

人为热对城市边界层结构影响研究

蒋维楣 陈 燕

南京大学大气科学系, 南京 210093

摘 要 为研究不同人为热源引入方案对城市边界层结构模拟性能的影响, 以杭州地区为例, 在区域边界层模式 (RBLM) 中引入一种新人为热源处理方案, 即对城市中的人为热排放分层考虑, 将低层的人为热源加入地表能量平衡方程, 将高层人为热源分布与建筑物高度和密度联系起来, 加入热量方程中, 同时考虑了人为热源强度的日变化。数值试验结果表明, 这是一种比较合理的处理方案。人为热源引入方案对城市边界层结构的影响表现在: 气温、湍流动能增加, 并通过湍流交换输送到较高层大气; 大气不稳定度增加, 混合层高度最高抬升了 400 m; 城市地区上升速度增加, 热岛环流加强; 白天人为热源一般为太阳辐射的 10%~20%, 对地气交换的影响较小。夜间没有了太阳辐射能量, 对地气交换的影响比日间更明显; 冬季低层湍流活动加强, 湍能约增加 40%, 大气层结稳定度降低。

关键词 人为热 地气交换 城市边界层结构 数值模拟 城市化

文章编号 1006-9895 (2007) 01-0037-11

中图分类号 P404

文献标识码 A

The Impact of Anthropogenic Heat on Urban Boundary Layer Structure

JIANG Wei-Mei and CHEN Yan

Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The urbanization is a process that the human being changes the local natural surface characteristics widely and dramatically. This process will impact local atmospheric environment greatly. To understand the urbanization's effect on local urban boundary layer will show its great value in urban weather/climate study, urban environmental protection, urban design and construction, urban disaster-prevention, and will help us improve the residential environment and residential quality in urban area.

A numerical simulation model is used in this paper to investigate the effect of the inhomogeneity of urban anthropogenic heat source on the exchanges of energy and material between surface and atmospheric system, and its impacts on urban boundary layer structures. To study the anthropogenic heat affecting the urban boundary layer structures, Hangzhou is taken as an example. A new anthropogenic heat source scheme is developed in the regional boundary layer numerical model (RBLM). In this new scheme, the urban anthropogenic heat source is distributed into different model layers. The lower layer heat release is added into the surface energy budget and the upper layer anthropogenic heat release is coupled into the atmosphere energy equations and its vertical distribution is related with the urban building distribution feature, including building height and density and the diurnal change of anthropogenic heat release is included in this scheme. The numerical simulation results show that this scheme can describe the anthropogenic heat release process better than former schemes and the simulated temperatures, wind directions, wind speeds are closer to the observation data.

In the former anthropogenic heat release scheme all of the heat is added into the surface, this leads to the in-

creasing of temperature and turbulence energy, and in the daytime this impact will be transported to upper atmosphere due to the strong turbulence and the increase of atmospheric temperature and turbulence is not obvious in lower air layer. The atmospheric instability increases and the boundary layer height increases by 400 m, the vertical speed over urban area is increased and urban heat island density is strengthened. In the nighttime the impact of anthropogenic heat is more obvious than in the daytime without the solar radiation heating. In the cases of the new scheme turbulence energy in lower layers increases by 40% and the atmospheric stability decreases.

In general, the simulation results with the new anthropogenic heat release scheme show that the anthropogenic heat affects the urban boundary layer structure more greatly in the nighttime than in the daytime. And this impact is largest in winter, less in spring and autumn and weakest in summer. The reason may depend on that, in the surface energy budget the solar radiation is the main energy source, while anthropogenic heat is an important but not primary source. Compared with the diurnal and seasonal change of solar radiation, the anthropogenic heat release is assumed stable, so the fraction of urban anthropogenic heat in total energy that heats the surface skin and surface atmosphere is also diurnally and seasonally changeable, this causes the impact of the anthropogenic heat diurnally and seasonally.

Key words anthropogenic heat, exchange between surface and atmosphere, urban boundary layer structure, numerical simulation, urbanization

1 引言

随着经济的发展和城市化进程的加速,城市人口迅速增加,大量的人类活动不断向大气释放热量,改变了城市大气的热量平衡,对城市边界层结构产生重要影响。许多研究结果^[1~4]表明,人为热量的释放是强化城市热岛现象的一个重要诱因,已有研究和分析主要集中在有无人为热源对城市温度场分布的影响,而人为热源对地表能量收支平衡、地气交换过程、湍流生成与发展等方面的作用和影响的研究比较少。

本文的研究目的是了解不同人为热源引入方案对城市边界层结构的影响,以杭州地区为例,应用改进的三维非静力区域边界层模式(RBLM)^[5, 6],细致考虑了各种人为热的排放,及其时间、空间变化,设计不同的引入方案,通过数值计算,模拟人为热排放对城市边界层结构的影响,分析其对地表能量平衡、地气间物质和能量的交换,湍流发展、混合层高度演变,以及对气象要素场的影响,讨论这些影响之间的联系,并分析了不同的季节差异。

2 数值模式简介

原区域边界层模式(RBLM)^[5, 6]参考 Kimura 等的做法^[7],将人为热源引入到地表能量平衡方程中,不考虑其日变化,这种处理方法比较简单粗略。实际上,人为热源受人类活动的支配,随时

间、水平空间和垂直高度都有十分明显的变化,因此,对原有模式进行改进,考虑人为热源的高度分布,在大气热流量方程和地表能量平衡方程中均加入其影响,同时引入日变化函数。进入大气的地表动量通量、热量通量和水汽通量根据 Businger 等^[8]和 Byun^[9]的方案计算,地表通量作为湍流动量扩散项、热量扩散项和水汽扩散项的下边界条件进入大气模式。采用两层土壤-植被模式计算地表温度、土壤深层温度等地表特征量。

本文的研究以杭州为例,模拟范围为 $100\text{ km} \times 100\text{ km}$,包括杭州、萧山、临安、富阳、绍兴、安吉、德清、桐乡等地。地表利用类型主要包括城市、庄稼、草地、水面等类型(图 1)。杭州市区建筑物的平均高度为 30 m,建筑物在模拟水平网格中的覆盖比例为 20%~40%(图 2)。水平方向采用均匀网格,网格距为 1 km。为了详细考虑低层人为活动的影响,垂直方向采用拉伸网格,最低层为 10 m,1000 m 以下共有 14 层。

根据浙江省气候中心提供的气象资料,选取不同季节出现频率最高的典型天气状况为代表,即 2001 年 6 月 16 日和 1998 年 12 月 17 日。2001 年 6 月中旬,副热带高压稳定强大,杭州地区受其控制,是非常典型的夏季高压天气形势。1998 年 12 月上旬为一次冬季冷空气过程,降温、大风,到 20 日左右该过程已完全结束,气温略有回升,天气晴好。

3 人为热源引入方案及试验设计

人为热量受人类生产和生活活动的支配,有明显的时间变化和空间差异,不同城市的总量以及时空变化也有所不同。要得到详细的人为热源的空间分布和时间变化,需要对城市各区域的能量消耗进行大量的调查分析。由于这样人力物力的花费较

大,一般难以进行如此大规模的调查,而大部分的研究是将人为热源看作城市地表利用状况(如工业区、商业区、居民区、交通用地、绿化用地、水体等)的函数,根据城市下垫面情况的不同来确定,以体现城市中人为热量释放的非均匀性。

Taha^[10]定义了城市冠层的热储存量,并作为净辐射的一部分,热储存量与土地利用类型以及每个网格内某种土地类型的面积百分比有关,将人为热通量加在最低一层的热量方程上,并在地表热量平衡中增加了土壤热通量项。人为热通量为傅氏函数形式:

$$P(t) = r + \sum_{n=1}^3 \lambda_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{24}\right) + \phi_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{24}\right), \quad (1)$$

其中, $r = 0.557$, $\lambda_1 = -0.227$, $\lambda_2 = -0.006$, $\lambda_3 = -0.084$, $\phi_1 = -0.384$, $\phi_2 = -0.016$, $\phi_3 = -0.012$ 。

Haan 等^[11]给出人为热源的时间函数为

$$Q_f(h) = Q_f \{1 - 0.6 \cos[\pi(h-3)/12]\}, \quad (2)$$

其中, Q_f 在 1 月为 62.5 W/m^2 , 在 6 月为 37.5 W/m^2 ; h 为小时数。

杨玉华等^[12]和佟华等^[13]认为,在北京,人为热主要来源于汽车尾气排放的废热、工业生产的能源消耗以及城市建筑物的各种能量的消耗(包括城市居民冬季采暖和夏季空调制冷)。综合考虑这些因素,认为人为热源在白天一直保持很高的水平,且存在早晨和傍晚两个峰值,夜晚则一直较低。

Fan 等^[14]在 MM5 模式中的两种边界层方案中

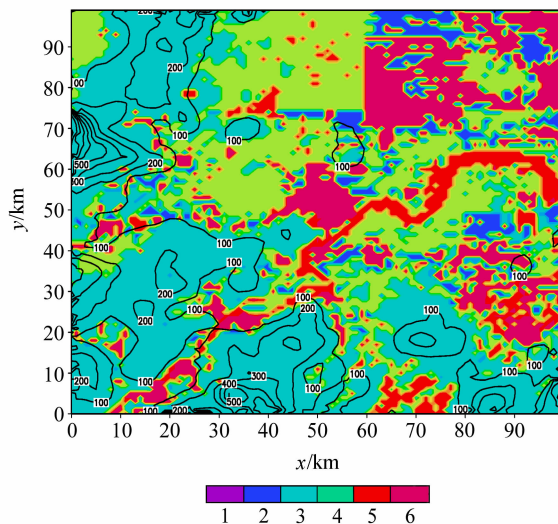


图1 模拟区域地形高度(等值线,单位:m)及地表利用类型(1:草地;2:树木覆盖草地;3:常绿林;4:庄稼;5:水;6:城市)

Fig.1 The terrain height field (contour, units: m) and land-use types in the simulated area (1: grassland; 2: grassland with tree cover; 3: evergreen forest; 4: cultivation; 5: water; 6: urban)

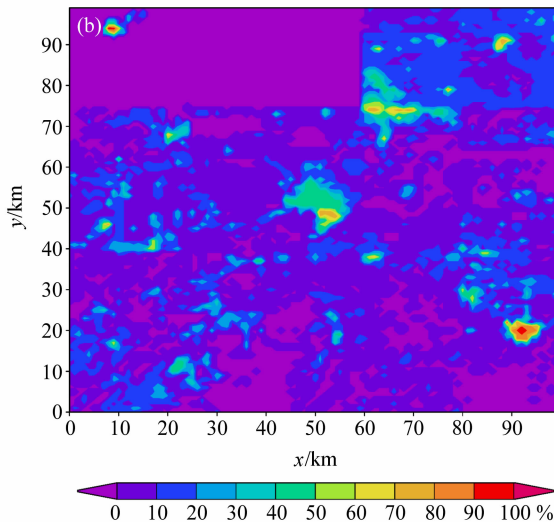
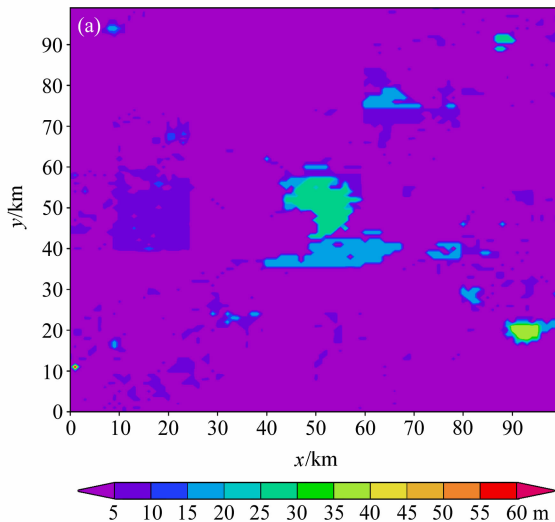


图2 模拟区域建筑物平均高度(a)和密度(b)

Fig.2 The mean building height (a) and building density (b) in the simulated area

加入人为热源的影响,对费城的城市热岛现象进行模拟,研究表明,在冬天人为热源可以造成夜间 2~3℃ 的热岛强度。

在本文研究中,对于人为热源的水平空间分布,主要考虑各种工业能源消耗量、居民生活能耗以及交通能耗的分布情况。根据浙江省统计年鉴^[15]所载有关资料,利用土地面积、人口密度、人均国民生产总值、大型企业的主要能源消费量和社会机动车辆拥有量等资料进行分析和估算,得到人为热源的水平空间分布情况。对于人为热源的垂直空间分布,主要是根据不同区域的建筑物高度和密度进行分层考虑。在地面,建筑物密集,人为热源释放最多;越往高层,建筑物密度越小,人为热源释放量也相应减少。对于人为热源的时间变化,参考杨玉华等^[12]的研究,认为杭州市的人为热源日变化情况基本与北京相当,即在上午 08:00 (北京时,下同) 到一个高峰,傍晚 18:00 左右为另一个高峰,夜间 04:00 为人为热源排放的最低时刻。图 3 为杭州市人为热源的日变化周期,最大值为 60 W/m²,最小值为 30 W/m²,日平均值为 50 W/m² 左右。萧山市的日平均值为 40 W/m²,临安、富阳、绍兴、安吉、德清等城市则更低。

本文工作考虑了四种人为热源的引入方案:

- (1) 将人为热源加于地表能量平衡方程中,不考虑日变化;
- (2) 将人为热源加于地表能量平衡方程中,考虑日变化;
- (3) 将人为热源同时加于地表能量平衡方程和大气热流量方程中,不考虑日变化;
- (4) 将人为热源同时加于地表能量平衡方程和大气热流量方程中,考虑日变化。

利用夏季的天气条件,分别用这四种方案进行

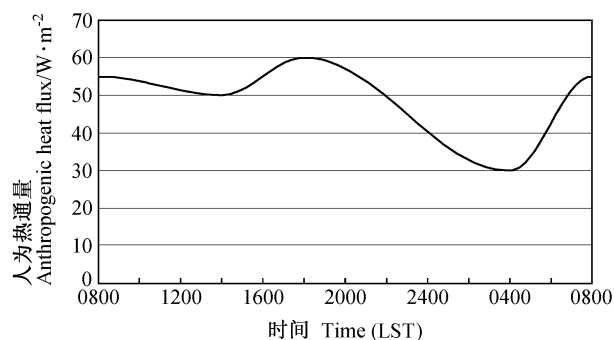


图 3 杭州人为热源日变化

Fig. 3 The diurnal change of anthropic heat in Hangzhou

模拟,算例编号依次为 JUN01、JUN02、JUN03 和 JUN04。同样,对冬季进行模拟,算例编号为 DEC01、DEC02、DEC03、DEC04。上述考虑人为热源日变化的第 2 和第 4 种方案采用相同的日变化形式,只是计算时的分配不同。

4 人为热源对城市边界层结构影响的试验与分析

4.1 对平均气象场的影响

将夏季算例 (JUN01~JUN04) 地面气温、风向和风速的模拟结果与气象观测站点的实际观测进行对比 (如图 4 所示),模式对气温的模拟效果较好,模拟得到的温度最高值和最低值与实际观测值较一致,同时日变化趋势与观测场均吻合较好。JUN01~JUN04 的人为热源处理方案不一样,从总体效果来看,算例 JUN04 的模拟结果与实际情况最接近,比观测结果低 1℃ 左右;JUN03 次之,比观测结果低 1~2℃ 左右;JUN02 和 JUN01 略差,这表明算例 JUN04 的人为热源处理方案与实际情况最接近。具体而言,JUN01 和 JUN02 仅考虑将人为热源加于地表能量平衡方程中,模拟结果比观测结果低 3~4℃;JUN02 考虑了日变化,白天人为热源排放量大于 JUN01,上午模拟温度略高 0.5℃,下午相差 1℃,夜间人为热源排放量小于 JUN01,两者的模拟结果在凌晨 03:00~07:00 几乎一致;JUN03 和 JUN04 将人为热源同时加于地表能量平衡方程和大气热流量方程中,这两个算例的模拟结果之差的变化趋势与 JUN02、JUN01 之间相似。风速和风向的模拟结果复杂多变,变化规律不如气温明显,大部分时刻的风速模拟值和观测值之差小于 2 m/s 左右,风向模拟结果和观测值之差小于 60°。从总体情况分析,算例 JUN04 的模拟效果要好于其他三个方案,这表明 JUN04 采用较复杂的人为热源设计方案不仅能直接提高模式对温度场的模拟效果,而且通过对温度场模拟的改进也提高了对风场的模拟效能。

沿模拟区域中心做南北方向剖面 (杭州市中心为 Y=53),图 5a 为 JUN04 模拟的垂直速度分布。14:00,城市地区为明显的上升气流,在 200~600 m 间出现最大值 0.15 m/s,周围则出现了下沉气流,尤其是在钱塘江面 (Y=45 处) 上空,下沉气流范围较大,形成了较明显的城市热岛环流。冬

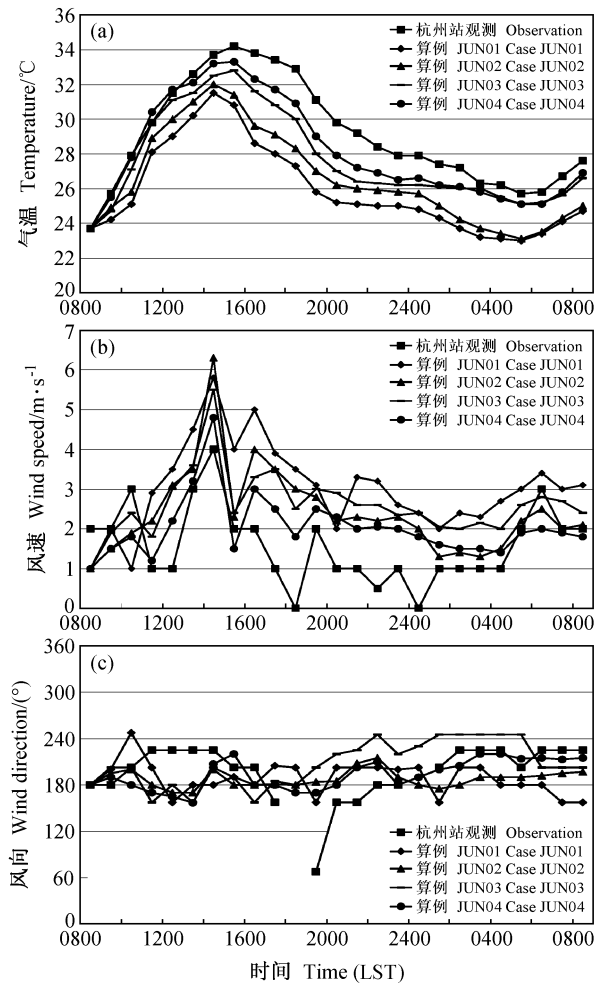


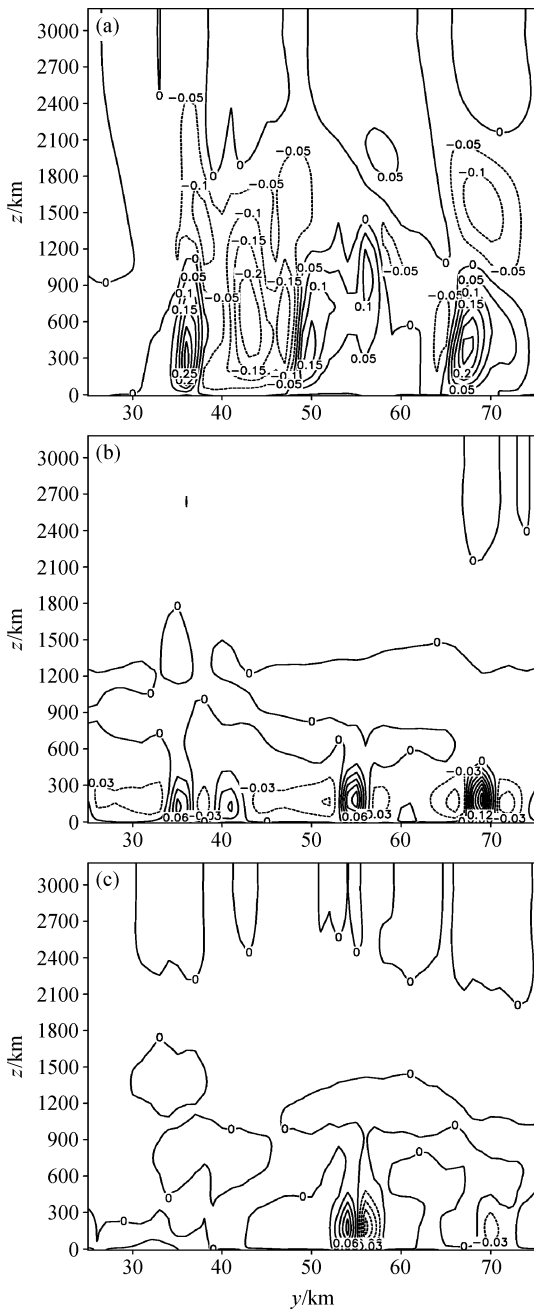
图 4 杭州站模拟结果与地面观测结果比较：(a)气温；(b)风速；(c)风向
Fig. 4 Comparison between the simulation and observation at Hangzhou station: (a) Temperature; (b) wind speed; (c) wind direction

季 DEC04 上升及下沉垂直速度小，影响的范围小，高度低，热岛环流明显弱于夏季。比较中午 DEC04 和 DEC01 的垂直速度差值（图 5c）可以发现，DEC04 的人为热源方案使低层的大气增温，城市地区的上升气流更明显，增加 0.08 m/s；同时城市下风向的下沉气流加强，增加 -0.04 m/s，这样加强了城市热岛环流，也使低层气流辐合加强，高空气流辐散加强。

4.2 对地表能量平衡的影响

当仅考虑将人为热源加于地表能量平衡方程中，或者同时加于地表能量平衡方程及大气热流量方程中时，将直接对地表能量平衡产生影响。

由前文的分析可知第 4 种方案的模拟结果和实



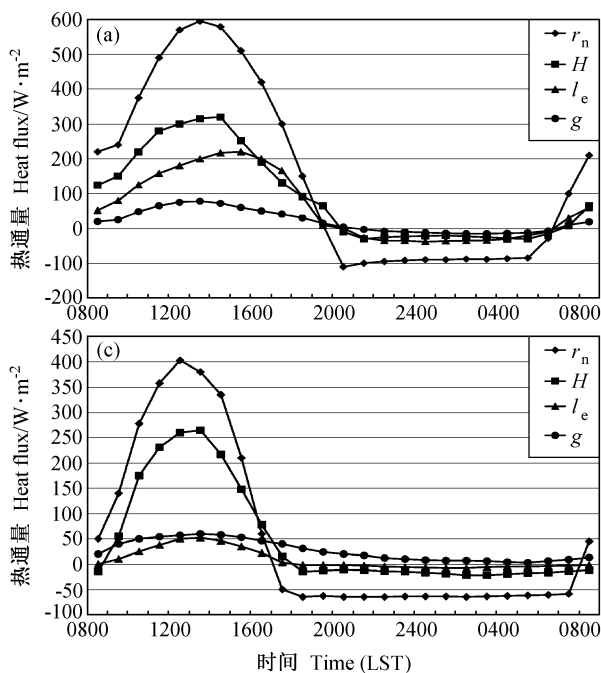
大, 13:00 左右达到最大; 而后缓慢下降; 夜间地表向大气释放白天储存的热量, 地表长波辐射占主导地位, 净辐射通量小于零, 随时间变化幅度较小。比较城市和郊区的净辐射日变化可以发现, 城市获得的太阳能量多, 净辐射值大于郊区。

感热通量在 13:00 到 14:00 之间达到最大, 比净辐射通量滞后一段时间, 夜间为负。白天郊区的大气-地表温差远小于城市, 感热通量比城市小 $100 \sim 120 \text{ W/m}^2$ 左右, 大部分时候为城市的 $2/3$ 。比较城郊的不同还可以发现, 日落前后一段时间内, 城市由于有人为热源的额外能量补充, 推迟了感热通量由正转为负的出现时间。如在 19:00~20:00 间, 城市感热通量变为零, 而郊区则要早一个小时左右。

潜热通量主要受地表水汽蒸发和植被蒸腾的共同影响。由于植被的蒸发蒸腾过程所需响应时间较长, 其最大值出现时间略滞后于净辐射通量和感热通量。郊区的植被覆盖率较高, 地表更湿润, 潜热通量最大时是城市的两倍。

土壤热通量的日变化趋势和净辐射通量类似, 但前几个通量相比, 土壤热通量较小, 城市和郊区的差别也较小。

冬季地表能量平衡中的各量的日变化趋势和夏



季一样, 但日变化幅度减小。城市、郊区之间差距减小, 如城郊的感热通量最大相差 60 W/m^2 , 为夏季的一半 (如图 6c、d)。

不同的人为热源引入方案对地表能量平衡包括地面净辐射通量、感热通量、潜热通量、土壤热通量等产生直接的影响。计算结果表明, 不同算例具有不同的情况。14:00 时, JUN04 的一部分人为热源直接加热于大气, 气温高于 JUN01, 地温略低于 JUN01, 使得地面净辐射通量大于 JUN01, 感热通量小于 JUN01。白天, 太阳短波辐射是地表能量的最主要部分, 也是决定地表能量平衡的主要因素, 人为热源一般为太阳辐射能量的 $10\% \sim 20\%$, 仅是地表获得能量的一小部分, 作用比较小。由不同人为热源方案引起的地面净辐射通量差异几乎可以忽略不计, 城市地区的相对变化幅度仅为 0.1% ; 感热通量的相对变化幅度稍大, 为 4% 左右。由于此时水汽变化已经很平缓, 对气温、地温的敏感度不高, 所以潜热通量几乎没有变化。土壤热通量的变化也十分有限。02:00 时没有太阳辐射, 由不同人为热源方案引起的差异则比较明显。此时 JUN01 将全部人为热源用于加热地表, 地温高于 JUN04, 由于地表发射率大于空气的发射率, 这样 JUN01 的地面净辐射通量绝对值大于 JUN04, 差值为正,

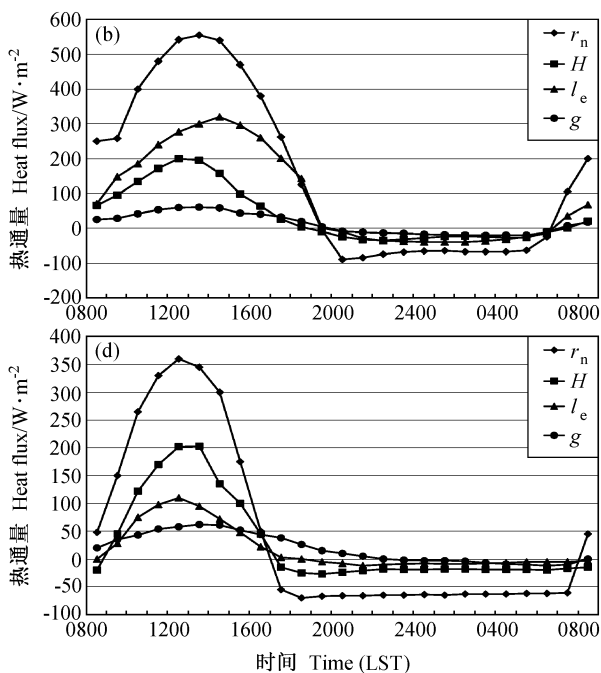


图 6 地表能量平衡日变化: (a) 城市 (JUN04); (b) 郊区 (JUN04); (c) 城市 (DEC04); (d) 郊区 (DEC04)

Fig. 6 The diurnal change of surface energy budget: (a) Urban (JUN04); (b) suburban (JUN04); (c) urban (DEC04); (d) suburban (JUN04)

城市地区的相对变化幅度为 6%。JUN04 的感热通量绝对值大于 JUN01, 最大相对变化幅度达到了 27%。潜热通量的相对变化幅度为 20%, 土壤热通量则为 10% 左右。

JUN04 和 JUN02、JUN03 之间各种通量的差值变化与上述的趋势基本一致, 差值大小略有不同。在冬季, 人为热源对地表能量平衡的相对影响比夏季大, 尤其是在夜间, 如感热通量的变化幅度达 33%。这表明, 在白天由于不同人为热源方案引起的地面通量的相对变化幅度很小, 夜间较大, 冬季大于夏季。

4.3 对地表-大气之间物质、能量交换的影响

不同的人为热源引入方案改变了地表-大气之间的动量、热量、水汽交换, 并由此来影响低层大气。

JUN04 模拟所得地面热量通量分布如图 7a、b 所示, 热通量的正负号表明了地气之间热量传输的方向, 绝对值大小表明热量交换的强弱程度。中午, 地表温度高于地面气温, 热量通量为负。城市地区热通量为 $-0.25 \text{ kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 热量交换强烈。城市地温和气温的差值大于郊区, 所以其热通量的绝对值比郊区大。夜间地面气温略高于地表温度, 热通量为正, 但值比中午时小一个量级, 此时地气间的热量交换较弱。冬季地温和气温之差小于夏季, 地气间热量交换比夏季弱, 城市和郊区的差别也较小。

图 7c、d 是 JUN04 与 JUN01 地面热量通量差值分布。中午 JUN01 和 JUN04 的人为热源总量基本相等, 前者地温高, 后者气温高, JUN04 的热通

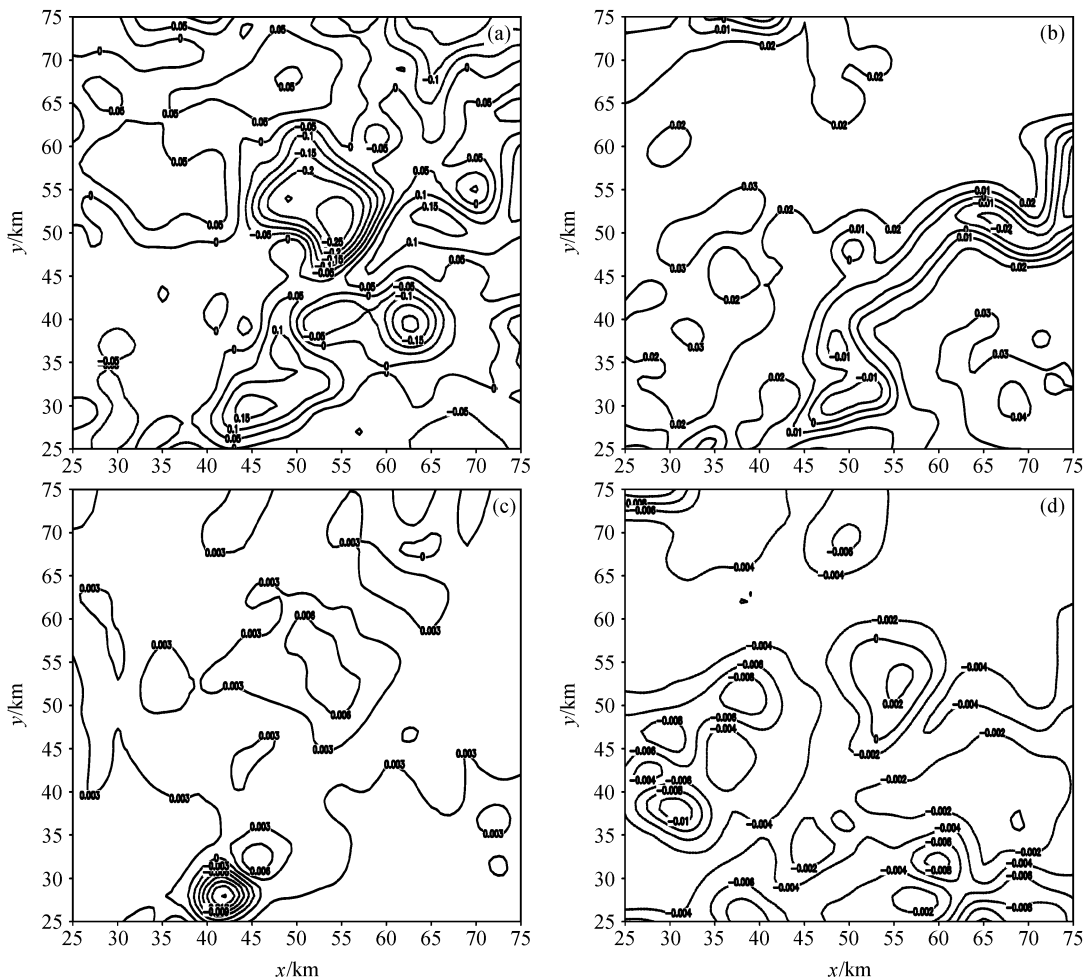


图 7 JUN04 地面热量通量 (单位: $\text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 14:00, (b) 02:00; JUN04 与 JUN01 地面热量通量差值 (单位: $\text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$): (c) 14:00, (d) 02:00

Fig. 7 Surface heat fluxes ($\text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) for JUN04 at 1400 LST (a) and 0200 LST (b); differences of surface heat fluxes ($\text{kg} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) between JUN04 and JUN01 at 1400 LST (c) and 0200 LST (d)

量绝对值小于 JUN01, 表明此时 JUN04 的地气交换强度比 JUN01 弱。夜间 JUN04 的人为热源总量小于 JUN01, 两种方案都是气温略高, 地温略低, 但 JUN04 地气温差大, 地气间热量交换强度大于 JUN01。冬季中午 DEC04 地气之间热量交换强度小于 DEC01, 相对变化幅度和夏季基本一样, 均为 3% 左右。02:00 时, DEC04 地气之间热量交换强度大于 DEC01, 相对变化幅度为 16%, 大于夏季的 9%。

城市内部结构复杂的道路和建筑群代替了自然下垫面, 是十分粗糙和不均匀的下垫面, 使近地面风速、风向发生了改变, 湍能增加, 地面动量通量较大, 基本分布如图 8 所示。白天, 城市为明显的动量通量高值区, 水面上为低值区。夜间, 大气层结趋于稳定, 地气间物质能量交换受到抑制, 此时城市地区已无明显高值区, 而地形开始起主导作用, 西南和东南山区动量通量较大。当考虑人为热源同时对大气和地表产生影响时, 使白天的大气层结更加不稳定, 湍流发展更旺盛 (将在下文分析), 地表动量通量增加, 大于人为热源仅加于地表的引入方案的模拟结果, 中午时城市动量通量增加 $0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

人为热源方案对地气之间的水汽输送也有影响, 日出后数小时内蒸发作用强, 地表和空气中水汽的变化对地温、气温比较敏感, 经过较长时间蒸发, 到中午时水汽变化已比较平缓, 对气温敏感度

降低, 此时不同人为热源的引入方案对水汽通量的影响不大。夜间, 人为热源同时对大气和地表产生影响时, 气温高, 空气中水汽含量大, 由大气向地表传输的水汽通量较大。这说明人为热源对地气间水分平衡的影响主要是在夜间。

4.4 对湍流交换的影响

图 9 是 JUN04 模拟的南北方向湍流动能剖面图。城市地区一直是湍能的高值区, 杭州市 (城市中心为 $Y=52$) 上空最大值为 $0.45 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 出现在 $50 \sim 100 \text{ m}$ 之间, 对照模拟区域建筑物分布情况 (图 2), 该处建筑物密度大, 平均高度为 30 m 。Oikawa 等^[16]和 Zhang 等^[17]在研究中均发现, 建筑物 1.5~3 倍高度处一般是湍能高值区, 本模拟也体现了这一点。夜间湍能减小 1 个量级, 影响高度不超过 100 m 。模拟区域的西北部由于有地形的作用, 湍能也较大, 水面则最小。由 JUN04 和 JUN01 湍能差值可见, JUN04 方案中城市上空的湍流交换更强烈, 杭州市上空在 $200 \sim 400 \text{ m}$ 间增加 $0.015 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 相对增加幅度为 3%。夜间增加的绝对值最小, 为 $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 但相对增加幅度最大, 为 40%。影响高度集中在 $30 \sim 50 \text{ m}$ 之间, 比白天低。

冬季大气层结稳定, 湍流交换发展较弱, 湍流动能强度一般为夏季的一半。从总体来说, 不同的人为热源方案对湍能的影响, 中午使 $100 \sim 350 \text{ m}$ 之间的湍能变化 $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 左右; 夜间的影响高度

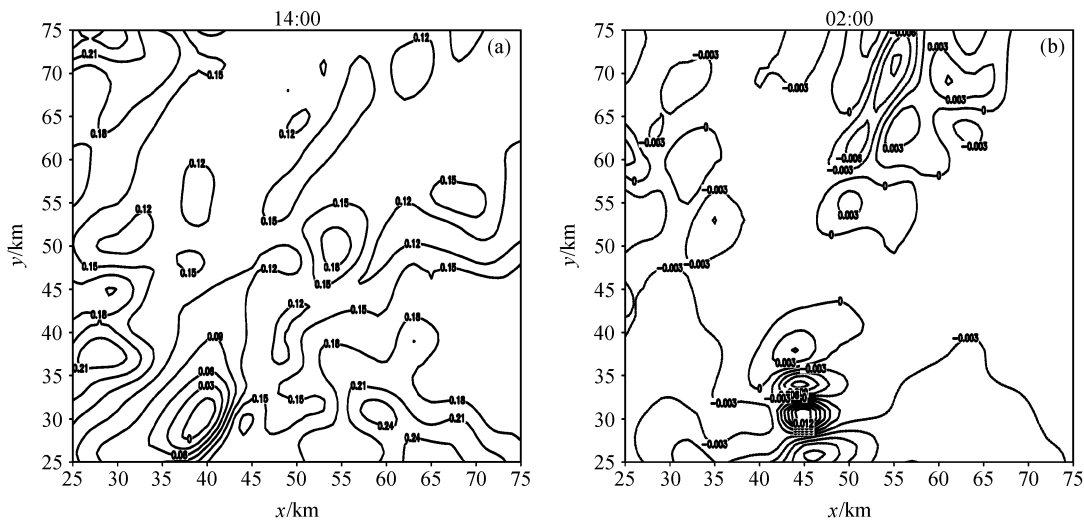


图 8 (a) JUN04 地面动量通量 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$); (b) JUN04 与 JUN01 地面动量通量差值 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 8 (a) Surface momentum fluxes ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) for JUN04; (b) difference of surface momentum fluxes ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$) between JUN04 and JUN01

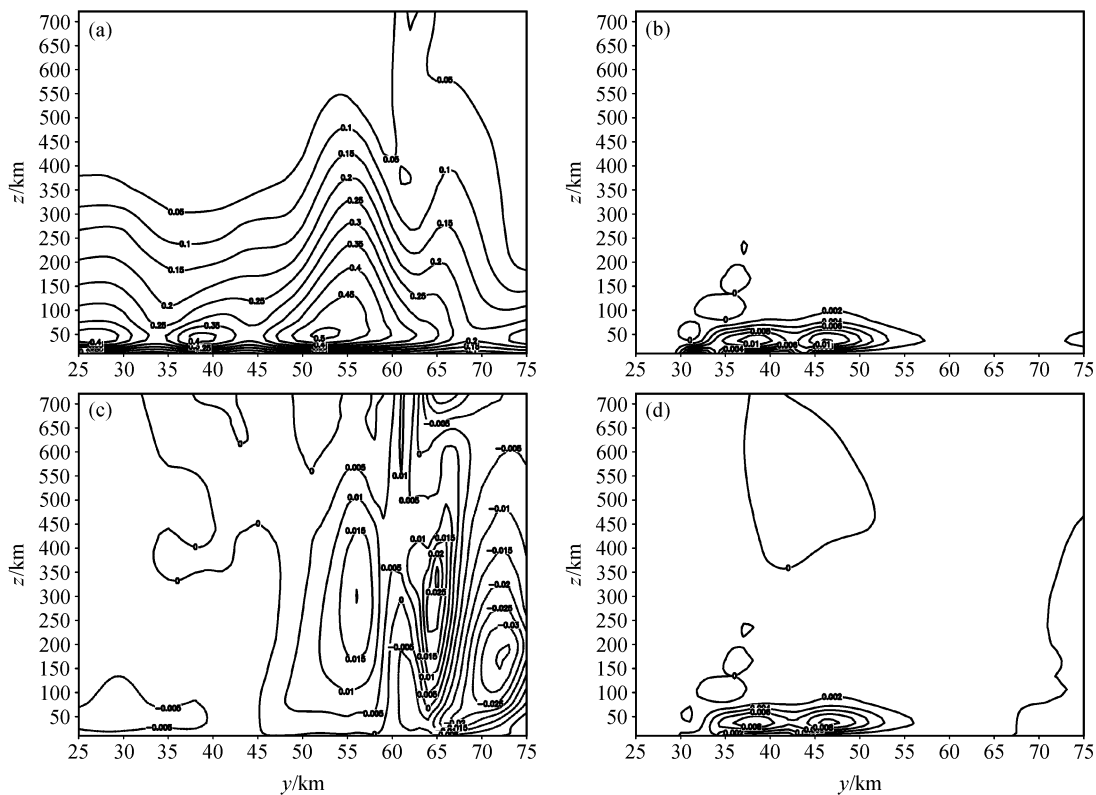


图9 JUN04 的南北向湍能分布 (单位: m^2/s^2): (a) 14:00, (b) 02:00; JUN04 和 JUN01 的湍能差值 (单位: m^2/s^2): (c) 14:00; (d) 02:00

Fig. 9 The turbulence energy (m^2/s^2) distribution in south-north cross section for JUN04: (a) 14:00, (b) 02:00; differences of the turbulent energy (m^2/s^2) between JUN04 and JUN01: (c) 14:00, (d) 02:00

更低, 湍能值的变化范围较小。

这说明白天人为热源对湍能的影响作用较小, 并将这种影响通过湍流交换输送到高层大气, 低层湍能的增加不明显; 而到夜间没有了太阳辐射能量, 人为热源在地气交换中的影响更明显, 使低层湍能增加明显。

4.5 对日间混合层和夜间逆温的影响

图 10 是 JUN04 模拟的城市和郊区白天混合层的变化。08:00 时, 城郊为稳定的温度层结, 并有逆温现象。随着太阳辐射的增强, 地表吸收热量增温, 并加热低层大气, 逆温逐渐消失, 湍流混合开始从地面向高空发展, 10:00 时城市和郊区的混合层高度为 200 m, 但城市的发展强度更大。到 12:00 时, 城市地区的混合层已明显强于郊区, 混合层顶为 450 m, 而此时郊区仅为 300 m。14:00 时, 湍流混合更加充分, 城市上空 500~700 m 为充分混合层, 是弱稳定层结, 而郊区湍流发展较弱, 变化不明显, 混合层顶仍为 300 m。下午随着太阳辐射减

弱, 混合层高度开始降低, 到 18:00 时, 城市的混合层已经十分微弱, 仅在地面到 150 m 高度, 郊区已开始出现逆温现象。20:00 时, 城市地区混合层完全消失, 大气层结稳定度上升, 逆温开始出现。

不同的人为热源引入方案对热力结构影响较大, 对城市白天混合层和夜间逆温层的发展影响明显。比较四种不同的人为热源方案的模拟结果可以发现, 白天混合层日变化趋势基本一致, 但混合层具体发展的高度和强度则不同。当人为热源仅加于地表能量平衡方程时, 地表温度较高, 但是地表的热量需通过地气交换间接影响低层大气, 与 JUN04 相比低层气温略低, 其城市混合层发展也略弱, 如 14:00 时 JUN01 的混合层高度为 300 m, JUN02 略高为 350 m, 但都远低于 JUN04 的 700 m。JUN03 与 JUN04 相比是未考虑人为热源的日变化, 总体来说, 这两种方案的差别小于前几种的差别。18:00 时 JUN04 比 JUN03 人为热源值大, 对大气的加热持续时间长, 此时 JUN04 的城市混合层高

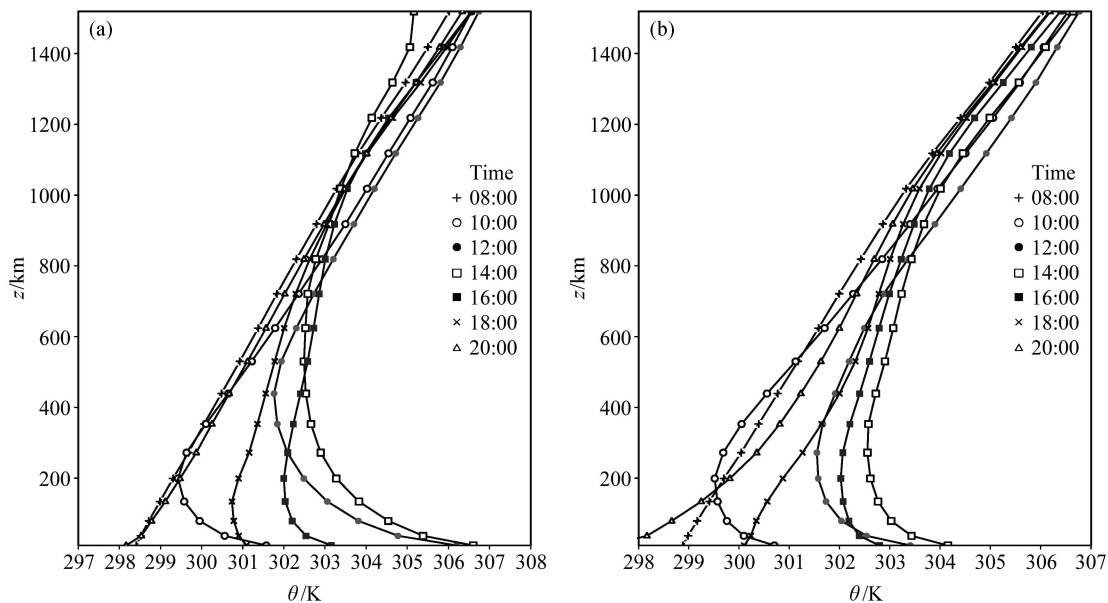


图 10 混合层日变化 (JUN04): (a) 城市; (b) 郊区

Fig. 10 The diurnal change of mixing layer (JUN04): (a) Urban area; (b) suburban area

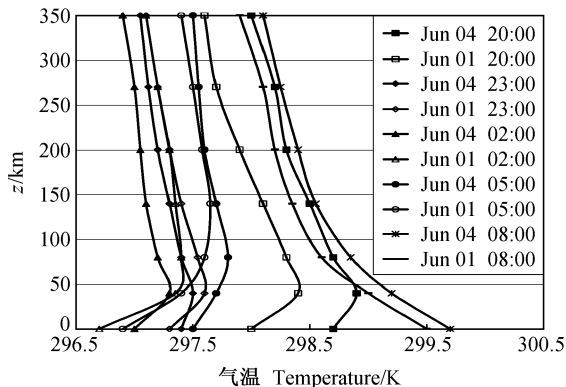


图 11 夜间逆温层变化

Fig. 11 The change of the inversion layer at night

度仍维持在 150 m 左右, 而 JUN03 算例中城市混合层则基本已经消失。图 11 是 JUN04 和 JUN01 夜间城市逆温的对比。夜间 JUN04 的低层大气有人为热源的直接加热, 气温比 JUN01 高, 这就使 JUN01 的逆温强度强, 逆温层顶高。这在 05:00 时最明显, 此时 JUN04 的逆温层顶高为 80 m, 逆温强度是 $3.75\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 而 JUN01 的逆温层顶高为 140 m, 逆温强度是 $5.35\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。这些分析表明, 将人为热源同时加于地表能量平衡方程和大气热流量方程中, 并考虑其日变化时, 使大气层结不稳定性增加, 白天边界层高度抬升; 混合层持续的时间增长; 夜间逆温强度减小。

5 结论

人为热源直接改变地表温度、低层气温, 改变净辐射通量、感热通量、潜热通量和土壤热通量的分布, 影响地表-大气间的动量、热量、水汽交换, 影响湍流交换的发展, 改变城市地区的混合层、逆温层高度、温度场、流场等, 从多方面影响城市边界层结构, 从而亦直接影响到上述城市和郊区之间的气象环境的差异。

通过对不同人为热源处理方案的模拟和分析发现: 对城市中的人为热源排放分层考虑, 将低层的人为热源加入地表能量平衡方程, 将高层的人为热源分布与建筑物高度、密度联系起来, 加入热量方程中, 同时考虑了人为热源强度的日变化, 是一种比较合理的处理方案, 模拟所得的气温、风向、风速变化与实际情况最接近。

与另一种方案, 即不考虑人为热源日变化, 仅将人为热源作用引入地表能量平衡的粗略处理方案相比, 引入新的精细人为热源处理方案后, 夜间气温增高, 大气向地表输送的热量、水汽多, 净辐射通量、感热通量和潜热通量的相对变化幅度在 20% 左右; 而白天太阳能量对地表能量平衡起决定作用, 人为热源的作用较小, 不同人为热源方案引起地表能量平衡的差异几乎可以忽略不计, 一般不超

过 4%。冬季的相对影响幅度大于夏季。

城市的湍流交换加强, 湍流动能增加, 白天影响的高度范围较大, 可达两、三百米高度, 促进了混合层的发展, 边界层高度抬升, 在夏季最高上升了 400 m。夜间对湍能的影响高度低, 一般不超过 150 m, 冬季低层湍能增加 40%; 大气层结稳定度降低, 减弱了城市逆温。

这些变化说明人为热源方案对城市热力环境及边界层结构的相对影响在夜间大, 影响高度的范围小; 白天仅是地表获得能量的一小部分, 相对影响较小, 但影响高度的范围大。就季节变化而言, 冬季的影响大, 春秋次之, 夏季较小。

在目前的研究中没有细致考虑建筑物的储热效应, 实际上一些人为热量在释放到空气中后, 会被暂时储存于建筑物内部和墙壁中, 再通过传导和对流向建筑物外部传输, 影响大气热力环境, 这样人为热的释放和其作用之间就有一个滞后的效应^[4, 14]。在今后研究中, 需要在中尺度模拟中将建筑物对热量的储存和释放的影响进行参数化考虑。

参考文献 (References)

- [1] Hafner J, Kidder S Q. Urban heat island modeling in conjunction with satellite-derived surface/soil parameters. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**: 448~465
- [2] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteor.*, 2000, **94**: 357~397
- [3] Kondo H, Kikegawa Y. Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use. *Pure Appl. Geophys.*, 2003, **160**: 317~324
- [4] Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, et al. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban building's energy-demands. *Applied Energy*, 2003, **76**: 449~466
- [5] 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** (supplement): 61~68
- [6] 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**: 265~274
Chen Yan, Jiang Weimei, Xu Min, et al. Simulation of greenbelts effect on meteorological environment in urban planning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**: 265~274
- [7] Kimura F, Takahashi S. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment. *Atmosphere Environment*, 1991, **25B** (2): 155~164
- [8] Businger J A, Wyngaard J C, Bradley E F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 181~189
- [9] Byun D W. On the analytical solutions of flux-profile relationships for the atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteor.*, 1990, **29**: 652~657
- [10] Taha H. Modifying a mesoscale meteorological model to better incorporate urban heat storage: A bulk-parameterization approach. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **38**: 466~473
- [11] Haan D P, Rotach M W, Werfeli M. Modification of an operational dispersion model for urban applications. *J. Appl. Meteor.*, 2001, **40**: 864~879
- [12] 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟. 应用气象学报, 2003, **14**: 61~67
Yang Yuhua, Xu Xiangde, Weng Yonghui. Simulation of daily cycle of boundary heat island in Beijing. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 2003, **14**: 61~67
- [13] 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, 2004, **9** (3): 409~421
Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (3): 409~421
- [14] Fan H, Sailor D J. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**: 73~84
- [15] 浙江省统计局. 浙江统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1999. 670pp
Statistics Bureau of Zhejiang Province. *Statistical Yearbook of Zhejiang Province*. Beijing: China Statistics Press, 1999. 670pp
- [16] Oikawa S, Meng Y. A field study of diffusion around a model cube in a suburban area. *Bound.-Layer Meteor.*, 1997, **84**: 399~410
- [17] Zhang Ning, Jiang Weimei, Hu Fei. Numerical method study of how buildings affect the flow characteristics of an urban canopy. *Wind and Structures*, 2004, **7**: 159~172