

# 城市人为热对北京热环境的影响\*

佟 华<sup>1)</sup> 刘辉志<sup>2)</sup> 桑建国<sup>3)</sup> 胡 非<sup>2)</sup>

1) (国家气象中心, 北京 100081)

2) (中国科学院大气物理研究所边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

3) (北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871)

**摘 要** 城市的人为热对城市热岛的产生有重要作用, 通过对北京冬季的居民采暖排放废热、汽车排放废热和工业生产排放废热的估算, 制定了考虑随时空变化的北京市人为热排放清单。利用北京大学城市边界层模式对北京冬季城市边界层结构特征进行模拟, 通过考虑和忽略人为热的排放研究北京地面温度的变化, 并通过几种方案减少人为热的排放对缓解城市热岛作用作出评价。

**关键词:** 人为热; 城市热岛; 数值模拟

**文章编号** 1006-9585 (2004) 03-0409-13 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

## 1 引言

城市中人为热的排放对城市热环境影响很大。为了了解人为热排放对城市热环境的影响程度, 以及定量分析如何通过改变城市布局和人类活动来减小城市热岛现象, 需要知道人为热源详细的空间分布和随时间的变化, 运用数值模式进行数值试验<sup>[1,2]</sup>。因为对如此大区域的能量消耗进行调查很难实施, 所以对人为热源的的空间分布和时间变化做过细致调查的城市还不多, 通常只对城市能源消耗做粗略的分析作为人为热源<sup>[3]</sup>。但在东京对人为热曾做过较详细的调查<sup>[4]</sup>, 通过对不同用途建筑(如住宅区、写字楼、商场、学校、宾馆等)的各种能量消耗(如取暖、制冷、热水、厨房等)以及汽车和工业废热排放进行统计, 并利用细致的土地利用类型图(其中包括每个格点的建筑物的层数), 绘制了详细的人为热排放图以及日际和年际变化。调查表明, 在东京冬季人为热的排放对城市热环境影响很大, 而夏天由于短波辐射很强影响相对很小。数值试验表明, 如减少50%热水供应或100%的制冷消耗就可以使地表附近的空气温度下降0.5℃。

在北京, 人为热主要来源于汽车尾气排放的废热、工业生产的能源消耗以及城市建筑物的各种能量消耗(如城市居民冬季采暖和夏季空调制冷)。对于北京城市人为热的排放清单的详细调查以及人为热对北京城市热岛的贡献仍然没有人进行过研究, 本文在已有的一些调查基础上初步建立一个较详细的人为热排放的空间分布和时间演变清单, 对其给北京城市热环境造成的影响进行初步研究。

2003-09-25 收到, 2003-12-29 收到修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目 59895410、中国科学院知识创新工程项目 KZCX2-204H 和 LAPC-KF-2002-08 项目共同资助

## 2 北京市人为热排放清单的制定

北京城市住宅用热量是根据中国建筑科学研究院和中国供热协会 2000 年的调查资料得到,北京城市住宅不同用途用热量的比例大致为采暖 44.4%~55.6%,空调 16.9%~10.6%,生活热水 23.9%~15.2%,炊事 8.1%~10.1%,家电、照明等 6.7%~8.5%。根据表 1 北京市居民采暖总量推算,可以得到北京城区居民生活平均人为热通量释放大约为  $19.0 \text{ W m}^{-2}$ 。将人为热根据城市不同位置的建筑物密度和高度进行加权分配,得到北京城区各部分居民生活人为热的空间分布。对于居民生活人为热随时间的变化曲线是按照东京城市居民用热量随时间的变化规律<sup>[4]</sup>绘制的,认为居民用热量白天较大,夜晚较小,用热高峰期早晨和傍晚,如在市中心的崇文门地区早晚的用热量分别达到了  $80 \text{ W m}^{-2}$ 和  $50 \text{ W m}^{-2}$ 。

表 1 北京市居民采暖总量

供热方式	供热面积/ $10^4 \text{ m}^2$	小时供暖量/ $10^9 \text{ J}$	年供暖量/ $10^9 \text{ J}$	供暖效率/%
城市集中供暖	3250	5443	15826104	80
集中锅炉供暖	4000	6699	19468620	85
分散小锅炉采暖	10250	17166	49864788	82
小煤炉采暖	1500	2512	7285032	90
总计	19000	31820	92444544	

对于汽车尾气排放的废热则通过北京地区汽车燃料的消耗进行估计,另外废热排放清单还考虑了人口密度以及车流量的昼夜变化。按照一家世界石油公司的最新报告,以中国每辆汽车每年平均跑  $2.5 \times 10^4 \text{ km}$ ,百公里汽车消耗汽油 12.7 L 为标准,得出目前北京的 200 万辆机动车每年大致消耗汽油  $4.6 \times 10^6 \text{ t}$ 。据测算,汽车尾气排出的废热为每克油 45 kJ<sup>[5]</sup>,由此计算每天在市区排放的热量为  $6.5 \times 10^{14} \text{ J}$ ,热排放率平均为  $11.34 \text{ W m}^{-2}$ 。对于车流量随时间的变化,据北京日报报道,《中国城市空气污染控制》方案的北京项目曾在崇文门路口建立现场监测系统,发现崇文门路口车流量的昼夜变化明显呈现出三峰型,其平均车流量为 4 827 辆  $\text{h}^{-1}$ ,最大车流量为 7 206 辆  $\text{h}^{-1}$ ,最小车流量为 600 辆  $\text{h}^{-1}$ 。早上 8:00~10:00 (北京时,下同)出现第一个峰值,下午 3:00~5:00 出现第二个峰值,然后车流量稍微下降,但一直保持在一个很高的值直到晚上 9:00。设全市的车流量随时间都按照这一规律变化,且同时假设建筑物密度与车流量成正比关系,得到汽车尾气排放废热随时间和空间的分布情况。如市中心高峰期的热排放率最大为  $104.3 \text{ W m}^{-2}$ ,郊区凌晨的热排放率最小为  $8.575 \text{ W m}^{-2}$ 。

由于北京日益重视环境保护,陆续将一些污染严重的企业迁出城区,使得城区工业废热排放量逐渐减少,城郊排放量日趋均匀。目前尚未对城区各地点和时间的工业废热的排放量做过具体的调查,因而不能直接给出定量结果。北京与对工业废热做过详细调查的日本东京相比较,工业废热的排放量在时间变化上相似,数值较东京小。根据文献 [4],假设北京的工业废热为东京的一半,即工作时间 8:00~12:00 和 14:00~18:00 排放量为  $59 \text{ W m}^{-2}$ ,夜间排放量为  $9 \text{ W m}^{-2}$ ,并且认为在整个模拟区域工业废热排放是水平均匀的。

将人为热的 3 个组成部分相加得到北京城市人为热随时间和空间的分布情况。图 1 为人为热排放量较大的崇文门地区一天中人为热的变化情况。在这个地区，人为热在白天一直保持很高的水平，三项总和可达到  $130\sim 170\text{ W m}^{-2}$  之间，且存在早晨和傍晚两个峰值，夜晚约为  $20\sim 40\text{ W m}^{-2}$  左右。其中居民采暖人为热通量白天为  $40\sim 80\text{ W m}^{-2}$ ，夜晚  $20\text{ W m}^{-2}$  左右。汽车排放为白天约  $30\sim 40\text{ W m}^{-2}$ ，夜晚相对较小只有  $4\text{ W m}^{-2}$  左右。工业废热排放为白天  $60\text{ W m}^{-2}$ ，夜晚  $10\sim 20\text{ W m}^{-2}$  左右。通过比较人为热的空间分布（图 2），可见早 7:00 整个市区的人为热高于郊区，此时市区的数值

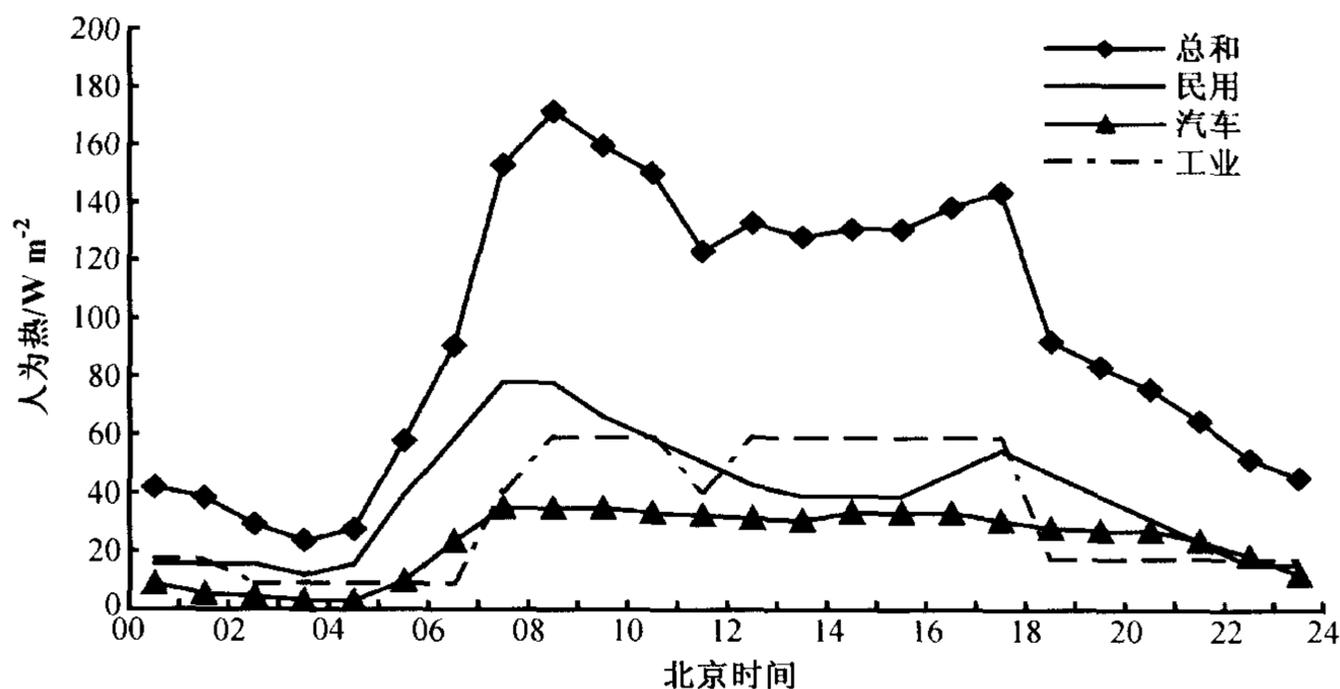


图 1 城区崇文门地区采暖、汽车和工业的人为热在一天中的变化情况

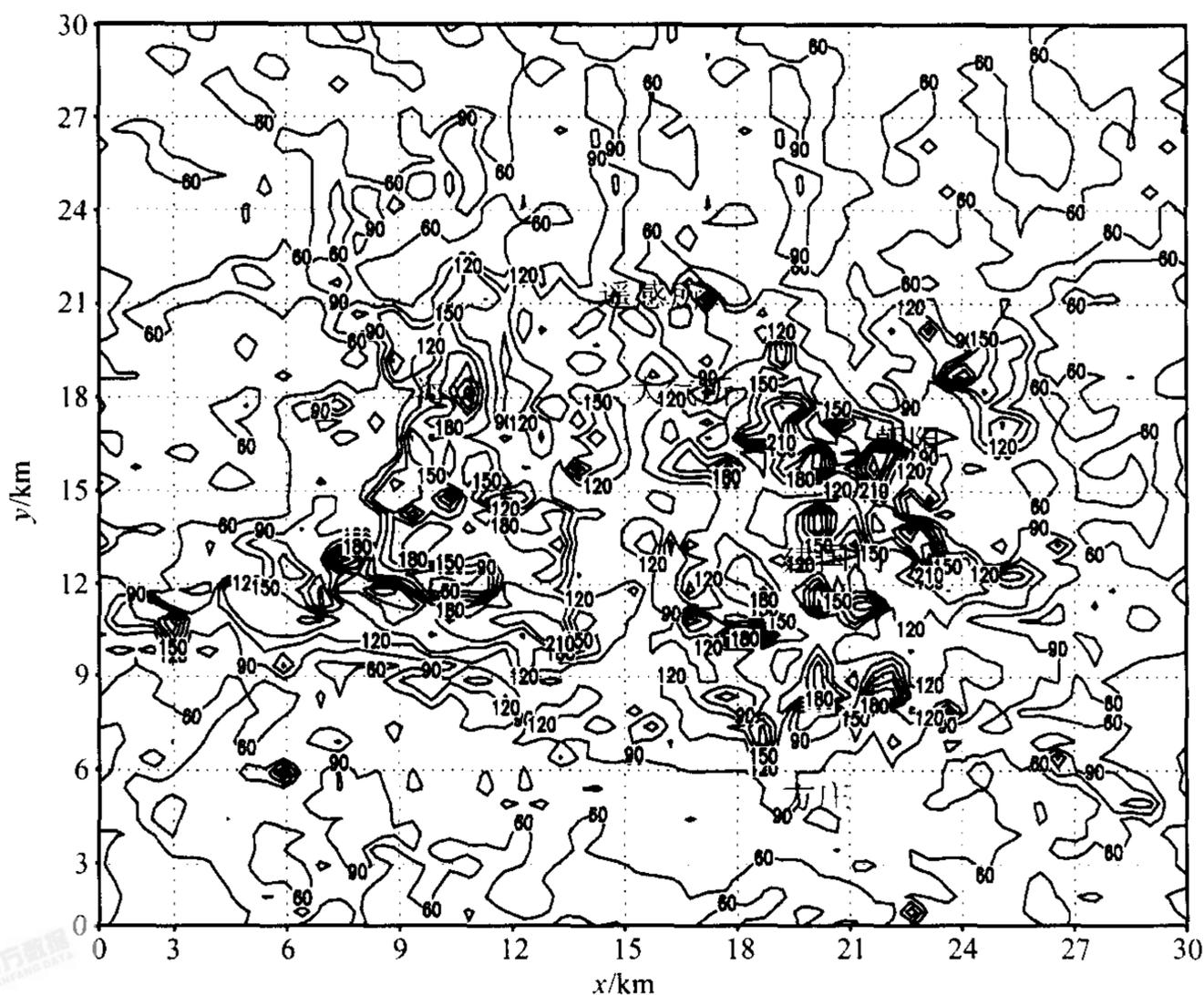


图 2 北京城区早晨 7:00 人为热水平分布（单位： $\text{W m}^{-2}$ ）  
中心点位置为  $(39.91^\circ\text{N}, 116.39^\circ\text{E})$ ，下同

在  $100\sim 200\text{ W m}^{-2}$ , 最高值位于二环路和三环路之间, 而郊区数值在  $50\sim 60\text{ W m}^{-2}$ , 主要是工业废热引起的。

### 3 研究方法

采用北京大学城市边界层模式<sup>[6]</sup>对北京城市冬季的一次个例进行模拟, 在城市边界层模式中, 将城市地表类型分为建筑物、裸土、水域、林地、草地 5 类, 每个网格的物理参数按照在该网格内各种地表类型所占的百分比决定, 这样使得城市地表的复杂性和多样性被细致的描述出来。城市边界层模式的初始条件和边界条件采用四重嵌套的 MM5 模式, 格距分别为 27、9、3、1 km, 模拟时段为 2001 年 2 月 20 日 08:00 至 22 日 20:00。然后将 MM5 模式中 1 km 格距的风速、位温、气压、地表温度结果插值到城市边界层模式中做初始场, 并每半小时输入一次 MM5 的结果作为侧边条件。北京大学城市边界层模式为包括整个城区和部分城郊的  $30\text{ km}\times 30\text{ km}$  的区域, 水平网格距为 500 m, 垂直方向分成不等距的 20 层, 各层高度分别为 0、10、20、40、60、100、150、200、300、400、500、750、1 000、1 250、1 500、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 m。

### 4 模拟个例 2001 年 2 月 21 日和 22 日气象条件

2001 年 2 月 21~22 日有一次弱冷锋过境过程, 根据地面观测站观测, 21 日北京地面气压为 1 009 hPa, 风速很小, 在  $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$  之间, 而高层风速很大, 1 500 m 高度为  $12\text{ m s}^{-1}$ 。风向受山谷风影响中午之前为东北风, 中午之后转为东南风。地面温度 14:00 为  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 22 日 02:00 为  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 温度日较差很大, 天空晴朗无云。22 日凌晨, 弱冷锋通过北京城区, 使得 22 日 14:00 的地面温度降至  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与前一天相差  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最低温度为  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 日较差很小。锋面过境后, 北京位于锋后冷高压的东南部, 受其影响 22 日白天风向一直为东北偏东风, 风速仍很小, 为  $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$ 。总云量为 10。图 3 为中国科学院大气物理研究所气象塔测得的 20 日 20:00 至 22 日 20:00 的风向风速。由观测结果可知 21 日 00:00 到 06:00 为偏北风, 06:00 到 12:00 为东北偏东风, 12:00 到 24:00 转为偏南风, 之后又转为偏东风, 为典型的山谷风情况。风速在

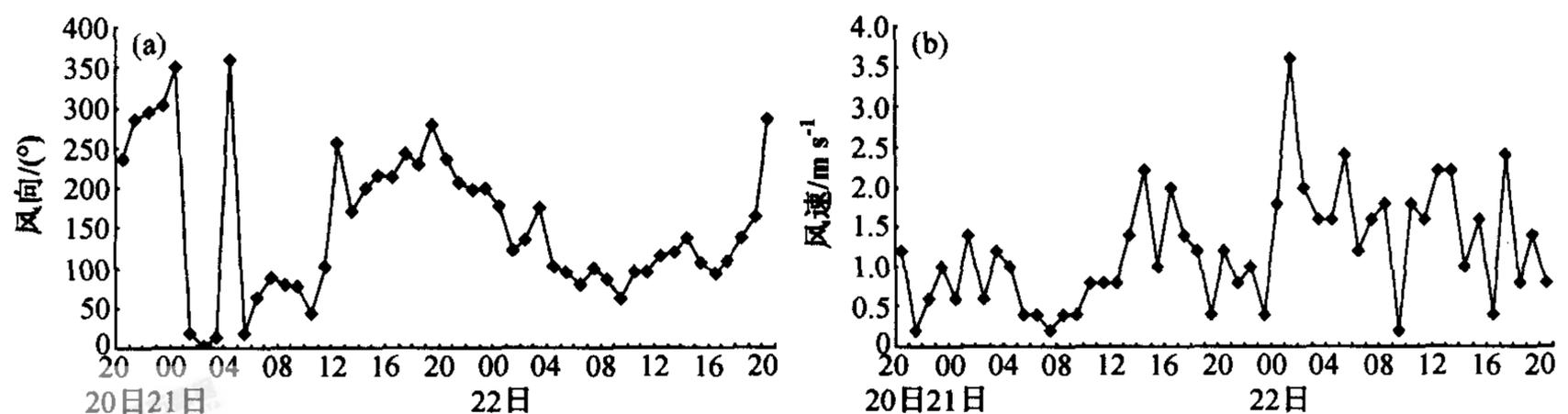


图 3 中国科学院大气物理研究所气象塔观测到的 2001 年 2 月 20 日 20:00 至 22 日 20:00 的 100 m 高度风向 (a)、风速 (b) 随时间的变化

21 日 24:00 前很小, 基本在  $1 \text{ m s}^{-1}$  左右, 最大风速为  $2.2 \text{ m s}^{-1}$ 。22 日 00:00 起风速较 21 日稍微增大, 平均值在  $1.5 \text{ m s}^{-1}$  左右, 但仍然很小。图 4 为北京大气科学试验 (BECAPEX)<sup>[7]</sup> 中 21 日 14:00 至 22 日 20:00 方庄的位温廓线 (21 日 14:00 前没观测), 可见 22 日温度较 21 日有明显的下降, 21 日 14:00, 400 m 高度以下为中性层结, 400 m 以上为稳定层结, 其中 400 m 至 600 m 之间位温升高了 5 K, 混合层高度很低。到了 22 日 02:00 在 200 m 高度有一个非常强的位温增加, 10 m 高度内增加了 3 K, 200 m 至 600 m 为位温增加了 11 K 的非常稳定的层结大气, 而 22 日各时刻位温变化很小, 整个白天都为弱的稳定层结, 非常不利于污染物的扩散, 且容易形成城市热岛。

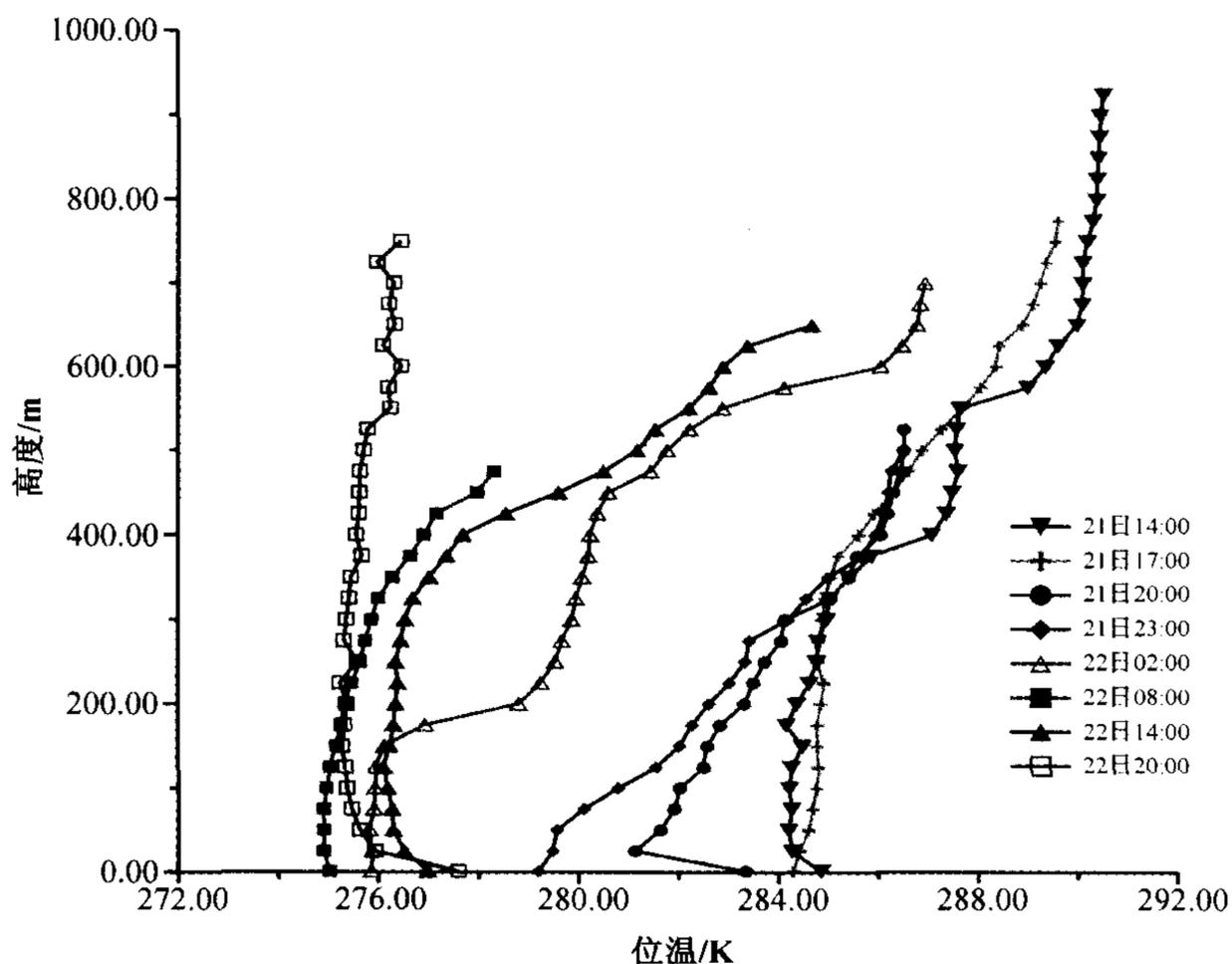


图 4 大气科学试验观测到的方庄 2001 年 2 月 21 日 14:00 至 22 日 20:00 点位温廓线

## 5 北京大学复杂地形下三维城市边界层模式模拟结果

图 5 为北京大学城市边界层模式的模拟区域, 是南北和东西向都为 30 km 的正方形区域, 包括了整个北京城区、城郊结合部及部分郊区。根据北京自身特征, 将下垫面分为裸土、草地、林地、水域、和建筑物 5 类, 通过 5 种类型在同一网格中所占比重来决定某一网格的地表热系数  $C_T$ 、反照率  $\alpha$ 、粗糙度  $Z_0$ 、地表放射率  $\epsilon$  等参数。各地表类型的特征参数的取法见表 2。对北京下垫面的粗糙度有不同的研究结果, 高志球等<sup>[8]</sup>、陆龙骅等<sup>[8,9]</sup>分别对中国科学院大气物理研究所气象塔的大气湍流观测资料分析, 得到气象塔附近的下垫面粗糙度  $Z_0$  为 1.75 m 和 1.34 m。根据本文中粗糙度的表达式, 城市中由于网格内建筑物平均高度的不同, 粗糙度为 0.5~5 m 之间。中国科学院大气物理研究所气象塔位置的粗糙度根据所在网格的建筑物高度为 1.7 m, 说明此表达式是可行的。

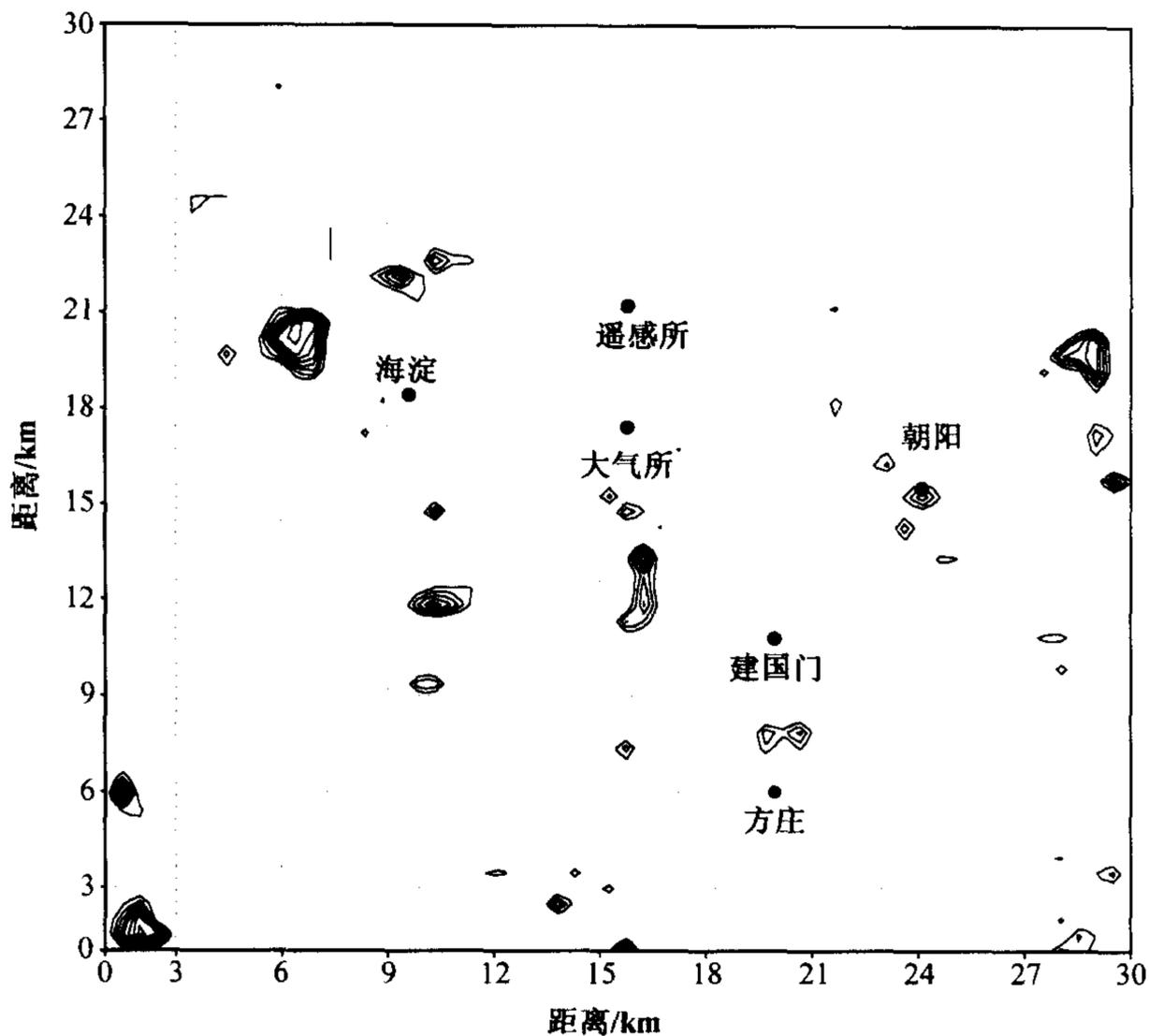


图5 城市边界层模式模拟区域

等值线为水域，海淀、朝阳为地面观测站，遥感所（中国科学院遥感应用研究所）、建国门、方庄为大气科学试验观测点，大气所（中国科学院大气物理研究所）为气象塔观测

表2 各种地表类型的特征参数

	裸土	草地	林地	水域	建筑物
$C_T/10^{-6} \text{ m}^2 \text{ kJ}^{-1}$	2.5	2	1.5	1	$2+0.1(h-2.7)$
$\alpha$	0.25	0.2	0.15	0.1	0.1
$\epsilon$	0.965	0.94	0.95	0.98	0.88
$Z_0/\text{cm}$	5.0	15.0	100.0	0.01	$10.0+20.0h$

注： $h$ 为网格中建筑物的平均高度

使用由中尺度模式 MM5 做初始场和边界条件，城市地表能量平衡模式计算的地面温度为下边界条件的城市边界层模式，模拟 20 日 22:00 至 21 日 22:00 的北京城市边界层结构，结果见图 6。

下面研究近地面水平气象场在不同时间的分布和变化特征。图 7、8 分别为模式模拟得到的几个时刻近地层（10 m）温度场、风场水平分布，及有观测记录的点的观测结果，时间分别为 2001 年 2 月 21 日 02:00 和 14:00。

根据观测，21 日 02:00 朝阳气象站为静风，海淀气象站的风向为东北风，中国科学院大气物理研究所（以下简称大气所）为东北偏东风，风速都小于  $1 \text{ m s}^{-1}$ ；从温度看，大气所此时温度为 273.37 K，海淀 272.95 K，朝阳 270.05 K，可见城市中心区的大气所温度最高，位于城郊结合部但在当时是城市下风向的海淀次之，在上风向的朝阳温度最低，较城区温度低 3 K。这一时刻的模拟结果为，整个模拟区域的温度高值区

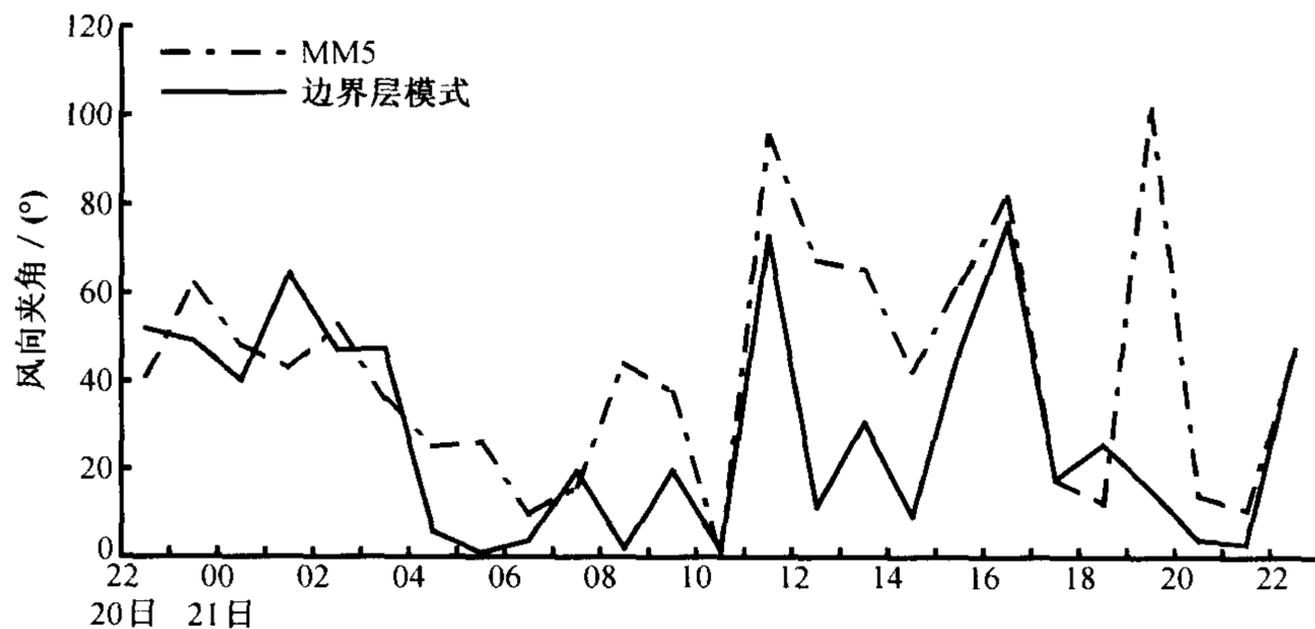


图6 2001年20日22:00至21日22:00中国科学院大气物理研究所气象塔位置上10 m高处边界层模式和实测值风向夹角与MM5模式和实测值风向夹角的对比

位于城区的西北部海淀区一带，温度较周围高约1 K左右，风向在温度高值区为偏东风，高值区北部东北风，南部为东南风，均向温度高值区辐合，与观测结果较符合。21日08:00观测结果，大气所风向仍为偏东风，海淀、朝阳为静风，温度在大气所为273 K，较海淀和朝阳高2~3 K。模拟结果整个模拟区域风速也较小，吹东北风，温度分布较均匀。到了11:00，城区温度开始显著升高，由于当时背景风场为弱的东北风，使得温度的高值区位于城市中心偏西南的玉渊潭周围地区，温度为280 K，同时风场有在这一地区辐合的趋势，而风速小到接近静风。在郊区尤其是区域东北和西北山地和农田温度升高较慢，为275~278 K。此时大气所观测的温度为282 K，风向为北偏东风。到14:00，模拟结果为中尺度风场由山风转为谷风，即模拟区域转为偏南风控制，并在温度高值区有辐合趋势。温度的高值区也由于南风控制而移到了城区的北部，最大值位于海淀区的中关村附近，温度达到287 K，在郊区温度为282 K左右，城市热岛明显。从14:00的观测结果看，大气所的温度最高为287 K，位于城区下风向的海淀、朝阳和遥感所温度较大气所低2 K左右，而位于上风向的方庄则较大气所低4 K；观测的风向也为偏东风，大气所、方庄为东南风，海淀为西南风，存在辐合。可见14:00的模拟结果与观测值对比，不论是风场还是温度场都模拟的很准确。到了17:00，整个城区的大部分地区温度趋于均匀，在285 K左右，城区与郊区的温差为1~2 K，风向为东南风，也与观测符合。21日20:00整个区域为偏南风，风速很小，市区中心的温度约为282 K，而近郊温度略低，同样与同时刻的海淀、朝阳和方庄的地面观测值很接近。

通过模拟气象场与观测结果的比较，可见模拟风场总的分布为，风速在城区要略小于郊区，为 $1\sim 2\text{ m s}^{-1}$ ，郊区特别在山地附近风速稍大，有 $2\sim 3\text{ m s}^{-1}$ 。总体风向是中尺度的山谷风环流，21日12:00之前为山风控制吹偏北风，12:00之后转为谷风控制吹偏南风，但是城区内部由于城市热岛的作用风场有向热岛中心辐合的趋势。总的温度分布为，几乎所有时间的城市中心区温度都高于近郊，热岛效应明显，且在城区的下风向温度高于城区上风向，说明热岛位于城区及偏下风向。而观测结果与模拟结果所反映的城市特点相同，说明模式能够较好地模拟城市近地面层的水平特征。

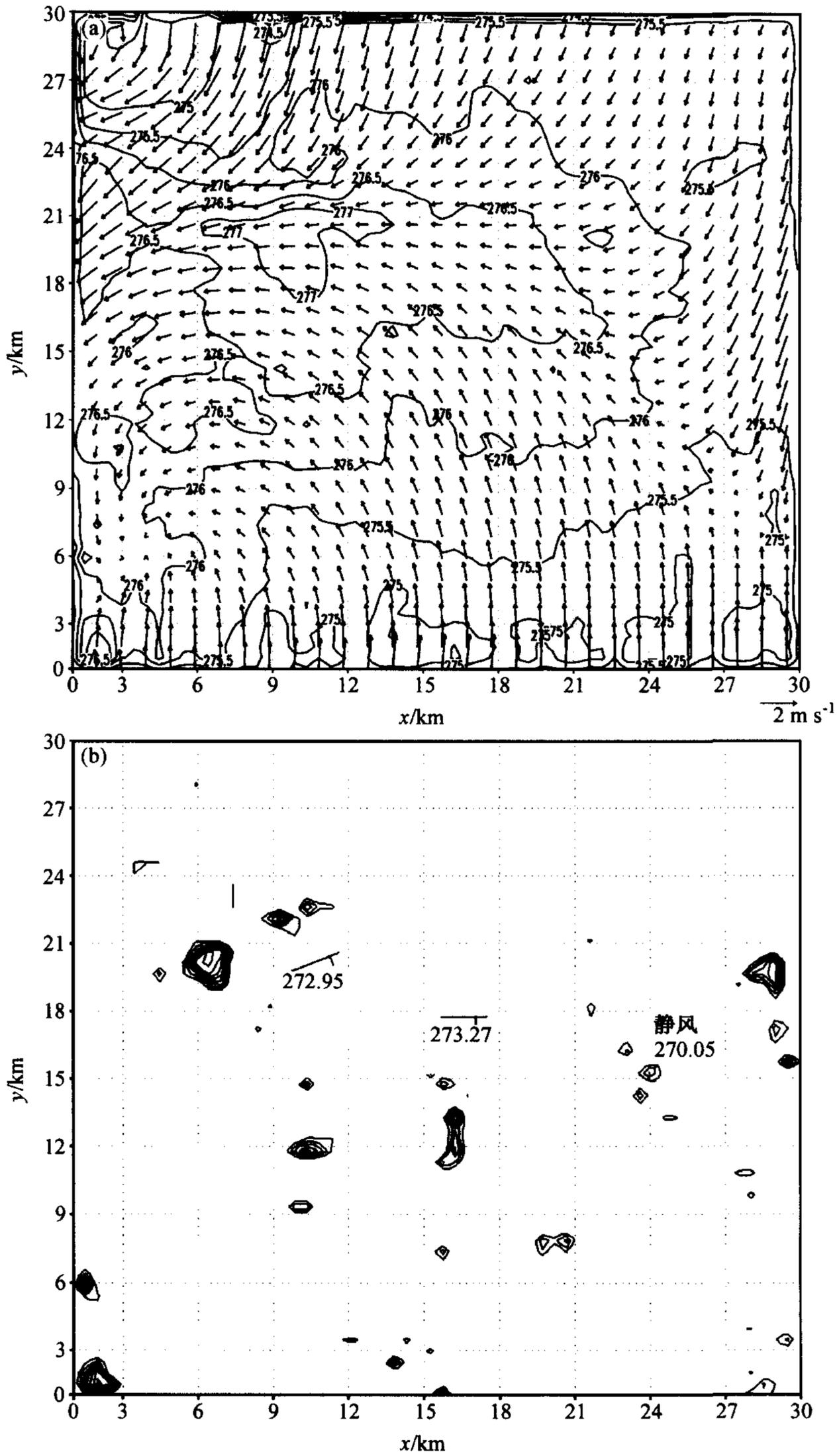


图7 模拟得到的21日02:00近地层(10 m)温度场(单位:K)、风场水平分布(a)及有观测记录的点的观测结果(b)(单位:K)

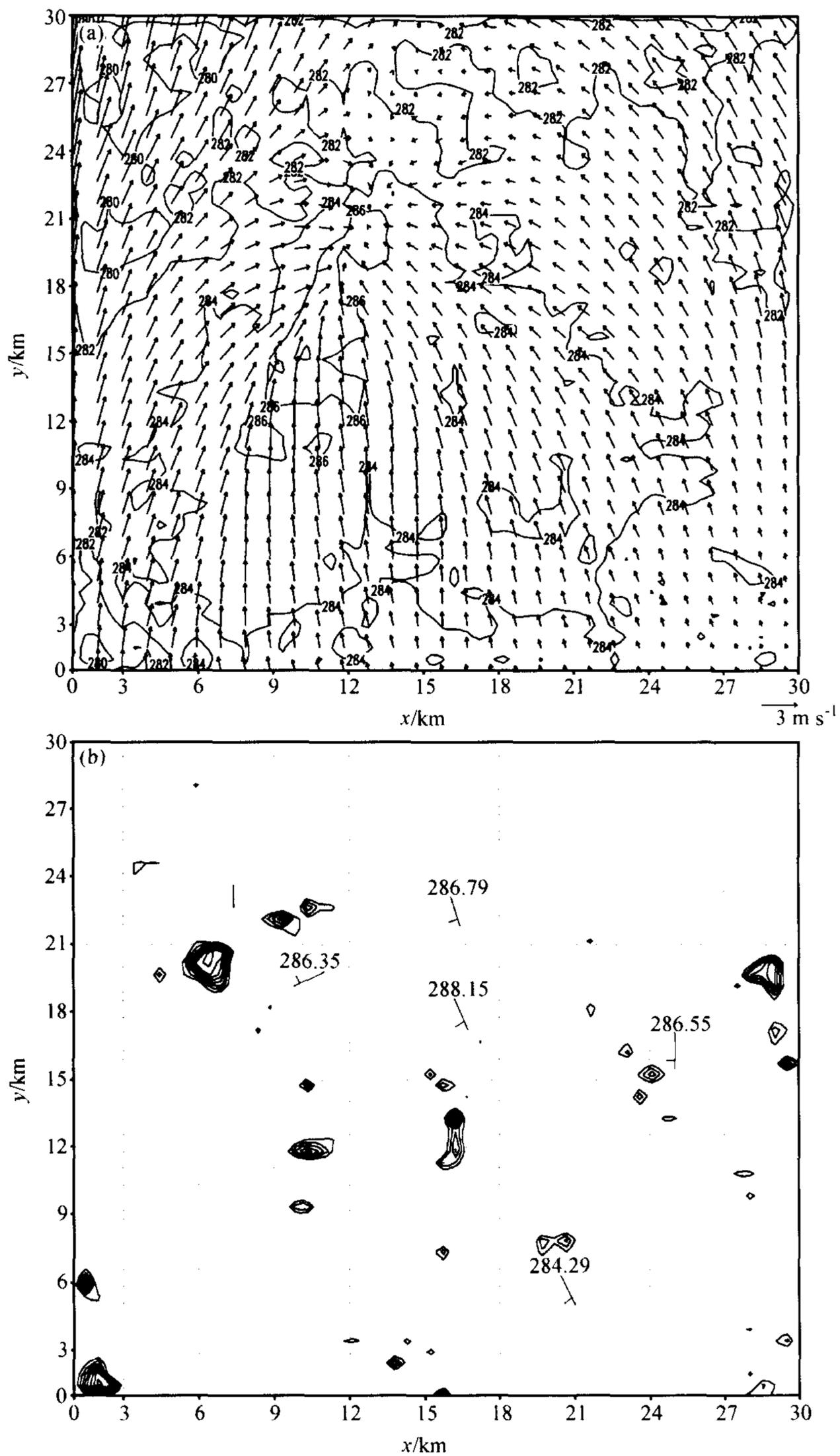


图 8 同图 7，但时间为 21 日 14: 00

## 4 城市人为热对北京热环境影响的敏感试验

为了了解人为热对形成城市热岛的作用,对有无人为热的温度场变化进行对比,并考察如何通过减少人为热的排放量来控制城市热岛。但是实际情况中不是人为热排放的所有部分都能够减少的,如汽车尾气的排放由于汽车数量的不断增加而没法减少,但采暖和工业废热是可以通过提高供热效率和工厂外迁而减少的。对表3几种情况作数值试验。

表3 人为热试验条件

	人为热
试验1	原值
试验2	无人热
试验3	工厂排放量减少50%
试验4	居民用热排放量减少50%

使用2001年2月21日个例模拟的气象条件对上述几种情况进行对比研究。图9为4个试验在大气所位置上的全天温度变化。对比试验1和2,可见人为热虽然在白天数值较大,夜晚数值较小,但人为热对温度的影响却是白天小于夜晚,在白天人为热使温度升高 $1\sim 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而晚上可以使温度增加 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这是因为白天总的热通量较大,人为热对温度的影响相对较小,夜晚其他辐射通量较小,使得人为热对温度的影响明显。图10和图11分别为2月21日13时和22日01时考虑人为热与否的气象场水平差异。根据气象场水平分布在考虑和没考虑人为热的差异看出,夜晚整个模拟区域的温度变化远大于白天,在 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,而白天增加的值都在 $0\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,在没考虑人为热影响时的温度高值区也是考虑人为热影响时温度增加较大的地区,因为本来的温度高值区大都为人为热通量的大值区,风场的差值也为向温度增加较大的地区辐合。

另外通过试验3和试验4的两种较现实可行的方法减少人为热排放,检验上述方法对城市热环境的改善程度。对于通过采用试验3和试验4的途径减少人为热排放,由于分别减少的热量值很小温度相差不大,温度稍微下降 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。这个结果说明较难仅仅通过提高热效率和减少工业废热来改善城市热岛。

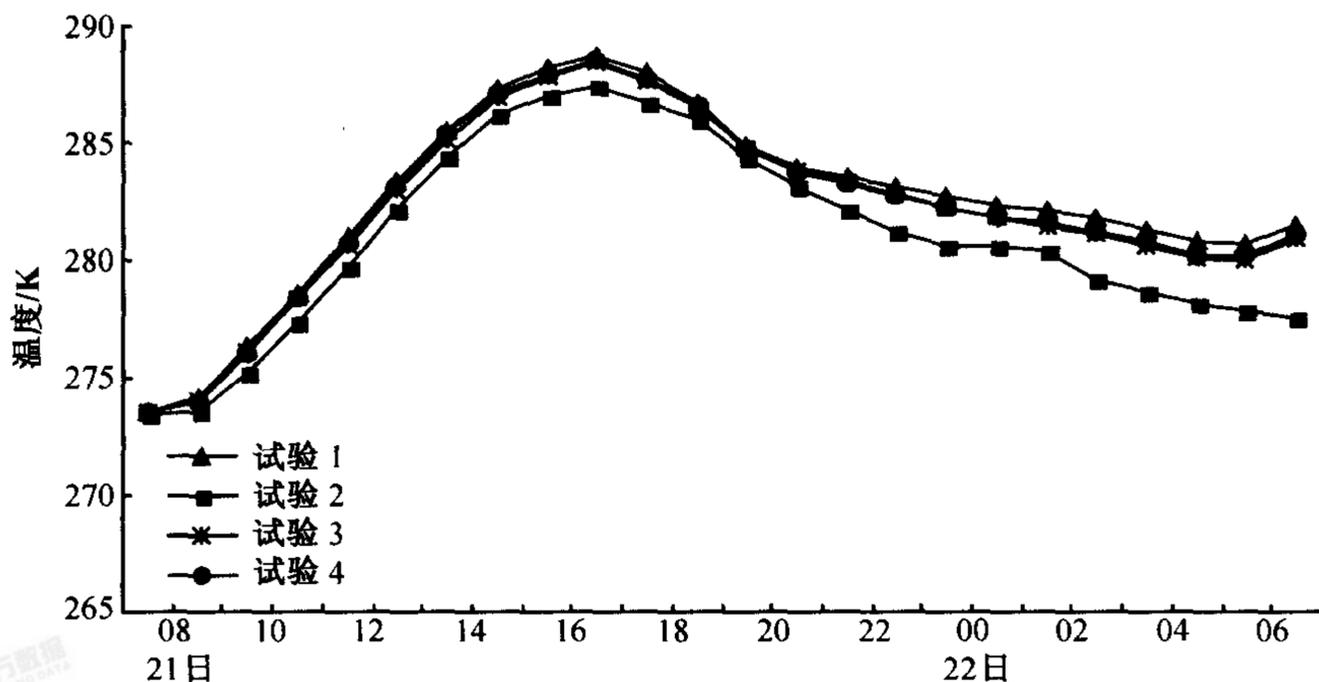


图9 4个试验在大气所位置上的全天温度变化

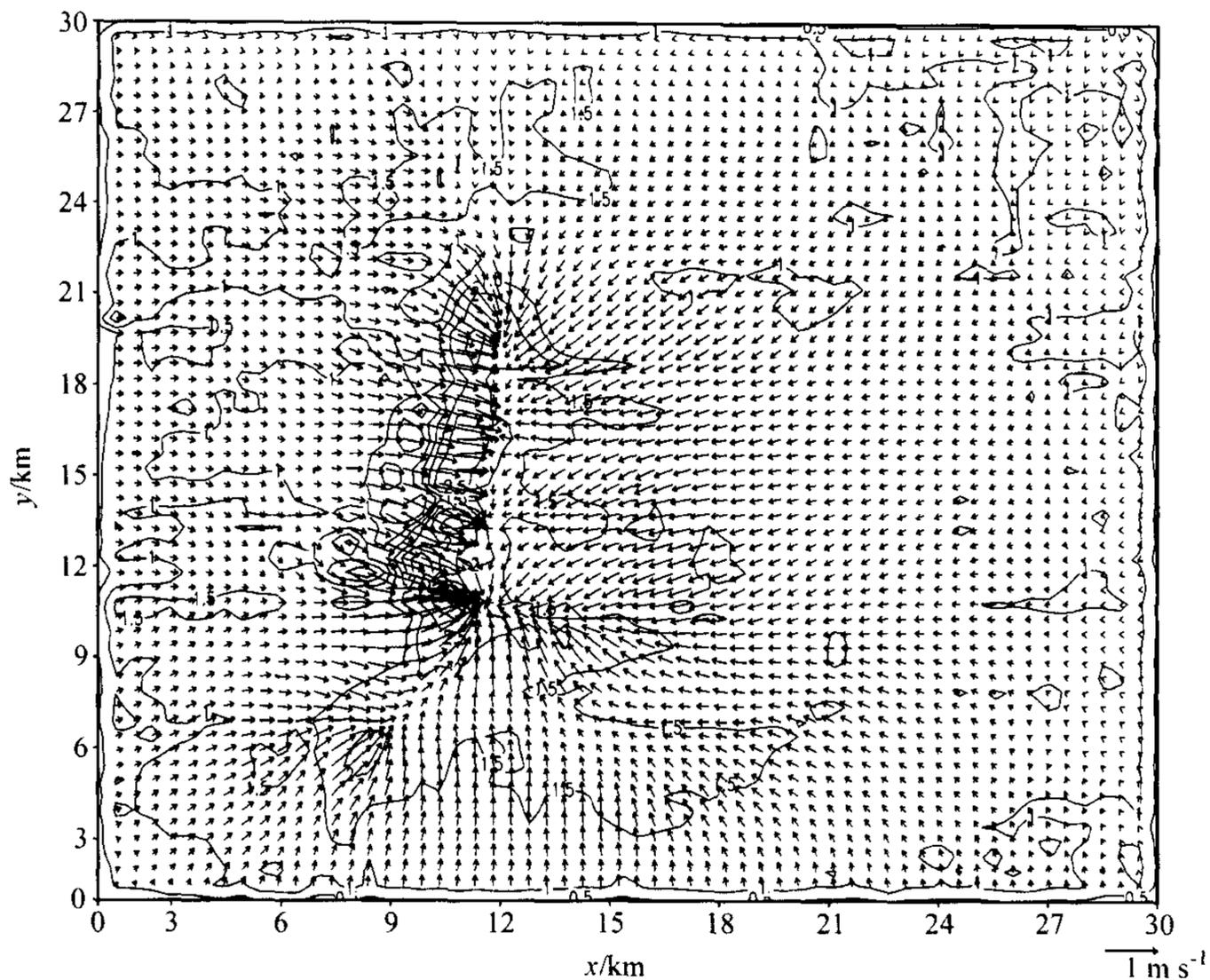


图 10 2001 年 2 月 21 日 13:00 考虑人为热与否的气象场水平差异

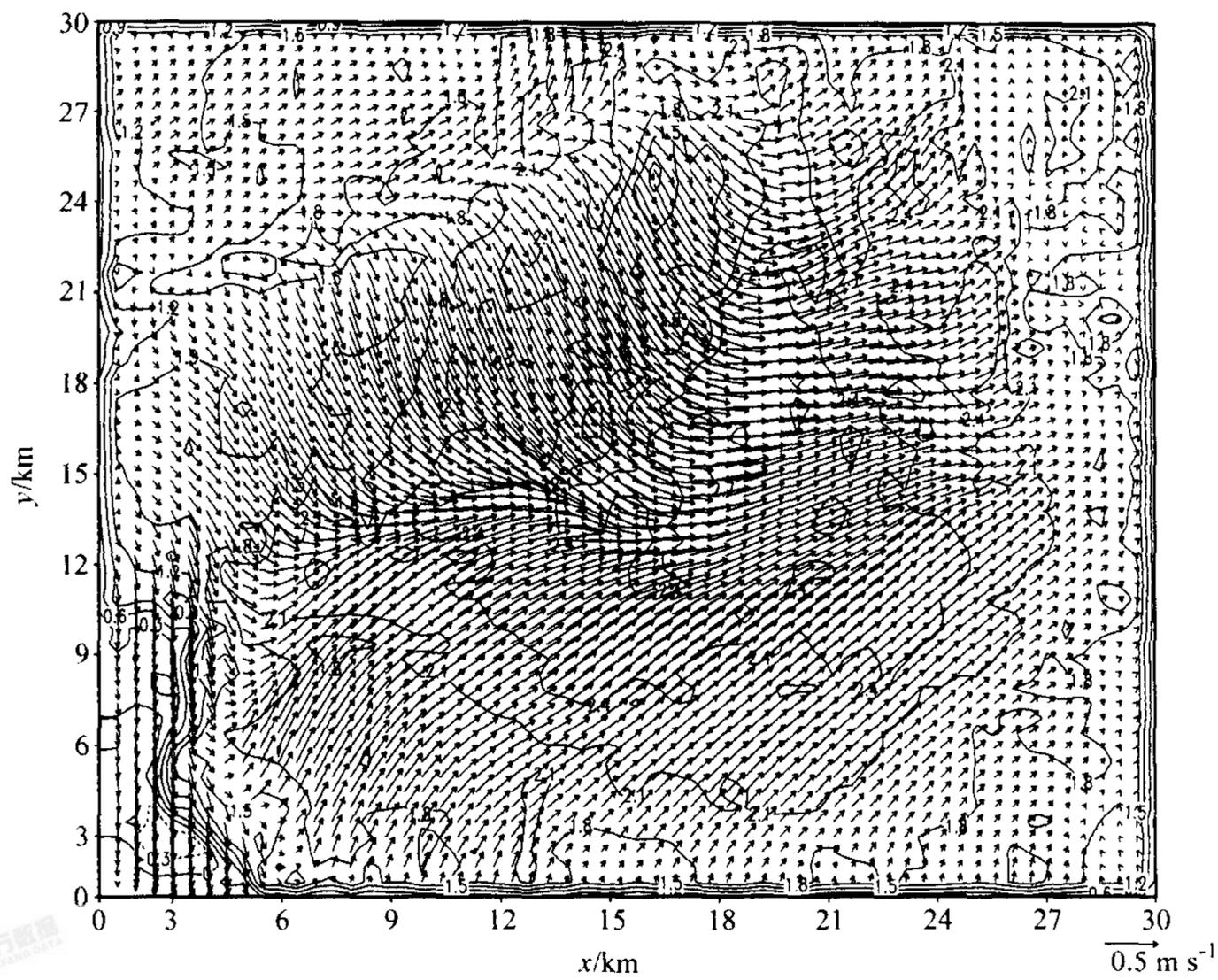


图 11 2001 年 2 月 22 日 01:00 考虑人为热与否的气象场水平差异

## 7 结论

从模式的模拟结果看,通过加入了 MM5 计算出的中尺度背景场,以详细考虑了城市地表类型分布的城市边界层能量平衡模式的温度结果做下边界条件,构成的城市边界层模式可以较准确的模拟城市边界层的风场、温度场、城市大气边界层高度的空间分布和时间演变,模式能够模拟出控制整个地区的中尺度环流背景场,又能模拟叠加在中尺度背景场上的城市影响,结果与常规观测资料和大气科学环境试验的观测结果符合较好。模式为详细了解城市边界层气象特征和环境污染特点提供了有效的方法,对了解和控制空气污染有一定帮助。人为热对城市热岛的形成起很大作用,白天使城市中心温度增加  $0.5^{\circ}\text{C}$  左右,夜晚增加  $1\sim 3^{\circ}\text{C}$  左右,通过提高热效率和减少工业废热的排放对缓解城市热岛的作用不明显。另外这种对人为热时空分布的分项估计,虽然基于一系列调查数据,有一定的参考价值,仍然存在一定的误差。今后如能进行更详细的调查,得到更加详细准确的人为热排放清单,将会更加准确的了解人为热对城市的影响。

## 参 考 文 献

- 1 Toshiaki, I., and S. Kazuhiro, Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo, *Atmospheric Environment*, 1999, **33**, 3897~3909.
- 2 Khan, S. M., and R. W. Simpson, Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed, *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **100**, 487~506.
- 3 Sang Jianguo, Liu Heping, et al., Observational and numerical studies of wintertime urban boundary layer, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, **87**, 243~258.
- 4 Kimura, F., and S. Takahashi, The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: a numerical experiment, *Atmospheric Environment*, 1991, **25B**, 155~164.
- 5 Small, R. D., Environmental Impact of Fires in Kuwait, *Nature*, 1991, **350**, 11~12
- 6 佟华、刘辉志、胡非、桑建国, 城市规划对大气环境变化及空气质量的影响, *气候与环境研究*, 2003, **8** (2), 169~179.
- 7 徐祥德, 城市化环境大气污染模型动力学问题, *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊), 1~12.
- 8 高志球、卞林根、逯昌贵等, 城市下垫面空气动力学参数的估计, *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊), 26~33.
- 9 陆龙骅、卞林根、程彦杰等, 冬季北京城市近地层的气象特征, *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊), 34~42.

## The Impact of Urban Anthropogenic Heat on Beijing Heat Environment

Tong Hua<sup>1)</sup>, Liu Huizhi<sup>2)</sup>, Sang Jianguo<sup>3)</sup>, and Hu Fei<sup>2)</sup>

1) (*National Meteorological Center, Beijing 100081*)

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

3) (*Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

**Abstract** Urban anthropogenic heat plays an important role to urban heat island. A heat emission inventory was carried out for Beijing in winter which includes sources such as motor vehicles, waste heat from industrial activities and space heating. A urban boundary layer model was used to simulate a case in Beijing in winter. The effect of urban heat island is studied by considering and ignoring urban anthropologic heat.

**Key words:** anthropologic heat; urban heat island; numerical simulation