

城市布局规模与大气环境影响的数值研究

王咏薇¹, 蒋维楣¹, 郭文利², 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

摘 要 为探索城市建设对局地及周边大气环境的影响, 本文采用典型代表性天气条件, 以北京主城区及其东部发展带小城镇群的发展变化为例, 设计算例进行数值模拟. 分析结果表明, 城镇群建设发展通过地气的相互作用对局地环境产生显著影响, 在本文选择的夏日晴好天气条件下, 就 1980~2004 年城市区域布局状况, 模拟域内北京城市用地增加 19%, 城市区域平均气温增加 1.91℃, 植被覆盖率减少 20%, 城市区域平均比湿减少 3.3 g·kg⁻¹, 并且城市发展的格局规模不同, 对城市气象环境的影响程度也不同. 此外, 由于地气多因子的相互影响和反馈作用, 城建规模的变化对周边的环境也存在显著的影响, 城建规模越大, 对周边的影响越大. 例如, (1) 北京主城区的存在对周边小城镇午间 14:00 近地面温度影响最大可达到 1.2℃, 混合层高度可增高 150 m 左右; (2) 城市建设在影响周边气象环境的同时, 也改变了城市污染物的输送扩散能力, 北京主城区的存在使周边小城镇 PM₁₀ 的允许排放总量减小 18.02 t·d⁻¹, 同时, 随着周边小城镇城市规模的扩大, 影响主城区 PM₁₀ 逐渐由净的输出转变为净的收入, 小城镇群的存在对主城区 PM₁₀ 净收支的贡献率达到 0.192 t·d⁻¹.

关键词 城建规模, 气象环境, 空气质量, 地气相互作用, 数值模拟

文章编号 0001-5733(2008)01-0088-13

中图分类号 P463

收稿日期 2006-05-27 2007-06-05 收修定稿

Numerical study of the urban scale and layout effect on atmospheric environment

WANG Yong-Wei¹, JIANG Wei-Mei¹, GUO Wen-Li², WANG Xiao-Yun²

¹ Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

² Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China

Abstract For investigating the urbanization development effect on the local and surrounding atmospheric environment, some numerical experiments are employed by adopting the typical meteorological condition in this paper. The simulation region was chosen for the urban district and three important satellite town of Beijing city, which are the main developing direction of Beijing planning in recent twenty years. The simulation results show that, firstly, the urban development has great effect on the local environment. On a clear, calm summer meteorological condition, as urban area fraction in simulation region increasing of 19%, the mean air temperature on urban region increase 1.91℃; and as the vegetation fraction reducing the mean specific humidity decrease 3.3 g·kg⁻¹. Furthermore, the different urban layout and scale lead to the different influence on meteorological environment. At the same time, the variety of local urban scale and layout influence the atmospheric environment of surrounding region greatly, and the urban area is larger, the influence is more marked. Such as, 1) reasoning for the existent of Beijing urban district, the temperature increment of surrounding town reach the maximum of 1.2℃ at 14:00, and the mixture layer depth rise about 150 m, and the turbulence kinetic energy increase about 0.15 m²·s⁻²; 2) the urban construction and development change the meteorological environment, at the same time, the air pollution transporting and dispersing has been altered. The existent of Beijing urban district lead to the decrease of the total allowable emission reaching 18.02 t·d⁻¹.

Identically, the contribution ratio of the surrounding towns expanding to PM10 concentration of urban district reaches $0.192 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$.

Keywords Urban layout and scale, Meteorological environment, Air quality, Ground-air interaction, Numerical simulation

1 引言

城市是由人为造成的各种不同景观成分的组合体,非均匀性是城市形态分布的一个基本特点,这种强烈的不均匀下垫面分布造成大气环境中的能量传输和物质分布的极大不均匀性,进而形成了城市的局地环流、小尺度的空气平流和大气湍流等物质和能量的交换过程^[1,2],而城市布局正是通过这些过程影响了大气环境,生成了有别于区域气候的城市局地气候^[3-6].城市布局和发展规模的变化,尤其是绿地和建筑物的空间格局对城市大气环境的影响显著^[7,8].Eliasson 等^[9]研究了瑞典的城市土地覆盖类型的面积比例及其动态对城市大气环境的影响.结果表明,城市的景观结构能够解释 78% 的城市气温的差异. Avissar^[10]则认为城市发展存在一个最佳面积,最佳面积的大小取决于城市绿地的面积比例和周边景观组分的类型.

基于确立数学物理模型的数值运算及精细城市信息资料支撑的大气环境数值模式,通过对城市陆面过程及边界层内大气过程的考虑,可全面描述城市格局及规模变化与大气之间的相互作用,是城市大气环境研究的重要方法^[11-14].张惠远等^[15]对运用大气数值模式进行城市景观格局与大气环境影响的研究工作进行了回顾.陈燕等采用区域边界层模式(Regional Boundary Layer Model,缩写为 RBLM)就城市化进程对大气边界层的影响以及对污染物输送扩散的影响展开^[16],并研究了规划中绿化布局及植被覆盖的变化对城市气象环境的影响^[17].何晓凤等^[18]对城市规划布局影响边界层结构进行数值试验研究.

当前,我国经济迅速发展,城市建设很快,大型城市的发展,其建设面积的大小、建设布局以及间距远近的不同对周边大气环境带来不同的影响;反之,周围城镇的布局、面积及距离不同,对大型城市的大气环境也存在影响.城市群通常为污染物排放较为集中的地区,合理的城市布局能够降低城市建设所带来的大气环境负面影响,城市建设布局必须考虑城市群的协调关系,在我国快速的城市化形势下,这

种需求更为迫切.

运用数值模拟的研究手段,本文以北京主城区及其东部发展带顺义、通州、亦庄三重点新城改革开放后的城市建设发展过程为例,对城市建设发展可能带来的大气环境的局地及相互影响进行分析,以期城市群发展决策提供参考.

2 研究区域及试验算例

本文采用南京大学的区域边界层模式与大气污染物输送扩散模式,对城市群发展大气环境的相互影响进行模拟研究,实例应用于北京主城区及其东部发展带顺义、通州、亦庄等重点新城,如图 1 所示为本文研究区域(包括北京主城区及顺义、通州、亦庄三城)1980 年,1990 年,2000 年及 2004 年的土地利用类型,中心坐标位于 116.57°E , 39.97°N ,范围为 $50 \text{ km} \times 60 \text{ km}$.由图可见,北京自 1979 年改革开放以来,城市建设用地急剧增加.同时,分析 1980 ~ 2004 年研究区域内建筑物高度的变化可知,北京市建筑物高度显著增加,1980 年 1 km 水平格距范围内建筑物平均高度最大值为 18 m ,而到 2004 年达到 45 m (图 2).

目前《北京城市空间发展战略研究》提出了“两轴-两带-多中心”的城市空间新格局,即完善“两轴”——继承和发展北京城市中轴线,保障首都职能和文化职能的发挥;强化“东部发展带”,制定顺义、通州、亦庄等重点新城规划,疏导首都经济的产业发展方向,整合“西部生态带”,最终构筑以城市中心与副中心相结合、市区与多个新城相联系的新的城市形态.顺义、通州、亦庄三重点新城具有疏导首都经济的产业发展方向的新职能,必然会有较大发展.然而该区域的建设发展对局地气象环境的影响如何,另外三新城的发展会对主城区带来什么样的影响呢?反之,主城区的建设对三新城的影响如何?为了减小城市建设对环境的负面影响,首先我们需要了解城市发展,其大气环境相互影响的物理过程,我们通过设计以下数值试验方案对北京市区与三新城大气环境的相互影响进行初步剖析:

(1) STND 方案对 2004 现状年北京的大气环境

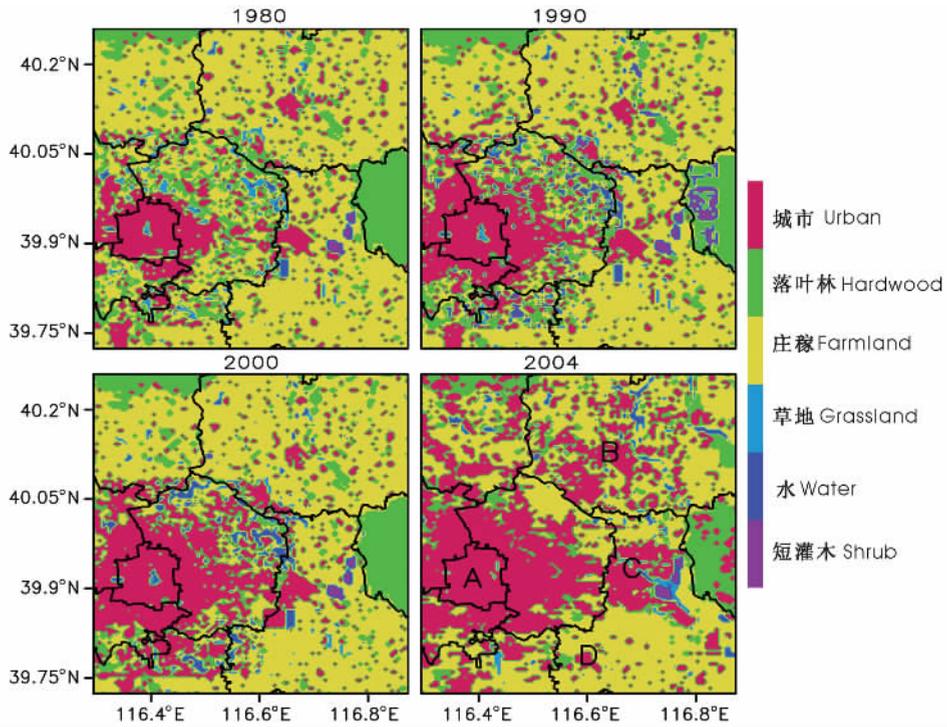


图 1 北京土地利用类型图

A 主城区 Downtown area B 顺义 Shunyi town C 通州 Tongzhou town D 大兴 Daxing town

Fig. 1 The landuse type of Beijing city in different decades

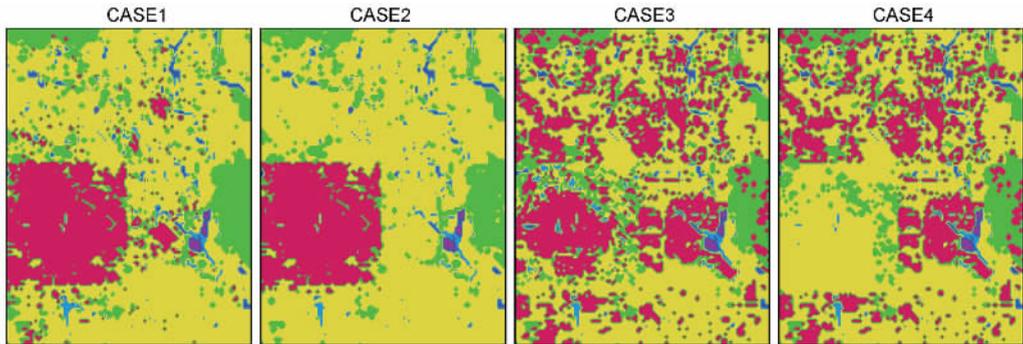


图 3 CASE1 ~ CASE4 数值试验方案土地利用状况 (图中色标说明与图 1 同)

Fig. 3 The landuse type for CASE1 ~ CASE4 (The colorbar same as Fig. 1)

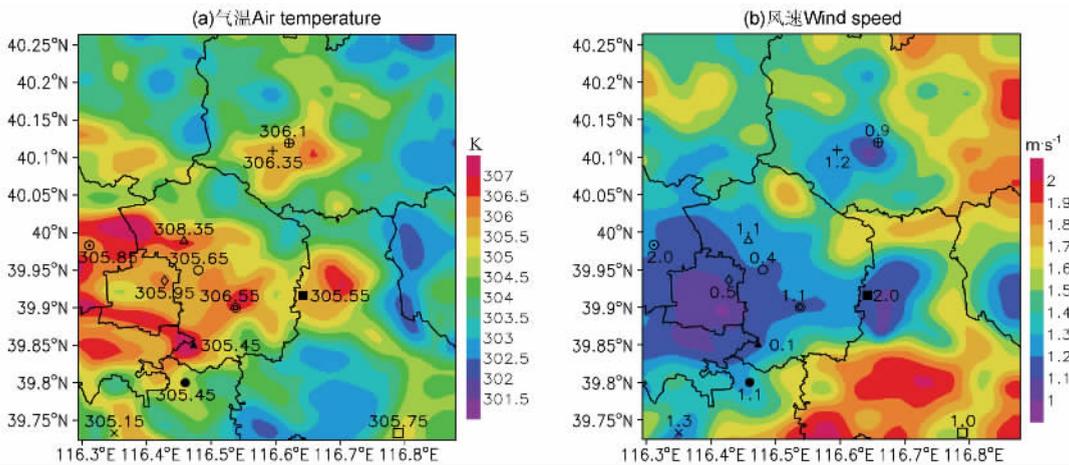


图 5 近地面气温 (2 m) 与风速 (10 m) 模拟结果与观测值的比较

Fig. 5 The comparison between simulation and observation of air temperature (2 m) and wind speed (10 m) near surface layer

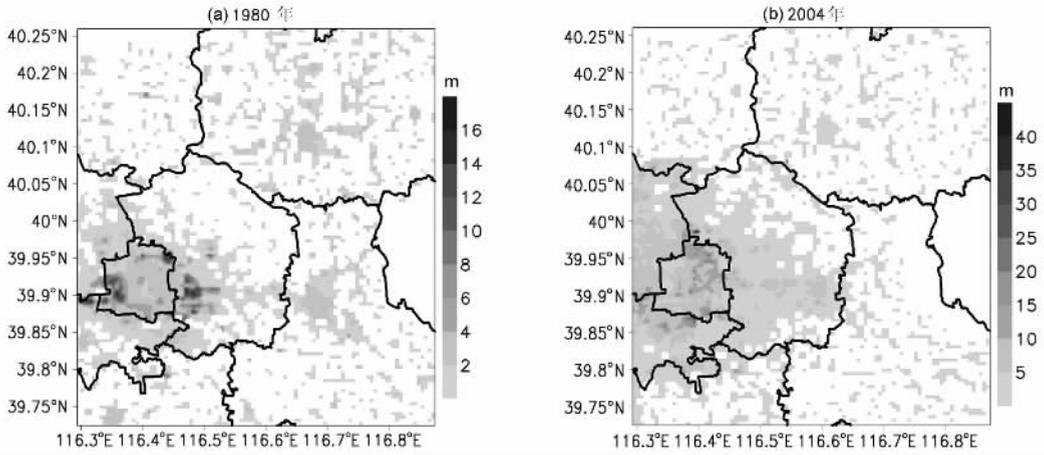


图 2 模拟区域建筑物平均高度分布(单位:m)

Fig.2 Distribution of the average height in simulation domain

进行模拟；

(2) 2000,1990,1980 方案 分别应用 2000 年,1990 年及 1980 年土地利用类型对北京的气象环境进行模拟,以分析城市发展对局地气象环境的影响；

(3) CASE1 及 CASE2 方案 北京主城区保持 2004 现状年土地利用类型不变,小城镇分别为 1980 年状况以及不存在小城镇,进行模拟计算,以分析小城镇的发展变化对主城区的影响；

(4) CASE3 及 CASE4 方案 小城镇保持 2004 年土地利用类型不变,主城区分别为 1980 年及不存在主城区两种情况,以分析主城区的发展变化对小城镇的影响。

图 1 所示为上述 STND 方案及 2000,1990,1980 方案土地利用类型分布,图 3 所示为上述数值试验 CASE1~CASE4 方案的土地利用类型分布状况,本文采取同样的气象条件计算以上四组城镇布局的气象环境以及可吸入颗粒物 PM_{10} (直径小于 $10 \mu m$ 的粒子)的浓度分布,对城市群发展大气环境的相互影响进行分析研究。

3 模式及资料介绍

3.1 区域边界层模式

RBLM 模式开发于 2002 年^[19],应用于城市边界层结构^[20-22]、气象环境变化以及城市规划^[11-14]等研究,并在应用过程中进一步发展和完善对于城市效应影响的计算,能够较为细致地处理城市中建筑物拖曳作用^[21]以及人为热排放^[22]等作用,能够较好地描述城市复杂下垫面的边界层结构演变,体现热力和动力因子作用下的山谷风、海陆风以及城市热岛

等特征,并可为污染扩散计算提供较为精细的气象场。RBLM 模式采用 1.5 阶闭合的湍流参数化方案,气象模式及污染物扩散模式所需的湍流水平扩散系数 K_{mh} 及垂直扩散系数 K_{mv} 是湍流能量 E 和长度尺度 l 的函数^[11]：

$$K_{mh} = 0.1 E^{1/2} l_h,$$

$$K_{mv} = 0.1 E^{1/2} l_v,$$

$$l_h = \Delta s_h$$

$$\text{其中, } l_v = \begin{cases} \Delta s_v & \text{不稳定和中性层结} \\ \min(\Delta s_v, l_s) & \text{稳定层结} \end{cases}$$

$\Delta s_h = (\Delta x \Delta y)^{1/2}$, $\Delta s_v = \Delta z, h, v$ 下标分别表示水平方向和垂直方向。

算例的气象条件由北京市气象局分析提供,2004 年 8 月 8 日 08 时开始,北京处于西北部弱高压与东边高压之间的风向辐合区中,山谷风环流不明显,风向为偏东风,至 9 日 2 时西北部高压东移与东边高压合并,地面仍呈东高西低的形势。在该种天气条件控制下,北京地区天气晴朗,风速不大,为不利于污染物扩散的典型天气类型。从 8 月 7 日至 9 日,北京地区首要污染物为可吸入颗粒物,城市处于轻度污染状况。

模拟算例从 2004 年 8 日 08 时开始积分 24 小时。水平方向采用网格距为 1 km 的均匀网格。为了详细考虑低层人为热源的影响,垂直方向采用拉伸网格,最低层为 10 m,1000 m 以下共有 19 层。人为热各年份变化的处理主要考虑汽车尾气排放的废热、工业生产的能源消耗以及城市居民生活的各种能量的消耗,由 1980 年,1990 年,2000 年及 2004 年北京城市年鉴、中国能源统计年鉴及人口年鉴等资料,利用土地面积、人口密度、北京的总能源消耗、居

民生活能源消耗、工业能源消耗,社会机动车辆拥有量及标准煤的发热率进行分析和估算.如图4所示为北京不同年份人为热排放日变化分布.

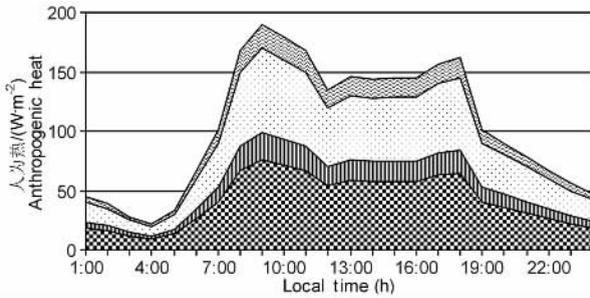


图4 人为热日变化分布

Fig.4 The diurnal change of anthropogenic heat flux

3.2 大气扩散模式

由质量守恒定律以及梯度输送理论导出的大气污染物输送扩散模式^[23-24],可较全面地描述大气对污染物的平流输送、湍流扩散、干湿沉积和化学转化过程,也反映下垫面地形的影响.对于任何一种大气污染物,设其浓度为 $C(x, y, z^*, t)$,则地形坐标系下的三维大气扩散模式为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w^* \frac{\partial C}{\partial z^*} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{mh} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{mh} \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ &+ \left(\frac{h_d}{h_d - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_{mz} \frac{\partial C}{\partial z^*} \right) \\ &+ S + R + \sum \text{chemis}, \end{aligned}$$

其中 h_d 为模式顶高, z_g 为地形高度, S 为地面源排放, R 为干湿沉积过程, $\sum \text{chemis}$ 为化学过程带来的生成和消亡.

随着北京城市能耗和机动车数量大幅度增加,气溶胶造成的空气污染引起人们的广泛关注.可吸入颗粒物(PM10)已成为北京首要污染物. PM10 主要来源于汽车尾气和地面尘土^[25],同时,燃煤生成的二次颗粒物硫酸盐和有机炭(如黑炭等)也是 PM10 的主要来源.当前,PM10 是城市中对人体健康危害最大的污染物之一^[26].王玮等^[27]根据交通来源不同粒径颗粒物平均排放因子的测定和计算,认为机动车排放颗粒物主要存在于粒径较小的颗粒中.假定1999年北京机动车保有量为220万辆,则PM10发生率为6.7万 $t \cdot a^{-1}$.本文根据机动车保有量可得到1980年,1990年,2000年及2004年的PM10发生率,并假设建筑物的高度与密集程度与城市PM10排放有很好的对应关系^[28],假定污染物面

源的源强与网格建筑物的平均高度和建筑物所占面积的乘积成正比,得到PM10的面源源强分布为 $q_{i,j}$

$$= \frac{(D_{i,j} H_{i,j}) E}{\sum_{i,j} D_{i,j} H_{i,j}}$$

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 为北京市区PM10总排放量, D, H 分别为某一网格上建筑物所占的平均密度和高度, i, j 为模拟区域的网格点.初始条件假设PM10地面浓度水平均匀分布,垂直方向上按照指数率下降: $C = C_0 e^{-\frac{z_g}{h_d}}$.

4 模式效果检验

采用STND算例方案,对北京2004年8月8日08时至9日08时的气象环境进行了模拟.对模拟域内12个地面气象观测站点的观测结果与模拟结果作相关分析,相关系数如表1所示.

表1 风速与温度模拟值与观测值的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between simulation and observation

站名	站号	温度相关系数	风速相关系数	
顺义	+	54398	0.96	0.50
海淀	⊙	54399	0.96	0.62
石景山	□	54413	0.95	0.42
通州	■	54431	0.70	0.22
朝阳	○	54433	0.97	0.80
观象台	●	54511	0.90	0.58
大兴	×	54594	0.99	0.86
东直门	◇	206	0.81	0.73
四元桥	△	211	0.89	0.82
十八里店	▲	212	0.82	0.72
白家庄	◎	220	0.72	0.52
顺义赛马场	⊕	396	0.99	0.44
平均			0.88	0.60

图5为模拟所得正午14:00近地面温度与风速分布,图中标出了气象观测站点的观测值.由表1及图5可见,边界层模式模拟所得近地面气温与观测吻合较好,并大致合理地模拟出了近地面风速的分布.

5 计算结果分析

5.1 城市群发展对局地环境的影响

城市迅速发展使城市规模扩张,其下垫面的非

均匀程度更为剧烈,且城市地表热容量、含水率、反射率、粗糙度等物理属性发生变化,直接对地表能量平衡产生影响,从而影响地气之间的物质能量交换,并进一步影响气象要素场。图 6a 分析了模拟区域内城市用地增长与感热通量变化及城市平均气温变化之间的关系,气温及感热通量均为模拟域中城市下垫面中午 14:00 的平均值。由图可见,城市土地利用率的的增长与城市地表感热的增长及近地面温度

增长的变化趋势基本一致,从 1980 方案至 STND 方案,城市覆盖率增加 19%,中午 14:00 地表感热通量增加 52%,近地面气温增加 1.91℃。相应地,从图 6b 可以看出自然植被利用率的减少与城市地表潜热的减少及近地面相对湿度减小的变化趋势也基本一致。比较 1980 方案与 STND 方案,自然植被覆盖率减少 20%,使潜热通量减少 27%,城市区域近地面比湿降低 3.3 g·kg⁻¹。

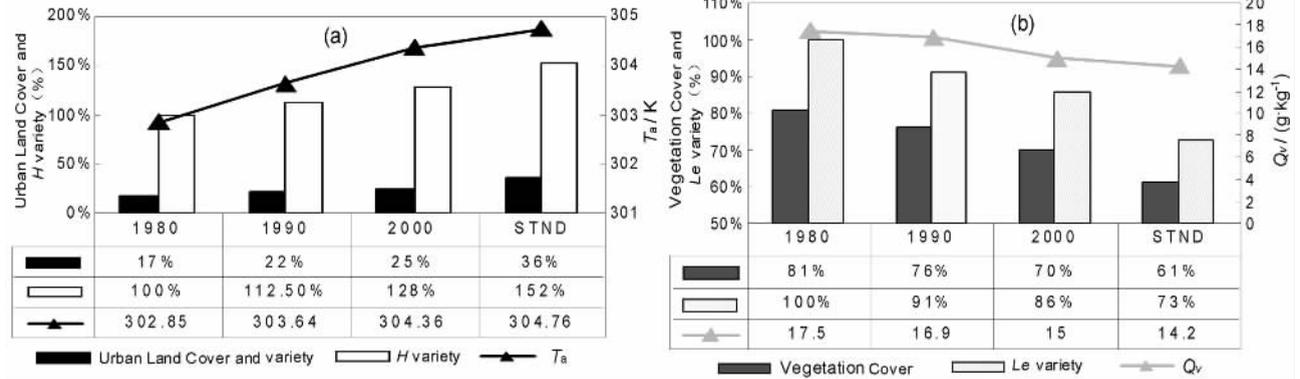


图 6 1980、1990、2000 及 STND 方案土地利用变化和湍能通量及近地面气象要素的变化对应关系示意
(a)城市面积变化与感热通量(H)及近地面气温(T_s)变化关系 (b)植被覆盖变化与潜热通量(Le)及近地面比湿(Q_v)变化关系。

Fig.6 The relationship between variety of heat flux near surface layer, meteorological condition and landuse change in 1980,1990,2000 and 2004
(a)The variety of sense heat flux and air temperature near surface layer correspond to urban scale change;
(b)The variety of latent heat flux and specific heat near surface layer correspond to vegetation fraction change.

城市群的发展导致城市区域地表能量平衡产生的显著变化,加强了近地面地气物质的交换,从而影响近地面的气象环境。城市区域建筑物的增长,加大了对城市低层风场的阻尼拖曳作用,使得大气流经城市地区时,风速减小,随着建筑物的增高和增密,气流的减速现象更加明显。由图 7 可见,城市区域风速明显减小,随着城建规模扩大,城市建筑物更为密集,比较 1980 方案与 STND 方案,主城区日平均风速减小 0.85 m·s⁻¹,由于通州城市建设迅速,且城市布局较为密集,其风速变化最为显著达到 1.26 m·s⁻¹,顺义的城市发展同样较为迅速,然而从其下垫面分布形式可以看出,顺义的城市分布较为分散,其日平均风速的变化为 1.05 m·s⁻¹左右;大兴由于城市占地面积很小,其建筑物分布比较低矮,且城市发展缓慢,其风速的变化较小为 0.58 m·s⁻¹。此外,分析各算例主城区、顺义、通州及大兴城市区域温度和湿度的湿度的变化可知,温度、湿度变化与风速变化的趋势一致,通州城市区域的变化最显著,其次是顺义,大兴的变化最小。由此可见,城市发展布局与规模不同,对城市区域气象环境程度也不同。

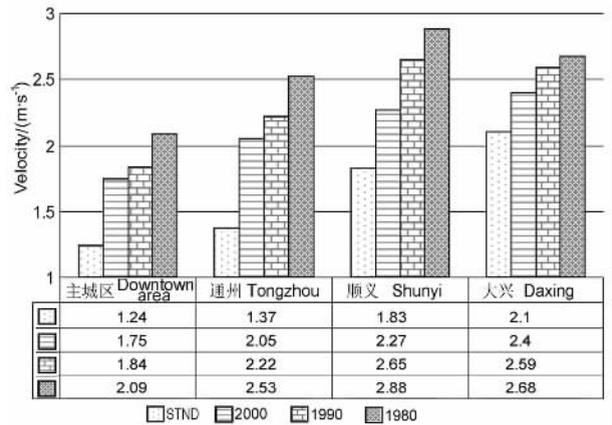


图 7 各方案城市区域日平均风速变化
Fig.7 The change of average wind speed between STND,2000,1990, and 1980

5.2 小城镇群的发展对主城区环境的影响

城镇群发展在影响局地气象环境的同时,对周边地区会产生怎样的影响,程度如何? CASE1 与 CASE2 方案设计为主城区不变,周围小城镇发展变化。采用 2004 年 8 月 8 日 08:00 至 9 日 08:00 相同的气象条件,模拟计算 STND 方案及 CASE1 与

CASE2 状况下城市气象环境,对不同方案模拟结果比较,从而分析小城镇发展变化对主城区周边环境的影响.

图 8 为模拟所得 14:00 STND 方案与 CASE1 及 CASE2 方案的近地面温度差. 受天气系统控制,8 月 8 日 14:00 主要为偏东风,CASE2、CASE1、STND 方案中小城镇城市建筑物密集程度增加,导致局地空气动力粗糙度变化,对近地面气流的拖曳影响增加,主城区内风速减少 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,而通州、顺义区域局地风速减小最多达到 $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 风速的减少使

更多的热量留在城市主城区,同时,小城镇面积的增加,人为热排放增加,以及动力粗糙度增加,多种因素使小城镇局地温度升高,以通州为例,如图 8 所示,通州近地面气温发生明显的变化,对于下风向主城区的热力输送也相应增加,这些影响均使主城区的近地面温度升高. 由图 8a 可以看出,当小城镇处于 2004 年的状况时,与小城镇群为 1980 年状况比较,主城区存在 0.5°C 左右的温度变化. 与没有小城镇时(图 8b)相比,这种温度变化更为明显.

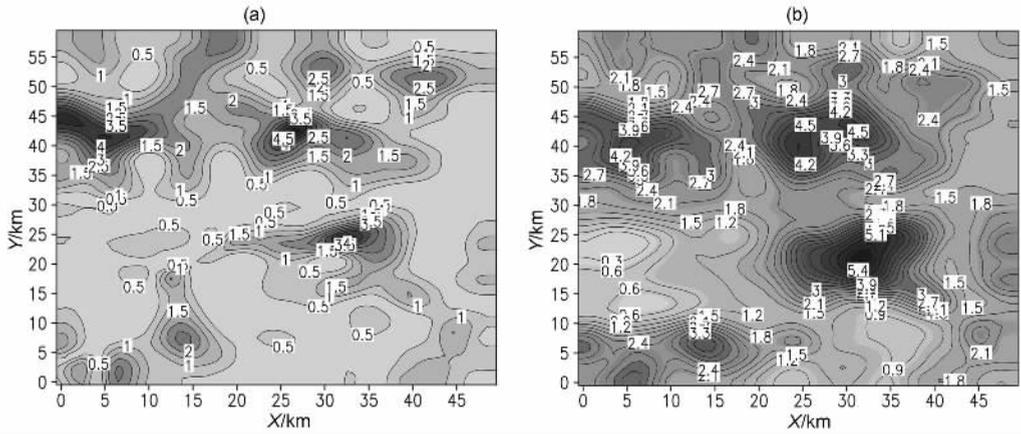


图 8 14:00 近地面(2 m)气温差值分布(单位: $^\circ\text{C}$)

(a) STND - CASE1 (b) STND - CASE2.

Fig.8 Distribution of the temperature difference near surface layer at 14:00 (unit: $^\circ\text{C}$)

图 9 为 14:00 STND、CASE1 及 CASE2 方案主城区的垂直扩散系数廓线分布,可以看出,由于小城镇的影响,主城区湍能垂直扩散作用增加,与没有小城镇比较(CASE2),2004 年小城镇状况时(STND)垂直扩散系数在 14:00 最大增加 $1 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. 小城镇的建

设发展,影响了主城区湍流交换过程,进而改变主城区气温的垂直分布,对白天的混合层及夜间的逆温结构产生影响. 图 10 为 STND、CASE1 及 CASE2 方案 14:00 及 02:00 主城区的气温垂直廓线. 由图 10a 可见,与 CASE2 方案比较,STND 方案正午 14:00 主城区的混合层高度升高 100 m 左右. 夜间湍能的影响较小,温度层结稳定,逆温出现,主城区温度随小城镇面积变化存在较小的变化,逆温层高度无明显变化(图 10b).

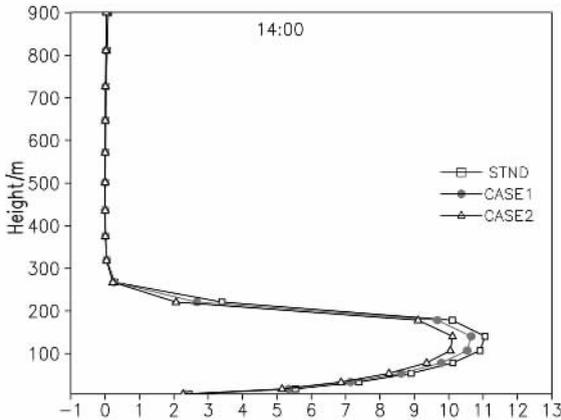


图 9 主城区垂直扩散系数廓线分布 ($x = 14, y = 20$) (单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.9 The profile of vertical diffusion coefficient in urban center ($x = 14, y = 20$) (unit: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)

5.3 主城区的发展对小城镇群环境的影响

与 CASE1 及 CASE2 相反,CASE3 与 CASE4 算例设计为通州、顺义、大兴等小城镇土地利用类型不变,而主城区则分别为 1980 年状况以及不存在. 通过比较 STND 算例结果与 CASE3、CASE4 算例结果,可进一步分析主城区发展对小城镇周边气象环境产生的影响.

图 11 为模拟所得 14:00 STND 方案与 CASE3 及 CASE4 方案的近地面气温差值,由图可见,与 CASE3 方案相比,STND 方案小城镇增温 0.5°C 左右,与 CASE4 方案比较,STND 方案小城镇最大增温可达到

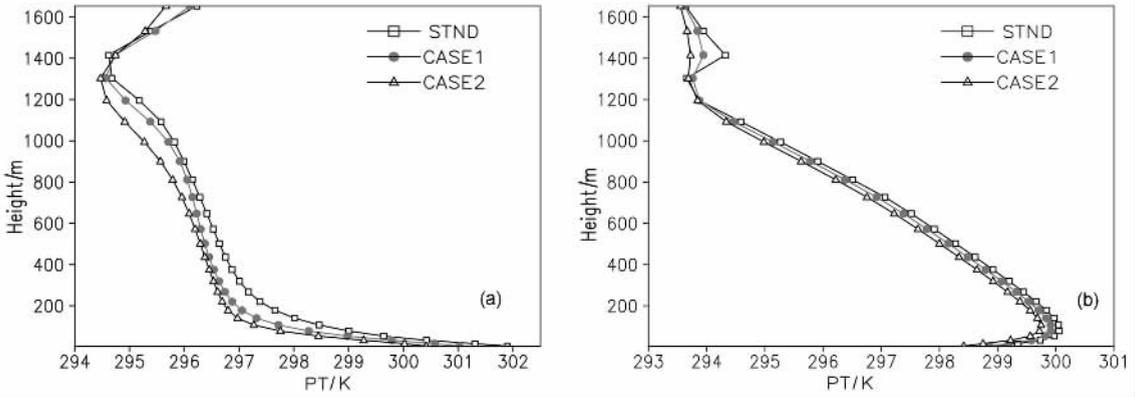


图 10 主城区温度垂直廓线分布($x = 14, y = 20$)

(a)日间温度 ;(b)夜间逆温层 .

Fig. 10 The temperature profiles of urban center($x = 14, y = 20$)

(a) Potential temperature profile at 14 00 ;(b) Air temperature profile at 02 00 .

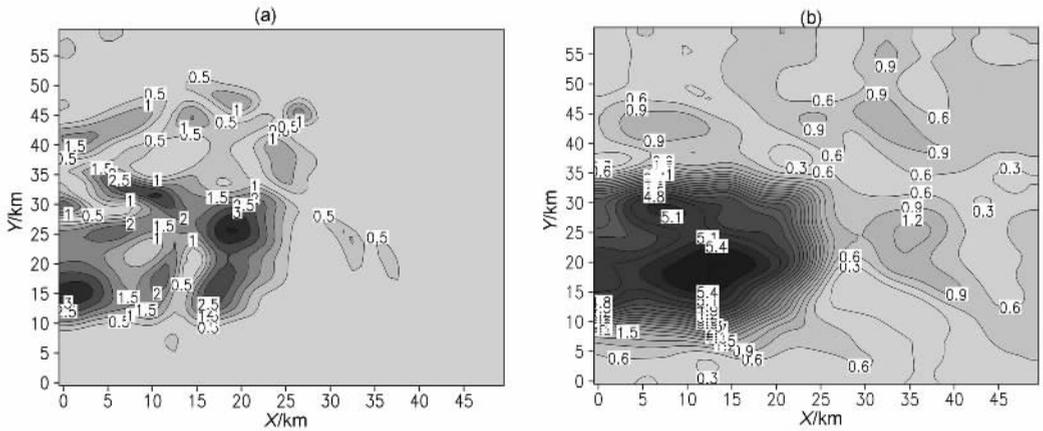


图 11 14 00 近地面(2 m)气温差值分布(单位 : $^{\circ}\text{C}$)

(a)STND - CASE3 ;(b)STND - CASE4 .

Fig. 11 Distribution of the temperature difference near surface layer at 14 00(unit : $^{\circ}\text{C}$)

1.2 $^{\circ}\text{C}$. 主城区城市建设发展 ,局地热岛强度加大 ,然而 14 00 近地面为偏东风 ,主城区气温增加导致的热平流输送对三新城无明显的影响 ,然而主城区建筑增加 ,风力减小 ,风切变增加 ,风速的变化导致主城区热通量发生变化 ,同时 ,人为排放热量的增多 ,这些因素使主城区湍能发生变化 ,对周围区域的热量扩散作用增加 . 而城市下垫面的热容较大 ,风速较小 ,对于热量、能量的储存及吸收更明显 ,因此与郊区相比较 ,小城镇受主城区影响的增温效应更加显著 . 从图 1 中可见 ,从 1980 年至 2004 年 ,主城区的城市面积发生很大的变化 ,建筑物最大平均高度从 18 m 增加到 45 m ,局地人为热最大排放从 57 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 增至 143 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,由图 11b 可见 ,这些变化使小城镇增温最大为 1.2 $^{\circ}\text{C}$,比郊区高出 0.6 $^{\circ}\text{C}$.

图 12 所示为模拟所得 14 :00 湍能垂直剖面变化 ,由图可以看出 ,从 CASE4 ,CASE3 至 STND 方案 ,

主城区湍能逐渐增大 . 随着主城区城建规模的增加 ,热通量输送增加 ,主城区湍流扩散作用增强 ,影响通州区域湍能也发生变化 . 比较图 12a 与图 12c ,通州区域湍能增加可达 0.15 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$. 湍流能量的变化使物质能量的垂直扩散作用变化 ,与 CASE4 方案相比较 ,STND 方案通州区域正午 14 00 的混合层高度升高 150 m 左右 (图 13a) . 由于夜间湍能的作用较小 ,02 00 的逆温层高度变化不大 (图 13b) .

由以上分析可见 ,小城镇群规模的建设发展对主城区周边气象环境存在较明显的影响 ,主要表现为随着小城镇群城市面积的增加 ,建筑逐渐密集 ,建筑物拖曳作用增强导致下风向主城区的风速减小 ,热量储存增加 ,并影响主城区湍能的变化 ,从而使主城区近地面温度及温度层结发生变化 . 反之 ,主城区建设发展导致周边小城镇环境的变化 ,则通过主城区局地风速减小 ,热岛强度增加 ,引起近地面湍能

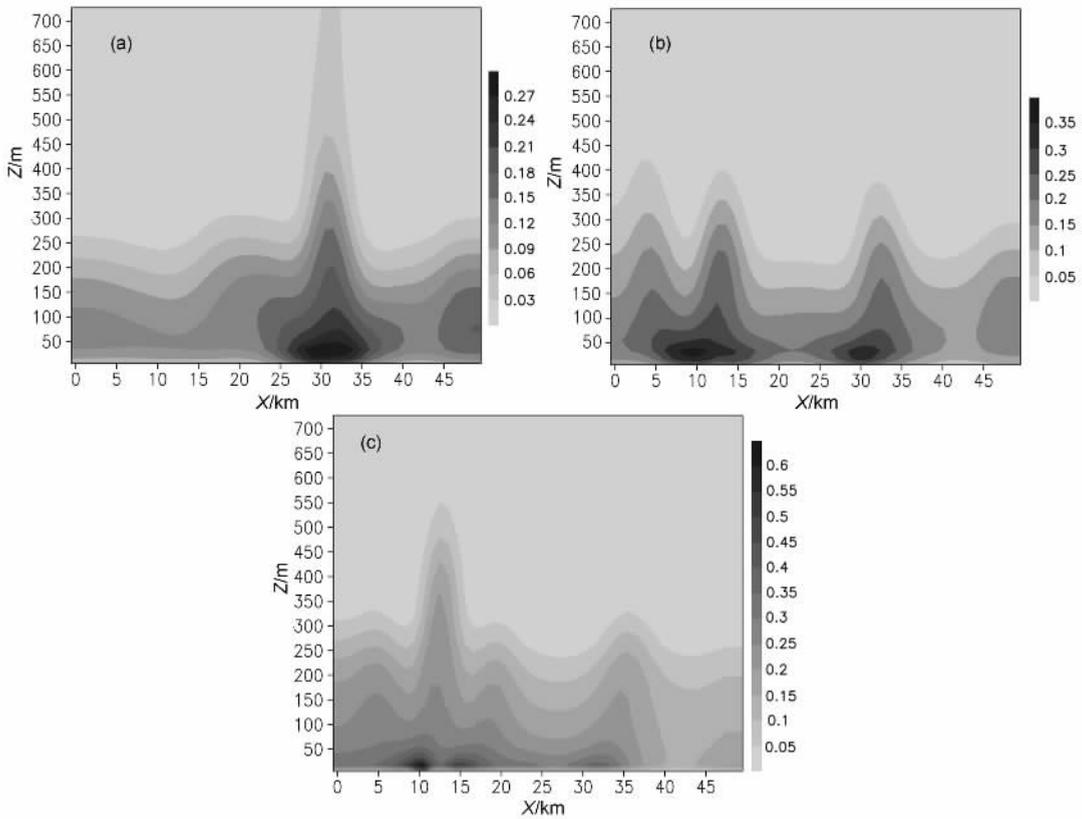


图 12 14 00 湍能垂直分布($y = 20$) (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)
 (a) CASE4 ; (b) CASE3 ; (c) STND.

Fig. 12 The vertical distribution of turbulence kinetic energy at 14 00 (unit : $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

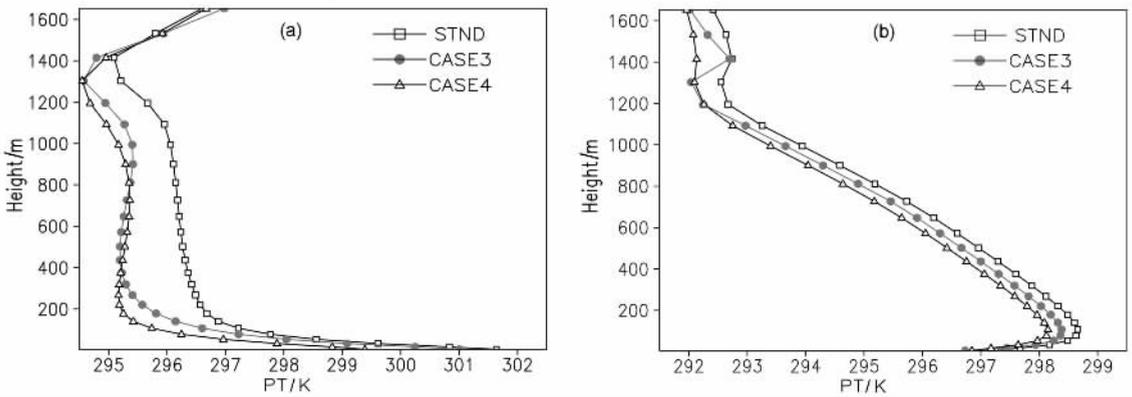


图 13 小城镇温度垂直廓线分布($x = 30, y = 20$)
 (a) 14 00 位温廓线 ; (b) 02 00 逆温层.

Fig. 13 The temperature profiles at circum-town ($x = 30, y = 20$)
 (a) Potential temperature profile at 14 00 ; (b) Air temperature profile at 02 00.

扩散作用增强,从而使主城区局地增加的热通量通过湍能扩散作用进一步影响周围小城镇的热环境,使周围地区的近地面气温增加.由于主城区城市面积改变显著,且城市建筑物及人为热排放等的变化较大,主城区对三新城的影响较大,三新城近地面温度最大增加可达 1.2°C .

随着城市的建设发展,由于包括动量、热量、水汽等物质与能量等多因子地气相互作用的过程,主城区与周边小城镇的气象环境相互影响,相互反馈.城市土地利用发生变化,通过地气相互作用使近地面温度场与流场发生变化,并导致湍能及近地面物质能量输送作用发生变化,又进一步作用于温度场

与流场. 这种复杂的相互作用过程导致地面流场与湍能扩散能力不断发生变化, 从而使近地面污染物扩散输送的能力也发生变化, 下一节, 我们将对城市群发展对污染物输送扩散的影响进行分析.

5.4 城市群发展对污染物输送扩散的影响

5.4.1 近地面 PM10 的浓度分布与收支分析

图 14 给出了模拟所得 STND 方案近地面 PM10 日平均分布. 当日地面风速较小, 市区风速多在 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右, 由图 14 可见, PM10 日平均最大值达到 $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$, 超过 PM10 国家环境质量日均浓度二级标准, 高值区位于建筑物较为密集区域, 整个城市处于轻污染状况.

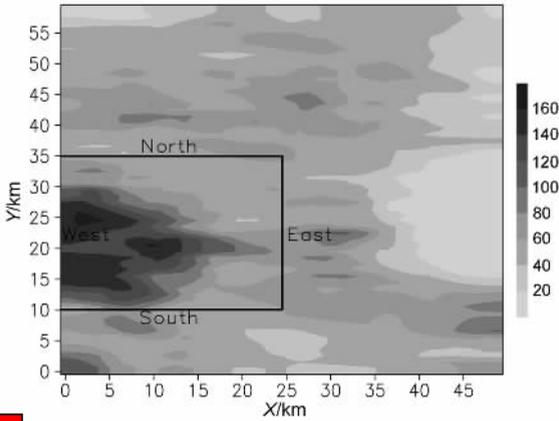


Fig. 14 Diurnal average distribution of PM10 of STND case (unit $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

通过定义跨边界污染物输送通量 F , 定量计算 STND, CASE1, CASE2, CASE3 及 CASE4 五个算例中主城区及三新城 PM10 的收支状况, 从而分析大气对污染物输送扩散能力的影响. 如图 14 所示为主城区与小城镇的东、南、西、北边界, 对于径向剖面, $F = u \times C$, 其中 u 为东西向风分量, C 为污染物浓度, $F > 0$ 表明污染物由西向东输送, 反之, 由东向西输送. 对于纬向剖面, $F = v \times C$, v 为南北向风分量. 表 2 给出了 8 日 08:00 至 9 日 08:00 主城区与小城镇群区域间 PM10 的输送通量, 表中净收支为正时, 表示各模拟方案黑框内区域为净收入, 为负时表示净输出. 由表 2 结果可见, 与 STND 方案比较, CASE1 及 CASE2 方案中处于上风方的小城镇群对主城区 PM10 输入输出存在一定的影响. 随着小城镇群交通量的增加, PM10 的源排放增加, PM10 的输送也增加, 2004 年现状小城镇 (STND) 与小城镇群不存在 (CASE2) 相比较, 东边界的输送量增加 $0.1819 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$. 小城镇群建筑物的增长对低层风场

的阻尼和扰动作用, 使主城区的风速衰减, 辐合气流加强, 与 CASE2 方案比较, STND 方案西边界的输送减少 $0.023 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$. 比较 CASE2, CASE1 与 STND 方案, 随着小城镇规模的扩大, 主城区 PM10 逐渐由净的输出转变为净的收入, 小城镇群的存在对主城区 PM10 净收支的贡献率达到 $0.192 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$.

表 2 区域间 PM10 日输送总量 (单位 $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)

Table 2 Total transportation of PM10 (unit: $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)

个例	East	South	West	North	净收支
STND	-0.182	0.046	-0.197	0.036	0.003
CASE1	-0.098	0.039	-0.201	0.041	-0.1
CASE2	-0.0001	0.009	-0.220	0.004	-0.189
CASE3	-0.237	0.053	-0.024	0.052	0.212
CASE4	-0.113	0.05	-0.003	0.004	0.156

主城区建设发展, 建筑物密集程度发生变化, 影响局地风场变化, 并进一步影响周边区域大气污染物的输送扩散能力. 与 CASE3 比较, 由于主城区建筑物增加, 风速减小, STND 方案东边界的输送量减小 $0.055 \text{ t}\cdot\text{d}^{-1}$. 然而对于 CASE4 方案, 当不存在主城区时, 一方面, 该区域内风速增大, 东边界来自小城镇群的污染物输送通量增加, 另一方面, 当小城镇群城市热岛作用较强时, 城市近地面风吹向热岛中心, 使向东的输送量减小, 在这两方面的共同影响下, CASE4 方案东边界的输送量减小. 比较 STND 方案与 CASE3, CASE4 方案的净收支可以看出, CASE3, CASE4 方案中主城区范围内的净收入大部分来源于小城镇群向下风向东边界的输送, 远大于 STND 方案, 主城区城建规模增加不利于小城镇群污染物向周边区域的输送.

5.4.2 PM10 允许排放总量的变化

为了更好地理解城市群发展大气环境的相互影响, 我们分别计算 STND, CASE1 与 CASE2 方案主城区 (图 14 中黑框内部分) 的 PM10 允许排放总量, 及 STND, CASE3 与 CASE4 方案小城镇群 (图 14 中黑框外部分) 的 PM10 允许排放总量, 以此为例, 进一步分析城市群发展对周边区域污染物环境的影响. 计算结果如表 3 所示.

由于小城镇群建筑物对城市低层风场的扰动和阻尼作用, 使局地风速衰减, 减少了对小城镇群下风方的主城区污染物的输送, 然而小城镇群的发展使城市面积迅速增大, 对周围的影响也增大, 近地面扩散能力加强, 同时源排放浓度增加, 导致小城镇群城

表 3 不同区域 PM10 允许排放总量

Table 3 The allowable concentration of PM10 in different region

评价区域	主城区			小城镇群		
	STND	CASE1	CASE2	STND	CASE3	CASE4
总量控制区域面积 (km ²)	523	523	523	730	730	730
目标浓度 (mg·m ⁻³)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
允许排放量 (t·d ⁻¹)	39.29	45.85	46.25	33.39	49.3	51.41
目前排放量 (t·d ⁻¹)	59.98	59.98	59.98	7.58	7.58	7.58

建规模的发展对主城区 PM10 允许排放量的影响越显著。如表 3 所示,与 CASE2 及 CASE1 比较,STND 方案中主城区的允许排放量最小,CASE2 方案最大,可以看出,小城镇群的存在及发展建设对主城区 PM10 允许排放总量存在一定的影响,与 CASE2 相比,STND 方案主城区允许排放总量减少 6.96 t·d⁻¹。由于本文选择典型不利于输送扩散的天气条件,三个方案主城区 PM10 允许排放量均小于目前排放量。

主城区对小城镇群大气环境的影响,由于源排放的增加,同时城建规模增加,对周围区域的大气环境影响加强。比较 STND, CASE3 方案及 CASE4 方案,小城镇群的 PM10 允许排放总量逐渐变大,与 CASE4 方案比较,STND 方案小城镇群允许排放总量减少 18.02 t·d⁻¹。由于小城镇城市面积较小,污染物排放少,又地处郊区,布局较为分散,目前的排放量尚小于允许排放总量。

6 结论及讨论

(1) 城镇群建设发展通过地气的相互作用对局地大气环境产生显著影响,在本文选择的夏日晴好天气条件下,从 1980 年至 2004 年,模拟域内北京市用地增加 19%,城市区域平均气温增加 1.91℃,植被覆盖率减少 20%,城市区域平均比湿减少 3.3 g·kg⁻¹。另外,城市建设规模和格局不同,对城市气象环境的影响也不同,通州和顺义城市建设的速度很快,然而通州城市区域分布较为密集集中,平均风速减小最为明显,达到 1.26 m·s⁻¹,而顺义城市格局较为分散,其风速减小为 1.05 m·s⁻¹。大兴城市发展较为缓慢,风速减小仅为 0.58 m·s⁻¹。

(2) 城市群的建设发展,通过大气的输送扩散过程对周边区域大气的热力及动力环境产生一定影响。主要表现为,受周围城建规模发展的影响,城市

的热量输送增加,风速减小。由于主城区城市建设面积变化较大,对周围小城镇的影响较明显,小城镇升温最高可达 1.2℃,小城镇的建设规模变化对主城区的温度影响最大为 0.6℃左右。城市群的建设发展对近地面湍能扩散能力的影响较为明显,主城区的发展变化显著改变了周边小城镇的湍能结构,使通州近地面湍能最大增加 0.15 m²·s⁻¹,相对变化幅度达到 50%。从而使日间混合层发生变化,其中 14:00 主城区城建规模发展影响小城镇混合层高度可增高 150 m。

(3) 城镇群发展,其气象环境通过地气多因子相互作用,相互反馈,发生显著的相互影响。在气象环境变化的同时,必然对污染物的扩散输送也产生显著的影响。城镇群发展,则污染物源排放增加;同时,建筑物增长对低层风场的阻尼扰动作用加强,从而影响向下风方区域的污染物输送;再则,由于城市边界层内大气对物质能量的湍能扩散作用较强,城市规模的增大使湍能扩散作用加强,向周围区域扩散输送的大气污染物同时增加,使周边区域的污染物允许排放总量减少。

(4) 本文的数值试验结果表明,城市的建设发展不仅影响局地大气环境,还影响周边城市群落的环境,必须从大气环境相互影响的角度考虑城市建设与周围区域的协调关系,以确保实现城市可持续发展的目标。由于资料的限制,本文选取典型天气个例,在有限的区域内对城镇群发展大气环境的相互影响进行了研究,需对长期气候状况,及更广泛区域的相互影响进行研究。

(5) 城市环境与城市建设协调发展是一个具有多因子的复杂问题,合理的城市布局能够缓解因城市化而引起的大气环境问题,当前我国城市发展迅速,研究城市格局与大气环境影响的需求更加迫切,然而城市格局对城市气候及大气环境的影响研究却仅仅处于起步阶段,对此须在实践中作进一步深入

的研究.

参考文献(References)

- [1] Arnfield A J. Two decades of urban climate research : a review of turbulence , exchanges of energy and water , and the urban heat island. *International Journal of Climatology* , 2003 , **23**(1) : 1 ~ 26
- [2] Pielke R A , Marland G , Betts R A , et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system : relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences* , 2002 , **360** : 1705 ~ 1719
- [3] 徐祥德, 汤 绪, 徐大海等. 城市化环境气象学引论. 北京 : 气象出版社, 2001
Xu X D , Tang X , Xu D H , et al. Introduction to Meteorology in Urbanization Environmen (in Chinese). Beijing : China Meteorological Press , 2001
- [4] Segiu T , Aurora S S , Alexandru L , et al. Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters. *Atmospheric Environment* , 1999 , **33**(24) : 4173 ~ 4183
- [5] Stephan P , Friedrich D. Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning. *Landscape and Urban Planning* , 2000 , **52** : 1 ~ 20
- [6] Pielke R A , Avissa R. Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology* , 1990 , **4** : 133 ~ 155
- [7] 魏 斌, 王景旭, 张 涛. 城市绿地生态效果评价方法的改进. 城市环境与城市生态, 1997, **10**(4) : 54 ~ 56
Wei B , Wang J X , Zhang T. Improvement of assessment methods for ecological effect of urban green land. *Urban Environment and Urban Ecology* (in Chinese) , 1997 , **10**(4) : 54 ~ 56
- [8] Oke T R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : comparison of scale model and field observations. *International Journal of Climatology* , 1981 , **1** : 237 ~ 254
- [9] Eliasson I , Svensson M K. Spatial air temperature , variations and urban land use-A statistical approach. *Meteorological Applications* , 2003 , **10**(2) : 135 ~ 149
- [10] Avissar R. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. *Atmospheric Environment* , 1996 , **30**(3) : 437 ~ 448
- [11] 汪光焘. 气象环境与城市规划. 北京 : 北京出版社, 2004
Wang G T. Meteorological Environment and Urban Planning (in Chinese). Beijing : Beijing Press , 2004
- [12] 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体系的研究与应用. 中国科学 (D 辑) , 2005 , **35**(增刊) : 145 ~ 155
Wang G T , Wang X Y , Miao S G , et al. The studying and application of the multi-scale evaluation system about atmospheric environment effect on urban planning. *Science in China (Series D)* (in Chinese) , 2005 , **35**(Suppl.) : 145 ~ 155
- [13] 《北京城市规划建设与大气污染关系研究》课题组. 气象条件及城市规划与大气环境. 北京 : 气象出版社, 2004
The research team of project " Research of relationship between meteorological condition and air pollution in Beijing city planning and construction ". Urban Planning and Atmospheric Environment (in Chinese). Beijing : Meteorological Press , 2004
- [14] Fang X Y , Jiang W M , Miao S G , et al. The multi-scale modeling system for research relationship between urban planning and meteorological environment. *Advances in Atmospheric Sciences* , 2004 , **21** : 103 ~ 112
- [15] 张惠远, 饶 胜, 迟妍妍等. 城市景观格局的大气环境效应研究进展. 地球科学进展, 2006, **21**(10) : 1025 ~ 1032
Zhang H Y , Rao S , Chi Y Y , et al. Advances in the impacts of urban landscape pattern on urban air environment. *Advances in Earth Science* (in Chinese) , 2006 , **21**(10) : 1025 ~ 1032
- [16] 陈 燕, 蒋维楣, 郭文利等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染扩散的影响. 环境科学学报, 2005 , **25**(2) : 700 ~ 710
Chen Y , Jiang W M , Guo W L , et al. Study on the effect of the city group development in Pearle River Delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese) , 2005 , **25**(2) : 700 ~ 710
- [17] 陈 燕, 蒋维楣, 徐 敏等. 城市规划中绿化布局对区域气象环境影响的数值试验研究. 地球物理学报, 2005 , **48**(2) : 265 ~ 274
Chen Y , Jiang W M , Xu M , et al. Simulation of greenbelts effect on meteorological environment in urban planning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2005 , **48**(2) : 265 ~ 274
- [18] 何晓凤, 蒋维楣, 郭文利等. 城市规划布局对边界层结构影响的数值试验. 高原气象, 2007, **26**(2) : 363 ~ 372
He X F , Jiang W M , Guo W L , et al. Simulation of local planning to the structure of urban boundary layer. *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 2007 , **26**(2) : 363 ~ 372
- [19] 徐 敏. 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟 [博士论文]. 南京 : 南京大学大气科学系, 2002
Xu M. Numerical simulation on the turbulence structure and meteorological environment in atmospheric boundary layer : from regional scale to micro-scale [Ph. D. thesis] (in Chinese). Nanjing : Atmospheric Sciences Department of Nanjing University , 2002
- [20] 陈 燕, 蒋维楣. 南京城市化进程对边界层结构影响的数值研究. 地球物理学报, 2007 , **50**(1) : 84 ~ 93
Chen Y , Jiang W M. Study on the impact of the urban development on boundary layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2007 , **50**(1) : 84 ~ 93
- [21] 陈 燕, 蒋维楣. 城市建筑物对边界层影响的数值模拟. 高原气象, 2006, **25**(5) : 824 ~ 833
Chen Y , Jiang W M. The numerical experiments of the effect of buildings on boundary layer structure. *Plateau Meteorology* (in Chinese) , 2006 , **25**(5) : 824 ~ 833
- [22] 何晓凤, 蒋维楣. 人为热对城市边界层结构影响的数值研究. 地球物理学报, 2007, **50**(1) : 75 ~ 83
He X F , Jiang W M. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) , 2007 , **50**(1) : 75 ~ 83
- [23] 蒋维楣. 空气污染气象学. 南京 : 南京大学出版社, 2004

- Jiang W M. Air Pollution Meteorology (in Chinese). Nanjing : Nanjing University Press , 2004
- [24] 房小怡 , 蒋维楣 , 吴 润等 . 城市空气污染数值预报模式系统及其应用 . 环境科学学报 , 2004 , **24**(1) : 111 ~ 115
Fang X Y , Jiang W M , Wu J , et al. Study on the development of numerical model system to predict urban air quality. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese) , 2004 , **24**(1) : 111 ~ 115
- [25] Cantanho A D A , Paulo A. Winter time and summer time Sao Paulo aerosol source apportionment study. *Atmospheric Environment* , 2001 , **35**(29) : 4889 ~ 4920
- [26] Fujii T , Hayashi S , Hogg J C , et al. Particulate matter induces cytokine expression in human bronchial epithelial cells. *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology* , 2001 , **25**(3) : 265 ~ 271
- [27] 王 玮 , 岳 欣 , 刘红杰等 . 交通来源颗粒物排放因子研究 . 环境科学研究 , 2001 , **14**(4) : 36 ~ 40
Wang W , Yue X , Liu H J , et al. Study on emission factors of particles from traffic sources. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese) , 2001 , **14**(4) : 36 ~ 40
- [28] 佟 华 , 刘辉志 , 桑建国等 . 城市人为热对北京热环境的影响 . 气候与环境研究 , 2003 , **9**(3) : 409 ~ 421
Tong H , Liu H Z , Song J G , et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) , 2003 , **9**(3) : 409 ~ 421

(本文编辑 何 燕)