

# 热力粗糙度引入精细城市边界层模式的初步应用

周荣卫<sup>1</sup> 蒋维楣<sup>1</sup> 刘罡<sup>1</sup> 郭文利<sup>2</sup> 王晓云<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 南京大学大气科学系, 南京 210093

<sup>2</sup> 北京市气象局, 北京 100089

**摘 要** 运用南京大学城市尺度边界层模式 (UBLM) 以 100 m 水平网格距的精细高分辨率, 诊断分析小规模城市 (水平范围在一二十公里) 的气象环境与边界层结构。就高分辨率精细模拟分析研究了两个问题: (1) 在模式中引入热力粗糙度, 就引入热力粗糙度前后的模拟结果与实测结果进行对比, 结果表明引入后的模拟结果与自动气象站的观测结果吻合较好, 能够很好地反映出地面气温的日变化规律。冬季, 白天不引入热力粗糙度比引入热力粗糙度会高估小规模城市地区感热通量约  $60 \text{ W/m}^2$ , 而对乡间农作物地区约  $10 \text{ W/m}^2$ 。(2) 以四种不同水平网格距对同一下垫面及气象条件进行诊断分析, 结果表明以 100 m 网格距精细模拟效果明显优于以较大网格距进行的模拟效果。以这样的精细高分辨率模式所获模拟结果分析了小规模城市的边界层特征, 表明: 冬季白天和夜间小规模城市与乡村气温差分别为  $0.8^\circ\text{C}$  和  $0.6^\circ\text{C}$ ; 风速明显低于乡村地区; 湍能高于乡村地区, 白天和夜间湍能一般为乡村的 3 倍左右; 白天混合层发展较乡村迅速, 且高度高于乡村地区。这样的特征在当今城市规划布局工作中, 为特大型城市的卫星城市的建设规划提供了有益的科学实验依据。模拟效果表明以如此高的水平分辨率实施的模式和模拟是可行和有意义的。

**关键词** 高分辨率 城市边界层 数值模拟 热力粗糙度

**文章编号** 1006-9895 (2007) 04-0611-10

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## A Study of Introducing Temperature Roughness Length into a Fine Urban Boundary Layer Model

ZHOU Rong-Wei<sup>1</sup>, JIANG Wei-Mei<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1</sup>, GUO Wen-Li<sup>2</sup>, and WANG Xiao-Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

<sup>2</sup> Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089

**Abstract** The present boundary layer model whose horizontal grid spacing is more than 500 m is not efficient to simulate a town whose horizontal range is fewer than twenty kilometers, as the large horizontal grid spacing cannot satisfactorily distinguish the land surface types from each other. For the present study, the Urban Boundary Layer Model (UBLM) of the multi-scale numerical modeling system with a high resolution ( $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ) is used to simulate the meteorological environment of such a town. UBLM is a three-dimensional model with non-hydrostatic  $E-\epsilon$  turbulence closure scheme, and it has been used to diagnose the meteorological environment and the characteristics of the boundary layer over complex terrains. The UBLM is in terrain-following coordinates, as the horizontal grid spacing is 100 m and the least vertical grid spacing is 5 m. The initial meteorological fields are derived from the results of NJU-Regional Boundary Layer Model (NJU-RBLM) with its horizontal grid spacing being 500 m.

Based on the UBLM with a high resolution ( $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ ), this study diagnoses and analyses the diurnal variation of the meteorological environment and the boundary layer structure of a town in winter. The research methods

**收稿日期** 2006-01-19 收到, 2006-03-20 收到修改稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40333027

**作者简介** 周荣卫, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 主要从事城市气象环境、大气边界层物理的研究。E-mail: jwm@nju.edu.cn

and results are as follows: 1) the simulated results of surface air temperature, when taking temperature roughness length into account, are in reasonable agreement with the observational results of automatic weather station, and they actually reflect the diurnal variation of the temperature. The relative mean bias of surface air temperature is only 0.22 and its correlation coefficient is 0.77. In the daytime of winter, the simulated results without temperature roughness length will overestimate the sensible heat flux by  $60 \text{ W/m}^2$  or so in the town, and about  $10 \text{ W/m}^2$  or so in the rural area. 2) By comparing four different scales of horizontal grid spacing in the same area with the same meteorological condition, the diagnostic analysis shows that the results from a fine simulation (100 m horizontal grid spacing) are apparently better than those done with larger-scale simulations. Then, by analyzing the boundary layer structure of the town in winter with the results from high-resolution simulation, the study shows that the temperature differences between the town and the rural area are  $0.8^\circ\text{C}$  in the daytime and  $0.6^\circ\text{C}$  in the nighttime respectively, and that the wind speed in the town is lower than that in the rural area. Simultaneously, the turbulent kinetic energy of the town is three times that of the rural area, and the evolution of boundary layer of the town is quicker than that of the rural area, with the boundary layer higher than that of the rural area. In the daytime of winter, the height of the boundary layer in the town is about 700 m, while that in the rural area is around 500 m. In urban planning, therefore, these characteristics of the town provide scientific evidence for the planning of the satellite cities around the megalopolis. The simulation results prove that such high-resolution model and simulation are both practical and feasible.

**Key words** high resolution, urban boundary layer, numerical simulation, temperature roughness length

## 1 引言

随着经济的高速发展,城市人口越来越密集。20 世纪末,全球大约一半(约 30 亿)人居住在城市里。联合国预计:到 2025 年,城市人口还将加倍。因此,建设小规模卫星城市是一个很好的解决途径。目前,我国小规模城市建设正处在逐步完善当中,为了合理布局,促进小规模城市健康发展,小规模城市作为特大型城市的卫星城市既起到大城市分流和通道的作用,又为建设良好人居环境、发展和谐社会起良好作用,因此,有必要采用精细高分辨率的 $U$ BLM 模式实施大气环境条件及其影响的评估,有关城市热岛及小城镇气温特征的研究越来越多<sup>[1~3]</sup>。小规模城市建设范围一般为一、二十公里,现有城市边界层模式的水平分辨率尚嫌不够<sup>[4]</sup>。本文在多尺度数值模式系统中 UBLM 模式<sup>[5]</sup>的基础上,以 100 m 水平网格距对此类小规模城市进行数值模拟。提高数值模式的分辨率,可以使模式更好地识别下垫面土地利用类型的影响,同时模式在数值运算时能直接计算的含能涡尺度降低。为了使高分辨率城市边界层模式计算得到的地表能量平衡各能量分量更接近实际情况,本文在模式中引入了热力粗糙度。另外,本文还专门研究分析了采用精细 100 m 水平网格距

的实际模拟效果,并给出一些示例。最终,在结果分析基础上,给出了一实际小规模城市范围的模拟实例。

## 2 热力粗糙度及其引入

南京大学城市尺度边界层模式 (UBLM) 中,关于近地层参数化方案,与其他模式(如 MM5、ARPS、RAMS 等)一样,忽略了热力粗糙度与动力粗糙度的区别,采用相同的值。然而,近地层对于动量和热量的传输机制并不一样,在接近地表的范围内湍流运动已不是动量和热量的主要输送方式,动量输送主要靠粘性切变和粗糙元的作用(即气压脉动的影响),而热量的输送则仅靠分子扩散过程来传输<sup>[6]</sup>。任军芳等<sup>[7]</sup>对六种不同植被作对比试验,指出热力粗糙度远小于动力粗糙度,相差约 3~10 个数量级不等,但是在动力粗糙度较小的水面和冰面上,热力粗糙度则大于动力粗糙度。在以往的模式中近地层参数化时,热力粗糙度一般粗略地用动力粗糙度来代替,这样计算得到的感热通量一般会高于实际值,因此会改变地表能量平衡关系,得不到正确的地面气温模拟效果。Garratt<sup>[6]</sup>提出了平坦和粗糙地表面上的热力粗糙度参数化公式;Brutsaert<sup>[8]</sup>提出了粗糙下垫面热力粗糙度参数化公式;Brutsaert 和 Sugita<sup>[9]</sup>在 Brutsaert<sup>[8]</sup>工作

的基础上, 针对植被冠层提出了与冠层特性相关的参数化公式; Jensen 和 Hummelshoj<sup>[10]</sup> 提出运用植被叶面积指数来计算植被地区热力粗糙度的参数化公式; Cahill 等<sup>[11]</sup> 根据实测资料对 Brutsaert 公式<sup>[8]</sup> 的系数进行了订正。虽然热力粗糙度的参数化公式大多与动力粗糙度和摩擦速度有关, 但是在陆地上, 特别是植被和城市地区, 热力粗糙度还与植被叶面积指数和城市建筑物分布特征有很大的关系, 目前并没有专门关于城市建筑物地区的参数化公式。在现有的边界层模式中, 通常没有单独引入热力粗糙度的计算, 而是把动力粗糙度近似等同于热力粗糙度。

本文在 UBLM 模式中近地层参数化时引入热力粗糙度的计算, 其参数化表达式为

$$u = \frac{u_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m \frac{z}{L} \right), \quad (1)$$

$$\theta - \theta_0 = \frac{\theta_*}{k} \left( \ln \frac{z}{z_{0t}} - \Psi_h \frac{z}{L} \right), \quad (2)$$

其中,  $z$  为大气第一层高度,  $u$  和  $\theta$  分别为模式中大气第一层水平风速和位温,  $\theta_0$  为地表位温,  $u_*$  为摩擦速度,  $\theta_*$  为特征位温,  $L$  为 Monin-Obukhov 长度,  $k$  为 Von-Karman 常数,  $z_0$  为动力粗糙度,  $z_{0t}$  为热力粗糙度,  $\Psi_m$  和  $\Psi_h$  为普适函数。而普适函数表达式为

$$\Psi_m = \begin{cases} \ln \left[ \frac{1+x^2}{2} \left( \frac{1+x}{2} \right)^2 \right] - 2\text{arctg}(x) + \frac{\pi}{2}, & \frac{z}{L} < 0, \\ -5 \frac{z}{L}, & \frac{z}{L} > 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$x = \left( 1 - 15 \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4)$$

$$\Psi_h = \begin{cases} 2 \ln \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 15 \frac{z}{L}} \right) \right], & \frac{z}{L} < 0, \\ -4.7 \frac{z}{L}, & \frac{z}{L} > 0. \end{cases} \quad (5)$$

在实际模拟过程中, 采用 Brutsaert<sup>[8]</sup> 提出的粗糙下垫面参数化公式来计算所有下垫面类型下的热力粗糙度。

$$z_{0t} = z_0 [7.4 \exp(-2.46 Re_*^{1/4})], \quad (6)$$

其中,  $Re_* = u_* z_0 / \nu$  为粗糙雷诺数,  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  为分子运动学粘性系数。

### 3 模拟算例计算条件

本文运用的高分辨率城市边界层模式是一个三

维非静力, 湍流  $E-\epsilon$  闭合的边界层模式, 模式采用地形跟随坐标系, 模式水平网格距为 100 m, 垂直向采用拉伸网格, 最低层为 5 m。高分辨率城市边界层模式基本方程以及湍流  $E-\epsilon$  闭合方程与 UBLM 模式相同。本文数值计算的模式初始场取自多尺度模式系统中的区域城市边界层模式 (NJU-RBLM) 模式<sup>[12, 13]</sup> 500 m 水平网格距的预报结果, 诊断分析模拟区域内的气象环境。

运用高分辨率城市边界层模式对两个不同区域进行了模拟:

算例 1 [图 1 (见文后彩图)] 模拟区域范围为 12 km×18 km, 中心经纬度为 (39.8446°N, 116.4330°E), 模拟算例取 2004 年 1 月 27 日 08 时~28 日 08 时 (北京时, 下同) 24 小时, 采用对比资料为该区域内的自动气象站的观测结果。算例 1 在模拟过程中根据城市发展情况不同把城市下垫面分为类型城市和小规模城市, 小规模城市主要分布在模拟区域的南部, 其中有南郊观象台站。由于模式的水平网格距仅 100 m, 由图 1 可见模式能够清晰分辨出城市内的水面、草地和树木的分布, 甚至连宽阔的道路也可以分辨出来。

算例 2 [图 2 (见文后彩图)] 模拟区域为一实际的小规模城市, 模拟范围为 10.5 km×6.7 km, 水平网格距为 500 m 以上的城市尺度边界层模式就不适合用于这样的模拟区域。模拟区域内小规模城市下垫面相对集中在两块地区, 分别在河流东北边和模拟区域的东南角。东南部的城市类型下垫面分布仅在 1 km 左右, 网格距较大的模式跟本不能很好的分辨出来, 更不能正确地模拟该地区的气象环境。

### 4 模拟结果与效果检验

本文为了验证高分辨率城市边界层模式在引入了热力粗糙度后的模拟效果, 分别计算了未引入热力粗糙度 (方案 1) 和引入热力粗糙度 (方案 2) 两种方案, 并对地面气温的模拟结果与自动气象站观测资料进行对比。图 3 和图 4 分别为算例 1 中南郊观象台站和算例 2 中亦庄站的地面气温对比结果图。

南郊观象台站 (图 3) 的地面气温在未引入热力粗糙度时, 模拟结果与实测结果偏差最大为 2.86°C, 引入后仅 19 时、02 时和 08 时偏差超过 1.0°C, 其余时刻的偏差均低于 0.5°C; 亦庄站 (图 4) 的地面气温引入前模拟结果最大偏差为 2.0°C,

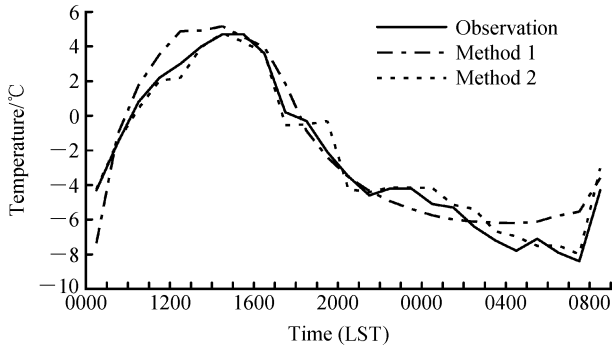


图3 南郊观象台地面气温的模拟和自动气象站对比图

Fig. 3 Comparison between the simulation and observation of surface air temperature at Nanjiao Guanxiangtai station

表1 不同方案各站点地面气温模拟值与观测值的相对平均偏差和相关系数

Table 1 The relative mean biases and correlation coefficients of surface air temperatures between simulation and observation at every station for different methods

自动站	相对平均偏差		相关系数	
	方案1	方案2	方案1	方案2
天安门	-4.55	-0.10	0.67	0.78
十八里店	-0.45	0.31	0.73	0.77
白家庄	-3.68	0.54	0.62	0.80
古观象台	-1.10	0.29	0.71	0.81
南郊观象台	0.11	0.06	0.76	0.73
亦庄	0.05	0.01	0.66	0.75

引入后最大偏差仅为  $1.0^{\circ}\text{C}$ ，模式引入热力粗糙度后对地面气温的模拟结果与实测结果偏差缩小了一半以上。由图 3、4 可以看出，模式引入热力粗糙度后地面气温模拟结果与实测结果偏差缩小，与实测吻合较好，基本能够模拟出气温的日变化规律。

除了对上述测站的模拟结果与自动气象站观测结果进行点对点的直接对比外，还对地面气温作了统计指标比较<sup>[14]</sup>，计算的统计指标有相对平均偏差 ( $F$ ) 和相关系数 ( $R$ )。

$$F = \frac{\bar{X}_0 - \bar{X}_p}{0.5(\bar{X}_0 + \bar{X}_p)}, \quad (7)$$

$$R = \frac{(\bar{X}_0 - \bar{X}_p)(X_p - \bar{X}_p)}{[(X_0 - \bar{X}_0)^2(X_p - \bar{X}_p)^2]^{1/2}}. \quad (8)$$

公式 (7)、(8) 中的  $X_0$  表示观测值， $X_p$  表示模拟值，“ $\bar{\quad}$ ”表示空间或时间的平均。表 1 给出了各测站两种不同方案模拟地表气温的相对平均偏差和相关系数。从统计结果同样可以看出，引入热力粗糙度方案 2 的模拟结果明显优于未引入热力粗糙度

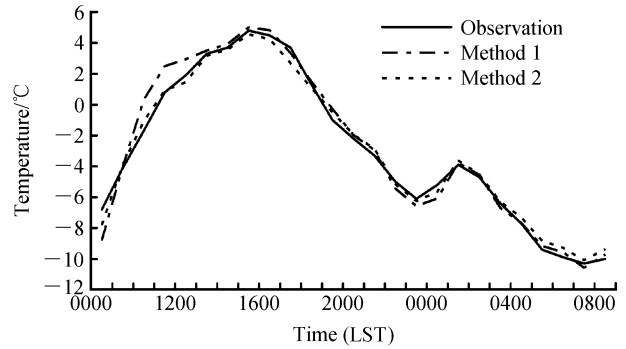


图4 亦庄站地面气温的模拟和自动气象站对比图

Fig. 4 Comparison between the simulation and observation of surface air temperature at Yizhuang station

方案 1，方案 1 的相对平均偏差和相关系数分别为 1.66 和 0.69，方案 2 的相对平均偏差和相关系数分别为 0.22 和 0.77。从表 1 中还可以得出，城郊站点模拟结果偏差最小，城市内站点的模拟结果偏差相对较大，但是在引入方案 2 中相对平均偏差最大也仅为 0.54，所以引入热力粗糙度后的高分辨率城市边界层模式能够更准确地模拟地面气温。

## 5 不同水平网格距流场模拟

本文对实际小规模城市 (图 2) 分别采用四种不同水平网格距 1000 m、500 m、200 m 和 100 m 来进行模拟，其中 1000 m 和 500 m 采用 UBLM 模式计算，200 m 和 100 m 则运用高分辨率城市边界层模式来模拟。实际小规模城市中存在两块相对比较集中的城市地区，所占面积分别大约为  $3\text{ km} \times 3\text{ km}$  和  $1\text{ km} \times 2\text{ km}$ ，模拟区域内还有水面和植被的分布。模拟时间为 1 月 27 日 14 时，此时模拟区域内测站风速  $3.0\text{ m/s}$ ，风向为西南风。

图 5 为四种采用不同水平网格距计算得到的地表流场分布。从流场对比图可以看出，水平网格距为 1000 m 和 500 m 的城市尺度边界层模式因为难以识别出较细的城市下垫面特征，因而也不能较确切地模拟出地面流场分布；而 100 m 水平网格距的模拟结果又比 200 m 的效果要好一些。对比下垫面分布图 (图 2) 和图 5d，可以看出水平网格距 100 m 的高分辨率城市边界层模式能很好地模拟出小规模城市地表的流场结构。图 5d 中有两个明显的气流辐合地区，这两个地区分别对应为河流附近和东南部的城市区域。图 6 为 100 m 水平网格距模拟得到的

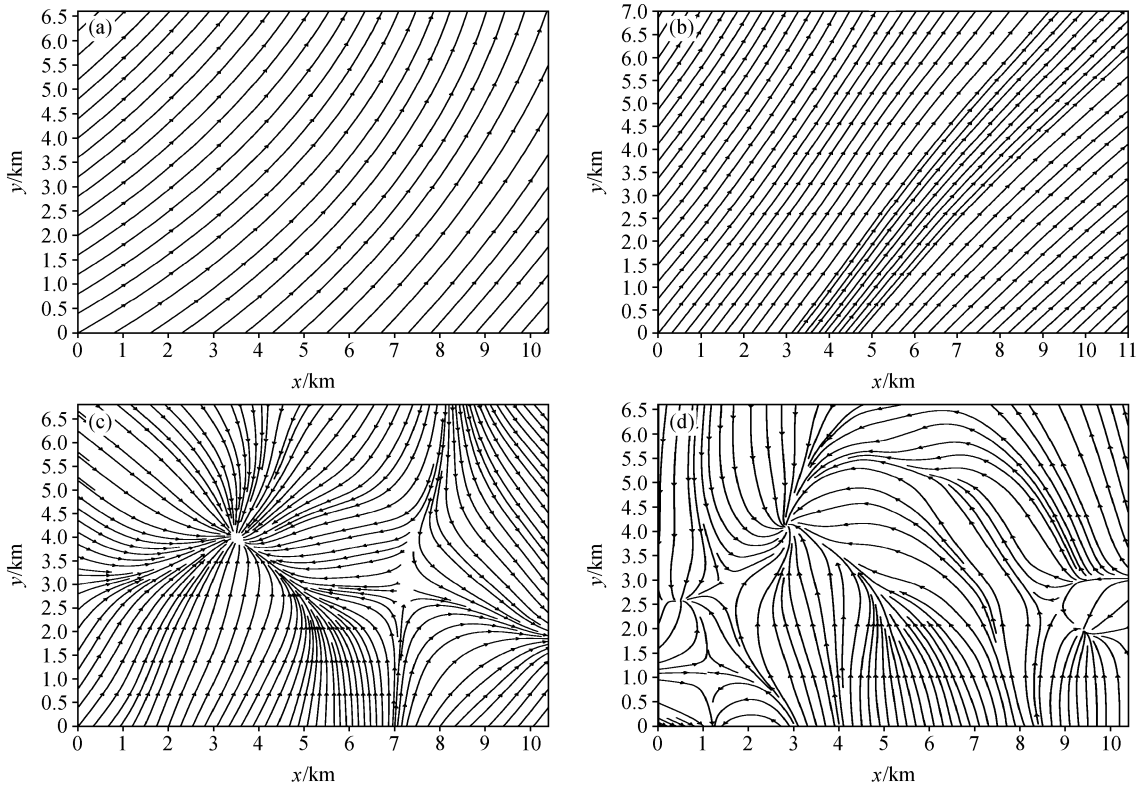


图 5 四种不同水平网格距 14 时地面流场对比图: (a) 1000 m; (b) 500 m; (c) 200 m; (d) 100 m

Fig. 5 Comparison among simulated surface streamline fields at 1400 LST for four different horizontal grid spacings: (a) 1000 m; (b) 500 m; (c) 200 m; (d) 100 m

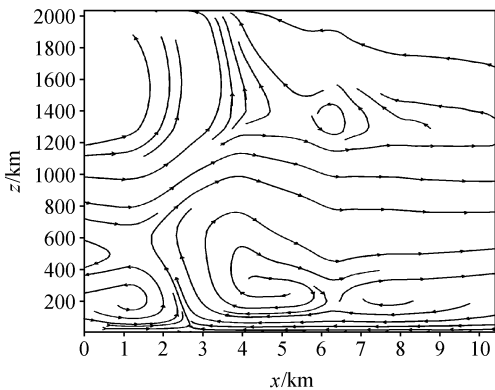


图 6 水平网格距 100 m  $u-w$  垂直剖面图 ( $y=4.5$  km)

Fig. 6 The vertical cross section of simulated  $u-w$  for 100 m horizontal grid spacing ( $y=4.5$  km)

$u-w$  垂直剖面图, 由于小规模城市分布地区地面气温比周围地区要高, 在该地区上空形成上升气流, 因而在城市分布地表形成了气流的辐合区。

### 6 城市边界层结构与特征模拟

以算例 2 的计算条件对实际的一个小规模城

市, 选 1 月 27 日 08 时~28 日 08 时的气象条件作了 24 小时日变化的模拟, 模式引入热力粗糙度的方案分析其边界层特征。模拟结果表明, 如果在边界层模式中采用的热力粗糙度等同于动力粗糙度, 则模拟所得的感热通量会高于实际值。图 7 (见文后彩图) 为算例 2 引入热力粗糙度前后模拟 1 月 27 日 14 时感热通量的差。在该小城市区域, 感热通量差值相对较大, 约为  $60 \text{ W/m}^2$ , 而乡间农作物地区差值较小, 约为  $10 \text{ W/m}^2$ 。这里分析引入热力粗糙度前后感热通量模拟结果差值主要与该地区的实际感热通量值有关, 感热通量越大的地区, 不引入热力粗糙度造成的感热通量偏差就会较大。

图 8 为 1 月 27 日 14 时和 1 月 28 日 02 时地表气温分布图, 从图中可以看出水平网格距 100 m 的高分辨率城市边界层模式能够清晰地模拟出不同下垫面情况下近地面的气温分布。100 m 的水平网格可以读出模拟范围内小规模城市、河流的分布, 就连东南部很小的城市地区都能被清晰的读出。14 时城市分布地区最高气温达到  $4.0^\circ\text{C}$  左右, 在一般

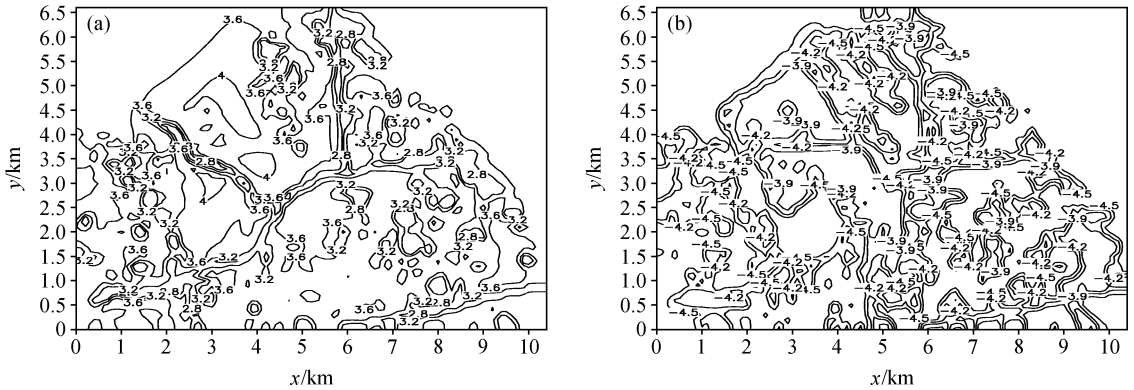


图8 1月27日14时(a)和28日02时(b)地面气温分布图(单位: °C)

Fig. 8 Surface air temperature (°C) distributions at 1400 LST 27 Jan (a) and 0200 LST 28 Jan (b)

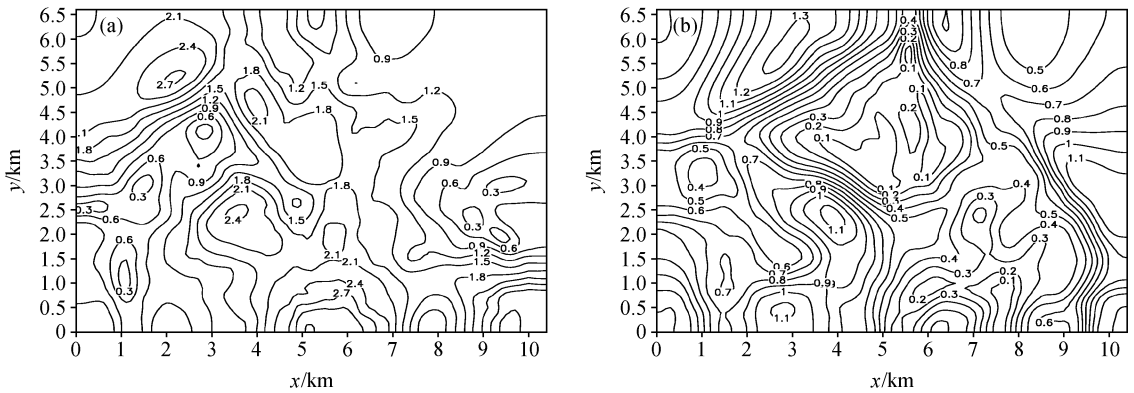


图9 1月27日14时(a)和28日02时(b)地表风速分布图(单位: m/s)

Fig. 9 Surface wind speed (m/s) distributions at 1400 LST 27 Jan (a) and 0200 LST 28 Jan (b)

分布建筑物的地区气温均在 $3.6^{\circ}\text{C}$ 左右,而在河流附近气温明显偏低,一般为 $2.8^{\circ}\text{C}$ ,乡村地区气温则为 $3.2^{\circ}\text{C}$ 左右,小规模城市地区最高气温比乡村气温高 $0.8^{\circ}\text{C}$ 。02时城市分布地区气温一般为 $-3.9^{\circ}\text{C}$ ,乡村地区的气温在 $-4.5^{\circ}\text{C}$ 左右,而河流附近的气温与14时不同的是,比乡村地区的气温要高,为 $-4.2^{\circ}\text{C}$ ,在夜间02时左右,小规模城市与乡村的气温差为 $0.6^{\circ}\text{C}$ 。与一般城市地区存在明显的热岛效应相比,小规模城市范围较小,同时附近存在大量植被,缓和了与乡村不同下垫面间的气温差,使得白天和夜间的气温差均较小,不存在明显的热岛效应。

图9为27日14时和28日02时地表风速分布图。小规模城市地区由于建筑物的拖曳作用,使得该地区风速明显低于乡村地区。14时,城市分布地区风速为 $0.3\sim 1.2\text{ m/s}$ ,中心风速最低为 $0.3\text{ m/s}$ ,乡村地区最大风速达到 $2.7\text{ m/s}$ 。夜间02时,由于

整体风速较小,城市中心风速仅为 $0.1\text{ m/s}$ ,乡村地区风速为 $1.0\text{ m/s}$ 左右。由模拟结果可以看出小规模城市地区的建筑物对气流的拖曳作用还是比较明显的。

图10为27日14时和28日02时地表湍能分布图,从图中可以清楚看出,白天和夜间城市地区的湍能均比其余地区要大,14时城市地区最大达到 $0.6\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,乡村地区在 $0.2\text{ m}^2/\text{s}^2$ 左右;而夜间02时湍能较低,城市地区为 $0.3\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,乡村地区为 $0.1\text{ m}^2/\text{s}^2$ ,甚至更低。同时,由于水面相对平坦,风速较大,在城市中间的河流附近,湍能也比城镇地区要低。从白天和夜间地表湍能水平分布大致可以得出,象算例2这样的小规模城市,城市地区的湍能一般为乡村地区的3倍左右。

图11为27日14时和28日02时湍能垂直剖面图,垂直剖面取在城镇中心( $y=4.5\text{ km}$ )处。由图11可以看出,城市地区湍能大于乡村地区,

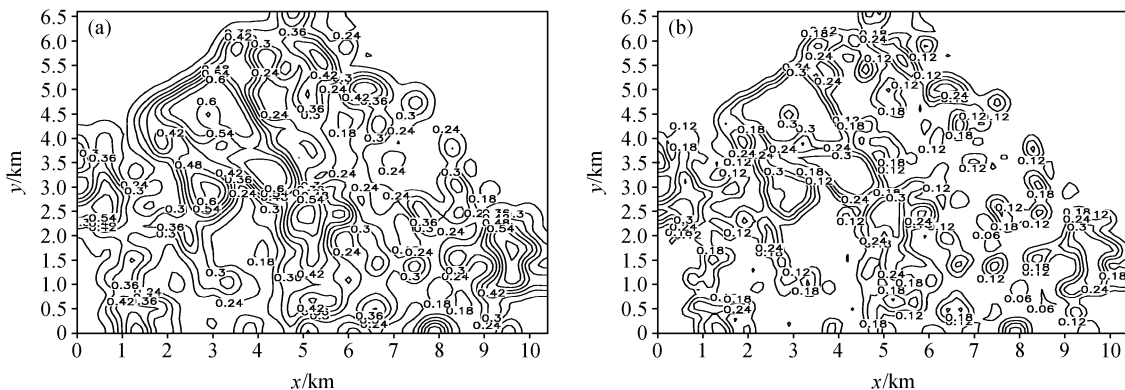


图 10 1月27日14时(a)和28日02时(b)地表湍能分布图(单位:  $m^2/s^2$ )

Fig. 10 Surface turbulent kinetic energy ( $m^2/s^2$ ) distributions at 1400 LST 27 Jan (a) and 0200 LST 28 Jan (b)

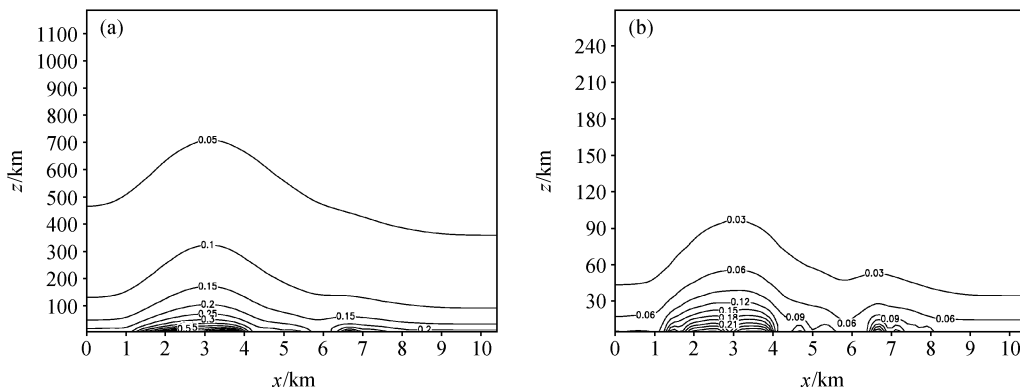


图 11 1月27日14时(a)和28日02时(b)湍能  $x-z$  剖面图 ( $y=4.5$  km, 单位:  $m^2/s^2$ )

Fig. 11 The vertical cross sections of turbulent kinetic energy ( $m^2/s^2$ ) at 1400 LST 27 Jan (a) and 0200 LST 28 Jan (b) ( $y=4.5$  km)

14时,城市地区湍能发展高度达到700 m左右,而乡村地区为500 m左右;02时,城市地区湍能发展高度为100 m附近,而乡村地区仅为60 m左右。白天湍能发展高度大于夜间,同时城市地区湍能发展高度比乡村地区要高。

图12为小规模城市和乡村27日08~12时混合层变化图,08时到12时气温逐步上升。08时,城市和乡村均为稳定的温度层结,随着太阳辐射增强,地表气温逐渐上升,稳定层结被破坏,混合层开始抬升;到10时,城市地区已经形成明显的大约为400 m的混合层,而乡村地区虽然稳定层结被破坏,但是混合层发展没有城市地区明显;12时,城市地区混合层进一步发展达到700 m左右,同时乡村地区也形成了明显的混合层,高度为550 m左右。从08时到12时,可以得出混合层反展过程,城市地区混合层发展较乡村地区要快,同时混合强度要比乡村地区大。

图13为小规模城市和乡村27日14~20时混合层变化图,14时到15时气温有所上升,15时开始气温逐步下降。14时城市地区仍维持500 m左右的明显的混合层,而乡村地区混合层已经开始减弱,16时已经为完全的稳定层结。虽然,城市地区15时气温要高于14时,但是由于太阳辐射减少,地面向上输送热量降低,混合层高度降低,混合开始减弱,16时变为完全的稳定层结。

## 7 结论与讨论

本文运用UBLM模式以100 m水平网格距的精细高分辨率研究了小规模城市的气象环境和边界层结构。在模式中引入了热力粗糙度,采用Brutsaert粗糙下垫面下的计算公式。运用高分辨率城市边界层模式,对算例1和实际小规模城市算例2分别采用未引入热力粗糙度和引入热力粗糙度两种不同方案,模拟1月27日08时~28日08时24小

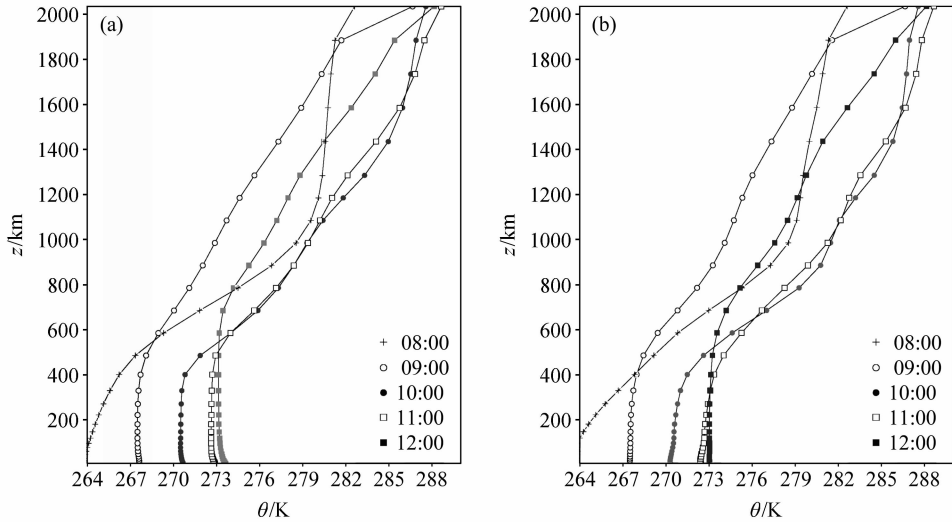


图 12 1月27日08~12时混合层高度变化:(a)小规模城市;(b)乡村。 $\theta$ 表示位温

Fig. 12 Variations of boundary layer height during 0800 LST–1200 LST 27 Jan; (a) Town; (b) rural areas,  $\theta$  is the potential temperature

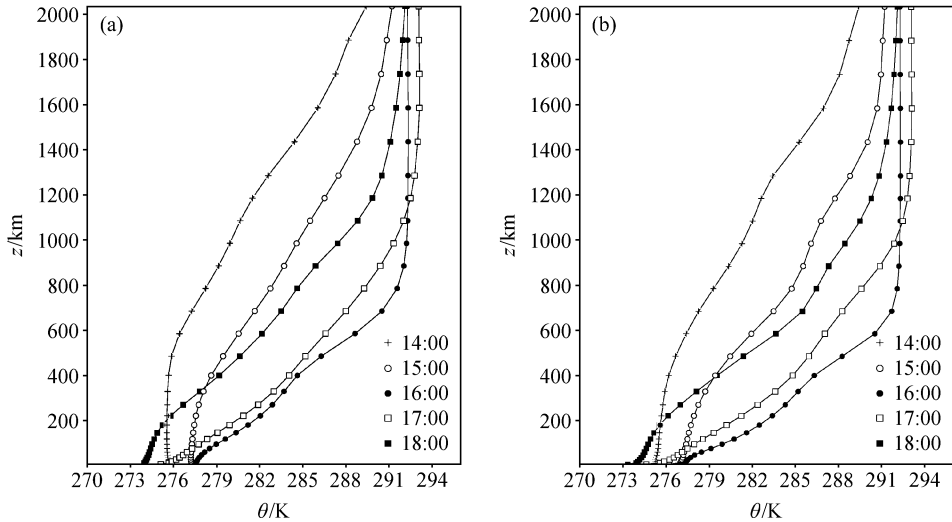


图 13 27日14~18时混合层高度变化:(a)小规模城市;(b)乡村

Fig. 13 Variations of boundary layer height during 1400 LST–1800 LST 27 Jan; (a) Town; (b) rural areas

时日变化,并对其中六个测站地面气温的观测结果与模拟结果进行对比,引入热力粗糙度后大大改进了模式的模拟能力,模拟结果与自动气象站的观测结果吻合良好,能够较好地反映气温的日变化规律,平均相对偏差仅为0.22,相关系数为0.77。对算例2模拟结果表明,冬季,不引入热力粗糙度对城市地区的感热通量会高估约 $60 \text{ W/m}^2$ ,而对乡间农作物地区高估约 $10 \text{ W/m}^2$ 。通过对比四种不同水平网格距对同一区域及气象条件模拟的地表流场情况,发现100 m分辨率的城市边界层模式能够准确地模拟出地表流场的情况,而1000 m和500 m

基本不能识别出下垫面热力环境对地表流场的作用。

模式中引入了热力粗糙度,对地表气温的模拟结果与实测结果吻合较好,但是从统计结果来看,在高密度建筑物地区的模拟结果不及其余地区。热力粗糙度公式与下垫面特征有较强的相关性,特别在城市地区,建筑物的平均高度和密度都是很大的影响因素,相对于植被地区来说,城市建筑物地区热力粗糙度相关因素更多,所以要在城市地区运用热力粗糙度,最好根据实际观测资料对现有公式进行订正,得到适合该地区的热力粗糙度公式。



运用高分辨率城市边界层模式对小规模城市冬季边界层特性进行分析, 该模式能够清晰地模拟出不同下垫面情况下的气象要素, 城市地区的气温高于乡村地区, 河流附近的气温日变化较小, 在夜晚稍高于乡村地区, 城市地区风速明显低于乡村地区, 城市中的河流附近风速较大。冬季, 小规模城市并不存在像大城市那样有明显的热岛效应, 白天和夜晚小规模城市与乡村的气温差分别为  $0.8^{\circ}\text{C}$  和  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。由于城市地区气温较高, 白天和夜晚均为气流辐合地区。白天乡村地区风速为  $2.7\text{ m/s}$ , 而城市中心最低为  $0.3\text{ m/s}$ , 夜晚整体风速偏低, 城市中心基本为静风状态。小规模城市的建筑物对气流的拖曳作用还是相当明显的, 当外部风速处在  $1.0\text{ m/s}$  左右时, 城市中心基本上是静风状态。小规模城市地区湍能高于乡村地区, 就冬季而言, 白天和夜晚一般为乡村地区的 3 倍, 城市地区湍能发展最高大约为  $700\text{ m}$ , 乡村地区为  $500\text{ m}$  左右, 城市地区混合层发展比乡村迅速, 同样下午混合层削弱也比乡村地区晚。

我们将进一步着手研究城市不均匀下垫面条件下, 对热力粗糙度参数化公式的研究以及它与动力粗糙度的关系, 再次引入到精细城市边界层模式中进行模拟研究。

### 参考文献 (References)

- [1] 谢庄, 崔继良, 陈大刚, 等. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析. 气候与环境研究, 2006, **11** (1): 69~75  
Xie Zhuang, Cui Jiliang, Chen Dagang, et al. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (1): 69~75
- [2] 王喜全, 王自发, 郭虎. 北京“城市热岛”效应现状及特征. 气候与环境研究, 2006, **11** (5): 627~636  
Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. The study of the urban heat island in Beijing city. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**(5): 627~636
- [3] 华丽娟, 马柱国, 曾昭美. 中国东部地区大城市和小城镇极端温度及日较差变化对比分析. 大气科学, 2006, **30** (1): 80~92  
Hua Lijuan, Ma Zhuguo, Zeng Zhaomei. The comparative
- analysis of the changes of extreme temperature and extreme diurnal temperature range of large cities and small towns in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 80~92
- [4] Fang Xiaoyi, Jiang Weimei, Miao Shiguang, et al. The multi-scale numerical modeling system for research on the relationship between urban planning and meteorological environment. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21** (1): 103~112
- [5] Jiang Weimei, Zhou Mi, Xu Min, et al. Study on development and application of a regional PBL numerical model. *Bound.-Layer Meteor.*, 2002, **104**: 491~503
- [6] Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. New York: Cambridge University Press, 1992. 316pp
- [7] 任军芳, 苏炳凯, 赵鸣. 标量粗糙度对地气交换的影响. 大气科学, 1999, **23** (3): 349~358  
Ren Junfang, Su Bingkai, Zhao Ming. Influence of scalar roughness lengths on the biosphere-atmosphere transfer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (3): 349~358
- [8] Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere*. Holland: D. Reidel Publishing Company, 1982. 299pp
- [9] Brutsaert W, Sugita M. Sensible heat transfer parameterization for surfaces with anisothermal dense vegetation. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 209~216
- [10] Jensen N O, Hummelshøj P. Derivation of canopy resistance for water vapor fluxes over a spruce forest, using a new technique for the viscous sublayer resistance. *Agri. Forest Meteor.*, 1995, **73**: 339~352
- [11] Cahill A T, Parlange M B, Albertson J D. On the Brutsaert temperature roughness length model for sensible heat flux estimation. *Water Resour. Res.*, 1997, **33** (10): 2315~2324
- [12] 徐敏, 蒋维楣, 季崇萍, 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  
Xu Min, Jiang Weimei, Ji Chongping, et al. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2002, **13** (Special Issue): 61~68
- [13] 蒋维楣, 陈燕. 人为热对城市边界层结构影响研究. 大气科学, 2007, **31** (1): 37~47  
Jiang Weimei, Chen Yan. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 37~47
- [14] Pileke R A, Pearce R P. *Mesoscale Modeling of the Atmosphere*. Boston: American Meteorological Society, 1994. 167pp

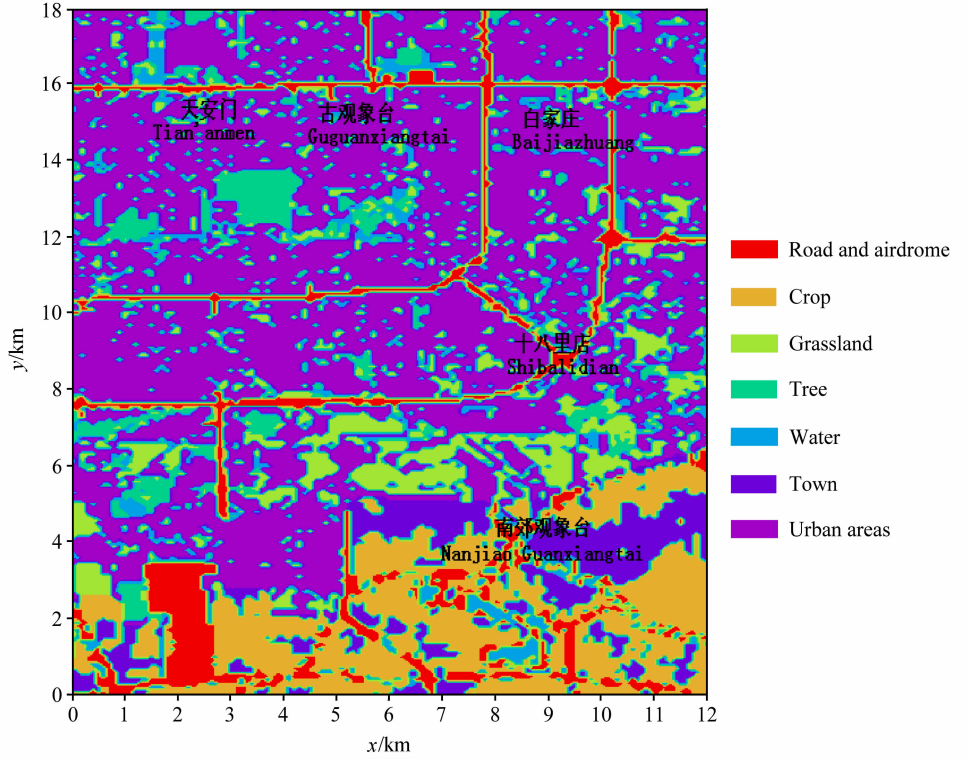


图1 算例1中下垫面土地利用类型(城市、小规模城市、水面、树木、草地、农作物、道路和机场)  
Fig. 1 Land use type in case 1

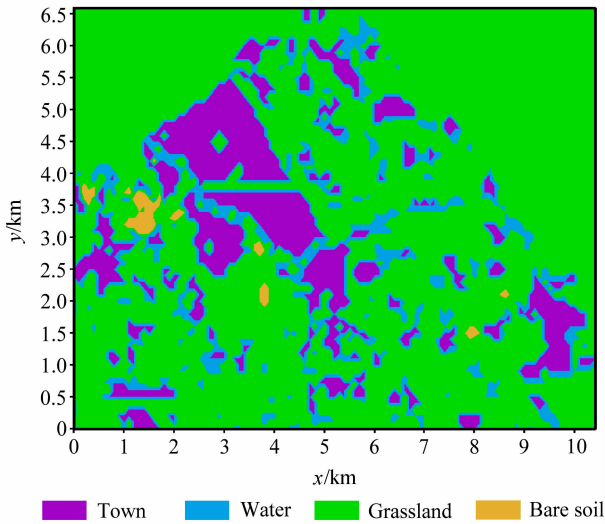


图2 算例2中下垫面土地利用类型(小规模城市、水面、草地、裸土)  
Fig. 2 Land use type in case 2

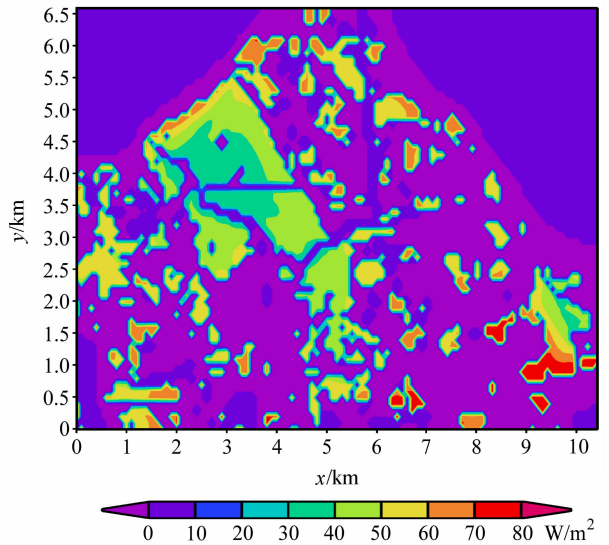


图7 1月27日14时两种不同方案(方案1-方案2)感热通量差  
Fig. 7 Difference of sensible heat fluxes between method 1 and method 2 at 1400 LST 27 Jan