

# 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

吴润<sup>1,2</sup>, 蒋维楣<sup>1</sup>, 陈新梅<sup>2</sup>, 王卫国<sup>2</sup>, 郭世昌<sup>2</sup>, 谢应齐<sup>2</sup>, 刘红年<sup>1</sup>

(1. 南京大学大气科学系, 南京 210093; 2. 云南大学大气科学系, 昆明 650091)

**摘要:** 利用区域气候和大气化学模式系统, 对 2000 年春季生物质燃烧排放影响东南亚及中国南部地区对流层臭氧含量进行模拟研究. 结果表明, 春季东南亚和南亚的生物质燃烧不仅影响源区对流层臭氧含量, 而且对处于环流下游的中国南部地区也有显著作用; 燃烧源区主要影响对流层低层, 下游地区则影响对流层中低层. 在源区引起的对流层臭氧总浓度增加达  $2.1 \times 10^{-1} \text{ g/m}^2$ , 对下游的中国南部地区增加量为  $9.0 \sim 12.0 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2$ ; 源区大气低层 1000 ~ 900hPa 的臭氧含量可增加  $36 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$  以上, 而在中国南部 750 ~ 700hPa 高度上空的增加达  $15 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

**关键词:** 生物质燃烧; 大气臭氧; 区域气候模式; 中国南方

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)02-0001-06

## Simulation of Effects to Tropospheric Ozone over South East Asia and South China from Biomass Burning

WU Jian<sup>1,2</sup>, JIANG Wei mei<sup>1</sup>, CHEN Xin mei<sup>2</sup>, WANG Wei guo<sup>2</sup>, GUO Shi chang<sup>2</sup>, XIE Ying qi<sup>2</sup>, LIU Hong nian<sup>1</sup>

(1. Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing, 210093; 2. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming, 650091)

**Abstract:** The ozone variation led by biomass burning in Spring 2000 over South East Asia and South of China region was simulated with a combined regional climate model and atmospheric chemical model. It was found that ozone was added by the pollutant of biomass burning both over source area and down wind area. The ozone of lower troposphere was affected by the pollutant over source area, so did the ozone in middle troposphere over down wind area. An ozone increase of  $9.0 \sim 12.0 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2$  over South of China was found. The range of ozone increase between 1000 ~ 900hPa over source area was more than  $36 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

**Key words:** biomass burning; ozone; regional climate model; south of China

生物质燃烧可排放出大量的温室气体,并能释放出通过光化作用产生对流层臭氧及形成污染的氮氧化物、烃类和引起平流层臭氧化学损耗的卤化烃类<sup>[1,2]</sup>. 生物质燃烧的 90% 是人为因素引起的<sup>[3,4]</sup>, 而且近百年来已扩展到全球尺度范围, 全球增暖将导致更频繁更剧烈的生物质燃烧<sup>[5]</sup>.

目前国际科学界对生物质燃烧的研究主要集中在排放的温室气体、气溶胶产生的气候效应, 以及排放的氮氧化物、一氧化碳和有机物通过光化作用产生的对流层臭氧含量变化几方面<sup>[6~10]</sup>. IPCC (2001) 评估报告中指出: 生物质燃烧对对流层臭氧的含量有显著的影响, 由此能产生辐射强迫. 国际上关于生物质燃烧对臭氧的影响主要集中在大西洋西部的非洲海岸<sup>[11~13]</sup>, 印度尼西亚等地<sup>[14]</sup>. 东南亚尤其中南半岛地区也是重要的生物质燃烧的排放源区, 由于纬度比较低, 光照条件好, 因此排放物容易产生二次污染, 可能影响下风向的我国南方地区. 国

际上的 TRACE-P 计划正在进行这方面的研究<sup>[15]</sup>. 因此研究东南亚地区生物质燃烧排放物对我国南方地区环境和气候造成的可能影响是一个很有科学意义的问题, 目前国内还少有开展.

### 1 模式及模拟方案

本文利用区域气候模式与大气化学模式构成模拟系统, 其中区域气候模式为 RegCM2, 该模式系统曾用于模拟人为硫酸盐的分布和直接辐射效应<sup>[16]</sup>、对流层臭氧的辐射效应<sup>[17,18]</sup>等工作, 具有较强的模拟效能. 模式顶位于 100hPa, 垂直分层为 23 层 Sigma 层, 水平分辨率 90km.

所采用的大气化学模式是 SAQM, 模式将大气

收稿日期: 2003-05-31; 修订日期: 2003-08-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40165001; 40205016); 云南省自然科学基金资助项目(2003D0011).

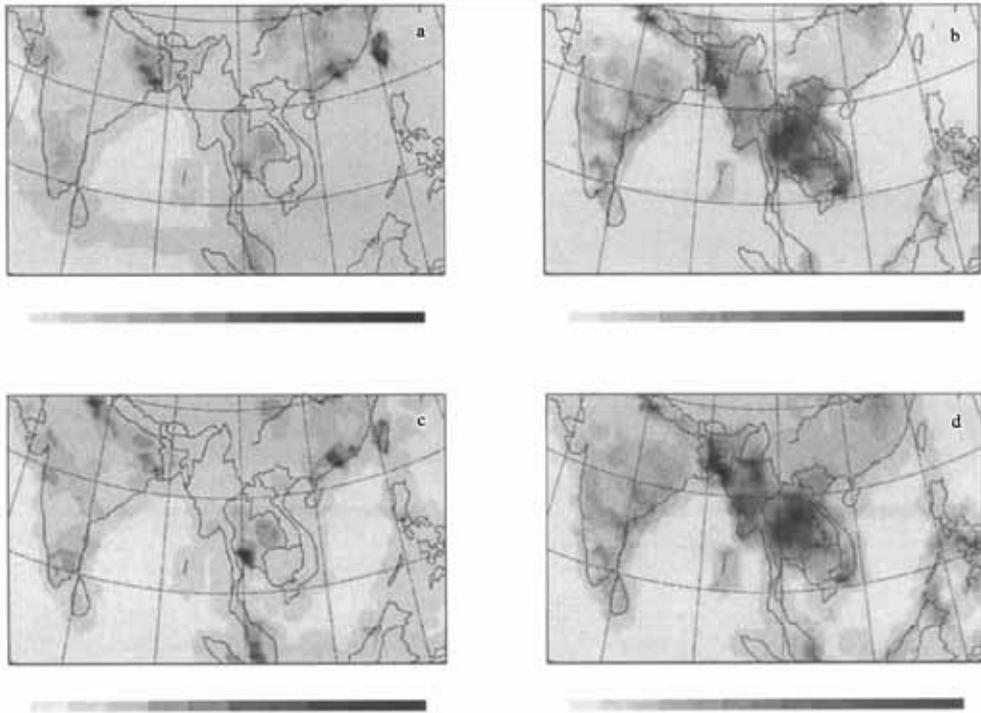
作者简介: 吴润(1973~), 男, 博士, 讲师, 主要研究大气环境与气候变化模拟. E-mail: wujian@ynu.edu.cn

中的化学物质成分浓度考虑为受输送、源排放、沉降清除、化学转化等过程的控制。大气化学反应采用 CB4 反应机制,考虑了 72 个热反应和 11 个光解反应及 36 种化学物质。模式中考虑了液相化学过程,并且包含积云动力夹卷效应引起垂直方向物种浓度的再分布,液相化学模式的积分采用准稳态近似法,积分中所用的云特征参数如云顶和云底高度、云量、云内温度和液态水含量等由一个定常的一维云模式诊断得到。

利用 2000 年 3~4 月的 NCEP 资料,为区域气候模式提供初始条件和侧边界条件。化学物种源采用同年的 TRACE-P 计划中生物质燃烧排放量和人类其它活动排放量资料<sup>[15,19]</sup>,主要包含  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、

$\text{CO}$ 、 $\text{BC}$  (Black Carbon) 等无机物,以及甲醛 (HCHO)、烷烃类 (PAR)、乙烷 (ETH)、烯烃类 (OLE)、乙醛和高级醛 (ALD)、甲苯 (TOL) 和二甲苯 (XYL) 等有机物。化学物种初始浓度为化学模式自诊断 24h 的浓度。模拟的区域从  $0^\circ \sim 26^\circ \text{N}$ ,  $75^\circ \sim 130^\circ \text{E}$ , 水平网格点数  $40 \times 75$ , 范围包括印度半岛、中南半岛和中国南部。区域气候模式采用 200s 的步长,大气化学模式自选步长。模拟过程中每 6h 模式时间输出一次结果,以下将要分析的计算结果是各次输出结果的平均值。

首先对模拟区域内化学物种的时空排放分布特征进行分析。在图 1 中仅给出了生物质燃烧和人类其它活动排放源的  $\text{NO}_x$  及烷烃类有机物分布的对



(a)  $\text{NO}_x$  人类排放 (b)  $\text{NO}_x$  燃烧排放 (c) 烷烃人类排放 (d) 烷烃燃烧排放

(a) Anthropogenic emission of  $\text{NO}_x$  (b) Biomass burning emission of  $\text{NO}_x$

(c) Anthropogenic emission of HC (d) Biomass burning emission of HC

图 1 2000 年  $\text{NO}_x$  和烷烃人类排放和生物质燃烧排放源分布 [ $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ]

Fig. 1 Annual averaged emission of anthropogenic activity and biomass burning of  $\text{NO}_x$  and HC in year 2000 [ $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ ]

比。图 1a 和图 1c 为 2000 年  $\text{NO}_x$  和烷烃类有机物的人类其它活动排放量,图 1b 与图 1d 是生物质燃烧对应的排放量,单位为  $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$ 。考虑到生物质燃烧主要只发生在春季,同时参照同年的逐日吸收性气溶胶指数,因此年生物质燃烧仅指春季的排放量。从图 1a 中看到,  $\text{NO}_x$  的人类其它活动排放源主

要集中在工业城市,如中国南方沿海、台湾和内陆工业城市,印度的新德里和加尔各答,中南半岛的泰国。而图 1b 中生物质燃烧的主要发生源地在中南半岛,泰国境内的排放最大,孟加拉国次之,印度半岛也有排放。图 1c 和图 1d 中烷烃类有机物的排放状况与  $\text{NO}_x$  的排放基本一致。通过对比可以发现,在

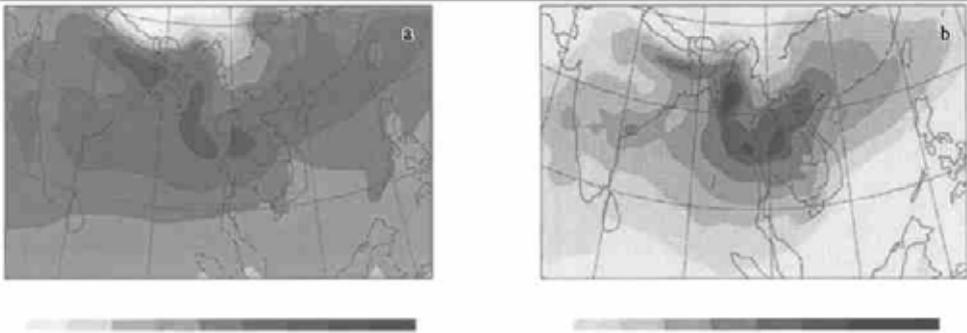
缅甸、老挝、柬埔寨物质燃烧所产生的排放量已超过了该地区总排放量的 60%，而泰国和印度东部以及菲律宾一带燃烧排放量也远超过了人类其它活动的排放量(图略)。因此，这些国家和地区春季生物质燃烧产生的环境气候响应要比同期人类其它活动排放影响重要得多。

## 2 臭氧垂直积分浓度分布

通常春季生物质燃烧旺盛时段为 3 月中旬到 4 月中旬，为此重点模拟了 2000 年 3 月 12 日~4 月 10 日的情况。图 2 给出了模拟的此时段平均臭氧垂直积分浓度。图 2a 是考虑生物质燃烧和人类其它活动的总排放量产生的臭氧垂直积分浓度，在印度与孟加拉国一带、缅甸西部和泰国境内有大于  $9.0 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$  的高值中心，印度半岛东部，中南半岛大

部和中国南部为  $8.1 \sim 9.0 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ ，其余的陆地地区一般高于  $7.2 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ ，在青藏高原上则低于  $5.4 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ 。

图 2b 为生物质燃烧排放对臭氧垂直积分浓度的贡献，其引起的对流层臭氧浓度增加均大于  $6.0 \times 10^{-2} \text{g/m}^2$ 。在源区的中南半岛超过  $1.5 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ ，其中缅甸西部最大可达  $2.1 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ 。在下游区域的广西达到  $1.2 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$ ，而广东、海南，以及贵州、湖南、江西和福建的部分地区为  $9.0 \times 10^{-2} \text{g/m}^2$ 。由于印度半岛生物质燃烧的排放量不大，燃烧对臭氧的贡献不如中南半岛显著，虽有影响但超过  $1.2 \times 10^{-1} \text{g/m}^2$  的区域范围很小，达到  $9.0 \times 10^{-2} \text{g/m}^2$  仅存在于印度东部和东北部。由此可见，生物质燃烧排放对对流层臭氧垂直积分浓度的作用在源区最大，并对下游地区也能产生显著影响。



(a) 总排放量的贡献 (b) 生物质燃烧排放量的贡献

(a) Contribution of total emission (b) Contribution of biomass burning

图 2 2000 年 3 月 12 日~4 月 10 日的平均臭氧垂直积分浓度( $\text{g/m}^2$ )

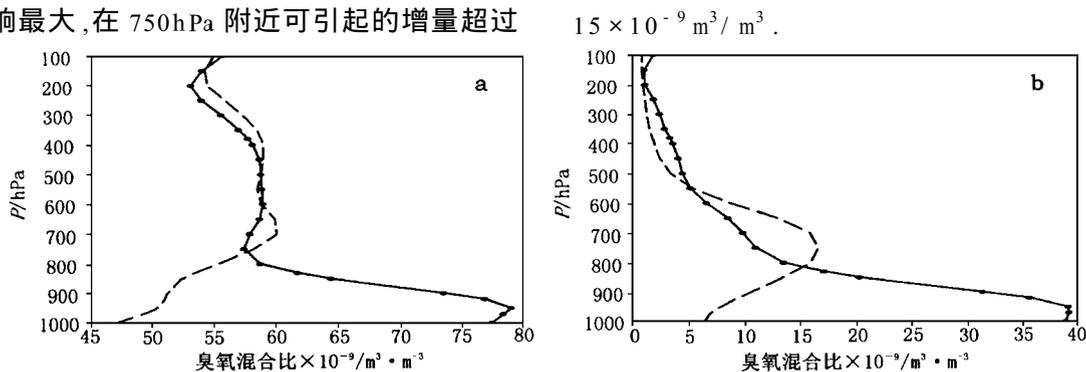
Fig.2 Averaged column burden of ozone from 12th Mar. to 10th Apr., 2000 ( $\text{g/m}^2$ )

## 3 臭氧垂直分布

在生物质燃烧区选取包括缅甸大部的区域为“源区”，格点数为  $12 \times 9$ 。同时在处于其西北部的中国南方选取一区域为“下游区”，包括广西和广东的部分地区，格点数为  $5 \times 5$ 。图 3 是“源区”与“下游区”平均总排放和生物质燃烧排放对臭氧垂直廓线的影响。“源区”总排放影响的臭氧垂直廓线在近地面 950hPa 上最大超过了  $78 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ ，在此极大值的高度以上，臭氧体积混合比随高度增加而减小，到 750hPa 达次极小值随后的变化则较为缓慢，而在 200hPa 高度又存在一极小值  $54 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ 。“下游区”在 700hPa 和 400hPa 上出现了  $60 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$  的双峰极大值，而 150hPa 高度上为  $55 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$  的极小值。“源区”与“下游区”臭氧垂

直廓线在 500hPa 以上的变化相一致，在对流层中低层则表现出了非常明显的差异。生物质燃烧对臭氧垂直分布的贡献，在“源区”大气低层 1000~900hPa 之间最明显，950hPa 上增加的臭氧含量最大值已超过了  $36 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ ，此影响随高度的增加而迅速减小，到 800hPa 以上增加的臭氧含量已小于  $12 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ ，而对 600hPa 以上的影响较小。“下游区”最显著的贡献位于 750hPa 高度上，增加的臭氧含量超过  $15 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ 。在 750hPa 以下燃烧的贡献随高度增加而加大，从 750hPa 向上随高度增加而减弱，而 600hPa 以上增加的臭氧含量已小于  $6 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ 。表明了生物质燃烧排放不仅对“源区”臭氧廓线产生影响，对其“下游区”的影响也不容忽视。在“源区”对流层底层的影响最大，臭氧含量可增加约  $40 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{m}^3$ 。对“下游区”地区对流层中低

层的影响最大,在 750hPa 附近可引起的增量超过



(a) 总排放量的影响 ( $\times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) (b) 生物质燃烧的影响 ( $\times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

(a) Effect of total emission ( $\times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) (b) Effect of biomass burning ( $\times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )

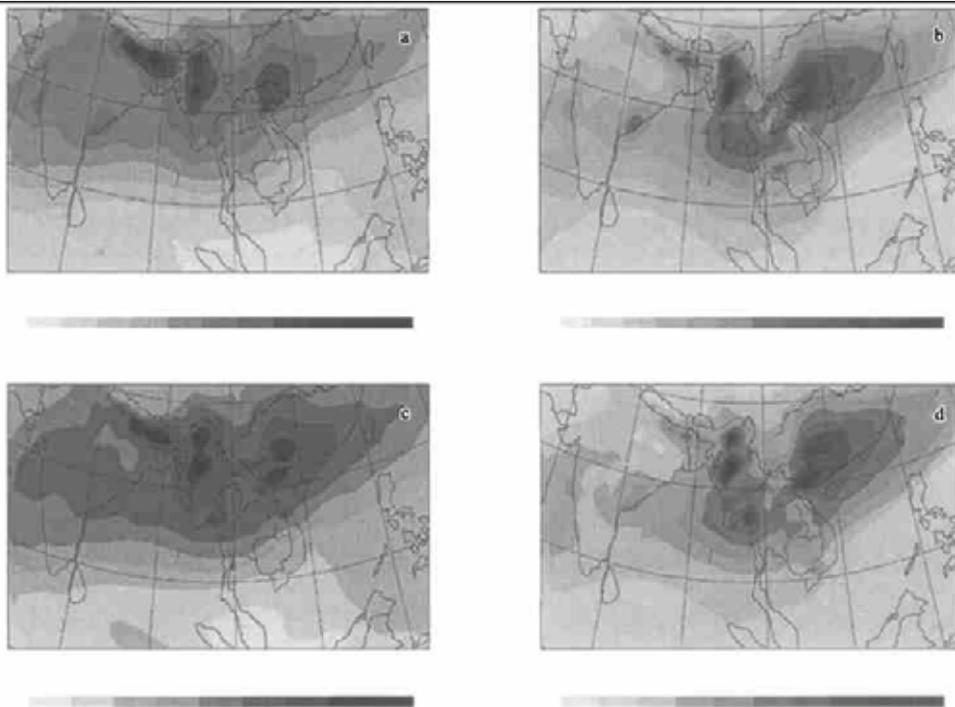
图 3 臭氧垂直廓线在源区(实线)和下游区(虚线)的变化( $10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$ )

Fig. 3 The ozone profile in the source area(dot) and down-wind area (dash) ( $10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$ )

### 4 臭氧水平分布

从图 4a 中看到,750hPa 高度上总排放产生的臭氧水平分布有 3 个达  $65 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$  的高值中心,分别位于印度与孟加拉国的交界地区,缅甸及印度的部分地区,越南北部和广西地区.其中,印度及孟加拉国交界处达最大值  $80 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$ .将图 4a

和图 4c 相比较,2 图的水平分布状况基本一致,但随高度的增加 700hPa 高度上臭氧含量高值中心的数值有所减小,印度东部的高值中心明显减弱,而在缅甸和越南上空的高值中心已分裂.臭氧含量在  $60 \sim 65 \times 10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$  间的分布范围在 750hPa 上还未输送到香港上空,但在 700hPa 高度上已跨过香港及其东部地区.



(a) 750hPa 总排放产生的臭氧 (b) 750hPa 生物质燃烧产生的臭氧 (c) 700hPa 总排放产生的臭氧 (d) 700hPa 生物质燃烧产生的臭氧

(a) Effect of total emission on 750 hPa (b) Effect of biomass burning emission on 750 hPa

(c) Effect of total emission on 700 hPa (d) Effect of biomass burning emission on 700 hPa

图 4 总排放和生物质燃烧产生的臭氧水平分布( $10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$ )

Fig. 4 The distribution of ozone of total and biomass burning emission ( $10^{-9} \text{ m}^3 / \text{m}^3$ )

为了考察生物质燃烧影响的水平范围,并考虑到生物质燃烧影响下游地区的高度均集中在 750 ~ 700hPa 间.图 4b 和图 4d 分别给出了 750hPa 与 700hPa 高度上生物质燃烧排放对臭氧水平分布的影响.对中国南部而言,生物质燃烧对广西的影响最大,能引起臭氧体积混合比的增量达  $21 \times 10^{-9} \sim 24 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ .其次臭氧增加在  $15 \times 10^{-9} \sim 18 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$  间的有海南、广东,以及湖南、江西和福建的部分地区.这与春季香港地区在 700hPa 高度附近经常观测到的臭氧极大值相一致<sup>[20,21]</sup>,因而观测结果证实了由于中南半岛生物质燃烧排放及其环流运输的作用,而且这一过程对广西地区造成的影响要比对香港地区的影响还要大得多.

从图 5 中可以看到大气环流对生物质燃烧排放的输运作用.对平均流场而言,印度半岛受反气旋型

环流控制,斯里兰卡及印度洋上空为气旋型环流,由此可形成南北向的局地经圈垂直环流,这将抑制着印度东部的燃烧排放不能有效地向中南半岛上空输送.在中南半岛地区  $15^\circ \text{N}$  以南为东风环流,  $20^\circ \text{N}$  以北为西风环流,其间分别存在有弱的气旋型环流与反气旋型环流,它们的中心在 700hPa 高度上位于  $(26^\circ \text{N}, 85^\circ \text{E})$  和  $(18^\circ \text{N}, 100^\circ \text{E})$ ,而且北部与珠穆朗玛峰的东南麓接壤,地形起伏变化复杂.由于泰国处于东风环流控制中,使得燃烧排放的  $\text{NO}_x$  以及对臭氧的产生起作用的气体成分随偏东风向缅甸附近输送.而缅甸地区主要受西风与西南风环流控制,这将有利于燃烧排放的物质向环流下游区的中国南部输送,从而对下游地区对流层臭氧含量产生影响.同样,在越南和老挝均为西南风控制,进有其南部地区处在东风环流中,因此这一地区产生的燃烧排放将

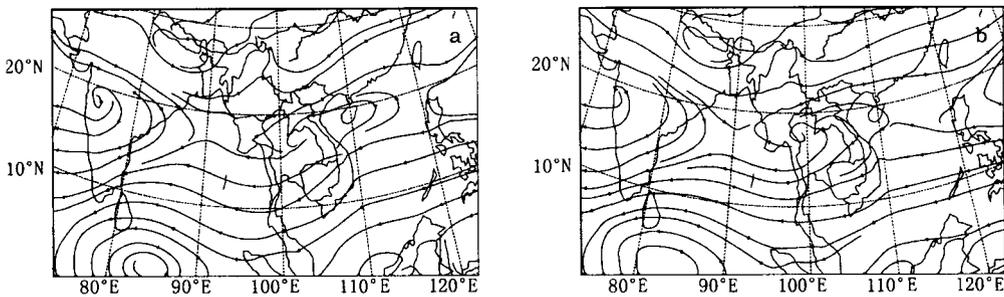


图 5 2000 年 3 月 12 日 ~ 4 月 10 日的平均流场 (a 750hPa, b 700hPa)

Fig. 5 Averaged stream line from 12th Mar. to 10th Apr., 2000 (a 750hPa, b 700hPa)

向东北方输送.

## 5 结论与讨论

春季生物质燃烧对东南亚和中国南部对流层臭氧含量存在着非常显著的影响,具体表现为:

(1) 生物质燃烧引起臭氧总浓度的增加最大值位于源区的缅甸和泰国,达  $2.1 \times 10^{-1} \text{ g}/\text{m}^2$ .对下游中国南方影响最大的地区位于广西,其臭氧浓度增量为  $1.2 \sim 1.5 \times 10^{-1} \text{ g}/\text{m}^2$ ,在广东、贵州、湖南和江西大部分地区达  $9.0 \sim 12.0 \times 10^{-2} \text{ g}/\text{m}^2$ .对流层中臭氧含量增加最大的垂直高度,在源区为 950hPa,引起的增量大于  $36 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ ;下游区主要在 750 ~ 700hPa 间,含量可增加  $15 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ .

(2) 在 750hPa 高度上生物质燃烧对臭氧含量水平分布的贡献,最显著的区域位于源区的缅甸和越南北部以及下游的中国广西地区上空,其次为海南、广东、湖南、江西和福建.700hPa 高度上影响最

大的区域与 750hPa 高度基本一致,但影响区域已越过香港及其以东地区.

(3) 生物质燃烧排放的环流输运分布与 750 ~ 700hPa 层次上的流场形势相一致.由此可见,大气环流的输运效应可以形成污染物质的跨国远距离输送,并由此导致全球性的环境污染.

通过本文的工作获得了中南半岛春季生物质燃烧对我国南方地区对流层臭氧影响的基本情况,虽然所得到的一些定量结果还有待观测资料的对比验证,但是生物质燃烧对我国的影响是显著的,为获得由此产生的对大气环境变化和辐射效应等影响的更具体深入的分析,还需要进行大量的相关研究工作.

参考文献:

- [1] Houghton R A. Biomass Burning from the Perspective of the Global Carbon Cycle [A]. In: Levine J S. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications [C]. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1991. 321 ~ 325.
- [2] Andreae M O, Fishman J, Garstang M, et al. Biomass Burning

- in the Global Environment: First Results from the IGAC/BIBEX Field Campaign SATARE/TRACE-A/SAFARI-92[ A]. In: Prinn R G. Global Atmospheric-Biospheric Chemistry[ C]. New York: Plenum Press, 1994. 83 ~ 101.
- [ 3 ] Hao W M, Liu M H. Spatial and Temporal Distribution of Tropical Biomass Burning[ J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(4): 495 ~ 503.
- [ 4 ] Andreae M O. Biomass Burning: Its History, Use, and Distribution and Its Impact on Environmental Quality and Global Change[ A]. In: Levine J S. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications[ C]. Cambridge, Mass: The MIT Press, 1991. 3 ~ 21.
- [ 5 ] Penner J E, Bradley M M, *et al.* A Numerical Simulation of the Aerosol-Cloud Interactions and Atmospheric Dynamics of the Hardiman Township, Ontario, Prescribed Burn[ A]. In: Levine J S. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications[ C]. Cambridge, Mass: The MIT Press. 1991. 420 ~ 426.
- [ 6 ] Andreae M O, Artaxo P, Fischer H, *et al.* Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region[ J]. Geophys. Res. Lett., 2001, 28(6): 951 ~ 954.
- [ 7 ] Anderson I C, Levine J S, Poth M A, *et al.* Enhanced biogenic emissions of nitric oxide and nitrous oxide following surface biomass burning[ J]. J. Geophys. Res., 1988, 93: 3893 ~ 3898.
- [ 8 ] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[ J]. Science, 1990, 250: 1669 ~ 1678.
- [ 9 ] Lobert J M, Scharffe D H, *et al.* Experimental evaluation of biomass burning emissions: Nitrogen and carbon containing compounds[ A]. In: Levine J S. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications[ C]. Cambridge, Mass., The MIT Press, 1991. 289 ~ 304.
- [ 10 ] Levine J S, Cofer W R, Cahoon D R, *et al.* Biomass Burning: A Driver for Global Change[ J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(3): 120A ~ 125A.
- [ 11 ] Fishman J. The global consequences of increasing tropospheric ozone concentrations[ J]. Atmosphere, 1991, 22(7): 685 ~ 695.
- [ 12 ] Fishman J, Brackett V G. The climatological distribution of tropospheric ozone derived from satellite measurements using version 7 Total Ozone Mapping Spectrometer and Stratospheric Aerosol and Gas Experiment data sets[ J]. J. Geophys. Res., 1997, 102(D15): 19275 ~ 19278.
- [ 13 ] Portmann R W, Solomon S, Fishman J, Olson J G, Kiehl J T, Briegleb B. Radiative forcing of the Earth climate system due to tropical tropospheric ozone production[ J]. J. Geophys. Res., 1997, 102(D8): 9409 ~ 9417.
- [ 14 ] Hauglustaine D A, Brasseur G P, Levine J S. A sensitivity simulation of tropospheric ozone changes due to the 1997 Indonesian fire emissions[ J]. Geophys. Res. Lett., 1999, 26(21): 3305 ~ 3308.
- [ 15 ] Tang Y H, Gregory R, Carmichael J H W, *et al.* The influences of biomass burning during TRACE-P experiment identified by the regional chemical transport model[ J]. J. Geophys. Res., 2003(in press).
- [ 16 ] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 汤剑平. 硫酸盐直接和间接辐射气候效应的模拟研究[ J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 129 ~ 134.
- [ 17 ] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 汤剑平. 区域气候模式和大气化学模式对中国地区气候变化和对流层臭氧分布的模拟[ J]. 南京大学学报, 2002, 38(4): 572 ~ 582.
- [ 18 ] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 汤剑平, 王卫国. 我国对流层臭氧增加对温度的影响[ J]. 高原气象, 2003, 22(2): 132 ~ 142.
- [ 19 ] 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]. J. Geophys. Res., 2003(in press).
- [ 20 ] 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[ J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(10): 1479 ~ 1482.
- [ 21 ] Liu H Y, Chang W L, Samuel J O, Chan L Y, Joyce M H. On springtime high ozone events in the lower troposphere from Southeast Asian biomass burning[ J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(15): 2403 ~ 2410.