

大气边界层和大气环境研究进展^{*}

胡 非 洪钟祥 雷孝恩

(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 大气边界层物理和大气环境是大气科学的重要领域, 中国科学院大气物理研究所自成立以来在这一研究领域取得了丰硕的成果。作者重点介绍最近十多年来在大气边界层探测、大气边界层结构特征、大气湍流理论、城市和区域大气污染预测预报模式研究等方面取得的重要进展, 并对大气边界层和大气环境研究的未来发展作了展望。

关键词: 大气边界层; 大气湍流; 大气环境

1 引言

离地面 1~2 km 左右的大气边界层是人类生活和生产活动的主要空间, 地气之间相互作用以及大气污染主要是发生在这里。由于大气边界层中的流体运动几乎总是处于湍流状态, 所以湍流自然成为大气边界层物理研究的基础问题。大气边界层和大气湍流研究历史悠久, 从上个世纪算起已有近百年的发展历程。大气边界层的理论是以湍流理论为基础, 湍流理论发展到一定程度才得以有大气边界层理论的出现。另一方面, 人类活动引起的生态失衡、环境恶化以及气候变化和天气、气候异常等无一不是与大气边界层中发生的物理过程、化学过程和生态过程等密切相关, 因此大气边界层物理是一门基础性和实用性都非常强的学科。为了了解大气圈与海洋、岩石圈、生物圈和冰雪圈的相互作用机理, 并建立合理的数学模型来研究地球气候环境系统变化的规律和进行预测, 就必须对大气边界层有非常深入的了解。同样, 为了保护生态环境、研究大气污染的机理和开展大气污染预报、保障地面交通和航空安全等, 也都有赖于大气边界层的研究。可以说, 大气边界层物理研究始终是大气科学最活跃、最重要的一个分支。

自上世纪 50 年代以来, 中国科学院大气物理研究所(简称大气物理所)在大气边界层和大气环境领域做了大量的工作, 取得丰硕的成果并发表了大量的论著。特别是自 1993 年在世界银行贷款支持下建立了大气边界层物理和大气化学国家重点实验室(LAPC)^[1]以来, 综合观测系统建设和研究工作都有了很大的进展, 主要包括: 建立了包括 325 m 气象塔、边界层遥感雷达、高性能超声风速仪和水汽脉动仪等在内的综合观测系统, 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、

2003-02-10 收到, 2003-05-08 收到修改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40233030 和 40035010 共同资助

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，建立了长距离污染物输送预报模式、沙尘预报模式和多尺度城市空气污染预报模式等。在较短的篇幅中全面介绍所取得的成果比较困难，由于以往的工作周明煜等^[2]和洪钟祥等^[3]已经分别作过很好的总结，因此本文扼要介绍近十多年来所取得的主要进展。

2 大气边界层综合探测系统研制和观测实验

通过自行研制和引进、开发，大气物理所建成了以北京 325 m 气象塔为中心的、含多种测量设备的大气边界层综合探测系统^[1, 3, 4]，包括：北京 325 m 气象塔全天候自动化观测系统，可组网的野外观测系统（移动式铁塔、系留气艇、系留软塔、GPS 探空），遥感探测系统（无线电测温声雷达、相控阵测风声雷达、测温测风廓线仪）和质量保证/质量控制系统等。同时，自行研制出新一代 UAT-1 型超声风速温度仪。整个系统采用了当今计算机网络通讯技术的最新成果，能确保获取实时、同步、多要素的观测数据，并可与各种形式的开放网络直接相连，实现数据共享。总体技术指标已达到国际上同类产品的先进水平。

上述先进的观测系统已在北京市及周边地区观测实验、青藏高原实验（TIBEX）、内蒙古草原实验（INGRASS）、淮河流域实验（HUBEX）、以及西太平洋和北极等观测实验中得到成功的应用。1998 年为酒泉卫星发射中心研制的塔高 80 m、分 7 个层次的近地层风测量系统，在我国第一艘载人航天试验飞船“神舟”号的成功发射过程中提供了实时、准确的边界层气象保障。

在完成科研项目和为解决国家实际问题服务的课题中，积累了大量宝贵的科学实验数据。特别是北京 325 m 气象塔从 20 世纪 70 年代末期以来已经连续进行了 20 多年的观测。对该塔测量的资料进行了整编、分析和质量控制，从中选择代表春、夏、秋、冬四季的资料编成《中国科学院北京气象塔观测资料集》，在国内外得到广泛应用，该资料集还被世界实验室收藏。从 2000 年开始，为适应城市边界层和城市环境研究的需要，在 325 m 气象塔 47 m、120 m 和 280 m 高度上还增加了三层超声风速仪日常观测，迄今为止获得了极具价值的湍流脉动连续观测资料。

同时，在大气物理所野外实验站（河北省香河县）也进行了多次边界层综合观测，其中包括与世界实验室和意大利合作开展的综合观测，获得的资料与北京 325 m 气象塔资料一起，构成了一套极其宝贵的城、乡边界层对比资料^[5, 6]。

大气物理所在上个世纪 60 年代以来就开展了与山区污染有关的大气边界层结构和湍流特性的观测研究，在 80 年代开展了京津渤地区大气环境质量评价观测研究^[2, 3]。90 年代在执行中国科学院“九五”重大项目“大气污染预测的理论和方法研究”中，利用北京 325 m 气象塔综合测量系统开展了城市边界层污染物垂直分布和气象要素的同步观测研究^[7~10]。此外，还利用该观测系统对沙尘暴、强降水过程和冷锋过程等天气过程极端事件的边界层过程进行了观测研究^[11, 12]。

在各种复杂下垫面条件下的边界层结构和湍流特征观测方面取得较大进展。其中 1998 年在青藏高原改则地区（海拔 4000 多米）进行了为期一个多月的边界层观测^[13~15]；在淮河实验中首次使用红外湿度脉动仪获得了近地层湍流湿度脉动资

料^[16~19]。而 2000 年开展的关于北冰洋及其邻近海域大气边界层结构特征的观测研究在我国还是首次^[20~23]。

3 大气边界层和大气湍流理论研究

利用北京 325 m 气象塔的长期观测资料,通过有效的观测资料质量控制^[25~27],研究了北京市城市化发展对边界层结构和湍流特征的影响,得到了下垫面粗糙度、边界层逆温、风极值、低空风切变以及湍流的统计特征。由于城市化的发展,气象塔周边不断有大型建筑物出现。从 1986 年到 1998 年的 12 年间,下垫面粗糙度从平均 0.63 m 增长到平均 3.86 m,特别是常通量厚度由平均 50~60 m 增长到 100 m 左右。最近的研究发现粗糙度又增长到最高可达 4.15 m (表 1)。证实了北京 325 m 气象塔的下垫面已从城、郊结合型完全转为粗糙的城市型。使得该塔成为当前国际上研究城市边界层和城市空气污染的一个难得的理想观测平台。刘辉志和洪钟祥^[10]利用 325 m 气象塔上 47 m、120 m 和 280 m 三个不同高度的超声观测资料,分析了湍流统计量随高度的分布规律,并发现当有冷空气经过时,边界层中感热通量会有明显增大。

表 1 北京 325 m 气象塔下垫面粗糙度的变化

作 者	Z_0 / m	$\bar{Z}_0$ / m	资料时段	仪 器	下垫面
本 文	2.14~10.89	4.15±0.52	2000 年 4 月	超声风速仪	城 市
	1.38~6.48	2.87±0.75		电接风杯	
殷达中和洪钟祥 ^[7]	3.1~4.5	3.86	1998 年 9 月	超声风速仪	城郊结合
张宏升等 ^[28]		1.0	1993 年 5 月	超声风速仪	郊 区
胡非 ^[24, 27]	0.55~0.68	0.63±0.21	1986 年 8~10 月	电接风杯	郊 区

城市下垫面由于有很高的楼房,存在一个称为城市冠层的层次,胡非等^[29]通过在北京市设计观测实验并进行分析表明:无论白天还是夜晚,城市冠层中垂直方向的湍流强度和湍流脉动风速标准差均小于水平方向的,水平方向的相应湍流特征量则总是接近相等;城市冠层中湍流脉动强度和标准差几乎均大于平坦下垫面边界层的;当平均风速大于等于 1 m s⁻¹时的湍流统计特征量与平均风速小于 1 m s⁻¹时的有所不同;城市冠层的阻力系数较大,可达 0.0625。

用地基遥感方法研究边界层垂直结构是国际上大气边界层研究的重要手段,大气物理所拥有三台现代化大气边界层遥感雷达,在利用这些雷达开展大量野外观测实验的基础上,发展了一套由遥感资料确定边界层湍流热通量垂直分布、地面热通量以及边界层高度的计算方法,所得结果与国际上著名的 AMTEX 资料对比有很好的 consistency。对流边界层中反梯度输送问题是一个理论界非常关心的重要问题,其机理至今尚不清楚,洪钟祥等^[30]通过遥感资料对这一问题进行了分析研究,定量给出了反梯度输送项的大小及其垂直分布(图 1)。这方面的工作对于深入了解大气湍流机理、改进湍参数化方案有重要意义^[6, 30]。

开展了灾害性天气条件或严重大气污染条件下的北京市边界层结构的研究。例如,刘小红等^[11]详细分析了 325 m 气象台塔自动观测系统记录的一次特大强风天气过程资料(1993 年 4 月 9 日),塔上观测到的风速极值达 33.8 m s⁻¹,大风持续时间长达 10

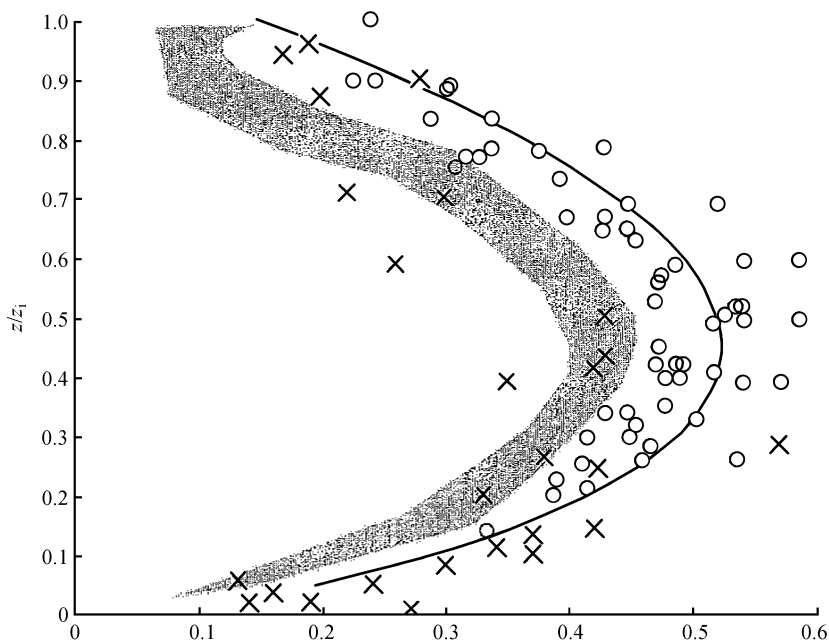


图 1 由雷达遥感资料确定的对流边界层垂直速度方差廓线（实线）与实测资料的比较（引自文献 [30]）
圆圈：香河实验；叉号：AMTEX 实验；阴影：LES 实验

余小时。资料分析揭示出冷锋过境时大气边界层出现的一些特殊的结构：有数个风速高值中心（图 2），低层出现强的风速垂直切变和阵风特性等。又如，1998 年 9 月下旬北京连续几天出现严重污染，殷达中等^[7]通过研究 325 m 气象塔资料发现这一期间的边界层具有小风、逆温、风向摆动大、低层中性或不稳定层结上还存在逆温等特征。

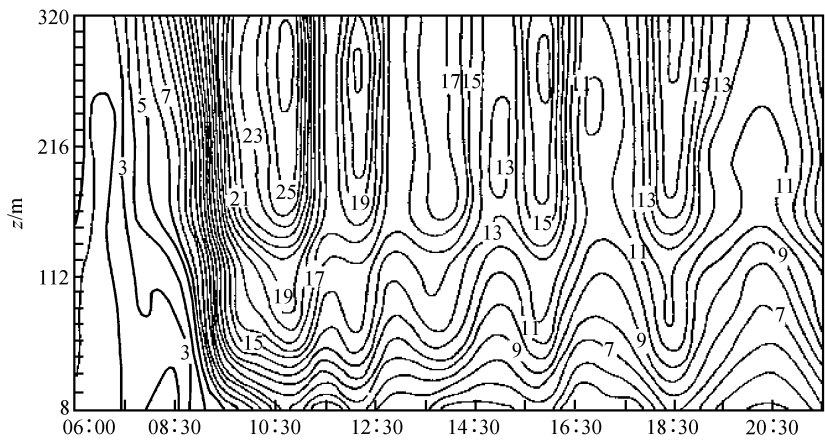


图 2 北京 325 m 气象塔测得的强风天气条件下边界层风速时空分布（引自文献 [11]）
等值线单位： m s^{-1} ；观测时间：1993 年 4 月 9 日

青藏高原对东亚乃至全球的大气环流及天气气候的形成和变化都有重要影响。高原对大气的各种热力和动力效应是通过边界层影响到自由大气的，对于高原大气边界层尤其是近地层微气象特征的观测分析研究显得十分重要。1998 年 6 月 6 日至 7 月 18

日,李家伦等^[13]分析了在海拔 4000 多米的西藏改则地区对大气边界层结构和湍流特征等进行了连续测量数据,发现该地区边界层具有自身的特征,主要是风速随高度多极值分布,而在白天混合层内,空气上下混合也较差,而且 400 m 以上风速反比低层小;白天温度递减率较大,平均可达 $1.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,夜间低层(100 m 以下)存在强逆温层;温度随高度减小,这与一般情况相近。

通过改则观测站对辐射的观测发现,太阳总辐射强烈,瞬时值可超过太阳常数 1370 W m^{-2} ,出现在晴天午后,最大观测值达 1600 W m^{-2} 。地面长波辐射也很强,平均值大于 600 W m^{-2} ,但净辐射却很小,干季感热通量占主导地位,最大值为 $150\sim 300\text{ W m}^{-2}$,出现在午后。潜热通量远小于感热通量,一般小于 50 W m^{-2} 。湿季潜热通量与感热通量相当,最大值在 $150\sim 200\text{ W m}^{-2}$ 之间。用涡旋相关法计算得到的阻力系数 $C_D\approx 2.32\times 10^{-3}$,热输送系数 $C_H\approx 3.01\times 10^{-3}$ 。由湍流观测还表明,高原地区湍流宏观统计量二阶矩和三阶矩在不稳定层结条件下与平原地区有相似关系,只是系数略有不同^[13~15]。

此外,还开展了西太平洋、南极、北极等各种不同下垫面条件下的边界层和湍流交换过程的研究,通过在北极进行边界层观测和数据分析,研究了北冰洋及其邻近海域不同下垫面的热量平衡,海—冰—气间动量、感热和潜热等湍流通量的特征,这些工作对深入研究极气候系统及其对全球气候系统的影响具有科学参考价值^[20~23, 31~39]。

为了解沙漠土壤和大气边界层水分和能量的交换与传输特征,牛国跃等^[40]建立了一个适合于我国干旱地区的、同时考虑土壤中液态和气态水运动的陆面过程模式,该模式可以清晰地再现土壤内的水、热运动,同时可以给出界面水、热通量。经黑河试验区沙漠站观测资料多次模拟验证,结果发现如果不考虑土壤内的气态水运动,地气界面的水汽通量和边界层内的湿度分布计算就会产生较大的误差。

地表的动量及热量决定了边界层湍流扩散的强度及稳定度,也同时控制着平均风、温、湿度的变化,热量及水汽通量还支配着边界层雾及云的形成。因此,一个适用的陆面过程模式对研究天气、气候变化是十分重要的。由于大多数地表是非均匀的,而常用的网格平均通量是基于局地均匀流动的相似性理论的整体输送公式求得的,只有经过改进才能得到符合实际的非均匀情况的结果。为此,牛国跃等^[40~44]利用一个裸土与 Pielke 中尺度边界层模式相耦合的模式,对大气环流模式中网格尺度的地表温度和粗糙度的非均匀分布情况下整体输送系数的平均方法进行了研究。首先,估算了将单点陆面模式应用到大气环流模式的非均匀网格时所产生的误差,在此基础上构造了一种有效阻抗的平均方法,从而有效地消除这种误差。当然,这种方法需要更高分辨率的下垫面分类资料和土壤湿度资料。

牛国跃等^[45]建立了一个适合于我国干旱地区的、同时考虑了土壤中液态和气态水运动的陆面过程模式,该模式可以清晰地再现土壤内的水、热运动,同时可以正确地给出界面水、热通量。该模式经黑河试验区沙漠站等观测资料多次模拟验证,结果发现如果不考虑土壤内的气态水运动,就会对界面的水汽通量的估计产生很大的误差。国际上其他近百个陆面过程模式中都没有考虑土壤中气态水的运动,因此不适用于干旱或半干旱地区。

根据上述内陆河水分循环模型,牛国跃等^[46]发展了一个可与区域大气模式系统

(RAMS) 相耦合的陆面水分平衡模式, 并用之对意大利北部发生的一次特大洪水过程及陆面水文系统对它的响应进行了数值模拟。

此外, 有关作者^[47~63]还开展了复杂地形边界层、过山气流、对流边界层等的数值模拟研究以及稳定边界层的水槽实验等大量的研究工作。

在大气湍流理论研究方面, 陈红岩等^[16]深入分析了如何处理观测资料时间序列的线性和非向性趋势项以提高湍流通量计算精度的问题。大气边界层物理和大气化学国家重点实验室发展了两种新的湍流分析方法, 一种方法是用来对大气湍流脉动信号去除噪音并进行多尺度分解, 该方法的核心内容是利用离散正交小波变换的“数学显微镜”功能^[64]和构造若干物理判据准则。另一种方法则用来提取湍流相干结构, 该方法的核心内容是构造出一类适用于湍流信号的伪连续小波变换。胡非^[65]和李昕等^[66]利用上述方法成功地区分出大气湍流中均匀各向同性小涡成分和大尺度含能涡旋成分, 区分大小涡旋提取湍流的相干结构和湍流自相似结构^[65, 66]: 成功地识别出了湍流湿度信号中的斜坡结构, 并定量给出斜坡结构对湍流通量的影响; 李昕等^[67]和陈炯等^[68, 69]还应用小波分析方法研究了城市冠层湍流的相干结构问题。

在大气湍流理论研究方面取得了重要进展。胡非^[27, 70]提出“最邻近最大作用假设”, 从理论上导出了间歇性湍流中速度场概率密度分布函数的渐进表达式; 将 Heisenberg 和周培源的一般湍流理论推广到大气湍流, 导出并求解均匀剪切和密度分层条件下大气边界层湍流的谱动力学方程。提出“自回避随机行走涡管模型”, 成功地解释了国际上关于湍流与非湍流交界面分形维数的实验测量结果, 并预言二维情形下分形维恒等于 2; 给出湍流速度场的分形几何性质与 Kolmogorov 能谱指数之间的定量关系, 并证明 Poincare 不等式对湍流运动的约束是产生间歇性的原因之一。刘罡等^[71]还构造了一个与实际观测资料符合很好的湍流风速分布的分形模型。研究湍流间歇性的存在, 说明能量的级串过程在充分发展的湍流的惯性副区也是不均匀的, 因而, 传统的 Richardson 级串图案不符合已有实验事实。最近, 赵松年^[72]提出一个不同于传统的 Richardson 级串模型, 它不仅显示了湍流的能量级串是分形的、间歇的和不均匀的; 而且, 由其级串图案还可以预测, 当尺度逐渐接近 Kolmogorov 耗散尺度时, 小涡将逐渐充满流体所在的物理空间, 与观测到的实际湍流图案相符。

混沌现象是上个世纪最重要的科学发现, 已经发现非线性复杂系统具有很多共性, 这对大气湍流机理研究有极大的借鉴和促进作用。大气物理所杨培才、赵松年等在国内较早开展了湍流的非线性混沌动力学特征研究^[27, 73~84], 给出了不同下垫面近地层湍流速度、温度、湿度和动能的相关维和 Lyapunov 指数, 发现大气湍流的相关维在 3.5~4.5 之间, 最大 Lyapunov 指数均大于零, 在 0.1~0.4 之间^[73, 80, 82, 83]。还探讨了湍流的非线性动力学特征量 (二阶 Renyi 熵) 与传统的宏观统计量 (Monin-Obukhov 长度 L) 之间的半经验关系^[75]。由于科尔莫戈罗夫给出的惯性区湍流能谱“ $-5/3$ 律”在近地层大气湍流中适用的频率范围比较窄, 通过引入连续时间混沌系统所具有的幂指数 + 指数函数形式的谱函数来拟合近地层湍流谱, 发现无论在稳定还是不稳定条件下都更加符合实验结果^[84]。

在湍流发生机理研究方面, 李存标等^[85~87]与俄罗斯科学院和北京大学湍流研究国家重点实验室合作, 在层流向湍流转捩的实验研究中发现了大尺度涡旋是由相干孤立

子 (CS-Solitons) 边界失稳产生的, 同时发现第一个小涡旋也是由 CS-Solitons 的界面高阶失稳产生的。这对理解转捩后期和充分发展的湍流结构提供了非常重要的帮助。

4 区域大气污染数值模式研究

东亚继欧洲和北美之后成为世界第三大酸雨区, 东亚地区酸性物质的远距离输送已成为我国环境外交的重要问题; 我国城市空气污染十分严重, 已威胁着人民的生命健康和国民经济的可持续发展。因此, 了解我国酸沉降量的时空分布和变化, 掌握我国与周边国家(地区)以及我国各大区、各省之间的污染物相互输送量, 研究空气污染形成机理, 进而科学、有效地预测和控制大气污染是十分重要和紧迫的研究课题^[88~92]。

大气物理所黄美元、安俊岭等建立和发展了两类硫氧化物在对流层中的排放、输送、转化和沉降等含有多种物理和化学过程的硫氧化物输送模式: 一类为研究型模式, 另一类为实用型模式。研究型模式由三部分组成, 核心是三维时变硫输送模式, 直接耦合 31 个物种、52 个反应的气相化学模式和包含 13 个化学反应的液相化学模式, 还考虑了气溶胶表面的非均相化学反应和积云的垂直输送作用以及边界层过程(图 3)。该模式适用于研究时间不太长的区域酸性物质的时空分布变化规律及输送过程^[93~98]。

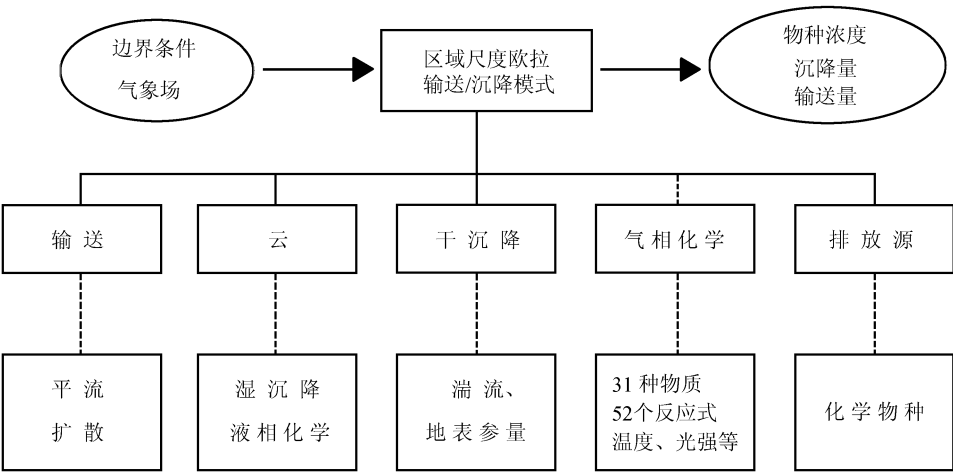


图 3 区域空气污染预报模式框架图

实用型模式对气相化学过程(31 个物种的 52 个反应)首次采用分裂查表算法进行处理^[99], 即针对某种污染物首先选择影响该种污染物转化速率的主要因子(如温度、湿度、光强等)并进行分档, 然后利用气相化学模式计算该污染物的转化速率并制成表存入计算机, 在运行长距离污染物输送模式时不再与气相化学模式进行直接耦合, 这样处理既节约了大量的 CPU 时间, 又考虑了非线性化学过程的影响, 使得更长时期(季节或年)内硫氧化物长距离输送的计算成为可能。表 2 给出了一次个例预报试验结果。

表 2 区域污染模式模拟与观测的周平均空气质量比较（1998 年 10 月 23~29 日）

城市	观测值	模拟值	主要污染物	空气质量	城市	观测值	模拟值	主要污染物	空气质量
北京	215	213	氮氧化物	四级	武汉	98	80	氮氧化物	二级
上海	85	71	氮氧化物	二级	长沙	103	75	二氧化硫	三（二）级
合肥	62	44	氮氧化物	二级	贵阳	141	129	二氧化硫	三级
青岛	77	62	二氧化硫	二级	重庆	202	181	二氧化硫	四（三）级

黄美元等^[100]和王自发等^[101~103]利用实用型模式研究了我国和东亚地区硫氧化物浓度和沉降量以及东亚各国或地区之间的硫氧化物的相互输送量。与国外同类模式相比，该模式更具有科学性、实用性以及适合处理东亚地形等优点。主要结果是：西南地区酸雨形成以局地源为主，属硫酸型；对于大气污染严重的城市（如重庆市），云下的酸化作用不可忽视；东部地区酸雨形成过程中，云内反应和远距离输送起重要作用；在我国及东亚各国或地区硫的总沉降大部分均来自本地源，目前中国硫氧化物排放对日本、韩国等周边国家或地区不构成威胁。这些工作不仅为我国酸雨的控制决策提供了科学参考依据，同时也为解决污染物跨国界输送的国际纠纷提供了科学依据。

在理论研究的基础上，建立了可供预报试验的我国区域大气污染预报模式系统。利用该系统对东亚黄沙的长距离输送、台湾北部地区污染物（NO_x、O₃、SO₄）的分布和演变进行了模拟和研究。利用该区域模式成功进行了多次东亚区域污染预报试验，预报时效为 24~48 小时，输出 6 小时一次的 SO₂、NO_x和 O₃，与实测资料比较好的一致性。

近期，王自发等^[104~106]又对三维区域模式作了进一步改进，并实现了气象、物理、化学和气溶胶过程的同步计算。从而建立了新的区域大气质量模式系统。该模式已被用于 2001 年两大国际合作观测计划 Trace-P 和 ACE-Asia 中进行污染要素的实时预报。该模式还与加拿大气溶胶模式（CAM）耦合，详细考虑了各类气溶胶的粒子谱以及复杂的微物理过程。到目前为止，国际上可以同时计算如此复杂物理化学、气溶胶过程的区域尺度的模式系统仅此一个。他们还实现了嵌套网格空气品质预报模式系统的并行化和业务化，利用此系统，通过数值模式量化了沙尘输送对于东亚区域酸雨分布的影响，结果表明沙尘及其土壤粒子的碱化作用可使得中国北方、韩国和日本降水的 pH 值增加，有关结果发表后，在国际上引起很大反响。

5 城市大气污染数值模式研究

近十多年来，城市大气污染预报是国际上一直未解决的、非常活跃的前沿科学问题。随着工业化和城市化的进程，以 SO₂、NO_x和 O₃和颗粒物为主要污染物的城市空气污染已危及人民的身体健康并制约经济社会可持续发展。为了满足我国开展城市空气污染预报理论和方法的研究的迫切需要。近年来，大气物理所雷孝恩、张美根、韩志伟等相继完成了以下研究工作^[88~92,107~124]。

研制和改进了中尺度（20~200 km）动力学模式，完成了由流体静力过程向非静力过程的转变，提高了模式在水平和垂直方向的分辨率和计算的稳定性。该模式可以成功地模拟复杂下垫面非均匀性对边界层结构的影响以及复杂地形条件下局地环流的

基本特征，如广东大亚湾核电站厂地区的地形性中尺度环流和海陆风、重庆地区的山谷风与河陆风等。同时，还分别研制了在垂直方向具有高分辨能力的三维大气边界层模式、高分辨的对流层化学模式和大气环境质量模式。这些模式不仅在理论上具有较高的学术水平，而且具有很好的实用价值，可直接服务于国家建设和环境保护。上述模式系统已被广东省事故应急系统研制和重庆市大气污染规划和控研究等研究项目所采用^[88,112]。

在上述工作基础上，建立了我国第一个城市空气污染预报模式系统，该模式系统由气象模式和物质模式组成，结构设计合理（图 4），运行稳定，在湍流扩散参数化和对流层化学过程处理等方面有创新性，能预报多种污染物质的浓度分布。该模式实用性强，可直接用于日常城市空气污染业务的预报，在国际上也属少有。利用该模式系统在我国天津、广州、沈阳、济南等城市进行了预报试验，效果很好，二氧化硫、氮氧化物、总悬浮颗粒物和臭氧等的预报浓度指标均达到或超过国家规定的要求，取得了良好的社会效果，受到国家和地方环保部门的高度评价。1998 年，由中国环境监测总站直接组织，利用上述模式系统，张美根、韩志伟和雷孝恩在天津市进行了我国第一次空气污染数值预报试验^[111,113]。2000 年，该模式系统被国家环保局和中国气象局联合向全国 47 个重点城市推广应用。

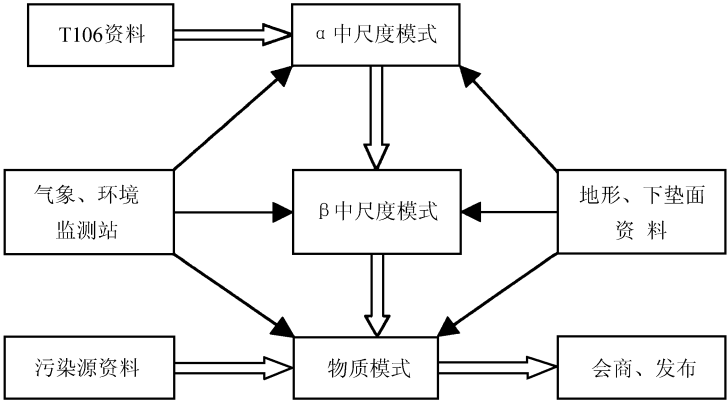


图 4 城市空气污染预报模式框图

为了检验模式系统的合理性，将预报的逐时污染物 SO₂、NO₂、PM₁₀、O₃ 的浓度分别与区域尺度和城市尺度同步的实测资料（6023 天次）^[120] 作对比分析（表 3、4）。从表 3 看出，对不同物质，预报效果最好是 O₃，较差是 PM₁₀；对不同区域，预报效果最好是重

表 3 预报与实测浓度比值总体平均

物质	四川盆地	重庆市	天津市	广州市	济南市	总体
SO ₂	1.02±0.32	1.09±0.28	0.96±0.35	1.04±0.38	1.22±0.53	1.07±0.37
NO ₂	0.83±0.40	1.02±0.26	1.12±0.28	0.77±0.32	0.88±0.40	0.92±0.33
PM ₁₀	/	/	0.97±0.36	0.99±0.26	1.10±0.59	1.02±0.40
O ₃	/	0.96±0.26	/	1.00±0.39	1.10±0.42	1.02±0.36
总体	0.93±0.36	1.02±0.27	1.02±0.33	0.95±0.34	1.08±0.49	1.01±0.37

庆市，较差是济南市；如果取一个标准差值估算，浓度比值在 1.38~0.64 之间。

为了确定模式系统的预报准确率，利用平均浓度与大气污染指数 API 级别的对应关系，对预报与观测的城市平均浓度（有效资料一共 2466 天次）所对应的 API 类别作了对比分析（表 4）。

可见，对不同物质，预报的 API 准确率最高的是 O₃，最低的是 PM₁₀；

对不同城市，预报准确率最高的是济南市，最低的是天津市；总体讲模式系统预报准确率大于 80%，较好地满足开展城市空气污染业务预报的要求。图 5 给出 2001 年 2 月 23 日 17:00 济南市的一次预报个例，从图中可以清楚地看到济南市的城市热岛环流和热岛控制下围绕市中心的多个高污染浓度区，其中 250 μg m⁻³等值线所包围的中心有 7 个，它们都处于市中心区和高大工业源影响的下风方区域，最大一片的范围已经超过 350 km²。

近年来，在过去多年来的理论和应用研究的基础上，充分吸收美国环境保护局空气质量模式系统 MODELS-3 中的优点，建立了一个全新的城市空气质量模式系统。与原来的模式系统相比，新的模式系统具有以下三个重要特点：（1）利用套网格技术将城市群与单个城市（如以北京、天津与石家庄为主的城市群与北京市）大气环境问题结合起来加以研究，充分考虑了单个城市排放与外来污染物对该城市空气质量的影响，并且实现了天气预报模式与污染物预报模式坐标系的一致，大大减少了因模式间数据传输而引起的误差；（2）更新了气象预报模式，在边界层结构的预报方面作了很大的改进（如增加了植物冠层、地面雪盖等对边界层结构的影响）；（3）更新了污染物预报模式，增加了污染物的物种和完善了对污染物物理化学过程的处理，如增加了次生气溶胶（硫酸盐、硝酸盐、铵和有机碳）和工业排放的烟尘等，并考虑了气溶胶的生长、聚变和碰变及其液相与非均相过程，提高了对臭氧、氮氧化物等污染物的预报能力和预报精度。

大气物理所还开展了大气污染物的非线性动力学特征和神经网络预报研究^[124, 125]，特别是开展了大气污染的优化控制理论研究^[126, 127]。具体包括：（1）污染源的优化削减：为了克服总量控制线性规划方法难以处理复杂目标函数，约束条件和非线性化学过程的不足，建立了完整的优化控制数学模型，并给出了具体的求解方案；（2）空气质量的实时控制：针对不利天气条件下污染源的短期动态控制，建立了一个最优控制理论的严谨的数学理论框架，推导了求解这一问题的数学方法和相应的计算公式¹⁾；（3）工业布局重大调整和新建工业布局。从我国科学家曾庆存院士提出的“自然控制论”思想^[127]出发，并以伴随模式算法为基础，给出了求解工业污染源优化布局问题高效、通用的方法²⁾，数值试验的结果证明了理论推导的正确性和计算效率很高，并有着广阔的实际应用前景。

表 4 预报与观测 API 级别一致的概率 %

物质	重庆市	天津市	广州市	济南市	总体
SO ₂	80.0	80.6	80.1	75.6	79.1
NO ₂	83.3	80.6	83.3	96.4	85.9
PM ₁₀	/	80.2	80.3	68.1	76.2
O ₃	83.3	/	85.5	91.3	86.7
总体	82.2	80.5	82.3	82.9	82.0

1) 朱江、曾庆存，控制大气污染的一个数学理论框架，中国科学（D辑），2003，待发表。
2) 刘峰、胡非、朱江，用伴随方法求解多个工业污染源优化布局问题，中国科学（D辑），2003，待发表。

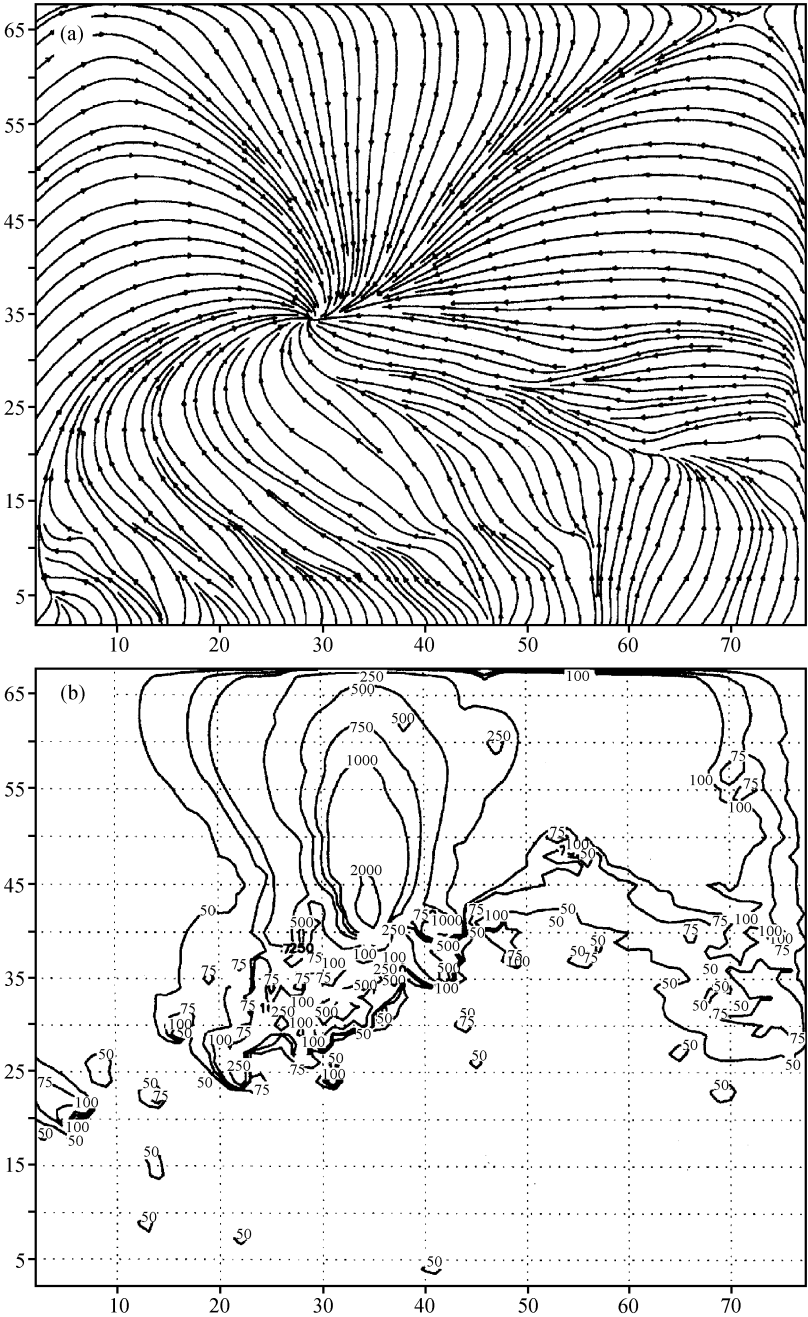


图 5 (a) 预报济南市 25 m 高度上的热岛环流型 (2001-02-23, 17:00);
(b) 预报对应于 a 图的 SO₂ 浓度分布 (单位: $\mu\text{g m}^{-3}$)

6 大气边界层物理研究展望

大气边界层物理的研究，作为大气科学的一个重要分支，已有几十年的历史。已

经取得的进展表明，它既是一个逐渐成熟的学科，又是一个研究内容与领域不断扩展的学科。有着长期广泛的应用前景。根据国家急需和大气科学自身发展规律，我们认为今后十年大气边界层物理最重要的研究内容除了大气湍流机理等需要长期坚持研究的基础问题外，主要应开展：

(1) 非均匀复杂下垫面区域边界层研究

由于地表状态的不同，发生在边界层内的地气之间热量、水汽和动量的交换过程也不同，由此影响到自由大气，产生了各种不同的天气气候变化。区域边界层中水热通量的正确估计已成为当前气候变化研究中的一个关键科学难题。开展典型非均一下垫面区域边界层观测试验，建立更加完善的正确描述面积平均通量的区域边界层数学模式是十分必要的。

(2) 城市边界层研究

空气污染预报已在我国各大城市普遍开展，但是尚处初级阶段，数值预报的科学基础亟待充实。在一个短时期内，污染源排放是相对稳定的，因此城市大气边界层结构及其时空变化，就是直接影响污染物浓度分布的主要原因。至今，我们还没有一个由精密科学思想指导而设计的城市大气边界层综合试验，以首都北京为例，由于城市化发展很快，20 世纪 80 年代进行的一些观测结果已与当前的实际情况相去甚远。90 年代末以来有些单位为了完成某些科学任务，也曾克服种种困难，作过一些零星的外场观测试验，但终因缺乏资金和有效的组织，规模小，手段少，对现今北京市城市边界层的总体面貌缺乏了解，相应的理论和模式研究也没有大的进展。为此，可选择一典型城市（如北京），组织一次具有一定规模的、有明确科学目的的城市边界层三维结构的大型观测试验。

(3) 局地边界层气象预报研究

由于边界层特别是近地层对航空、建设、能源建设、农业生产和军事活动等等关系十分密切，因此经常需要对某一特定地区（几公里到几十公里范围）的大气边界层气象要素（风、温、湿）的空间分布和时间演变进行短时预报。这也是边界层气象应用的一个重要方面，应予以必要的重视。

其他重要的课题还有：大气湍流的非线性动力学研究，与天气过程特别是天气极端事件过程（如强沙尘暴、强降水和强冷空气等）有关的边界层结构和湍流特性的研究，生态环境恶化区域（城市群、沿海开放地区和西部生态环境脆弱地区等）的中尺度过程的大气边界层结构和湍流特性的研究，典型气候特征区域（高山、海洋和南北极以及干旱和半干旱地区等）的大气边界层结构和湍流特性的综合研究，与建立气候（变化和预测）模式有关的大气边界层结构、陆面和海洋过程参数化方案的改进研究，森林和农田等生态系统边界层研究，以及大气边界层的卫星遥感研究等等。

致谢：感谢对本文工作提供帮助的大气物理所同事和参考文献中所引述的论文的其他作者！

参 考 文 献

- 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.
- 2 周明煜、张锡福、李兴生，大气边界层物理的研究进展，大气科学，1979，**3**（3），210～218.

- 3 洪钟祥、张锡福、雷孝恩等, 大气边界层物理的研究的新进展, 大气科学, 1988, 特刊, 217~235.
- 4 赵松年、洪钟祥、胡非, 大气边界层湍流的综合观测实验及其动力学特征的研究, 自然科学进展, 1992, **2**, 104~111.
- 5 钱敏伟, 李军, 夜间近地面稳定边界层湍流间歇与增温, 大气科学, 1996, **20** (2), 250~254.
- 6 Qian Minwei, A. Longhetto, C. Cassardo et al., Heat energy balance in the convective atmospheric boundary layer at Xianghe (Beijing area), China, *J. Atmos. Sci.*, 2000, **57**(23), 3881~3890.
- 7 殷达中、洪钟祥, 北京地区严重污染状况下大气边界层结构与参数研究, 气候与环境研究, 1999, **4** (3) 303~307.
- 8 刘小红、洪钟祥、李家伦等, 北京地区严重大气污染的气象和化学因子, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 231~236
- 9 陈辉、胡非、任丽红等, 北京冬季二氧化硫污染和气象条件的关系、气候与环境研究, 2000, **5** (3), 287~295.
- 10 刘辉志、洪钟祥, 北京城市下垫面边界层湍流统计特征, 大气科学, 2002, **26** (2), 241~248.
- 11 刘小红、洪钟祥, 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究, 大气科学, 1996, **20** (2) 223~228.
- 12 刘毅、周明煜, 北京沙尘质量浓度与气象条件关系研究及其应用, 气候与环境研究 1998, **3** (2), 142~146.
- 13 李家伦、洪钟祥、罗卫东等, 青藏高原改则地区近地层通量观测研究, 大气科学, 1999, **23** (2), 142~151.
- 14 李家伦、洪钟祥, 孙淑芬, 青藏高原改则地区大气边界层特征, 大气科学, 2000, **24** (3), 301~312.
- 15 刘辉志、洪钟祥, 青藏高原改则地区近地层湍流特征, 大气科学, 2000, **24** (3) 290~300.
- 16 陈红岩、胡非、曾庆存, 处理时间序列提高计算湍流通量的精度, 气候与环境研究, 2000, **5** (5), 304~311.
- 17 陈红岩、陈家宜、胡非等, HUBEX 试验区近地面层的湍流输送, 气候与环境研究, 2001, **6** (2), 221~227.
- 18 Xu Min, Jiang Weimei, Hufei, et al., Study on the characteristics of turbulent moisture—based on the data obtained from Huaihe river basin experiment, *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, **45**(1), 11~19
- 19 Xu Min, Jiang Weimei, Hu Fei, et. al., The characteristics of turbulent moisture on Huaihe river basin in China, *Meteor. Atmos Phys.*, 2002, **81**, 53~65.
- 20 Qu Shaohou, Gao Dengyi, and Zhou Han, Atmospheric boundary layer structure and turbulent flux transfer over Zhongshan station area Antarctica, *Chinese J. Polar Sciences*, 1997, **8** (2), 79~88.
- 21 曲绍厚、胡非、李亚秋等, 北冰洋及其邻近海域极昼期间大气边界层结构特征试验研究, 地球物理学报, 2001, **45** (1), 8~16.
- 22 Qu Shaohou, Hu Fei, and Li Yaqiu, Turbulent flux exchange characteristics of air—ice—sea above the Arctic Ocean during the polar day period, *Progress of Natural Science*, 2001, **11**(8), 594~601.
- 23 Hu Fei, Qu Shaohou, Li Yaqiu et al., Experiment research on the characteristics of ABL structure over the Arctic Ocean and adjacent sea area during period, *Chinese J. Geophys.*, 2002, **45**(1), 1~10.
- 24 Hu Fei, Results of some preliminary data analysis of Beijing 325m meteorological tower, in: Second Year Progress Report of The World Laboratory, (Eds. A. Longhetto and Q. C. Zeng), World Laboratory, Geneva, Switzerland, 1990, 206~225.
- 25 陈明、洪钟祥, 大气边界层观测资料的质量控制方案及其应用, 大气科学, 1993, **17** (1), 97~105.
- 26 苏红兵、洪钟祥, 北京城郊近地层湍流实验观测, 大气科学, 1994, **18** (6), 739~750.
- 27 胡非, 湍流、间歇性与大气边界层, 北京: 科学出版社, 1995, 288pp.
- 28 Zhang Hongsheng, Chen Jiayi, and Soon—Ung Park, Turbulence structure in unstable conditions over various surface, *Bound. -Layer Meteor.*, 2001, **100**, 243~261
- 29 胡非、李昕、陈红岩等, 城市冠层中湍流运动的统计特征, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 252~258.
- 30 洪钟祥、钱敏伟、胡非, 由地基遥感资料确定大气边界层特征, 大气科学, 1998, **22** (4), 613~624.
- 31 曲绍厚等, 西太平洋热带海域厄尔尼诺和非厄尔尼诺年期间湍流通量输送的不同特征, 大气科学, 1993, **17** (4), 415~423.
- 32 曲绍厚、高登义, 中山站地区大气边界层结构和湍流通量的输送特征, 极地科学, 1996, **8** (4), 1~10.

- 33 曲绍厚、王赛, 西太平洋热带海域西风爆发过程湍流通量输送的某些特征, 大气科学 1996, **20** (2), 188~194.
- 34 高登义、周立波, 西太平洋暖池在不同天气系统下的海气交换差异, 大气科学, 1997, **21** (3), 257~265.
- 35 曲绍厚, 西太平洋热带海域动量、感热和潜热等湍流通量的观测研究, 气象学报, 1998, **46** (4), 452~460.
- 36 Gao Dengyi, Gao Yongqi, Xiong Kang et al., Arctic air/ice exchange and physical characteristics of ice floe in summer, *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(4), 326~329.
- 37 曲绍厚、胡非、李亚秋, 1998 年 SCSMEX 期间南海夏季风海气交换的主要特征, 气候与环境研究, 2000, **5**, 434~446.
- 38 Liu Yu, Zhou Libo and Zou Han, a temperature inversion in "Chinese Arctic Research Expedition 1999", *Chinese J. Polar Sci.*, 2002, **13**(1), 83~88.
- 39 Hu Fei, Yang Jing, LI Yaqiu et al., Some characteristics of AIR—SEA exchange for the SCS summer monsoon during the SCSMEX in 1998, *Acta Meteor. Sinica*, 2003, **17**, 155~170.
- 40 牛国跃、孙淑芬、洪钟祥, 沙漠绿洲非均匀分布引起的中尺度通量的数值模拟, 大气科学, 1997, **21** (4), 385~395.
- 41 牛国跃、孙淑芬、洪钟祥, 沙漠土壤大气边界层中水热交换和传输的数值模拟研究, 气象学报, 1997, **55** (4) 398~407.
- 42 牛国跃、洪钟祥、孙淑芬, 陆面过程研究的现状与发展趋势, 地球科学进展, 1997, **12** (1), 20~25.
- 43 牛国跃、洪钟祥、孙淑芬, 地表湿度及粗糙度非均匀分布情况下整体输送方法的初步研究, 大气科学, 1997, **21** (6), 717~724.
- 44 牛国跃、洪钟祥、孙淑芬等, 陆面面积平均通量的参数化问题, 气候与环境研究, 1997, **2** (3), 210~221.
- 45 Niu Guoyue, Sun Shufen, and Hong Zhongxiang, Water and Heat Transport in the Desert Soil and Atmospheric Boundary Layer in Western China, *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, **85**, 179~195.
- 46 Niu Guoyue, C. Carssardo, Hong Zhongxiang et al, Numerical simulation on the response of land surface to severe weather, *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, **12**(4), 410~424.
- 47 胡非, 地形对边界层影响的有限元数值模式, 气象学报, 1990, **48** (2), 129~138.
- 48 胡非, 大气边界层的一些空气动力学特征, 力学进展, 1990, **20** (3), 328~340.
- 49 刘小红、洪钟祥, 非均匀网格的过渡湍流理论及其在大气边界层数值模拟中的应用, 大气科学, 1995, **19**(3), 347~358.
- 50 Chen Ming, Hong Zhongxiang, A. Longhetto et al., Sensitivity study of nonlocal turbulence closure scheme in local circulation, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**(2), 147~158.
- 51 高会旺、黄美元、姚小红, 一个中尺度模式中高分辨率边界层的参数化, 气候与环境研究, 1997, **2**(4), 369~376.
- 52 Ye Zhuojia, Li Jun and Fan Sihong, Turbulent fluxes over inhomogeneous landscape, *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**(3), 399~408.
- 53 唐有华、苗曼倩, 湍流动能闭合方法在中尺度模式中的应用, 大气科学, 1998, **22** (2), 236~242.
- 54 Tang Youhua, and Miao Manqian, A numerical case study on the impact of surface characteristics variations associated with urbanization on local climate, *Contributions to Atmospheric Physics*, 1998, **71**(3), 347~357.
- 55 张美根、韩志伟, 复杂地形对对流混合层的影响, 气候与环境研究, 1998, **3** (2), 117~123.
- 56 刘辉志, 洪钟祥、桑建国, 地层大气边界层中的地形阻力, 大气科学, 1998, **22** (6), 881~895.
- 57 王雪梅、雷孝恩、洪钟祥, 对流边界层大涡模拟, 中山大学学报, 1998, **37**, 118~121.
- 58 韩志伟、张美根、雷孝恩, 复杂地形局地环流的数值模拟研究, 气候与环境研究, 1999, **4** (2), 210~223a
- 59 林文实、牛国跃、王雪梅等, 山谷环流的二维数值模拟, 中山大学学报 (自然科学版), 1999, **38** (3), 90~93.
- 60 刘辉志、洪钟祥、桑建国, 大气中粘性效应对三维地形波及其波动阻力的影响, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 315~322.
- 61 张美根、韩志伟、雷孝恩, 地形性中尺度环流的数值模拟及验证, 大气科学, 2000, **4** (1), 122~130.
- 62 Qian Minwei, and C. Giraud, A preliminary numerical simulation of bord wind with a limited model of atmos-

- pheric circulation, *IL Nuovo Cimento*, 2000, **23**(5), 515~523.
- 63 刘辉志、洪钟祥、桑建国, 对流边界层中过山气流的数值模拟, 气候与环境研究, 2001, **6** (3), 305~311.
- 64 赵松年、熊小芸, 小波变换与小波分析, 北京: 电子工业出版社, 1996, 150pp.
- 65 胡非, 大气边界层湍流涡旋结构的小波分解, 气候与环境研究, 1998, **3** (2), 97~105.
- 66 Li Xin, Hu Fei, Liu Gang et al., Multi-scal fractal characteristics of atmospheric boundary-layer turbulence, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**, 787~792.
- 67 Li Xin, Hu Fei, Pu Yifen et al., Identification of coherent structures of turbulence at the atmospheric surface layer, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19**(4), 87~698.
- 68 陈炯, 郑永光, 胡非, 用连续子波变换提取城市冠层大气湍流的相干结构, 大气科学, 2003, **27** (2), 182~190.
- 69 Chen Jiong, and Hu Fei, Coherent Structures Detected in Atmospheric Boundary-layer Turbulence using Wavelet transforms at Huaihe River Basin, China, *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, **107**(2), 429~444.
- 70 胡非, 间歇性湍流速度场的概率分布, 基础科学研究新进展, 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 256~259.
- 71 刘罡、李昕、胡非, 大气边界层风速脉动的分形模拟, 气候与环境研究, 1998, **3** (3), 260~265.
- 72 Zhao Songnian, Synchro-cascade pattern in the atmospheric turbulence, *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D8), ACL4-1~ACL4-8.
- 73 杨培才、刘锦丽、杨硕文, 低层大气运动的混沌吸引子, 大气科学, 1990, **14** (3), 335~341.
- 74 赵松年, 非线性科学: 它的内容、方法和意义, 北京: 科学出版社, 1994, 95pp.
- 75 杨硕文、麻益民、杨培才, 大气湍流的非线性动力学参量与其经典统计量之间的关系, 大气科学, 1994, **18** (1), 30~36.
- 76 赵松年, 大气非线性与湍流过程中动力学复杂性的研究与进展, 力学进展, 1995, **25** (3), 1~33.
- 77 赵松年, 关于湍流运动的几点记注, 航空动力学报, 1995, **10** (2), 193~196.
- 78 Qian Minwei, and Liu Shida, Scale Exponents of Atmospheric Turbulence under Different Stratifications, *Fractal*, 1996, **4**, 45~48.
- 79 赵松年、熊小芸、朱江, 大尺度螺旋孤子实验, 物理学报, 1996, **45** (11), 1817~1822.
- 80 李昕, 混沌理论与大气边界层湍流研究, 地球科学进展, 2000, **15** (2), 178~183.
- 81 Liu Gang, Li Xin, and Hu Fei, The method of controlling chaos with self-coupled variables and without feedback, *Progress in Natural Science*, 2000, **10** (7), 509~514.
- 82 Li Xin, Hu Fei, and Liu Gang, Chaotic characteristics of atmospheric boundary layer turbulence, *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **99**, 335~345.
- 83 李昕、胡非、刘罡, 大气湍流的混沌吸引子特征, 气候与环境研究, 2001, **6** (1), 58~66.
- 84 卞建春、乔劲松、吕达仁, 大气近地层湍流能谱特征的再分析, 大气科学, 2002, **26** (4), 474~480.
- 85 李存标, 转捩和湍流研究的最新进展, 流体力学实验与测量, 1998, **12** (1), 8~28.
- 86 Lee Cun Biao, New features of CS solitons and the formation of vortices, *Physics Letters A*, 1998, **247**, 397~402.
- 87 李存标、洪钟祥等, 边界层控制转捩研究的新结果——流场测量和流场显示, 大气科学, 1999, **23** (2), 227~232.
- 88 雷孝恩、张美根、韩志伟, 大气污染数值预报基础和模式, 北京: 气象出版社, 1998, 321pp.
- 89 Lei Xiaoen, Han Zhiwei, and Zhang Meigen, *Physical, Chemical, Biological Processes and Mathematical Model on Air Pollution*, China Meteorological Press, 1998, 355pp.
- 90 洪钟祥、胡非, 大气污染预测的理论和研究方法研究进展, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 225~230.
- 91 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 空气污染数值预报模式系统, 北京: 气象出版社, 1999, 69pp.
- 92 胡非、郭亚羲, 大气污染预报研究取得新进展, 中国科学院院刊, 2000, **15** (2), 122~125.
- 93 高会旺、黄美元、徐华英等, 欧拉型区域疏沉降模式研究, 大气科学, 1997, **21** (5), 615~626.
- 94 黄美元、王自发, 东亚地区黄沙长距离输送模式设计, 大气科学, 1998, **22** (4), 625~637.
- 95 安俊岭、王自发、黄美元等, 区域空气质量数值预报模型, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 244~250.
- 96 安俊岭、王自发、高会旺等, 区域性光化学模式与 LLA-C 机制的模拟性能比较, 大气科学, 1999, **23** (4),

- 422~426.
- 97 An Junling, Huang Meiyuan, Wang Zifa et al. , Numerical regional air quality forecast tests over the mainland of China, *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **130**, 1781~1786.
- 98 An Junling, H. Ueda, Wang Zifa et al. , Simulations of monthly mean nitrate concentrations in precipitation over East Asia, *Atmospheric Environment*, 2002, **36**, 4159~4171.
- 99 张新玲、安俊岭、程新金等, 查表法处理 SO_x 气相化学过程的性能检验, 环境科学学报, 2001, **21** (5), 513~518.
- 100 Huang Meiyuan, Wang Zifa et al. , Modeling studies on sulfur deposition and transport among different areas in China in summer and winter, *Chinese Science Bulletin*, 1996, **41**(11), 1013~1016.
- 101 王自发、黄美元、何东阳等, 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式, 大气科学, 1997, **21** (3), 366~378.
- 102 王自发、安俊岭、高会旺等, 未来东亚地区硫化物沉降及输送的预测, 气候与环境研究, 1998, **3** (2), 134~141.
- 103 王自发、黄美元、高会旺等, 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 II. 硫化物浓度空间分布特征及季节变化, 大气科学, 1998, **22** (5), 693~700.
- 104 Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang et al. , Sulfur distribution and transport studies in East Asia using Eulerian Model, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, **13**(3), 399~409.
- 105 Wang Zifa, W. Sha and H. Ueda, Numerical modeling of pollutant transport and chemistry during a high-ozone event in Northern Taiwan, *Tellus*, 2000, **52B**(5), 1189~1205.
- 106 Wang Zifa, T. Maeda, M. Hayashi et al. , A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales: application for high-ozone episode in Taiwan, *Water, Air and Soil Pollution*, 2001, **130**, 391~396.
- 107 雷孝恩、田瑞明、韩志伟等, 植物冠层动量交换特征的实验研究, 大气科学, 1995, **19** (6), 747~754
- 108 Lei Xiao'en, A new dry deposition velocity pattern and its practical application in high resolution regional acid deposition model, *Acta Meteor. Sin.*, 1996, **10**, 118~128.
- 109 葛孝贞、J. S. Chang、雷孝恩, 高分辨区域输送模式中不同输送格式的对比试验, 大气科学, 1996, **20** (1), 37~46.
- 110 Ge Xiaozhen and Lei Xiao'en, Application and numerical experiments of the highly-accurate advection scheme in regional transfer model, *Meteor. Atmos. Phys.*, 1998, **66**, 131~142.
- 111 张美根、韩志伟、雷孝恩, 天津市空气污染数值预报试验中的模式系统, 气候与环境研究 1999, **4** (3), 237~243.
- 112 张美根、韩志伟、雷孝恩, Monte Carlo 多源模式在广东核电站大气环境评价中的应用, 气候与环境研究, 1999, **4** (2), 203~209.
- 113 韩志伟、张美根、雷孝恩等, 城市空气污染数值预报试验, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 283~289.
- 114 高守亭、雷霆, 污染物大尺度垂直输送的理论研究, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 267~274.
- 115 Rudklo, M. , Lei Xiao'en, and P. Wongwises, A new Lagrangian-Eulerian coupling model system, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (4), 587~600.
- 116 Han Zhiwei, Hu Fei, Zhang Meigen, et al. , Model study of the effect of soil NO emission surface ozone, *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16** (4), 470~480.
- 117 韩志伟、张美根、胡非, 生态 NMHC 对臭氧和 PAN 影响的数值模拟研究, 环境科学学报, 2002, **22** (3), 273~278.
- 118 Zhang Meigen, and I. Uno, Role of Anthropogenic Volatile Organic Compounds and Nitrogen Oxides as Ozone Precursors in the Wintertime over East Asia, *Journal of Ocean University of Qingdao* (English Edition), 2002, **1**(1), 45~49.
- 119 Zhang Meigen, I. Uno, and S. Sugata et al. , Numerical study of boundary layer ozone transport and photochemical production in east Asian in the wintertime, *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(11), 401~404.
- 120 雷源、王颖、雷孝恩, 我国城市 O_3 污染的数值预报试验研究, 环境科学研究, 2002, **15** (6), 33~38.

121 韩志伟、王雪梅、朱江, 污染物分布特征及其演变过程的分析和数值模拟, 过程工程学报, 2002, **2** (增刊), 255~258.

122 韩志伟、杜世勇、雷孝恩等, 城市空气污染数值预报模式系统及其应用, 中国环境科学, 2002, **22** (3), 202~206.

123 Han Zhiwei, Hu Fei, Zhang Meigen et al. , Model study of the effecat of soil NO emission surface ozone, *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **16**(4), 470~480.

124 刘罡、李昕、胡非, 大气污染物浓度时间序列的神经网络预报, 中国环境科学, 2000, **20** (5), 429 ~ 431.

125 刘罡、李昕、胡非等, 大气污染物浓度变化的非线性特征分析, 气候与环境研究, 2001, **6** (3), 328~336.

126 陈红岩、胡非、曾庆存等, 大气环境污染优化控制的实际问题, 气候与环境研究, 1998, **3** (2), 163~172.

127 曾庆存, 自然控制论, 气候与环境研究, 1996, **1** (1), 11~20.

Recent Progress of Atmospheric Boundary Layer Physics and
Atmospheric Environment Research in IAP

Hu Fei, Hong Zhongxiang, and Lei Xiaoen

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

Abstract This paper provides a comprehensive, critical review of the most important research progress of atmospheric boundary layer structure, atmospheric turbulence, regional and local air pollution modeling in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences during the past ten years. Experimental, theoretical and numerical study of convective and stable boundary under complex surface condition, dynamical study of chaotic characteristics of coherent and intermittent turbulence, and numerical study of long range (east Asia) and short range (urban) air pollution prediction models are emphasized in detail.

Key words: atmospheric boundary layer; atmospheric turbulence; atmospheric environment