

# 亚热带红壤丘陵人工混交林区 CO<sub>2</sub> 源汇及变化

沈 艳<sup>1</sup>, 缪启龙<sup>1</sup>, 刘允芬<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 利用 2003 年 1~6 月份 23 m 高度上的涡动相关观测数据, 分析了典型亚热带红壤丘陵人工混交林区 CO<sub>2</sub> 通量的变化特征。结果表明: 森林碳汇午前略高于午后, 碳源是后半夜大于前半夜, 但平均碳汇大小是碳源的 6 倍, 该生态系统是大气重要的碳汇。研究 CO<sub>2</sub> 通量的季节变化时发现: 呼吸对升温有更大的正相关。日 NEE 密度受光合作用有效辐射 (PAR)、风速的影响很大。研究时段的月 NEE 密度在 -0.0696~-0.1493 mg/(m<sup>2</sup>·s)。最后, 利用方差分析和多元线性回归方法建立了预报日 NEE 的线性模型。

**关键词:** 人工混交林; CO<sub>2</sub> 通量; NEE; 日变化; 季节变化; PAR

文章编号: 1000-0933(2005)06-1371-05 中图分类号: S154.2, S718 文献标识码: A

## CO<sub>2</sub> source/sink and its variation of artificial mixed forest in subtropical red soil hilly area

SHEN Yan<sup>1</sup>, MIAO Qi-Long<sup>1</sup>, LIU Yun-Fen<sup>2</sup> (1. College of Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1371~1375.

**Abstract:** Based on eddy-covariance measurement data in Jan. ~Jun., 2003 at 23m high, the changing characteristics of CO<sub>2</sub> flux in artificial mixed forests are investigated in typical subtropical red soil hilly area. Research result indicates that forest carbon sink/source is higher in forenoon (8:00~12:30)/first half night (0:00~5:30) than afternoon (13:00~18:00)/latter night (18:00~23:30) and the average sink is 6 times of source. This ecosystem represents an important sink to atmosphere. Respiration has more positive correlation with temperature increase than photosynthesis derived from CO<sub>2</sub> flux seasonal variation. Diurnal NEE density is mostly influenced by photosynthetically active radiation (PAR) and wind speed. Monthly NEE density is between -0.0696 and -0.1493 mg/(m<sup>2</sup>·s). Finally, a linear model is established to forecast diurnal NEE through variance analysis and multiple linear regression methods.

**Key words:** artificial mixed forest; CO<sub>2</sub> flux; NEE; diurnal variation; seasonal variation; PAR

大气中 CO<sub>2</sub> 等含碳气体含量的日益增加, 是造成全球温室效应的主要原因之一。据 IPCC2000<sup>[1]</sup> 年的最新报道指出: 自从工业革命以来的近 200a 内 (1750~1998 年), 大约有 406±60 GtC (1Gt=10<sup>9</sup>t=10 亿 t=1Pg=10<sup>15</sup>g), 以 CO<sub>2</sub> 的形式被排放进入大气。森林系统是大气重要碳汇已逐渐成为科学界公认的事实。国外对各种类型森林排放 CO<sub>2</sub> 的机制、变化规律和碳汇大小的研究<sup>[2~12]</sup> 支持了森林系统是大气碳汇这一事实, 但也有报道<sup>[13]</sup> 指出: 黑云杉林是大气的碳源。国内相关报道尚不多见。我国南方红壤丘陵区是世界上一个特殊的生态类型区, 也是我国南方的主要生态类型区。研究该地区 CO<sub>2</sub> 源汇和动态变化特征, 并探

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01-01A2); 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干科学计划资助项目 (CX10G-E01-03-05); 中国科学院知识创新资助项目 (KZCX2-407)

收稿日期: 2004-04-11; 修订日期: 2004-10-09

作者简介: 沈 艳 (1977~), 女, 山西忻州人, 博士生, 主要从事陆地生态系统 C、N 循环研究。E-mail: dysy77@163.com

致谢: 南京信息工程大学的陈万隆老师对本文给予指导和帮助, 在此深表感谢!

**Foundation item:** The Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCX1-SW-01-01A2), the Project of Knowledge Innovation Scientific Program of Geographical Sciences and Natural Resources Research Institute of CAS (No. CX10G-E01-03-05) and the Project of Knowledge Innovation of CAS (No. KZCX2-407)

**Received date:** 2004-04-11; **Accepted date:** 2004-10-09

**Biography:** SHEN Yan, Ph. D. candidate, mainly engaged in C and N cycling of terrestrial ecosystem. E-mail: dysy77@163.com

讨环境因子的影响,对于揭示亚热带红壤丘陵区的碳收支机理,对温室效应的影响和响应,为建立并运行温室气体动态模型进而精确查明全球碳收支都有重要意义,同时是我国社会经济发展和环境外交的双重要求。

本文采用的涡动相关法是通过快速传感器测定并计算垂直风速脉动和待测物理量脉动的协方差来获得湍流通量的。此方法较其它微气象测量方法直接、简易,且在通量计算中几乎不存在任何假设。但必须使用高精度、响应速度极快的湍流脉动传感器。近年来,超声波风速计和高性能气体分析仪的开发和改进,使其应用成为可能。自 1951 年 Swinbank 首次用涡动相关法测量通量以来,一直被认为是当今测定通量的较精细而可靠的方法<sup>[14]</sup>。从 2003 年 1~6 月,在距地面 23 m 处进行 CO<sub>2</sub> 通量涡动相关测量,本文利用 CO<sub>2</sub> 通量和温、湿、压、辐射资料,希望对该区域 CO<sub>2</sub> 变化特征进行初步分析。

## 1 试区概况

中国科学院千烟洲生态试验站(115°04'13"E,26°44'48"N)位于江西省泰和县灌溪乡境内,是我国南方典型的亚热带中部红壤丘陵区。试区现有林分基本为 1985 年前后营造的人工纯林,主要树种有马尾松、湿地松、杉木以及木荷、柑橘等,常绿植被占土地总面积的 76%。更详细的自然环境和观测站点位置描述见文献<sup>[15]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 数据获取

千烟洲试验站的 2 套开路涡动相关系统(Open Path Eddy Covariance System 简称 OPEC)从 2002 年 8 月开始运行,为了获得最佳观测高度,仪器定期在 15、23、31、39m 调换。理论上认为,涡动相关法测定高度是林冠高度的 1.8 倍时,其结果最能反映森林系统的 CO<sub>2</sub> 净交换<sup>[12]</sup>。故本文选用 2003 年 1~6 月运行的 23 mOPEC 数据。OPEC23 m 包括 CR5000 数据采集器、CSAT33-维超声风速仪和 LI-7500 开路红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气体分析仪。CR5000 实时采集全天 24h 的原始数据并且根据输入程序作即时通量及其相关量的计算,如 CO<sub>2</sub> 通量  $F_c$ (下同)、感热通量和潜热通量等;CSAT3 能够测量 3-维风速和风向;LI-7500 测量 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 浓度。另外还装有温度和湿度探头。采样频率 10Hz。仪器定期校准。选时间步长 30min 的  $F_c$  数据进行分析。

### 2.2 数据处理

森林植物通过同化作用,吸收大气中的 CO<sub>2</sub>,固定在森林生物量中,森林是大气的碳汇,涡动相关的  $F_c$  是负值;另一方面森林中动物、植物和微生物的呼吸以及枯枝落叶的分解氧化等过程,以 CO<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub> 等形式向大气排放碳,森林又是大气的碳源, $F_c$  是正值。实际工作中,由于各种原因<sup>[16]</sup>会出现缺测和不合理数据,只取一天中不存在缺测且  $F_c$  值在  $\pm 2.2$  mg/(m<sup>2</sup>·s)<sup>[12]</sup>之间的观测值,否则视缺测处理,各月缺测天数见表 1。

表 1 2003 年 1~6 月份每月缺测天数

月份 Month	1月 Jan.	2月 Feb.	3月 Mar.	4月 Apr.	5月 May	6月 Jun.
缺测天数(d) Missing measurements	8	5	7	3	2	2

(1) $F_c$  日变化计算方法 将每月中每天同一时间的  $F_c$  相加后求平均,得到时间步长是 30min 的  $F_c$ 。

(2) $NEE$  计算方法 群落以上  $F_c$  测量值表示该生态系统与大气的 CO<sub>2</sub> 净交换,即“净生态系统  $F_c$ ”<sup>[10]</sup>。净生态系统  $F_c$  就是多个  $F_c$  的代数和。所以,用一天中 48 个  $F_c$  的平均值能换算得到每月的净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换( $NEE$ )(即森林系统碳储量)通量密度。失测值用线性内插值代替。

## 3 结果与讨论

### 3.1 森林 $F_c$ 及其日变化

图 1 是  $F_c$  日变化曲线,称“抛物线型”曲线。统计数据和图 1 都表明:从 1 月到 6 月,森林系统吸收的碳量逐渐增大,呼吸释放的碳量也逐渐增大,而且二者的差值即森林固定的碳量除了 6 月份也是逐渐增大的。平均而言,森林  $F_c$  正、负值有 2 个转折时间,即早 8:00 和晚 18:00。从早 8:00 开始光合作用首次超过呼吸作用,一直持续到 18:00。18:00 以后,呼吸作用再次强于光合作用。实际上,平均光合作用开始的时间要比 8:00 早,呼吸作用要比 18:00 早。总的来说,白天(8:00~18:00) $F_c$  绝对值高于夜间(18:00~8:00)。就占日总量的比率来说,白天吸收的碳占 86%,夜间释放的碳仅占 14%,该森林系统是很强的碳汇。12:30 以后,光合作用速率开始变慢,表现为 8:00~12:30 碳汇大于 13:00~18:00。就占碳汇的比率来说,8:00~12:30 占 45%,13:00~18:00 约占 40%。另外,夜间  $F_c$  波动性较大,可能与森

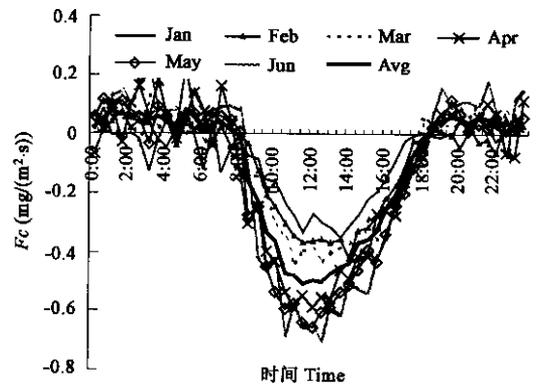


图 1 1~6 月份各月及 6 个月平均的森林  $F_c$  日变化

Fig. 1 Monthly forest  $F_c$  diurnal variation from Jan. to Jun. and total average

林地区夜间大气层结稳定性和湍流有关。

另外,绘制了光合作用最强(即 CO<sub>2</sub> 日最大汇)的频率时间分布图(图 2)。从 10:00~14:30 出现最大值的频率合计占 80%,其中光合作用最强的前 5 个时间分别是:11:30、12:00、11:00、13:30 和 10:30,合计占 55%强。而 12:00、12:30 出现的频率较小,合计仅占 11%强。似乎也说明了短暂的生态系统“午休”现象。呼吸作用最强(即 CO<sub>2</sub> 日最大源)的频率时间分布图(图 3),没有图 2 那样集中的趋势,表现为波动增减,但是 0:00~5:30 出现最大值的频率大于 18:00~23:30,分别占 60%和 40%。

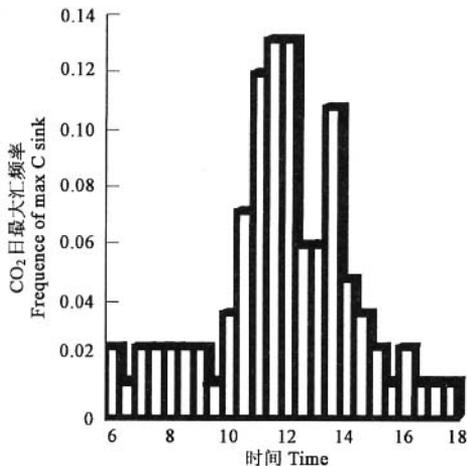


图 2 光合作用最强的频率时间分布

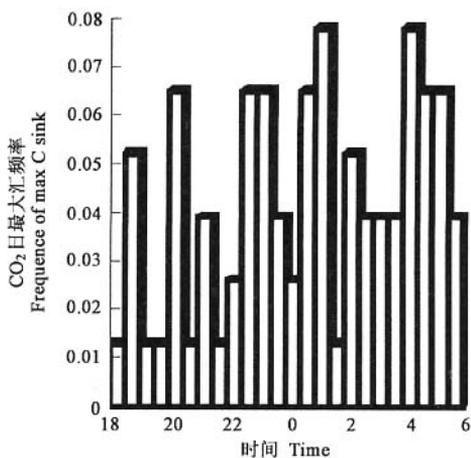


图 3 呼吸作用最强的频率时间分布

Fig. 2 Frequent and temporal distribution of photosynthetic maximum

Fig. 3 Frequent and temporal distribution of respiration maximum

### 3.2 森林 $F_c$ 及其季节变化

表 2 是月  $NEE$  值,图 4 是  $NEE$  季节变化图。可知,1~6 月份森林系统固定的 CO<sub>2</sub> 在  $-0.0696 \sim -0.149 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间,最大值出现在 5 月份,最小值在 1 月份。1~6 月份净  $F_c$  密度的变化趋势是先增加后减小。从 4 月份开始明显增大,比 3 月份增大了  $0.045 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,5 月份达到最大值,这与温度升高和植物进入生长期有密切关系。2003 年 6 月下旬到 7 月份该地区在偏强西太平洋副热带高压的控制下,日平均温度都超过了  $30^\circ\text{C}$ ,呼吸作用释放碳量增幅超过了光合作用吸收量,这是 6 月份  $NEE$  较 5 月份低的重要原因之一。说明在一定温度范围内,呼吸对升温有更大的正相关。另外,6 月份植物生长发育变慢也使得该月的  $NEE$  减小。从 10d 移动平均曲线(图 4)也能看出同样的变化趋势,从 1 月 1 日开始日  $NEE$  逐渐增大,到 5 月 21 日附近达到最大值,之后有减小的趋势。研究时段 1~6 月份无缺测日共 154d,该系统共储存碳量  $1485.93 \text{ g}/\text{m}^2$ ,日平均值  $9.65 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

表 2 2003 年 1~6 月份每月的  $NEE$  密度

Table 2 Monthly  $NEE$  density in Jan. ~Jun., 2003

月份 Month	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.
碳汇 $(\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ Carbon sink	-0.0696	-0.0986	-0.0988	-0.1438	-0.1493	-0.1196

“-”表示汇大于源 Carbon sink > Carbon source

### 3.3 影响森林 $F_c$ 的主要环境因子

这里仅讨论外部因素对呼吸速率和光合速率的影响。光合作用有效辐射( $PAR$ )和  $F_c$  的日变化有很大的相关性(图 5)。随着  $PAR$  的增加,森林生态系统碳汇功能逐渐增大,碳汇最大值出现时间和  $PAR$  最大值的时间对应。之后碳汇和  $PAR$  都开始减小。图 5 相应的相关系数  $R^2=0.975(n=48)$ 。已有的研究  $NEE$  与  $PAR$  关系的模型是非线性的<sup>[4,17]</sup>,形如:

$$NEE = a - \frac{bPAR}{1 + cPAR} \quad (1)$$

在本测站,拟合数据得到  $a = -0.06, b = -0.00013, c = -0.002$ ,概率  $F$  检验在 0.05 水平上显著,  $R^2=0.73$ 。另外,从图 6 较好的线性关系得到启发,为了综合考虑  $NEE$  的影响因子,采用方差分析方法判断外部因子对日  $NEE$  的方差贡献率。选取 8 个因子:气温  $T_a$ 、5cm、10cm 土温(分别记作:  $T_{s5}$ 、 $T_{s10}$ )、相对湿度  $RH$ 、风速  $WS$ 、水气压  $P_v$ 、CO<sub>2</sub> 浓度  $C$ (这 7 个因子全是日均值)和 7:00~18:00 光合作用有效辐射( $PAR$ )平均值  $PAR$ 。方差分析结果见表 3;方差贡献最大的是  $PAR$  达 75.2%,其次是  $WS$

占 13.5%，都通过了概率 0.05 的检验。此时利用多元线性回归法建立线性模型(2)，运算得到的模型系数和概率  $T$  检验见表 4。其中截距、 $PAR$ 、 $WS$  的概率  $T$  检验在 0.001 水平上显著，说明因子对  $NEE$  的影响高度有效， $R^2=0.89$ 。所以，本测站利用  $PAR$  和  $WS$  建立的  $NEE$  预报模型(2)的预报值比(1)更准确：

$$NEE = -0.061095 - 0.000237 \times PAR + 0.028649 \times WS \quad (2)$$

在模型(2)中， $PAR$  对  $NEE$  的方差贡献率在 70% 以上，下面讨论环境因子与  $PAR$  的关系。采用逐步回归法判断 6 个因子的日均值： $Ta$ 、 $Ts5$ 、 $Ts10$ 、 $RH$ 、 $WS$  和  $Pv$  与  $PAR$  的关系。在概率  $F$  检验 0.05 水平上依次入选  $Ta$  和  $Pv$ ，利用多元线性回归方法建立模型(3)，其中截距、 $PAR$ 、 $WS$  的概率  $T$  检验在 0.001 上显著，说明模型(3)高度有效：

$$PAR = 378.538943 + 57.07026 \times Ta - 662.685242 \times Pv \quad (3)$$

从实用角度出发建立的模型(3)，可为我国亚热带红壤丘陵区没有  $PAR$  观测资料的测站用气温和水汽压估计  $PAR$  提供参考。

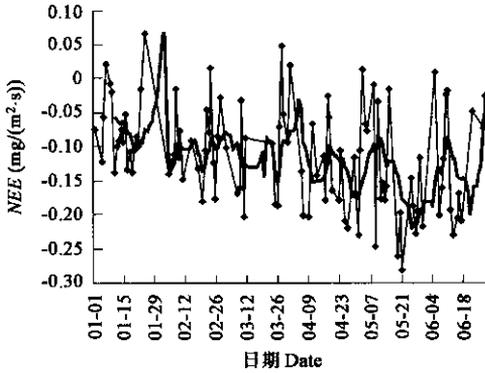


图 4  $NEE$  的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of  $NEE$

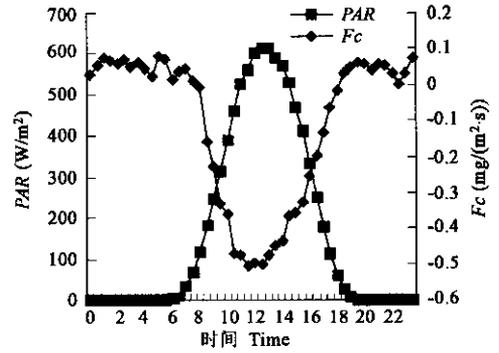


图 5  $PAR$  和  $F_c$  时间变化图

Fig. 5 Temporal variations of  $PAR$  and  $F_c$

◆ 日均值 Daily average; — 10 d 滑动平均 10 days' running average

表 3 8 个因子对日  $NEE$  的方差贡献率及概率  $F$  检验

Table 3 Variance contribution rate to diurnal  $NEE$  and probability  $F$  test of 8 factors

因子 Factors	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)	$F$ 值 $F$ value	$Prob > F$
$PAR$	75.2	75.2	34.87	0.0001
$WS$	13.5	88.7	6.27	0.0153
$Ts5$	3.6	92.3	1.68	0.2006
$Ta$	3.3	95.6	1.53	0.2213
$Ts10$	2.8	98.4	1.31	0.2569
$C$	0.8	99.2	0.39	0.5336
$Pv$	0.5	99.7	0.21	0.6477
$RH$	0.3	100	0.16	0.6914

表 4 多元线性回归得到的变量系数及概率  $T$  检验表

Table 4 Variable coefficient by multiple linear regression and probability  $T$  test

变量 Variables	自由度 $DF$	系数 Coefficient	$T$ 值 $T$ value	$Prob >  T $
截距 Intercept	1	-0.061095	-4.138	0.0001
$PAR$	1	-0.000237	-7.277	0.0001
$WS$	1	0.028649	4.319	0.0001

如上述分析已知，日  $NEE$  是负值，而参加筛选的其它环境因子全是正值，所以根据模型中各系数的正、负号得到：模型 1 中，日  $NEE$  与  $PAR$  均值成正相关，而与日平均风速成负相关。因为相同条件下，光合有效辐射强，必将加速森林光合作用。平均风速越大  $CO_2$  平流输送越强，本底  $CO_2$  浓度越低，净通量也越低。在我国亚热带地区，因为水热条件适合植物生长，所以在该地区影响  $NEE$  最主要因子是光合有效辐射和当地的湍流条件。模型(3)中， $PAR$  与  $Ta$  成正相关，而与  $Pv$  成负相关。因为辐射越强，气温越高；当大气中水汽含量增加，吸收太阳辐射的量也相应增加，则到达地面的光合有效辐射减少。

#### 4 结论

(1)  $F_c$  的日变化 碳汇的作用是午前高于午后,而碳源是后半夜高于前半夜。总的白天森林系统吸收的 CO<sub>2</sub> 远远高于夜间释放的 CO<sub>2</sub>,该生态系统是大气的重要碳汇。这是因为该生态系统属于 20 多年生的针阔混交林,加之人为破坏非常少,森林处于顺行演替过程中,物质和能量快速积累的结果。

(2)  $F_c$  的季节变化 随着温度升高,植物开始生长,森林生态系统吸收的碳量逐渐增大,6 月份达到最大;呼吸作用释放的碳量也逐渐增加。但 6 月份高温干旱造成呼吸释放碳量的增幅大于光合吸收碳量的增大,说明呼吸对升温有更大的正相关。导致 6 月份固定碳量小于 5 月份。

(3) 月  $NEE$  密度在  $-0.0696 \sim -0.1493 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  之间。

(4)  $F_c$  和  $PAR$  随时间变化有相同的趋势,同增减,线性关系明显,相关系数  $R^2=0.975(n=48)$ 。

(5) 建立了日  $NEE$  线性预报模型,并进行了合理性分析。

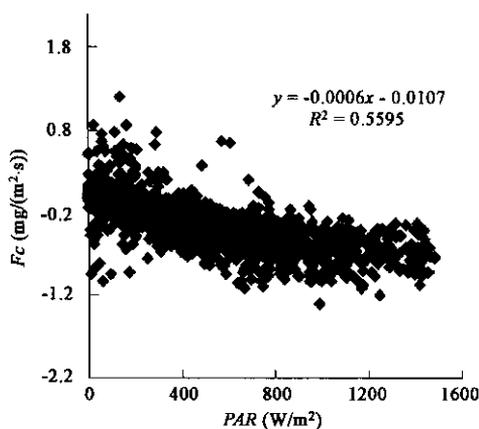


图 6  $PAR$  和  $F_c$  关系图 ( $n=1931$ )

Fig. 6 Relationship of  $PAR$  and  $F_c$  ( $n=1931$ )

#### References:

- [1] IPCC. Land use, land-use change, and forestry. *A special report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] Valentini R P, de Angelis, Matteucci G, et al. Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Boil.*, 1996, **2**(2): 199~208.
- [3] Wilson K B and Meyers T P. The spatial variability of energy and carbon dioxide fluxes at the floor of a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 2001, **98**(3): 443~447.
- [4] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, et al. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a Mid-Latitude forest. *Science*, 1993, **260**(5112): 1314~1317.
- [5] Greco S and Baldocchi D D. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Boil.*, 1996, **2**(2): 183~198.
- [6] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to inter-annual climate variability. *Science*, 1996, **271**(5255): 1576~1578.
- [7] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurement of carbon storage by long-term eddy correlation: method and a critical assessment of accuracy. *Global Change Boil.*, 1996, **2**(2): 169~182.
- [8] Kicklighter D W, Melillo J M, Peterjohn W T, et al. Aspects of spatial and temporal aggregation in estimating regional carbon dioxide fluxes from temperate forest soils. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(D1): 1303~1305.
- [9] Black T A, den Hartog G, Neumann H, et al. Annual cycles of CO<sub>2</sub> and water vapor fluxes above and within a boreal aspen stand. *Global Change Boil.*, 1996, **2**(3): 219~230.
- [10] Jarvis P G, Massheder J, Hale S, et al. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D24): 28953~28967.
- [11] Lindroth A, Grelle A, and Moren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Boil.*, 1998, **4**(4): 443~450.
- [12] Schmid H P C, Susan B Grimmond, Cropley F, et al. Measurements of CO<sub>2</sub> and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agric. For. Meteorol.*, 2000, **103**(4): 357~374.
- [13] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, et al. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, **279**(5348): 214~217.
- [14] Huang M F. Advance of research on surface flux. *Arid Land Geography*, 2003, **26**(2): 159~165.
- [15] Liu Y F, Song X, Liu Q J, et al. Preliminary study of heterogeneous surface-layer energy fluxes in subtropical red earth hilly region. *Jiangxi Science*, 2003, **21**(3): 183~188.
- [16] Foken Th and Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurement. *Agric. For. Meteorol.*, 1996, **78**(1): 83~105.
- [17] Anthoni P M, Law B E, Unsworth M H. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agric. For. Meteorol.*, 1999, **95**(3): 151~168.

#### 参考文献:

- [14] 黄妙芬. 地表通量研究进展. *干旱区地理*, 2003, **26**(2): 159~165.
- [15] 刘允芬, 宋霞, 刘琪, 等. 亚热带红壤丘陵非均匀地表能量通量的初步研究. *江西科学*, 2003, **21**(3): 183~188.