

天津城市热岛及其对污染物扩散影响的数值模拟

韩素芹^{1,2}, 孟冬梅², 佟华³, 李向津², 李英华²

1. 南开大学信息技术科学学院, 天津 300071; 2. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘要: 城市热岛直接影响城市风场结构和污染物扩散路径, 以能量平衡模式得到的地面温度作为下边界条件、中尺度气象模式 MM5 作初始场和侧边界条件, 建立了天津市 500 m 的细网格城市边界层模式并用其研究天津市秋季热岛及其对污染物扩散的影响。结果表明, 模式可以较好地模拟城市热岛现象, 地面温度日变化规律及近地层的温度廓线与实际观测值较一致, 能够反映夜间出现的逆温。模式成功地再现了城市温度场和流场的三维结构, 结果表明 17:00 时热岛强度在地面最强, 到 300 m 存在个别的弱热岛中心, 500 m 高度城郊不存在温度差异; 地面高温中心有一个弱的辐合中心, 直接影响污染物在城区的扩散, 模拟的污染物浓度在地面较低, 150~300 m 高度最大。该研究结果可为了解天津地区局地气候的形成、污染物的扩散及城市规划提供参考和帮助。

关键词: 城市热岛; 污染物; 扩散; 数值模拟; 天津

中图分类号: X16

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2009) 02-0403-05

城市热岛现象是城市人类活动对城市边界层造成影响最直接的体现^[1-2], 并且由于关系到城区温度分布、风场结构、污染物输送等一系列问题而受到广泛的关注^[3-6]。Jonsson 等人^[7]的研究表明达累斯萨达姆 (Dares Salaam) 城区颗粒物浓度在夜间高于郊区, 且浓度与夜间城市热岛强度呈正相关。Kevin 等^[8-9]也认为城市热岛可以影响混合层高度进而影响地面污染物浓度。国内苗曼倩^[10]用一个二维非定常扩散模式模拟了夜间城市边界层 3 种不同有效高度 (20 m, 72 m, 110 m) 连续线源所产生污染物浓度分布特征, 数值试验结果表明: 不管是否出现城市热岛环流, 城市热岛的存在使高架源产生的大气污染物的地面浓度增大, 而近地面源产生的大气污染物的地面浓度减小, 城市下垫面的热力作用是影响城市空气质量的主要原因。徐祥德^[11]认为城市区域尺度热岛由强弱程度不同的“次生”热岛效应结构“合成”, 可引起局地次生尺度环流辐合结构, 导致大气污染程度加重。

近年来随着经济的快速发展, 天津城市化进程的速度不断加快, 其对天津市热岛效应和大气环境的影响日益受到人们的重视^[12-13]。虽然有利用环境监测资料和气候统计资料研究城市颗粒物与热岛强度相关关系进行探讨^[14], 但对热岛结构及其对污染物扩散影响机制方面仍然存在一些亟待深入认识的问题。本文利用数值模拟的方法研究天津市城市热岛及其对污染物扩散的影响规律, 为城市规划和大气污染防治提供依据。

1 数值试验方案

1.1 模式系统介绍

本文采用复杂地形下三维城市边界层模式对城市热岛及热岛对污染物扩散的影响进行模拟^[15-16]。模式包括能刻画城市地表特征的城市边界层能量平衡方程、作为能量平衡模式动力学框架的城市边界层动力学模式以及为动力学模式提供初始场合边界条件的中尺度模式 MM5。模式既考虑中尺度背景场对城市边界层的影响, 又详细刻画城市下垫面的复杂性与多样性对边界层的重要作用。本文首先要将 MM5 模式的输出结果插值到城市边界层模式的格点上作初始场和边界条件输入, 使两模式得以联接。

1.2 数值模拟个例

1.2.1 模拟个例期间气象条件

2005 年 11 月 2 日京津地区处于华北地形槽中, 大气层结稳定, 空中云量不多, 地面风以西南偏西风为主, 风速很小, 平均风速不足 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2 日地面温度在凌晨 02:00 时为 4.4°C , 中午 13:00 达到 27.5°C 。气温在 02:00 时为 11.1°C , 中午气温最大为 19.6°C 。在这种天气背景下, 天津地区连续出现大雾天气, 其中 2 日为轻雾, 3—5 日为大雾。2 日 NO_2 和 SO_2 均为 2 级, PM_{10} 为 3 级, 3—5 日 PM_{10} 分别达到 4、5、4 级。

1.2.2 模式参数设置

MM5 采用混合相的水汽方案, MRF 的行星边界层方案, 且应用了多层土壤热量扩散模式, ccm^2 大气辐射方案, 辐射过程每 30 min 计算一次。模式采用四重嵌套网格, 格距分别为 27, 9, 3, 1 km,

基金项目: 国家科技部公益基金资助项目(2005D1B3J105); 天津市科委资助项目(07ZCGYSF03200)

作者简介: 韩素芹 (1973 年生), 女, 博士, 研究方向为大气环境。E-mail: sq_han@126.com

收稿日期: 2009-01-02

模拟时段 2005 年 11 月 1 日 08:00 至 3 日 20:00。复杂地形边界层模式网格距 500 m, 模拟区域 30 km×30 km, 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, 1000, 1250, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 m。本文将 MM5 模式 1 km 格距的风场、位温、气压、地表温度结果进行插值作为复杂地形边界层模式初始场, 并每小时输入一次 MM5 的结果作为侧边条件。

图 1 为模式的模拟区域, 是南北和东西向都为 30 km 的正方形区域, 它包括天津中心城区及一部分郊区。根据天津自身特征, 将下垫面分为裸土、草地、林地、水域、和建筑物五类, 通过五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 α 、粗糙度 Z_0 、地表放射率 ε 等参数。各地表类型的特征参数的取法参见文献[17]。

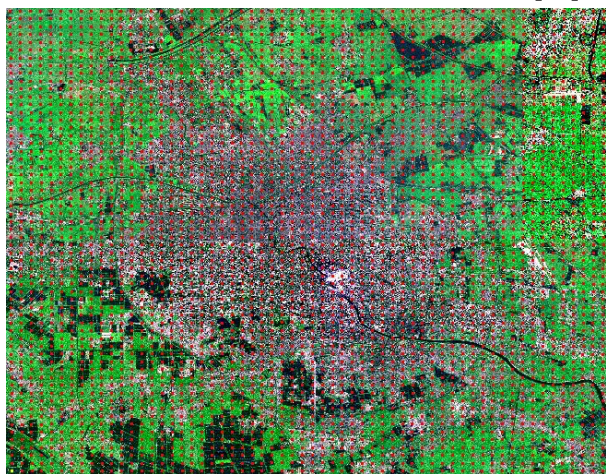


图 1 计算区域及网格分布

Fig. 1 The simulation domain and grid distribution

根据天津大气环境监测, 天津的首要污染物通常为 PM_{10} 。为了研究城区大气污染物扩散路径, 通过污染物 PM_{10} (直径小于 $10 \mu m$ 的粒子) 进行模拟。本文假定污染物面源的源强与这一网格建筑物的平均高度和建筑物所占的面积乘积成正比, 得到 PM_{10} 的面源源强分布为

$$q_{I,J} = (S_{I,J} h_{I,J}) \cdot E / \sum_{i,j} (S_{i,j} h_{i,j}) \quad (1)$$

其中 $q_{I,J}$ 为某一网格的面源源强 (单位: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), E 为天津市区 PM_{10} 总排放量, S, h 分别为某一网格上建筑物所占的面积和平均高度, i, j 为天津市市区的某一网格点, I, J 为天津市模拟区域的网格点。

2 模拟结果分析

2.1 模拟结果与实际观测资料对比

图 2 为计算时段铁塔气象观测站气温实测资料和模式模拟结果对比图, 从其变化曲线可以看到模

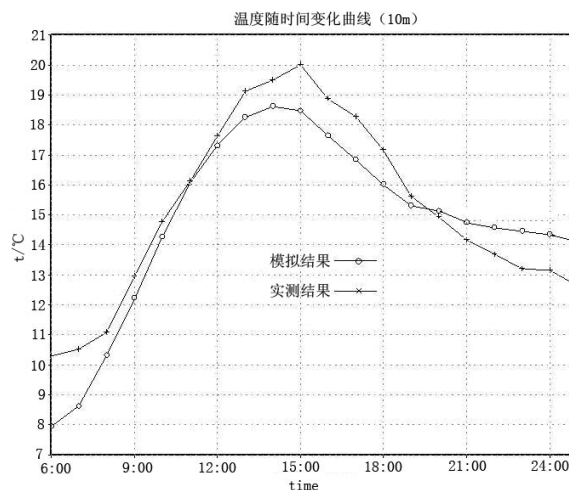


图 2 铁塔站实际观测与模拟的温度日变化

Fig. 2 The observed and simulated diurnal variation of temperature at the meteorological tower station

拟值与实测值的日变化规律基本一致, 最小值出现时间一致, 均在早晨 6:00, 最大值出现时间不完全吻合, 模拟最大值为 $18.6^{\circ}C$, 出现在北京时间 14:00, 实际气温观测最大值为 $19.6^{\circ}C$, 出现在 15:00, 模拟最大值比实测值稍偏低, 晚上 20:00 以后模拟值又略高于实际值。

污染物的垂直扩散与大气边界层的垂直结构有密切关系, 温度随高度的变化可以说明层结的稳定性, 从而判断边界层的结构。图 3 是铁塔梯度观测资料和模式模拟的温度廓线分布情况的对比, 早晨 8:00 逆温特征很明显; 中午实测和模拟值都不存在逆温现象, 观测值和模拟值在晚上 20:00 又开始存在逆温, 直到 3 日 2:00 逆温特征仍然很明显。模拟的逆温生消规律与天津市污染的日变化特征一致, 即一般中午前后能见度较好, 污染较轻; 傍晚或早晨能见度很差, 烟雾沉沉, 大气污染最为严重。这说明观测结果与模拟结果所反映的城市的特点相同, 说明模式可以较好地模拟城市近地面层的水平和垂直特征。

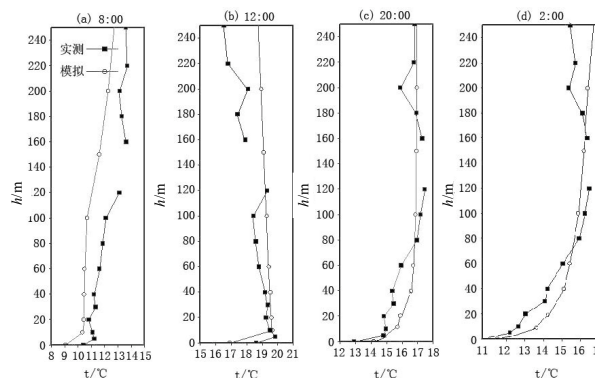


图 3 铁塔站实测和模拟的温度廓线

Fig. 3 The observed and simulated temperature vertical profile at the meteorological tower station

2.2 模拟气象场

图 4 是 2 日 11:00 和 17:00 地面温度场和流场的模拟结果，可以看出白天 11:00 时市区比郊区温度约高 2℃，17:00 时则高于郊区 4℃，说明市区白天也存在热岛现象。流场表现为风速很小，最大

值在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，和实际观测风速比较吻合。模拟的地面流场在市区高温部分出现辐合特征，两个时刻只是辐合强度有所差异。

2.3 地面流场对污染物浓度分布特征的影响

图 5 是 2 日 11:00，17:00，20:00 和 3 日 02:00

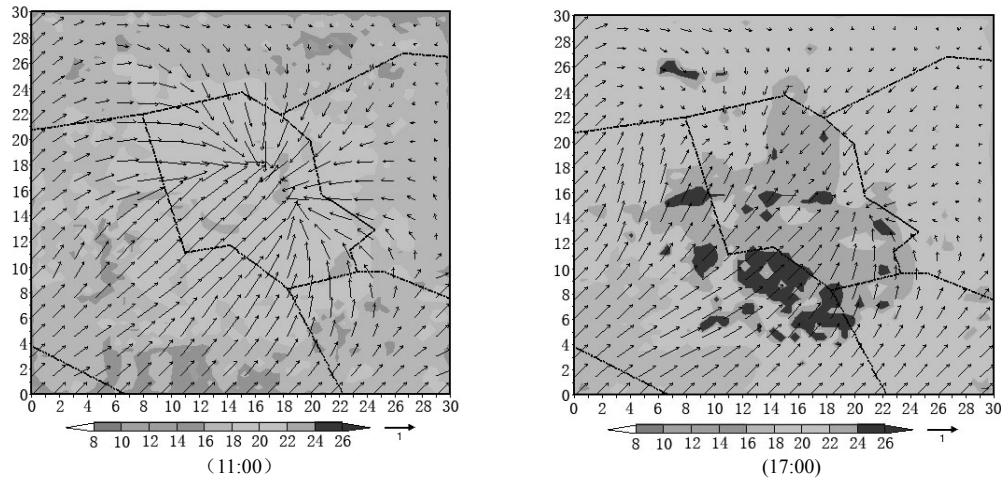


图 4 模拟区域 2 日 11:00 和 17:00 近地温度场和风场空间分布（背景代表温度场；流线代表风场）
Fig. 4 Wind and temperature fields near surface at 11:00 and 17:00 on Nov 2
(the background represents air temperature field; the streamlines represents wind field)

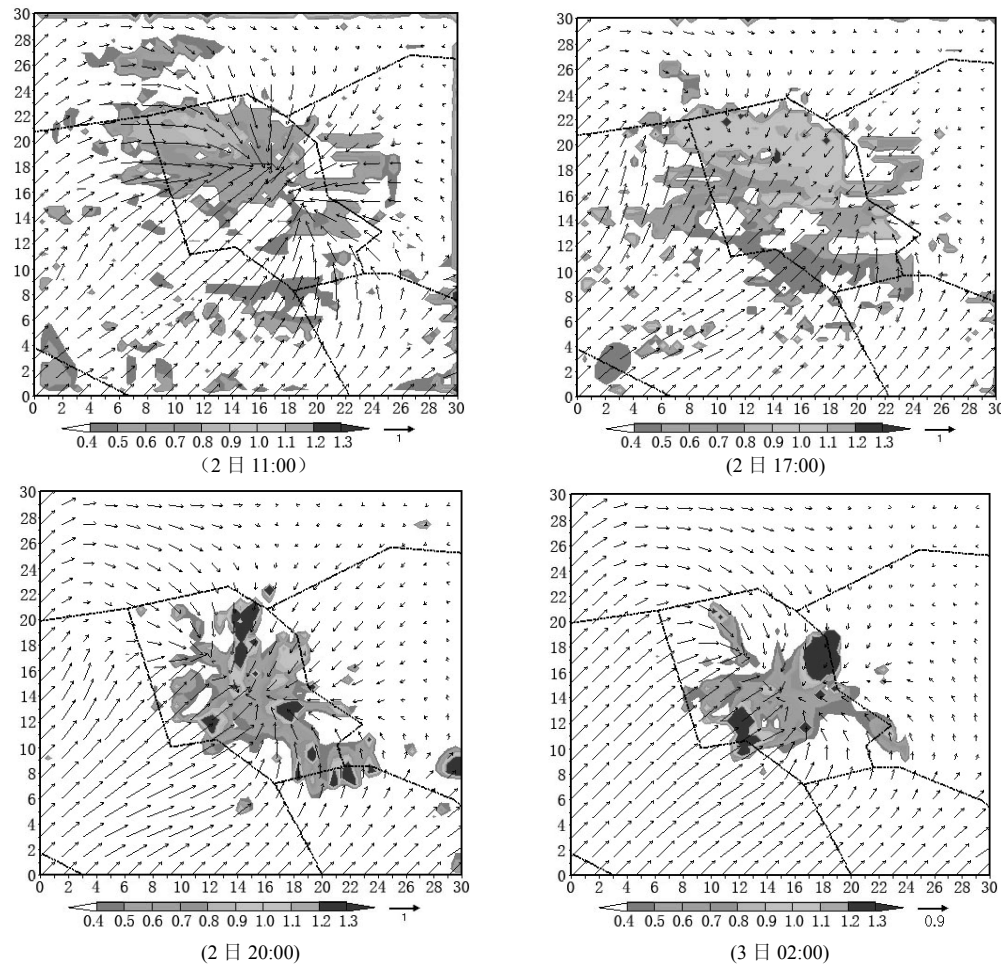


图 5 模拟区域近地面污染物浓度场和风场空间分布（背景代表浓度场；流线代表风场）
Fig. 5 Wind and pollutants concentrations fields near surface at 11:00, 17:00, 20:00 and 02:00
(the background represents pollutants concentration field; the streamlines represents wind field)

共4个时次模拟区域的风场和浓度场,可以看出在4个时刻都存在不同程度的辐合场,污染物聚集在市中心很难扩散出去。图6是经过市中心一东西方向垂直速度剖面图,可以看出市中心垂直速度为正,表明有上升气流,两侧垂直速度为负,说明存在下沉气流,在市区和近郊构成一个闭合环流,这样在垂直方向上扩散出去的污染物又会回到市区,在一定程度上说明当天的污染主要是本地源影响,而气象条件又不利于污染物扩散造成,也可以解释3—5日的重污染是前期不利气象条件造成局地污染物浓度累积的结果。

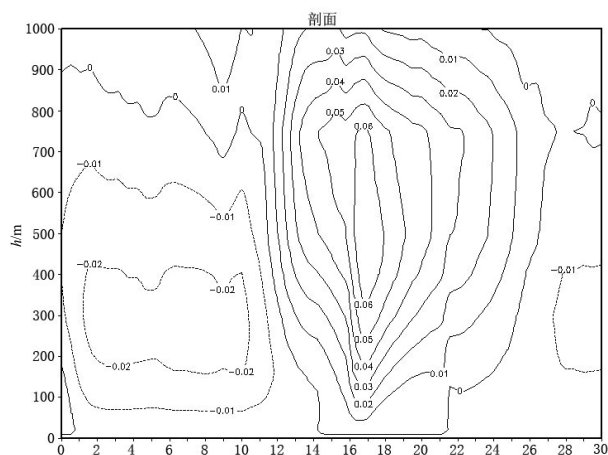


图6 模拟区域垂直速度沿东西向通过城市中心的垂直剖面
Fig. 6 The simulated vertical velocity fields of the W-E cross section through the city center

2.4 热岛和污染物分布垂直结构

目前城市的温度和污染物一般只有地面观测资料,因而对边界层内不同高度温度和大气污染物浓度分布缺乏了解。模拟个例结果表明 17:00 温度场的垂直分布表现为近地面热岛强度较强,随高度呈递减趋势,到 150 m 高度城郊温差在 2℃左右,到 300 m 存在个别的弱热岛中心,500 m 城郊温度没有区别,可以认为 17:00 热岛在垂直方向上高度大约在 300~400 m。污染物浓度在不同高度的分布有明显差异,近地面 20 m 处污染物浓度较小,60 m 处浓度明显高于地面,该结果与北京大学在天津市的实际观测结果一致^[18],150~300 m 浓度最高(图略)。

3 结论

(1) 将中尺度 MM5 模式和城市气边界层模式进行了合理的嵌套,通过模拟个例揭示了城市热岛及其对污染物扩散的影响规律。

(2) 模拟个例的地面温度日变化规律及近地层的温度廓线与实际观测值较一致,能够反映夜间出现的逆温。模拟结果显示在市区高温中心形成一个弱的辐合中心,污染物聚集在市区很难扩散。

(3) 模拟个例结果表明 17:00 热岛强度在地面最强,到 300 m 存在个别的弱热岛中心,500 m 高度城郊不存在温度差异;污染物浓度在不同高度的分布有明显差异,近地面 20 m 处污染物浓度较小,60 m 处浓度明显高于地面,150~300 m 浓度最高。

参考文献:

- [1] WENG Q, YANG S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese City[J]. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70: 145-156.
- [2] 韩素芹, 刘彬贤, 解以扬, 等. 利用255 m铁塔研究城市化对地面粗糙度的影响[J]. *气象*, 2008, 34(1): 54-58.
HAN Suqin, LIU Binxian, XIE Yiyang, et al. Research of the urbanization on Surface Roughness length with 255 m meteorological tower[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(1): 54-58.
- [3] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 等. 城市热岛效应研究进展[J]. *生态环境*, 2005, 14(5): 574-579.
PENG Shaolin, ZHOU Kai, YE Youhua, et al. Research progress in urban heat island[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(5): 574-579.
- [4] 周凯, 叶有华, 彭少麟, 等. 城市大气总悬浮颗粒物与城市热岛[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 381-385.
ZHOU Kai, YE Shaohua, PENG Shaolin, et al. Total suspended particulates(TSP) and its effects on urban heat island(UHI)[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 381-385.
- [5] SAHASHI K. Nitrogen-oxide layer over the urban heat island in Okayama City[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(3): 531-535.
- [6] GUNTER B. Influence of inversion layers on the distribution of air pollution in urban areas[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2003, 3: 65-76.
- [7] JONSSON P, BENNET C, ELIASSON I, et al. Suspended particulate matter and its relation to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 4175-4181.
- [8] KIM S W, YOON S C, WON J G, et al. Ground-based remote sensing measurements of aerosol and ozone in an urban area: A case study of mixing height evolution and its effects on Ground-level ozone concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 7069-7081.
- [9] KEVIN C, CHRISTIAN H, BARRY L. Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 1803-1819.
- [10] 苗曼倩. 城市热岛效应对污染物扩散规律影响的数值模拟[J]. *大气科学*, 1990, 14(2): 207-214.
MIAO Manqian. Numerical simulation of the urban heat island over pollutant dispersion[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 1990, 14(2): 207-214.
- [11] 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征[J]. *中国科学*, 2005, 35(增刊): 1-19.
XU Xiangde, ZHOU Xiujie, SHI Xiaohui. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration[J]. *Science in China ser. D Earth Sciences*, 2005, 35(suppl): 1-19.
- [12] 韩素芹, 郭军, 黄岁樑, 等. 天津城市热岛效应演变特征研究[J].

- 生态环境, 2007, 16(2): 280-284.
- HAN Suqin, GUO Jun, HUANG Suiliang, et al. Study on the evolution of urban heat island in Tianjin city[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 280-284.
- [13] HAN S, GUO J, REN G. Urban heat island effect in tianjin city, China[J]. International Association for Urban Climate, 2006, 19: 5-6.
- [14] 韩素芹, 边海, 解以扬. 天津 2000-2004 年天津市大气污染特征分析[J]. 气象科技, 2007, 35(6): 787-791.
- HAN Suqin, BIAN Hai, XIE Yiyang. Research on characteristics of air pollution in Tianjin[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(6): 787-791.
- [15] TONG H, ANDREW W, SANG J G, et al. Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 3549-3563.
- [16] 佟华, 陈忠良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香港地区复杂地形下的应用[J]. 大气科学, 2004, 28(6): 957-978.
- TONG Hua, CHEN Zhongliang, SANG Jianguo. A study of the urban boundary layer model and Application in the Hong kong area[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2004, 28(6): 957-978.
- [17] 佟华, 刘辉志, 李延明, 等. 北京夏季城市热岛现状及楔形绿地规划对缓解城市热岛的作用[J]. 应用气象学报, 2005, 16(9): 357-368.
- TONG Hua, LIU Huizhi, LI Yanming, et al. Actuality of summer urban heat island and the impact of urban planning "wedge-shaped Greenland" to reducing the intensity of urban heat island in Beijing[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(9): 357-368.
- [18] 吴水平, 蓝天, 左谦, 等. 不同高度大气颗粒物中多环芳烃的粒径分布[J]. 环境化学, 2005, 24(1): 76-80.
- WU Shuiping, LAN Tian, ZUO Qian, et al. Vertical and size distribution of polycycle aromatic hydrocarbons in Tianjin urban aerosol[J]. Environmental Chemistry, 2005, 24(1): 76-80.

Numerical simulation of the urban heat island and its influence on the diffusion of pollutants in Tianjin

Han Suqin^{1,2}, Meng Dongmei², Tong Hua³, Li Xiangjin², Li Yinghua²

1. Collage of information technical Science, Nankai University, Tianjin, 300071, China;

2. Tianjin meteorology institute, Tianjin, 300074; 3. National meteorological center, Beijing, 100081, China

Abstracts: Urban heat island has direct influence on the structure of urban wind field and diffusive trajectory of air pollutants. A fine-mesh urban boundary layer model was developed by using the surface temperature calculated by energy balance model as lower boundary condition, and using meso-scale model MM5 as initial condition and lateral boundary conditions. The detailed structure of the urban heat island and its influence on the diffusion of air pollutants in autumn was simulated by the model. The results show that the model are capable of simulate the main features of g urban heat island with reasonable accuracy. The simulated temperature profile and the diurnal variation of temperature are in agreement with the observation results. The simulated three-dimension structure of temperature field and velocity field reflected that the intensity of the urban heat island is strongest at the ground, and exists a weak high temperature center at 300 m, while there is no temperature difference between urban and suburb at 500 m height; A weak convergenc exists in and around the high temperature center, which cause the pollutants accumulated in the urban center. The particulate concentration is low at the ground and high at 150~300 m height. These simulated results are helpful to understand the local climate and diffusive feature of pollutants over Tianjin area, and to give advice on urban plan.

Key words: urban heat island; pollutants; diffusion; numerical simulation; Tianjin