

刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 467–476.

大气边界层物理研究进展

刘辉志 冯健武 王雷 洪钟祥

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 本文总结了近 4 年来 (2009~2012) 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在大气边界层物理理论、观测实验、数值模拟和超声风速温度仪等仪器研制领域的主要研究进展, 并对未来几年内大气边界层物理的发展方向提出了一些建议。

关键词 大气边界层 大气湍流 超声风速温度仪

文章编号 1006-9895(2013)02-0467-10

中图分类号 P404

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315

Overview of Recent Studies on Atmospheric Boundary Layer Physics at LAPC

LIU Huizhi, FENG Jianwu, WANG Lei, and HONG Zhongxiang

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

Abstract This paper presents an overview of the recent important developments in the field of atmospheric boundary layer physics at 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 over the last 4 years (2009–2012). It focuses on theoretical, experimental, and numerical studies of the atmospheric boundary layer, as well as the development of an ultrasonic anemometer/thermometer (UAT-2). Some future research prospects are also presented in this paper.

Keywords Atmospheric boundary layer, Atmospheric turbulence, Ultrasonic anemometer/thermometer

1 引言

大气边界层是指离地球表面约 1~2 km 高度的低层大气。由于大气边界层受地球表面的影响最大, 该层大气有着区别于上层自由大气显著不同的特征, 例如各种气象要素 (气温、湿度和风速等) 日变化较大、垂直梯度较大等。大气边界层是人类的生活和生产活动主要场所。由人类活动带来污染物的排放、传输和转化大部分发生在该层, 因此大

气边界层的环境问题直接影响到人类的健康和生存。大气边界层同时也是地球各个圈层相互作用的关键区域。大气边界层的变化直接影响到地圈、水圈、冰雪圈和生物圈与大气圈的能量和物质交换过程, 同时对天气和气候产生重要的影响。天气及气候模式中大气边界层物理过程参数化方案的改进是提高其模拟性能的关键科学问题之一, 也是当前大气科学研究的基础前沿问题。由于全球变化研究包括气候异常、生态环境恶化、水资源短缺等问题

收稿日期 2012-10-23, 2012-10-30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41275023、41030106, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110102

作者简介 刘辉志, 男, 1967 年出生, 博士, 研究员, 主要从事大气边界层和大气环境方面的研究。E-mail: huizhil@mail.iap.ac.cn

以及可持续发展研究等的需要,大气边界层物理研究已成为大气科学研究的前沿学科之一。

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)定位于低层大气中物理和化学过程的基础研究。自实验室建立来,我们一直将大气边界层物理的基本理论作为重点研究方向。近年来, LAPC 在大气边界层物理和大气化学联网观测研究,大气边界层实验、理论与参数化研究,大气化学过程与气候变化的相互作用模拟研究,陆地生态系统与大气间碳氮交换研究,空气质量多模式集合预报系统研制与应用等方面取得了重要进展。对于大气边界层物理方面,近年来主要研究方向包括:(1)城市复杂下垫面湍流相干结构和边界层阵风机理,非均匀下垫面大气边界层结构和交换过程;(2)不同生态系统地—气湍流物质、能量交换规律及特征;(3)海洋大气边界层物理过程,数值模式中的大气边界层参数化。对于 2008 年之前的工作,胡非等(2003)和张美根等(2008)已作了较全面的总结,因此本文将扼要介绍近 4 年来(2009~2012) LAPC 在大气边界层物理方面取得的最新研究进展。

2 大气边界层结构和理论研究

大气边界层气象学是以湍流理论为基础的,在湍流理论有了一定的发展之后才得以有边界层气象学的产生。大气边界层的基础理论早在 20 世纪 50 年代末已经基本形成。到 20 世纪 70 年代末,对均匀下垫面大气边界层物理结构有了较全面的认识,大气边界层物理学开始作为气象学的一门相对独立的分支学科出现。目前,大气边界层领域主要围绕解决大气数值模式中边界层和地表通量参数化的问题上展开研究。LAPC 近年来在深入认识湍流机制和本质的基础上,在湍流相干结构和边界层阵风机理方面取得了重要的进展。

在我国华北地区,春季常发生扬沙和沙尘暴天气,通常伴随有冷锋过境及强风,严重影响着人们的生活和生产活动。对起沙扬沙过程基本物理规律的深入认识是预报和减少沙尘灾害、改善空气质量的基础。通过分析北京 325 米气象塔观测的风速梯度资料以及涡动相关资料(Zeng et al., 2010; Cheng et al., 2011, 2012a, 2012b, 2012c),曾庆存等(Zeng et al., 2010)提出了自然界阵风产生的一种新机制,即自然界阵风产生的机制不仅有剧烈天气的外部

动力作用原因,同时也是边界层湍流内部自组织结构发展的结果。在强风天气中,当风速足够大,使得地面摩擦速度大于某一临界值时,在当地起沙尘。但是大中尺度系统下沉气流使沙尘只能积聚在大气边界层的低层(约 200 m 厚)。由于阵风存在明显的相干结构(图 1);阵风风速波峰期(即阵风时)伴随着下沉气流,波谷期(即阵风歇时)伴随着上升气流,当阵风停歇时上升气流才能将沙尘传入边界层上层,然后借助大中尺度的系统性上升气流再往上传输进入对流层。基于对阵风机理的深入认识,发展了一个利用频谱和混沌时间序列突变点检测理论来提取阵风信号的方法(Cheng et al., 2012a),提出了一个新的阵风扰动参数化方案(Cheng et al., 2012b),导出地表摩擦速度新的理论公式,并以此改进了空气质量模式中的起沙和扬沙过程的模拟(Cheng et al., 2012c)。

在大气边界层物理结构研究方面,发现了台风、寒潮大风、沙尘暴过程和一般平稳天气大边界层湍流结构完全具有相同的概率密度分布型(Liu et al., 2010),即具有稳定分布和标度律,这一结果为强天气条件下大气边界层湍流的理论建模和参数化提供了科学参考。另外,我们还给出了两层大气模式中滚轴涡旋(大气中一种重要的有组织结构)的解析解,揭示出下层不稳定层结对流活动与上层稳定层结中重力波的相互作用是滚轴涡旋形成的机制之一(Liu and Sang, 2009)。此外, LAPC 科研人员采用飞机观测大气湍流数据,通过分析大气边界层顶的小尺度湍流结构来研究层积云覆盖边界层顶部的夹卷层特征(代成颖, 2012),发现了:夹卷层内一直存在湍流,只是湍流强度在逆温层底部开始向上逐渐减弱;云顶风切变有助于产生湍流,能够增强云顶过渡层内大气的夹卷混合,进而减弱逆温强度,缩小逆温高度与湍流层顶之间距离;风切变产生的湍流能够促使云顶多界面分离,使夹卷层、稀薄云层和逆温层厚度明显增加;当云顶处存在强风切变时,局地强风切变还能够在云顶上方产生间歇性湍流。研究结果可为数值模式中边界层过程的参数化提供科学的参考依据。

3 大气边界层物理观测实验

均匀下垫面的大气边界层近地层特征在 Monin-Obukhov 相似性理论的指导下研究比较成

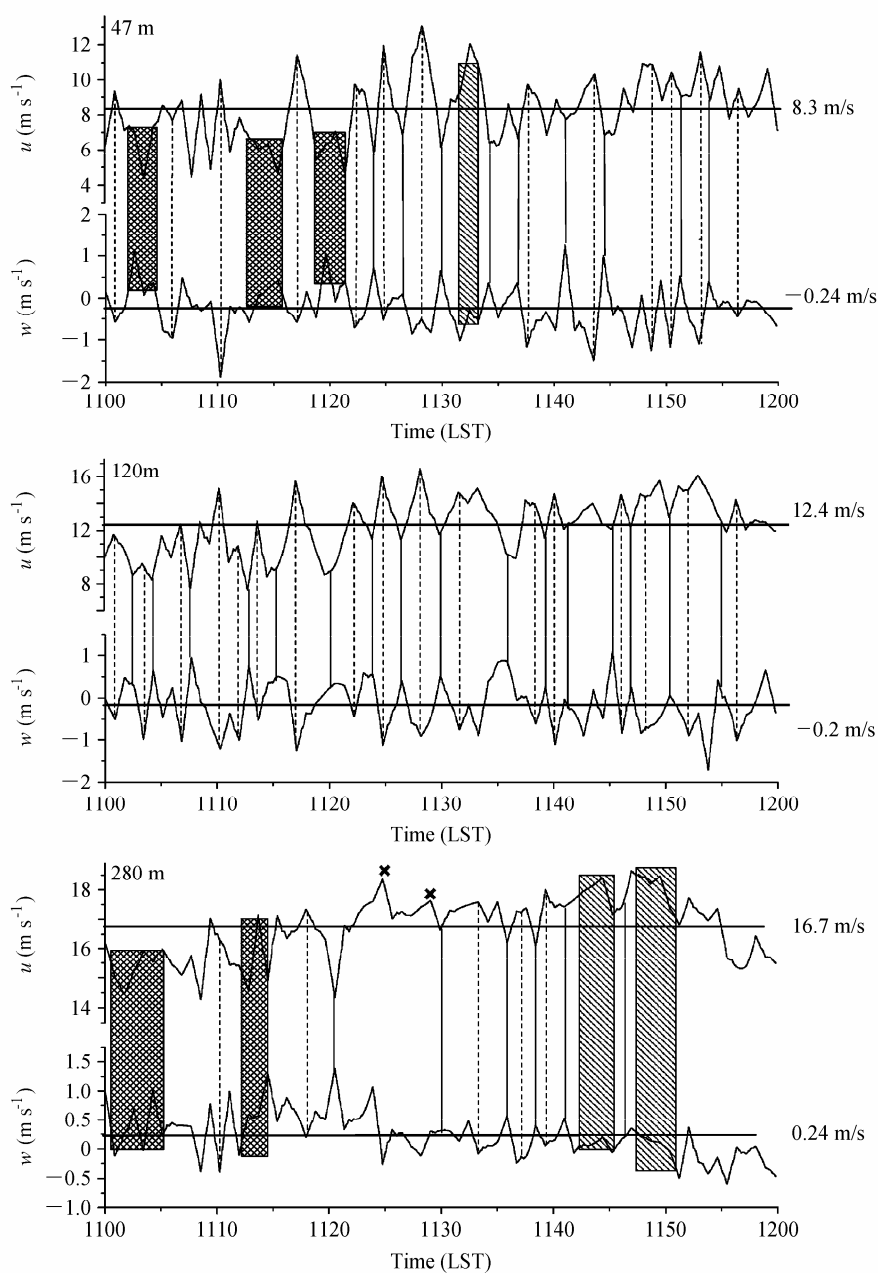


图1 2002年3月20日不同高度、不同时间间隔下1 min平均水平风速和垂直风速变化曲线。竖线表示阵风的相干结构：虚线代表阵风峰期，实线代表阵风谷期；阴影部分代表受对流和湍流影响的阵风相干性；“×”代表与相干结构相反的情况。（引自 Zeng et al., 2010）

Fig. 1 1-min averaged horizontal downwind velocity and vertical velocities (u ; w) at various heights and time intervals on 20 March 2002. Vertical lines show the coherent structure of gust-wind, dashed lines are the moments of the peaks in strong gust-wind, and solid lines are wind speed valleys. Shaded areas represent the coherent structures of gust-wind, but disturbed by convection or turbulence. Those marked “×” are out of phase from the coherent structure. (From Zeng et al., 2010)

熟，但地球表面最普遍存在的非均匀和复杂下垫面大气边界层尚未得到很好的解决。近年来，大气边界层研究重点从均匀下垫面逐渐转向非均匀非定常下垫面。另一方面，观测技术的迅猛发展为非均匀下垫面的直接观测研究提供可能性。为了揭示真实下垫面条件下大气边界层特征和规律，LAPC 在发展大气边界层理论并为模式发展提供基础性支

持的同时，利用铁塔、汽艇、雷达、飞机和卫星遥感等手段，在我国各种典型地表下垫面开展了有针对性的综合观测试验，例如城市（北京）、半干旱草原（吉林通榆、锡林浩特）、山地（青藏高原）、海洋（北冰洋）等下垫面。上述实验获得了区别于传统水平均匀下垫面边界层的新发现，积累了大量宝贵的观测资料。

3.1 青藏高原观测实验

在青藏高原的观测研究方面, LAPC 近年来联合青藏高原研究所在喜马拉雅山北侧珠峰北坡绒布河谷地区联合进行了两次大气强化观测实验(2006、2007 年 5~6 月)。该实验在一个由海拔 5800 m 水平截面和沿河谷中部地区的垂直截面组成的封闭型河谷中进行。河谷中部架设了自动气象站和风温廓线仪, 观测地面风、大气辐射、热力状况和垂直风廓线等参数。根据大气物质守恒定律, 通过分析研究穿越河谷中部垂直截面大气物质通量可初步定量估计河谷内外大气物质的交换量。此外, 结合同期的大尺度环流资料, 该实验可为研究珠峰北坡绒布河谷地区局地环流导致的地气间物质交换过程以及观测期间南亚夏季风活动对地气交换过程的影响提供第一手观测资料。

上述的资料分析得出了许多有意义的结果和发现(Zou et al., 2009; Zhou et al., 2009; Ma et al., 2009; 周立波等, 2010; Zhou et al., 2011), 揭示了以喜马拉雅山区为代表的青藏高原大型山地“山谷风”和“冰川风”环流的耦合机理。喜马拉雅山区特殊的局地环流系统是强烈的太阳辐射在复杂下垫面上形成的热动力复合环流, 主要是“山谷风”和“冰川风”相互耦合的产物(Zou et al., 2009)。该环流明显有别于传统山地气象学理论以及世界其它山地中的观测结果, 耦合环流系统的物质输送能力远远大于过去学术界的传统认识, 表明了以喜马拉雅山区为代表的青藏高原大型山地中以局地环流为媒介的低层大气与自由大气间的物质交换过程的重要性。分析结果表明: 喜马拉雅山区的近地面湍流热交换接近高原其他地区, 其感热输送为 69.9 W m^{-2} , 潜热输送为 32.2 W m^{-2} , 总热通量为 102.1 W m^{-2} , 波文比为 2.17。由于局地环流的存在, 极大提高了该地区的地气交换能力, 其物质交换能力可以达到 $6.4 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, 约为整个封闭河谷体积的 36 倍。该地区地气间的物质输送与南亚夏季风活动密切相关(周立波等, 2010)。南亚夏季风活动弱(季风中断期)则物质交换量大($9.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 季风活动强(季风活跃期)则物质交换量小($6.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), 表明南亚夏季风可能通过改变局地大气辐射和热力状况影响到该地区地气间的物质交换过程(图 2)。

3.2 半干旱区地气相互作用观测实验

为了研究半干旱区不同下垫面地气相互作用

过程, LAPC 和东亚中心的科研人员在吉林省通榆县建立了地气交换过程长期观测实验站(简称通榆实验站)。该实验站是国际能量和水分循环加强观测计划(CEOP)的地面观测基准站之一, 目前已经积累了多年连续的半干旱区地表过程观测资料。该观测实验与过去在我国进行陆面过程大气边界层观测实验 HEIFE 及 IMGRASS 最大的区别在于: 改变了过去仅在加强期(一般在夏季)进行湍流通量的加强观测, 而采取一年四季连续的观测地气间通量交换, 研究地气通量交换过程的日、月、季及年变化, 为气候模式中半干旱地区陆面过程参数化的改进提供了可靠的验证数据。通过分析通榆实验站的观测资料, 我们在半干旱区近地层地气之间能量和物质交换以及水循环特征研究方面取得了一些有意义的结果(涂刚等, 2009; Liu et al., 2012a), 并给出了该半干旱区地表基本物理参数(空气动力学粗糙度、热力学粗糙度和整体输送系数)的变化特征(冯健武等, 2012)。地气之间的水循环过程是陆面过程中关键过程之一, 直接影响到地表水分收支、植被的生产力和碳循环等重要的生态过程, 从而间接地影响天气和气候。通过分析通榆站观测资料, 发现了地表实际蒸散在生长季的日总量最大值在退化草地下垫面为 $2.0 \sim 4.5 \text{ mm d}^{-1}$, 在农田下垫面为 $1.5 \sim 5.5 \text{ mm d}^{-1}$ 。降雨量的季节分布是地表实际蒸散季节变化的一个重要的影响因子。在半小时时间尺度上, 大气水分需求是地表实际蒸散的主要控制因子。生物控制因子在季节尺度上对半干旱区地表实际蒸散的影响较显著, 主要是通过表面导度季节和年际变化来实现。地表实际蒸散在年尺度上取决于年总降雨量(Liu et al., 2012a)。

在中德合作项目“不同放牧强度对内蒙古草原生态系统物质流的影响”支持下, 我们于 2006~2009 年在中国科学院内蒙古草原生态系统定位站开展内蒙古半干旱草原下垫面地气能量和物质交换过程的观测实验。为了揭示放牧对地气交换过程的影响, 我们在该地区三种典型的羊草样地(冬季放牧、持续放牧和过度放牧)进行了对比实验。通过对观测资料进行分析(王雷等, 2009; 王雷等, 2010; Wang et al., 2012), 发现了不同的放牧强度在季节尺度上都显著减少了地气间的实际蒸散(图 3), 主要原因是: (1) 放牧使地表反照率增大, 从而减小了有效能量; (2) 放牧导致土壤湿度的降低, 减少了有效能量分配为潜热通量的比例

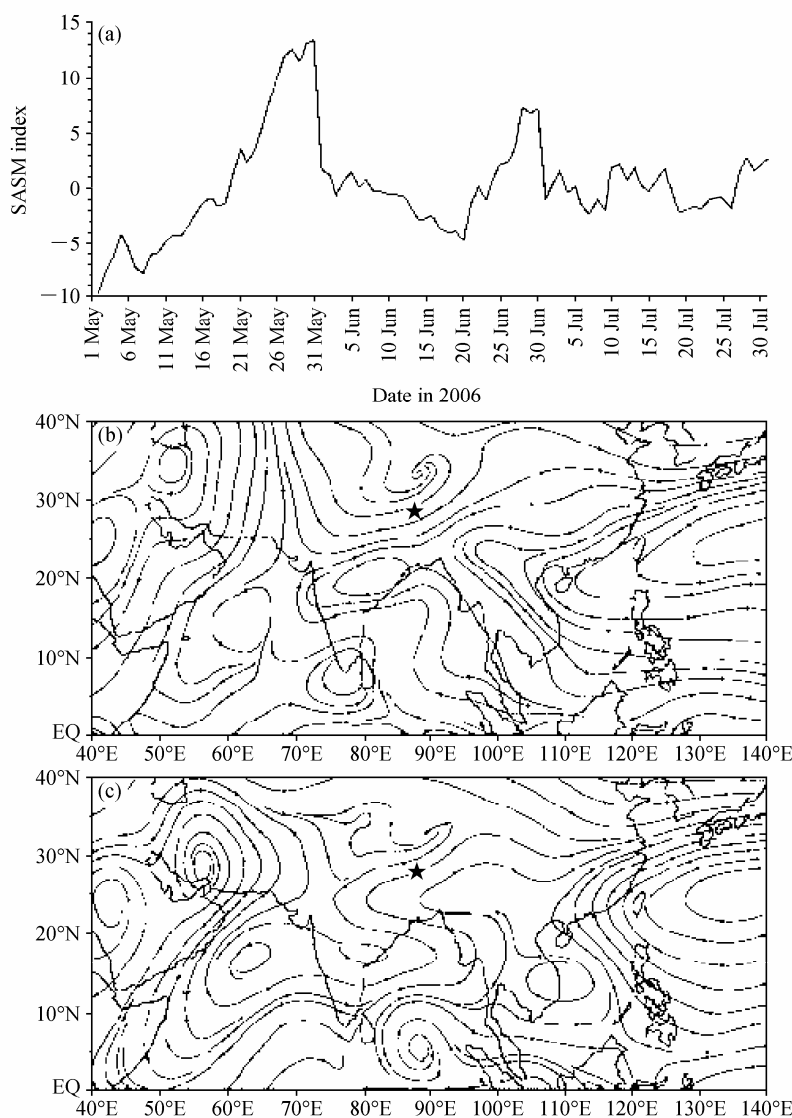


图2 2006年5月1日至7月31日南亚夏季风指数变化曲线(a), 季风中断(b)和活跃期间(c)南亚地区500 hPa天气形势变化。星号代表绒布河谷的位置。(引自Zou et al., 2009)

Fig. 2 Variations of the South Asia summer monsoon index from May 1 to July 31 (a), 500 hPa streamlines in the SASM break period (b), and 500 hPa streamlines in the SASM active period (c). The star denotes the Rongbuk Valley. (From Zou et al., 2009)

(Wang et al., 2012)。此外, Gao et al. (2009a) 对内蒙古典型草原下垫面地气之间能量和物质交换特征进行了研究, 发现了该地区近地层能量平衡四分量具有显著的日和季节变化特征, 能量的不平衡问题主要是由于能量平衡四分量的不同相位造成的。

3.3 城市边界层观测实验

近十年来, 随着城市化发展加快, 北京城市规模不断扩大, 城市建筑物逐渐向高空发展。城市下垫面变得更加复杂, 动力学粗糙度日益增大。下垫面热力学和动力学性质的改变使该地区下垫面与大气

进行能量和物质交换的特征发生变化, 从而使大气边界层对天气和气候产生不可忽略的影响。针对城市边界层理论研究, 大气物理研究所早在上世纪70年代起建立了北京325 m气象塔(简称气象塔)。目前, 该气象塔已经积累了二十多年城市边界层气象数据, 为城市边界层的研究提供宝贵数据。为了获取城市冠层不同高度处大气湍流脉动数据, 该气象塔从2000年开始在47 m、120 m和280 m高度处增加了三层超声风速温度仪, 为城市边界层结构和湍流交换特征研究提供连续的湍流观测资料。

在城市边界层湍流通量研究方面, 通过分析气

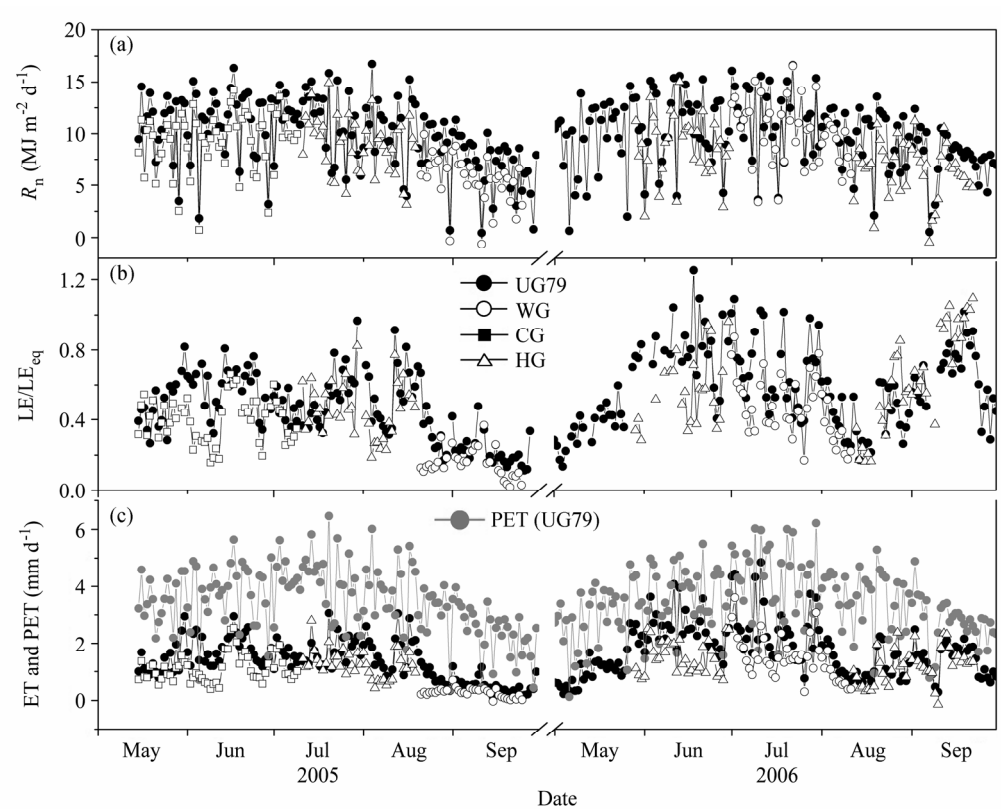


图3 2005 和 2006 年生长季 (a) 净辐射日平均值, (b) LE/LE_{eq} , (c) 实际蒸散 (ET) 和潜在蒸散 (PET) 的季节变化。(引自 Wang et al., 2012)

Fig. 3 Seasonal variation of (a) daily net radiation (R_n), (b) LE/LE_{eq} , (c) ET and PET of the four sites during the growing seasons of 2005 and 2006. (From Wang et al., 2012)

象塔的涡动相关资料, 发现了 2008 年奥运期间 CO_2 通量在量值上明显小于过去同期的 CO_2 通量 (Song and Wang, 2012), 分析结果证实了奥运期间所采取的车辆限行等政策取得了较显著的效果。另外, 通过分析多年 (2006~2009) CO_2 通量资料 (Liu et al., 2012b), 发现了 CO_2 通量在量值上与车流量关系密切, CO_2 通量日变化曲线的两个峰值出现在上下班期间车流量最多的时次。结合气象塔风场资料, 发现了 CO_2 通量最大值出现的方位在两条车流量最多的公路交叉处。同时通过对比 2006~2009 年 CO_2 排放总量, 发现了 2008 年 CO_2 排放总量明显小于其他年份 (表 1), 分析结果可为减少温室气体的排放提供参考依据。

在城市边界层湍流统计特征研究方面, 利用气象塔的涡动相关资料, 分析了城市边界层的阵风 and 湍流积分尺度以及湍流的垂直结构 (王丙兰, 2012), 发现了阵风因子的大小与阵风持续时间、风速平均时间和平均风速的大小有关, 阵风因子随阵风持续时间的增大而减小, 随风速平均时间的增大而增大, 随平均风速的增大而减小, 当平均风速足够大时, 阵风因子为常数; 湍流积分尺度随样本

长度的增大而增大; 各种稳定度条件下的上冲下扫运动对动量通量的贡献不同, 在城市冠层内 (47 m), 下扫运动对通量的贡献要大于上冲运动, 但是在 140 m 和 280 m 高度处, 均是上冲运动的贡献略大于下扫运动。

表 1 2006~2009 年北京 325 m 气象塔观测的 CO_2 排放总量估算值 (引自 Liu et al., 2012b)

Table 1 Total annual CO_2 flux estimated using EC data from Beijing 325 m meteorological tower (2006–2009) (From Liu et al., 2012b)

年份	2006	2007	2008	2009
年总量 ($kg(C) m^{-2} a^{-1}$)	4.77	4.80	4.61	5.40

3.4 海洋边界层观测实验

在海洋下垫面大气边界层研究方面, LAPC 科研人员利用 1998 年在北冰洋地区大气边界层观测实验 (SHEBA) 获取的观测资料, 研究了该地区大气边界层高度的演变特征并取得了一些有意义的发现 (Dai et al., 2011)。由于下垫面热力学和动力学特征的差异, 北冰洋地区的大气边界层结构特征有别于中低纬度的大气边界层。由于观测资料十分

缺乏, 该地区的大气边界层演变特征尚不清楚。通过分析该实验期间获取的飞机和 GPS 探空数据(图 4), 发现了: 温度梯度方法较适用于估算该地区的大气边界层高度, 并且给出了稳定边界层和对流边界层的阈值(分别为 $6.5 \text{ K}/100 \text{ m}$ 和 $1.0 \text{ K}/100 \text{ m}$); 该地区大气边界层高度春季大于夏季, 最大高度出现在 5 月份 (1150 m)。这些研究结果在一定程度上弥补了高纬度海洋下垫面大气边界层研究的空白。

4 大气边界层数值模拟

近地层湍流通量参数化方案是气候和中尺度数值模拟研究中一个十分重要的课题。数值模式中湍流通量参数化一般有两种计算方案, 即迭代方案和非迭代方案。迭代方案完整地保留了 Monin-Obukhov 相似理论, 但迭代过程需要耗费大量的 CPU 时间。为了让数值模式的通量计算方案具备更高的计算精度, 同时花费更少的 CPU 时间, 可采用非迭代方案计算湍流通量。非迭代方案是目前湍流通量参数化计算方案研究的热点。基于多元回归分析方法, 发展了一套湍流通量参数化方案的非迭代方法(李煜斌等, 2009; Li et al., 2010)。新方法具有计算量少、高精度和允许 z_0/z_{0h} 为大值等优点。

气候模式几乎都是基于能量平衡的原理, 近地面可利用能量, 即净辐射与土壤热通量之差(有时还考虑植被冠层热储存等), 应与所分配的感热通量和潜热通量之和相等。然而, 观测实验中普遍存在能量不平衡的问题, 此问题在上世纪 90 年代的陆面过程观测实验中被证实并得到国内外科学家们的重视。Gao et al. (2010) 分析了青藏高原安多站的观测资料, 发现土壤表面温度与土壤热通量日变化曲线的波相位差存在 0 至 $\pi/4$ 的差异, 此相位差对地表能量平衡的影响十分显著。

在海面湍流参数化研究方面, 发展了一个可以用于气候模式的海面湍流通量参数化方案(Ban et al., 2010)。该方案能够给出更接近观测事实的通量模拟结果。将新的湍流通量参数化方案应用到气候模式 CAM3 中, 不仅使得 CAM3 给出了更为精确的模拟结果, 而且提高了 CAM3 的模拟时效(图 5)。此外, Gao et al. (2009b) 在海/湖面摩擦系数、粗糙度和拖曳系数参数化方案的改进方面做了一些研究, 并利用实际观测资料评估了新的参数化方

案。新的参数化方案使模拟结果更贴近真实值。

在风场模拟和风能资源评估方面, 利用拟合对数风廓线法和 Davenport 土地类型系统划分法, 结合风能资源利用的特点, 估算了内蒙东部草原地表粗糙度(李军等, 2011)。分析结果表明: 该地区地表粗糙度长度有明显月份和季节变化, 夏秋植被茂盛期和冬春植被枯萎期粗糙度长度分别为 0.138 m 和 0.088 m ; 细微的地形起伏也会对粗糙度的评估造成影响; 两类方法估算的粗糙度长度大致相当, 且估算的风能密度只相差 2% 左右。

5 第二代超声风速温度仪观测系统研制

LAPC 第二代超声风速温度仪(UAT-2)是在第一代的基础上研发的新一代大气湍流观测系统。近年来, LAPC 在利用多台 UAT-2 构建湍流观测系统方面取得了重要的进展。该系统可实时、同步完成对多点三维风速和温度的脉动测量。系统拥有以下特点: (1) 采样频率可达 100 Hz 。采样频率是超声风速温度仪的主要技术指标之一。UAT-2 观测系统最高采样频率提高至 100 Hz 。采样频率的提高有两点重要意义: 仪器可以在单位时间内获取更多测风数据, 能更好地、真实反映大气中三维风速和温度脉动值; 采样频率的提高, 反映仪器整体设计水平和工艺, 以及相关最新技术的应用。(2) GPS 信号的引用和实时同步组网观测。随着超声风速温度仪应用的深入与发展, 需要多台超声实时、同步组网观测。只有多台超声采用高精度同源时钟, 才可以保证此关键技术的实现。为此, 系统引进了 GPS 秒信号作为网络的共同时基。GPS 秒信号的引进有两个重要意义: 可以把超声有线局域网实时、同步观测的理念拓展至无线广域网的实时、同步观测; 在大大降低组网成本的同时, 可以提高系统的采样频率。(3) 声阵实时垂直度的获取。超声测量对其传感器——声阵的垂直度有严格的要求, 特别是在各种通量测量中, 更突显其重要性。为此, 本系统加装了专门测量声阵动态垂直度的倾角仪子系统。子系统按 100 Hz 的采样频率采集动态垂直度数据, 保证了与超声数据的同步, 便于数据后处理时对相关数据进行必要的订正, 提高数据的准确性。图 6 为六台 UAT-2 平行对比试验结果。多台 UAT-2 在采样频率为 100 Hz 时, 观测的脉动值具有很好的一致性, 表明该系统达到国际同行的先进水平。

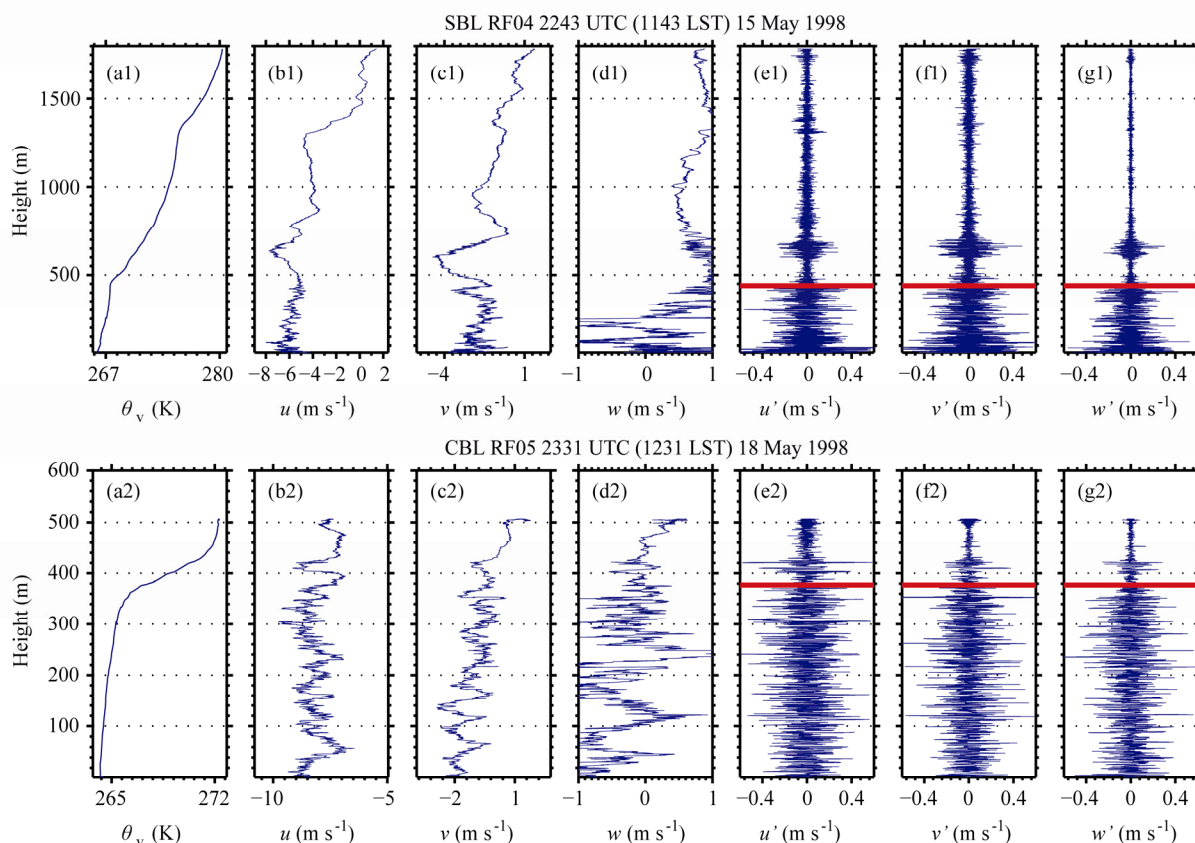


图4 SHEBA 实验中稳定边界层和对流边界层飞机观测例子: (a) 虚位温 (K), (b) u 风速分量 (m s^{-1}), (c) v 风速分量 (m s^{-1}), (d) w 风速分量 (m s^{-1}), (e) u 风速脉动 (m s^{-1}), (f) v 风速脉动 (m s^{-1}), (g) w 风速脉动 (m s^{-1})。 (引自 Dai et al., 2011)

Fig. 4 Example of the vertical profiles of SBL and CBL from SHEBA aircraft measurements: (a) Virtual potential temperature (K), (b) u wind speed component (m s^{-1}), (c) v wind speed component (m s^{-1}), (d) w wind speed component (m s^{-1}), (e) u perturbation (m s^{-1}), (f) v perturbation (m s^{-1}), and (g) w perturbation (m s^{-1}). The black lines on (e1, f1, g1) and (e2, f2, g2) denote the h_{TUR} . (From Dai et al., 2011)

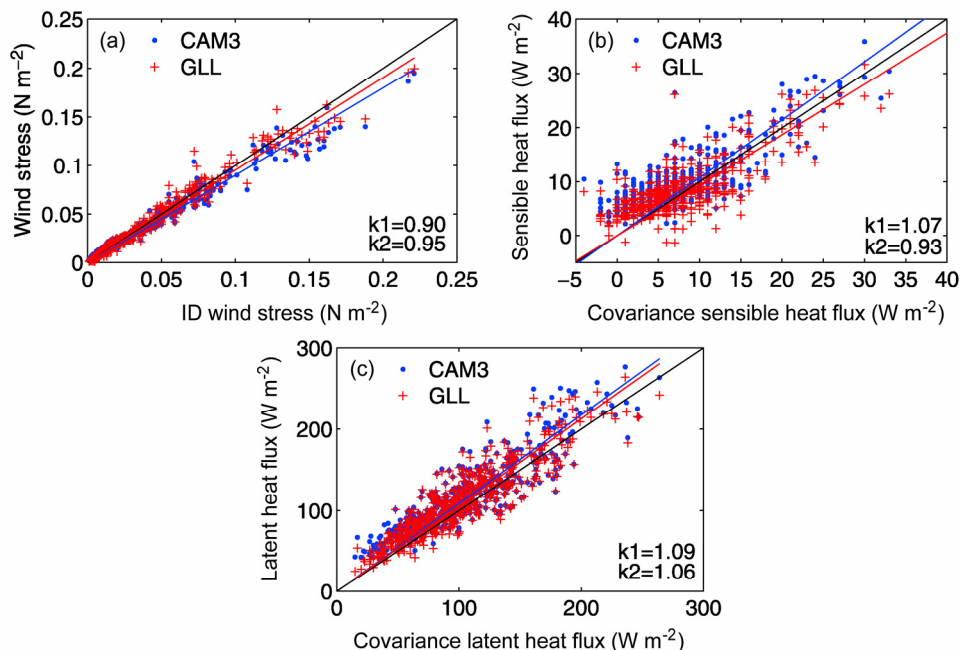


图5 CAM3 中的参数化方案 and 新的参数化方案 (GLL) 计算的海面端流量与实测资料的对比: (a) 风切应力; (b) 感热通量和 (c) 潜热通量。红线和蓝线代表回归直线; k_1 和 k_2 分别为 CAM3 方案和 GLL 方案与观测值的比率。 (引自 Ban et al., 2010)

Fig. 5 Fluxes calculated with the flux subroutine of the original CAM3 and by the GLL scheme versus measurements: ID wind stress (a), covariance sensible heat flux (b), and covariance latent heat flux (c). The red and blue lines represent regression lines; k_1 and k_2 are the slopes of fluxes calculated by CAM3 and GLL versus measurement. (From Ban et al., 2010)

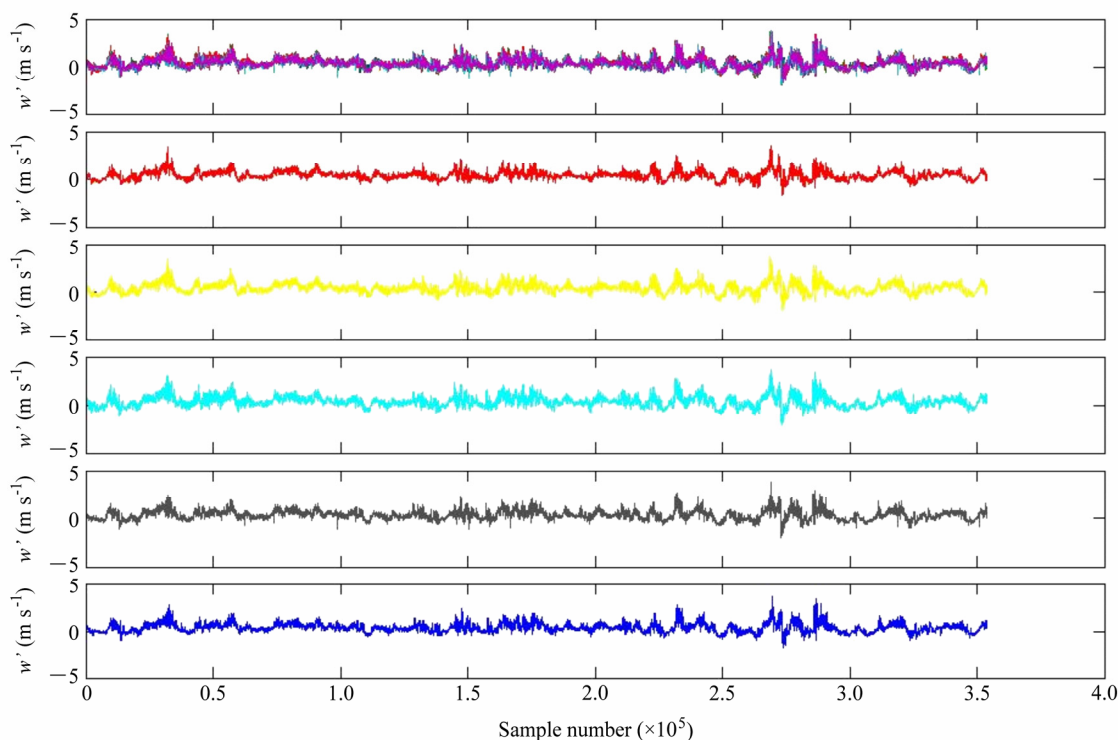


图6 2011年8月6台UAT-2超声风速温度仪平行对比实验中观测的垂直风速脉动(w') (罗卫东提供)

Fig 6 Vertical wind speed fluctuation (w') were compared with 6 ultrasonic anemometers on 6 August, 2011 (From Luo Weidong, personnel communication)

6 结论和展望

本文从理论研究、观测实验、数值模拟和仪器研制四个方面，扼要总结了近4年来中国科学院大气物理研究所大气边界层和大气化学国家重点实验室(LAPC)在大气边界层物理领域的主要研究进展。由于水平的限制，可能有不少不妥之处或不全面的地方。作者认为未来一段时间内大气边界层物理研究重点仍然集中在非均匀下垫面(复杂地形，例如高大山地、城市等)大气边界层结构和特征、天气和气候模式中大气边界层参数化方案的改进、强风条件下海洋大气边界层参数化的方案及大型风电场风电量的短期预报系统等。非均匀下垫面大气边界层的定量描述是目前研究的重点和难点。此外，因为地面单点观测通量的代表性通常在公里尺度，而中尺度模式和遥感资料反演得到的面上湍流通量通常尺度为几公里到几十公里。如何将单点观测到的湍流通量升尺度到面上的通量，或者将遥感反演得到的面上湍流通量降尺度到单点，与地面单点的观测结果比较，从而校验和改进遥感反演算法。因此，地面单点观测、模式输出以及遥感反演结果的匹配也是大气边界层物理未来几年研究的重点。

参考文献 (References)

- Ban J M, Gao Z Q, Lenschow D H. 2010. Climate simulations with a new air-sea turbulent flux parameterization in the National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model (CAM3) [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D01106, doi: 10.1029/2009JD012802.
- Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei. 2011. Characteristics of gusty wind disturbances and turbulent fluctuations in windy atmospheric boundary layer behind cold fronts [J]. *J. Geophys. Res.*, 116: D06101, doi: 10.1029/2010JD015081.
- Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei. 2012a. Stochastic modeling the effect of wind gust on dust entrainment during sand storm [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (27): 3595–3602, doi: 10.1007/s11434-012-5230-z.
- Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei. 2012b. Parameterizations of some important characteristics of turbulent fluctuations and gusty wind disturbances in the atmospheric boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 117: D08113, doi: 10.1029/2011JD017191.
- Cheng Xueling, Hu Fei, Zeng Qingcun. 2012c. Simulation of wind gust structure in the atmospheric boundary layer with Lattice Boltzmann Method [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57: 1196–1203.
- 代成颖. 2012. 大气边界层顶部夹卷层特征及边界层高度研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 129pp. Dai Chengying. 2012. Properties of the entrainment zone atop the atmospheric boundary layer and determination of the boundary layer height [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 129pp.
- Dai Chengying, Gao Zhiqu, Wang Qing, et al. 2011. Analysis of

- atmospheric boundary layer height characteristic over the Arctic Ocean using the aircraft and GPS sounding [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4 (2): 124–130.
- 冯健武, 刘辉志, 王雷, 等. 2012. 半干旱区不同下垫面地表粗糙度和湍流通量整体输送系数变化特征 [J]. *中国科学 (地球科学)*, 42 (1): 24–33. Feng Jianwu, Liu Huizhi, Wang Lei, et al. 2012. Seasonal and inter-annual variation of surface roughness length and bulk transfer coefficients in a semiarid area [J]. *Science China (Earth Science)*, 55 (2): 254–261.
- Gao Z Q, Lenschow D H, He Z, et al. 2009a. Seasonal and diurnal variations in moisture, heat and CO₂ fluxes over a typical steppe prairie in Inner Mongolia, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13: 987–998.
- Gao Zhiqiu, Wang Qing, Zhou Mingyu. 2009b. Wave-dependence of friction velocity, roughness length, and drag coefficient over coastal and open water surfaces by using three databases [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 26 (5): 887–894.
- Gao Z Q, Horton R, Liu H P. 2010. Impact of wave phase difference between soil surface heat flux and soil surface temperature on soil surface energy balance closure [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D16112; doi: 10.1029/2009JD013278.
- 胡非, 洪钟祥, 雷孝恩. 2003. 大气边界层和大气环境研究进展 [J]. *大气科学*, 27 (4): 712–728. Hu Fei, Hong Zhongxiang, Lei Xiaoen. 2003. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (4): 712–728.
- Li Y B, Gao Z Q, Lenschow D H, et al. 2010. An improved approach for parameterizing surface-layer turbulent transfer coefficients in numerical models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 137: 153–165.
- Liu Huizhi, Sang Jianguo. 2009. Analytical model of roll vortices in the convective boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 130: 43–55.
- Liu Huizhi, Feng Jianwu. 2012a. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration and energy exchange over different land surfaces in a semi-arid area of China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51 (10): 1875–1888.
- Liu Huizhi, Feng Jianwu, Järvi L, et al. 2012b. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12: 1–87; doi: 10.5194/acp-12-1-2012.
- Liu Lei, Hu Fei, Cheng Xueling. 2010. Probability density functions of velocity increments in the atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 134: 243–255.
- 李军, 胡非, 刘磊, 等. 2011. 风能资源评估中地表粗糙度的研究 [J]. *资源科学*, 2011, 33 (12): 2341–2348. Li Jun, Hu Fei, Liu Lei, et al. 2011. On estimation of surface roughness for wind energy resources assessment [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 33 (12): 2341–2348.
- 李煜斌, 高志球, 袁仁民, 等. 2009. 湍流通量参数化方案的非迭代方法研究 [J]. *大气科学*, 33 (4): 760–770. Li Yubin, Gao Zhiqiu, Yuan Renmin, et al. 2009. Non-iteration methods of turbulent flux parameterization [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 760–770.
- Ma Shupo, Zhou Libo, Zou Han, et al. 2009. Preliminary estimation of moisture exchange in rongbuk valley on the northern slope of Mt. Qomolangma [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (1): 40–44.
- Song Tao, Wang Yuesi. 2012. Carbon dioxide fluxes from an urban area in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 106: 139–149.
- 涂刚, 刘辉志, 董文杰. 2009. 半干旱区不同下垫面近地层湍流通量特征分析 [J]. *大气科学*, 33 (4): 719–725. Tu Gang, Liu Huizhi, Dong Wenjie. 2009. Characteristics of the surface turbulent fluxes over degraded grassland and cropland in the semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 719–725.
- 王雷, 刘辉志, Ketzner B, 等. 2009. 放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响 [J]. *大气科学*, 33 (6): 120–1211. Wang Lei, Liu Huizhi, Ketzner B, et al. 2009. Influence of grazing intensity on energy and mass exchange between the surface and atmosphere over semi-arid grassland in Inner Mongolia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (6): 1201–1211.
- 王雷, 刘辉志, Schaffrath D, 等. 2010. 内蒙古羊草草原和大针茅草原下垫面水汽、二氧化碳通量输送特征 [J]. *高原气象*, 2010, 29 (3): 605–613. Wang Lei, Liu Huizhi, Schaffrath D, et al. 2010. Transfer characteristics of water vapor and CO₂ flux over leymus Chinensis and stip a grandis steppe surfaces in Inner Mongolia [J]. *Plateau Meteorology*, 29 (3): 605–613.
- Wang Lei, Liu Huizhi, Ketzner B, et al. 2012. Effect of grazing intensity on evapotranspiration in the semiarid grasslands of Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 83: 15–24.
- 王丙兰. 2012. 城市边界层湍流统计特征和环流结构研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 146pp. Wang Binglan. 2012. Statistic characteristics of urban boundary layer turbulence and circulation structure [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 146pp.
- Zeng Qingcun, Cheng Xueling, Hu Fei. 2010. Gustiness and coherent structure of strong winds and their role in dust emission and entrainment [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 27 (1): 1–13.
- 张美根, 胡非, 邹捍, 等. 2008. 大气边界层物理与大气环境过程研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 923–934. Zhang Meigen, Hu Fei, Zou Han, et al. 2008. An overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment in LAPC [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 923–934.
- 周立波, 邹捍, 马舒坡, 等. 2010. 喜马拉雅山地区地气间物质交换及其与南亚夏季风的联系 [J]. *气候与环境研究*, 15 (3): 289–294. Zhou Libo, Zou Han, Ma Shupo, et al. 2010. The air mass exchange between the surface and free atmosphere and its relationship with the South Asian summer monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (3): 289–294.
- Zhou Libo, Zou Han, Ma Shupo, et al. 2009. Quantitative estimation of air mass exchange by along-valley wind in the rongbuk valley [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2 (1): 29–34.
- Zhou Libo, Zou Han, Ma Shupo, et al. 2011. Vertical air mass exchange driven by the local circulation on the northern slope of Mount Everest [J]. *Advance in Atmospheric Science*, 28 (1): 217–222.
- Zou Han, Ma Shupo, Zhou Libo, et al. 2009. Measured turbulent heat transfer on the northern slope of Mt. Everest and its relation to the south Asian summer monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 36: L09810; doi: 10.1029/2008GL036984.