

气象卫星与城市气象环境模拟研究*

周志恩^{1,3)} 蒋维楣¹⁾ 苗世光¹⁾ 王晓云²⁾

1) (南京大学大气科学系, 南京 210093)

2) (北京市气象局, 北京 100089)

3) (重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要 利用徐敏等人建立的具有广泛用途的区域边界层模式 (NJU-RBLM), 对北京城市区域的气象环境特征做了比较细致的模拟研究; 然后, 再利用 NOAA-AVHRR 气象卫星遥感资料, 采用修正的 Ulivieri 分裂窗方法反演得到北京城市区域地表温度场, 将其结果与同样区域范围的数值模拟结果进行对比分析, 以此进一步检验数值模式的模拟效果和卫星观测资料处理方案的可行性。分析表明: 采用 NJU-RBLM 模拟得到的地面热力场分布及其变化总体趋势与晴空条件下的卫星反演结果基本一致, 卫星反演的地表热力场分布和强度要较模式模拟的结果更为细致; 两者都能较好地反映夜间的城市热岛效应和春夏秋季白天的弱冷岛现象, 夜间的城市高温区以及由山区向城市平原地区风速渐小的辐合过渡带高温区都比较明显, 午后城市地区温度略低于周边东南地区。

关键词: 卫星气象学; 城市边界层; 数值模拟; 城市气象环境; 热岛效应

文章编号 1006-9585 (2004) 03-0465-10 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

1 引言

随着城市建设步伐的不断加快和人民生活水平的不断提高, 人民越来越关心所居住城市的空气质量以及气象环境。在这种情形下, 高分辨率和高精度的城市大气边界层数值模式开始发展起来。由于城市下垫面独特的物理属性, 使得人们在运用数值模拟手段对城市边界层气象环境特征的研究中遇到极大的挑战, 主要表现在: 城市环境地形的复杂性; 人为活动的影响; 大气运动多尺度性等。用数值模拟手段研究城市大气边界层结构时, 必须考虑城市独特的下垫面性质 (如城市人为热源, 城市建筑物冠层等等) 对城市气象环境特征的影响。此外, 在城市空气质量模式系统中的气象部分, 也必须将城市人为热源和建筑物冠层的作用合理地引入到模式中去, 才能获得较为满意的城市地区污染物浓度的预测效果。

通常, 对城市气象环境与大气边界层领域的研究主要采用外场观测、实验室研究和数值模拟 3 种方法。其中对城市热力分布特征的模拟研究比较多, 如 Sorbjan 等^[1] 利用一个简单的一维热力模式, 研究人为热源对城市大气边界层结构的热力影响。Vukovich 等^[2~4] 运用三维数值模式研究了美国圣路易斯市风场和温度场的分布, 以及城市热岛环流的日变化与臭氧的分布; 在其数值模拟过程中整个模拟区域使用套网格方案,

2003-05-16 收到, 2004-01-25 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 40333027

将城市建筑物冠层对边界层的影响考虑为粗糙度的增加。Fujio 等^[5]运用三维静力大气边界层模式,将城市人为热源加入到地表能量平衡方程中,对日本东京市地表气温的日变化和地表风速分布进行了模拟。Urano 等^[6]详细考虑人为热源的高度分布,并将它分为两部分,靠近地面的那部分热源加到地表能量平衡方程,而在高层的人为热源直接加热空气,建筑物冠层对城市边界层的影响则参考 Uno 等^[7]的方法。虽然现在有一些比较成功的中尺度气象模式如 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)、ARPS (the Advanced Regional Predicting System) 等,但由于它们没有对城市大气边界层的模拟作特殊处理,直接利用这些模式进行城市边界层物理过程的研究以及将其作为一些大气污染模式的气象输入场,是不完全合适的。

外场观测可以直接获得大气环境有关参数,揭示大气运动的基本规律,还可为数值模拟提供基本参数和对比依据。目前我国气象部门相当普遍地拥有气象卫星观测资料。但是这些资料如何为城市气象服务以及在城市建设规划等方面发挥作用,亟待进一步研究并开展工作。中国科学院遥感应用研究所的延昊等^[8]已通过分裂窗方法对中国地表温度进行分析,认为其在大范围晴空条件下是可行的。我们也尝试通过合理的 NDVI (归一化植被指数)、 ϵ (比辐射率)、 $\Delta\epsilon$ (红外波段通道间比辐射率之差) 以及经验参数的选取,采用适宜的反演处理方法,给出了卫星观测对地面温度的测量结果,由此比较细致地分析了地面热状况及其与土地利用类型和地面覆盖性质等的关系^[9]。

本文首先采用一个发展应用比较完善的三维区域边界层数值模式 NJU-RBLM,对北京城市区域 2000 年四季的气象环境进行了数值模拟研究。同时,利用该区域范围的 NOAA-AVHRR 卫星观测资料对北京城市区域在 2000 年 1、3、7、10 月内相对应时刻的地面热力场进行反演分析,并将上述两种研究方法所得结果相比较再次检验模式的模拟效果和卫星反演处理方案的可行性,期望能将卫星反演获得的地面资料运用到模式初始化方案中以弥补地面观测点位的不足。

2 北京城市区域气象环境的数值模拟研究

2.1 模式与模拟处理

首先应用三维非静力区域边界层模式 (NJU-RBLM) 模拟研究北京地区现有城市规划条件下气象环境的特征,模拟的北京地区地形及其站点分布如文献 [10] 所示。城市区域尺度的模拟中心是 (40°15'N, 116°27'E), 水平网格距为 4 km, 垂直方向采用拉伸网格, 垂直最小格距为 20 m, 垂直方向共 30 层, 模式顶高 5 400 m。模拟的初始场是由北京市 20 个地面测站和一个探空测站经过 BARNES 插值和客观分析得到, 边界条件取为辐射边界条件^[11], 采 Deardorff 的 1.5 阶能量闭合方案^[12], Pleim 等^[13]和 Xiu 等^[14]提出的土壤-植被 2 层模式。为适应在城市地区的模拟, 对北京市人为热源资料作了大致的估算, 根据 2000 年北京市年鉴, 在地面温度的预报方程中加入人为热源项

$$Q_a = (N_c \eta_c + N_e \eta_e) / \Delta S,$$

其中, ΔS 是网格面积, N_c 、 N_e 分别是网格中单位时间消耗煤和电的量, η_c 、 η_e 分别是网格中单位量的煤和电所产生并释放到大气中的热量。

北京市下垫面的参数，如植被和建筑物的分布是由北京市测绘局提供，其地面覆盖物的热性质等参数取自文献 [13, 14]。RBLM 对粗糙度的确定比较简单，如果下垫面覆盖类型为城市，则采用 Gifford 经验公式^[15]：

$$z_0 = \frac{h_B}{2A} = h_B^2 \sqrt{r_B/2\Delta S},$$

其中， z_0 是粗糙度， A 是网格总面积与网格内建筑物迎风截面积之比， h_B 是网格内建筑物平均高度， r_B 是网格内建筑物所占的面积比。详细的模式说明可参阅文献 [16, 17]。

为了使数值模拟试验具有一定的代表性，选取一年四季的典型代表月，模拟研究了北京城市区域 2000 年 1、3、7、10 四个月的气象环境特征，并试图通过与北京地区 20 个实测点的地面气象场特征量的观测值进行比较，以重点分析北京地区一年四季流场和温度场的变化规律。模拟初始时间都是从每月 1 日 08 时（北京时，下同）开始，积分预报 24 h 到次日 08 时，分别模拟每月 31 天并将结果平均，如此得到一年四季月平均的 24 h 典型气象环境特征。

2.2 结果与分析

2.2.1 北京冬季 1 月平均的模拟结果分析

图 1 给出了模式模拟的 02 时平均结果示例，由此图可见，城区出现明显的热岛现象，市区的地表温度比郊区高出 5 K。从西北部山区向城市平原过渡（即怀柔—昌平—霞云岭）为强西北风辐合带，向城区的气流汇合现象明显，同时对应为高温带，市区都在西北风的控制下，风速经此过渡带穿过市区向模拟区域的东南逐渐减小。西北山区以微弱的西北向山风为主，官厅水库以西风为主，于桥水库以北地区主导为北风，少许东北风。北京周边的三大水库均为局地高温区。08 时，城区仍为绝对高温区，市区与周围的温差减小，同时西北山区向城区的辐合带也明显升温，水库仍较周边地区高温；风向与 02 时比较变化不大，但城区西北线的辐合程度不如 02 时明显，这可能是导致该区域明显升温的原因之一。14 时，城区仍有热岛效应，但因城郊升温均显著，此时的热岛强度不如夜间明显，最高温约 280 K，温差为 3 K，密云、官厅和于桥 3 个水库都表现为明显的局地低温区；此时城区为小风速（不到 1 m s^{-1} ）控制，市区西部为弱南风，而市区东部有弱北风，最大风速区位于官厅水库周边及东北区域，主导西风最大为 $4 \sim 5 \text{ m s}^{-1}$ ，但仍低于 02、08 时的该地风速，模拟区域的中下部以南风为主，东北部以偏北风为主。从 13 时到 14 时城区以东的风向辐合区向西北移动，此时西风减弱，南风加强。20 时的城区高温仍很明显，最高约 275 K；此时西风又加强，主导风向改为西南风，辐合区向东北推进。

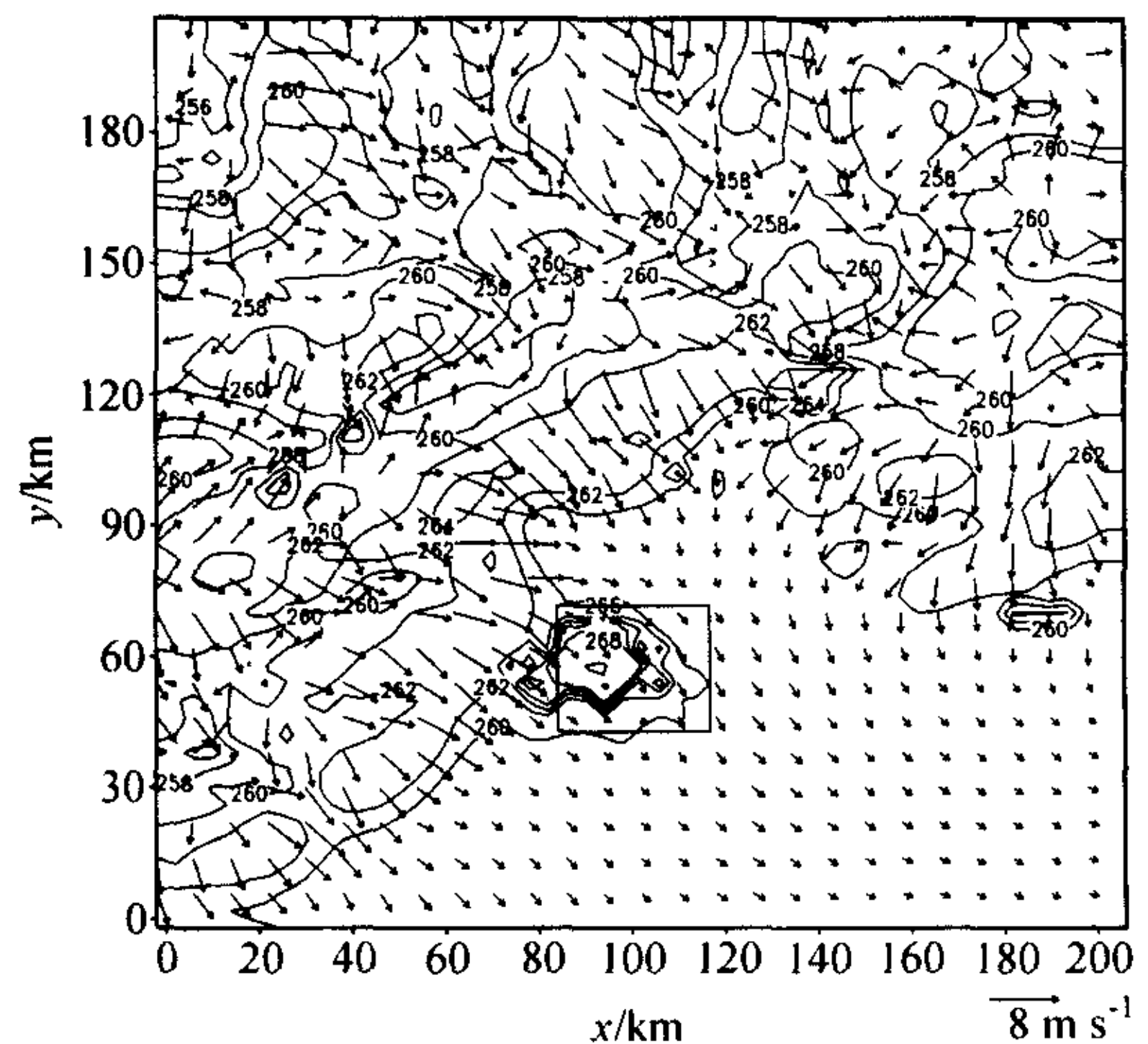


图 1 1 月 02 时近地层风和温度（单位：K）的模拟结果（等值线为温度分布）

从市中心 ($40^{\circ}15'N$, $116^{\circ}27'E$) 分别向东、南、西、北四方各伸展 12 km 和 4 km, 即 $24\text{ km}\times 24\text{ km}$ 和 $8\text{ km}\times 8\text{ km}$ 作为市区范围, 相应地向四周各伸展 32 km 和 12 km, 即形成 $64\text{ km}\times 64\text{ km}$ 和 $24\text{ km}\times 24\text{ km}$ 的外围环作为比较的郊区范围, 分析由 NJU-RBLM 模拟得出的北京地区远郊和近郊与市中心的冬季 1 月份温差日变化规律。早 09 时到次日 08 时, 北京地区远郊和近郊的温差日变化趋势一致, 但变化强度有明显差异。在早晨日出后至下午升温结束近郊升温较快, 而市中心因其特殊下垫面覆盖和强反照特性等因素其地表温度略比近郊地区低 0.5 K; 在夜间出现明显高温差, 市区与远郊温差达到 4.5 K 左右, 有明显的热岛效应。

总之, 北京城区 1 月份全天的热岛效应都很明显, 以 02 时为最强, 14 时最弱。02、08 时受主导西北风影响, 到 14 时减弱, 随后到 20 时又增强。冬季的风速日变化较小, 风向比较恒定, 主要为西北和偏北风, 表明该地区冬季受偏北大风系统的影响。

2.2.2 北京夏季 7 月平均的模拟结果分析

图 2 是模式得到的 7 月近地面 (10 m) 风和温度的模拟结果。其中 02 时, 城区热岛明显, 温差约为 3 K, 最高为 290 K, 模拟区域内最高温在三大水库, 城区为小风辐合区, 有弱的西北风出现。08 时城区处于 1.6 m s^{-1} 的东北风控制下, 最高风速位于模拟区域的西南角仅为 3.5 m s^{-1} 。13 时的盛行风向为南风、东南风, 最高温位于城区最北部为 318 K, 整个模拟区域的中部偏东南部均为高温区。此时及随后的 14 时均有弱冷岛出现。到 20 时风向由下部的南风逐渐变化为上部的东风, 城区再次出现高温, 同时还有一高温区出现在城区外东北处 (密云一带) 以及城区西北的气旋性辐合区。

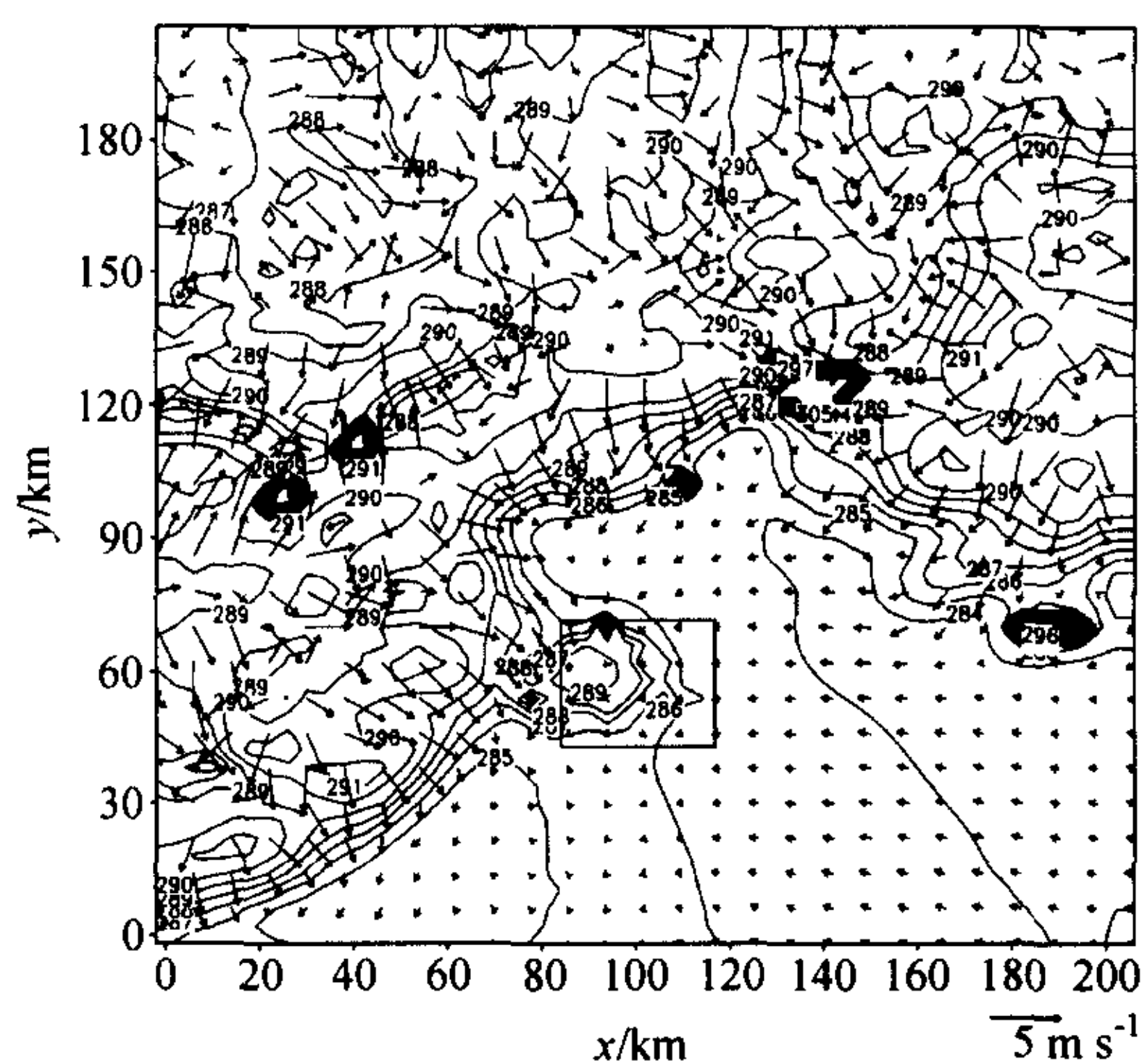


图 2 7 月 02 时近地层风和温度 (单位: K) 的模拟结果 (等值线为温度分布)

同时还有一高温区出现在城区外东北处 (密云一带) 以及城区西北的气旋性辐合区。

7 月的城区主导风向由 01 时的弱西北风、北风逐渐转变为 07 时的弱北风和东北风, 再演变到 13 时的东南风以至 20 时的南风。说明夏季出现了风向、风速日变化, 且白天基本为偏南风、东南风, 风速较大; 夜间则以西北、偏北风为主, 风速很小, 充分反映了当地热力作用下山地—平原风的中尺度环流和日夜变化。呈现风向的顺时针变化, 可能与该地区在夏季的盛行系统风为东南风有关。此时应该更多关注污染物对西山和西北方向 (延庆一带) 可能的输送扩散。

分析模拟得出的北京地区远郊和近郊与市中心的夏季 7 月份温差日变化规律, 温差日变化明显。无论远郊还是近郊地区都只在日出后至午后 15 时略比市区地表温度高, 但强度有差异, 远郊地区只比市区地表温度略高 0.5 K 左右, 而近郊地区则比市区地表温度高出 1~2 K; 在夜间则都只低于市区地表温度略 1~2 K, 同时, 远郊地区与市区地表温度的温差在 20 时左右出现跃变现象较近郊地区明显。

2.2.3 北京地区 2000 年 1、3、7、10 月四季平均的流场分析

将以上模拟计算得到的 2000 年 1、3、7、10 四个月的平均流场进行 $200\text{ km} \times 200\text{ km}$ 的区域平均，并且同 20 个站点实测的 1996~2000 年 5 年平均的北京地区四季流场进行比较，以分析北京地区一年四季的流场变化规律，并检验模式对流场的模拟能力。1996~2000 年 1、4、7、10 月每天 4 次的北京地区 20 个站点的风速、风向实测值由北京市气象局提供。

模拟结果显示，一年四季的流场总体可分为冬秋型和春夏型两类。以 1 月和 10 月为代表的冬秋型更多受强天气系统的影响，风速日变化较小，风向较为恒定，主要以西北和偏北风为主，其中秋季 10 月的风速小于冬季 1 月，同时其大风天气的流动受地形的动力扰动作用明显。而以 3 月和 7 月为代表的春夏季流动特征实际为典型的山地—平原地形中尺度环流演变特征，有明显的风向、风速日变化，即夜间风速较小，主要为偏北的下坡风，白天风速较大，为偏南的上坡风。其中，春季 3 月和夏季 7 月在整个模拟区域范围内从夜间流动向白天流动的形态转换也有明显差别，前者风向呈现逆时针转动，即由偏北风转变为偏西风，再变为偏南风；后者则为顺时针变化，即由偏北风转变为偏东风，再变为偏南风，这可能和该地区盛行系统风在春季和夏季分别为西南风和东南风有关。秋季为北京地区仅次于夏季的次小风季节。同时，对应于春夏季白天的偏南风时段，秋冬季午后时段偏北风分量明显减弱，这可能是由于在非系统大风的天气条件下，山地—平原中尺度环流仍可发展，午后有较强的偏南风出现，因此在所统计的一个月中即可抵消部分偏北风分量。本文因资料限制选择 3 月作为春季代表月进行分析，其结果表明 3 月的风速与 1 月接近，说明此时还属于由冬到春的转型期，但在午后明显加强的西南、偏南风则体现了由冬季向春季转变而出现流场形势的变化。

1996~2000 年 1、4、7、10 月的风向风速观测值，同样体现了秋冬季以西北风为主；春季因还属于冬季转型期，西北风减弱，同时西南风明显增强；而在夏季，西北风进一步减弱，南风和东南风则明显加大。

将 NJU-RBLM 模拟得到的一年四季流场变化与实测结果相比较可以看出，该模式对城市区域尺度的流场模拟能力较强，一年四季的流场变化趋势与实测较吻合，冬秋型与春夏型的区分也较明显，只在风速大小上稍有差异，这可能是由于实测的 20 个站点基本分布在市区内以及近郊范围。

3 NOAA-AVHRR 卫星遥感资料反演的地表温度

目前我国气象部门相当普遍地拥有气象卫星观测资料。但是，这些资料如何为城市气象服务以及在城市建设规划等方面发挥作用，亟待进一步研究并开展工作。以往研究地表温度变化的常规方法，是使用地面气象站点的观测资料，但由于空间分布的不均匀和观测所受到的种种限制，比较难于推算分析实际的地表温度变化情况。应用卫星遥感反演技术则可以在一定程度上弥补这一不足。我们曾利用有限的 NOAA-AVHRR 气象卫星遥感资料^[9]，采用修正的 Ulivieri 分裂窗方法^[18]反演出 2000 年 12 个月每月 2~4 个时次的地表温度场。通过对北京地区的卫星观测资料进行算例分析，揭示出一

个 200 km×200 km 范围内的地面温度分布特征, 并与实际观测资料作比较以检验此算法的反演效果。

分析 1 月 7 日早晨 08 时的对应站点情况, 表 1 中反演数据基本反映了在石景山、门头沟和观象台一带北京市中心的高温区, 最低温度无疑出现在西北角海拔高度最高的佛爷顶, 其次出现在东北角的汤河口、密云和怀柔地区。此时为日出升温时段, 这一地区由于受密云水库的大面积水体影响而保持低温。采用相同的 NDVI 数据, 比较分析 1 月 10 日凌晨 04 时反演的地表温度与凌晨 02 时的实测地表温度, 反演计算结果与实测值的吻合程度明显好于 1 月 7 日早晨 08 时的计算结果, 全部 18 个站点中有 5 个站点的反演地表温度与实测地表温度之差小于 1 °C, 还有近一半站点的反演温度与实测值之差在 2~3 °C 以内, 最大差值不超过 5 °C。最低温出现在延庆、佛爷顶和汤河口一带, 高温区则位于门头沟、石景山、丰台、朝阳和通州一线, 包括北京市区及近郊区。这与北京市的特殊下垫面和城市中的人类活动影响密切相关, 近 10 年北京市的发展改变了原有的自然条件, 如大部分原有的自然植被为建筑物、沥青或水泥马路等硬化下垫面所代替, 绿地面积减少; 城市粗糙度加大, 市区风速减小; 城市人口和工业集中, 人们的生产和生活 (尤其是冬季的供暖设施) 增加了额外的热量; 城市工业排放大量烟尘、气溶胶等。由此, 首都钢铁厂所在地常年出现高温极值。通州一带的高温区表明, 北京近 10 年来城市热岛效应加剧可能还与外部周边地区向北京的热能输送有关。同时, 由于北京地区冬天低层大气流动的日变化很小, 风向比较固定, 主要是西北和偏北风, 因此反演趋势与实际情况相符, 主要呈西北低温东南高温形式。夜间最

表 1 反演地表温度与实测地表温度的比较

°C

站点代码	站点名	2000 年 1 月 7 日 08 时		2000 年 1 月 10 日	
		订正后的卫星反演结果	实测地表温度值	04 时的反演地表温度	02 时的实测地表温度
54398	顺义	-21.01	-21.4	-12.94	-14.3
54406	延庆	-21.07	-22.4	-19.99	-15.8
54410	佛爷顶	-23.96	-26.7	-18.71	-18.1
54412	汤河口	-19.57	-21.1	-19.93	-16.6
54416	密云	-23.08	-25.7	-16.27	-18.4
54419	怀柔	-18.32	-15.8	-14.34	-12.9
54424	平谷	-16.78	-25.4	-14.60	-16.0
54431	通州	-13.98	-17.2	-9.99	-10.5
54433	朝阳	-16.29	-18.3	-10.29	-14.6
54499	昌平	-15.33	-16.7	-12.77	-14.2
54501	斋堂	-15.81	-18.7	-15.57	-13.7
54505	门头沟	-12.87	-14.5	-10.85	-12.8
54511	观象台	-13.83	-16.1	-12.13	-13.6
54513	石景山	-12.33	-19.7	-9.03	-13.7
54514	丰台	-17.01	-21.3	-10.23	-15.2
54594	大兴	-13.03	-16.7	-14.13	-16.1
54596	房山	-15.41	-19.2	-13.35	-13.7
54597	霞云岭	-16.91	-17.4	-9.27	-11.0

高温出现在密云一带，可能与密云水库对当地温度的调节作用有关；此时北京城、郊温差约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

通过全年 24 个以上算例基本说明北京的热岛效应一直稳定存在，以海淀为代表，门头沟、石景山、丰台、朝阳、通县一带均为局地高温区。北京市具有城市与卫星城市“热岛”多中心的复杂特征，这也是现代大都市的一个特点。用 Ulivieri 方法可以很好地反演出城市热岛的趋势，并且能较为准确地反映出相对的高温区和低温区。此算法的反演能力在午夜时段最好，其次在凌晨日出时段，对午后时段的反演准确率相对较低；并且在冬季反演的地表温度值偏大而在夏季反演值偏小，秋、冬季的热岛效应较春、夏季而言更为明显。官厅、密云等大型水库都对局地的地表温度有较大影响。

4 NOAA-AVHRR 卫星遥感资料反演的地表温度与模拟结果的比较分析

我们选取了若干日间和夜晚的算例来对比分析卫星反演与模式模拟得到的地表温度分布，限于篇幅，这里给出个别算例的图例结果，分析如下：

图 3 为 1 月 10 日 04 时模拟的地表温度分布与反演对比，此时两者反映的城市高温区都很明显。模拟得到的最高温在城区，城、郊温差达到 4 K ；而卫星反演的最高温则出现在水库和西南部霞云岭地区，城区以及山区向平原过渡的昌平—门头沟一带也为高温区，但城、郊温差只有 2 K 左右。

7 月 11 日 16 时模拟的地表温度分布与反演对比表明，两者均在北京市区和东南部为明显的高温区，北部山区有少许高温区出现，在水库地区则出现低温。反演中西北部的大片低温与实际有一定出入，这可能与当时的天气状况，如多云、多雨出现造成感应或反演缺值或误值而出现极低温有关。7 月白天的卫星反演与模拟之间差异较大，与夏季多强降水和多云天气有密切关系，此时对模式和反演算法的要求都很高。

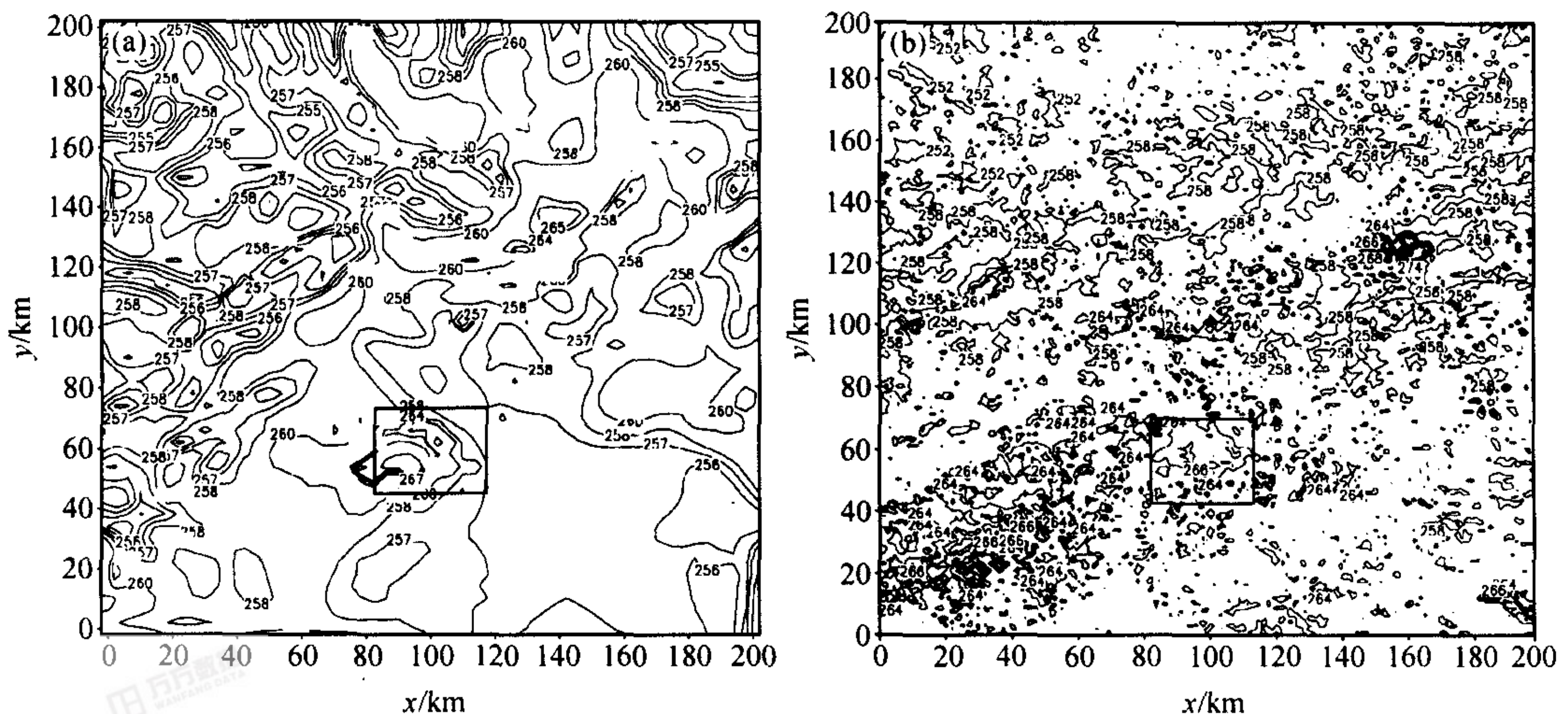


图 3 1 月 10 日 04 时模拟与卫星反演的地表温度分布 (单位: K)

(a) 模拟结果; (b) 卫星反演结果

10月15日15时模拟的地表温度分布与反演对比表明,两者的高温区都出现在城区周围偏东南部,即有微弱冷岛现象出现,卫星反演得到的北京市区地表温度约比郊区低2~3 K。10月30日05时模拟的地表温度分布与反演对比亦表明了类似情形。两者的北京市区热岛现象都比较明显,同时在西南霞云岭,水库地区和过渡带,以及东南部都出现少许高温区。模拟最高温出现在城区,城郊温差约2 K左右;卫星反演最高温出现在水库地区,市区地表温度较周边郊区高约1~2 K。此时城区处于弱的东北风辐合带。

由此可见,采用NJU-RBLM模拟得到的地面热力场分布和变化总体趋势与卫星反演结果基本一致。因模拟计算可利用的资料测站量有限(20个地面站点和1个探空点(54511)),而卫星遥感资料采用NOAA-AVHRR(分辨率为1 km),所以卫星反演的地表热力场分布和强度要较模式模拟结果更为细致。进一步研究可以利用卫星反演得到的资料作为初始场送入模式进行模拟计算分析,这样得到的模拟结果可能会更全面真实的反映实际情况。上述对比实例反映了模式和反演算法对一年四季白天、夜间地面热力场的模拟和卫星反演能力,可以看出,两者都能较好反映夜间的城市热岛效应和春夏秋季白天的弱冷岛现象,夜间的城市高温区以及由山区向城市平原地区风速渐小的辐合过渡带高温区都比较明显,午后城市地区温度略低于周边东南地区。在地面水体覆盖的大范围区域,1月的水库地表温度反演值明显高于模拟结果而出现强高温区,在3、10月中,水库地区模拟的地表温度也明显低于卫星反演结果形成强低值区。但在7月白天的卫星反演与模拟之间差异较大,这与夏季多强降水和多云天气有密切关系,此时对模式和反演算法的要求都很高。本文工作只在模式中粗略考虑了水汽作用,而在卫星反演算法中则因没有获取同时刻的水汽含量无法考虑该因子作用,这些都是产生误差因素的所在,也是我们下一步工作需要考虑和解决的重要问题。

5 结论与展望

采用模式NJU-RBLM对北京城市区域2000年1、3、7、10月一年四季的算例进行数值模拟分析,得到以下主要结论:

(1) 模拟得到的北京地区温度场特征能明显反映出北京市区的夜间强热岛效应和午后弱冷岛现象。北京地区一年四季在夜间均有热岛现象出现,其中冬季1月的夜间热岛强度最大,达到5 K左右。同时北京地区从早上10时至下午15时期间有弱冷岛现象。

(2) NJU-RBLM对城市区域尺度的流场模拟能力比较强。一年四季的流场变化趋势与实测吻合较好,冬秋型与春夏型的区分也较明显。

将NJU-RBLM模拟结果与按分裂窗方法计算所得的卫星反演结果相比较,再次检验了模式的模拟效果和卫星反演处理方案的可行性,对比分析了几个示例模式与反演对一年四季白天、夜间地面热力场的模拟和反演能力,分析结果如下:

(1) 采用NJU-RBLM模拟得到的地面热力场分布和变化总体趋势与卫星反演结果基本一致。因模拟计算可利用的资料站点数有限(20个地面站点和1个探空点(54511)),而卫星资料采用NOAA-AVHRR(分辨率为1 km),所以卫星反演的地表

热力场分布和强度分布都较模式模拟结果更为细致。

(2) 对比算例可以看出, 两者都能较好反映夜间的城市热岛效应和春夏秋季白天的弱冷岛现象, 夜间的城市高温区以及由山区向城市平原地区风速渐小的辐合过渡带高温区都比较明显, 午后城市地区温度略低于周边东南地区。

(3) 在地面水体覆盖的大范围区域, 1 月的水库地表温度反演值明显高于模拟结果而出现强高温区, 3、10 月中水库地区模拟的地表温度也明显低于卫星反演结果, 形成强低值区。而在 7 月白天的卫星反演与模拟之间差异较大, 与夏季多强降水和多云天气有密切关系, 此时对模式和反演算法的技术要求和难度均较高。

希望本文工作有利于下一步的模式改进和更好的利用各气象台站都容易获取的 NOAA 卫星资料反演得到更多的气象要素, 使其得到更为充分的利用, 并期望能将卫星反演获得的地面资料运用到模式初始化方案中, 以弥补地面观测点分布的局限性。在进一步的研究中可以利用卫星反演得到的资料作为初始场送入模式进行模拟计算分析, 这样得到的模拟结果可能会更全面真实的反映实际情况。另外, 本文只在模式中粗略考虑了水汽作用, 而在卫星反演算法中则因没有获取同时刻的水汽含量无法考虑该因子作用, 这些都是可能的误差因素, 也是我们下一步工作需要考虑和解决的重要问题之一。

参 考 文 献

- 1 Sorbjan, Z., and M. Uliasz, Some numerical urban boundary-layer studies, *Bound. -Layer Meteor.*, 1982, **22**, 431~450.
- 2 Vukovich, F. M., J. W. Dunn, and B. W. Crissman, A theoretical study of the St. Louis heat island: The wind and temperature distribution, *J. Appl. Meteor.*, 1976, **15**, 417~440.
- 3 Vukovich, F. M., J. W. Dunn, and B. W. Crissman, A theoretical study of the St. Louis heat island: Some parameters variation. *J. Appl. Meteor.*, 1978, **17**, 1585~1594.
- 4 Vukovich, F. M., W. J. King, and J. W. Dunn, Observations and simulations of the diurnal variation of the urban heat island circulation and associated variations of ozone distribution: A case study, *J. Appl. Meteor.*, 1979, **18**, 836~854.
- 5 Fujio Kimura, and Shunji Takahashi, The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area, A numerical experiment, *Atmos. Environ.*, 1991, **25B** (2), 155~164.
- 6 Urano Akira, Toshiaki Ichinose, and Keisuke Hanaki, Thermal environment simulation for three dimensional of urban activity, *J. of Wind Eng. and Industrial Aero.*, 1999, **81**, 197~210.
- 7 Uno, I., H. Ueda, and S. Wakamatsu, Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, *Bound. -Layer Meteor.*, 1989, **49**, 77~98.
- 8 延昊、王长耀、牛铮等, 利用遥感和常规资料对比研究中国地面温度变化, *气候与环境研究*, 2001, **6** (4), 448~455.
- 9 周志恩、蒋维楣、胡非等, 气象卫星观测资料的分析在城市区域气象环境研究中的应用, *气象科学*, 2003, **23** (3), 292~299.
- 10 徐敏、蒋维楣、房小怡等, 北京地区气象环境数值模拟试验, *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊), 61~68.
- 11 Durran, D. R., and J. B. Klemp, The effects of moisture on trapped mountain lee waves, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **39**, 2490~2506.
- 12 Deardorff, J. W., Three-dimensional numerical modeling of the PBL, Workshop on Micrometeorology, Amer. Meteor. Soc., 1973, 271~311.

- 13 Pleim, J. E. , and A. Xiu, Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models, *J. Appl. Meteor.* , 1995, **34**, 16~32.
- 14 Xiu, A. , and J. E. Pleim, Development of land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model, *J. Appl. Meteor.* , 2000, **40**, 192~209.
- 15 Gifford, F. A. , Turbulent diffusion typing schemes—A review, *Nuclear safety*, 1972, **13**, 391~402.
- 16 Jiang Weimei, Zhou Mi, and Hu Fei, Study on development and application on a regional PBL numerical model, research note, *Bound. -Layer Meteor.* , 2002, **104**, 491~503.
- 17 徐敏, 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟, 南京大学博士学位论文, 2002, 9~25.
- 18 Ma Yaoming, and Osamu Tsukamoto, *Combining Satellite Remote Sensing with Field Observations for Land Surface Heat Fluxes over Inhomogeneous Landscape*, China Meteorological Press, 2002, 172.

The Meteorological Satellite and Numerical Simulation Research on the Urban Meteorological Environment

Zhou Zhien^{1,3)}, Jiang Weimei¹⁾, Miao Shiguang¹⁾, and Wang Xiaoyun²⁾

1) (*Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093*)

2) (*Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089*)

3) (*The Academy of Chongqing Environmental Science, Chongqing 400020*)

Abstract A Regional Boundary Layer Model (NJU-RBLM) was used to simulate the meteorological environmental characteristics of Beijing in 200 km×200 km area, in four seasons—winter (January), spring (March), summer (July), and autumn (October) around the year of 2000. Then, with the limited remote sensing data from the NOAA-AVHRR, this paper used the revised Ulivieri ‘split-window’ algorithm to retrieve and reveal the distribution characteristics of the land-surface temperature in the same area. We compared the two results and found that: the simulated surface thermodynamic distribution and total change trend were generally consistent with the retrieved results, and the retrieved LST’s distribution and intensity were finer than the simulated ones, the phenomena of strong UHI at night around one year and the weak UCI at day during spring, summer and autumn could be well revealed.

Key words: satellite meteorology; urban boundary layer; numerical simulation; urban meteorological environment; heat island effect