

李喜仓,白美兰,马玉峰,等. 呼和浩特市城区发展对大气环境的影响分析[J]. 气象,2011,37(12):1572-1577.

呼和浩特市城区发展对大气环境的影响分析^{*1}

李喜仓¹ 白美兰¹ 马玉峰¹ 刘克利² 冯晓晶¹ 杨 晶¹

1 内蒙古气候中心,呼和浩特 010051

2 内蒙古气象科技服务中心,呼和浩特 010051

提 要: 基于呼和浩特市近 50 年逐日定时地面气象资料、2002—2006 年的逐日 07 时和 19 时各标准层探空资料、2001—2006 年逐日主要污染物浓度和主要污染源源强、1961—2006 年社会经济数据、2002 年城区建设现状及 1996—2010 年城市总体规划资料,利用区域边界层模式模拟方法,研究了呼和浩特市城区建设发展对大气环境的影响。结果表明:(1)呼和浩特市城区发展后(规划后)气温高于现状(规划前),城区中心气温与周边地区气温差增大,城市热岛效应增强;(2)呼和浩特市城区规划后冬季气流汇集辐合区域增多,辐合能力增强,从而使冬季大气污染加剧;(3)呼和浩特市城区扩展后引起的下垫面热力与动力参数变化,将导致气流场发生显著变化,使得污染物的辐合能力增强。总体而言,呼和浩特市城区规划后虽增加了部分绿地等面积,但建筑物的增高增密、下垫面性质的改变,将使大气环境扩散能力减弱,大气污染加重。

关键词: 呼和浩特市, 城区发展, 大气环境, 影响分析

Simulating the Influence of Urban Development on Atmospheric Environment in Hohhot City

LI Xicang¹ BAI Meilan¹ MA Yufeng¹ LIU Keli² FENG Xiaojing¹ YANG Jing¹

1 Inner Mongolia Climate Center, Hohhot 010051

2 Inner Mongolia Meteorological Science and Technology Service Center, Hohhot 010051

Abstract: In terms of the daily fixed time surface meteorological data over recent 50 years, the standard layer daily sounding data at 07:00 BT and 19:00 BT from 2002 to 2006, the daily concentration data of main pollutants and sources from 2001 to 2006, the social and economic data from 1961 to 2006, the city development situations in 2002, and the Hohhot City planning maps from 1996 to 2010, the influence of urban development on atmospheric environment in Hohhot City was analyzed with the regional boundary layer numerical simulation method. The results have shown that: (1) The temperature in Hohhot City is higher after development than before, the temperature difference between urban center and surrounding areas increases and the heat island effect enhances. (2) The current convergence area increases and the capacity of convergence enhances in winter after development, as a result, the urban atmospheric pollution aggravates in winter. (3) The change of thermal and dynamic parameters of the underlying surface resulting from city expansion leads to air current fields to change remarkably, and then the capacity of convergence of pollutants strengthens. In short, although the green lands are increased after development, the higher and closer buildings and the change of underlying surface's characters make the capacity of diffusion of atmospheric environments weaken and atmospheric pollutions become heavier.

Key words: Hohhot City, urban expansion, atmospheric environment, influence

* 中国气象局 2007 年多轨道建设项目“城市规划气候可行性论证业务系统”资助

2010 年 12 月 2 日收稿; 2011 年 5 月 25 日收修定稿

第一作者: 李喜仓,主要从事气候资源开发利用和气候变化影响研究. Email: qkslxc@163.com

引 言

城镇人口的急剧增长和城市规模的不断扩大,改变了城市区域的土地利用结构和大气层下垫面特性,使得原有的自然植被或裸露土地被各种各样的建筑物以及大量的沥青、水泥马路所代替,从而将显著地改变城市大气下垫面的热力和动力状况^[1]。同时,城市工业排放的大量烟尘、气溶胶、颗粒物以及汽车尾气和扬尘等对城市的气温、湿度、能见度、风和降水都有影响,由此将引起一系列的城市环境问题,如大气污染、城市热岛、城市浑浊岛等城市特有的现象^[2],从而将显著影响城市的人居环境。

呼和浩特市作为内蒙古自治区的首府,近年来经济发展迅速,1961—2006 年呼和浩特市 GDP 年均增长率达 2.3%,但自 2001 年后增幅明显加大,6 年内增加了约 3 倍。伴随着经济的快速发展,城市人口急剧膨胀、资源大量消耗,导致城市环境污染加剧、自然生态系统破坏等一系列环境问题^[3]。因此,如何在呼和浩特市城区的发展进程中确保社会经济与城市大气环境的可持续发展,引起了政府与科学界的高度关注。关于城区发展对大气环境的影响评价已有一些研究^[4-8],如京津冀、珠江等地区未来城区规划对大气环境的影响评价;并探讨了城区扩大、建筑物增高等下垫面变化对周边地区大气环境的影响。但是,现有研究主要针对经济较为发达或工业污染较为严重的大城市,关于经济增长较快的欠发达地区中、小城市城区发展对局地大气环境的影响还较少。

本研究试图以近年来经济增长较快的欠发达地区的中等城市呼和浩特市为研究对象,利用区域边界层模式模拟方法,研究呼和浩特市城区发展对大气环境的影响,为建设资源节约型、环境友好型的宜居城市提供科技支撑。

1 资料来源及研究方法

1.1 资料来源

呼和浩特市 1961—2006 年每日 4 个时次(02、08、14、20 时)气压、气温、风向、风速、地温等资料,来源于呼和浩特市地面观测站;2002—2006 年逐日 07 和 19 时各标准层高度、气温、露点温度、风向和风速等资料,来源于呼和浩特市高空探测站;2001—2006

年逐日 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 平均浓度资料以及主要污染源源强资料,来源于呼和浩特市环保局;1961—2006 年 GDP、人口等社会经济资料,来源于内蒙古统计年鉴;2002 年呼和浩特市城区建设现状资料来源于内蒙古气象卫星遥感中心卫星遥感反演资料;1996—2010 年呼和浩特市城区下垫面类型资料,来源于呼和浩特市城市规划设计院。所有资料经过数值信息化后,代入到区域边界层模式(RBLM 模式)中。

1.2 研究方法

采用南京大学发展的区域边界层模式(RBLM 模式)研究城区发展对大气环境的影响。以 2002 年呼和浩特市城区现状作比较,模拟 1996—2010 年城区规划发展过程引起的城区规模扩大对大气环境的影响。

RBLM 模式较为细致地考虑了下垫面特征对边界层结构的影响。该模式采用先进实用的湍能 1.5 阶的湍流闭合方案,由三维非静力、细网格高分辨、精细 PBL 模型和一个区域 β 中尺度气象模式及空气污染物输送扩散模式组成,是一个具有诊断和预报功能的城市数值模拟系统^[9-11]。模式采用 Reynolds 平均的大气运动控制方程组,包括动量方程、热流量方程、标量方程和完全弹性连续方程。

模式的控制方程组由水平和垂直运动方程、连续方程、位温方程和水汽方程组成。取湍流动能 E (TKE) 闭合方案和湍流能量 $E-\epsilon$ 闭合方案可选,引入湍流动能 E (TKE) 方程和 $E-\epsilon$ 方程。模式取地形跟随坐标系处理。模式输入由地理信息系统(GIS)生成的数据库给出,并经模式预处理以提供气象模式和扩散模式所需信息和参数作本模式输入。主要包括模拟区域范围内的地理网络及基本地理特征、地形高度、地面覆盖状况、地面与高空气象要素、地面污染物排放源址及源量等。

模式输出主要包括:(1)大气边界层气象要素和湍流变量的分布。(2)近地面层空气污染物浓度分布。(3)利用 Grads 给出的图像显示并输出。

1.3 模拟范围及参数设置

应用 RBLM 模式对城市现状和规划方案进行模拟,模拟范围东西宽 55 km,南北长 60 km,模式的水平分辨率为 1000 m,垂直方向采用拉伸网格,从地面到 5400 m 分为不等距的 33 层,垂直最小格距为 100 m。

模拟中所用到的气象资料有:(1)08、20 时的探空资料,包括气压、高度、温度、露点、风向和风速;

(2)02、08、14、20时的地面观测资料,包括气压、气温、20 cm和40 cm的地温、湿度、风向和风速。呼和浩特气象站2002—2006年5年的探空资料和地面资料,对逐年冬季(1月)和夏季(7月)一天中的探空资料和地面资料各气象要素分别取平均,作为模式的初始场,以使资料能够代表冬、夏季节的平均天气状况。地形为模拟区域1:5万地形高度数据。污染源资料包括两种污染物(二氧化硫和氮氧化物)共34个点污染源排污数据。

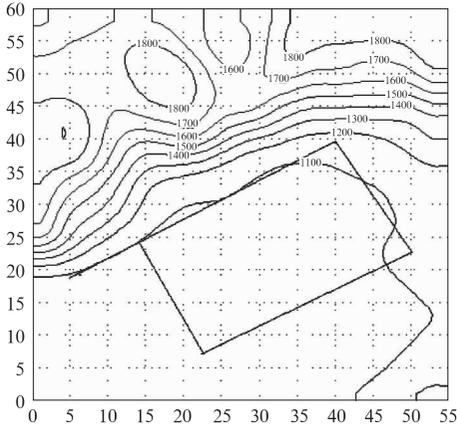


图1 模拟区域地形图(单位:m)
方框为呼和浩特市城区位置

Fig. 1 Terrain map of the simulation domain (unit:m)
Rectangle represents Hohhot urban area

1.4 城区现状和规划特征

呼和浩特市城区北部为大青山、东南部为蛮汉山、南部及西南部为土默川平原,呈北东向南西逐渐倾斜地势。受地形限制,未来城区发展只能向南部和西部的土默川平原扩展。

自2002年以来,呼和浩特市的GDP呈显著增加趋势(见图2),考虑到模拟区域卫星影像资料获取的便利性,以2002年城区建设作为现状,1996—2010年规划作为未来发展的目标。

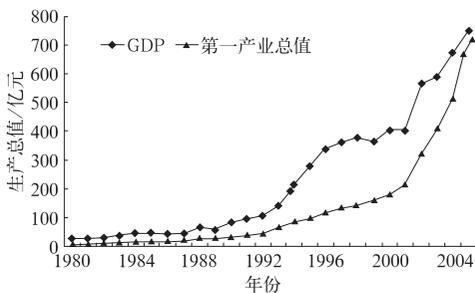


图2 呼和浩特历年国民生产总值(单位:亿元)
Fig. 2 The yearly GDP values of Hohhot City (unit:10⁸ RMB yuan)

2002—2009年经过7年多城区规划建设(表1),建城区面积扩大30 km²,房屋建筑面积翻了近1倍,绿地面积扩大21.8 km²,绿化覆盖率增加明显。据轩春怡等^[12]研究;城市下垫面状况在很大程度上决定城市大气物理环境的特征。在城市区域增加绿地、湿地等自然地带有利于城市的减温增湿,促使局地流场发生变化,可改善局地微气象条件以及大气物理环境。呼和浩特市城区在规划扩展时,充分考虑了绿地对环境的调节作用。

表1 2002和2009年的呼和浩特市城区建设基本信息
Table 1 Construction information in 2002 and 2009 in Hohhot City

	建筑区面积/km ²	绿地面积/km ²	绿化覆盖率/%	房屋建筑面积/10 ⁴ m ²
2002年	120	4.6	19.5	2800
2009年	150	26.4	25.8	5504

注:资料来源于呼和浩特市经济统计年鉴。用2009年统计状况代表1996—2020年规划后的城区状况

2 结果分析

2.1 模式检验

以呼和浩特地面自动气象站2007年7月15日21时至16日20时的逐时气温和风速观测数据对模拟结果进行检验。将2007年7月15日20时的

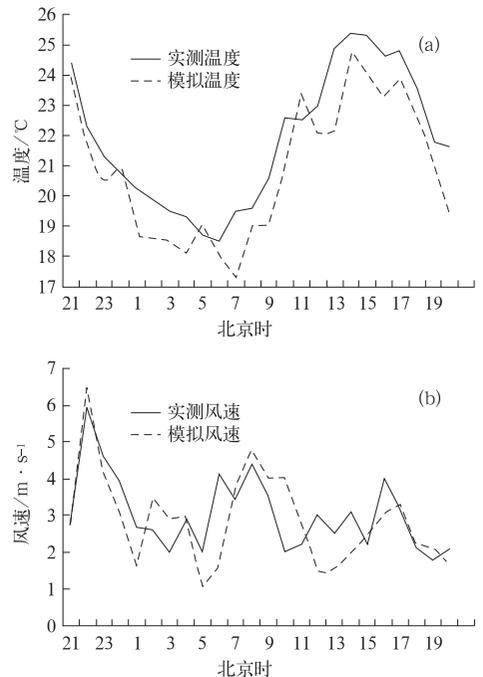


图3 气温(a)和风速(b)观测与模拟结果比较
Fig. 3 Comparisons between the simulated and observed (a) temperature and (b) wind speed

地面观测资料及探空资料作为模式的初始场,共模拟 30 小时。比较观测数据与相应时段的模拟值表明(图 3),模式模拟性能较好,模拟的地面气温与实测趋势基本吻合,地面风速的模拟结果基本反映了日变化规律,模式对地面气温的模拟效果好于地面风速的模拟效果。

2.2 呼和浩特市城区发展对大气环境的影响

城区建筑物的高低、街道走向、道路改造、城区扩大等直接影响风向、风速、湍流、温度层结等大气环境状况。这些因子是决定城区污染物积聚、扩散和稀释能力的主要因素^[13]。呼和浩特市城区位于大青山山脉南面,下垫面动力和热力的非均匀性强迫形成了冬、夏季特有的复杂局地大气环流,影响着城区污染物的扩散。利用 2002 年呼和浩特市卫星遥感监测资料和 1996—2010 年城市发展规划实施后的信息作为不同年代城区发展的下垫面属性,在相同的气象条件背景(取 2002—2006 年平均状况)

和相同的污染排放水平条件下,模拟分析城市发展对大气环境的影响。

2.2.1 温度

城市热岛强度与城市化过程中城市规模扩大,如城区土地利用面积的增大与改变及城市人口不断增加所引起的人为热源增多等有关^[6]。热岛效应将引起城区空气上升,而周围郊区空气向城市辐合,进而影响污染物的混合扩散。通常,城市热岛效应越明显,越不利于城市的大气环境改善^[6]。对呼和浩特市城区现状(2002 年)和规划发展后(1996—2010 年)夏季和冬季地面温度变化的数值模拟表明(图 4,冬季图略):城区规划后呼和浩特城区夏季温度为 20~23℃,冬季为-13.0~-13.6℃;规划前呼和浩特城区夏季温度为 15~16.5℃,冬季为-13.5~-14.1℃,城区发展后城区中心气温与周边地区的气温差异变大,城区热岛效应增强,从而导致污染加剧,对大气环境产生不利影响。虽然城区发展后绿地面积增加对局地大气环境起到调节作

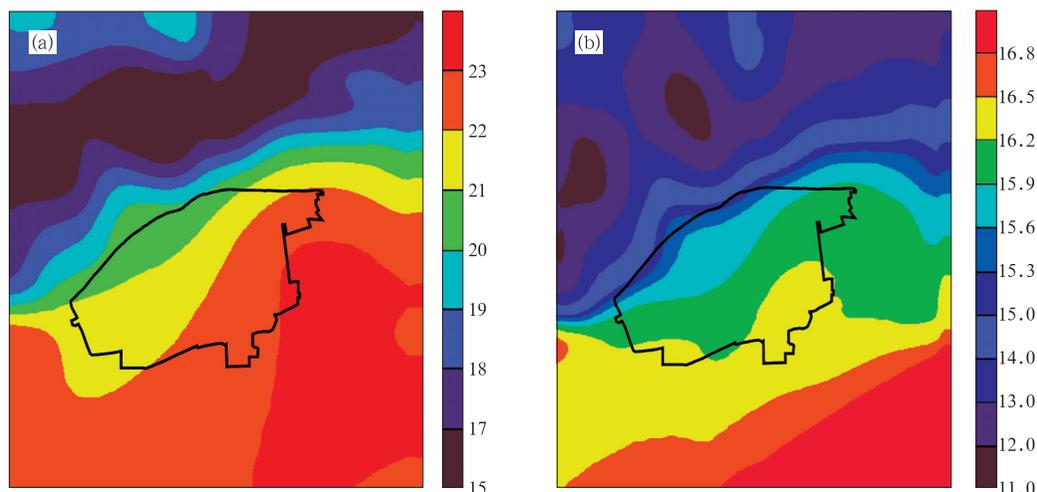


图 4 呼和浩特市城区规划后(a)和规划前(b)夏季 14 时气温
图中黑框为呼和浩特市城区位置

Fig. 4 Temperature distribution at 14:00 BT in summer in Hohhot urban area (represented by the enclosure)
(a) after development, (b) before development
The black enclosure is location of Hohhot urban area

用,但对城区热岛效应的缓解能力有限。

2.2.2 风速

风速的大小直接决定了城区污染物的扩散稀释能力^[14]。对城区不同发展时期平均风速的模拟表明(图 5):规划前冬季呼和浩特市城区平均风速为 0.7~3.2 m·s⁻¹,规划后城区风速为 0.7~2.2 m·s⁻¹,减少趋势较为明显。呼和浩特城区的大气污染主要发生在集中采暖和沙尘天气多发的冬、春季,是 PM₁₀、SO₂ 浓度高发期。城区发展后,冬季呼

和浩特市的平均风速减少,不利于污染物的稀释扩散。夏季的情况也是如此(图略),城区发展后呼和浩特市风速有所降低,但夏季呼和浩特市城区逆温出现几率低,通透性较好,污染相对较轻。因此,风速减小对夏季呼和浩特市城区的空气质量影响较小。

2.2.3 流场

城区发展对局地风场的影响不仅表现为风速的变化,风向变化也十分明显。这种改变实际上是气压梯度力、摩擦力和科氏力在平衡状态下的扰动,近

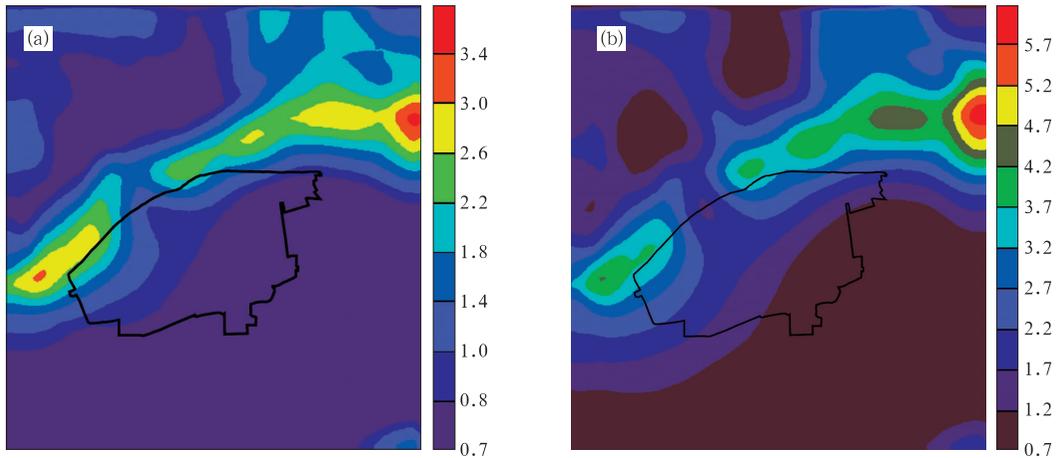


图 5 呼和浩特市城区规划后(a)和规划前(b)冬季 14 时平均风速

Fig. 5 As in Fig. 4, but for average wind speed in winter

地面层下垫面的变化对风向的影响更大^[8,15]。对呼和浩特市城区不同发展时期的气流场模拟表明(图 6):城区规划前冬季大青山以北主要以西北气流为主,大青山以南受到山脉影响以西南气流为主。因此,在呼和浩特市城区以北大青山附近形成西北向的气流辐合带,污染物易于在此堆积,形成高污染区域。呼和浩特市城区及以南地区辐散较明显,有利于污染物向东北偏东方向的扩散稀释。城

区规划后,由于下垫面改变,流场变化较大。冬季呼和浩特市城区大青山以北主要以偏北气流为主,以南受到山脉阻挡影响,以偏西气流为主,呼和浩特市城区中部沿大青山一带有气流强聚集辐合区,易造成城区污染物的大量堆积。城区东南部位于气流辐散区域,污染物向东南方向扩散。因此,呼和浩特市城区规划发展后城区上空气流辐合带明显强于规划前。

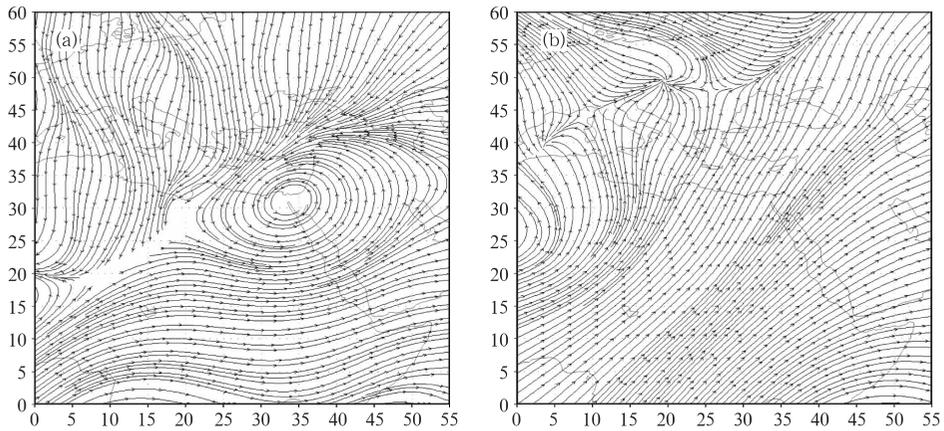


图 6 呼和浩特市城区规划后(a)和规划前(b)冬季 08 时流场

Fig. 6 Airflow fields at 08:00 BT in winter of 2010 (a) and 2002 (b) in Hohhot urban area

由呼和浩特市城区夏季规划前后流场模拟可见(图 7),夏季主要以西南气流为主,受大青山脉影响,模拟区域中部均有气流汇集辐合带。这些辐合区域恰好位于呼和浩特市城区的中心地带,极易在城区形成污染物的积聚。城区南部以气流辐散为主,污染物向东南方向扩散。城区规划发展,由于下垫面以及城区布局的改变,夏季呼和浩特市城区气

流方向较为复杂,城区中部有气旋型辐合气流,易产生污染物的堆积,且规划后气流的辐合强度明显高于规划前。

综上所述,随着呼和浩特市城区的规划发展,无论是冬季还是夏季,城区热岛效应增强、风速减小、流场辐合能力加大,对减轻城区大气污染较为不利。

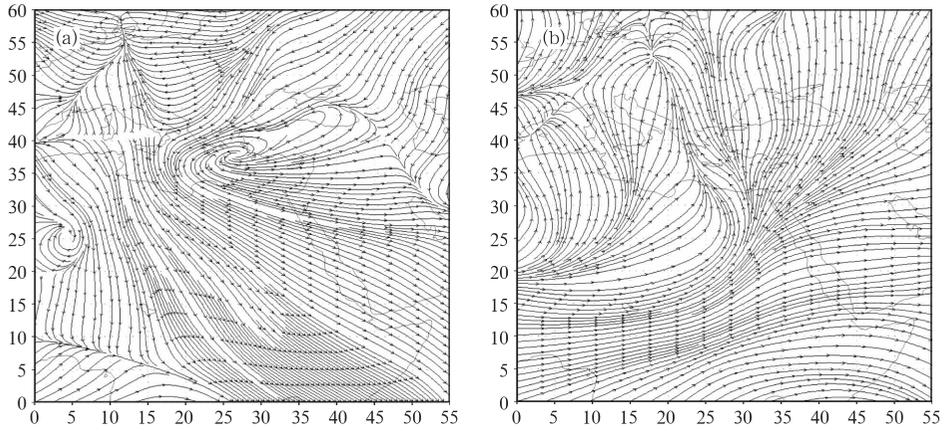


图 7 呼和浩特市城区规划后(a)和规划前(b)夏季 08 时流场

Fig. 7 As in Fig. 6, but for summer

3 结 论

(1) 呼和浩特市城区发展对温度影响较大。按照呼和浩特市城市规划发展到 2010 年,无论是冬季还是夏季,城区气温明显高于现状(2002 年),尤其是城区中心气温变化更为明显。城区中心气温与周边地区气温差异变大,增强了城郊间局地环流,加重了二次污染,对城区的大气环境质量的改善较为不利。

(2) 呼和浩特市城区发展使污染严重的冬春季风速减小,大气污染物的稀释扩散减弱,对污染物扩散净化不利;夏季城区发展后风速减小,但夏季呼和浩特城区大气基本处于不稳定状态,对流强、通透性好,不易出现污染性天气。因此,夏季风速的降低对大气环境影响相对较小。

(3) 无论是在冬季还是夏季,呼和浩特市城区受下垫面动力和热力的非均匀性强迫影响较大,气流方向较为复杂,气流辐散、辐合汇集区域明显。但随着城区不断发展,到 2010 年呼和浩特市城区辐合汇集区域加强,污染程度加剧,对大气环境产生不利影响。

(4) 本研究将数值模拟方法应用到城市规划与气象环境的关系研究中,可以定量描述城市下垫面覆盖类型的改变对环境的影响,弥补了观测试验的不足,与传统的风玫瑰图和统计分析方法相比,可以更为细致地描述不同的城市布局对气象环境的影响。城市区域边界层数值模式在呼和浩特市城市规划方案评价工作中的应用表明,数值模拟方法可以很好地模拟、预测和评估城市下垫面变化对气象环境的影响,在优选和调整城市整体与局部规划方面有很好的实用价值。

参考文献

- [1] 司鹏,李庆祥,李伟. 城市化进程对中国东北部气温增暖的贡献检测[J]. 气象,2010,36(2):13-21.
- [2] 汪光焘,王晓云,苗世光,等. 城市规划大气环境影响多尺度评估技术体系的研究与应用[J]. 中国科学 D 辑,2005,35(s1):145-155.
- [3] 宝玉. 简析呼和浩特市煤烟型大气污染变化[J]. 内蒙古科技与经济,2006,3:3-4.
- [4] 刘宁微,马雁军. 城市化发展对气象要素的影响[J]. 气象,2006,32(9):15-20.
- [5] 程胜龙,王乃昂. 近 60 年兰州城市发展对城市气候环境的影响[J]. 兰州大学学报,2006,42(3):9-14.
- [6] 张光智,徐祥德,王继志,等. 北京及周边地区城市尺度热岛特征及演变[J]. 应用气象学报,2002,13(z1):29-34.
- [7] 王晓云,汪光焘,陈鲜艳,等. 珠江三角洲城市群发展规划与大气环境研究[J]. 城市规划,2005,29(12):18-25.
- [8] 陈燕,蒋维楣,郭水利,等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J]. 环境科学学报,2005,25(5):211-219.
- [9] 徐敏. 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟[D]. 南京:南京大学大气科学系,2002.
- [10] Pleim J E, Xiu A. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models[J]. J Appl Meteor, 1995, 34: 16-32.
- [11] Xiu A, Pleim J E. Development of land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model[J]. J Appl Meteor, 2000, 40: 192-209.
- [12] 轩春怡,王晓云,蒋维楣,等. 城市中水体布局对大气环境的影响[J]. 气象,2010,36(12):94-101.
- [13] 苗世光,蒋维楣,胡非,等. 建筑物分布对市区流场及污染物扩散影响的数值模拟[J]. 气象科学,2004,24: 137-144.
- [14] 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等. 空气污染与气候变化[J]. 气象,2009,35(3):3-14.
- [15] 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 杭州市区空气污染物变化特征及其与气象条件的关系[J]. 气象,2010,36(2):93-101.