

# 中国东部森林样带典型生态系统碳收支 的季节变化\*

张雷明<sup>①②</sup> 于贵瑞<sup>①\*\*</sup> 孙晓敏<sup>①</sup> 温学发<sup>①②</sup> 任传友<sup>①②</sup> 宋霞<sup>①②</sup>  
刘允芬<sup>①</sup> 关德新<sup>①</sup> 闫俊华<sup>①</sup> 张一平<sup>③</sup>

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ② 中国科学院研究生院, 北京 100049; ③ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ④ 中国科学院华南植物园, 广州 510650; ⑤ 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223)

**摘要** 利用涡度相关技术对中国东部森林样带(NSTEC)上的长白山温带针阔混交林(CBS)、千烟洲亚热带常绿人工针叶林(QYZ)、鼎湖山亚热带常绿针阔混交林(DHS)与西双版纳热带雨林季雨林(XSBN)等 4 种典型生态系统类型的碳收支特征开展了长期、连续的观测研究. 本研究利用 ChinaFLUX 的连续观测资料, 初步分析和评价了 4 种生态系统 2003 年碳收支的季节变化及其环境响应特征. 在 2003 年, 各生态系统的碳收支对环境因子的变化产生了不同的响应. CBS 生态系统的碳收支主要受到了辐射与温度的控制, 0℃和 10℃是两个重要的临界温度, 前者控制了生态系统碳交换的起止时间, 后者影响了生态系统碳交换的强度. 由于生态系统光合作用(GPP)出现峰值的时间早于呼吸( $R_e$ )作用, 因此, CBS 生态系统的净交换(NEE)在早夏达到最大值. 由于夏季降水与温度的不同步性, QYZ 生态系统的碳收支受到了干旱的制约, 其降低主要来自于生态系统  $G_{pp}$  的降低. DHS 与 XSBN 生态系统均表现出在旱季碳吸收强、而雨季吸收弱的特征, 特别是 XSBN 从旱季到雨季的转变过程中出现了由碳汇向碳源的转变. 这主要是由于这两个生态系统在雨季的降水量较大, 光合有效辐射不足, 导致生态系统 GPP 受到抑制, 而  $R_e$  随温度升高而增大所致. XSBN 的生态系统呼吸温度敏感性参数( $Q_{10}$ )与年呼吸总量最大, CBS 与 QYZ 次之, DHS 最小, 但 CBS 生态系统每天的呼吸释放量最高. 在 2003 年, CBS, QYZ, DHS 和 XSBN 的 NEE 分别为 181.5, 360.9, 536.2 和 -320.8  $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ . 在 CBS, QYZ 和 DHS 三种生态系统之间, 随着纬度的降低, 温度与降水表现出明显的纬度梯度, 生态系统  $R_e$  占 GPP 比例逐渐降低, NEE 与  $R_e$  的比例随纬度的降低而逐渐增大. 每天的光合吸收量、光能利用率和降水利用效率均表现出了随纬度降低

收稿日期: 2005-10-27; 接受日期: 2006-03-24

\* 中国科学院知识创新重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501)共同资助

\*\* E-mail: yugr@igsrr.ac.cn 或 yuguirui@cem.ac.cn

SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences

而减少的趋势,但 XSBN 生态系统往往脱离这一纬度趋势。由于森林生态系统结构和功能具有的高度复杂性,需要更长时间的观测数据和开展更深入的分析,以科学解释不同生态系统对气候环境变化的响应和准确评价生态系统的碳收支能力。

**关键词** 森林样带 碳收支 生态系统光合作用 生态系统呼吸 ChinaFLUX 涡度相关

陆地生态系统对全球气候变化的响应和适应机制是认识生态系统与大气间相互作用规律的基础,也是了解陆地生态系统主要功能和生理过程的重要前提<sup>[1]</sup>。作为陆地生态系统的主体,森林生态系统在缓解全球变化中具有非常重要的作用,在全球碳循环研究中,森林生态系统的碳循环机理及其收支受到了广泛的关注<sup>[2-5]</sup>。近年来,涡度相关技术的进步使得森林生态系统碳通量长期和连续的测定成为可能,涡度相关技术已成为全球通量观测网络 (FLUXNET) 的标准微气象观测方法<sup>[6]</sup>,并已经对热带雨林<sup>[7,8]</sup>、温带森林<sup>[9,10]</sup>以及北方森林<sup>[11,12]</sup>开展了大量的观测研究。但对不同森林生态系统的碳汇/源能力的准确评价以及生态系统碳过程对气候变化的响应与适应机理的理解还需要进一步的深入与提高<sup>[4,12]</sup>。

样带研究作为耦合和转换不同时空尺度生态过程的桥梁和媒介,以及认识与理解全球变化情景下的区域响应的有效途径和方法,可充分利用水热环境梯度条件下的多种典型生态系统的比较研究来揭示生态系统的主要功能和过程对环境变化的响应和适应机制<sup>[1]</sup>。我国丰富的陆地生态系统类型和多样的自然环境梯度为生态系统对全球变化的响应和适应机理的样带研究提供了得天独厚的条件。ChinaFLUX 通过在样带上沿不同水热梯度设立的控制站点,对我国典型陆地生态系统的碳交换开展了直接的长期观测和研究,这不仅有助于准确评价不同类型生态系统的碳源汇能力,而且将有助于在区域等大尺度上深刻揭示生态系统碳过程对全球变化的响应和适应机理<sup>[1]</sup>。

我国东部南北森林样带 (NSTEC) 由北到南依次分布着从寒温带针叶林到热带雨林季雨林等不同类型的森林生态系统,构成了一条相当完整而且连续的水热梯度驱动下的森林样带。同时这条样带受东

亚季风性气候的强烈影响,形成了较为独特的森林景观特征<sup>[13]</sup>,如在北半球回归线的植被多为荒漠与草地,而由于季风气候的影响,在中国则形成了亚热带常绿针阔混交林。因此,对这一样带的研究将有助于理解与评价该地区森林生态系统对东亚季风气候的响应与适应机制。但以往的研究工作还只是局限于对单个的森林生态系统<sup>[14,15]</sup>,缺乏基于样带概念的综合对比分析。因此,本研究将利用 ChinaFLUX 2003 年的观测数据,研究和分析:(i) 中国东部森林样带上典型森林生态系统碳收支的季节变化特征;(ii) 不同森林生态系统碳收支的环境响应机理和(iii)水热梯度对生态系统碳收支的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 站点描述

中国东部南北森林样带 (NSTEC) 从南至北分布有温带针阔混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿针阔混交林和热带雨林,具有明显的热量梯度与水热组合梯度,是 IGBP 的第 15 条样带<sup>[13]</sup>。ChinaFLUX 在该样带上选取了长白山温带针阔混交林 (CBS)、千烟洲亚热带常绿人工针叶林 (QYZ)、鼎湖山亚热带常绿针阔混交林 (DHS) 与西双版纳热带雨林季雨林 (XSBN) 等 4 种典型生态系统,利用涡度相关技术开展了长期、连续的通量观测研究。各观测站点的基本情况如表 1 所示,详细信息的介绍参见参考文献 [14~18]。

### 1.2 数据采集

各通量观测站采用统一的开路涡度相关系统与观测技术进行植被-大气之间的 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 和能量通量的长期连续观测。在开路涡度相关系统中,利用三维超声风速仪 (Model CSAT-3, Campbell Scientific) 测定三维风速和温度脉动,红外线 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 气体分析仪

表 1 各通量观测站的基本情况

站点	CBS	QYZ	DHS	XSBN
地理位置	41°29'N, 128°05'E	26°44'N, 115°04'E	23°10'N, 101°12'E	21.96N, 101.21E
地形	平坦	丘陵	山地	沟谷
海拔/m	736	100	300	750
年平均温度/°C	4.0	17.9	21.1	22
年降水/mm	695	1,485	1,956	1,493
土壤类型	山地暗棕壤	红壤	赤红壤和黄壤	砖红壤、赤红壤
冠层高度/m	26	11	17	36
粗糙度	1.5	1.0	2.0	3.0
叶面积指数/m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup>	5.7	3.6	4.0	6.0
优势树种	红松、椴树、蒙古栎、水曲柳、色木	湿地松、马尾松、杉木	锥栗、荷木、黄果厚壳桂、马尾松、翅子树	番龙眼、千果榄仁、云南肉豆蔻、滇南风吹楠
观测高度/m	40	39	27	48.8
辐射观测高度/m	32(冠层上) 2(冠层下)	42(冠层上) 2(冠层下)	36(冠层上) 2(冠层下)	70(冠层上) 4.2(冠层下)
降水观测高度/m	70	42	36	70
林龄/a	200	20	100	200
温度和相对湿度观测高度/m	2.5, 8.0, 22.0, 26.0, 32.0, 50.0, 61.8	1.6, 7.6, 11.6, 15.6, 23.6, 31.6, 39.6	4.0, 9.0, 15.0, 21.0, 27.0, 31.0, 36.0	4.2, 16.3, 26.2, 36.5, 42.0, 48.8, 70
土壤温度测定深度/m	0.05	0.05	0.05	0.05
土壤水分测定深度/m	0.05, 0.2, 0.5	0.05, 0.2, 0.5	0.05, 0.2, 0.4	0.05, 0.2, 0.4

(Model LI-7500, Licor Inc.)测定 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 密度脉动。所有 10Hz 的原始数据均利用数据采集器 CR5000 (Model CR5000, Campbell Scientific) 记录和储存, 同时计算和输出 30 min 通量数据。在进行通量观测的同时, 各观测采用相同的仪器同步进行辐射、温度、降水和土壤水分等常规气象要素的观测。详细介绍参见参考文献[14~16]。

### 1.3 数据计算

#### 1.3.1 CO<sub>2</sub> 通量

涡度相关技术是通过测定大气中湍流运动所产生的风速脉动和物理量脉动, 直接求算植被与大气间净 CO<sub>2</sub>、水汽和能量通量的方法<sup>[6]</sup>。CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )的计算公式为:

$$F_c = \overline{\rho w' c'}, \quad (1)$$

其中,  $\rho$  是空气密度,  $c$  是 CO<sub>2</sub> 在空气中的浓度,  $w$  是风速的垂直分量, 上划线表示某时间段内的平均值, 撇号表示瞬时值与平均值的偏差即脉动值。

#### 1.3.2 冠层空气储存

对于森林等高大植被, 冠层空气碳储存( $F_s$ )对净

生态系统碳交换(NEE)具有重要影响<sup>[19]</sup>。一般地,  $F_s$  可利用 CO<sub>2</sub> 浓度廓线和通量观测高度处的 CO<sub>2</sub> 浓度变化两种方法进行估算<sup>[19,20]</sup>。由于在鼎湖山与西双版纳观测站没有安装廓线系统, 因此, 本文采用 Hollinger 等<sup>[19]</sup>的方法进行  $F_s$  的估算:

$$F_s = \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot h, \quad (2)$$

其中,  $\Delta c$  是前后两次相邻时刻测定的 CO<sub>2</sub> 浓度差,  $\Delta t$  是前后两次测定的时间间隔, 在本研究中为 1800s,  $h$  是通量观测高度。因此, NEE 可由下式计算:

$$NEE = F_c + F_s. \quad (3)$$

在本研究中, NEE 符号为正时表示生态系统从大气吸收 CO<sub>2</sub>, 负值表示生态系统向大气排放 CO<sub>2</sub>。

#### 1.3.3 冠层吸收的光合有效辐射

冠层吸收的光合有效辐射( $Q_a$ )采用 Griffis 等<sup>[20]</sup>的方法进行估算,

$$Q_a = (1 - \eta) Q_p (1 - e^{-kLAI}), \quad (4)$$

其中,  $k$  是消光系数, CBS, QYZ, DHS 和 XSBN 分别为 0.5, 0.4, 0.4 和 0.5.  $\eta$  是冠层光合有效辐射反射率, 分别取 0.03, 0.04, 0.03, 0.03.  $Q_p$  是光合有效辐射. LAI 是

冠层叶面积系数, 由下式进行估算:

$$LAI = -\frac{1}{k} \ln \left( \frac{Q_{p,b}}{Q_{p,a}} \right), \quad (5)$$

其中,  $Q_{p,b}$  和  $Q_{p,a}$  分别是冠层下方与上方测定的光合有效辐射.

## 1.4 通量数据处理

### 1.4.1 密度校正与坐标轴旋转

用红外分析仪所观测的  $CO_2$  气体浓度为质量密度, 而不是摩尔质量比. 因此大气温度、压力、湿度发生变化时均会引起大气中  $CO_2$  质量密度的变化. 因此, 需要对 NEE 进行 WPL 校正, 以消除水热传输造成的  $CO_2$  通量变化的密度效应<sup>[21]</sup>. 同时这里还采用了 3 次坐标旋转方法, 使平均垂直风速为零, 以减少地形的影响<sup>[22]</sup>.

### 1.4.2 数据筛选

为了得到能准确代表植被-大气之间碳交换量的数据, 并减少噪音数据的干扰, 在数据处理过程中, 对数据进行了筛选: (i) 剔除同期有降水的通量数据; (ii) 设通量数据的阈值为  $[-3, 3]$ , 以剔除明显的异常数据; (iii) 对夜间数据进行了摩擦风速的筛选. 根据夜间 NEE 与摩擦风速的关系确定了 CBS, QYZ 和 DHS 临界摩擦风速为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[14-16]</sup>, XSBN 的摩擦风速为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 剔除了低于临界摩擦风速时的夜间通量观测数据; (iv) 将数据进行连续 5 点的 1.96 倍方差筛选. 数据筛选之后, CBS, QYZ, DHS 和 XSBN 白天的有效数据量分别是 83%, 82%, 73% 和 76%, 但夜间的有效数据量普遍较少, 分别是 34%, 30%, 34% 和 15%.

### 1.4.3 缺失数据插补

利用涡度相关法评价生态系统碳收支状况需要获得连续的通量观测数据, 但由于仪器故障、系统校正以及天气等因素, 在长期通量观测中往往造成观测数据的丢失. 目前, 常用的数据插补方法包括平均日变化法、非线性回归法、查表法与人工神经网络法. 本研究主要采用非线性回归法进行缺失数据的插补. 对于短时间(小于 2 小时)的缺失数据采用线性内

插, 较长时间的白天缺失通量数据, 利用 Michaelis-Menten 方程进行插补<sup>[23]</sup>, 时间窗口为 30 d,

$$NEE = \frac{\alpha Q_p P_{\max}}{\alpha Q_p + P_{\max}} - R_d, \quad (6)$$

式中,  $\alpha$  为生态系统的光合量子效率 ( $\text{mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ),  $P_{\max}$  为最大光合强度 ( $\text{mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $R_d$  是生态系统白天的呼吸强度 ( $\text{mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

夜间缺失数据利用 NEE-温度的关系方程进行插补<sup>[23]</sup>:

$$NEE = Ae^{(BT)}, \quad (7)$$

式中,  $A, B$  均是拟合参数, 其中  $B = \ln(Q_{10}/10)$ ,  $Q_{10}$  值的大小表征了生态系统呼吸的温度敏感性的强弱.

对于较短时间的常规数据缺失也采用线性内插的方法, 而对于较长时间的缺失数据, 则采用滑动平均的方法, 白天和夜间分别选取 14 d 与 7 d 作为滑动窗口.

### 1.4.4 生态系统呼吸与光合作用的估算

生态系统呼吸 ( $R_e$ ) 通常用两种方法进行估算, 一种是利用夜间通量观测数据与温度的关系, 由方程(7)进行估算; 另一种是先利用白天观测数据由方程(6)拟合得到  $R_d$ , 然后再由  $R_d$  与温度的关系根据方程(7)进行估算. 生态系统光合作用(GPP)以 NEE 与  $R_e$  之和表示, 即

$$GPP = NEE + R_e. \quad (8)$$

利用上述计算与处理之后的数据分别统计通量与常规数据的日、月和年值. 所有数据处理过程都是利用 MATLAB 完成(Math Works Inc., Natick, MA).

## 2 研究结果

### 2.1 环境因子的季节变化

与常年平均水平相比, 2003 年各森林生态系统的环境条件均表现出不同程度的偏暖、偏旱, 特别是降水量比常年平均值分别减少了 37%, 43%, 34% 和 23% (图 1, 2 和表 1). 在温带大陆性季风气候的影响下, 长白山温带针阔混交林(CBS)在生长季节内(4~9 月)表现出明显的水热同步的季节变化特征, 生长季节

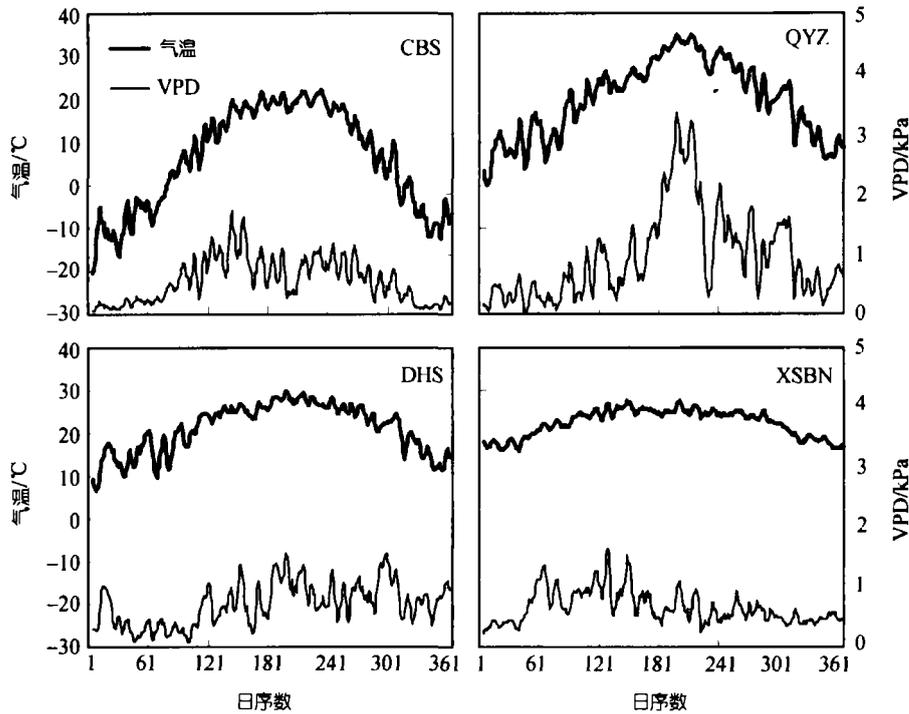


图1 各生态系统日平均气温与空气饱和水汽压差(VPD)的季节变化特征

图中显示的是5点滑动平均的气温和VPD, 其中粗线表示日平均温度, 细线表示VPD. CBS, QYZ, DHS和XSBN分别表示长白山温带针阔混交林、千烟洲亚热带常绿人工针叶林、鼎湖山常绿针阔混交林与西双版纳热带雨林季雨林(下同)

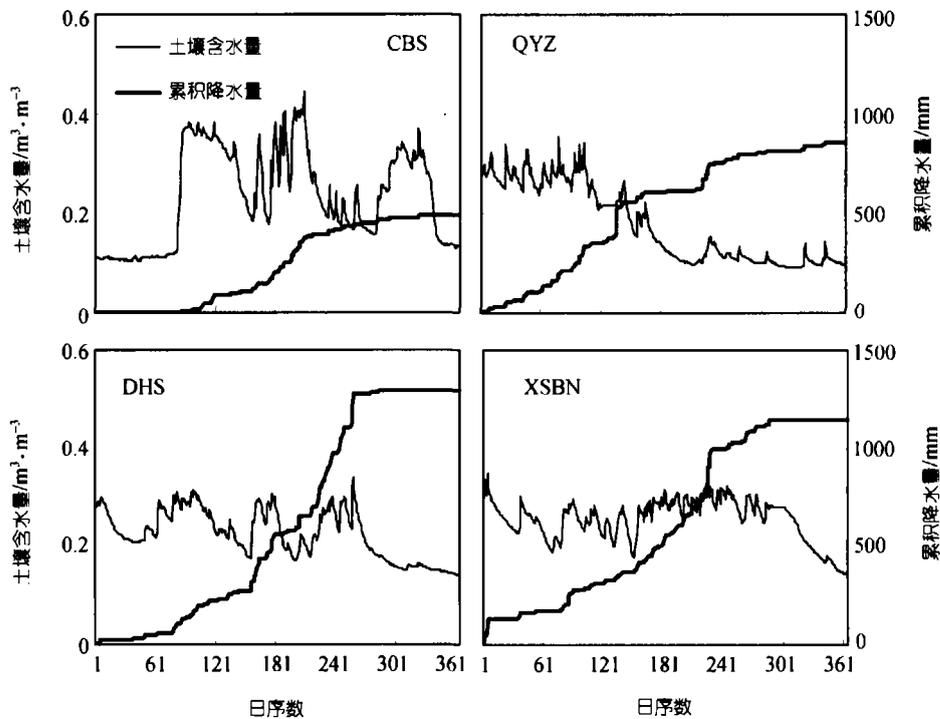


图2 各生态系统日平均土壤表层土壤体积含水量与日累积降水量的季节变化特征

图中粗线表示累积降水量, 细线表示日平均土壤表层体积含水量

内的平均温度为  $16^{\circ}\text{C}$ , 降水量占到了全年总量的 89%. 干烟洲亚热带常绿人工针叶林(QYZ)在 2003 年夏季受到了异常干旱的胁迫, 在植被需水旺盛的 7 月份降水量微乎其微, 而日平均温度达到了  $30^{\circ}\text{C}$  以上, 土壤表层含水量降低到  $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , VPD 接近于 4 kPa. 根据常年统计资料, 鼎湖山亚热带常绿针阔混交林(DHS)的 4~9 月份为雨季, 10 月至来年 3 月为旱季<sup>[18]</sup>. 在 2003 年, 4~9 月份的降水量占全年降水量的 88%, 但是由于同期的温度较高和植被生长旺盛, 导致水分消耗较大, 使得雨季的 VPD 略高于旱季. 西双版纳热带雨林季雨林(XSBN)具有明显的雾凉季(11 月至次年 2 月)、干热季(3~4 月)和湿热季(5~10 月)之分<sup>[24]</sup>. 在雾凉季、干热季和湿热季的平均温度分别为 18, 23 和  $24^{\circ}\text{C}$ , 降水量分别是 171, 147 和 832 mm, VPD 分别为 0.5, 0.9 和 0.7 kPa. 从总体上来看, 4 个森林生态系统的温度和降水等水、热气象因子表现出了随纬度降低而逐渐升高的空间变化趋势.

## 2.2 生态系统呼吸与温度的关系

在通量观测过程中, 由于白天与夜间湍流混合程度、通量贡献区的分布以及植物生理生态反应的不同, 因此在分别利用白天与夜间数据进行生态系统呼吸的估算时, 可能会造成不同估算方法的结果之间存在差异. 本研究分别采用白天和夜间的通量数据对森林生态系统的呼吸进行了估算(图 3). 表 2 列出了两种方法获得的生态系统呼吸相关参数和年总量的估算值. 在拟合夜间通量与温度的响应曲线时, 将夜间通量数据按照每  $2^{\circ}\text{C}$  的间隔进行平均, 并且保证每个间隔内至少有 10 个数据点; 同时, CBS 与 XSBN 选取了土壤温度, 而 QYZ 和 DHS 则选取了近地层空气温度, 这是根据不同温度与夜间通量数据回归得到的相关系数的大小进行确定的<sup>[16]</sup>; 同时, 这也反映了不同森林生态系统系统呼吸主要来源的差异, 在 CBS 与 XSBN, 土壤呼吸可能是生态系统呼吸的主要来源, 这与其林龄较大, 凋落物多和土壤有机

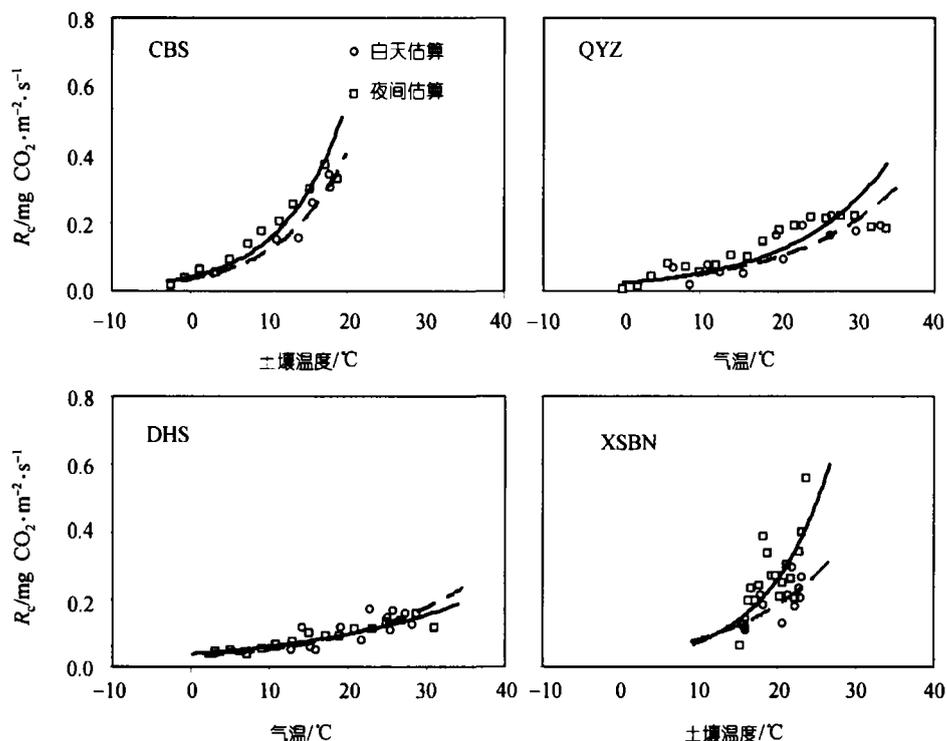


图 3 不同森林生态系统呼吸( $R_c$ )与温度关系的估算

图中的方点与圆点分别表示由夜间和白天通量观测数据获得的生态系统呼吸; 实线与虚线分别表示由夜间和白天通量观测数据拟合的得到的生态系统呼吸对温度的响应曲线. 其中白天的生态系统呼吸由方程 6 拟合得到

表 2 由白天与夜间通量观测数据分别估算得到的生态系统呼吸<sup>a)</sup>

站点		A	B	$Q_{10}$	$R_{ref,15}/\text{mg} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	年度 $R_e/\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
CBS	$R_{nf}$	0.0557	0.1065	2.90	0.275	1343.56
	$R_{df}$	0.0305	0.1319	3.74	0.220	1030.47
QYZ	$R_{nf}$	0.0516	0.0524	1.69	0.113	1280.36
	$R_{df}$	0.0401	0.0520	1.68	0.088	987.80
DHS	$R_{nf}$	0.0393	0.0472	1.60	0.080	918.94
	$R_{df}$	0.0362	0.0517	1.68	0.079	933.40
XSBN	$R_{nf}$	0.0272	0.1109	3.03	0.144	2246.72
	$R_{df}$	0.0398	0.0771	2.16	0.127	1634.47

a) A 和 B 分别表示方程 7 中的常数;  $Q_{10}$  是生态系统呼吸的温度敏感性参数, 表示温度每升高 10°C, 生态系统呼吸的相对变化量;  $R_{ref,15}$  是参考温度 15°C 条件下生态系统的呼吸速率;  $R_{nf}$  与  $R_{df}$  分别表示利用夜间与白天通量观测数据估算得到的生态系统呼吸

质含量比较高有关, 而在 QYZ 和 DHS, 植被的呼吸可能是生态系统呼吸的主要来源, 但这还需要进行深入的探讨。

从图 3 与表 2 可以看出, 生态系统呼吸温度敏感性参数( $Q_{10}$ )与年总量的大小顺序是 XSBN>CBS>QYZ>DHS, 15°C 参考温度下的生态系统呼吸速率的大小顺序是 CBS>XSBN>QYZ>DHS. 其中, CBS 与 QYZ 呼吸的年总量的估算值分别为 1343 和 1280  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 于贵瑞等<sup>[16]</sup>的研究结果为 1268 和 1197  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 二者基本接近. 需要指出的是, 除 DHS 之外, 在其它各森林生态系统由夜间与白天通量观测数据分别估算得到的生态系统呼吸之间存在一定的差异, 由夜间估算得到的生态系统年总量高于白天的估算值, 特别是在西双版纳热带季雨林, 这种差异更为显著. 由于夜间的通量直接表示了生态系统的呼吸, 因此, 采用了夜间通量数据估算得到的生态系统呼吸进行后续的分析与计算。

### 2.3 生态系统碳交换环境响应的对比分析

一般来讲, 生态系统的碳交换主要受辐射、温度、水分供应状况的影响<sup>[4,9,10]</sup>. 本研究利用残差分析方法评价了不同生态系统日累积碳交换量对环境因子的响应(图 4). 图 4(a)~(d)分别是各生态系统日累积碳交换量与辐射的相互关系. 由于 QYZ 和 DHS 为亚热带常绿林生态系统, XSBN 为热带常绿林生态系统, 因此这 3 种生态系统的生长期为全年, 而 CBS 为温带针阔混交林, 具有明显的生长季节和非生长季节之分. 为了与其它处于生长季节内的生态系统相比较, CBS 选取了 4~9 月生长季节内的数据进行分析。

虽然在冠层尺度由于时间尺度的扩展, 辐射与碳交换量的关系更倾向于直线关系<sup>[25]</sup>, 但对 CBS, QYZ 和 DHS 而言, 这种关系可以很好地用方程 6 进行描述(图 4(a)~(c)). 而对于 XSBN, 本文采用了 2 次曲线的形式进行描述(图 4(d)). 在日尺度上, CBS, QYZ 和 DHS 三种生态系统的  $\alpha$  分别为 0.94, 0.61 和 0.74  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ;  $P_{\max}$  分别为 9.07, 4.45 和 5.09  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $R_d$  分别为 5.34, 2.14 和 2.15  $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 其中, CBS 的各参数均为最大值. 因此, 在生长季节, CBS 生态系统的光合潜力要高于 QYZ 和 DHS 生态系统, 但同时其呼吸强度也明显高于其它生态系统。

图 4(e)~(p)表示了由 NEE- $Q_p$  关系得到的残差与温度、VPD 和土壤水分的相互关系. NEE 残差的计算是以 NEE 减去由 NEE- $Q_p$  关系估算的 NEE 得到的, 正(负)残差表示生态系统表现出高于(低于)由辐射所决定的生态系统的碳吸收能力, 这种差异主要受到了辐射以外的环境因子的影响. 图 4(e)~(h)为残差和日平均温度的关系. CBS 表现出了与其它类型森林明显不同的特征, 残差随着温度的升高而线性增强, 而其它 3 种生态系统均随之线性减弱, 其中对于 QYZ, 当温度超过 30°C 之后, 残差开始明显降低. VPD 与土壤水分含量表征了生态系统内大气与土壤的水分供应状况. CBS 的 VPD 与土壤水分含量对残差没有显著影响(图 4(i)和(m)), 甚至在 DHS 与 XSBN 出现了残差随土壤水分含量的升高而降低的情况(图 4(o)和(p)). 因此, 对于 CBS, DHS 与 XSBN 而言, 生态系统没有表现出干旱的影响. 但在 QYZ 残差显著地受到了夏季干旱的影响, 随着 VPD 的升高与土壤水分

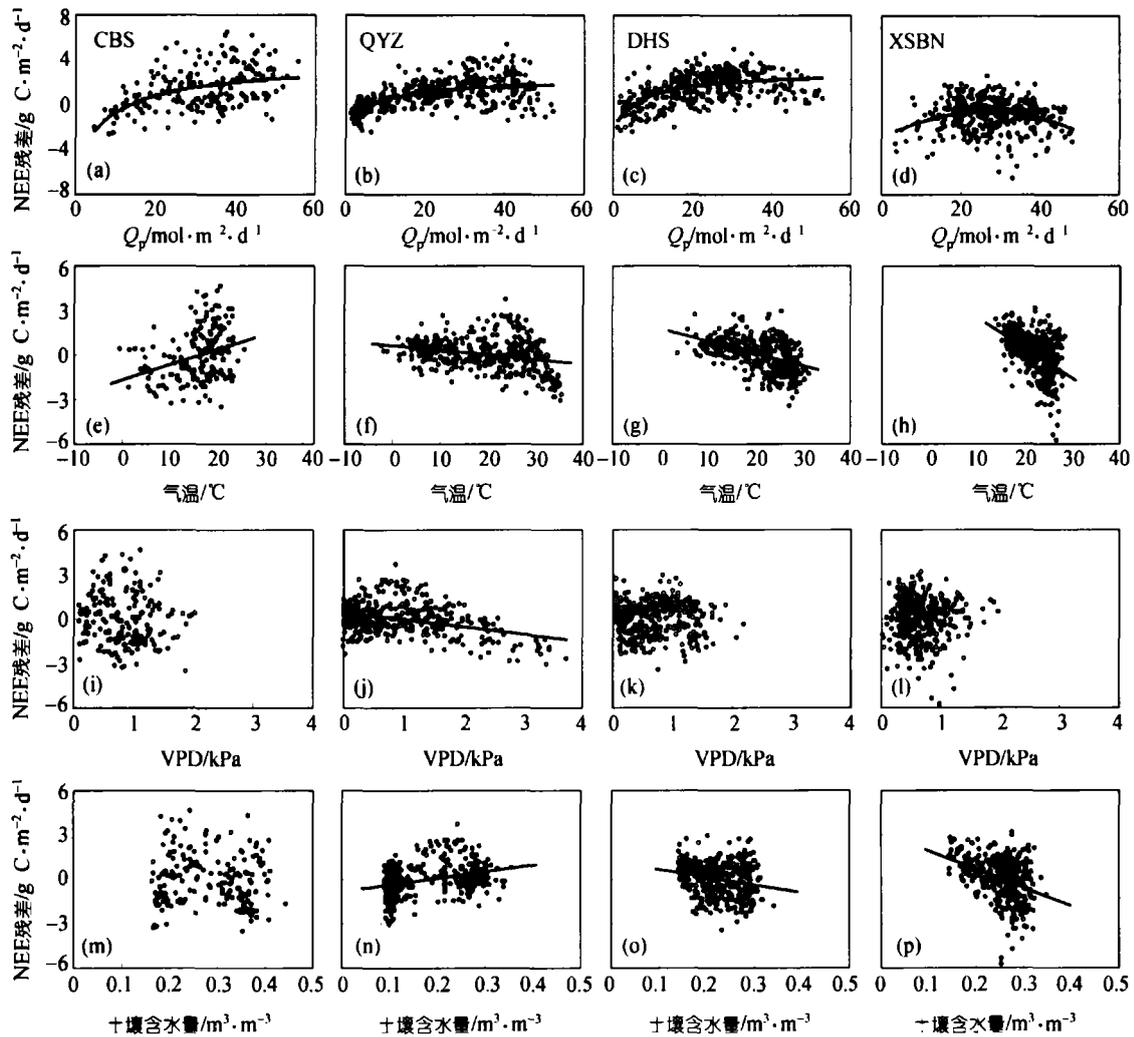


图 4 生态系统日累积 NEE 及残差(Residuals)和环境因子的关系

NEE 残差的计算是以 NEE 减去由 NEE- $Q_p$  关系估算 NEE 得到的, 正(负)残差表示生态系统表现出高于(低于)由辐射所决定的生态系统的碳吸收能力。(a)-(d)为 NEE 与  $Q_p$  的相互关系;(e)-(h), (i)-(l)和(m)-(p)分别为各生态系统残差与温度、VPD 和土壤表层体积含水量的关系。图中趋势线表示存在的二者的相关关系达到显著水平

含量的降低而迅速下降(图 4(j)和(n)). 需要指出的是, 在大气轻微干燥的情况下( $VPD < 1.0$  kPa), 残差是随之升高的。

## 2.4 生态系统碳交换的季节变化

图 5 表示了不同生态系统光合作用参数  $\alpha$ ,  $P_{max}$  和  $R_d$  的季节变化及其差异。CBS 各光合参数均随温度的季节变化而表现出明显的单峰变化特征, 最大值出现在 6 月份, 分别为  $0.0041 \text{ mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1} \cdot \text{photon}$ ,  $1.40 \text{ mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.34 \text{ mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot$

$\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  与 CBS 相比, 其他 3 个生态系统  $\alpha$  的季节变化与幅度均比较小, 而  $P_{max}$  的季节变化明显, 且一年中  $P_{max}$  的最大值与 CBS 接近, 分别为 1.57, 1.18, 1.77  $\text{mg} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 但在夏季  $P_{max}$  均出现明显降低。QYZ 生态系统  $P_{max}$  的降低是由于干旱胁迫影响的, 而在 DHS 与 XSBN, 由于夏季是降水和雾的多发季节, 尽管温度与降水条件适宜, 但可能由于辐射强度不能完全满足生态系统光合作用所需, 导致生态系统  $P_{max}$  受到影响。各生态系统的  $R_d$  均表现出与温度相似的季节变化特征, CBS 生态系统  $R_d$  的最大值

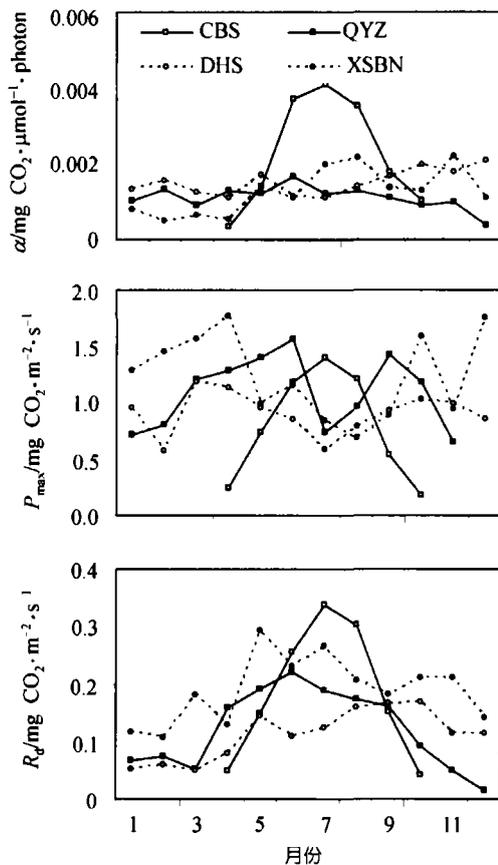


图5 由方程(6)拟合得到的不同生态系统光合作用参数的季节变化

$\alpha$ 是生态系统光合量子效率,  $P_{\max}$ 是生态系统最大光合速率,  $R_d$ 是生态系统白天的呼吸强度

最高 QYZ 与 XSBN 次之, DHS 最低。

各生态系统 NEE,  $R_e$  和 GPP 的季节变化特征如图 6 所示。CBS 生态系统的碳交换主要发生在 4 月到 9 月的生长季节, 而其它生态系统则全年均保持活跃的碳交换能力。由于 CBS 的 GPP 达到最大的时间要早于  $R_e$ , 因此 NEE 在夏初达到最高, 这与 Griffis 等<sup>[20]</sup>在北方落叶阔叶林生态系统上的研究结果相似; 之后, NEE 随着  $R_e$  的升高以及夏末秋初 GPP 的降低而下降。受夏季严重干旱的影响, QYZ 生态系统 GPP 在 7 月份显著降低, 而此时的  $R_e$  依然保持着较高水平, 导致 NEE 的明显降低, 甚至产生了由碳汇向碳源的转变。由于 DHS 生态系统在雨季(4~9 月)的降水与雾较多, 其 GPP 受到光照条件的抑制, 同时  $R_e$  也较高; 而在旱季(10 月~次年 3 月)GPP 和  $R_e$  均比较低, 因此

总体上 DHS 生态系统 NEE 的季节变化相对比较平稳, 并且在全年基本表现为连续的碳汇。而在 XSBN, 在降水较少、温度适宜的雾凉季(11 月~次年 2 月)生态系统表现为碳汇, 而在干热季(3~4 月), 随着温度升高和  $R_e$  的增强, 生态系统表现为弱的碳源, 在呼吸旺盛的湿热季(5~10 月)则转变为较强的碳源。从各生态系统碳交换季节变异的振幅来看, 温带森林生态系统的振幅最大, 而亚热带生态系统次之, 而热带生态系统最小。

为更好地表示各生态系统碳平衡的季节变化特征, 图 7 给出了  $GPP/R_e$  的季节变化。当  $GPP/R_e < 1.0$  时, 表明生态系统的光合作用吸收的  $CO_2$  少于呼吸作用释放的  $CO_2$ , 生态系统表现为碳源; 当  $GPP/R_e = 1.0$  时, 表明生态系统光合作用吸收的碳全部被呼吸消耗返回到大气中, 生态系统达到碳收支平衡; 当  $GPP/R_e > 1.0$  时则表示生态系统为碳汇。CBS 在 5~8 月份为碳汇, 其中最大的碳汇出现在 6 月份, 而且  $GPP/R_e$  的季节变化与温度相似(图 1)。QYZ 在各月均表现为碳汇, 但 7 月份的严重干旱使其表现为接近于碳中性。DHS 在各月的  $GPP/R_e$  基本上都大于其它生态系统, 其中在呼吸较低的 1 月和 12 月,  $GPP/R_e$  达到 2.0 以上, 表明生态系统是一个很强的碳汇。XSBN 的  $GPP/R_e$  除了在雾凉季大于 1.0 之外, 在其它各月均低于 1.0。在全年尺度上, CBS, QYZ, DHS 和 XSBN 生态系统  $R_e$  占 GPP 的比例依次为 81%, 78%, 63% 和 116%。

## 2.5 生态系统年碳收支

4 个生态系统的 2003 年碳收支状况如表 3 所示。其中生态系统  $R_e$  是利用夜间通量与温度的关系进行估算的, GPP 为 NEE 与  $R_e$  之和。在 2003 年, CBS, QYZ 和 DHS 的 NEE 分别为 181.5, 360.9 和 536.2  $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , 而 XSBN 为碳源, 其大小为 -320.8  $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$  但需要明确的是, 由于 XSBN 生态系统通量观测地点的地形较为复杂, 给通量观测带来的不确定性较大, 同时, 本研究只选取了一年的观测资料, 相应地也会对研究结果产生影响。因此, 还需要开展更长时间的观测和更多的数据分析, 以准确评价生态系统的碳收支能力。

能量平衡比例表示了生态系统能量平衡情况,

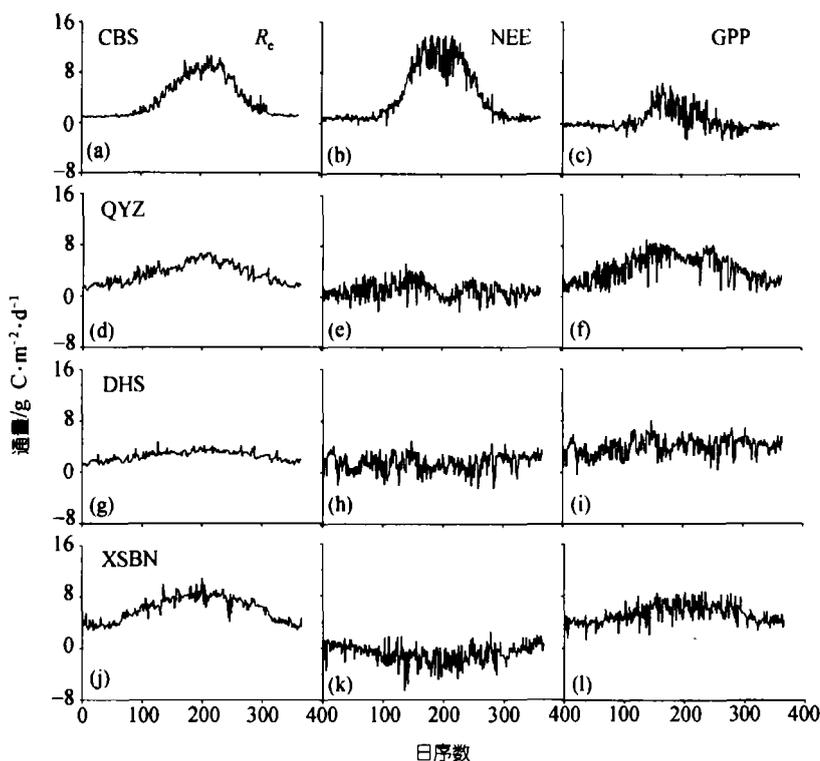


图 6 各生态系统呼吸( $R_c$ )、净交换(NEE)和光合作用(GPP)的季节变化

图中 NEE 是利用经过摩擦风速筛选后的数据计算得到的, 其中白天的缺失数据利用光响应方程进行插补, 时间窗口是 30 d; 夜间缺失数据是利用夜间通量与温度的关系进行插补

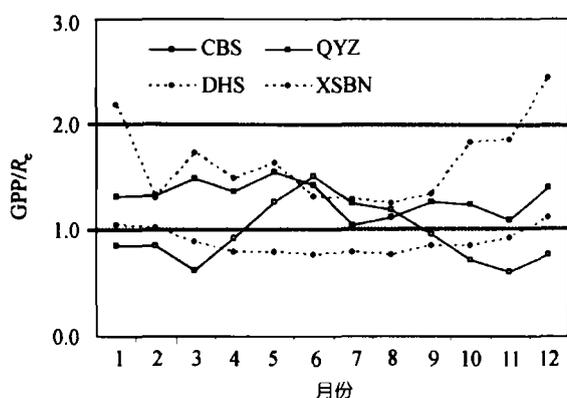


图 7 生态系统  $GPP/R_c$  的季节变化

图中每点表示月 GPP 累计值与  $R_c$  累计值的比例, 当  $GPP/R_c < 1.0$  时, 表明生态系统是碳源; 当  $GPP/R_c = 1.0$  时, 表明生态系统达到碳收支平衡; 当  $GPP/R_c > 1.0$  则表示生态系统为碳汇

一般用有效能量(辐射+土壤热通量+冠层热储存)与湍流能量(显热通量+潜热通量)的比例表示。在通量观测与研究中, 能量平衡多用于观测数据质量的评价<sup>[26]</sup>和年碳收支的校正<sup>[20]</sup>。研究表明 CBS, QYZ,

DHS 和 XSBN 在 2003 年的能量平衡度为 83%, 77%, 82% 和 58%<sup>[27]</sup>。本研究利用上述比例对年碳收支直接进行了校正。从表 3 可以看出, 一方面, 由于进行摩擦风速的筛选会增大生态系统的呼吸量, 因此生态系统的 NEE 减少; 而另一方面, 当生态系统的 GPP 比  $R_c$  大时, 能量平衡校正会增大白天的吸收量, 引起 NEE 的增大<sup>[20]</sup>。但对于 XSBN 而言, 能量平衡校正反而进一步减少了 NEE, 使其变为更强的碳源。因此, 对能量平衡校正的方法的适宜性仍需要进一步评价<sup>[26]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 生态系统碳收支的对比

不同森林生态系统碳收支的对比如表 4 所示。可以看出, 与相比较, 2003 年长白山温带针阔混交林生态系统 NEE 处于相似类型森林生态系统 NEE 的变化范围之内。与温带以及更高纬度的常绿针叶林生态系统相比较, 千烟洲亚热带常绿人工针叶林的 NEE

表 3 生态系统的碳收支( $\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )<sup>a)</sup>

站点	$R_e$		GPP		NEE		
	EBC	N-EBC	EBC	N-EBC	RAW	EBC	N-EBC
CBS	1618.7	1343.6	1837.4	1525.1	391.4	218.7	181.5
QYZ	1662.8	1280.4	2131.5	1641.3	687.6	468.7	360.9
DHS	1120.7	918.9	1774.6	1455.1	741.3	653.9	536.2
XSBN	3873.7	2246.7	3320.5	1925.9	120.2	-553.2	-320.8

a) 表中: EBC, 经过摩擦风速筛选和能量平衡校正后的年总量; N-EBC, 经过摩擦风速筛选, 但是没有进行能量平衡校正的年总量; RAW, 由原始数据进行插补之后计算的年总量, 没有进行摩擦风速筛选与能量平衡校正。  $R_e$  是利用夜间通量数据与温度的关系进行估算。 GPP 为 NEE 与  $R_e$  之和

表 4 不同类型森林生态系统碳收支的比较

站点	$\text{NEE}/\text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	森林类型	纬度
Camp Borden	60~240 <sup>a)</sup>	针阔混交林	44°19'N
Collelongo, Selva Piana	210~660 <sup>a)</sup>	针阔混交林	41°50'N
Takayama	120~214 <sup>a)</sup>	针阔混交林	36°08'N
Tomakomai	293 <sup>a)</sup>	针阔混交林	42°44'N
Harvard Forest	120~303.1 <sup>a)</sup>	针阔混交林	42°32'N
Howland Forest	210~321.9 <sup>a)</sup>	针阔混交林	45°20'N
Sask., SSA Old Aspen	122 <sup>[20]</sup>	针阔混交林	53°63'N
长白山	181	针阔混交林	42°40'N
Sask., SSA Old Black Spruce	35~68 <sup>a)</sup> [20]	常绿针叶林	53°59'N
Sask., SSA Old Jack Pine	78 <sup>[20]</sup>	常绿针叶林	53°54'N
Le Bray, Bordeaux	372.5~575 <sup>a)</sup>	常绿针叶林	44°43'N
Bayreuth	76.3 <sup>a)</sup>	常绿针叶林	50°09'N
Reno/Ritten Bolzano	450 <sup>a)</sup>	常绿针叶林	46°35'N
Niwot Ridge Forest	57.6~152.5 <sup>a)</sup>	常绿针叶林	40°01'N
Wind River Crane	476.2 <sup>a)</sup>	常绿针叶林	45°49'N
千烟洲	360.9	常绿针叶林	26°75'N
Rond., Rebio Jaru Ji Paraná	102 <sup>a)</sup>	热带常绿阔叶林	10°04'S
Manaus	601.7 <sup>a)</sup>	热带常绿阔叶林	02°36'S
鼎湖山	536.2	亚热带常绿针阔混交林	23°17'N
La Selva	-0.05~792 <sup>[8]</sup>	热带雨林	10°26'N
Ducke	220 <sup>[28]</sup>	热带雨林	02°57'S
Jarú	100 <sup>[29]</sup>	热带雨林	10°04'S
Cuierias	590 <sup>[30]</sup>	热带雨林	02°35'S
西双版纳	-320	热带雨林季雨林	21°96'S

a) 数据来源: [http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/neg\\_cfm](http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/neg_cfm), NEE 正值表示从大气中吸收  $\text{CO}_2$ , 负值表示向大气释放  $\text{CO}_2$

接近于 Le Bray 常绿针叶林。鼎湖山亚热带常绿针阔混交林的 NEE 略低于 Manaus 热带常绿针阔混交林。西双版纳热带雨林季雨林在 2003 年表现为一个中等的碳源, 而巴西热带雨林为中性到很强的碳汇, 这可能反映了不同气候与植被类型的差异。

### 3.2 物候对生态系统碳收支的影响

许多研究表明, 物候对生态系统的碳收支有重要的影响<sup>[6,20,31]</sup>。对于温带森林生态系统, 温度决定

了生态系统生长季节的长短与碳交换的强度<sup>[20,31]</sup>。在 2003 年, CBS 生态系统  $R_e$  与 GPP 的季节变化与温度相似, 同时, LAI 也受到了温度的制约(图 8(a))。

由于温度、LAI 和 GPP 具有相似的季节变化特征, 并且温度与 LAI 均对生态系统 GPP 的大小与季节变化有重要影响。为了区分二者对生态系统 GPP 的影响, 首先根据 LAI 的季节变化特征, 将冬季 CBS 生态系统的 LAI 确定为该生态系统的基本 LAI, 即生态系统内常绿针叶林的叶面积, 其大小约为

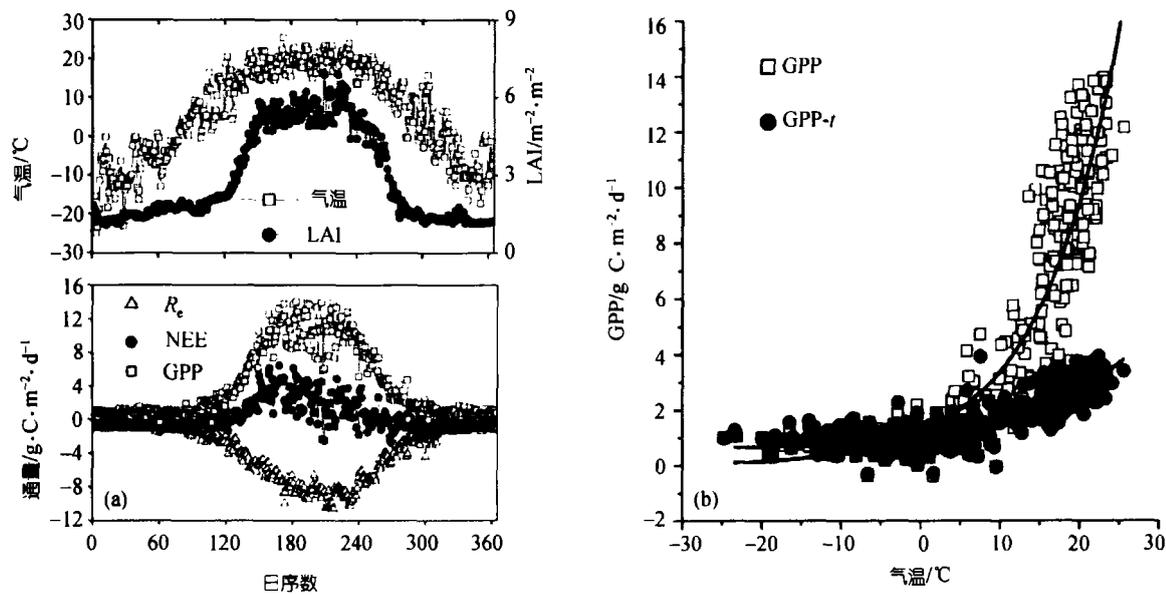


图 8 (a) CBS 生态系统  $R_e$ , GPP, LAI 与温度的协同季节变化. (b) CBS 生态系统温度和 LAI 对生态系统 GPP 作用的区分图(a)中为更清楚地表现 GPP,  $R_e$  和 NEE 的季节变化, 将  $R_e$  以负值表示, 负值越小表示呼吸释放越强烈. (b) 中  $GPP-t$  表示排除 LAI 影响之后的生态系统 GPP, 实线为拟合趋势线. GPP 和  $GPP-t$  的差值表示了 LAI 对 GPP 的贡献

$1.5\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  然后将日累积 GPP 分别除以对应的 LAI, 得到单位 LAI 的 GPP, 之后单位 LAI 的 GPP 再乘以基本叶面积, 得到基本 LAI 条件下的 GPP, 即  $GPP-t$ . GPP 与  $GPP-t$  的差值可以简单地表示来自于叶面积的贡献. 图 8(b) 表明, 二者之间的差值随着温度的增长而增大. 初步的计算表明, 来自于温度和 LAI 的 GPP 贡献分别为  $615$  和  $910 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ .

CBS 生态系统  $R_e$ , GPP 和 LAI 的季节变化表现出了两个临界温度. 一个临界温度是  $0^\circ\text{C}$ . 当在 3 月中下旬日平均温度超过  $0^\circ\text{C}$  以上之后, 生态系统的  $R_e$  和 GPP 开始活跃, 同时随着新生枝叶的萌发, LAI 也开始逐渐升高. 而在 10 月底温度低于  $0^\circ\text{C}$  之后, 植被的生长随之基本停止. 另一个临界温度为  $10^\circ\text{C}$ . 图 8(a) 表明, 在 4 月 3 日温度达到  $10^\circ\text{C}$  之后, 生态系统的碳交换活动开始迅速增强, 而在 9 月底温度低于  $10^\circ\text{C}$  之后, 生态系统的碳交换迅速降低; LAI 也发生了类似的变化. 图 9 表明, 当温度从  $0^\circ\text{C}$  升高到  $10^\circ\text{C}$ , 生态系统  $R_e$ , GPP, NEE 和 LAI 仅有很小的增长, 但是当温度大于  $10^\circ\text{C}$  之后, 均迅速地升高.

由于受到副热带高压的影响, QYZ 在夏季出现降水稀少与高温同步作用的环境条件. 这一方面

是由于降水总量减少, 另一方面是由于夏季温度与降水的非同步性, 导致在干旱期间, 生态系统 GPP 明显降低(图 6 与图 7). 而在没有出现干旱胁迫的 5 月份, 生态系统的净碳吸收量为  $68.8 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$  虽然在 6 月份的下半月才开始出现明显胁迫, 但 6 月份碳吸收量依然达到了  $62.2 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ , 与 5 月份没有明显差异. 但在干旱严重的 7 月和 8 月份, 吸收量减少到了  $8.6$  与  $19.8 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ , 在 9 月份, 碳吸收量恢复到  $37.8 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ .

DHS 生态系统具有明显的旱季(10~3 月)与雨季(4~9 月)之分. 在 2003 年, 旱季和雨季的降水量分别是  $150.7$  和  $1148.7\text{mm}$ . 在雨季, 生态系统日  $G_{pp}$  仅比旱季增大  $0.4 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 而  $R_e$  却增大  $1.0 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 导致 NEE 降低了  $0.6 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 5). 并且由光合作用参数可以看出, 雨季的  $P_{max}$  小于旱季, 而  $R_d$  却高于旱季. 因此, 雨季和旱季的累积 NEE 分别为  $212.4$  和  $323.8 \text{g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其雨季较小的原因是生态系统的光合作用受到抑制, 而呼吸作用增强, 导致 NEE 降低.

XSBN 在不同的生长时期也表现出了不同的碳

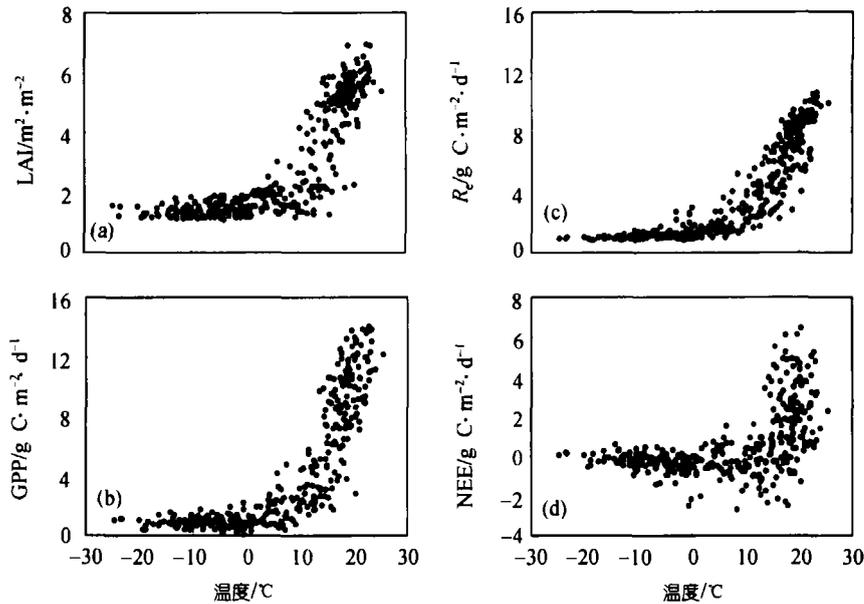


图9 CBS 温度与 LAI(a), 日累积 GPP(b),  $R_e$ (c)和 NEE(d)的关系

表5 鼎湖山和西双版纳不同季节的生态系统通量与环境因子<sup>a)</sup>

时期	温度 /°C	VPD /kPa	土壤水分 /m³·m⁻³	降水量 /mm	$R_e$ /g·C·m⁻²·d⁻¹	NEE/g·C·m⁻²·d⁻¹	GPP/g·C·m⁻²·d⁻¹	$\alpha$ /mg· $\mu$ mol⁻¹	$P_{max}$ /mg·m⁻²·s⁻¹	$R_d$ /mg·m⁻²·s⁻¹	
鼎湖山亚热带常绿阔叶林(DHS)											
旱季	10~3月	16.6	0.63	0.20	150.7	2.0	1.8	3.8	0.0015	0.93	0.088
雨季	4~9月	25.6	0.80	0.24	1148.7	3.0	1.2	4.2	0.0015	0.76	0.129
西双版纳热带雨林季雨林(XSBN)											
雾凉季	11~2月	18.3	0.48	0.23	170.6	4.0	0.1	4.1	0.0018	0.85	0.182
干热季	3~4月	23.2	0.93	0.24	147.1	5.7	-0.9	4.8	0.0006	1.64	1.154
湿热季	5~10月	24.8	0.69	0.28	831.5	7.7	-1.5	6.2	0.0017	0.90	0.240

a) 温度、VPD 与土壤水分是各季节的日平均值; 降水量为各季节的累计值;  $R_e$ , NEE 和 GPP 为各季节的日平均累积值;  $\alpha$ ,  $P_{max}$  和  $R_d$  是利用各季节白天通量观测数据由方程 6 拟合得到

交换特征。在雾凉季尽管生态系统 GPP 低于干热季和湿热季, 但此时的生态系统  $R_e$  也较低, 因此, 生态系统表现为碳汇。而在干热季和湿热季, 随着温度的升高, 虽然生态系统 GPP 逐渐也升高, 但增长速率明显小于  $R_e$ , 并且, 湿热季的大量降水以及由此产生的雾等气象条件不利于生态系统光合作用的高效进行, 而生态系统呼吸却随着温度而持续升高, 二者共同作用的结果是导致 NEE 的降低, 引起生态系统由碳汇向碳源的转变。Voulitis 等<sup>[7]</sup>和 Loescher 等<sup>[8]</sup>在巴西与中美洲的热带雨林的研究表明, 在雨季由于水、热条件的改善, 热带雨林生态系统表现为碳汇, 而 Goulden 等<sup>[32]</sup>研究认为在旱季由于土壤有机质分解慢, 生态系统呼吸速率低, 因此 NEE 较雨季高。这与西双

版纳热带雨林季雨林的研究结果是相似的。

### 3.3 生态系统碳收支的纬度变化趋势

随着纬度的变化, 生态系统的水热等环境因子随之发生规律性的变化(图 1), 并对生态系统的碳交换产生了显著的影响。表 6 对比了 2003 年各生态系统的环境因子和日平均光合吸收量(GPP/D), 光能利用率(GPP/ $Q_a$ )以及降水利用效率(GPP/ $R_{ain}$ )等与碳交换有关的参数, 其中 CBS 只列出了生长季节(4~9月)的计算结果。从表 7 可以看出, 从 CBS 到 DHS, 温度与降水逐渐升高, 生态系统  $R_e$  占 GPP 比例逐渐降低, 而 NEE 的比例升高, 因此, NEE 与  $R_e$  的比例随纬度的降低而逐渐增大, 这与 Valentini 等<sup>[12]</sup>在欧洲温带和

表 6 各生态系统的环境因子和碳交换参数

	CBS	QYZ	DHS	XSBN
温度	16.16	19.76	21.12	22.35
VPD <sup>a)</sup>	0.84	0.94	0.71	0.66
土壤水分 <sup>a)</sup>	0.28	0.18	0.22	0.26
$Q_p$ <sup>a)</sup>	5774.38	8877.10	8342.82	10108.44
$Q_a$ <sup>a)</sup>	4924.43	7001.65	6828.92	9558.25
降水 <sup>a)</sup>	439.3	854.9	1299.4	1149.2
GPP/ $R_e$ <sup>b)</sup>	1.13	1.28	1.58	0.86
GPP/NEE <sup>b)</sup>	8.44	4.56	2.73	-5.98
GPP/ $Q_a$ <sup>b)</sup>	0.31	0.24	0.21	0.20
NEE/ $D$ <sup>c)</sup>	0.99	0.99	1.47	-0.88
GPP/ $D$ <sup>c)</sup>	8.37	4.51	4.01	5.26
$R_e/D$ <sup>c)</sup>	7.38	3.52	2.54	6.14
GPP/ $R_{min}$	3.49	1.93	1.13	1.67

a) 温度(°C)、VPD(kPa)和土壤水分( $m^3 \cdot m^{-3}$ )为年平均均值;  $Q_a$ ( $mol \cdot photon \cdot m^{-2}$ ),  $Q_p$ ( $mol \cdot photon \cdot m^{-2}$ )和降水(mm)为年总量; b) NEE,  $R_e$ 和GPP为年累积值( $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ); c)  $D$ 表示生态系统生长季节的天数. CBS为4-9月,共183d,其它3个生态系统为365d

北方森林的研究结果相似. 虽然 NEE/ $D$  是随着纬度降低而升高, 但 GPP/ $D$ , GPP/ $Q_a$  和 GPP/ $R_{min}$  却表现出了降低的趋势, 这反映出了温带森林生态系统在有限的生长季节内高效利用有效资源的生长特性<sup>[30]</sup>. 但 CBS 生态系统每天的呼吸释放量是最高的, 并且生态系统呼吸的温度敏感性( $Q_{10}$ )也明显高于 QYZ 和 DHS(表 2), 这可能与其林龄较大(约 200 年)<sup>[16]</sup>, 土壤有机质含量丰富有关<sup>[33]</sup>.

需要指出的是, XSBN 生态系统的碳交换参数往往脱离了这种随纬度的变化趋势, 一方面的原因是该生态系统位于中国西南部, 受西南季风的影响比较大, 而其它生态系统受大陆性季风气候的影响比较明显, 另一方面的原因是, 本研究仅选取了一年的观测数据进行分析, 可能会包括很多的不确定性, 因此, 还需要更长时间的观测数据来进行相关的深入分析.

#### 4 结论

本研究利用 ChinaFLUX 通量观测数据分析了中国东部森林样带上长白山温带针阔混交林(CBS), 千烟洲亚热带常绿人工针叶林(QYZ)、鼎湖山亚热带常绿针阔混交林(DHS)与西双版纳热带雨林季雨林(XSBN)4 种森林生态系统碳交换的季节变化及其对环境的响应特征. 研究取得了以下几方面的结论:

(1) 长白山温带针阔混交林(CBS)生态系统的碳收支表现出了与温度、LAI 协同的季节变化特征, 并且生态系统光合作用(GPP)中来自于 LAI 增长的贡献

(910  $g \cdot C \cdot m^{-2}$ )要大于温度对生态系统 GPP 的直接贡献(615  $g \cdot C \cdot m^{-2}$ ). 同时, 除了 0°C 温度之外, 10°C 的温度界限对生态系统的碳交换具有重要的影响. 千烟洲亚热带常绿人工针叶林(QYZ)在夏季受到了异常干旱的影响, NEE 在干旱期间明显降低. 鼎湖山亚热带常绿针阔混交林(DHS)与西双版纳热带雨林季雨林(XSBN)均表现出在旱季吸收强、而雨季吸收弱的特征, 这主要是由于这两个生态系统在雨季的降水量较大, 光合有效辐射不足, 导致生态系统光合作用受到抑制, 而呼吸作用随温度升高而增大所致.

(2) 利用夜间与白天通量观测数据分别估算得到的生态系统呼吸之间存在一定的差异, 前者估算得到的生态系统呼吸的年总量要高于后者的估算值. 生态系统呼吸的温度敏感性参数( $Q_{10}$ )与年总量的大小顺序是 XSBN>CBS>QYZ > DHS, 但 CBS 生态系统在生长季节内每天的呼吸释放量是最高的.

(3) 在 2003 年, CBS, QYZ 和 DHS 为碳汇, 其大小分别为 181.5, 360.9 和 536.2  $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ , 而 XSBN 为碳源, 其大小为 -320.8  $g \cdot C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ .

(4) 随着纬度的降低, 温度与降水逐渐增大, 在 CBS, QYZ 和 DHS 三种生态系统之间, 生态系统  $R_e$  占 GPP 比例逐渐降低, 分别为 88%, 78% 和 63%; NEE 与  $R_e$  的比例随纬度的降低而逐渐增大; 每天的光合吸收量, 光能利用率和降水利用效率均表现出了随纬度降低而降低的趋势. 但 XSBN 生态系统却往往脱离了这种纬度变化趋势. 由于本研究仅选取了一年

的观测数据进行分析, 而陆地生态系统是具有复杂的结构和功能的有机体, 不同生态系统对气候环境变化的响应和适应机理存在显著的差异, 对这些差异的理解和解释还需要更长时间的观测数据, 开展更深入的分析。

### 参 考 文 献

- 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环与碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003. 43—66
- Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystem. *Science*, 1994, 263: 185—190
- Malhi Y, Baldocch D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forest. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 715—740
- Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 113: 97—120
- Global Carbon Project. Science Framework and Implementation. Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVERSITAS) Report No. 1: Global Carbon Project Report No. 1 Canberra, 2003. 22—23
- Baldocchi D D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bull Am Meteorol Soc*, 2001, 82: 2415—2434
- Voulitis G L, Filho N P, Hayashi M M S, et al. Seasonal variations in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest. *Functional Ecology*, 2001, 15: 388—395
- Loescher H W, Oberbauer S F, Gholz H L, et al. Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a Central American tropical wet forest. *Global Change Biology*, 2003, 9: 396—412
- Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, et al. Long-term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 108: 293—315
- Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 1996, 2: 183—197
- Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1997, 83: 147—170
- Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861—865
- 彭少麟, 赵平, 任海, 等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化. *地学前缘*, 2002, 9(1): 217—226
- 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO<sub>2</sub> 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 109—117
- 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 主要气象条件对长白山阔叶红松林 CO<sub>2</sub> 通量的影响. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 103—108
- 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 84—94
- 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 167—174
- 闫俊华, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律. *生态学报*, 2003, 23(11): 2359—2366
- Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, et al. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 1994, 75: 134—150
- Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, et al. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2003, 117: 53—71
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurement for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q J Roy Meteor Soc*, 1980, 106: 85—100
- Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Lay Meteorology*, 2001, 99: 127—150
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43—69
- 张克映. 滇南气候的特征及形成因子的初步分析. *气象学报*, 1966, 33: 210—230
- Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, et al. CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, 1995, 26: 1—81
- Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Biology Change*, 2003, 9: 479—492
- 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 46—56
- Fan S-M, Wofsy S C, Bakwin P S, et al. Atmosphere-biosphere exchange of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> in the central Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 25: 12851—16864
- Grace J, Lloyd J, McIntyre J, et al. Fluxes of carbon dioxide and water vapor over an undisturbed tropical rainforest in south-west Amazonia. *Global Change Biology*, 1995, 1: 1—12
- Mahli Y, Nobre A D, Grace J, et al. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 31593—31612
- Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2002, 113: 53—74
- Goulden M L, Miller S D, Da Rocha H R, et al. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO<sub>2</sub> exchange. *Ecological Applications*, 2004, 14(4) Supplement: S42—S54
- 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO<sub>2</sub> 和水热通量的模拟研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 131—140