

Zheng Y G, Zhu P J, Chan C Y, et al. Influence of biomass burning in southeast Asia on the lower tropospheric ozone distribution over South China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(5):767~775

东南亚地区生物体燃烧影响华南地区对流层臭氧垂直分布的个例分析

郑永光¹ 朱佩君¹ 陈尊裕² 陈鲁言² 崔宏¹ 郑向东³
赵琼⁴ 秦瑜¹

1 北京大学物理学院大气科学系暴雨与旱涝灾害教育部重点实验室, 北京 100871

2 香港理工大学土木与结构工程学系, 香港

3 中国气象科学研究院, 北京 100081

4 北京市气象局观象台, 北京 100089

摘要 2001 年 3 月 7 日与 8 日在香港与昆明用电化学臭氧探空仪探测到了对流层低层异常的高浓度臭氧分布. 本文使用 NCEP(美国环境预报中心)分析资料、中尺度数值模式 MM5 模拟的大气环流数据、卫星观测的东南亚地区的生物体燃烧状况、气溶胶指数等资料,分析了这段时间的天气形势、大气环流、空气的后向轨迹以及生物体燃烧产生的烟尘的轨迹,结果发现高浓度的臭氧空气来源于有生物体燃烧的中南半岛地区. 燃烧烟尘的轨迹还表明生物体燃烧地区的下风方的对流层低层臭氧的分布会受到上游地区生物体燃烧产物的影响.

关键词 臭氧 生物体燃烧 东南亚

文章编号 0001-5733(2004)05-0767-09 中图分类号 P421 收稿日期 2003-05-12,2004-03-31收修定稿

INFLUENCE OF BIOMASS BURNING IN SOUTHEAST ASIA ON THE LOWER TROPOSPHERIC OZONE DISTRIBUTION OVER SOUTH CHINA

ZHENG Yong-Guang¹ ZHU Pei-Jun¹ CHAN C Y² CHAN L Y² CUI Hong¹
ZHENG Xiang-Dong³ ZHAO Qiong⁴ QIN Yu¹

1 Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

2 Center of Urban Environmental Technology and Management, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

4 Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China

Abstract Ozone enhancement was observed in the lower troposphere over Hong Kong and Kunming on March 7 and 8, 2001 using the electrochemical concentration cell ozonesondes. Based on the data of NCEP, Total Column Ozone, the numerical simulation of MM5, AI from TOMS, aerosol optical depths from MODIS, and CO concentrations from MOPITT, we analyze the influence of the biomass burning in Southeast Asia on the ozone distribution in the lower troposphere over Hong Kong and Kunming. The transport of the emissions of biomass burning shows that the enhancement of ozone in the lower troposphere over Hong Kong and Kunming is

基金项目 国家自然科学基金项目(49975026, 40318001), Research Grant Council of Hong Kong (PolyU 5061/99E)和 The Hong Kong Polytechnic University (G YW 58)共同资助.

作者简介 郑永光,男,1974年生,讲师,2002年7月于北京大学物理学院大气科学系气象学专业博士毕业,主要从事对流层臭氧与中尺度气象学研究. E-mail:zhengy@pku.edu.cn

from the region where large-scale fires occurred in Southeast Asia. TOMS AI images and the atmospheric background circulations reveal that the biomass burning plumes in Southeast Asia are transported to downwind South China and lead to enhancement of the ozone concentrations in the lower troposphere.

Key words Ozone, Biomass burning, Southeast Asia.

1 引言

在南大西洋、非洲南部、南美洲以及东南亚地区,已经确认季节性的生物体燃烧会导致对流层中下层的臭氧增加^[1~4]. Elvidge 和 Baugh^[5]、Connors et al.^[6]发现春季东南亚地区以及印度的中东部有大量的生物体燃烧发生. Folkins et al.^[7]发现东南亚地区的生物燃烧产物可以被扩散到全球尺度的范围. 生物体燃烧产生的大量 CO、CO₂、CH₄、非甲烷碳氢化合物(NMHC)和氮氧化物(NO_x = NO + NO₂)被释放到大气中,这些燃烧产物在光的作用下就可以产生高浓度的臭氧^[8~11]. 这些燃烧产物及所产生的臭氧可以被气流输送到下风方向的地区^[12, 13]. Liu H Y^[14]使用追踪后向轨迹的方法研究了香港 1994 年 2 月和 1996 年 3 月、4 月的对流层低层臭氧浓度增加的个例,结果表明,香港对流层低层的高浓度臭氧来自东南亚的生物体燃烧地区. Chan L Y et al.^[13]和 Chan C Y^[15]认为含有生物体燃烧产物的空气在输送到香港的过程中发生的光化学反应产生的臭氧导致香港对流层低层臭氧浓度明显升高.

虽然已有的研究成果已经表明东南亚地区生物体燃烧能够导致香港地区对流层下部臭氧升高,但是这些研究结果没有确定东南亚地区生物体燃烧对多大地区范围的臭氧产生影响. 此外,直接的生物体燃烧产物观测资料也较缺乏,并且追踪空气来源使用的资料的时间与空间分辨率较低. 本文将以昆明和香港两地同时观测的臭氧分布数据为基础,结合卫星观测的 TOMS(臭氧总量测绘分光计)气溶胶指数、MODIS(中分辨率成像光谱仪)气溶胶光学厚度以及 MOPITT(对流层污染探测装置)一氧化碳浓度,使用中尺度数值模式 MM5 模拟的高时间、空间分辨率的大气环流资料,综合研究 2001 年 3 月 7、8 日个例东南亚地区生物体燃烧对华南地区臭氧垂直分布的影响. 在本文中,未特别指明的臭氧浓度都为体积混合比浓度,单位为 1×10^{-9} .

2 资料及其来源

臭氧探空资料是由北京大学物理学院大气科学

系、中国气象科学研究院、北京市气象局观象台、香港理工大学土木与结构工程学系与香港天文台联合于 2001 年 3 月到 4 月上旬在中国的香港、昆明进行探测的,探测仪器为芬兰 Vaisala 制造的 6A 型 ECC(电化学浓度单元)电化学臭氧探空仪. 在探测过程中,严格地按 Komhyr 在 1986 年制定的操作规范进行操作,以最大限度减少观测误差. Barnes et al.^[16]与 Komhyr et al.^[17]评估了 ECC 臭氧探空仪的准确性与精确性,结果表明使用 ECC 电化学臭氧探空仪能够有效地获取大气层中的臭氧垂直分布数据.

静止卫星云图资料是由北京大学物理学院大气科学系接收的日本 GMS-5 静止卫星资料;大气环流资料与柱体臭氧总量资料来自 NCEP 的每 6h 的最终分析资料,追踪轨迹所使用的大气三维运动资料是由中尺度数值模式 MM5 模拟的. MM5 模拟的地理范围以(27.5°N, 105°E)为中心,作了两重嵌套网格,大网格格距为 90km,格点数为 49 × 31,小网格格距为 30km,格点数为 73 × 37. 在垂直方向上以 σ 为坐标,从 1 到 0 不等距分为 27 层. 初始场以 NCEP 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6h 一次的分析场为背景场,该分析场资料在对流层有 21 层,平流层有 5 层,并且包含海温和土壤数据. 此外,还使用了地面和高空常规气象观测资料对背景场作订正形成模拟的初始场. 通过模拟结果与常规观测资料分析结果的对比(图略),发现 MM5 模式很好地模拟了这次天气过程.

3 香港和昆明对流层臭氧垂直分布特征

2001 年 3 月 7 日在香港和 8 日在昆明探测的臭氧浓度垂直分布廓线的对流层低层出现了明显的异常增高现象. 图 1 给出了 2001 年 3 月 7 日 05 UTC(世界协调时)在香港 0.1 ~ 18km 高度臭氧垂直分布廓线和 8 日 06 UTC 在昆明 1.9 ~ 18km 高度臭氧垂直分布廓线以及平均臭氧浓度垂直分布.

从图 1a 可见,香港 3 月 7 日的对流层臭氧、相对湿度和温度的分布廓线具有以下特征: 1 ~ 15km 出现多个臭氧浓度极大值和极小值,其中 2km 左右高度的极大值最大,大约为 110,此值远大于

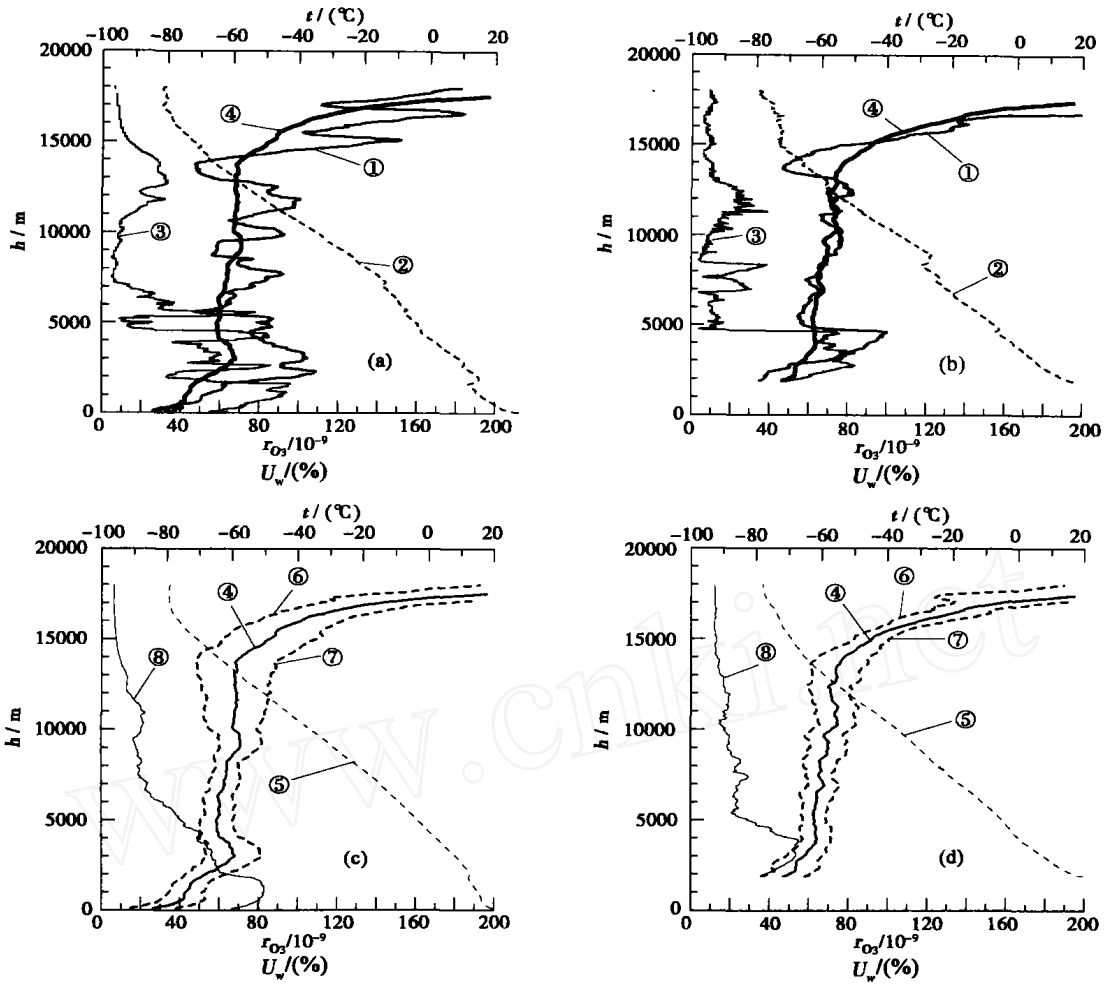


图 1 臭氧、温度及相对湿度垂直分布廓线

为臭氧廓线; 为温度廓线; 为相对湿度廓线; 为平均臭氧浓度廓线; 为平均温度廓线; 为臭氧浓度平均值减去标准差; 为加标准差; 为平均相对湿度廓线. r_{O_3} 为臭氧体积混合比浓度, U_w 为相对湿度, t 为温度, h 为高度.

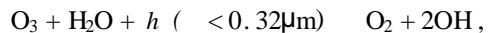
(a) 香港 2001 年 3 月 7 日 05 UTC 0.1~18km 高度; (b) 昆明 2001 年 3 月 8 日 06 UTC 1.9~18 km 高度; (c) 香港 1994~2001 年 3 月的 0.1~18km 臭氧、温度和相对湿度平均廓线; (d) 昆明 2001 年 3~4 月 2~18km 平均廓线.

Fig. 1 Profiles for ozone, temperature and relative humidity

3 月份的平均值 60. 对流层底层的高浓度臭氧空气层的相对湿度都较高,这说明此空气层不是来源于空气湿度较低的空气团,而是来源于湿度较高的地区,从第 6 节的分析会知道,这些空气来自较低纬度的中南半岛. 在对流层底层有几个很明显的逆温层,结合相对湿度廓线,可知逆温层上层的空气暖而湿,而下层的空气较为冷干. 从图 1b 可见,在大约 4km 的高度有一臭氧体积混合比浓度大于 90 的峰值,其相对湿度大约为 70%,在此高度上面有一明显的逆温层. 此特征同香港 3 月 7 日的个例非常类似.

需要指出的是,一般情况下,高湿度的空气中臭氧浓度较低,因为水汽能够与臭氧发生如下光化学

反应而破坏臭氧分子^[18]:



其中, h 为普朗克常数, ν 为光的频率, λ 为光的波长. 但从 3 月 7 日香港和 3 月 8 日昆明的臭氧、相对湿度的垂直分布来看,在对流层底层却是较高的相对湿度对应着较高浓度的臭氧分布,因此在这里必然有较高浓度的臭氧生成,以致抵消了水汽对臭氧的破坏作用,并且使得臭氧浓度升高.

由于臭氧总量的大值区与 500 hPa 和 200 hPa 的槽有很好的相关关系^[19, 20],因此为了说明香港与昆明对流层低层的臭氧浓度增加是否由冷空气从北方输送而来,由 NCEP 每日四次 $1^\circ \times 1^\circ$ 分析的柱体臭氧总量计算出 2001 年 3 月 7、8 日 06 UTC 的柱体

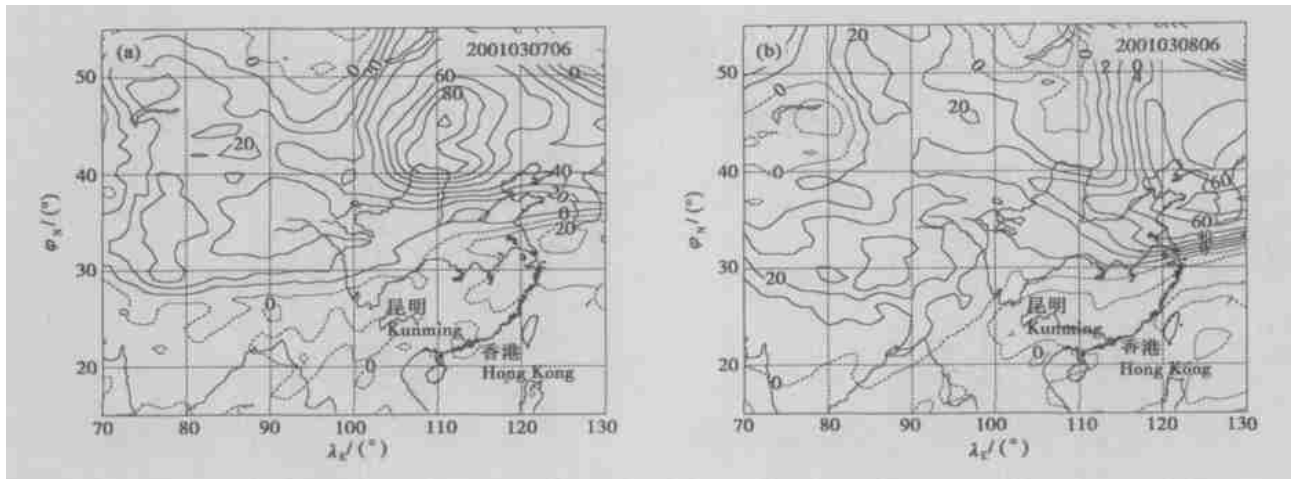


图2 柱体臭氧总量与3月平均值的偏差
 (实线 > 0, 虚线 = 0; 臭氧浓度单位 :DU; 柱体臭氧总量偏差等值线间隔 10 DU)
 (a) 2001年3月7日06 UTC; (b) 2001年3月8日06 UTC.

Fig. 2 Total column ozone deviation from the mean value of March 2001
 (solid lines > 0, dashed lines = 0; ozone unit : DU; contour interval : 10 DU)

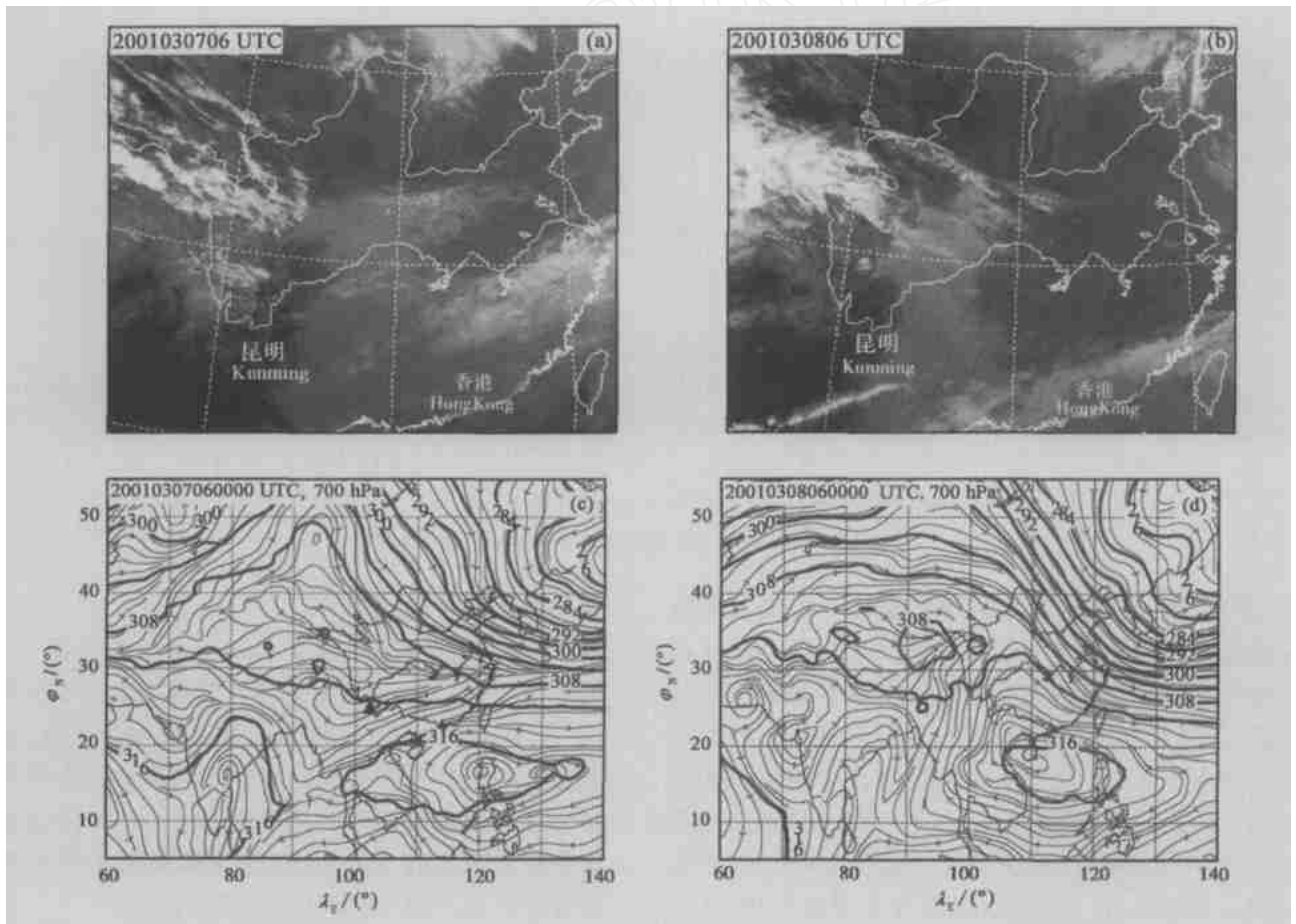


图3 日本 GMS-5 静止卫星增强红外云图(a, b)与700hPa 流场与位势高度场分布(c, d)
 (实线为流线,粗实线为位势高度,位势高度场单位 :10gpm,等值线间隔 40gpm)
 (a, c)2001年3月7日06 UTC; (b, d)2001年3月8日06 UTC.

Fig. 3 Satellite images from GMS-5(a, b) and atmospheric circulations at 700 hPa(c, d)
 (solid lines : streamline ; thick solid lines : geopotential height ; geopotential height unit : 10 gpm ; contour interval : 40 gpm)

臭氧总量与3月份平均值的差值(见图2)。从图2可见,北方冷气团所导致的臭氧增加主要位于 $30^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 的中纬度地区, 30°N 以南地区的臭氧总量低于3月的平均值,这说明昆明与香港两地的臭氧总量变化并未直接受到北方冷气团的影响,同时也表明对流层低层臭氧浓度的增加对于臭氧总量来说是微不足道的。

4 大气环流概况

2001年3月7日和8日影响昆明和香港两地的天气过程是一次南下冷锋^[21]。图3给出了3月7日与8日的两张增强红外卫星云图,从图上可见,3月7日在华南有一条宽广的冷锋云带,向西南一直延伸到贵州等地;3月8日06 UTC,该冷锋在云南昆明到贵州一带形成了昆明静止锋。但在3月4~8日这段时间,从GMS-5卫星云图(图略)发现孟加拉国及中南半岛地区都为晴天少云的天气,这种天气条件有利于生物体的燃烧。

图3(c, d)给出了2001年3月7日06 UTC与8日06 UTC的700 hPa的流线与位势高度场。从3月7日00 UTC到8日06 UTC中国大陆西北气流逐渐

向东南伸展,冷空气逐渐南下到了华南地区。与此同时,中心位于菲律宾的南海高压也逐渐由纬向带状分布转变为块状,并且高压中心也移动到了南海北部(其他时次的图未给出)。影响昆明与香港的环流形势也逐渐从西南风、西风环流转变为南风环流,这样就把中南半岛的空气团源源不断地输送到了昆明和香港。也就是说,冷空气的南下改变了华南地区对流层低层的大气环流,从而有利于输送中南半岛对流层低层的空气团到昆明与香港地区。

5 东南亚地区的生物体燃烧状况

春季东南亚地区经常有大规模的生物体燃烧。图4a为1993年东南亚的火点数目的季节性变化^[15],覆盖地区的范围为 $10^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$,是由AVHRR(先进的甚高分辨率扫描辐射仪)卫星图像资料反演而来。从图中可见,东南亚的火烧春季最多,尤以3、4月份为最^[15]。图4b给出了2001年3月份的火烧情况(资料来源:European Space Agency-ESA/ESRIN网站),该图表明在中南半岛及印度半岛的中东部地区都有不同程度的火烧存在,尤以中南半岛靠近孟加拉湾的地区(缅甸西部)火烧最

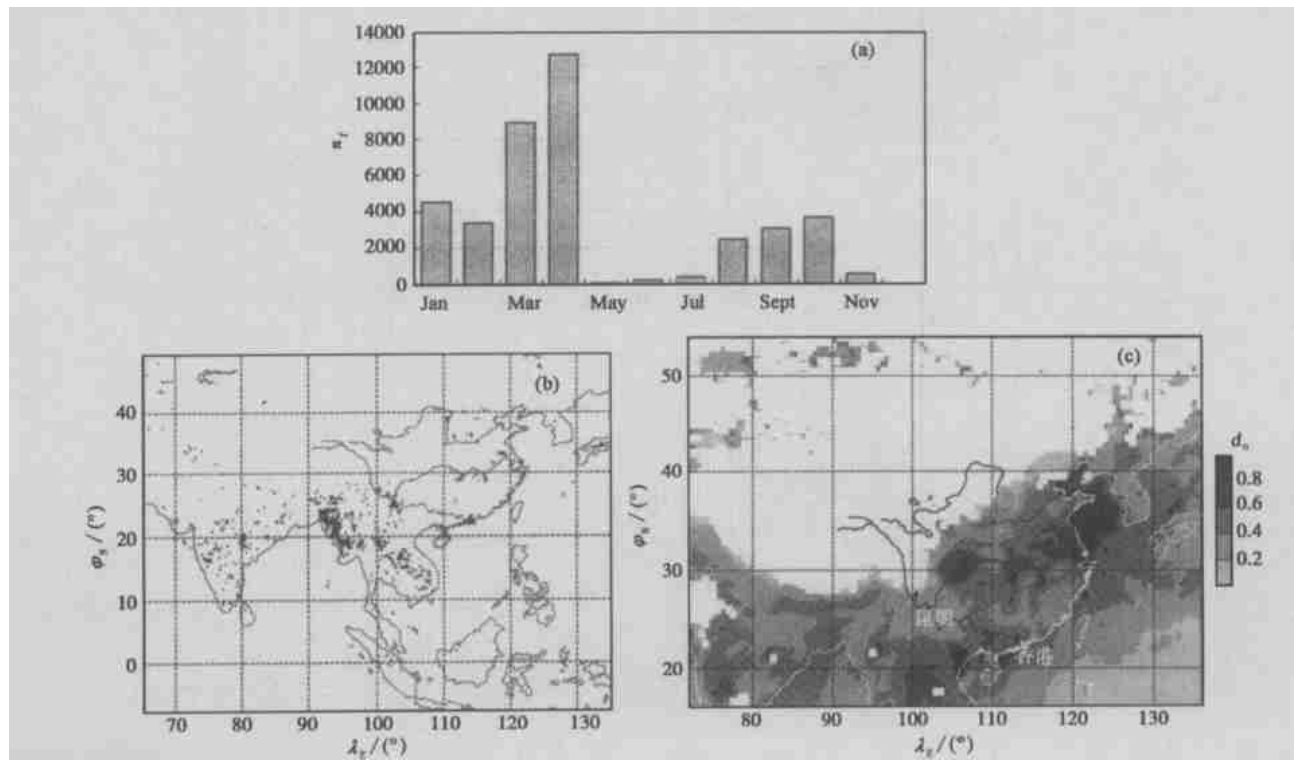


图4 东南亚地区的生物体燃烧情况

- (a) 1993年东南亚火点数目的季节性变化, n_f 为火点数; (b) 卫星探测到的2001年3月火点数据(黑色表示探测的火点);
(c) MODIS探测到的2001年3月平均气溶胶光学厚度 d_0 (量纲为1), 白色区域为无观测区。

Fig. 4 Biomass burning in Southeast Asia

为严重. 图 4c 给出了 2001 年 3 月份平均的 MODIS 观测到的气溶胶光学厚度. 从图上可见, 在中南半岛地区气溶胶光学厚度的值较大, 说明此地有较大浓度的吸收性气溶胶存在. 张军华^[22]的研究结果表明, 中国广西和越南交界地区吸收性气溶胶含量较多, 它们是由生物体燃烧引起的, 因此, 根据图 4b 可以知道 2001 年 3 月中南半岛地区的吸收性气溶胶是由生物体燃烧的烟羽造成的.

6 对流层低层高臭氧空气的来源

在 Liu H Y^[14]和 Chan C Y^[15]分析香港对流层低层的空气来源时, 其制作轨迹的方法为等熵面后向追踪, 使用的是空间分辨率较低的格点资料 ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$), 这只能表示出大尺度的空气轨迹, 并且计算对流层低层轨迹的资料不能很好地应用于地处高原的昆明 (海拔 1900 m 左右). 因此本文使用数值模式 MM5 每小时输出一次的 u 、 v 、 w 三维运动分量, 用可视化软件 LiveView^[23]制作空气块的三维轨迹, 给出了 3 月 7 日 05 UTC 到达香港上空 2km 与 4km

高度的空气块轨迹, 见图 5 所示.

从图 5 中可看到, 受西/西南风气流 (图未给出) 的影响, 3 月 7 日 05 UTC 到达香港上空对流层低层 (2~4km) 的空气轨迹来自中南半岛地区. 通过这些轨迹可看到, 香港上空 2km 左右高度的臭氧极大值主要受 3 月 4 日的老挝和越南北部的大气影响, 而 4km 左右高度的臭氧极大值主要受 3 月 4 日的泰国西部以及 3 月 6 日北部湾附近的大气影响. 然而正是在轨迹通过的这些地区观测到了较高的气溶胶指数, 通过对图 6 的分析我们确认在这些高气溶胶指数的地方有大量的生物体燃烧产物存在.

图 6 给出的是轨迹经过时刻的卫星 TOMS 分光计观测到的中南半岛地区大气中的气溶胶指数 (AI). 从图 6 可看到, 3 月 4 日在泰国和老挝、越南北部有大量吸收性气溶胶存在, 而 3 月 6 日在泰国中东部及北部湾附近有较多的吸收性气溶胶存在. 生物体燃烧时产生的烟羽中含有大量的吸收性气溶胶. 前文已经提到, 中国广西和越南交界地区吸收性气溶胶是由生物体燃烧引起的^[22]. Hsu 等^[24]使用 AI 指数探测了南美洲生物体燃烧时产生的烟羽,

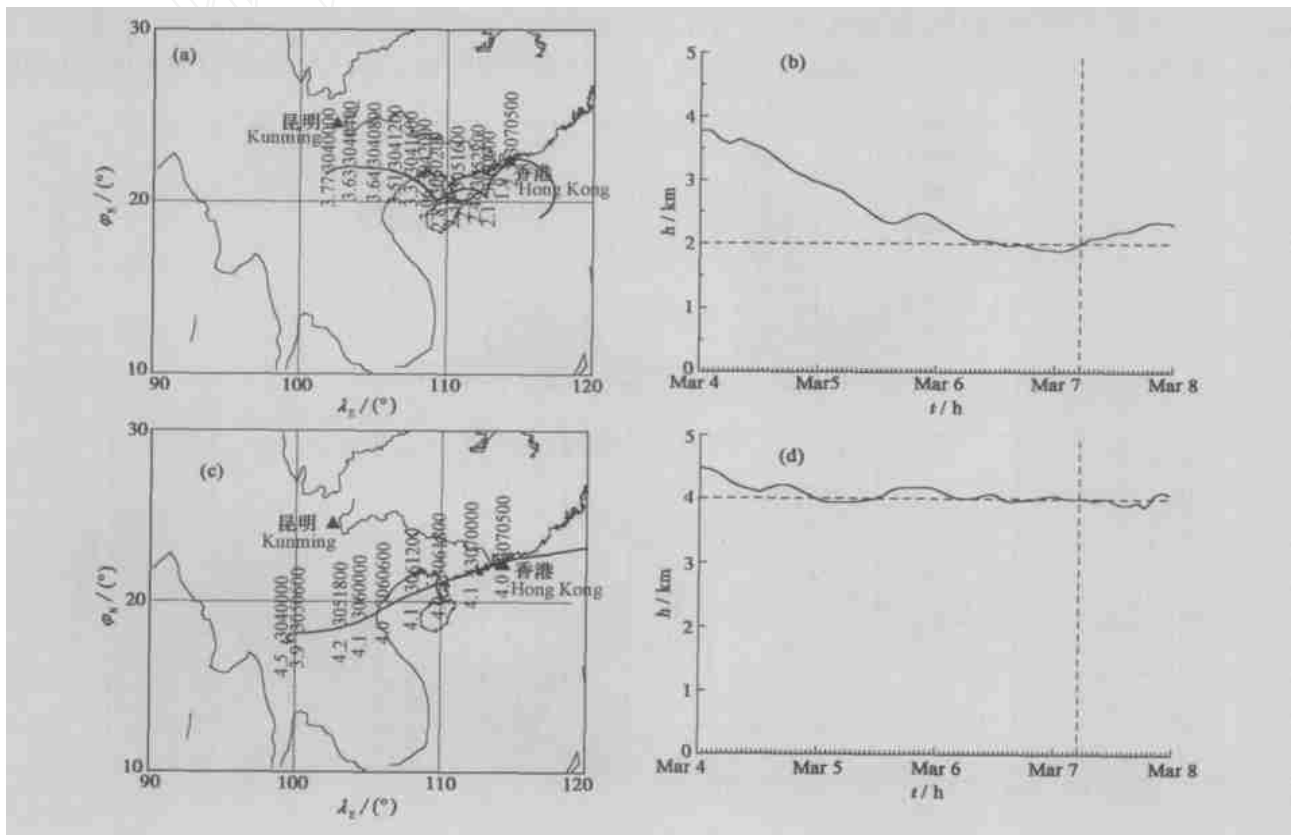


图 5 2001 年 3 月 7 日 05 UTC 到达香港上空的空气后向轨迹

(a, b) 2km 高度; (c, d) 4km 高度; (a, c) 为轨迹的水平投影, 轨迹上方标注的数字为时间, 3040000 表示 3 月 4 日 00 时 00 分 (世界协调时), 依次类推; 下方数字为高度, 单位: km; (b, d) 为轨迹的高度随时间的变化.

Fig. 5 Back air trajectories reaching Hong Kong (a, b) at 2km and (c, d) at 4 km on March 7, 2001

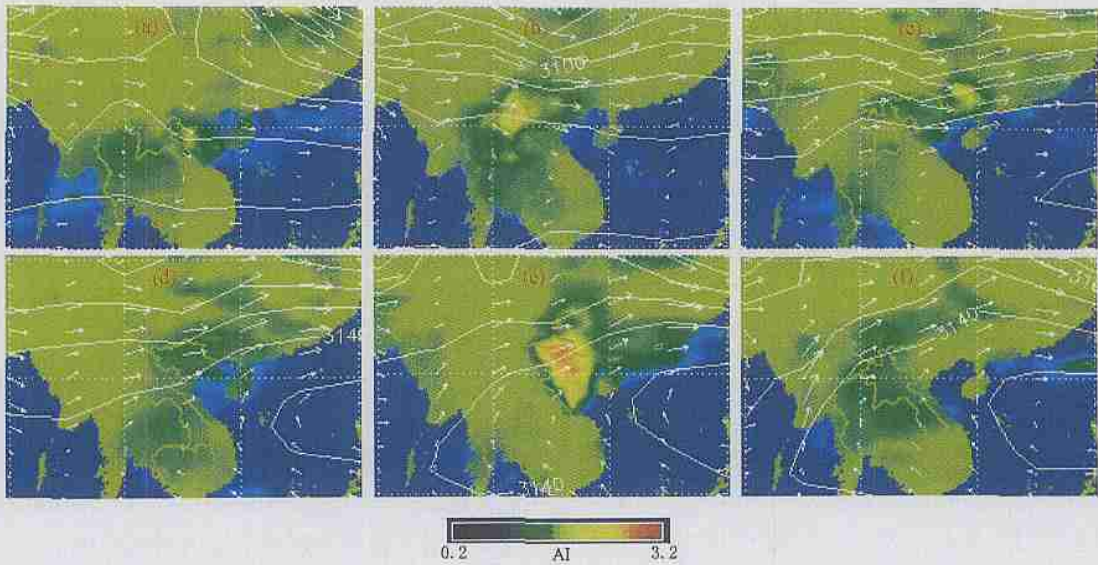


图6 2001年3月3~8日的TOMS探测的气溶胶指数
 (白色等值线为700hPa位势高度,白色箭头为700hPa的风.资料来源:NASA)
 (a)3日; (b)4日; (c)5日; (d)6日; (e)7日 (f)8日.

Fig.6 Aerosol Indices from TOMS for March 3-8, 2001

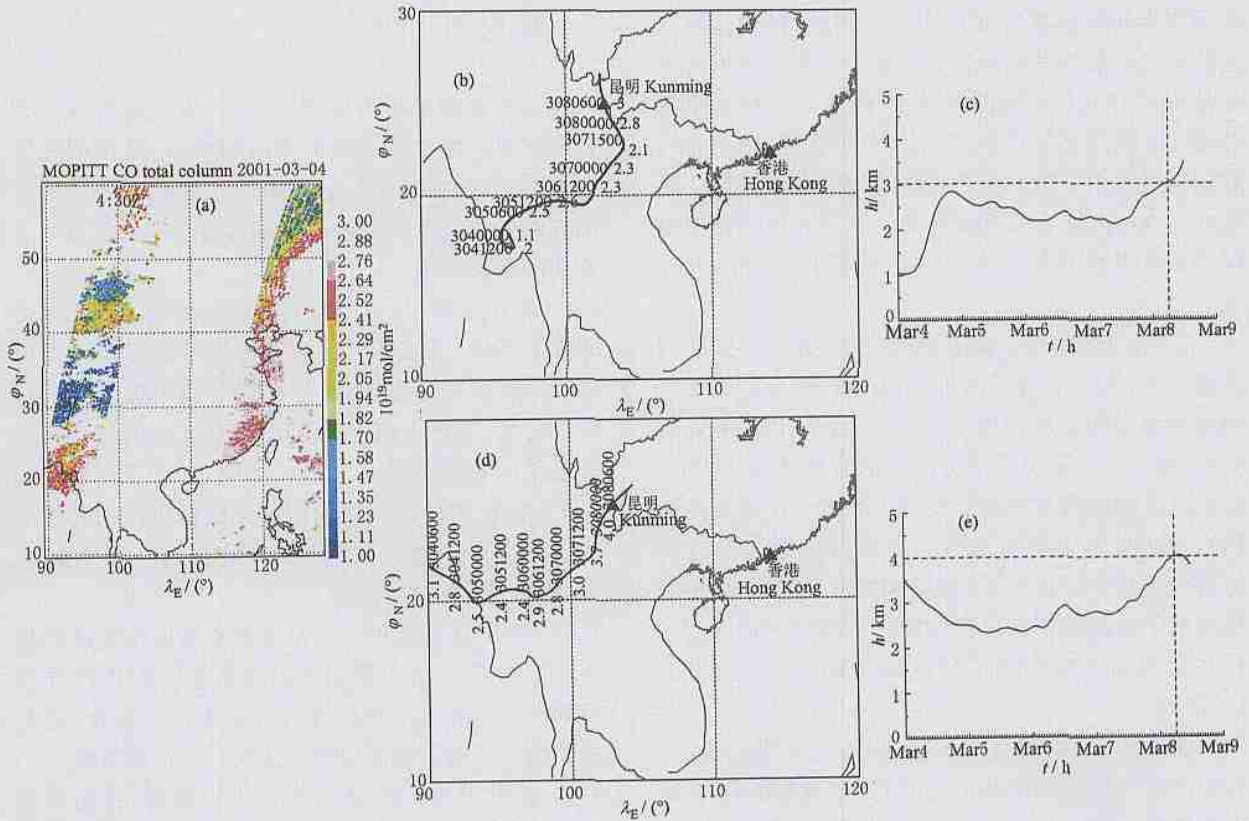


图7 一氧化碳气柱总量与到达昆明上空的空气后向轨迹
 (a)2001年3月4日MOPITT探测的一氧化碳气柱总量(资料来源:NCAR);
 (b-e)3月8日06UTC到达昆明上空3km (b,e)与4km (d,e)高度的空气块轨迹,说明同图5.

Fig.7 Total column CO and back air trajectories reaching Kunming

他们指出,使用 AI 指数很容易区分云/霾和烟羽/沙尘. 另一方面,中南半岛地区多山和高原,森林覆盖率高(柬埔寨森林覆盖率达 74%),这些气溶胶不可能是由沙尘引起的,又根据三月份中南半岛地区的生物体燃烧情况(见图 4),因此可以知道这些吸收性气溶胶的来源是生物体燃烧产生的烟羽.

此外,这些高气溶胶指数的空气团是随着对流层低层西/西南大气环流向香港方向移动的,3月7日高 AI 的空气团到达了香港上空,从另一个侧面也说明了 3 月 7 日香港对流层低层的空气是来自中南半岛地区,这与轨迹的分析是一致的. Hsu 等^[24]使用 AI 指数研究南美洲的生物体燃烧烟羽时指出, TOMS 的 AI 指数显示生物体燃烧的烟雾粒子可以被大尺度的天气过程输送到很遥远的地方. 以上的分析与 Hsu 等的结果是一致的,生物体燃烧产生了大量 CO、CO₂、CH₄、NMHC、VOC 和 NO_x,根据臭氧的光化学反应理论,在有足够 NO_x 存在的情况下,CO 和 CH₄、NMHC 可在光的作用下生成 O₃,并且在光化学反应的初始阶段,烟羽中的较高分子量 VOC 对于臭氧的产生起着很重要的作用^[25]. 因此,可以知道在这些高气溶胶指数的地区的对流层低层必然有高浓度的臭氧存在. 对流层低层西/西南大气环流把这些富含生物体燃烧产物、臭氧空气向香港上空输送,在输送过程中必然也会有臭氧生成,这就造成了香港 2~4 km 高度上的臭氧峰值. 但是这种对流层低层的臭氧增加在柱体臭氧总量的变化上并没有反映.

3 月 8 日 06 UTC 到达昆明上空 3km 的空气与香港一样,来自中南半岛地区(见图 7b, c),但空气块是由南向北运动到昆明地区的;昆明上空 4km 的空气(图 7d, e)是由西南方向运动而来,经过了孟加拉国以及缅甸的北部到达昆明. 虽然空气块在向昆明运动期间(3 月 8 日除外),所经过的地区没有观测到气溶胶,但在 3 月 4 日,MOPIIT 在缅甸的北部观测到了较高的一氧化碳气柱总量(见图 7a),3 月 8 日在昆明上空观测到了较高的 TOMS 气溶胶指数(见图 6f).

北半球 CO 的垂直分布特点是,地面浓度较高,其浓度随高度增加而减少,到对流层顶附近降至地面浓度的一半^[18]. 因此,根据 MOPIIT 的观测(图 7a),在孟加拉国东南部及缅甸的西北部有较高 CO 总量,可以认为在该地区地面以及对流层的中下层都有较高浓度的 CO 存在. 但是如果大气的微量气体只有 CO 是不可能生成臭氧的,根据臭氧的光化

学反应理论,必须有足够 NO_x 存在,CO 和 CH₄、NMHC 才能在光的作用下生成 O₃. 根据图 4,3 月份在中南半岛地区有较多的生物体燃烧,而 2001 年 3 月份反演的火烧情况是孟加拉国东南部和缅甸的西北部的火烧最为严重. 我们认为,既然在这些地区有较高浓度的生物体燃烧产物——CO 存在,那么生物体燃烧的其他产物(CH₄、NMHC、NO_x、VOC 等)浓度必然也很高,同时该地区又有充足的光照条件(见图 3 卫星云图),因此,在该地区的对流层中下层有较高浓度的臭氧存在.

3 月 8 日在昆明上空有较高的 TOMS 气溶胶指数(其值大约为 1.7,见图 6f),上述分析表明这些气溶胶是由生物体燃烧的烟羽造成的,由于烟羽中含有大量的 CO、CH₄、NMHC、NO_x、VOC 等,因此在太阳光的作用下必然有较高浓度的臭氧产生.

通过以上分析可以发现,昆明 3 月 8 日对流层低层的高浓度臭氧空气是来自于具有较高浓度生物体燃烧产物的地区,即东南亚地区.

7 结论与讨论

从本文的分析可以看到,不仅香港地区会受到东南亚地区生物体燃烧产物的影响,而且昆明地区也受到了它们的影响,这说明生物体燃烧地区的下风方的对流层低层臭氧的分布都会受到上游地区生物体的燃烧影响.

7.1 在本个例中,对流层低层的大气环流的变化是非常重要的. 北方冷气团南下,使得南海高压的位置及形状都发生了变化,导致了对流层低层大气环流的转变,并把中南半岛生物体燃烧地区的空气输送到昆明和香港地区.

7.2 使用 MM5 模式的模拟结果计算出昆明和香港对流层低层的空气块轨迹,直接经过了具有较高 TOMS 气溶胶指数的地区.

7.3 使用 AI 指数可分辨出东南亚地区生物体燃烧所产生的烟尘,并且烟尘的扩散轨迹与使用 MM5 模拟数据追踪的空气块轨迹具有较大的一致性,因此这种烟尘可成为对流层低层大气运动的示踪物.

7.4 使用 TOMS 的 AI 指数还可以发现,在昆明和香港对流层低层有较高臭氧浓度时,两地也有较高的 AI 指数,这就说明生物体燃烧产物直接被大气环流输送到了上述两个地区.

7.5 由于烟尘经过地区的对流层的低层有较高的臭氧浓度,春季位于东南亚地区下风方的华南、华西

南地区对流层低层的臭氧分布将很容易受到该地区生物体燃烧产物的影响。

虽然可以确认是南亚/东南亚地区的生物体燃烧导致了2001年3月7日香港和3月8日昆明对流层低层的臭氧浓度增加,但是由于没有CO、CO₂、NO_x、CH₄、NMHC、VOC等的定量观测资料,因此不能使用大气化学模式定量地分析生物体燃烧到底能够使对流层臭氧的浓度增加多少。今后的研究重点应该放在对燃烧产物的测量上,以及使用大气化学模式模拟生物体燃烧对对流层臭氧的影响上。

感谢北京大学大气科学系李成才提供的MODIS气溶胶观测资料以及毛节泰、王美华老师提供的CMS-5卫星云图资料。同时也感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] Crutzen P J, Heidt L E, Krasnec J P, et al. Biomass burning as a source of atmospheric gases CO, H₂, N₂O, NO, CH₃Cl, and COS. *Nature*, 1979, **282**: 253 ~ 256
- [2] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. *Science*, 1990, **250**: 1669 ~ 1678
- [3] Logan J A, Kirchhoff V W J H. Seasonal variations of tropospheric ozone at Natal, Brazil. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**: 7875 ~ 7881
- [4] Fishman J, Watson C E, Larsen J C, et al. Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**: 3599 ~ 3617
- [5] Elvidge C D, Baugh K E. Survey of fires in southeast Asia and India during 1987. In: *Biomass Burning and Global Change, Volume 2*: MIT Press, 1996. 663 ~ 670
- [6] Connors V S, Flood M, Jones T, et al. Global distribution of biomass burning and carbon monoxide in the middle troposphere during early April and October 1994. In: *Biomass Burning and Global Change, Volume 1*, MIT Press, 1996. 99 ~ 106
- [7] Folkins I, Chatfield R, Baumgardner D, et al. Biomass burning and deep convection in Southeastern Asia: Results from ASHOC/MAESA. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**: 13291 ~ 13299
- [8] Crutzen P J. Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air. *Tellus*, 1974, **26**: 47 ~ 57
- [9] Chameides W L. The photochemical role of tropospheric nitrogen oxides. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5**: 17 ~ 20
- [10] Fishman J, Solomon S, Crutzen P J. Observational and theoretical evidence in support of a significant in situ photochemical source of tropospheric ozone. *Tellus*, 1979, **31**: 432 ~ 446
- [11] Logan J A, Prather J J, Wofsy S C, et al. Tropospheric chemistry: a global perspective. *J. Geophys. Res.*, 1981, **86**: 7210 ~ 7254
- [12] Mauzerall D L, Logan J A, Jacob D J, et al. Photochemistry in biomass burning plumes and implications for tropospheric ozone over the tropical South Atlantic. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D7): 8401 ~ 8423
- [13] Chan L Y, Chan C Y, Liu H Y, et al. 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
- [14] Liu H Y. Variation of total ozone and characteristics of vertical ozone distribution over Hong Kong [Doctor's Thesis]. Hong Kong: the Hong Kong Polytechnic University, 1997
- [15] Chan C Y. Characteristics of vertical ozone distribution and ozone transport in the troposphere over Hong Kong [Doctor's Thesis]. Hong Kong: the Hong Kong Polytechnic University, 2000
- [16] Barnes R A, Bandy A R, Torres A L. Electrochemical concentration cell ozonesonde accuracy and precision. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90** (D5): 7881 ~ 7887
- [17] Komhyr W D, Barnes R A, Brothers G. B., et al. ECC performance evaluation during STOIC. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 9231 ~ 9244
- [18] 王明星. 大气化学. 北京:气象出版社, 1999
Wang M X. Atmospheric Chemistry (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1999
- [19] Reiter E R, Gao D Y. Heating of the Tibet plateau and movements of the South Asian high during spring. *Mon. Weath. Rev.*, 1982, **110**: 1694 ~ 1711
- [20] Shapiro M A, Hampel T, Krueger A J. The Arctic tropopause fold. *Mon. Weath. Rev.*, 1986, **115**: 444 ~ 454
- [21] 张金艳. 全国大部降水偏少北方多风沙天气—2001年3月. *气象*, 2001, **27** (6): 58 ~ 61
Zhang J Y. Less precipitation over most of China and more dust storm over Northern China—March 2001. *Meteorological Mon.* (in Chinese), 2001, **27** (6): 58 ~ 61
- [22] 张军华. 地面和卫星遥感中国地区气溶胶光学特性[博士论文]. 北京:北京大学, 2000
Zhang J H. Aerosol optical characteristics over China obtained by ground and satellite remote sensing [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Peking University, 2000
- [23] 王洪庆, 张 焱, 陶祖钰等. 五维大型复杂数据集计算机可视化. *自然科学进展*, 1998, **8** (6): 742 ~ 748
Wang H Q, Zhang Y, Tao Z Y, et al. Computer visualization for 5-dimension large-complicated data. *Prog. in Natur. Sci.* (in Chinese), 1998, **8** (6): 742 ~ 748
- [24] Hsu N C, Herman J R, Bhartia P K, et al. Detection of biomass burning smoke from TOMS measurement. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 745 ~ 748
- [25] Köppmann R, Khedim A, Rudolph J, et al. Emissions of organic trace gases from savanna fires in southern Africa during the 1992 Southern African Fire Atmosphere Research Initiative and their impact on the formation of tropospheric ozone. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D15): 18879 ~ 18888