

城市大气边界层的综合观测研究 ——实验介绍与近地层微气象特征分析

刘 罡¹, 孙鉴泞¹, 蒋维楣¹, 刘红年¹, 袁仁民², 罗 涛²

(1. 南京大学大气科学学院, 江苏南京 210093; 2. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要:介绍了南京大学大气科学系依托国家自然科学基金重点项目《城市边界层三维结构研究》在南京进行的两次城市边界层综合观测实验(时间分别在2005年夏季与2006年冬季),对实验所获观测资料进行了初步分析,获得了一些城市近地层微气象学的基本特征,并对结果进行了讨论.主要结果为:市区气温明显高于郊区,体现出城市热岛效应的存在,且市区与郊区的气温差异随高度的增加而减小;2006年冬季观测期间,市区的风速比郊区约小1 m/s,反映出城市建筑物对气流的摩擦、阻尼和拖曳等作用,这些作用使得平均风速在城市上空衰减,并使一部分气流平均动能转化为湍流动能;市区白天的感热通量与郊区相当,但潜热通量远小于郊区,因此市区的鲍恩比远大于郊区.市区下垫面储热项在地表能量分配中占有较大份额,成为城市热岛效应的主要成因;夏季观测期间,市区摩擦速度均值比郊区高34%;冬季观测期间,市区摩擦速度均值比郊区高23%.这种夏季大于冬季、市区大于郊区的现象表明,由于冬/夏热力学性质和城/郊下垫面动力学性质的不同而引起湍流活动的差异;为了定量地衡量气流平均场转化为湍流场的效率,表述动量输送的强弱,我们引入了一个新的变量:归一化摩擦速度.对冬/夏两季和城/郊两地的比较发现,归一化摩擦速度具有很好的相似性和一致性,它表现为一个不随季节和时间变化的常数;通过比较水平湍流方差 $\sigma_u^2 + \sigma_v^2$ 与垂直湍流方差 σ_w^2 的方法,来更直观地研究湍流能量在水平和垂直两个方向上的分配特征.在2006年冬季观测期间,市区的 $\sigma_w^2 / (\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$ 平均值为0.16,郊区为0.14,市区湍流能量在垂直方向所占份额略高于郊区.

关键词:城市边界层;综合观测;近地层;微气象特征;归一化摩擦速度

中图分类号:P412.291 **文献标识码:**A

Comprehensive observation research on urban atmospheric boundary layer — Description of field experiment and analysis of micrometeorological properties in the surface layer

LIU Gang¹, SUN Jian-ning¹, JIANG Wei-mei¹, LIU Hong-nian¹, YUAN Ren-min², LUO Tao²

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Two field observation experiments in Nanjing aimed at urban boundary layer researches were described. The observation data were analyzed and some micrometeorological properties in the urban

收稿日期:2007-12-11;修回日期:2008-01-21

基金项目:国家自然科学基金(40333027,40575005,40605005)资助.

作者简介:刘罡,男,1971年出生,博士/副教授.研究方向:大气边界层物理与空气污染气象学. E-mail: gangliu@nju.edu.cn

通讯作者:孙鉴泞,博士/教授. E-mail: jnsun@nju.edu.cn

surface layer were obtained. The main results are: Air temperature in the urban area is significantly higher than in the suburban area, which embodies the presence of urban heat island effect, and the differences of air temperature between the urban and suburban areas decrease with height. During the observation period in the winter of 2006, wind speed in the urban area is about 1 m/s less than in the suburban area, which reflects the damping, friction and drag effects of urban buildings on the airflow. Sensible heat flux in the daytime in the urban area is approximately equivalent to that in the suburban area, but latent heat flux in the urban area is far less than in the suburban area, thus the Bowen ratio in the urban area is far larger than in the suburban area. In the summer, friction velocity in the urban area is 34% larger than in the suburban area, and is 23% larger in the winter. In this paper, a new variable, normalized friction velocity, was introduced, of which the mean value was found a constant not varying with time and season. It is found that the proportion of vertical turbulent energy to total turbulent energy in the urban area is somewhat larger than in the suburban area during the winter of 2006.

Key words: urban boundary layer; comprehensive observation; surface layer; micrometeorological properties; normalized friction velocity

0 引言

大气边界层是地球大气动量、热量和各种物质上下输送的重要通道,因此,大气边界层中发生的物理过程是大尺度天气气候形成的重要因子,也是天气气候影响人类生活以及人类活动影响大气的通道.大气边界层的物理过程与下垫面物理性质具有紧密关系.由于边界层过程又同时受到天气尺度背景场的制约与影响,并且也对天气尺度场起着反馈作用,因此两者关系十分密切.为提高天气气候预报的准确性,预测大气污染以及推动其他应用气象学科与气候学的发展,必须深入研究大气边界层的结构和特征^[1,2].

随着探测手段和电子计算机技术的发展,大气边界层观测与理论模式的研究在近数十年里有了长足的进展,定常水平均匀平坦地形上的近地层问题在 M-O 相似理论指引下已较好地解决,研究重点已转向非均匀、非定常的近地层和边界层.而在非均匀、非定常和复杂下垫面边界层中,城市边界层属于最不均匀、最变化无常和下垫面最复杂的情形,研究非均匀下垫面边界层,就不能不涉及到对城市边界层问题的研究.而且城市是人口聚集的地方,研究城市边界层特征及城市上空污染物的扩散规律具有最为重要和迫切的现实意义.因此,针对城市边界层结构与特征的理论研究^[3,4]和外场观测实验就显得十分重要.

城市边界层观测实验研究,在北美开展是近十年的事,在欧洲则更是近几年内才开始实施的^[5,6].

近年来国际上进行的城市边界层综合观测实验主要有美国的 URBAN 2000 计划^[7]、欧盟的 COST 715 计划^[8,9]、法国的 ESCOMPTE 计划^[10]、墨西哥的墨西哥城观测实验^[11]、日本的东京观测实验^[12]和瑞士的 BUBBLE 计划^[13]等.我国自上世纪 90 年代以来,陆续开展了许多针对非均匀下垫面边界层结构特征的观测实验研究,如 TIBEX、HEIFE、IMGRASS 和 HUBEX 等观测实验,以及近年来由中国国家自然科学基金委员会资助的《地表通量参数化与大气边界层过程的基础研究》、《绿洲系统能量和水分循环过程观测和数值研究》、《北极苔原和海冰地区边界层物理过程的观测研究》等重点研究项目的观测实验^[14],都是我国在非均匀边界层领域的重要观测实验研究.然而近年在我国专门针对城市边界层而进行的观测实验研究,除国家科学技术部“973”项目《首都北京及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控原理》的外场观测实验(BECAPEX)^[15]外,详细、系统的综合观测实验尚不多.南京大学大气科学系以国家自然科学基金委员会资助的重点研究项目《城市边界层三维结构研究》为依托,在南京城市和郊区下垫面上,于 2005 年夏季和 2006 年冬季分别进行了两次边界层外场观测实验,获得了一批有价值的观测结果.本文介绍了南京城市边界层综合观测实验,并对本实验中的近地层微气象学特征进行了分析,获得了一些有意义的结果.更多的研究结果还将会在今后陆续发表.

1 实验介绍

1.1 实验场地、仪器与观测项目

南京城市边界层综合观测实验分为两次,分别在夏季和冬季进行,时间为2005年7月17日至31日(15天)以及2006年2月17日至3月10日(22天),总计37天.观测在城市和郊区同步进行.

图1为南京城市边界层综合观测实验的观测场地位置示意图.市区观测场地位于南京市委党校教学楼楼顶(32.04°N , 118.79°E),建筑物南北朝向,楼高22 m,观测场地为 $20\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的水泥柏油楼板.以观测点为中心的1 km范围内主要为典型的居民区和商业区,街道纵横,建筑物密集,高低起伏,混凝土及建筑物占地面积占总面积的70%以上,代表了城市典型水泥下垫面的基本特征.郊区观测场地位于南京大学浦口校区大气科学园气象观测场内,为一块 $40\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的草地(32.18°N , 118.67°E),周围无高大建筑物与障碍物,半径500 m以内只有零星的低矮建筑与庄稼地和绿地,代表了郊区下垫面的基本特征.市区与郊区观测场地的直线距离约为18 km.

测量气流的三维脉动速度、虚温和空气中的二氧化碳、水汽含量,其传感器安装于距楼顶2.2 m的高处.这两套观测仪器的数据测量、采集、运算和存储均由数据采集器(CR5000, Campbell Scientific Inc.)完成,数据采样频率为10 Hz.楼顶有一座高度为36 m的铁塔,其上安装了一套平均风温观测系统(风杯:Model12002, R. M. Young; 温、湿度:HMP45C, Campbell Scientific Inc.; 数据采集器:CR10X, Campbell Scientific Inc.),在塔上距离楼顶8.5 m, 15.2 m和27.7 m的高度测量平均风速、风向、气温、湿度和气压,在0 m处测量楼顶温度,数据采样频率为0.05 Hz.在市区观测场地还有一台激光雷达(MSL, 中国科学院安徽光学与精密机械研究所研制)测量大气边界层厚度.在南京大学鼓楼校区还安装了一台声雷达(XFAS, Biral Ltd.),用于探测边界层风、温廓线.另外,在鼓楼校区还进行了无线电低空探空测量(温度湿度低空探空仪由北京大学研制).

郊区观测场地的观测项目与市区大体相同,也设置了辐射、超声风温和平均风温等观测项目.一台超声风速温度仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)和水汽脉动分析仪(KH-20, Campbell Scientific Inc.),其传感器安装于距离草地地面2.2 m的高处,测量气流的三维脉动速度、虚温和空气中的水汽含量,数据采样频率为10 Hz.2006年冬季,在距离草地地面1.22 m的高处,安装了一套四分量辐射观测仪(Model CNR1, Kipp & Zonen),对向上和向下的长波和短波辐射进行测量.另外,2006年冬季,一座专为本项综合观测实验建造的铁塔架设完成,铁塔的高度为50 m.一台超声风速温度仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)和二氧化碳/水汽脉动分析仪(LI-7500, Licor)测量气流的三维脉动速度、虚温和空气中的二氧化碳、水汽含量,其传感器安装于塔上距离地面40 m的高处.这套仪器与辐射观测仪器的数据测量、采集、运算和存储由一个数据采集器(CR5000, Campbell Scientific Inc.)完成,数据采样频率为10 Hz.一台由中国科学院大气物理研究所研制的超声风速温度仪(UAT-1)测量气流的三维脉动速度和空气虚温,其传感器安装于塔上距离地面30 m的高处,数据采样频率为10 Hz.在铁塔上还安装了一套由长春气象仪器厂研制的平均风温观测系统(DYYZ II-RTF),每隔10 m安装一层探测仪器,分为10 m, 20 m, 30 m, 40 m和50 m共5

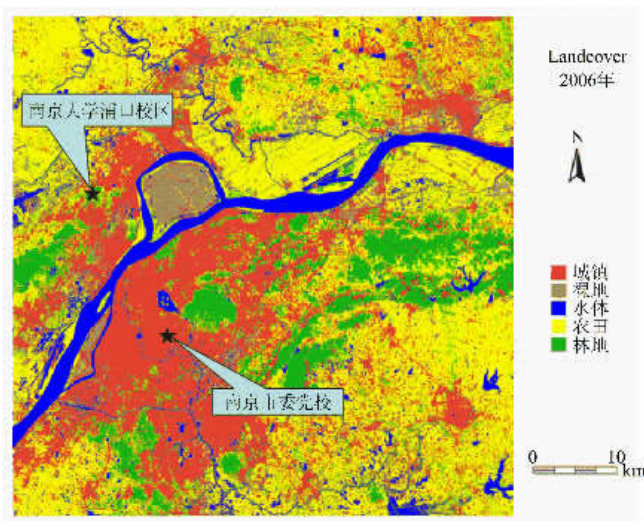


图1 南京市土地利用类型和城市边界层综合观测实验场地位置示意图

Fig. 1 Land use types of Nanjing City and sites of comprehensive observation experiment on the urban boundary layer

在市区观测场地设置了辐射、超声风温、平均风温等观测项目.一套四分量辐射观测仪(Model CNR1, Kipp & Zonen)安装于距楼顶1.22 m的高处,用于测量向上和向下的长波和短波辐射通量.一台超声风速温度仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)和二氧化碳/水汽脉动分析仪(LI-7500, Licor)

层,对平均风速、风向、气温、湿度和气压进行测量,另外在地面 0 m 处测量草地温度,数据采样频率为 1/60 Hz. 在郊区观测场地还设有一台激光雷达 (MSL,中国科学院安徽光学与精密机械研究所研制)测量大气边界层厚度. 此外,在郊区观测场地也进行了无线电低空探空测量(温度湿度低空探空仪由北京大学研制).

1.2 观测实验期间的天气情况

表 1 为实验观测期间的逐日天气情况. 在 2005 年夏季观测期间,南京市上空主要受副热带高压控制,盛行下沉气流,除间或出现雷阵雨等强对流天气外,整个观测期间天气以晴到多云为主,高温高湿为

表 1 观测期间逐日天气情况

Tab. 1 Daily weather record during the two experiment periods

时间	天气状况
2005 年 7 月 17 日	晴到多云
7 月 18 日	晴到多云
7 月 19 日	多云
7 月 20 日	多云到阴
7 月 21 日	阴转多云
7 月 22 日	多云
7 月 23 日	多云
7 月 24 日	多云有雷阵雨
7 月 25 日	多云有雷阵雨
7 月 26 日	多云
7 月 27 日	多云有雷阵雨
7 月 28 日	阴有阵雨
7 月 29 日	阴转多云
7 月 30 日	多云有雷阵雨
7 月 31 日	晴到多云
2006 年 2 月 17 日	市区多云;郊区晴,日照良好
2 月 18 日	市区阴间多云;郊区晴间多云
2 月 19 日	阴间多云
2 月 20 日	晴间多云
2 月 21 日	上午到中午晴间多云,下午阴有小雨,夜晚多云
2 月 22 日	阴间多云
2 月 23 日	晴间多云
2 月 24 日	上午到中午晴间多云,下午到夜晚阴
2 月 25 日	上午到中午阴有小雨,下午到夜晚阴
2 月 26 日	阴
2 月 27 日	阴
2 月 28 日	上午到中午中雪,下午小雪转阴,夜晚阴
3 月 1 日	晴
3 月 2 日	晴
3 月 3 日	晴
3 月 4 日	晴间多云
3 月 5 日	上午阴间多云,中午到夜晚晴间多云

天气的主要特征. 2006 年冬季,天气则以阴到多云为主,晴天较少,并间或出现小雨或小雪,2 月 28 日还出现了小到中雪,3 月 1 日以后才开始转晴.

在两次观测期间,除了不利于实验观测的天气情况以外,还由于停电或仪器设备出现故障、工作不正常等因素影响了实际观测,造成了数据的缺失或错误等,我们在分析时已做了相应的处理.

本文的工作仅对本项城市边界层综合观测实验中近地层观测部分的微气象学特征进行了分析,对其他部分的分析和研究工作仍在进行中,研究结果我们将陆续发表.

2 对近地层微气象学特征的分析与讨论

表 2 为两次观测期间各微气象特征量在城/郊两地的平均值.

表 2 南京城市边界层观测实验期间微气象特征量平均值 (2005 年夏季、2006 年冬季)

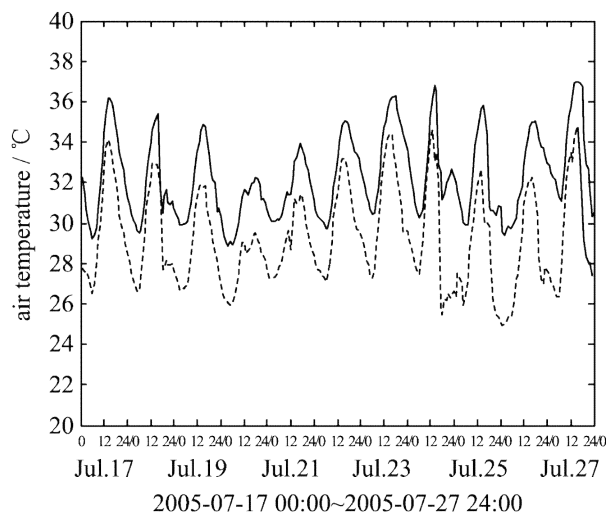
Tab. 2 Mean values of the micrometeorological characteristic quantities during the Nanjing urban boundary layer experiment periods (in the summer of 2005 and winter of 2006)

	市区 夏季	郊区 夏季	市区 冬季	郊区 冬季
平均气温(观测高度:2.2 m;单位:°C)	32.28	29.22	6.70	5.86
平均气温(观测高度:市区 27.7 m, 郊区 30 m; 单位:°C)	—	N/A	6.10	5.49
平均风速(观测高度:市区 8.5 m, 郊区 10 m; 单位: m/s)	—	N/A	2.22	3.26
平均感热通量(观测高度: 2.2 m; 单位: W/m ²)	59.51 (白天)	37.36 (白天)	—	—
	15.95 (夜间)	-23.88 (夜间)	—	—
平均潜热通量(观测高度: 2.2 m; 单位: W/m ²)	5.63 (白天)	65.48 (白天)	—	—
	1.48 (夜间)	19.93 (夜间)	—	—
平均摩擦速度(观测高度:2.2 m; 单位: m/s)	0.55	0.41	0.43	0.35
平均归一化摩擦速度(观测高度:市区 2.2 m / 8.5 m, 郊区 2.2 m / 10 m)	0.20	N/A	0.20	0.11
平均湍流能量分配比例(观测高度:2.2 m)	—	—	0.16	0.14

【注】表中“N/A”表示无观测资料,“—”表示观测资料有缺失.

2.1 平均温度特征

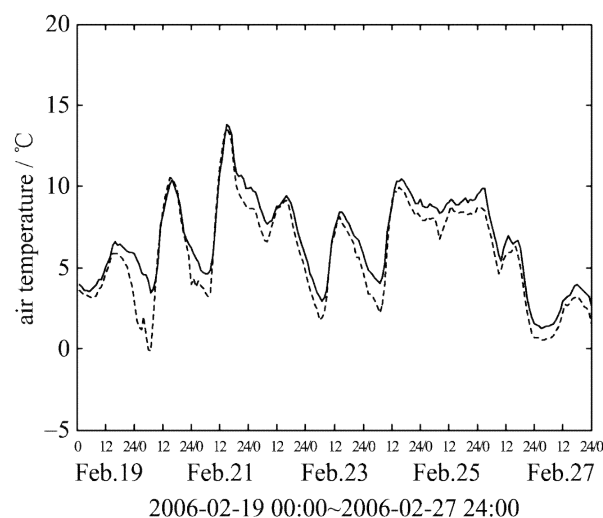
图 2、图 3 分别为 2005 年夏季、2006 年冬季城/郊地面平均气温的时间序列图. 城区观测值由 LI-7500 输出的平均量(10 分钟 1 组数据)经小时平均获得, 郊区观测值由 KH-20 输出的平均量(30 分钟 1 组数据)经小时平均获得. 由图可见, 两者的日变化趋势相当一致, 所不同的是两者的温度值. 城区气



实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值
市区和郊区观测高度均为 2.2 m

图 2 夏季城/郊近地层气温变化对比
(2005 年 7 月 17 日~27 日)

Fig. 2 Comparison of the surface layer air temperature between the urban and suburban area in the summer (July 17~27, 2005)



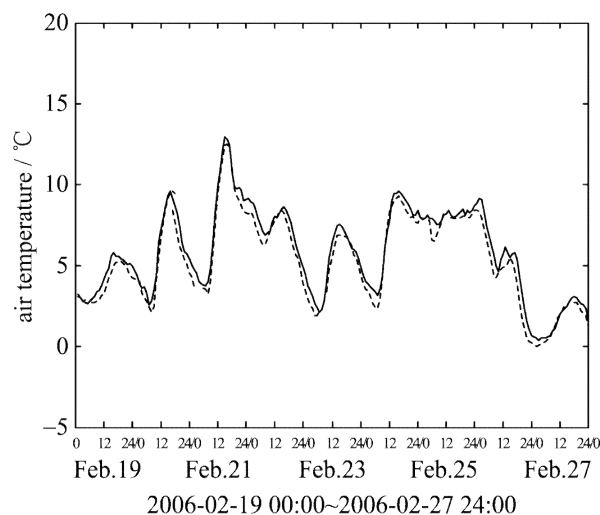
实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值
市区和郊区观测高度均为 2.2 m

图 3 冬季城/郊近地层气温变化对比
(2006 年 2 月 19 日~27 日)

Fig. 3 Comparison of the surface layer air temperature between the urban and suburban area in the winter (February 19~27, 2006)

温高于郊区, 且夏季尤为明显. 计算结果表明, 夏季观测期间城/郊平均地面温差为 $3.06\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而冬季观测期间两者平均温差为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$. 由图中还可以看出, 不论是夏季还是冬季, 城/郊的温差都是夜间大于白天. 观测数据显示, 夏季最大温差可达 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而冬季最大温差也接近 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

图 4 为 2006 年冬季城/郊两观测点的近地层气温变化时间序列图, 两者均为 10 min 平均值. 其中郊区观测高度为离地 30 m, 城区观测高度离楼顶 27.7 m(观测点楼高为 22 m, 以该点为圆心, 500 m 半径范围内的平均建筑物高度约为 21 m, 以此为零平面位移高度, 则观测高度距地面亦约为 30 m). 二者的日变化趋势一致, 且温差较小. 计算结果表明, 观测期间该高度上城/郊平均温差为 $0.61\text{ }^{\circ}\text{C}$, 比地面平均温差小, 符合温度场的垂直分布特征.



实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值
市区观测高度 27.7 m, 郊区观测高度 30 m

图 4 冬季城/郊近地层气温变化对比
(2006 年 2 月 19 日~27 日)

Fig. 4 Comparison of the surface layer air temperature between the urban and suburban area in the winter (February 19~27, 2006)

上述观测结果在一定程度上反映了城市热岛现象的某些特征. 需要指出的是, 这两点的温度观测值并不能直接反映南京的热岛状况. 城区观测点设在楼顶之上, 郊区观测点设在草地之上, 其观测结果都具有较强的局地性, 这可能正是为什么夏季温差偏大, 冬季温差偏小的原因. 此外, 冬季观测期间多为阴天, 城/郊下垫面热力学特性的差异体现得不明显, 这可能也是造成冬季温差较小的原因. 尽管如此, 从总体情况看, 上述结果还是较明显地反映出城市热岛的某些特征.

本研究专门设置了热岛观测项目,并已对观测结果进行了分析,详情请见文献[16].

2.2 平均风特征

图 5 为 2006 年冬季城/郊观测点近地层平均风速变化时间序列图,两者均为 10 min 观测值的每小时平均结果.其中城区观测高度为距楼顶 8.5 m,郊区为离地 10 m.两者的变化趋势比较一致,表明两地处于相同的大尺度气象背景场中,只是风速的大小不同,表现为郊区的平均风速明显大于城区,反映出城市下垫面对风速的影响.计算结果表明,冬季观测期间市区的平均风速为 2.22 m/s,郊区为 3.26 m/s,市区近地层风速比郊区约小 1 m/s,接近 30%.这反映了城市下垫面动力学特性对风场的影响,城市区域建筑物密集,建筑物的拖曳和阻尼、摩擦等动力学效应使得流经城市区域上空的气流减速,平均动能转化为湍流动能,从而使得总体上,市区的平均风速要小于郊区.上述观测结果表明,这一效应十分明显.

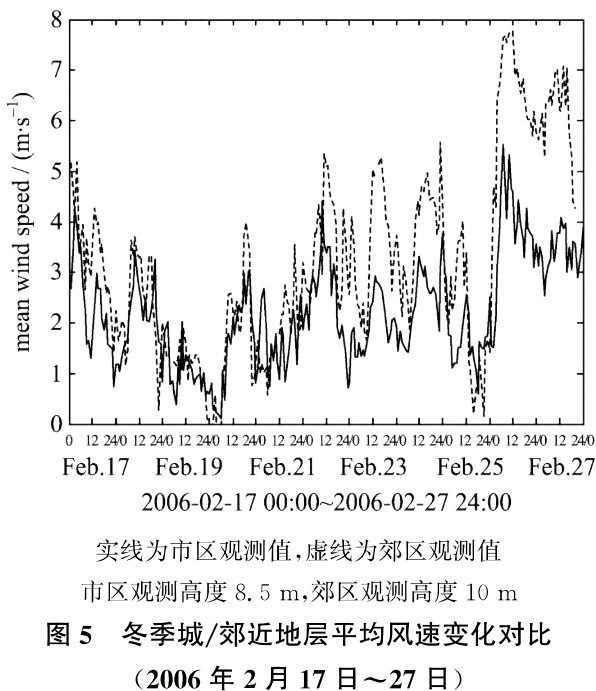


图 5 冬季城/郊近地层平均风速变化对比 (2006 年 2 月 17 日~27 日)
Fig. 5 Comparison of the surface layer mean wind speed between the urban and suburban area in the winter (February 17~27, 2006)

虽然由城/郊两处通量仪的超声测量数据可以获取平均垂直速度,但由于观测点离地面很近,垂直速度接近于零,因此本文未对此项观测结果进行分析.

2.3 地表能量平衡特征

图 6 为 2005 年夏季城/郊两观测点的感热通量变化图,其中城区点输出的是 10 min 平均结果,而

郊区点输出的是 30 min 平均结果,图中数据为每小时平均结果.图 7 为相同时段的潜热通量变化图,数据处理与感热通量相同.由图上可以看出,城/郊两处的感热通量在白天基本相当,而在夜晚差异明显,城区点上的感热通量在夜间仍然为正值,而郊区夜间感热通量为负值.城/郊两地的潜热通量差异也十分显著,郊区潜热通量日变化明显,白天与感热通量相当,夜间接近于零;而城区潜热通量日变化很小,量值也很小,尤其在白天,城区的潜热通量远小于感热通量.

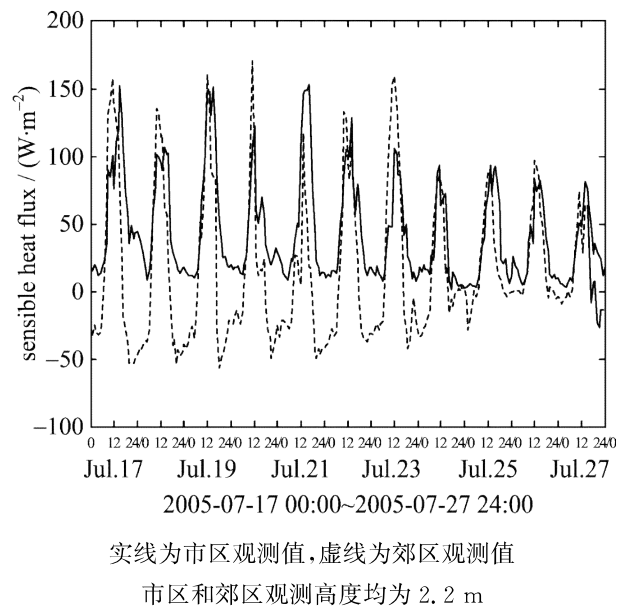


图 6 夏季城/郊感热通量比较(2005 年 7 月 17 日~27 日)
Fig. 6 Comparison of sensible heat flux between the urban and suburban area in the summer (July 17~27, 2005)

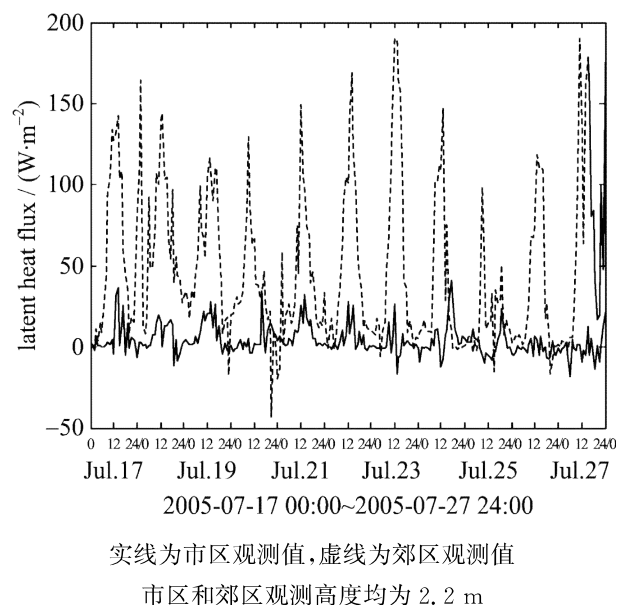


图 7 夏季城/郊潜热通量比较(2005 年 7 月 17 日~27 日)
Fig. 7 Comparison of latent heat flux between the urban and suburban area in the summer (July 17~27, 2005)

由图可见,夏季城/郊两地白天感热通量最大可

达到 $150\sim 200\text{ W/m}^2$, 郊区白天潜热通量最大也可达到 $150\sim 200\text{ W/m}^2$, 而城区最大潜热通量还不到 50 W/m^2 . 计算结果表明: 城区感热通量白天平均为 59.51 W/m^2 , 夜间平均为 15.95 W/m^2 ; 郊区感热通量白天平均为 37.36 W/m^2 , 夜间平均为 -23.88 W/m^2 . 城区潜热通量白天平均为 5.63 W/m^2 , 夜间平均为 1.48 W/m^2 ; 郊区潜热通量白天平均为 65.48 W/m^2 , 夜间平均为 19.93 W/m^2 .

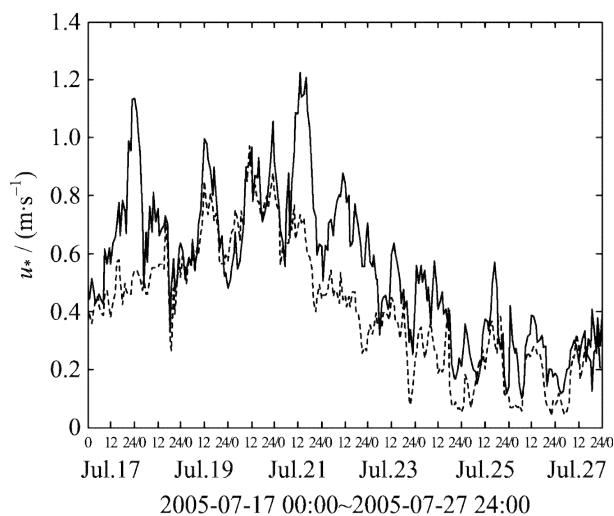
上述结果反映了城市下垫面在热力学特性上与自然下垫面的显著差异. 在白天, 城市下垫面接受太阳辐射后增温效应明显, 在以感热通量加热大气的同时, 下垫面储存了大量热量(即储热项), 并由于城市下垫面绝大部分由建筑路面等人造下垫面构成, 而植被、树木等所占份额很小, 因此蒸发潜热总量很小, 所以城区的鲍恩比(感热通量/潜热通量)远大于郊区(自然下垫面). 在夜间, 由于城市下垫面白天储存了大量热量, 温度很高, 到了夜间除辐射降温之外, 它还以热交换方式加热大气, 所以夜间城区下垫面的感热通量依然为正, 这一特征可能是夏季夜间城市热岛维持较大强度的一个原因. 如前所述, 尽管城区观测结果具有较强的局地性, 但由于城市建筑物密集, 其结果在很大程度上体现了城市下垫面的热力学特征.

冬季观测结果与夏季类似, 较为明显的不同是城区夜间感热通量接近于零. 限于篇幅, 本文不再赘述. 此外, 有关城区观测点的辐射特性及地表能量平衡特征, 本研究已有专门的论文进行了详细的分析, 详情请见文献[17].

2.4 摩擦速度(u_*)特征

图 8 和图 9 分别为 2005 年夏季和 2006 年冬季城/郊两观测点的摩擦速度时间变化图, 其中市区观测点仪器输出的是 10 min 平均数据, 郊区观测点仪器输出的是 30 min 平均数据, 图中数据为小时平均结果. 由图上可以看出: 不论夏季还是冬季, 城区地表摩擦速度都大于郊区, 这一特征在夏季表现得更为明显. 计算结果表明: 在夏季观测期间, 市区观测点的摩擦速度平均值为 0.55 m/s , 郊区观测点为 0.41 m/s ; 冬季观测期间, 市区观测点的摩擦速度平均值为 0.43 m/s , 郊区观测点为 0.35 m/s . 夏季的值比冬季大, 反映出夏季的湍流活动较强. 而市区的值比郊区大, 则反映出城市下垫面对动力场的影响. 城市建筑物扰动平均气流场而产生机械湍流, 加强了湍流运动, 使得城市近地层中的动量通量增大, 因

而使得摩擦速度增加. 上述结果反映出城市与郊区下垫面动力学特性的差异, 并与城/郊平均风速的观测结果(郊区大于市区)相对应.

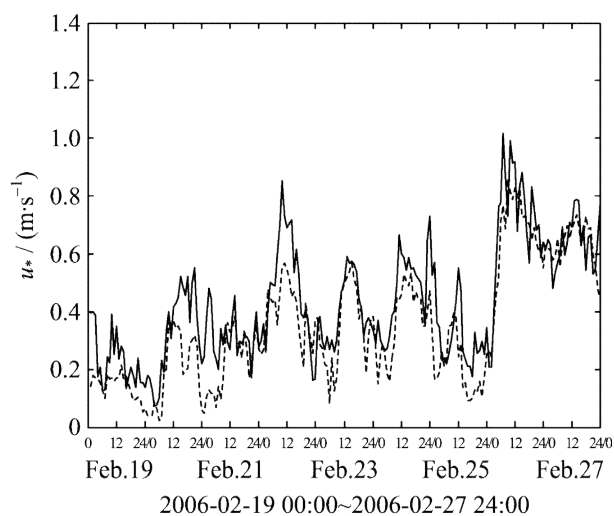


实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值

市区和郊区观测高度均为 2.2 m

图 8 夏季城/郊摩擦速度(u_*)比较
(2005 年 7 月 17 日~27 日)

Fig. 8 Comparison of friction velocity between the urban and suburban area in the summer (July 17~27, 2005)



实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值

市区和郊区观测高度均为 2.2 m

图 9 冬季城/郊摩擦速度(u_*)比较
(2006 年 2 月 19 日~27 日)

Fig. 9 Comparison of friction velocity between the urban and suburban area in the winter (February 19~27, 2006)

与郊区相比, 城区的摩擦速度较大, 机械湍流较强, 表明在城市区域机械湍流对边界层的发展起着更为显著的作用, 这有助于我们在研究边界层高度的预报, 特别是研究城市边界层高度的预报时, 将机械湍流作为一个更为重要的因子来引入和研究[18~19], 以期待能对城市边界层高度的预报做出一

定程度的改进.

2.5 归一化摩擦速度(u_* / u_{10})特征

为了研究摩擦速度与平均风速之间的关系,以及比较它们之间的关系在空间和时间的变化上有何异同,本文计算了归一化摩擦速度,来研究二者的关系及其变化规律.

归一化摩擦速度等于摩擦速度除以相同地点参考高度(本文取 10 m)上的平均风速,即

$$\frac{u_*}{\bar{u}},$$

其中, u_* 为摩擦速度, \bar{u} 为平均风速.由于

$$-\overline{u'w'} = u_*^2 = C_D \bar{u}^2,$$

其中, $-\overline{u'w'}$ 为动量通量, C_D 为拖曳系数,所以

$$\frac{u_*}{\bar{u}} = C_D^{1/2}.$$

归一化摩擦速度直观地反映出的是摩擦速度与平均风速两者大小的比值,以及拖曳系数的大小,实质上能够定量地衡量在这一地点平均气流转化为湍流的效率,表征动量输送的强弱程度,并体现出下垫面对气流拖曳的强弱.

图 10 为 2005 年夏季城区和 2006 年冬季城/郊两地的归一化摩擦速度.由图中可以看出,无论是在冬季还是夏季,市区观测点的归一化摩擦速度平均值为 0.20,而标准差较小(冬季为 ± 0.03 ,夏季为 ± 0.02)则表明数据的稳定性非常好,偏离平均值的起伏程度并不大,说明冬季和夏季归一化摩擦速度具有很好的一致性,始终为一个常数,并不随季节和时间变化.郊区观测点的归一化摩擦速度平均值为 0.11,其偏离平均值的起伏也不大(标准差为

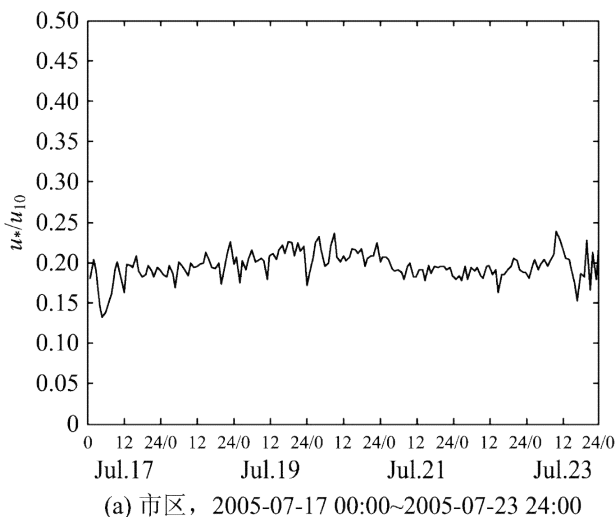
± 0.03),表明规律性也非常好.值得注意的是,2月21日和25日两天的归一化摩擦速度出现了较大起伏,原因是这两天出现了降雨,影响了观测结果.

归一化摩擦速度在同一地点保持为一个不随时间变化的常数,说明气流从平均场到湍流场的转化以及动量自上而下的输送有着极好的相似性和规律性,在任何地点,摩擦速度的大小总是正比于 10 m 处平均风速的大小,而这一比值常数只与地点有关.事实上,这一常数是与湍流活动的强弱和气流受障碍物或粗糙元拖曳、阻尼与摩擦的程度密切相关的.在城市区域,由于建筑物的拖曳、阻尼和摩擦较强,因而平均风速较低,而由于建筑物对平均气流场的扰动造成的机械湍流的加强,使得摩擦速度增大,因此使得市区的归一化摩擦速度值和拖曳系数较大.相反,在郊区,平均气流受到的拖曳、阻尼和摩擦较小,平均风速较大,而机械湍流较弱,摩擦速度较小,则使得归一化摩擦速度值和拖曳系数较小.

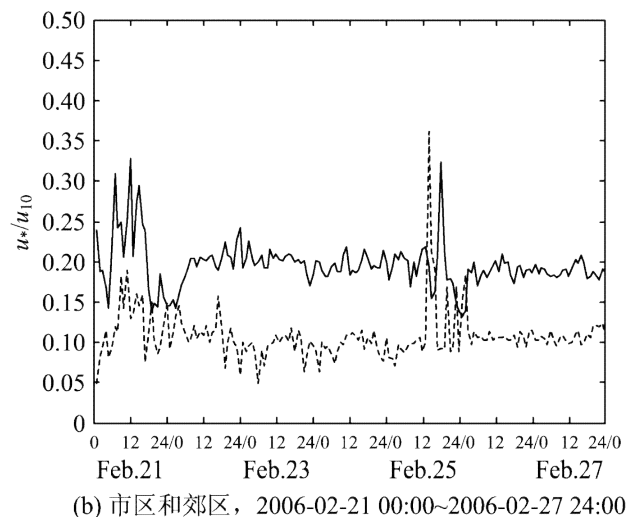
2.6 湍流能量分配特征

本文采用常规的时间序列分析方法对湍流时间序列进行处理.市区和郊区的湍流时间序列采样频率均为 10 Hz.计算平均时间取为 30 min,在进行去野点、去趋势等前处理后,计算出湍流时间序列在平均时段内的平均值,再用瞬时值减去该时段的平均值,便得到该时段湍流时间序列的脉动值以及方差值.

湍流速度时间序列的方差值实质上表征了湍流能量的大小.本文通过比较水平湍流方差 σ_w^2 与垂直湍流方差 σ_v^2 的方法,代替通用的 u, v, w 三分量湍流方差比较法,来更直观地研究湍流能量在水平和



(a) 市区, 2005-07-17 00:00~2005-07-23 24:00



(b) 市区和郊区, 2006-02-21 00:00~2006-02-27 24:00

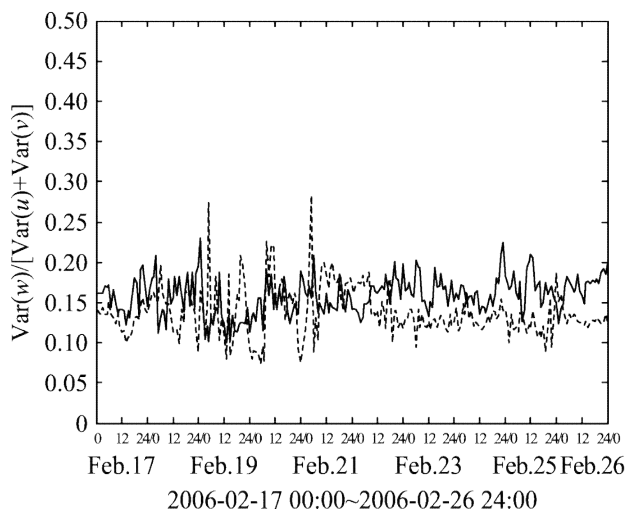
实线为市区观测值,虚线为郊区观测值

图 10 夏季和冬季城/郊归一化摩擦速度(u_* / u_{10})比较

Fig. 10 Comparison of the normalized friction velocity between the urban and suburban area in the summer and winter

垂直两个方向上的分配比例. 水平湍流方差 σ_{uw}^2 求取的方法为: 首先按常规方法对风速 u 和 v 的时间序列分别求取方差, 获得 σ_u^2 和 σ_v^2 , 然后将二者相加, 得到 σ_{uw}^2 , 即 $\sigma_{uw}^2 = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$. 垂直湍流方差 σ_w^2 的求取与 σ_u^2 和 σ_v^2 相同, 通过上述方法直接对垂直速度 w 的时间序列进行计算处理获得.

图 11 为 2006 年冬季城/郊两地大气湍流能量在水平与垂直方向上的分配比例图. 计算结果表明, 市区的 σ_w^2/σ_{uw}^2 平均值为 0.16, 郊区为 0.14, 市区的值大于郊区. 这说明在市区, 湍流能量中垂直分量所占的比重更大. 这是由于市区建筑物对气流的扰动, 使得湍流活动加强, 这种扰动不仅体现在水平方向, 也体现在垂直方向. 从观测结果看, 城区垂直方向上的湍能在总湍能中所占比例高于郊区, 这体现了城市下垫面的动力学特征.



实线为市区观测值, 虚线为郊区观测值

市区和郊区观测高度均为 2.2 m

图 11 冬季城/郊大气湍流能量在水平与垂直方向上的分配比例(2006年2月17日~26日)

Fig. 11 Comparison of the atmospheric turbulent kinetic energy partitions in horizontal and vertical direction between the urban and suburban area in the winter (February 17~26, 2006)

由于城/郊两处通量仪的观测点离地面较近, 湍流运动特别是垂直方向上的运动受到抑制, 垂直速度相对较小, 但所得结果仍然反映出城/郊两地湍流运动特征的差异.

3 结论

本文介绍了南京城市边界层综合观测实验, 并对实验所获观测资料进行了初步分析, 通过城/郊两点观测结果的对比, 获得了一些城市近地层微气象

基本特征, 并对结果进行了讨论. 所得主要结论为:

(I) 市区气温明显高于郊区, 体现出城市热岛效应的存在. 这一现象在夏季显得更为明显, 2005年夏季观测期间, 城/郊平均地面温差为 $3.06\text{ }^{\circ}\text{C}$; 而2006年冬季观测期间, 城/郊平均地面温差为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, 市区与郊区的气温差异随高度的增加而减小;

(II) 2006年冬季市区 10 m 高度处的平均风速为 2.22 m/s , 郊区为 3.26 m/s . 市区的风速比郊区约小 1 m/s , 反映出城市建筑物对气流的摩擦、阻尼和拖曳等作用, 这些作用使得平均风速在城市上空衰减, 并使一部分气流平均动能转化为湍流动能;

(III) 市区白天的感热通量与郊区相当, 但潜热通量远小于郊区, 因此市区的鲍恩比远大于郊区. 市区下垫面储热项在地表能量分配中占有较大份额, 成为城市热岛效应的主要成因. 夏季, 市区的感热通量全天为正, 而郊区则为白天正、夜晚负, 昼夜交替; 冬季, 市区的感热通量在夜间常为负值, 但量值比郊区小, 接近于零, 这些特征对热岛效应的形成有一定影响;

(IV) 夏季观测期间, 市区摩擦速度均值为 0.55 m/s , 郊区为 0.41 m/s , 市区比郊区高 34% ; 冬季观测期间, 市区摩擦速度均值为 0.43 m/s , 郊区为 0.35 m/s , 市区比郊区高 23% . 这种夏季大于冬季、市区大于郊区的现象表明, 由于冬/夏热力性质和城/郊下垫面动力学性质的不同而引起湍流活动的差异;

(V) 为了定量地衡量气流平均场转化为湍流场的效率, 表述动量输送和气流拖曳的强弱, 本文计算了归一化摩擦速度, 它等于摩擦速度除以 10 m 高度处的平均风速. 对冬、夏两季和城、郊两地的比较发现, 归一化摩擦速度具有很好的相似性和一致性, 它表现为一个不随季节和时间变化的常数, 常数的值只与地点有关, 对其均值的偏离程度很小, 具有良好的规律性. 市区的归一化摩擦速度值为 0.20 , 郊区为 0.11 , 表明在市区有更大的动量输送, 更强的气流拖曳, 更多的平均动能转化为湍流动能;

(VI) 本文通过比较水平湍流方差 $\sigma_u^2 + \sigma_v^2$ 与垂直湍流方差 σ_w^2 的方法, 来更直观地研究湍流能量在水平和垂直两个方向上的分配特征. 在 2006 年冬季观测期间, 市区的 $\sigma_w^2/(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$ 平均值为 0.16 , 郊区为 0.14 , 市区湍流能量在垂直方向所占比重高于郊区.

上述研究工作仅是对本项城市边界层综合观测实验进行了介绍并对观测结果进行了初步分析,获得了一些城市近地层微气象学的基本特征和一些有意义的结果.进一步的分析和研究工作仍在进行中,我们将在此基础上对城市边界层特征,特别是湍流特征,做深入细致的研究.

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所胡非研究员,中国科学院安徽光学与精密机械研究所周军研究员、吴晓庆研究员等人对本文外场观测实验的大力支持和帮助.

参考文献 (References)

- [1] 罗云峰,周小刚. 进一步提高项目管理水平,做好自然科学基金“十一五”大气科学发展战略工作[C]//2004年地球科学部工作报告. 北京:国家自然科学基金委员会,2004.
- [2] National Scientific Foundation. The Scientific Agenda [C]//USA: NSF, 2002.
- [3] 陈燕,蒋维楣. 南京城市化进程对大气边界层的影响研究[J]. 地球物理学报,2007,50(1):66-73.
- [4] 何晓凤,蒋维楣,陈燕,等. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究[J]. 地球物理学报,2007,50(1):74-82.
- [5] European Commission. Surface energy balance in urban areas[C]//Extended Abstracts of an Expert Meeting, WG-2 COST Action 715 (COST-715). Antwerp, Belgium; Report EUR 9447, 2001.
- [6] Belcher S E (Leading Researcher). URGENT Air Science Project, UWERN urban meteorology program [C]//European Commission, 2002.
- [7] Allwine K J, Shinn J H, Streit G E. Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83: 521-536.
- [8] Fisher B, Kukkonen J, Schatzmann M. Meteorology applied to urban air pollution problems: COST 715 [C]//Presented at the 6th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes. Rouen, France: 1999.
- [9] Craig K J, Bornstein R D. Urbanization of Numerical Mesoscale Models[C]//Workshop on Urban Boundary Layer Parameterizations (COST Action 715). Zurich: 2001.
- [10] Mestayer P G, Durand P, Augustin P. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): Set-up and first results [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 114: 315-365.
- [11] Oke T R, Sproken-Smith R A, Jauregui E, et al. The energy balance of central Mexico City during the dry season [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33: 3 919-3 930.
- [12] Kanda M, Moriwaki R, Roth M, et al. Area-averaged sensible heat flux and a new method to determine zero-plane displacement length over an urban surface using scintillometry [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105: 177-193.
- [13] Rotach M W, Vogt R, Bernhofer C, et al. BUBBLE-an urban boundary layer meteorology project [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2004; 10. 1007/s00704-004-0117-9.
- [14] 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[J]. 大气科学,2006,30(5):883-893.
- [15] 徐祥德,丁国安,卞林根. 北京城市大气环境污染机理与调控原理[J]. 应用气象学报,2006,17(6):815-828.
- [16] 刘红年,蒋维楣,孙鉴泞,等. 南京城市边界层微气象特征观测与分析[J]. 南京大学学报(自然科学),2008,44(1):99-106.
- [17] 王成刚,孙鉴泞,胡非,等. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析[J]. 南京大学学报(自然科学),2007,43(3):270-279.
- [18] 孙鉴泞,蒋维楣,李萍阳,等. 对流边界层顶部夹卷速度参数化的模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报,2003,33(1):119-124.
- [19] 伍大洲,孙鉴泞,袁仁民,等. 对流边界层高度预报方案的改进[J]. 中国科学技术大学学报,2006,36(10):1 111-1 116.