论文

北京城市地表能量平衡特征观测分析

苗世光^{①*}, 窦军霞^①, Fei CHEN^②, 李炬^①, 李爱国^③

① 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089;

② National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307-3000, USA;

③ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

* E-mail: sgmiao@ium.cn

收稿日期: 2011-08-05; 接受日期: 2012-03-27

公益性行业(气象)科研专项(编号: GYHY200906026, GYHY201106050)、国家自然科学基金项目(批准号: 41175015)和国家科技支撑计划课题(编号: 2008BAC37B04, 2006BAJ02A01)资助

摘要 本研究采用位于北京市北三环与北四环之间的 325 m 气象塔 47, 140, 280 m 三层高度上 2009 年 7 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日一年的涡动相关观测资料, 分析了该区域城市复杂下垫面的地表能量平衡特征. 研究表明: (1) 北京 325 m 气象塔的观测结果代表了处在暖温带半湿润大陆性季风气候区的中国城市所特有的地表能量平衡特征, 即: 夏季炎热多雨、冬季寒冷干燥, 造成夏季波恩比最小, 秋季次之, 冬季最大. 140 m 高度上晴天条件下, 春夏秋冬四季白天波恩比分别为 2.86, 0.82, 1.17, 4.16. (2) 140 m 高度基本处于常值通量层. 该层上, 正午前后的反照率夏季约为 0.10, 春、秋季约为 0.12, 冬季约为 0.14; 白天储热在净辐射中所占比例夏天最小、冬天最大, 分别为 0.51 和 0.66; 白天感热、潜热、储热占净辐射比例的年均值, 晴天时分别为 0.25, 0.16 和 0.59, 多云时分别为 0.33, 0.19 和 0.48. (3) 晴天的夜间, 各季节感热均接近于零, 而潜热均大于零; 多云时, 冬季夜间的感热略大于潜热. 可推测: 该部分夜间向上的热通量主要是由人类活动所释放, 人为热在夏季以潜热为主, 冬季则潜热和感热同等重要.

关键词城市地表能量平衡
铁塔观测
涡动相关
波恩比
人为热

城市下垫面对大气的影响是当前边界层研究和气候研究共同关注的一个热点问题. 城市的出现和扩大, 使得密集建筑物取代了自然的地表面, 改变了地表能量平衡和边界层结构特征, 形成了城市热岛等独特的城市气候特征, 并导致大气环境的恶化, 直接影响人们的日常生活^[1].

近年来, 国际上陆续开展了一些城市地表能量平衡和边界层结构的研究计划, 如法国的 UBL/CLUESCOMPTE 计划^[2]、瑞士的 BUBBLE 计划^[3]和美国的 Joint Urban 2003 计划^[4]等. 这些研究表明, 由于城

市结构和气候条件的不同, 一个城市内部及各城市间的城市边界层和城市气候特征均有明显不同, 因此需要针对不同城市开展研究.

刘辉志和洪钟祥^[5]研究了北京城市下垫面边界层湍流统计特征. 徐祥德等^[6]开展了 BECAPEX 科学试验, 揭示了北京城市污染“空气穹隆”大气化学结构特征及其变化规律. 徐阳阳等^[7]研究了北京城市化发展对大气边界层特性的影响. 王成刚等^[8]分析了城市水泥下垫面的能量平衡特征. 王新平等^[9]分析了夏季北京城市下垫面的湍流通量, 结果表明: 夏季晴好

英文引用格式: Miao S G, Dou J X, Chen F, et al. Analysis of observations on the urban surface energy balance in Beijing. Sci China Earth Sci, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4411-6

天气情况下, 北京城市下垫面能量输送以感热为主. 然而, 对北京城市下垫面地表能量平衡不同季节日变化特征的观测研究尚有待开展.

本文采用 2009 年 7 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日共 365 天北京 325 m 气象塔上的 3 层地表能量平衡通量观测资料, 分析了该地区地表能量平衡随高度和时间的变化特征, 并与其他城市的观测结果进行了对比分析.

1 北京 325 m 气象塔及观测实验方案

1979 年建成投入使用的中国科学院 325 m 高气象与环境观测塔(以下简称“北京 325 m 气象塔”), 位于北京德胜门外 2.7 km 处的元大都遗址上. 塔上设有 15 层平台, 安装有多种测试仪器, 可全天候、连续、同步遥测获取大气近地面边界层 15 个层次的资料, 包括风速、风向、温度和相对湿度等基本气象要素. 在距离塔基 40 m 处的东西南北 4 个方向, 分别建设了 4 栋小楼及其配套设施, 用于传输、处理塔上仪器获得的信息. 这些信息通过各种形式的开放网络间的连接和传输, 实现数据共享, 在监测、研究北京地区的环境和气候变化方面发挥了重要作用^[10].

在相关项目的支持下, 通过多单位协作等方式, 在北京 325 m 气象塔上形成了如表 1 所示的城市地表能量平衡观测方案. 即, 47, 140, 280 m 共 3 层通量观测. 3 套辐射仪器均为新出厂, 在安装之前做了平行观测比对, 差别在 2% 以内^[11]. 通过数据采集器(CR5000, Campbell, USA)采集并按 30 min 计算平均值.

城市地表能量平衡方程为

$$Q^* + Q_F = Q_h + Q_e + Q_s + Q_A.$$

上式中, 从左至右各项依次为净辐射、人为热、感热、

潜热、储热、平流热. Q_F 可以通过能源消耗普查、建筑物能量模式和交通系统模式计算等方式获得. 这里由于没有精确的能源消耗和交通流量等数据, 暂时略去此项. 略去 Q_A 后, 储热项即为 $Q^* - Q_h - Q_e$. 下面的分析中均用这种剩余项的方法来计算储热项.

王新平等^[9]的印痕(footprint)分析结果表明: 中性稳定条件下, 47, 120 和 280 m 高度处测量通量的 90% 分别来自上风方向上最近的 1.9, 9.4 和 31 km 的范围内. 因此, 由北京市 1:2000 比例尺地形图矢量数据, 计算了 325 m 气象塔周边用地和建筑物特征参数(见表 2). 在局地尺度上(4 km×4 km, 约为 47 m 高度处测量通量的印痕范围), 铁塔东南、西南和西北方向 500 m 之内均有高度在 50 m 以上的高层建筑物, 该区域充分体现了城市下垫面高度非均匀的特征. 在略大一些的尺度上(20 km×20 km, 约为 140 m 高度处测量通量的印痕范围), 铁塔周边 20 km×20 km 范围内的平均建筑物高度(18.3 m)与 4 km×4 km 范围内的值(19.1 m)非常接近, 仅差 0.8 m. 可见该区域城市下垫面的局地非均匀性在略大一些的尺度上是均匀的. 彭珍和胡非^[12]研究表明, 气象塔 47 m 以下的观测反映的是城市冠层的流场特征, 城市冠层厚度约在 47~63 m 之间. 根据粗糙子层(Roughness Sublayer)厚度约为建筑物高度的 2~3 倍^[13]估计, 47 m 高度在粗糙子层之内, 140 m 估计在常值通量层(Constant Flux Layer)之内.

2 观测期间的气象条件及数据筛选

本项研究中所用观测资料时间为 2009 年 7 月 1 日至 2010 年 6 月 30 日, 共 365 天.

距离北京 325 m 气象塔最近的 B 类自动气象站

表 1 北京 325 m 气象塔湍流通量观测系统

物理量	仪器名称	仪器型号	产地/厂家	采样率	观测高度
三维风速和温度	超声风速温度仪	CSAT3	美国 CAMPBELL 公司	10 Hz	47, 140, 280 m
水汽/二氧化碳	CO ₂ /H ₂ O 分析仪	LI-7500	美国 LI-COR 公司		
向上/向下的长波/短波辐射	四分量辐射表	CNR1	荷兰 KIPP&ZONEN 公司	1/min	

表 2 北京 325 m 气象塔周边用地和建筑物特征参数

		4 km×4 km	20 km×20 km	60 km×60 km
平均建筑物高度(m)		19.1	18.3	/
不透水表面面积百分比(%)	建筑物	68.3	64.6	24.1
	道路、停车场等	20.0	13.7	
透水表面面积百分比(%)	草地、树木等	11.7	21.7	75.9

(不符合国家一般气象站规范要求, 但对观测要素无直接或间接影响)为奥体中心自动站(站号: A1017)¹⁾. 该站观测到的气象要素日均值的年变化如图 1 所示. 由于该站无融雪功能, 无法观测冬季降雪, 因此冬季降水量来自附近的朝阳站(站号: 54433). 由图 1 可见, 北京的气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 即: 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥. 观测期间的年降雨量为 579.8 mm, 与北京的多年平均降雨量接近^[14]. 降水季节分配很不均匀, 全年降水的 64%(371.1 mm)集中在夏季, 7~8 月常有暴雨.

由于有降水时涡动相关系统无法正常计算出通量值, 因此首先将有降水的天去掉. 对经过延迟时间校正、超声虚温校正和 WPL 校正^[15]的 30 min 平均观测数据进行筛选, 即: 剔除满足以下 3 个条件之一的数据:

摩擦速度 $u^* < 0.1 \text{ m s}^{-1}$;

水蒸汽密度: < 0 或 $> 40 \text{ g m}^{-3}$;

水蒸汽密度的方差 $\sigma_q > 0.2 \text{ g m}^{-3}$, 并且潜热通量 $Q_e > 400$ 或 $< -100 \text{ W m}^{-2}$ ^[16].

筛选后的数据在极值以及各时次的统计量(均值、方差)等方面更符合物理上的合理范围(阈值), 使观测的不确定性足够小并可与其他站点、时段、以及理论模式的分析结果做有意义的对比. 参照气象上常用的按照月份划分四季的方法, 将数据分为春夏秋冬四季(分别对应 3~5, 6~8, 9~11, 12~2 月). 在此基础上, 根据日总短波辐射与大气顶接收到的短波辐射的比值 S_T , 将每个季节分为晴天($S_T > 0.8$)和多云($0.2 \leq S_T < 0.8$)两种类型的个例, 分别计算地表能量平衡各分量的变化特征.

3 地表能量平衡各分量白天统计量的变化特征

47, 140 和 280 m 三层高度上观测到的春夏秋冬四季晴天和多云条件下地表能量平衡各分量白天累计值及日累计值的平均值及其比值列于表 3. 这里白天定义为 $Q^* > 0$. 为了便于对比, 将其分别绘于图 2~4.

3.1 晴天

(1) 摩擦速度 u^* : 春季最大, 冬季次之, 夏季最

小. u^* 季节变化与风速的季节变化相对应. 三个高度上: 47 m 值略大, 上面两层非常接近(尤其是白天的平均值). 这与风廓线分析^[12]及建筑物高度分析的结论是一致的, 即: 47 m 处于粗糙子层之内, 受建筑物影响较明显, 湍流较强. 140 m 基本处于常值通量层.

(2) 净辐射 Q^* : 夏季最大, 春季次之, 冬季最小. 随高度变化不明显.

(3) 感热通量 Q_h : 春季及夏季较大, 秋季及冬季较小. 春季 Q_h 随高度递减比较明显, 夏季 140 m 最大, 秋季及冬季随高度略有递减.

(4) 潜热通量 Q_e : 夏季最大, 春季与秋季相当, 冬季最小. Q_e 随高度增加而减小.

(5) 储热 Q_s : 夏季最大, 春季次之, 冬季最小. Q_s 随高度增加而增大. 这主要是由于各测量高度之间空气的储热所致.

(6) 波恩比 Q_h/Q_e : 夏季及秋季最小, 在 1 左右; 春季在 2~3 之间; 冬季最大, 达 4.16. 这主要是受降水及潜热的影响, 夏季多雨, 潜热较大, 因此波恩比较小; 冬季干燥, 潜热很小, 因此波恩比较大.

图 1 北京 325 m 气象塔附近的奥体中心自动站(站号: A1017)观测到的气象要素日均值的年变化情况

t : 气温($^{\circ}\text{C}$); p : 气压(hPa); q : 比湿(g kg^{-1}); ws : 风速(m s^{-1}); r : 日降水量(mm)

1) 北京市气象局观测与预报处. 区域自动站观测环境分类表. 2009 年 8 月

图 2 三层高度不同条件下的平均摩擦速度对比

表 3 三层高度上观测到的不同条件下地表能量平衡各分量的平均值及其比值

高度 (m)	季 节	降水量 (mm)	S_T	ND	白天($Q^* > 0$)										u^*	全天							
					u^*	能量通量 (MJ m^{-2})				比例				能量通量 (MJ m^{-2})				比例					
					(m s^{-1})	Q^*	Qh	Qe	Qs	Qh/Qe	Qh/Q^*	Qe/Q^*	Qs/Q^*	(ms^{-1})		Q^*	Qh	Qe	Qs	Qh/Qe	Qh/Q^*	Qe/Q^*	Qs/Q^*
47	春	90.6	0.8~1.0	43	0.67	14.75	4.93	2.33	7.50	2.12	0.33	0.16	0.51	0.56	11.59	4.83	3.07	3.69	1.57	0.42	0.27	0.32	
		[25]	0.2~0.8	22	0.46	7.50	2.88	1.82	2.80	1.59	0.38	0.24	0.37	0.41	5.61	3.06	2.49	0.06	1.23	0.55	0.44	0.01	
	夏	371.1	0.8~1.0	14	0.43	17.97	3.73	5.66	8.57	0.66	0.21	0.32	0.48	0.39	15.55	3.60	6.33	5.62	0.57	0.23	0.41	0.36	
		[40]	0.2~0.8	38	0.41	11.71	3.00	4.26	4.45	0.70	0.26	0.36	0.38	0.37	9.79	2.97	5.05	1.77	0.59	0.30	0.52	0.18	
	秋	87.4	0.8~1.0	36	0.47	8.64	2.22	2.24	4.18	0.99	0.26	0.26	0.48	0.38	5.03	1.69	2.89	0.46	0.58	0.34	0.57	0.09	
		[16]	0.2~0.8	21	0.36	5.75	1.70	2.04	2.01	0.83	0.30	0.35	0.35	0.34	3.53	1.70	2.76	-0.92	0.62	0.48	0.78	-0.26	
	冬	30.7	0.8~1.0	19	0.55	5.20	1.98	0.57	2.66	3.50	0.38	0.11	0.51	0.41	1.44	1.87	1.04	-1.46	1.80	1.29	0.72	-1.02	
		[6]	0.2~0.8	6	0.38	2.22	1.06	0.31	0.85	3.38	0.48	0.14	0.38	0.37	0.06	1.51	0.67	-2.12	2.25	23.39	10.40	-32.8	
	140	春	90.6	0.8~1.0	40	0.63	14.26	4.12	1.44	8.70	2.86	0.29	0.10	0.61	0.52	10.99	4.09	2.10	4.80	1.95	0.37	0.19	0.44
			[25]	0.2~0.8	26	0.45	7.86	2.66	1.24	3.96	2.14	0.34	0.16	0.50	0.38	5.77	2.78	1.76	1.23	1.58	0.48	0.31	0.21
		夏	371.1	0.8~1.0	13	0.41	17.99	4.01	4.87	9.10	0.82	0.22	0.27	0.51	0.35	15.41	4.11	5.71	5.58	0.72	0.27	0.37	0.36
			[40]	0.2~0.8	36	0.39	11.56	3.18	3.18	5.20	1.00	0.28	0.28	0.45	0.35	9.56	3.32	3.95	2.28	0.84	0.35	0.41	0.24
秋		87.4	0.8~1.0	34	0.43	8.01	1.83	1.57	4.61	1.17	0.23	0.20	0.58	0.35	4.24	1.57	2.06	0.61	0.76	0.37	0.49	0.14	
		[16]	0.2~0.8	15	0.37	4.98	1.39	1.11	2.48	1.25	0.28	0.22	0.50	0.34	2.43	1.54	1.63	-0.74	0.94	0.63	0.67	-0.31	
冬		30.7	0.8~1.0	37	0.46	5.54	1.53	0.37	3.65	4.16	0.28	0.07	0.66	0.38	1.65	1.62	0.75	-0.72	2.16	0.98	0.46	-0.44	
		[6]	0.2~0.8	14	0.47	2.56	1.04	0.29	1.24	3.62	0.41	0.11	0.48	0.41	-0.07	1.50	0.64	-2.21	2.34	-22.39	-9.58	32.96	
280		春	90.6	0.8~1.0	37	0.63	13.89	3.23	1.52	9.15	2.13	0.23	0.11	0.66	0.52	10.56	3.01	2.03	5.52	1.49	0.29	0.19	0.52
			[25]	0.2~0.8	26	0.40	8.51	1.90	1.23	5.38	1.54	0.22	0.14	0.63	0.37	6.32	1.69	1.92	2.71	0.88	0.27	0.30	0.43
		夏	371.1	0.8~1.0	14	0.41	17.47	3.26	3.23	10.97	1.01	0.19	0.19	0.63	0.36	14.76	3.11	4.09	7.55	0.76	0.21	0.28	0.51
			[40]	0.2~0.8	38	0.36	11.41	2.55	2.38	6.48	1.07	0.22	0.21	0.57	0.31	9.30	2.46	3.24	3.60	0.76	0.26	0.35	0.39
	秋	87.4	0.8~1.0	34	0.43	7.54	1.44	1.17	4.93	1.23	0.19	0.16	0.65	0.38	3.71	1.07	1.56	1.08	0.69	0.29	0.42	0.29	
		[16]	0.2~0.8	22	0.34	5.49	1.14	0.80	3.55	1.42	0.21	0.15	0.65	0.32	3.06	1.04	1.39	0.64	0.75	0.34	0.45	0.21	
	冬	30.7	0.8~1.0	37	0.47	5.58	1.22	0.31	4.05	3.92	0.22	0.06	0.73	0.41	1.67	1.04	0.51	0.11	2.04	0.62	0.31	0.07	
		[6]	0.2~0.8	14	0.47	2.57	0.65	0.17	1.75	3.77	0.25	0.07	0.68	0.43	-0.08	0.61	0.41	-1.10	1.48	-8.14	-5.49	14.63	

- (7) Qh/Q^* : 季节变化不明显, 随高度略有减小. 140 m 年均值为 0.25.
- (8) Qe/Q^* : 夏季较大, 秋季次之. 随高度略有减小. 140 m 年均值为 0.16.
- (9) Qs/Q^* : 季节变化不明显, 随高度略有增加. 140 m 年均值为 0.59.

3.2 多云

与晴天相比, 多云时的 u^* 较小(冬季 140 和 280 m 除外). 与晴天不同的是, 多云时的 u^* 秋季最小, 这与秋季多云时风速最小有关. 多云时能量平衡各分量均比晴天小, 随高度的变化亦比晴天小. 多云时 Qh/Q^* 和 Qe/Q^* 比晴天大, Qs/Q^* 比晴天小, 140 m 年

图3 三层高度不同条件下地表能量平衡各分量平均值对比

均值分别为: 0.33, 0.19 和 0.48.

3.3 波恩比与风向的关系

能量通量的印痕随风向的变化而变化, 由此可以推断代表感热通量与潜热通量比值的波恩比可能与风向相关. 由图 5 可见, 夏季时波恩比随风向变化较小, 其他季节随风向变化略大. 这主要是由于夏季降水较多, 潜热较大, 波恩比较小, 并且各方位上印痕特征的相对差异不大. 不同高度比较可见, 47 m 高度上波恩比随风向的变化最小, 280 m 高度上随风向的变化最大. 这一方面是由于 47 m 的印痕范围较小, 各方位上印痕特征的差异亦较小; 另一方面也反映了 47 m 处在粗糙子层内, 湍流混合较均匀, 因此波恩比随风向的变化不大.

图4 三层高度不同条件下地表能量平衡各分量平均值的比值对比

4 地表能量平衡各分量全天统计量的变化特征

4.1 晴天

与白天的均值相比, 晴天时 u^* 全天的均值较小, 主要是由于夜间 u^* 较小所致. 由于夜间 Q^* 为负值, 因此 Q^* 全天的均值比白天的均值小. 由 Qh 全天的均值比白天均值小(夏季 140 m 略大)可见, 夜间感热通量基本为一很小的负值, 即夜间大气层基本处于稳定状态. Qe 全天的均值明显大于白天的均值, 夏季最为显著, 可见夜间一直有向上的潜热通量. 由于夜间自然下垫面上的潜热通量基本为零(如果有露水则为负值), 因此可推测该部分潜热是由人类活动所释放, 如空调系统、交通等. 由此可见, 该区域夏季夜间的人为热排放以潜热为主, 而非传统的感热.

图 5 不同季节波恩比随风向的变化
(a) 47 m; (b) 140 m; (c) 280 m

夜间城市冠层的储热向大气释放, 因此 Q_s 全天的均值比白天的均值小. 47 m 和 140 m 冬季的 $Q_s < 0$. 可见, 平均而言冬季 140 m 以下向大气释放储热, 温度降低. 波恩比的全天均值比白天均值小, 变化趋势基本相同. 全天的 Q_h/Q^* 和 Q_e/Q^* 比白天的大, Q_s/Q^* 比白天的小.

4.2 多云

多云时能量平衡各分量均比晴天时小, 随高度的变化亦比晴天小. 冬季 140 和 280 m 净辐射均小于 0, 可见冬季亦通过净辐射向外释放能量. 秋季 47 和 140 m, 以及冬季 280 m 的 Q_s 均小于 0, 说明多云时城市冠层向大气释放的储热比晴天释放的多. 多云时 Q_s/Q^* 比晴天小, Q_h/Q^* 和 Q_e/Q^* 比晴天大.

5 地表能量平衡各分量的日变化特征

三个高度上地表能量平衡各分量的日变化特征非常接近, 这与王新平等^[9]于 2003 年 8 月 13~26 日在 47, 120 和 280 m 三层高度上的测量结果一致. 这里以 140 m 观测结果为例(图 6), 对其进行分析, 并对三个高度上差别较明显的物理量进行比较分析(图 7).

图 6 140 m 高度地表能量平衡各分量的日变化特征

5.1 晴天(140 m)

白天, 净辐射在各个季节均主要分配给储热. 储热的日最大值约为感热的两倍. 潜热在夏季与感热量级相当, 秋季比感热略小, 春季及冬季明显小于感热. 夜间, 感热接近于零, 潜热在各个季节均大于零. 如前所述, 可推测该部分潜热是由人类活动所释放.

各分量在白天出现最大值的时间有所不同: 净辐射在正午最大; 感热约在 14 时最大, 与最高温度出现的时间基本相同; 潜热最大值的出现时间与感热接近; 储热则约在正午前后(即 11~12 时)最大, 此时湍流热通量较小, 净辐射的大部分都供给储热.

5.2 多云(140 m)

由于地表接收的短波辐射减少, 能量平衡各分量均减小. 它们的相对大小及最大值出现时间与晴

图7 三层高度夏季((a), (c), (e), (g)~(j))和冬季((b), (d), (f))晴天条件下各物理量日变化对比

(a), (b) 夏季和冬季反照率; (c), (d) 夏季和冬季地表辐射温度; (e), (f) 夏季和冬季水汽密度; (g) 夏季感热通量; (h) 夏季潜热通量; (i) 夏季储热; (j) 夏季摩擦速度

天时类似(秋冬季储热最大值的出现时间与净辐射相同)。春夏秋三个季节夜间的潜热比感热大, 与晴天时相同。而冬季, 夜间的感热略大于潜热(由表3亦可看出此特征)。可见, 人为热在夏季夜间以潜热为主(交通和空调系统等), 冬季则潜热(交通等)和感热(取暖等)同等重要。

5.3 三层高度比较

三层高度上的反照率除在夏季的正午前后基本相同外, 其他时间均为280 m最大, 47 m最小。由于47 m印痕内的建筑物密度和平均高度较大(表2), 经建筑物表面的多次反射, 短波辐射被吸收较多, 因此反照率较小。140 m上的反照率夏季约为0.10, 春、秋

季约为0.12, 冬季约为0.14, 比常用的城市下垫面反照率0.15略小一些^[17], 与江玉华等^[18]2004年10~12月在塔上280 m处测量的晴天城市地表反照率0.12较一致。反照率日变化的非对称性与铁塔周边建筑物的非均匀分布有关。47 m向下短波辐射在冬季较140和280 m偏小约8%(正午时差值可达 $\sim 40 \text{ W m}^{-2}$), 其他季节三个高度上差别不明显(图略), 比江玉华等^[18]研究得出的晴好天气下2 m总辐射比280 m衰减11.2%略小一些。

夏季47 m上计算得出的辐射温度 TR (计算公式为 $TR = \left[\frac{ULR - DLR \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon \cdot \sigma} \right]^{1/4} - 273.15$, 这里 ULR 和 DLR 分别为向上和向下长波辐射, 地表发射率取为 $\varepsilon=0.95$, 斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)日变化幅度最大, 即白天最高、夜间最低。140 m的 TR 上午与47 m较接近, 下午至上半夜最高, 下半夜与280 m较接近。冬季则47 m的 TR 一直最高, 140 m与280 m较接近。这与近地层稳定度及湍流热通量的日变化相对应: 夏季上午47 m的 Q_h 最大, 下午至上半夜140 m最大。

水汽密度夏季随高度递减, 冬季随高度递增。这是由于夏季多雨, 水汽来源于地面; 而冬季干燥, 水汽来自于输送。夏季 Q_e 在白天亦是随高度递减, 夜间则差别不太明显。

由于不同高度之间空气的储热, 三层高度上 Q_s 的绝对值随高度递增, 正午前后差别较明显, 夜间差别较小。白天边界层内混合较均匀, 三个高度的 u^* 差别较小; 夜间则差别略大。

6 讨论与结论

本文采用2009年7月1日至2010年6月30日共365天北京325 m气象塔上的3层涡动相关观测资料, 研究了该地区地表能量平衡随高度和时间的变化特征。初步分析表明:

47 m高度上摩擦速度较大, 湍流较强, 受建筑物影响较明显。结合风廓线分析及铁塔周边的建筑物高度信息可知, 47 m高度处于粗糙子层内, 140 m高度基本处于常值通量层。

3层高度上的反照率除在夏季正午前后基本相同外, 其他时间均为280 m最大, 47 m最小。140 m上正午前后的反照率夏季约为0.10, 春、秋季约为0.12,

冬季约为 0.14, 比常用的城市下垫面反照率 0.15 略小一些. 47m 向下短波辐射在冬季较 140 和 280 m 偏小约 8%(正午时差值可达 $\sim 40 \text{ W m}^{-2}$), 其他季节三个高度上差别不明显. 三个高度上地表能量平衡各分量的日变化特征非常类似.

140 m 高度观测分析表明: 白天储热在净辐射中所占比例夏天最小、冬天最大, 分别为 0.51 和 0.66; 白天感热、潜热、储热占净辐射比例的年均值, 晴天时分别为 0.25, 0.16 和 0.59, 多云时分别为 0.33, 0.19 和 0.48.

夏季波恩比最小, 秋季次之, 冬季最大. 140 m 高度上晴天条件下, 春夏秋冬四季白天波恩比分别为 2.86, 0.82, 1.17, 4.16.

晴天的夜间, 各季节感热均接近于零, 而潜热均大于零. 多云时, 冬季夜间的感热略大于潜热. 可推测: 该部分夜间向上的热通量主要是由人类活动所释放. 人为热在夏季以潜热为主, 冬季则潜热和感热

同等重要.

Grimmond 等^[16]研究表明: 湍流热通量的分配, 尤其是波恩比, 与地表特性(如绿地覆盖率)密切相关. 将本文研究与亚洲、欧洲、美洲城市的观测结果对比分析可见(表 4): 城市地表能量平衡特征主要受气候条件的影响, 其次受地表特性影响. 瑞士的巴塞尔和法国的马赛为地中海气候, 夏季炎热干燥、冬季温和多雨; 因此与夏季相比, 冬季潜热在净辐射中所占比例更大、波恩比更小. 日本的东京和 COSMO 实验区属于温带海洋性季风气候, 夏季雨水较多, 因此夏季潜热在净辐射中所占比例更大、波恩比更小. 北京为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 即: 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥. 与绿地覆盖率较接近的日本东京的观测结果相比, 本文研究的潜热在净辐射中所占比例夏季与之接近、冬季更小, 因此波恩比夏季更小、冬季更大.

各城市中, 本文研究的储热在净辐射中所占比例

表 4 各城市白天地表能量平衡各分量的平均值及其比值比较

城市	绿地百分比(%)	建筑物高度(m)	观测高度(m)	观测时段	降水日频率(%)	能量通量 (MJ m^{-2})				比例				参考文献
						Q^*	Q_h	Q_e	Q_s	Q_h/Q^*	Q_e/Q^*	Q_s/Q^*	Q_h/Q_e	
加拿大, 温哥华 (49°16'N, 123°06'W)	4.0	8.6	/	1992 年 8 月	/	13.95	5.90	1.34	6.71	0.42	0.10	0.48	4.42	[20]
法国, 马赛 (43°17'N, 5°23'E)	11.0, 14.0 ^{a)}	15.6	43.9, 34.6	2001 年 6~7 月	5.0	17.17	11.79	2.76	4.87	0.69	0.16	0.28	4.27	[16]
瑞士, 巴塞尔 (47°34'N, 7°36'E)	16.0	14.6	32.0	2002 年 7~8 月	/	/	/	/	/	0.49	0.20	0.36	2.50	[21]
日本, COSMO 实验 (39°04'N, 139°07'E)	0.0	1.5	3.0	2006 年 7 月	45.2	17.79	5.49	2.89	9.41	0.31	0.16	0.53	1.90	[22]
美国, 图森 (32°07'N, 110°56'W)	42.4	~3.0	25.6	1990 年 6 月	13.1	16.27	7.54	4.11	4.62	0.47	0.25	0.28	1.83	[23]
日本, 东京 (35°34'N, 139°41'E)	29.1	7.3	29.0	2001 年 7 月	/	18.94	9.37	5.28	4.96	0.49	0.28	0.26	1.77	[24]
美国, 洛杉矶 (34°08'N, 118°03'W)	40.8	5.2	30.5	1993 年 7~8 月	4.3	16.40	5.74	4.12	6.54	0.35	0.25	0.40	1.40	[23]
美国, 萨克拉曼多 (38°39'N, 121°30'W)	42.2	~3.0	29.0	1991 年 8 月	7.6	12.65	5.19	3.79	3.67	0.41	0.30	0.29	1.37	[23]
中国, 北京 (39°58'N, 116°42'E)	21.7	18.3	140.0	2009 年 7~8 月, 2010 年 6 月	33.3	17.99	4.01	4.87	9.10	0.22	0.27	0.51	0.82	本文
美国, 芝加哥 (41°57'N, 87°48'W)	44.2	5.2	18.0	1992 年 7 月	59.8	17.20	5.58	7.11	4.51	0.32	0.41	0.26	0.78	[23]
墨西哥, 墨西哥城 (19°25'N, 99°10'W)	1.0	18.4	28.0	1993 年 12 月	0.0	8.98	3.40	0.39	5.20	0.38	0.04	0.58	8.80	[25]
中国, 北京 (39°58'N, 116°42'E)	21.7	18.3	140.0	2009 年 12 月 ~2010 年 2 月	5.0	5.54	1.53	0.37	3.65	0.28	0.07	0.66	4.16	本文
日本, 东京 (35°34'N, 139°41'E)	29.1	7.3	29.0	2001 年 12 月	/	6.67	2.30	0.74	4.14	0.35	0.11	0.62	3.13	[24]
日本, COSMO 实验 (39°04'N, 139°07'E)	0.0	1.5	3.0	2006 年 12 月	16.1	7.02	1.79	0.78	4.45	0.25	0.11	0.63	2.29	[22]
瑞士, 巴塞尔 (47°34'N, 7°36'E)	16.0	14.6	32.0	2001 年 12 月~ 2002 年 2 月	/	/	/	/	/	0.56	0.28	0.34	2.01	[21]

a) 塔体可伸缩. 两个绿化覆盖率分别对应于塔体的两种观测高度

例夏季为0.51, 仅次于COSMO试验的0.53, 冬季为最大(0.66)。这主要是由于本项观测是在北京城市核心区的高度非均匀城市下垫面上进行的, 建筑物较高, 城市冠层较厚, 因此储热在净辐射中所占比例较大。

应当指出, 由于本研究中略去人为热和水平平流项, 采用剩余项的方法来计算储热项, 另外涡动相关观测可能会低估感热通量和潜热通量^[19], 这些都

给储热项的估算带来误差。基于大涡模拟方法或拉格朗日随机粒子扩散模式的北京城市地表通量印痕分析工作亟待开展^[26]。本文仅分析了北京城区一个地点的观测, 下一步将选择不同绿地覆盖率、不同城市功能区开展观测分析, 研究与中国城市特征及气候特征相对应的城市地表能量平衡特征, 以此改进城市陆面模式, 提高中国的城市精细气象预报水平。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所贾京京、中国气象局北京城市气象研究所熊斌等在观测、资料等方面的帮助。

参考文献

- 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技术体系的研究与应用. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(增刊): 145-155
- Mestayer P G, Durand P, Augustin P, et al. The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE): Set-up and first results. *Bound-Layer Meteorol*, 2005, 114: 315-365
- Rotach M W, Vogt R, Bernhofer C, et al. BUBBLE—An urban boundary layer project. *Theor Appl Climatol*, 2005, 81: 231-261
- Allwine K J, Flaherty J E. Joint Urban 2003: Study overview and instrument locations. Technical Report, Pacific Northwest National Laboratory, United States Department of Energy. 2006. http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15967.pdf
- 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: 241-248
- 徐祥德, 丁国安, 卞林根, 等. BECAPEX 科学试验城市建筑群落边界层大气环境特征及其影响. *气象学报*, 2004, 62: 663-671
- 徐阳阳, 刘树华, 胡非, 等. 北京城市化发展对大气边界层特性的影响. *大气科学*, 2009, 33: 859-867
- 王成刚, 孙鉴宁, 胡非, 等. 城市水泥下垫面能量平衡特征的观测与分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43: 270-279
- 王新平, 王琳琳, 高志球, 等. 夏季北京城市大气边界层湍流通量的塔层观测. *气候与环境研究*, 2008, 13: 629-638
- 王静. 创新中国的 60 项科学成就: 325 米观测塔的贡献. *科学时报*, 2009-08-24, http://www.edu.cn/60rd_8419/20090824/t20090824_401828.shtml
- 王正兴, 江玉华, 李炬, 等. 在北京气象铁塔上测量城市边界层辐射的研究. *高原气象*, 2009, 28: 20-27
- 彭珍, 胡非. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究. *地球物理学报*, 2006, 49: 1608-1615
- Roth M. Review of atmospheric turbulence over cities. *Q J R Meteorol Soc*, 2000, 126: 941-990
- 北京市气象局气候资料室. 北京气候志. 北京: 北京出版社, 1985
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Q J R Meteorol Soc*, 1980, 106: 85-100
- Grimmond C S B, Salmond J A, Oke T R, et al. Flux and turbulence measurements at a densely built-up site in Marseille: Heat, mass (water and carbon dioxide), and momentum. *J Geophys Res*, 2004, 109: D24101, doi: 10.1029/2004JD004936
- 江晓燕, 张朝林, 高华, 等. 城市下垫面反照率变化对北京市热岛过程的影响——一个案例分析. *气象学报*, 2007, 65: 301-307
- 江玉华, 王强, 张宏升, 等. 在北京气象塔上测量城市边界层辐射特征. *高原气象*, 2010, 29: 918-928
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, 2002, 113: 223-243
- Grimmond C S B, Oke T R. Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J Appl Meteorol*, 1999, 38: 922-940
- Christen A, Vogt R. Energy and radiation balance of a central European city. *Int J Climatol*, 2004, 24: 1395-1421
- Kawai T, Kanda M. Urban energy balance obtained from the comprehensive outdoor scale model experiment. Part I: Basic features of the surface energy balance. *J Appl Meteorol Clim*, 2010, 49: 1341-1359
- Grimmond C S B, Oke T R. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *J Appl Meteorol*, 1995, 34: 873-889
- Moriwaki R, Kanda M. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *J Appl Meteorol*, 2004, 43: 1700-1710
- Oke T R, Spronken-Smith R A, Jauregui E, et al. The energy balance of central Mexico city during the dry season. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3919-3930
- 蔡旭晖. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展. *大气科学*, 2008, 32: 123-132