DOI: 10.20103/j.stxb.202501240187

王媛媛,罗维均,张小琴,吕伊娜,张林,程安云,曾广能,王世杰.西南喀斯特地区典型农田生态系统碳通量特征——以普定陈旗小流域为例.生态 学报,2025,45(19): - .

Wang Y Y, Luo W J, Zhang X Q, Lü Y N, Zhang L, Cheng A Y, Zeng G N, Wang S J. Carbon flux characteristics of typical farmland ecosystems in the karst region of Southwest China: a case study of the Chenqi small watershed in Puding, Guizhou. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19): - .

西南喀斯特地区典型农田生态系统碳通量特征

——以普定陈旗小流域为例

王媛媛^{1,2},罗维均^{1,3,*},张小琴^{1,2},吕伊娜^{1,3},张 林^{1,3},程安云^{1,3},曾广能^{3,4},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,普定 562100

4 贵州民族大学生态环境工程学院,贵阳 550025

摘要:以贵州省普定陈旗小流域为对象,采用涡度相关(EC)技术监测了西南喀斯特地区三种主要农作物(油菜、水稻和玉米) 生长季的碳通量。结果表明:日时间尺度上,三种作物在生长季内净生态系统碳交换(NEE)均呈"U"型变化,即白天以吸收 CO₂为主(NEE<0),夜间以排放为主(NEE>0),碳吸收峰值出现在12:00—14:00,日吸收峰值分别出现在油菜花期、水稻孕穗和 抽穗期以及玉米花粒期。季节时间尺度上,NEE 动态与作物生长阶段协同变化:幼苗期和成熟期有微弱的碳排放,在生长旺盛 期的碳吸收能力最强。整个生长季的碳吸收能力依次为玉米(-443.17 gC/m²)>水稻(-304.39 gC/m²)>油菜(-105.33 gC/ m²);扣除籽粒含碳量后,三种作物碳吸收能力依次为玉米(-232.97 gC/m²)>油菜(-38.99 gC/m²)>水稻(-18.66 gC/m²),玉米 作为 C₄植物表现出较强的碳吸收能力。与其他区域相比,喀斯特地区受土壤贫瘠、水分渗漏及养分限制,作物碳吸收能力整体 偏低,但玉米作为 C₄植物展现出更强的环境适应性。本研究揭示了喀斯特地区农田生态系统不同作物生长阶段的碳通量特 征,可为区域农业碳汇管理及种植制度优化提供科学依据。

关键词:喀斯特;农田生态系统;涡度相关;碳通量

Carbon flux characteristics of typical farmland ecosystems in the karst region of Southwest China: a case study of the Chenqi small watershed in Puding, Guizhou

WANG Yuanyuan^{1,2}, LUO Weijun^{1,3,*}, ZHANG Xiaoqin^{1,2}, LÜ Yina^{1,3}, ZHANG Lin^{1,3}, CHENG Anyun^{1,3}, ZENG Guangneng^{3,4}, 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 562100, China

4 College of Eco-environmental Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

Abstract: In the context of global climate change, agricultural ecosystems play a critical role in regulating the global carbon balance. However, in the karst region of southwestern China, studies on carbon fluxes in farmland ecosystems face a series of unique and complex challenges due to shallow soils, intense karstification, limited water and nutrient availability, and a

基金项目:国家自然科学基金项目(U2244216, 42273021);中国烟草总公司贵州省公司 2023 年度科技项目(2023XM17);中国博士后科学基金 (2021M703187)

收稿日期:2025-01-24; 网络出版日期:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: luoweijun@ vip.gyig.ac.cn

http://www.ecologica.cn

high proportion of sloping farmland. Although the eddy covariance (EC) technique serves as a widely accepted, noninvasive, and high-temporal-resolution standard method for measuring carbon fluxes, to date, no studies have reported continuous, high-frequency EC-based monitoring of farmland ecosystem carbon budgets covering entire growing seasons in this karst region. This study systematically monitored the dynamic variations of carbon fluxes across the entire growing seasons of three major crops (rapeseed, rice, and maize) in the karst region of southwestern China using the eddy covariance technique in the Puding Chenqi small watershed of Guizhou Province. The comprehensive results demonstrated the following key findings: (1) At the daily scale, the net ecosystem carbon exchange (NEE) of all three crops exhibited a "U-shaped" pattern, with CO, absorption dominating during the daytime (NEE<0) and emissions prevailing at night (NEE >0). The peak of carbon absorption occurred between 12:00 and 14:00. (2) At the seasonal scale, NEE dynamics synchronized with crop growth phases; weak carbon emissions (NEE>0) dominated during seedling and maturity stages. while peak absorption capacity emerged during vigorous growth periods. The cumulative carbon absorption capacities across the entire growing season ranked as maize $(-443.17 \text{ gC/m}^2) > \text{rice} (-304.39 \text{ gC/m}^2) > \text{rapeseed} (-105.33 \text{ gC/m}^2)$. After accounting for carbon removal via grain harvest, maize retained a significantly higher net carbon sink (-232.97 gC/ m^2) compared to rapeseed (-38.99 gC/m²) and rice (-18.66 gC/m²), highlighting maize's superior carbon sequestration efficiency as a C_4 plant. (3) Compared to other agricultural regions, crop carbon absorption capacities in the karst area were generally lower due to soil infertility, water leakage, and nutrient limitations. However, maize exhibited stronger environmental adaptability. Optimizing crop planting structures, such as expanding maize cultivation and implementing rapeseed-maize rotation, combined with precision water-fertilizer management, can enhance regional carbon sink potential. This study elucidated the carbon flux characteristics of different crop growth stages in karst farmland ecosystems, and provided a scientific basis for regional agricultural carbon sink management and cropping system optimization.

Key Words: karst; farmland ecosystem; eddy covariance; carbon flux

自工业革命以来,人类活动引发的大气二氧化碳(CO₂)浓度逐步增加,造成了全球气候的持续变暖,而陆 地生态系统作为重要的碳汇,有效地减缓了全球气候变暖的趋势^[1]。农田生态系统是陆地生态系统的重要 组成部分,在维持粮食安全的同时,也在调节全球碳平衡中发挥着重要作用^[2]。对于农田生态系统,其碳循 环过程和作物生长发育密切相关,影响到粮食产量、农业节水和固碳减排^[3]。农田生态系统在生长季通常表 现为碳汇^[4-5],但在整个生长周期中,可能会因为呼吸和输出等过程而表现为碳源^[3-5]。中国西南喀斯特地 区作为全球最大的喀斯特连片分布区,耕地面积占全国总耕地面积的 15.07%,是我国重要的农业生产 区^[7-9]。受土壤浅薄、岩溶作用强烈、水分与养分供给受限以及坡耕地比例高等因素的影响^[10-11],该区域农 田生态系统的碳通量研究面临独特挑战。

以往生态系统碳通量的研究主要采用静态箱法^[12]、大气反演模型^[13-14]以及过程模拟^[15]等方法。静态 箱法主要用于短期点尺度的地—气间 CO₂的交换研究,但实验结果受人为因素的影响较大;大气反演模型依 赖稀疏站点数据,且人为排放估算误差可能导致较高的不确定性;过程模型则因生态过程简化及输入参数的 不确定性,不同模型的结果间存在较大差异^[16-17]。这些方法在时间分辨率、空间代表性及长期监测能力方面 存在一定局限,难以揭示不同作物在生长期尺度的碳交换动态。相比之下,涡度相关(Eddy Covariance, EC)技 术作为一种非侵入性、高时间分辨率的通量测定方法,是全球范围内监测生态系统碳通量的标准方法^[18]。EC 技 术可在不干扰生态系统自然状态的情况下,进行自动连续的 CO₂通量观测,在农田生态系统的碳通量研究中得到 了广泛应用^[19-22]。在国内外,已有许多研究使用 EC 技术监测农田 CO₂通量的日变化和季节变化^[23]。然而,基 于 EC 技术,对西南喀斯特地区农田生态系统碳收支进行全生长季连续高频监测的研究尚未见报道。

因此,本研究采用 EC 技术,在中国西南典型喀斯特地区选取三种主要农作物(油菜、水稻和玉米),对其 生长季的净生态系统碳交换(NEE)进行监测。通过连续观测农作物在生长季的碳通量变化规律,重点分析 三种作物在不同生长期的碳收支特征,并对比中国不同地区农田的碳吸收能力,以期为喀斯特地区农田碳收 支研究提供基础数据支持,并为区域农业可持续发展以及碳管理策略优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市普定县的陈旗小流域(105°46′30″E—105°46′50″E,26°15′20″N—26°16′90″N), 属长江流域乌江水系,处于后寨地下河流域。小流域面积约1.25 km²,属于亚热带季风湿润气候,雨热同期。 观测期间的年均气温为16.1 ℃,年降水量为1079.3—1457.7 mm,降雨主要分布在5—9月份。该流域(图1) 四周被星状分布的锥形山丘环绕,是一个典型的座舱式喀斯特景观^[24-25]。山坡区域的土层相对较薄,平均厚 度约为50 cm,以灌丛地和草丛地为主;坡势较缓的山脚以及流域洼地处的土层明显较厚,平均厚度大于



图1 研究区及作物生长季风向玫瑰图和通量观测贡献区

Fig.1 Research area, wind rose diagrams for crop growing seasons, and flux footprint contribution areas

100 cm,集中了大部分的耕地^[24]。流域内的农田主要农作物包括水稻、玉米、油菜以及多种蔬菜,同一季节内种植的作物种类在空间分布上展现出较高的一致性。

两个研究农田的下垫面地势均较为平坦,土壤类型为粉壤土,两个 EC 通量观测系统分别设置在1号农田和2号农田的中心位置,通量塔周围无其他遮蔽物(图1)。其中,1号农田的海拔为1302m,2号农田的海拔为1375m,水平间距为674m。本研究分别对1号农田的油菜生长季(2020年11月—2021年4月)、水稻生长季(2021年6月—2021年9月)以及2号农田的玉米生长季(2022年5月—2022年9月)进行了通量观测。油菜和水稻研究期内的主导风向均为东北风和西偏南风,平均风速分别为1.2m/s和0.92m/s,从地形上看均为山谷风;玉米研究期内的主导风向为北风、东风和东偏南风,平均风速为1.14m/s。在通量观测源区贡献图中,轮廓线以10%的增量表示,从通量塔中心开始由内向外逐渐增大,90%的通量源区位于以通量塔为中心的200m范围内。在该范围内,1号农田主要种植油菜和水稻,基本为单一作物种植;2号农田则以玉米种植为主,但局部区域存在空地及野生植被,其中19.4%的面积为非农田生态系统,主要覆盖野生灌木丛。因此,在玉米生长季,农田生态系统碳通量的测定可能受一定程度的影响。但由于在90%的通量贡献区内,油菜、水稻和玉米的种植面积均超过80%,整体上仍能够较好地代表这三种作物在生长季内的碳通量特征及其贡献。

1.2 试验方法

1号和2号农田均建有20m高的铁塔,分别装有EC系统和气象观测系统。EC系统由三维超声风速仪(Gill-R3-50)和开路式红外CO₂/H₂O气体分析仪(LI-7500DS)组成,安装高度为距地面6m,数据采集频率为10Hz,传输并存储于SmartFlux系统中。小气候梯度自动监测系统(CR-9200)配备了多层空气温湿度传感器(HMP155A)和风速风向传感器(FT742-DM)。此外,在通量塔周围地表以下10、30、50 cm处,埋设有土壤热通量板(HFP01)和土壤水分传感器(CS655型)。除此以外,研究点还安装了其他气象数据观测仪器,包括降水量(TE525MM, Texas Electronics)、净辐射(CNR4, Kipp&Zonen)、气压(PTB110, VAISALA)、日照时数(SPN1,DelTair-t)、红外表面温度(SI-111, Apogee)、光合有效辐射(LI-190R,LI-COR)、太阳辐射(LI-200R,LI-COR)等。

1.3 田间管理

研究区内1号农田种植的油菜为芥菜型油菜,种植方式为直播,于2020年11月中下旬开始播种,至2021 年4月底完全成熟并收割,仅在蕾薹期进行施肥,生长期间未进行灌溉。水稻种植方式为先育苗,再插秧移 栽,于2021年5月开始育苗,在9月底完全成熟并收割,在育苗期施用复合肥,田间管理采取水层控制方式, 根据土壤水分状况适时补充灌溉。2号农田主要种植夏季玉米,种植方式为穴播,于2022年5月初播种,在9 月初收获,分别在苗期和穗期进行追肥,生长期间未进行灌溉。观测期间,三种作物的生长状况详细记录于表 1中。

1.4 气象条件

研究期内空气温度(*T*_{air})、土壤温度(*T*_{soil})、降水量(Precipitation)、光合有效辐射(PAR)、总太阳辐射(*R*_g)及饱和水汽压差(VPD)的变化特征如图 2 所示。油菜生长季的气温和降水远低于水稻和玉米,其观测期内平均气温为 11.5 ℃,总降水量为 170.8 mm,在气温回升的过程中,3 月初和 4 月中上旬有两次相对较强的降温,这一现象可能与同期的连续降水有关;水稻生长季内平均气温为 22.3 ℃,总降水量为 655 mm,占当年降水量的 65%;玉米生长季平均气温为 20.7 ℃,生长全过程处于雨季,总降水量为 967 mm,占当年降水量的 73.87%。油菜生长季受到冬季气候的影响,辐射强度较弱且波动较大;水稻和玉米均在 7—8 月辐射水平 最强且波动较小。油菜生长季内 VPD 日均值为 3.50 hPa,冬季较低,11 月和次年 3 月稍高;水稻生长季的 VPD 最高,日均值为 6.70 hPa,主要受较高气温影响;玉米生长季的 VPD 波动较小,日均值为 3.53 hPa,可能与观测期降水量较多和气温适中有关。

Table 1 Summary of crop growth and development					
作物	日期	生长阶段	生长阶段		
Crop	Date	Growth stage			
油菜 Rapeseed	2020年11月中下旬	播种			
	2020年12月初—2021年1月15日	苗期			
	2021年1月15日—2021年2月19日	蕾薹期			
	2021年2月19日—2021年3月22日	开花期			
	2021年3月底—2021年4月中下旬	成熟期			
	2021年4月底—2021年5月初	收割			
水稻 Rice	2021年5月初—2021年5月25日	育苗期			
	2021年6月上旬	插秧期			
	2021年6月11日—2021年6月25日	分蘖期			
	2021年6月25日—2021年7月	拔节期-孕穗期			
	2021年7月—2021年8月中旬	抽穗期-灌浆期			
	2021年9月3日—2021年9月20日	乳熟期-成熟期			
	2021年9月底	收割			
玉米 Maize	2022年5月5日—2022年5月26日	苗期			
	2022年5月26日—2022年6月24日	穂期			
	2022年6月24日—2022年8月30日	花粒期-成熟期			
	2022年9月中上旬	收割			

表 1 作物生长发育状况总结 Table 1 Summary of crop growth and development

1.5 数据质量控制、插补及拆分

采用 EddyPro7.0.9 软件(LI-COR)对原始数据进行通量数据计算和质量控制。校正方法包括频谱、WPL 校正、时滞补偿、去势、统计检验和平面拟合等,获得半小时的 NEE 值。对 EddyPro 标注的低质量数据、夜间 为负值的数据、降雨天气的数据、仪器故障或人为干扰导致的异常值数据等进行剔除,并根据摩擦速度阈值剔 除低湍流状态下的通量^[26]。日间和夜间经剔除后得到的数据的完整性分别为 74.83%和 58.60%。最后,使 用 REddyPro 在线处理工具利用其他气象数据对 NEE 进行插补^[27-28]。

将所测得的 NEE 拆分为生态系统呼吸(Reco)和总初级生产力(GPP),以更好地了解生态系统碳交换过程。在夜间,生态系统由于没有光合作用,NEE 描述为夜间的 Reco;在白天,NEE 描述为日间的 Reco 与 GPP 的差值。

NEE =
$$\begin{cases} \text{Reco 夜间} \\ \text{Reco-GPP 日间} \end{cases}$$
 (1)

通过温度响应模型对夜间 Reco 与空气温度(*T*_{air})进行拟合^[29],依据响应变化曲线来填补缺失的夜间 NEE 值,并模拟出日间 Reco 值。

$$\operatorname{Reco} = ae^{bT_{\operatorname{air}}} \tag{2}$$

式中,*a* 为参考温度(0°C)下的呼吸速率(μ mol m⁻² s⁻¹);*b* 为与温度敏感系数(Q_{10})有关的参数, Q_{10} 可由下式 确定:

$$Q_{10} = e^{10b}$$
(3)

利用模拟的日间 Reco 值与日间有效 NEE 的差值得到日间有效 GPP 值,并通过 Michaelis-Menten 光响应 模型模拟日间 GPP,从而填补日间 NEE 的空白:

$$NEE_{d} = R_{d} - \frac{\alpha \times PAR \times A_{max}}{\alpha \times PAR + A_{max}}$$
(4)

式中,NEE_d为日间净生态系统碳交换量(μ mol m⁻² s⁻¹); R_d 为生态系统呼吸速率(μ mol m⁻² s⁻¹); α 为初始光能 利用效率(μ mol m⁻² s⁻¹); A_{max} 为最大光合速率(μ mol m⁻² s⁻¹);PAR 为光合有效辐射(μ mol m⁻² s⁻¹),基于 PAR





Fig.2 Meteorological conditions during the observation period

与全球太阳辐射 $R_g(W/m^2)$ 之间存在显著的线性关系,本研究在 PAR 数据缺失时使用 R_g 作为替代^[30]。 籽粒含碳量 C_{gr} 由下式计算:

$$C_{gr} = (1 - W_{gr}) f_c Y \tag{5}$$

式中, Cgr为籽粒含碳量, gC/m²; Wgr为籽粒含水量, 油菜取 0.1, 水稻取 0.15, 夏玉米取 0.155; fc 为籽粒含碳率,

油菜取 0.42,水稻取 0.45,夏玉米取 0.447; Y 为产量,g/m²。

2 结果

2.1 NEE 的日变化特征

油菜、水稻和玉米生长季的逐月 NEE 平均日变化曲线如图 3 所示,三种作物表现出相似的变化特征,但 在不同生长期的 NEE 水平存在显著差异。NEE 月平均日变化总体呈"U"型,即夜间为正值(排放),白天为负 值(吸收)。在夜间无太阳辐射,生态系统只进行呼吸作用并向大气排放 CO₂,表现为碳排放(NEE>0);日出 后(6:00—7:00),随着辐射的增强和气温的上升,生态系统通过光合作用吸收的 CO₂大于呼吸作用排放的 CO₂,表现为碳吸收(NEE<0),通常在 12:00—14:00 达到吸收峰值;随着 PAR 的显著减弱(15:00—16:00), NEE 快速上升,在 18:00—19:00 变为正值。夜间 NEE 曲线相较于日间变化平缓,夜间生态系统只进行呼吸 作用,气温等影响因子在夜间通常更加稳定,导致 NEE 的变化波动较小。相对于玉米,油菜和水稻生长季的 NEE 在上午变化幅度较小,而在下午较大,这种差异可能与作物的生理特性有关。此外,农田生态系统 NEE 的日较差(一天内 NEE 的最大值和最小值之间的差异)在作物生长旺盛期相对较大,水稻和玉米的月平均日 较差高于油菜,其差异主要取决于作物生长季的碳吸收能力。



Fig.3 Diurnal variations of NEE in different months

NEE、Reco和 GPP 的逐日变化如图 4 所示,油菜、水稻和玉米生长季的日 NEE 变化范围分别为-4.50-

^{2.2} NEE、Reco 和 GPP 的季节变化特征

2.37 gC m⁻² d⁻¹、-12.18—9.89 gC m⁻² d⁻¹和-14.37—12.70 gC m⁻² d⁻¹。油菜在 11 月和 12 月种子尚未发芽,生态系统基本处于裸土状态,此时碳通量主要来自土壤微生物和野草的呼吸作用及光合作用贡献,NEE 变化幅度较小且接近碳平衡(NEE ≈ 0);在水稻和玉米生长初期,植株尚小光合作用能力较弱,且种植前后阶段的温度和辐射均相对较低,GPP 和 Reco 值较小,NEE 表现为微弱的碳排放(NEE > 0)。随着作物的生长发育以及温度和辐射强度的增加,生态系统的光合作用和呼吸作用同步增强,GPP 和 Reco 值逐渐升高,且光合作用在此过程中占据主导作用,NEE 逐渐表现为碳吸收(NEE < 0),日吸收峰值分别出现在油菜花期、水稻抽穗期和玉米花粒期。作物生长末期,随着植株衰老,光合作用能力下降,GPP 值逐渐降低;但由于生态系统的碳排放源主要包括植物呼吸和土壤呼吸,二者均与温度呈正相关,且三种作物在该阶段的温度均处于生长季的较高水平,因此土壤呼吸对 Reco 值有较大的贡献,Reco 值并未大幅降低,该阶段 NEE 又逐渐趋于 0 甚至正值^[31]。

从 NEE、GPP 和 Reco 逐日累积结果可以看出,三种作物整个生长季内通过光合作用吸收的 CO₂远高于呼 吸作用的排放量,均表现为明显的碳吸收。油菜生长季内 NEE、GPP 和 Reco 累的积值分别为-105.33 gC/m²、540.92 gC/m²和 435.37 gC/m²;水稻生长季内 NEE、GPP 和 Reco 累积值分别为-304.39 gC/m²、2082.40 gC/m²和 1778.01 gC/m²;玉米生长季的 NEE、GPP 和 Reco 累积值分别为-443.17 gC/m²、1882.65 gC/m²和 1439.48 gC/m²。整体来看,三种作物生长季的碳吸收能力依次为:玉米>水稻>油菜,这一差异不仅与作物的生理特性 有关,还可能与油菜生长季低温和较弱辐射条件对其碳吸收能力的限制相关。

3 讨论

3.1 不同农作物生长季的碳通量特征

不同农田生态系统的生长季累积碳通量存在显著差异,在不考虑籽粒移出农田的情况下,西南喀斯特地 区农田生态系统表现出较强的吸收能力,油菜、水稻、玉米生长季的 NEE 累积值分别为-105.33、-304.39 和-443.17 gC/m²。玉米和水稻在生长季展现出较强的碳吸收能力,这与作物的生理特性、气候条件等因素密切 相关。从 NEE 日变化动态(图3)中可以看出,油菜和水稻生长季的 NEE 在上午变化幅度相较于下午较小,这 一现象可能与淀粉等光合产物的积累会对光合作用产生抑制有关^[32],即 NEE 的日变化也会受到生物钟和其 它内源性过程的调控^[33];相比之下,玉米作为 C₄植物,并未表现出明显的光合反馈抑制现象,这一差异可能 源于 C₄植物特有的 CO₂浓缩机制,该机制有助于减轻光合产物积累对光合作用的潜在抑制^[34],从而增强其碳 吸收能力。此外,气候条件对生态系统的碳收支也有一定影响:油菜在生长季内面临较低的温度和较弱的辐 射,导致其光合作用效率较低;而水稻和玉米则在温暖且辐射较强的气候条件下,表现出更有利的碳吸收能 力。在作物成熟后,从农田尺度向更大范围的区域尺度进行评估时,需考虑籽粒含碳量的消耗^[35]。根据研究 区所在城市的平均产量,籽粒收获移出农田后,油菜的 NEE 由-105.33 gC/m²变为-38.99 gC/m²,水稻的 NEE 由-304.39 gC/m²降低至-18.66 gC/m²,玉米的 NEE 由-443.17 gC/m²降为-232.97 gC/m²。整体来看,玉米在 生长季展现出相对较强的碳吸收能力。

3.2 作物生长与田间管理对农田碳通量的影响

作物生长阶段影响光合作用与呼吸过程的动态平衡,主导了 NEE 的日变化与季节动态。日间碳吸收主 要受光合作用驱动^[23,36],表现出明显的生长阶段特征,油菜、水稻和玉米均在生长旺盛期表现出较高的光能 利用效率。油菜生长季内最大光合速率(*A*_{max})呈现出先增大、后减小的趋势,在花期达到最大(30.08 μmol m⁻² s⁻¹),与 NEE 日变化的最大碳吸收量出现在同一生长期,即随着作物的生长发育,其冠层的光合能力逐渐 提升,直至达到一个最高点,此后光合能力开始逐渐减弱^[37]。与油菜类似,水稻和玉米的*A*_{max}最大值分别出 现在灌浆、乳熟期(28.12 μmol m⁻² s⁻¹)和花粒期(45.56 μmol m⁻² s⁻¹),同样与各自 NEE 日变化峰值出现在同 一生长期。作物的光合能力与其物候和生长节律紧密相关,生长旺盛期的碳吸收能力最强^[23]。农田夜间碳 排放动态则受作物形态与栽培模式的影响^[29]:油菜浅根系特性使其夜间呼吸对土壤温度(*Q*₁₀=2.59)更敏 感^[38];而玉米因高杆形态,其夜间呼吸对气温的波动更敏感(*Q*₁₀=2.17);水稻淹水栽培通过抑制土壤氧气扩



图 4 NEE、GPP 和 Reco 的季节性变化 Fig.4 Seasonal variations of NEE, GPP, and Reco

散,并受水体热容效应影响,使其夜间呼吸对气温敏感性较低(Q₁₀=1.24)^[39]。作物形态特征与栽培方式通过 调节植物与土壤呼吸的相对贡献,影响了夜间碳排放模式。

此外,田间管理措施也会进一步影响碳通量的变化。油菜采用直播方式种植,整个生长季仅在蕾薹期施肥,未进行灌溉,有限的水肥供应可能使其生长过程中光合碳同化能力受到一定限制^[40]。水稻淹水栽培模式通过水层管理维持土壤湿度稳定,这种水田生态系统的管理方式可能在一定程度上降低了夜间土壤温度波动,从而影响生态系统的呼吸速率^[41]。玉米采用穴播方式种植,并在苗期和穗期施肥,促进光合产物的高效转运,其*A*_{max}在花粒期达到最高值,支撑其较高的光合碳同化能力^[42]。

因此,不同作物的生长节律、栽培模式及管理措施等共同影响农田碳通量的动态特征。在此基础上,优化 种植制度可改善农田碳收支特征。例如,扩大玉米种植比例可充分发挥 C₄植物的高光效优势,而油菜—玉米 轮作则有助于延长光合活跃期,从而优化全年碳收支。此外,通过合理的水肥管理,如在水稻淹水栽培模式下 施用有机肥,或针对油菜和玉米优化施肥与灌溉策略,可调控土壤呼吸和碳释放过程,进一步影响农田碳 通量。

3.3 中国不同区域农作物生长季碳通量的对比

研究结果表明,本区域油菜生长季内的 NEE 累积值为-105.33 gC/m²,与湘中丘陵区小盆地油的观测结 果(-101.62 gC/m²)^[43]相近,但远低于江汉平原的稻-油连作系统的油菜观测值(-703 gC/m²)^[44]。这种差异 可能与土壤条件、气候因素及农田管理措施密切相关。喀斯特地区土壤浅薄贫瘠、岩溶裂隙导致水分快速渗 漏、养分供应能力较低^[7,45],加之冬季光照不足,限制油菜的根系生长与光合能力;而江汉平原土壤较为肥沃, 且精细化施肥和灌溉管理提高了油菜的碳吸收能力^[44]。此外,不同研究在 EC 技术的夜间观测精度及数据处 理方法上的差异,也可能对油菜碳通量估算产生一定影响^[43]。

本研究区域水稻生长季 NEE 累积值为-304.39 gC/m²,与淮河中游的观测结果(-300.05 gC/m²)^[46]相 近,略低于鄱阳湖流域(-326—-408 gC/m²)^[3,21]和太湖流域(-332.65—-440.49 gC/m²)^[39]的研究结果。喀 斯特地区夏季降水虽多但分布不均,土壤贫瘠且保水能力较弱^[7,45],限制水稻的光合作用和碳固定效率;相比 之下,鄱阳湖和太湖流域土壤有机质丰富,养分供应充足,有助于提高碳吸收能力^[39]。此外,气象条件、作物 品种、轮作方式以及碳通量观测手段的不同,也可能导致不同区域的碳通量差异^[19,22,39]。

玉米生长季的碳吸收能力较强(-443.17 gC/m²),与东北地区的观测结果相近(-398.67—-513.37 gC/m²)^[47],但明显高于华北平原(-136—-342.8 gC/m²)的观测结果^[3,48-50]。玉米作为 C₄作物,在高温强光下仍能保持高碳吸收能力。本研究区域夏季辐射较强、温湿度条件适宜,碳通量高于华北平原;而东北地区日照时间长,土壤有机质丰富,养分供应更稳定,因此碳吸收能力也处于较高水平^[47,51]。此外,东北和华北地区玉米 多采用机械化管理,水肥供应较为均衡;而本研究区域玉米仅在苗期和穗期施肥,未进行灌溉,可能在一定程度上限制了其光合效率^[52-53]。

Table 2 Comparison of carbon fluxes capacity of three crops in different regions during their growth seasons							
作物 Crop	研究区域 Study area	气候 Climate type	经纬度 Geographic coordinates	年份 Year	年均气温 Mean annual temperature/℃	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	净生态系 统碳交换 Net ecosystem exchange/(gC/m ²)
油菜 Rapeseed	湘 中 丘 陵 区 湖南浏阳	亚热带湿润 季风气候	113°84′E 28°30′N	2019—2020	17.3	1358.6—1552.5	-101.62
	江 汉 平 原 湖 北荆州	北 亚 热 带 季 风气候	112°09′E 30°21′N	2010—2011	16.5	1095	-703
水稻 Rice	太 湖 流 域 江 苏无锡	亚热带季风 气候	120°32′43″E 31°39′14″N	2012,2013	16	1048	-332.65 -440.49
	淮河中游安 徽寿县	亚 热 带 半 湿 润季风气候	116°47′E 32°33′N	2008	14.8	906.7	-300.05
	鄱 阳 湖 流 域 江西南昌	亚 热 带 湿 润 季风气候	116°00′03″E 28°26′27″N	2017 2018	18.1 ±0.7	1634±312	-383±16、 -408±12
	鄱 阳 湖 平 原 江西南昌	亚热带季风 气候	116°00′E 28°26′N	2011,2012	18.1	1634	-326.6,-398.1
玉米 Maize	华 北 平 原 山 东禹城	暖 温 带 半 湿 润季风气候	116°38′E 36°57′N	2004 2005	13.1	528	-276.6 -170.1
	华北平原河 南郑州	暖 温 带 半 湿 润季风气候	113°39'E 34°43'N	2008—2022	15.4	631	-342.8
	华北平原河 北廊坊	暖 温 带 半 湿 润季风气候	116°03′E 36°39′N	2011	13.3	532	-136
	东 北 地 区 辽 宁锦州	温 带 季 风 气候	121°12′6″E 41°8′53″N	2008—2011	9.4	569	-513.37、-489.86、 -482.06、-398.67

表 2 不同地区三种作物生长季碳通量对比

总体来看,中国不同地区农田生长季的碳通量存在显著差异,是作物类型、环境条件以及管理实践多因素 共同作用的结果。首先,作物类型、品种特性及种植时令的变化,直接影响光合途径与呼吸代谢,从而调控碳 交换过程^[3]。其次,地理纬度、地形地貌以及区域气候条件共同决定了作物的生长环境及其碳吸收能力^[22]。 同时,种植制度、耕作方式以及水肥管理等农业管理措施,通过改变土壤理化特性和作物生长环境,进一步影响碳交换过程^[19,54-55]。此外,不同研究在数据处理方法以及作物生育期划分等方面的差异,也可能会影响区域间碳通量的对比^[56]。

4 结论

本研究利用 EC 技术,揭示了中国西南喀斯特地区主要农作物(油菜、水稻、玉米)生长季的碳通量变化特征。结果表明:(1)三种农作物生长季内碳通量有明显的日变化和季节变化特征:日时间尺度上,NEE 均呈"U"型变化,夜间呼吸作用主导碳排放(NEE>0),白天光合作用驱动碳吸收(NEE<0),碳吸收峰值出现在 12:00—14:00;季节时间尺度上,碳通量变化与作物物候和生长节律等紧密相关,幼苗期和成熟期有微弱的碳排放,在生长旺盛期的碳吸收能力最强。(2)在整个生长季内,三种作物均表现为碳吸收,NEE 依次为玉米-443.17 gC/m²、水稻-304.39 gC/m²、油菜-105.33 gC/m²,考虑到收获后籽粒的含碳量,三种作物的净碳吸收量均有所下降,其中玉米仍保持着较强的碳吸收能力(-232.97 gC/m²)。(3)与其他地区相比,喀斯特地区农田生态系统的碳收支表现出明显差异,这种差异可能受喀斯特地区土壤贫瘠、水分渗漏及养分限制等因素的影响,但玉米表现出更强的环境适应性。优化种植制度及田间管理措施,可有效提升区域农田碳汇潜力。本研究阐明了喀斯特农田生态系统的碳通量特征,为西南脆弱生态区碳收支评估与农业实践提供了科学依据。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, 2021.
- [2] Gray J M, Frolking S, Kort E A, Ray D K, Kucharik C J, Ramankutty N, Friedl M A. Direct human influence on atmospheric CO₂ seasonality from increased cropland productivity. Nature, 2014, 515(7527); 398-401.
- [3] 时元智. 两种典型农田生态系统水碳通量变异特征与环境响应[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
- [4] Aubinet M, Moureaux C, Bodson B, Dufranne D, Heinesch B, Suleau M, Vancutsem F, Vilret A. Carbon sequestration by a crop over a 4-year sugar beet/winter wheat/seed potato/winter wheat rotation cycle. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(3/4): 407-418.
- [5] Kutsch W L, Aubinet M, Buchmann N, Smith P, Osborne B, Eugster W, Wattenbach M, Schrumpf M, Schulze E D, Tomelleri E, Ceschia E, Bernhofer C, Béziat P, Carrara A, Di Tommasi P, Grünwald T, Jones M, Magliulo V, Marloie O, Moureaux C, Olioso A, Sanz M J, Saunders M, Søgaard H, Ziegler W. The net biome production of full crop rotations in Europe. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(3): 336-345.
- [6] Ceschia E, Béziat P, Dejoux J F, Aubinet M, Bernhofer C, Bodson B, Buchmann N, Carrara A, Cellier P, Di Tommasi P, Elbers J A, Eugster W, Grünwald T, Jacobs C M J, Jans W W P, Jones M, Kutsch W, Lanigan G, Magliulo E, Marloie O, Moors E J, Moureaux C, Olioso A, Osborne B, Sanz M J, Saunders M, Smith P, Soegaard H, Wattenbach M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(3): 363-383.
- [7] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
- [8] 刘子涵, 王晓丹, 岳甫均, 陆萌, 张平, 时治宇. 典型喀斯特小流域水体碳、氮的影响因素研究. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41(5): 1060-1068.
- [9] 易兴松. 喀斯特石漠化区耕地撂荒分布特征及其土壤生态效应研究[D]. 贵阳:贵州大学, 2023.
- [10] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策. 生态经济, 2015, 31(1): 23-30.
- [11] 王世杰,刘再华,倪健,闫俊华,刘秀明.中国南方喀斯特地区碳循环研究进展.地球与环境,2017,45(1):2-9.
- [12] 王小国,朱波,王艳强,郑循华.不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性.生态学报,2007,27(5):1960-1968.
- [13] 冯涛. 地表大气 CO₂浓度数值模拟及碳通量反演研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [14] Jiang F, Chen J M, Zhou L X, Ju W M, Zhang H F, Machida T, Ciais P, Peters W, Wang H M, Chen B Z, Liu L X, Zhang C H, Matsueda H, Sawa Y. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top-down and bottom-up approaches. Scientific Reports, 2016, 6: 22130.
- [15] Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J O, Levis S, Lucht W, Sykes M T, Thonicke K, Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. Global Change Biology, 2003, 9(2): 161-185.

http://www.ecologica.cn

16 赵明月 刘源鑫 张雪艳 农田生态系统做壮研究进展 生态学报 2022	5] 赵明	月 刘源鑫	张雪艳	农田生态系统碳汇研究讲展	生态学报	2022	42(23)	. 9405-9416
---	---	------	-------	-----	--------------	------	------	--------	-------------

- [17] 赵德华,李建龙,齐家国,范亚民.陆地生态系统碳平衡主要研究方法评述.生态学报,2006,26(8):2655-2662.
- [18] Huang Z Q, Yu Z P, Wang M H. Environmental controls and the influence of tree species on temporal variation in soil respiration in subtropical China. Plant and Soil, 2014, 382(1): 75-87.
- [19] Chi J S, Waldo S, Pressley S, O'Keeffe P, Huggins D, Stöckle C, Pan W L, Brooks E, Lamb B. Assessing carbon and water dynamics of no-till and conventional tillage cropping systems in the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218: 37-49.
- [20] Wagle P, Gowda P H, Northup B K, Turner K E, Neel J P S, Manjunatha P, Zhou Y T. Variability in carbon dioxide fluxes among six winter wheat paddocks managed under different tillage and grazing practices. Atmospheric Environment, 2018, 185: 100-108.
- [21] Liu B, Cui Y L, Tan J W, Luo Y F, Xiang Z. CO₂ fluxes over two paddy fields with different management practices in Southern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 310: 108650.
- [22] Waldo S, Chi J S, Pressley S N, O'Keeffe P, Pan W L, Brooks E S, Huggins D R, Stöckle C O, Lamb B K. Assessing carbon dynamics at high and low rainfall agricultural sites in the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218: 25-36.
- [23] Yang S H, Xu J Z, Liu X Y, Zhang J G, Wang Y J. Variations of carbon dioxide exchange in paddy field ecosystem under water-saving irrigation in Southeast China. Agricultural Water Management, 2016, 166: 42-52.
- [24] 覃蔡清. 喀斯特关键带碳的生物地球化学特征及其对降雨事件的响应[D]. 天津:天津大学, 2020.
- [25] Chen X, Zhang Z C, Soulsby C, Cheng Q B, Binley A, Jiang R, Tao M. Characterizing the heterogeneity of karst critical zone and its hydrological function: an integrated approach. Hydrological Processes, 2018, 32(19): 2932-2946.
- [26] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. Biogeosciences, 2006, 3(4): 571-583.
- [27] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havránková K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival J M, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1424-1439.
- [28] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [29] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315.
- [30] Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. Photosynthetically active radiation: measurements and modelling. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1/2): 121-131.
- [31] 赵辉,朱盛强,刘贞,邓蕙菁,郑有飞.基于涡度相关技术的农田生态系统碳收支评估.环境科学学报,2021,41(11):4731-4739.
- [32] Paul M J, Foyer C H. Sink regulation of photosynthesis. Journal of Experimental Botany, 2001, 52(360): 1383-1400.
- [33] de Dios V R, Goulden M L, Ogle K, Richardson A D, Hollinger D Y, Davidson E A, Alday J G, Barron-Gafford G A, Carrara A, Kowalski A S, Oechel W C, Reverter B R, Scott R L, Varner R K, Díaz-Sierra R, Moreno J M. Endogenous circadian regulation of carbon dioxide exchange in terrestrial ecosystems. Global Change Biology, 2012, 18(6): 1956-1970.
- [34] Cummins P L. The coevolution of RuBisCO, photorespiration, and carbon concentrating mechanisms in higher plants. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 662425.
- [35] Lei H M, Yang D W. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain. Global Change Biology, 2010, 16(11): 2944-2957.
- [36] Xu L K, Baldocchi D D. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 123(1/2): 79-96.
- [37] 文双雅,石楠,高倩文,阳会兵,高志强,卢俊玮.基于涡度协方差法和植被指数的油菜光能利用率研究.东北农业大学学报,2022,53 (12):72-81.
- [38] Wang D N, Gao G Q, Wang Y, Jia S X, Gu J C. Temperature sensitivity of root respiration declines with increasing soil depth in six temperate tree species. Plant and Soil, 2023, 492(1): 315-328.
- [39] 徐昔保,杨桂山,孙小祥.太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素.生态学报,2015,35(20):6655-6665.

- [40] 王寅,李雅颖,鲁剑巍,李小坤,徐正伟,邹家龙,姚忠清.栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响.植物营养与肥料学报,2013,19(3):597-607.
- [41] 周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明. 灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响. 环境科学, 2019, 40(10): 4700-4707.
- [42] 谢军,徐春丽,陈轩敬,王珂,李丹萍,张跃强,石孝均.不同施肥模式对玉米各器官碳氮累积和分配的影响.草业学报,2018,27(8): 50-58.
- [43] 文双雅,高倩文,高志强,卢俊玮.湘中地区冬油菜全生育期碳通量变化特征分析.中国油料作物学报,2022,44(3):581-588.
- [44] 苏荣瑞,刘凯文, 耿一风,周守华,田皓,黄永平,张红燕. 江汉平原稻-油连作系统冠层 CO₂通量变化特征. 中国农业气象, 2012, 33 (3): 362-367.
- [45] 彭大为,周秋文,谢雪梅,韦小茶,唐欣,严卫红.下垫面因素对喀斯特地区水分利用效率的影响.地理科学进展,2021,40(12): 2086-2100.
- [46]李琪, 胡正华, 薛红喜, 王云龙, 谭甜甜, 吴东丽. 淮河流域典型农田生态系统碳通量变化特征. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2545-2550.
- [47] 叶昊天,姜海梅,李荣平.中国东北地区玉米农田生态系统生长季碳交换研究.玉米科学,2022,30(1):77-85,92.
- [48] Zhang Q, Lei H M, Yang D W, Xiong L H, Liu P, Fang B J. Decadal variation in CO₂ fluxes and its budget in a wheat and maize rotation cropland over the North China Plain. Biogeosciences, 2020, 17(8): 2245-2262.
- [49] 彭记永,张溪荷,王冰,余卫东.夏玉米农田生态系统碳源汇特征及其气候影响.生态学杂志, 2024, 43(10): 3121-3131.
- [50] Li J, Yu Q, Sun X M, Tong X J, Ren C Y, Wang J, Liu E M, Zhu Z L, Yu G R. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(2): 226-240.
- [51] 张慧,高全,常妹婷,金晨,梁琬璐,蔡福.东北雨养玉米田碳交换年际变化及影响因素.应用气象学报,2023,34(2):246-256.
- [52] 吴海燕, 孙甜田, 范作伟, 赵兰坡. 东北地区主要粮食作物对气候变化的响应及其产量效应. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 299-307.
- [53] 王玉英, 胡春胜, 董文旭, 张玉铭, 李晓欣, 刘秀萍. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施. 中国生态农业学报:中英文, 2022, 30(4): 651-657.
- [54] 董丽, 史学正, 徐胜祥, 王美艳. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响. 土壤, 2021, 53(6): 1290-1298.
- [55] Yang H, Chen G Y, Li Z Y, Li W, Zhang Y, Li C M, Hu M M, He X M, Zhang Q Q, Zhu C H, Qing F H, Wei X Y, Li T, Li X Y, Ouyang Y Y. Responses of yield and photosynthetic characteristics of rice to climate resources under different crop rotation patterns and planting methods. Plants, 2024, 13(4): 526.
- [56] 祁亚辉, 王小丹. 陆地生态系统碳通量面临的挑战与机遇——基于涡度协方差测定. 生态学报, 2023, 43(8): 2979-2994.