



城市边界层温度廓线及特征的季节变化

王喜全^①, 王自发^①, 郭虎^②

① 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② 北京气象台, 北京 100084

E-mail: wxq@mail.iap.ac.cn

2008-06-27 收稿, 2008-09-05 接受

中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCZ2-YW-219)和中国科学院大气物理研究所前沿领域研究项目(批准号: 8-070204)资助

摘要 利用北京月坛公园 180 m 铁塔城市边界层常规微气象观测资料, 分析了城市边界层温度及其层结的季节变化. 结果表明: (1) 与其他季节不同, 冬季地面气温日变化与其上层的气温日变化不同步, 即地面最高气温比上层提前 1~2 h 达到; 这种位相差表明了观测场地的地理位置、建筑物分布对观测结果的影响. (2) 除中午前后为不稳定层结以外, 其他时间, 城市冠层顶部与城市摩擦副层间的静力稳定度具有季节性变化的特征, 即冬季为弱不稳定层结, 而夏季为弱稳定层结, 这种弱稳定层结可能会抑制城市冠层内污染物向上扩散的过程. (3) 城市冠层顶部(即屋顶)对城市边界层热状态的影响具有季节性的差异, 即夏季城市冠层顶部对城市摩擦副层起加热作用, 而冬季起冷却作用, 这与青藏高原对大气热状态的影响非常相似.

关键词

城市边界层
温度廓线
温度层结
季节变化

城市边界层温度廓线对城市气候特征和污染物扩散规律有重要影响^[1,2]. 近年来一些关于城市边界层的大规模观测试验和强化观测试验^[3~5], 对城市大气环境的多尺度特征、城市建筑群的影响效应、城市下垫面及其陆面过程、城市大气边界层结构以及城市环境多圈层的相互作用等问题, 开展了综合性研究^[6]. 但由于技术及经费等限制性因素的原因, 这些观测试验多属短期观测, 因而对城市边界层结构的季节性变化及其特点分析了解得并不够充分. 本文利用北京月坛 180 m 铁塔近 2 年的城市边界层微气象常规观测资料, 分析研究了北京城市边界层, 特别是城市冠层(urban canopy layer)和城市摩擦副层(urban roughness sublayer)的温度及其层结的季节变化特征, 并通过与国内外相关研究的对比, 印证了城市边界层温度结构的复杂性和多样性等特点.

1 观测场地及数据处理

北京月坛公园铁塔拔地高度为 180 m, 1993 年以

前是中央电视台发射塔. 2001 年 7 月至 2002 年 12 月底, 为筹备 2008 年北京 29 届奥运会, 北京气象局在铁塔 30, 60, 120 m 处安装气象仪器, 开展城市微气象观测研究. 月坛公园毗邻西二环路, 周围 1 km 以内具有典型的城市下垫面特征(图 1): 西、南、北方向为城市居民小区, 均匀分布 3~10 层的居民楼; 东方向分布有月坛体育场和西二环南北干线, 除一高层建筑(24 层)以外, 还有些低矮建筑. 月坛公园占地面积约 8 hm², 除一些低矮古建筑物以外, 全部是绿化用地.

在月坛铁塔的 30, 60, 120 m 处安装的国产自动气象观测仪器(仪器性能指标见表 1), 观测的常规气象要素包括时温度、时最高温度、时最低温度、2 min 平均风速及风向、10 min 平均风速及风向、时极大风速及风向、时最大风速及风向、时降水、日降水、10 min 雨强和湿度, 其中地面要素由按气象规范建立的月坛自动地面气象站提供. 根据分析月坛铁塔周围的建筑物高度, 30~60 m 层处于屋顶高度, 处于城市

引用格式: 王喜全, 王自发, 郭虎. 城市边界层温度廓线及特征的季节变化. 科学通报, 2009, 54(7): 954~958

Wang X Q, Wang Z F, Guo H. Seasonal variation of the temperature profile and its characteristics within urban roughness sublayer. Chinese Sci Bull, 2009, 54(3): 468~473, doi: 10.1007/s11434-008-0463-6

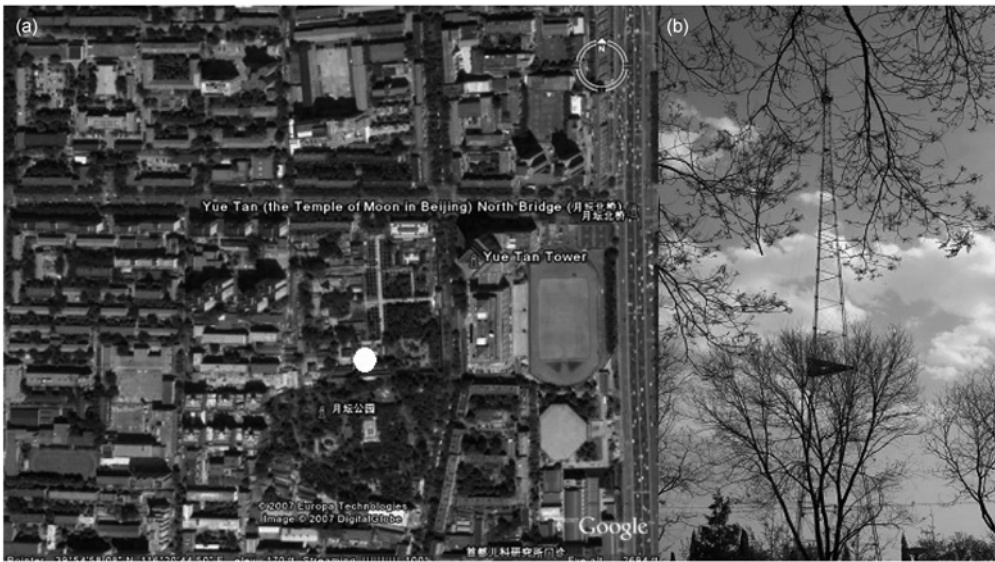


图 1

(a) 北京月坛铁塔周围城市下垫面状况卫星照片(取自 Google Earth). 图中白色圆圈指示铁塔的位置; (b) 北京月坛铁塔照片 (由北向南拍照)

表 1 自动气象站性能指标

要素	测量范围	分辨率	准确度
气温/°C	-50~+50	0.1	±0.2 ±3($t>0^{\circ}\text{C}$) ±5($t<0^{\circ}\text{C}$)
相对湿度(%)	0~100	1	±5($t<0^{\circ}\text{C}$)
降水量/mm	0~999.9	0.1	±0.3($\leq 10\text{ mm}$) ±3($>10\text{ mm}$)
气压/hPa	450~1060	0.1	±0.3
风向/(°)	0~360	2.5	±5
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0~75	0.1	$0.3\pm 0.03\text{ V}$

冠层和城市摩擦副层之间的过渡带.

为保证数据的质量,对自动气象站气象资料进行了校正,主要采用的办法如下: (1) 人工去除明显错误记录; (2) 对日变化单调上升或单调下降处的缺测资料采用线性插值,对拐点处的缺测资料采用抛物线插值; (3) 对每天长时间(4 h 以上含 4 h)缺测且含拐点的资料不参加统计.

2 结果及讨论

2.1 城市边界层气温日变化的季节差异

除天文地理因素以外,局地气温日变化还受大、中、小尺度等天气过程过境的影响. 对于北京来说,夏季最高气温达到的时间在 13~18 时(北京时间,下同)之间变化,冬季最高气温达到的时间在 12~15 时之间变化^[2]. 因此,在分析城市边界层各层气温日变化特征时,我们只对当日没有剧烈天气变化(如大风、

阵雨等)的资料进行统计,以便能更清晰地凸显日变化的季节差异.

图 2(a)和(b)分别给出了冬季(2002 年 1 月)和夏季

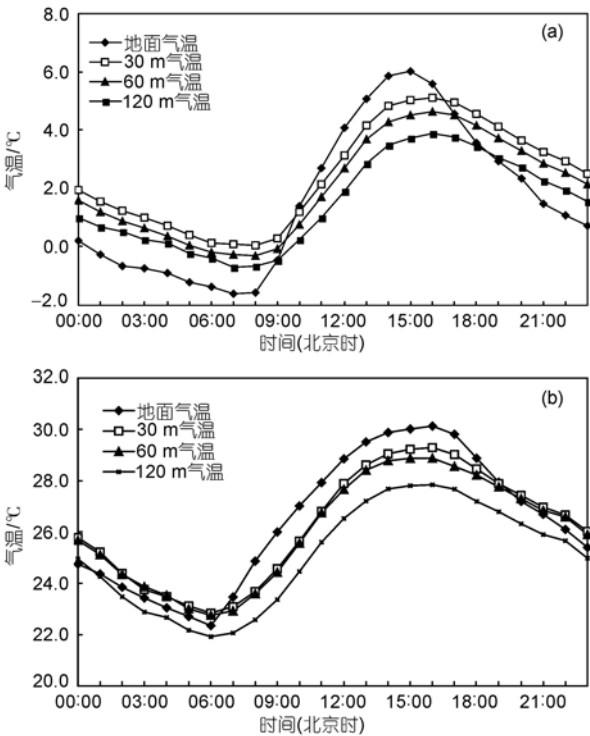


图 2 北京月坛铁塔各层气温日变化(2002 年)
(a) 冬季; (b) 夏季

(2002 年 8 月)北京月坛铁塔地面、30, 60 和 120 m 高度气温日变化曲线. 由于春季和秋季处于冬夏过度期, 其日变化特征介于冬夏之间, 因而将这两个季节的气温日变化曲线暂付阙如. 由图 2 可见北京城市边界层内气温日变化有如下季节性差异:

(1) 冬季地面逆温层厚度比夏季深厚, 冬季地面逆温强度也比夏季强; 夏季逆温层高度低于 120 m, 而冬季逆温层厚度至少不少于 120 m.

(2) 夏季城市边界层各层最高气温几乎同步达到; 冬季地面最高气温与其上各层不同步, 地面最高气温达到的时间平均比上层提前 1 h 左右, 即地面为 15 时达到, 而 30, 60 和 120 m 处在 16 时达到. 但不论冬夏, 城市边界层内的最低气温是同步变化的, 即各层最低气温达到的时间, 冬季为 7~8 时, 而夏季为 6 时左右.

北京月坛铁塔城市边界层内的最高气温一年四季总是在地面最高, 这点与文献[8]的结论有所差别. 文献[8]指出城市边界层内的最高气温的高度有季节性变化, 即夏季最高气温在地面达到, 而冬季在平均屋顶高度达到. 对比两者的观测场地, 文献[8]与北京月坛铁塔周围下垫面几何特征的差异, 可能是造成两者结果不同的主要因素, 即月坛铁塔周围比较开阔, 使得地面在冬季也能得到太阳的直接照射. 至于冬季北京月坛铁塔各层最高气温不同步现象的形成原因可能与文献[9]指出的原因相同, 即冬季城市边界层存在逆温(这点可从图 2(a)明显看出), 日出之后太阳辐射使地面迅速加热增温, 而逆温使热量不能迅速上传, 使地面最高气温比上层提前达到. 另外, 本文的结果与文献[8]的差异还说明, 城市边界层观测代表站点的选择是一个非常棘手的问题. 由于城市下垫面建筑物的结构对观测结果的影响太大, 限制了观测结果的推广, 同时也给城市边界层过程的参数化提出了挑战, 即参数化方案还应反映边界层结构的季节变化特征.

2.2 城市边界层温度层结的季节变化特征

虽然从图 2 即可看出城市边界层温度层结的季节差异的一些特点, 但为了清楚起见, 图 3 给出了边界层各层温度层结的日变化曲线. 分析图 3 可归纳如下几条城市边界层温度层结的季节特征:

(1) 从总体上来看, 冬季城市边界层的温度层结比夏季的要更稳定一些, 如冬季夜晚经常出现的贴

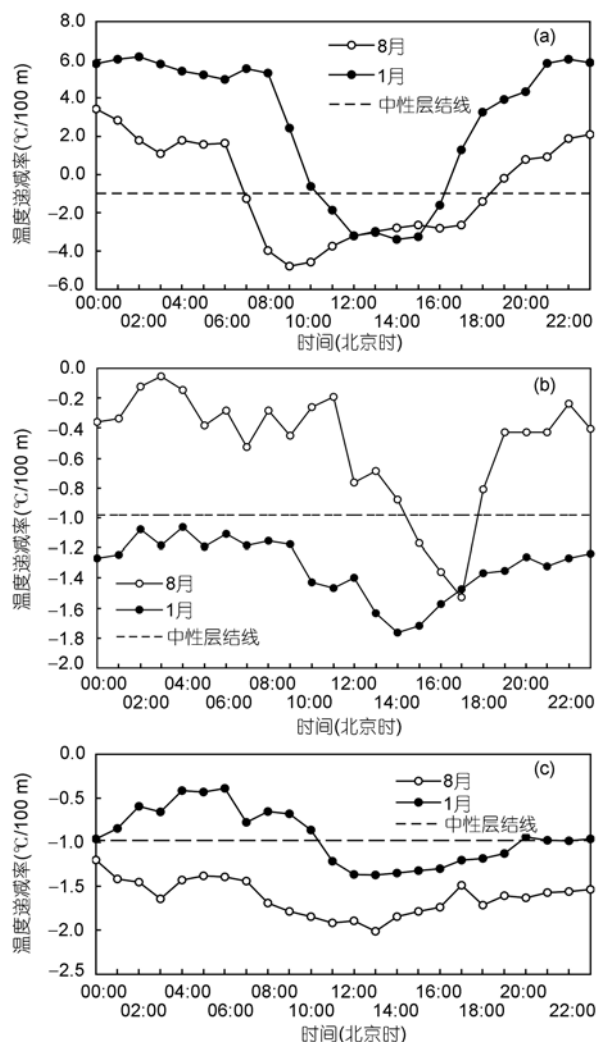


图 3 北京月坛铁塔各层静力稳定度季节特征(2002 年)
(a) 30 m 至地面; (b) 60~30 m, (c) 120~60 m

地强逆温现象(图 3(a)).

(2) 在城市冠层内, 夏季白天不稳定层结的持续时间约 9 h 左右, 最不稳定发生在午前 9~10 时左右; 冬季白天不稳定层结的持续时间约 5 h 左右, 最不稳定发生在午后 14 时左右(图 3(a)).

(3) 最值得注意的 30~60 m 层夜间温度层结的表现, 即夏季的温度层结比冬季的更稳定(图 3(b)). 为进一步说明这一现象, 利用公式^[10]

$$Rb = \frac{gz}{T} \frac{\theta - \theta_s}{U^2},$$

其中 g 是重力加速度, θ 和 θ_s 分别是 60, 30 m 处的位温, U 是 60 与 30 m 处平均风速差, T 是 60, 30 m 处气温平均值, z 是 30~60 m 之间的气层厚度, 计算整体里查孙

数(Bulk Richardson number), 并根据文献[11]稳定度分类法[11]确定该层的稳定度等级. 结果表明, 除中午前后的短时间内, 其他时间 30~60 m之间的气层的温度层结有季节性差异, 即夏季为弱稳定层结, 而冬季为弱不稳定层结.

夏季为弱稳定层结的结果特别值得注意. 从表象上看, 夏季 30~60 m这一层近似于等温层. 由于月坛铁塔周围建筑物的屋顶高度介于 30~60 m之间, 该气层处于城市冠层和城市摩擦副层之间的过渡带. 城市冠层上部的近似等温结构, 说明了屋顶的物理结构对夏季城市冠层的特殊影响. 由于夏季白天强烈的太阳辐射, 热能首先储存在建筑物的材料中(这可从早晨气温的缓慢升温过程看到), 夜晚再缓慢释放, 加上城市冠层顶部夜晚较强的动力湍流交换作用[1], 使城市冠层上部的气温混合均匀形成近似等温的结构, 形成温度层结的弱稳定结构. 这点对夜间城市冠层内污染物的扩散可能有一定的影响, 特别是无风或小风的天气条件下, 其作用可能更显著.

2.3 城市建筑屋顶对城市边界层热状态影响的季节差异

在 30~60 m层(介于城市冠层上部和城市摩擦副层之间)温度层结的季节性差异, 似乎还说明城市建筑屋顶对城市边界层大气热状态影响的季节差异. 典型的(或非城市的)近地面边界层的温度廓线的一个明显特征是, 夜间地面逆温层高度以上, 气温随高度增加呈单调递减的趋势. 从图 2 和 3 也可看出这样的整体趋势, 即不论冬夏 30 m以上的气温随高度增加呈单调递减, 但递减率有季节性的差异. 以 30~120 m间的气温递减率, 内插 60 m处的气温, 并与 60 m处实测的气温比较, 我们发现 60 m处实测气温与内插气温之差有显著的季节差异, 图 4 给出了 60 m处实测气温与内插气温之差的日变化特征. 从图 4 可见, 夏季 60 m处实测气温与内插气温之差为正值, 即实测气温高于内插气温; 冬季 60 m处实测气温与内插气温之差为负值, 即实测气温低于内插气温. 这种系统性的季节差异说明了城市建筑屋顶对城市边界层热状态影响的季节差异, 即夏季屋顶对城市摩擦副层起加热的作用, 而冬季起冷却的作用. 这与青藏高原对大气热状态的影响十分相似[12,13]. 值得注意的是, 夏季城市建筑屋顶对城市边界层热状态影响要比冬季显著, 夏季 60 m处实测气温与内插气温

之差的日平均值为 $(0.2 \pm 0.09)^\circ\text{C}$, 而冬季为 $(-0.1 \pm 0.04)^\circ\text{C}$.

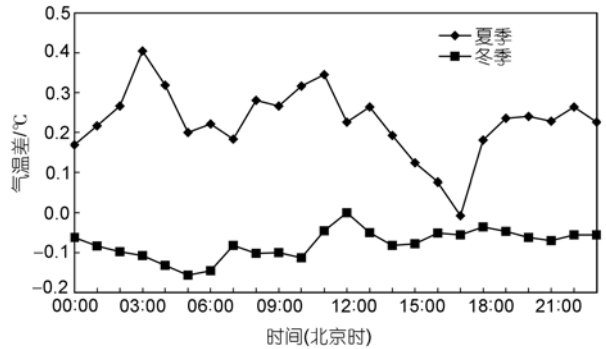


图 4 北京月坛铁塔 60 m 处实测与内插气温差日变化 (2002 年)

3 总结

以上利用北京月坛 180 m 铁塔 2 年的常规微气象资料, 分析了城市边界层低层(城市冠层和城市摩擦副层)温度及其层结的季节差异, 主要结论有: (1) 冬季地面气温日变化与上层(30, 60 和 120 m)不同步, 地面最高气温比上层提前 1~2 h 达到, 而其他季节的地面气温日变化与上层的同步. (2) 除中午前后为不稳定层结以外, 城市冠层与摩擦副层之间的静力层结特征有季节性变化, 即冬季为弱不稳定层结, 而夏季为弱稳定层结. (3) 城市建筑物屋顶对城市边界层热状态的影响有季节性的差异, 即夏季屋顶对城市摩擦副层起加热的作用, 而冬季起冷却的作用. 以上结论特别值得注意的是: 冬季白天城市边界层低层气温日变化的不同步性, 即各层日最高气温的达到时间的位相差, 说明观测场地的地理位置和空域指数(sky view factor)对观测结果的影响; 夏季城市冠层上部(屋顶)的弱稳定层结结构, 说明夏季在城市冠层之上存在一抑制冠层内污染物向上扩散的层结结构; 城市建筑物屋顶对边界层热状况影响的季节差异, 可能会随着城市地理位置和气候背景的不同而有变化, 也可能随屋顶高度而呈现出不同的结果. 鉴于此, 对城市边界层的研究有如下感想.

(1) 城市边界层长期观测的重要性. 由于城市边界层观测需要大量的资金和协调工作, 目前的城市边界层观测多属短期观测, 因此对城市边界层特征的季节性差异揭示得不够.

(2) 城市结构、城市的地理位置(或气候背景)对边界层结构的影响. 在与国外同类观测的对比中,

我们的结果也体现了城市结构对城市边界层结构的影响. 文献[14]指出了美国城市夜晚多出现边界层抬升逆温结构(An elevated nocturnal inversion), 而文献[15]指出了北欧城市夜晚多出现边界层贴地逆温结构(The stably stratified nocturnal inversion). 这些研究结果都说明了不同的城市结构、不同的气候背景下城市边界层结构具有不同的特征.

(3) 城市边界层观测站址的代表性问题及其观测结果的多样性. 由于现代城市的复杂性, 如多功能区结构, 不同的功能区必有其特殊的要素廓线和

交换特征. 再加上(1), (2)两点, 城市边界层观测站址的代表性问题及其观测结果的多样性是不可避免的.

(4) 城市边界层过程参数化的本质困难. 随着全球城市化的进展, 城市出现了区域化的倾向, 因此城市化可能会对区域气候甚至对全球气候产生影响. 为了利用数值模式对城市化的气候影响进行评估, 迫切需要城市边界层过程的参数化方案. 由于城市边界层特征的季节差异, 对城市结构和气候背景的依赖性等复杂因素的影响, 构造一个完备的城市边界层参数化方案成为一个巨大的挑战.

致谢 对参加观测的北京市气象局的同志以及提出宝贵建议的中国科学院大气物理研究所曲绍厚研究员, 特此一并致谢.

参考文献

- 1 Arnfield A J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int J Clim*, 2003, 23: 1—26[doi]
- 2 Fernando H J S, Lee S M, Anderson J, et al. Urban fluid mechanics: Air circulation and contaminant dispersion in cities. *Environ Fluid Mech*, 2001, 1: 107—164[doi]
- 3 Rotach M W, Vogt R, Bernhofer C, et al. BUBBLE-An urban boundary layer meteorology project. *Appl Clim*, 2005, 81: 231—261[doi]
- 4 Allwine J K, Shinn J H, Streit G E, et al. Overview of URBAN 2000. *Bull Am Met Soc*, 2002, 83: 521—536[doi]
- 5 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
- 6 徐祥德. 城市化环境大气污染模型动力学问题. *应用气象学报*, 2002, 13(特刊): 1—12
- 7 北京市气象局气候资料室. 北京气候志. 北京: 气象出版社, 1987
- 8 Kanda M, Moriwaki R, Kimoto Y. Temperature profiles within and above an urban canopy. *Boundary-layer Meteor*, 2005, 115: 499—506[doi]
- 9 王喜全, 王自发, 郭虎. 北京“城市热岛”效应现状及特征. *气候与环境研究*, 2006, 11(5): 627—636
- 10 Arya S P. *Introduction to Micrometeorology*. New York: Academic Press Inc, 1988
- 11 Pasquill F, Smith F R. *Atmospheric Diffusion*. 3rd ed. Ellis Horwood Limited, 1983
- 12 吴国雄, 刘新, 张琼, 等. 青藏高原抬升加热气候效应研究的新进展. *气候与环境研究*, 2002, 7(2): 184—200
- 13 赵平, 陈隆勋. 青藏高原大气热量源汇在海-地-气相互作用准4年振荡中的作用. *科学通报*, 2000, 45(15): 1666—1671
- 14 Bornstein R D. Currently used parameterizations in numerical models. *Workshop on Urban Boundary Layer Parameterization*. COST 715, Zurich, 200, May 24-25
- 15 Railo M, ed. *Urban Episodes. Problems and Action Plans*: Paris, Berlin, Helsinki, Turku, Iimansuojelu. Special Issue. 6