

# 北京城市气象观测试验进展

李炬 窦军霞

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

**摘要:** 2004年以来, 北京地区开展了一系列城市气象观测试验, 试验涉及城市边界层观测、城市暴雨适应性观测、复杂地形和城市局地环流观测、城市通量和能量平衡观测以及城市热环境观测。研究内容包括城市边界层结构、城市强降水可预报性、山谷风环流、海陆风环流、城市热岛环流、城市地表能量平衡、人为热估计和城市热岛时空分布特征等。通过观测试验, 揭示了北京地区城乡边界层结构特征和差异、强降水条件下的边界层结构、城乡地表能量平衡特征以及京津冀地区复杂的局地性环流特征。在大城市强降水的可预报性上, 利用适应性观测方法进行了尝试, 取得了一些初步的成果。利用固定点加密观测结合流动观测的方法, 获取了城市CBD的精细热岛分布。这些观测试验及其研究成果, 对于研究复杂地形条件下的大城市和城市群的气象问题, 具有很好的参考价值。

**关键词:** 城市气象, 外场观测试验, 适应性观测, 城市边界层, 城市热岛

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2014.01.005

## Progress in Urban Meteorological Experiments in Beijing

Li Ju, Dou Junxia

(Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089)

**Abstract:** This paper reviews urban meteorological experiments conducted in the city of Beijing since 2004. The series of experiments related to urban boundary observation, adaptive observations on urban torrential rain, local circulation observation, urban flux and energy balance observation, and urban thermal environment observations, which are aiming at urban boundary layer structures, predictability of torrential rain, mountain-valley breeze, sea breeze, urban heat island circulation, urban surface energy balance, anthropochory heat estimation, and urban heat island spatial-temporal variations. These experiments revealed characteristics of urban-rural boundary layer, boundary layer structures in rainstorms, urban-rural energy balance and complex local wind systems in Beijing-Tianjin-Hebei region. For predictability of rainstorms in mega-city, methods of THORPEX are tested with some preliminary results. Using densely fixed stations and mobile observation, a high resolution UHI distribution in CBD of the city is observed. The experiences and results of these experiments will be helpful and valuable for studying urban meteorology in a big city and city clusters with complex terrain.

**Keywords:** urban meteorology, field campaign, adaptive observation, urban boundary layer, urban heat island

### 1 引言

城市大气条件和过程的观测是提高城市天气气候认识的基础。自1820年Luke Howard首次利用温度直接观测研究城市气候和城市热岛以来, 城市气象观测已有近200年的历史<sup>[1]</sup>。针对城市气象和城市环境问题, 国际上比较有代表性的综合观测试验和计划有: 法国UBL/ESCOMPTE-CLU试验(马赛)<sup>[2]</sup>、希腊MEDCAPHOT-TRACE试验(雅典)<sup>[3]</sup>、欧盟COST研究计划<sup>[4]</sup>、美国URBAN 2000(盐湖城)<sup>[5]</sup>、美国CAP-

LTER(凤凰城)<sup>[6]</sup>、美国Joint Urban 2003(俄克拉荷马)<sup>[7]</sup>、英国的PUMA(伯明翰)<sup>①</sup>、瑞典BUBBLE(巴塞尔)<sup>[8]</sup>、日本COSMO试验<sup>[9]</sup>、墨西哥MIRAGE(墨西哥城)<sup>②</sup>等。这些观测试验涉及: 城市地表参数的获取(反照率、粗糙度、湿参数)、地表能量平衡、城市边界层结构、城市热岛效应(UHI)、城市环流与中尺度局地环流相互作用、城市对降水的影响和城市空气污染等内容。这些研究提升了对城市影响天气、气候的机理以及城市空气质量问题的认识水平。WMO在全球开展了一系列城市气象和环境研究(GURME)<sup>③</sup>项目, 主要针对空气质量及其相关的气象观测, 项目包括: 北京大气环境污染控制机制

收稿日期: 2013年5月30日; 修回日期: 2013年9月3日

第一作者: 李炬(1971-), Email: jli@ium.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106050);  
北京市朝阳区科技计划项目(KC1103); 国家  
科技支撑计划(2008BAC37B02)

① <http://urgent.nerc.ac.uk/Air/Projpages/A1.htm>

② <http://urgent.nerc.ac.uk/Air/Projpages/A1.htm>

③ <http://mce2.org/wmogurme/>

研究项目、莫斯科超大城市可持续发展气象服务、用被动采样仪进行空气质量观测（美国NOAA）、拉丁美洲城市空气质量预报的改进以及上海城市气象和环境研究示范。在国内，大规模的城市气象观测和试验主要集中在2000年之后，2001—2003年北京开展的大气边界层动力、热力、化学综合观测试验（BECAPEX），获取了北京城市大气动力和大气化学三维结构特征<sup>[10]</sup>；长江三角洲地区低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用研究项目在长江三角洲地区开展了水、热与物质通量输送和转化的综合观测试验<sup>[11]</sup>；南京市城市边界层观测<sup>[12]</sup>与我国东部大规模城市化的气候效应及对策研究在长三角城市群区，针对地表物理特性、陆面过程、城市冠层和大气边界层、大气污染物及其辐射特性等开展了多过程的协同强化观测试验。

针对北京城市的气象观测和研究不仅起步早、数量多，而且受到更多的关注。本文主要介绍了2004年以来，在北京及周边开展的城市气象观测试验的情况和相关进展。这些观测试验，涉及城市边界层观测、城市暴雨适应性观测、局地环流观测、通量观测和城市热环境观测等。

## 2 北京地区城市气象观测试验

### 2.1 北京城市边界层观测试验

城市区域复杂的下垫面性质，突出的非均匀性和建筑物导致的高粗糙度，其辐射性质、热容量、含水量、粗糙度等热力、动力学性质均与一般的自然

地理环境有很大的差异，形成了城市区域特殊的大气边界层结构。城市复杂下垫面与大气边界层相互作用研究，近年来已成为大气科学研究的一个重要方面。2004、2005年夏季，中国气象局北京城市气象研究所开展了北京城市大气边界层和复杂下垫面的能量收支的综合观测试验研究。2004年夏季观测主要针对城乡边界层结构进行观测。自北向南，分别在西三旗（郊区）、宝莲体育公园（城区）、南郊观象台（郊区）布设了3台风廓线雷达，同时在每个观测点进行每天6~8次的系留艇探空。在城区站还利用激光雷达进行边界层高度的连续探测（图1和表1）。期间，南郊观象台进行了每日4次的加密无线电探空观测。

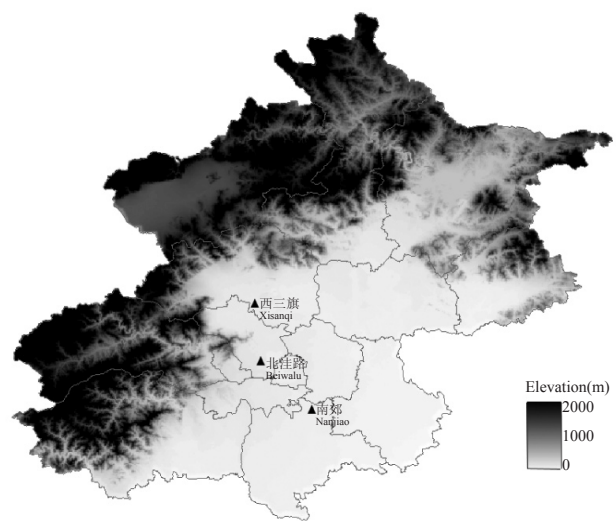


图1 观测站点（2004年夏季）

表1 观测站点和仪器列表

测量仪器	仪器型号	测量要素	观测地点	时间	观测频次	有效观测次数
系留艇	VAISALA TTS111	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	西三旗	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	212
留艇	VAISALA TTS111	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	北洼路	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	247
系留艇	AIR TS-2A	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿	南郊	2004年7月31日—8月31日	每日6~8次，遇雨和大风停测	216
风廓线雷达	Airda-3000车载边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	西三旗	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
风廓线雷达	23所边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	北洼路	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
风廓线雷达	14所对流层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	南郊	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
涡动相关	CSAT3、LICOR7500	脉动量 ( $u, v, w, H_2O, CO_2$ )，四分量辐射、净辐射、感热通量、潜热通量、土壤热通量	北洼路	2004年7月31日—8月31日	连续观测	
激光雷达	安光所便携式米散射激光雷达	气溶胶后向散射强度、消光系数、边界层高度	北洼路	2004年8月1日—9月3日	整点探测，每小时1次，加密期间每半小时1次，遇雨停测	
系留艇	VAISALA TS-5A	水平风速和风向、气压、气温、相对湿度、比湿、 $O_3$	北洼路	2005年8月3—31日	每日2次，遇雨和大风停测	35
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	房山	2005年7月18日—9月14日	连续观测	
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	北洼路	2005年7月19日—9月26日	连续观测	
风廓线雷达	Airda-3000边界层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	通州	2005年7月28日—9月16日	连续观测	
风廓线雷达	14所对流层风廓线仪	水平风速和风向、垂直速度	南郊	2005年7月27日—9月16日	连续观测	
地基微波辐射计	TP/WVP-3000	温度、湿度、液态水	南郊	2005年8月1日—9月30日	连续观测	

这次观测试验, 获得了大量的边界层风、温、湿观测资料。利用探测资料, 对夜间边界层低空急流进行了研究, 初步揭示了北京地区边界层低空急流的特征<sup>[13]</sup>。30%的夜间观测记录出现了低空急流。急流平均高度为200m, 最大出现频率在140m左右, 90%急流出现在320m以下。W、SW、SE是夜间低空急流的主要风向(图2)。不同观测地点低空急流在速度、风向和高度上存在着明显差异。城区低空急流高度大部分时间比郊区高。在夜间稳定边界层条件下, 低空急流与局地山谷风环流强弱变化有很好的相关。进一步的成因分析认为, 斜坡地形产生的热成风、山谷环流可能是北京夏季夜间低空急流形成的主要原因。

为获取城区大气边界层结构演变特征, 利用便携式米散射激光雷达在北洼路进行连续观测。观测数据显示: 北京城区夏季大气边界层高度相对稳定, 多分布在1.8km以下, 平均值为0.68km; 大气边界层内存在浓度较高的气溶胶粒子, 平均光学厚度(3km以内)在0.30左右<sup>[14]</sup>。

2005年观测是对2004年观测的延续和补充。主

要的探测仪器设备是4台边界层风廓线雷达、1台地基微波辐射计、1个系留艇(表1)。观测的目的是捕捉强天气条件城市边界层精细的热力和动力结构。在观测期间, 捕捉到了数次强降水天气过程。通过对强降水个例的观测资料进行分析, 发现降水前十几小时就会出现双层低空急流, 急流层内结构复杂, 呈现多中心结构<sup>[15]</sup>。这些精细的温度、水汽、风的垂直观测资料, 有助于理解和解释暴雨系统的演变。为了解北京城市O<sub>3</sub>的垂直分布特征, 还利用系留艇对臭氧的垂直分布进行了观测。

## 2.2 环北京夏季暴雨适应性外场观测试验

城市对高影响天气造成灾害的“放大”效应已被广为认识。一些极端天气在城市出现, 往往会造成城市运行的混乱, 并带来巨大的财产损失, 提高城市高影响天气的预报准确率被世界气象组织视为21世纪具有社会影响力与科学挑战的重要问题之一<sup>①</sup>。2009和2010年, 针对北京夏季暴雨预报难题, 中国气象局北京城市气象研究所联合北京区域气象中心五省(区、

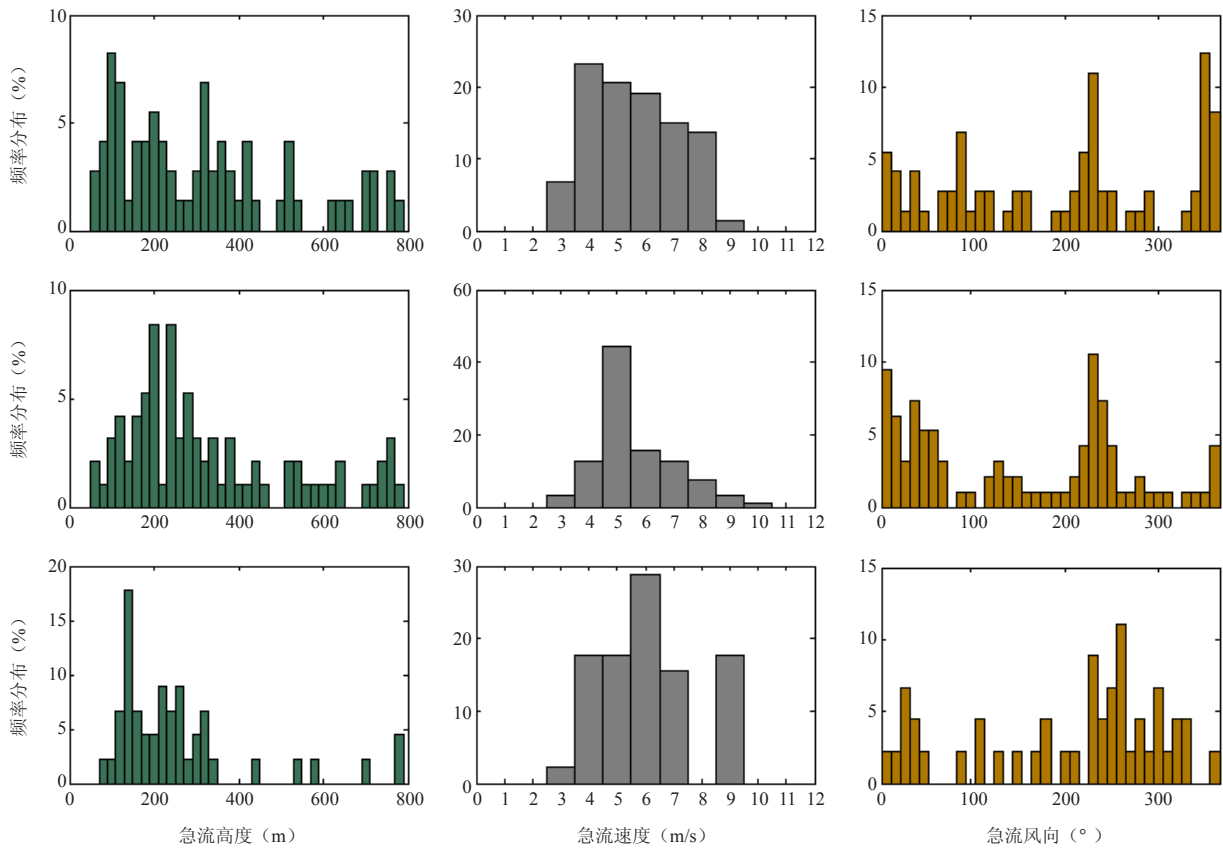


图2 基于2004年夏季观测资料统计的西三旗(第一行)、北洼路(第二行)和南郊(第三行)的急流高度、急流速度、急流风向出现频率分布

① 《观测系统研究与可预报性试验中国计划(THORPEX-China)(版本1.0)》, <http://www.thorpexchina.org.cn/Website/index.php?ChannelID=4&NewsID=15>

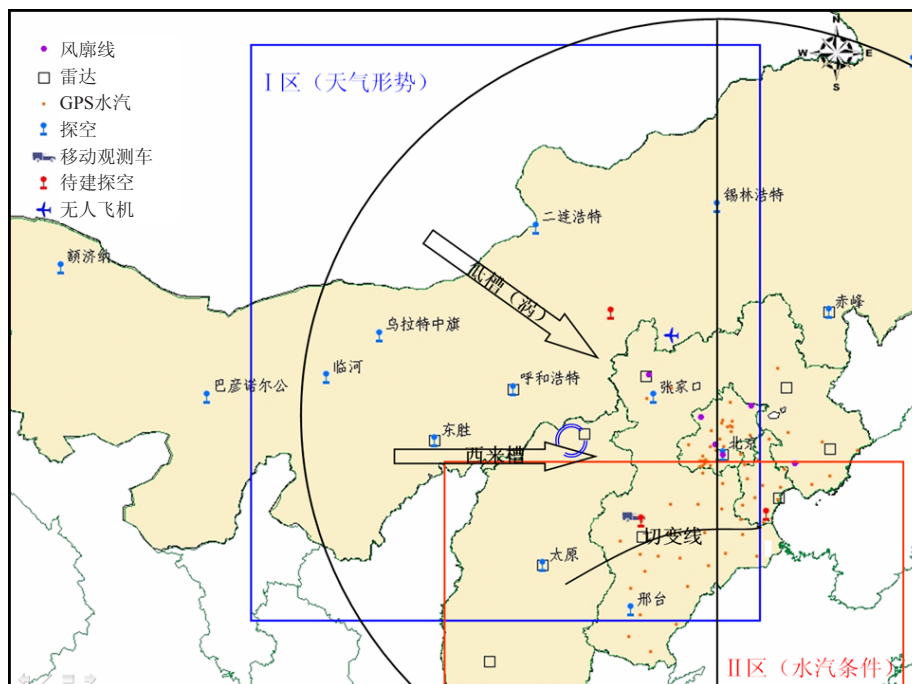


图3 观测仪器和布点 (2009年7—8月)

市) 气象局、中国科学院大气物理研究所、中国气象局气象探测中心等单位, 开展了环北京夏季暴雨适应性外场观测试验, 针对高影响天气对其上游地区预报敏感区域实施加密观测, 旨在将这些资料同化到数值模式中, 提高该高影响天气数值预报水平。

试验的主要目标是: 在北京夏季24h内暴雨预报的上游敏感区采用GPS探空、无人驾驶大气探测飞机等技术手段进行空间加密, 结合对现有气象站网进行时间加密的方法, 建成环北京夏季暴雨适应性观测系统与实施目标观测的指挥系统。对北京地区近10年来暴雨资料进行了统计分析, 确定了影响北京夏季暴雨的主要天气型、关键区和关键观测要素。在此基础上, 对主要的影响天气系统, 设计了针对关键区和关键观测要素的观测布局方案。2009年7—8月, 包括内蒙古、山西、河北、北京、天津在内的广大地区, 开

展了以探空观测为主的加密观测和针对降水过程的加强观测(图3)。根据数值预报结果, 在天气系统移动路径上依次启动加密探空(每天6次/8次)。探空观测站详细信息见表2。除固定探空站点观测外, 还试验了机动观测: 利用无人气象观测飞机在内蒙古太仆寺旗草原择机进行了多次下投探空试验, 试验包括: 无人挂载下投探空仪试验; 降水天气条件适应性飞行试验; 下投探空探测试验; 利用L波段移动探空雷达车快速机动到山西山阴进行了探空加强观测。

利用条件非线性最优扰动方法(CNOP)<sup>[16]</sup>和采用集合预报相关方法对2009年观测到的降水个例进行了敏感区诊断研究。对2009年7月23日北京地区强降水个例进行了分析(图4), 对于直接影响系统为飚线的局地强对流过程, 暴雨发生前24h敏感区中的探空观测的同化, 能够在模式中形成更加有利于飚线形

表2 环北京暴雨观测探空观测站

站号	站名	经度(°E)	纬度(°N)	海拔高度(m)	观测频次	观测频次	探空仪类型	备注
					(加密观测期)	(加强观测期)		
53068	内蒙古二连浩特	111.97	43.65	971	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
53463	内蒙古呼和浩特	111.68	40.82	1065	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
54102	内蒙古锡林浩特	116.3	44.13	1012	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
54543	内蒙古东胜	109.98	39.83	1462	3次/d	6次/d	L波段	业务探空站
53513	内蒙古临河	107.42	40.75	1039	3次/d	6次/d	59-701	业务探空站
53772	山西太原	112.55	37.78	790	3次/d	6次/d	400M-701	业务探空站
	内蒙古镶黄旗	113.83	42.23	1322	3次/d	8次/d	RS-92	新增临时探空站
	天津大港	117.48	38.15	7	3次/d	8次/d	RS-92	新增临时探空站
	山西山阴	112.805	39.535	1105		8次/d	L波段	车载移动探空

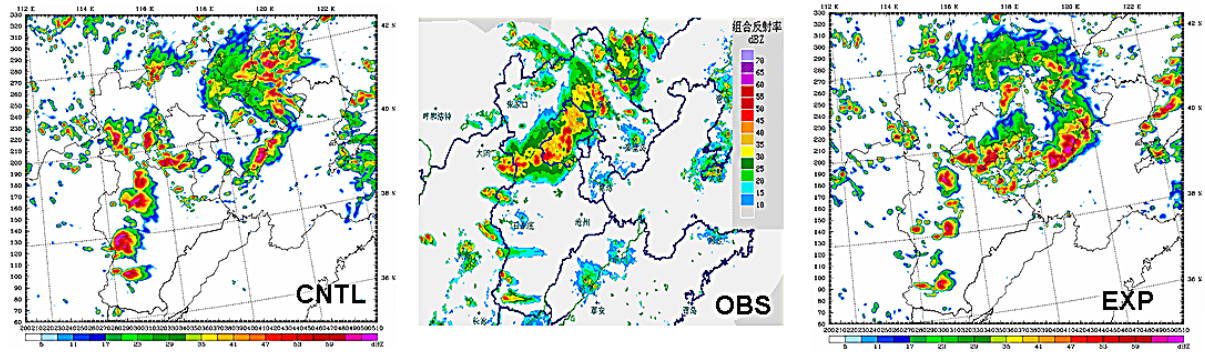


图4 敏感区观测资料同化效果检验  
(CNTL: 控制试验不加观测资料; OBS: 雷达反射率; EXP: 同化敏感区内的1个探空资料)

成和发展的环境条件，这与OSSE试验结果类似，证明在敏感区进行目标观测确能改进预报效果。

在2009年观测和分析的基础上，2010年夏季结合预报的敏感区对降水进行了实际的目标观测试验。基于敏感区的理论计算区域，采用固定站点时间加密观测和移动观测相结合的方式，在敏感区内及附近的业务探空站进行时间加密观测，在敏感区内及附近的合适地点增加机动观测。针对2010年8月18日的降水过程，利用河北邢台、张家口、内蒙古呼和浩特3个业务探空站进行了8次加密观测。这次试验取得了一定的效果，为检验和改进目标观测系统提供了很好的机会。

### 2.3 京津冀城市群边界层综合观测试验

我国是当今世界上城市化发展规模最大、速度最快的地区之一。城市面积扩展迅速，特别是城市群发展速度之快，在世界城市发展史上是罕见的，其中尤以长江三角洲、珠江三角洲和京津冀地区三大城市群的迅猛发展为代表。从水平范围在几十千米量级的单个城市到几百千米量级的城市群，城市对局地天气、气候的影响愈加明显。京津冀地区处于华北平原，东临渤海，西部是太行山山脉余脉的西山，北部是燕山山脉的军都山，两山在南口关沟相交，形成一个向东南展开的半圆形大山弯，通常称之为“北京湾”。复杂的地理环境导致了海陆风、山谷风以及城市热岛作用产生的城市环流，这些中小尺度的局地系

统对该地区的强降水、雾霾等高影响天气产生着重要的影响。为深入了解城市群复杂下垫面在高影响天气的形成、发展和衰减过程中所起的重要作用，国家科技支撑计划“京津冀城市群高影响天气预报中的关键技术研究”围绕京津冀城市（群）局地环流及其对城市高影响天气过程影响开展了综合观测科学试验，重点对城市（群）山谷风环流、热岛环流和海陆风环流及边界层结构进行观测。从渤海湾（天津大港）到太行山脉与燕山山脉交汇处（北京小汤山），共布设了7台边界层风廓线雷达进行同步观测（图5）。该区域还有北京（325m）、天津（255m）2座气象塔。观测时间为2010年7—8月，为期2个月。

观测结果表明，北京存在明显的山地—平原风环流。由于所处地理位置不同，小汤山、海淀、南



图5 京津冀城市群边界层综合观测试验仪器布点

郊观象台和榆垓的主导风向有所不同。山地平原风环流的厚度也有所不同，小汤山、南郊观象台和榆垓山地—平原风环流的厚度分别约为1500、650和550m，同时有个例分析表明，平原风的厚度可达1400~1700m。北京山地—平原风的水平范围几乎可覆盖北京整个平原地区。天津大港的风廓线雷达观测数据显示，大港300m以下中午至傍晚为东南风，其余时段为东北风，表现为较明显的海陆风环流。400~1950m以上，白天风速较小，表现为偏北风；夜间风速较大，表现为东北风。根据天津武清的风廓线雷达资料，武清的海陆风环流不明显。300m以下上午表现为西北风，下午表现为西南风。白天风速较小，夜间风速较大，表现为东北风。400~1050m夜间及上午均为东北风，下午表现为微弱的西南风。从天津大港和武清的海陆风日来看，海风的厚度大概就在300m左右。图6(a、c)为WRF模拟的2010年8月6日02和06时风场沿(116.084°E, 40.13609°N)和(117.8276°E, 38.51733°N)的垂直剖面图，其中横坐标第8、16、38和62点分别近似代表海淀、南郊

观象台、武清和大港，右为风廓线雷达观测的风廓线。数值模式的结果与地面实测风场、温度场以及风廓线雷达的观测结果有较好的一致性。从模拟结果来看，海风可以到达北京地区，甚至可达北京市区。海风一般在下午产生，但是个例模拟结果也表明，海风也有可能在10时产生。

## 2.4 京津城市复杂下垫面通量和能量平衡观测

在大气边界层中，湍流运动是能量、物质和水分输送的载体，湍流通量一直是城市边界层综合观测试验中的基本组成部分。自20世纪90年代后半叶以来，涡度相关技术开始被广泛地应用于大气、陆面、遥感、生态等多个学科领域，并被认为是获取湍流通量的最优方法<sup>[17]</sup>。该方法能够较准确地估计出地表与大气间的湍流交换量，对大气模式，特别是陆面模式的检验和发展、遥感产品的地面验证等都具有非常重要的作用<sup>[18]</sup>。中国气象局北京城市气象研究所充分利用京津科研设备和资源，利用涡动相关仪器在北京和天津的市区、城郊结合区和远郊同步开展通量观测，探讨用地属性、土地覆盖类型及所占比例以及建筑物的

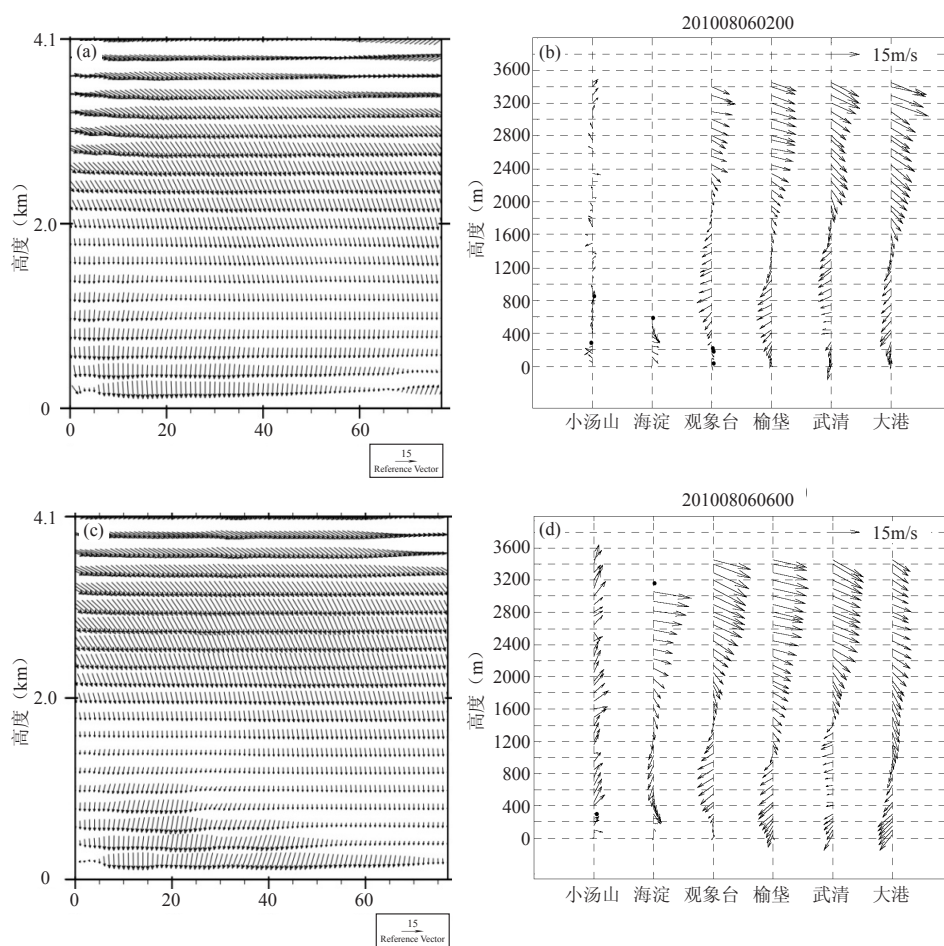


图6 2010年8月6日02和06时WRF模拟结果与风廓线雷达观测对比

表3 京津城市通量观测站仪器设置

地理位置	土地利用类型	铁塔高度(m)	观测高度(m)	物理量	仪器名称	仪器型号	采样频率	观测时间
中国科学院大气物理研究所LAPC	市内	325	47、140、280					2009年7月至今
顺义区气象局	城郊结合区	45	36	三维风速和温度 水汽/CO <sub>2</sub> 向上/ 向下的长/短波 辐射	超声风速温度仪 CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O分析仪 四分量辐射表	CSAT3 LI-7500 CNR1	水汽/CO <sub>2</sub> 、 三维风速和温 度: 10Hz; 辐 射: 1/min	2007年7月至今
密云县气象局	城郊结合区	38	36					2011年9月至今
上甸子	远郊	80	63					2011年7月至今
小汤山	远郊	10.2	9					2008年5月—2010年4月
天津气象塔	市内	255	40、120、220					2010年5月至今
天津武清	城郊	38	36					2011年7月至今

高度、布局等因素对湍流通量的影响过程、影响机制和影响程度。在此基础上,以观测值检验城市冠层/陆面模式参数化方案的计算结果,并改进、完善参数化方案;进而通过Noah/SLUCM陆面模式,检验其对城市地表能量平衡各分量的模拟效果。以期能为改善城市冠层/陆面模式物理过程,提高城市数值天气预报精度,以及城市化进程对天气、气候的影响提供科学依据。试验选择位于北京和天津的市区、城郊结合区以及郊区的7个地点建立通量观测站点,利用各站点的气象观测塔搭载涡度相关仪和气象梯度观测系统仪器开展观测,各通量观测站点的位置和仪器设置情况(表3)。

利用位于北京市北三环与北四环之间325m气象塔上140m高度的湍流观测资料,对该区域2009年6月—2011年12月共919d二氧化碳(CO<sub>2</sub>)通量的时间变化及各方位的分布特征进行了分析研究,并计算了CO<sub>2</sub>年排放量(图7)。结果表明,CO<sub>2</sub>通量受交通因素影响明显,各季节CO<sub>2</sub>通量日间早、晚峰值与车流量高峰时间相对应,这一特征在冬季表现尤为突出。冬季消耗能源取暖会显著增加CO<sub>2</sub>的排放量;受供暖排放和植物休眠的影响,冬季CO<sub>2</sub>通量值全天均高于其他季节,其日平均值为30.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,显著高于春、夏、秋季的日平均值15.2、17.9和15.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (*t*-test, *P*<0.001)。

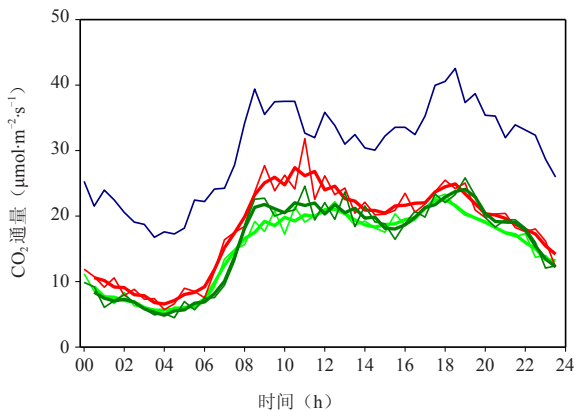


图7 2009年6月—2011年12月春(浅绿色)、夏(红色)、秋(深绿色)、冬(深蓝色)季节CO<sub>2</sub>通量日变化特征(细线条代表日平均值,粗线条表示3点滑动平均)

CO<sub>2</sub>通量在各方位的分布特征表明,源区内人工建筑面积所占比例越大,CO<sub>2</sub>通量值越高,而植被覆盖比例较高的方位,其CO<sub>2</sub>通量值相应较小。观测点附近区域是CO<sub>2</sub>的排放源,且年平均排放量达到30.0 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,但仍小于伦敦的年排放量35.5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [19]。在北京高密度住宅区CO<sub>2</sub>通量观测的基础上,可以对人为热总量以及人为热来自汽车排放、居民日常生活耗电和燃烧天然气排放、冬季取暖排放以及人体新陈代谢产生的热量进行计算。结果表明,汽车行驶产生的人为热在冬夏两季节人为热日总量中均占有较大比例;此外,供暖产生的人为热是冬季人为热总量高于夏季的重要原因。

利用位于北京325m气象塔(城区)上140m高度的以及顺义通量观测站点(郊区)36m高度的湍流观测资料,对这两个站点的辐射和能量平衡各分量的数值大小、时间变化规律以及能量分配特征等进行了分析研究。结果表明,夏、冬季节,白天郊区净辐射值小于城区,但夜间高于城区,郊区的净辐射日平均值总小于城区,且冬季差异较大。郊区夏、冬季节昼间的反射率总高于城区。在能量的分配中,夏季潜热通量占了最大比例,但冬季所占比例最小。在郊区观测站点(顺义),显热通量在净辐射中所占比例夏、冬季节总高于热贮量所占比例,但城区(大气所铁塔)情况不同,其冬季时是热贮量所占比例最高。

## 2.5 北京中央商务区(CBD)热环境观测

城市热岛效应是人类活动对气候系统产生的最显著的城市气候效应。在我国城市化进程已到了前所未有的高度的背景下,定量研究城市功能区热环境的时空演变特征,制定相应的城市高温热环境防范和改善措施已成为城市可持续发展的一项重要任务。通过开展城市热岛效应的观测和研究不仅对认识城市微气候特征及边界层现象等具有重要价值,而且在城市建筑设计、城市规划、城市环境保护、生态城市建设、城市能源利用和城市居民生活健康等方面都具有重要的现实意义。中国气象局北京城市气象研究所、朝阳区气象局等多家单位联合,从2011年开始在北京CBD地

区开展了流动观测结合固定观测的城市热环境观测。在北京CBD一块 $1.47\text{km} \times 0.88\text{km}$ 区域内，建立了32个温湿度观测站（图8）。同时，利用电动自行车，开展了对该区域进行热环境流动观测（每季度至少1次）。将便携式温湿传感器、GPS等设备安装在电动自行车上，在试验区内分2组同时进行流动测量。温湿度、经纬度坐标每秒钟采集1次，每次测量约1h，测量范围覆盖整个试验区。观测试验表明电动自行车可以胜任在较小的城市区域开展流动观测。与常见的汽车流动观测相比，电动自行车具有自身不发热、机动灵活性强、道路适应能力强等优点。

基于一年的固定观测资料分析结果表明：CBD观测试验区2012年夏、冬季各月平均气温分布特征比较稳定，绿地覆盖的小区、公园夏季平均气温较低，而主要交通路段交叉点和高层建筑密集区为气温高值中心。夏季平均气温的高值中心较低值中心偏高 $1.0^{\circ}\text{C}$ 左右；冬季，平均气温的低值中心较高值中心偏低 $0.6^{\circ}\text{C}$ 左右。下垫面类型和人为热排放等差异是影响北京CBD观测试验区近地面气温空间分布的主要原因。夏、冬季CBD观测试验区与朝阳站之间的地面气温差值即附加城市热岛效应周内变化具有明显的时间特征，清晨05时CBD观测试验区附加城市热岛效应很明显，夜间均比白天强、冬季比夏季明显，周六夜间均出现一个峰值，周内最高、最低及平均气温差有类似的分布趋势，工作日温差高于非工作日温差，呈现出

“周末效应”。CBD观测试验区夏、冬季平均附加城市热岛效应在一天24h内存在明显的时间变化特征。CBD观测试验区夏、冬季逐小时的平均气温均高于朝阳站，且夜间差别较大、日间差别较小。附加城市热岛强度在夜间维持较大值，日出后强度急剧下降，最低值出现在14时附近，日落后附加城市热岛强度开始增大，至午夜左右达到峰值。夏季上午UHI剧烈变化开始时间早于冬季，分析主要原因是由于冬季日出较晚，太阳辐射影响时间滞后造成的；中午时段，冬季UHI强度比夏季弱。

不同天气条件下（图9），CBD区域UHI空间分布特征均比较一致，并表现为白天弱夜间强，UHI强度最高出现在夏季晴好、微风少云天气条件下，最高值达 $4.3^{\circ}\text{C}$ ；多云、阴天天气条件下，UHI在白天和夜间均较弱；降水天气条件下，UHI昼夜差异最小，说明太阳辐射对UHI强度的影响起到关键作用。多云阴天、降水、雾霾天气条件增加了对太阳辐射的遮挡以及城区人为热排放等原因，造成冬季UHI强度普遍高于夏季，且夜间更为明显。不同降水相态对UHI的影响不同，冬季降雪对UHI强度影响较夏季降雨天气更为突出，雾霾天气条件下，CBD区域UHI强度冬季明显高于夏季。不同天气条件下CBD区域UHI表现不同，城市下垫面特征对UHI强度影响较大，夏、冬季UHI空间分布基本一致。从UHI效应差异分析结果看，下垫面条件、日照和太阳辐射、风力、能见度、

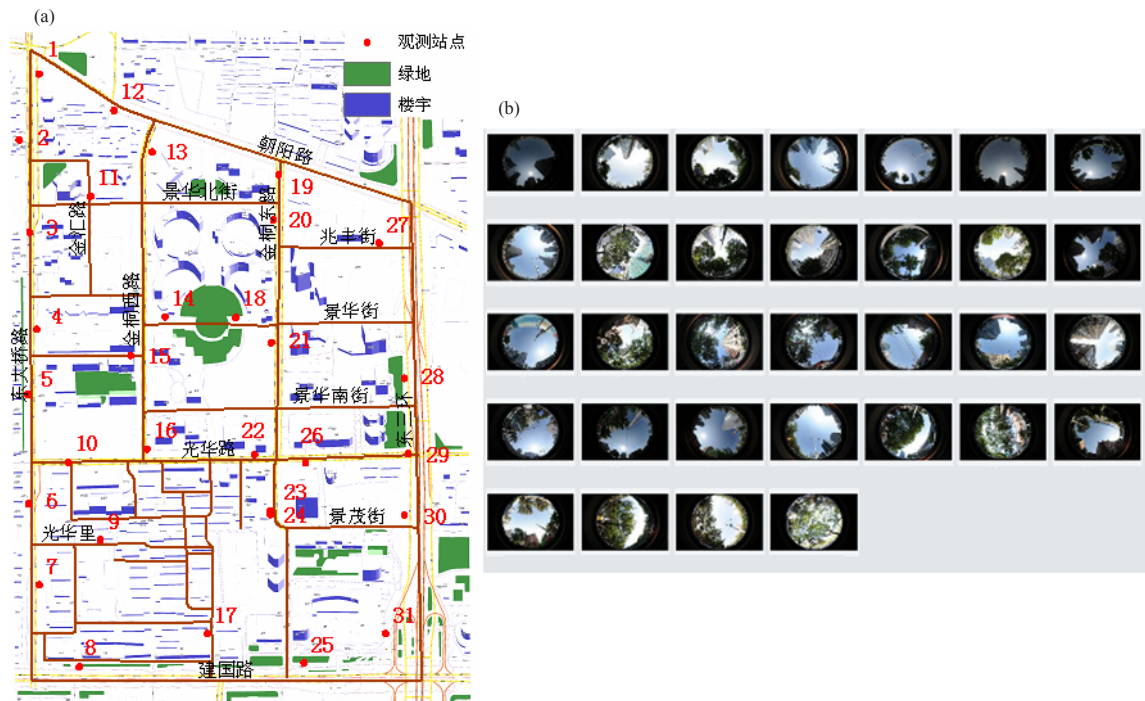


图8 北京CBD观测试验区下垫面特征及其测点分布  
(a) 试验观测区下垫面特征及其测点分布；(b) 观测点天穹可见图（鱼眼图）

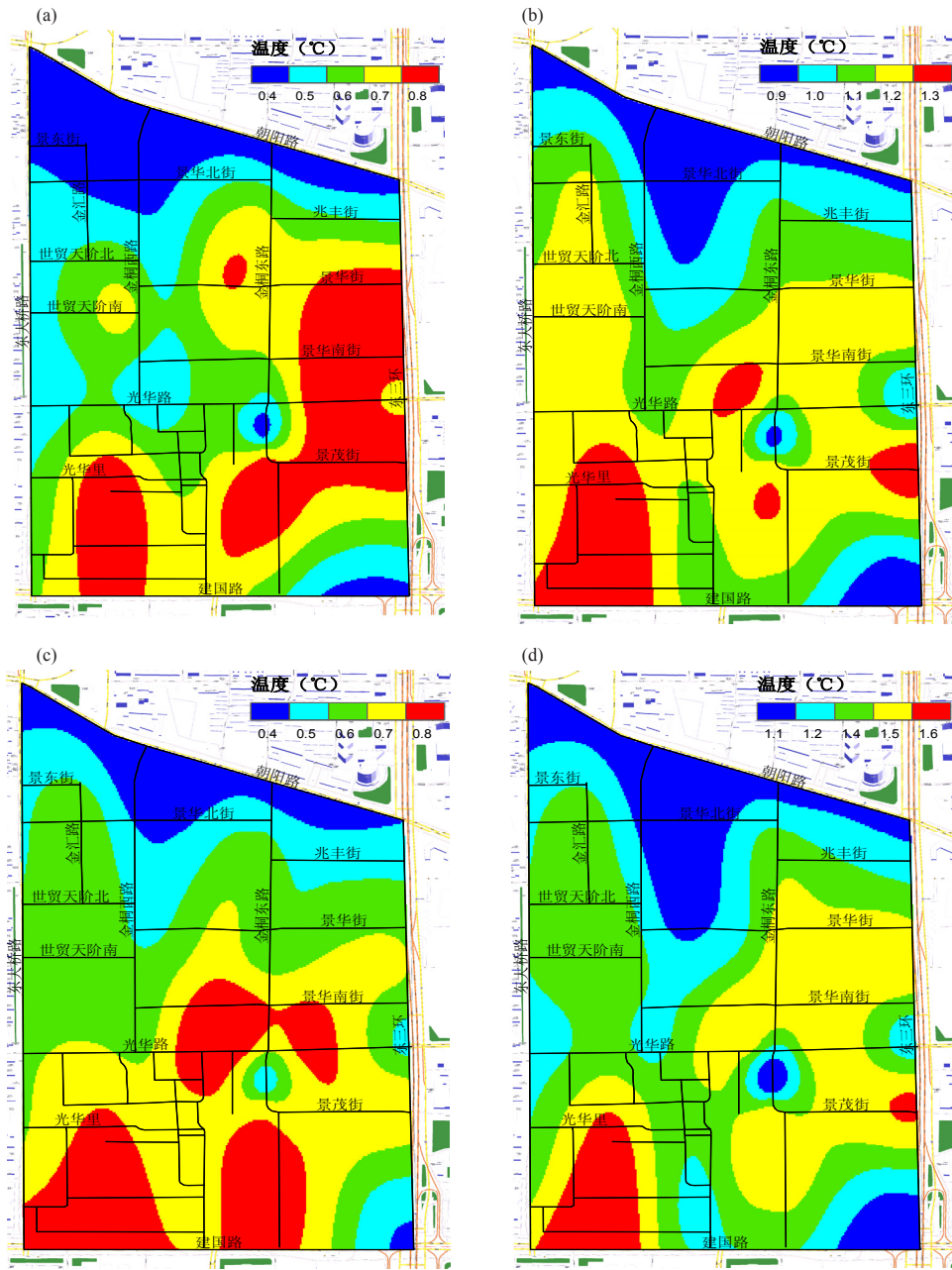


图9 冬季不同天气条件下CBD区域附加城市热岛效应空间分布  
(a) 晴好微风少云天气; (b) 多云阴天天气; (c) 降水天气; (d) 雾霾天气

空气湿度、人类热释放、冬季城市供暖等对UHI效应均有影响，但不同天气条件下，各个因子的影响程度具有明显差异。

### 3 讨论和展望

本文介绍了近年来在北京开展的城市气象观测试验，目的之一是让更多的学者了解相关的试验情况，进而对观测试验取得的大量观测数据进行深入应用和挖掘。同时，这些观测试验对于研究与北京类似的、处于复杂地形条件下的超大城市的气象和环境问题，

也有很好的借鉴意义。在北京开展了一系列的城市气象观测试验，观测针对和涉及的主要目标有：城市对其上大气的影响作用（城市热岛、城市冠层水热通量和平衡、城市边界层结构），提高城市强降水的预报，城市群局地环流及其与高影响天气相互作用。观测尺度从街道、小区到城市和城市群，垂直方向覆盖了整个城市边界层。综观国内外城市气象观测研究，大致可以看到城市气象观测呈现出四个发展趋势：观测从描述城市大气基本状态到更多关注地气之间的能

量和物质交换；研究尺度上强调对不同尺度进行观测和研究；新科技推动了对城市地气相互作用的观测，新的传感器、新技术和新方法被大量采用；观测上更多地采用业务观测和科研观测相结合的方式，力争获取较长时间的观测资料。

如进一步细致分析，国内外城市气象观测试验存在很多差异。（1）与国外城市气象观测和试验相比<sup>[1]</sup>，国内观测和试验更多面向当前城市气象业务和服务需求。国外则更多与城市气象、边界层理论和机理研究相结合。国内的观测试验在规模上不逊于国外，但在学术界的知名度和影响力却远不及国外。

（2）从试验的参与者来看，国外此类试验往往会聚集众多的研究部门、学校、政府部门甚至公司的参与，观测资料和仪器资源往往可以实现很好的共享。而国内不仅参与者少，且在资源和资料互惠和共享上很难做好。国外知名的观测试验，往往具有国际特点，即参与者来自多个国家和组织。国内在开展国际性的观测试验方面，尚缺乏足够的经验和尝试。

（3）国外的观测试验在设计之初，就有很高的参与度。参加试验各方能够结合自身需求和条件，对观测试验设计提出意见，有效保证了观测试验在研究上的深度和涉及研究领域的广度（包含各类参与者的需求）。而国内的观测试验，在前期的设计时，往往参与度就不够，留给试验设计和筹备的时间也太短。有可能导致对研究问题缺乏足够细致和深入的考虑，从而影响观测试验最终的成果和效果。（4）国内观测试验获取的数据，由于各种因素的制约，不能为更多的研究者共享。这些情况，导致国内观测试验无论是成果和论文数量还是影响力均无法与国外相比，也是今后我们开展类似观测试验应当注意和改进的。

当前，如何提高城市应对极端天气的弹性和防御能力，减少气象灾害损失，减缓城市热岛效应，改善空气质量等问题，是政府和民众所关心的热点问题。不仅是我国各大城市，全球很多城市也面临着类似的问题。最近，日本<sup>①</sup>和英国<sup>②</sup>开展了一些针对提高城市应对极端天气灾害弹性能力的计划。日本正在开展东京都市圈强对流观测试验（TOMACS），力图利用稠密的多种探测手段协同的观测网络对影响广、危害大的强对流天气进行观测。这些观测试验的特点是，将对灾害性天气观测、短时临近预报以及社会应对措

施研究作为一个有机整体相结合，更加强调科研成果的实用性。这给我们今后的工作带来了重要的启示。未来的城市气象观测，不仅为学术研究提供观测数据和事实，而且将更积极地参与从科研到服务和决策的“端到端”的整个研究计划和工作中去。

#### 参考文献

- [1] Grimmond C S B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, 2006, 84: 3-22.
- [2] Mestayer P G, et al. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): Set-up and first results. *Bound-Layer Meteorol*, 2005, 114: 315-365.
- [3] Ziomas I C. The Mediterranean campaign of photochemical tracers transport and chemical evolution (MEDCAPHOT-TRACE): An outline. *Atmos Environ*, 1998, 32: 2045-2053.
- [4] Fisher B, Kukkonen J, Schatzmann M. Meteorology applied to urban air pollution problems: COST 715. *Int J Environ Pollution*, 2001, 16: 560-570.
- [5] Allwine K J, Shinn J H, Streit G E, et al. Overview of URBAN 2000: A multiscale field study of dispersion through an urban environment. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83: 521-536.
- [6] Brazel A, Selover N, Vose R, et al. The tale of two climates-Baltimore and Phoenix urban LTER sites. *Climate Research*, 2000, 15: 123-135.
- [7] Allwine K J, Flaherty J E. Joint Urban 2003: Study overview and instrument locations. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2006.
- [8] Rotach M W, et al. BUBBLE - An urban boundary layer project. *Theor Appl Climatol*, 2005, 81: 231-261.
- [9] Kawai T, Kanda M, Takashima A, et al. Outdoor scale model experiments for the evaluation of urban modeling studies. Sixth Symposium on the Urban Environment, Atlanta, GA, 29 January-2 February, 2006. Boston: American Meteorological Society, 2006.
- [10] 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. *气象学报*, 2004, 62: 663-671.
- [11] 罗云峰, 周小刚. 重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统的相互作用”所取得的成果. *中国科学基金*, 2005, 19(1): 35-37.
- [12] 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. *南京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44: 99-106.
- [13] 李炬, 舒文军. 北京夏季夜间低空急流特征观测分析. *地球物理学报*, 2008, 51: 360-368.
- [14] 王珍珠, 李炬, 钟志庆, 等. 激光雷达探测北京城区夏季大气边界层. *应用光学*, 2008, 29(1): 96-100.
- [15] 古红萍, 马舒庆, 王迎春, 等. 边界层风廓线雷达资料在北京夏季强降水天气分析中的应用. *气象科技*, 2008, 36(3): 300-304.
- [16] 穆穆, 王洪利, 周非凡, 等. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用. *大气科学*, 2007, 31(6): 1102-1112.
- [17] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.
- [18] Williams M, Richardson A D, Reichstein M, et al. Improving land surface models with FLUXNET data. *Biogeosciences*, 2009, 6: 1341-1359.
- [19] Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, et al. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D24101.

① <http://www.mpsep.jp/english/index.html>

② <http://www.extreme-weather-impacts.net/twiki/bin/view>