

# 城市公园绿地水、热与 CO<sub>2</sub> 通量观测与分析

王修信<sup>1 2 3 4</sup> ,朱启疆<sup>1 2 3</sup> ,陈声海<sup>1 2 3</sup> ,孙 睿<sup>1 2 3</sup> ,杨胜天<sup>1 2 3</sup> ,  
胡玉梅<sup>1 2 3</sup> ,刘 馨<sup>1 2 3</sup> ,高凤飞<sup>1 2 3</sup>

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心 ,北京 100875 ;

2. 环境遥感与数字城市北京市重点实验室 ,北京 100875 3. 遥感科学国家重点实验室 ,北京 100875 ;

4. 广西师范大学 计算机科学与信息工程学院 ,广西 桂林 541004 )

**摘要** 水、热和 CO<sub>2</sub> 通量是评价城市绿地生态效益的重要指标。在北京海淀公园中部和边缘架设涡度相关系统 ,连续观测和定量研究城市公园绿地影响下的通量变化特征。结果表明 ,公园绿地所获得的净辐射在植被生长季节大部分用于植被的蒸散作用 ,潜热大于显热 ,而在植被非生长季节大部分用于显热 ,潜热数值非常小。晴天显热与潜热的比值在春季随着植被枝叶的生长逐渐减少 ,到夏季达到最小值约 1/3 ,在秋季随着植被叶片枯黄逐渐变大 ,冬季达到数倍。公园绿地能量平衡率在 52% ~ 83% ,普遍存在能量不平衡。公园中部的潜热观测值大于公园边缘 ,而显热小于公园边缘 ;公园中部 CO<sub>2</sub> 通量日均值为负 ,公园绿地是 CO<sub>2</sub> 汇。公园绿地在植被生长季节具有明显的降温增湿、吸收 CO<sub>2</sub> 等生态效应。

**关键词** 城市公园绿地 ,潜热通量 ,显热通量 ,CO<sub>2</sub> 通量 ,能量平衡

文章编号 :1000-0933 (2007) 08-3232-08 中图分类号 :P343 文献标识码 :A

## Analysis of water , heat and CO<sub>2</sub> fluxes on urban green space

WANG Xiu-Xin<sup>1 2 3 4</sup> , ZHU Qi-Jiang<sup>1 2 3</sup> , CHEN Sheng-Hai<sup>1 2 3</sup> , SUN Rui<sup>1 2 3</sup> , YANG Sheng-Tian<sup>1 2 3</sup> , HU Yu-Mei<sup>1 2 3</sup> , LIU Xin<sup>1 2 3</sup> , GAO Feng-Fei<sup>1 2 3</sup>

1 Research Center for Remote Sensing and GIS , School of Geography , Beijing Normal University , Beijing 100875 , China

2 Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities , Beijing 100875 , China

3 State key Laboratory of Remote Sensing Science , Beijing 100875 , China

4 College of Computer Science and Information Technology , Guangxi Normal University , Guilin 541004 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 ( 8 ) 3232 ~ 3239.

**Abstract** : Urban green spaces largely affect energy and mass exchange in urban ecosystem , and they can decrease temperature , increase humidity , absorb carbon dioxide and release oxygen. It is significant to quantitatively evaluate the impact of urban green space on urban environment. Base on the surface energy and CO<sub>2</sub> flux measurements in Haidian Park , Beijing , the water , heat and CO<sub>2</sub> exchange was analyzed in this paper. The results show that most of incident solar radiation

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40571109 ) ;北京市自然科学基金重点基金资助项目 (4051003 ) ;与北京市教委共建资助项目 (SYS100270431 和 JD100270540 )

收稿日期 2006-11-20 ;修订日期 2007-06-11

作者简介 王修信 (1963 ~ ) 男 广西桂林人 博士生 副教授 主要从事环境遥感研究. E-mail :xxwangbnu@163.com

致谢 感谢中国气象局北京城市气象研究所刘伟东研究员为海淀公园合作观测实验提供了一套涡度相关设备。感谢中国科学院地理科学与资源研究所张仁华研究员、中国科学院大气物理研究所胡非研究员为海淀公园观测实验设计提供了大量建议 ;感谢北京市园林科学研究所李延明高级工程师为实验提供了支持与协助 ;感谢海淀公园刘颖杰和周佳楠为实验提供了支持与协助 ;感谢中国科学院地理科学与资源研究所孙晓敏研究员为实验提供了部分地面辅助观测仪器。

**Foundation item** :The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40571109 ) ; Key Project of Natural Science Foundation of Beijing (No. 4051003 ) ; Collaborating Project with Beijing Municipal Education Commission (No. SYS100270431 , JD100270540 )

**Received date** 2006-11-20 ; **Accepted date** 2007-06-11

**Biography** :WANG Xiu-Xin , Ph. D. candidate , Associate professor , mainly engaged in environmental remote sensing. E-mail :xxwangbnu@163.com

is changed into latent heat flux ( $LE$ ) during growing season , while it is mainly changed into sensible heat flux ( $H$ ) during non-growing season. The ratio of  $H$  and  $LE$  decreases from spring to summer , with one-thirds in summer and several times in winter.  $LE$  is greater in the central park than that on the fringe of the park. The most important environmental factors controlling  $LE$  are net radiation , relative humidity and atmospheric temperature. The energy imbalance phenomenon is found in this study , with energy balance ratio ranging from 52% to 83% . It is also showed that the diurnal average of  $CO_2$  flux is negative. Urban green space is the sink of carbon dioxide during growing season.

**Key Words** : urban park green space ; latent heat flux ; sensible heat flux ;  $CO_2$  flux ; energy balance closure

在城市区域 ,由于下垫面状况和所处位置的不同 ,常形成不同的小气候环境。在城市绿地系统中 ,公园绿地面积相对最大、群落结构为乔灌木镶嵌的复层结构 ,是影响城市小气候环境的重要因子<sup>[1,2]</sup>。地表水、热、 $CO_2$  通量是近地层大气和下垫面间的能量、水分、 $CO_2$  交换的数量表征 ,它决定着城市小气候环境的主要特征 ,是评价城市绿地生态效益的重要指标。在申奥成功后 ,北京市政府大大加强了绿地建设的资金投入 ,以改善城市生态环境 ,然而 “绿色奥运 ”的绿地建设对小气候的调节作用尚缺乏定量数据的支持。因此定量研究城市公园绿地水、热和  $CO_2$  通量 ,对进一步研究和认识城市小气候、城市生态系统具有十分重要的意义。

以往的研究大部分都是基于生物量法和非连续性观测 ,不可能克服扰动大气环境和尺度转换上的弊端 ,存在很大的局限性和不确定性。涡度相关技术以较坚实的物理理论为基础 ,直接测定水、热、 $CO_2$  通量 ,弥补了以上不足 ,是一种相对标准的观测方法。Wilson 研究了 FluxNet 不同站点的能量不平衡问题及可能原因<sup>[3]</sup> ,Massman 研究了涡度相关测量的显热与潜热通量值被低估 ,从而导致能量不平衡的问题<sup>[4]</sup>。国内外涡度相关技术主要应用于森林生态系统<sup>[5~13]</sup>和农田生态系统<sup>[14~16]</sup>的通量测量 ,但利用涡度相关连续观测城市生态系统鲜见报道。

鉴于此 2005 年 10 ~ 12 月和 2006 年 4 ~ 10 月在北京近郊区海淀公园中部和边缘分别架设了涡度相关系统 ,连续观测显热、潜热和  $CO_2$  通量 ,定量地研究城市公园绿地影响下的通量变化趋势 ,并研究能量平衡状况。

1 涡度相关法实验原理

地表的能量交换可用能量平衡方程表示<sup>[5]</sup>  $R_n = LE + H + G + \Delta S$

其中  $LE$  为潜热通量 ,指下垫面与大气间水分的热交换 ,包括地面蒸发或植被蒸腾的能量。  $H$  为显热通量 ,表征下垫面与大气间通过湍流形式的热交换。  $R_n$  为地表净辐射通量 ,  $G$  为土壤热通量 ,  $\Delta S$  为下垫面热能储存 ,在公园绿地相对于  $LE$  或  $H$  ,  $\Delta S$  是个小量。

近地面层处于大气边界层底层大约 10% 的高度范围 ,在该气层内空气运动符合湍流交换规律 ,可以利用涡度相关法测定近地层大气中热量和水汽的垂直输送通量。当下垫面均匀一致时 ,在近地层内显热通量、潜热通量、 $CO_2$  通量  $F_c$  可表示为<sup>[5]</sup> :

$$H = \rho C_p \overline{w' \cdot T'} \quad LE = L \overline{w' \rho_v'} \quad F_c = \overline{w' \rho_c'}$$

其中  $\rho$  为空气密度 ,  $C_p$  为空气的定压比热 ,  $L$  为水的汽化潜热 ,  $w'$  为近地面大气湍流运动引起的垂直风速的脉动量 ,  $T'$  为温度的脉动量 ,  $\rho_v'$ 、 $\rho_c'$  分别为水汽密度、 $CO_2$  密度的脉动量。上横线表示在一定时间间隔上的平均。

2 实验数据获取

实验地点位于北京市海淀区公园 ,在公园绿地中部树林和边缘树林建立了两个 16 m 高的微气象观测塔 (图 1) ,实验时间为 2005 年 10 ~ 12 月和 2006 年 4 ~ 10 月。

海淀公园位于北京市西北四环万泉河立交桥的西北角 ,东起万泉河路 ,西至万柳中路 ,南到西北四环路 ,北至新建宫门路。占地面积 40  $hm^2$  ,其中园林绿化 30  $hm^2$ 。公园中乔木有垂柳、毛白杨、刺槐、金丝垂柳、洋白蜡、国槐、桧柏等。灌木有沙地柏、贴梗海棠、迎春、碧桃、北京丁香、大叶黄杨等 ,还有大片的草坪 ,是典型的

接彩图 1

乔灌草镶嵌结构的城市公园绿地。

观测塔位于坡度较小、高度将近 5 m 的土丘顶部,塔周边主要为较高的垂柳和少量较低的松柏,垂柳的叶面积指数在乔木中相对较小。一般涡度相关应置于林冠上 1.5 ~ 2.0 m 高度,但由于仪器固定需要借助塔的横梁,因此净辐射仪架设高度略低于超声风速仪。为了确定仪器架设高度,实验初始在公园中部塔同时架设两套涡度相关,一套架设高度超声风速仪 10 m (林冠上约 1.5 ~ 1.8 m)、净辐射仪约 9.5 m,另一套架设高度超声风速仪 14 m、净辐射仪约 13.5 m。比较不同高度两套涡度相关观测的通量、辐射值,观测值不存在明显差异,符合近地面层为常通量层的规律,而较低层通量观测值更能反映公园绿地特征。

根据上面分析,涡度相关架设在观测塔上 10 m 高度 (林冠上约 1.5 ~ 1.8 m),CSAT3 三维超声风速仪 (Campbell, USA) 测量水平与垂直方向上风速和温度瞬时脉动量,LI-7500 红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪 (Licor, USA) 测量湿度和 CO<sub>2</sub> 的瞬时脉动量,HMP45C 空气温湿度计测量该高度空气温度和湿度。CNR-1 净辐射仪 (Kipp&Zonen, 荷兰) 架设高度约 9.5 m,测量向上、向下短波辐射与向上、向下长波辐射。两块 HFP01 土壤热流板 (Hukseflux, 荷兰) 埋放在地下 2 ~ 3 cm 处。数据采集器 CR5000 采样频率为 10 Hz,每 10 min 输出 1 组平均值,正值表示物质和能量向大气方向传输。潜热和显热均经过 WPL 校正<sup>[7]</sup>,CO<sub>2</sub> 通量进行了水汽和显热通量影响的订正。由于实验条件限制,在公园边缘只采集到 2005 年 10 ~ 12 月和 2006 年 8 ~ 10 月数据。

3 实验结果与分析

对公园中部涡度相关观测值进行分析,比较不同季节晴天天气下、春夏之交与秋冬之交阴天天气下的通量数据 (图 2、表 1)。

表 1 公园中部不同月份能量通量 (W·m<sup>-2</sup>) 和 CO<sub>2</sub> 通量 (mg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 统计值

Table 1 The statistic values of energy and CO <sub>2</sub> fluxes in central park by the month								
月份 Month	MaxLE <sub>max</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>max</sub> /LE <sub>max</sub>	G <sub>max</sub>	R <sub>nmax</sub>	EBR	Mean F <sub>c</sub>	
晴天 Clear	4	143	98	0.69	75	541	0.54	-0.031
	5	240	152	0.63	80	544	0.66	-0.067
	6	373	155	0.42	86	671	0.82	-0.109
	7	455	148	0.33	72	737	0.75	-0.119
	8	396	137	0.35	66	637	0.70	-0.108
	9	333	169	0.51	65	583	0.66	-0.105
	10	143	140	0.98	45	495	0.60	-0.065
	11	69	151	2.19	22	329	0.57	0.051
	12	16	105	6.56	14	214	0.50	0.116
阴天 Cloudy	5	92	15	0.16	15	106	0.50	0.076
	11	26	25	0.96	7	86	0.48	0.046

3.1 潜热和显热通量

由于植被蒸腾和地面蒸发,公园绿地潜热白天为正值,在晚上植被和地面温度比空气温度低而造成水汽凝结,潜热一般为负值,晚上潜热出现正值表明夜间仍有明显的蒸发。显热白天为正值,植被或地面通过湍流形式向大气放出热量,显热晚上一般为负值,大气向植被或地面传输热量。潜热和显热晚上变化相对平缓,夜间最低值一般出现在子夜或凌晨,白天随着日出开始显著上升,峰值出现在 11 00 ~ 14 00,随后急剧下降,在日落后趋于平稳。

从图 2 和表 1 可以看出,5 至 9 月份植被生命活动旺盛,蒸腾的潜热较多,潜热明显大于显热,有效能量 (净辐射与土壤热通量之差) 主要分配为潜热。春季显热峰值约为潜热一半,随着植被枝叶的生长,潜热逐渐增加,显热与潜热比值也逐渐减少。夏季植被最茂密,潜热达到一年的最高值,约为春季的一倍,显热潜热峰值比最小,仅为 0.33。

而在秋季,随着植被枯黄、落叶,植被蒸腾变弱,潜热逐渐变小,显热与潜热的比值也逐渐增加。到冬季显

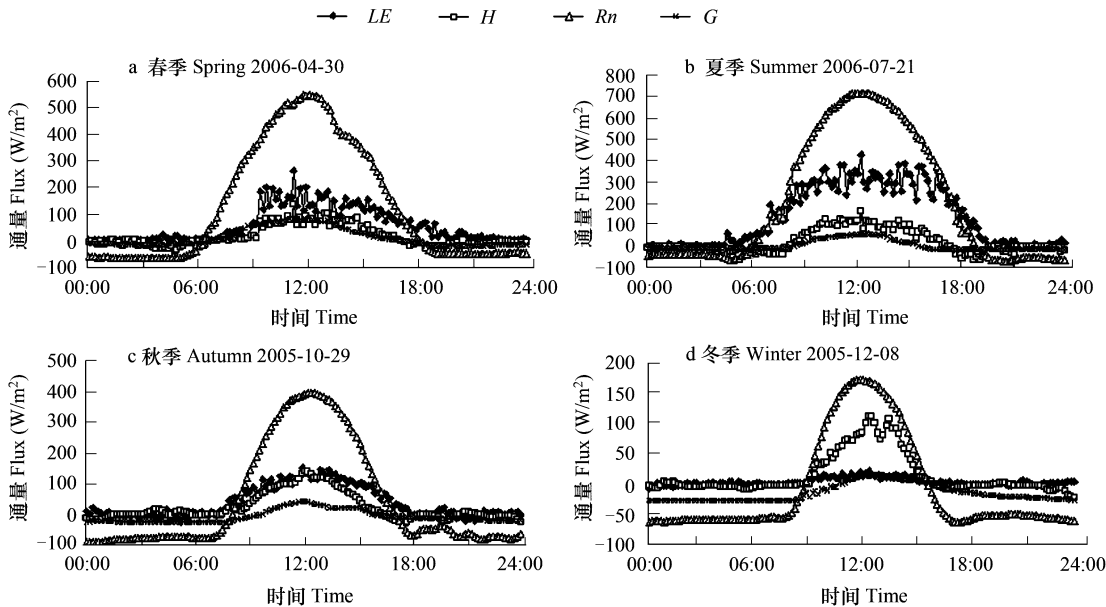


图2 公园中部不同季节晴天的潜热  $LE$ 、显热  $H$ 、净辐射  $R_n$ 、土壤热通量  $G$  日变化

Fig. 2 Diurnal change of latent heat ,sensible heat ,soil heat fluxes and net radiation on clear day in central park

热明显大于潜热,尤其是当气温低于摄氏零度时显热远远大于潜热,显热与潜热的峰值比为 6.56,有效能量主要分配为显热通量。阴天天气下的显热值与晴天相比都非常小,春夏之交的潜热大于显热数倍,秋冬之交潜热与显热相当。

潜热日变化曲线呈现双峰型或单峰型;显热基本为单峰型日分布,部分多峰型分布。潜热日变化曲线双峰型说明公园绿地植被存在蒸腾“午睡”现象。

### 3.2 潜热通量影响因素权重分析

植被蒸腾和地面蒸发是受多种因素综合影响的。对潜热与环境影响因素观测值进行相关分析,以探求影响潜热的主导因素。表 2 的相关系数表明,在植被生长季节影响潜热最大的环境因素是净辐射,其次是相对湿度和气温,其相关系数绝对值都大于 0.5,其中与相对湿度显著负相关,再次是风速。植被蒸腾速率随着有效光辐射、气温的增加和相对湿度的下降而升高。但是在冬季当气温下降到零度以下时,相对湿度、气温与潜热的相关性不显著,表明此时相对湿度、气温对潜热观测值影响不大。

表 2 晴天潜热与影响因素的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of latent heat with environmental variables on clear day

月份 Month	水平风速 Horizontal speed	垂直风速 Vertical speed	净辐射 Net radiance	气温 Air temperature	相对湿度 Relative humidity
4	0.354 *	0.147	0.674 *	0.649 *	-0.773 *
5	0.354 *	0.340 *	0.862 *	0.568 *	-0.691 *
6	0.386 *	0.165	0.913 *	0.520 *	-0.563 *
7	0.342 *	0.304 *	0.943 *	0.521 *	-0.575 *
8	0.350 *	0.352 *	0.938 *	0.592 *	-0.721 *
9	0.206	0.277 *	0.908 *	0.527 *	-0.657 *
10	0.365 *	0.364 *	0.929 *	0.599 *	-0.649 *
11	0.195	0.418 *	0.868 *	0.629 *	-0.650 *
12	0.048	0.001	0.873 *	0.272	-0.283

\*  $P < 0.05$  Significance

3.3 下垫面的能量平衡分析

净辐射峰值在夏季最大 约 700 W/ m<sup>2</sup> ,在冬季最小 约 200 W/ m<sup>2</sup> 。土壤热通量与净辐射比值在夏秋季约为 10% ,在冬季 12 月份小于 10% ,而在春季略大于 10% 。

$LE + H$  小于  $R_n - G$  ,表明涡度相关观测的潜热与显热通量之和小于可供能量 ,公园绿地存在明显的能量不平衡问题。从表 1 可以看出 ,公园绿地由于受非均匀下垫面效应的影响 ,能量平衡率在 50% ~ 80% ,并受季节影响 ,能量平衡率在夏季较高 ,而在冬季较低 (图 3 )。

一般对森林当植被高度超过 8 m 时 ,能量平衡方程需要考虑冠层热储存项的影响<sup>[3]</sup>。McCaughey 研究表明 ,茂密的森林冠层热储存约占有效能量的 7%<sup>[18]</sup>。但公园绿地是乔灌木镶嵌结构 ,海淀公园建园时间仅几年 ,中部林木大部分是建园后移植的垂柳 ,树龄不长 ,林分郁闭程度不高 ,因此冠层热储存小于茂密的森林。如果考虑冠层热储存占有效能量的 4% ,能量平衡率将提高一些 ,达到 52% ~ 83% ,但也不可能实现完全闭合。

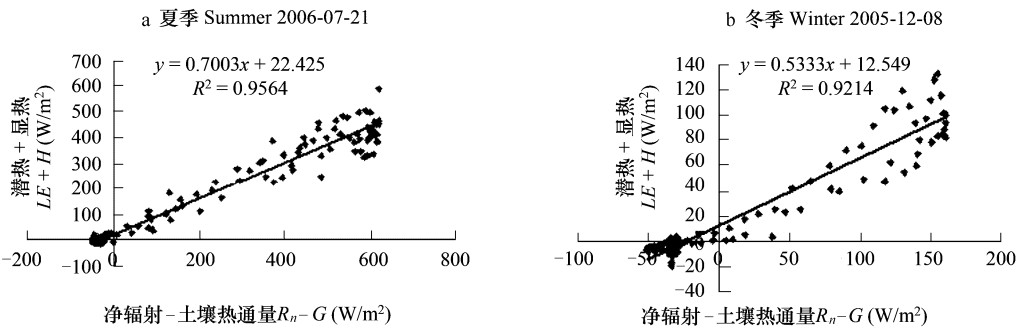


图 3 晴天的能量平衡  
Fig. 3 Energy balance closure on clear day

3.4 CO<sub>2</sub> 通量

在植被生长季节晴天天气下 ,公园绿地 CO<sub>2</sub> 通量呈现白天为负、夜间为正的日变化特征 (图 4 ) ,白天植被光合作用从上层吸收 CO<sub>2</sub> ,夜间向大气释放 CO<sub>2</sub> ;CO<sub>2</sub> 通量日均值为负 ,6 至 9 月份植被生长最茂盛时绝对值最大 ,说明植被生长季节公园绿地是 CO<sub>2</sub> 汇。而在植被非生长季节 ,植被光合作用减少 ,CO<sub>2</sub> 通量日均值为正 ,公园绿地为 CO<sub>2</sub> 源 (表 1 )。

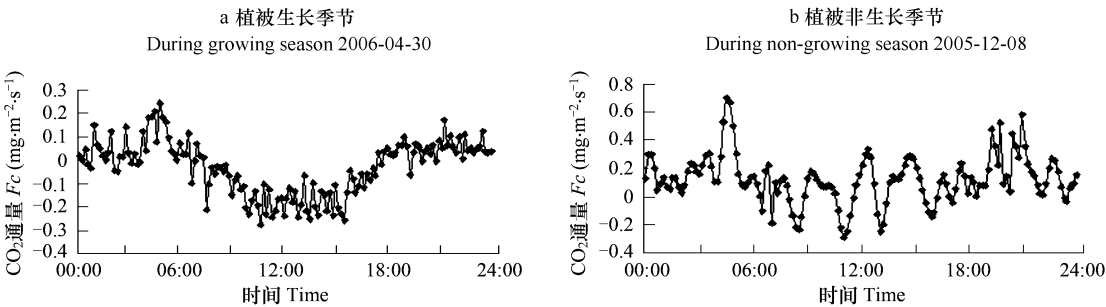


图 4 公园中部晴天的 CO<sub>2</sub> 通量日变化  
Fig. 4 Diurnal change of CO<sub>2</sub> flux on clear day in central park

3.5 公园绿地对周边环境的影响

公园边缘涡度相关 ,东距海淀区南北大通道万泉河路仅 50 m ,往返车流量大 ,而路东侧即为密集的居民住宅区 ,其南方相距约 250 m 则为西北四环的立交枢纽 ,观测数据受公园周边住宅区和道路车流的影响。由于实验设备的限制 ,只采集到 8 ~ 12 月份的观测数据 (表 3 )。

在植被生长季节 ,公园中部的潜热观测值大于公园边缘 ,而显热小于公园边缘。秋季随着植被枯黄 ,公园中部与边缘潜热、显热观测值的差距逐渐减少 ,到植被非生长季节 ,这种差距达到最小。公园绿地在植被生长季节是 CO<sub>2</sub> 汇 ,而在植被非生长季节是 CO<sub>2</sub> 源。而公园边缘的 CO<sub>2</sub> 通量日均值为正值 ,是 CO<sub>2</sub> 源 ,其受住宅区和交通流的严重影响。

纵上可见 ,公园绿地具有明显的增加湿度、降低气温、吸收 CO<sub>2</sub> 的作用。

表 3 晴天两塔水热通量 (W·m <sup>2</sup> )和 CO <sub>2</sub> 通量 (mg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) 的比较						
Table 3 Comparison of water , heat and CO <sub>2</sub> fluxes between two towers on clear day						
月份 Month	潜热通量峰值		显热通量峰值		CO <sub>2</sub> 通量日均值	
	Maximum of latent heat flux		Maximum of sensible heat flux		Diurnal average of CO <sub>2</sub> flux	
	中部塔 At the center	边缘塔 On the fringe	中部塔 At the center	边缘塔 On the fringe	中部塔 At the center	边缘塔 On the fringe
8	396	343	137	166	-0.108	0.028
9	333	325	169	232	-0.105	0.077
10	143	137	140	170	-0.065	0.065
11	69	68	151	130	0.051	0.117
12	16	19	105	92	0.116	0.421

4 结论与讨论

公园绿地潜热和显热具有明显的季节变化特征。在植被生长季节 ,公园绿地所获得的净辐射大部分用于植被的蒸散 ,潜热大于显热 ;显热与潜热的比值在春季随着植被枝叶的生长逐渐减少 ,在夏季达到最小值约 1/3 ,在秋季随着植被叶片枯黄逐渐变大。而在植被非生长季节 ,情形恰好相反 ,公园绿地所获得的净辐射大部分用于显热 ,潜热数值非常小 ;当气温低于摄氏零度时显热远远大于潜热 ,是潜热的数倍。阴天的显热值与晴天相比都非常小。地表的潜热、显热能量分配与植被的覆盖度和生长状况、土壤水份含量等下垫面特征密切相关。

在植被生长季节影响潜热最大的环境因素是净辐射 ,其次是相对湿度和气温 ,再次是风速。但在冬季当气温下降到零度以下时 ,相对湿度、气温对潜热观测值影响不大。

公园绿地能量平衡率在 52% ~ 83% ,普遍存在能量不闭合的问题。造成能量不平衡的原因有以下几点 :土壤热流板被埋放在地下 2 ~ 3 cm 处 ,测量的是一定深度的土壤热通量 ,忽略了埋放深度以上的土壤的热能储存。涡度相关测量水热通量 ,要获得可靠的测量数据 ,理论上要求下垫面均匀且地势平坦 ,以避免在水平和垂直方向上形成平流 ,公园绿地观测点属于非均匀下垫面 ,非均匀效应可能造成平流的影响<sup>[1]</sup>。超声风速仪和红外 CO<sub>2</sub>/ H<sub>2</sub>O 分析仪观测的潜热、显热、CO<sub>2</sub> 通量的“源地”主要来自观测点上风方向风浪区 ,而净辐射仪和土壤热通量板观测的辐射、土壤热通量主要受观测仪器局地特征影响 ,加上公园绿地非均匀下垫面效应 ,两者的“源地”不相同 ,观测值的代表区域不同 ,造成能量不平衡。此外 ,传感器测量的能量平衡方程各项值误差也是造成能量不平衡的一个因素<sup>[3]</sup>。

公园绿地在植被生长季节具有明显的增加湿度、降低气温、吸收 CO<sub>2</sub> 的作用。公园中部的潜热观测值大于公园边缘 ,而显热小于公园边缘 ;公园中部 CO<sub>2</sub> 通量日均值为负 ,公园绿地是 CO<sub>2</sub> 汇。

公园绿地在植被生长季节具有较强的蒸散和光合作用等生态效应 ,在改善城市小气候环境方面具有极其重要的作用。

References :

[1 ] Francisco G , Luisa G , Jose J. Experimental investigation on the thermal comfort in the city-relationship with the green areas , interaction with the urban microclimate. *Building and Environment* 2004 ,39 :1077 — 1086.

[2 ] Argiro D , Marialena N. Vegetation in the urban environment- microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings* ,2003 ,35 :69 — 76.

[3 ] Wilson K , Goldstein A , Falge E , *et al.* Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000 ,113 :223 — 243.

[4 ] Massman W J , Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2002 ,113 :121 — 144.

[5 ] Wang K Y , Kellomaki S , Zha Tianshan , *et al.* Seasonal variation in energy and water fluxes in a pine forest :an analysis based on eddy covariance and an integrated model. *Ecological Modelling* 2004 ,179 :259 — 279.

[6 ] Scott R L , Edwards E A , Shuttleworth W J , *et al.* Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2004 ,122 :65 — 84.

[7 ] Yoshiko K , Hiroki T , Satoru T , *et al.* Three years of carbon and energy fluxes from Japanese evergreen broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2005 ,132 :329 — 343.

[8 ] Barr A G , Morgenstern K , Black T A , *et al.* Surface energy balance closure by the eddy-covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO<sub>2</sub> flux. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2006 ,140 :322 — 337.

[9 ] Rannika U , Keronena P , Hari P , *et al.* Estimation of forest-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange by eddy covariance and profile techniques. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2004 ,126 :141 — 155.

[10 ] Li J , Liu Y F , Yang X G , *et al.* Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 26 ( 8 ) :2449 — 2456.

[11 ] Wang X , Yin G C , Zhou G Y , *et al.* Dry Season Energy Balance of a Coniferous and Broad-leaved Mixed Forest at Dinghushan Mountain , Southern China. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* 2005 ,13 ( 3 ) :205 — 210.

[12 ] Wu J B , Guan D X , Zhao X S , *et al.* Characteristic of the energy balance in broad-leaved Korean pine forest of northeastern China. *Acta Ecologica Sinica* ,2005 ,25 (10 ) :2520 — 2526.

[13 ] Shen Y ,Miao Q L , Liu Y F. CO<sub>2</sub> source/sink and its variation of artificial mixed forest in subtropical red soil hilly area. *Acta Ecologica Sinica* , 2005 25 ( 6 ) :1371 — 1375.

[14 ] Bakera J M , Griffis T J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2005 ,128 :163 — 177.

[15 ] Guo J X , Mei X R , Lin Q , *et al.* Diurnal variation of water and heat flux under transient water stress in a winter wheat field. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 26 ( 1 ) :130 — 137.

[16 ] Guo X F , Kang L , Cai X H , *et al.* An Observation Study of Surface Air Exchanges and Energy Budget at an Agricultural Site in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ,2006 30 ( 3 ) :453 — 463.

[17 ] Webb E K , Pearman G I , Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quart J Meteorol Soc* ,1980 ,106 :85 — 106.

[18 ] McCaughey J H , Saxton W L. Energy balance storage terms in a mixed forest. *Agricultural and Forest Meteorology* ,1988 ,44 :1 — 18.

参考文献：

[10 ] 李菊 ,刘允芬 ,杨晓光 等. 干烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系. *生态学报* 2006 26 ( 8 ) :2449 ~ 2456.

[11 ] 王旭 ,尹光彩 ,周国逸 等. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究. *热带亚热带植物学报* 2005 ,13 ( 3 ) :205 ~ 210.

[12 ] 吴家兵 ,关德新 ,赵晓松 等. 东北阔叶红松林能量平衡特征. *生态学报* 2005 25 (10 ) :2520 ~ 2526.

[13 ] 沈艳 ,缪启龙 ,刘允芬. 亚热带红壤丘陵人工混交林区 CO<sub>2</sub> 源汇及变化. *生态学报* 2005 25 ( 6 ) :1371 ~ 1375.

[15 ] 郭家选 ,梅旭荣 ,林琪 等. 冬小麦农田暂时水分胁迫状况下水、热通量日变化. *生态学报* 2006 26 ( 1 ) :130 ~ 137.

[16 ] 郭晓峰 ,康凌 ,蔡旭晖 等. 华南农田下垫面地气交换和能量收支的观测研究. *大气科学* 2006 30 ( 3 ) :453 ~ 463.

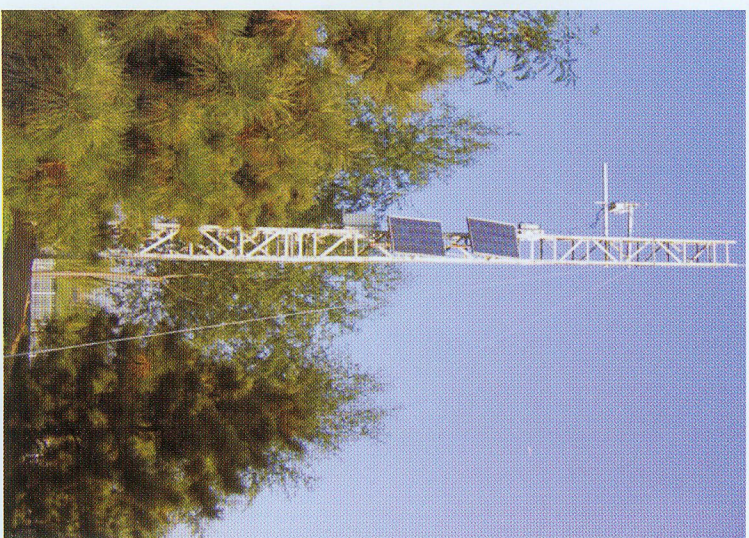




a 公园中部涡度相关  
Eddy covariance in central park



b 观测塔位置  
Position of flux towers



c 公园边缘涡度相关  
Eddy covariance on the fringe of the park

图 1 北京市海淀公园通量观测塔位置  
Fig. 1 Locator map for flux tower sites in Haidian Park, Beijing