

基于数字相机的中国西南和泰国北部两种热带森林的冠层物候和总初级生产力比较

SAWASDCHAI Boonsiri^{1,2}, SANWANGSRI Montri³,
HANPATTANAKIT Phongthep⁴, VONGRUANG Patipat⁵,
SUWANNAPAT Pimsiri⁶, CHIDTHAISONG Amnat⁷,
TOWPRAYOON Sirinthornthep⁷, TAMMADID Wittanan^{1,2},

刘雅琪¹, 郑惠旭¹, 张 晶¹, 焦麟杰¹, 张一平¹, 陈 星¹, 宋清海^{1,*}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 云南 勐腊 666303; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 清迈大学 农业学院 高地农业和自然资源系, 泰国 清迈 50200; 4. 诗纳卡琳威洛大学 文化环境与生态旅游学院 环境系, 曼谷 10110; 5. 帕尧大学 公共卫生学院 环境卫生系, 泰国 帕尧 56000; 6. 帕尧大学 能源与环境学院 能源与环境系, 泰国 帕尧 56000; 7. 泰国先皇理工大学 能源与环境联合研究生院, 曼谷 10140)

摘 要: 为了探究物候指数与涡度相关技术获取的通量数据之间的关系, 本研究比较了中国西南部热带雨林(BNS)和泰国干性龙脑香林(DPT)通量塔获取的两年的监测数据。研究周期从2020年1月到2022年4月。基于红、绿、蓝数字值(RGB_{DN})提取的冠层颜色指数分为RGB色坐标(RGB_{CC} ; RCC 、 GCC 、 BCC)、绿色绝对指数(GEI)、植被对比指数(VCI)的 RGB_{ratio} 、绿红比(GRr)和红蓝比(RBr)。结果显示, 植被指数呈现明显的季节变化, 表征了热带森林的物候特征。在BNS站点, 植被指数与总初级生产力(GPP)呈显著正相关关系($GRr: R^2=0.91$, $GEI: R^2=0.90$, $GCC: R^2=0.88$, $VCI: R^2=0.87$; $P<0.05$), 而DPT站点显示出比BNS更弱的关系($VCI: R^2=0.77$, $GCC: R^2=0.77$, $GEI: R^2=0.71$, $GRr: R^2=0.45$)。BNS(热带雨林)对物候变化的敏感性高于DPT(干性龙脑香林), 同时热带雨林的GPP[5.92~7.79 $gC/(m^2 \cdot day)$]高于干性龙脑香林的[4.64~5.63 $gC/(m^2 \cdot day)$]。土壤温度可能是驱动BNS物候变化的重要因素, 而相对湿度可能对DPT森林的物候具有更重要的影响。长期数字相机观测为GPP评估和理解树冠物候对气候变化响应提供了宝贵数据, 未来研究应加强对热带森林生态系统冠层物候变化和生态系统碳交换量的定量关系的理解。

关键词: 热带森林; 数字相机; 植被指数; 总初级生产力

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2025)03-0391-11

热带森林被视为关键的陆地生态系统之一, 对全球能量分配、水循环动态和生物地球化学循环产生深远影响^[1]。热带森林生态系统在气候调节^[2]、区域降水^[3]以及固碳等方面具有重要意义^[4]。热带森林储存了陆地生物圈约25%的碳总量^[5-6], 同时贡献了全球约30%的净初级生产力(NPP)^[7]。大量研究表明气象因素、生态系统碳交换量和植物物候之间有着密切的关联^[8-10]。植物物候是指植物生命周期中与季节变化相关的生理

和生态事件, 如发芽、开花、结果、叶片变色和落叶等现象, 植物物候时间通常受到环境因素(如温度、光照、降水等)的影响, 反映了植物对环境变化的适应和生长发育的节律^[11-12]。因此, 植物物候研究不仅有助于了解植物的生长发育规律, 还能深入探讨森林生态系统中诸如生态系统净初级生产力和总初级生产力(GPP)等重要科学问题^[13-14]。

监测森林冠层的物候特征有助于理解不同地区森

收稿日期: 2024-05-17; 改回日期: 2024-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(42361144863、41961144017); 中国科学院区域发展青年学者项目(2022-003); 国家自然科学基金委员会与泰国国家研究理事会合作研究项目(N11A640060); 中国科学院西双版纳热带植物园十四五项目(XTBG-1450101)。

第一作者简介: Sawasdchai Boonsiri (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为森林生态学。email: boonsiri@xtbg.ac.cn。

*通信作者: 宋清海(1979—), 男, 博导, 研究员, 研究方向为全球变化生态学。email: sqh@xtbg.ac.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

林植被对气候变化的响应^[15]。林冠物候监测通常采用3种方法:个体水平的人工观测、冠层局域尺度的近地面遥感观测以及全球尺度的卫星遥感观测^[16-18]。人工观测是最传统的研究方法,奠定了植物物候学的基础,但该方法耗时耗力,且观测覆盖范围受限^[19-20]。卫星遥感观测的应用为大尺度植物物候研究带来了新的认识,但该方法精度不高,且难以与地面实际环境因子结合^[21-22]。近地面遥感观测作为连续监测冠层尺度物候变化的有力工具,运营成本和维护成本都比较低,为解释精细尺度下的物候变化和大尺度植被格局变化提供了尺度演绎的桥梁^[23-25]。值得注意的是,涡度相关技术(EC)也是精确评估森林生态系统碳交换的重要工具,可为生态系统的能量交换和物质循环提供长期、精确的定量标准数据^[26-28]。其最大缺点在于运营成本和专业人员的投入,难以大规模运用^[29-30]。

作为近地面遥感监测的主要监测设备,林冠相机运营成本较低,易获取连续、标准的图像数据^[31]。森林通量塔上同时安林冠相机和涡度相关仪器,可为揭示林冠特征与碳交换之间的关系奠定重要基础。一方面,物候相机通过捕捉植被的颜色变化的季节性特征,提供高

时空分辨率的信息,有助于理解植被的生长和发育过程^[32];另一方面,涡度相关技术通过监测大气和植被界面的气体交换,提供植被生态系统的碳通量数据^[33]。将这两种技术结合使用,可以更全面地揭示植被的生态特征和功能,从而促进对植被生态系统的深入理解和管理。

目前,基于林冠相机的物候研究,尤其是联网观测的研究多以欧美等温带发达地区的较为常见^[21,34-36],亚洲的亚热带地区如日本和中国南部的亚热带森林也有少量研究^[23,32,37-38]。然而,当前使用林冠相机对热带森林生态系统的物候现象进行的相关研究十分匮乏。鉴于此,本研究聚焦于中国热带雨林和泰国的干性龙脑香林,基于物候相机的植被指数和涡度相关的通量数据,旨在:1)厘清2种不同热带森林的植被指数变化特征;2)量化2种不同热带森林的初级生产力动态变化;3)探索林冠相机植被指数与生态系统生产力之间的关联。本研究的假设是涡度相关技术测量的地面生产力将与数字相机观察到的冠层物候变化相对应,并且热带森林生态系统可能受到气象因素的显著影响。

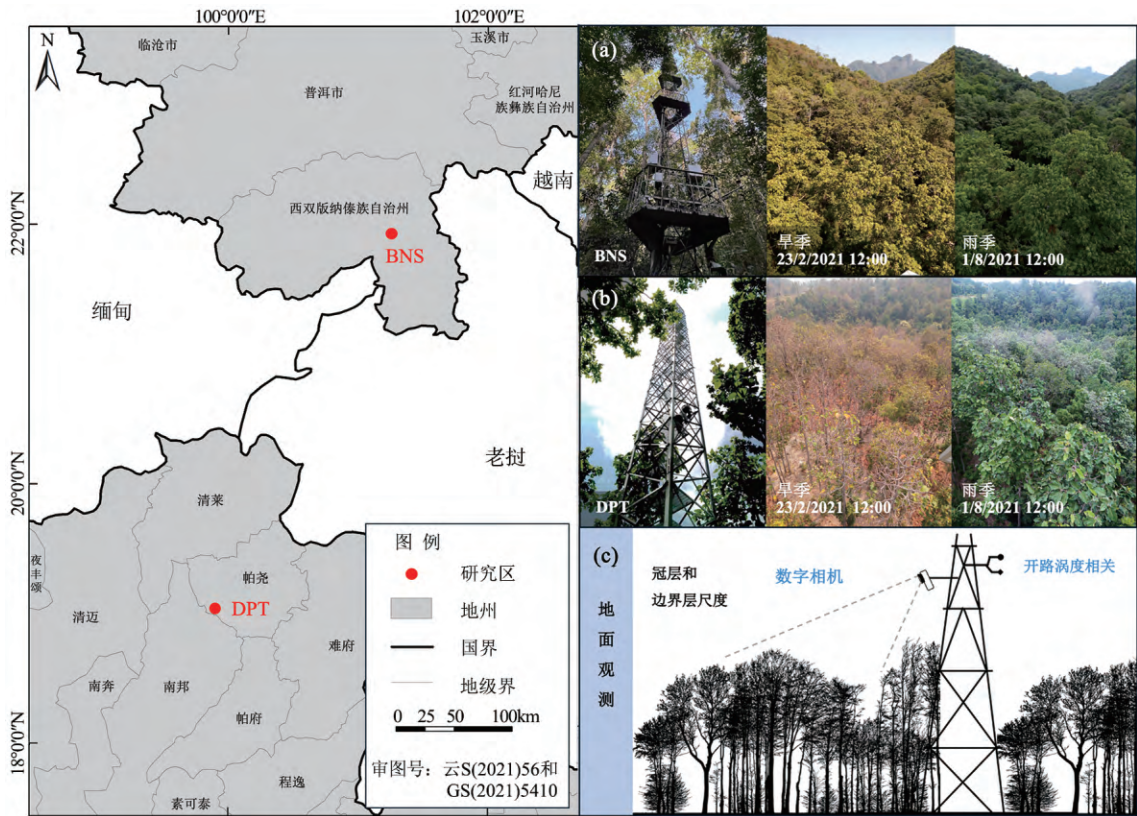


图1 热带雨林与橡胶林通量观测塔的地理位置示意图与林冠季节概貌

Fig.1 Geographical location of ground-based observation towers in the tropical forest (BNS) and dry dipterocarp forest (DPT) with overview of seasonal forest canopy

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

本研究的样点为热带雨林(BNS)和干性龙脑香林(DPT)(图1):热带雨林(BNS)站点(21°55'39"N, 101°15'55"E, 海拔750 m)位于中国云南西双版纳勐仑自然保护区, 典型植被类型为热带雨林, 冠层高约35 m, 优势树种为番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、云南玉蕊(*Barringtonia pendula*)等, 年均温21.8 °C、年降雨量1 415 mm^[39-40]。泰国干性龙脑香林(DPT)站点(19°02'14.38"N, 99°54'10.96"E, 海拔512 m), 地处泰国北部英河森林的流域, 典型植被类型为干性龙脑香林, 冠层高约20 m, 优势树种为小瘤龙脑香(*Dipterocarpus tuberculatus*)、钝叶婆罗双(*Shorea obtusa*)和泰国婆罗双(*Terminalia myriocarpa*)等, 年均温24.9 °C、年降雨量1 262 mm^[41]。两个点受热带季风气候影响, 干湿季分明: 干季为11月至次年4月、雨季为5月至10月^[42-43]。

1.2 林冠相机的物候观测和物候指数提取

为了观测热带森林中的林冠物候变化, 在林冠上方安装了数字相机, 自动定时拍摄影像, 拍摄间隔为30 min, 保存格式为24-bit JPEG, 分辨率为3 120×4 208像素^[23,44]。相机设置为自动曝光模式, 拍摄时间选择在当地时间10:00至14:00之间, 避免太阳光直射影响^[24,31]。为减少干扰, 相机封装在防水外壳中, 与垂直轴成20°角, 排除雨滴、阴影等干扰。保持高质量, 光圈设置为F/2.2, ISO低于150, 快门速度在1/100到1/2000秒之间。影像分析中划定感兴趣区域(ROI), 覆盖约25%的森林冠层, 分为10个子区域进行详细分析和平均。使用R软件进行数字图像分析, 基于RGB色彩系统计算亮度变化, 提供1 680万种潜在颜色和24-bit量化^[45]。为了更好地探究物候特征与初级生产力和气象因子的关系, 综合计算了以下冠层物候的指标数据(表1)。

1.3 通量观测

BNS站点通量观测塔高约72 m, 塔上48 m处安装了开路红外气体分析仪(Li-7500, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)和三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Sci., USA)。DPT站点在塔顶42 m处安装了EC150开路红外CO₂/H₂O分析仪(Campbell Sci., USA)和CSAT3三维超声风速仪(Campbell Sci., USA)。数据采集器CR1000(Campbell Sci., USA)以10 Hz频率记录通量和气象数据, 并计算和存储30 min尺度的通量数据。

森林生态系统的初级生产力(GPP)根据以下公式

表1 颜色指数及计算方法

Table 1 Color index and calculation method

颜色指数	表达式	参考文献
RCC	$RDN / (RDN + GDN + BDN)$	[34]
GCC	$GDN / (RDN + GDN + BDN)$	[34]
BCC	$BDN / (RDN + GDN + BDN)$	[34]
VCI	$GDN / (RDN + BDN)$	[46]
GRr	GDN / RDN	[35]
RBr	RDN / BDN	[31]
GEI	$2GDN - (RDN + BDN)$	[34]

注: 本文中的颜色指数包括红(RDN)、绿(GDN)、蓝(BDN)数字值、RGB颜色坐标[红色坐标(RCC)、绿色坐标(GCC)、蓝色坐标(BCC)]、绿色冗余指数(GEI)、植被对比指数(VCI)、绿红比(GRr)和红蓝比(RBr)。

计算^[47-48]:

$$GPP = R_{ECO} - NEE \quad (1)$$

$$R_{ECO} = R_{ECO,ref} \times e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0} \right)} \quad (2)$$

式中, R_{ECO} 表示生态系统呼吸速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], $R_{ECO,ref}$ 表示一定温度下生态系统呼吸(T_{ref} , 此处为283.15 K), E_0 为拟合参数, T_0 为常数(设置为227.13 K), T 为本研究中测量的5 cm处土壤温度。NEE包括湍流涡通量(F_C)和存储通量(F_S), 如方程(3)所示^[38,49]:

$$NEE = F_C + F_S = \rho \times \left(\overline{w' \times c'} \right) + \left(\frac{\Delta c}{\Delta t} \right) \times z_r \quad (3)$$

其中, F_C 表示在EC系统和大气高度上方传输的湍流涡通量, F_S 表示EC系统平面和地表下方的存储通量。 ρ 、 w 、 c 分别表示空气密度、垂直风速、气体标量浓度; 角分符号(')表示平均值的波动, 上横线表示给定时间内的平均值。 z_r 是EC系统的高度, Δc 是高度 z_r 处30 min间隔的变化, Δt 是时间间隔(本研究中为1 800 s⁻¹)。数据分析使用EddyPro软件(开源版本7.0.9, Li-Cor Bioscience 2022)完成^[50-53]。

1.4 统计分析方法

分别计算了BNS和DPT两个站点的CO₂通量数据(涡流相关系统获取)和RGB颜色指数(近地面遥感数据获取)的Pearson相关系数(r)。在进行相关性分析时, 采取了日尺度相关性和季节性异常相关性2种方法。日尺度相关性用于检查各时间点的NEP和植被指数之间的一致性, 而季节性异常相关性则侧重于每个站点的长期趋势。此外, 使用决定系数(R^2)和显著性(P 值)评估模型性能。该分析有助于确定气候变量和植被指数是否影响CO₂通量。采用R软件(版本4.3.1)中

的单因素差分析来测试拟合线斜率之间的统计显著性差异 ($P < 0.05$)。描述性统计用于计算平均值和标准误差。

2 结果与分析

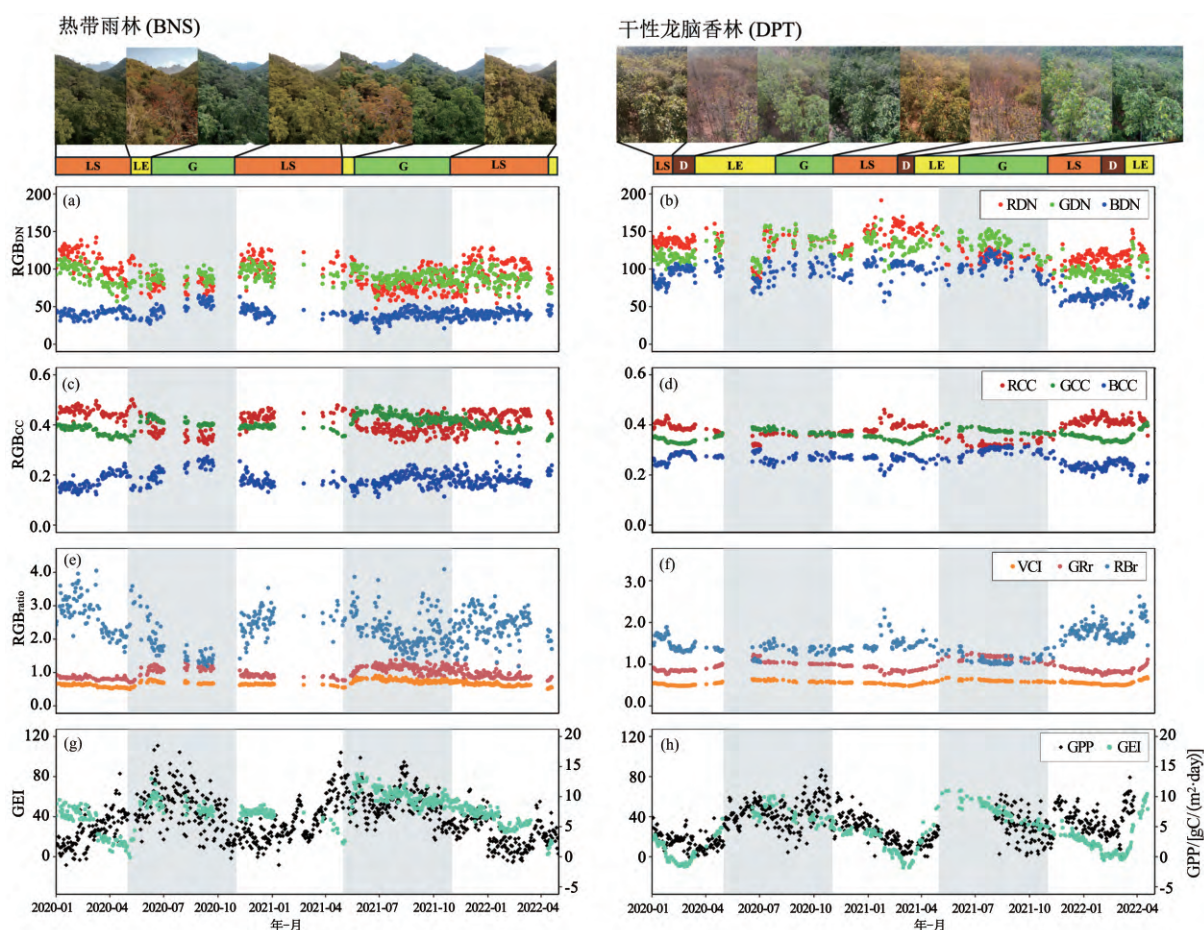
2.1 森林冠层物候的时间格局

图2展示了BNS和DPT两个站点的冠层物候RGB颜色指数(即 RGB_{DN} 、 RGB_{CC} 、 RGB_{ratio} 和GEI)的日变化趋势。BNS热带雨林可分为3个阶段:叶片衰老(LS)、叶片萌发(LE)和生长季节(G);而在DPT干性龙脑香林中,除上述3个生长时期外,还存在落叶期(D,此时 $GEI < 0$),揭示了其冠层通过落叶的方式来响应干旱。在BNS,GEI和VCI在每年先随积日(DOY)迅速下降,从 DOY_1 (2020年1月1日)叶片衰老开始到 DOY_{126} ,之后逐渐增加到出叶(DOY_{162}),然后在2021年的生长季节和

叶片衰老过程中缓慢下降,分别降至最小值13.18和0.55(DOY_{121})。在DPT, DOY_1 至 DOY_{24} ,GEI和VCI的随叶片衰老迅速下降,直至 DOY_{25} 至 DOY_{73} 落叶期为负值,逐渐增加直至 DOY_{223} (出叶)然后减少到2021年的生长季节和叶片衰老,至最小值分别为-10.74和0.48(DOY_{60})。2个地点的GEI和VCI均在雨季和生长季节重叠出叶期达到峰值,而干性龙脑香林的出叶期比热带雨林长。从物候指数(即GCC、GEI、VCI)来看,DPT的变化幅度比BNS大,表明DPT森林冠层经历了更显著的季节性变化。此外,两种森林的GEI指数与GPP的变化趋势较为一致。

2.2 碳交换特征

在2020年1月至2022年4月(旱季)的研究期间,利用涡度协方差技术观测到了净生态系统碳交换(NEE)、生态系统呼吸(R_{ECO})、总初级生产力(GPP)和净生态系



数据在当地时间10:00至14:00采集。冠层物候特征分为:LS-表示叶片衰老(橙色方框)、D-表示落叶(棕色方框)、LE-表示出叶(黄色方框)和G-表示生长季节(绿色方框)。阴影区表示雨季,无阴影区域为旱季。

图2 热带雨林和干性龙脑香林的逐日动态在排除具有GPP模式的 RGB_{DN} (a-b)、 RGB_{CC} (c-d)、 RGB_{ratio} (e-f)和GEI(g-h)

Fig.2 Daily dynamics of tropical rainforest and dry dipterocarp forest excluding RGB_{DN} (a-b), RGB_{CC} (c-d), RGB_{ratio} (e-f) and GEI with GPP patterns (g-h)

统生产力(NEP)的时间序列。图3展示了每个站点的年际变化。研究结果表明,热带雨林中BNS的日总初级生产力(GPP)高于干性龙脑香林DPT。具体而言,从2020年到2021年,BNS热带雨林的年平均GPP范围为 $(5.92 \pm 0.84) \sim (7.79 \pm 0.70)$ $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$,而DPT干性龙脑香林的年平均GPP较低,分别为 (5.63 ± 0.72) 和 (4.64 ± 0.47) $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{day})$ 。在印度季风气候影响下,两个站点每年的GPP均在雨季初期达到最高,而在叶片衰老的旱季降至最低,这与 R_{ECO} 的变化趋势相一致。

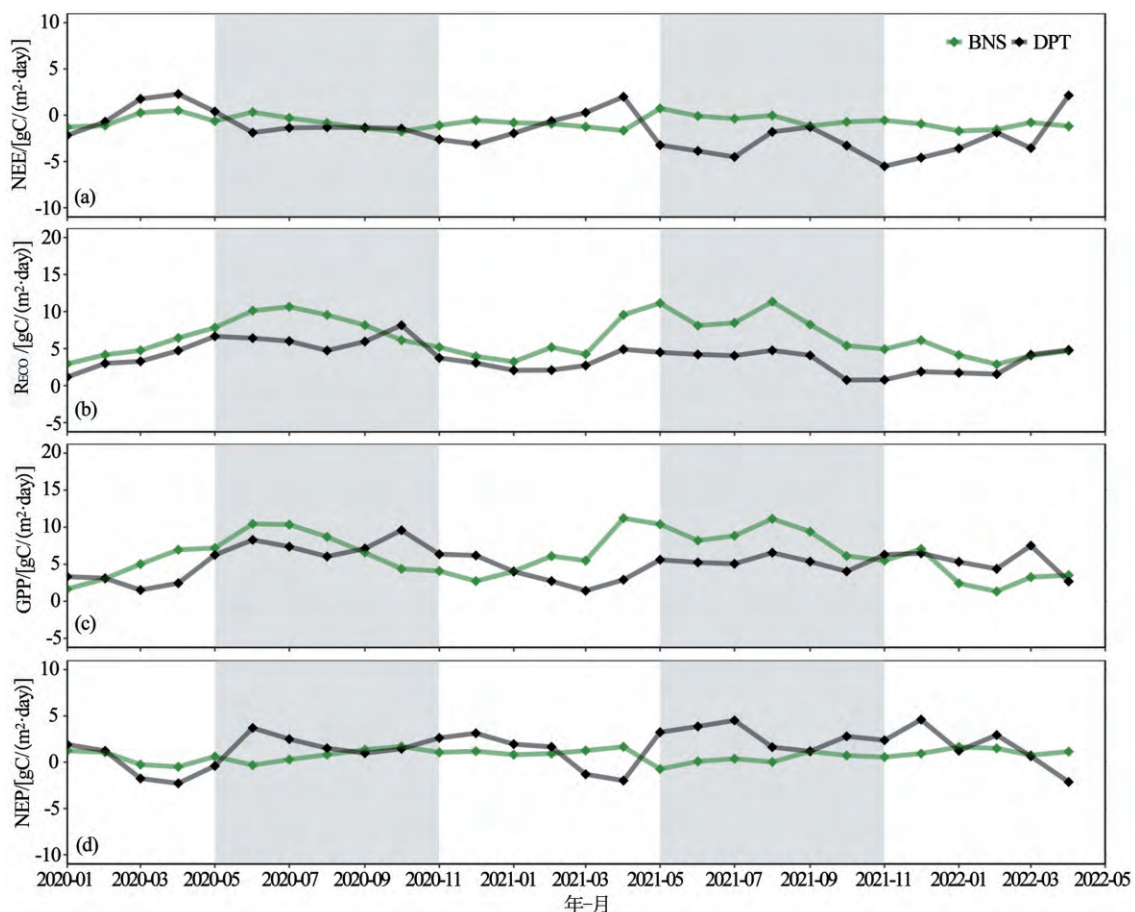
2.3 冠层物候与生产力的关系

图4展示了冠层物候RGB颜色指数与总初级生产力(GPP)在日、月和季节尺度下的关系。在日尺度下,BNS热带雨林的GPP值与大多数植被指数呈显著正相关($P < 0.01$)。其中,与GRr的相关性最高($R^2 = 0.23$),其次是VCI、GCC和GEI。在DPT森林中,GPP值与GCC和VCI的相关性最显著($R^2 = 0.31$),其次是GEI和GRr(P

< 0.01)。在月尺度下,两个站点GPP值与颜色指数的关系与日尺度相似($P < 0.05$)。而在季节尺度下,BNS热带雨林的GPP和植被指数之间表现出比DPT干性龙脑香林更强的正相关关系,具体如下:BNS热带雨林的GRr($R^2 = 0.91$)、GEI($R^2 = 0.90$)、GCC($R^2 = 0.88$)和VCI($R^2 = 0.87$);而DPT站点的VCI($R^2 = 0.77$)、GCC($R^2 = 0.77$)、GEI($R^2 = 0.71$)和GRr($R^2 = 0.45$)。

3 讨论

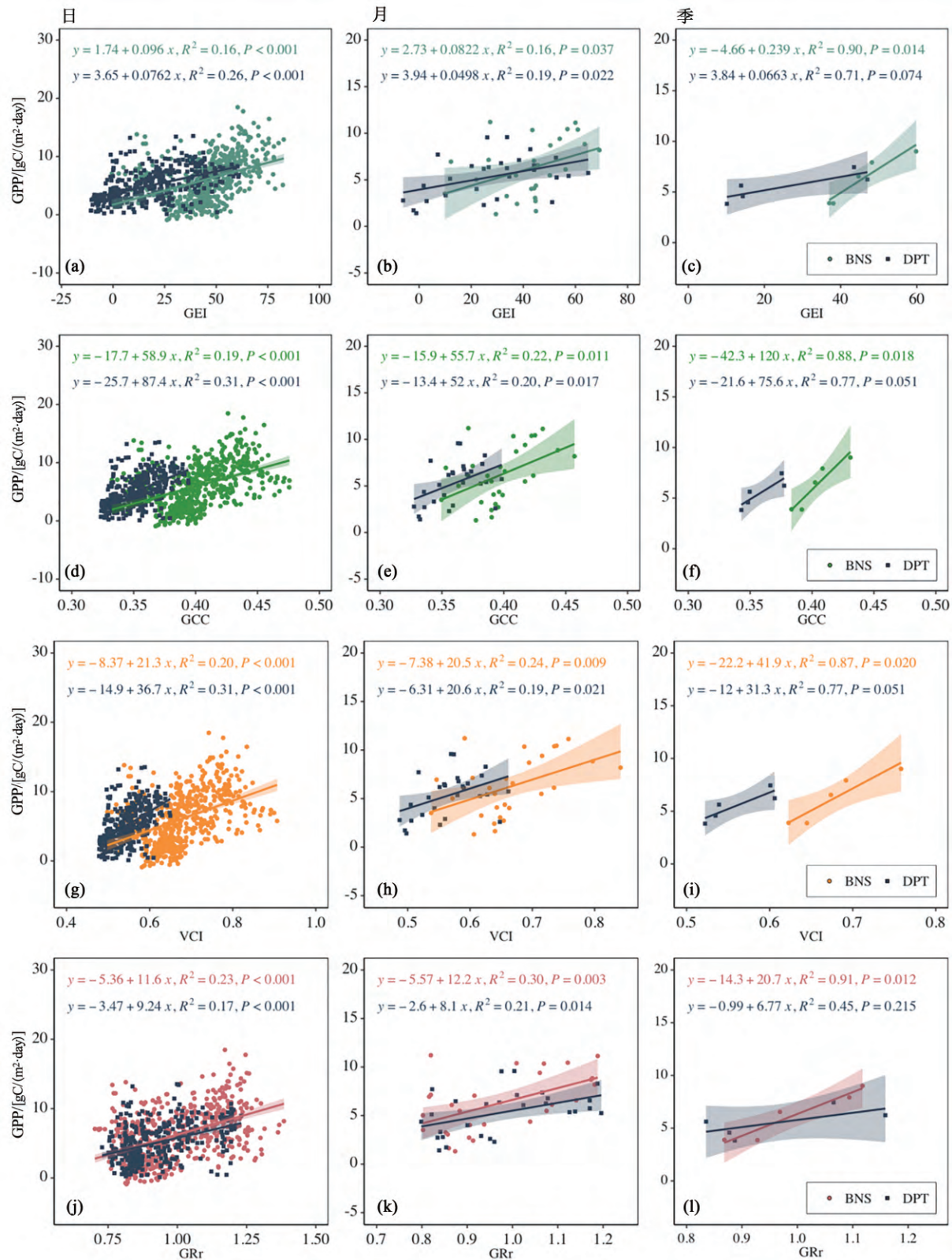
本研究揭示了基于物候相机的植被色彩指数能够清晰记录和反映2种热带森林的季节动态变化。热带雨林的季节动态可分为衰老(LS)、叶片萌发(LE)和生长季节(G)3个阶段,而干性龙脑林的季节动态则包括衰老(LS)、落叶(D)、叶片萌发(LE)和生长季节(G)4个阶段(见图1)。这表明物候相机可通过捕捉森林植被颜色季节变化特征,提供高时空分辨率的植被物候信息。物



图中阴影区表示雨季, 非阴影区为旱季

图3 2020至2022年4月研究期间采用涡度协方差技术观测的中国西南地区热带雨林(BNS)和泰国北部干性龙脑香林(DPT)月度碳通量NEE(a)、 R_{ECO} (b)、GPP(c)和NEP(d)

Fig.3 Monthly carbon flux of NEE (a), R_{ECO} (b), GPP (c), and NEP (d) observed by using the eddy covariance technique from 2020 to Apr 2022 of tropical forests in southwestern China (BNS) and northern Thailand (DPT)



阴影区域表示95置信区间,*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

图4 日、月、季尺度的总初级生产力(GPP)与GEI (a,b,c),GCC (d,e,f),VCI (g,h,i) 和GRr (j,k,l) 之间的关系

Fig.4 Relationships between daily, monthly, and seasonal productivity (GPP) with GEI (a, b, c), GCC (d, e, f), VCI (g, h, i), and GRr (j, k, l), respectively

候相机捕捉季节性植被动态的优势已在各类型的森林均有验证,比如天然林(如落叶阔叶林和常绿林)^[37]和人工林(橡胶林)^[38]中的GPP季节变化。

通过涡度相关技术测定生态系统GPP是量化森林动态的最为标准方法之一。因此,基于图像提取的物候指数与涡度相关技术测量的森林生态系统的GPP之间的关系是检验物候相机监测物候有效性的重要检验指标。本研究发现,目前开发的物候指数与GPP存在显著相关性($0.45 < R^2 < 0.90$,图4),和对日本常绿和落叶林研究结果中 R^2 的范围(0.61~0.90)相似^[37]。该结果一方面验证了物候相机图像信息具有捕捉生态系统关键过程的能力,另一方面,不同森林类型的生理生态指标可能导致 R^2 范围变化较大。例如,本研究发现热带雨林中物候指数与GPP的关系相较于干性龙脑香林而言更为显著(图4)。这表明未来需要进一步建立颜色指数与生态系统GPP的模型,为物候相机数据在大尺度长时序监测森林生态系统物候方面奠定理论基础^[54]。

森林生态系统的动态变化可能与温度、湿度和降雨等环境因子息息相关。本研究发现,BNS热带森林的GPP[(5.92±0.84)和(7.79±0.70) gC/(m²·day)]高于DPT干性龙脑香林[(4.64±0.47)和(5.63±0.72) gC/(m²·day)]。这可能与BNS森林更高的降雨量,以及优势种多为常绿树种有关。通过分析物候指数和GPP与各项环境因子的关系,可以看出大部分环境因子均与其呈显著的正相关(表2)。从相关系数大小来看,BNS森林的物候动态可能主要受制于深层土壤温度,而DPT干性龙脑香林的物候动态可能与空气相对湿度和深层土

壤含水率有关。研究发现,干性龙脑香林(DPT)的年GPP低于热带雨林(BNS),这可能是由于不同的气象因素(包括平均温度和年累积降雨量)造成的。干性龙脑香林的平均气温(平均值±SE,25.31±0.10 °C)高于热带雨林(20.98±0.13 °C),降雨量较低,分别为(785.52±0.34)和(1 096.90±0.34) mm。因此,影响两种热带森林物候和GPP变化的主要气候因子不同,相对湿度对DPT的影响为52%~71%,而土壤温度对BNS的影响为48%~70%。而且,在干性龙脑香(落叶)林中,森林冠层开阔,易受到人类活动的干扰,因此还存在其他不可控制的因素。并且,在旱季末期,森林火灾在干性龙脑香林中时常发生,此时树叶碎片堆积在森林地面上^[55-56]。因此,落叶森林生态系统不如西双版纳的热带雨林稳定,西双版纳的热带雨林受到政策保护,少有人为干扰。研究发现,泰国干性龙脑香林(DPT)在2020年3月中旬发生了一场森林火灾,但并没有影响当时采集的树冠图像,因为火势尚未蔓延到树冠。在干燥的落叶林中,已经发现了能够抵抗森林火灾的耐火树种(例如厚皮树)。这可能是树木生存的另一个重要因素,较厚的树皮有助于防止野火期间形成层温度过高,危及植被生命。总之,物候指数可能更适用于冠层变化更稳定的森林GPP估算中。

环境因子如温度、水分共同塑造了立地水平的森林植被,森林植被可能对于当地环境有很强的适应性,例如DPT的干性龙脑香林通过落叶来适应极端干旱的气候。先前的研究强调了热带不同常绿和落叶森林光合生产力的显著时间波动,这与光强度、温度和蒸气压等天气条件有关^[57]。本研究结果与Fei等^[58]的研究结

表2 2种热带森林GPP、植被指数与气象因素的Pearson相关分析

Table 2 Pearson correlation analysis between GPP, vegetation indices with meteorological factors in two tropical forest ecosystems

研究点	指数	光合有效 辐射	降水量	相对湿度	土壤体积含水量SWC			气温T _{air} (36 m)	土壤温度T _{soil}		
					5 cm	15~20 cm	40~50 cm		5 cm	15~20 cm	40~50 cm
BNS	GPP	0.102**	0.148**	0.227**	0.349**	0.338**	0.235**	0.536**	0.627**	0.632**	0.634**
	GEI	-0.199**	0.115**	0.506**	0.328**	0.300**	0.284**	0.262**	0.444**	0.450**	0.483**
	GCC	-0.322**	0.208**	0.532**	0.423**	0.393**	0.356**	0.350**	0.541**	0.544**	0.570**
	VCI	-0.325**	0.229**	0.522**	0.429**	0.398**	0.354**	0.375**	0.564**	0.567**	0.590**
	GRr	-0.344**	0.307**	0.592**	0.577**	0.548**	0.470**	0.444**	0.671**	0.676**	0.702**
DPT	GPP	0.152**	0.043	0.521**	0.415**	0.437**	0.411**	-0.159**	-0.222**	-0.166**	-0.121**
	GEI	0.242**	0.244**	0.711**	0.685**	0.624**	0.696**	0.064	0.087	0.118	0.261**
	GCC	0.245**	0.266**	0.698**	0.675**	0.594**	0.688**	0.045	0.043	0.129*	0.211**
	VCI	0.250**	0.270**	0.688**	0.674**	0.590**	0.688**	0.055	0.052	0.136*	0.219**
	GRr	0.200**	0.240**	0.691**	0.666**	0.603**	0.706**	0.139**	0.227**	0.198**	0.383**

注: 加粗表示同组中相关性系数最强的指标。**表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关;*表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

果一致,中国西南地区的热带雨林生态系统(BNS)中,GCC、GEI、VCI和GRr与GPP呈正相关。RGB颜色指数表明数字图像可以以精细的空间和时间分辨率捕捉叶片变红和落叶现象^[59]。使用数字图像计算GEI、GCC和RGB_{ratio}对于准确估算GPP非常重要。总体而言,本研究结果增强了对热带森林生态系统碳吸收和物候变化的理解,并揭示了数字相机获取重要生态信息以跟踪和预测植被生理和生态功能的工具的潜力。

4 结论

本研究利用2种跨国的热带森林生态系统、跨度2年的物候相机图像数据和涡度相关技术通量数据,深入研究了植被指数与GPP之间的关系,发现GEI指数在评估热带森林生态系统的GPP方面具有巨大潜力。研究结果揭示,不同热带森林的物候变化对碳交换产生显著影响,且GEI、GCC和GPP之间的关系在季节尺度上存在差异。在BNS站点,这些指数之间呈现较强正相关关

系,而在DPT站点关联较弱。本研究强调需要开发更多的方法来表征物候相机提取的物候指数与涡度相关技术的GPP之间的关系。数字相机是一种低成本、高效益的工具,可用于获取重要的生态信息以跟踪和预测生理过程。然而,为了建立物候相机提取物候指数与涡度相关技术的GPP数据之间的定量模型,还需要更多的研究案例,尤其需要在那些目前研究相对匮乏的区域,比如印缅热带生物多样性热区的热带森林等。

致谢:感谢宋清华专家基层科研工作站以及云南省热带亚洲森林碳汇国际联合实验室项目的支持。感谢帕尧大学能源与环境系微气象实验室(MiLab)和清迈大学农业学院农林气候变化研究中心(AFCC)提供数据支持。特别感谢Intanil Punlop、Khamorn Phenruedee、Panya Mana、Rungdee Rachanit和杨东海在林冠相机安装和现场试验维护方面的贡献。感谢编辑和匿名评审专家提出的宝贵意见和建议,极大地提高了本文的质量。

参 考 文 献

- [1] Lewis S L, Lloyd J, Sitch S, et al. Changing ecology of tropical forests: evidence and drivers[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2009, 40(1): 529–549.
- [2] Artaxo P, Hansson H C, Machado L A T, et al. Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth[J]. *PLOS Climate*, 2022, 1(8): e0000054.
- [3] Bala G, Caldeira K, Wickett M, et al. Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(16): 6550–6555.
- [4] Yadav V S, Yadav S S, Gupta S R, et al. Carbon sequestration potential and CO₂ fluxes in a tropical forest ecosystem[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 176: 106541.
- [5] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008, 320(5882): 1444–1449.
- [6] Hari M, Tyagi B. Terrestrial carbon cycle: tipping edge of climate change between the atmosphere and biosphere ecosystems[J]. *Environmental Science: Atmospheres*, 2022, 2(5): 867–890.
- [7] Prentice I C, Farquhar G D, Fasham M J R, et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide[M]//Houghton J T, Ding Y, Griggs D J. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge: Cambridge University, 2001: 185–237.
- [8] Pfeifer M, Gonsamo A, Woodgate W, et al. Tropical forest canopies and their relationships with climate and disturbance: results from a global dataset of consistent field-based measurements[J]. *Forest Ecosystems*, 2018, 5(1): 7.
- [9] Piao S L, Liu Q, Chen A P, et al. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922–1940.
- [10] Moon M, Richardson A D, Milliman T, et al. A high spatial resolution land surface phenology dataset for AmeriFlux and NEON sites[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1): 448.
- [11] Stucky B J, Guralnick R, Deck J, et al. The plant phenology ontology: a new informatics resource for large-scale integration of plant phenology data[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 517.
- [12] Gray R E J, Ewers R M. Monitoring forest phenology in a changing world[J]. *Forests*, 2021, 12(3): 297.
- [13] Balzarolo M, Vicca S, Nguy-Robertson A L, et al. Matching the phenology of net ecosystem exchange and vegetation indices estimated with MODIS and FLUXNET in-situ observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, 2016, 174: 290–300.
- [14] Chen X, Zhang Y P. The impact of vegetation phenology changes on the relationship between climate and net primary productivity in Yunnan, China, under global warming[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1248482.
- [15] Songsom V, Koedsin W, Ritchie R J, et al. Mangrove phenology and environmental drivers derived from remote sensing in southern Thailand[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(8): 955.

- [16] Guenther A, Kulmala M, Turnipseed A, et al. Integrated land ecosystem-atmosphere processes study (iLEAPS) assessment of global observational networks[J]. Boreal Environment Research, 2011, 16(4): 321–336.
- [17] Lechner A M, Foody G M, Boyd D S. Applications in remote sensing to forest ecology and management[J]. One Earth, 2020, 2(5): 405–412.
- [18] Zhuravlev R, Dara A, Santos A L D D, et al. Globally scalable approach to estimate net ecosystem exchange based on remote sensing, meteorological data, and direct measurements of eddy covariance sites[J]. Remote Sensing, 2022, 14(21): 5529.
- [19] Taylor S D, Meiners J M, Riemer K, et al. Comparison of large-scale citizen science data and long-term study data for phenology modeling[J]. Ecology, Wiley Online Library, 2019, 100(2): e02568.
- [20] Katal N, Rzanny M, Mäder P, et al. Deep learning in plant phenological research: a systematic literature review[J]. Frontiers in Plant Science, Frontiers, 2022, 13: 805738.
- [21] Toomey M, Friedl M A, Froking S, et al. Greenness indices from digital cameras predict the timing and seasonal dynamics of canopy-scale photosynthesis[J]. Ecological Applications, 2015, 25(1): 99–115.
- [22] Alberton B, Martin T C M, Da Rocha H R, et al. Relationship between tropical leaf phenology and ecosystem productivity using phenocameras[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: 1223219.
- [23] Zhao J, Zhang Y, Tan Z, et al. Using digital cameras for comparative phenological monitoring in an evergreen broad-leaved forest and a seasonal rain forest[J]. Ecological Informatics, Elsevier, 2012, 10: 65–72.
- [24] Alberton B, Torres R D S, Cancian L F, et al. Introducing digital cameras to monitor plant phenology in the tropics: applications for conservation[J]. Perspectives in Ecology and Conservation, 2017, 15(2): 82–90.
- [25] Chianucci F, Bajocco S, Ferrara C. Continuous observations of forest canopy structure using low-cost digital camera traps[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108516.
- [26] Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications: a field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates[M]. Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences, 2013: 1–688.
- [27] Mauder M, Cuntz M, Drüe C, et al. A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 169: 122–135.
- [28] Baldocchi D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of global change biology[J]. Global change biology, Wiley Online Library, 2020, 26(1): 242–260.
- [29] Hill T, Chocholek M, Clement R. The case for increasing the statistical power of eddy covariance ecosystem studies: why, where and how?[J]. Global Change Biology, 2017, 23(6): 2154–2165.
- [30] Cunliffe A M, Boschetti F, Clement R, et al. Strong correspondence in evapotranspiration and carbon dioxide fluxes between different eddy covariance systems enables quantification of landscape heterogeneity in dryland fluxes[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2022, 127(8): e2021JG006240.
- [31] Richardson A D, Braswell B H, Hollinger D Y, et al. Near - surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology[J]. Ecological Applications, 2009, 19(6): 1417–1428.
- [32] Nagai S, Maeda T, Gamo M, et al. Using digital camera images to detect canopy condition of deciduous broad-leaved trees[J]. Plant Ecology & Diversity, 2011, 4(1): 79–89.
- [33] Hoek Van Dijke A J, Orth R, Teuling A J, et al. Comparing forest and grassland drought responses inferred from eddy covariance and earth observation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 341: 109635.
- [34] Sonnentag O, Hufkens K, Teshera-Sterne C, et al. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 152: 159–177.
- [35] Richardson A D, Klosterman S, Toomey M. Phenology: an integrative environmental science[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 413–430.
- [36] Guan P, Zheng Y, Lei G. Analysis of canopy phenology in man-made forests using near-earth remote sensing[J]. Plant Methods, 2021, 17(1): 104.
- [37] Saitoh T M, Nagai S, Saigusa N, et al. Assessing the use of camera-based indices for characterizing canopy phenology in relation to gross primary production in a deciduous broad-leaved and an evergreen coniferous forest in Japan[J]. Ecological Informatics, 2012, 11: 45–54.
- [38] Zhou R, Zhang Y, Song Q, et al. Relationship between gross primary production and canopy colour indices from digital camera images in a rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation, Southwest China[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 437: 222–231.
- [39] Cao M, Zhang J. Tree species diversity of tropical forest vegetation in Xishuangbanna, SW China[J]. Biodiversity and Conservation, 1997, 6(7): 995–1006.
- [40] Song Q H, Fei X H, Zhang Y P, et al. Water use efficiency in a primary subtropical evergreen forest in Southwest China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 43031.
- [41] Suwannapat P, Sanwangsri M, Komori D, et al. Introduction to new ThaiFlux site: dry dipterocarp forest flux Phayao site (DPT)[C]. AsiaFlux Workshop 2014 Secretariat Office International, Laguna, Philippines, 18 August 2014.

- [42] Sanwangsri M, Hanpattanakit P, Chidthaisong A. Variations of energy fluxes and ecosystem evapotranspiration in a young secondary dry dipterocarp forest in western Thailand[J]. *Atmosphere*, 2017, 8(8): 152.
- [43] Nutiprapun P, Hermhuk S, Nanami S, et al. Effects of El Niño drought on seedling dynamics in a seasonally dry tropical forest in Northern Thailand[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(2): 451–461.
- [44] Myo S T Z, Zhang Y, Song Q, et al. Investigating the rainforest canopy phenology variation and productivity responses to drought by using digital camera images[J]. *International Journal of Current Science Research and Review*, 2021, 4(10): 1378–1397.
- [45] Ghosh T, Fattah S A, Wahid K A. CHOBBS: color histogram of block statistics for automatic bleeding detection in wireless capsule endoscopy video[J]. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 2018, 6: 1–12.
- [46] Myo S T Z, Zhang Y P, Song Q H, et al. Assessing canopy phenological variations and gross primary productivity in a savanna ecosystem in Yuanjiang, Yunnan province of southwest China[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2023, (2): 75–89.
- [47] Zhang L, Sun R, Xu Z, et al. Diurnal and seasonal variations in carbon dioxide exchange in ecosystems in the Zhangye oasis area, northwest China[J]. *PLOS ONE*, 2015, 10(3): e0120660.
- [48] Wang X, Blanken P D, Kasemsap P, et al. Carbon and water cycling in two rubber plantations and a natural forest in mainland southeast Asia[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(5): e2022JG006840.
- [49] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, et al. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere[J]. *Ecology*, 1994, 75(1): 134–150.
- [50] Vickers D, Mahrt L. Fetch limited drag coefficients[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1997, 85(1): 53–79.
- [51] Moncrieff J. *Vegetation, Water, Humans and the Climate*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 173–182.
- [52] Vickers D, Thomas C, Law B E. Random and systematic CO₂ flux sampling errors for tower measurements over forests in the convective boundary layer[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 73–83.
- [53] Uuh-Sonda J M, Figueroa-Espinoza B, Gutiérrez-Jurado H A, et al. Ecosystem productivity and evapotranspiration dynamics of a seasonally dry tropical forest of the Yucatan peninsula[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(1): e2019JG005629.
- [54] Xu X, Du H, Fan W, et al. Long-term trend in vegetation gross primary production, phenology and their relationships inferred from the FLUXNET data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 605–616.
- [55] Brando P M, Nepstad D C, Balch J K, et al. Fire-induced tree mortality in a neotropical forest: the roles of bark traits, tree size, wood density and fire behavior[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 630–641.
- [56] Ishida A, Yamaji K, Nakano T, et al. Comparative physiology of canopy tree leaves in evergreen and deciduous forests in lowland Thailand[J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): 601.
- [57] Takanashi S, Kosugi Y, Tanaka Y, et al. CO₂ exchange in a temperate Japanese cypress forest compared with that in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest[J]. *Ecological Research*, 2005, 20(3): 313–324.
- [58] Fei X H, Song Q H, Zhang Y P, et al. Patterns and controls of light use efficiency in four contrasting forest ecosystems in Yunnan, southwest China[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(2): 293–311.
- [59] Lin Y, Zhang Y, Zhao W, et al. Pattern and driving factor of intense defoliation of rubber plantations in SW China[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 104–116.

Comparison of Canopy Phenology and Productivity in Two Tropical Forests from Southwestern China and Northern Thailand

SAWASDCHAI Boonsiri^{1,2}, SANWANGSRI Montri³, HANPATTANAKIT Phongthep⁴,
VONGRUANG Patipat⁵, SUWANNAPAT Pimsiri⁶, CHIDTHAISONG Amnat⁷,
TOWPRAYOON Sirinthornthep⁷, TAMMADID Wittanan^{1,2}, LIU Yaqi¹, ZHENG Huixu¹,
ZHANG Jing¹, JIAO Linjie¹, ZHANG Yiping¹, CHEN Xing¹, SONG Qinghai^{1,*}

(1. CAS Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla Yunnan 666303, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Highland Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200, Thailand; 4. Department of Environment, Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, Thailand; 5. Department of Environmental Health, School of Public Health, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand; 6. School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand; 7. The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, Thailand)

Abstract: Tropical forest ecosystems are vital for climate change mitigation since they have strong carbon uptake ability and high productivity. The phenology of tropical forests in Southeast Asia is affected by large seasonality, thereby influencing productivity through photosynthetic activity. Still, understanding the relationship between ecosystem productivity and phenology is insufficient in this region. To explore the relationship between phenological indices extracted from canopy cameras and eddy covariance flux data, this study compared two years of monitoring data from flux towers in a tropical rainforest of Southwest China (BNS) and a dry dipterocarp forest of Thailand (DPT) (January 2020–April 2022). The canopy color indices extracted from Red, Green, Blue digital numbers (RGB_{DN}) are divided into RGB chromatic coordinates (RGB_{CC} : RCC, GCC, BCC), Green Excess Index (GEI), RGB_{ratio} of Vegetation Condition Index (VCI), Green-Red Ratio (GRr), and Red-Blue Ratio (RBr). The results showed that vegetation indices exhibited clear seasonal variations, reflecting the phenological characteristics of tropical forests. At the BNS, vegetation indices were significantly positively correlated with Gross Primary Production (GPP) (GRr: $R^2=0.91$, GEI: $R^2=0.90$, GCC: $R^2=0.88$, VCI: $R^2=0.87$; $P<0.05$), while the DPT exhibited weaker relationships compared to the BNS (VCI: $R^2=0.77$, GCC: $R^2=0.77$, GEI: $R^2=0.71$, GRr: $R^2=0.45$). The BNS showed higher sensitivity to phenological changes than the DPT, with a higher annual average GPP [$5.92\text{--}7.79\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{day})$ vs $4.64\text{--}5.63\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{day})$]. Soil temperature may be a key driving factor for phenological changes in the BNS site, while relative humidity may significantly impact phenology in the DPT forest. Long-term digital camera observations provided valuable data for assessing GPP and understanding the response of canopy phenology to climate change. Future research should focus on quantifying the relationship between canopy phenological changes and ecosystem carbon exchange in tropical forest ecosystems.

Keywords: tropical forests; digital camera; vegetation indices; gross primary production