

北京市秋季城区和郊区大气边界层* 参数观测分析

王欣^{1,2)} 卞林根²⁾ 逯昌贵²⁾

1) (北京大学物理学院, 北京 100871)

2) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 应用2001年9月北京城区和郊区同步大气边界层观测资料, 对大气边界层热力和动力参数进行了计算分析。结果表明: 北京市秋季, 逆温出现的时间城区滞后于郊区; 逆温层高度城区大于郊区, 200 m通常为郊区的逆温层顶和城区的逆温层底部; 逆温层强度城区弱于郊区; 城市热岛强度为3℃; 城区感热通量的输送大于郊区; 城区下垫面粗糙度远大于郊区; 郊区总辐射和紫外辐射的强度明显大于城区。

关键词: 城市边界层; 逆温层; 城市热岛

1 引言

大气边界层的动力和热力作用是形成城市大气环境污染的重要因子。逆温层和城市热岛环流的存在, 会造成污染物质的堆积, 加剧城市近地面层的污染。城市边界层的动力热力作用对模拟影响很大, 要准确预报城市的空气质量, 必须对边界层各种物理过程有足够的认识。1974~1976年美国圣路易斯进行了著名的METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment)^[1]试验, 利用湍流脉动、雷达、探空和地面观测等探测仪器, 得到大量可应用于数值模式的资料。Cooper^[2]等利用探空资料和雷达观测资料进行对比, 研究了墨西哥城的城市行星边界层大气特征, 揭示了边界层动力作用对污染物的输送不是连续和分层的, 而是缓慢和空间不连续的。卞林根等^[3]利用北京市2001年冬季大气廓线观测资料, 分析指出了北京市冬季城、郊区的风廓线受城市覆盖层影响的变化特征。刘辉志等^[4]利用北京325 m观测塔3层高度的超声观测资料计算和分析了北京市城、郊结合部下垫面的湍流宏观统计特征量随稳定度变化的规律。苗蔓倩^[5]模拟了城市热岛效应对污染物扩散规模的影响。佟华等^[6]模拟了北京海淀区大气边界层的风、温场结构, 结果表明, 边界层风场受到热岛热力作用以及地形动力作用的影响。但是, 目前国内外研究和模拟城市边界层结构大多采用城区或单站的资料^[7~9], 且以地面资料为主, 这是不全面的, 应基于更多有代表性测站的空间观测资料, 才能客观分析研究边界层的动力热力作用。中国气象科学研究院于2001年9月采用先进的系留气艇、超声风温仪和测量辐射等的仪器, 分别在北京市城区和郊区进行

2003-01-10收到, 2003-07-09收到再改稿

* 国家科技部项目“首都北京及周边地区大气、水、土壤污染机理与调控原理”(G1999405700)资助

了约2周左右的大气边界层和污染物质同步的观测试验。本文利用观测的大气边界层资料,重点分析北京地区秋季城、郊区大气边界层结构的热力和动力参数差异,为提高空气质量预报模式的边界层参数化方案提供一些依据。

2 观测概况

城区观测点设在海淀区中国气象局大院内的楼顶上,观测点周围楼群林立,下垫面为水泥地。由于近年来中关村地区高科技园区的蓬勃发展,带动了海淀区经济建设的飞速增长,使其取代了过去前门、西单、王府井一带的暖中心^[10],成为北京市城市热岛效应的新代表。郊区观测点选择在北京西北方向的昌平定陵附近,距离北京市区大约100 km。周围环境以树木和低矮的房屋为主,下垫面和周围环境具有北京郊区的典型特征。

风速、风向、温度、湿度及气压大气廓线的观测采用美国大气(Air)公司生产的TS-3A型系留气艇探测系统,每日进行6次观测;太阳总辐射和紫外辐射观测采用美国EPPLEY公司的传感器(PSP和UV-B),由采集器(DT60)每分钟采集一次;湍流脉动观测采用美国YOUNG公司生产的超声脉动风温仪(Model-81000),采样频率为10 Hz,可连续观测三维风速和脉动温度随时间的变化。城区和郊区观测仪器相同,仪器设备在试验前后均在中国气象局计量站进行了鉴定。

本次观测从2001年9月6日开始到9月16日结束。观测期间,天气状况良好,风力不大,以多云和晴天为主,8日下了一场小雨。

3 观测结果

3.1 大气廓线

图1为2001年北京秋季城区(图1a)和郊区(图1b)的温度随高度分布的廓线,由图可见在城、郊区夜间都存在逆温现象,逆温是加剧城市空气污染的主要气象条件。逆温的平均情况为:傍晚开始形成,夜间加强,凌晨发展到最大强度,日出后开始消失。但由于北京市城、郊的差别,使得城区和郊区的逆温现象呈现出不同的特征。图中显示城区形成明显逆温层的时间比郊区晚,20时只是在近地面层50 m以下形成贴地逆温,郊区此时已经出现显著的逆温层,温度变化为1.5℃;夜间23时逆温现象继续加强,温度变化在3℃以上;而在早上08时,城区200 m到500 m上空还有强度为1℃左右的逆温层,郊区的逆温现象已经很弱或基本消失。由此可见,北京市秋季城区上空出现逆温层的时间比郊区出现逆温层的时间滞后,而且强度比郊区弱。其可能是由于城市热岛作用,城区下垫面温度比郊区高,白天蓄热多,傍晚后近地层气温下降缓慢,地面释放长波辐射迅速加热贴地层的空气,高层空气加热缓慢,因此只出现贴地逆温;而郊区近地面大气则快速降温,日出后郊区大气温度的增温率大于城区。

表1给出了北京城、郊秋冬季逆温层参数的对比。可发现城区的逆温层高度与郊区明显不同,城区一般大于郊区。城、郊逆温层的高度变化与当时的气象条件有很大关系,因季节的不同也有所不同。在秋季,北京市郊区的逆温层一般从地面开始,顶

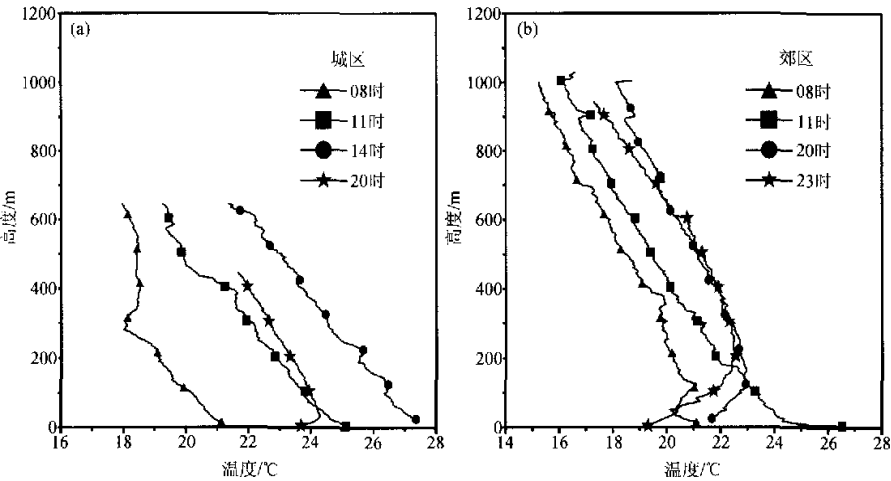


图1 2001年秋季北京市城区(a)和郊区(b)平均温度随高度的分布

部约在 200 m 高度；而这个高度正好是城区逆温层的底部，城区逆温层的顶部大约为 550 m。这说明北京市秋季郊区逆温层顶经常出现的高度，也是城区逆温层底较多出现的高度。城区逆温层底部较高的原因可能与城区的下垫面特征有关，由于高层建筑物的增多，使得城区 150 m 以下空气的垂直运动增强，温度上下混合比较充分，加上城区下垫面的高温，很难形成贴地逆温。在此高度内，地面输送到大气中的污染物滞留在逆温层中不易扩散，逆温层高度决定了污染物垂直扩散的范围。

城、郊区风速垂直分布的差异十分显著，图 2 为 2001 年秋季北京城区（图 2a）和郊区（图 2b）风速的垂直分布。由图可见市区风速随高度增加而增大明显，低层 100 m 以下由于建筑物的影响粗糙度较大，各时次的风速值都较小而且随高度增长趋势十分接近，100 m 到 250 m 风速增长很快。白天在 250 m 高度时脱离建筑物影响，达到风速最大值，形成一急流带，然后缓慢增长，到 600 m 边界层顶时再次出现较大风速。晚间 20 时由于热岛环流加强，风速始终随高度增长很快，到 500 m 左右才出现最大值。郊区风速的变化趋势与城区类似，但增长速度比较缓慢，其变化趋势在 600 m 以下变化不大，600 m 以上高层城区和郊区各时次风速逐渐趋于混合。低层的风速郊区明显大于城区，两者平均差为 2 m s⁻¹ 左右，这与郊区下垫面平坦、粗糙度较小有直接关系。

表 1 2001 年秋冬季北京城、郊逆温层高度和强度

季节	秋季						冬季					
日 期	9 月 9 日		9 月 11 日		9 月 12 日		1 月 10 日		2 月 21 日		2 月 25 日	
区 域	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区	城区	郊区
层底高度/m	175	地面	240	地面	300	地面	385	地面	225	地面	135	地面
层顶高度/m	—	220	530	185	525	155	540	115	405	115	240	125
强度/℃(100 m) ⁻¹	0.19	1.37	0.17	1.78	0.83	2.96	0.47	0.52	0.47	2.98	1.72	0.36
天气状况	阴		晴		晴		多云		晴		多云	

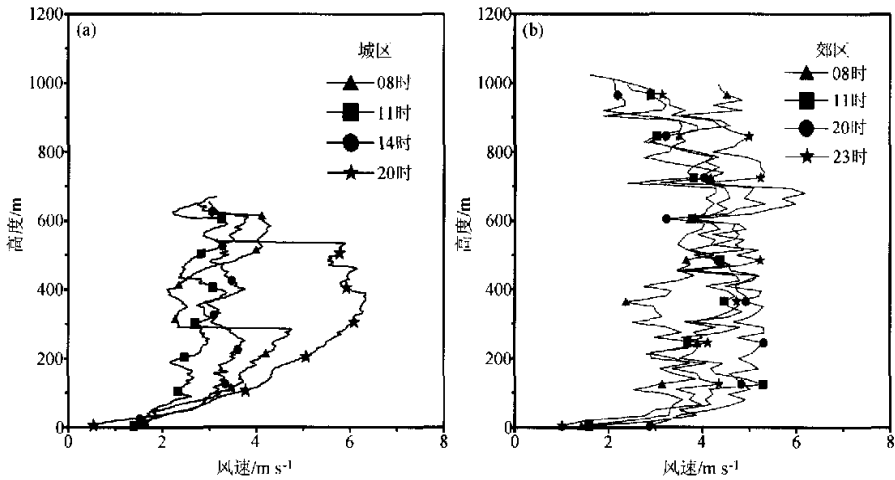


图2 2001年秋季北京市城区(a)和郊区(b)平均风速的垂直分布

3.2 城市热岛

由于城市下垫面以水泥、混凝土为主,具有较小的热容量和较大的导热率,升温比郊区下垫面要快;同时城市的立体建筑更增大了受热面积,造成城市热储量比郊区大很多。日落后,下垫面释放的热量使得夜间城区温度高于郊区,形成城市热岛^[11]。

城市热岛强度可以用同一时间的城区与郊区的气温差来表示,图3中给出了北京市上空4个时次的城、郊温度差在垂直方向上的变化。从图中看出城、郊的温度差随高度有明显变化,近地面的温差比高空大,显示了热岛作用所造成的城、郊温度差别;

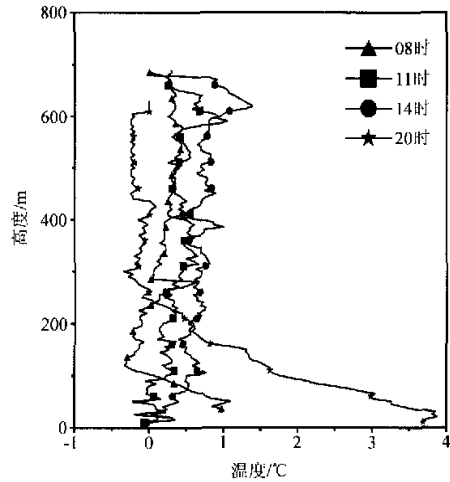


图3 2001年秋季城区和郊区平均气温差(城区气温减郊区气温)随高度的变化

到达高空后,温差缩小趋向于零,城郊温度在到达一定高度后开始趋于混合。图中近地面层早晨08时和傍晚20时温差较大,其中20时城郊温差达到最大,可达3.64℃;中午11时和14时城郊温差最小,近地面几乎为零,有时甚至出现负值。因此充分反映出城市热岛强度夜晚强、白天弱的特点。值得注意的是08时从100m到300m,20时300m以上热岛消失,出现城区温度小于郊区的现象,在北京冬季大气边界层温度廓线的垂直变化研究中有类似现象出现,这种现象可能是因为城、郊逆温层底部和顶部高度的差异及逆温层出现的时间不同所造成的。由于资料不足,还有待今后进一步加以研究。

图 4a 为北京市秋季城区与郊区地面平均气温的日变化, 由于城、郊下垫面的差异, 地面温度的差异最能够代表城市热岛效应的强度。从图中可看出城区地面温度在一天大部分时间中都大于郊区, 温差最大的时间出现在夜间, 凌晨 02 时温差达到 2.98°C , 傍晚 20 时城市热岛强度也比较强, 温差为 2.92°C 。到中午前后, 城、郊地面温度相差不大, 热岛消失, 甚至可能由于郊区的总辐射强于城区, 城、郊热量收支状况不同而使得郊区下垫面温度比城区高, 12 时温差为 -0.38°C , 出现了“冷岛”现象。

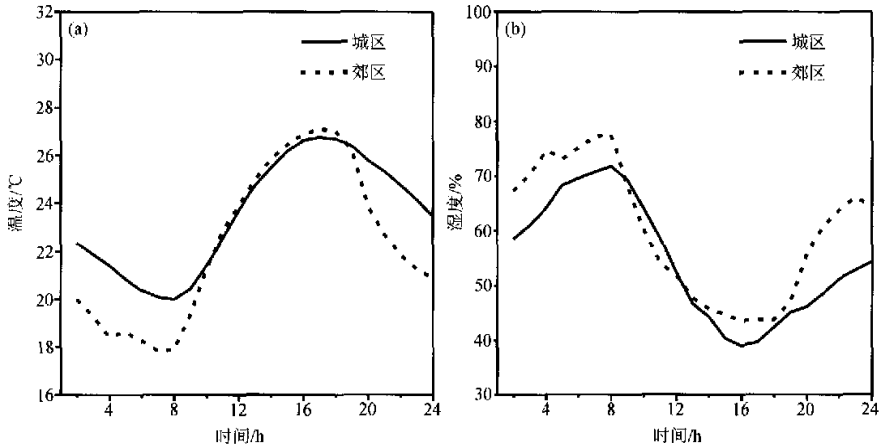


图 4 2001 年秋季城、郊区温度 (a) 和相对湿度 (b) 的日变化

城市热岛造成城区气温大于郊区, 气温差异的变化也引起了城、郊空气相对湿度的差异^[12]。相对湿度的日变化趋势与气温相反, 郊区几乎全天都大于城区如图 4b。白天郊区由于绿地面积大, 其蒸发量比城区大, 大大增加了空气湿度。夜间郊区的空气温度低、冷却快, 有大量的露水凝结, 而城区下垫面植物覆盖面积小, 蒸发量小; 同时由于城市近地层垂直湍流交换强, 有利于水汽向高层输送, 使得城区的湿度减小, 空气相对干燥, 因此郊区的相对湿度比城区大。增加城市绿化面积是解决城区气温高、空气干燥, 并减轻城市空气污染的最佳手段。

3.3 湍流特征

城、郊区的一个最明显的差别就是下垫面, 下垫面与大气间的湍流热通量的空间变化是边界层大气中引起温度变化的重要和主要原因^[13]。研究湍流交换对于提高大气边界层的模拟效果影响很大, 同时, 下垫面摩擦对大气运动的阻滞作用也是地气相互作用中的一部分。感热通量、摩擦速度等边界层湍流特征量的计算方程为

$$H = \rho c_p w' T', \quad (1)$$

$$u_* = [\overline{(u'w')^2} + \overline{(v'w')^2}]^{1/4}, \quad (2)$$

$$C_D = (u_* / U)^2, \quad (3)$$

其中, H 为感热通量, U 为平均风速, u_* 为摩擦速度, C_D 为拖曳系数^[4]。图 5 为由超声资料计算得到的城、郊感热通量变化, 可见白天地气的感热通量总是由下垫面向上输送。因天气条件的不同, 城、郊感热通量的输送有其日变化特征和差异。从图中可

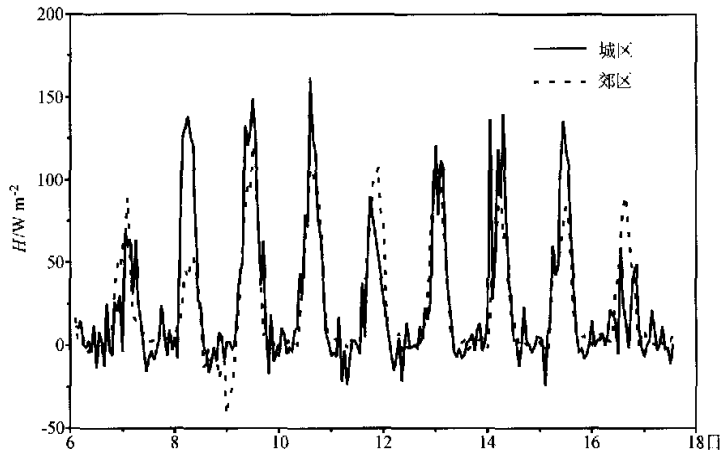


图5 2001年秋季9月6~16日城、郊区感热通量的时间序列

看出9月8日为阴天有雨,感热通量最小,日最大值只有 67.54 W m^{-2} ,且城郊差异不明显。10日和11日为晴天,中午12时前后达到最大值 161 W m^{-2} ,城郊相差 18.5 W m^{-2} ,城郊之比为0.813;这个值比Dupont等^[14]得到的巴黎城郊感热通量差别 $25 \sim 65 \text{ W m}^{-2}$ 稍小,可能与观测季节、时间和当地的天气有很大的关系。12日和13日为多云天气,中午前后可达到 120 W m^{-2} ;由于城、郊天空云量的不同,感热通量呈现比较复杂的情况,但总体上感热通量的输送在大部分时间是城区大于郊区,主要是因为城市热岛效应造成下垫面的温度较郊区高,因此下垫面输送给大气的热量比郊区大。

公式(3)中的 C_D 反映了下垫面的粗糙状况,其值的大小决定于摩擦速度(u_*)和平均风速(U)。图6a给出了城区与郊区摩擦速度的比较,可看出城区大于郊区,根据3.1节的讨论“城区低层风速小于郊区”,从(3)式可推算得到城区下垫面的粗糙度远大于郊区。由于城区下垫面的复杂性,城区观测的 u_* 与 U 的变化关系(图6b)中,离散很大,表明这两者之间的关系不能用(3)式定义的物理参数来描述。随着城市的发展,建筑物大量增加并向高处延伸,地面粗糙度发生了很大的变化。研究表明,城区的粗糙度比郊外农村地区约大一个量级,并且由于城区建筑物的阻挡产生涡旋及气流紊流,使得城区内部的风向也变得不确定,但在局部地区可能有较好的动量通量和风廓线的局地平衡关系;而郊区(图6c)得到的结果相对比较集中,表明能够很好的遵循这种关系,郊区下垫面以草地、树木及低矮的建筑物等为主,无高大建筑物,相对较平坦,粗糙度较城区低,对风向的变化没有什么影响。

3.4 总辐射和紫外辐射

到达地表的太阳辐射强度与大气透明度有关^[15],城区由于污染物质的排放,透明度小于郊区,因此太阳辐射强度的日变化整体小于郊区。太阳总辐射和紫外辐射强度有明显的日变化,日出后辐射迅速增加,正午达到极大值,午后随着太阳高度角的减小而减小(见表2)。图7为观测时段内晴天和阴天城区与郊区的总辐射和紫外辐射日平均变化对比,从图中可看出,晴天和阴天的辐射日变化形势相差很大。晴天总辐射

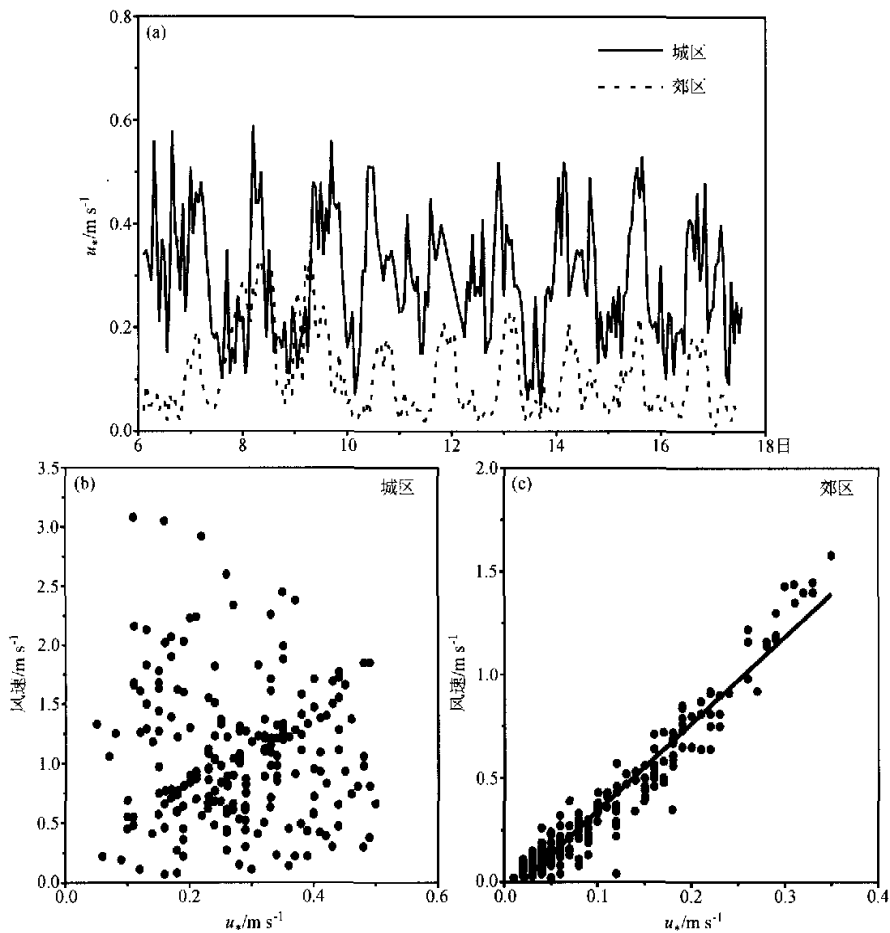


图 6 2001 年秋季城、郊区摩擦速度 (u_*) 和平均风速的关系
(a) 城、郊区摩擦速度对比; (b) 城区摩擦速度与平均风速的关系;
(c) 郊区摩擦速度与平均风速的关系

和紫外辐射的变化规律很相似，但城区辐射强度弱于郊区。太阳总辐射和紫外辐射的强弱与大气透明度有直接的关系，城市中由于早晨光化学烟雾还没形成，大气透明度较好；郊区则由于上午湿度较大，温度较低，致使空气中有雾，所以城区的总辐射强度比郊区大，但紫外辐射强度比较接近。从中午到傍晚，随着人类活动的增多城市的污染物逐渐增加，虽然有部分气溶胶粒子的散射作用增强，但不足以补偿总辐射的损失，紫外辐射也受到很大的削弱；而郊区空气中的雾逐渐消散，大气透明度增加，因此辐射强度大于城区。中午 1:30 前后城郊差距达到最大，城区与郊区总辐射比为 0.92，紫外辐射比为 0.804。阴天的变化与晴天不同，并无明显规律，但整体趋势还是城区弱于郊区，总辐射和紫外辐射的强度都相应的减弱了，可见云量的增加、水汽和

气溶胶的凝聚和消散对辐射传输有着巨大的影响。

表 2 2001 年北京市城区和郊区辐射强度日变化

			7: 00	10: 40	13: 30	15: 30	17: 30
晴天	城区	总辐射	136.89	507.38	516.38	172.13	17.5
		紫外辐射	0.062	1.172	1.196	0.408	0.047
	郊区	总辐射	47.98	507.63	560.38	300.2	50.15
		紫外辐射	0.054	1.224	1.366	0.482	0.047
阴天	城区	总辐射	23.0	110.0	224.0	201.5	19
		紫外辐射	0.016	0.393	0.855	0.419	0.064
	郊区	总辐射	11.18	114.35	206.17	253.94	64.15
		紫外辐射	0.011	0.396	0.754	0.573	0.067

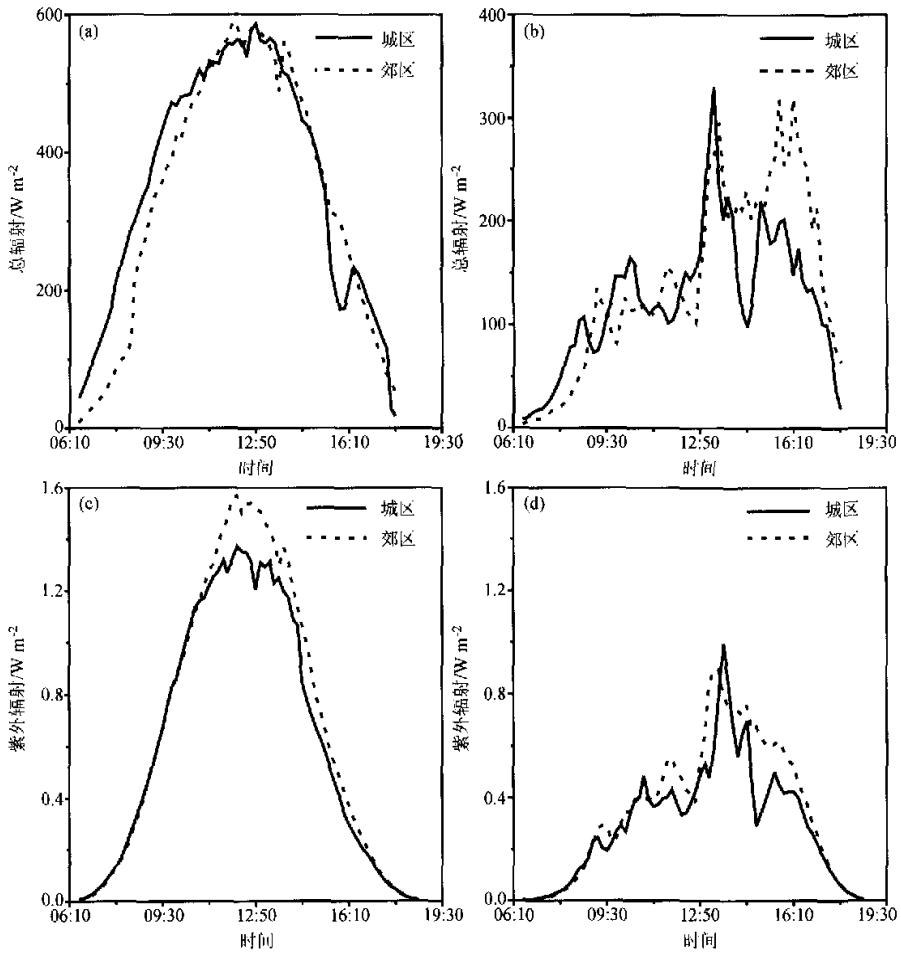


图 7 2001 年秋季城区与郊区晴天和阴天地面总辐射和紫外辐射的平均日变化

(a) 晴天总辐射; (b) 阴天总辐射; (c) 晴天紫外辐射; (d) 阴天紫外辐射

4 讨论与结语

2001年秋季在北京地区进行了城市和郊区大气边界层的对比观测试验,分析了城、郊大气边界层结构热力和动力参数的差异,从而为研究城市热岛效应及提高城市空气质量的预报,治理空气污染提供了科学依据^[16,17]。试验中所选择的观测地点非常具有代表性。综上所述,得出如下结论:

(1) 北京地区秋季城区和郊区逆温层的出现时间是不同的,且逆温层高度也有差异。城区由于热岛效应的作用比郊区出现逆温层的时间滞后。郊区的逆温一般从地面开始,顶部为200 m左右;城区由于下垫面特殊,其逆温层底高度一般是200~250 m,顶部高度为550 m左右。而且城区的逆温强度比郊区小。

(2) 北京地区秋季城、郊区风速的垂直分布特征有较大差异。城区风速在100 m以下受建筑物影响,平均风速值比郊区小 2 m s^{-1} 左右;城区低层风速随高度增加显著,到250 m高度时风速达到最大,郊区风速随高度增加变化趋势不明显;到600 m高度后,城区和郊区风速逐渐混合。

(3) 北京地区秋季城市热岛效应的强度近地面最大可达 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$,通常出现在傍晚20时左右;到了高空,强度开始减弱,城郊温度在到达一定高度后开始趋于混合。由于郊区绿地面积大及温度比城区低,空气相对湿度大于城区,城区空气相对干燥。

(4) 北京地区秋季城区的感热通量比郊区大,在一天中差别最大可达到 18.5 W m^{-2} 。城区随着下垫面楼房的增多,改变并增大了原有的粗糙度;郊区始终保持了以树木及低矮建筑物为主的下垫面特征,粗糙度没有很大改变。下垫面的改变对局地风向有很大的影响。

(5) 北京地区秋季城市上空的大气污染物对城区的总辐射和紫外辐射强度有很大影响,其减低了大气透明度,使得城区晴天的辐射强度均弱于郊区;阴天城、郊状况很相近,并无明显的规律,这种现象也与当时所处的天气气象条件有很大关系。由于阴天辐射强度比晴天弱,因而云量、水汽和气溶胶对辐射传输有着巨大的影响。

由于城市环境本身随着社会的发展而具有一定的复杂性和多样性,在2周的观测时间内,不可能做出全面的阐述,有待将来做更长时间的观测和更细致的分析工作来弥补。

参 考 文 献

- 1 Godowitch, J. M., Spatial variation of the evolution and structure of the urban boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, 1987, **38**, 249~272.
- 2 Cooper, D. I., and W. E. Eichinger, Structure of atmosphere in an urban planetary boundary layer from lidar and radiosonde observations, *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**, 22937~22948.
- 3 卞林根、程彦杰、王欣等,北京大气边界层中风和温度廓线的观测研究, *应用气象学报*, 2002, **13** (特刊), 13~25.
- 4 刘辉志、洪钟祥,北京城市下垫面边界层湍流统计特征, *大气科学*, 2002, **26** (2), 241~248.
- 5 苗曼倩,城市热岛效应对污染物扩散规律的数值模拟, *大气科学*, **14** (2), 1990.

- 6 佟华、桑建国, 北京海淀地区大气边界层的数值模拟研究, 应用气象学报, 2002, **13** (特刊), 51~60.
- 7 陆龙骅、卞林根、程彦杰等, 冬季北京城市近地层的气象特征, 应用气象学报, 2002, **13** (特刊), 34~41.
- 8 Brazil, R., and M. Budikova, An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, The Czech Republic, *Atmospheric Environment*, 1999, **33**, 4211~4217.
- 9 Geissbuhler, P., and R. Siegwolf, Eddy covariance measurements on mountain slopes: The advantage of surface-normal sensor orientation over a vertical set-up, *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, **96**, 371~392.
- 10 北京市气象局气候资料室, 北京城市气候, 北京: 气象出版社, 1992.
- 11 周淑贞、束炯, 城市气候学, 北京: 气象出版社, 1994.
- 12 周淑贞, 上海城市气候中的“五岛”效应, 中国科学 (B辑), 1988, **11**, 1226~1234.
- 13 苏红兵、洪钟祥, 北京城郊近地层湍流实验观测, 大气科学, 1994, **18**, 739~750.
- 14 Dupont, E., and L. Menut, Comparison between the atmospheric boundary layer in Paris and its rural suburbs during the ECLAP experiment, *Atmospheric Environment*, 1999, **33**, 979~994.
- 15 郑有飞、石广玉、何金海等, 南京地区紫外辐射初步研究, 南京气象学院学报, 2000, **23** (2), 235~241.
- 16 刘小红、洪钟祥、李家伦等, 北京地区严重大气污染的气象和化学因子, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 231~236.
- 17 殷达中、洪钟祥, 北京地区严重污染状况下的大气边界层结构与参数研究, 气候与环境研究, 1999, **4** (3), 303~305.

A Study of Characteristic Parameters of Atmosphere Boundary Layer over Beijing in Urban and Suburban Area in Autumn

Wang Xin^{1,2)}, Bian Lingen²⁾, and Lu Changgui²⁾

1) (School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

2) (Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract Using the synchronous observing data of atmospheric boundary layer in both urban and suburb district in Beijing of September 2001, thermal and dynamic parameters of atmospheric boundary layer, are calculated and analyzed. The analysis indicates that: in autumn of Beijing, the time of temperature inversion in urban area lag behind the one of suburb, the altitude of temperature inversion layer in urban area is higher than the one of suburb, and generally, the height of 200 meters is the top of urban temperature inversion layer and the bottom of suburb temperature inversion layer; the intensity of the temperature inversion layer in urban area is weaker than the one of suburb; the heat island intensity in autumn is 3 °C; the transportation of sensible heat flux in urban area is larger than that of the suburb; the underlying surface in urban district is far more rougher than that of the suburb; and the global radiation and the intensity of ultraviolet in the suburb are apparently larger than those of the urban district.

Key words: atmospheric boundary layer; inversion layer; urban heat island