

任阵海, 苏福庆, 陈朝晖, 等. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM_{10} 浓度分布和演变过程的影响. 大气科学, 2008, **32** (4): 741~751
Ren Zhenhai, Su Fuqing, Chen Zhaohui, et al. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM_{10} concentration in the boundary layer in summer and autumn. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese) 2008, **32** (4): 741~751

夏秋季节天气系统对边界层内大气中 PM_{10} 浓度分布和演变过程的影响

任阵海¹ 苏福庆¹ 陈朝晖^{1, 2} 洪钟祥³ 程水源² 高庆先¹ 冯丽华¹

1 中国环境科学研究院, 北京 100012

2 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 边界层内的气压场直接影响区域性的大气环境质量, 天气系统的变化与边界层气压场形势直接相关。根据 2000~2006 年大气环境监测资料的日均值和日增(减)量分布图, 同时对夏秋季节主要的天气系统, 副热带高压和台风进行耦合诊断分析, 得出西太平洋高压和台风的时空演变对我国环境质量有十分重要的影响, 这种影响主要是形成的高压均压场对污染物有累积效应, 也出现污染物的汇聚, 而其周边流场对区域污染物有输送作用。此外, 天气系统的降水分布又对大气污染物有清除的作用。而且天气形势演变的空间和周期性形成了大气环境的区域性和过程性等复杂的特征。本文选择典型个例, 进行剖析研究。在地面高压或 500 hPa 高度上 5880 gpm 等高线控制区内, 造成大范围的静稳型区域性污染物的增量过程。在副高周边地区的雨区内经常是 PM_{10} 的谷值期。夏秋季节台风近周边和远周边的影响区, 经常是 PM_{10} 峰值或较重污染物浓度出现区域。

关键词 环境过程 副高 台风

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0741-11

中图分类号 X16

文献标识码 A

Influence of Synoptic Systems on the Distribution and Evolution Process of PM_{10} Concentration in the Boundary Layer in Summer and Autumn

REN Zhenhai¹, SU Fuqing¹, CHEN Zhaohui^{1, 2}, HONG Zhongxiang³,
CHENG Shuiyuan², GAO Qingxian¹, and FENG Lihua¹

1 Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

2 College of Environmental & Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The pressure field in the boundary layer affect regional atmospheric environmental quality directly, the changes of synoptic systems are related to the pressure field in the boundary layer. Based on the daily mean and increment figures of atmospheric environmental monitoring data during 2000 - 2006, the subtropical high and the typhoon are analyzed, which are important synoptic patterns in summer and autumn, results show that the temporal and spatial evolutions of these systems have important influence on the environmental qualities in China because high pressures and transports of wind field lead to pollutant accumulating. Moreover, rain can clear the atmosphere pollutant. The periodic evolvments of synoptic systems form the regional characteristic and periodic evolvments of at-

mospheric environment.

Typical examples are chosen and analyzed in this paper. In the region of isohypse 5880 gpm at 500 hPa and high pressure at the sea surface, there are large-scale stable and regional pollution processes. PM_{10} concentration is low in the marginal area of subtropical high. PM_{10} concentration is high in the near and far influenced areas of typhoon.

Key words environmental process, subtropical high, typhoon

1 引言

夏秋季节我国的主要天气系统“副热带高压和台风”常引起气象灾害已广为关注,同时也对大气环境质量造成某种危害。叶笃正等^[1, 2]和陶诗言等^[3]对我国夏秋季节的主要天气系统进行了奠基性研究。嗣后,吴国雄等^[4]和陈联寿等^[5]给出深入基础性的研究成果。夏季青藏高原东出与西太平洋高压西进并合,形成高压带西伸,经常稳定出现在我国广大地区,也影响我国大气环境质量。西风带高压与西太平洋副高并合,使副热带高压产生西进或北跳,在我国北方包括北京地区常形成严重的大气污染过程。

夏秋季节的天气过程影响边界层气压场的时空演变,受其影响,污染物浓度出现谷值和峰值波动性交替,致使大气环境质量出现过程性和区域性特征。在副高和台风的下沉气流区常出现污染物浓度逐日增加的日增量区,它是当日浓度与昨日浓度差值,再减去输送扩散量仍然表现逐日浓度增加的累积现象。在一个环境污染过程中,污染物浓度多日的增量,形成区域性的污染物增值区,出现过程中污染物浓度最重日,就是峰值日;反之污染物浓度逐日减小,出现逐日减量区,在一个环境污染过程中,污染物浓度多日的减量,形成最低浓度日就是谷值日。

西太平洋高压经常以高压脊的形势伸向大陆,高压中心常位于海上,高压范围内盛行大范围的下沉气流,脊线附近为强下沉气流区,以晴朗、少云、微风、炎热为主,低层普遍形成逆温层,尤其高压东部逆温层较厚、较低、空气潮湿。逆温层以上空气干燥,出现滞留型的高压时,有利于区域污染物的增量累积,易形成浓度峰值。

在地面西太平洋高压西部常为区域性偏南夏季风气流,受系统性输送气流作用,污染物向北输送,在华北地区形成区域污染增量区和峰值区;在偏南气流输送区常为区域污染减量区。大气环境质

量背景具有区域性调整特征。

台风在海上向北移动期间,大陆上配置着相应的气压形势,受台风近周边及大陆上高压下沉气流影响,由于副热带高压和台风天气系统都是动态的演变特征,受其影响边界层气压系统也具有动态演变特征。因此,形成的区域性的大气环境质量背景也具有区域调整的动态演变特征。总之,大气环境质量具有过程性、区域性以及浓度的累积和消散等特点,这些特点都具有动态调整演变的特征。

目前,关于天气系统与城市大气环境质量的关系^[6~14]已有少量研究,区域性大气环境质量与各类天气系统的演变规律,仍不多见。本文使用2000~2006年我国气象站的资料以及大气环境监测资料,采用天气学的诊断方法和环境数据的统计方法及数值模拟,给出区域性环境质量的过程分析。区域性大气环境质量受排放源结构和环境背景场影响,但在近期内 PM_{10} 浓度的相对变化,较敏感因素可以认为是环境背景场影响的结果。

2 夏秋季节副热带高压对我国区域性大气环境质量的影响

夏秋季节地面西太平洋高压以及高空 500 hPa 5880 gpm 等高线控制区的不同配置,其结构、强度及演变对边界层大气环境质量演变过程有非常明显的影响。为此,节选以下几种类型进行分析,根据副热带高压与区域大气环境质量演变过程统计分析,副热带高压类型分为:(1)西进北移型,其强度和位置有明显季节性和年际变化特征;(2)断裂型,受背景场影响副高常出现断裂,从而改变晴雨分布,形成特有的大气环境质量演变过程;(3)并合型,副高与青藏高原和大陆高压之间常有并合特征,使副高加强和扩展,改变地面高压和副高的垂直配置。

2.1 选例 1

选取 2005 年 8 月 26 日~9 月 1 日(北京时,下同)的副热带高压 500 hPa 5880 gpm 等高线以

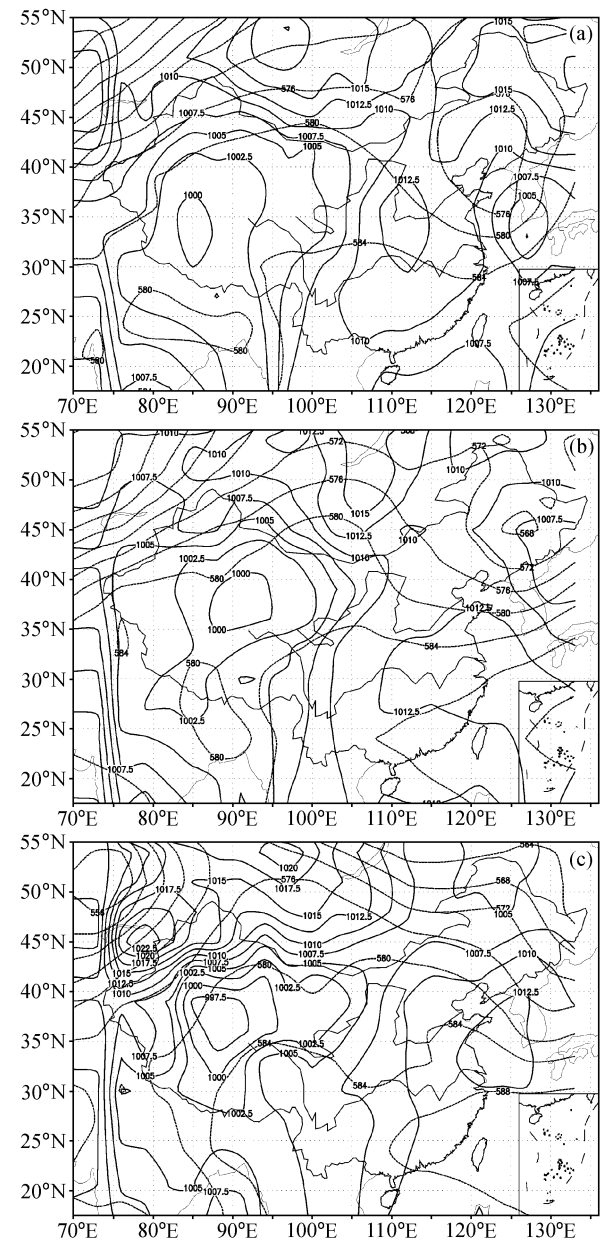


图1 2005年8月海平面气压场(实线)和500 hPa高度(虚线): (a) 25日08:00; (b) 26日08:00; (c) 28日08:00
Fig. 1 Sea level pressure (solid lines, hPa) and 500-hPa geopotential height (dashed lines, dagpm) at 0800 LST on (a) 25, (b) 26, (c) 28 Aug 2005

及地面西太平洋高压对大陆的控制范围及变化(图1),显示地面西太平洋高压出现在5880 gpm等高线的北部,两个高压脊线不重合,从图1b上看,相距7个纬距,根据副热带高压结构的研究,高空和地面脊线不一定重合。对应副高的变化再分析PM₁₀浓度增量的演变过程(图2),查明高空5880 gpm等高线控制范围对地面污染物浓度的增量有

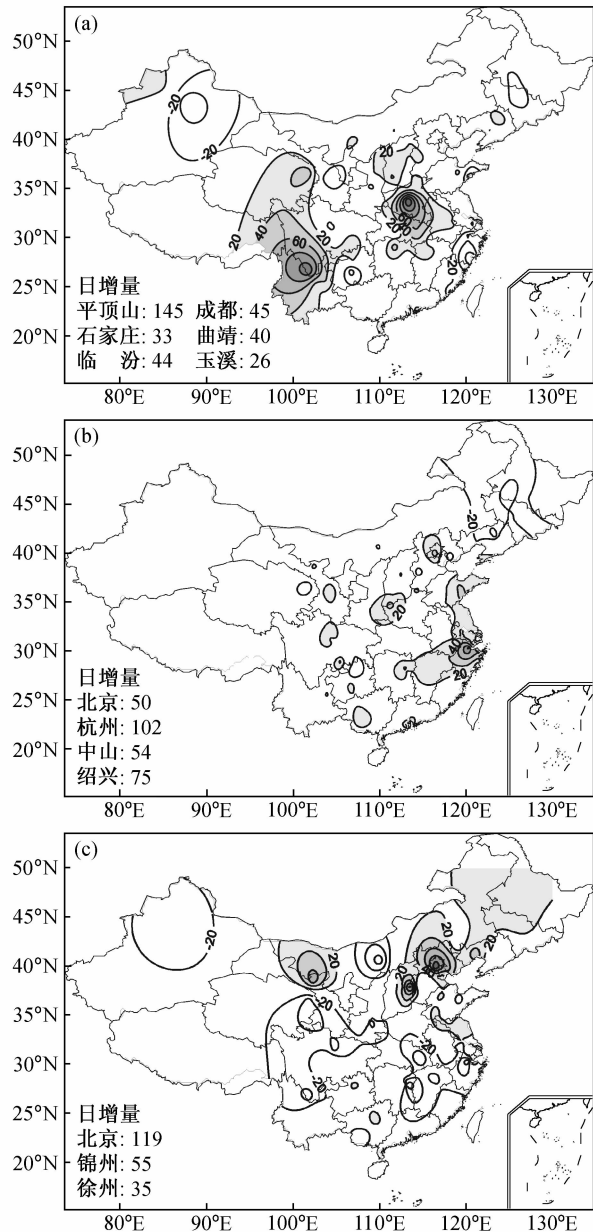


图2 2005年8月PM₁₀的日增量(减量)图: (a) 25日; (b) 26日; (c) 28日
Fig. 2 PM₁₀ daily increment ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on (a) 25, (b) 26, (c) 28 Aug 2005

间接影响,地面西太平洋高压控制区对地面污染物增量有直接影响。这次环境过程是副高西进东退伴生降水与晴日交替影响的结果;西进北移过程中与西风带高压并合加强,属副高进退及大陆高压并合型。数值模拟结果显示,5880 gpm等高线控制区有微弱的下沉气流,地面高压控制区有明显的下沉气流(见第4节图23),由于持续多天的增量,使污染物浓度出现累积增高的峰值特征(图3)。

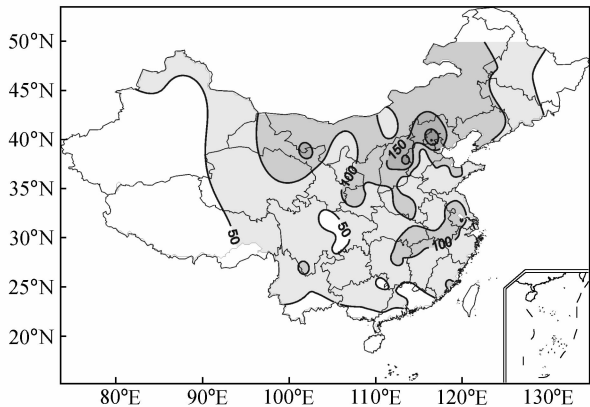


图 3 2005 年 8 月 28 日 PM₁₀ 浓度分布范围图 (等值线间隔: 50 μg/m³)

Fig. 3 Distribution of PM₁₀ concentration (μg/m³) on 28 Aug 2005

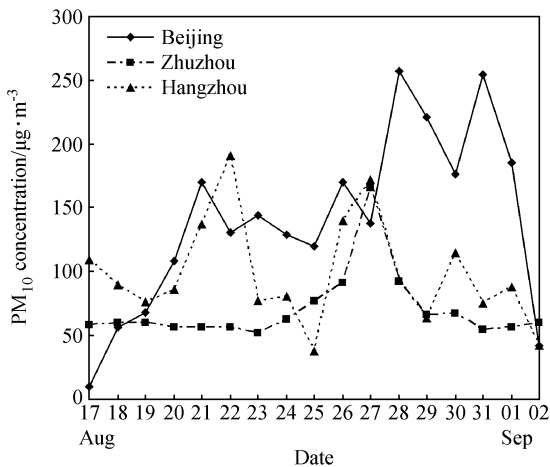


图 4 2005 年 8 月 17 日至 9 月 2 日典型城市 PM₁₀ 浓度演变图

Fig. 4 Evolution of PM₁₀ concentration for typical cities during 17 Aug – 2 Sep 2005

根据过去研究,太行山和燕山山前平原地区常出现污染物的汇聚带^[15],因此,在此地区出现了重污染中心(图 3,2005 年 8 月 28 日是该过程中区域污染最重日),例如,北京 PM₁₀ 污染物浓度峰值达到 257 μg/m³,阳泉达到 239 μg/m³。此外,根据 28 日 5880 gpm 等高线的西边缘出现偏南季风,使南方污染物向北输送,也是上述峰值产生的一个原因,而南方地区污染物则出现减量特征。

选取北京代表北方地区,株洲、杭州代表南方地区,研究其污染物浓度的演变过程,图 4 明显反映区域性大气环境质量背景由于相互输送、累积而出现的调整特征。

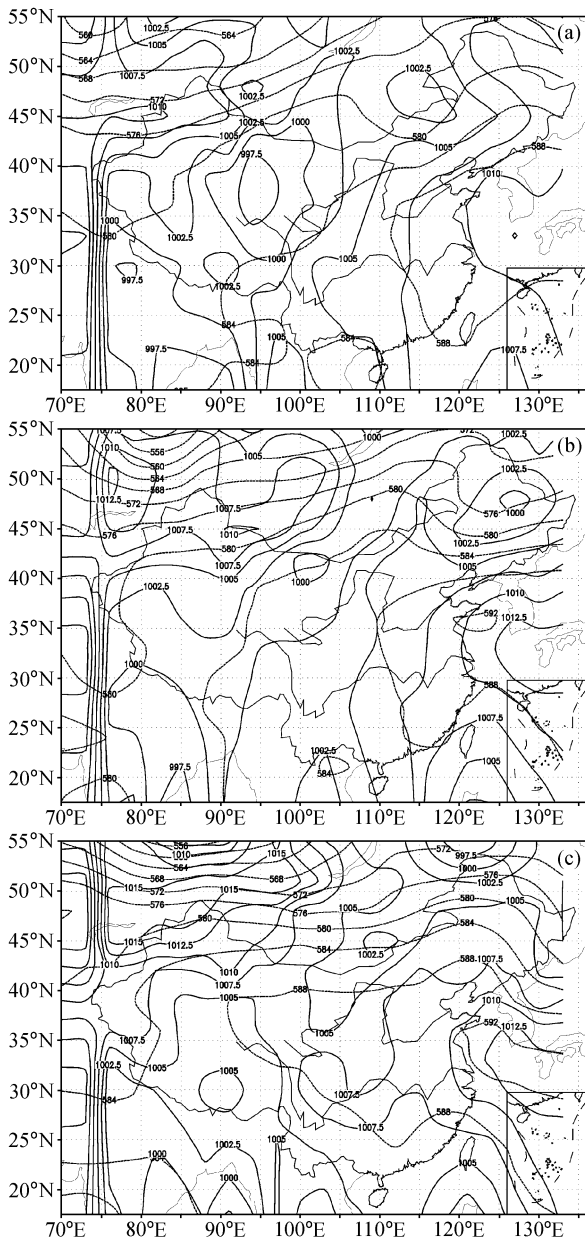


图 5 2002 年海平面气压场 (实线) 和 500 hPa 高度 (虚线): (a) 7 月 30 日 08:00; (b) 7 月 31 日 08:00; (c) 8 月 1 日 08:00

Fig. 5 Same as Fig. 1, but at 0800 LST on (a) 30 Jul, (b) 31 Jul, (c) 1 Aug 2002

2.2 选例 2

分析 2002 年 7 月 29 日~8 月 6 日,这次副热带高压的结构特点是地面副高与 700、500 hPa 的脊线和范围基本重合,高空和地面的高压控制区在大陆东部地区。而青藏高原西部为大低压控制,高压和低压之间出现较强的偏南季风,把长江以南的污染物向北输送(图 5)。北京的环境质量受这次副高进退移动的影响,出现一次较重的环境污染过

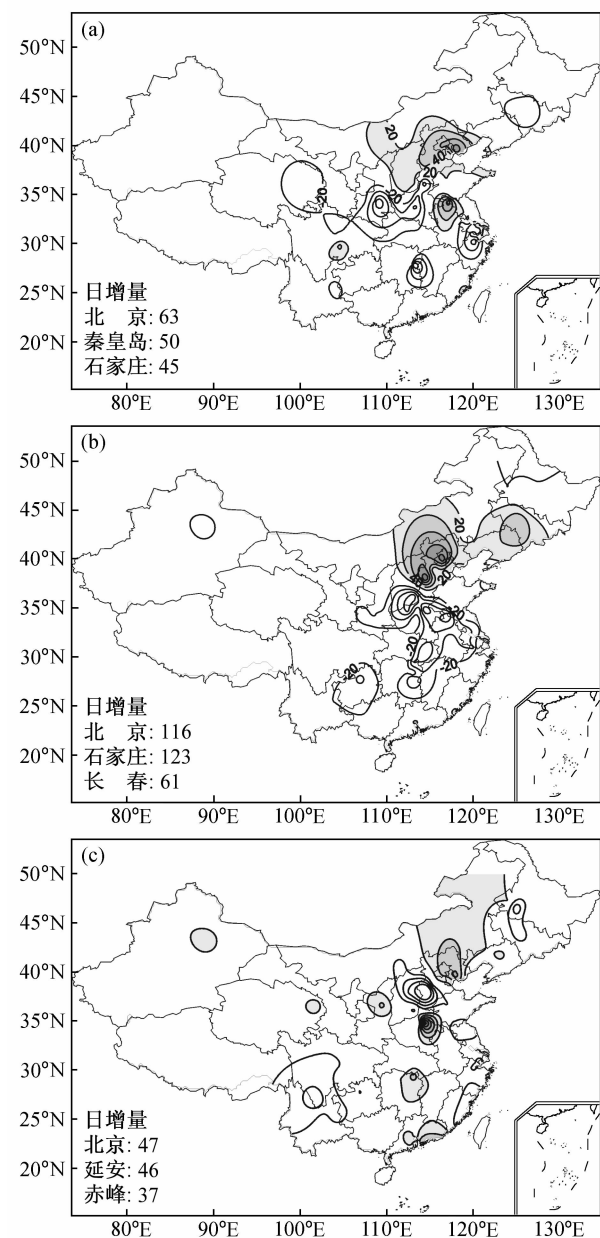


图 6 2002 年 PM₁₀ 的日增量 (减量) 图: (a) 7 月 30 日; (b) 7 月 31 日; (c) 8 月 1 日
Fig. 6 PM₁₀ daily increment ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on (a) 30 Jul, (b) 31 Jul, (c) 1 Aug 2002

程,属副高西进北移型污染过程。如 29 日受副热带高压前沿降水影响时,北京的环境质量出现谷值,随后 7 月 30 日副高和地面高压西伸,北京受其下沉气流区影响,PM₁₀逐日持续增量(图 6),于 8 月 1 日达到峰值 $270\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这次 5880 gpm 等高线西脊点西伸到 90°E 至青海省的西部,受 5880 gpm 等高线控制区的影响(图 5),我国北方很多地区出现污染物的累积发生明显的重污染现象(图 7)。图 8

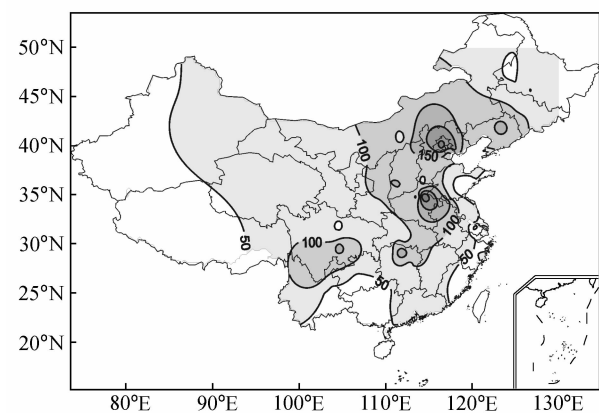


图 7 同图 3, 但为 2002 年 8 月 1 日
Fig. 7 Same as Fig. 3, but for 1 Aug 2002

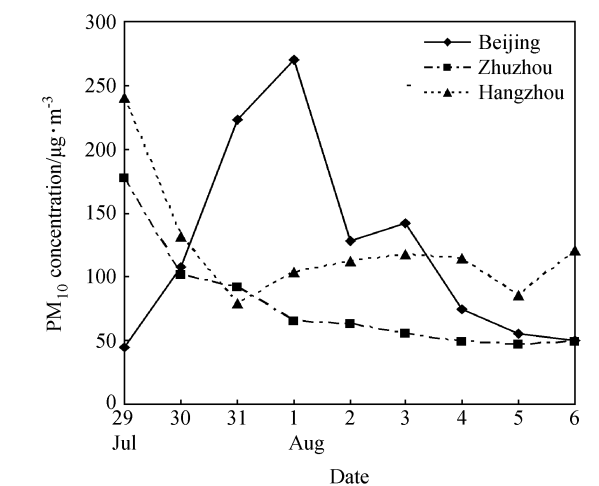


图 8 2002 年 7 月 29 日至 8 月 6 日典型城市 PM₁₀ 浓度演变图
Fig. 8 Evolution of PM₁₀ concentration for typical cities during 29 Jul–6 Aug 2002

反映了北方城市北京和南方城市株洲、杭州 PM₁₀ 污染物的背景浓度出现区域性的调整过程。

2.3 选例 3

陶诗言最早发现副热带高压与青藏高原“相向而行”出现并合的规律^[16],同时西风带高压与西伸的副高又出现并合北抬,这种形势是影响我国区域大气环境质量的重要类型。本文选取上述规律的一次典型个例 2004 年 8 月 4~13 日。图 9a 是副高与青藏高原并合形势气压场图,图 9b 是西风带高压与南部副高并合形势气压场图。图 10 (a、b) 为相应形势的 PM₁₀ 区域增量图,除中国中部降水造成副高边缘 PM₁₀ 浓度为负值外,其他区域均为浓度增值区。

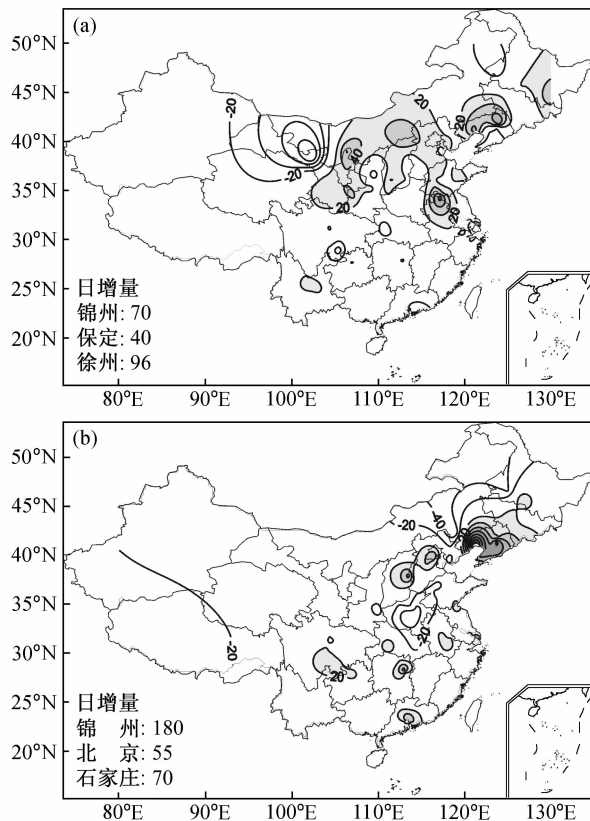


Fig. 10 PM₁₀ daily increment ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on (a) 6, (b) 8 Aug 2004

2.4 选例 4

选取 2005 年 7 月 11~24 日一次环境过程, 图 13 为副热带高压的断裂过程, 其相应的环境质量 PM_{10} 增值区的演变见图 14。

Fig. 11 Same as Fig. 3, but for 8 Aug 2004

统的断裂演变有关。

2.5 选例 5

2006 年 8 月 9~31 日四川、重庆地区出现百年不遇的高温干旱,引起全国关注。图 17 给出两张典型天气形势,也是青藏高原和副高合并的特征,副高西脊点伸至 95°E 青藏高原地区。图 18 给出相

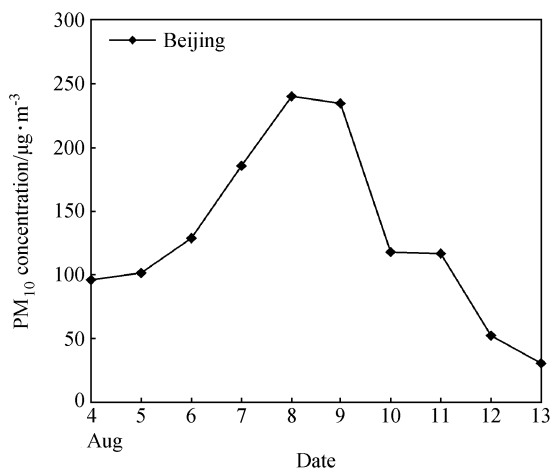
图 12 2004 年 8 月 4-13 日典型城市 PM₁₀ 浓度演变图

Fig. 12 Evolution of PM_{10} concentration for typical cities during 4–13 Aug 2004

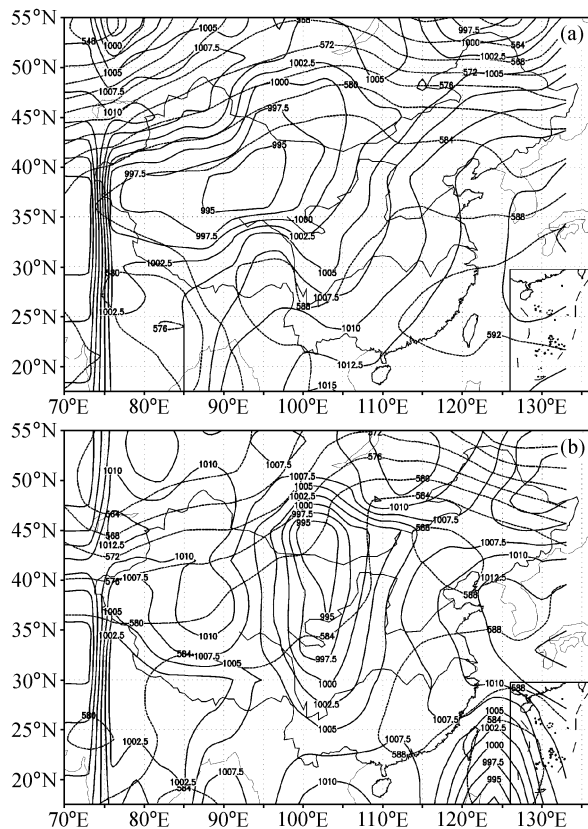


图 13 2005 年 7 月海平面气压场 (实线) 和 500 hPa 高度 (虚线): (a) 15 日 08:00; (b) 17 日 08:00

Fig. 13 Same as Fig. 1, but at 0800 LST on (a) 15, (b) 17 Jul 2005

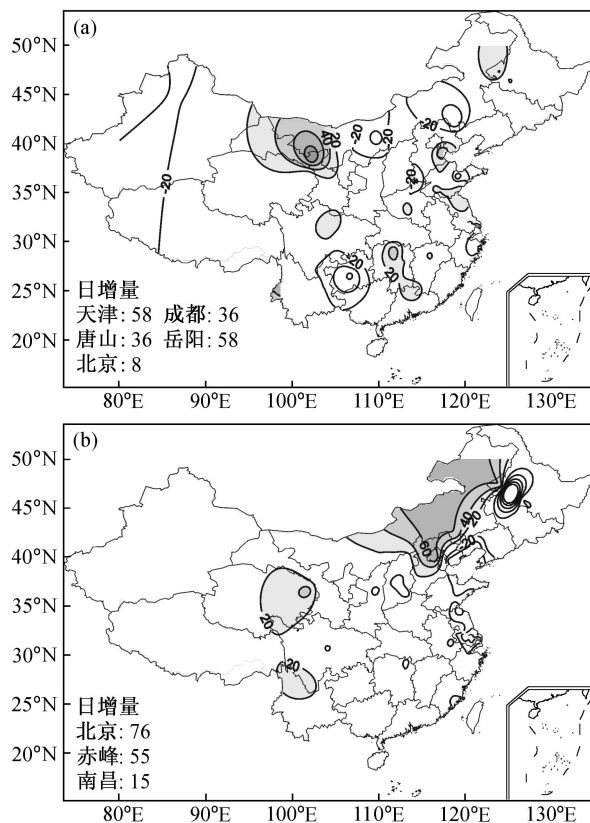


图 14 2005 年 7 月 PM_{10} 的日增量 (减量) 图: (a) 15 日; (b) 17 日

Fig. 14 PM₁₀ daily increment ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on (a) 15, (b) 17 Jul 2005

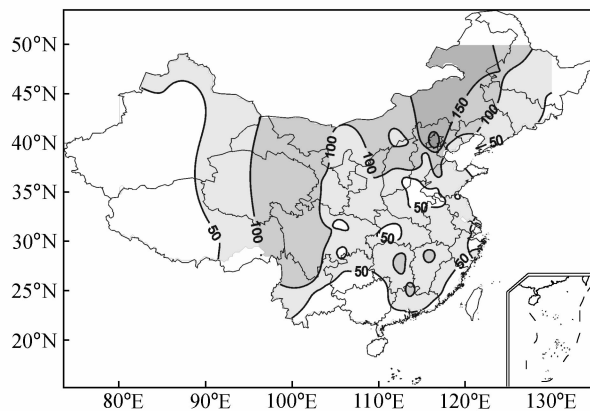


图 15 同图 3, 但为 2005 年 7 月 17 日

Fig. 15 Same as Fig. 3, but for 17 Jul 2005

省市都出现较重污染情景,以四川最重。北方也有三个较重程度的污染区。8月25~31日 PM_{10} 污染浓度背景分布图(图18b)显示,仅在四川出现 PM_{10} 平均浓度值 $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上的污染区。

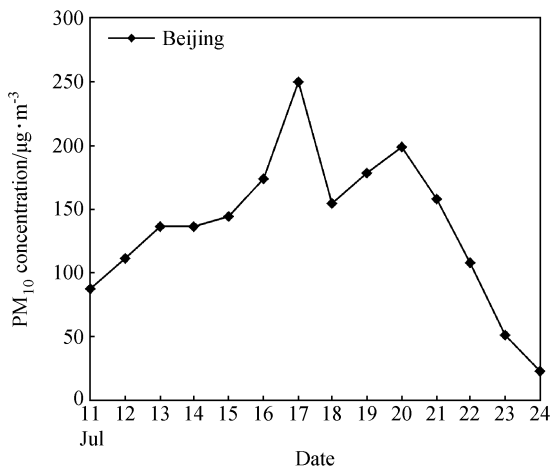


图 16 2005 年 7 月 11~24 日典型城市 PM₁₀ 浓度演变图
Fig. 16 Evolution of PM₁₀ concentration for typical cities during 11–24 Jul 2005

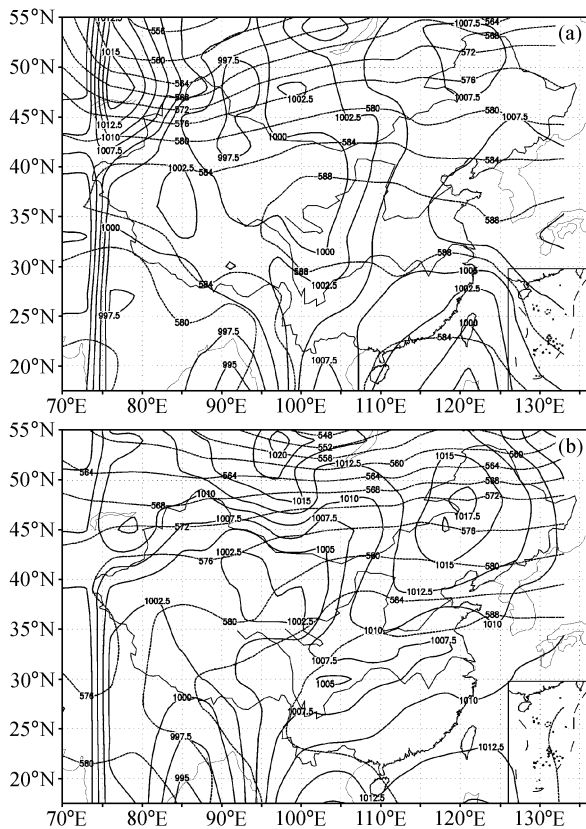


图 17 2006 年 8 月海平面气压场 (实线) 和 500 hPa 高度 (虚线):
(a) 10 日 20:00; (b) 29 日 20:00
Fig. 17 Same as Fig. 1, but at 2000 LST on (a) 10, (b) 29 Aug 2006

3 夏秋季节台风路径及结构对我国大气环境质量的影响

夏秋季节台风及其气象背景场是影响我国环境

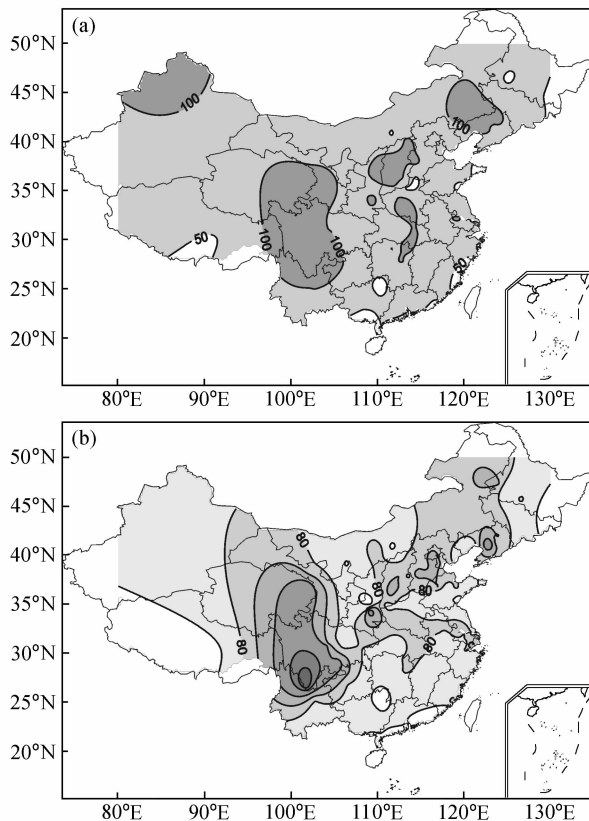


图 18 2006 年 8 月 PM₁₀ 多日的平均值分布图: (a) 9~15 日;
(b) 25~31 日
Fig. 18 Distributions of PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) averaged for (a) 9–15 Aug, (b) 25–31 Aug 2006

质量背景的主要天气类型,特别是台风北上转向活动期间,在台风的近周边和远周边的大陆高压系统都有明显的下沉气流,常形成明显的大范围污染物的增量区。为了说明台风及其气象背景场对我国环境空气质量的影响,选取一次造成我国大范围环境污染现象的个例。2002 年 8 月 28 日~9 月 8 日 0216 号台风森拉克 (Sinlaku),在海上北上期间,图 19 是台风在 29、30 日的位置图,台风西部覆盖着我国大部分地区出现明显的高压均压场。受其影响,相应的 PM₁₀ 增量图 (图 20) 显示 29 日南部有增量,30 日增量区向北扩展,范围增大。

在台风北上期间,受台风近周边及远周边下沉气流区增量累积的影响,形成明显的全国性的污染现象 (图 21)。以下仍取上述引用的三个城市显示污染物浓度演变过程,9 月 1 日北京、杭州、株洲 PM₁₀ 浓度分别为 $277 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $204 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (见图 22)。

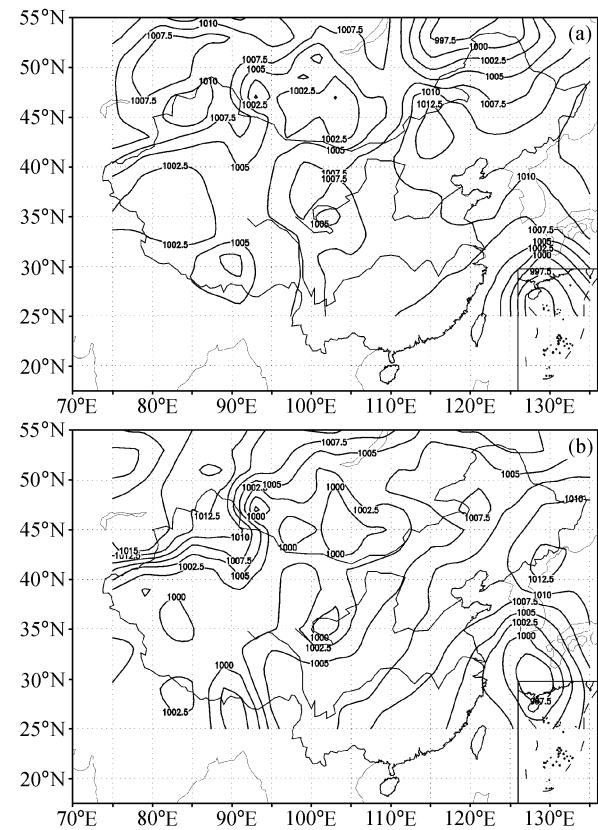


图 19 2002 年 8 月海平面气压场: (a) 29 日 20:00; (b) 30 日 20:00
Fig. 19 Sea level pressure (hPa) at 2000 LST on (a) 29, (b) 30 Aug 2002

4 数值模拟

为了深入研究夏秋季节天气系统对大气环境过程影响机理, 引用三维非静力气象模式进行模拟。WRF (Weather Research and Forecast) 模式是在 MM5 模式基础上发展起来的, 动力框架及模拟能力较为优越。WRF 模式给理想化的动力学研究、全物理过程的天气预报、空气质量大气背景场预报以及区域气候模拟提供一个公用的模式框架。

本文设置研究区域分辨率为 45 km, 水平 101 格点, 垂直方向 71 个格点, 中心经纬度为 (34. 38°N, 114. 94°E), 在垂直方向采用地形追随 σ -坐标系, 垂直 31 层, 数值积分采用 60 s, 物理过程采用 Lin 等微物理^[19]和 Kain-Fritsch (new Eta) 积分方案^[20]。WRF 模拟采用的气象数据主要有美国国家环境预报中心的全球 NCEP 数据, 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 每 6 小时一次。

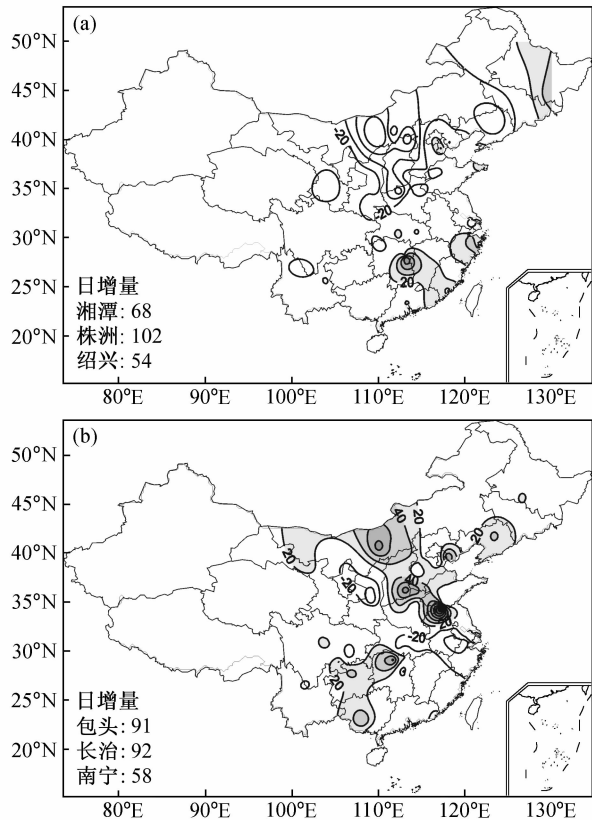


图 20 2002 年 8 月 PM₁₀ 的日增量 (减量) 图: (a) 29 日; (b) 30 日。单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Fig. 20 PM₁₀ daily increment ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on (a) 29, (b) 30 Aug 2002

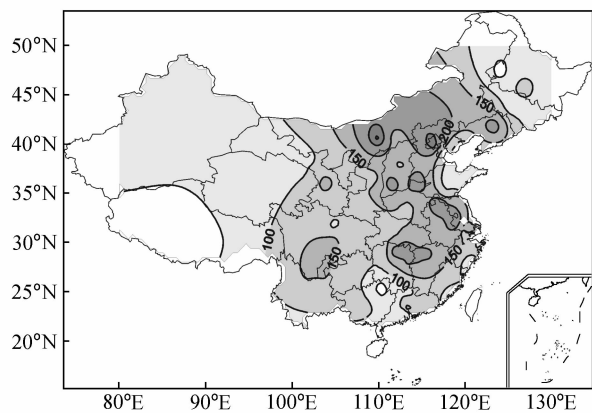


图 21 同图 3, 但为 2002 年 9 月 1 日
Fig. 21 Same as Fig. 3, but for 1 Sep 2002

图 23a 是模拟本文的选例 1, 2005 年 8 月 28 日 08 时垂直气流模拟图。地面高压控制区有明显的下沉气流, 全国大范围地区为重污染现象(图 3)。

图 23b 是模拟本文的选例 3, 蒙古高压和副热

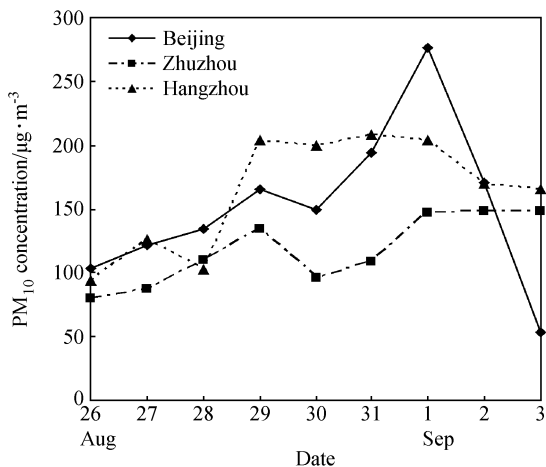


图 22 2002 年 8 月 26 日至 9 月 3 日典型城市 PM_{10} 浓度演变图
Fig. 22 Evolution of PM_{10} concentration for typical cities during 26 Aug – 3 Sep 2002

带高压并合后的垂直气流模拟图。由图可知除山东半岛为上升气流,我国其他地区均为大范围的弱下沉气流区。由于下沉气流的作用,使大范围地区出现 PM_{10} 浓度增量(图 10)。

图 23c 是模拟本文的台风选例,为 2002 年 8 月 30 日 (29°N , 112.15°E) 点与 (36.1°N , 129°E) 点之间的垂直气流剖面图。在朝鲜半岛南部为台风森拉克,我国大陆地区为大范围的下沉气流,受其影响,我国大部分地区都形成明显的 PM_{10} 增量区(图 20),由模拟图 23c 可知,在朝鲜半岛有明显的上升气流,在我国西部的其他地区为强的下沉气流,有些地区下沉气流高度达 200 hPa。台风西边缘有明显的下沉气流,其高度约为 350 hPa 左右。在台风和高压之间有一个过渡区,较好地显示了台风在海上活动期间近周边及远周边下沉气流的结构及配置特征。此外,对其他北上类型的台风结构模拟也有相似结果(已投相关刊物)。

5 结论

夏秋季节副热带高压和台风是影响我国大气环境质量背景的主要天气型。副高的进退能形成我国相关地区大气污染物浓度的谷、峰交替的环境过程。副热带高压和青藏高原高压的并合的形势能造成我国大范围的污染过程。副热带高压和西风带高压并合对我国北方造成相当严重的污染情景。

台风在我国海上由南向北移动,对我国也造成大范围的污染过程。因为副热带高压或台风系统的

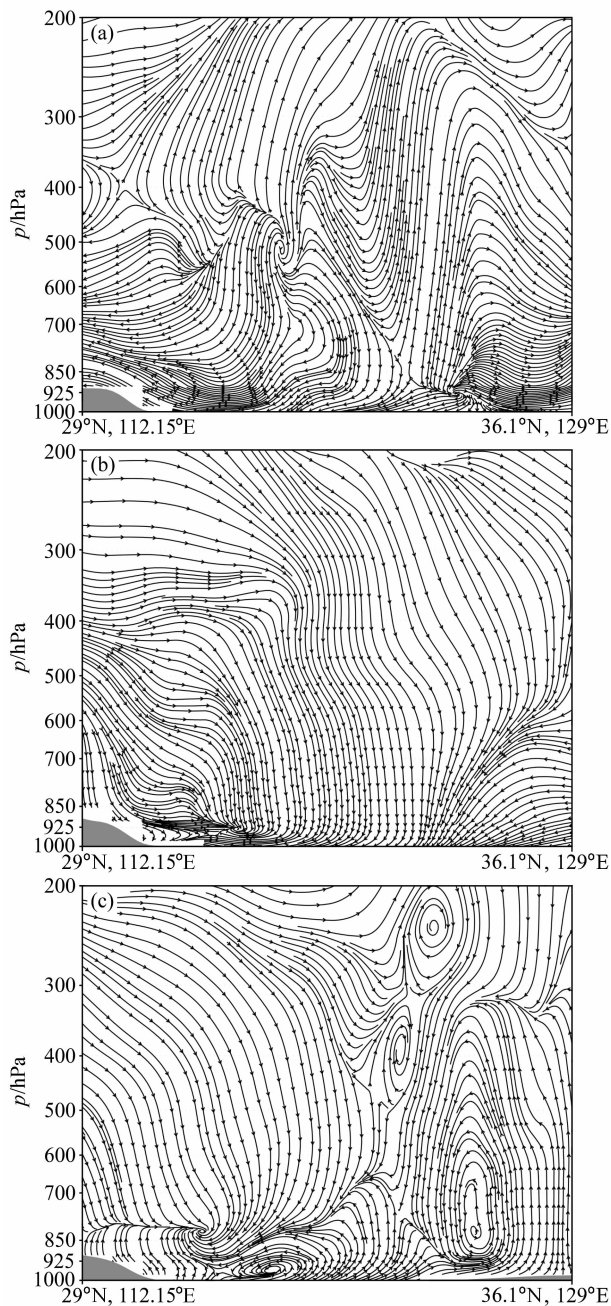


图 23 2005 年 8 月 28 日 (a)、2004 年 8 月 8 日 (b)、2002 年 8 月 30 日 (c) 08:00 (29°N , 112.15°E) 和 (36.1°N , 129°E) 之间的垂直气流模拟图

Fig. 23 Cross sections of vertical air stream between (29°N , 112.15°E) and (36.1°N , 129°E) at 0800 LST on (a) 28 Aug 2005, (b) 8 Aug 2004, (c) 30 Aug 2002

出现常持续多日,并有一定的时间和空间尺度,受其影响,大气边界层气压场也具有相似特征。因此,我国的大气环境质量也出现明显的过程性、区域性和累积性。

参考文献 (References)

- [1] 叶笃正, 杨广基, 王兴东. 东亚和太平洋上空平均垂直环流 (一) 夏季. 大气科学, 1979, **3**(1): 1~11
Ye Duzheng, Yang Guangji, Wang Xingdong. The average vertical circulations over the East-Asia and the Pacific area. (I) In summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1979, **3** (1): 1~11
- [2] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 278 pp
Ye Duzheng, Gao Youxi. *Qinghai-Xizang Plateau Meteorology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 278 pp
- [3] 陶诗言, 卫捷. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳. 应用气象学报, 2006, **17** (5): 513~524
Tao Shiyan, Wei Jie. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2006, **17** (5): 513~524
- [4] 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 副热带高压形成和变异的动力学问题. 北京: 气象出版社, 2002. 314pp
Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. *Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclones* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 314pp
- [5] 陈联寿, 徐祥德, 罗哲贤, 等. 热带气旋动力学引论. 北京: 气象出版社, 2002. 316pp
Chen Lianshou, Xu Xiangde, Luo Zhexian, et al. *Introduction to Tropical Cyclone Dynamics* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 316pp
- [6] Davis R E, Kalkstein L S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentration. *Phys. Geogr.*, 1990, **11**: 320~342
- [7] Leighton R M, Spark E. Relationship between synoptic climatology and pollution events in Sydney. *Int. J. Biometeorol.*, 1997, **41**: 76~89
- [8] Shahgedanova M, Burt T P, Davies T D. Synoptic climatology of air pollution in Moscow. *Theoretical and Applied Climatology*, 1998, **61**: 85~102
- [9] Greene J S, Kalkstein L S, Ye H, et al. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities. *Theor. Appl. Climatol.*, 1999, **62**: 163~174
- [10] Cheng W L, Pai J L, Tsuang B J, et al. Synoptic patterns in relation to ozone concentrations in west-central Taiwan. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2001, **78**: 11~21
- [11] Tanner P A, Law P T. Effects of synoptic weather systems upon the air quality in an Asian megacity. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **136**: 105~124
- [12] 邓雪娇, 黄健, 吴兑, 等. 深圳地区典型大气污染过程分析. 中国环境科学, 2006, **26** (增刊): 7~11
Deng Xuejiao, Huang Jian, Wu Dui, et al. Analyses on the typical atmospheric pollution processes in Shenzhen area. *China Environmental Science* (in Chinese), 2006, **26** (Suppl.): 7~11
- [13] 范清, 程水源, 苏福庆, 等. 北京夏季典型环境污染过程个例分析. 环境科学研究, 2007, **20** (5): 12~19
Fan Qing, Cheng Shuiyuan, Su Fuqing, et al. Example analysis of typical environment pollution process in the summer in Beijing. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2007, **20** (5): 12~19.
- [14] 陈朝晖, 程水源. 台风系统对我国区域性大气环境质量的影响. 北京工业大学学报 (已投稿)
Chen Zhaohui, Cheng Shuiyuan. Influence of typhoon to the air environmental quality of our regional parts. Submitted to *Journal of Beijing University of Technology*
- [15] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇. 环境科学研究, 2004, **17** (1): 21~25
Su Fuqing, Ren Zhenhai, Gao Qingxian, et al. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China; Transportation convergence in boundary layer. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2004, **17** (1): 21~25
- [16] 陶诗言, 朱福康. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系. 气象学报, 1964, **34** (4): 385~395
Tao Shiyan, Zhu Fukang. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1964, **34** (4): 385~395
- [17] 吴国雄. 气候系统研究中的几个问题. 现代大气科学前沿及展望. 北京: 气象出版社, 1996. 88 pp
Wu Guoxiong. *Several Problems of Climate Research. Prospect for Modern Atmospheric Sciences* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1996. 88 pp
- [18] 陶诗言, 朱福康, 吴天祺. 夏季中国大陆及其临近海面副热带高压活动的天气学研究. 见: 陶诗言编. 中国夏季副热带高压天气系统若干问题的研究. 北京: 科学出版社, 1963. 106~123
- [19] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1983, **22**: 1065~1092
- [20] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models*. Emanuel K A, Raymond D J, Eds. Amer. Meteor. Soc., 1993, 246 pp