

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. 大气科学, 2008, 32 (5): 1147~1158

Zhang Hua, Ma Jinghui, Zheng Youfei. The study of global radiative forcing due to black carbon aerosol. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (5): 1147~1158

黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究

张华¹ 马井会^{1, 2, 3} 郑有飞²

1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学环境科学与工程系, 南京 210044

3 上海市浦东新区气象局, 上海 200135

摘 要 利用一个改进的辐射传输模式, 结合全球气溶胶数据集 (GADS), 计算晴空条件下冬夏两季黑碳气溶胶的直接辐射强迫在对流层顶和地面的全球分布。计算结果表明, 与温室气体引起的整层大气都是正的辐射强迫不同, 黑碳气溶胶的辐射强迫在对流层顶为正值, 而在地面的辐射强迫却是负值。作者从理论上解释了造成这种结果的原因。对北半球冬季和夏季而言, 在对流层顶黑碳气溶胶的全球辐射强迫的平均值分别为 0.085 W/m^2 和 0.155 W/m^2 , 在地面则分别为 -0.37 W/m^2 和 -0.63 W/m^2 。虽然气溶胶的辐射强迫主要依赖于其本身的光学性质和在大气中的浓度, 太阳高度角和地表反照率对黑碳气溶胶的辐射强迫会产生很大的影响。研究指出: 黑碳气溶胶在对流层顶正的辐射强迫和在地面负的辐射强迫的绝对值都随太阳天顶角的余弦和地表反照率的增加线性增大; 地表反照率对黑碳气溶胶辐射强迫的强度和分布都有重要影响。黑碳气溶胶的辐射强迫分布具有明显的纬度变化特征, 冬夏两季的大值区都位于 $30^\circ\text{N} \sim 90^\circ\text{N}$ 之间, 表明人类活动是造成黑碳气溶胶辐射强迫的主要原因。

关键词 黑碳气溶胶 直接辐射强迫 辐射传输模式 地表反照率 太阳天顶角

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1147-12

中图分类号 P422

文献标识码 A

The Study of Global Radiative Forcing due to Black Carbon Aerosol

ZHANG Hua¹, MA Jinghui^{1, 2, 3}, and ZHENG Youfei²

1 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081

2 *Department of Environmental Sciences and Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044

3 *Pudong New Area Weather Office, Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai* 200135

Abstract Combining the global distributions of black carbon (BC) mass concentration given by GADS (Global Aerosol Data Set), The direct radiative forcing due to BC have been calculated with an improved radiative transfer model under clear sky in both winter and summer. The results show that the radiative forcing by BC is positive at the tropopause and negative at the surface, which is different from the positive radiative forcing of greenhouse gases through the whole atmosphere. The reason is explained theoretically in this paper. The global mean forcing values are 0.085 W/m^2 for winter and 0.155 W/m^2 for summer at the tropopause, while they are -0.37 W/m^2 for winter and -0.63 W/m^2 for summer at the surface. Although the radiative forcing due to BC is highly dependent on the

收稿日期 2007-01-22, 2007-07-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403707, 科技部公益性行业(气象)科研专项经费 GYHY200706036

作者简介 张华, 女, 1965 年出生, 博士, 研究员, 目前主要从事大气辐射传输模式, 温室气体与气溶胶辐射强迫与气候效应研究。

E-mail: huazhang@cma.gov.cn

optical properties of itself and its concentration in the atmosphere, surface albedo and zenith angle also influence the forcing greatly. It is pointed out in this work that the absolute values of radiative forcing due to BC at both the tropopause and the surface increase linearly with the cosine of zenith angle and the surface albedo. The distribution of BC radiative forcing relies significantly on the latitude change, its maximum value is located between 30°N and 90°N for both winter and summer, which shows that anthropogenic activities are the main cause for BC radiative forcing.

Key words BC aerosol, radiative forcing, radiative transfer model, surface albedo, zenith angle

1 引言

黑碳气溶胶可以通过改变地面反照率来改变地面潜热和感热通量以及地面净长波发射通量,从而改变边界层的热力结构来影响行星边界层高度,并通过其直接(间接)辐射强迫影响低云量和对流性降水,继而影响全球水循环,并因此对全球尺度的气候变化产生影响。近年来,有关黑碳气溶胶辐射强迫的研究成为国际科学界研究的热点^[1, 2]。

气溶胶中的黑碳和有机碳分别是含碳燃料不完全和完全燃烧排放出来的细颗粒物,是大气气溶胶的重要组成部分。自工业革命以来,由于世界人口数量快速增长,对能源的需求量和消耗量持续增加,大量使用煤、石油等化石燃料,以及出于农业目的的生物焚烧大大增加等因素,造成黑碳和有机碳气溶胶在大气中的排放量持续增加。同时,随着汽车工业的迅速发展,由汽车尾气带来的黑碳气溶胶排放也成为大气,尤其是城市区域大气黑碳和有机碳气溶胶的重要来源。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^[3]。Ito 和 Penner^[4]指出,由于化石燃料燃烧排放的黑碳气溶胶在 2000 年大约为 2.8 t/a,其变化趋势在 1950~2000 年间,英国、德国、前苏联以及美国具有明显减少的趋势,而印度和中国却是显著增加的。Novakov 等^[5]指出,由于美国、欧洲和亚洲经济的快速发展,就全球而言,由化石燃料燃烧产生的黑碳气溶胶排在 1950 年~1990 年间增加了 3 倍(2.2~6.7 t/a),近年来由于加强了对排放的进一步控制,目前已降到 5.6 t/a 左右。

黑碳气溶胶是目前不确定性最大、自 IPCC^[1]以来倍受关注的气溶胶种类之一。原因是黑碳气溶胶在光学性质上与其他气溶胶组分有很大差别,它对从可见光到红外波长范围内的太阳和大气辐射都有强烈的吸收作用,与某些大气温室气体如 CO₂、CH₄、CFCs 等相比,具有更宽的吸收波段,与沙尘

气溶胶相比,其质量吸收系数要大两个数量级^[6],所以,尽管黑碳气溶胶在总的气溶胶含量中所占的比例较小,由于它的上述光学性质导致其像温室气体一样会使全球气候变暖,并因此受到国际学术界和各国政府的极大关注。在印度洋试验期间^[7]对气溶胶进行的观测发现:吸收性气溶胶在大气中起着举足轻重的作用,当黑碳气溶胶位于高地表反照率的上空时(例如在雪面、冰面或云上时),会使对流层顶正的辐射强迫大大增加^[2, 8]。IPCC^[2]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±0.13 W/m² 和 0.29±0.15 W/m²,不确定性很大,目前的科学理解水平仍然很低^[2],值得给予进一步的研究。

国内,张瑛等^[9]从理论上研究黑碳与硫酸盐气溶胶在不同体积混合比和不同浓度下的辐射强迫,指出黑碳气溶胶的辐射强迫依赖于气溶胶的浓度和混合方式;张立盛^[10, 11]利用 GCM 对全球烟尘气溶胶(包括黑碳和有机碳)的辐射强迫进行了模拟,得到其全球平均的辐射强迫为 0.22 W/m²;吴润等^[12]通过研究指出,黑碳气溶胶对太阳辐射存在较强的吸收,应用区域气候模式的初步模拟结果表明其直接辐射效应是显著的。

本文利用 Zhang 等^[13~15]改进的 BSTAR5C/CCSR/NCC 辐射传输模式和全球气溶胶数据集(Global Aerosol Data Set,简称 GADS)^[16, 17],计算了晴空条件下黑碳气溶胶辐射强迫在冬夏两季的全球分布,并探讨了各种因子对黑碳气溶胶辐射强迫的影响,为今后利用全球气候系统模式开展黑碳气溶胶气候效应的研究奠定了基础。

本文第二部分介绍数据来源和所用的辐射传输模式;第三部分给出黑碳气溶胶的全球浓度分布;第四部分计算黑碳气溶胶的全球光学厚度分布;黑碳气溶胶的晴空直接辐射强迫结果在第五部分给出;第六部分是结论。

2 数据和模式介绍

本文所用的全球气溶胶数据集 (GADS)^[16, 17] 综合了大量不同的观测和模式模拟分析结果, 其中包括气溶胶主要观测试验, 如 ACE-1 (First Aerosol Characterization Experiment)^[18] 和 TARFOX (Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment)^[19]。由 GADS 给出的气溶胶浓度是冬季和夏季的气候平均值, 在全球的经纬度分辨率是 $5^\circ \times 5^\circ$ 。由于气溶胶浓度的分布具有时间和空间上的可变性和不确定性, 该数据集在全球尺度上考虑了天气学和气候学的影响因素, 如风、云量、降水、工业生产力、地表状况以及人口等, 对于没有资料或者资料稀少的地区, 其浓度资料采用的是与其环境状况相似的其他地区的资料。有关 GADS 的详细情况参阅文献^[16, 17]。必须指出的是, 因为 GADS 采用季节气候平均值和粗网格分辨率, 黑碳气溶胶的浓度分布在某些地区有可能是失实和不正确的, 特别对于不经常发生的高浓度事件的地方, 有可能将高浓度值平滑掉。所以, 对于某些地区该数据集不能代表气溶胶的实际分布状况。然而到目前为止, 由于缺乏黑碳气溶胶的全球浓度分布的长期观测资料, GADS 仍然被 IPCC^[2] 作为气溶胶气候效应研究的基础资料, 同时, 由于它能够提供一个初步定量化的全球气溶胶分布的气候模型, 因此到目前为止仍然被广泛用于气溶胶辐射强迫和气候效应的研究中^[20~22]。

本文的辐射强迫计算采用 Zhang 等^[13~15] 改进的 BSTAR5C/CCSR/NCC 辐射传输模式。其中, 气溶胶的散射和吸收性质、辐射传输算法采用 Nakajima 等^[23] 的方法, 模式的谱带划分和温室气体吸收算法采用 Zhang 等^[13~15, 24] 的方法。按照波长分为 17 个带, 其中长波 8 个带, 短波 9 个带, 包括黑碳、沙尘等 9 种主要气溶胶类型^[23] 和 11 种温室气体。在计算中, 全球大气廓线的网格分辨率采用 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$ 的水平网格, 垂直分为 32 层, 其中气温、气压和水汽资料采用加拿大气候模式 (CCCma GCM)^[25] 输出的结果; 黑碳气溶胶浓度的全球分布取自 GADS, 将原数据 $5^\circ \times 5^\circ$ 的格点资料采用三次样条方法插值到 $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$ 的水平网格; 臭氧浓度资料采用 ECMWF 月平均浓度再分析资料。主要温室气体的浓度 (单位: 体积百万

分之一) 分别是: 二氧化碳浓度采用 IPCC^[2] 给出的最新浓度 380×10^{-6} , 甲烷、氧气和氧化亚氮分别为 1.776×10^{-6} 、 209000×10^{-6} 和 0.314×10^{-6} , 卤碳化合物 CFC11、CFC12、CCl4、CFC22 的浓度分别为 1.02×10^{-10} 、 2.68×10^{-10} 、 5.33×10^{-10} 、 1.32×10^{-10} 。

地面植被覆盖采用加拿大 NARCM 给出的资料^[26], 将地表分为 15 种类型, 根据以往的研究给出每一种地表植被类型的反照率, 对每一个网格点的地面反照率, 采用该网格周围地区、按照上述模式给出的不同地表植被类型所占面积比例, 进行加权平均得到的地表反照率。本文没有考虑地面反照率随入射波长的变化, 对所有波段取相同的平均反照率。

关于太阳天顶角的计算方案, 是按照不同纬度、不同季节, 并对从日出到日落的白天时段进行平均得到的 (见下文)。

根据球面天文学, 太阳天顶角余弦的计算公式为

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h, \quad (1)$$

式中, φ 为纬度, δ 为赤纬, h 为时角。

24 小时内赤纬发生的最大变化是在二分点, 但小于 0.5° , 因此对于太阳天顶角和方位角计算足够精确的情况, 每天可以采用同一个赤纬值, 这里采用 Spencer^[27] 导出的级数形式, 即

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \theta + 0.070257 \sin \theta - \\ & 0.006758 \cos 2\theta + 0.000907 \sin 2\theta - \\ & 0.002697 \cos 3\theta + 0.001480 \sin 3\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\theta = 2\pi(T-1)/365$, T 为儒略日, 即自元月一日始算的日期。

根据太阳天顶角 Z 的余弦计算公式可以计算日出时间 h_{rise} 和日落时间 h_{set} , 令 $\cos Z = 0$, 则

$$h_{\text{rise}} = -\arccos(\tan \varphi \tan \delta), \quad (3)$$

$$h_{\text{set}} = \arccos(\tan \varphi \tan \delta), \quad (4)$$

其中, 日出时间为负, 日落时间为正, 正午取为零。应当指出, 在高纬度地区, 可能出现极昼极夜, 此时有 $\cos Z \neq 0$ ($|\tan \varphi \tan \delta| > 1$), 则极昼情况 ($\tan \varphi \tan \delta < -1$) 下, $h_{\text{rise}} = -\pi$, $h_{\text{set}} = \pi$; 极夜情况 ($\tan \varphi \tan \delta > 1$) 下, $h_{\text{rise}} = 0$, $h_{\text{set}} = 0$ 。

为了计算任一时段 $\Delta t = t_1 - t_2$ 内平均太阳辐射, 需要计算这段时间内平均的太阳天顶角余弦^[28],

$$\overline{\cos Z^{(t_1, t_2)}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \cos Z \, dt. \quad (5)$$

(t_1, t_2) 时段内平均太阳天顶角的计算分五种情况:

(1) $t_1 \leq h_{\text{rise}} < t_2 \leq h_{\text{set}}$, 计算时间跨越日出,

$$\overline{\cos Z} = \frac{1}{\Delta t} \int_{h_{\text{rise}}}^{t_2} \cos Z \, dt = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_0 \frac{\sin \Delta t}{\Delta t}, \quad (6)$$

其中, $\Delta t = t_2 - h_{\text{rise}}$, $t_0 = h_{\text{rise}} + (t_2 - h_{\text{rise}})/2$.

(2) $h_{\text{rise}} \leq t_1 < t_2 \leq h_{\text{set}}$, 计算时间在白天,

$$\overline{\cos Z} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} \cos Z \, dt = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_0 \frac{\sin \Delta t}{\Delta t}, \quad (7)$$

其中, $\Delta t = t_2 - t_1$, $t_0 = t_1 + (t_2 - t_1)/2$.

(3) $h_{\text{rise}} \leq t_1 \leq h_{\text{set}} < t_2$, 计算时间跨越日落,

$$\overline{\cos Z} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{h_{\text{set}}} \cos Z \, dt = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_0 \frac{\sin \Delta t}{\Delta t}, \quad (8)$$

其中, $\Delta t = h_{\text{set}} - t_1$, $t_0 = t_1 + (h_{\text{set}} - t_1)/2$.

(4) $t_1 < h_{\text{rise}} \leq h_{\text{set}} < t_2$, 日出日落时间极短, 计算时间包括白天的全部,

$$\overline{\cos Z} = \frac{1}{\Delta t} \int_{h_{\text{rise}}}^{h_{\text{set}}} \cos Z \, dt = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t_0 \frac{\sin \Delta t}{\Delta t}, \quad (9)$$

其中, $\Delta t = h_{\text{set}} - h_{\text{rise}}$, $t_0 = h_{\text{rise}} + (h_{\text{set}} - h_{\text{rise}})/2$.

(5) 其他情况,

$$\overline{\cos Z} = 0. \quad (10)$$

将改进的辐射传输模式应用在全球网格后, 分别计算中纬度夏季和热带大气条件下长短波加热率(图略), 与文献[14, 15]应用 ck-D 模式以及逐线积分模式计算的相应大气的长短波加热率相比, 得到了比较一致的结果, 证明该一维辐射传输模式在全球网格的应用是正确的。值得注意的是, 在本文计算中冬季和夏季定义为北半球冬季和夏季, 所以本文的冬季和夏季正好对应于南半球的夏季和冬季。

3 黑碳气溶胶的全球浓度分布

按照 GADS 给出的气溶胶年平均浓度的全球分布, 图 1 给出本文计算的黑碳气溶胶质量浓度冬夏两季的全球分布, 黑碳气溶胶质量浓度分布具有明显的季节和地理差异。陆地高于海洋, 北半球高

于南半球。冬季北极地区的浓度值较高是由于地处中纬的西欧、北美等城市和工业区排放的污染物向极地输送、转化和积累造成的, 另外, 冬季日光不足和极锋南移对其维持也起了重要作用。浓度最大值冬季高于夏季, 与冬季北半球取暖、燃烧量增加有密切关系。冬季最大值 $1.555 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 位于西欧, 夏季最大值 $1.244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 同样也位于西欧。可见, 西欧是世界上黑碳气溶胶浓度最大的地区, 这与其他人的研究结果^[16, 29~32]相同, 可能与西欧工业发达、汽车多以及人口密集等因子有关。有研究表明, 汽车尾气带来的黑碳气溶胶排放是大气, 尤其是城市区域大气中黑碳气溶胶的重要来源^[33]。就东亚而言, 黑碳气溶胶质量浓度大的区域主要位于大城市和重工业区周围(如中国的中部、东部、华北和东北地区), 中国华北和东北排放的黑碳气溶胶向东输送影响朝鲜和日本等地^[34]。中国地区大气边界层黑碳气溶胶浓度最高值位于华北、华东, 浓度随季节变化, 冬季高、夏季低, 冬季浓度高值区位于江苏省。上述结论与 GADS^[16]的结果具有很好的一致性。

4 黑碳气溶胶的全球光学厚度分布

黑碳气溶胶光学厚度是利用 Nakajima 等^[23]给定的黑碳气溶胶的光学参数, 结合 GADS 给出的黑碳气溶胶的全球浓度分布, 由 Zhang 等^[13~15]改进的 BSTAR5C 辐射传输模式计算得到(光学厚度的具体计算公式参阅文献[35])。图 2 给出可见光区间($0.45 \sim 0.83 \mu\text{m}$)黑碳气溶胶光学厚度在冬(12月~2月)、夏(6月~8月)两季的全球分布情况。可以看出: 黑碳气溶胶光学厚度分布具有明显的季节和地理差异。黑碳气溶胶光学厚度陆地大于海洋, 北半球大于南半球, 北半球中高纬地区大于低纬度地区, 冬季大于夏季, 与上述黑碳气溶胶的浓度分布基本呈对应关系。黑碳气溶胶光学厚度在冬季的地理分布特征为: 大值区位于人类活动密集的工业发达地区, 其中西欧、东亚、北美、中东地区都是黑碳气溶胶光学厚度大值区, 说明人类活动对黑碳气溶胶光学厚度的分布会产生较大的影响, 是使黑碳气溶胶光学厚度增加的主要因素。另外值得注意的是, 南亚地区黑碳气溶胶的光学厚度也比较大, 这大概与秸秆的燃烧以及交通工具的使用有很大的关系。

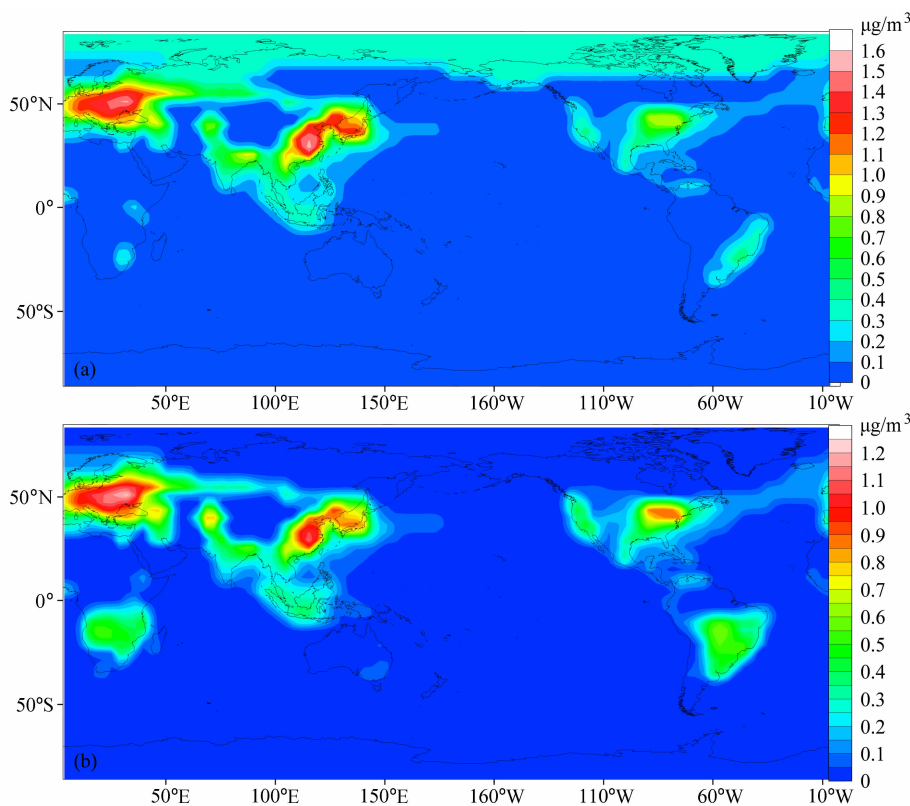


图 1 黑碳气溶胶质量浓度全球分布 (单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$): (a) 冬季; (b) 夏季
Fig. 1 The global distribution of black carbon (BC) mass concentration for winter (a) and summer (b)

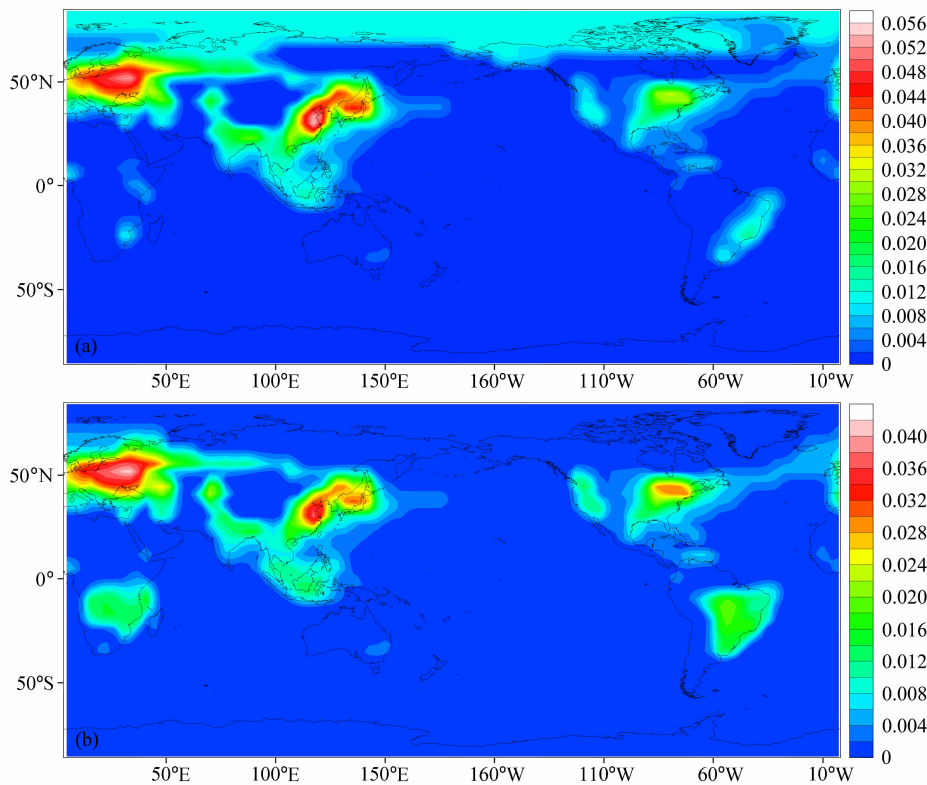


图 2 同图 1, 但为黑碳气溶胶光学厚度 (波长 $\lambda=0.45\sim0.83 \mu\text{m}$)
Fig. 2 Same as Fig. 1, but for BC optical depth (wavelength $\lambda=0.45\sim0.83 \mu\text{m}$)

就中国地区而言,从图 2 可以看出,黑碳气溶胶光学厚度大值区出现在海拔较低、人口相对密集、工业相对发达的华北、华东、华南以及东北地区,而在人口稀少的西北地区黑碳气溶胶光学厚度值很小,这与近年来中国科研工作者得出的结论^[36, 37]有很好的一致性。由图 2 可以看出,光学厚度的分布强烈地受到地形的影响,大值区分布在低海拔地区、以及人口、工业密集地区附近,这些地区、尤其是东亚和北美地区的光学厚度明显偏大,而且影响范围很广。东亚地区的黑碳气溶胶在冬季(图 2a)盛行西风的作用下,可以对几千公里以外的海洋产生影响,夏季由于环流的调整,其影响范围有所减小(图 2b)。值得注意的是,夏季南非和南美洲地区的光学厚度值增大、范围扩大,其原因是南半球冬季取暖所消耗的碳质燃料增加引起大气中黑碳气溶胶浓度的增加所致。黑碳气溶胶光学厚度的上述分布与文献[16]基本一致,说明本文的计算是正确的。

5 黑碳气溶胶晴空直接辐射强迫

晴空辐射强迫的计算方案为^[38]

$$\begin{cases} R_T = \Delta F_{TB} - \Delta F_{TC}, \\ R_S = \Delta F_{SB} - \Delta F_{SC}, \end{cases} \quad (11)$$

式中, R 表示计算的辐射强迫, T 和 S 分别表示在对流层顶和地面, B 和 C 分别表示只有黑碳气溶胶存在的晴空大气和无黑碳气溶胶存在的晴空大气, ΔF 表示层的净辐射通量。计算时,首先不考虑黑碳气溶胶的影响,利用改进的 BSTAR5C 计算晴空大气对流层顶和地面的净辐射通量;然后在计算中考虑黑碳气溶胶的作用,利用 BSTAR5C 再计算对流层顶和地面的净辐射通量,后者与前者在对流层顶和地面的差值即为黑碳气溶胶在对流层顶和地面造成的直接辐射强迫。为了消除其他气溶胶对黑碳气溶胶的辐射强迫的影响,在计算中没有考虑除黑碳气溶胶以外的气溶胶种类。

通过公式(11),黑碳气溶胶在地面和对流层顶造成的辐射强迫符号相反的原因可以解释如下。与温室气体不同,黑碳气溶胶可以吸收部分太阳短波辐射,使得到达地面的太阳辐射减少,因而造成地面负的辐射强迫。与此同时,吸收了太阳辐射的黑碳气溶胶使其所在的局部大气加热,使得该层大气向下的红外辐射增加,是造成

对流层顶黑碳气溶胶正的辐射强迫的主要原因,此外,黑碳气溶胶也会像温室气体一样吸收由地面向上的红外辐射发射,减少了一小部分红外辐射返回太空,也会将对流层顶正的辐射强迫有一定的贡献。黑碳气溶胶的地面辐射强迫也是评价黑碳气溶胶对气候影响的一个主要因子,因此,本文分别计算了冬(12月~2月)、夏(6月~8月)两季的黑碳气溶胶在地面和对流层顶的晴空直接辐射强迫。应该注意的是,通过本研究和前人研究^[39]发现,黑碳气溶胶引起的长波辐射强迫与其引起的短波辐射相比可以忽略,因此本研究只计算了短波辐射强迫。

5.1 对流层顶的辐射强迫

研究表明,由于黑碳气溶胶的存在,使得大气顶和对流层顶的短波辐射强迫增加^[40]。由图 3a 可见,东亚、欧洲地区黑碳气溶胶在对流层顶的辐射强迫普遍超过 1.6 W/m^2 ,美洲东部超过 1 W/m^2 ,而且波及到邻近的广大地区及海域,这表明黑碳气溶胶对全球的辐射收支都有重要影响。辐射强迫的高值区主要位于中国东部地区,幅度超过 3 W/m^2 ,其中最大值超过 3.2 W/m^2 ,与 IPCC^[2]给出的黑碳气溶胶的局地大气顶辐射强迫的最新值 7 W/m^2 比较接近。另外,美国东部、南美洲东部呈现出范围较小的强迫中心。北半球夏季,非洲南部以及南美洲地区黑碳气溶胶的辐射强迫范围加大,强度增强,这是由于非洲南部地处南半球,此时为南半球冬季。非洲地区工业不发达,机动车也比较少,黑碳气溶胶主要来源于生物质燃烧,这是因为非洲南部冬季取暖,秸秆等生物质燃料的使用增加,导致这一地区的辐射强迫增加。对流层顶的辐射强迫不仅依赖于气溶胶本身的光学特性,还受到气溶胶空间分布和地面反照率、天顶角等因素的影响,因此,它与光学厚度的分布并不是简单的一一对应关系。作为对黑碳气溶胶全球辐射效应的整体评估,我们计算了辐射强迫的全球平均值,冬季短波辐射强迫为 0.085 W/m^2 ,夏季为 0.155 W/m^2 ,在 IPCC^[2]给出的范围之内。

5.2 地面的辐射强迫

与大气顶的正辐射强迫形成对比,地面的辐射强迫全部为负值,这是由于无论是黑碳气溶胶层的吸收和散射作用,还是地面反照率的影响,都使地面接收的太阳辐射减少。同时,因为黑碳气溶胶对

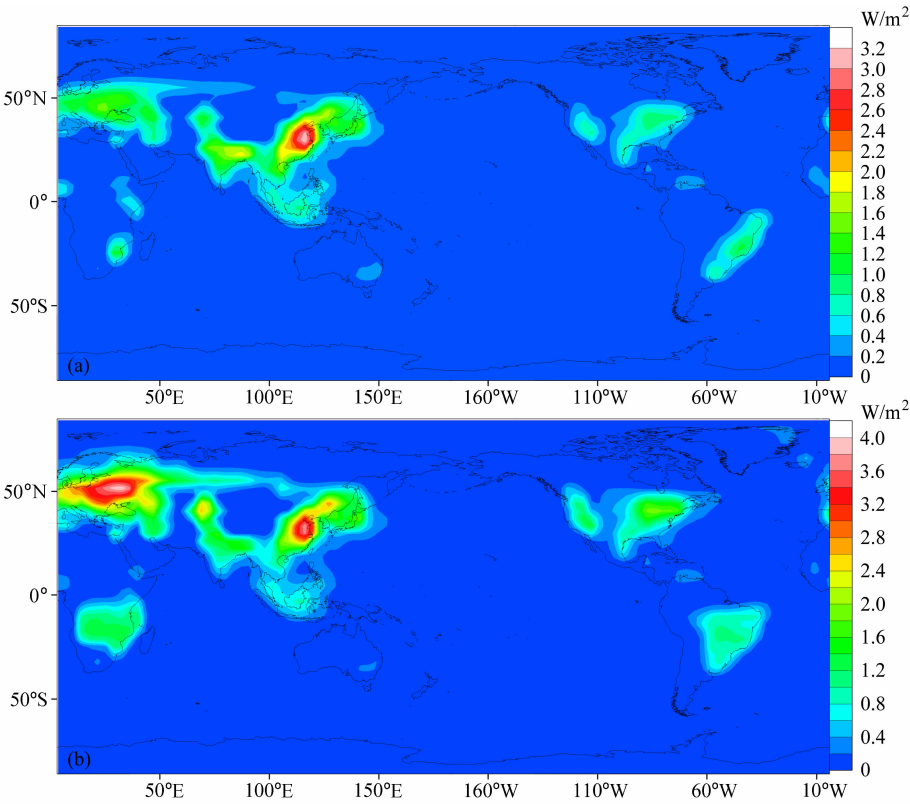


图 3 同图 1, 但为对流层顶辐射强迫 (单位: W/m^2)
Fig. 3 Same as Fig. 1, but for radiative forcing at the tropopause

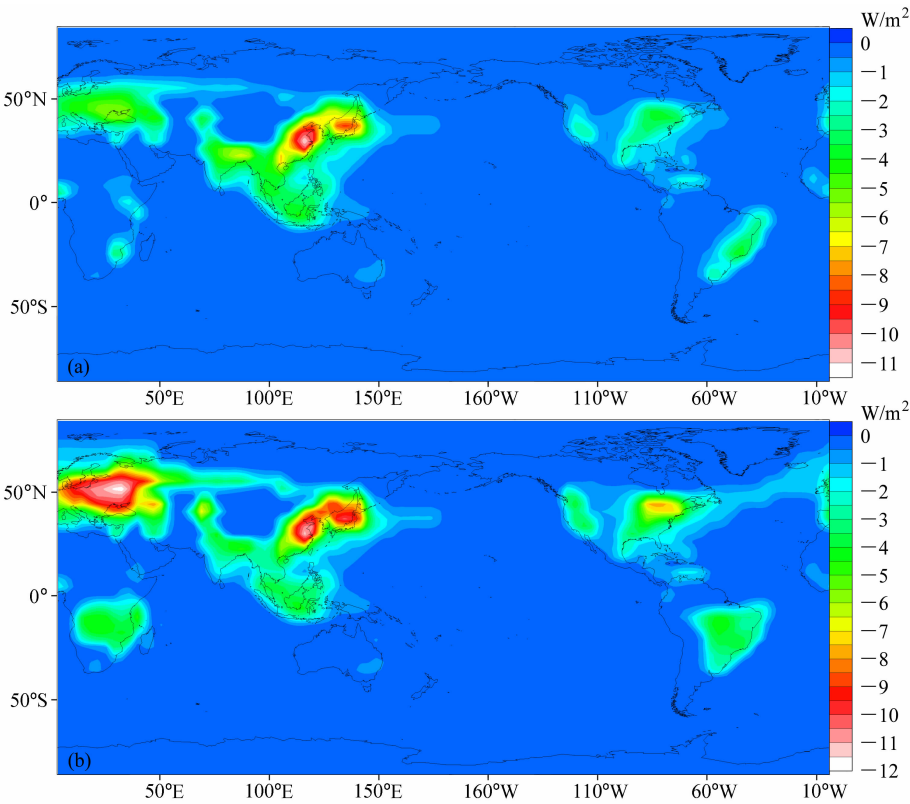


图 4 同图 1, 但为地面辐射强迫 (单位: W/m^2)
Fig. 4 Same as Fig. 1, but for radiative forcing at the surface

太阳辐射的强烈消光作用是导致地表辐射通量减少的最直接因素,所以地面的辐射强迫总是负值,并与气溶胶光学厚度呈现很好的一一对应关系(对比图 2 和图 4)。由图 4a 可以看出:冬季的最大辐射强迫位于东亚地区,达到 -11.5 W/m^2 ,与 IPCC^[2] 给出的黑碳气溶胶的局地地面辐射强迫最新值 -23 W/m^2 比较接近。从图 4b 看出:夏季黑碳气溶胶最大辐射强迫位于欧洲,最大值为 -12 W/m^2 。冬季的地面辐射强迫全球平均值为 -0.37 W/m^2 ,夏季的平均值为 -0.626 W/m^2 。黑碳气溶胶辐射强迫的分布与人类活动的分布关系极为密切,北半球人口密集,冬季由于采暖等原因,黑碳气溶胶的排放量比夏季高,但造成辐射强迫平均值夏季的比冬季高,这是由于太阳天顶角余弦夏季比冬季大(具体在 5.4 节讨论)。

5.3 地面反照率对辐射强迫影响的敏感性研究

地面反照率反映了地面对太阳辐射反射和吸收的相对强弱状况,是影响辐射强迫的重要因素。在不考虑云的情况下,它在很大程度上决定了辐射强迫的符号^[41]。为了说明地表反照率对辐射强迫的影响,本文计算了在不同地表反照率情况下黑碳气溶胶在地面和对流层顶的全球平均辐射强迫。

图 5 给出黑碳气溶胶地面辐射强迫(虚线)随地面反照率的变化,可以看出,地面辐射强迫都是负值,随着地面反照率的增加,地面辐射强迫的绝对值逐渐减小,且呈准线性关系,这主要是因为高反照率的地表使得地面向上的辐射通量大大增加,削弱了有黑碳气溶胶与晴空无黑碳气溶胶存在时的地面向上辐射通量的差别,由辐射强迫的计算公式

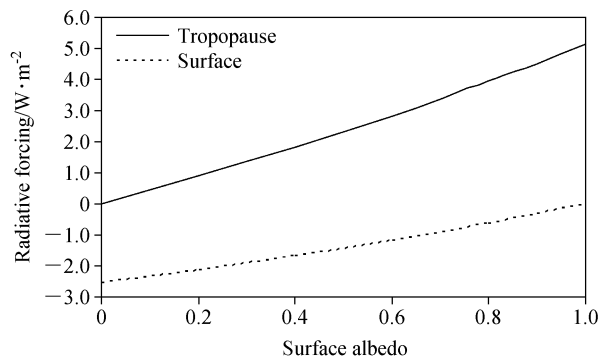


图 5 黑碳气溶胶在地面和对流层顶辐射强迫随地表反照率的变化

Fig. 5 The effect of surface albedo on the global means of radiative forcing due to BC at the surface and the tropopause

(11) 可以得出,地表高反照率会导致地面的负辐射强迫的绝对值减少。对流层顶的辐射强迫都是正值(图 5 实线),且随地面反照率线性递增,因为高反照率的地表使到达地面的太阳辐射更多地返回大气,增加黑碳气溶胶对太阳反射辐射的吸收,因而加强了黑碳气溶胶在对流层顶正的辐射强迫。可见,地表反照率无论对对流层顶还是对地面辐射强迫都有很大影响,对于同样浓度的黑碳气溶胶,在不同的地表覆盖情况下,其引起的辐射强迫是不同的,也就是说,地表覆盖情况同样影响黑碳气溶胶对大气热力结构的作用,地面反照率越大,其影响就越大。而南极的黑碳气溶胶浓度基本为零,所以没有辐射强迫发生。

5.4 天顶角对辐射强迫影响的敏感性研究

太阳辐射具有明显的日变化和季节变化。研究表明,气溶胶辐射效应对太阳辐射的变化异常敏感,它不仅引起辐射强迫的大小发生变化,而且还会改变辐射强迫的符号。本文对不同天顶角下冬季黑碳气溶胶在地面和对流层顶的辐射强迫进行研究(计算中地表反照率取固定值 0.2)。

地面辐射强迫随天顶角余弦的变化(图 6 实线),表明黑碳气溶胶在地面的辐射强迫是负值,其绝对值随天顶角的余弦呈对数增加;对流层顶辐射强迫随天顶角余弦的变化(图 6 虚线),表明对流层顶黑碳气溶胶的辐射强迫是正值,随着天顶角余弦的增大呈准线性增加。这种变化规律是因为正午时的天顶角为 0,单位面积上大气接收到的太阳辐射通量最大,因此黑碳气溶胶吸收的太阳辐射最多,导致到达地面的太阳辐射减少也最多,使得地

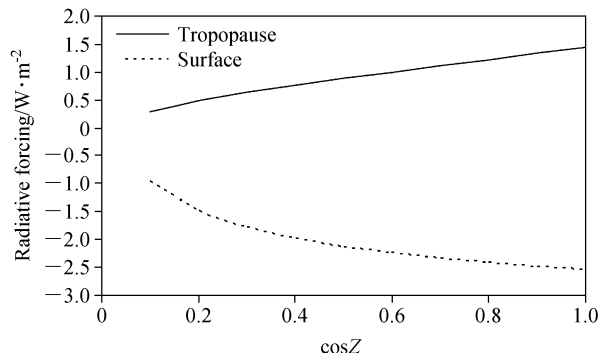


图 6 冬季黑碳气溶胶地面和对流层顶全球平均辐射强迫随天顶角余弦变化

Fig. 6 The global average values of BC radiative forcing as a function of zenith angle at the surface and the tropopause

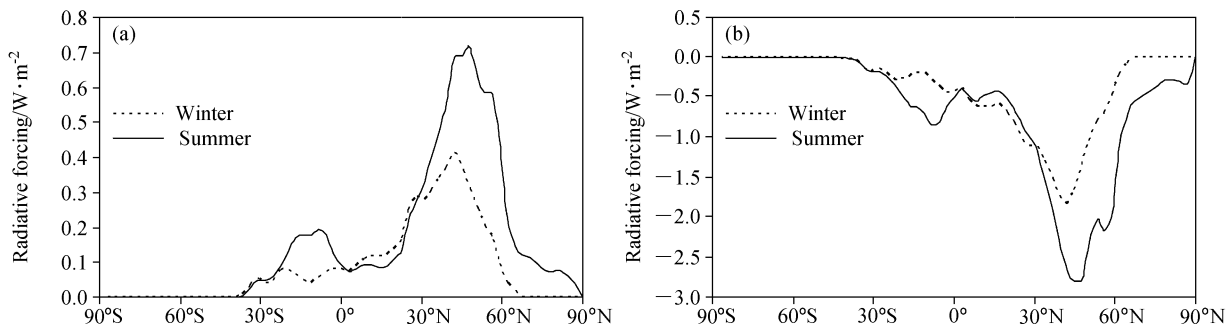


图7 北半球冬夏两季黑碳气溶胶纬向平均辐射强迫随纬度的变化: (a) 对流层顶; (b) 地面

Fig. 7 The zonal means of radiative forcing due to BC for winter and summer at the tropopause (a) and the surface (b)

面的负辐射强迫的绝对值达到最大。同时,如前所述,吸收了最大辐射能量的黑碳会使其所在的大气层增温达到最大,因此该局部大气层向地面的红外发射也最大,使得对流层顶的辐射强迫达到最大;反之,当天顶角增加时,地面和对流层顶辐射强迫的绝对值就会逐渐减小。由此可以得出这样的结论,对同样浓度的黑碳气溶胶,在天顶角小的夏季比天顶角大的冬季造成的对流层顶和地面的辐射强迫的绝对值要大,也就是说,同样浓度的黑碳气溶胶,发生在不同的季节会对大气热力和动力结构产生不同程度的影响。

5.5 黑碳气溶胶纬向平均的辐射强迫

图7a是黑碳气溶胶在对流层顶纬向平均的辐射强迫随纬度的变化,可以看出,无论冬季还是夏季,黑碳气溶胶的纬向辐射强迫都是正值,且在30°N~60°N之间冬夏两季都存在一个大值区,这是由于人类主要居住在该纬度带之间,人类活动造成黑碳气溶胶排放的浓度高,因而造成较大的辐射强迫;在30°S以南由于没有人类活动,其纬向平均辐射强迫的值是0。南半球0°~30°S之间夏季的辐射强迫大于冬季的辐射强迫,这是因为北半球夏季对应的是南半球的冬季,由于采暖等原因造成黑碳气溶胶排放量增加造成的。图7b是黑碳气溶胶在地面的纬向平均辐射强迫随纬度的变化,与对流层顶相反,冬夏两季其辐射强迫的平均值都是负值,表明黑碳气溶胶的存在,使地表接收的太阳辐射净通量减小。在30°N~60°N之间冬夏两季辐射强迫的绝对值都是大值区,南半球0°~30°S之间按照北半球夏季计算的辐射强迫大于北半球冬季的辐射强迫,这些现象与上述对对流层顶的辐射强迫的解释分析是一致的。

6 结论

本文利用一个改进的BSTAR5C/CCSR/NCC辐射传输模式,结合GADS给出的黑碳气溶胶浓度的全球分布,计算了晴空条件下冬夏两季黑碳气溶胶辐射强迫的全球分布,并通过一系列敏感性试验讨论了地表反照率和太阳天顶角等因子对黑碳气溶胶全球平均辐射强迫的影响,主要结论如下:

由黑碳气溶胶引起的冬季对流层顶辐射强迫的全球平均值为0.085 W/m^2 ,夏季为0.155 W/m^2 ;冬季地面辐射强迫全球平均值为-0.37 W/m^2 ,夏季为-0.63 W/m^2 ,在IPCC^[2]给出的黑碳气溶胶的辐射强迫值范围之内。

虽然气溶胶本身的光学性质和它们在大气中的浓度是决定其辐射强迫的主要控制因素,但是其他因子像地面反照率和太阳天顶角等也会对辐射强迫大小和分布产生重要影响。总的来说,黑碳气溶胶的光学厚度分布与地面的辐射强迫的区域分布基本呈一一对应的关系,即:光学厚度大的区域对应于地面辐射强迫绝对值的大值区,反之亦然。但是,由于受到地表反照率以及季节纬度等的影响,对流层顶辐射强迫的分布与光学厚度的分布不完全一致。本文的敏感性试验表明:在对流层顶黑碳气溶胶的正辐射强迫和在地面造成的负辐射强迫的绝对值随地表反照率的增加线性增大。因此,对相同浓度的黑碳气溶胶,在不同的下垫面情况下,造成的对流层顶辐射强迫的分布和强度会有所不同,由此会产生不同的气候效应。

黑碳气溶胶在对流层顶的正辐射强迫和在地面的负辐射强迫的绝对值随太阳天顶角的余弦线性增加。这一现象说明,在同一地区同样浓度的黑碳气

溶胶,如果发生的季节和时间不同,对整个地气系统热力和动力结构影响的程度就会有所不同。

黑碳气溶胶在对流层顶纬向平均辐射强迫在 $30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 之间冬夏两季都为大值区,由于该纬度区域是人类活动的密集区,因而从另一个角度证明了人类活动是造成黑碳气溶胶辐射强迫的主要原因。

由于温室气体造成的辐射强迫无论在地面或者在对流层顶都是正值,对地面-对流层系统都是增温效应;而黑碳气溶胶在地面的辐射强迫为负值,造成的是冷却效应;而且它们在对流层顶造成正辐射强迫的机制与温室气体完全不同,由此所产生的气候效应也完全不同,黑碳气溶胶会使对流层大气的稳定度增加,抑止对流发生,减小地表的蒸发,从而影响水循环;而温室气体的效应则完全相反,会使对流层大气变得更加不稳定,促进对流的发展,增加地表的蒸发。因此,不能完全将黑碳气溶胶和温室气体等同看待。

本文只讨论晴空条件下黑碳气溶胶在地面和对流层顶的直接辐射强迫的大小和分布,并从理论上给予了解释。在实际大气中,云和大气中存在的其他种类的气溶胶(包括有机碳气溶胶、沙尘气溶胶和硫酸盐气溶胶等)将会对黑碳气溶胶的辐射强迫产生重要的影响,我们将在另文给予讨论。

致谢 感谢加拿大气象局的龚山陵博士和张立盛博士提供计算所需要的气象场数据;感谢澳大利亚气象局的孙治安博士提供黑碳气溶胶全球浓度计算的相关资料;感谢在本文完成过程中与美国华盛顿大学大气科学系傅强教授、中国科学院大气物理研究所石广玉教授以及中国气象科学研究院王宏副研究员所作的十分有益的讨论。

参考文献 (References)

- [1] Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. Radiative forcing of climate change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, Eds. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 349~416
- [2] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007
- [3] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Rev. Geophys.*, 2000, **38**: 513~543
- [4] Ito A, Penner J E. Historical emissions of carbonaceous aerosols from biomass and fossil fuel burning for the period 1870~2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: GB2028, doi: 10.1029/2004GB002374
- [5] Novakov T, Ramanathan V, Hansen J E, et al. Large historical changes of fossil-fuel black carbon aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: 1324, doi: 10.1029/2002GL016345
- [6] 任国玉, 徐德应, 石广玉, 等. 人类活动在气候变化中的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰编. 中国气候与环境演变科学报告(上). 北京: 科学出版社, 2005. 464~477
Ren Guoyu, Xu Deying, Shi Guangyu, et al. The role of human activities in climate change. *The Science Report on China Climate and Environment (Part I)* (in Chinese). Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 464~477
- [7] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. Indian Ocean experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D22): 28371~28398
- [8] Hansen J E, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2004, **101**: 423~428
- [9] 张英, 高庆先. 硫酸盐和黑碳气溶胶辐射效应的研究, 应用气象学报, 1997, **8** (增刊): 87~91
Zhang Ying, Gao Qingxian. The study of radiative effects of sulfate aerosol and black carbon aerosol. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8** (Suppl.): 87~91
- [10] 张立盛. 硫酸盐和烟尘气溶胶辐射强迫的模拟和估算. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1999. 140pp
Zhang Lisheng. The simulation and evaluation of radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1999. 140pp
- [11] 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, 大气科学, 2001, **25** (2): 231~242
Zhang Lisheng, Shi Guangyu. The simulation and estimation of radiative properties and radiative forcing due to sulfate and soot aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, **25** (2): 231~242
- [12] Wu J, Jiang W M, Fu C B, et al. Simulation of the radiative effect of black carbon aerosols and the regional climate responses over China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2004, **21** (4): 637~649
- [13] Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al. An optimal approach to overlapping bands with correlated k distribution method and its application to radiative calculations. *J. Geophys.*

- Res., 2003, **108**: 4641, doi: 10.1029/2002JD003358
- [14] Zhang H, Shi G-Y, Nakajima T, et al. The effects of the choice of k -interval number on radiative calculations. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2006, **98** (1): 31~43
- [15] Zhang H, Suzuki T, Nakajima T, et al. Effects of band division on radiative calculations. *Optical Engineering*, 2006, **45** (1): 016002, doi: 10.1117/1.2160521
- [16] Koepke P, Hess M, Schult I, et al. *Global Aerosol Data Set*. Report No. 243 of Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, ISSN 0937-1060, 1997
- [17] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79** (5): 831~844
- [18] Carrico C M, Rood M J, Ogren J A. Aerosol light scattering properties at Cape Grim, Tasmania, during the First Aerosol Characterization Experiment (ACE 1). *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 16565~16574
- [19] Russell P B, Hobbs P V, Stowe L L. Aerosol properties and radiative effects in the United States East Coast haze plume: An overview of the Tropospheric Aerosol Radiative Forcing Observational Experiment (TARFOX). *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (D2): 2213~2222
- [20] Gadhave H, Jayaraman A. Aerosol characteristics and aerosol radiative forcing over Maitri, Antarctica. *Current Science*, 2004, **86** (2): 296~304
- [21] Sarkar S, Chokngamwong R, Cervone G, et al. Variability of aerosol optical depth and aerosol forcing over India. *Advances in Space Research*, 2006, **37**: 2153~2159
- [22] Kim J, Gu Y, Liou K N. The impact of direct aerosol radiative forcing on surface insulation and spring snowmelt in the southern Sierra Nevada. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, **7**: 976~983
- [23] Nakajima T, Tsukamoto M, Tsushima Y, et al. Modeling of the radiative process in an atmospheric general circulation model. *Appl. Opt.*, 2000, **39**: 4869~4878
- [24] 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 一维辐射对流模式对云-辐射强迫的数值模拟研究. *大气科学*, 2007, **31** (3): 486~494
Liu Yuzhi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative-convective model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, **31** (3): 486~494
- [25] Flato G M, Boer G J, Lee W G, et al. The Canadian centre for climate modeling and analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, 2000, **16**: 451~467
- [26] Gong S L, Barrie L A, Blanchet J-P, et al. Canadian Aerosol Module: A size-segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models. 1. Module development. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D1): 4007, doi: 10.1029/2001JD002002
- [27] Spencer J W. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 1971, **2** (5): 172
- [28] 颜宏. 初始方程 $P-\sigma$ 混合坐标细网格嵌套模式的设计——(二)数值模式中次网格物理过程参数化. *高原气象*, 1987, **6** (2): 64~138
Yan Hong. The design of a nested fine-mesh model over the complex topography. Part two: Parameterization of the sub-grid physical processes. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1987, **6** (2): 64~139
- [29] Koch D. Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (17): 20311~20332
- [30] Chung S H, Seinfeld J H. Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (19): 4407, doi: 10.1029/2001JD001397
- [31] Roberts D L, Jones A. Climate sensitivity to black carbon aerosol from fossil fuel combustion. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D16202, doi: 10.1029/2004JD004676
- [32] Kristjánsson J E, Iversen T, Kirkevåg A, et al. Response of the climate system to aerosol direct and indirect forcing: Role of cloud feedbacks. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D24206, doi: 10.1029/2005JD006299
- [33] 董真, 黄世鸿, 李子华. 相对湿度对大气气溶胶可见辐射吸收的影响. *气象科学*, 2000, **20** (4): 487~493
Dong Zhen, Huang Shihong, Li Zihua. Influence of relative humidity on absorption of visible radiation of aerosol. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **20** (4): 487~493
- [34] 吴润, 符淙斌. 近五年来东亚春季黑碳气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究. *大气科学*, 2005, **29** (1): 111~119
Wu Jian, Fu Congbin. Simulation research of distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol in recent five spring seasons over East Asia region. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 111~119
- [35] 马井会, 张华, 郑有飞, 等. 沙尘气溶胶光学厚度的全球分布及分析. *气候与环境研究*, 2007, **12** (2): 156~164
Ma Jinghui, Zhang Hua, Zheng Youfei, et al. The optical depth global distribution of dust aerosol and its possible reason analysis. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (2): 156~164
- [36] 李成才, 毛节泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征. *科学通报*, 2003, **48** (19): 2094~2100
Li Chengcai, Mao Jietai, Lau Kai-Hon Alexis, et al. Characteristics of distribution and seasonal variation of aerosol optical depth in eastern China with MODIS products. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (22): 2488~2495
- [37] 刘桂青, 毛节泰, 李成才. 长江三角洲地区大气气溶胶光学厚度研究. *上海环境科学*, 2003, **22** (增刊): 58~63

- Liu Guiqing, Mao Jietai, Li Chengcai. Optical depth study on atmospheric aerosol in Yangtze River delta regions. *Shanghai Environ. Sci.* (in Chinese), 2003, **22** (Suppl.): 58~63
- [38] Quijano A L, Sokolik I N, Toon O B. Radiative heating rates and direct radiative forcing by mineral dust in cloudy atmospheric conditions. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 12207~12219
- [39] Schult I, Feichter J, Cooke W F. Effect of black carbon and sulfate aerosols on the Global Radiation Budget. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 30107~30117
- [40] Ramanathan V, Chung C, Kim D, et al. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, **102** (15): 5326~5333
- [41] 郑飞, 张镭, 朱江. 复杂地形城市冬季边界层对气溶胶辐射效应的响应. *大气科学*, 2006, **30** (1): 171~179
Zheng Fei, Zhang Lei, Zhu Jiang. Responses of urban atmospheric boundary layer to aerosol radiative effect over complex terrains in winter. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 171~179