

喀斯特常绿落叶阔叶混交林旱季 CO₂ 通量特征及其影响因子

李子涵^{1,2}, 罗维均^{1,3,*}, 杜虎^{4,5}, 宋同清^{4,5},
彭海军¹, 王彦伟^{1,2}, 王世杰^{1,3}

(1.中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550081; 2.中国科学院大学,北京 100049;
3.中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站,贵州 普定 562100; 4.中国科学院亚热带农业生态研究所
亚热带农业生态过程重点实验室,长沙 410125; 5.中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站,广西 环江 547100)

摘要: 对广西木论国家级自然保护区喀斯特常绿落叶阔叶混交林旱季生态系统 CO₂ 净交换 (*NEE*) 的变化特征及其与环境因子的关系进行初步分析,计算研究期间碳汇大小,与其他相似气候条件下的不同生态系统进行对比,以期准确估算该生态系统的年碳汇量提供基础。利用涡度相关法对该地区旱季(2018年10月1日~2019年3月31日) CO₂ 通量进行连续观测,同时开展降水量(*P*)、光合有效辐射(*PAR*)、空气温度(*T_{air}*)、土壤温度(*T_{soil}*)以及土壤含水量(*SWC*)等环境因子监测。观测期内该生态系统 CO₂ 通量及浓度具有明显的“单谷”状日变化特征,白天表现为明显的碳汇,夜间则表现为明显的碳源,*NEE* 在 12:00 最强,为 $-0.309 \pm 0.330 \text{ mg CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 18:30 最弱,为 $0.074 \pm 0.061 \text{ mg CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 观测期内 *NEE*、生态系统呼吸 (*Re*)、生态系统总生产力 (*GEP*) 分别为 -121.4 、 209.2 、 330.6 g C/m^2 , 该生态系统在 2019 年 2 月的碳吸收能力最强, *Re*、*GEP* 在 2018 年 10 月达到最强; 光合有效辐射是白天生态系统 CO₂ 净交换 (*NEE_d*) 变化的主要控制因素 ($R^2 = 0.40$, $p < 0.01$), 空气温度与夜间生态系统 CO₂ 净交换 (*NEE_n*) 存在指数关系 ($R^2 = 0.1267$, $p < 0.01$); 观测期内的降雨抑制了该生态系统的碳汇能力,即降水对 *NEE* 产生了抑制作用。旱季该生态系统整体表现出明显的碳汇,碳汇值为 1.214 t C/ha , 明显低于相似气候条件下的其他生态系统。

关键词: 涡度相关法; 喀斯特山地; 常绿落叶混交林; 生态系统净交换; 碳汇能力

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2020)05-0525-12 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.064

陆地生态系统在全球碳循环中扮演重要的角色,每年由陆地生态系统固定的碳可达 $2.5 \sim 3.9 \text{ Pg C}^{[1]}$, 研究 CO₂ 在陆地生态系统的周转和代谢,对碳减排具有重要意义。森林生态系统在全球碳循环中发挥着重要的作用,其总面积仅占全球陆地的 30%,却固定了全球 45% 的碳^[2]。已有研究发现^[3],东亚季风区亚热带森林年生态系统 CO₂ 净交换 (*NEE*) 可达 $-0.72 \pm 0.08 \text{ Pg C/a}$, 占全球森林年 *NEE* 的 65.4%^[4], 可见该区域的亚热带森林在陆地碳循环中起到了重要的作用。目前对于我国西南东亚季风区森林生态系统碳通量的观测研究主要

集中在亚热带常绿阔叶林、常绿针阔混交林、人工林及亚高山针叶林等地区的台站 (<http://www.fluxnet.ornl.gov/maps-graphic>)。然而对该地区的喀斯特原生常绿落叶阔叶混交林的研究却鲜有报道。

然而,由于森林生态系统结构复杂以及仪器和方法的限制,对森林碳汇量的估算结果普遍存在精度低、不确定性高的问题^[5]。我国西南地区广泛分布喀斯特地貌,该地区生境复杂,大部分地方土壤深度不足 $30 \text{ cm}^{[6]}$; 研究发现石灰岩地区更适合深根系的树木生长^[7], 同时喀斯特地区特殊的地表地下双层二元水文结构导致“岩溶干旱”^[8], 植物为获

收稿日期: 2019-12-20; 改回日期: 2020-03-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502300、2016YFC0502102); 国家自然科学基金项目(41673121); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40020100); 贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648); 广西重点研发计划项目(桂科 AB17129009、桂科 AB16380255)。

第一作者简介: 李子涵(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态环境地球化学。E-mail: lizihan@mail.gyig.ac.cn, <http://www.cnki.net>

* 通讯作者: 罗维均(1978-), 男, 研究员, 研究方向为环境地球化学。E-mail: luoweijun@vip.gyig.ac.cn.

取深层水分保证正常生长,其根系可穿过土壤和岩石缝隙,导致该地区植被地上与地下部分碳分配比例最高可达2:1^[9],发达的地下根系系统会导致对该地区进行传统植被调查时对净初级生产力(NPP)的低估^[10];同时该地区存在强烈碳酸盐岩风化作用,植物对风化产生的溶解性无机碳(DIC)的利用形成有机质固存的机制^[11]又常常被现有研究森林碳循环的地球化学过程模型忽略^[12-13]。从20世纪90年代开始,涡度相关法因其观测不对生态系统造成扰动,可实现长期、连续、定点观测的优点,已成为测定陆地生态系统与大气间物质和能量交换的主要方法^[14],因此,亟需使用涡度相关法对喀斯特森林的碳汇能力进行研究。

当前全球水热格局发生重大改变的背景下,对森林生态系统的水碳变化规律的研究一直是焦点问题。旱季是指某地区降水低于潜在蒸散的时期^[15],干旱引起的土壤水分变化会导致林下幼苗的种类和数量大量减少^[16-17];刘效东等^[18]比较了南亚热带3种演替阶段的森林,发现成熟林内的水分条件在年尺度上显著降低,全年旱季变得更为明显。干旱所导致的林下植被分布和生长的变化以及森林内部水热条件的改变将影响森林的组成和结构,并最终对森林生态系统的碳汇能力产生深远的影响。区域尺度上,2010年中国西南五省的极端干旱造成该年较往年平均(2001~2008)NPP损失34 Tg C^[19];同样干旱导致了20世纪南美地区NPP降低40%^[20]。现有的研究结果显示,即使在旱季,亚热带森林生态系统仍有较高的碳汇能力,该时期碳汇可占全年碳汇的40%~50%左右^[21]。我国西南喀斯特地区由于全年降水分布不均,而且秋冬季降水量仅占蒸散量的38%~50%,极易出现季节性干旱^[22]。而且,我国西南地区有旱季提前,长度变长,冬季和春季降水偏少,干旱化加剧的趋势^[23-24]。因此,以亚热带气候条件的喀斯特顶极森林生态系统为研究对象,开展旱季CO₂通量变化特征的研究对理解全球变化背景下森林-大气间碳水交换有其特殊意义。

本文基于涡度相关法,选取了广西环江木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林2018年10月~2019年3月共计6个月(旱季)的CO₂通量数据,分析该时期影响CO₂通量的因素,获得研究区该时期碳源/汇性质和大小,为今后准确估算喀斯特森林碳收支

提供基础。

1 研究方法

1.1 研究区概况

木论通量塔位于广西壮族自治区环江县木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林25 ha大样地内(25°07′59″N,108°00′38″E,海拔486 m)(图1a,b)。通量塔附近坡度为1°~14°,周围冠层高度在15 m左右,主要生长的乔木以小果厚壳桂(*Cryptocarya austrokwichouensis*)和圆果化香树(*Platycarya longipes*)为主,灌木以齿叶黄皮(*Clausena dunniana*)、枝翅珠子木(*Phyllanthodendron dunnianum*)等为主,草本植物以楼梯草(*Elatostema involucreatum*)、傅氏凤尾蕨(*Pteris fauriei*)等为主^[25]。大样地所在的木论国家级自然保护区年均温19℃,年均降水量1300~1400 mm,降水主要集中在4~9月,约占全年降水量的80%。该地区地貌以峰丛洼地、峰林谷地为主,是我国喀斯特地区受溶蚀作用最强、地形起伏最破碎的地区。保护区总面积为89.69 km²,森林覆盖率达95%,与贵州茂兰自然保护区连片组成了当今世界上连片分布面积最广、保存最完好、原生性最强的喀斯特森林^[9]。

1.2 观测系统设置

木论通量塔高30 m,观测系统分为涡度相关系统(OPEC)和气象观测系统。涡度相关系统由开路式CO₂和H₂O红外气体分析仪(Li-7500)和三维超声风速仪(CSAT3)组成,设置在距地面27.5 m的平台上,观测数据以10 Hz的频率保存在CR1000数据采集器中;气象观测系统由架设在15 m平台的净辐射传感器(CNR4)、光合有效辐射传感器(LI-190SL-50)、雨量筒(TR-525USW)以及温湿度传感器(HMP155),地表以下5 cm和10 cm分别放置的土壤温湿度传感器(70030)和土壤热通量板(HFP01SC)组成。上述传感器数据均30 min为单位记录在数据采集器内(CR1000)。研究期通量塔温度、光合有效辐射和降水量的月变化如图1c、d所示。

1.3 分析方法

(1) 原始数据的校正

本研究选择2018年10月至2019年3月数据为研究对象(仪器断电等原因未完整获取2019年的湿季数据),对所有30 min原始.ghg文件使用Ed-dyPro 6.2(Express mode)(LI-COR Inc.,美国)进行通量数据的计算(公式1~3)和校正。校正包括频谱校正^[26-27],WPL校正^[28],虚温校正^[29],时滞补

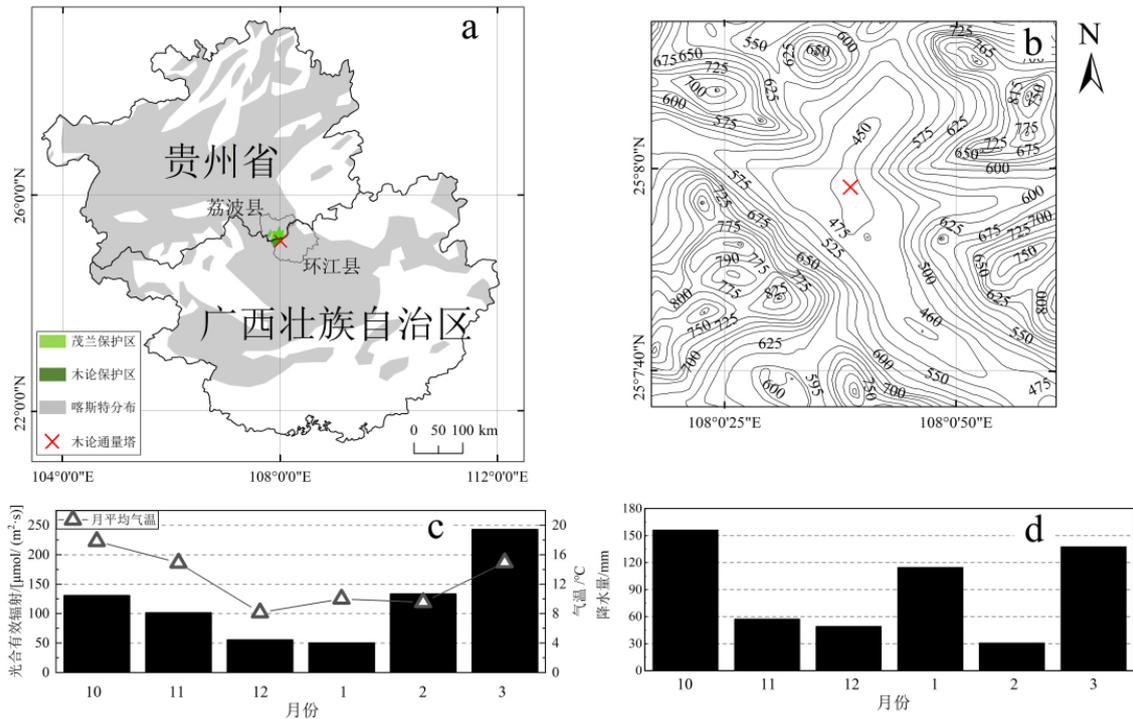


图 1 木论通量塔及研究区位置示意图

Fig.1 Location of Mulun flux tower and the research area

偿去势 (Block averaging) 统计检验^[30] 和平面拟合 获得初始 NEE 值。

$$NEE = F_c + F_s \quad (1)$$

$$F_c = \overline{w'c'} \quad (2)$$

$$F_s = \frac{\Delta c}{\Delta t} \cdot z \quad (3)$$

式中 F_c 代表 CO₂ 的湍流通量项 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$], w' 和 c' 代表三维风分量 (m/s) 和 CO₂ 摩尔密度 (mmol / m^3) 的脉动值; F_s 代表 CO₂ 的存储项 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$], Δc 代表高度 z (27.5 m) 处两次 CO₂ 浓度的差值 (mg / m^3)、 Δt 代表两次测量的时间间隔 (1 800 s)。

(2) CO₂ 及其通量数据的质量控制

为减小异常值点 (通量值异常大/小或者前后通量值差异较大) 所带来的误差, 对 EddyPro 6.2 输出的初始通量数据进行质量控制, 超出阈值范围的数据予以删除^[21]; 有时因为红外气体分析仪镜片受水汽影响等原因会导致前后半小时通量数据差异非常大的现象, 本文将某通量数值与其前后相邻两数值平均值之差的绝对值大于其相邻两数值方差的 2.5 倍的数据作为异常值, 并进行了剔除^[31]; 夜间数据筛选与剔除: 参考朱治林等人^[32] 对夜间数据的处理方法, 剔除了夜间所有通量为负值的数据; 并限定夜间通量值为 $0.6 \text{ mg CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 超出该

阈值数据予以剔除; 参考 Tan 等人^[33] 的方法, 计算出 u_* 的阈值为 0.10 m/s 并剔除了夜间 $u_* < 0.10 \text{ m/s}$ 的通量数据。同时对 CO₂ 数据质量控制: 设定 CO₂ 浓度正常范围为 $500 \sim 800 \text{ mg} / \text{m}^3$, 超出该范围的数据予以剔除^[34]。经过质量控制后剔除 49.9% 的通量数据, 高于 FLUXNET 的 35% 拒绝率^[35]。

(3) 通量数据的插补

对于缺失的通量数据将其分为白天和夜晚两个数据子集, 并用各子集剩余的有效数据分别驱动 Michaelis-Menten 方程 (公式 4) 和 Van't Hoff 方程 (公式 5)^[36]:

$$NEE_d = \gamma - \frac{\alpha \cdot \beta \cdot PAR}{\alpha \cdot PAR + \beta} \quad (4)$$

$$NEE_n = R_{ref} e^{\theta T_{air}} \quad (5)$$

式中 NEE_d 代表白天生态系统 CO₂ 净交换 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; $\alpha, \beta, \gamma, R_{ref}$ 和 θ 为拟合参数, 分别代表光反应曲线截距 ($\mu\text{mol} / \mu\text{mol}$), 光合有效辐射 (PAR) $\rightarrow 0$ 和 ∞ 时的呼吸速率 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 参考温度下 ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) 的呼吸速率 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 和与 Q_{10} 有关的参数 [$\theta = \ln(Q_{10}) / 10$]; NEE_n 代表夜间生态系统 CO₂ 净交换 [$\mu\text{mol CO}_2 / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$], PAR 和 T_{air} 则代表白天的光合有效辐射 [$\mu\text{mol} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 和 27.5 m 处的夜间气温 ($^\circ\text{C}$)。

对于 PAR 数据缺失时段数据的插补则采用昼夜平均法, 设定白天 14 天, 夜晚 7 天的窗口对缺失数据进行插补。

(4) 通量数据的拆分

计算生态系统总生产力 (GEP) 需要得到生态系统呼吸 (Re), 由于夜间植物没有光合作用, 所以 NEE_n 可作为夜间生态系统呼吸 (Re_n), 通过对夜间通量数据与温度的拟合得到呼吸曲线, 将白天的温度带入曲线外推得到白天的生态系统呼吸 (Re_d), 故生态系统呼吸定义为:

$$Re = Re_d + Re_n \quad (6)$$

因此总初级生产力 GPP 可表示为:

$$GPP = NEE - Re \quad (7)$$

而在生态系统尺度上总生态系统生产力等于

总初级生产力, 即:

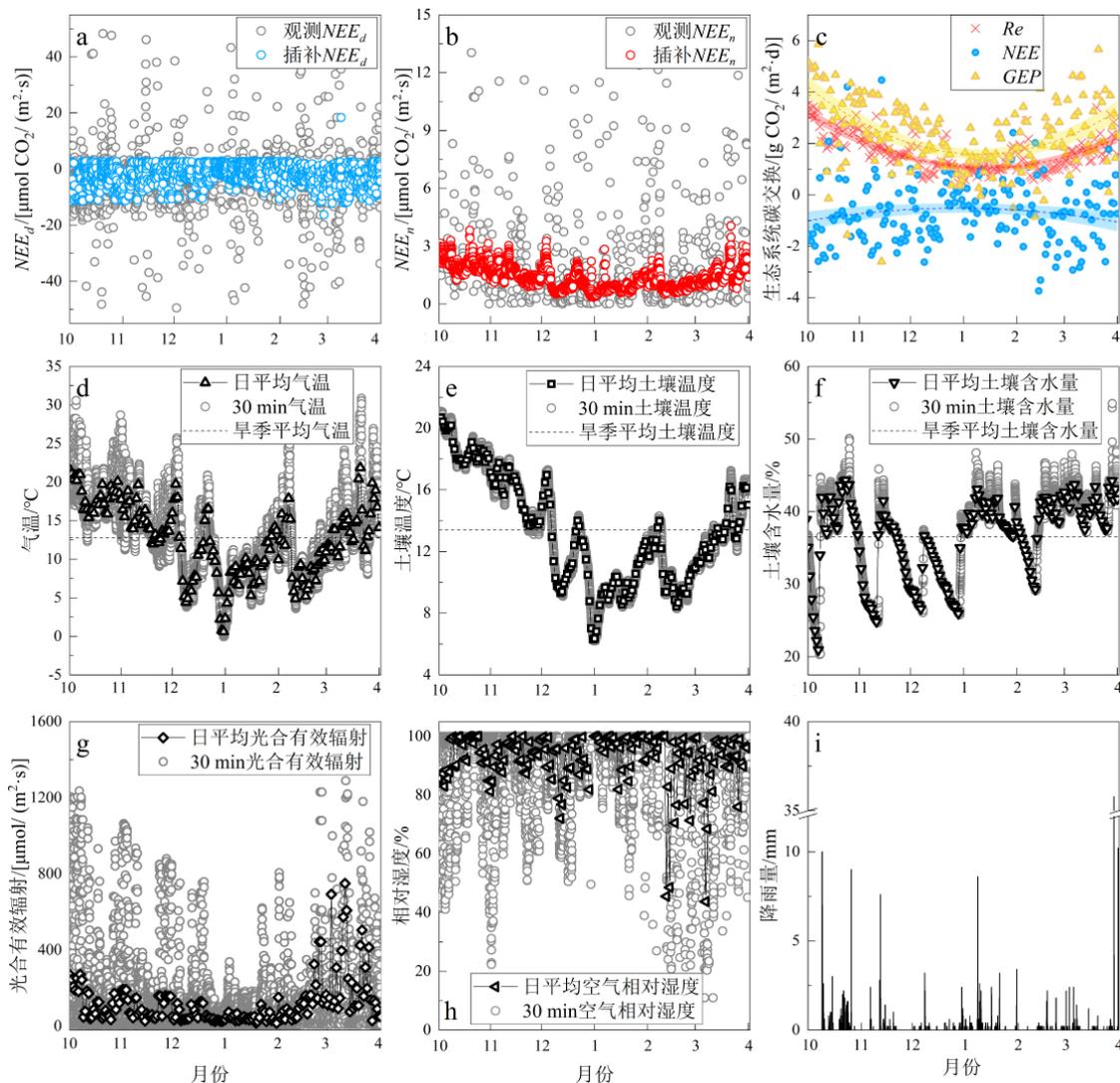
$$GEP = GPP \quad (8)$$

本文中对于半小时尺度的碳通量数据表述为 mg CO₂/(m²·s), 日和月尺度分别表示为 g C/(m²·d) 和 g C/(m²·月), 季节尺度的碳汇强度为 t C/ha。

2 结果与分析

2.1 环境因子的变化

降水 (P) 主要集中在旱季的开始 (2018 年 10 月) 和结束 (2019 年 3 月) 阶段 (图 1d, 图 2i), 其余月份除 2019 年 1 月外降水量不足 60 mm, 与之对应的土壤含水率 (SWC) 在 2018 年 10 月、2019 年的 1 月和 2019 年 3 月维持在较高水平, 在其他月份呈明显偏低 (图 2f)。降水量与 SWC 之间存在明显的响应关系, 每出



c 图中虚线表示采用二次函数拟合得到 NEE, Re 和 GEP 变化趋势图

图 2 木论站旱季生态系统碳交换及环境因子的变化特征

现大于 5 mm 的降水事件即能引起 SWC 的明显上升 (图 2f j)。PAR 在 2018 年 10 月到 2019 年的 3 月之间呈现先减小, 而后增加的趋势 (图 1c 图 2g) 2019 年 3 月平均光合有效辐射最大, 为 242.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 2019 年 1 月最小, 为 50.1 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。T_{air} 与土壤温度 (T_{soil}) 整体上的变化趋势较吻合, 均从 2018 年 10 月至 12 月底呈现下降趋势并从 2019 年 1 月开始缓慢上升 (图 2d e) T_{air} 较 T_{soil} 的变化幅度大但是二者在旱季的平均差异仅为 0.6 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 CO₂ 通量的变化

2.2.1 CO₂ 通量和浓度的月平均日变化特征

CO₂ 浓度和 NEE 在一天中的变化均表现为明显单谷特征, 白天吸收 CO₂, 夜间向大气排放 CO₂, CO₂ 浓度白天低, 夜晚高 (图 3a~i)。不同月份的碳

汇时间 (一天中 NEE 为负值的时段) 仅有微小差异, 每日碳汇时间为 9 h 左右, 生态系统对 CO₂ 的吸收大概从早上 8:30 开始, 在中午太阳辐射最大时 (12:00~13:30) 达到最强, 之后逐渐减弱, 在每日 17:00 左右发生转向, NEE 变为正值, 表明该生态系统开始向大气排放 CO₂, 并维持到次日早上 8:00。对于 CO₂ 浓度, 由于植物的光合作用, 导致其最低值出现在下午, 白天随着温度的升高解除了山谷中的逆温层结, 湍流活动增加, 夜晚土壤和植物呼吸排放的 CO₂ 得以由冠层下释放, 所以 CO₂ 浓度的最高值多数情况下出现在清晨 (5:00~8:00)。随着冬季的到来, 生态系统的碳代谢减弱, CO₂ 浓度的变化幅度也相应降低。对于每月 CO₂ 浓度和 NEE 的最高/低值, 不同月份却有明显的差异 (表 1)。

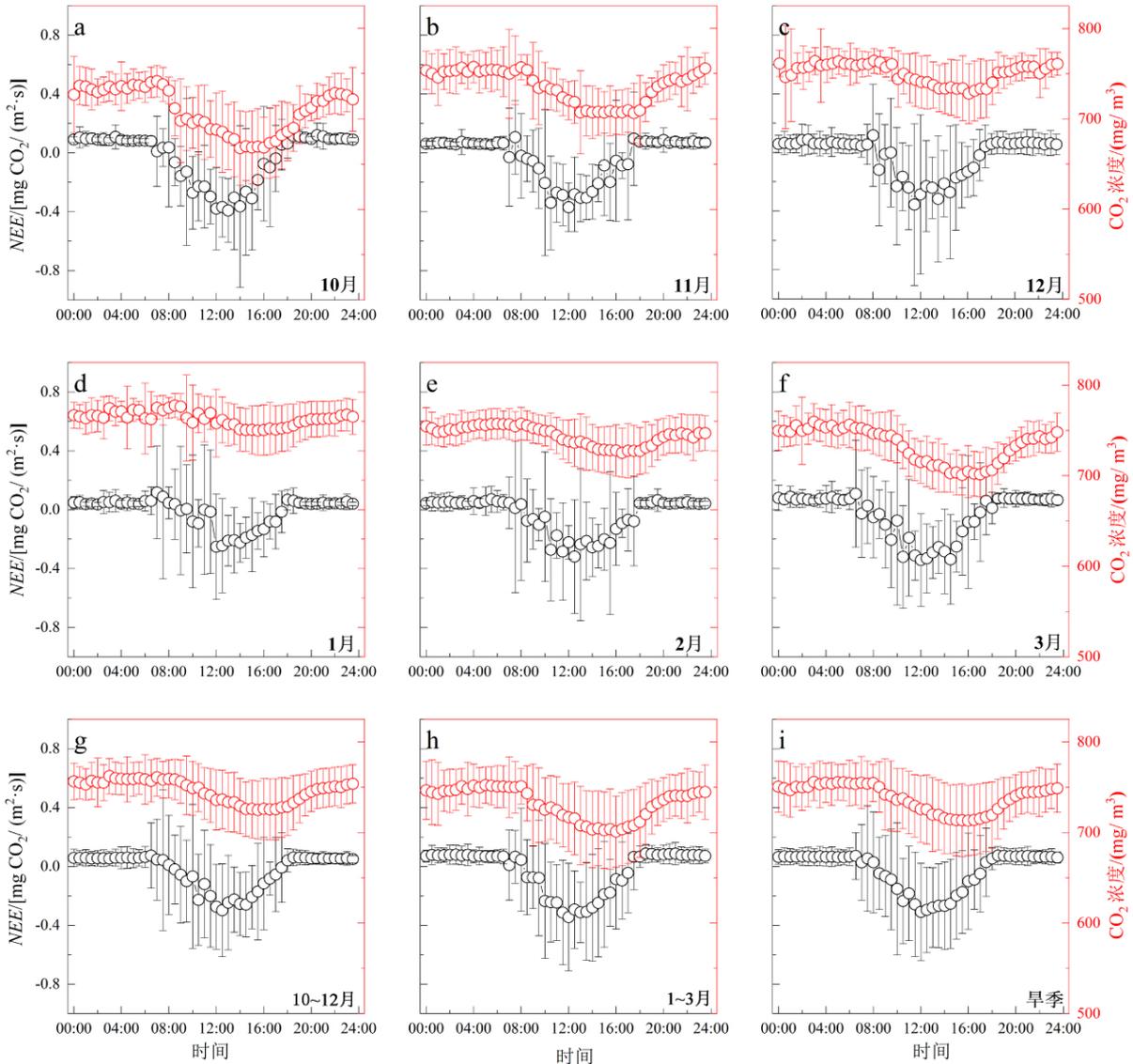


图 3 研究期内 NEE 及 CO₂ 浓度的月平均日变化

表1 不同月份碳汇时间及 CO₂ 浓度和 NEE 的最高/低值对应时刻
Table 1 The carbon sink time in different months and the corresponding moment for maximum/minimum of CO₂ concentration and NEE

| 月份 | CO ₂ 浓度、NEE 最大值及对应时刻 | | | | CO ₂ 浓度、NEE 最小值及对应时刻 | | | | 碳汇时间 ^a |
|-----|---|------|---|-------|---|-------|---|-------|-------------------|
| | c(CO ₂) _{max} / (mg/m ³) | 对应时间 | NEE _{max} / [mg/(m ² ·s)] | 对应时间 | c(CO ₂) _{min} / (mg/m ³) | 对应时间 | NEE _{min} / [mg/(m ² ·s)] | 对应时间 | |
| 10 | 741.7±17.65 | 7:00 | 0.120±0.083 | 20:30 | 667.8±41.01 | 14:00 | -0.391±0.216 | 13:00 | 8:30~17:00 |
| 11 | 757.0±13.60 | 8:00 | 0.107±0.248 | 7:30 | 706.5±33.13 | 17:30 | -0.369±0.165 | 12:00 | 8:30~17:00 |
| 12 | 764.3±13.79 | 8:00 | 0.117±0.368 | 8:00 | 727.9±33.28 | 16:00 | -0.356±0.551 | 11:30 | 8:30~17:00 |
| 1 | 777.5±13.34 | 8:30 | 0.117±0.314 | 7:00 | 744.9±29.99 | 15:30 | -0.252±0.358 | 12:00 | 8:30~17:30 |
| 2 | 757.5±18.03 | 8:00 | 0.071±0.087 | 5:30 | 725.3±27.04 | 16:30 | -0.319±0.386 | 12:30 | 8:30~17:30 |
| 3 | 759.5±20.11 | 3:00 | 0.108±0.363 | 6:30 | 700.8±22.30 | 15:30 | -0.342±0.314 | 12:00 | 7:30~17:00 |
| 研究期 | 755.5±19.70 | 5:00 | 0.074±0.061 | 18:30 | 713.7±39.35 | 15:00 | -0.309±0.330 | 12:00 | 8:30~17:00 |

注: a 代表一天中 NEE 为负值即生态系统碳吸收的时间。

2.2.2 NEE、Re 和 GEE 的逐日变化特征

图 2a 显示 NEE_d 的变化幅度较小, 但能基本分辨出 2018 年 12 月至 2019 年 2 月期间 NEE_d 一直保持在较低的水平, 相较于温度(图 2d、e) 变化趋势不明显。与 NEE_d 相反, NEE_n 的变化趋势(图 2b) 却与温度更接近, 均表现为先减小后增加的趋势, 与土壤含水率变化(图 2h) 无明显相关。图 2c 显示, NEE、Re 和 GEP 具有明显的季节变化, 整个旱季 NEE、Re 和 GEP 三者变化具有高度的一致性。在旱季的开始和结束期具有较高的量级, 在旱季中期, Re 呈现下降的趋势, NEE 也明显下降, 甚至有部分天数成为微弱的碳源并在 2019 年 1 月左右达到最低量级。2019 年 1 月以后, 随着温度和光合有效辐射逐渐回升, 生态系统碳交换加强并在旱季结束时基本恢复到旱季开始时的量级。

2.2.3 NEE、Re 和 GEE 的逐月特征

木论喀斯特原生性森林生态系统旱季碳交换的月变化特征如图 4 所示, 整体上表现为大气 CO₂ 的汇, 观测期内 NEE、Re、GEE 分别为 -121.4、209.2、330.6 g C/m²。各月 NEE 的数值基本维持在同一数量级, -15.90 (2018 年 11 月) 至 -27.70 g C/(m²·月) (2019 年 2 月), 月平均值为 -20.23 g C/(m²·月), NEE 分别在 2019 年 2 月和 1 月达到最小值 [-27.7 g C/(m²·月)] 和最大值 [-8.56 g C/(m²·月)], 即表明该生态系统对应 2019 年 2 月和 1 月的碳吸收最大和最小, 基本与光合有效辐射强度吻合(图 1c); Re 的大小在 31.32 至 75.6 g C/(m²·月) 之间, 月平均值为 72.55 g C/(m²·月), 最大值出现在 10 月 [75.61 g C/(m²·月)], 最小值出现在 2019 年 2 月 [31.32 g C/(m²·月)], 总体呈先减小后增加的趋势; GEP 的大小在 44.95 至 97.28 g C/(m²·月) 之间, 月平均值为 102.90 g

C/(m²·月), 其最大值出现在 10 月 [97.28 g C/(m²·月)], 最大值出现在 1 月 [44.95 g C/(m²·月)], 即表明该生态系统对应 2018 年 10 月和 2019 年 1 月的总 CO₂ 交换最大和最小, 并且总体呈先减小后增加的趋势。

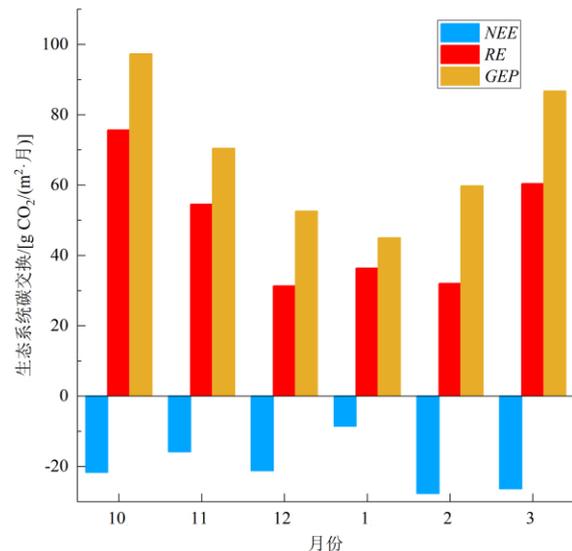


图4 木论站旱季生态系统碳交换的月变化

Fig.4 Monthly variation of the ecosystem CO₂ exchange at Mulun station during the dry season

3 讨论

3.1 辐射对 NEE 的影响

图 5a 显示了日尺度上 PAR 与 NEE_d 的关系, NEE_d 表现为在日尺度上随 PAR 的增加而显著降低 ($p < 0.01$), 即随着辐射的增强森林的碳汇能力明显的增加, PAR 可解释研究期间约 40% 的 NEE_d 的变化。到达地表的太阳辐射是植物进行光合作用的主要驱动力, 但是不同植物的光饱和点不同, 所以针对不同生态系统还可以用非直角光响应曲线

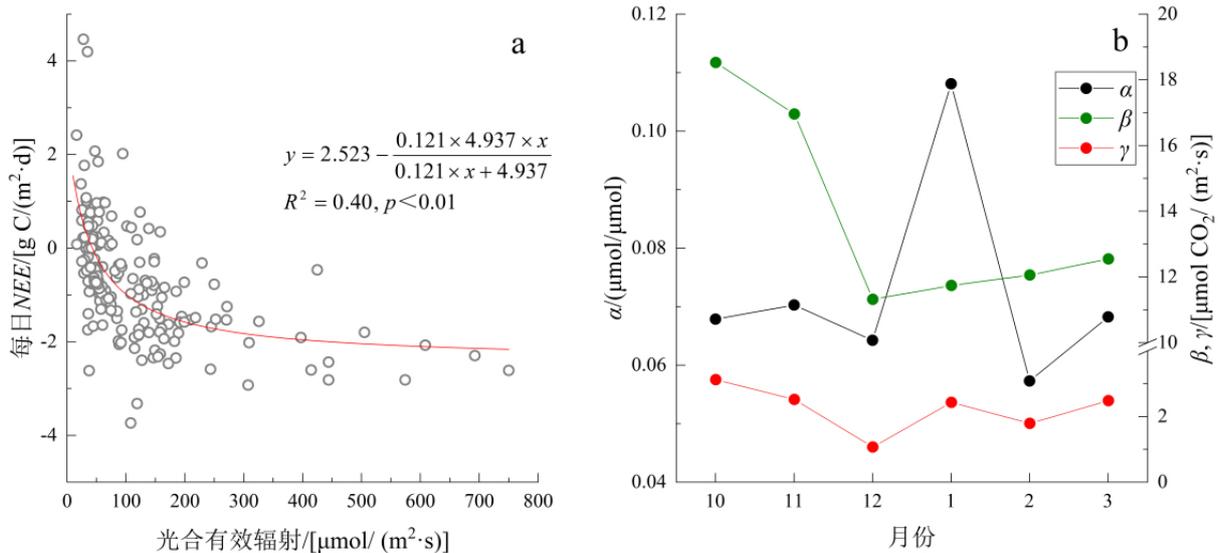


图 5 研究期间每日 NEE 随 PAR 的变化(a) 和每月光响应方程参数的变化(b)

Fig.5 Variation of the daily NEE and PAR (a) and monthly variation of the light response equation parameters during the study period (b)

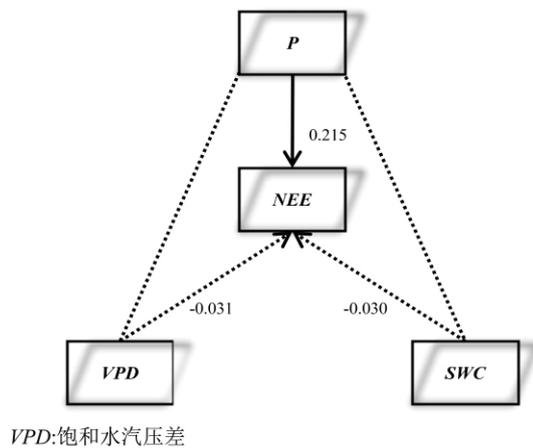
Mitscherlich 等函数量化 NEE_d 和 PAR 的关系^[37-38]。本研究中采用 Michaelis-Menten 方程(公式 4)刻画 NEE_d 和 PAR 的关系,具有较好的效果,进一步说明 PAR 是研究期间影响 NEE_d 的重要环境因子。我们也分析了不同月份 NEE_d 对 PAR 响应(图 5b),结果显示,除参数 α , 参数 β 和 γ 分别随着研究期内辐射和温度的减弱而回升。Aubinet 等^[39]人认为, α 是一个与 SWC 和有关的参数,他们在对比利时一个混交林一年多的监测研究表明,在 $T_{air} < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $SWC < 26\%$ 时 α 会随着这两个参数的增加而增加。故我们推测研究期 2019 年 1 月较低的平均气温和 SWC 的环境胁迫可能诱导植物对光的利用,从而使得 12 月的 α 值远高于其他月份; β 和 γ 分别是反映植物生理代谢活动是否旺盛和暗呼吸速率的重要参数, β 和 γ 的最低值出现在 2018 年 12 月,表明在 2018 年 12 月植物的代谢功能和暗呼吸速率最弱,基本对应了 PAR 和 T_{air} 的变化。通过对逐月 NEE_d 与 PAR 关系的拟合发现,研究期间 β 的最小值 $[11.32\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 介于同时期哀牢山^[40] $[10.63\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 和鼎湖山^[41] $[17.45\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 之间,主要可能是不同生态系统的生理学状态不同导致的,如植被种类、结构以及林龄等;研究期间 γ 的月平均值为 $2.235 \pm 0.709\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 吴鹏等^[42] 利用气室法测同时段的该区域原生乔木林月平均土壤呼吸为 $1.386\text{ }\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 该时期土壤呼吸占生态系统呼吸的 62%,

小于 EuroFLUX 的 69%^[43], 大于全年干烟洲的 58.9%^[44], 随着雨季的到来, 该比例会有所提升。

3.2 水分对 NEE 的影响

研究表明,半干旱草原、亚热带和温带森林生态系统呼吸由温度和水分共同控制,旱季当生态系统存在水分胁迫时,其呼吸对水分的变化更为敏感^[45-46]。降水对森林生态系统碳汇能力既有促进作用也有抑制作用,例如干烟洲站 2004 年生长季的 NEE 明显高于 2003 年,就是由于 2004 年较 2003 年有充沛的降水从而解除了干旱的胁迫^[44];然而在热带地区,充沛的雨水以及多云的天气会导致该地区森林生态系统对光的利用,从而抑制了该地区对 CO₂ 的捕获^[47]。我们对由降水造成的 NEE 变化进行路径分析,结果如图 6 所示,研究期间降水对 NEE 的影响程度相对较低,总影响系数仅为 0.154,说明降水不是旱季限制该地区 NEE 变化的主要因子,同时降水对 NEE 产生了正的总效应,说明随着降水量的增加会导致 NEE 的增加,降水已经对 NEE 产生了一定程度的抑制作用。

有研究发现,土壤含水量也是限制 NEE_n 的一个重要因子^[48]。但在本研究中,两者虽呈现一个极显著的二次函数关系,但相关性 ($R^2 = 0.031$) 较差(图 7),说明土壤含水量对夜间 CO₂ 通量的影响较小。同时对 NEE_d 和 SWC 的比较发现,两者不存在任何函数关系,SWC 的变化对日间 CO₂ 通量没有影响。这与其他针对西南地区森林生态系统研究所



VPD:饱和水汽压差
数字表示路径系数,实箭头表示直接效应,虚箭头表示间接效应,总效应=直接效应+间接效应

图6 降水对 NEE 日变化造成的总效应

Fig.6 Total effect of precipitation on the daily NEE variation

得到的结论一致,即 SWC 与 CO₂ 通量之间的确存在某种相关性,但是总体 SWC 对 CO₂ 通量影响较小,例如四川贡嘎山峨眉冷杉林夜间 NEE 与地下 5 cm 处 SWC 的相关性 R² 不足 0.1^[49];海南儋州橡胶林 CO₂ 通量与地下 5 cm 处 SWC 与 NEE 存在相关性但并不显著^[50],水分条件都不是制约这两个生态系统 NEE 的环境因子。

3.3 温度对 NEE 的影响

将研究期间各月的 NEE_d 和 NEE_n 分别与 T_{air} 和 T_{soil} 进行回归分析发现,二次函数和指数函数的拟合形式能分别较好反映研究期间 NEE_d 和 NEE_n 随温度的变化趋势(表 2)。相较于 T_{soil}, T_{air} 与 NEE 相关性更高,能较好的解释 NEE 的变化,且 T_{air} 对 NEE_n 的解释效果明显好于 NEE_d; 各月 NEE_n 与 T_{air} 均呈现良好的极显著正相关性,表明温度的升高,能促进 NEE_n 的增加;对于 NEE_d 与 T_{soil} 与 T_{air} 之间的 R² 较小,说明温度在该时期对该生态系统碳吸收影响较小,温度不是限制该生态系统碳吸收的重要影响因素。

本研究中各月 NEE_n 随温度增加呈指数增长,这与大多数森林的研究结果一致^[10, 32, 41, 45]。于贵瑞

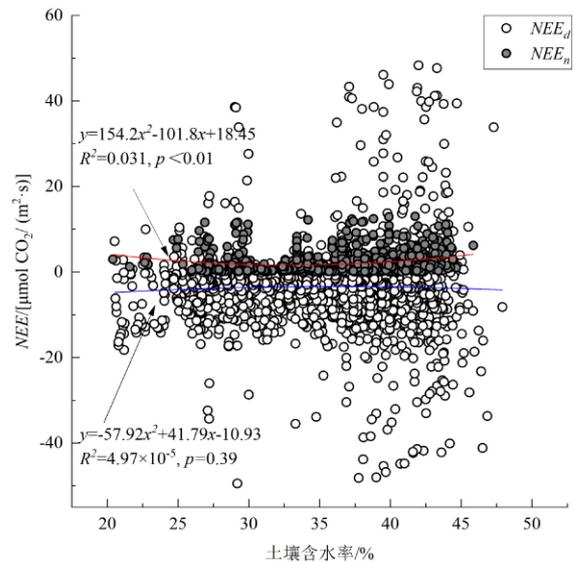


图7 土壤含水量与 NEE_n, NEE_d 的回归分析

Fig.7 Regression analysis between NEE_n, NEE_d and SWC

等^[46]认为成熟林适合以土壤温度作为驱动变量用于描述温度和生态系统呼吸的关系,但是对于本研究,相较于土壤温度,空气温度更能有效地反映这一时期生态系统呼吸的变化,这可能与该时期土壤温度的变化不大,异养呼吸占生态系统呼吸的比重较为恒定有关。

温度不仅对生态系统呼吸有限制作用,而且环境温度超过植物耐受幅度,酶的活性受到影响,同时植物叶片气孔导度也会下降,造成光合作用的降低。Lindroth 等人^[51]对瑞典欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 和挪威云杉 (*Picea abies*) 混交林研究发现,该森林光合作用最适温度在 14~15 °C,低于或高于该温度时,CO₂ 通量明显降低,甚至当温度超过 23~24 °C 时,该森林表现为碳源;不同气候带的森林生态系统 NEE 对温度的响应具有一定差异^[52],温带森林的光合作用对温度的敏感性高于亚热带森林,当空气温度分别在 10~12 °C 和 15 °C 时,长白山针阔混交林和干烟洲人工林均表现为碳排放,当温度分别为 15~20 °C 和 25 °C 时,这两个生态系统表现为碳吸收;而对于鼎湖山站,碳排放和吸收的温度都是 25 °C。

表 2 研究期 NEE_d 和 NEE_n 与 T_{air} 和 T_{soil} 的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between NEE_d, NEE_n and T_{air}, T_{soil} during the study period

| 相关指标 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 10月~3月 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| NEE _d -T _{air} | 0.073** | 0.042** | 0.070* | 0.001 | 0.012 | 0.011* | 0.015** |
| NEE _d -T _{soil} | 0.007 | 0.009 | 0.005 | 0.004 | 0.007 | 0.006 | 0.001 |
| NEE _n -T _{air} | 0.116* | 0.171** | 0.196** | 0.142** | 0.124** | 0.064* | 0.191** |
| NEE _n -T _{soil} | 0.032 | 0.083* | 0.148** | 0.113** | 0.048* | 0.019 | 0.115** |

注: * 表示 p<0.05, ** 表示 p<0.01。

表3 研究区旱季 NEE 与 ChinaFLUX 其他亚热带生态系统的比较

Table 3 Comparison of NEE at Mulun station with other subtropical ecosystems in ChinaFLUX during the dry season

| 站点 | 生态系统类型 | 观测时期 | 观测期温度 /°C | 观测期降水/mm | NEE/(t C/ha) |
|------|--------------|-------------|-----------|----------|---------------------------------|
| 元江 | 亚热带稀树灌草丛 | 2013.5~2016 | 21.1 | 140.2 | -0.20±0.09 ^a , [21] |
| 西双版纳 | 热带雨林 | 2003~2016 | 18.8 | 288.6 | -1.31±0.56 ^a , [21] |
| 哀牢山 | 亚热带常绿阔叶林 | 2009~2016 | 9.0 | 331.5 | -3.41±0.56 ^a , [21] |
| 丽江 | 亚高山针叶林 | 2014~2016 | 4.2 | 219.5 | -1.81±0.28 ^a , [21] |
| 会同 | 中亚热带人工林 | 2008 | 7.8 | 417 | -0.84 ^b , [52] |
| 鼎湖山 | 亚热带常绿针阔叶混交林 | 2003~2004 | - | - | -2.45~-3.92 ^a , [41] |
| 环江 | 亚热带常绿落叶阔叶混交林 | 2018~2019 | 13.4 | 585 | -1.21 ^c |

注: a 表示 11 月~次年 4 月, b 表示 11 月~次年 3 月, c 为基于本文的研究。

3.4 与其他森林生态系统的比较

森林在全球碳循环中扮演重要的作用,但是不同森林间的气候、林龄和类型等差异会导致碳汇大小的不同,有时甚至体现出碳源的性质。表 3 比较了同属亚热带气候条件下各森林生态系统在旱季的碳汇能力,可知该区域森林生态系统即使是在旱季也是表现为大气 CO₂ 的汇,但是不同生态系统碳汇的能力差异较大,成熟林>人工林>稀树灌草丛。

研究期木论喀斯特常绿落叶阔叶混交林的碳汇为 1.21 t C/ha,远低于同时期的哀牢山和鼎湖山,远高于元江,十分接近西双版纳和会同。研究表明,对于亚洲亚热带生态系统而言,不存在严重的水分胁迫^[53]。但较同时期其他站点,该站点研究期的降水更加充足,路径分析得出研究期间降水对 NEE 产生了正的总效应,即降水已经对 NEE 产生了一定程度的抑制作用,这可能是偏多的降水会加剧了植物的光限制,使得该区域在部分降雨时段出现了微弱的碳源。同时,相较于哀牢山和丽江站,地形因素也可能是导致该生态系统碳汇偏低的原因;哀牢山和丽江站拥有 2 500 m 和 3 200 m 的高海拔,使其年平均温度维持在 10 °C 以下,从而抑制了生态系统呼吸使得全年有较高的碳汇值^[21]。

4 结论

本研究首次在我国西南喀斯特原始森林碳循环的研究中引入了涡度相关法,在 2018 年 10 月至

2019 年 3 月木论常绿落叶阔叶混交林的碳通量观测中,分析了该生态系统 CO₂ 通量的时间变化特征及主要环境影响因子,得出的结论如下:

1) 木论常绿落叶阔叶混交林的 CO₂ 通量和浓度具有明显的“单谷”日变化特征;白天该生态系统表现为碳汇,一天中 CO₂ 吸收强度最大出现 13:00 前后,CO₂ 通量和浓度最高值均出现在夜晚,每日碳汇时间均维持在 9 h 左右。

2) 研究期间月 NEE 的最小值 [-27.7 g C/(m²·月)]和最大值 [-8.56 g C/(m²·月)]分别出现在 2019 年 2 月和 1 月,与之对应该生态系统 2019 年 2 月和 1 月的碳吸收最强和最弱;整个研究期 NEE、Re 和 GEP 的值分别为 -1.214、2.092、3.306 t C/ha,表明木论常绿落叶阔叶混交林旱季也有较大的碳汇能力。

3) 光合有效辐射和气温是影响这一时期生态系统碳汇能力的控制因素。NEE_d 与 PAR、NEE_n 与气温显著相关,NEE_n 与气温的关系可用指数函数描述,生态系统呼吸主要由温度控制;NEE_d 与气温存在一个显著的二次函数关系,但二者的相关性较弱,表明白天光合主要受辐射控制,气温不是限制白天光合作用的主要因素。

4) 研究期内土壤含水量的变化对 CO₂ 通量影响不明显;降水对 NEE 甚至产生了一定的抑制作用。此外,特殊的山谷地形也有可能是造成该区域较其他同纬度站点相同时期 NEE 值偏低的原因。

参 考 文 献

- [1] LeQuere C, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. Global carbon budget 2018[J]. Earth System Science Data, 2018, 10(4): 2141-2194.
- [2] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. Science, 2008, 320(5882): 1444-1149.
- [3] Yu G, Chen Z, Piao S, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region[J]. Proceedings of

- the National Academy of Sciences ,2014 ,111(13) : 4910-4915.
- [4] Pan Y ,Birdsey R A ,Fang J , et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science* ,2011 ,333(6045) : 988-993.
- [5] 赵苗苗,赵娜,刘羽,等.森林碳计量方法研究进展[J]. *生态学报*,2019 ,39(11) : 3797-3807.
- [6] 尹亮,崔明,周金星,等.岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征[J]. *中国水土保持科学*,2013 ,11(1) : 51-58.
- [7] 刘鸿雁,蒋子涵,戴景钰,等.岩石裂隙决定喀斯特关键带地表木本与草本植物覆盖[J]. *中国科学(地球科学)* ,2019 ,49(12) : 1974-1981.
- [8] 王世杰,刘再华,倪健,等.中国南方喀斯特地区碳循环研究进展[J]. *地球与环境*,2017 ,45(1) : 2-9.
- [9] 宋同清.西南喀斯特植物与环境[M].北京:科学出版社,2015.
- [10] Liu L B ,Yang H M ,Xu Y , et al. Forest biomass and net primary productivity in southwestern china: A meta-analysis focusing on environmental driving factors[J]. *Forests* ,2016 ,7(12) : 173-189.
- [11] 刘再华.岩石风化碳汇研究的最新进展和展望[J]. *科学通报* ,2012 ,57(Z1) : 95-102.
- [12] Chen W ,Chen J ,Cihlar J. An integrated terrestrial ecosystem carbon-budget model based on changes in disturbance , climate , and atmospheric chemistry[J]. *Ecological Modelling* ,2000 ,135(1) : 55-79.
- [13] Li C ,Aber J ,Stange F , et al. A process oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* ,2000 ,105(D4) : 4369-4384.
- [14] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past , present and future[J]. *Global Change Biology* ,2003 ,9(4) : 479-492.
- [15] Manoli G ,Ivanov V Y ,Faticchi S. Dry season greening and water stress in Amazonia: The role of modeling leaf phenology[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* ,2018 ,123(6) : 1909-1926.
- [16] 李洁琼,宋晓阳,曹敏.云南哀牢山和玉龙雪山森林树种幼苗对海拔梯度的响应及其季节性差异[J]. *应用生态学报*,2016 ,27(11) : 3403-3412.
- [17] 纪金华,章永江,张一平,等.水分条件变化对哀牢山亚热带常绿阔叶林林下幼苗死亡率的影响[J]. *生态学报* ,2015 ,35(8) : 2521-2528.
- [18] 刘效东,周国逸,陈修治,等.南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应[J]. *生态学报* ,2014 ,34(10) : 2755-2764.
- [19] 周蕾.2001-2010年干旱对中国陆地生态系统碳循环的影响[D].北京:中国科学院研究生院,2013.
- [20] Chen G ,Tian H ,Zhang C , et al. Drought in the Southern United States over the 20th century: Variability and its impacts on terrestrial ecosystem productivity and carbon storage[J]. *Climatic Change* ,2012 ,114(2) : 379-397.
- [21] Fei X ,Song Q ,Zhang Y , et al. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan ,Southwest China[J]. *Science of the Total Environment* ,2018 ,616: 824-840.
- [22] 周游游,蒋忠诚,韦珍莲.广西中部喀斯特干旱农业区的干旱程度及干旱成因分析[J]. *中国岩溶*,2003 ,22(2) : 63-68.
- [23] 贾孜拉·拜山,李维京,孙丞虎,等.1961—2014年我国西南地区干湿季变化特征[J]. *气候变化研究进展*,2017 ,13(2) : 103-116.
- [24] 尹晗,李耀辉.我国西南干旱研究最新进展综述[J]. *干旱气象*,2013 ,31(1) : 182-193.
- [25] Du H ,Hu F ,Zeng F , et al. Spatial distribution of tree species in evergreen-deciduous broadleaf karst forests in southwest China[J]. *Scientific Reports* ,2017 ,7(1) : 15664.
- [26] Moncrieff J B ,Massheder J ,Bruin H D , et al. A system to measure surface fluxes of momentum , sensible heat , water vapour and carbon dioxide[J]. *Journal of Hydrology* ,1997 ,188: 589-611.
- [27] Medermit D ,Burba G ,Xu L , et al. A new low-power , open-path instrument for measuring methane flux by eddy covariance[J]. *Applied Physics B* ,2011 ,102(2) : 391-405.
- [28] Webb E K ,Pearman G I ,Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* ,1980 ,106(447) : 85-100.
- [29] Dijk A V ,Moene A F ,Bruin H D. The principles of surface flux physics: Theory , practice and description of the ECPACK library[R]. Meteorology and Air Quality Group , Wageningen University , the Netherlands ,2004: 1-99.
- [30] Mahrt L ,Vickers D. Relationship of area-averaged carbon dioxide and water vapour fluxes to atmospheric variables[J]. *Agricultural and Forest Meteorology* ,2002 ,112(3-4) : 195-202.
- [31] 陈丽萍.基于凋落物相关法和无线传感网的雷竹林碳通量估算[D].杭州:浙江农林大学,2015.
- [32] 朱治林,孙晓敏,温学发,等.中国通量网(ChinaFLUX)夜间CO₂凋落物相关通量数据处理方法研究[J]. *中国科学(地球科学)* ,2006 ,36(S1) : 34-44.
- [33] Tan Z H ,Zhang Y P ,Yu G R , et al. Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* ,2010 ,115(D4) .

- [34] 黄俊, 麦博儒, 邓雪娇, 等. 鼎湖山针阔叶混交林 CO₂ 浓度及通量变化特征[J]. 广西植物, 2019, 39(2): 261-274.
- [35] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 71-77.
- [36] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [37] Gilmanov T G, Verma S B, Sims P L, et al. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO₂-flux tower measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2).
- [38] Lindroth A, Klemedtsson L, Grelle A, et al. Measurement of net ecosystem exchange, productivity and respiration in three spruce forests in Sweden shows unexpectedly large soil carbon losses[J]. Biogeochemistry, 2008, 89(1): 43-60.
- [39] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, et al. Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(4): 293-315.
- [40] Tan Z H, Zhang Y P, Schaefer D, et al. An old-growth subtropical Asian evergreen forest as a large carbon sink[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(8): 1548-1554.
- [41] 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 等. 鼎湖山常绿针阔叶混交林 CO₂ 通量估算[J]. 中国科学(地球科学), 2006, 36(S1): 119-129.
- [42] 吴鹏, 崔迎春, 杨婷, 等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落土壤呼吸研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 57-62.
- [43] Janssens I, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests[J]. Global Change Biology, 2001, 7(3): 269-278.
- [44] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 等. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征[J]. 中国科学(地球科学), 2006, 36(S1): 91-102.
- [45] 姜海梅, 张德广, 王若静, 等. 不同生态系统呼吸模型在半干旱草原生长季碳循环研究中的比较及应用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 593-604.
- [46] 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[J]. 中国科学(地球科学), 2004, 34(S2): 84-94.
- [47] Baldocchi D, Chu H, Reichstein M. Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: A review[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 249: 520-533.
- [48] Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. Soil moisture effect on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical Pinus plantation of southeastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(3-4): 166-175.
- [49] 张元媛, 朱万泽, 孙向阳, 等. 川西贡嘎山峨眉冷杉成熟林生态系统 CO₂ 通量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6125-6135.
- [50] 吴志祥, 陶忠良, 兰国玉, 等. 海南岛橡胶林生态系统碳通量及其影响因子研究[J]. 热带作物学报, 2014, 35(11): 2099-2108.
- [51] Lindroth A, Grelle A, Moren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity[J]. Global Change Biology, 1998, 4(4): 443-450.
- [52] 李轩然, 孙晓敏, 张军辉, 等. 温度对中国典型森林生态系统碳通量季节动态及其年际变异的影响[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 752-761.
- [53] 张利平. 会同杉木人工林生态系统与大气间 CO₂ 通量特征的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [54] Chen Z, Yu G, Ge J, et al. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182: 266-276.

CO₂ Flux and Its Driving Factors in a Karst Evergreen Deciduous Broadleaf Mixed Forest in Dry Season

LI Zihan^{1,2}, LUO Weijun^{1,3}, DU Hu^{4,5}, SONG Tongqing^{4,5}, PENG Haijun¹,
WANG Yanwei^{1,2}, WANG Shijie^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding Guizhou 562100, China; 4. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 5. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang Guangxi 547100, China)

Abstract: The variation of net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*) and the environmental factors was analyzed preliminarily in a karst evergreen deciduous broad-leaf mixed forest ecosystem, Mulun National Nature Reserve in Guangxi, SW China, in dry season to estimate the carbon sinks of the ecosystem during the study period and try to provide a basis for accurately estimating the annual carbon sinks of this ecosystem, in addition, values obtained from other ecosystems under similar climatic conditions were compared. Open-path eddy covariance system was used to continuously measure the CO₂ flux in a dry season from October 1st, 2018 to March 31st, 2019. Meanwhile, environmental factors such as precipitation (*P*), photosynthetic active radiation (*PAR*), air temperature (*T_{air}*), soil temperature (*T_{soil}*), and soil water content (*SWC*) were also monitored. CO₂ flux and concentration have obvious diurnal variation of single-valley shape. *NEE* is highest at 12:00 with -0.309 ± 0.330 mg CO₂/(m²·s), and is lowest at 18:30 with 0.074 ± 0.061 mg CO₂/(m²·s). The accumulated *NEE*, Ecosystem Respiration (*Re*), and Gross Ecosystem Productivity (*GEP*) during the study period are -121.4 , 209.2 and 330.6 g C/m², respectively. The carbon sink capacity of this ecosystem is strongest in February 2019, while, *Re* and *GEP* reach the maximum in October 2018. *PAR* is the main controlling factor for the change of daytime *NEE* ($R^2 = 0.40$, $p < 0.01$), and air temperature exponentially correlates with nighttime *NEE* ($R^2 = 0.1267$, $p < 0.01$). Precipitation has an inhibitory effect on the carbon sink capacity of the ecosystem. Overall, this ecosystem in dry season performs as a carbon sink with 1.214 t C/ha, that significantly lower than other ecosystems under similar climate conditions.

Key words: eddy covariance method; karst hilly area; mixed evergreen and deciduous forest; net ecosystem CO₂ exchange; carbon sink capacity