(图 4)及

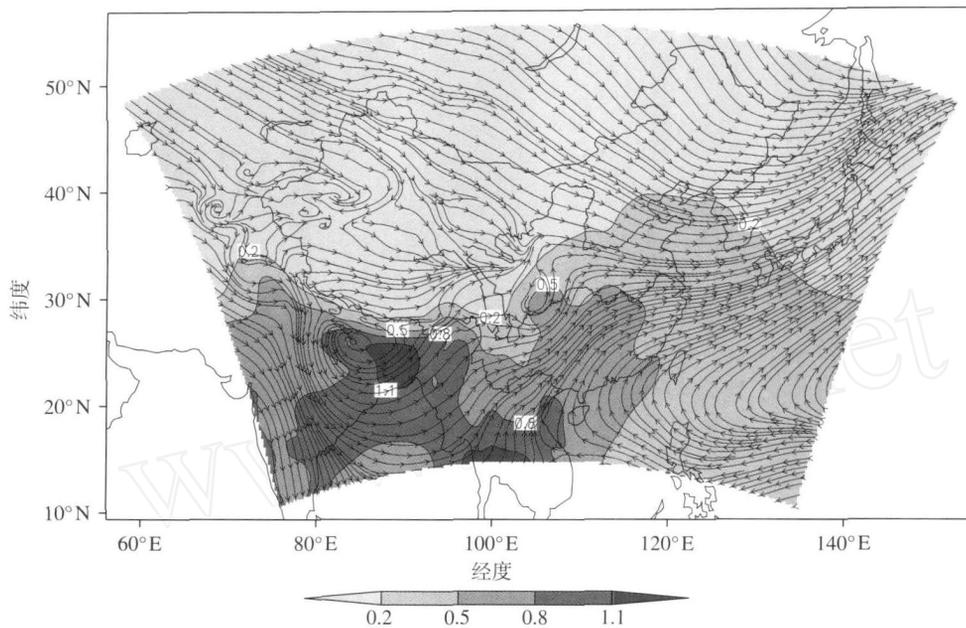


图 3 模拟区域 2000 年黑碳气溶胶柱含量 (阴影区; 单位: mg/m^2) 与 850 ~ 700 hPa 层平均输送场 (流线)

Fig 3 Column burden of black carbon aerosols (shaded area; units: mg/m^2) over the simulation domain and its averaged horizontal transportation field between 850 and 700 hPa (stream line)

影响其分布的原因。

春季, 柱含量由南向北递减, 最大值位于两广南部地区, 数值在 $1 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上; 长江以南大部分地区柱含量都在 $0.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上; 华东沿海以及江淮、黄淮流域下游柱含量在 $0.4 \sim 0.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ 之间; 四季柱含量低于 $0.1 \text{ mg}/\text{m}^2$ 地区与年平均分布基本一致, 即青藏高原北部、西北、东北大部、内蒙等地区。春季黑碳气溶胶柱含量的分布, 除了受各排放源的影响, 还与春季冬季季风的减弱、副热带高压逐渐加强以及我国东部地区稳定的天气形势而造成黑碳气溶胶浓度较高^[28]等有关。

夏季, 受强劲的夏季风作用, 黑碳气溶胶大致呈东南—西北走向分布。柱含量值比春季小的多, 大值区位于我国东南部, 四川盆地、山东南部—湖北—广西—一线以东除福建、浙江、台湾部分地区外, 柱含量均在 $0.3 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上; 最大值位于两广南部地区, 柱含量在 $0.4 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上。降水过程是黑碳气溶胶的主要清除机制。夏季我国夏季风带来丰沛的降水, 湿沉降过程能有效清除所有黑碳气溶胶可溶性粒子和不可溶粒子, 这是造成夏季黑碳气溶胶含量较低的主要原因。

秋季, 黑碳气溶胶大值区位于高原东侧、黄河以南的广大地区, 四川盆地、中南地区有两个极大值中心, 柱含量在 $0.6 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上; 从这两个大值中心向

外柱含量递减。秋季黑碳气溶胶柱含量的分布特征, 除了居民生活和工业源, 生物质燃烧排放的黑碳不可小视。秋季是我国大部分地区农作物收获季节, 农作物秸秆的燃烧产生大量的黑碳, 这部分的贡献比其他季节都要高。另外, 华南后汛期的降水对黑碳气溶胶的清除造成了华南地区柱含量值较中南地区和四川盆地要低。

冬季, 黄河以南黑碳气溶胶柱含量由西南向东北递减, 最大值在 $1 \text{ mg}/\text{m}^2$ 以上, 位于云南边境地区。出现上述特征除排放源影响外, 还有以下原因: 一是冬季我国主要受大陆性高压控制, 多偏北风, 我国北方地区冬季供暖等产生的大量黑碳气溶胶由高空偏北气流源源不断地输送到南方; 二是我国北方地区冬季多雨雪天气, 雨雪对黑碳气溶胶有较强的清除作用。以上原因造成冬季黑碳气溶胶主要分布区的范围在四季中最小。

表 1 各季黑碳气溶胶柱含量区域平均值

Table 1 Regional averaged column burden of black carbon aerosols for different seasons mg/m^2

	春季	夏季	秋季	冬季
柱含量	0.50	0.25	0.36	0.49

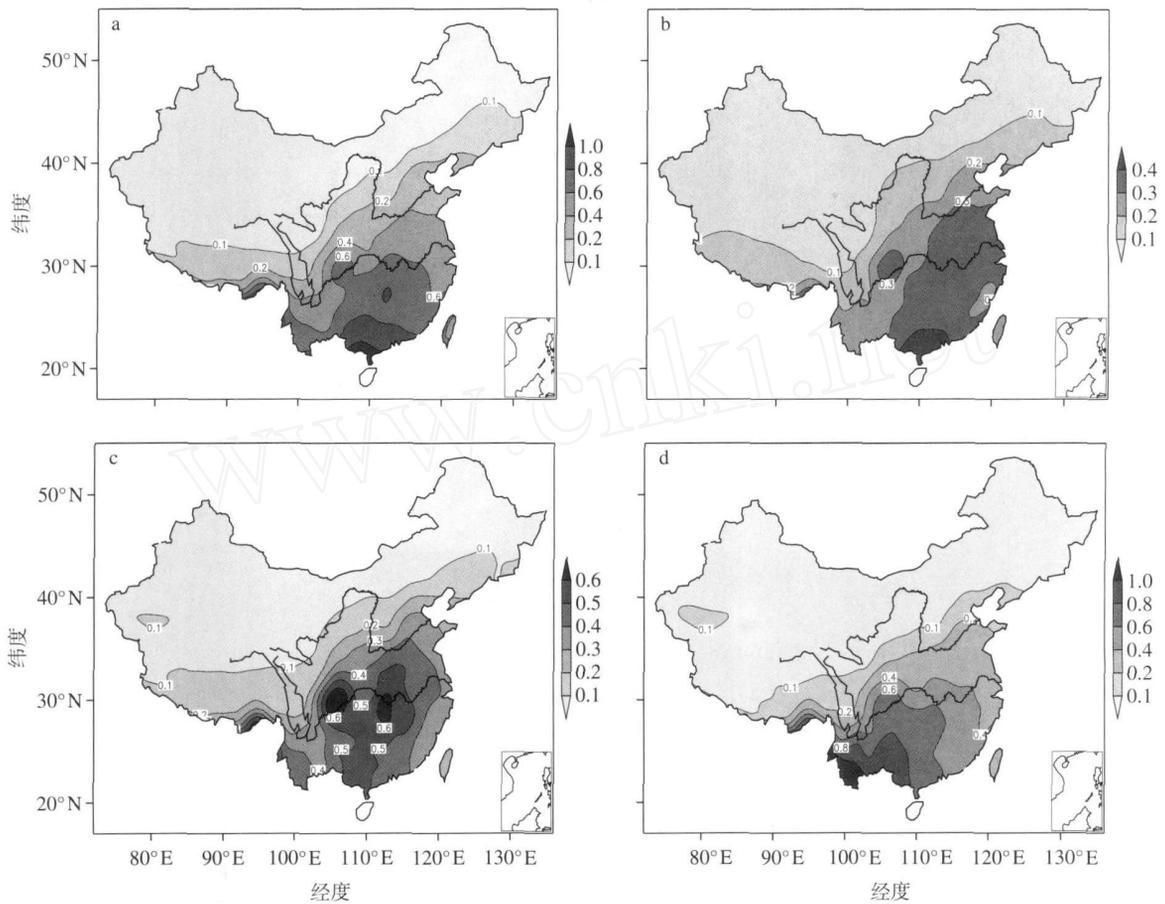


图 4 黑碳气溶胶各季柱含量分布 (单位: mg/m^2) a 春季; b 夏季; c 秋季; d 冬季

Fig 4 Seasonal distributions of the column burden of black carbon aerosols (units: mg/m^2) a spring; b summer; c autumn; d winter

3 辐射强迫分布

3.1 大气顶辐射强迫分布

黑碳气溶胶是大气中吸收太阳辐射的主要成分,它的辐射特性不同于 CO_2 和 CH_4 , CO_2 和 CH_4 仅在有限的几个波段吸收和发射太阳辐射,而且这几个波段大多位于红外的长波范围内。黑碳气溶胶的吸收波段很广,尤其是在可见光和近红外波段,表现出很强的辐射吸收特性,而太阳辐射的能量主要集中在在这个范围内。黑碳气溶胶对太阳辐射的吸收会造成入射太阳辐射的增加,从而在大气顶导致正的辐射强迫。

图 5 给出了黑碳气溶胶年平均大气顶辐射强迫分布。由图 5 可见,大气顶辐射强迫大值区主要位于黄河以南,其中以西藏南部数值最大,最大值在 $0.8 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上;次大值区位于四川盆地、中南和华南地区,中心数值在 $0.6 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上。我国东南部地区的辐射强迫高值区与黑碳气溶胶柱含量相关性较

好,而云南南部和西藏东南部大气顶辐射强迫与柱含量的相关性不高,原因在于气溶胶辐射强迫的大小与气溶胶光学厚度值之间的关系受到云、入射太阳辐射、地表反照率和吸收气体含量等诸多因素的影响^[29-30],其中云是最不确定的因子^[31]。

IPCC TAR^[32] 给出,来自化石燃料的黑碳气溶胶全球平均辐射强迫为 $0.2 \text{ W}/\text{m}^2$ ($0.1 \sim 0.4 \text{ W}/\text{m}^2$); IPCC AR4^[33] 给出化石燃料燃烧和生物质燃烧产生的黑碳气溶胶在大气顶造成的辐射强迫分别为 $0.44 \pm 0.13 \text{ W}/\text{m}^2$ 和 $0.29 \pm 0.15 \text{ W}/\text{m}^2$ 。在本文研究中,中国地区黑碳气溶胶大气顶辐射强迫基本介于 $0.1 \sim 0.8 \text{ W}/\text{m}^2$ 之间,数值相对比较合理。由此可见,区域气候模式 RegCM3 中气溶胶模型比较理想。

大气顶辐射强迫的季节性变化与柱含量相同,春季最大,秋、冬季次之,夏季最小(图略)。

3.2 地表辐射强迫分布

黑碳气溶胶对太阳辐射的强烈消光作用必然导

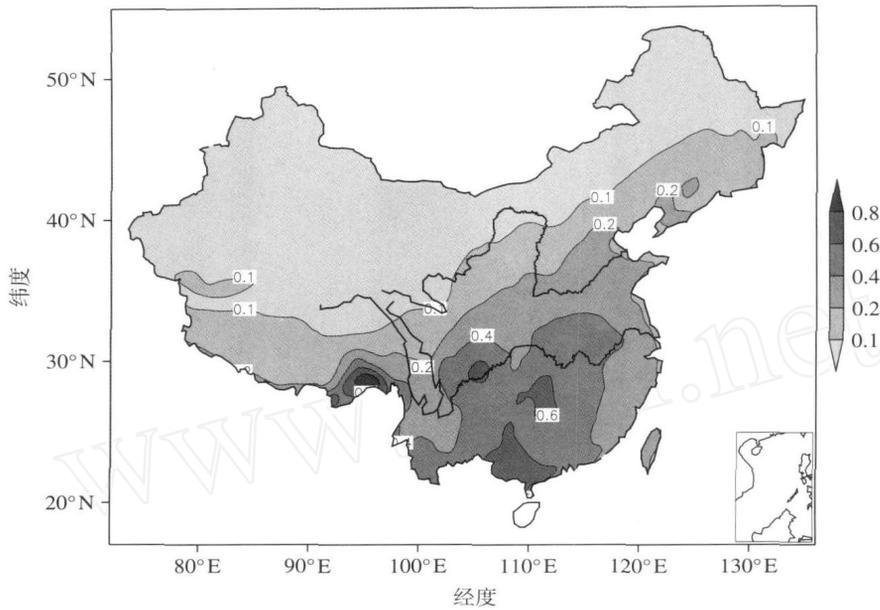


图 5 大气顶辐射强迫年平均分布 (单位: W/m^2)

Fig 5 Yearly averaged distribution of radiative forcing at the TOA (units: W/m^2)

致到达地表的辐射通量减少,产生负的辐射强迫,进而对气候产生重要影响。图 6 为黑碳气溶胶年平均地表辐射强迫分布。由图 6 可见,地表辐射强迫大值区主要分布在高原以东、黄河以南的广大地区,在 $-0.4 W/m^2$ 以上;长江以南绝大部分地区地表辐射强迫在 $-1.2 W/m^2$ 以上;极大值区位于两广南部地区,数值在 $-2.0 W/m^2$ 以上。

比较图 2、5、6 发现,地表辐射强迫分布特征与柱含量、大气顶辐射强迫分布特征均有一定的相似性,但也有差异。同各季大气顶辐射强迫不同,各季地表的辐射强迫均为负值,但数值比大气顶辐射强迫明显增大;受偏南夏季风影响,黑碳气溶胶从华南向江淮流域扩散,辐射强迫大值区在夏季向北延伸扩展明显。黑碳气溶胶主要与人类活动有关,其源在大气边界层内,因此对地面辐射强迫影响更为直接,这也是地面辐射强迫与大气顶辐射强迫存在差异的主要原因。

表 2 给出了黑碳气溶胶各季大气顶和地表辐射强迫的区域 (90 ~ 120°E, 20 ~ 40°N) 平均值。由表可见,大气顶辐射强迫和地表辐射强迫 (图略) 也具有明显的季节性。同柱含量分布的季节性相同,大气顶辐射强迫和地表辐射强迫也是春季辐射强迫最大,分别为 $0.49 W/m^2$ 和 $-1.53 W/m^2$; 冬季次之,为 $0.38 W/m^2$ 和 $-1.17 W/m^2$; 夏季最小,为 $0.25 W/m^2$ 和 $-0.83 W/m^2$, 分别只有春季的 51% 和 54%。本区域大气顶辐射强迫和地表辐射强迫

与柱含量的相关系数分别为 0.896 和 0.985,说明相对于大气顶辐射强迫,地表辐射强迫受柱含量的影响更大。

表 2 各季大气顶辐射强迫和地表辐射强迫的区域平均值

	Regional averaged radiative forcing at the TOA and the ground surface in different seasons W/m^2			
	春季	夏季	秋季	冬季
大气顶辐射强迫	0.49	0.25	0.29	0.38
地表辐射强迫	-1.53	-0.83	-0.95	-1.17

4 结论

本文利用区域气候模式 RegCM3 模拟研究了 2000 年我国黑碳气溶胶分布特征和辐射强迫,主要得出以下结论:

(1) 黑碳气溶胶柱含量由南向北递减,主要分布在黄河以南、青藏高原以东的广大区域;大值区出现在中南、四川盆地、湖南、贵州、广西、广东西部和云南南部等地区,柱含量在 $0.6 mg/m^2$ 以上;青藏高原北部、西北、东北和内蒙等广大地区柱含量较小,在 $0.1 mg/m^2$ 以下。柱含量分布具有明显的季节性,春季最大,冬季次之,夏季最小。黑碳气溶胶的分布特征除受排放源影响外,还与各季气候、天气形势有关。青藏高原南侧黑碳气溶胶次高值区的存在反映了气溶胶的跨国界输送并对区域气候产生影响的特点。

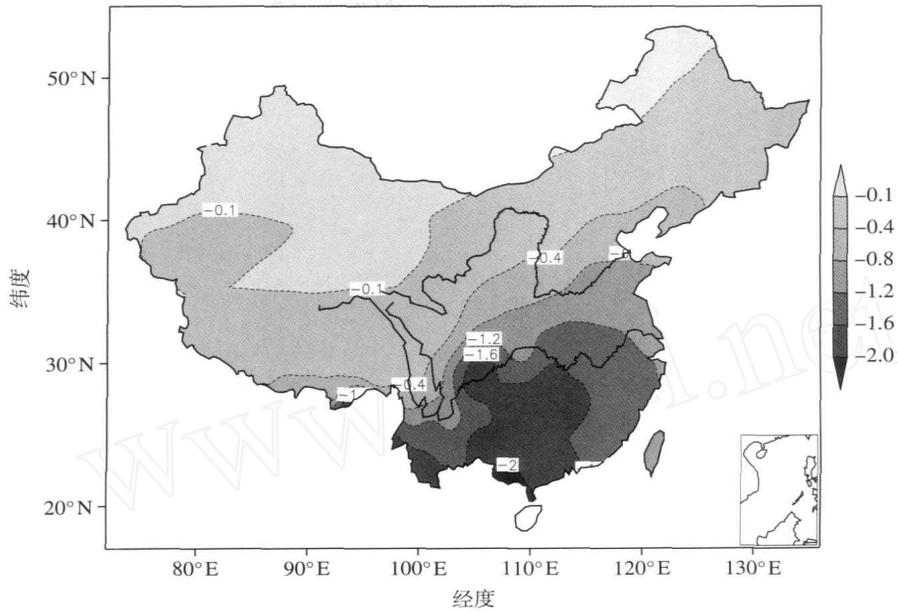


图 6 地表辐射强迫的年平均分布 (单位: W / m^2)

Fig 6 Yearly averaged distribution of surface radiative forcing (units: W / m^2)

(2)黑碳气溶胶在大气顶产生正的辐射强迫,大值区主要位于黄河以南、青藏高原以东的广大区域,其中以西藏东南部最大,在 $0.8 W / m^2$ 以上;次大值区位于四川盆地、中南和华南地区,中心数值在 $0.6 W / m^2$ 以上。大气顶辐射强迫与 IPCC 相比较合理,说明区域气候模式 RegCM 3 中的气溶胶模型比较理想。

(3)黑碳气溶胶在地表产生负的辐射强迫,地表辐射强迫大值区主要分布在高原以东、黄河以南的广大地区,数值在 $-0.4 W / m^2$ 以上;长江以南绝大部分地区地表辐射强迫在 $-1.2 W / m^2$ 以上;极大值区位于两广南部地区,数值在 $-2.0 W / m^2$ 以上。黑碳气溶胶主要与人类活动有关,其源在大气边界层内,对地面辐射强迫影响更为直接,这是地面辐射强迫与大气顶辐射强迫存在差异的主要原因。

(4)大气顶辐射强迫和地表辐射强迫也具有明显的季节性。同柱含量分布的季节性相同,大气顶辐射强迫和地表辐射强迫也是春季辐射强迫最大,秋、冬季次之,夏季最小。大气顶辐射强迫和地表辐射强迫与柱含量的相关系数分别为 0.896 和 0.985,说明相对于大气顶辐射强迫,地表辐射强迫受柱含量的影响更大。

当然,由于黑碳气溶胶辐射强迫作用的机制比较复杂,辐射模式本身也还不很完善,因此对黑碳气溶胶辐射强迫效应的估算还不够精确。另外,由于黑碳气溶胶在大气中停留时间相对温室气体较短,

其空间和时间分布也具有很大的差别,全球仍缺少广泛、长期的黑碳气溶胶浓度观测,有关黑碳气溶胶光学性质的参数、尺度分布、垂直分布以及与硫酸盐等其他气溶胶混合方式的实验结果更是缺乏,不能为模式提供大量准确的实验数据基础,这也是造成模式模拟结果还有很大不确定性的主要原因。

本文只是对我国黑碳气溶胶的分布特征和辐射强迫进行了讨论,下一步的工作是研究黑碳气溶胶对我国区域气候如温度、降水、云等的影响,并探讨其对区域气候的影响机制。

参考文献:

- [1] 许黎,王亚强,陈振林,等. 黑碳气溶胶研究进展 I: 排放、清除和浓度 [J]. 地球科学进展, 2006, 21 (4): 352-360.
- [2] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review [J]. Rev Geophys, 2000, 38: 513-543.
- [3] Ito A, Penner J E. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870—2000 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19, GB2028, doi: 10.1029/2004GB002374.
- [4] 白爱娟,翟盘茂. 中国近百年气候变化的自然原因讨论 [J]. 气象科学, 2007, 27 (5): 584-590.
- [5] 张靖,银燕. 黑碳气溶胶对我国区域气候影响的数值模拟 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31 (6): 852-859.
- [6] Kirkevåg A, Iversen T, Dahlback A. On radiative effects of black carbon and sulphate aerosols [J]. Atmos Environ, 1999, 33: 2621-2635.

- [7] Chuang C C, Penner J E, Prospero J M, et al Effects of anthropogenic aerosols on cloud susceptibility: A sensitivity study of radiative forcing to aerosol characteristics and global concentration [R]//Lawrence Livermore National Laboratory Internal Report, NA UCRL-JC-139097 Rev. 1. CA, USA, 2000.
- [8] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming[J]. J Geophys Res, 2002, 107(D19), 4410.
- [9] Wang C. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols [J]. J Geophys Res, 2004, 109, D03106, doi: 10.1029/2003JD004084.
- [10] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos[J]. Proceeding of National Academy Science of the United States of America, 2004, 101(2): 423-428.
- [11] Frazer L. Seeing through soot[J]. Environmental Health Perspectives, 2002, 110(8): A471-A473.
- [12] 张立盛. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟和估算 [D]. 北京:中国科学院大气物理研究所, 1999.
- [13] 张立盛, 石广玉. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射特性及辐射强迫的模拟估算 [J]. 大气科学, 2001, 25(2): 231-242.
- [14] 张华, 马井会, 郑有飞. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1147-1158.
- [15] Zhang H, Wang Z L, Guo P W, et al A modeling study of the effects of the direct radiative forcing due to carbonaceous aerosol on the climate in East Asia [J]. Adv Atmos Sci, 2009, 26(1): 57-66.
- [16] 延昊, 矫梅燕, 毕宝贵, 等. 国内外气溶胶观测网络发展进展及相关科学计划 [J]. 气象科学, 2006, 26(1): 110-117.
- [17] 高润祥, 牛生杰, 张华, 等. 2006年春季西北地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 655-661.
- [18] 杨琨, 孙照渤, 倪东鸿. 1999—2003年我国气溶胶光学厚度的变化特征 [J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 92-96.
- [19] 马井会, 郑有飞, 张华. 黑碳气溶胶光学厚度的全球分布及分析 [J]. 气象科学, 2007, 27(5): 549-556.
- [20] Liousse C, Penner J E, Chuang C C, et al A global three dimensional model study of carbonaceous aerosols [J]. J Geophys Res, 1996, 101: 19411-19432.
- [21] Cooke W F, Wilson J J N. A global carbon aerosol model [J]. J Geophys Res, 1996, 101: 19395-19409.
- [22] Grant K E, Chuang C C, Grossman A S, et al Modeling the spectral optical properties of ammonium sulfate and biomass aerosols: Parameterization of relative humidity effects and model results [J]. Atmos Environ, 1999, 33: 2603-2620.
- [23] Kiehl J T, Briegleb B P. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing [J]. Science, 1993, 260: 311-314.
- [24] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单 [J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 259-264.
- [25] 吴润, 符淙滨. 近五年来东亚春季黑炭气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究 [J]. 大气科学, 2005, 29(1): 111-119.
- [26] 付培健, 张镭, 张文煜, 等. 河谷城市低空风温场观测研究 [C]//陈长和. 复杂地形上的大气边界层和大气扩散. 北京: 气象出版社, 1993: 12-17.
- [27] 陈长和, 黄建国, 王海啸, 等. 兰州烟雾层的辐射效应及其混合层发展的影响 [C]//陈长和. 复杂地形上的大气边界层和大气扩散的研究. 北京: 气象出版社, 1993: 1-11.
- [28] 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 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 46-51.
- [29] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国气溶胶研究综述 [J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
- [30] 邱金桓, 吕达仁, 陈洪滨, 等. 现代大气物理学研究进展 [J]. 大气科学, 2003, 27(4): 628-652.
- [31] 毛节泰, 李成才. 气溶胶辐射特性的观测研究 [J]. 气象学报, 2005, 63(5): 622-634.
- [32] IPCC. Third Assessment Report Climate Change 2001: The scientific basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [33] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2007: The physical scientific basis: Contribution of WG1 to the fourth assessment report of IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

(责任编辑:倪东鸿)