

# 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

吴 润<sup>1,2</sup> 符淙斌<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

2 云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系, 昆明 650091

**摘 要** 通过对 2000~2004 年 2~4 月东亚地区人为和生物质燃烧排放黑炭气溶胶的模拟, 分析 5 年平均的结果, 发现: 春季, 东亚地区印度、中南半岛、中国东部存在三个显著的黑炭气溶胶大值区, 最大柱含量均在  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上, 印度半岛的排放能影响中国南方  $25^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$  之间区域, 而中南半岛的排放能影响中国  $25^\circ\text{N}$  以南的大陆地区。850~700 hPa 是中南半岛排放输送进入中国的主要层次。中国华北和东北的排放向东输送影响朝鲜半岛、日本等地, 但中国春季的输出量小于境外对中国的输入量; 境外注入对中国西部和江南地区影响显著, 对中国北方地区影响较小。黑炭气溶胶引起晴空和云天大气顶净向下辐射通量增大, 地表净向下辐射通量减小, 辐射通量变化最显著地区在中国四川、湖北一带, 大气顶辐射通量增大最大为  $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地表通量减小最大约  $-5.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

**关键词** 黑炭气溶胶 生物质燃烧 东亚地区 输送 辐射强迫

文章编号 1006-9895 (2005) 01-0111-09

中图分类号 P444

文献标识码 A

## Simulation Research of Distribution Transportation and Radiative Effects of Black Carbon Aerosol in Recent Five Spring Seasons over East Asia Region

WU Jian<sup>1,2</sup>, and FU Cong-Bin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Regional Climate - Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

**Abstract** The distribution transportation and radiative effects of black carbon aerosol due to anthropogenic and biomass burning emission over the East Asia region have been simulated in springtime from 2000 to 2004. It has been revealed that there exist three main column burden regions: Indian Peninsula, Indo-China Peninsula and East China, the column burden over the three regions exceeds  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pollutant from Indian Peninsula can be transported into China, and affects the zonal region between  $25^\circ\text{N}$  and  $30^\circ\text{N}$  in Chinese mainland. Emission from Indo-China Peninsula can contribute to column burden to the south of  $25^\circ\text{N}$  over Chinese mainland. The maximum horizontal flux of Black Carbon (BC) from Indo-China Peninsula emerges between 850 - 700 hPa. BC from North China and Northeast China can pollute Korea Peninsula and Japan due to eastern jet. Input flux is larger than output flux over China mainland, and it has more obvious effect on West China and South China than North China due to emission from other countries to China. The net downward radiative flux at Top of Atmosphere (TOA) has been increased by BC aerosol in both clear and cloudy sky, but that at the surface is opposite. The increment value emerges over Chinese Sichuan basin and Hubei area,  $4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to TOA flux and  $-5.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  to surface flux.

**Key words** black carbon aerosol, biomass burning emission, East Asia area, transportation, radiative forcing

收稿日期 2004-11-15 收到

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40205016

作者简介 吴润, 男, 1973 年 5 月出生, 副教授, 在职博士后, 主要从事大气环境与气候变化研究。E-mail: kmwujian@yahoo.com.cn, wujian@ynu.edu.cn

## 1 引言

近年来,有研究表明黑炭气溶胶可能是影响东亚区域气候变化的原因之一<sup>[1]</sup>,但由于缺乏系统性的研究工作,因此还很难确定黑炭气溶胶与气候变化之间的具体关系<sup>[2]</sup>,但黑炭气溶胶的重要性却已受到重视<sup>[3]</sup>。我国已在青海瓦里关山和浙江临安建立了大气本底观测站,黑炭气溶胶是其中一个观测项目<sup>[4]</sup>。

随着经济发展,东亚地区已经成为全球人为黑炭气溶胶的主要排放源区之一,其中以印度、东南亚各国和中国为主<sup>[5,6]</sup>。此外,东南亚国家由于存在春季烧荒的耕种方式,每年2~4月间在印度半岛和中南半岛由于生物质燃烧排放的黑炭气溶胶也不容忽视。卫星遥感观测到,在燃烧期间,燃烧源区及下风向一些地区气溶胶指数显著升高<sup>[7]</sup>。在香港进行的探空和空气污染物的轨迹分析,表明中南半岛生物质燃烧与香港对流层中臭氧出现极大值层有密切关系<sup>[8,9]</sup>。有数值模拟结果表明中南半岛生物质的燃烧能导致我国华南和南海上空对流层臭氧显著增加<sup>[10]</sup>。Uno等<sup>[11]</sup>通过对2001年春季中南半岛和中国排放黑炭的模拟,认为上述地区的排放能输送到日本。

以上的观测和短期的模拟结果表明:由于东亚地区排放源较密集,又处于亚洲季风区,不同季节大气环流特征变化显著,可以造成人为和生物质燃烧排放黑炭气溶胶的相互输送,甚至对远距离地区造成污染。因此,从大气环境质量的角度,有必要在包括大多数排放源的较大空间范围内研究黑炭的输送问题。

黑炭气溶胶对太阳辐射存在较强吸收,能通过扰

动辐射传输过程影响气候变化<sup>[12,13]</sup>,全球模式和区域模式的初步模拟结果表明其直接辐射效应是显著的<sup>[14,15]</sup>。因此,东亚地区黑炭气溶胶的分布和输送不只是大气环境质量问题,可能与区域气候变化存在着联系,这需要深入研究。为深入探讨黑炭气溶胶与东亚地区气候变化之间存在的可能联系,首先,需要从气候意义上了解黑炭气溶胶的分布特征,并弄清生物质燃烧的贡献和黑炭气溶胶的输送问题。因此,本文利用区域气候模式 RegCM3<sup>[16]</sup>,通过对2000~2004年2~4月间的模拟,获得5年平均的春季东亚地区黑炭气溶胶分布特征,并对其直接辐射效应进行了初步研究,为研究其气候响应的机制做前期工作。

## 2 模式和资料

区域气候模式 RegCM3是在原有 RegCM2的基础上发展起来的,设计与大气化学模式的接口,采用考虑次网格尺度云变化的大尺度云和降水参数化方案<sup>[17]</sup>、新的海表通量参数化方案<sup>[18]</sup>,增加了 Betts-Miller 积云对流参数化方案<sup>[19]</sup>,在辐射方案中加入了硫酸盐间接效应的参数化方案<sup>[20]</sup>,并且改进了模式输入输出接口,与原版本相比,性能有一定程度提高。本文所用的气溶胶输送模式是由 Qian等<sup>[21]</sup>开发,其中包括平流、扩散、次网格对流输送、大尺度湿清除、积云对流清除、干沉降等物理过程。

采用 NCEP 资料,为区域气候模式提供初始场和6小时一次的侧边界场,侧边界采用5层过渡的指数松弛方案。东西和南北方向各90个格点,水平格距90 km,垂直分18层,模式顶取在100 hPa。积分时

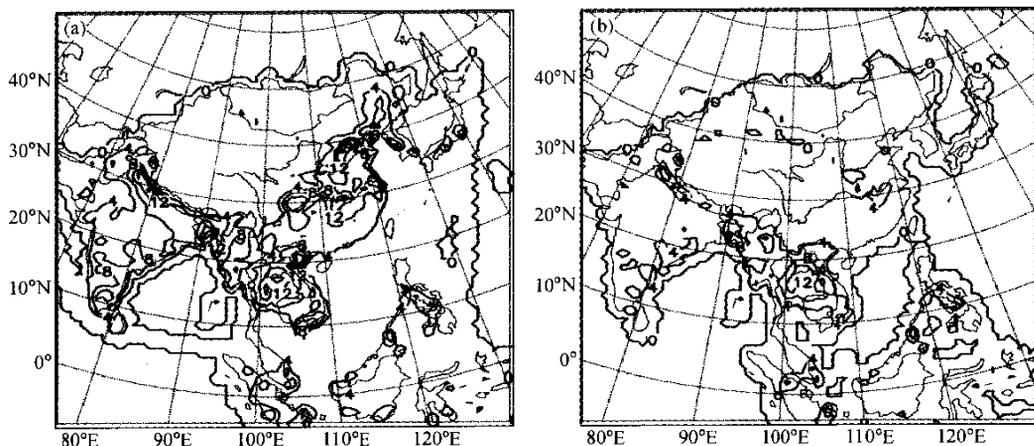


图1 黑炭排放率分布(单位:  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ):(a) 总源排放;(b) 生物质燃烧排放

Fig. 1 Emission rate of Black Carbon (BC)(units:  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ): (a) Anthropogenic and biomass burning emission;(b) biomass burning emission

间为 2000~2004 年每年的 2 月 1 日~5 月 1 日, 2 月份作为初始化时间, 只分析 3~4 月的结果。本文对每年共进行 3 个例子的模拟, 个例 1 包括全模拟区域内的人为和生物质燃烧排放, 个例 2 只包括中国境外的人为和生物质燃烧排放, 个例 3 则只考虑全区域的生物质燃烧排放。下文如无特别指明均为所模拟的 5 年平均值。

黑炭气溶胶排放资料采用 Street 等<sup>[5]</sup>的排放清单, 其中分为人为活动排放和生物质燃烧排放, 模拟中不考虑排放量随时间的变化。图 1 为模拟区域内总排放和生物质燃烧排放率分布, 主要排放源位于印度半岛、中南半岛和中国东部, 其中生物质燃烧排放在中南半岛中部最显著, 最大达到  $16 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

### 3 结果分析

#### 3.1 浓度分布

图 2 为地表浓度的分布情况。印度半岛、中南半岛和中国东部三个区域为显著大值区, 浓度均超过  $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中印度东北部、缅甸、泰国部分地区和我国的华东地区浓度在  $2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  以上, 孟加拉国、我国四川、湖北等地浓度超过  $2.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  是高浓度中心。此外, 在马来西亚、印度尼西亚等岛国有  $0.2 \sim 1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  的零星分布。在我国西部地区模拟的地面浓度小于  $0.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 绝大部分地区低于  $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 这与 1995 年青海瓦里关山大气本底站观测到的 2~4 月份平均值 (约  $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 较为符合<sup>[4]</sup>。此外, 图 2 中我国浙江北部的地面浓度大约为  $1.5 \sim 2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

与 1991 年 7~8 月在浙江临安进行的短期地面观测结果有相同的量级<sup>[4]</sup>。生物质燃烧对各地总浓度的贡献有显著差异, 基本呈现东西部较低、南北较高的分布形势, 印度半岛为 30%~45%, 中南半岛为 55%~75%, 其中缅甸南部和泰国北部最大; 我国东部多数地区为 30%~40% 之间, 广西、广东、福建和黑龙江、内蒙古为 45%~55%。我国境内生物质燃烧贡献最大的地区位于  $100^\circ \text{E}$  以西的地区, 最大接近 60%。马来西亚、印度尼西亚等国的比例也在 60% 以上, 部分地区甚至达到 80%~85%。此外, 蒙古生物质燃烧的贡献也很大在 55%~85% 之间。

为进一步检验模拟结果, 引用 ACE-Asia 试验 2001 年春季日本 5 个点、2004 年 3 月北京以及文献 [22~24] 中的一些观测结果与模拟结果进行对比, 具体如表 1 所示。

在人类活动影响较小的地区, 本文模拟的地面浓度在几个点上与观测符合得很好, 但总体上略偏小些, 浓度差别最大的个别点相差不超过一倍。这形成的原因除排放量与实际情况可能存在偏差外, 还与本文所用模式为静力模式对黑炭的垂直输送描述不很理想, 减小了远距离输送量有关。对于受人类活动影响非常剧烈的城市地区, 由于难以统计的局地排放和小尺度地形、建筑物、交通活动等影响, 在目前的分辨率条件下, 模式很难客观地模拟出地面浓度的实际状况。从大范围的特征看, 以上除北京和临安外, 各点平均的观测浓度为  $0.44 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均的模拟浓度为  $0.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 模拟结果基本反映了大范围的黑炭气溶胶分布状况。

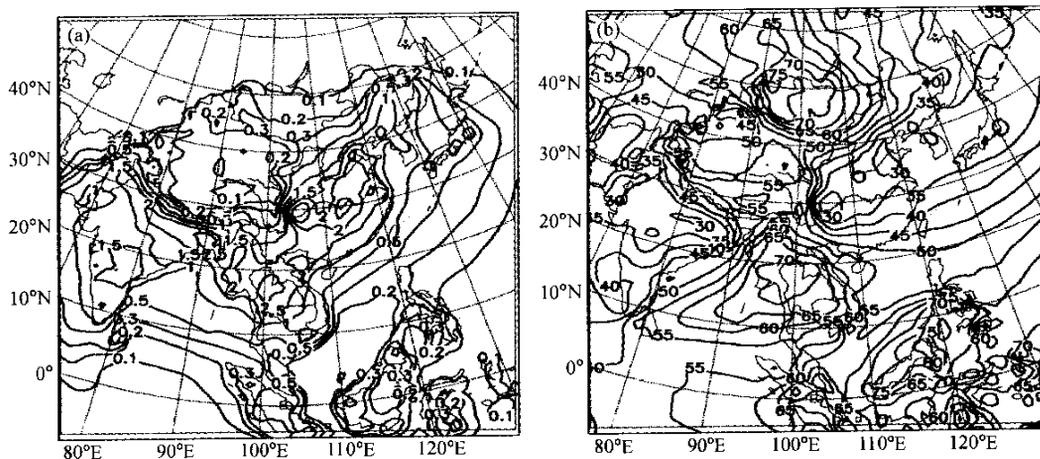


图 2 黑炭气溶胶地表浓度: (a) 人为排放和生物质燃烧排放产生的地面浓度 (单位:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ); (b) 生物质燃烧排放的贡献率 (%)

Fig. 2 Surface concentration of BC aerosol: (a) Concentration under total emission condition (units:  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ); (b) contribution percentage of biomass burning (%)

表 1 黑炭气溶胶地面浓度模拟值与观测值的比较

Table 1 Comparison between observation and simulation of surface concentration of BC

观测点 Observation point	观测时间 Observation time	观测浓度 Observation value/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	模拟浓度 Simulation value / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	生物质燃烧的贡献 Contribution of biomass burning/%	中国大陆的贡献 Contribution of Chinese mainland/%
北京 Beijing (39.90°N, 116.30°E)	2004-03	7.58	0.84	27	95
临安 Lin'an (29.5°N, 119.67°E)	1991-07~08	2.07	1.79	24	94
利尻岛 Rishiri-tō (45.12°N, 141.20°E)	2001-03~04	0.40	0.22	35	55
佐渡岛 Sado-shima (38.25°N, 138.40°E)	2001-03~04	0.63	0.42	26	55
八丈岛 Hachijō-jima (33.15°N, 139.75°E)	2001-03~04	0.33	0.31	21	47
奄美大岛 Amami-ō-shima (28.44°N, 129.70°E)	2001-04	0.63	0.43	27	57
父岛 Chichi-jima (27.07°N, 142.22°E)	2001-03~04	0.21	0.20	31	54
隐岐诸岛 Oki-shotō (36.20°N, 133.20°E)	年平均 Annual average	0.52	0.47	23	51
吐噶喇列岛 Tokara-rettö (29.5°N, 128°E)	4~5月 From April to May	0.36	0.41	28	58

### 3.2 柱含量

图 3 的阴影区显示黑炭气溶胶柱含量的分布, 柱含量仍然在印度半岛、中南半岛和我国东部及邻近海区最大, 含量均超过  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 其中印度半岛东南部存在  $2.5 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  的中心区, 孟加拉国含量也超过  $2.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 从缅甸南部、泰国和越南北部向东北经北部湾一直延伸到我国长江中游地区呈现  $2.5 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  的条状大值区。该区域中, 泰国北部和越南北部、我国四川及长江中游地区含量超过  $3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 四川地区甚至大于  $3.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  为模拟区域内的最大含量。我国华东北部约为  $1.5 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 华北大部分地区则在  $0.5 \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 并且华北北部和黑龙江北部低于  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。黄河河套地区是我国西北含量最大的区域约为  $0.5 \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 河套以西地区含量小于  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  印度尼西亚的大部分地区在  $0.5 \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$  之间, 其中马来西亚部分地区能达到  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。我国周边海洋上空的含量在  $1 \sim 2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 越靠近大陆含量越大。生物质燃烧产生的黑炭含量在中南半岛中部最大, 中心位于泰国北部达到  $2.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ , 除东南部的少数地区外, 中南半岛生物质燃烧对柱含量的贡献大于  $1.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在印度半岛东南部、孟加拉国和我国华南大部分地区为  $1 \sim 1.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。生物质燃烧对黑炭气溶胶柱含量的贡献在印度半岛为  $30\% \sim 50\%$ , 中南半岛大于  $70\%$ , 对我国东部在  $20\% \sim 50\%$  之间, 与地面浓度类似,

生物质燃烧的贡献是不容忽视的。

### 3.3 水平输送特征

图 3a 中的实线代表地面到模式顶平均的总源排放时黑炭气溶胶水平输送通量场, 图 3b 表示 850 hPa、700 hPa 上的平均输送通量, 其中, 通量  $F_x$ ,  $F_y$  的定义为

$$F_x = \frac{1}{p_1 - p_2} \int_{p_1}^{p_2} u \cdot c dp, \quad (1)$$

$$F_y = \frac{1}{p_1 - p_2} \int_{p_1}^{p_2} v \cdot c dp, \quad (2)$$

式中,  $u$ ,  $v$  为水平风速 (单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $c$  为黑炭气溶胶质量混合比 (单位:  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),  $p_1$ ,  $p_2$  为气压。

图 3a 显示整个气柱平均的输送在  $20^\circ\text{N}$  南北的特征是不同的,  $20^\circ\text{N}$  以北的输送主要是自西向东, 包括俄罗斯、蒙古、我国西部等低含量区向我国华北和东北较高含量地区的输送, 以及我国华北和东北地区向朝鲜、日本等地的输送。值得注意的是,  $20^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$  之间输送方向基本自西南向东北, 其中源自印度半岛北部地区和孟加拉国的排放, 在高空西南气流输送下沿青藏高原东南麓经缅甸北部进入我国, 能影响我国  $25^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$  之间的区域。在  $20^\circ\text{N}$  以南的输送显示了完全不同的特征, 基本趋势变为自东向西输送。中南半岛上空受高压的影响形成了闭合的顺时针环流, 源自泰国北部高含量中心区的含黑炭气流先向东输送, 在  $120^\circ\text{E}$  附近回转到  $10^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$  之间向西

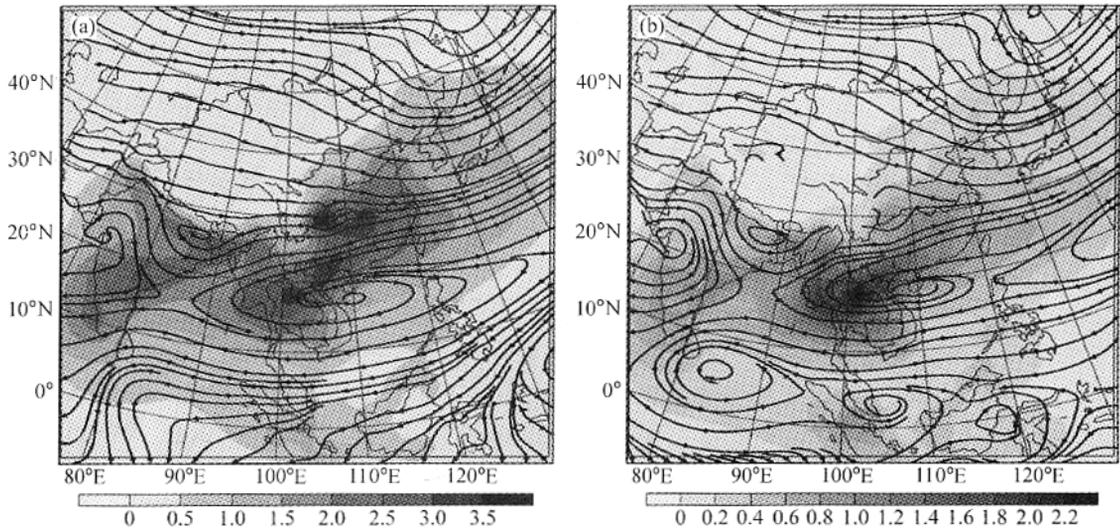


图 3 黑炭气溶胶柱含量 (阴影, 单位:  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) 与水平输送场 (实线): 总源的柱含量与气柱平均输送场; (b) 生物质燃烧柱含量与 850 ~ 700 hPa 层平均输送场

Fig. 3 Column burden (shadow, units:  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ ) and horizontal transportation flux (solid line): (a) Column burden and column averaged horizontal transportation flux of total emission; (b) column burden of biomass burning emission and averaged horizontal transportation flux between 850 - 700 hPa

输送, 到达中南半岛西侧后再次转向东北输送, 并汇合了缅甸中部和南部的排放后, 从云南南部和广西进入我国境内影响到我国大陆 25°N 以南地区和台湾, 最后进入东海直至太平洋上空。从图 3 中可以清楚地看到我国大陆长江以南地区由北向南分别受到印度半岛和中南半岛排放的影响, 其大致分界线在 25°N 附近, 越往西侧分界纬度越低。也可以发现我国大陆的排放没有显著向南海和中南半岛输送, 而主要对朝鲜半岛、日本及西太平洋地区产生影响。此外, 马来西亚和印度尼西亚等低纬地区的排放有向南输送越过赤道的现象, 有研究<sup>[25]</sup>表明这些存在于低纬地区的黑炭气溶胶可能对全球气候变化有重要作用。印度半岛的排放物也有少量能沿高原南北两侧进入我国境内, 但其绝大部分是向西输送影响印度洋, 几乎没有向东输送影响中南半岛的现象。

图 3b 显示在 850 ~ 700 hPa 之间, 20°N 以北的输送特征与图 3a 气柱平均结果一致, 但在 20°N 以南却不完全相同。中南半岛中部向我国境内输送的流线更密集, 说明这是一个主要的输送层次。850 ~ 700 hPa 之间, 源自几乎整个中南半岛生物质燃烧区的含黑炭气流能向东北方向输送, 影响我国 25°N 以南的大陆地区。同时, 还存在从越南、泰国、缅甸东部出发向东的输送, 影响广西、广东、香港等现象, 其中一条流线沿广西南部进入广东, 经过珠江三角洲上空继续向东输送, 沿台湾南部进入太平洋。这与香港等地春季探空资料中常出现臭氧次极大值层比较符合。与图 3a 类似, 在 10°N 附近存在一个纬向的向东输送

区, 但在 10°N 以南形成了三个逆时针的环流圈, 并且在 850 ~ 700 hPa 之间向南越过赤道的输送很弱。

为了进一步讨论中南半岛对我国境内的输送和我国东部地区对日本方向的输送, 选取经过 105°E 和 125°E 的经向剖面分析黑炭的东西向输送 (图 4)。在 105°E 的剖面中, 8°N 以南主要是向西输送, 15°N 以北为向东输送, 而 8°N ~ 15°N 为过渡区域, 高度越高分界面越向低纬度倾斜。这与图 3 的低纬地区部分对应。向东输送带在垂直方向上充满了整个模式空间, 在 17°N ~ 19°N 之间的 850 ~ 600 hPa 层输送通量最大。在 20°N 附近, 800 hPa 层以下仍然为向西输送, 但 800 hPa 以上则变为向东输送, 并且向东的通量在 700 hPa 达到最大。对照图 3b 可以看到, 20°N 附近向东的输送是中南半岛上空闭合环流的一部分。20°N ~ 25°N 之间的东向通量正对应于从中南半岛北部沿东北方向进入我国的通量, 正是这一分量影响我国 25°N 以南的大陆地区。而 25°N ~ 30°N 之间的东向通量在图 3b 中显示来自印度半岛北部, 并经孟加拉国沿青藏高原东南麓进入我国境内, 合并了四川盆地南部的排放物后形成。同时, 图 4a 中还可以看到 35°N 以北向东的输送比低纬地区弱, 这部分与图 3 中来自我国西部和蒙古等地的输送对应。

图 4b 是沿 125°E 的剖面, 在赤道与 10°N 之间是显著的西向输送区, 10°N ~ 20°N 为过渡区, 高空向东输送, 低空向西输送, 最大通量出现在 400 hPa 以下。向东输送通量较大的区域在 10°N ~ 20°N 过渡区, 最大通量出现在 20°N ~ 25°N 之间的 850 ~ 600 hPa 层,

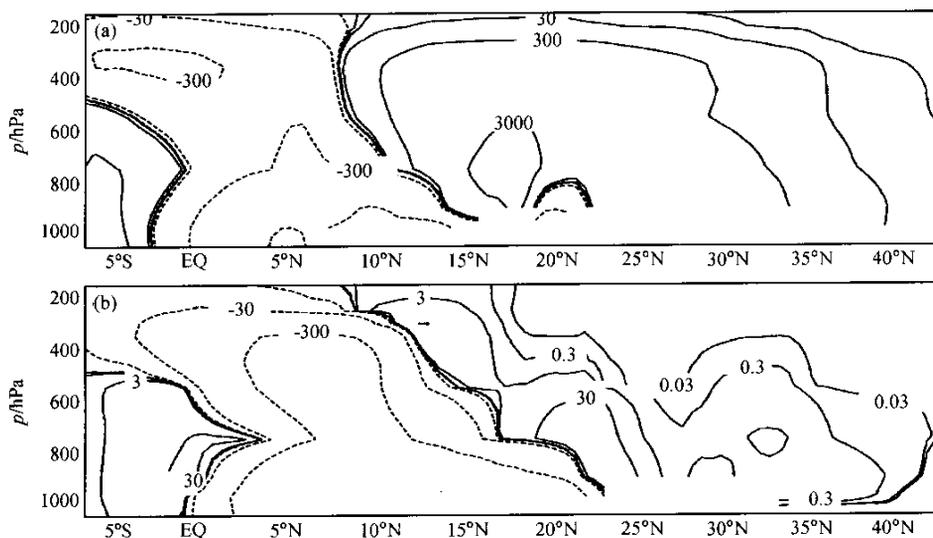


图 4 黑炭气溶胶水平通量 (单位:  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 场的纬度—高度剖面:(a)  $105^\circ\text{E}$ ;(b)  $125^\circ\text{E}$

Fig. 4 Latitude - pressure cross section of horizontal transportation flux (units:  $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ):(a)  $105^\circ\text{E}$ ;(b)  $125^\circ\text{E}$

在  $25^\circ\text{N}$  以北均维持东向通量,但是数值比最大值减小  $2\sim 3$  个量级。 $30^\circ\text{N}$  以北的向东输送能影响朝鲜、日本等地。

综合图 4a, b, 由  $105^\circ\text{E}$  进入我国的通量与  $125^\circ\text{E}$  从我国输出的通量在垂直方向上有非常相似的空间分布特征,并且对我国大陆地区输入量远大于输出量,从这个角度看,春季,我国主要是受污染地区。

为了解境外排放与我国境内排放的相互输送影响,对各模拟时段都进行了移除(即令中国大陆上原有排放为零,而境外排放不变)我国大陆排放的数值试验。图 5 为移除我国大陆排放后的黑炭柱含量占全区域排放时的百分比,反映境外排放对我国境内黑炭含量的影响,总体上境外排放的贡献对西部和南部大,东部和北部小, $105^\circ\text{E}$  以西地区境外的贡献几乎都大于 40%,其中既有蒙古、俄罗斯等北方国家的排放,也有印度和中南半岛各国的贡献,最敏感的是自然环境相对洁净的西藏,境外输入占柱含量的 70%以上,在与印度和尼泊尔接壤一侧甚至超过 90%。在  $105^\circ\text{E}$  附近等值线很密集,说明该地区是西侧以境外注入为主向东侧以当地自身排放为主的过渡区,尤其四川西部和云南变化非常显著。 $105^\circ\text{E}$  以东地区等值线相对稀疏,境外注入量显著减小,这主要是青藏高原起到了明显的阻挡作用。长江以南地区境外注入量在 20%~60%之间,纬度越低境外影响越显著,特别值得注意的是珠江三角洲地区境外影响约为 50%,再次说明该地区大气污染状况的复杂性。长江以北除东北北部与华北北部外,境外注入量基本

都低于 20%,尤其京津地区小于 10%,为我国黑炭气溶胶境外注入量最少的地区。在图 5 中,我国大陆以外地区的数值与 100% 的差反映了我国大陆排放的影响,受影响较大的包括朝鲜半岛,约 70%~80%,日本约 60%~70%,蒙古南部约 40%~50%,此外,还有我国近海和西太平洋地区也比较显著。图 5 显示的信息表明,东亚地区黑炭气溶胶存在显著的相互输送、交叉影响,即某地区的黑炭气溶胶来源除本地排放外,邻近地区甚至较远地区的贡献可能都比较大,因此,若要控制东亚地区大气黑炭气溶胶含量,需要

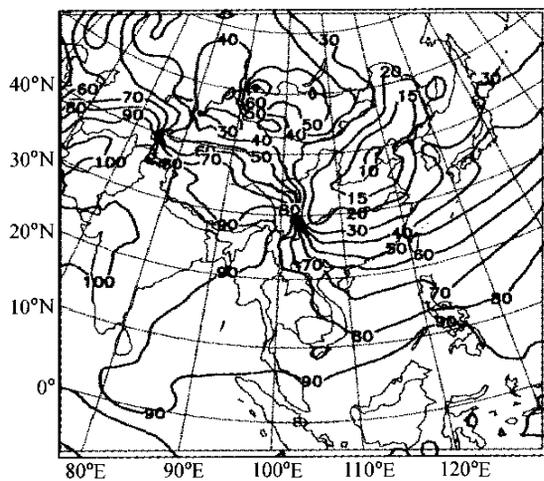


图 5 移除中国大陆排放所得柱含量占全区域排放所得柱含量的百分比 (%)

Fig. 5 Percentage of column burden without emission in Chinese mainland to that of whole emission (%)

各国的协调和努力。

### 3.4 无反馈辐射通量变化

图 6 所示为地表和大气顶净辐射通量的增量，无论晴空还是全天空模式顶净向下辐射都增大，说明黑炭气溶胶的加入减小了反照率，使地气系统吸收更多太阳辐射。比较图 6a, c 发现：云天大气顶净向下辐射的增量大于晴空时的增量，说明云的存在进一步增大了黑炭气溶胶对太阳辐射的吸收，而由图 6b, d 可看出，晴空时地表净向下辐射通量减小比云天时显著，这是由于云层进一步减小了含黑炭大气对太阳辐射的透过率所致<sup>[14]</sup>。云天时大气顶净向下辐射通量增大，在四川、湖北一带最显著，极大值达到  $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；其次，我国长江以南地区位于  $2\sim 4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之间；东海、南海北部、中南半岛和印度半岛约为  $1.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；我国华北和东北南部、日本海、西太平

洋、南海南部以及孟加拉湾在  $0.5\sim 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  之间；华北和东北北部、我国西北地区以及蒙古等地小于  $0.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。云天地表增量各分布中心区与大气顶情况类似，数值为负并且绝对值大一些，例如，四川附近的  $-5.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  为模拟区域内最显著的值。由于大气顶数值为正而地表数值为负，所以由于黑炭气溶胶的存在导致大气对太阳短波辐射的吸收量显著增大，其数值为图 6c, d 绝对值之和，在四川、湖北中心区已经达到  $9.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，这对大气层结稳定度、垂直速度等可能产生显著影响，并进而影响降水量和地表能量平衡，关于这一问题将另文讨论。本文得到辐射通量增量的结果与全球大气环流模式结果在分布趋势上接近，数值也比较接近，本文结果略大于全球多年平均的结果<sup>[15]</sup>，这是因为本文为春季结果且在前期工作中发现春季辐射效应一般最显著<sup>[14]</sup>。

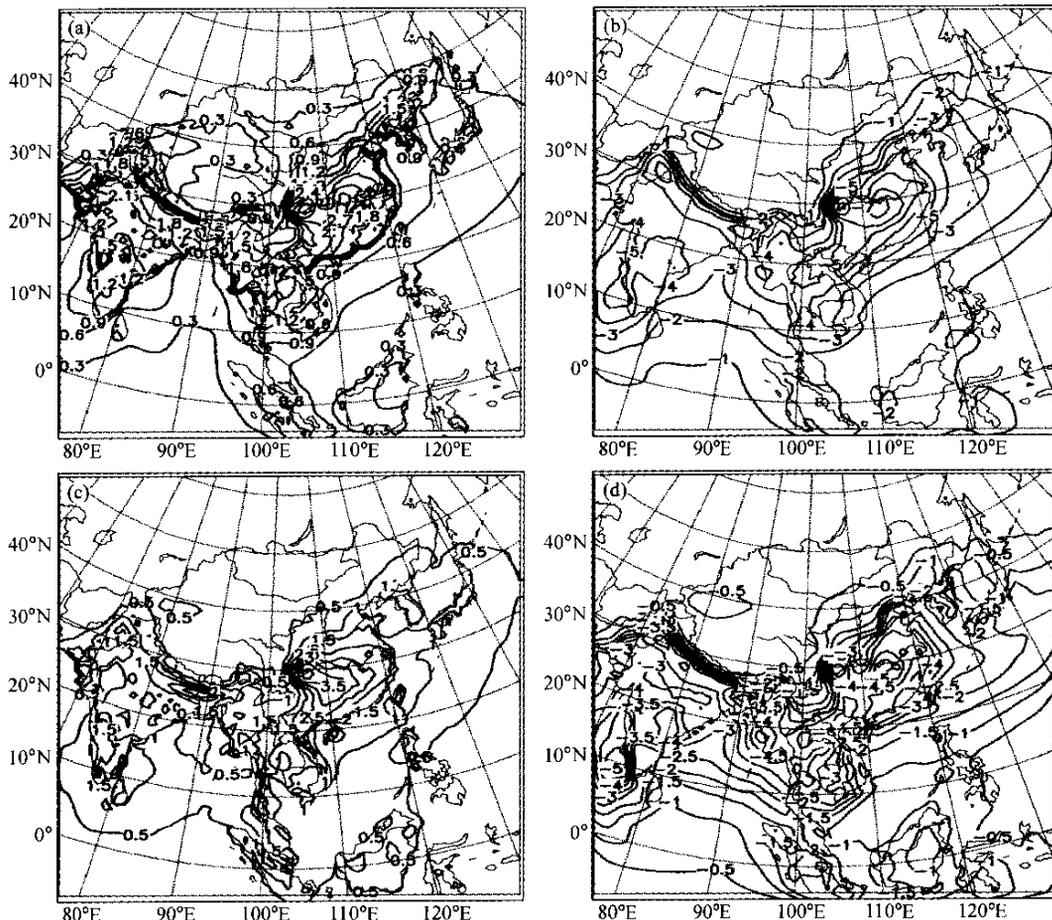


图 6 黑炭气溶胶引起辐射通量的增量(单位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ):(a)晴空模式顶净向下辐射通量;(b)晴空地表净向下辐射通量;(c)云天模式顶净向下辐射通量;(d)云天地表净向下辐射通量

Fig. 6 Increase of downward net radiation flux(units:  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ):(a)Clear sky net downward radiation flux at Top of Atmosphere(TOA);(b)clear sky net downward radiation flux at Surface(SRF);(c)all sky net downward radiation flux at TOA;(d)all sky downward radiation flux at SRF

## 4 结论与讨论

利用区域气候模式 RegCM3 对东亚地区春季黑炭气溶胶分布和辐射强迫进行模拟, 主要有以下结论:

(1) 黑炭气溶胶地面浓度和柱含量在印度半岛、中南半岛和中国东部为显著大值区, 地面浓度超过  $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 中心区达到  $2.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 柱含量在  $1.5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$  以上, 最大为  $3.5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

(2) 气柱平均输送通量在  $20^\circ\text{N}$  以北主要自西向东,  $20^\circ\text{N}$  以南基本趋势为自东向西输送; 我国大陆长江以南地区由北向南分别受到印度半岛和中南半岛排放的影响, 其大致分界线在  $25^\circ\text{N}$  附近, 越往西侧分界纬度越低; 我国大陆的排放没有显著向南海和中南半岛输送, 而主要对朝鲜半岛、日本及西太平洋地区产生影响。

(3)  $850 \sim 700 \text{hPa}$  之间是中南半岛排放向我国输送的主要层次, 源自几乎整个中南半岛生物质燃烧区的含黑炭气溶胶的气流能向东北方向输送, 影响我国  $25^\circ\text{N}$  以南的大陆地区, 还存在从越南、泰国、缅甸东部出发向东的输送影响广西、广东、香港等地区的现象。

(4) 在  $105^\circ\text{E}$  的剖面上,  $15^\circ\text{N}$  以北为向东输送, 而  $8^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$  为向东和向西输送的过渡区域, 在空中形成向低纬倾斜的过渡面。在  $125^\circ\text{E}$  剖面上, 赤道与  $10^\circ\text{N}$  之间向西输送,  $10^\circ\text{N} \sim 20^\circ\text{N}$  为过渡区, 过渡面仍向低纬倾斜,  $20^\circ\text{N}$  以北为向东输送区, 其中  $30^\circ\text{N}$  以北的向东输送能影响朝鲜、日本等地。  $125^\circ\text{E}$  向东输送通量比  $105^\circ\text{E}$  的小 2 个量级。

(5) 境外排放对我国的贡献率, 在  $105^\circ\text{E}$  以西和长江以南比较显著, 对华北、东北、华东北部影响较小。我国排放对朝鲜半岛、日本影响最显著。

(6) 由黑炭气溶胶引起晴空和云天大气顶净向下辐射通量增大, 地表净向下辐射通量减小; 辐射通量变化最显著地区在四川、湖北一带, 大气顶辐射通量增大达  $4 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 地表通量减小约  $-5.5 \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

由于缺乏较大范围连续的地面黑炭气溶胶观测和垂直分布观测, 本文模拟结果仅对个别时段、个别地点进行了对比验证, 还难以全面了解模拟区域内的真实情况和进行模式效果的评估, 这在今后的工作中将加强。另外, 本文仅分析了无气候反馈的直接辐射强迫, 对气候系统的响应结果和响应机理未做分析探讨, 这是后续工作的主要问题。

致谢 中国科学院大气物理研究所张仁健研究员提供了北京地区黑炭气溶胶观测资料, 特此致谢!

## 参考文献

- [ 1 ] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250 ~ 2253
- [ 2 ] Roberts D L, Jones A. Climate sensitivity to black carbon aerosol from fuel combustion. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D16202, doi: 10. 1029/2004JD004676
- [ 3 ] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 944pp
- [ 4 ] 汤洁, 温玉璞, 周凌郁, 等. 中国西部大气清洁地区黑炭气溶胶的观测研究. *应用气象学报*, 1999, **10** (2): 160 ~ 170  
Tang Jie, Wen Yupu, Zhou Lingxi, et al. Observational study of black carbon in clean air area of western China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, **10** (2): 160 ~ 169
- [ 5 ] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China. *Atmos. Environ.*, 2001, **35**: 4281 ~ 4296
- [ 6 ] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D21): 8809, doi: 10. 1029/2002JD003093
- [ 7 ] Breon F-M, Tanre D, Generoso S. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 2002, **295**: 834 ~ 838
- [ 8 ] Liu H Y, Chang W L, Samuel J O, et al. On springtime high ozone events in the lower troposphere from Southeast Asian biomass burning. *Atmos. Environ.*, 1999, **33** (15): 2403 ~ 2410
- [ 9 ] Chan L Y, Chan C Y, Liu H Y. A case study on the biomass burning in Southeast Asia and enhancement of tropospheric ozone over Hong Kong. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (10): 1479 ~ 1482
- [ 10 ] 吴润, 蒋维楣, 陈新梅, 等. 生物质燃烧对东南亚及中国南方对流层臭氧含量影响的模拟研究. *环境科学*, 2004, **25** (2): 1 ~ 6  
Wu Jian, Jiang Weimei, Chen Xinmei, et al. Simulation of effects to tropospheric ozone over South East Asia and South China from biomass burning. *Environmental Science* (in Chinese), 2004, **25** (2): 1 ~ 6
- [ 11 ] Uno I, Carmichael G R, Street D, et al. Analysis of surface black carbon distributions during ACE-Asia using a regional-scale aerosol model. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D23): 8636, doi: 10. 1029/2002JD003252
- [ 12 ] Hansen J, Sato Mki, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 6831 ~ 6864
- [ 13 ] Cook J, Highwood E J. Climate response to tropospheric absorbing aerosols in an intermediate general-circulation model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2004, **130**: 175 ~ 191
- [ 14 ] 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
- [ 15 ] Wang C. A modeling study on the climate impacts of black carbon aerosols. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D03106, doi: 10.

- 1029/2003JD004084
- [ 16 ] Giorgi F , Bi X Q , Qian Y. Indirect vs. direct effects of anthropogenic sulfate on the climate of East Asia as simulated with a regional coupled climate-chemistry/aerosol model. *Climatic Change* , 2003 , **58** : 345 ~ 376
- [ 17 ] Pal J , Small E , Eltahir E. Simulation of regional-scale water and energy budgets : Representation of subgrid cloud and precipitation processes within regcm. *J. Geophys. Res.* , 2000 , **105** ( D24 ) : 29579 ~ 29594
- [ 18 ] Zeng X , Zhao M , Dickinson R E. Intercomparison of bulk aerodynamic algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA Coarse and TAO data. *J. Climate* , 1998 , **11** ( 10 ) : 2628 ~ 2644
- [ 19 ] Betts A. A new convective adjustment scheme. Part I : Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* , 1986 , **112** : 677 ~ 691
- [ 20 ] Qian Y , Giorgi F. Interactive coupling of regional climate and sulfate aerosol models over eastern Asia. *J. Geophys. Res.* , 1999 , **104** ( D6 ) : 6477 ~ 6499
- [ 21 ] Qian Y , Giorgi F , Huang Y , et al. Simulation of anthropogenic sulfur over East Asia with a regional coupled chemistry-climate model. *Tellus* , Ser. B , 2001 , **53** : 171 ~ 191
- [ 22 ] Cooke W F , Liousse C , Cachier H , et al. Construction of  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model. *J. Geophys. Res.* , 1999 , **104** ( D18 ) : 22137 ~ 22162
- [ 23 ] Matsumoto K , Uematsu M , Hayano T , et al. Simultaneous measurements of particulate elemental carbon on the ground observation network over the western North Pacific during the ACE-Asia campaign. *J. Geophys. Res.* , 2003 , **108** ( D23 ) : 8635 , doi : 10. 1029/2002JD002744
- [ 24 ] Liousse C , Penner J E , Chuang C , et al. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. *J. Geophys. Res.* , 1996 , **101** ( D14 ) : 19411 ~ 19432
- [ 25 ] 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