

黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统碳收支量化分析

段玉鹏^{1,2} 丁硕秋^{1,2} 胡羽欣^{1,2} 冯浩^{2,3} 于强^{3,4} 何建强^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;

3. 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西杨凌 712100;

4. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室, 西安 710016)

摘要: 黄淮海平原是我国重要的农业基地, 准确量化该地区农业生产的碳收支可为我国农业绿色发展和实现“双碳”目标提供科学依据。本研究基于 Biome - BGCMuSo 模型模拟了 1981—2100 年黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作(简称麦玉轮作)区域的初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(RECO)和净生态系统生产力(NEP), 并分析了其时空变化趋势。结果表明: 利用差分进化算法进行模型参数优化后, Biome - BGCMuSo 模型可获得较高的模拟精度, 日尺度 GPP、RECO、NEP 模拟值与观测值之间的决定系数(R^2)分别达到 0.80、0.64、0.68, 月尺度分别达到 0.92、0.73、0.83。在时间尺度上, 在历史时段(1981—2020 年), GPP、RECO 和 NEP 的年均值分别为 1 682.40、1 293.12、389.28 gC/(m²·a), 其中 GPP 和 RECO 显著增加, NEP 在 2000 年前显著增加之后变化不显著; 在未来时段(2020—2100 年)SSP245 情景下, GPP、RECO 和 NEP 的年均值分别为 2 015.75、1 613.06、402.69 gC/(m²·a); SSP585 情景下 GPP、RECO 和 NEP 的年均值分别为 2 144.67、1 729.52、415.15 gC/(m²·a)。整体上, GPP 和 RECO 在未来时期呈现显著增加趋势, NEP 将先呈现相对稳定的变化趋势直至 2051 年后显著减小。在空间尺度上, GPP 和 RECO 呈现出中部高而南北部低的空间分布格局, NEP 则从东南向西北方向递增。气候变化背景下, 黄淮海平原麦玉轮作系统未来时期碳汇功能减弱主要是由生态系统呼吸的增速超过作物初级生产力的增速所导致。

关键词: 黄淮海平原; 冬小麦-夏玉米轮作系统; Biome - BGCMuSo 模型; 碳收支; 气候变化

中图分类号: S181

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)15-0332-13

OSID:



Quantifying Carbon Budget of Winter Wheat – Summer Maize Rotation System in Huang – Huai – Hai Plain

Duan Yupeng^{1,2} Ding Shuoqiu^{1,2} Hu Yuxin^{1,2} Feng Hao^{2,3} Yu Qiang^{3,4} He Jianqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

3. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Yangling, Shaanxi 712100, China

4. Key Laboratory of Eco-environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710016, China)

Abstract: The Huang – Huai – Hai Plain is an important agricultural production base in China. Accurately quantifying the carbon budget in agricultural production could provide a scientific basis for the agriculture development in China. The Biome – BGCMuSo model was used to simulate the gross primary productivity (GPP), ecosystem respiration (RECO), and net ecosystem productivity (NEP) in the winter wheat – summer maize rotation systems of the Huang – Huai – Hai Plain in period of 1981—2100, and their spatiotemporal change trends were analyzed as well. The results showed that after parameter optimization through the differential evolution algorithms, the simulation accuracy of the Biome – BGCMuSo model was high. The determination coefficients (R^2) between the simulated and observed daily values of GPP, RECO, and NEP were 0.80, 0.64, and 0.68, respectively. And the R^2 values

收稿日期: 2026-02-03 修回日期: 2026-02-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52579046)

作者简介: 段玉鹏(2000—), 男, 博士生, 主要从事农业生态系统碳收支模拟研究, E-mail: duanyupeng-2019@nwfufu.edu.cn

通信作者: 何建强(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态系统模拟研究, E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn

were 0.92, 0.73, and 0.83 at monthly scale, respectively. In historical period of 1981—2020, the average annual values of GPP, RECO, and NEP were $1\,682.40\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1\,293.12\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and $389.28\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively. Among them, GPP and RECO were increased significantly, but NEP was increased significantly before 2000 and then changed insignificantly. In future period of 2020—2100, the average annual values of GPP, RECO, and NEP were $2\,015.75\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1\,613.06\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and $402.69\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under the SSP245 scenario, while they were $2\,144.67\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $1\,729.52\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and $415.15\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ under the SSP585 scenario, respectively. GPP and RECO showed obvious increasing trends in the future, while NEP showed a relatively stable trend first and then decreased significantly after 2051. At spatial scale, GPP and RECO showed a distribution pattern of high in the middle and low in the northern and southern parts of the Huang-Huai-Hai Plain, while NEP was increased from southeast to northwest. Under future climate change, the weakening carbon sink function of the winter wheat-summer maize rotation system will be mainly because the increasing rate of ecosystem respiration exceeded the increasing rate of crop gross primary productivity in the future. Since the quantification of agricultural carbon budget was of great significance for the ‘carbon peak and carbon neutrality’ goals and food security of China, more studies were needed to further quantify the carbon budget and explain the underlying change mechanism in the Huang-Huai-Hai Plain in the future.

Key words: Huang-Huai-Hai Plain; winter wheat-summer maize rotation system; Biome-BGCMuSo model; carbon budget; climate change

0 引言

农业生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,其碳收支平衡在全球碳循环中发挥着重要作用^[1-4]。黄淮海平原作为我国最重要的农业产区之一,主要以冬小麦-夏玉米双熟轮作(简称麦玉轮作)为主,提供了全国约 70.0% 的小麦和约 30.0% 的玉米产量^[5]。目前,对未来气候变化情景下该地区麦玉轮作系统长时间序列区域碳收支的量化研究还较为缺乏。同时,目前量化碳收支的研究多采取结构单一的生态模型,难以对农田生态系统复杂的管理措施进行模拟,可能导致农田碳收支评估误差增大。因此,在未来气候变化情景下,准确量化黄淮海平原麦玉轮作系统的碳收支,估计农田的固碳潜力,对于保障国家粮食安全和落实“双碳”目标具有重要意义。

目前,对陆地生态系统碳收支的量化方法多集中于涡度相关法和模型模拟法。已有学者基于涡度相关法对华北平原麦玉轮作系统开展了相关研究,如利用典型麦玉轮作系统 16 年的通量观测数据,探讨碳物候和环境因子对 NEP 年际变化的解释能力^[6]。另外,模型模拟法也被广泛应用于生态系统碳收支研究,有学者采用光能利用率模型模拟了黑河流域净初级生产力(NPP)和总初级生产力(GPP),并分析了人类活动和气候变化对 GPP 的影响^[7]。然而涡度相关法和光能利用率模型难以模拟预测未来时期碳收支,所以过程模型成为估算区域长时间序列历史和未来碳通量的优选方法,其中 Biome-BGC 模型和 Biome-BGCMuSo 模型是最常

用的方法^[8-9],Biome-BGCMuSo 模型是通过改进 Biome-BGC 模型结构,并与 4M 作物模型耦合而来,相比于单一的生态模型,可以更准确地对农田生态系统的碳收支进行量化^[10]。目前,Biome-BGCMuSo 模型已经被广泛应用于不同生态系统的碳收支模拟研究。例如,Huang 等^[11]利用该模型研究了 1990—2020 年中国土地利用和气候变化对碳收支的影响;Su 等^[12]利用该模型研究了 2012—2018 年内蒙古大兴安岭林区不同类型森林的碳通量及时空动态变化。对于受人为管理措施严重影响的黄淮海平原麦玉轮作系统,还未见利用该模型研究其碳收支情况的报道。因而,亟需采用结构更为严谨的 Biome-BGCMuSo 模型,系统探究黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作体系的历史及未来碳收支特征。

因此,本研究以黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统为研究对象,基于历史气象数据和全球气候模式(GCMs)产生的未来气候数据,来驱动率定后的 Biome-BGCMuSo 模型模拟 1981—2100 年麦玉轮作系统的 GPP、RECO 和 NEP,探究气候变化背景下麦玉轮作系统碳收支的年际、年内时空变化趋势,评估气候变化对麦玉轮作农田生态系统的影响。研究成果可为麦玉轮作农田生态系统碳收支的量化评估提供科学依据与技术支持,对保障国家粮食安全和落实国家“双碳”目标具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄淮海平原位于我国华北地区($29^{\circ}24' \sim$

42°36' N, 110°21' ~ 122°42' E, 0 ~ 2 250 m), 北起长城、南至淮河、西倚太行山、东濒渤海。该区域气候属于暖温带季风气候, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 年均气温为 8 ~ 15℃, 最高温出现在 7 月份, 无霜期为 170 ~ 220 d; 年降水量为 500 ~ 1 000 mm, 且时空分布不均匀, 夏季降水量占全年 70.0% 以上。黄淮海平原地区土层深厚、土壤肥力较高, 且光热资源充足、雨热同期, 是我国重要的粮食生产基地之一, 种植模式主要为冬小麦-夏玉米

轮作。根据黄淮海平原作物种植模式分布^[13]及冬小麦-夏玉米种植制度分区^[14], 本研究将黄淮海平原冬小麦-夏玉米种植区划分为 6 个分区, 包括: 环渤海二熟区 (Zone 1)、太行山前二熟区 (Zone 2)、海河平原二熟区 (Zone 3)、鲁西平原二熟区 (Zone 4)、黄淮平原二熟区 (Zone 5)、江淮平原二熟区 (Zone 6)。每个分区划分为 0.1° (约为 10 km) 的栅格单元 (图 1), 然后进行格点化模型模拟。

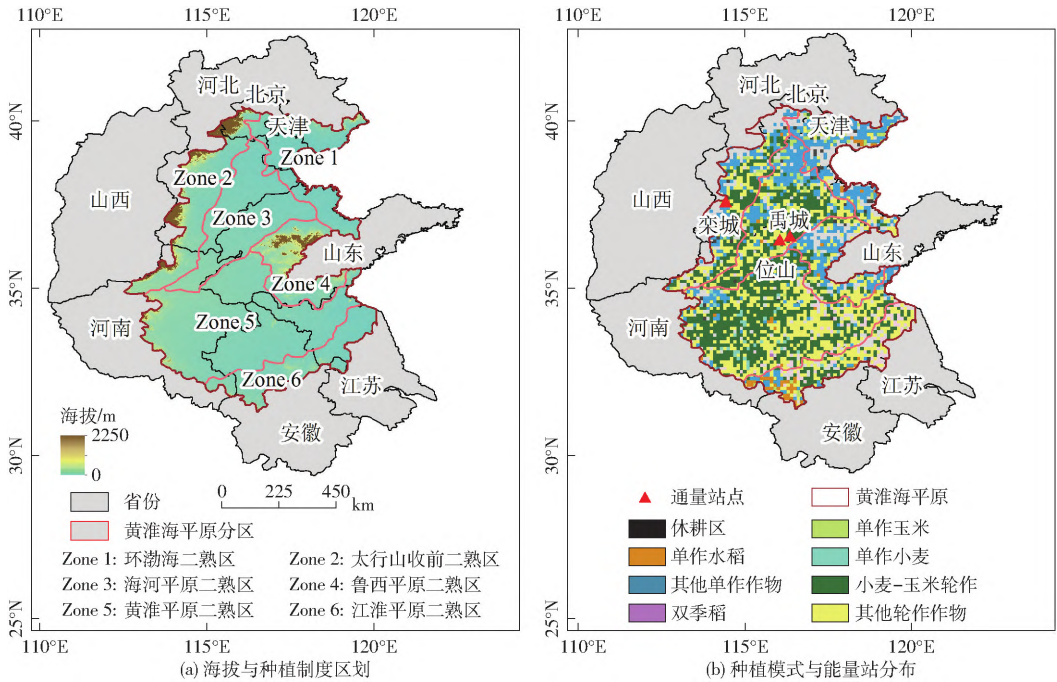


图 1 研究区海拔与种植制度区划以及种植模式与通量站分布图

Fig. 1 Elevations and planting system zones, as well as distributions of cropping patterns and flux stations in study region

1.2 气象数据

本研究所需的历史气象数据来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的 ERA5 - land 逐小时气象再分析数据 (<https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis>)。驱动模型所需要的气象要素包括平均气温 (T_{mean} , °C)、最高气温 (T_{max} , °C)、最低气温 (T_{min} , °C)、降水量 (P_{rep} , mm)、太阳短波辐射 (R_s , W/m^2)、水汽压差 (e_a , kPa), 其中水汽压差由平均气温和露点温度计算。ERA5 气象要素数据均预先处理为 1981—2020 年分辨率 0.1° 的日尺度数据。

未来气候预测数据来源于第 6 次耦合模式比较计划 (Coupled model intercomparison project phase 6, CMIP6) 发布的全球气候模式 (Global climate models, GCMs) 产生的气候预测数据集。为了准确评估未来气候变化对黄淮海平原麦玉轮作系统碳收支的影响以及减小 GCMs 导致的模型模拟结果不确定性^[15], 本研究运用 CMIP6 中 7 个广泛采用的 GCMs 产生的未来 (2021—2100 年) 气候降尺度数据

来驱动模型进行未来情景模拟 (表 1), 所涉及气象要素包括: 逐日最高温度 (T_{max} , °C)、最低温度 (T_{min} , °C)、降水量 (P_{rep} , mm) 和太阳短波辐射 (R_s , W/m^2)。选取的共享社会经济路径排放情景 (Shared socioeconomic pathways, SSPs) 为中等温室气体排放情景 (SSP245) 和高温温室气体排放情景 (SSP585)。然后, 通过 MTCLIM 模型将所产生的未来气候数据转换为 Biome - BGC MuSo 模型所需的未来气象文件。

表 1 采用的 7 个全球气候模式

Tab. 1 Seven global climate models

序号	名称	缩写	机构	国家/地区
1	BCC - CSM2 - MR	BCCC	BCC	中国
2	EC - Earth3 - Veg	ECE2	EC - EARTH - Consortium	欧洲
3	GFDL - ESM4	GFD2	NOAA - GFDL	美国
4	INM - CM4 - 8	INM1	INM	俄罗斯
5	INM - CM5 - 0	INM2	INM	俄罗斯
6	MPI - ESM1 - 2 - HR	MPI1	MPI - M	德国
7	MRI - ESM2 - 0	MRIE	MRI	日本

1.3 其他多源数据

历史大气 CO₂ 浓度数据来自于美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 发布的 1979—2023 年全球数据 (https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gl_data.html); 未来逐年的大气 CO₂ 浓度数据则分别根据 SSP245 情景和 SSP585 情景的年际拟合公式进行计算^[16], 计算式为

$$[CO_2]_{ssp245_year} = 62.044 + \frac{34.002 - 3.8702y}{0.24423 - 1.1542y^{2.4901}} + 0.028057(y - 1900)^2 + 0.00026827 \cdot (y - 1960)^3 - 9.2751 \times 10^{-7} \cdot (y - 1910)^4 - 2.2448(y - 2030) \quad (1)$$

$$[CO_2]_{ssp585_year} = 757.44 + \frac{84.938 - 1.537y}{2.2011 - 3.8289y^{-0.45242}} + 2.4712 \times 10^{-4}(y + 15)^2 + 1.9299 \times 10^{-5}(y - 1937)^3 + 5.1137 \times 10^{-7}(y - 1910)^4 \quad (2)$$

式中 y ——年份, 取 2024—2100 年

$[CO_2]_{ssp245_year}$ ——SSP245 情景下的逐年 CO₂ 浓度
 $[CO_2]_{ssp585_year}$ ——SSP585 情景下的逐年 CO₂ 浓度

大气干湿氮沉降数据通过查阅文献^[17]获得; 土壤数据需要的土壤质地与酸碱度采用分辨率 250 m 的 SoilGrids 世界土壤信息数据 (<https://soilgrids.org/>); 格点地理信息数据主要包括纬度和高程, 高程数据来源于 SRTM 分辨率 500 m DEM 数据 (<https://www.earthdata.nasa.gov/>)。作物田间管理数据来源于冬小麦-夏玉米种植制度分区数据^[14]、国家生态中心、国家区试品种报告以及文献^[18-20], 其中 6 个不同分区 (图 1) 种植制度根据黄淮海平原农气站的作物物候记录数据以及当地常规栽培措施来确定 (表 2)。通量站观测数据来源于国家生态数据中心提供的禹城站、位山站、栾城站的逐日观测数据 (<http://www.nesdc.org.cn/>), 该数据主要用于模型校准和精度验证; 同时选取 VPM、PML_V2、GOSIF^[21-23] 和 MOD17A2H (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 共 4 种 GPP 产品与模型模拟值进行对比验证。

1.4 碳收支指标定义

总初级生产力 (GPP) 是指植物通过光合作用吸收的碳总量, 是陆地生物圈与大气之间最大的碳通量^[24]。生态系统呼吸 (RECO) 是生态系统中所有生物体将有机碳转化为 CO₂ 的过程^[25]。GPP 和 RECO 决定了净生态系统二氧化碳交换量 (NEE) 和净生态系统生产力 (NEP), 即 $NEE = - (GPP -$

表 2 各分区作物管理数据信息

Tab. 2 Crop management data in different zones

分区	作物	多年平均 播期	多年平均 收获期	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	灌溉量/ mm
Zone 1	小麦	10 月 2 日	6 月 15 日	250	205
	玉米	6 月 21 日	9 月 25 日	200	166
Zone 2	小麦	10 月 10 日	6 月 4 日	150	180
	玉米	6 月 9 日	9 月 26 日	200	120
Zone 3	小麦	10 月 15 日	6 月 9 日	300	200
	玉米	6 月 17 日	9 月 27 日	180	100
Zone 4	小麦	10 月 1 日	6 月 11 日	270	300
	玉米	6 月 20 日	9 月 25 日	330	200
Zone 5	小麦	10 月 18 日	6 月 1 日	135	170
	玉米	6 月 12 日	9 月 25 日	240	50
Zone 6	小麦	10 月 20 日	6 月 5 日	270	0
	玉米	6 月 17 日	9 月 27 日	225	0

RECO) = -NEP, 其中 NEP 是衡量区域生态系统碳源和碳汇的重要指标。本研究基于麦玉轮作系统的生态过程特征, 对冬小麦-夏玉米轮作区 GPP、RECO 及 NEP 的时空特征规律进行系统分析。

1.5 研究方法

1.5.1 基于 Biome-BGCMuSo 模型的未来情景模拟

Biome-BGC 是被广泛应用的生物地球化学模型, 可模拟生态系统和大气之间以及陆地生态系统内部水、碳和氮的通量和储量^[26]。Biome-BGCMuSo 模型作为 Biome-BGC 模型和 4M 作物模型相结合的更新版本, 扩展了来自 4M 模型的作物模拟功能, 可对农田、草地和森林设置种植、收获、间伐、割草、放牧、犁地、灌溉、施肥等管理措施, 提高了模型对受人为管理影响的农田生态系统中碳水循环的模拟能力。Biome-BGCMuSo 模型的运行可分为两个阶段: ①自旋模拟 (Spin-up model), 从土壤碳和氮非常低的初始水平开始, 一直运行到与气候达到稳定状态, 并估计状态变量的初始值。②正常模拟 (Normal model), 使用自旋模拟的结果作为碳库和氮库的初始值, 在确定的时间段内进行模拟。本研究基于 7 个不同 GCMs 产生的气候数据驱动 Biome-BGCMuSo 模型进行 SSP245 和 SSP585 两种未来情景模拟, 并将多个 GCMs 驱动的不同模拟结果均值作为未来时期的碳收支模拟值, 以此减小不同 GCMs 带来的模拟误差。

1.5.2 模型参数优化

差分进化算法 (Differential evolution) 源于遗传退火算法 (Genetic annealing algorithm), 是一种简单而强大的全局优化算法, 可以高效地实现模型参数全局优化。基于关于 Biome-BGC 模型参数敏感性的研究^[27-30]以及模型指导手册, 本研究确定冬小麦

和夏玉米的敏感参数包括:叶片碳氮比、冠层光截获系数、Rubisco 中叶氮百分比含量、土壤水分参数、根区分布参数、根深度函数形状参数、生长性呼吸所消耗碳含量、共生和非共生固氮含量、冠层平均比叶面积、当前部分生长比例,其余参数为模型默认值。以 GPP 为优化目标变量,结合禹城站 2003—2010 年的通量观测数据,利用 R 语言 Deoptim 包和最小二乘法原理进行模型敏感参数优化,最终利用禹城站、位山站和栾城站的通量观测数据进行模型模拟精度验证。

1.5.3 统计分析

采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和偏差(Bias)作为模型精度验证的指标。 R^2 介于 0~1 之间,反映模型对因变量变异的解释能力;RMSE 用于指示模型在预测中产生的误差大小;Bias 可以反映模型预测值与观测值之间的差异。本研究采用 Theil-Sen 中值斜率估计方法对 GPP、RECO 和 NEE 的模拟结果进行趋势分析,并通过 Mann-Kendall 方法进行显著性检验^[31]。斜率 Sen 大于 0 时,通量呈现增加趋势;斜率 Sen 小于 0 时,呈减小趋势。采

取 0.05 的显著性水平,当 MK 显著性检验得到的标准统计量绝对值大于 1.65、1.96 时,表示通量微显著、显著变化。

2 结果与分析

2.1 多站点日尺度和月尺度模型模拟精度验证

采用禹城站 2003—2008 年、位山站 2005—2006 年麦玉轮作系统的 GPP、RECO、NEP 日尺度通量数据,以及栾城站 2007—2017 年的 NEE 日尺度通量数据来验证 Biome-BGCMuSo 模型的模拟精度。在禹城站,GPP 模型模拟值与观测值之间的决定系数 R^2 为 0.80,均方根误差 RMSE 为 2.94 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;RECO 模拟值与观测值之间的 R^2 为 0.64,均方根误差 RMSE 为 2.00 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;NEE 模拟值与观测值之间的 R^2 为 0.68,均方根误差 RMSE 为 2.49 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,模型模拟精度总体较好(图 2、表 3)。Biome-BGCMuSo 模型在位山站和栾城站同样具有较高的模拟精度,表明该模型的模拟精度在不同区域具有空间一致性(表 3)。

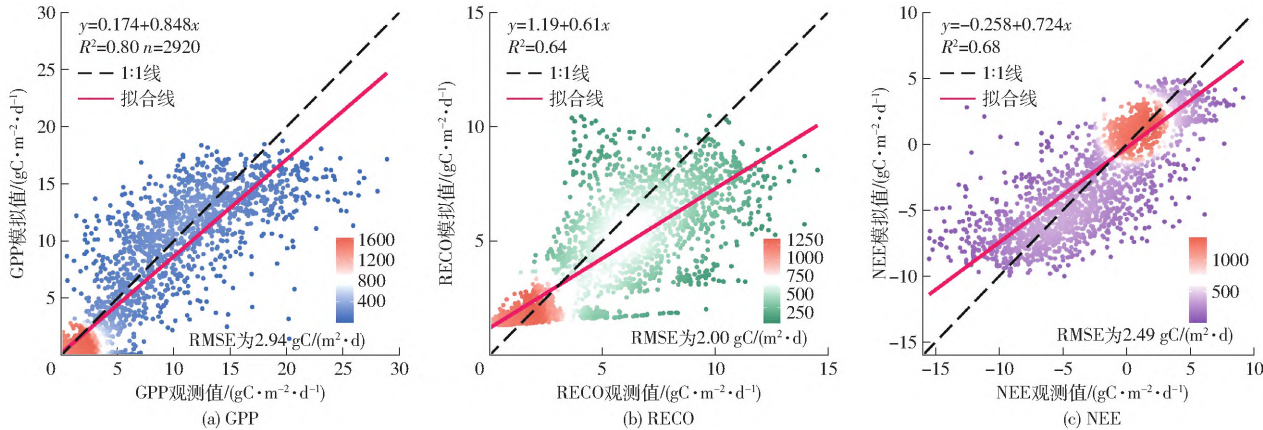


图 2 禹城站日尺度 GPP、RECO、NEE 的模型模拟精度验证

Fig. 2 Verification of model accuracies in simulating daily GPP, RECO, and NEE at Yucheng Station

表 3 禹城站、位山站和栾城站的日尺度 GPP、RECO、NEE 模型精度验证

Tab. 3 Verification of model accuracies in simulating daily GPP, RECO, and NEE at Yucheng Station, Weishan Station and Luancheng Station

站点	GPP		RECO		NEE	
	R^2	RMSE/ $(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	R^2	RMSE/ $(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	R^2	RMSE/ $(\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
禹城站	0.80	2.94	0.64	2.00	0.68	2.49
位山站	0.82	2.42	0.70	1.31	0.75	1.91
栾城站	—	—	—	—	0.69	2.28

注:“—”表示因栾城站缺失 GPP、RECO 观测数据而未计算相应指标。下同。

Biome-BGCMuSo 模型在禹城站、位山站和栾城站上月尺度的模拟精度均较高(图 3),其中 GPP 模拟值和观测值之间的 R^2 为 0.92, RMSE 为 55.23 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$;RECO 模拟值和观测值之间的 R^2 为 0.73, RMSE 为 49.61 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$;NEE 的模拟值和观测值之间的 R^2 为 0.83, RMSE 为

42.73 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{month})$,均表明该模型在月尺度上具备较高的模拟精度。

2.2 禹城站多种 GPP 产品与模型模拟结果对比分析

本研究进一步采用 4 种 GPP 产品数据与禹城站的 Biome-BGCMuSo 模型模拟值以及观测值进行对比分析(表 4),可见禹城站 2003—2010 年的多年

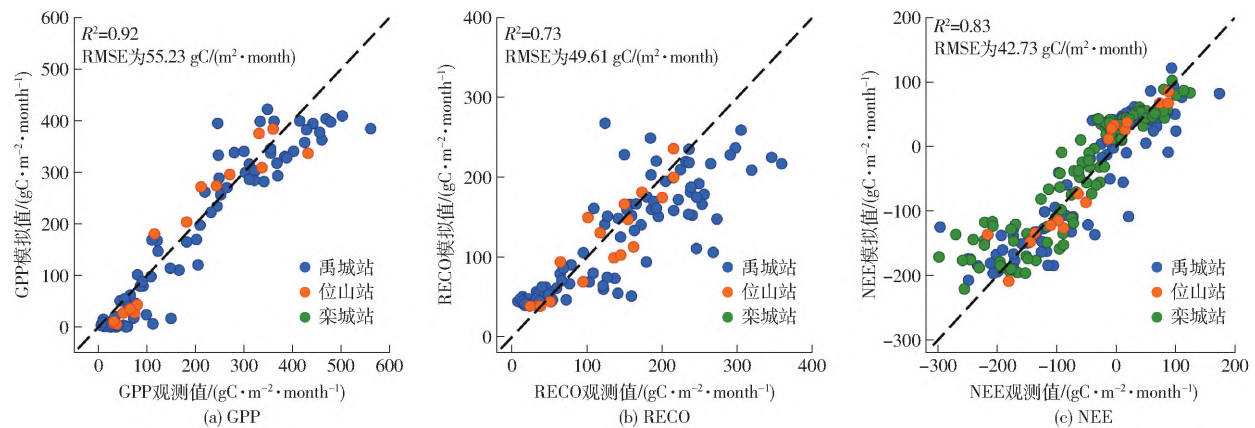


图3 禹城站、位山站和栾城站月尺度 GPP、RECO、NEE 的模型模拟精度验证

Fig. 3 Verification of model accuracy in simulating monthly GPP, RECO, NEE at Yucheng, Weishan, and Luancheng Stations

年均 GPP 为 $2\,109.52\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 4 种 GPP 产品的多年年均 GPP 均明显小于观测值, 但是模型模拟具有较高的 R^2 、最低的 RMSE 和 Bias, 表明 Biome - BGC MuSo 模型的 GPP 模拟结果精度高于本研究选择的 4 种 GPP 产品, 可以更准确地量化黄淮海平原麦玉轮作系统的碳收支。

表 4 禹城站 2003—2010 年 GPP 模型模拟值和 GPP 产品值与观测值之间的对比分析
Tab. 4 Comparisons of model simulated values and product values with observed values of GPP at Yucheng Station in years of 2003—2010

数据类型	R^2	RMSE/ $(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	Bias/ $(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$	多年平均 GPP/ $(\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$
观测值	—	—	—	2 109.52
模拟值	0.87	2.19	0.72	1 844.92
VPM	0.90	2.60	1.63	1 511.25
PML_V2	0.74	3.90	1.78	1 456.78
GOSIF	0.83	4.31	2.73	1 106.99
MOD17A2H	0.79	5.58	3.68	757.01

2.3 黄淮海麦玉轮作区 GPP、RECO 和 NEP 的时间变化趋势

2.3.1 1981—2100 年 GPP、RECO 和 NEP 年际变化趋势

将 1981—2100 年划分为 3 个研究时段: 历史时期(1981—2020 年)、未来近期(2021—2050 年)及未来远期(2051—2100 年), 其中未来模拟采取了 SSP245 和 SSP585 两种共享社会经济路径情景。在历史时期, 黄淮海麦玉轮作区 GPP 的均值和变化率分别为 $1\,682.40\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $6.48\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$), RECO 的均值和变化率分别为 $1\,293.12$ 、 $6.84\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$), 可见 GPP 和 RECO 均呈现显著增大趋势。历史时期 NEP 的均值为 $389.28\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$, 但在 1981—2000 年和 2001—2020 年的 NEE 变化趋势却不一致, 变化率分别为 $4.98\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.05$) 和 $-3.07\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P>0.05$) (图 4, 图中阴影区域为 25% 和 75% 分位数区间)。在未来 SSP245 和 SSP585 两种情景下, GPP 和 RECO 在未来近期(2021—2050 年)和未来远期(2051—2100 年)均呈现明显增大趋势, 其中

GPP 在 SSP245 情景下的年均值和变化率分别为 $2\,015.75\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $7.39\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$), 在 SSP585 情景下分别为 $2\,144.67\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $11.01\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$)。RECO 在 SSP245 情景下的年均值和变化率分别为 $1\,613.06\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $8.72\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$), 在 SSP585 情景下分别为 $1\,729.52\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $12.09\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$)。NEP 在整个未来时期(2021—2100 年) SSP245 和 SSP585 两种情景下的年均值分别为 $402.69\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $415.15\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$; NEP 在未来近期(2021—2050 年)呈现先增大后稳定的趋势, 在 SSP245 情景下的年均值及变化率分别为 $434.14\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-0.14\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P>0.05$), 在 SSP585 情景下分别为 $442.50\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-0.11\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P>0.05$), 变化率统计不显著; NEP 在未来远期(2051—2100 年)呈现出明显减小的趋势, 在 SSP245 情景下的年均值及变化率分别为 $383.82\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-2.03\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$), 在 SSP585 情景下分别为 $398.74\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 和 $-1.35\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ ($P<0.01$)。

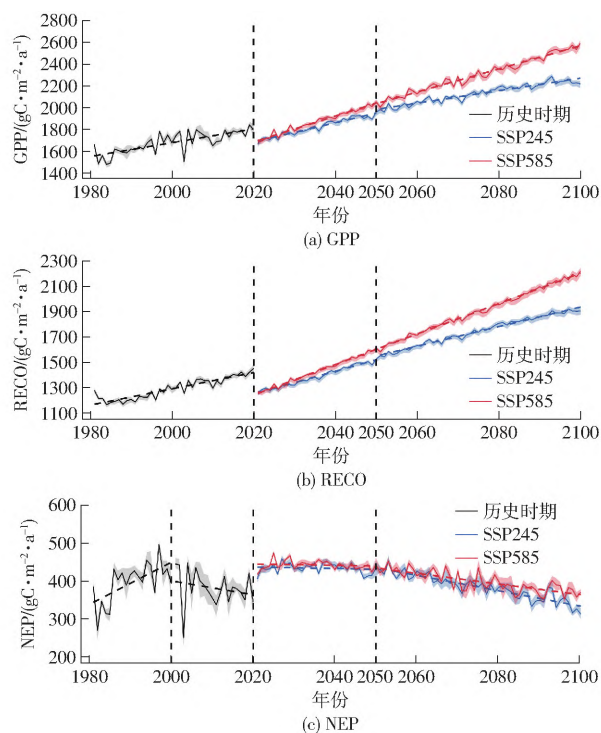


图4 黄淮海平原麦玉轮作区 1981—2100 年 GPP、RECO、NEP 的年际时间变化趋势

Fig.4 Inter-annual variations of GPP, RECO, and NEP of wheat-maize rotation systems in Huang-Huai-Hai Plain in years of 1981–2100

2.3.2 GPP、RECO 和 NEP 平均年内变化趋势

黄淮海平原麦玉轮作区历史时期(1981—2020年)和未来时期(2021—2100年)两种情景下的月均 GPP、RECO 和 NEP 均呈现双峰变化模式(图 5)。对 GPP 而言,冬小麦和夏玉米分别在每年的 5 月和 8 月达到峰值;在历史时期和两种未来情景下,冬小麦的月平均 GPP 逐渐增大;SSP585 情景下的夏玉米月平均 GPP 相较于 SSP245 情景则基本没有变化(图 5a)。对 RECO 而言,冬小麦和夏玉米分别在每年的 5 月和 8 月达到峰值;历史时期和两种未来情景下,冬小麦和夏玉米的月平均 RECO 均大幅增大(图 5b)。对 NEP 而言,冬小麦和夏玉米分别在每年的 4 月和 8 月达到峰值;农田在 1、2、6、10、11、12 月表现为碳源,而在冬小麦和夏玉米的主要生长期表现为碳汇;从历史时期到两种未来情景,冬小麦主要生长期的 NEP 均有所增大;夏玉米主要生长期的 NEP 除了 6—8 月有较小幅度的增大外,9、10 月均减小(图 5c)。

2.4 黄淮海麦玉轮作区 GPP、RECO 和 NEP 的空间变化特征

在黄淮海平原麦玉轮作区,GPP 随纬度的增大呈现先增后减的趋势,且在 Zone 4 区(鲁西平原二熟区)最大,该区域在历史时期、未来 SSP245 和

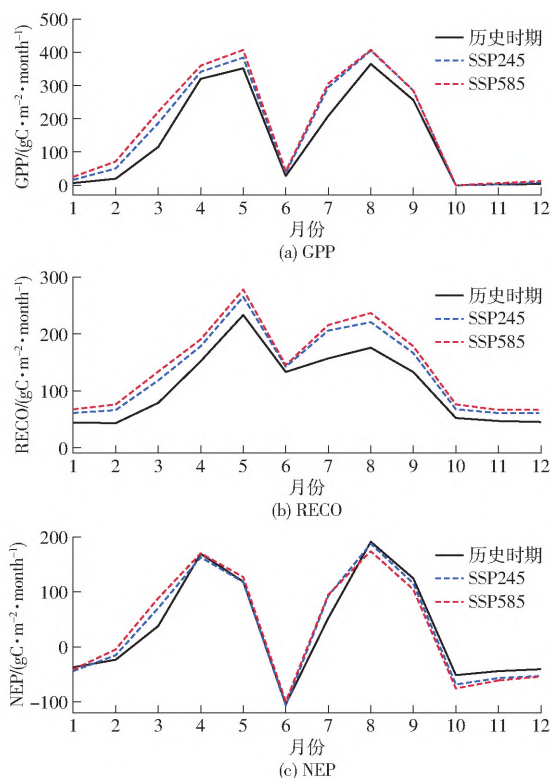


图5 历史时期(1981—2020年)和未来(2021—2100年)两种情景(SSP245 和 SSP585)下黄淮海平原麦玉轮作区 GPP、RECO、NEP 的年内变化

Fig.5 Intra-annual variations of GPP, RECO, and NEP of wheat-maize rotation systems in Huang-Huai-Hai Plain in historical period (1981–2020) and under two future (2021–2100) scenarios of SSP245 and SSP585

SSP585 情景下的年均 GPP 分别为 1 758.81、2 119.30、2 266.32 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 6a~6c、图 7a)。RECO 与 GPP 呈现一致的空间分布格局,Zone 4 区在历史时期、未来 SSP245 和 SSP585 情景下的年均 RECO 分别为 1 416.78、1 763.49、1 894.12 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (图 6d~6f、图 7b)。NEP 则呈现出从东南向西北方向逐渐增大的空间分布格局,且在 Zone 2 区(太行山前二熟区)最大,该区在历史时期、未来 SSP245 和 SSP585 情景下年均 NEP 分别为 433.40、433.45、443.75 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,未来情景下的 NEP 与历史时期差异较小(图 6g~6i、图 7c)。

根据黄淮海平原麦玉轮作区碳收支变化率的空间分布特征(图 8),可见 1981—2100 年 GPP 和 RECO 呈现普遍显著增大的趋势,而 NEP 在 1981—2000 年、2001—2020 年、2021—2050 年和 2051—2100 年 4 个时段呈现出较为复杂的变化趋势及空间分布格局。其中,1981—2000 年大部分区域的 NEP 呈增长趋势,其中显著增长格点数($P < 0.05$)占格点总数的 71.3%,Zone 4(鲁西平原二熟区)为增长最快的区域;2001—2020 年 NEP 呈减小趋势,

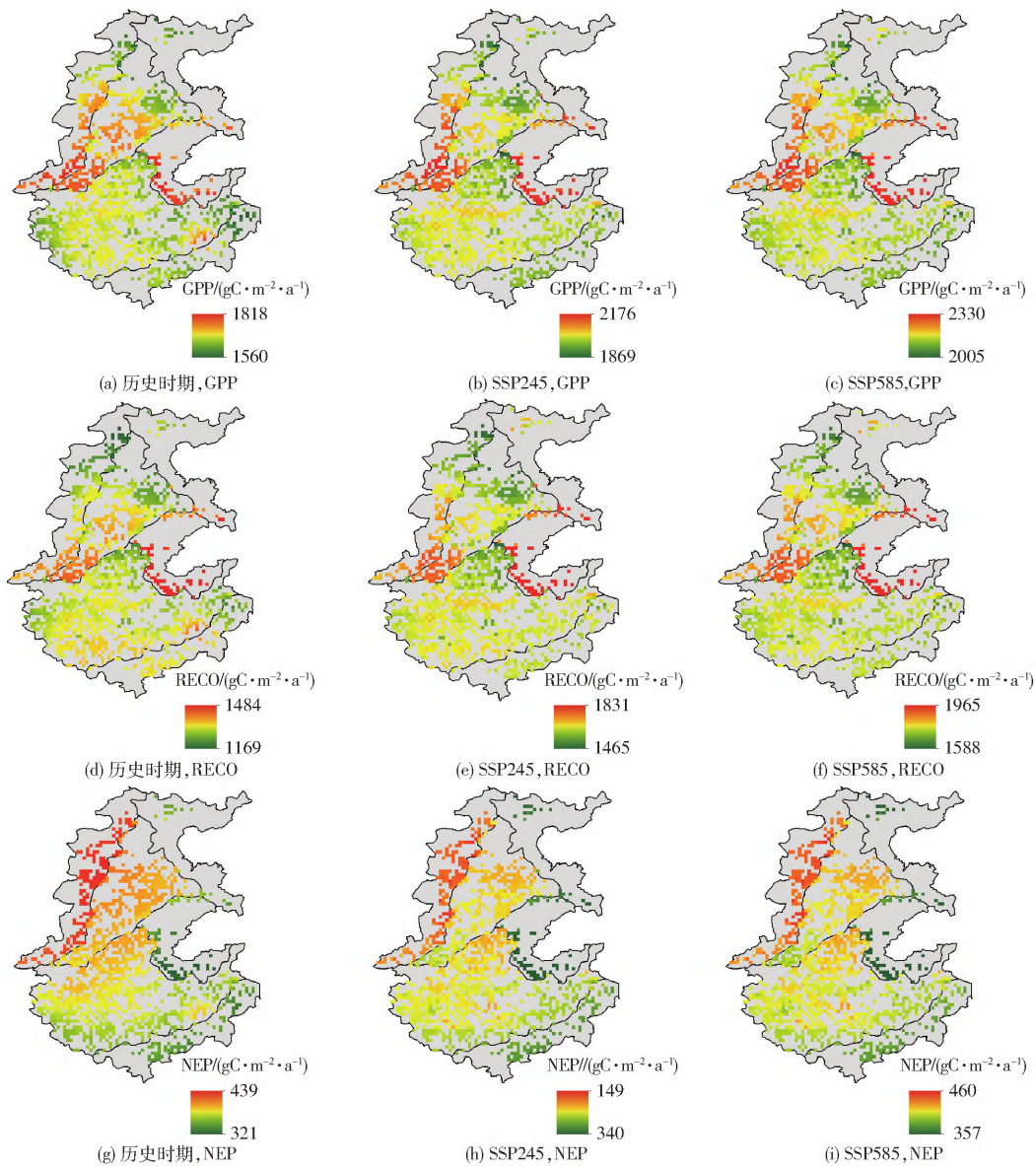


图 6 历史时期 (1981—2020 年)、未来 (2021—2100 年) SSP245 和 SSP585 两种情景下黄淮海平原麦玉轮作区的年均 GPP、RECO、NEP 空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of annual average values of GPP, RECO, and NEP in historical period (1981—2020), in future period (2021—2100) under SSP245 and SSP585 scenarios in wheat-maize rotation region of Huang-Huai-Hai Plain

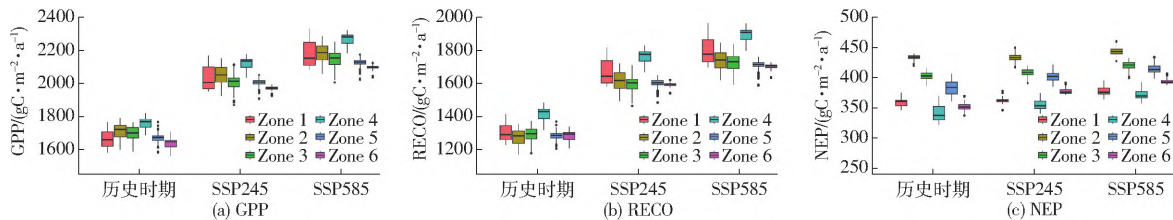


图 7 历史时期 (1981—2020 年)、未来 (2021—2100 年) SSP245 和 SSP585 两种情景下黄淮海平原麦玉轮作区内不同分区内 (Zone 1 ~ Zone 6) 所有格点的年均 GPP、RECO、NEP 统计箱型图

Fig. 7 Boxplots for values of annual GPP, RECO, and NEP of all grid points at different zones (Zone 1 ~ Zone 6) in wheat-maize rotation region of Huang-Huai-Hai Plain in historical period (1981—2020) and future period (2021—2100) under SSP245 and SSP585 scenarios

但格点数显著减小 ($P < 0.05$), 仅占格点总数的 3.5%; 2001—2050 年, 在 SSP245 和 SSP585 情景

下, 研究区 NEP 的空间变化趋势呈现出明显的南北差异, 北部区域 NEP 呈现不显著增加趋势 ($P >$

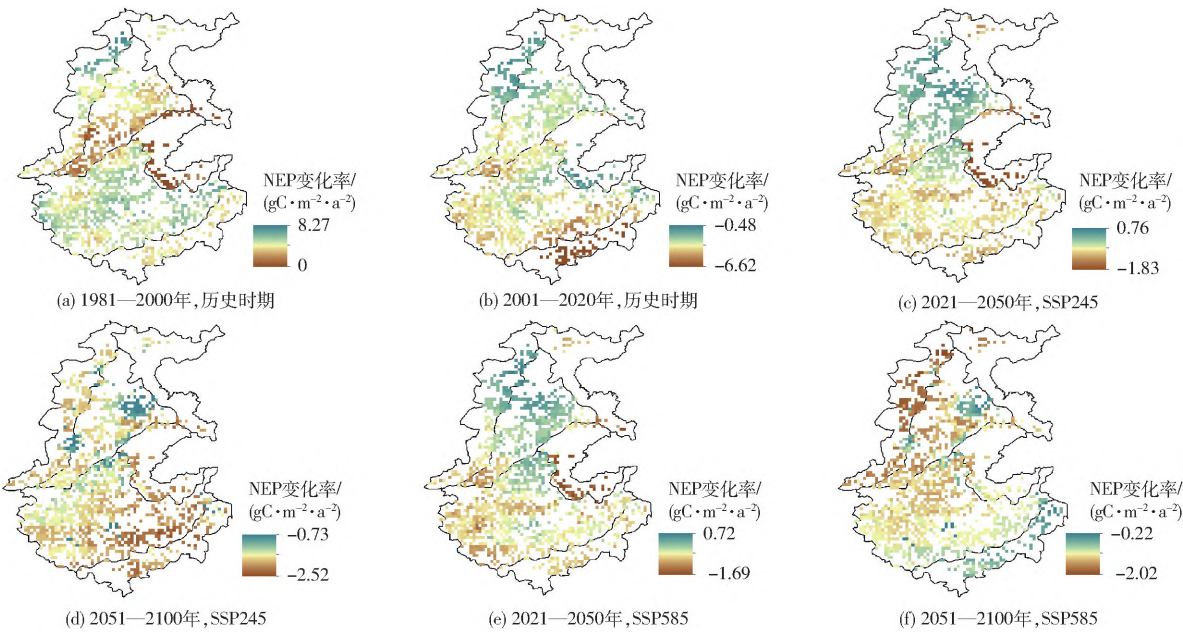


图8 历史时期(1981—2020年)、未来近期(2021—2050年)和未来远期(2051—2100年)SSP245和SSP585两种情景下黄淮海平原麦玉轮作区内不同分区(Zone 1~Zone 6)所有格点NEP变化率的空间分布
Fig. 8 Spatial distributions of NEP change rate for all grid points in different zones (Zone 1~Zone 6) in wheat-maize rotation region of Huang-Huai-Hai Plain during historical period (1981—2020), and near future (2021—2050) and far future (2051—2100) under SSP245 and SSP585 scenarios

0.05,增加格点数占格点总数的30.0%),南部区域NEP则呈现不显著减小趋势($P>0.05$,减小格点数占格点总数的60.0%);2051—2100年内,SSP245和SSP585两种情景下NEP在整个区域呈现出一致显著减小趋势,但SSP585情景下的NEP减小率更低。

3 讨论

3.1 黄淮海平原麦玉轮作区的碳收支比较

由于数据来源、研究时段、生态系统和计算碳收支方法的差异,不同黄淮海平原麦玉轮作区的碳收支量化研究结果之间可能存在一定差异。本研究将模拟的黄淮海平原麦玉轮作区碳收支与有关文献的量化研究结果进行了对比分析(表5),可以发现本研究的GPP模拟结果与其他研究的结果较为相近,均在文献值范围之内。但NEP存在较大差异,禹城站2003—2018年的NEP年均模拟值与文献值接近,而2000—2020年的NEP年均模拟值范围与文献值范围存在一定偏差,这可能主要是因为文献[35]中的农田作物类型不仅包含了冬小麦-夏玉米轮作,还包括了其他轮作作物和单作作物,使得农田整体的NEP年均值范围偏小。

3.2 黄淮海平原麦玉轮作区碳收支的时间变化趋势

农业生态系统的碳平衡在全球碳循环中发挥着重要作用,根据核算的时间和空间尺度以及不同的地理区域,农田既可能是大气中CO₂的碳汇,也可能

表5 本研究黄淮海平原冬小麦-夏玉米轮作系统GPP、NEP模型模拟值与其他文献结果的比较

Tab. 5 Comparisons between GPP and NEP values simulated and values in other published studies for winter wheat - summer maize rotation systems in Huang-Huai-Hai Plain

植被生产	研究时段	模型模拟值/ ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	文献参考值/ ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
GPP	2000—2009	1 506 ~ 1 805	1 500 ~ 2 000 ^[32]
	2001—2018	1 734	1 857 ^[33]
	1981—2013	1 479 ~ 1 805	1 329 ~ 2 497 ^[34]
NEP	2003—2018	398	423 ^[6]
	2000—2020	251 ~ 448	139 ~ 316 ^[35]

是碳排放源^[36]。黄淮海平原作为我国重要的粮食主产区,目前还较少对其冬小麦-夏玉米轮作系统未来情景下的碳收支进行量化研究。对于GPP在历史时期的变化趋势,相关研究^[34]表明华北平原的GPP在1981—2013年间呈现显著增长的趋势,与本研究一致。对于GPP未来时期的变化趋势,在SSP245和SSP585两种情景下麦玉轮作系统的GPP变化率在2021—2050年分别为8.82 $\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ 和12.15 $\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$,但在2051—2100年却分别降低为5.73 $\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ 和10.70 $\text{gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^2)$ 。有研究^[37]表明:在SSP245和SSP585两种未来情景下,全球年际GPP均呈现逐渐上升的趋势,增长的幅度随未来情景的强迫水平提高而增大,其中,在SSP245情景下,GPP变化率在2051—2100年的增

长率明显低于 2021—2050 年,但是在高辐射强迫 SSP585 情景下,2051 年之后的 GPP 变化率增长率超过 2051 年之前。本研究与上述结论存在一定差异,无论是 SSP245 情景还是 SSP585 情景,2051—2100 年 GPP 变化率均低于 2021—2050 年。农田生态系统的 GPP 主要受到温度、辐射的影响^[38],但是黄淮海平原 2051—2100 年辐射的增长速度明显低于 2021—2050 年,而且冬小麦在 SSP585 情景下生育期内的太阳辐射呈现减小趋势^[14],可能因此导致本研究中黄淮海平原麦玉轮作系统的 GPP 在 2051 年之后的年均增长率较 2051 年之前明显降低。GPP 作为作物通过光合作用形成生物量的初始通量,与作物产量之间存在高度相关性,常用来估算作物产量^[39]。在未来情景下黄淮海平原冬小麦和夏玉米的产量模拟研究^[14]中,其结果表明冬小麦的未来产量随着辐射强迫强度的增大而提高,但是 SSP585 情景下夏玉米的未来产量相较于 SSP245 情景却没有明显变化,这与本研究结果类似(图 5)。本研究结果同样表明:在 SSP245 和 SSP585 两种情景下,冬小麦生长时期内的逐月 GPP 明显增大,而夏玉米生长时期内的逐月 GPP 基本没有差异,在 SSP585 情景下产生的生物量相较于 SSP245 情景没有明显变化。

随着气候变化,全球平均 RECO 呈显著上升趋势,陆地生态系统的碳排放量将继续增加,从长远来看可能超过或抵消植被生产力的提高,降低陆地生态系统的碳汇能力,并对全球生态系统构成重大风险^[40]。黄淮海平原麦玉轮作区的 RECO 通量在历史时期(1981—2020 年)、未来时期(2021—2100 年)SSP245 与 SSP585 两种情景下均呈现出显著增大的趋势。在未来近期(2021—2050 年)SSP245 和 SSP585 两种情景下,RECO 与 GPP 年增长率之间的差距仅为 $0.31 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 和 $-0.07 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$,但是在未来远期(2051—2100 年)二者年增长率之间的差距达到了 $2.01 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$ 和 $1.38 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}^2)$,即 RECO 的增大速率明显超过 GPP,使得麦玉轮作系统的净生态系统生产力 NEP 在 2051—2100 年呈现显著减小趋势。这可能主要与未来时期温度、辐射的变化和外部碳输入有关。受未来时期辐射增长率减弱的制约,GPP 增速在 2051 年后明显低于 RECO 增速。RECO 则受到温度升高和外部碳输入的影响,其中温度一方面直接影响植被呼吸速率和微生物分解速率^[41],另一方面通过影响植被的光合作用和改变植被生产力的大小来间接影响呼吸作用^[42]。外部碳输入包括小麦和玉米的凋落物和土壤中储存的有机碳^[43],由于未来时期温度升高使得

植被呼吸和土壤呼吸增大,导致 RECO 增长速率高于 GPP 增长速率,因此 NEP 在 2051 年之后呈现显著减小趋势。

3.3 黄淮海平原麦玉轮作区碳收支的空间变化特征

在空间尺度上,黄淮海平原麦玉轮作区的 GPP 和 RECO 呈现出较为一致的空间分布与变化特征。GPP 和 RECO 总体呈现中部高而南北低的格局,其中 Zone 4 区(鲁西平原二熟区)的值最大。相关研究^[44]也表明华北平原年 GPP 呈现出由南到北逐渐减小的分布特征。从空间变化趋势来看,GPP 和 RECO 的变化具有同步性,整体均呈现出一致的增大趋势。本研究中华北平原碳收支模拟充分考虑了各地不同的灌溉措施,其中安徽、江苏内的 Zone 6 区(江淮平原二熟区)无灌溉以及 Zone 5 区(黄淮平原二熟区)夏玉米灌溉水量相对较少,因此本研究模拟的 GPP 在黄淮海南部相对较小。NEP 呈现出从东南向西北方向递增的分布趋势,其中 Zone 2 区(太行山前二熟区)值最大。NEP 在 1981—2000 年呈现全区域明显增大趋势,但在 2001—2020 年却普遍呈现轻微减小趋势。相关研究^[45]表明,黄淮海平原 2001—2020 年的骤旱次数和历时均为上升趋势,而骤旱带来的干旱胁迫可能是导致本研究中净生态系统生产力下降的原因之一。Liang 等^[46]研究发现,同时期中国大部分地区的 NEP 均呈不显著上升趋势,但是其中呈下降趋势的区域主要为农田,这表明我国大部分农田碳汇能力有所减弱。在 2021—2050 年,黄淮海平原麦玉轮作区的 NEP 呈现出北部增大、南部减小的趋势,但是整体时间段内变化不显著;在 2051—2100 年,NEP 则呈现全区域普遍显著减小趋势,这主要是由 RECO 与 GPP 之间增长率差异增大导致,表明未来时期的农田碳汇能力可能会先短时间内增强再保持稳定,然后逐渐减弱。

4 结论

(1) 利用差分进化算法可以较好地对 Biome-BGCMuSo 模型的敏感性参数进行优化,其中 GPP、RECO 和 NEP 的模型模拟值与观测值之间的决定系数 R^2 分别达 0.80、0.64、0.68;校准后的 Biome-BGCMuSo 模型在月尺度的模拟精度最高;相较于已有的 GPP 产品数据,GPP 的模型模拟结果更加准确。

(2) 在时间尺度上,黄淮海平原麦玉轮作区内 GPP、RECO 在历史时期(1981—2020 年)均显著增加,NEP 则呈现先显著增加后不显著性减小的趋势;在未来时期(2021—2100 年)SSP245 和 SSP585

两种情景下,GPP和RECO均显著增大,但是2051年之后增大率有所降低,而NEP则在2051年之前变化不明显,2051年之后显著减小。

(3)在空间尺度上,黄淮海平原麦玉轮作区内GPP和RECO呈现出中部高而南北部低的空间分布格局,研究区域内呈普遍增大趋势;NEP则呈现从东南向西北方向递增的空间分布格局,在1981—

2000年间约71.3%的区域明显增大,但在2001—2020年变化却不明显。在未来时期(2021—2100年),2051年之前NEP呈现北部不显著性增加($P > 0.05$)和南部不显著减小($P > 0.05$)的趋势;2051年之后NEP在整个区域呈现出一致减小的趋势,气候变化引起RECO增速高于GPP增速,从而导致黄淮海冬小麦-夏玉米轮作系统碳汇功能减弱。

参考文献

- [1] Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. Global carbon budget 2018[J]. *Earth System Science Data*, 2018,10(4): 2141–2194.
- [2] Liu J, Kuang W, Zhang Z, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014,24(2): 195–210.
- [3] Dold C, Büyükcangaz H, Rondinelli W, et al. Long-term carbon uptake of agro-ecosystems in the Midwest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017,232: 128–140.
- [4] Tang X, Zhao X, Bai Y, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018,115(16): 4021–4026.
- [5] Li X, Ju H, Sarah G, et al. Spatiotemporal variation of drought characteristics in the Huang-Huai-Hai Plain, China under the climate change scenario[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017,16(10): 2308–2322.
- [6] Yue Z, Li Z, Yu G, et al. Climate controls over phenology and amplitude of net ecosystem productivity in a wheat-maize rotation system in the North China plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023,333: 109411.
- [7] Shi X, Shi M, Zhang N, et al. Effects of climate change and human activities on gross primary productivity in the Heihe River Basin, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023,30(2): 4230–4244.
- [8] Gong K, Huang Z, Qu M, et al. Influences of climate change on carbon and water fluxes of the ecosystem in the Qinling Mountains of China[J]. *Ecological Indicators*, 2024,166: 112504.
- [9] Hidy D, Barcza Z, Marjanović H, et al. Terrestrial ecosystem process model Biome-BGCMuSo v4.0: summary of improvements and new modeling possibilities[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016,9(12): 4405–4437.
- [10] Hidy D, Barcza Z, Hollós R, et al. Soil-related developments of the Biome-BGCMuSo v6.2 terrestrial ecosystem model[J]. *Geoscientific Model Development*, 2022,15(5): 2157–2181.
- [11] Huang B, Lu F, Sun B, et al. Climate change and rising CO₂ amplify the impact of land use/cover change on carbon budget differentially across China[J]. *Earth's Future*, 2023,11(3): 17.
- [12] Su Y, Zhang W, Liu B, et al. Forest carbon flux simulation using multi-source data and incorporation of remotely sensed model with process-based model[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(19): 4766.
- [13] Qiu B, Hu X, Chen C, et al. Maps of cropping patterns in China during 2015–2021[J]. *Scientific Data*, 2022,9(1): 479.
- [14] 董文彪, 冯文哲, 屈萌钰, 等. 未来气候变化对黄淮海冬小麦-夏玉米轮作系统生产力影响[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(11): 429–445.
Dong Wenbiao, Feng Wenzhe, Qu Mengyu, et al. Influences of climate change on productivity of winter wheat and summer maize rotation system in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(11): 429–445. (in Chinese)
- [15] Liu D L, O'leary G J, Christy B, et al. Effects of different climate downscaling methods on the assessment of climate change impacts on wheat cropping systems[J]. *Climatic Change*, 2017,144(4): 687–701.
- [16] Jiang T, Wang B, Duan X, et al. Prioritizing agronomic practices and uncertainty assessment under climate change for winter wheat in the loess plateau, China[J]. *Agricultural Systems*, 2023,212: 103770.
- [17] Yu G, Jia Y, He N, et al. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade[J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(6): 424.
- [18] 郑学博, 周静, 崔健, 等. 不同施肥措施对沿淮区麦-玉周年产量及氮素利用的影响[J]. *土壤*, 2012,44(3): 402–407.
Zheng Xuebo, Zhou Jing, Cui Jian, et al. Effects of different fertilization treatments on yields and nitrogen utilization of winter wheat-summer maize rotation system in region along Huai River[J]. *Soils*, 2012,44(3): 402–407. (in Chinese)
- [19] 李昊儒, 郝卫平, 梅旭荣, 等. 不同灌溉施肥措施对夏玉米-冬小麦农田 N₂O 排放和产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018,34(16): 103–112.
Li Haoru, Hao Weiping, Mei Xurong, et al. Effect of different irrigation and fertilization managements on N₂O emissions and yield in summer maize-winter wheat field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018,34(16): 103–112. (in Chinese)
- [20] 徐驰. 气候变化对华北农田粮食生产和净温室效应的影响及其适应技术[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.

- Xu Chi. The effects and adaptive technology of climate change on grain production and net greenhouse effect in North China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
- [21] Zhang Y, Xiao X, Wu X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000—2016 [J]. *Scientific Data*, 2017,4(1):170165.
- [22] Li X, Xiao J. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(5): 517.
- [23] He S, Zhang Y, Ma N, et al. A daily and 500 m coupled evapotranspiration and gross primary production product across China during 2000—2020[J]. *Earth System Science Data*, 2022,14(12): 5463–5488.
- [24] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate[J]. *Science*, 2010,329(5993): 834–838.
- [25] Yu P, Zhou T, Luo H, et al. Global pattern of ecosystem respiration tendencies and its implications on terrestrial carbon sink potential[J]. *Earth's Future*, 2022,10(8): 19.
- [26] Thornton P E, Rosenbloom N A. Ecosystem model spin-up: estimating steady state conditions in a coupled terrestrial carbon and nitrogen cycle model[J]. *Ecological Modelling*, 2005,189(1–2): 25–48.
- [27] 何丽鸿, 王海燕, 雷相东. 基于 BIOME-BGC 模型的长白落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性[J]. *应用生态学报*, 2016,27(2): 412–420.
- He Lihong, Wang Haiyan, Lei Xiangdong. Parameter sensitivity of simulating net primary productivity of *Larix olgensis* forest based on BIOME-BGC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(2): 412–420. (in Chinese)
- [28] 李一哲, 张廷龙, 刘秋雨, 等. 生态过程模型敏感参数最优取值的时空异质性分析——以 BIOME-BGC 模型为例[J]. *应用生态学报*, 2018,29(1): 84–92.
- Li Yizhe, Zhang Tinglong, Liu Qiuyu, et al. Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: the BIOME-BGC model as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,29(1): 84–92. (in Chinese)
- [29] 李英. 生态过程模型参数敏感性的时空异质性分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- Li Ying. Spatiotemporal heterogeneity analysis of parameter sensitivity of ecological process model: the BIOME-BGC model as an example[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [30] 黄卓. 气候变化对秦岭森林和农田生态系统碳水通量变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- Huang Zhuo. Influences of climate change on the carbon and water fluxes of forest and cropland ecosystems in the Qinling Mountains[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)
- [31] 崔茜琳, 何云玲, 李宗善. 青藏高原植被水分利用效率时空变化及与气候因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(6): 1525–1532.
- Cui Xilin, He Yunling, Li Zongshan. Spatial-temporal variation of vegetation water use efficiency and its relationship with climate factors over the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(6): 1525–1532. (in Chinese)
- [32] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. *地理学报*, 2011,66(5): 589–598.
- Mo Xingguo, Liu Suxia, Lin Zhonghui, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(5): 589–598. (in Chinese)
- [33] Wang X, Lei H, Li J, et al. Climate and management impacts on the spatiotemporal dynamics of water-carbon fluxes in the North China Plain[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023,343: 108270.
- [34] Mo X, Chen X, Hu S, et al. Attributing regional trends of evapotranspiration and gross primary productivity with remote sensing: a case study in the North China Plain[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017,21(1): 295–310.
- [35] 曹云, 张称意, 孙应龙, 等. 2000—2020 年华北地区植被固碳能力时空变化特征及其气象影响分析[J]. *生态学报*, 2023,43(9): 3488–3499.
- Cao Yun, Zhang Chenyi, Sun Yinglong, et al. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration and their responses to climatic factors in North China from 2000 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(9): 3488–3499. (in Chinese)
- [36] Zhou W, Guan K, Peng B, et al. Quantifying carbon budget, crop yields and their responses to environmental variability using the ecosys model for U. S. Midwestern agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021,307: 108521.
- [37] Lu Q, Liu H, Wei L, et al. Global prediction of gross primary productivity under future climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2024,912: 169239.
- [38] 李春波, 张园, 刘雅各, 等. 长白山自然保护区总初级生产力时空变化特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(5): 1341–1348.
- Li Chunbo, Zhang Yuan, Liu Yage, et al. Temporal and spatial variations and influencing factors of gross primary productivity in Changbai Mountain Nature Reserve, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023,34(5): 1341–1348. (in Chinese)
- [39] 刘博, 徐涛, 徐强强, 等. 基于叶绿素荧光遥感的江西省稻田总初级生产力估算及其气象驱动因素研究[J]. *农业机*

械学报, 2024, 55(8): 391–400.

Liu Bo, Xu Tao, Xu Qiangqiang, et al. Estimation of gross primary production of paddy field in Jiangxi Province based on remote sensing measured sun-induced chlorophyll fluorescence and its correlation with meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 391–400. (in Chinese)

- [40] Luyssaert S, Inglis I, Jung M, et al. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database [J]. Global Change Biology, 2007, 13(12): 2509–2537.
- [41] Johnston A S A, Meade A, Ardö J, et al. Temperature thresholds of ecosystem respiration at a global scale[J]. Nature Ecology & Evolution, 2021, 5(4): 487–494.
- [42] Garbulsky M, Penuelas J, Papale D, et al. Patterns and control of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19: 253–267.
- [43] Curiel Yuste J, Baldocchi D, Misson L, et al. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture in two contrasting ecosystems[J]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2006, 13(9): 2018–2035.
- [44] Chen X, Mo X, Hu S, et al. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014[J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6): 661–680.
- [45] 陈治仲, 陈上, 线子仪, 等. 黄淮海平原植被日光诱导叶绿素荧光对骤旱的响应[J]. 农业机械学报, 2024, 55(10): 327–338.
Chen Zhizhong, Chen Shang, Xian Ziyi, et al. Response of solar-induced chlorophyll fluorescence to flash drought in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 327–338. (in Chinese)
- [46] Liang L, Geng D, Yan J, et al. Remote sensing estimation and spatiotemporal pattern analysis of terrestrial net ecosystem productivity in China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1902.

(上接第 295 页)

- [26] 田有文, 吴伟, 林磊, 等. 基于深度学习与高光谱成像的蓝莓果蝇虫害无损检测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 393–401.
Tian Youwen, Wu Wei, Lin Lei, et al. Nondestructive detection of blueberry fruit fly pests based on deep learning and hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 393–401. (in Chinese)
- [27] 董建江, 田野, 张建兴, 等. 基于随机森林算法的底栖动物高光谱数据分类方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(10): 3015–3022.
Dong Jianjiang, Tian Ye, Zhang Jianxing, et al. Research on the classification method of benthic fauna based on hyperspectral data and random forest algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(10): 3015–3022. (in Chinese)
- [28] 祝清震, 朱艳秋, 王爱臣, 等. 基于无人机多光谱植被指数与纹理特征的水稻叶绿素含量反演[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 287–293.
Zhu Qingzhen, Zhu Yanqiu, Wang Aichen, et al. Accurate inversion of rice chlorophyll content by integrating multispectral and texture features derived from UAV multispectral imagery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 287–293. (in Chinese)
- [29] Bari B S, Islam M N, Rashid M, et al. A real-time approach of diagnosing rice leaf disease using deep learning-based Faster R-CNN framework[J]. PeerJ Computer Science, 2021, 7: e432.
- [30] 赵娟, 沈懋生, 浦育歌, 等. 基于近红外光谱与多品质指标的苹果出库评价模型研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 386–395.
Zhao Juan, Shen Maosheng, Pu Yuge, et al. Out-of-warehouse evaluation and prediction model of apple based on near-infrared spectroscopy combined with multiple quality indexes [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 386–395. (in Chinese)
- [31] Feng Z H, Wang L Y, Yang Z Q, et al. Hyperspectral monitoring of powdery mildew disease severity in wheat based on machine learning[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 828454.
- [32] Zhang X, Vinatzer B A, Li S. Hyperspectral imaging analysis for early detection of tomato bacterial leaf spot disease[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 27666.
- [33] Gold K M, Townsend P A, Chlus A, et al. Hyperspectral measurements enable pre-symptomatic detection and differentiation of contrasting physiological effects of late blight and early blight in potato[J]. Remote Sensing, 2020, 12(2): 286.