

北京稳定天气条件下城市边界层环流特征数值研究

仲跻芹 张朝林 范水勇

(中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089)

摘要 采用科罗拉多大学和 MRC/ ASTER 共同开发的区域大气模拟系统(RAMS) 对北京地区稳定天气条件下的个例进行数值模拟, 通过对数值模拟结果与观测事实的比较以及敏感性试验, 分析了北京城市边界层环流特征和环流影响因子在环流发展过程中的作用。结果表明: ①在山谷风环流和热岛环流相互作用下形成了北京城市边界层流场特有的局地环流。②热岛中心在决定边界层环流的辐合区位置上起相对较大的作用, 边界层环流的强度和发展高度由山谷风强度和热岛强度共同决定。

关键词 城市边界层 边界层环流 山谷风环流 热岛环流 数值模拟

引言

城市中绝大部分自然植被被建筑物、道路所代替, 城市中人类生产生活产生大量热量, 城市工业生产和交通运输排放大量烟尘和气溶胶, 城市化产生的效应影响着城市边界层气象场, 使其呈现出独特的分布特征。城市边界层的结构特征及城市局地环流问题越来越引起广大气象学者的注意。

20 世纪 80 年代和 90 年代前期, 很多学者使用二维边界层模式对中国非均匀下垫面上的边界层结构和环流进行了数值研究。桑建国^[1]从大气热力-动力学方程组出发, 分析了单纯由于城市的加热作用引起的热岛环流特征。讨论了环流强度和温度空间分布与背景大气的稳定性和平均风速的关系。苗曼倩等^[2]运用一个陆面过程和二维大气边界层过程相耦合模式, 研究了植被不均匀造成的边界层结构特征和局地环流及其昼夜变化。叶卓佳^[3]等利用非线性非定常二维数值模式, 研究夜间气流流经城市上空所引起的风场、温度场和垂直涡旋扩散参数的调整, 以及城市热岛环流发展演变。从 90 年代后期, 人们转而使用三维中尺度模式来对城市的局地环流及其与其它局地环流的相互作用进行数值研究。安兴琴^[4]等使用 MM5 V3 对山谷城市兰州

冬季风场和温度场进行了数值研究, 指出冬季近地面风场是山谷风环流和城市热岛环流共同作用的结果。苗曼倩等^[5]用一个三维中尺度模式研究了长江三角洲夏季海陆风与城市热岛环流的相互作用。李维亮等^[6]使用一个细网格区域气象模式也就长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流的影响做了分析研究, 讨论了海陆风、湖陆风和城市热岛之间的相互作用。仲跻芹^[7]使用 RAMS 模式对北京地区的边界层热岛进行数值模拟, 较好地模拟出复杂地形下城市边界层的气象环境。但以前的工作少有涉及北京稳定天气条件下的城市边界层环流特征的数值研究。

北京地处华北平原北部, 西、北及东北面邻山, 城区及其东南面地势平坦, 形成了“簸箕型”地形, 地形强迫对北京地区流场有很大影响。由于城市化的发展, 城近郊区与远郊间不同下垫面上动力、热力性质的差异也产生各种作用。这种复杂的地形、城市化效应和大尺度气象场相互作用形成了北京地区特有的局地环流, 而且各种作用的相对重要性随时间而变化, 造成了边界层局地环流的时间空间变化。因此采用数值模式精细描述北京城市边界层流场是很有必要的。本文采用科罗拉多大学和 MRC/ ASTER 共同开发的区域大气模拟系统(RAMS) 对

北京市科委项目“奥运会气象保障科学技术试验与研究——02 子课题城市气象精细预报技术研究”资助

作者简介: 仲跻芹, 女, 1975 年生, 硕士, 工程师, 主要从事精细数值预报研究, E-mail: jqzhong@jium.cn

收稿日期: 2005 年 5 月 19 日; 定稿日期: 2005 年 9 月 21 日

稳定天气条件下的北京城市边界层环流进行了数值模拟,与相应观测进行了比较,并通过敏感性试验定性分析了地形强迫和城市化效应对城市边界层局地环流的影响。

1 模式介绍

本文中使用的科罗拉多大学和 MRC/ASTER 共同开发的区域大气模拟系统 RAMS 进行数值研究。在本文的数值试验中,模式辐射参数化采用 Chen 与 Cotton(1988) 辐射方案;对流参数化采用 Tremback(1990) 的修正 KUO 积云对流方案;陆面过程采用 Tremback 与 Kessler(1985) 的 6 层土壤-植被方案,且使用固定的初始土壤湿度;Mellor 与 Yamada(1982) 湍流闭合方案;微物理过程则采用 Cotton 等(1982) 微物理参数化方案。数值积分采用时间分裂差分方案,对热力学变量采用时间向前差分,对速度分量和气压项则采用二阶蛙跃格式。另外,垂直方向采用隐式方案(Tripoli 和 Cotton,1982; Durran,1983),以隐式方法求解垂直气压梯度和垂直辐散。对垂直于侧边界的风分量,采用 Klemp 和 Durran(1983) 辐射边界条件,简单地取常数 20 m/s 作为典型的重力波相速,对于其他变量则采用零梯度边界条件;上边界采用“刚盖”顶边界条件;下边界取 $u = v = w^* = 0$ ($z^* = 0$),其余变量由陆面过程模式计算得到。RAMS 采用 Arakawa-C 网格。本文中模拟中心取 116.455°E , 39.275°N ,水平网格距为 4 km,水平模拟范围为 $204\text{ km} \times 204\text{ km}$;垂直方向采用拉伸网格,共 33 层,模式最低层为 9.5 m,模式顶高为 18 km。数值模拟中所使用的地形高度数据为 RAMS 模式自带的 30 s 分辨率的地形高度数据,模拟区域中的地表特征数据,包括植被类型、土壤类型、粗糙度等,均为 $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ 高分辨率数据。

2 数值模拟及结果分析

2.1 气象场资料

本文中数值试验的个例时间为 2002 年 2 月 14 日,晴朗,无明显天气过程,是北京地区典型的稳定天气。此类稳定的天气背景下,局地风场主要受地形等局地因子的热力和动力强迫作用,有利于研究局地环流的发展变化。初始条件由 08:00(北京时,下同)探空资料提供。模拟区域内能选用的探

空站只有北京 54511 (39.8°N , 116.5°E) 一个站,由于该探空资料中特性层上只有温度和露点数据,而 RAMS 模式要求各探空层上的温度、露点、风向、风速及位势高度等要素,所以所选用的资料只是 54511 站探空报文中规定层上的要素。

文中还对北京地区 19 个地面观测站的观测与模拟结果进行了比较。

2.2 数值试验结果分析

山谷风通常是在一般环流微弱的少云天最为明显。在山区,白天由于谷地和坡地的空气比同高度自由大气增温多,温度高,使空气沿坡上升成为谷风,夜间由于下垫面辐射冷却,邻近的空气迅速变冷,密度增大,因而沿坡流泻,成为山风^[8]。由于北京“簸箕型”的地形分布,在稳定天气背景下,易形成山谷风环流。从模拟的 14:00 地面风场(图 1a)可以看到,北京地区平原地带主要是东南风,西部山区也被东南风控制,且风速较平原地区偏大,而东北部和北部山区则分别表现为西南风和南风,整个风场呈现从平原向高地地形爬坡的形式,表现为谷风。与 14:00 地面观测比较,模拟风向和观测风向吻合的很好,但部分地区风速较之观测偏大。温度场则与观测场比较符合。20:00 模拟风场如图 2a 所示,此时地面风场已发生较大的转变,西部和东北部山区分别主要为偏西风 and 东北风;西北部山区的东南风控制区域与 14:00 相比较小了许多,且风速明显减弱;平原地区则仍然表现为东南风,同时风速也明显减弱;城市地区则出现了相对周边地区的高温中心,且伴有风场的辐合。整体上风场表现为山风,并且在城市的热岛中心出现流场的辐合。这种地面流场的分布与 20:00 地面测站观测是一致的。23:00 地面场仍然存在着城市中心的热岛和风场的辐合,但辐合较弱,热岛中心与 20:00 相比较偏南,且城区风速与 20:00 相比较增大(图略)。

将模式模拟的格点风场插值到地面观测站点上,可求得模拟风速与观测风速的偏差,从而对 RAMS 模式对风的模拟有一个定量的认识。图 3 为 2002 年 2 月 14 日 20:00 北京地区各地面观测站点上模拟风速与观测风速偏差,可以看到,平均绝对偏差约为 1.3 m/s,只有西部山区的 2 个站点上绝对偏差高达 3~4 m/s。14:00 的模拟与观测风速偏差较 20:00 偏大,平均偏差约为 3 m/s,大的偏差多出现在地形梯度较大的地区(图略)。

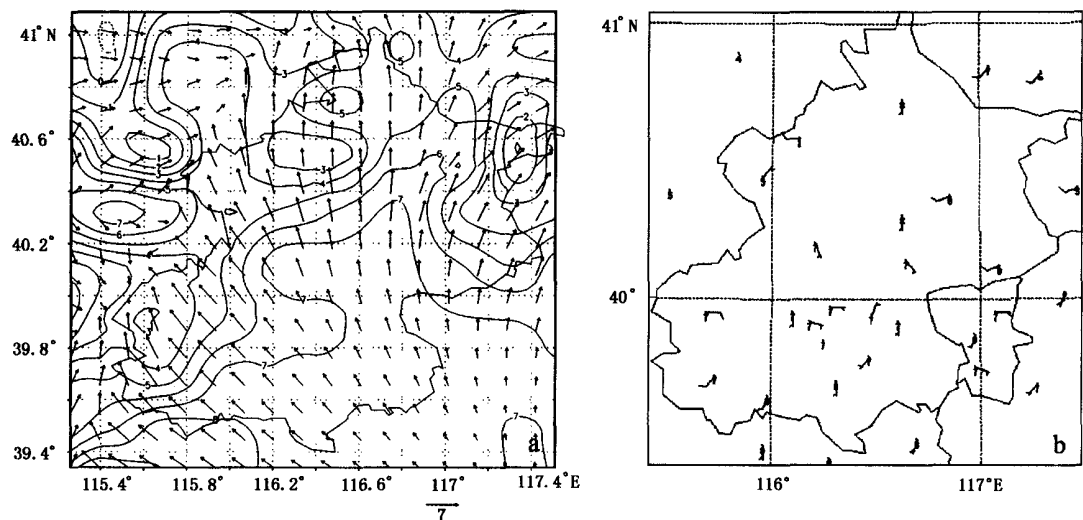


图 1 2002 年 2 月 14 日 14:00 的模拟(a)和观测(b)地面风温分布

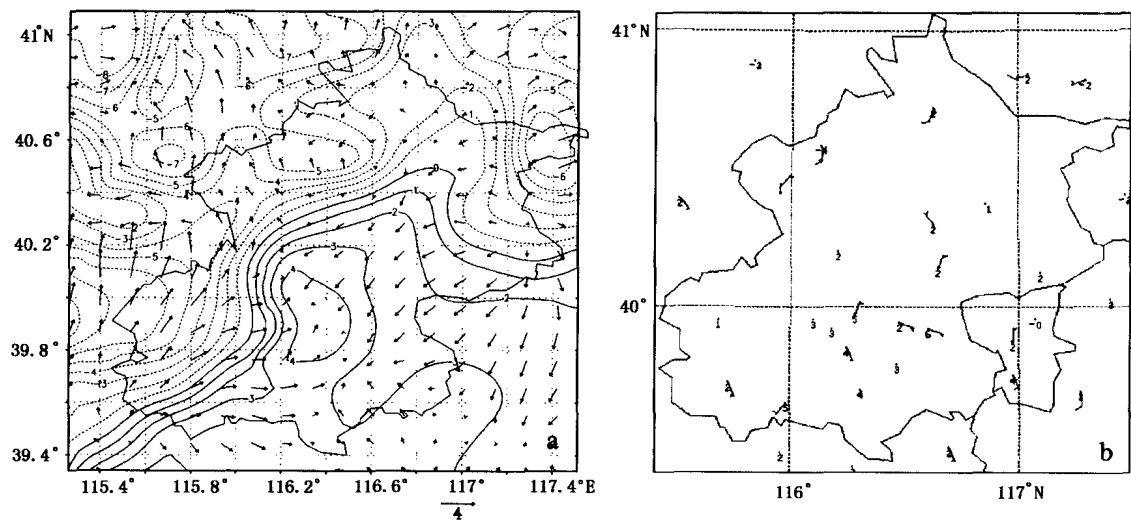


图 2 2002 年 2 月 14 日 20:00 的模拟(a)和观测(b)地面风温分布

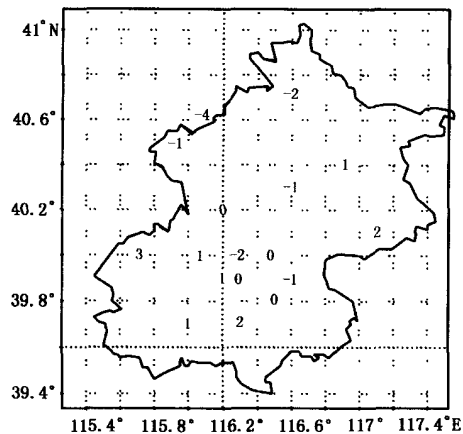


图 3 2002 年 2 月 14 日 20:00 模拟与观测风速偏差

为了进一步认识城市边界层流场,沿城市中心(39.90° N)做纬向剖面图来看局地环流的垂直发展。14:00,在短波辐射加热下,城近郊区与远郊明显增温,但温度差并不明显,没有形成产生热岛环流的有利条件,同时山区和平原上增热不同造成温差易产生谷风。在城市边界层中无明显的垂直运动(图略)。20:00 风场纬向剖面图如图 4a 所示,从图中可以清楚地看到,西侧高地形上则为下泻风,沿坡地向下流动至一定高度上向热岛中心辐合;同时东侧平坦地形上也存在着向城市热岛中心的气流辐合,城市中心出现明显的气流辐合上升。存在辐合的高度一直维持到超过 300 m,而在 1000 m 的垂直

高度内都存在着垂直运动。图4b给出了23:00的风场纬向剖面图,从图中不难看出,同20:00类似,西侧高地地形上风沿坡地向下流动到一高度上向城市中心辐合,东侧平坦地形上气流亦向城市中心辐合,在城市中心出现辐合上升。不同的是,呈现辐合的最大高度已降低为150 m以下,同时存在上升运动的高度也明显降低。仔细分析不同时次的垂直环流图可以知道,边界层局地环流显然是热岛环流和山谷风环流共同作用的结果:日落后,地面迅速由于长

波辐射冷却。但城市地区由于城市下垫面特殊的热力性质,冷却降温的速度缓慢得多,在日落后一段时间内,在城区和郊区间形成了较明显的温度差,有利于城市热岛环流的形成。而山区与平原不同地形上冷却不同造成温差则易形成山风。这两种形式的局地环流共同作用,形成了北京地区城市边界层环流。而且随热岛环流和山谷风环流的发展变化,该局地环流强度和发展高度也在发生着变化。

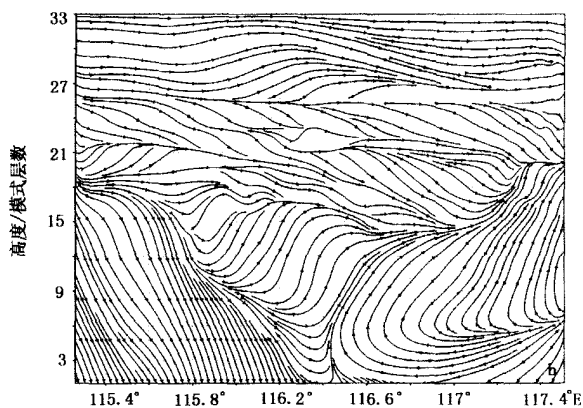
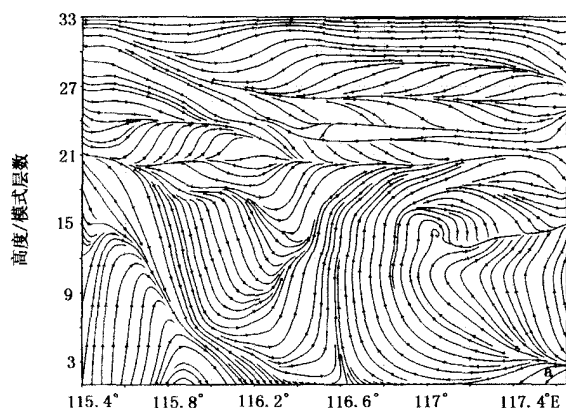


图4 风场沿城市中心所在纬度的纬向剖面图:(a) 2月14日20:00,(b) 2月14日23:00

为了更清楚地认识局地环流的形成发展过程中,城市的热力动力强迫和地形强迫分别起到怎样的作用,本文做了一个敏感性试验:不考虑城市的作用,将城市下垫面改变成邻近地区的下垫面类型(农田),其他条件保持不变进行数值模拟,取20:00、23:00模拟场进行分析。

图5a为20:00敏感性试验的地面风温场。从图中可以看出,从西部和东北山区下泻的偏西风和东北风在平原上形成了弱的辐合,辐合中心的位置较有城市情况下的辐合位置偏东南,东北山区和辐合中心位置的风速小于有城市情况下的风速,同时北部山区近乎于静风。从图5b中23:00敏感性试验的地面风场中可看到,地形引起的下坡风进一步加强,西部山区和北部、东北部山区的山风分别转为西北风和偏北风,辐合中心较20:00偏南。

从前人的研究中我们知道,北京地区冬季日落1 h后,热岛强度迅速增大,到20:00达最大值,后又下降,到夜间02:00降至最低,然后缓慢上升,至08:00达第2高峰^[8],而热岛环流是在热岛强度达到一定值后产生的,且热岛环流强度和高度随着热

岛强度增强而增强和增高^[3];谷风的最大强度大致是出现在12:00~14:00之间,山风的最大强度一次出现在19:00~20:00,一次出现在子夜之后到凌晨之前^[8]。从考虑城市影响的模拟地面流场和温度场可以知道,午间,由于城区与郊区间温差很小,热岛强度很弱,虽然背景天气比较稳定,但并未形成热岛环流。而此时正是谷风最大强度出现的时间,因而城市边界层内的流场主要受谷风影响。由于城市与周边热力动力性质的对比,至20:00热岛强度最强,热岛环流的强度和发展高度也达到最强和最高,同时山风强度也达到了最大,形成了城市地面的明显辐合。到23:00,热岛强度有所下降,边界层垂直环流的强度和高度也相应减弱和降低。当将城市作用去除后,由于地形的分布特征,地面流场仍存在辐合,但辐合变弱且位置也发生改变。图6为20:00沿城市中心的纬向剖面图,可以看到,在原先城市所在位置的东部出现辐合和上升气流,但边界层环流的发展高度低于有城市作用时的高度。至23:00,山风出现了第2次最大强度,由于风向的变化,辐合区较之20:00更偏南偏弱,沿城市中心的纬向剖面

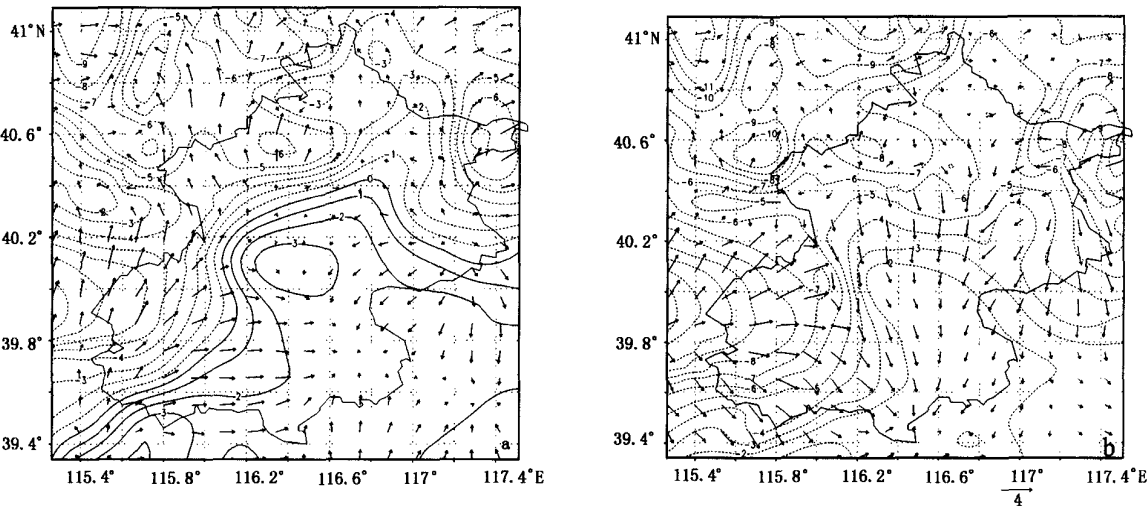


图 5 敏感性试验中地面风温场的分布:(a) 2 月 14 日 20:00,(b) 2 月 14 日 23:00

图上辐合上升较弱(图略)。由此可以得出,在稳定天气形势下,边界层环流主要在受城市热岛环流和山谷风环流共同影响。热岛中心在决定边界层环流的辐合区位置上起相对大的作用,而热岛强度和山谷风强度则共同对边界层环流的强度的发展高度产生影响。

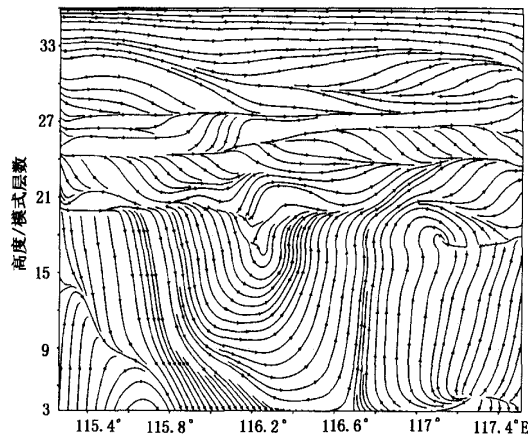


图 6 敏感性试验中 2002 年 2 月 14 日 20:00 沿城市中心的纬向剖面图

3 结论

本文选择北京地区稳定天气形势的典型个例,利用区域大气模式 RAMS 就该个例对北京城市边界层环流进行了数值模拟,通过模拟结果与观测事实的比较对边界层环流发展特征进行了分析,并通过敏感性试验定性地确定了城市的热力动力强迫和地形强迫在边界层环流形成和发展过程的相对作用。

(1) 北京处于北部、西北和东北面邻山,城区及其东南面地势平坦的“簸箕型”地形,地形强迫的山谷风环流是影响北京地区边界层流场的重要因子之一;另外由于城市下垫面的特殊热力性质,热岛环流也成为影响北京地区边界层流场的重要因子。在山谷风环流和热岛环流的共同作用下,在城市区域形成了明显的地面流场辐合,并产生垂直环流。

(2) 通过敏感性试验对城市边界层环流的影响因子的作用进行了定性的分析,结果表明:热岛中心在决定边界层环流的辐合区位置上起相对较大的作用,而山谷风强度和热岛强度则共同决定边界层环流的强度和发展高度。

以上结论仅是在一个个例的模拟结果分析后得出,还不具有很强的代表性,更强代表性的结论需要在大量个例研究的基础上得出。另外,本文只是模拟和定性分析了稳定天气形势下城市边界层环流及其影响因子的作用,对于不同天气形势下城市边界层环流的影响因子及其作用,还有待在以后的工作中进一步开展。

致谢:中国气象局北京城市气象研究所陈敏博士对本文给予了有益建议和帮助,特在此表示感谢。

参考文献

1 桑建国.城市热岛效应的分析解.气象学报,1986,44(2):251-255
2 苗曼倩,季劲钧.荒漠绿洲边界层结构的数值模拟.大气科学,1993,17(1):77-86
3 叶卓佳,关虹.夜间城市边界层发展的数值研究.大气科学,1986,

- 10(1):80 - 88
- 4 安兴琴,陈玉春,吕世华.中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟.高原气象,2002,21(2):186 - 192
- 5 苗曼倩,唐有华.长江三角洲夏季海陆风与热岛环流的相互作用及城市化的影响.高原气象,1998,17(3):280 - 289
- 6 李维亮,刘洪利,周秀骥,等.长江三角洲城市热岛与太湖对局地环流影响的分析研究.中国科学,2003,33(2):97 - 104
- 7 仲路芹.北京城市边界层热岛的数值模拟.新世纪气象科技创新与大气科学发展.北京:中国气象学会,2003.214 - 218
- 8 傅抱璞,翁笃鸣,虞静明,等.小气候学.北京:气象出版社,1994.251 - 253

Numerical Study of Circulation Characteristics in Urban Boundary Layer in Stable Weather in Beijing

Zhong Jiqin Zhang Chaolin Fan Shuiyong

(Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

Abstract: RAMS (Regional Atmospheric Modeling System, developed by University of CO & MRC/ASTER) was used to study a typical stable case in the Beijing area. By comparing the numerical simulation and observation and carrying out sensitive experiments, the circulation characteristics of the urban boundary layer in Beijing and the impacts of various factors on circulation development were analyzed. The analysis shows that ① the formation and evolution of the local circulation in the urban boundary layer is influenced by the mountain breeze circulation and heat island circulation together. ② The heat island center has relatively significant impact on the location of the convergence zone, while the intensities of mountain breeze and heat island determine jointly the intensity and the evolving height of the boundary-layer circulation.

Key words: urban boundary layer, boundary layer circulation, mountain breeze circulation, heat island circulation, numerical simulation