

宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田生态系统 碳循环特征及调控机制

张瑞瑞^{1,2}, 杜灵通^{1,2}, 姜旭阳^{1,2}, 乔成龙^{1,2}, 薛斌^{1,2}, 施光耀^{1,2}, 蔡茹瑾^{1,2}

(1. 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: [目的] 农田减排固碳是“双碳”战略背景下的重要发展方向, 但干旱绿洲农田生态系统碳循环特征及其环境调控机制尚缺乏充足的认识, 阻碍了干旱区农田生态系统碳汇的科学评估。[方法] 以宁夏沿黄绿洲农田为例, 基于涡度相关系统开展连续2 a的通量观测, 分析该生态系统多时间尺度的碳循环特征, 利用随机森林模型(RF)、结构方程模型(SEM)和Michaelis-Menten模型等研究碳循环关键过程对环境因子的响应机制。[结果] 1) 小麦-玉米间作农田生态系统年净生态系统碳交换(NEE)在 $-286.29 \sim -223.42 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计), 生长季强烈的光合固碳过程显著超过呼吸碳排放, 从生态系统年尺度的碳循环来看, 其表现出一定的碳吸收能力。2) 生长季的NEE日动态呈“U”形特征, 显著受总初级生产力(GPP)的倒“U”形日内过程控制, 但生态系统呼吸(Reco)的日内波动较小, 且对NEE影响不大。3) 土壤含水量(SWC)和光合有效辐射(PAR)影响光合固碳强弱, 适宜的SWC和PAR使光合固碳增强, SWC和土壤温度(T_s)驱动呼吸碳排放大小。4) 气候干湿变化显著调控干旱绿洲农田碳循环过程, 降水偏低与气温偏高的气候异常导致饱和水汽压差(VPD)升高和SWC降低, 通过生物物理因子的直接和间接耦合途径影响碳通量各组分, 最终抑制生态系统的碳汇能力。[结论] PAR、SWC、 T_s 等生物物理因子及气候干湿变化, 通过直接与间接耦合作用共同调控干旱绿洲农田生态系统碳循环与碳汇能力, 明晰干旱绿洲间作农田碳汇关键影响机制, 为干旱绿洲区的农业减排固碳提供基础科学依据。

关键词: 小麦-玉米间作; 农田生态系统; 碳循环; 干旱绿洲; 宁夏

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0277-15

Characteristics and Regulation Mechanisms of Carbon Cycling in a Wheat-Maize Intercropping Farmland Ecosystem in Yellow River Oasis of Ningxia

Zhang Ruirui^{1,2}, Du Lingtong^{1,2}, Jiang Xuyang^{1,2}, Qiao Chenglong^{1,2}, Xue Bin^{1,2}, Shi Guangyao^{1,2}, Cai Rujin^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] Farmland emission reduction and carbon sequestration are important development directions under the "dual carbon" strategy. However, the carbon cycling characteristics of arid oasis farmland ecosystems and their environmental regulation mechanisms remain insufficiently understood, limiting the scientific assessment of ecosystem carbon sinks in arid regions. [Methods] Using farmland in the Yellow River oasis of Ningxia as an example, two consecutive years of flux observations were conducted based on an eddy covariance system to analyze the carbon cycling characteristics of this ecosystem at multiple time scales. Random forest (RF), structural equation modeling (SEM), and Michaelis-Menten models were then used to investigate the response mechanisms of key carbon cycling processes to environmental factors. [Results] 1) The annual net ecosystem exchange (NEE) of the wheat-maize intercropping farmland ecosystem ranged from -286.29 to

收稿日期: 2026-03-22

修回日期: 2026-04-29

录用日期: 2026-05-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-17

资助项目: 宁夏重点研发计划项目(2024BEG02009); 宁夏自然科学基金重点项目(2025AAC020019)

第一作者: 张瑞瑞(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态系统生态学研究。E-mail: zhangrr1128@163.com

通信作者: 杜灵通(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: dult80@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

— 223.42 g/(m²·a) (as C). During the growing season, strong photosynthetic carbon fixation significantly exceeded respiratory carbon emissions, indicating that the ecosystem had a certain carbon absorption capacity on an annual scale. 2) The diurnal dynamics of NEE during the growing season showed a U-shaped pattern and were significantly controlled by the inverted U-shaped diurnal variation of gross primary productivity (GPP), whereas ecosystem respiration (Reco) showed relatively small diurnal fluctuations and had limited influence on NEE. 3) Soil water content (SWC) and photosynthetically active radiation (PAR) affected the magnitude of photosynthetic carbon fixation, with appropriate SWC and PAR enhancing photosynthetic carbon fixation. SWC and soil temperature (T_s) drove the magnitude of respiratory carbon emissions. 4) Climatic wet-dry variations significantly regulated the carbon cycling processes of arid oasis farmland. Climate anomalies characterized by lower precipitation and higher temperatures increased vapor pressure deficit (VPD) and decreased SWC, thereby affecting different carbon flux components through direct and indirect coupling pathways of biophysical factors and ultimately suppressing ecosystem carbon sink capacity. [Conclusion] Biophysical factors such as PAR, SWC, and T_s , together with climatic wet-dry variations, jointly regulate carbon cycling and carbon sink capacity in arid oasis farmland ecosystems through direct and indirect coupling pathways. This study clarifies the key influencing mechanisms of carbon sinks in wheat-maize intercropping farmland in arid oasis regions and provides a scientific basis for agricultural carbon emission reduction and carbon sequestration in arid oasis regions.

Keywords: wheat-maize intercropping; farmland ecosystem; carbon cycling; arid oasis; Ningxia

Received: 2026-03-22

Revised: 2026-04-29

Accepted: 2026-05-07

Online(www.cnki.net): 2026-08-17

根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告,工业革命以来的强烈人类活动导致全球气候发生显著变化,体现在全球平均气温上升、昼夜温差减小及极端气候事件频发等多个方面^[1],也深刻地影响到陆地生态系统的功能。作为全球关键的碳库与温室气体交换界面,陆地生态系统是地-气 CO₂ 交换的桥梁。它既通过光合作用吸收并固定大气中的 CO₂,又通过植被和土壤的呼吸作用向大气释放 CO₂,二者的差值表征生态系统在 CO₂ 收支上的碳源/汇特点^[2]。在过去几十年中,陆地生态系统普遍被视为净碳汇^[3],然而陆地生态系统下垫面的复杂性以及人类活动的强烈干扰,是导致当前碳汇评估存在不确定性的主要原因^[4];而对典型陆地生态系统碳循环关键过程及其环境驱动机制的认识不清,也妨碍了对生态系统碳汇贡献的精确评价^[5]。农田作为陆地生态系统的重要组成部分,对地-气碳循环起着重要的作用,且农业活动被认为是加速全球变暖的重要动力^[6],但农田土壤究竟是碳源还是碳汇,还取决于农业技术模式和区域环境条件^[7],特别是对干旱环境下的绿洲农田生态系统尚缺乏深入认识。因此,开展绿洲农田生态系统碳循环观测及其碳源/汇评估,可为干旱区农业减排固碳提供科学依据^[8]。

涡度相关技术具有高频获取碳通量数据和不扰动下垫面等优点,成为测定生态系统与大气间 CO₂ 交换通量的最主要方法^[9],是国际上公认的碳汇评估手

段^[10]。近年来,涡度相关技术被广泛用于不同农田生态系统碳通量规律研究中,并发现影响农田生态系统碳循环关键过程的因素复杂多样,且存在不同的调控机制。在安徽的典型稻麦轮作区,叶面积指数(leaf area index, LAI)是净生态系统碳交换(net ecosystem exchange, NEE)和总初级生产力(gross primary productivity, GPP)的主要控制因素,而空气温度(air temperature, T_a)和 LAI 基本上控制生态系统呼吸(ecosystem respiration, R_{eco})^[11];黄土高原雨养冬小麦农田的 CO₂ 通量变化对 LAI、光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)、土壤温度(soil temperature, T_s)和土壤含水量(soil water content, SWC)等环境因子都很敏感^[12];但黄土高原秸秆还田旱作玉米的生长季节 LAI 是控制 NEE、 R_{eco} 和 GPP 季节变化的最重要因素,其次是 PAR 和 T_a ^[13];淮北平原冬小麦-夏玉米轮作区的净生态系统生产力(net ecosystem productivity, NEP)主要受控于 PAR,但饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)起到抑制碳汇的作用;相比之下,华北平原冬小麦-夏玉米轮作区的 NEE 年际变化则主要受控于 LAI,且扣除灌溉施肥等人为温室气体排放后,该农田生态系统是碳源;Liebig 等^[14]研究发现,美国北部大平原的小麦-玉米-大豆轮作区也是净碳源;而在气候寒冷的东北地区,旱作玉米的 NEE 主要受净辐射(R_n)控制,其次是 LAI、 T_a 和 VPD,且环境因素通过影响 LAI 而间接调控碳通量^[15]。

综上所述,农田生态系统碳循环及其环境调控机制极为复杂,不同区域、不同种植模式下的主控因子存在显著差异,且各因子间常存在协同或拮抗作用,共同调控着生态系统的碳平衡,对预测未来气候变化下的生态系统响应构成显著挑战^[16]。尽管已明确环境与生物因子对湿润或半湿润区农田碳通量的调控作用,但对水热矛盾突出、以人为灌溉活动为主的干旱绿洲农田缺乏高精度、高频率碳循环关键过程监测,特别是针对小麦-玉米间作农田生态系统的碳循环特征及调控机制缺乏研究。因此,本研究基于宁夏沿黄绿洲农田 2023 年 4 月至 2025 年 4 月连续 2 a 的涡度相关观测数据,开展该农田生态系统碳循环特征及调控机制研究,旨在阐明该系统碳通量在多时间尺度的动态特征,揭示关键环境与生物因子对碳循环过程的驱动机制,以期补充该地理气候类型下的农田地-气碳循环认识,为干旱区农田生态系统的固碳潜力评估与适应性管理提供理论依据。

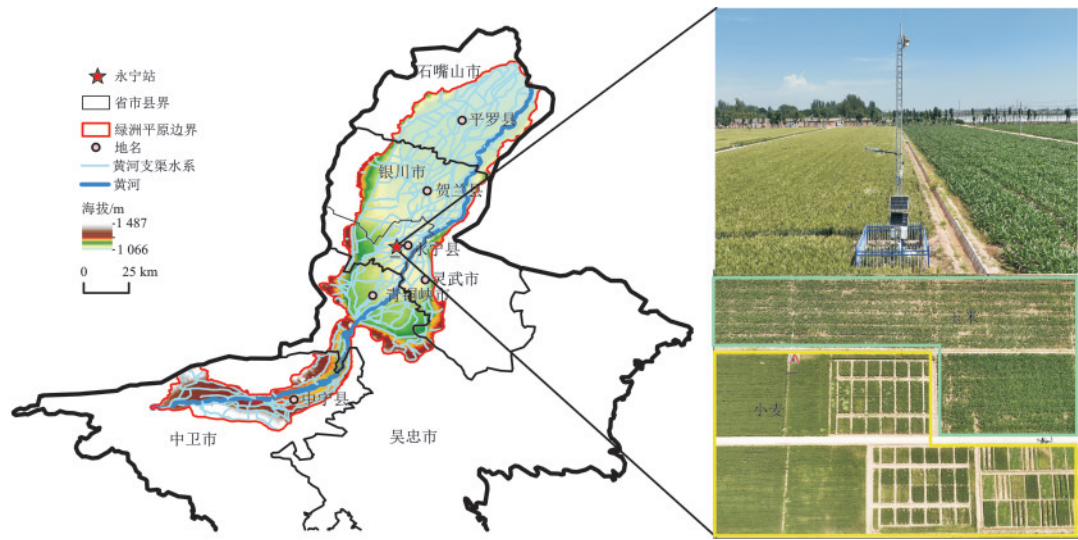
1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏沿黄绿洲为黄河冲积和灌溉形成的绿洲平原,由近东西走向的卫宁平原和近南北走向的银川平

原组成,长约 280 km,宽为 10~60 km,总面积约 8 955 km²,海拔 1 100~1 300 m^[17]。该区域属温带大陆性干旱气候区,年平均气温 9.29℃,年平均降水量仅 188.3 mm,且多集中于 7—9 月,年平均日照时间达 2 980 h,光热资源丰富^[18]。宁夏绿洲平原有两千多年的灌溉发展历史,具有丰富的水土资源优势,已成为宁夏重要的灌溉农业区,被誉为“塞上江南”^[18]。区域性土壤为灌淤土,受长期灌溉耕作影响而形成,质地偏沙壤。

本研究依托 2023 年 4 月建成并投入运行的宁夏沿黄绿洲农田通量观测站开展,该站位于银川市永宁县望洪镇(38°13′42″N,106°14′08″E),海拔 1 102 m,是宁夏沿黄绿洲的核心区(图 1)。观测站所在农田土壤基本理化性质为:土壤体积质量 1.18 g/cm³,pH 7.76~9.50(偏碱性),有机质质量分数 14.02 g/kg。观测站区域为典型的小麦-玉米间作农田,具体种植制度与管理措施为:1)作物品种。小麦为当地主栽春性品种“宁春 4 号”,玉米为高产中晚熟品种“先玉 335”。2)耕作与灌溉。小麦于每年 3 月上旬播种,7 月上旬收获;玉米于每年 4 月上旬播种,9 月下旬收获。两季作物生育期内均采用黄河水进行大水漫灌,总灌溉量为 4 800 m³/hm²。3)施肥。施用尿素、磷肥和钾肥,比例为 15.0:3.4:1.7。



注:图中绿色区域为春玉米种植区;黄色区域为春小麦种植区;红色五角星为涡度通量观测塔位置。

图 1 研究区位置及通量观测塔
Fig.1 Location of study area and flux observation tower

1.2 通量与气象、环境测量

基于永宁绿洲农田通量观测站的闭路涡度相关系统(CPEC310, Campbell Scientific, 美国),在 2023 年 4 月至 2025 年 4 月的 2 个整年周期中对作物和大气之间的高频碳通量过程进行测量,该系统由 1 台红外气体分析仪(EC155)及 1 台三维超声风速仪

(CSAT3A)组成,原始数据以 10 Hz 频率采集,通量塔还配置了气象环境全要素观测设备(表 1)。LAI 数据来源于 MODIS 产品(<https://modis.ornl.gov/globalsubset/>),空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 4 d,采用线性内插法和高斯滤波处理,对原始数据进行时间序列插补,得到研究区日尺度 LAI 数据集。

表 1 涡度相关及气象环境设备信息
Table 1 Detailed information on eddy covariance and meteorological and environmental equipment

名称	型号	用途	安装高度
三维超声风速仪	CSAT3A	高频观测三维风速和超声虚温	5 m
闭路 CO ₂ /H ₂ O 气体分析仪	EC155	高频观测大气水汽浓度和脉动	5 m
数据采集器	CR6	在线计算并存储数据	1.5 m
四分量辐射仪	CNR4	观测 4 个方向的长短波辐射	10 m
光合有效辐射传感器	Li-190R	观测光合有效辐射	10 m
雨量筒	TE525MM	观测降水	10 m
二维超声风速仪	Windsonic	观测水平风速	1、4、10 m
空气温湿度传感器	HMP155A	观测空气温湿度	1、4、10 m
土壤水分、电导率与温度 3 个参数传感器	CS655	观测土壤含水量、土壤电导率、土壤温度	地下 5、10、30、50、100 cm
土壤热通量板	HFP01-L	观测土壤热通量	地下 10 cm

1.3 通量数据处理

1.3.1 质量控制与插补 由于通量站从 2023 年 4 月 21 日正式开始运行,故选用 2 个整年周期的通量观测数据开展研究。观测期内由于降水、沙尘天气的影响,原始 10 Hz 高频数据会出现缺失和异常值。因此,对高频数据计算出的半小时通量进行质量控制和插补处理,具体包括:1)降雨事件扰乱正常空气湍流运动,导致数据异常,故对降水同时期数据进行剔除^[19];2)植物夜间不进行光合作用,故夜间 NEE 负值的数据判为异常并剔除^[20];3)使用 1.5 倍标准差剔除野点值(超出 1.5 倍标准差的数据为野点值,进行剔除);4)参考已有农田生态系统 NEE 的经验阈值^[21]及 ChinaFLUX 推荐的筛选标准,将 $NEE > 15 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计)或 $NEE < -50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计)的值判为异常并剔除;5)采用变化点检测法(CPD)计算摩擦风速(μ^*)的阈值(0.19 m/s)^[22],剔除阈值以下的夜间观测数据,确保湍流条件满足要求^[23];6)利用差分法(MAD)进行剔除^[24],在差分法中定义:

$$d_i = (NEE_i - NEE_{i-1}) - (NEE_{i+1} - NEE_i) \quad (1)$$

式中: NEE_i 为 30 min 尺度的净生态系统碳交换量; i 为数据的序号;当 d_i 满足以下条件时第 i 个观测数据为正常值,否则为异常值并剔除。

$$M_d + \left(\frac{Z \times MAD}{0.6475} \right) > d_i > M_d - \left(\frac{Z \times MAD}{0.6475} \right) \quad (2)$$

式中: M_d 为所有相邻 2 个数据之间 NEE 差值的中位数;阈值 Z 取值 4; MAD 为绝对差的中位数^[25]。

$$MAD = \text{median}(|d_i - M_d|) \quad (3)$$

对于剔除异常后的数据进行插补,目前,常用插补方法有查表法、平均昼夜变化法、非线性回归法等^[26],也有多重插补、人工神经网络、卡尔曼滤波等复杂数据插补法^[27]。本研究使用线性插值法来填补 $< 2 \text{ h}$ 的短期缺失,采用非线性回归法插补超过 2 h 的

数据缺失^[28],其中夜间数据用净碳交换与土壤温度之间的指数关系拟合填充^[29]。

$$NEE_n = a \times Q_{10}^{(T_s - 10)/10} \quad (4)$$

式中: NEE_n 为夜间净生态系统碳交换量; a 为 10°C 时的生态系统呼吸(R_{eco}); Q_{10} 为生态系统呼吸的温度敏感性,即温度每升高 10°C 时的呼吸增长倍数; T_s 为土壤温度, $^\circ\text{C}$ 。

连续缺失 $> 2 \text{ h}$ 的昼间数据采用 Michaelis-Menten 模型进行插补^[29]。

$$NEE_d = \frac{a \times PAR \times P_{\max}}{a \times PAR + P_{\max}} - R_{eco} \quad (5)$$

式中: NEE_d 为昼间净生态系统碳交换量; a 为表观量子效率; $P_{\max}$ 为最大光合速率; PAR 为光合有效辐射; R_{eco} 为昼间生态系统呼吸。

1.3.2 通量拆分 生态系统和大气界面的净碳交换量由植物光合固定 CO_2 和生态系统呼吸释放 CO_2 共同决定^[29],即 R_{eco} 减去 GPP 的量。由于涡度相关设备观测得到的是 NEE,其具有方向性, $NEE < 0$ 表示生态系统光合固碳量大于呼吸排碳量,因此, NEE 、GPP 和 R_{eco} 的关系见公式(6)。在生态系统碳通量关键过程研究中,需要将 NEE 拆分为 GPP 和 R_{eco} ,基本原理为:夜间 GPP 为 0,夜间 R_{eco} 等于 NEE;基于夜间生态系统呼吸与土壤温度建立的模型[公式(4)],可利用日间 T_s 估算日间 R_{eco} ,再基于公式(6)可反推出日间 GPP。

$$-NEE = R_{eco} - GPP \quad (6)$$

1.4 模型分析

随机森林模型(random forest, RF)通过构建多棵决策树并将其预测结果进行综合以提高模型性能^[30]。本研究使用随机森林模型分析了生物物理因子对碳通量的影响,以日尺度 NEE、GPP、 R_{eco} 作为响应变量,多个环境因子作为解释变量,设置模型分裂数和分类树数量, R^2 越接近于 1,表明模型拟合效果越好,最终确定模型的最优参数。结构方程模型(structural equation model, SEM)^[31]依据已有的先验

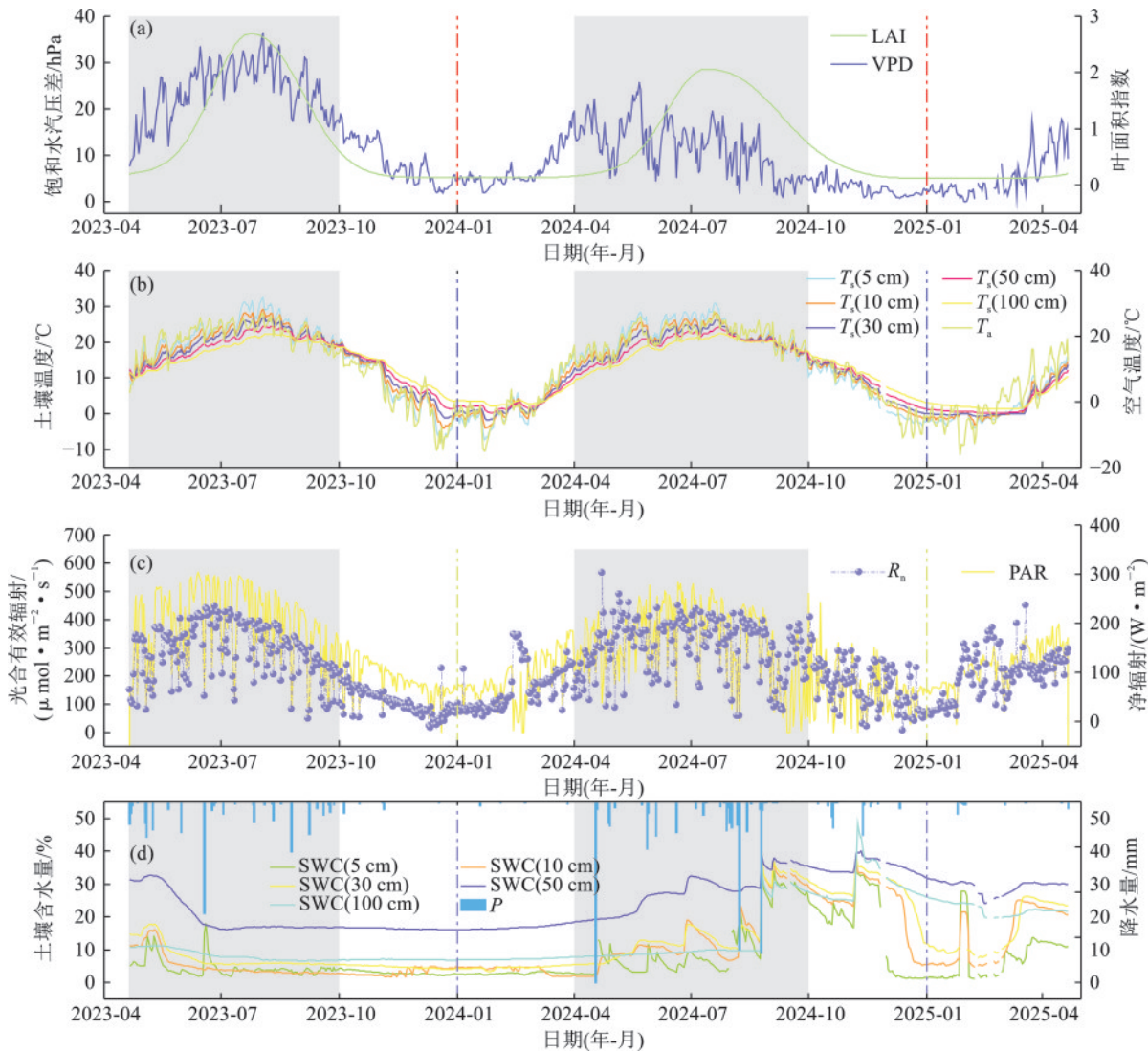
知识对变量之间的因果或相关进行假定,通过最大似然法对模型参数进行估计,依据试验数据对初始模型进行整体拟合评价,观察每条路径系数是否满足统计学意义^[32],通常选取 χ^2 检验进行模型的评价和选择。当 χ^2 检验的 $p>0.05$ 时,通常认为该模型是可行的^[33]。本研究利用结构方程模型识别驱动碳通量变化的直接和间接因素,使用近似均方根误差(RMSEA)、卡方自由度比(χ^2/df)、比较适配指数(CFI)对模拟结果进行检验^[34],一般认为 $\chi^2/df<3$ 、 $p>0.05$,RMSEA <0.05 ,CFI >0.95 时,模型拟合良好^[35]。Michaelis-Menten 模型针对 RF 和 SEM 共同揭示的核心关系,使用经典的 Michaelis-Menten 模型

对 NEE 与 PAR 的关系进行精确曲线拟合,获取最大光合速率、表观光合量子效率等关键生理生态参数。随机森林模型识别关键驱动因子;结构方程模型揭示多因子间的直接与间接作用路径;Michaelis-Menten 模型量化核心生理生态过程的响应函数,三者相互补充,共同构成从因子筛选、路径解析到机理量化的多层次分析体系。

2 结果与分析

2.1 环境因子时序变化

宁夏沿黄绿洲的各环境要素呈现出明显的季节变化特征(图 2),因地处中纬度温带大陆性干旱气候区, R_n 和 PAR 随四季存在年周期变化规律。



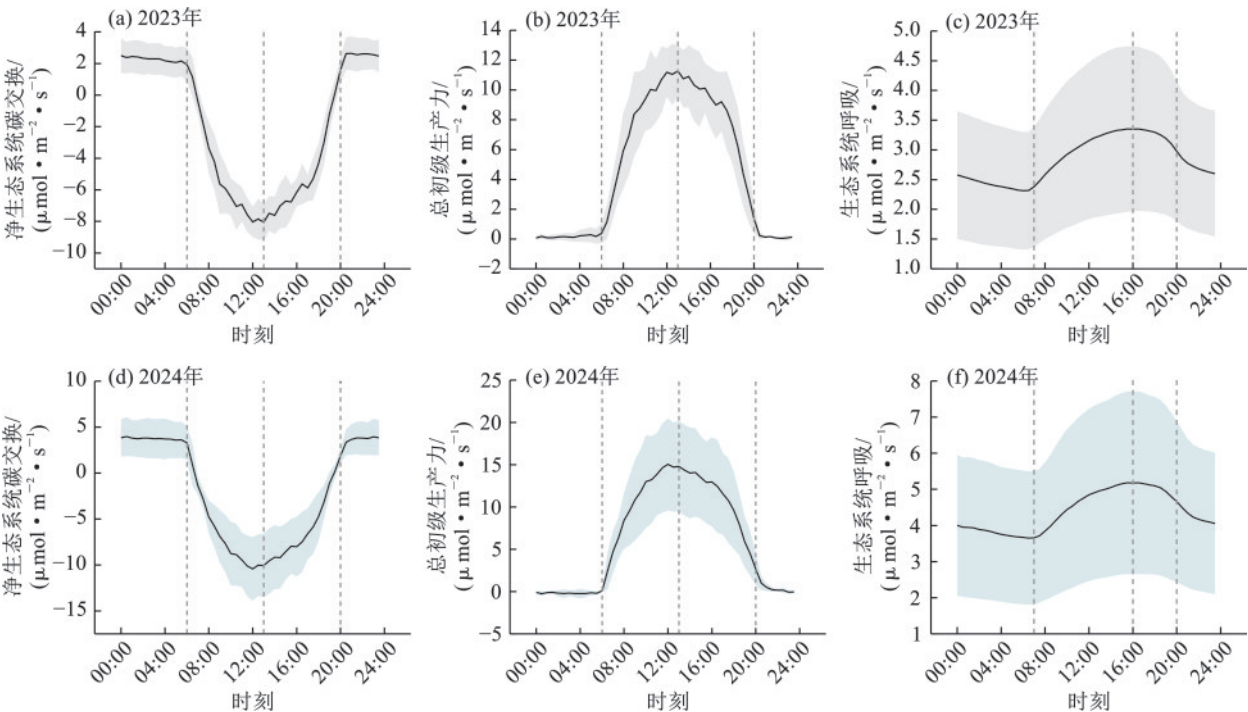
注: LAI 为叶面积指数; VPD 为饱和水汽压差; T_s 为土壤温度; T_a 为空气温度; PAR 为光合有效辐射; R_n 为净辐射; SWC 为土壤含水量; P 为降水量; 图中阴影区域为生长季(4—9月), T_s 、SWC 后括号中的数据为探头埋置于土壤表层下的深度。下同。

图 2 2023 年 4 月至 2025 年 4 月的生物及物理要素变化特征
Fig.2 Variation characteristics of biophysical factors (April 2023–April 2025)

研究期内 R_n 为 11.19~302.09 W/m², PAR 为 41.49~569.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 且均在夏季出现高峰, 与夏季太阳直射点北移, 中纬度地区正午太阳高度

角增大, 单位面积接收的太阳辐射量增加有关。研究期内 T_a 的年平均值为 11.02 $^{\circ}\text{C}$, T_s 年平均值为 12.93 $^{\circ}\text{C}$, 太阳辐射的季节性变化引起 T_a 和 T_s 的季节

周期波动,但年内 T_s 的波动幅度小于 T_a ,且随着土层深度增加, T_s 变得越恒稳。LAI 随地表植被的生长和衰落呈规律性升降,其 2023 年夏季最高峰达到 2.69。在气候年内季节性变化和植被活动的共同作用下,VPD 也出现夏季增强而冬季降低的特点,同时受大气降水和土壤水分等地气水分供应条件的调控,其中 2023 年生长季(4—9 月)的降水量(P)为 107.1 mm,而同期的 2024 年为 152.8 mm,2023 年的气象干旱也导致 SWC 明显低于 2024 年,可见,2024 年夏季地气水分供应充足显著缓解了同期的 VPD。土壤水文过程和大气降水供给存在显著的响应节奏,特别是表层 SWC 明显随单日有效降水发生而升高,研究期内 SWC 的年平均值为 7.61%,但深层 SWC 更多与强降水过程有关。此外,SWC 的变化还与人为灌溉有关,在小麦和玉米追肥之后每隔 20 d 大水漫灌 1 次,灌溉会引起 SWC 的快速响应。



注:NEE为净生态系统碳交换;GPP为总初级生产力; R_{eco} 为生态系统呼吸。下同。

图3 生长季内碳通量日内动态变化特征

Fig.3 Diurnal dynamic variation characteristics of carbon fluxes during growing season

NEE、GPP 和 R_{eco} 的日内变化形态在不同年份间相似,但各碳通量的变化幅度存在差异。2023 年 NEE、GPP 和 R_{eco} 的午间谷(峰)值分别为 -8.05 、 11.28 、 $3.35 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (以 CO_2 计),而 2024 年分别为 -10.43 、 15.05 、 $5.18 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (以 CO_2 计),2024 年的日间碳通量明显高于 2023 年,且昼夜变化幅度也偏大,与 2023 年生长季较为干旱和 2024 年较为湿润有显著关系(图 7)。

2.2 生长季碳通量日变化

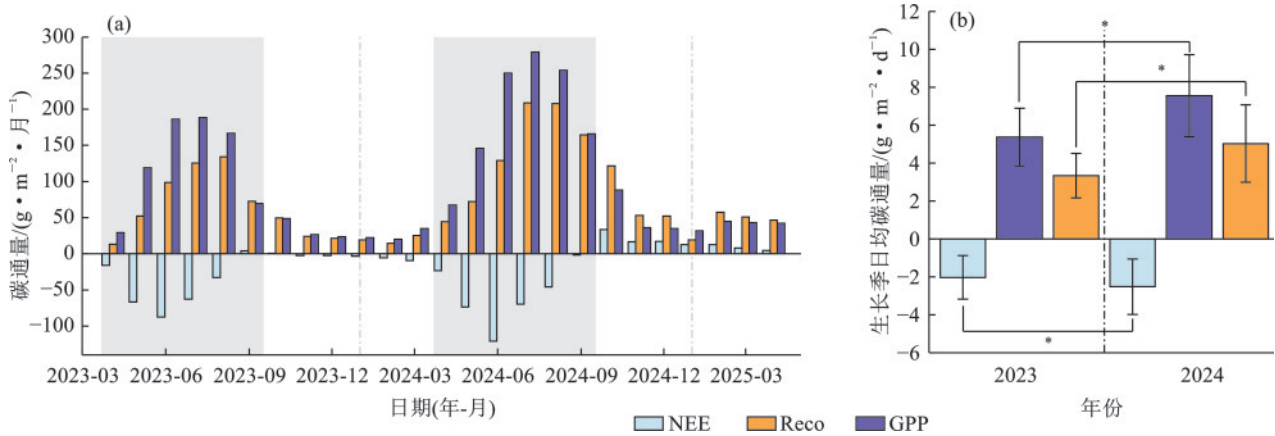
宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田生长季(4—9 月)内的碳通量日内动态变化特征见图 3。其 NEE、GPP 和 R_{eco} 等碳通量的日动态均较为典型。NEE 日内呈“U”形变化,夜间为正、日间为负,且在日出和日落时刻发生突变,日内的最低谷出现在午间 12:00,即午间的生态系统净碳吸收量达到最大。GPP 则呈现出与 NEE 相似但为倒“U”形的日动态特征,其夜间接近 0,在日出后迅速上升,日落后再降为 0。从日内动态关系来看,GPP 的日内过程决定 NEE 的日内变化,但 R_{eco} 日动态却较为独立。GPP 受日间光合作用的驱动,形成随日间光合辐射变化的强烈单峰,该光合固碳过程也决定宁夏沿黄绿洲生态系统的净碳交换过程。虽然 R_{eco} 也表现为日间高而夜间低的波动,但日内波动幅度明显小于 GPP 和 NEE,表明生态系统呼吸主要与昼夜温度变化驱动的微生物呼吸有关。

2.3 碳通量月变化特征

宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田的月尺度 NEE、GPP 和 R_{eco} 等碳通量在年内形成显著的生长季峰(谷)特点(图 4)。从生态系统尺度上来看,GPP 在 4—8 月均高于 R_{eco} ,即小麦-玉米间作农田在 4—8 月表现为碳汇,而在生长季的末期(9 月),NEE 几乎接近于 0。观测期内 NEE 最大值均出现在 6 月,2023 年和 2024 年分别为 -87.62 、 $-120.99 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ (以 C

计)。在 10 月至翌年 3 月的非生长季,NEE 绝对值很小,且出现正值,表明小麦-玉米间作农田出现碳排放高于碳吸收的现象。NEE 受控于生态系统光合生产碳输入和呼吸碳排放之差,其中 GPP 随作物的生育期变化,最大值均出现在 7 月,2023 年和 2024 年分别为 188.28、278.82 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ (以 C 计)。但 R_{eco} 为生态系统呼吸排放,主要受土壤微生物活性、温湿度环境和呼吸底物量等控制,其 2023 年最大值为 134.06 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ (以 C 计)(8 月),2024 年最大值为 208.94 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{月})$ (以 C 计)(7 月),可见 2023 年的干旱对 R_{eco} 的峰值来临产生抑制和时滞作用。

碳通量的方差分析表明,2024 年生长季 GPP 和 R_{eco} 的日平均值分别为 7.55、5.03 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),均大于 2023 年生长季 GPP 和 R_{eco} 的日平均值 5.37、3.34 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计);而 2024 年生长季 NEE 的日平均值为 -2.52 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),小于 2023 年的 -2.03 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计);且 NEE、GPP 和 R_{eco} 等碳通量在 2023 年和 2024 年存在显著差异(图 4)。可见 2023 年的气象干旱和土壤水分亏缺显著胁迫宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田的光合生产过程,也抑制土壤微生物呼吸的碳排放过程,导致地-气碳交换过程的减弱和生态系统碳汇量的降低。



注:*表示显著性水平达 0.05。

图 4 2023 年 4 月至 2025 年 4 月碳通量月变化特征

Fig.4 Monthly variation characteristics of carbon fluxes from April 2023 to April 2025

2.4 碳通量年累积特征

小麦-玉米间作农田的各碳通量组分年累积特征见图 5。日尺度的 NEE、GPP 和 R_{eco} 均表现出明显的随生长季到来而出现增强的规律,导致生长季 GPP 和 R_{eco} 累积量快速增大而 NEE 累积量快速降低。但日尺度的 NEE、GPP 和 R_{eco} 均有较为随机的波动特点,表明日尺度的生态系统碳输入、碳排放及净碳交

换量均随单日辐射、气象和土壤环境条件的不同而变化。2023 年的日尺度 NEE 为 -4.24~1.61 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),年累积值为 -223.42 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计);而 2024 年的日尺度 NEE 为 -5.71~1.19 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计),年累积值为 -286.29 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)。结果表明,2024 年具有更强的碳汇能力,与 2023 年干旱而 2024 年降水丰沛有关。

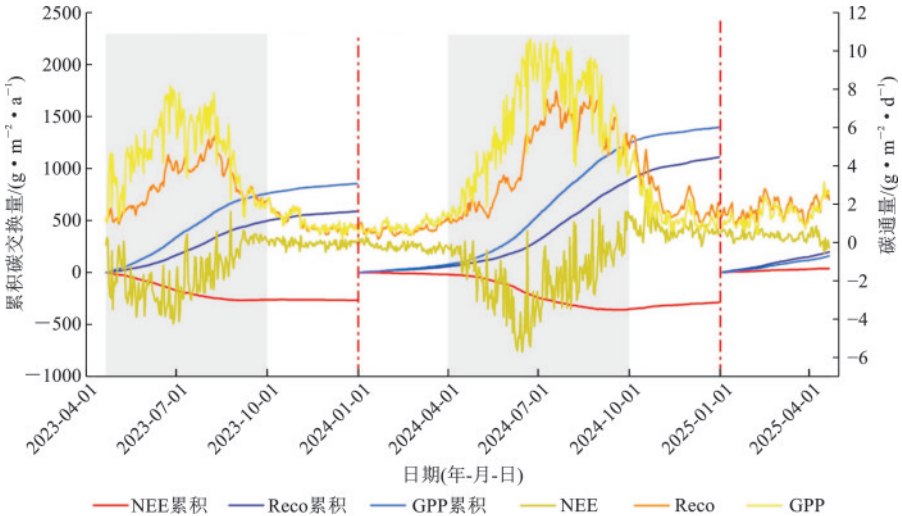


图 5 2023 年 4 月至 2025 年 4 月碳通量年累积特征

Fig.5 Annual cumulative characteristics of carbon fluxes from April 2023 to April 2025

2024年降水和土壤水分供应充足,促进作物生长,形成更为强盛的初级生产能力,通过光合生产固定大气中的 CO_2 量也更多,表现为2024年的GPP在生长季更高,年累积GPP达到 $1\,398.32\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以C计),显著高于2023年的 $1\,012.56\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以C计)。但适宜的环境条件也增强土壤微生物的活性和异养呼吸,故2024年 R_{eco} 在生长季也更强,年累积 R_{eco} 为 $1\,112.03\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以C计),显著高于2023年的 $789.14\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ (以C计)。

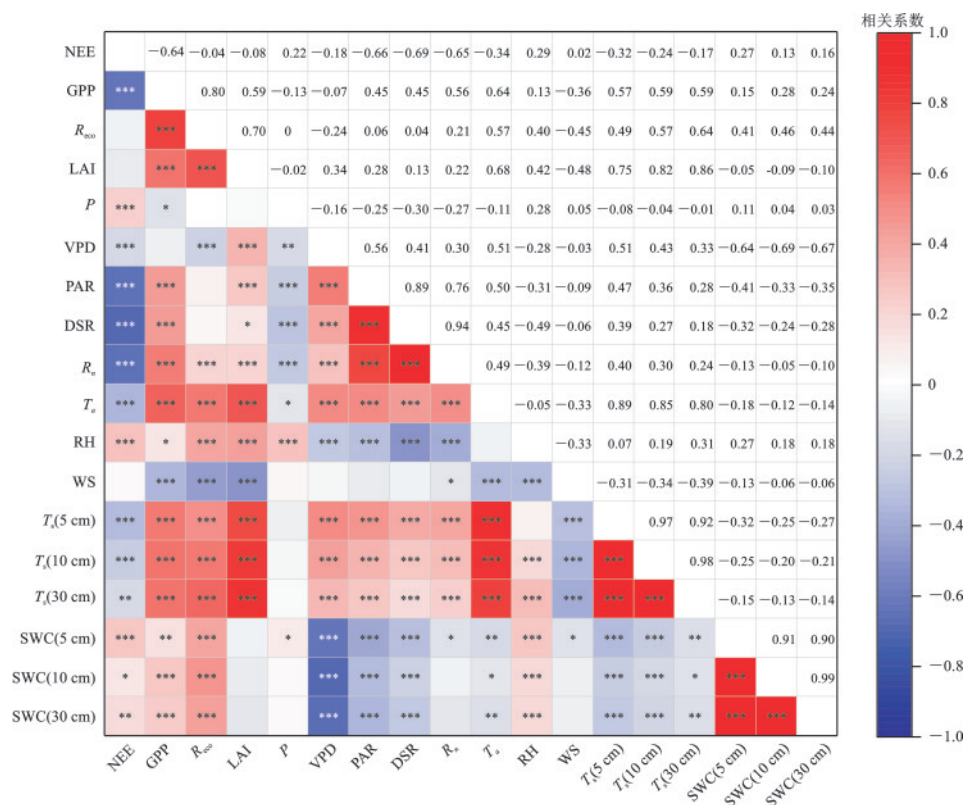
2.5 碳通量的生物物理调控机制

2.5.1 碳通量组分与生物物理因子的相关分析

小麦-玉米间作农田碳通量组分与生物物理因子间的相关矩阵见图6。

从能量环境来看,NEE与下行短波辐射(DSR)、 R_n 及PAR均呈显著负相关($p<0.001$),而GPP与DSR、 R_n 和PAR均呈显著正相关($p<0.001$),表明辐射是驱动光合作用的核心因子,辐射能量越强,该农田生态系统的生产力越高,净碳交换量越大。

从大气环境来看,GPP和 R_{eco} 与 T_a 呈显著正相关($p<0.001$),可见低温不仅抑制作物的光合作用,还减弱微生物呼吸,进而使NEE与 T_a 呈显著负相关($p<0.001$);NEE与 P 呈显著正相关($p<0.001$),原因是降水强烈刺激生态系统呼吸,导致短期内碳排放激增;虽然WS通过影响空气动力学导度进而影响小麦-玉米间作农田的光合与呼吸过程,但对NEE的调控作用不大,进而导致VPD与碳通量组分间的直接关系较弱。



注:DSR为下行短波辐射;RH为相对湿度;WS为风速;*表示 $p<0.05$;**表示 $p<0.01$;***表示 $p<0.001$ 。下同。

图6 生长季碳通量组分与生物物理因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between carbon flux components and biophysical factors during growing season

从土壤环境来看,SWC和 T_s 显著调控着GPP和 R_{eco} ,进而一定程度上耦合影响着NEE,但适宜的SWC在促进作物光合生长的同时,也增强微生物呼吸排放,削弱SWC与NEE的相关性;而生长季早期的土壤低温在一定程度上限制GPP和 R_{eco} ,进而耦合抑制NEE。

从植被环境来看,GPP随着LAI的升高而增强,即更大的叶面积会增加光合作用的载体,而光合作用产物的增加也为土壤微生物活动提供更多的底物,促进呼吸碳排放。各生物物理因子之间也存在不同程度的相关性,可见,小麦-玉米间作农田系统的

碳循环过程受多种生物物理因子的耦合协同调控。

2.5.2 基于随机森林模型的关键生物物理因子识别

以小麦-玉米间作农田的各碳通量组分为响应变量,以生物物理因子为解释变量,建立随机森林模型,通过逐步筛选法对模型参数进行优化(图7)。NEE、GPP和 R_{eco} 的随机森林模型在分裂的变量个数为3、4、4时误差达到最低,当分类树数量增至50后,各模型误差趋于稳定。基于上述分裂数和分类树数量确定模型参数,模型模拟结果与观测间的 R^2 为0.85~0.92,表明模型拟合效果较好。

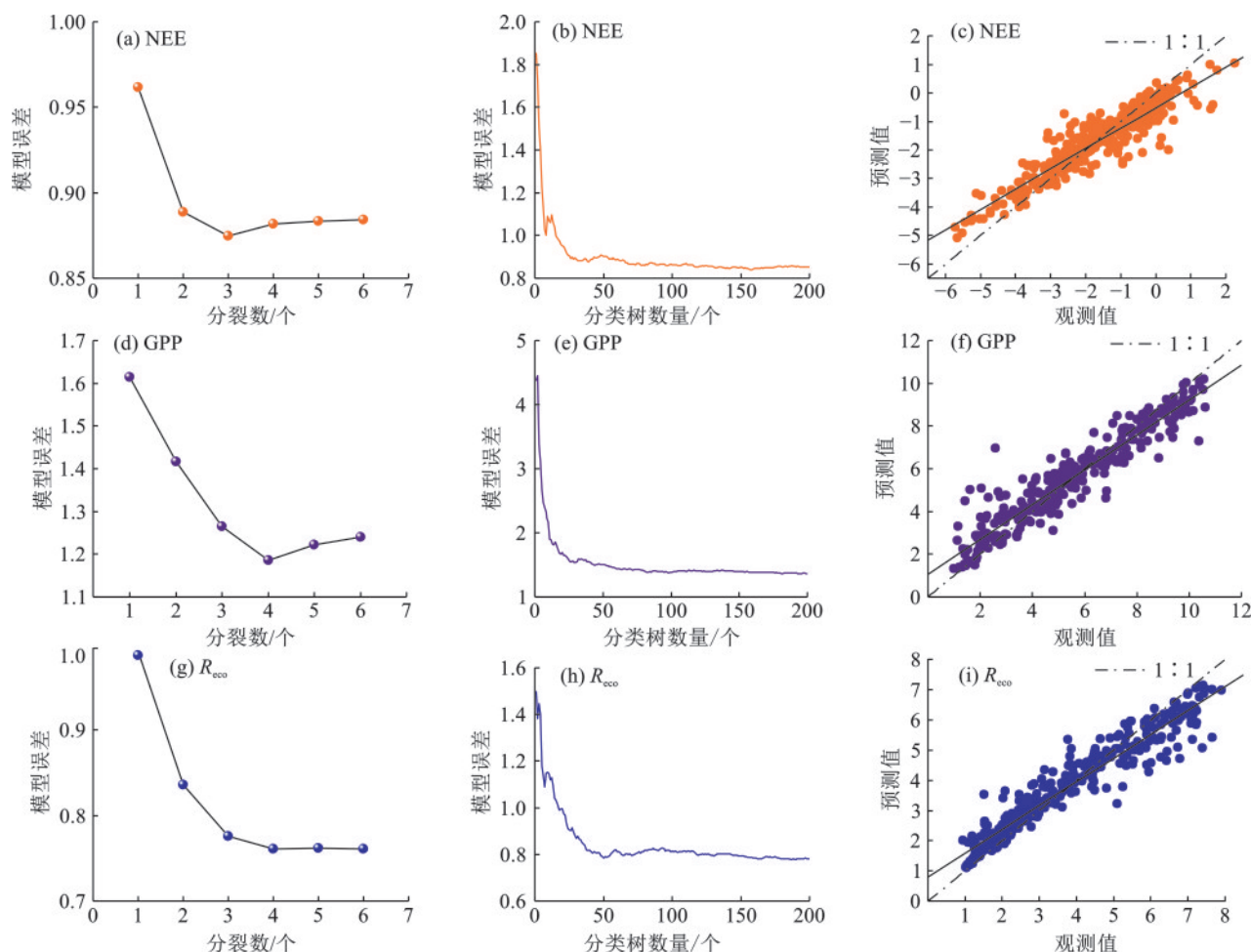


图7 随机森林模型参数影响分析及精度验证

Fig.7 Analysis of parameter effects and accuracy validation of random forest

随机森林模型评估结果表明,不同生物物理因子对碳通量组分的影响程度存在较大差异(图8)。PAR是影响NEE最主要的环境因子,其次是LAI,二者对NEE的影响均达到 $p < 0.05$ 的显著性水平,表明小麦-玉米间作农田通过光能的增加和植物光合组织面积的增多来提高碳汇量;从偏依赖性分析结果看出,在光合有效辐射较低[$PAR < 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]的环境下,NEE与PAR之间存在显著的线性响应关系;但 T_s 对NEE影响的节点纯度达到 $p < 0.05$ 的显著性水平,可能与春季地温不足限制农田生态系统NEE有关。

影响GPP的主要生物物理因子有LAI、SWC和 T_s ,且在 $SWC < 7\%$ 时,GPP强烈受SWC胁迫,但 $SWC > 7\%$ 时,虽然GPP还受SWC调控,但响应的敏感性降低。不管是从重要性得分还是节点纯度来看, T_s 和SWC均显著影响 R_{eco} ,且在 $SWC < 22\%$ 时, R_{eco} 随着SWC的增加而线性升高。综合来看,光合有效辐射强弱、叶片光合组织面积大小、土壤水分供给及土壤环境温度是调控宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田关键碳循环过程的重要生物物理因子。

2.5.3 基于结构方程模型的碳通量生物物理调控机制 由图9可知,小麦-玉米间作农田的NEE、GPP和 R_{eco} 3种碳通量组分与生物物理因子间的结构方程不仅解析环境因子对碳通量组分的不同作用路径,还量化各环境因子间的相互影响关系。PAR对NEE产生极显著的直接负向影响,即PAR越高,NEE越小,生态系统产生的碳汇能力越强,可见PAR驱动的GPP过程是决定该农田碳汇能力的关键。土壤环境对NEE的调控较为复杂,表现为 T_s 升高促进碳汇,但SWC升高则抑制碳汇。其潜在的机制是SWC和 T_s 升高既能增加作物光合碳输入量,导致GPP升高,也能增加呼吸碳排放量,导致 R_{eco} 升高,特别是生长季早期的土壤 T_s 升高强烈促进作物展叶和LAI上升,增强光合组织面积,间接促进光合生产过程,故能够显著增强碳汇。大气环境对NEE的调控则主要表现在水分供应途径,大气干旱引起的VPD升高不仅直接限制NEE,还通过向水文干旱传导,降低SWC来抑制生态系统的光合碳输入,减弱小麦-玉米间作农田的碳汇能力。辐射环境的能量供给与大气环境的水分和土壤环境的温湿度存在逐级作用关系,并通过耦合调控生态系统的碳输入和碳排放过程,控制着生态系统的碳汇能力。

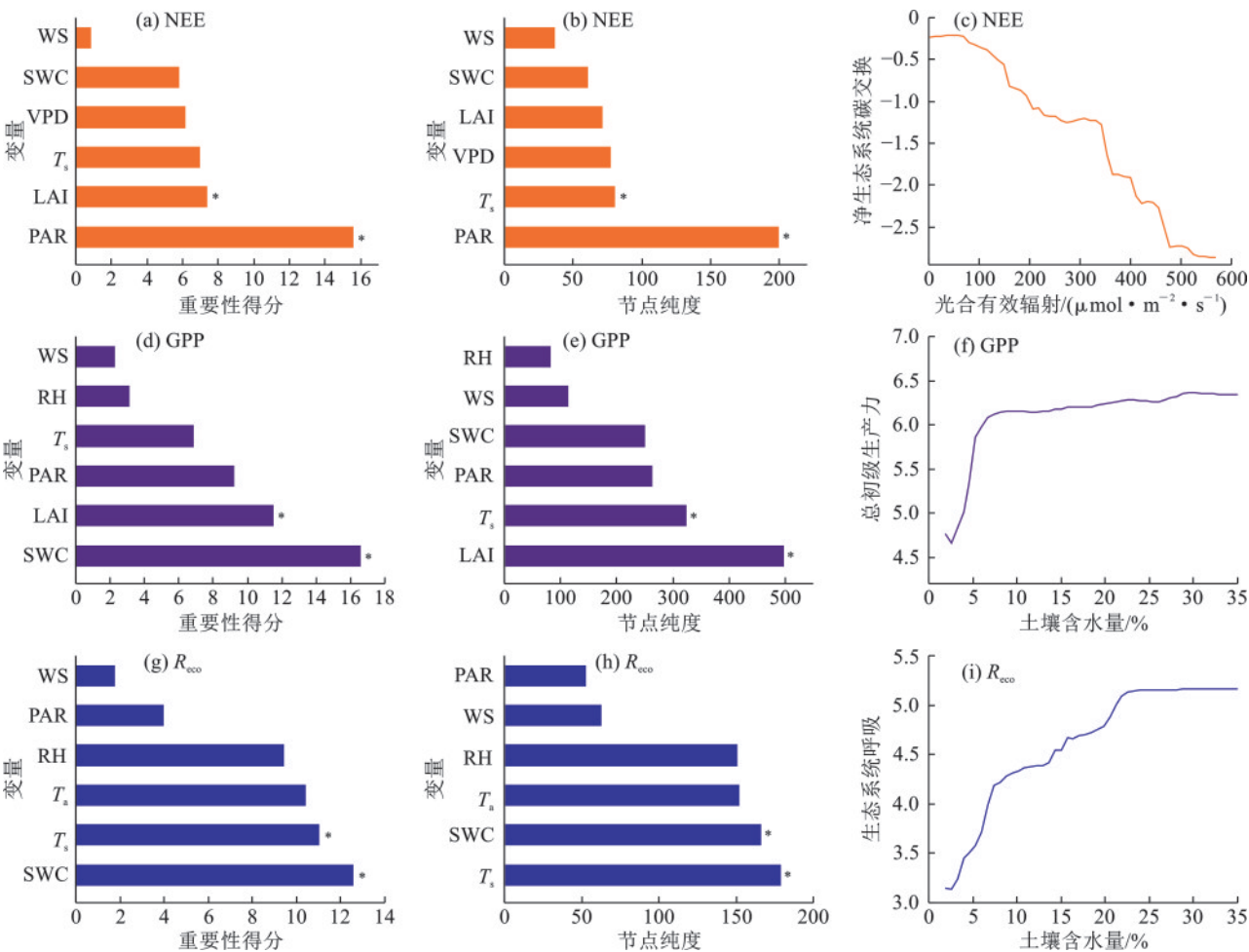
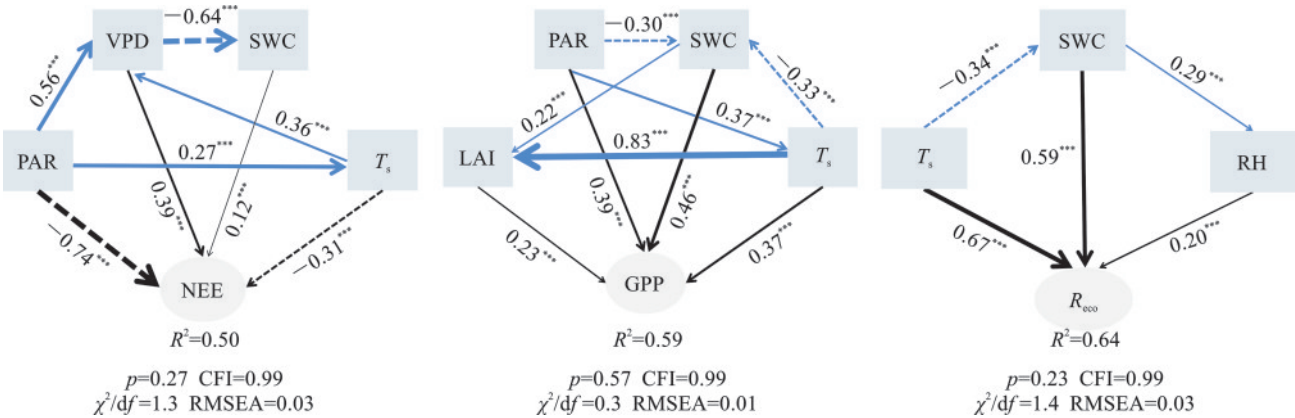


图 8 生物物理因子重要性排序及其偏依赖性
Fig.8 Importance ranking and partial dependence of biophysical factors



注:图中虚线表示负向作用,实线表示正向作用,蓝色表示生物物理因子之间的相互作用,黑色表示生物物理因子对碳通量组分的作用,线条粗细与关系强度呈正比;***表示 $p<0.001$; R^2 为模型解释方差;RMSEA为近似均方根误差; χ^2/df 为卡方自由度比;CFI为比较适配指数。

图 9 生物物理因子调控碳通量组分的结构方程模型

Fig.9 Structural equation model of carbon flux components regulated by biophysical factors

2.6 生长季 NEE 对环境因子的响应机制

2.6.1 日间 NEE 对 PAR 的响应机制 随机森林模型和结构方程模型均得出 PAR 是影响生长季日间 NEE 最大的环境调控因子,把 PAR 以 $100\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 为增量取对应的 NEE 平均值,用 Michaelis-Menten 模型对生长季日间 NEE 与 PAR 的关系进行拟合(图

10a)可知,PAR 调控 NEE 的大小,随着 PAR 的增加,NEE 呈负向增大,但不同月份的响应强弱不同。其中生长季初期的 4 月,NEE 随着 PAR 增加而负向增大的速率最慢,因为 4 月是小麦的生长早期,光合生产能力尚弱;随着生长旺季的来临,NEE 对 PAR 的响应逐渐增强,并在 6 月达到最强,即该月的 PAR 升高

显著提升生态系统的碳汇能力;到8月后 NEE 对 PAR 的强响应表现在 $PAR < 1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 阶段,而光强超过 $1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 后,NEE 不再明显随 PAR 增加而负向增大。

各月光合响应参数与生态系统呼吸参数拟合见图 10。各月光合/呼吸响应参数模拟的 R^2 为 0.88~0.99,表明模型能解释 88%~99% 的碳交换量变化。4 月的最大光合速率为 $(13.22 \pm 4.54)\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计),是生长季各月中的最低,导致表观量子效率也最低,仅有 $(0.008 \pm 0.003)\ \mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ (以 CO_2 计) PAR;同时,日间生态系统呼吸为 $(0.58 \pm 0.54)\ \mu\text{mol}/(\mu\text{mol} \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计),也是生长季各月中最

弱,表明土壤微生物活性受较低的 T_s 限制。随着生长季旺季的来临,最大光合速率逐渐增加,在 6 月达到峰值 $(23.64 \pm 1.86)\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计)后便处于高位;而日间生态系统呼吸一直处于增强态势,并在 8 月达到峰值 $(12.18 \pm 8.49)\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (以 CO_2 计),且 4—5 月的日间生态系统呼吸明显低于 6—8 月,与前文述及的生长季早期 T_s 较低抑制土壤微生物呼吸有关。4—8 月的表观量子效率为 0.008~0.209 $\mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ (以 CO_2 计),且一直处于提升状态。上述结果表明,宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田生长季的 NEE 受 PAR 调控,且随着生长旺季到来而愈加明显。

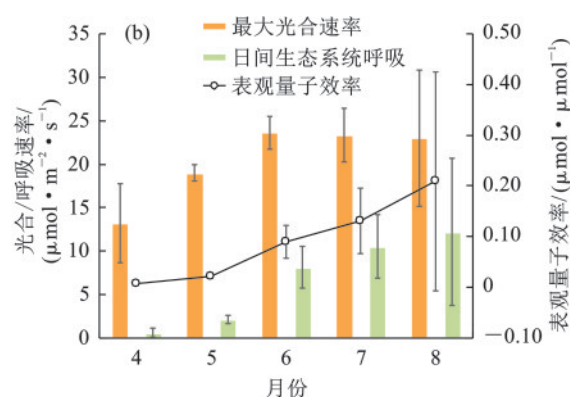
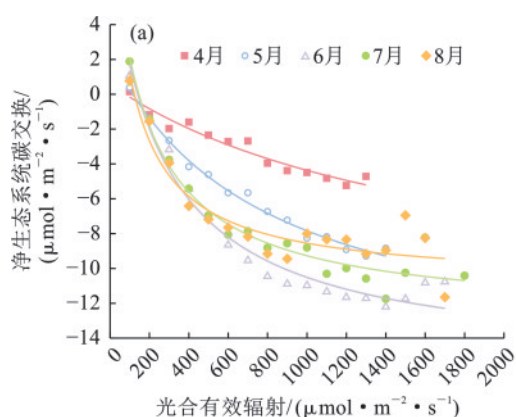


图 10 生长季日间 NEE 与 PAR 的响应关系及各月光合/呼吸响应参数拟合结果

Fig.10 Relationship between daytime NEE and PAR and fitted results of monthly photosynthetic/respiratory response parameters during growing season

2.6.2 不同 VPD 梯度下的 NEE 调控机制 已有研究^[37]表明,大气 VPD 会抑制光合,进而影响生态系统碳循环过程。为此,本研究采用 K-means 聚类方法对 VPD 进行梯度分区,并结合 Michaelis-Menten 模型对生长季不同 VPD 梯度下的 NEE 与 PAR 的关系进行模拟。

由图 11a 可知,NEE 的光响应特性表现出明显的 VPD 依赖性,即 VPD 的增加显著抑制农田生态系统

的 NEE,特别是在较强光照环境下 [$PAR \geq 500\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 表现更为明显。光合响应参数与生态系统呼吸拟合(图 11b)显示,虽然大气干燥环境下 ($VPD \geq 25\ \text{hPa}$) 的表观量子效率达到最高值,为 $(5.90 \pm 1.41)\ \mu\text{mol}/\mu\text{mol}$ (以 CO_2 计),但高 VPD (大气干燥)会抑制最大光合速率。日间生态系统呼吸在高 VPD 环境下达到最高,其主要与夏季高温环境下的土壤微生物活性增强有关。

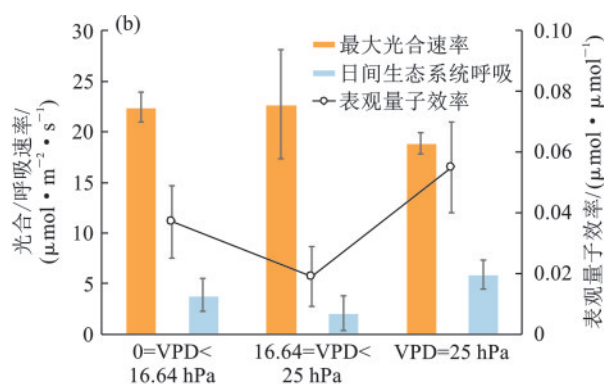
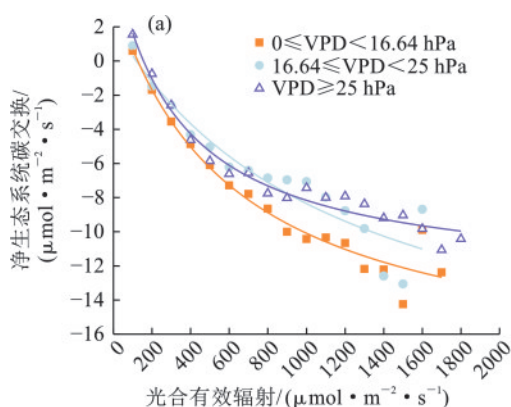


图 11 不同 VPD 梯度下 NEE 与 PAR 的响应关系及光合/呼吸响应参数拟合结果

Fig.11 Relationship between NEE and PAR and fitted results of photosynthetic/respiratory response parameters under different VPD gradients

3 讨论

3.1 间作农田碳汇时空差异分析

由于研究区采用小麦-玉米间作模式,通量塔观测的 NEE 主要反映其周边间作农田的碳交换特征,其中小麦种植区和玉米种植区的碳贡献在不同生长季存在显著差异。长江和淮河流域的农田生态系统碳汇整体偏高,其中长三角地区水稻-小麦轮作农田 NEE 达到 $-769.61 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),具有极强的固碳优势^[36];淮北平原冬小麦-夏玉米轮作农田的 NEP(= -NEE)为 $575.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),偏低长江流域^[37]。华北平原的农田生态系统碳汇能力相对次之,山东禹城实验站冬小麦-夏玉米轮作农田湿润年份(2003—2004 年)NEE 为 $-317.9 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),而干旱年份(2002—2003 年)只有 $-197.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)^[38];但禹城站 2003—2010 年的长期观测显示,冬玉米-夏小麦轮作体系的 NEE 为 $-274 \sim -857 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),年际间随气候波动很大^[39];Wang 等^[40]在河北栾城实验站冬小麦-夏玉米轮作农田观测的年 NEE 为 $-502.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),其中小麦季和玉米季的 NEE 分别为 -359.00 、 $-143.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),2 种作物间的碳汇差异巨大;但 Zhang 等^[41]观测的华北平原冬小麦-夏玉米的年均 NEE 为 $-534.30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),其中小麦季的 NEE ($-259.10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计))接近于玉米季 [$-275.20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)]。在关中平原半湿润气候区,夏玉米-冬小麦农田的年平均 NEE 为 $-370.00 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),但年际间为 $-291.00 \sim -433.10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)波动,其中玉米季的 NEE 为 $160.40 \sim 220.80 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),表现为碳源^[42]。干旱半干旱地区的农田生态系统碳汇能力往往更弱且存在更多不确定性,Niu 等^[43]在科尔沁研究发现,2014—2018 年夏玉米的平均 NEE 为 $-124.40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),虽然年均表现为碳汇,但 2016 年 NEE 为 $12.70 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),可能与当年采取的免耕种植模式有关;Guo 等^[44]在西北干旱区的研究发现,滴灌玉米田生长季(4 月下旬至 9 月中旬)的 NEE 达到 $-407 \sim -729 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),但此结果未累加非生长季的 NEE,所以碳汇结果偏高;Ji 等^[45]在西北干旱绿洲的观测表明,夏玉米的 NEE 为 $-487.90 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),其中非生长季 NEE 为 $205.00 \text{ g}/\text{m}^2$ (以 C 计),表现为碳源。本研究首次测得宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田 NEE 在 $-223.42 \sim -286.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),总体处于干旱绿洲农田的中等水平,且干湿年份间有较大波动。综上所述,农田生态系统的碳汇能力随气候条件差异而不同,且干旱绿洲农田碳汇波动性更

大,这给中国农业碳汇量估算带来极大的不确定性,未来仍需加强干旱绿洲农田的碳汇监测评估工作。值得一提的是,本研究所探讨农田碳汇均未考虑农业生产的外源性排放与收获干扰等因素,而精细考虑这些因素在农田碳汇定量评估中亦至关重要。

3.2 间作农田碳循环的不同生物物理调控机制

宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田生长季 NEE 的关键驱动因子为 PAR,与 Zhang 等^[46]在华北平原淮河流域(2016—2022 年)的冬小麦-水稻轮作农田研究结果相一致,其研究也表明,PAR 是日 NEE 最大的影响因子;Chen 等^[47]在中国西南热水河流域(2021 年 10 月至 2023 年 9 月)研究也表明,种植土豆和玉米的农田生态系统中 PAR 同样是控制日 NEE 变化的最重要影响因素;Gao 等^[13]在黄土高原(2012—2014 年)秸秆还田旱作春玉米农田的研究表明,在生长季节, LAI 是控制每日 NEE、 R_{eco} 和 GPP 季节变化的最重要因素;Wang 等^[48]在河套灌区(2017—2018 年)的研究也支持上述结论,PAR 是控制干旱区灌溉玉米田 NEE 和 ET 日动态的主要驱动力;Niu 等^[43]在科尔沁沙地(2014—2018 年)研究发现,在月尺度上, R_{eco} 随着 LAI 的增加而增加;Peng 等^[42]在关中平原(2019 年 6 月—2022 年 6 月)的研究显示, LAI 是夏玉米-冬小麦系统 R_{eco} 的主导驱动因素;Chen 等^[49]在淮河流域寿县(2007 年 7 月 1 日至 2010 年 7 月 31 日)对水稻-小麦轮作生态系统的研究结果进一步印证,白天 NEE 主要由 PAR 决定,且该轮作系统在 3 a 观测期间表现为每年 $-982 \text{ g}/\text{m}^2$ (以 C 计)的显著碳汇。

大气环境和土壤环境一方面直接作用绿洲农田生态系统的光合过程与呼吸过程来调控 NEE;另一方面,也通过自身相互作用来耦合调控生态系统碳汇能力。大气干旱引起的 VPD 升高和 RH 降低,诱发土壤水文干旱,并通过 SWC 和 T_s 等途径直接影响作物光合碳吸收和呼吸碳排放来调控 NEE,亦通过改变 LAI 等作物表型结构差异来间接调控碳输入。宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田生态系统碳循环的生物物理调控机制复杂,但其主要调控途径均与生态系统的水分供给有关,如大气 VPD 和土壤 SWC 均间接和直接影响作物水分供应状态,即水分亏缺显著影响生态系统的碳循环过程,导致碳汇能力减弱。2023 年宁夏平均气温 9.9°C ,较常年偏高 0.9°C ,是 1961 年以来气温最高年份,平均降水量 233.9 mm ,较常年偏少 17%,气候总体较为干旱,也诱发土壤水文干旱发生。此异常的大气干旱-土壤水文胁迫过程导致 2023 年的碳通量各组分明显低于 2024 年,且碳通量各组分在 2 a 的生长季存在显著差异。可见,干旱绿洲农田生态系统的碳循环过程受水分供应条件显著调控。

4 结 论

1)从生态系统自身碳循环过程来看,宁夏沿黄绿洲小麦-玉米间作农田在年尺度上表现为碳汇,年NEE为 $-223.42 \sim -286.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计),生长季强烈的光合固碳过程显著超过呼吸排放而形成碳汇能力。

2)生长季日内NEE呈“U”形变化,其日内过程显著受日内GPP的倒“U”形过程控制,而日内波动较小的 R_{eco} 对NEE日动态影响不大。

3)碳通量各组分受多种生物物理因子耦合调控,PAR为NEE关键驱动因子,SWC和PAR对GPP显著调控,而 R_{eco} 则对 T_s 和SWC敏感。

4)气候干湿变化显著调控干旱绿洲农田碳循环过程,降水偏低与气温偏高的气候异常导致VPD升高和SWC降低,环境因子的胁迫亦通过影响作物LAI而限制光合碳输入,通过生物物理因子的直接和间接耦联途径影响碳通量各组分,最终抑制生态系统的碳汇能力。

参考文献:

- [1] Lee H, Calvin K, Dasgupta D, et al. IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policy-makers. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland [R]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023.
- [2] 赵辉,朱盛强,刘贞,等.基于涡度相关技术的农田生态系统碳收支评估[J].环境科学学报,2021,41(11):4731-4739.
Zhao Hui, Zhu Shengqiang, Liu Zhen, et al. Evaluation of carbon budget for farmland ecosystem based on the eddy correlation technology [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(11): 4731-4739.
- [3] Chen Shutao, Zou Jianwen, Hu Zhenghua, et al. Climate and vegetation drivers of terrestrial carbon fluxes: A global data synthesis [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(7): 679-696.
- [4] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学(生命科学),2022,52(4):534-574.
Yang Yuanhe, Shi Yue, Sun Wenjuan, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. Science in China (Series C), 2022, 52(4): 534-574.
- [5] 朴世龙,何悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望[J].中国科学(地球科学),2022,52(6):1010-1020.
Piao Shilong, He Yue, Wang Xuhui, et al. Carbon sequestration estimation of terrestrial ecosystem in China: Method, progress and prospect [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(6): 1010-1020.
- [6] 史桂芬,贺伟光.涡度相关技术在农田生态系统通量研究中的应用[J].现代农业科技,2019(6):141-143.
Shi Guifen, He Weiguang. Application of eddy covariance technology in flux research of farmland ecosystem [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019 (6): 141-143.
- [7] 于贵瑞,朱剑兴,徐丽,等.中国生态系统碳汇功能提升的技术途径:基于自然解决方案[J].中国科学院院刊,2022,37(4):490-501.
Yu Guirui, Zhu Jianxing, Xu Li, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: Nature-based solutions [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 490-501.
- [8] 朱咏莉.亚热带稻田生态系统 CO_2 通量研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2005.
Zhu Yongli. Carbon dioxide exchange between paddy ecosystem and the atmosphere in the subtropical region [D]. Beijing: Research Center for Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, 2005.
- [9] 刘琳奇,李明,彭青,等.南昌城市森林碳水通量及资源利用效率变化特征[J].宁夏大学学报(自然科学版中英文),2025,46(2):204-213.
Liu Linqi, Li Ming, Peng Qing, et al. Changes in carbon and water flux and resource utilization efficiency of urban forests in Nanchang [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2025, 46(2): 204-213.
- [10] 赵佳伟,何清,金莉莉,等.涡动相关法通量数据处理研究概述[J].气象科技进展,2020,10(5):7-12.
Zhao Jiawei, He Qing, Jin Lili, et al. Overview of flux data processing by eddy covariance technique [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(5): 7-12.
- [11] Li Cheng, Li Zhaozhe, Zhang Fangmin, et al. Seasonal dynamics of carbon dioxide and water fluxes in a rice-wheat rotation system in the Yangtze-Huaihe region of China [J]. Agricultural Water Management, 2023, 275: e107992.
- [12] Wang Wen, Liao Yuncheng, Wen Xiaoxia, et al. Dynamics of CO_2 fluxes and environmental responses in the rain-fed winter wheat ecosystem of the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2013, 461/462: 10-18.

- [13] Gao Xiang, Gu Fengxue, Hao Weiping, et al. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 1193-1203.
- [14] Liebig M A, Saliendra N Z, Archer D W. Carbon fluxes from a spring wheat-corn-soybean crop rotation under no-tillage management [J]. *Agroecosystems, Geosciences and Environment*, 2022, 5(3): e20291.
- [15] Wang Yu, Zhou Li, Jia Qingyu, et al. Direct and indirect effects of environmental factors on daily CO₂ exchange in a rainfed maize cropland: A SEM analysis with 10 year observations [J]. *Field Crops Research*, 2019, 242: e107591.
- [16] Chu Housen, Chen Jiquan, Gottgens J F, et al. Response and biophysical regulation of carbon dioxide fluxes to climate variability and anomaly in contrasting ecosystems in northwestern Ohio, USA [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 220: 50-68.
- [17] 吴宏玥, 杜灵通, 乔成龙, 等. 基于蒸散演变驱动的宁夏绿洲平原生态系统耗水变化[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 172-180, 189.
- Wu Hongyue, Du Lingtong, Qiao Chenglong, et al. Water consumption of ecosystem driven by evapotranspiration evolution in Ningxia oasis plain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 172-180, 189.
- [18] 罗霄, 杜灵通, 乔成龙, 等. 宁夏沿黄绿洲参考作物蒸散演变特征及其归因[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4782-4794.
- Luo Xiao, Du Lingtong, Qiao Chenglong, et al. Change characteristics of reference crop evapotranspiration of the Yellow River Oasis in Ningxia autonomous region and its driving analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(11): 4782-4794.
- [19] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- Li Chun, He Honglin, Liu Min, et al. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX [J]. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565.
- [20] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(S1): 34-44.
- Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Wen Xuefa, et al. Research on processing method of CO₂ vorticity-related flux data at night in ChinaFLUX [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2006, 36(S1): 34-44.
- [21] 张权. 华北冬小麦-夏玉米轮作农田碳平衡特征及控制因素研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- Zhang Quan. Carbon balance characteristic and its controlling factors in a winter wheat-summer maize rotation cropland over the North China Plain [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [22] Wutzler T, Lucas-Moffat A, Migliavacca M, et al. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc [J]. *Biogeosciences*, 2018, 15(16): 5015-5030.
- [23] 刘敏, 何洪林, 于贵瑞, 等. 数据处理方法不确定性对 CO₂ 通量组分估算的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(9): 2389-2396.
- Liu Min, He Honglin, Yu Guirui, et al. Impacts of uncertainty in data processing on estimation of CO₂ flux components [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(9): 2389-2396.
- [24] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, et al. Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation [J]. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 571-583.
- [25] 李鑫豪, 田文东, 李润东, 等. 北京松山落叶阔叶林生态系统水热通量对环境因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(11): 1191-1202.
- Li Xinhao, Tian Wendong, Li Rundong, et al. Responses of water vapor and heat fluxes to environmental factors in a deciduous broad-leaved forest ecosystem in Beijing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(11): 1191-1202.
- [26] 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.
- [27] 何洪林, 于贵瑞, 张雷明, 等. 基于人工神经网络的 ChinaFLUX 观测站 CO₂ 模拟研究通量[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(增刊 1): 234-243.
- He Honglin, Yu Guirui, Zhang Leiming, et al. Simulation of CO₂ flux at ChinaFLUX Observatory based on artificial neural network [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2006, 36(S1): 234-243.
- [28] Moffat A M, Papale D, Reichstein M, et al. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 209-232.
- [29] 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.
- Shi Yuanzhi. Variations of H₂O/CO₂ and the mechanism of environmental response in two typical farmland ecosystems of China [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [30] Chapin F S, Woodwell G M, Randerson J T, et al. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and meth-

- ods[J].Ecosystems,2006,9(7):1041-1050.
- [31] Huang Ni, Wang Li, Zhang Yuelin, et al. Estimating the net ecosystem exchange at global FLUXNET sites using a random forest model [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 9826-9836.
- [32] Li Chaoqun, Han Wenting, Peng Manman, et al. Abiotic and biotic factors contribute to CO₂ exchange variation at the hourly scale in a semiarid maize cropland [J]. Science of the Total Environment, 2021, 784: e147170.
- [33] 王西石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 337-344.
- Wang Youshi, Chu Chengjin. A brief introduction of structural equation model and its application in ecology [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 337-344.
- [34] 石亚飞, 石善恒, 黄晓敏. 基于R的结构方程模型在生态学中的应用 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(5): 1015-1023.
- Shi Yafei, Shi Shanheng, Huang Xiaomin. The application of structural equation modeling in ecology based on R [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 1015-1023.
- [35] 董灵波, 田栋元, 陈莹, 等. 基于结构方程模型的兴安落叶松天然林更新影响因素 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2763-2772.
- Dong Lingbo, Tian Dongyuan, Chen Ying, et al. Clarifying the factors affecting *Larix gmelinii* forest regeneration based on structural equation model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2763-2772.
- [36] 孙小祥, 常志州, 杨桂山, 等. 长三角地区稻麦轮作生态系统净碳交换及其环境影响因子 [J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 803-811.
- Sun Xiaoxiang, Chang Zhizhou, Yang Guishan, et al. Characteristics of net ecosystem exchange and environmental factors of rice-wheat rotation system in the Yangtze River Delta of China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(7): 803-811.
- [37] Xing Wanqiu, Yang Lilin, Wang Weiguang, et al. Environmental controls on carbon and water fluxes of a wheat-maize rotation cropland over the Huaibei Plain of China [J]. Agricultural Water Management, 2023, 283: e108310.
- [38] Li Jun, Yu Qiang, Sun Xiaomin, et al. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(2): 226-240.
- [39] Tao Fulu, Li Yibo, Chen Yi, et al. Daily, seasonal and inter-annual variations in CO₂ fluxes and carbon budget in a winter-wheat and summer-maize rotation system in the North China Plain [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 324: e109098.
- [40] Wang Yuying, Hu Chunsheng, Dong Wenxu, et al. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 206: 33-45.
- [41] Zhang Yucui, Guo Xiaonan, Pei Hongwei, et al. Evapotranspiration and carbon exchange of the main agroecosystems and their responses to agricultural land use change in North China Plain [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 338: e108103.
- [42] Peng Xiongbiao, Wang Yunfei, Ma Jing, et al. Seasonal variation and controlling factors of carbon balance over dry semi-humid cropland in Guanzhong Plain [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 149: e126912.
- [43] Niu Yayi, Li Yuqiang, Wang Mingming, et al. Variations in seasonal and inter-annual carbon fluxes in a semi-arid sandy maize cropland ecosystem in China's Horqin Sandy Land [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(4): 5295-5312.
- [44] Guo Hui, Li Sien, Wong F L, et al. Drivers of carbon flux in drip irrigation maize fields in northwest China [J]. Carbon Balance and Management, 2021, 16(1): e12.
- [45] Ji Xibin, Zhao Wenzhi, Kang Ersi, et al. Carbon dioxide exchange in an irrigated agricultural field within an oasis, northwest China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(11): 2298-2308.
- [46] Zhang Kaidi, Lu Yanyu, Duan Chunfeng, et al. Variations and drivers of CO₂ fluxes at multiple temporal scales of subtropical agricultural systems in the Huaihe River basin [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2025, 362: e110394.
- [47] Chen Wenguang, Lu Yafeng, Yin He, et al. A typical small watershed in southwestern China is demonstrated as a significant carbon sink [J]. Land, 2024, 13(4): e458.
- [48] Wang Xingwang, Wang Xianghao, Wei Qiangli, et al. Coupling of net ecosystem CO₂ exchange and evapotranspiration of irrigated maize field in arid areas [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127140.
- [49] Chen Chen, Li Dan, Gao Zhiqiu, et al. Seasonal and inter-annual variations of carbon exchange over a rice-wheat rotation system on the North China Plain [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(10): 1365-1380.