张美根,胡非,邹捍,等. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展. 大气科学, 2008, **32** (4): 923~934 Zhang Meigen, Hu Fei, Zou Han, et al. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (4): 923~934

# 大气边界层物理与大气环境过程研究进展

张美根 胡非 邹捍 洪钟祥 赵翼俊 高志球

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029

**摘 要** 总结了近5年来中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)在第 二代超声风速温度仪研制、城市边界层研究、复杂地形大气边界层探测与数值模拟、湍流机理研究、大气污染模 式发展与应用等领域的主要进展,其中,第二代超声风速温度仪的野外对比测试结果表明其主要性能完全达到了 国际先进水平;北京城市化发展使得北京325m气象塔周边近地面流场已经具备了典型城市粗糙下垫面的流场特 征,近地面夏季平均风速呈现非常明显的逐年递减趋势;北京沙尘暴大风时期湍流运动主要是小尺度湍涡运动, 而大风的概率分布偏离高斯分布,风速较大的一侧概率分布呈指数迅速衰减,大风中风速很大的部分具有分形特 征;珠穆朗玛峰北坡地区两次综合强化探测实验是迄今为止在青藏高原大型山地中实施的针对山地环流和物质/ 能量交换最为全面和连续的大气过程探测实验,白洋淀地区的观测研究表明,非均匀边界层具有一般边界层不具 备的特点,无论是边界层结构还是湍流输送方面,水、陆边界层之间存在一定的差异,凸显其地表非均匀性的作 用;为了解决不同尺度、不同类型的大气污染问题和实际应用,研制或发展完善了多套大气污染模式系统,包括 全球大气化学模式、区域大气污染数值模式、城市大气污染数值模式和微小尺度(如街区尺度)范围内污染物输 送扩散模式。

关键词 大气边界层 大气湍流 青藏高原 超声风速仪 大气污染模式
 文章编号 1006-9895 (2008) 04-0923-12
 中图分类号 P404
 文献标识码 A

# An Overview of Recent Studies on Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Environment in LAPC

ZHANG Meigen, HU Fei, ZOU Han, HONG Zhongxiang, ZHAO Yijun, and GAO Zhiqiu

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Advances in the supersonic anemometer thermometer (UAT-2) development, urban boundary layer studies, field experiments and numerical simulations of atmospheric boundary layer structure over complex terrain, the turbulent mechanism study and air pollution model development and application obtained in the State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC) of the Institute of Atmospheric Physics of the Chinese Academy of Sciences in recent 5 years are briefly summarized in this paper. Comparison results of a field experiment show that UAT2 monitored wind speed and direction are in very good agreement with those by an Omnidirectional R3 Research Ultrasonic Anemometer, one of the best supersonic anemometers in the world. Surface layer wind fields near the Beijing 325-m meteorological tower are typical over urban rough surfaces and average wind

**收稿日期** 2008-02-02, 2008-03-17 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2007CB407303、2006CB403702

作者简介 张美根,男,1964年出生,博士,研究员,主要从事大气环境方面的研究。E-mail: mgzhang@mail. iap. ac. cn

speed at surface layer in summer tends to decrease obviously in association with urbanization of Beijing. Two intensive integrated field experiments on the slope of Mt. Everest are thought as comprehensive and continuous observation studies on atmospheric physical processes ever conducted in the Tibetan Plateau and targeted for local circulations over hilly areas and mass/energy exchange between surface and free atmosphere. Observation studies in the Baiyangdian area indicate that inhomogeneous boundary has some peculiarities over water and land because of inhomogeneity in underlying surface. A set of air quality model systems including global chemical transport models, regional and urban scale air quality models and micro-scale transport and diffusion models are developed and improved to solve different air pollution issues at different scales.

Key words atmospheric boundary layer, atmospheric turbulence, the Tibetan Plateau, supersonic anemometer, air pollution model

# 1 引言

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和 大气化学国家重点实验室(简称 LAPC)<sup>[1]</sup>主要研 究低层大气中发生的物理化学过程、形成机制、演 变规律,以及对天气、气候和环境的影响,研究方 向包括:(1)各种复杂下垫面条件下的大气边界层 结构、湍流特征以及地-气之间物质和能量的交换 过程;(2)城市和区域大气污染的形成机理、变化 规律,以及它们对大气环境的影响;(3)大气微量 气体和气溶胶浓度的变化、生物圈-气圈-水圈之间 的物质交换以及它们对环境和气候的影响。自成立 以来,LAPC 在大气边界层探测、大气边界层结构 和大气湍流理论研究,区域和城市大气污染监测和 数值模拟研究,以及大气化学特别是影响气候变化 最为重要的二氧化碳、甲烷、氧化亚氮等温室气体 排放机理研究等方面,均取得了丰硕的成果并发表 了大量的论著<sup>[2]</sup>。

具体到大气边界层物理和大气环境方面, LAPC建立了边界层遥感雷达、高性能超声风速仪 和水汽脉动仪等综合观测系统,开展了包括城市、 农村、高原和极地等复杂下垫面边界层的实验和理 论分析研究,开展了陆面过程模式、城市边界层模 式和大涡模式的研究,利用混沌动力学、小波分析 和水槽实验等开展了湍流的非线性动力学和湍流发 生机理的研究,建立了长距离(区域至全球尺度) 污染物输送模式、沙尘预报模式和多尺度(区域、 城市乃至街区尺度)空气污染模式等。对于 2003 年之前的工作,胡非等<sup>[3]</sup>已作了总结。本文将扼要 介绍 2003 年以来 LAPC 在第二代超声风速温度仪 研制、城市边界层研究、复杂地形大气边界层探测 与数值模拟、湍流机理研究、大气污染模式发展与 应用等领域的主要进展。

### 2 第二代超声风速温度仪研制

20世纪90年代,LAPC 成功研制了第一代超 声风速温度仪(UAT-1),并在大气物理基础研究 和大气环境保护、军事气象、航空航天等领域得到 广泛应用。随着科研工作的深入,对超声风速温度 仪性能的要求越来越高。如美国 NCAR 近年开展 的"水平阵列湍流研究"课题,要求 14 台超声在约 9.3 km<sup>2</sup>的面积(或更小的面积)中布阵。如此一 来,对超声传感器的空气动力学特性、仪器的一致 性、可靠性、实时性和测量精度等提出了更高、更 严格的要求。正是实际的需求,推动了新一代超声 风速温度仪(UAT-2)的研发。

UAT-2 是在 UAT-1 的基础上研发的新一代大 气湍流测量系统。该系统在研发的过程中,自始至 终以创新作为指导思想,把可靠性设计放在首位。 设计完成了超声发生、接收电路、信号处理电路、 专用嵌入式数字系统和局域网,以保证新的系统可 在恶劣的自然环境下高密度布阵,完成对大气湍流 实时、同步精确的组网测量。

UAT-2 的主要创新点如下:(1) 把先进的超声 测风技术、计算机技术和通讯技术紧密结合起来, 率先在国内外大气探测领域采用专用、开放、主从 分布式开放局域网,实现了对大气湍流实时、同 步、高密度布阵的精细、组网测量。(2) 以国际化 标准组织颁布的多项国际标准为基础,根据系统实 际要求,形成专用标准。在保证国际标准先进性、 严密性、开放性的前提下,突出专用标准"量身定 做"的特点。专用标准的采用,使系统更简单,更 可靠,运行更安全。(3) 为了同时完成系统复杂的 控制功能和通讯功能,设计独特的双 CPU 结构的 嵌入式数字系统,并以 EDA (Electronic Design Automation) 为工作平台, CPLD (Complex Programmable Logic Device) 为基本器件为数字系统 设计了专用 ASIC (Application Specific Integrated Circuits),实现了以先进的基于芯片的设计方法, 代替传统的基于电路板设计的重大技术跨越,保证 专用嵌入式数字系统速度更快,可靠性更高,运行 更安全。(4) 自始至终把可靠性设计放在首位,以 北京 325 m 气象塔为实验平台,采用多种避错、容 错技术,解决了比一般野外产生的更高、来源更为 复杂的复合型干扰源给系统带来的各种电波干扰问 题,以充分确保系统在条件恶劣的野外环境中长 期、稳定、可靠地工作。(5) 在全向非正交三维声 阵的设计中,精心设计了传感器、声阵和相关电 路,不但解决了声阵带来的阴影效应问题,且在保 证超声接收信号信噪比的前提下,大大缩短了声阵 和相关电路的机械、电路的过渡过程时间,系统采 样频率可达 100 s<sup>-1</sup>,标志着声阵和相关电路设计 和功能达到国际同类仪器先进水平。

野外观测实验结果(如图 1)表明, UAT-2 的 主要性能完全可以与代表国际先进水平的英国 Gill 公司定制生产的 R3 型全向研究专用超声风速仪 (Omnidirectional R3 Research Ultrasonic Anemometer)相媲美,且具有独立的自主知识产权。

#### 3 城市边界层研究

近十年来,随着北京城市化步伐的加快,城市 规模迅速扩大,北京三环以外的地区已由 20 世纪 70、80年代的城郊非均匀下垫面发展成为现在复 杂的城区粗糙下垫面,市区建筑物不断增多、增密 和增高,导致城区地面动力学粗糙度明显增大。针 对近十年来 325 m 气象塔(简称气象塔) 周边建筑 物的发展和变化研究表明[4~6],气象塔的下垫面粗 糙度已经上升到了3m多,零平面位移高度也增加 到了5m多;在受下垫面影响最为剧烈的近地层, 风向逐年趋于紊乱,如今气象塔周围近地面的流场 已经具备了典型城市粗糙下垫面的流场特征;近地 面夏季平均风速呈现非常明显的逐年递减的趋势 (表1),而且距离地表越近,平均风速逐年递减的趋 势也越为显著,这种风速逐年递减的趋势直到 65 m 高度左右才不明显,说明现在气象塔 47 m 以下的 观测资料反映的是城市冠层的流场特征,城市冠层

表1 北京 325 m 气象塔不同高度上夏季平均风速的年际变化 (单位: m/s)

Table 1	Yearly variations in wi	ind speeds (m/s) in t	the summertime at different	layers of Beijing 325-m	meteorological tower
---------	-------------------------	-----------------------	-----------------------------	-------------------------	----------------------

	8 m	15 m	32 m	47 m	65 m	100 m	140 m	180 m	240 m	320 m
1994 年	1.23	1.22	2.05	2.19	2.15	3.17	3.41	3.64	4.18	4.23
1997 年	1.18	1.41	2.08	2.36	2.41	3.16	3.46	4.11	4.12	4.68
1998 年	1.15	1.39	2.70	1.99	2.23	2.63	2.73	2.87	3.77	3.94
1999 年	1.08	1.28	1.67	1.85	2.08	2.48	2.90	3.06	3.64	3.76
2000 年	0.99	1.23	1.18	1.93	2.35	2.78	3.27	3.68	4.01	4.25
2001 年	0.81	1.14	1.44	1.79	2.20	2.72	3.08	3.55	3.86	4.11
2002 年	0.77	1.12	1.29	1.62	2.06	2.62	3.09	3.68	3.94	4.18
2003 年	0.71	0.95	1.38	1.67	2.06	2.69	3.18	3.66	3.60	4.40



图 1 2007 年 4 月 5 日 Gill 超声风速仪 R3 (空圆虚线) 与 UAT-2 外场试验 (黑点实线) 对比: (a) 风速; (b) 风向 Fig. 1 Time series of observed (a) wind speed and (b) wind direction by Gill R3 and UAT-2 on 5 Apr 2007

厚度约在 47~65 m之间;随着北京城市化的发展, 虽然城区近地面的平均风速存在逐年递减的趋势, 但阵风并不存在相似的递减趋势,表明城市冠层的 抬升对阵风的影响并不显著。

利用气象塔上的湍流资料,对 2003 年 3 月 20~23 日影响北京的强沙尘天气过程的中尺度通 量和湍流通量进行分析 [如图 2(见文后彩图)],结 果表明<sup>[7,8]</sup>:冷空气的影响是从上层开始的。沙尘 爆发前,边界层有强逆温存在,动量以中尺度输送 为主,湍流很弱。沙尘爆发时,向下的湍流动量通 量明显加大。湍流动量通量是沙尘沉降的主要原 因,但沙尘爆发前的中尺度过程不能忽略。沙尘爆 发前后,感热通量均以小尺度的湍流输送为主,中 尺度输送不明显。

关于沙尘暴天气条件下大气边界层的阵风结构 和扬沙机制,能谱分析表明<sup>[9~13]</sup>,沙尘暴大风时期 湍流运动主要是小尺度湍涡运动,而大风的概率分 布偏离高斯分布,风速较大的一侧概率分布呈指数 迅速衰减,表明大风中风速很大的部分具有分形特 征。由于不同时间间隔的风速差随间隔的增大从指 数分布逐渐过渡到高斯分布,因此,不能证明阵风 是小尺度湍流的一部分。而用湍流相干结构类比出 现阵风的阵性结构,可以看到垂直运动对阵风的贡 献,并且得到各个阵风参数与阵性结构时间尺度存 在线性关系,它们的个数随着时间尺度的增大呈幂 律迅速减少,两次阵风发生的时间间隔也呈幂律分 布;而阵性结构强度和阵风系数与阵性结构的时间 尺度之间存在线性-对数关系。

此外,针对北京城市规模扩大对"城市热岛" 与局地环流的影响开展了众多研究<sup>[14~20]</sup>,研究发 现北京的"城市热岛"表现出一些新的特点<sup>[19]</sup>: (1)以日均气温差表示"城市热岛"强度,现在北 京的"城市热岛"夏季最强,秋、冬季次之,春季最 弱;(2)除夏季"城市热岛"整天存在以外(午后的 平均强度也有 2℃左右),其他季节的午后,天安门 广场地区经常出现"城市冷岛"现象;(3)北京"城 市热岛"消失的"极限风速"没有发生系统性变化, 当风速大于3级时,北京"城市热岛"基本上消失; (4)"城市热岛"强度对风速的变化极其敏感,"热 岛"强度与风速呈反位相关系;(5)对强"城市热 岛"的个例分析显示,冬季夜晚"城市热岛"强度 经常表现出较大的波动性,与此相伴随,城郊地面 风出现风向突变和风速的阵性现象。

## 4 非均匀地表边界层观测与数值模拟

近年来,在中国科学院和国家自然科学基金委员会的资助下,LAPC开展了非均匀边界层的野外观测和数值模拟研究。其中的研究重点包括两个方面:2006年与2007年5月10日至7月10日间在珠穆朗玛峰(简称珠峰)北坡地区开展的两次综合强化探测实验<sup>[21~23]</sup>和2004年11月16~22日与2005年9月8~27日在白洋淀地区开展的冬、夏两次综合观测试验<sup>[24]</sup>。

珠峰北坡地区两次综合强化探测实验是迄今为 止在青藏高原大型山地中实施、针对山地环流和物 质/能量交换最为全面和连续的大气过程探测实 验[21]。从探测手段和设备上看,该实验采用众多 的现代化手段, 包括风温廓线仪、GPS 探空、协方 差脉动仪、自动气象站等;从水平尺度和分辨率上 看,该实验在珠峰北坡绒布河谷长约40km、宽约 2 km 的区域中设置了7个观测站点,按照该地区 大气流场分布形成了高密度探测网络;从垂直尺度 和分辨率上看,该强化实验使用的 GPS 探空和风 温廓线仪探测范围从地面到对流层以上大气,垂直 分辨率达到 50 m, 兼有近地层小塔提供更加稳定 和高垂直分辨率的大气要素探测;从时间尺度和分 辨率上看,该强化实验在 2006 年和 2007 两年初夏 季节进行大气探测,相互印证补充,对于全面认识 该地区初夏(青藏高原热交换最为旺盛的季节)大 气辐射、热力、环流和物质/能量交换过程有重要 意义。为期一个月的观测周期,对于认识不同天气 过程中该地区局地大气过程有重要意义。10 min 的水平大气过程采样频率和 30 min 垂直大气探测 采样频率为细致研究该地区大气环流和相关大气过 程提供了可靠保障。10 Hz 湍流通量探测频率为研 究近地面大气湍流物质/能量交换提供了有效数据。

在对上述观测资料的分析中,获得了很多有意 义的结果与发现。其中包括:(1)该地区存在强烈的 太阳辐射,月平均最大强度可以达到1361.2 W/m<sup>2</sup> (接近太阳常数)。强烈的总辐射和净辐射日变化导 致地表土壤温度和气温强烈的日变化。该地区太阳 辐射受到明显的地形影响,河谷中不同位置的太阳 辐射日变化差异很大。(2)该地区局地环流系统具 有很强的特殊性,明显区别于经典山地气象学理论 和其他地区的观测结果。其主要特征(图3)为: 午夜后至正午前强烈的沿河谷下行气流,以及太阳 辐射强烈时近地面剧烈的上升运动和 100 m 以上 大气的下沉运动。这一特殊局地环流系统是不同的 热力驱动环流耦合的结果,包括山谷风、冰川风、 坡风等,是地形和地表状态调整下强烈太阳辐射驱 动的结果。这一特殊局地环流系统在该地区形成强 烈的大气物质交换,平均日交换量达到 6.3×10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>,相当于11倍的河谷大气体积。同时,这一环 流系统与南亚季风的发展密切相关,季风中断期, 该环流系统加强;季风活跃期,该环流系统受到抑 制。(3) 在半干旱地表和强烈太阳辐射条件下, 加 之强烈的下行气流将较高山体上冷空气带入山谷, 形成河谷地面以上的冷空气,该地区存在地面向大 气的强烈感热输送,平均峰值可以达到 275.60 W/ m<sup>2</sup>。该地区潜热输送远远小干感热输送,平均峰值 只有 74.63 W/m<sup>2</sup>。平均最大动量输送为 0.3 kg·  $m^{-2} \cdot s^{-1}$  .

白洋淀是华北地区最大的淡水湖泊,位于河北 省中部平原,总面积约 360 多平方公里,由多条河 流将各个淀泊连在一起,沟壕纵横,芦荡、莲塘星 罗棋布,河淀相连。对白洋淀观测资料的分析表 明,由于地表非均匀的影响,非均匀边界层具有一 般边界层不具备的特点,无论是边界层结构还是湍 流输送方面,水、陆边界层之间存在一定的差异, 凸显其地表非均匀性的作用<sup>[25~27]</sup>:

(1) 该地区水域部分的边界层结构比陆地的复

杂,呈多中心特点。陆地上的对流不稳定层结形成 比水域早,结束晚。不稳定层结时,水域地区的对 流边界层顶较陆地上的稍高,但有时陆地近地面层 的比湿会比水域的大。并且,无论是层结稳定还是 层结不稳定时,水域地区的近地面层总有一薄层逆 温结构存在。稳定层结时,水域地区的地表比湿比 陆地大,气温比陆地高,但比湿随高度的递减律比 陆地大,而陆地上,40~60 m高度上总存在一个比 湿最小值区域。两地在夜间近地面层常有逆湿现象 出现,但水域地区更明显。另外,由于水热不均匀 分布,该地区有弱的湖陆风现象,从而形成弱的局 地环流。

(2) 与水域地区相比, 陆地上的气温日变化比 较明显,水平风速则偏小;9月份,陆地上的长波 入射辐射比水域地区的大,而反射辐射则是水域地 区的比陆地的稍大。水陆地区的短波入射辐射比较 相近,而短波反射辐射方面水域地区明显比陆地 大。水陆两地的净辐射白天非常接近,夜间两地的 净辐射为负值,但水域地区的负的净辐射比陆地明 显大;9月份,水、陆地区的感热通量相差不大,但 潜热通量比感热通量大,并且是陆地比水域地区 大。11月份,两地的潜热通量相差不大,但陆地的 感热通量明显比水域地区大。两地夜间都有负的潜 热通量出现;平均来讲,涡动相关法得到的感热与 潜热通量之和为有效能的 0.75 左右,这种能量不 闭合现象在潜热通量方面表现更突出;9月份陆地 上的 Bowen 比白天平均值在-0.4~0.4之间,总 体平均为 0.131, 有明显的日变化; 水、陆两地的



图 3 2006 年 5 月 29 日~6 月 29 日风廓线仪观测到的珠峰北坡绒布河谷局地环流垂直分布日变化:(a)沿河谷轴向气流(正值为下行气流,单位:m/s);(b)大气垂直运动(正值为上升气流,单位:cm/s)

Fig. 3 Diurnal variations in (a) axial and (b) vertical wind speeds (m/s) over the Rongbuk valley on the northern slope of Mt. Everest observed by a wind profiler from 29 May to 29 Jun 2006. Positive values indicate down-slope air streams in (a) and updrafts in (b) 反照率不同,不仅有日变化,并随季节变化。

(3) 在湍流统计特征方面,水、陆两地同样具 有一定的差异。由于地表性质的不同,两地的拖曳 系数也不同,陆地明显比水域大,并且两地的拖曳 系数的量级大小与季节有关;水域地区的摩擦速度 和动量通量比陆地大,而湍流强度则是陆地比水域 大,同样随季节有变化;无论是感热通量还是摩擦 速度都与层结稳定度有关,但水域地区的相似性明 显比陆地好。通过分析两地的温度和风速的归一化 标准差与稳定度之间的关系得到,水域地区的相似 性关系比陆地好,不稳定层结条件下的相似性关系 比稳定条件下的好;两地的温度、速度和水汽的谱 结构同样具有局地性。

在进行野外观测的同时开展了大气边界层数值 模拟试验。利用中尺度气象模式 RAMS 对珠峰地 区局地环流的模拟结果<sup>[28,29]</sup>表明, RAMS 较为真 实地再现了以珠峰地区为代表的青藏高原大型山地 复杂地形和地表状态下的局地大气环流过程。与珠 峰强化实验观测资料对比,数值模拟结果给出了珠 峰北坡绒布河谷中清晰的局地环流日变化过程,特 别是该地区占主导地位的复合下行气流,从而证实 该局地环流系统存在的必然性。在模拟结果中还可 以看到,珠峰南坡存在较强的上行气流,可以翻越 喜马拉雅山主山脊进入珠峰北坡的绒布河谷地区。

针对白洋淀地区水、陆不均匀分布条件下的大 气边界层结构和演变过程进行了数值模拟<sup>[30]</sup>,结 果表明,由于下垫面的热力差异,在 360 多平方公 里的白洋淀地区,地表特征分布的不均匀可以引发 弱的局地环流,影响大气边界层内温度和湿度的空 间分布;在 500 m 高度以下,下垫面不均匀分布对 湍流动能有明显影响。

除了珠峰北坡和白洋淀地区以外,基于热带季 风区草地湍流观测资料,研究了热带季风区草地湍 流通量的季节变化和日变化,结果表明:热带季风 区草地潜热通量的季节变化明显,是显著的气候信 号,而感热通量的季节变化极小<sup>[31]</sup>。建立了考虑 土壤垂直不均匀性和土壤水分垂直运动影响的土壤 温度预报方程,利用干旱区沙漠能量平衡观测试验 资料,定量比较新的预报方程和传统方法之间的差 异。结果表明:由于未考虑土壤垂直不均匀性和土 壤水分垂直运动影响,传统的土壤温度预报方程不 是高估地表温度振幅,就是高估地表温度相位的延 迟<sup>[32]</sup>。系统回顾和总结了前人的地表能量平衡观 测试验结果,结果表明:对不同的地表类型,土壤 水分垂直运动对地表能量平衡的影响存在差异;干 热地表能量分量能够很好地闭合,是由于极低的土 壤水含量所致;土壤水分垂直运动对于裸土地表的 能量平衡的影响最为显著<sup>[33]</sup>。在分析非均匀农田 地表湍流通量观测资料基础之上,研究了与非均匀 地表能量平衡有关的若干科学问题<sup>[34]</sup>。

#### 5 湍流机理研究

湍流是大气边界层研究的核心问题之一。湍流 流场中各物理量(例如速度、温度、结构函数等) 的统计分布特性是湍流统计理论的重点课题,关系 到人们对湍流机理的认识和湍流模型方程的建立。 表征和定量刻画湍流统计特征的最重要的量就是概 率分布函数或概率密度函数。概率分布函数的不同 形式反映了湍流运动不同的宏观-微观结构和过程。 自从 20 世纪 40 年代以来,科学家们最为关注的是 Kolmogorov 提出的惯性副区湍流微结构的统计特 性,希望从中可以找到湍流的普适或准普适的理 论。人们认为,任何完整的湍流理论都应该能给出 湍流惯性区的正确结果。

在北京 325 m 气象塔上 100 Hz 高频采样的湍 流观测试验发现<sup>[35]</sup>,热对流条件下城市冠层湍流 温度脉动具有"硬湍流"特征,两点温度差具有指 数型概率密度分布;观测实验同时也得到湍流能量 耗散率 ε 符合对数-正态分布,这与 Kolmogorov 在 1962 年提出的假设和已经报道的大量实验结果相 一致。根据相似性级串模型导出的"硬湍流"温度 场 n 阶结构函数的标度指数理论公式

 $\begin{aligned} \boldsymbol{\varsigma}_{n} &= n/3 - \mu \{ n(n+6)/72 + [2 \ln n! - n \ln 2] / \\ 2 \ln 6 \} & (\mu 为间歇性指数), \end{aligned}$ 

与实验测得的结果可以较好地符合到 8 阶,优于 Kolmogorov理论、β模型和联合对数-正态模型给 出的理论结果。

流能量级串和湍流拟序结构在长达几十年的时间里始终是国际上保持不衰的前沿和热点问题。赵松年等<sup>[36~39]</sup>在多年深入探索的基础上,指出国际上最为流行的湍流 Richardson 级串模型的缺陷,提出了湍流"同步级串"的新理论。新理论模型与其他模型的差异如图 4(见文后彩图)所示,其理论的核心思想是:从外界向含能区注入能量到形成

发达湍流其实并不需要经过 N 次有序的级串过程, 有如一块玻璃被摔碎时,最可能的情形是同时破碎 成各种不同尺寸的碎块。湍流含能涡一次散裂同时 形成各种大小尺度湍涡的概率应远大于 Richardson 级串模型的概率。该理论解析地表达了湍流的敏感 初条件特征,并求得湍流速度场和能量耗散的高阶 矩标度律,用 Cantor 集的补集和对应的小波变换 清楚地刻画了能量级串的几何结构,对标度律给出 了新的物理解释。此外,还从混沌动力学、层次相 似律、壳模型、格子气模型和大涡模拟等方面对大 气湍流的非线性动力学机理开展了多方位的研究。

## 6 大气污染模式发展与应用

近二十年来, 随着我国社会经济的发展和人民 生活水平的提高, 化石燃料的大量使用和人们对能 源需求的日益增加, 使得排向大气的工业废弃物如 二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和颗粒 物等急剧增加。与此同时,交通运输业的发展,汽 车大量增加,也使得汽车尾气的排放物如氮氧化 物、碳氢化合物和颗粒物等急剧增加。二氧化硫、 氮氧化物、碳氢化合物和颗粒物等废弃物排放量的 大量增加,不仅使得我国的大气环境污染已形成点 源与面源污染共存、生活污染和工业排放叠加、各 种新旧污染与二次污染相互复合的态势,而目影响 了云雨和雾霾的形成和地气系统的能量平衡,对区 域乃至全球气候产生重要影响。为了研究污染物在 大气层中的输送与演变规律以及控制对策,评估大 气污染的气候环境效应, LAPC 研制或发展了多套 大气污染模式系统,以用于解决不同尺度、不同类 型的大气污染问题和实际应用,如建立全球环境大 气输送模式 GEATM<sup>[40]</sup>和利用全球大气化学模式 MOZART-2<sup>[41~43]</sup>以研究全球大气污染物的时空分 布、我国大气污染排放对全球大气质量的影响以及 其他地区排放的污染物在我国大气污染形成中的作 用;改进了区域大气污染数值模式[42]和城市大气 污染数值模式<sup>[43]</sup>,使得模拟的污染物物种增加,演 变过程越来越复杂和大气化学反应机理更加完备, 以研究区域(或城市群)尺度大气污染物的输送与 演变规律和沙尘(或扬尘)气溶胶的产生机理,探 讨城市地区光化学烟雾的形成与演化机理,预测大 气质量,评估外来污染物在某一地区或城市大气污 染形成中的作用以及大气污染(如酸沉降、高浓度

臭氧等)对农作物的危害及其控制对策<sup>[44~59]</sup>;发展 了微小尺度(如街区尺度)范围内污染物输送扩散 模式<sup>[60~65]</sup>。

#### 6.1 全球大气化学模式

刘茜霞等<sup>[41,42]</sup>和葛萃等<sup>[43]</sup>利用由美国大气研 究中心(NCAR)的大气化学部、美国大气海洋局 地球流体力学实验室(GFDL)、德国马普气象研 究所(MPI)以及普林斯顿大学等单位共同开发的 全球三维大气化学输送模式 MOZART-2(Model of Ozone and Related Chemical Tracers, version 2),探讨东亚及欧洲地区典型的对流层臭氧季节变 化特征及其主要影响因子,并通过欧洲污染物源强 的变化进一步探讨欧洲污染物排放量的变化对东亚 地区污染物分布的影响,分析欧洲污染物向东亚地 区输送的主要路径。此外,通过与不同大气环流模 式的离线耦合,分析不同动力驱动场对化学模式的 影响,探讨影响污染物分布的主要气象因子。

#### 6.2 多尺度空气质量模式系统

我国经济的持续高速发展,能源与交通(特别 是城市汽车拥有量)规模的扩大、城市人口的膨胀 和大型工业开发区的发展使得大气污染变成点源与 面源污染共存、生活污染和工业排放叠加、各种新 旧污染与二次污染相互复合的态势,一个城市或地 区的空气质量很难与周边地区的污染排放分离开 来。如许多研究表明,北京地区的大气污染状况不 仅与该地区的污染排放量有关,而且与天津、河 北、山西、山东和内蒙古等地排放的外来污染物有 关,城市与区域尺度之间大气污染物的输送过程对 于污染物的浓度分布具有重要影响。鉴于此,在空 气质量模式系统发展过程中充分考虑了污染物输 送、扩散、迁移和转化过程中多尺度、高分辨率、 多物种和多过程的特点<sup>[51]</sup>。

空气质量模式系统 CMAQ-RAMS<sup>[51]</sup> 由区域大 气模拟系统 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)和多尺度空气质量模拟系统 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality modeling system)两部分组成。RAMS 采用地形追随坐标系  $[\sigma_z=z_h(z-z_g)/(z_h-z_g),其中 z_g和 z_h$ 为地形标高 和模式顶高度,对天气过程和下垫面非均匀性对大 气边界层结构的影响具有很好的模拟能力,能够为 CMAQ 提供高分辨率的有关大气边界层结构的信 息。RAMS 是一个比较完善的中尺度动力学模式,

目前广泛应用于理论研究和业务天气预报中。 CMAQ是美国环境保护局最新一代空气质量模式 系统 Models-3 的核心部分, 吸收了许多当今大气 化学与大气环境领域内的最新研究成果,可用于区 域和城市尺度光化学烟雾、区域酸沉降、大气颗粒 物污染等大气污染问题的理论研究与业务预报。模 式系统中的 CMAQ 是在 1999 年版本的基础上发展 起来的:更换了 CMAQ 的气象驱动模块,增加了 海盐、黑碳、有机碳等原生气溶胶,并且完善了物 理化学过程分析模块。改进后的 CMAQ 与原版本 相比,采用了不同投影体系,在垂直方向上采用了 高度  $(\sigma_z)$  坐标系以取代压力  $(\sigma_b)$  坐标系。用  $\sigma_z$ 代替σ,是考虑到高度坐标更适合于描述污染物在 大气边界层中的物理化学过程,在污染源的处理过 程中也更加方便。多尺度空气质量模式框架如图 5 所示。近年来 CMAQ-RAMS 先后应用于研究东亚 地区二氧化硫、对流层臭氧及其前体物的输送与演 变过程研究和黑碳与有机碳气溶胶的输送与扩散研 究[49, 50, 52, 53, 56~59]以及北京地区空气污染形成与演 变过程研究。

6.3 微小尺度(街区尺度)污染物扩散模式

国际上有关街区空气污染与控制的研究起步于 20世纪70年代,是当前的一个研究热点,而我国 还处于起步阶段。通常研究城市街区的污染模式, 都只能考虑两侧为连续建筑物的街道峡谷的情况, 而实际街区建筑物布局远比这些模式所考虑的情况 复杂,街道两旁建筑物通常参差不齐,街道本身的 布局也纵横交错,已有的街道峡谷模式无论从定量 还是定性上,对实际的街区都力不从心。因此对于



图 5 多尺度空气质量模式框图

Fig. 5 Schematic diagram of the multi-scale air quality model system

街区尺度范围内污染物的输送扩散模拟,普通的大 气模式通常都无能为力。相对而言,利用计算流体 力学(CFD)模拟技术能很好地模拟复杂街区的污 染情况,因而在城市街区污染物的湍流扩散方面逐 渐得到了应用。李磊等<sup>[60,61,65]</sup>和程雪玲等<sup>[62~64]</sup>应 用现代流体力学数值模拟方法研究影响城市街区峡 谷污染物扩散的因素,并且成功实现中尺度气象模 式和 CFD模式技术的单向耦合,研究了体育场馆、 高大建筑单体和复杂建筑群的风场和扩散问题。

### 7 结论与展望

本文旨在总结近5年来中国科学院大气物理研 究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室 (LAPC)在大气边界层物理与大气环境过程领域的 一些研究进展。由于水平的限制,可能有不少不妥 之处和不全面的地方。大气边界层物理与大气环境 的研究内容和领域不断扩展,依作者浅见,未来的 科学研究应着重以下三个方面:非均匀大气边界层 物理和大气湍流理论;城市大气污染物来源和形成 机制研究;大气污染预报模式和优化控制理论。

**致谢** 感谢对本文工作提供帮助的同仁和参考文献中所引述论文 的其他作者!

#### 参考文献 (References)

- [1] 洪钟祥.《大气边界层物理和大气化学国家重点实验室》简介.大气科学,1993,17 (1):126~128
  Hong Zhongxiang. Introduction of State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry (LAPC). Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 1993, 17 (1): 126~128
- $\left[ \ 2 \ \right] \quad http://www.lapc. ac. cn/chinese/achievement. htm$
- [3] 胡非,洪钟祥,雷孝恩.大气边界层和大气环境研究进展. 大气科学,2003,27 (4):712~728
  Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003,27 (4):712~728
- [4] 李倩,刘辉志,胡非,等.大风天气下北京城市边界层阵风结构特征.中国科学院研究生院学报,2004,21(1):40~44
  Li Qian, Liu Huizhi, Hu Fei, et al. Characteristic of the urban boundary layer under strong wind condition in Beijing city. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 2004, 21(1):40~44
- [5] 刘熙明,胡非,李磊,等.北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究.地球物理学报,2006,49(3):689~697

Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei, et al. Summer urban climate trends and environmental effect in the Beijing area. *Chinese* J. Geophys. (in Chinese), 2006, **49** (3): 689~697

- [6] 彭珍,胡非.北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究.地球物理学报,2006,49(6):1608~1615
  Peng Zhen, Hu Fei. A study of the influence of urbanization of Beijing on the boundary wind structure. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6):1608~1615
- [7] 彭珍,刘熙明,洪钟祥,等.北京地区一次强沙尘暴过程的 大气边界层结构和湍流通量输送特征. 气候与环境研究, 2007,12 (3):267~276

Peng Zhen, Liu Ximing, Hong Zhongxiang, et al. Characteristics of atmospheric boundary-layer structure and turbulent flux transfer during a strong dust storm weather process over Beijing area. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, **12** (3): 267~276

 [8] 刘熙明,全利红,姜金华,等.北京地区一次强沙尘天气过 程的中尺度通量特征.气候与环境研究,2007,12(3):296 ~301

> Liu Ximing, Quan Lihong, Jiang Jinhua, et al. Characteristics of the mesoscale fluxes during a strong dust storm weather process in Beijing. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, **12** (3): 296~301

- [9] 程雪玲,曾庆存,胡非,等.大气边界层强风的阵性和相干结构. 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 227~243
  Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. Gustness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, 12 (3): 227~243
- [10] 曾庆存, 胡非, 程雪玲. 大气边界层阵风扬尘机理. 气候与 环境研究, 2007, 12 (3): 251~255
   Zeng Qingcun, Hu Fei, Cheng Xueling. The mechanism of dust entrainment by gustwind. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, 12 (3): 251~255
- [11] 程雪玲, 全利红, 胡非, 等. 阵风的分形与混沌特征研究. 气候与环境研究, 2007, 12 (3): 256~266
  Cheng Xueling, Quan Lihong, Hu Fei, et al. The fractal and chaotic characteristic of gustwind. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, 12 (3): 256~266
- [12] 胡非,刘长庆,姜金华.大气边界层中沙粒悬移运动的数值 模拟.气候与环境研究,2007,12(3):277~286
  Hu Fei, Liu Changqing, Jiang Jinhua. Numerical simulation of sand suspension and transportation in atmospheric boundary layer. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, 12 (3):277~286
- [13] 全利红,胡非,王迎春.强天气过程中近地面风速的非线性动力学特征.气候与环境研究,2007,12(3):287~295
   Quan Lihong, Hu Fei, Wang Yingchun. Nonlinear dynamics of wind in surface layer during violent synoptic process. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2007, 12(3):287~295

- [14] 佟华,刘辉志,桑建国,等.城市人为热对北京热环境的影响. 气候与环境研究, 2004, 9 (3): 409~421
  Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2004, 9 (3): 409~421
- [15] 李兴荣,胡非,舒文军.近15年北京夏季城市热岛特征及其 演变,气象,2006,32(8):42~46
  Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. Characteristics and variations of urban heat island effect in Beijing for last 15 years. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2006, 32(8):42~46
- [16] 王郁,胡非.近10年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究.地球物理学报,2006,49(1):61~68
  Wang Yu, Hu Fei. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006,49 (1):61~68
- [17] 刘熙明,胡非,李磊.北京市夏季城市热岛特征及其近地层
   气象场分析.中国科学院研究生院学报,2006,23(1):70~
   76

Liu Ximing, Hu Fei, Li Lei. Analyses on the characteristics of Beijing summer urban heat island (UHI) and its meteorological fields. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2006, **23** (1): 70~76

- [18] 王喜全,王自发,郭虎.北京"城市热岛"效应现状及特征. 气候与环境研究,2006,11(5):627~636
  Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. The study of the urban heat island in Beijing city. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 2006, 11(5):627~636
- [19] 王喜全.北京城市气候与大气环境几个问题的研究.中国科学院大气物理研究所博士学位论文. 2007. 110 pp
   Wang Xiquan. Preliminary study on several problems about urban climate and atmospheric environment in Beijing city.
   Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 110 pp
- [20] 吴瑞霞. 城市下垫面对边界层结构影响的数值模拟研究. 中 国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2007. 104 pp Wu Ruixia. A numerical simulation study of the urban underlying surface's effect on the boundary layer structrue. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2007. 104 pp
- [21] 邹捍,周立波,马舒坡,等. 珠穆朗玛峰北坡局地环流日变 化的观测研究. 高原气象,2007,26(6):1123~1140
  Zou Han, Zhou Libo, Ma Shupo, et al. Observation of diurnal circulation on the Northern Slope of Mt. Qomolangma. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007,26(6):1123~1140
- [22] 刘辉志,冯健武,邹捍,等.青藏高原珠峰绒布河谷地区近 地层湍流输送特征.高原气象,2007,26(6):1151~1161 Liu Huizhi, Feng Jianwu, Zou Han, et al. Turbulent characteristics of the surface layer in Rongbuk valley on the North-

ern slope of Mt. Qomolangma. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26** (6): 1151~1161

[23] 马舒坡,周立波,邹捍,等.冰雪对珠峰北坡绒布河谷地区 局地环流影响的数值试验.高原气象,2007,26(6):1214~ 1223

Ma Shupo, Zhou Libo, Zou Han, et al. Simulation of the effects of glacier cover on local circulation in the Rongbuk valley. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, **26** (6): 1214~1223

[24] 胡非,洪钟祥,陈家宜,等. 白洋淀地区非均匀大气边界层的综合观测研究——实验介绍及近地层微气象特征分析. 大气科学,2006,30(5):883~893

Hu Fei, Hong Zhongxiang, Chen Jiayi, et al. The field experiment of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface in Baiyangdian area—Introduction and preliminary data analysis. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (5): 883~893

- [25] 刘熙明. 非均匀边界层结构和湍流通量特征的研究,中国科 学院大气物理研究所博士学位论文,2006. 127 pp Liu Ximing. Structures and turbulent fluxes of atmospheric boundary layer over heterogeneous surface. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006. 127 pp
- [26] 全利红,胡非,程雪玲.大气边界层湍流标量场的概率分布 及其特征分析. 气象学报,2007,65 (1):105~112
   Quan Lihong, Hu Fei, Cheng Xueling. Analyses of probability distribution and its statistical characters of turbulent scalars in atmospheric boundary layer. Acta Meteorologica Sinica. (in Chinese), 2007, 65 (1):105~112
- [27] 全利红, 胡非, 程雪玲. 用小波系数谱方法分析湍流湿度脉动的相干结构. 大气科学, 2007, 31 (1): 57~63
  Quan Lihong, Hu Fei, Cheng Xueling. Analysing coherent structures of humidity time series by the spectral analysis of the wavelet transform coefficients. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, 31 (1): 57~63
- [28] 张美根,马舒坡,许丽人,等. 珠峰北坡绒布河谷地区局地 环流的模拟分析. 高原气象, 2007, 26 (6): 1146~1150
  Zhang Meigen, Ma Shupo, Xu Liren, et al. Simulation of local circulation in the Rongbuk valley on the northern slope of Mt. Qomolangma. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, 26 (6): 1146~1150
- [29] 朱凌云,张美根,马舒坡,等. 珠峰绒布河谷大气边界层结构的数值模拟. 高原气象, 2007, 26 (6): 1208~1213 Zhu Lingyun, Zhang Meigen, Ma Shupo, et al. Numerical simulation of atmospheric boundary layer structure over Rongbuk valley of Mt. Qomolangma. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2007, 26 (6): 1208~1213
- [30] 姜金华, 胡非, 刘熙明, 等.水、陆不均匀条件下大气边界层 结构的数值模拟.南京气象学院学报, 2007, **30**(2):162~ 169

Jiang Jinhua, Hu Fei, Liu Ximing, et al. Numerical simulation of atmospheric boundary layer structure over a waterland heterogeneous surface. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2007, **30** (2): 162~169

- Bi X, Gao Z, Deng X, et al. Seasonal and diurnal variations in moisture, heat, and CO<sub>2</sub> fluxes over grassland in the tropical monsoon region of southern China. J. Geophys. Res. 2007, 112, D10106, doi: 10.1029/2006JD007889
- [32] Gao Z, Bian L, Hu Y, et al. Determination of soil temperature in an arid region. *Journal of Arid Environments*. 2007, doi: 10.1016/j.jaridenv.2007.03.012
- [33] Gao Z, Chen G T, Hu Y. Impact of soil vertical water movement on the energy balance of different land surfaces. *Inter*national Journal of Biometeorology. 2007, doi: 10.1007/ s00484-007-0095-6
- [34] Gao Z, Bian L, Chen Z, et al. Turbulent variance characteristics of temperature and humidity over a non-uniform land surface for an agricultural ecosystem in China. Advances in Atmospheric Sciences. 2006, 23 (3), 365~374
- [35] Hu Fei, Cheng Xueling, Zhao Songnian, et al. Hard state of the urban canopy layer turbulence and its self-similar multiplicative cascade models. *Science in China* (Series D), 2005, 48 (Supp. II): 80~87
- [36] Zhao Songnian, Xiong Xiaoyun, Cai Xiaohong, et al. A new turbulence energy cascade pattern and its scaling law. *Europhys. Lett.*, 2005, 69 (1): 81~87, doi: 10.1209/epl/ i2004-10300-9
- Zhao Songnian. Synchrocascade pattern in the atmospheric turbulence. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, No. D8, 4238, doi: 10.1029/2002JD002354
- [38] 马晓光,胡非.大气湍流能谱的精细结构及能量级串.地球物理学报,2004,47(2):195~199
  Ma Xiaoguang, Hu Fei. Refined structure of energy spectrum and energy cascade in atmospheric turbulence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004,47(2):195~199
- [39] 程雪玲,胡非.大气边界层剪切湍流统计特性的风洞实验及 其层次相似律.大气科学,2005,29(4):573~580
  Cheng Xueling, Hu Fei. Dynamic property of atmospheric shear turbulent flow and its self-similarity in the wind tunnel experiment. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, 29 (4):573~580
- [40] 罗淦,王自发.全球环境大气输送模式(GEATM)的建立及 其验证.大气科学,2006,30(3):504~518
  Luo Gan, Wang Zifa. A global environmental atmospheric transport model (GEATM): Model description and validation. *Chinese J. A tmos. Sci.* (in Chinese), 2006, 30(3): 504~518
- [41] Liu Qianxia, Zhang Meigen, Wang Bin. Simulation of tropospheric ozone with Mozart-2: An evaluation study over East Asia. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22 (4): 585

 $\sim 594$ 

[42] 刘茜霞, 王斌, 张美根. MOZART-2 对欧洲地区对流层臭氧 的模拟研究. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23 (2): 221 ~230

> Liu Qianxia, Wang Bin, Zhang Meigen. A simulation study of tropospheric ozone over Europe with MOZART-2. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 2006, 23 (2): 221~230

- [43] 葛萃,蔡菊珍,张美根.东亚地区对流层 O<sub>3</sub>和 CO 模拟.中 国科学院研究生院学报. 2007, 24 (5): 549~555 Ge Cui, Cai Juzhen, Zhang Meigen. Numerical study of tropospheric ozone and carbon monoxide in East Asia. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese). 2007, 24 (5): 549~555
- [44] An Junling, Ueda H, Matsuda K, et al. Simulated impacts of SO<sub>2</sub> emissions from the Miyake volcano on concentration and deposition of sulfur oxides in September and October of 2000. Atmospheric Environment, 2003, 37: 3039~3046
- [45] Uematsu M, Wang Zifa, Uno I. Atmospheric input of mineral dust to the western North Pacific region based on direct measurements and a regional chemical transport model. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30**: NO. 6, 1342, doi: 10.1029/ 2002GL016645
- 【46】 张新玲, 安俊岭, 程新金, 等. 污染源、气象条件变化对我国 SO<sub>2</sub>浓度及硫沉降量分布的影响. 大气科学, 2003, 27 (5): 939~947
   Zhang Xinling, An Junling, Cheng Xinjin, et al. Effect of evolutions of source emissions and meteorological factors on

SO<sub>2</sub> distribution and sulfur deposition in China. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 2003, **27** (5): 939 $\sim$ 947

- [47] Zhu Bin, Akimoto Hajime, Wang Zifa, et al. Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan? *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L17104, doi: 10.1029/2004GL020609
- [48] Chen J, Wang Zifa, Young C, et al. Simulations of Asian yellow dust incursion over Taiwan for the spring of 2002 and 2003. *Terrestrial*, *Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2004, 15 (5): 949~981
- [49] Zhang Meigen, Uno Itsushi, Yoshida Yasuhiro, et al. Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia campaigns. Atmospheric Environment, 2004, 38 (40): 6947~6959
- [50] Zhang Meigen, Xu Yongfu, UNO I, et al. A numerical study of tropospheric ozone in the springtime in East Asia. Advances in Atmospheric Sciences, 2004, 21 (2): 163~170
- [51] 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 I. 模型系统介绍与气象要素模拟. 大气科学, 2005, 29 (5): 805~813
  Zhang Meigen. A multi-scale air quality modeling system and its evaluation. I: Introduction to the model system and simulation of meteorological parameters. *Chinese J*. A tmos. Sci. (in Chinese), 2005, 29 (5): 805~813

[52] 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 II. 东亚地区对 流层臭氧及其前体物模拟. 大气科学, 2005, **29**(6): 926~ 936

Zhang Meigen. A multi-scale air quality modeling system and its evaluation. II: Simulation of tropospheric ozone and its precursors in East Asia. *Chinese J. A tmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29** (6): 926~936

- [53] 张美根,徐永福,张仁健,等.东亚地区春季黑碳气溶胶源 排放及其浓度分布.地球物理学报,2005,48(1):46~51 Zhang Meigen, Xu Yongfu, Zhang Renjian, et al. Emission and concentration distribution of black carbon aerosol in East Asia during springtime. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005,48(1):46~51
- [54] 王自发,谢付莹,王喜全,等. 嵌套网格空气质量预报模式 系统的发展与应用. 大气科学, 2006, 30 (5): 778~790
  Wang Zifa, Xie Fuying, Wang Xiquan, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system. *Chinese J. A tmos. Sci.* (in Chinese). 2006, 30 (5): 778~790
- [55] Wang Zifa, Li Jie, Wang Xiquan, et al. Modeling of regional high ozone episode observed at two mountain sites (Mt. Tai and Huang) in East China. *Journal of Atmospheric Chemis*try, 2006, 55 (3): 253~272
- [56] Zhang Meigen, Pu Yifen, Zhang Renjian, et al. Simulation of sulfur transport and transformation in East Asia with a comprehensive chemical transport model. *Environ. Model. Software*, 2006, **21**: 812~820
- [57] Zhang Meigen, Akimoto Hajime, Uno Itsushi. A three-dimensional simulation of HO<sub>X</sub> concentrations over East Asia during TRACE-P. J. Atmospheric Chemistry, 2006, 54 (3): 233~254
- [58] Zhang Meigen, Uno Itsushi, Zhang Renjian, et al. Evaluation of the Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system with observations obtained during the TRACE-P experiment: Comparison of ozone and its related species. Atmos. Environ., 2006, 40 (26): 4874~4882
- [59] Zhang Meigen, Gao Lijie, Ge Cui, et al. Simulation of nitrate aerosol concentrations over East Asia with the model system RAMS-CMAQ. *Tellus*, 2007, **59B**: 372~380
- [60] 李磊, 胡非, 程雪玲, 等. Fluent 在城市街区大气环境中的 一个应用. 中国科学院研究生院学报, 2004, **21**(4): 476~ 480

Li Lei, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. An application of fluent on the study of the atmospheric environment in urban streets. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 2004, **21** (4): 476~480

 [61] 李磊,张镭,胡非. 城市街道峡谷汽车尾气污染的数值模拟. 高原气象,2004,23(1):97~102
 Li Lei, Zhang Lei, Hu Fei. Numerical simulation of mobile emission pollution in urban street canyon. *Plateau Meteorol*- ogy (in Chinese), 2004, 23 (1): 97~102

- [62] 程雪玲, 胡非. 影响街区峡谷浓度扩散的因素. 城市环境与城市生态, 2004, 17 (2): 39~41
  Cheng Xueling, Hu Fei. Factors of effecting canyon street dispersion. Urban Environment and Urban Ecology (in Chinese), 2004, 17 (2): 39~41
- [63] 程雪玲,胡非,崔桂香,等.街区污染物扩散的数值研究.城 市环境与城市生态,2004,17(4):1~4
   Cheng Xueling, Hu Fei, Cui Guixiang, et al. Numerical

study on pollutant dispersion in urban street. Urban Environment and Urban Ecology (in Chinese), 2004, **17** (4) :  $1 \sim 4$ 

- [64] Cheng Xueling, Hu Fei. Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-road. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22 (2): 290~299
- [65] Li Lei, Hu Fei, Cheng Xueling, et al. Numerical simulation of the flow within and over an intersection model with Reynolds-averaged Navier-Stokes method. *Chinese Physics*, 2006, 15 (1): 149~155



图 2 2002 年 3 月 20 日 11 时(当地时间)在 47 m、120 m 和 280 m 高度 1 min 平均水平风速主导风和垂直速度的时间曲线。竖线表示阵风的相干性:红线:阵风峰期,黑线:阵风谷期;阴影:受对流和湍流干扰的阵风相干性;×表示反相的情况

Fig. 2 1-min averaged horizontal and vertical velocities at heights of 47, 120 and 280 m starting at 1100 LST 20 Mar 2002. The vertical lines show the coherent structure of gustwind: red is the period of strong gustwind, black is the period of weak gustwind; shadow is the coherent structures of gustwind disturbed by convection and turbulence;  $\times$  are the contrary conditions



图 4 (a) Richardson 级串模型; (b) β分形级串模型; (c) 同步级串模型

Fig. 4 (a) Richardson cascade model; (b)  $\beta$  fractal cascade model; (c) synchronicity cascade model