

应用城市冠层模式研究建筑物形态 对城市边界层的影响^{*}

周荣卫^{1, 2} 蒋维楣¹ 何晓凤^{1, 2} 刘 罡¹

ZHOU Rongwei^{1, 2} JIANG Weimei¹ HE Xiaofeng^{1, 2} LIU Gang¹

1. 南京大学大气科学系, 南京, 210093

2. 中国气象局国家气候中心, 北京, 100081

1. *Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

2. *National Climatic Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2007-05-11 收稿, 2007-07-02 改回.

Zhou Rongwei Jiang Weimei He Xiaofeng Liu Gang. 2008. Study on effects of buildings morphology on urban boundary layer using an urban canopy model. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4): 489–499

Abstract An urban canopy model is incorporated into the Nanjing University Regional Boundary Layer Model. The simulation results of urban temperature with the urban canopy model are better than those with the traditional slab model, and are in more reasonable agreement with the observations, especially in the night time. The incorporated model is used to study the effect of buildings morphology on urban boundary layer and meteorological environment by changing urban area, building height and building density. By analyzing the results of sensitive experiments, the results are as follows: (1) When the urban area is expanded, the urban boundary layer heat flux increases, the thermal turbulence strengthens, the turbulent momentum flux and kinetic energy increases, and the surface air temperature also increases. The stability of urban atmospheric stratification is affected to different extents at different times in a day. (2) When the building height increases, the aerodynamic roughness height and zero plane displacement height of urban area increase, and the ratio of building height to street width also increases. Therefore, the increase in building height results in decreases in the surface heat flux, and decreases in urban surface temperature, mean wind speed and turbulent kinetic energy in the day time. While at night, as the more heat storage released by higher buildings, the thermal turbulence is more active and the surface heat flux increases, so urban temperature is higher. (3) As the increase in building density, the aerodynamic roughness height of urban area decreases, and the effect of urban canopy on radiation strengthens. The increase in buildings density results in decreases in urban surface heat flux, momentum flux, and air temperature, the increase in mean wind speed, and the weakening of turbulences in the daytime. While at night, urban temperature increases due to the release of more heat storage.

Key words Urban canopy model, Urban boundary layer, Building morphology, Numerical simulation

摘 要 文中将城市冠层模式耦合到南京大学城市尺度边界层模式中, 通过模拟对比发现, 耦合模式对城市地区气温模拟结果更接近于观测值, 尤其是对城市地区夜间气温模拟的改进。运用改进耦合模式通过多个敏感性试验的模拟, 从城市面积扩张、建筑物高度增加、建筑物分布密度变化等角度研究城市建筑物三维几何形态变化对城市边界层及城市气象环境的影响, 试验结果表明: (1) 城市面积扩张使得城市下垫面的热通量增大, 热力湍流活动增强, 动量通量输送增强, 城市湍能增大, 湍流扩散系数变大, 城市气温升高, 且对不同时刻城市区域大气层结稳定度均有不同程度的影响。 (2) 建筑物高度增加增大了城市下垫面的粗糙度和零平面位移, 同时也增大了城市街渠高宽比。城市建筑物越高, 白天城市地区地表热通量越小, 城市上空大气温度越低, 平均风速减小, 湍能减小; 夜间由于高大建筑物释放储热比低矮建筑物要多, 其热力湍流相对活跃, 地表热

^{*} 资助课题: 国家自然科学基金重点项目(40333027)。

作者简介: 周荣卫, 主要从事城市边界层、气候资源评估研究。E-mail: zhourongwei@yahoo.com.cn

通量增大,使得城市区域气温较高。(3)建筑物密度增大,会减小城市下垫面的粗糙度同时增强街渠对辐射的影响。建筑物密度增大在白天会减小地表热通量和动量通量,使城市气温降低,平均风速增大,城市湍流活动能力减弱;夜间城市释放较多储热使得气温较高。

关键词 城市冠层模式,城市边界层,建筑物形态,数值模拟
中图法分类号 P404

1 引言

城市冠层是指从建筑物顶部到地表的这一层,讨论一个城市的冠层结构变化应主要从以下几个方面进行:(1)城市区域水平范围的扩张,(2)建筑物高度的增加,(3)建筑物分布密度的变化等。街渠是城市冠层的基本单位,通过改变街渠几何形态学参数(如街渠高度、街渠宽度以及建筑物宽度等)来描述城市冠层结构的变化。

传统平板模式中处理城市区域地-气间相互作用时,并不考虑街渠几何形态的影响,通过加大地表动力学粗糙度以及降低反照率等方法来达到模拟城市气象环境的目的。前人研究冠层建筑物对城市边界层的作用时,更多的是关注建筑物对近地层气流的直接动力影响。南京大学城市尺度边界模式(NJU-RBLM)采用 Uno 等(1989)在动量和湍能方程中添加建筑物拖曳力影响项来实现对城市建筑物动力作用描述的方法。陈燕等(2006)运用 NJU-RBLM 模式以杭州建筑物资料研究了城市建筑物平均高度和密度变化对城市边界层结构的影响。传统平板模式中的陆面过程参数化方案只考虑了建筑物对气流拖曳以及湍流生消等的作用,并未详细考虑建筑物冠层的热力效应,只是从建筑物动力作用的角度分析了建筑物高度和密度变化对城市边界层的影响,但是城市冠层对边界层的作用不只体现在动力作用方面,其热力作用也不可忽视。城市冠层的热力效应就是城市热岛现象形成的重要原因,对城市边界层结构有着重要影响(Bonacquisti, 2006),李小莉等(2005)在 MM5 中耦合城市冠层参数化方案研究了北京冬季城市边界层结构,江晓燕等(2007)研究了建筑物改变城市地区反照率对北京热岛过程的影响。

本文采用耦合了城市冠层模式(何晓凤, 2006)的 NJU-RBLM 模式通过大量敏感性试验来研究建筑物形态学参数变化对城市边界层的影响。由于城

市冠层模式描述的主要是冠层内的辐射过程,所以本文主要是从建筑物热力效应的角度来分析建筑物形态变化对城市边界层的影响,同时通过引入与建筑物形态相关的动力学粗糙度和零平面位移来考虑建筑物对边界层的动力作用。

2 数值模拟

2.1 南京大学城市尺度边界层模式

NJU-RBLM 模式是一个三维非静力城市尺度边界层模式,模式采用雷诺平均大气运动方程组,包括动量方程、热流量方程、完全弹性连续方程和水汽方程,采用湍能耗散率($E - \epsilon$)的闭合方案,模式中还考虑了建筑物对气流的动力拖曳作用,并耦合城市冠层模式来描述城市建筑物三维结构对地表能量平衡关系的影响。该模式可广泛运用于 β - γ 中尺度的数值模拟研究(徐敏等, 2002; 徐敏, 2002; 蒋维楣等, 2007; 陈燕等, 2005)。

2.2 城市冠层模式

城市冠层模式中认为街渠是构成城市的基本单位,冠层中的物理过程则是通过具有代表性的街渠来考虑的。根据城市冠层建筑物的几何特征细致地考虑了街渠内的辐射传输过程,如:街渠中各表面对辐射的吸收、反射、遮蔽以及多次反射吸收等过程。街渠中存在屋顶、路面和墙面 3 种表面,城市冠层模式的特点就是在这 3 种表面上分别建立能量平衡关系,计算表层温度和 3 种不同表面与相连大气间的热通量交换,再根据不同表面所占比重算出街渠单元与上部大气间总的热通量交换(Masson, 2000; Kusaka 等, 2001)。

城市冠层模式在计算时做如下假定:研究区域内所有建筑物高度和宽度相同;沿道路延伸的两排建筑物与道路等长,且道路长度远大于建筑物宽度;研究区域内任何走向街渠存在的可能性都相同。在 3 种不同表面分别建立能量平衡关系,但是街渠内两面相对墙的物理过程大多是相同的,比如天空可视因子、墙面热力结构、建筑物内部温度和对散射辐

射的吸收等,因此并不分开考虑。唯一不同的就是到达两面墙上的直接太阳辐射,会造成两面墙的表面温度不同,但是这种差异对街渠整体与上部大气间的热通量不会产生明显影响。

城市冠层模式具体计算流程如图 1 所示,驱动冠层模式的气象要素有:冠层上部大气的风速、气温以及向下长短波辐射通量,冠层的形态学参数包括:街渠形态(长、宽、高),各表面整层厚度,墙面、路面和屋顶表面材料反照率,以及表面材料的热力系数(热传导系数、比辐射率、热容量),各表面的热力粗糙度和动力粗糙度等。城市冠层模式中计算各表面与相连大气的热量交换,冠层整体与上部大气间的热量交换是对各表面热量通量进行权重后的结果。

在城市中,由于垂直存在的墙面无形中增加了城市人为材料的表面积,使得权重不能简单应用 3 种面的面积比来计算,而应使用式(1)来计算:

$$A_{\text{canopy}} = 2 \frac{H_{\text{building}}}{(W_{\text{road}} + W_{\text{roof}})} A_{\text{wall}} + \frac{W_{\text{roof}}}{(W_{\text{road}} + W_{\text{roof}})} A_{\text{roof}} + \frac{W_{\text{road}}}{(W_{\text{road}} + W_{\text{roof}})} A_{\text{road}} \quad (1)$$

A_{canopy} 表示冠层整体的各种能量通量(向上长波辐射、向上短波辐射、储热、感热等), A_{roof} 、 A_{road} 、 A_{wall} 分别表示在屋顶、路面、墙壁上算出的与 A_{canopy} 对应的各种能量, H_{building} 、 W_{roof} 、 W_{road} 分别表示街渠高度、建筑物宽度、马路宽度。通过这 3 个表征街渠形态的参数最终算出城市冠层各类表面所占的权重。

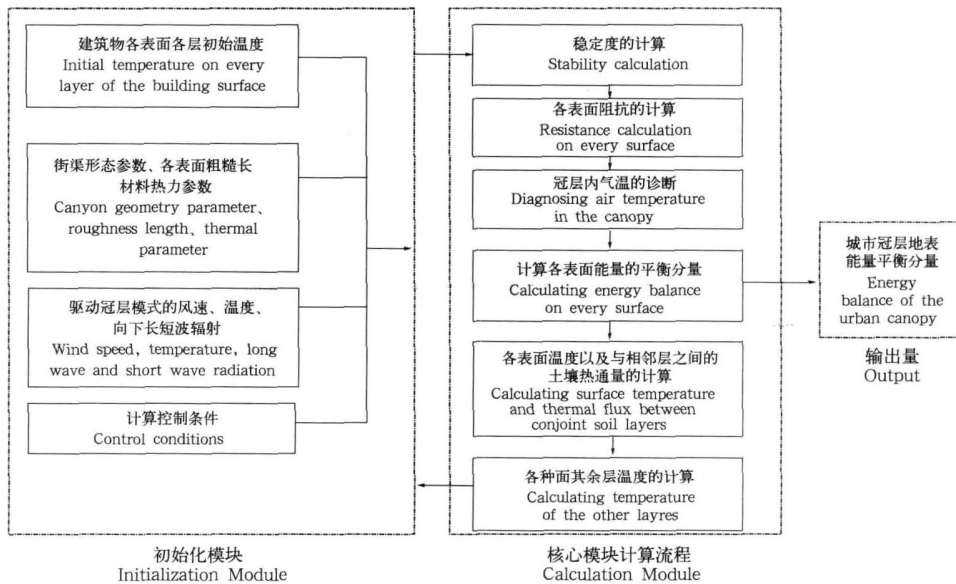


图 1 城市冠层模式计算流程(何晓凤, 2006)

Fig. 1 The simulation flow chart of urban canopy model

2.3 耦合模式结果检验

本文为了验证耦合了城市冠层模式的 NJU-RBLM 模式对城市地区气温模拟结果的改进,分别采用传统平板模式(old scheme)和耦合模式(new scheme)对南京地区 2002 年 7 月 12 日 08 时—13 日 08 时进行模拟。图 2 为两种不同方案模拟城市地区地面气温与实测资料的对比,如图所示,耦合模式的地面气温模拟结果与实测资料更为接近,日变化趋势也更为吻合,特别是模拟出了城市地区夜间地面气温的变化规律。耦合了城市冠层模式后能够更

好地模拟城市地区地表能量平衡关系,体现出白天城市冠层建筑物对太阳辐射的遮蔽以及强大的热存储能力,夜间热存储释放加热上部大气,这也是传统平板模式模拟城市地区夜间气温偏低的原因。传统平板模式和耦合模式模拟城市地区的气温分布与变化存在午后量值偏差较大的现象,这是因为平板模式中把城市地区的下垫面视为水泥平板结构,而水泥平板地面在午后降温较快,造成夜间气温偏低较多,致使对夜间城市地区热岛强度模拟结果偏小。在不考虑人为热源作用的情况下,城市地区气温模

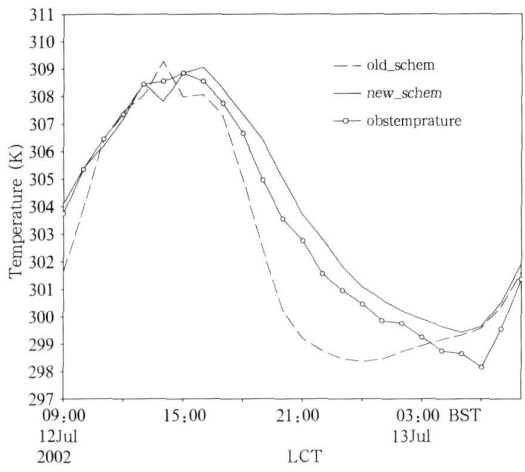


图2 地面气温模拟结果与观测资料对比(单位: K)
Fig. 2 Comparison of surface temperatures between simulated results and observations (Unit: K)

拟结果有可能偏低乡村地区。在建筑物密集地区, 平板模式模拟结果差异更大。

3 数值试验

3.1 数值试验设计

为了从多角度研究建筑物形态变化对城市边界层的影响, 本文设计了如表1所示的7个算例。首先本文试验均满足如下假定: 城市区域只有建筑物和道路, 所有建筑物都具有相同的高度和屋顶宽度, 街道宽度也完全相同。根据屋顶宽度和街道宽度就可确定单位网格上的建筑物面积密度; 表中每个试验的城市地区粗糙度 Z_0 和零平面位移高度 Z_d 均由建筑物高度和密度值根据 Grimmond 和 Oke 的办法给定 (Grimmond 等, 1999)。当建筑物密度在 30% 左右时, 粗糙度最大, 然后粗糙度随建筑物密度

表1 数值试验参数列表

Table 1 Parameters of numerical simulation experiments

算例名	街渠平均高度(m)	街渠宽度(m)	屋顶宽度(m)	建筑物密度 λ_p	城市面积(km ²)
Build01	20	20	20	0.500	10×10
Build02	20	20	20	0.500	20×20
Build03	20	20	20	0.500	40×40
Build04	10	20	20	0.500	20×20
Build05	30	20	20	0.500	20×20
Build06	20	12	20	0.625	20×20
Build07	20	40	20	0.330	20×20

增大而降低; 零平面位移随着建筑物密度的增大与建筑物高度越来越接近。

应用耦合了城市冠层模式的 NJU-RBLM 模式依次模拟表1中7个算例, 以南京2002年7月12日气象场为例, 模拟范围为100 km×100 km, 假定模拟范围内地形平坦, 中心区域按每个试验所假定的城市面积来给定城市下垫面的具体位置, 城市区域之外的下垫面类型为农作物, 如图3所示。水平网格距为2 km, 垂直方向采用拉伸网格, 模式第一层为50 m, 模拟时间为2002年7月12日08时—13日08时。为了只讨论建筑物形态对城市边界层的影响, 在所有试验中均未考虑人为热源的作用。

由表1中算例 Build01、Build02、Build03 来讨论城市面积变化对边界层结构和气象环境的影响, 这3个算例除了城市地区面积不同, 建筑物形态参数均一致, 10 km×10 km 代表小城镇尺度, 20 km×20 km 可以代表类似于南京这种规模的中等城市,

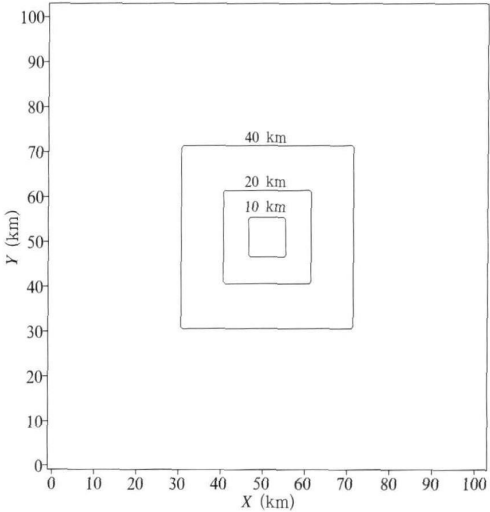


图3 敏感性试验模拟域示意图分别代表不同面积的城市范围

Fig. 3 Different urban areas of sensitivity experiments

而 $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ 的算例则可代表北京、上海等大规模城市; Build02、Build04、Build05 用来研究建筑物高度变化对边界层结构的影响,此时建筑物宽度、街渠宽度、建筑物密度等参数在这 3 个算例中均一致; Build02、Build06、Build07 来讨论建筑物高度和屋顶宽度保持不变时,街渠宽度发生变化对边界层的影响。这组试验本质上是讨论城市建筑物密度改变造成的影响。

3.2 城市范围变化对边界层的影响

通过算例 Build01、Build02、Build03 的模拟结果来分析城市面积扩张对城市气象环境和边界层结构的影响。图 4 为 3 个算例模拟的城市区域地面平均气温日变化的对比曲线,从图中看出,随着城市面积的扩张,城市区域平均气温全天都将增加,白天增量较大,最大约为 1.5°C ,夜间较小,增加 0.5°C 左右。

图 5 为 3 个算例模拟的城区平均热量通量和动量通量的日变化对比曲线,从图中发现,随着城市面积的增加,热量通量白天明显增大,夜间趋于负的热量通量。

通量,而小城市算例 Build01 的热量通量白天小,夜间为正,此时为大气向下输出热通量;城市面积增加后,城市区域的平均动量通量白天增加较大,夜间变

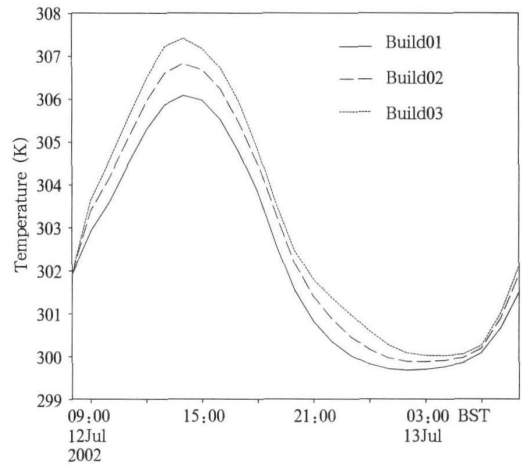


图 4 城市面积扩张对城市气温的影响(单位: K)

Fig. 4 Effect of urban area expansion on air temperature (Unit: K)

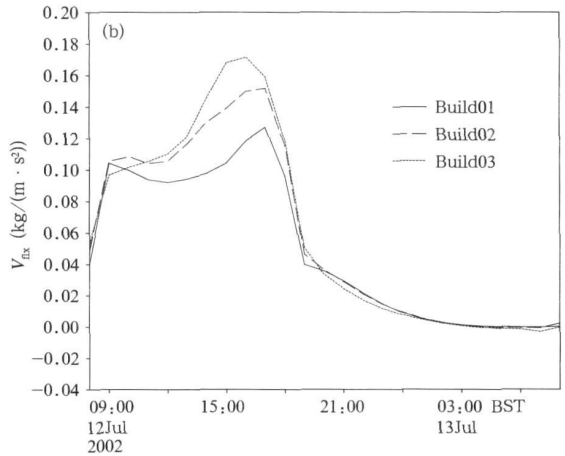
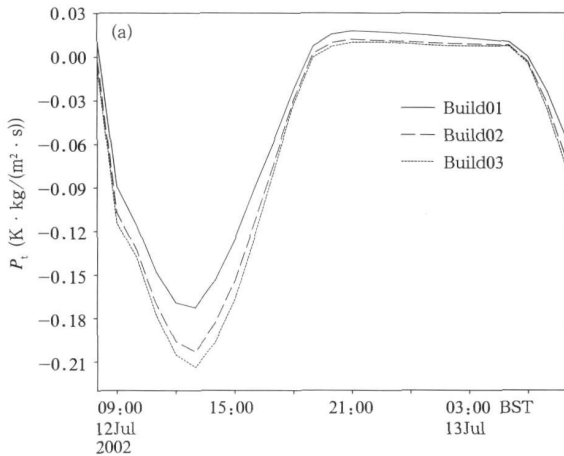


图 5 城市面积扩张对城市热量通量和动量通量的影响 (a. 热量通量, b. 动量通量)

Fig. 5 Effect of urban area expansion on (a) urban heat flux and (b) momentum flux

化不明显。

虽然在上述 3 个算例中所有与城市建筑物相关的参数都相同,但是城市区域面积的变化使得周边环境对城市区域的影响程度发生了变化:城市面积越大,模拟范围内农作物区面积就越小,农作物区域对城市区域所能影响的范围和程度都变小。当周边区域下垫面类型如算例中的农作物时,会降低城市区域中的气温,若城市周边为其他下垫面类型时,对

城市的影响可能不同。因此,城市面积扩张使得农作物区域对城市区域的降温作用减弱,城市区域地面气温增加,城市地区地表热通量相应增加,热通量的增大加强了城市区域的热力湍流活动,使得城市动量通量同样增加。夜间,由于边界层内风速较小,城市周边下垫面与城市区域间平流输送作用也会减弱,故城市区域面积扩张对城市气温的增温效应在夜间并不明显,加之夜间大气基本表现为稳定层结,

湍流活动较弱, 因此面积扩张对夜间城市区域的影响较弱。Atkinson(2003)也运用理想试验对类似的问题进行了研究, 研究中假定城市面积发生变化, 城市周边农作物下垫面对城市的影响保持不变, 农作物区域面积相应发生扩张, 数值试验结果表明: 当城市地表热通量保持不变时, 城市区域面积变化对城市热岛现象和气象环境几乎无任何影响。本文模拟结果与 Atkinson 的结论相比可知: 城市区域面积扩张, 而建筑物特征不变的情况下, 面积扩张对气象环境造成的影响, 主要源于扩张使得周围环境的气象状况发生改变, 从而对城市区域的气象环境影响发生变化。

图 6 为清晨、午间、傍晚及夜间 4 个不同时段城市区域平均位温廓线随城市面积扩张的变化, 从图中可以看出, 城市面积变化对 4 个时段城市区域平均位温廓线都有明显影响: 在夜间 02 时 3 种情况下城市地区大气均为稳定层结, 但是稳定度存在差异, Build03 和 Build01 的地面位温差约为 1.5 K, 影响一直持续到 300 m 高度处; 在清晨 07 时, 算例 Build01 在近地面为微弱的稳定或近中性层结, 而此时 Build03 近地面已变成不稳定层结状态; 在中午 14 时对流情况下, 3 个算例大气层结均为不稳定情况, 但是混合层高度不同, 城市面积越大混合层高度越高, 如图所示, Build03 比 Build01 的混合层高度大

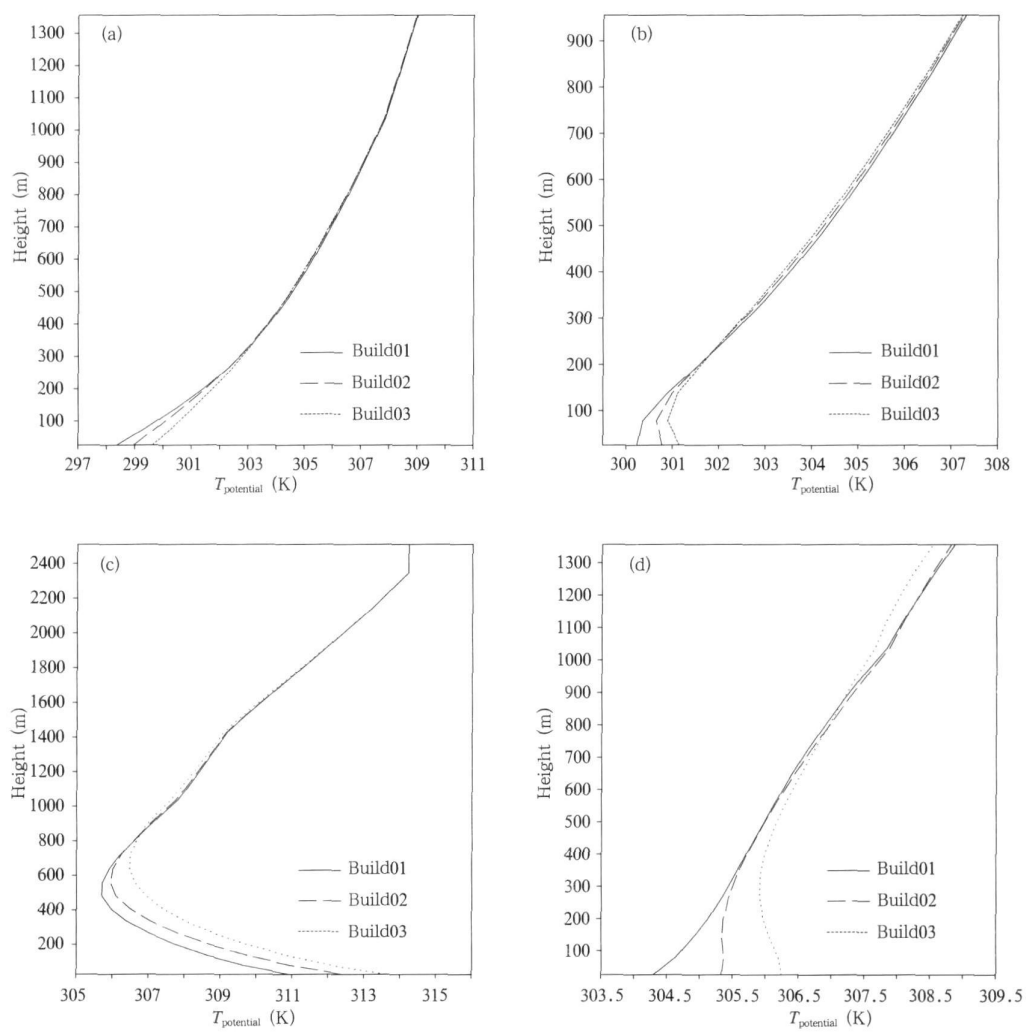


图 6 城市面积扩张对不同时刻位温廓线的影响(a. 02 时, b. 07 时, c. 14 时, d. 20 时)

Fig. 6 Effect of urban area expansion on profiles of urban potential temperature at (a) 02: 00 (b) 07: 00 (c) 14: 00, and (d) 20: 00 BST

约高 200 m;傍晚 20 时, Build01 已经显现出很清晰的稳定层结状态, Build02 为近中性层结, 而 Build03 则是弱不稳定层结状态, 此时 Build03 比 Build01 的近地面位温约高 2 K, Build03 和 Build01 的位温廓线差距可达 700 m 左右。由上述分析可知, 城市面积变化对城市平均气温的影响导致了不同时刻大气层结稳定度的变化。

图 7 为城市面积变化对 14 时城市区域平均湍能和湍流扩散系数垂直分布的影响, 从图中可以看

出: 城市面积扩张增大了城市上部大气的湍能, 城市面积越大, 湍能增加越多, 湍流活动影响高度越高。因为城市面积扩张使得城市区域热通量增加, 城市区域热力湍流活动旺盛增强了动量通量的输送, 因而增强机械湍流活动, 在二者的综合作用下, 城市区域湍能增加, 湍流影响高度增高。湍流扩散系数垂直分布随城市面积的变化趋势与湍能廓线随城市面积的变化类似。

通过对不同城市区域面积算例模拟得出的城市

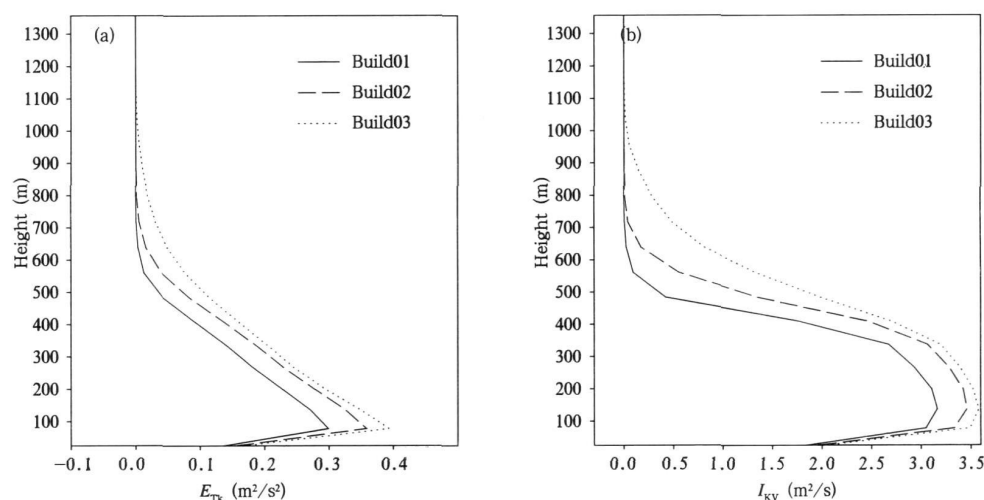


图 7 城市面积扩张对 14 时城市平均湍能廓线和湍流扩散系数的影响 (a. 湍能, b. 湍流扩散系数)

Fig. 7 Effect of urban area expansion on profiles of turbulent (a) kinetic energy and (b) diffusion coefficient at 14:00 BST

气象要素的对比分析可知, 城市区域面积扩张导致城市气温升高, 地表通量增大, 湍流活动旺盛, 湍流垂直输送增大, 对不同时刻大气层结稳定度带来一定影响。

3.3 城市建筑物高度变化对边界层的影响

随着城市规模发展, 城市中的高大建筑物也越来越多, Build02、Build04、Build05 依次代表建筑物高度为 20、10、30 m 的城市, 建筑物其余参数不变 (表 1)。

图 8 为城市地面气象要素日变化曲线, 其中气温和风速为大气模式第 1 层的模拟结果, 既在冠层高度之上的模拟结果, 如图可以看出: 建筑物越高, 白天城市气温越低而夜间城市气温越高, 对气温的影响在白天、夜间都不大, 远没有城市面积扩张带来的影响明显; 对平均风速而言, 建筑物越高, 城市风速全天都将变小, 建筑物高度对风速的影响白天比

夜间明显。陈燕等 (2006) 也通过研究发现城市地区建筑物削弱了城市地区的平均风速。

从城市地表通量的日变化曲线图 9 的差异来看, 建筑物越高城市区域全天热通量的绝对值都变小, 即日间地表热通量对大气的加热作用减弱, 夜间大气向下的热通量减少, 且有改变夜间热通量方向的趋向; 而动量通量随建筑物高度的变化不太明显, 但是建筑物越高日落后动量通量较大。

建筑物高度变化使城市地区地面气温变化的本质原因是改变了城市区域地表能量平衡关系, 建筑物高度增大, 白天建筑物对短波辐射的遮蔽效应增强, 辐射陷阱效应更为明显, 街渠内气温降低, 冠层与上部大气间的热通量减少, 白天更多的能量被储存在城市冠层的各表面中, 日落后高大建筑就会比低矮建筑释放更多的储热加热上部大气。这样就使得建筑物越高的城市区域白天感热通量变小, 导致

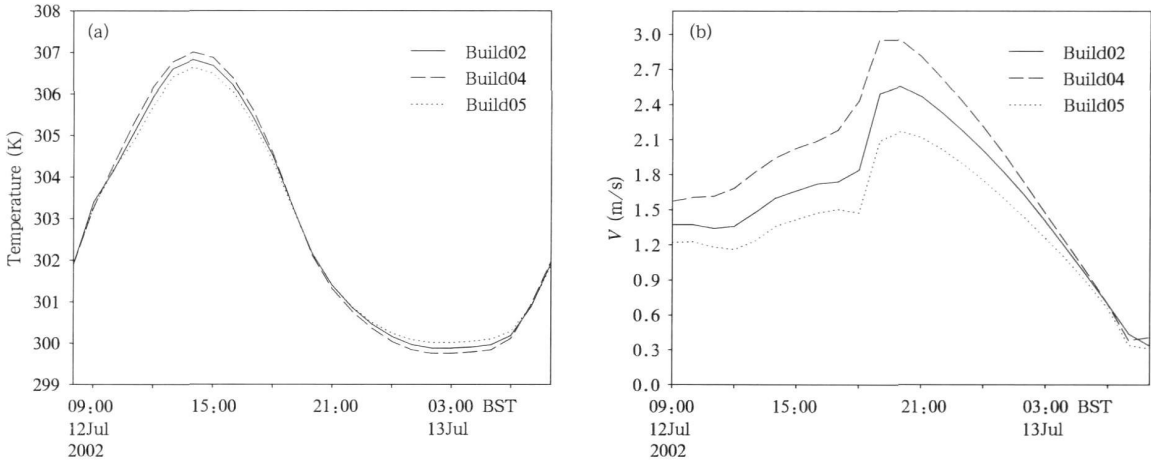


图 8 城市建筑物高度变化对城市地区地面气温和风速的影响 (a. 气温, b. 风速)
Fig. 8 Effect of building height variation on urban surface (a) temperature and (b) wind speed

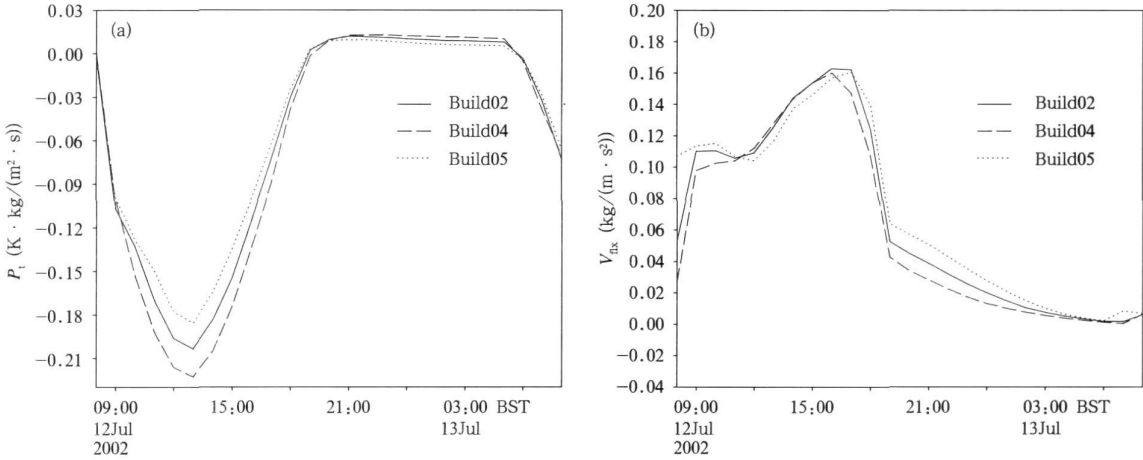


图 9 城市建筑物高度变化对城市平均热量通量、动量通量的影响 (a. 热量通量, b. 动量通量)
Fig. 9 Effect of building height variation on urban (a) heat flux and (b) momentum flux

气温降低;而日落后情况相反,建筑物越高城市地区地面气温就越高。此外,风速的变化主要受建筑物动力作用的影响,建筑物越高粗糙度和零平面位移越大,对气流的拖曳作用越明显,使得城市风速减小。由前面分析可知,动量通量的变化受建筑物对近地面大气的动力和热力作用的共同影响,建筑物增高会导致白天热量通量的减小,热力湍流活动减弱,进而使得湍流活动对动量的输送减少;而粗糙度增大会使动量通量增加,湍流活动加强,在这样两种反向作用下,动量通量在白天变化趋势不明显,但是由于建筑物增高会使日落后热通量增大,而粗糙度增大依然使得动量通量在日落后增加,因此日落后,建筑物越高大城市地区地表动量通量就越大。

3.4 城市建筑物分布密度对边界层的影响

城市化进程的加剧还表现为城市区域内建筑物越来越密集。从图 3 中可知:实际城市建筑物密度范围一般为 10%—63%,其中当密度为 33% 左右时,城市粗糙度最大,在此基础上设计了表 1 中的 Build02、Build06 和 Build07 算例: Build02 代表建筑物密度为 50% 的城市, Build06 代表建筑物密度为 62.5% 的城市, Build07 代表建筑物密度为 33% 的城市。在讨论城市地区建筑物密度变化对边界层的影响时,假定城市区域的面积、建筑物高度均保持不变,只改变街道宽度来实现密度的变化。

从图 10 中看出,城市建筑物密度越大,白天城市上空气温越低而夜间则反之,而风速全天都会变大一些。城市建筑物分布密度变化使得如下两个因

子发生变化,其一,即使建筑物高度不变,但只要街渠变窄就会使得街渠高宽比发生变化,从而造成建筑物对长、短波辐射的捕获作用发生变化;其二,建筑物密度加大,改变了城市下垫面的粗糙度和零平面位移高度。当建筑物密度超过 33 %时,城市粗糙度开始变小,零平面位移高度则增大。正是由于密度变化对街渠高宽比和粗糙度的上述影响导致了如图 10 所示的结果:建筑物密度越大下垫面粗糙度越小,风速则随之增大,同时建筑物密度增大会增加街渠高宽比,其作用类似于建筑物高度的抬升,这就使得城市储热增加而感热减小,故向上的地表热通量会减小。此外风速的增加会导致城市与周围农作物地区间的热量平流输送增加,这也使得城市气温有降低趋势。综上所述,建筑物分布密度增大使得城市街区白天的辐射遮蔽效应增强,同时白天冠层储

热较多,风速增大则热量平流增加,因而建筑物密度增加白天城市地区气温会降低。

由图 11 可知,随着建筑物密度的增大,白天城市热通量减小,夜间更多的储热释放使得情况相反,这导致了白天城市区域热力湍流活动减弱,进而使得对动量的湍流输送变弱;从动力作用来考虑,这种动量通量的变化与粗糙度关系密切:建筑物越密集、粗糙度越小,白天湍流机械运动越弱,动量通量越小。夜间由于建筑物密集的城市向上输送的热通量较大,其热力湍流活动比建筑物稀疏的城市强,使得动量交换有所增强,热力和动力的综合作用,使建筑物密集程度变化产生的夜间动量通量差异减小。建筑物分布密度变化对地表热量通量和动量通量造成的影响比城市面积扩张和建筑物高度变化对地表通量的影响都要明显。

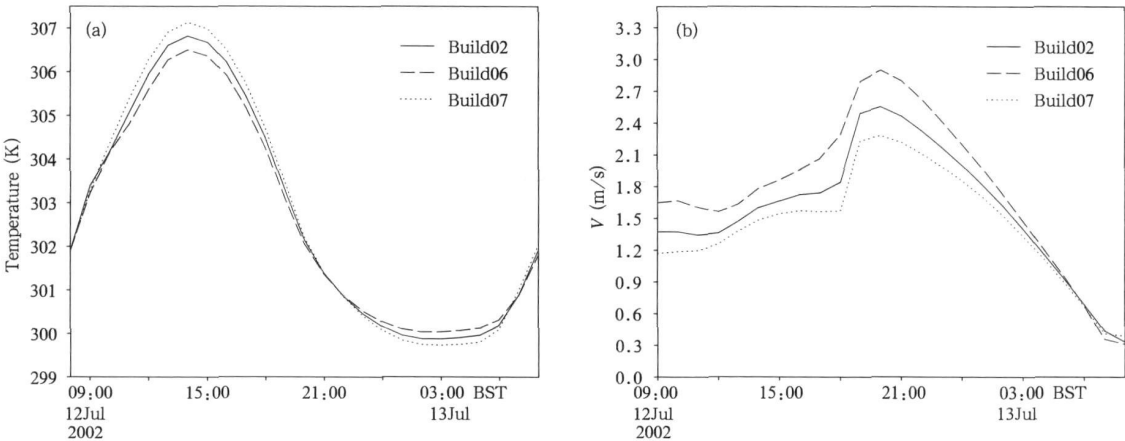


图 10 建筑物分布密度变化对城市地面气温和风速的影响 (a. 气温, b. 风速)

Fig. 10 Effect of building height variation on urban surface (a) temperature and (b) wind speed

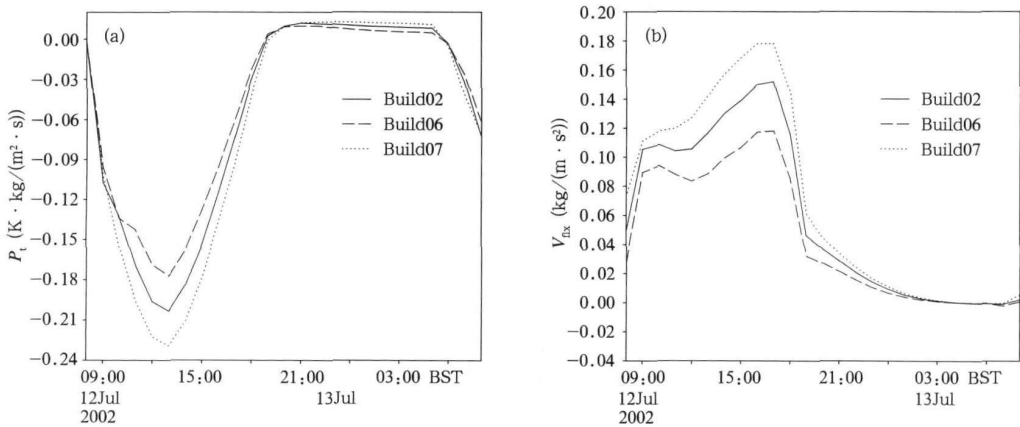


图 11 建筑物分布密度变化对城市平均热量通量、动量通量的影响 (a. 热量通量, b. 动量通量)

Fig. 11 Effect of building density variation on urban mean (a) heat flux and (b) momentum flux

城市建筑物分布密度变化造成的近地层风速、气温以及通量的上述变化会对不同时刻的大气层结带来一定影响(图 12)。从图中看出, 对流和稳定情况下, 城市平均位温廓线随密度的变化不明显, 而日出、日落时分密度变化对位温廓线的影响相对较为

明显, 日出 07 时, 对位温廓线的影响高度可达 150 m 左右, 日落后 20 时, 影响高度达到 250 m。与城市面积扩张对位温廓线的影响对比发现, 城市面积变化对边界层位温结构的影响高度大于城市密度变化对位温廓线的影响高度。这是由于, 面积扩张

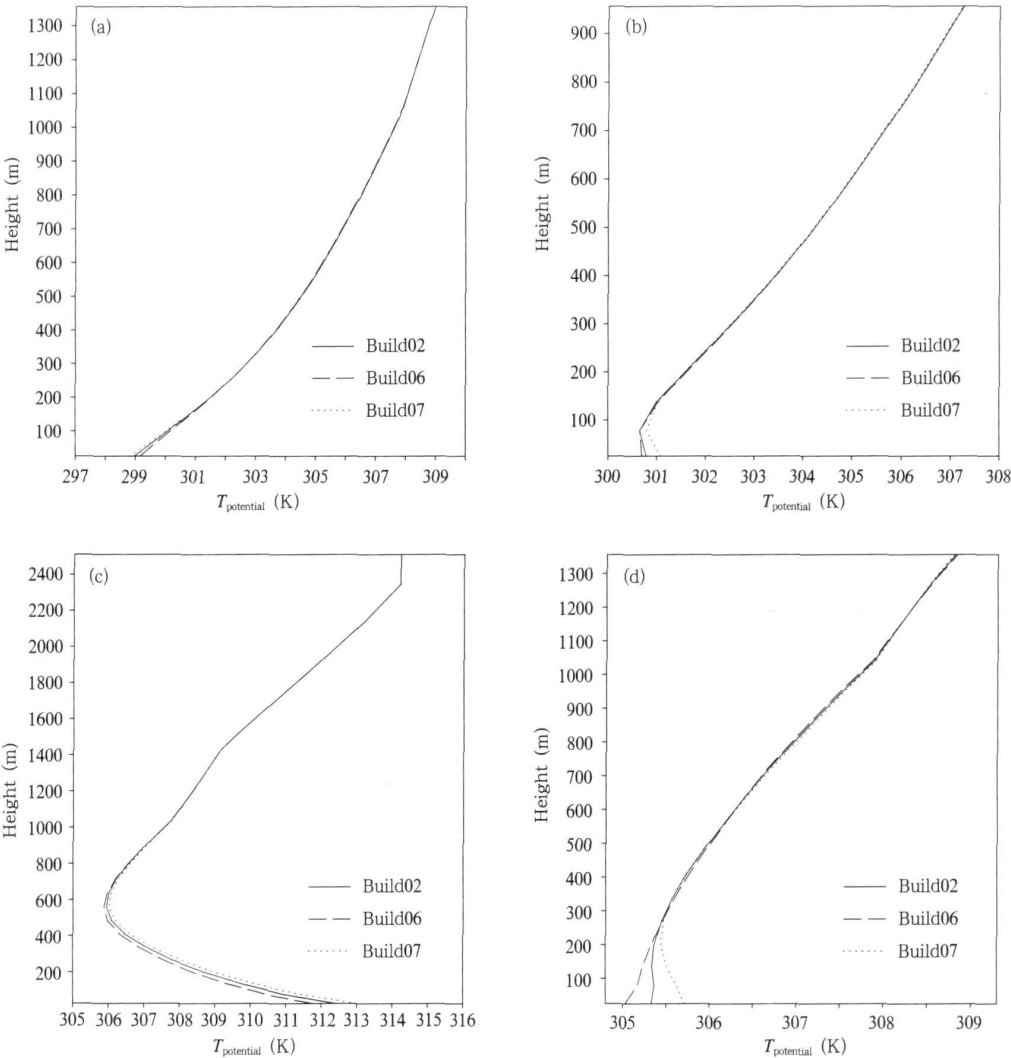


图 12 建筑物分布密度变化对不同时刻城市位温廓线的影响 (a. 02 时, b. 07 时, c. 14 时, d. 20 时)

Fig. 12 Effect of building density variation on profiles of urban potential temperature
at (a) 02: 00 (b) 07: 00 (c) 14: 00, and (d) 20: 00 BST

带来的影响实际上是周边区域空气对城市的影响占主要作用, 而城市下垫面动力和热力性质对其局地热力结构的影响所占的比重小一些, 所以周边气流带来的城市边界层结构变化达到的高度较高。而城市建筑物分布密度变化带来的影响局地性较强, 受湍流活动强度的影响较大, 且密度增大使得白天城

市湍流活动略受抑止, 所以密度变化带来的边界层热力层结变化较小。

4 结 论

本文采用耦合了城市冠层模式的 NJU-RBLM 模式, 从城市面积扩张、建筑物高度变化、建筑物分

布密度变化3个角度探讨了城市冠层形态变化对边界层结构的影响及其影响机制。分析表明:

(1) 城市面积的扩张降低了周边下垫面对城市的影响程度,从而使得周边较冷空气对城市区域的混合输送作用减弱,表现为城市热通量随面积增大而增大,热力湍流活动增强,进而增大了动量通量的输送,城市湍能增强、湍流扩散系数变大、气温升高,对不同时刻的大气层结稳定度均有影响。

(2) 城市建筑物高度增加从两个方面改变了下垫面对边界层的作用,一方面增大了城市下垫面的粗糙度和零平面位移,另一方面增大了城市街渠高宽比。白天,街渠高宽比的增加使得城市辐射陷阱效应更明显,截留更多的热量在冠层内,从而减小了冠层与上部大气之间的感热输送,地表热通量减小,热力湍流活动削弱,从而有减弱动量输送的趋势,减弱了机械湍流,而粗糙度的增加使得机械湍流增强,平均风速减小,在上述热力和动力效应的共同作用下,动量通量随建筑物高度增加的变化趋势没有热量通量明显。所以,城市建筑物越高,白天地表热量通量越小、城市上空大气温度越低,平均风速减小,湍能、垂直风速都减小;夜间由于高大建筑物释放的储热比低矮建筑物多,热力湍流相对活跃,地表热通量增大,城市地区气温升高。

(3) 建筑物分布密度变化对边界层结构的影响也是通过两方面的作用来实现的:建筑物密度增大,会减小城市下垫面的粗糙度同时加强街渠对辐射的影响。在这二者的共同作用下:建筑物密度增大在白天会减小地表热通量和动量通量,使城市气温降低,平均风速增大,城市湍流活动能力减弱;建筑物密度的增大会使得夜间城市气温升高。建筑物密度变化对边界层热力结构的影响强于建筑物高度变化带来的影响,但是弱于城市面积扩张造成的影响,这是由它们各自影响的机制不同而造成的。

References

- Atkinson B W. 2003. Numerical modeling urban heat-island intensity. *Bound Layer Meteor*, 109: 285-310
- Bonacquisti V, Casale G P R, Palmieri S, et al. 2006. A canopy layer model and its application to Rome. *Sci Total Environ*, 364(1-3): 1-13
- Chen Yan, Jiang Weimei, Xu Min, et al. 2005. Simulation of greenbelts effect on meteorological environment in urban planning, *Chinese J Geophy*(in Chinese), 48(2): 265-274
- Chen Yan, Jiang Weimei. 2006. The numerical experiments of the effect of urban buildings on boundary layer structure. *Plateau Meteor* (in Chinese), 25(5): 824-833
- Grimmond C S B, Oke T R. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J Appl Meteor*, 38: 1262-1292
- He Xiaofeng. 2006. Study on establishment and application of a land surface process parameterization scheme in urban area[D] (in Chinese). Nanjing: Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 137pp
- Jiang Weimei, Wang Yongwei, Liu Gang, et al. 2007. Multi-scale urban boundary layer modeling system. *J Nanjing University (Natural Sciences)*(in Chinese), 43(3): 221-237
- Jiang Xiaoyan, Zhang Chaolin, Gao Hua, et al. 2007. Impacts of urban albedo change on urban heat island in Beijing: A case study. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 65(2): 301-307
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Bound Layer Meteor*, 101: 329-358
- Li Xiaoli, Bi Baogui, Li Zechun. 2005. Simulation study of formation mechanism of winter urban boundary layer structure over Beijing area. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 63(6): 889-902
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound Layer Meteor*, 94: 357-397
- Uno I, Ueda H, Wakamatsu S. 1989. Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 49: 77-98
- Xu Min, Jiang Weimei, Ji Chongping, et al. 2002. Numerical modeling and verification of structures of the boundary layer over Beijing area. *Quart J Appl Meteor*(in Chinese), 13(Supl): 61-68
- Xu Min. 2002. Numerical simulation on the turbulence structures and meteorological environment in atmospheric boundary layer: from regional scale to micro-scale[D] (in Chinese). Nanjing: Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 108pp
- 陈燕, 蒋维楹, 徐敏等. 2005. 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*, 48(2): 265-274
- 陈燕, 蒋维楹. 2006. 城市建筑物对边界层结构影响的数值试验研究. *高原气象*, 25(5): 824-833
- 何晓凤. 2006. 一种城市陆面过程参数化方案的建立与应用研究[D]. 南京: 南京大学大气科学系, 137pp
- 江晓燕, 张朝林, 高华等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个例分析. *气象学报*, 65(2): 301-307
- 蒋维楹, 王咏薇, 刘罡等. 2007. 多尺度城市边界层数值模拟系统. *南京大学学报(自然科学版)*, 43(3): 221-237
- 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿. 2005. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究. *气象学报*, 63(6): 889-902
- 徐敏, 蒋维楹, 季崇萍等. 2002. 北京地区气象环境数值模拟试验. *应用气象学报*, 13(特刊): 61-68
- 徐敏. 2002. 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟: 从区域尺度到微尺度[D]. 南京: 南京大学大气科学系, 108pp

附中文参考文献

- 陈燕, 蒋维楹, 徐敏等. 2005. 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*, 48(2): 265-274
- 陈燕, 蒋维楹. 2006. 城市建筑物对边界层结构影响的数值试验研究. *高原气象*, 25(5): 824-833
- 何晓凤. 2006. 一种城市陆面过程参数化方案的建立与应用研究[D]. 南京: 南京大学大气科学系, 137pp
- 江晓燕, 张朝林, 高华等. 2007. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个例分析. *气象学报*, 65(2): 301-307
- 蒋维楹, 王咏薇, 刘罡等. 2007. 多尺度城市边界层数值模拟系统. *南京大学学报(自然科学版)*, 43(3): 221-237
- 李晓莉, 毕宝贵, 李泽椿. 2005. 北京冬季城市边界层结构形成机制的初步数值研究. *气象学报*, 63(6): 889-902
- 徐敏, 蒋维楹, 季崇萍等. 2002. 北京地区气象环境数值模拟试验. *应用气象学报*, 13(特刊): 61-68
- 徐敏. 2002. 大气边界层湍流结构和气象环境的数值模拟: 从区域尺度到微尺度[D]. 南京: 南京大学大气科学系, 108pp