



王思嘉, 贾蓉, 臧华栋, 葛军勇, 曹丽霞, 李玥, 靳军莉, 吴迪. 不同气候变化情景下北方农牧交错带轮作模式定向设计——以河北省张北县为例[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 1-11.

WANG Sijia, JIA Rong, ZANG Huadong, GE Junyong, CAO Lixia, LI Yue, JIN Junli, WU Di. Targeted design of crop rotation patterns in agro-pastoral ecotone of northern China under different climate change scenarios: A case study of Zhangbei County, Hebei Province[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 1-11.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.01

不同气候变化情景下北方农牧交错带轮作模式定向设计 ——以河北省张北县为例

王思嘉¹ 贾蓉² 臧华栋² 葛军勇³ 曹丽霞³ 李玥⁴ 靳军莉⁵ 吴迪^{4*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国农业大学 农学院, 北京 100193;

3. 张家口市农业科学院 河北省高寒作物研究所, 河北 张家口 075000;

4. 中国科学院 沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016;

5. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要 为应对气候变暖和极端天气频率增加, 定向设计和优化北方农牧交错带区域农业生产的种植模式, 本研究基于河北省张北县4种作物11种轮作模式的长期定位试验数据, 运用调参验证后的APSIM模型(Agricultural production systems simulator), 模拟该地区8种气候情景(3种温度升高、3种极端降水、2种温度升高和极端降水耦合)下228种轮作模式的产量, 通过生命周期评价法、碳足迹评价法和投入产出法对比分析不同轮作模式的产能-生态-经济效益。结果表明: 温度升高降低了228种轮作模式的平均10年总能量当量产量、平均10年总综合收益和平均土壤固碳量, 分别减产9.85%~38.02%、减收13.61%~54.99%、降低26.25%~85.08%。相反, 温度升高增加了228种轮作模式的平均10年总净碳排放量, 增排51.19%~165.89%。在温度升高耦合极端降水情景下, 蚕豆-燕麦轮作模式10年总能量当量产量最高, 马铃薯-蚕豆轮作模式10年总净碳排放量最低, 蚕豆-马铃薯轮作模式10年总综合收益最高。随着极端降水强度的增加, 228种轮作模式的增产、增收和减排能力都有所下降。本研究结果为北方农牧交错带地区制定多目标协同的多样化种植策略提供科学依据, 保障气候变化下的粮食安全, 促进农业可持续发展。

关键词 极端气候变化; 中低产田; 多样化轮作模式; APSIM模型; 多目标需求

中图分类号 S344.1

文章编号 1007-4333(2025)12-0001-11

文献标志码 A

Targeted design of crop rotation patterns in agro-pastoral ecotone of northern China under different climate change scenarios: A case study of Zhangbei County, Hebei Province

WANG Sijia¹, JIA Rong², ZANG Huadong², GE Junyong³, CAO Lixia³,
LI Yue⁴, JIN Junli⁵, WU Di^{4*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

3. Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Cold Crops Research Institute of Hebei Province,
Zhangjiakou 075000, China;

4. Shenyang Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

5. China Meteorological Administration Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China)

收稿日期: 2025-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1901100)

第一作者: 王思嘉(ORCID:0009-0009-8577-7452), 博士研究生, E-mail: WangSJ0514@outlook.com

通讯作者: 吴迪(ORCID:0000-0002-8005-2569), 研究员, 主要从事土壤碳氮生物地球化学循环研究, E-mail: wudi@iae.ac.cn

Abstract To address climate warming and the increasing frequency of extreme weather events, this study aimed to design and optimize cropping patterns for agricultural production in agro-pastoral ecotone of northern China. Based on long-term field trial data on 11 crop rotation patterns for 4 crops in Zhangbei County, Hebei Province, the APSIM model (Agricultural production systems simulator), which had been calibrated and validated, was employed to simulate the yields of 228 crop rotation patterns under 8 climate scenarios (3 warming scenarios, 3 extreme precipitation scenarios, and 2 coupled scenarios of warming and extreme precipitation) in the region. Subsequently, the production capacity, ecological, and economic benefits of different crop rotation patterns were compared and analyzed through life cycle assessment, carbon footprint assessment, and input-output methods analysis. The results indicated that rising temperatures reduced the average 10 years total energy equivalent yield, average 10 years total comprehensive income, and average soil carbon sequestration across 228 crop rotation patterns, with respective reductions of 9.85%-38.02%, 13.61%-54.99%, 26.25%-85.08%. In contrast, rising temperatures increased the average 10 years total net carbon emissions of 228 crop rotation patterns by 51.19%-165.89%. Under the scenarios of temperature rise coupled with extreme precipitation, the faba bean-oat rotation pattern had the highest 10 years total energy equivalent yield, the potato-faba bean rotation pattern had the lowest 10 years total net carbon emissions, and the faba bean-potato rotation pattern had the highest 10 years total comprehensive income. However, with the increase in extreme precipitation intensity, the yield increasing, income increasing, and emission reduction capabilities of the 228 crop rotation patterns all decreased. The findings of this study provide scientific basis for formulating multi-objective and coordinated diversified cropping strategies in agro-pastoral ecotone of northern China, ensuring food security under climate change and promoting sustainable agricultural development.

Keywords extreme climate changes; low-yield fields; diversified crop rotation patterns; APSIM model; multi-objective demands

全球正在经历以变暖、极端气候事件强度和频率显著提高为主要特征的气候变化^[1]。根据IPCC第六次气候变化评估报告^[2]的预测,到本世纪中叶,当前适合主要作物生长的区域中,预计约有10%将不再适合气候种植。与此同时,如果温室气体(Green house gas, GHG)排放持续增加,到2100年,全球增温幅度将可能达到4℃,这将直接影响作物的生长发育,导致作物产量显著下降^[3]。此外,有研究表明,气候变化可能改变水循环模式,影响全球的水资源供应和需求^[4],这将对雨养农业的作物产量造成重要影响,非抗旱作物因水分供应的制约,增产潜力会受到抑制^[5]。因此,研究作物生产对极端气候事件的响应,对于保障作物的高产和稳产具有重要意义。

北方农牧交错带是我国北方重要的生态屏障,在防风固沙、净化河流、滋养水体和防止水土流失等方面发挥着重要作用^[6]。然而,该区域长期存在作物种植结构单一、农田产能低而不稳和生态服务功能退化等问题^[7-8]。与此同时,该区域具有生境异质性强、作物种类多和光热资源充足的优势。因此,如何充分发挥区域资源禀赋,定向设计产能与生态协同提升的作物多样化种植模式成为亟需破

解的难题。此外,该区域受全球气候变化影响日益加剧,以河北省张北地区为例,近50年来当地气温总体呈上升趋势,且平均每10年增长0.4℃^[9]。在降水格局方面,虽然降水量总体变化不大,但近年来极端降水事件频发,如2023年7月末,河北省张北地区发生暴雨事件,数日内降水量甚至超过多年累积降水量^[10]。在全球变暖背景下,未来极端异常的天气气候事件强度加强、持续时间更长且影响程度更为显著。因此,如何针对我国北方农牧交错带的自然资源、气候条件和耕作方式等特征开展气候变化背景下作物的生产研究,已成为该地区农业可持续发展亟待解决的关键问题。

在人多地少的国情和粮食安全的双重压力下,我国北方农牧交错带生态服务功能提升无法照搬国外休耕的农田保护模式,须探索集约化利用模式下农田产能提升与生态服务协同的途径与机理^[11]。作物多样化种植指的是通过间作、轮作和覆盖作物的方式在农田中同时种植多种作物。与传统集约农业相比,作物多样化种植有助于提升田块、农场和景观尺度上的农田生态系统服务多功能性。我国学者通过发掘与革新传统农耕技术,构建了适用于不同生态区的多样化轮作模式,包括粮食

作物与豆科、饲料作物等的轮作体系^[12-13]。研究表明,这一模式不仅具有较强的增产稳产能力,还可以改善土壤养分循环、降低农田生态系统碳足迹、消除连作障碍,是一种行之有效的新型种植模式^[14-17]。此外,关于气候变化对轮作种植模式的影响研究指出,全球气候变化背景下,作物种植模式将发生显著改变^[18]。从宏观角度来看,气候变化导致了轮作系统种植范围及作物品种的北移;从微观角度来看,气温上升加速了轮作系统内作物的生长发育进程,对农作物的产量产生了影响,同时也促进了轮作系统内作物品种的更替^[19]。因此,针对未来不同气候变化情景,研究北方农牧交错带不同作物种植模式对气候变化的响应机制,通过定向设计和优化种植模式,保障作物产量稳定性和生态服务价值,降低农业生产对气候变化的敏感性和脆弱性,对于提高资源利用效率和保障粮食安全具有重要的科学意义。

作物模型具有强大的计算能力以及多种功能,能够综合考虑气候、土壤和管理等因素对作物生长的影响,以此实现对作物生长发育全过程的模拟,可为北方农牧交错带分析不同轮作模式的作物产量研究提供有力的工具保障^[20-22]。澳大利亚农业生产系统组研发的 APSIM (Agricultural production systems simulator) 模型是一种以土壤模块为基础的动态仿真机理模型^[23],它能实现作物不同轮作模式的生产过程模拟,还可以分析不同温度、气候条件、水肥管理和种植方式等对作物产量的影响,同时为人们提供动态决策和应变管理,为作物稳产与高产奠定基础。然而,在气候变化背景下,针对包含多种作物及休耕措施的多样化轮作模式的模拟与验证研究仍相对有限^[24-27]。因此,可利用 APSIM 模型对半干旱地区不同轮作模式应对气候变化的潜力进行量化评估,进而确定适应特定气候变化情境下的最优轮作模式。

本研究基于河北省张北县不同轮作制度长期定位试验数据,围绕北方农牧交错带的燕麦、蚕豆、胡麻和苜蓿等特色粮油饲作物,结合区域生产-生态-经济的多目标需求,基于作物生物学特性与生态位特点,利用调整模块参数并校准验证的 APSIM 模型^[28],分析该区域 8 种气候情景下 228 种轮作模式的产量数据,评估多目标之间的权衡和协同。旨在探究气候变化(尤其是温度与降水变化)对不同

轮作模式在能量当量产量、净碳排放量及综合收益方面的影响,以揭示其内在变化规律,并评估多样化轮作模式应对气候变化的潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

轮作制度长期定位试验地点在河北省张家口市张北燕麦科技小院试验地(41.34° N, 114.91° E),处于农牧交错带及其边缘地区,试验数据用于 APSIM 模型调参与验证。试验于 2017 年开始,试验各小区采用随机区组的排列方式,各小区面积为 24 m²(2.4 m×10.0 m)。田间试验包括燕麦-马铃薯、燕麦-胡麻和燕麦-蚕豆等 11 个轮作处理,每个处理 4 次重复,于作物成熟期进行测产^[28]。燕麦、马铃薯、蚕豆和胡麻的播种日期为 5 月中旬,播种量分别为 150 kg/hm²、6 000 株/hm²、24 kg/hm²和 45 kg/hm²;播种行距分别为 25、67、40 和 40 cm,收获日期为 9 月上旬,均按照当地种植习惯进行播种和田间管理。

1.2 模型概述及参数设置

1.2.1 APSIM 模型概述

APSIM 模型模拟是一个综合过程,涉及气象模块、作物模块、管理模块、土壤模块和用以连接各模块的中心引擎等多模块的协调与配合。其中,气候模块包括逐日气象要素变量,可进行驱动物物生长过程、土壤剖面水肥动态和土壤有机质循环等过程的模拟;作物模块可进行作物生长的关键过程模拟,经参数调整和验证后可模拟燕麦、蚕豆和胡麻等多种作物;土壤模块可进行土壤碳氮循环和水分利用等过程的模拟;管理模块用于设置播种、施肥和收获等管理措施以及单作、轮作和间作等条件规则。

1.2.2 模型参数设置和气象数据

研究团队已基于前期在河北省张北县的轮作制度长期定位试验数据对模型参数进行调试,实现本地化并加以验证,获得了研究区域燕麦、马铃薯、蚕豆和胡麻 4 种作物的品种参数,包括控制作物生长和产量形成的参数^[28]。经验证,APSIM 模型对北方农牧交错带燕麦、马铃薯、蚕豆和胡麻轮作产量模拟的精度较高,NRMSE 值均<20%,可用于模拟分析该地区多样化轮作模式的生产潜力以及生态效益^[28-29]。本研究使用的气象数据均来自中国气

象数据网(<https://data.cma.cn/>),主要包括逐日太阳辐射量(MJ/m²)、逐日气温(℃)和逐日降水量(mm)等。

1.3 轮作模式设计

本研究对4种作物(燕麦、马铃薯、蚕豆和胡麻)和休耕以10年(2012—2021年)为期限,进行有顺序的轮作排列组合,并根据当地生产实际情况设定10年内休耕不能超过2次,以此得到228种轮作模式,其中包括5种组合形式(2种作物轮作、3种作物轮作、4种作物轮作、3种作物轮作+休耕和4种作物轮作+休耕)。

1.4 区域气候变化趋势

根据IPCC第六次评估报告^[2]预测,若未来几十年内未能在全球范围内大幅减少温室气体排放,全球升温将在本世纪内超过2℃,最高可达4℃,从而对全球的粮食生产造成显著的负面影响。基于此,本研究设置1个CK处理,3个温度升高处理:T1(升温2℃)、T2(升温4℃)、T3(升温6℃),全年进行升温模拟。通过分析2012—2021年河北省张北县地面气象资料,该地区2012—2021年间夏季7—9月降水量平均为88.9 mm,最高为242.3 mm,最低为22.0 mm,单次最大降水量为57.6 mm。基于此,研究设置2个极端降水处理:月降水总量为300 mm,最大单次降水量分别为E1(150 mm)和E2(300 mm),将总降水量按照单次降水量在30 d内通过控制相同降水间隔均匀分配,均在每年的7—9月进行夏季极端降水处理,其余月份保持环境降水。同时设置2个温度升高和极端降水相耦合的处理:T1E1(升温2℃,最大单次降水量150 mm)、T1E2(升温2℃,最大单次降水量300 mm)。

基于上述8种气候变化情景,对河北省张北县2012—2021年的气象数据进行处理,然后分别对228种轮作模式进行10年的产量模拟,设置模拟从2012年开始至2021年结束,各轮作模拟的作物种植次序按照不同轮作模式名称中的作物顺序进行轮作,直至10年模拟完成。

1.5 轮作模式评价方法

1.5.1 能量当量产量计算

将不同轮作模式中各作物的产量换算为能量当量产量进行分析^[30]。计算公式如下:

$$E = 10^{-3} Y \times e \quad (1)$$

式中: E 为作物能量当量产量,GJ/hm²; Y 为各作物

每公顷产量,kg/hm²; e 为每g作物的能量含量,KJ/g^[31]。

1.5.2 碳足迹计算

农业生产投入碳足迹为不同轮作模式在其生命周期内或生产过程中使用各种肥料、种子和农药等农资产生的碳排放量之和,常用生命周期评价法对不同轮作模式下的碳足迹进行评价^[32-33]。计算公式如下:

$$CF_a = \sum CF_i = \sum G_i \times \partial_i \quad (2)$$

式中: CF_a 为农资投入碳排放总量,kg/hm²; CF_i 为各类农资投入所产生的碳排放,kg/hm²; G_i 为各农资使用量,kg/hm²; ∂_i 为各类农资的碳排放系数,kg/kg^[28]。

农业生产过程中的氧化亚氮(N₂O)排放主要来源于氮肥的使用^[34]:

$$CF_{N_2O} = DCF_{N_2O} + SCF_{N_2O} + LCF_{N_2O} \quad (3)$$

$$DCF_{N_2O} = N \times f_1 \times 44/28 \times 298 \quad (4)$$

$$SCF_{N_2O} = N \times F_s \times f_2 \times 44/28 \times 298 \quad (5)$$

$$LCF_{N_2O} = N \times F_L \times f_3 \times 44/28 \times 298 \quad (6)$$

式中: DCF_{N_2O} 、 SCF_{N_2O} 和 LCF_{N_2O} 分别为直接N₂O排放、氮沉降和淋失等引起的间接N₂O排放,kg/hm²; f 为N₂O排放的因子系数,分别为0.01、0.01和0.0075; F_s 为以NH₃等形式挥发的化肥氮比例(0.1 kg/kg), F_L 为土壤中淋失等的氮比例(0.3 kg/kg); 44/28为N₂O与N₂O-N的换算系数; 298为N₂O与CO₂当量的换算系数。

不同轮作模式生产过程中的单位面积碳足迹见表1,计算公式为^[28, 34]:

$$CF = CF_a + CF_{N_2O} \quad (7)$$

1.5.3 净碳排放量计算

土壤固碳量计算公式为:

$$SOC_{seq} = SOC_{con} \times BD \times H \times 100 \quad (8)$$

$$\Delta SOC = SOC_{seq-t} - SOC_{seq-0} \quad (9)$$

式中: SOC_{seq} 为土壤有机碳储量,t/hm²; BD 为土壤容重,g/cm³; H 为土壤深度,cm; 100为转换系数; SOC_{seq-t} 为10年轮作后土壤有机碳储量,t/hm²; SOC_{seq-0} 为初始土壤有机碳储量,t/hm²。

净碳排放量计算公式为:

$$C = CF - \Delta SOC \quad (10)$$

1.5.4 生态经济效益计算

总收入根据各作物的轮作产量与收购价格来

表 1 轮作种植过程中不同作物的单位面积碳足迹

Table 1 Carbon footprint per unit area of different crops in the process of crop rotation

项目 Item	燕麦 Oat	马铃薯 Potato	蚕豆 Faba bean	胡麻 Flax
种子 Seed	174.00	121.80	28.32	37.35
氮肥 Nitrogen fertilizer	446.40	1 190.40	297.60	595.20
磷肥 Phosphorus fertilizer	68.40	109.44	17.10	85.50
农药 Pesticide	17.11	17.11	17.11	17.11
柴油 Diesel	180.28	160.36	285.65	214.47
人工 Artificial	7.05	7.05	7.05	7.05
N ₂ O 排放 N ₂ O emission	558.43	1 489.15	372.29	744.57
合计 Total	1 451.67	3 095.31	1 025.12	1 701.25

计算。总支出根据农业生产过程中化肥、种子、农药和劳动力等的投入成本计算。净收益计算公式为：

$$I_{\text{net}} = I_{\text{total}} - E_{\text{total}} \quad (11)$$

式中： I_{net} 、 I_{total} 和 E_{total} 分别为不同轮作模式的净收益、总收入和总支出，元/hm²。

据中国碳排放交易网(<http://www.tanpaifang.com>)统计，目前我国国内碳交易市场每吨碳的平均价格为 51.66 元。综合收益计算公式为：

$$E_c = C \times P_c \quad (12)$$

$$B_{\text{com}} = I_{\text{net}} - E_c \quad (13)$$

式中： E_c 为不同轮作模式的碳排放成本，元/hm²； P_c 为碳交易价格，元/t； B_{com} 为综合收益，元/hm²。

2 结果与分析

2.1 气候变化对不同轮作模式平均产能-生态-经济的影响

从能量当量产量来看(图 1)，相比于 CK、T1、T2 和 T3 气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总能量当量产量分别降低了 9.85%、21.98% 和 38.02%，E1 和 E2 气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总能量当量产量分别提高了 9.40% 和 9.23%。在 8 种气候变化模拟情景中，E1 的平均 10 年总能量当量产量最高，为 2.88×10^5 GJ/hm²；T3 的平均 10 年总能量当量产量最低，为 1.63×10^5 GJ/hm²。

从净碳排放量来看(图 1)，相比于 CK、T1、T2 和 T3 气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总净碳排放量分别提高了 51.19%、105.59% 和 165.89%，E1 和 E2 这 2 种气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总净碳排放量分别降低了 23.74%

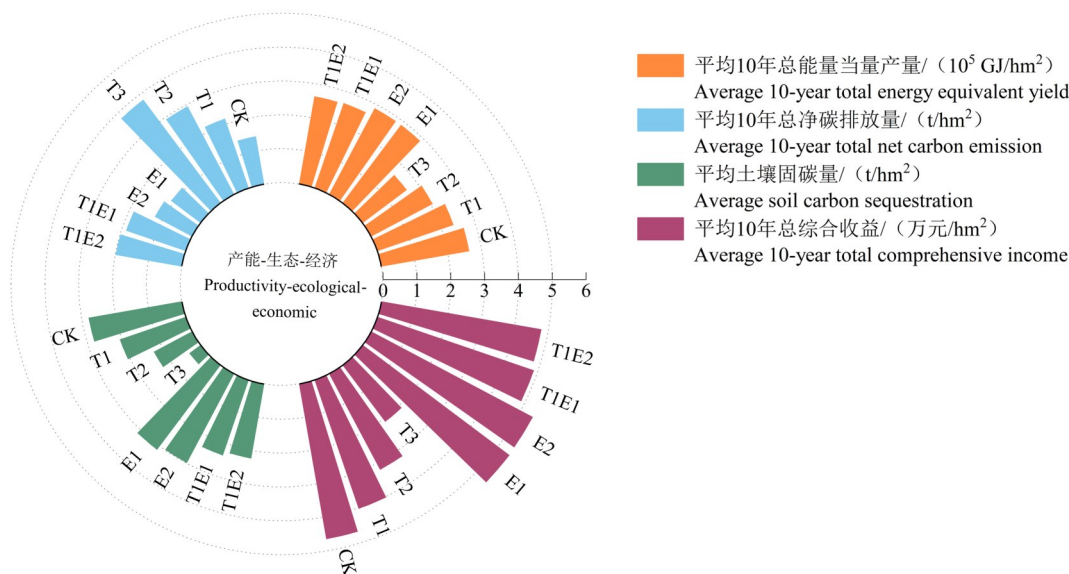
和 13.36%。在 8 种气候变化模拟情景中，E1 的平均 10 年总净碳排放量最低，为 1.09 t/hm²；T3 的平均 10 年总净碳排放量最高，为 3.80 t/hm²。

从土壤固碳量来看(图 1)，相比于 CK、T1、T2 和 T3 气候情景下 228 种轮作模式的平均土壤固碳量分别降低了 26.25%、54.15% 和 85.08%，E1 和 E2 气候情景下 228 种轮作模式的平均土壤固碳量分别提高了 12.17% 和 6.85%。在 8 种气候变化模拟情景中，E1 的平均土壤固碳量最高，为 3.14 t/hm²；T3 的平均土壤固碳量最低，为 0.42 t/hm²。

从综合收益来看(图 1)，相比于 CK、T1、T2 和 T3 气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总综合收益分别降低了 13.61%、30.97% 和 54.99%，E1 和 E2 气候情景下 228 种轮作模式的平均 10 年总综合收益分别提高了 16.38% 和 15.98%。在 8 种气候变化模拟情景中，E1 的平均 10 年总综合收益最高，为 5.42 万元/hm²；T3 的平均 10 年总综合收益最低，为 2.10 万元/hm²。

2.2 温度升高和极端降水耦合对不同轮作模式的影响

在 T1E1 气候情景下(图 2)，蚕豆-燕麦、燕麦-蚕豆和蚕豆-燕麦-马铃薯轮作模式的 10 年总能量当量产量在 228 种轮作模式中相对较高，分别为 3.78×10^5 、 3.76×10^5 和 3.53×10^5 GJ/hm²。马铃薯-蚕豆、胡麻-燕麦-蚕豆-马铃薯-休耕和燕麦-胡麻-蚕豆-马铃薯-休耕轮作模式的 10 年总净碳排放量在 228 种轮作模式中相对较低，分别为 0.54、0.92 和 0.99 t/hm²。蚕豆-马铃薯、马铃薯-蚕豆和马铃薯-蚕豆-胡麻轮作模式的 10 年总综合收益在 228 种轮作模式中相对较高，分别为 6.41、6.41 和 6.39 万元/hm²。

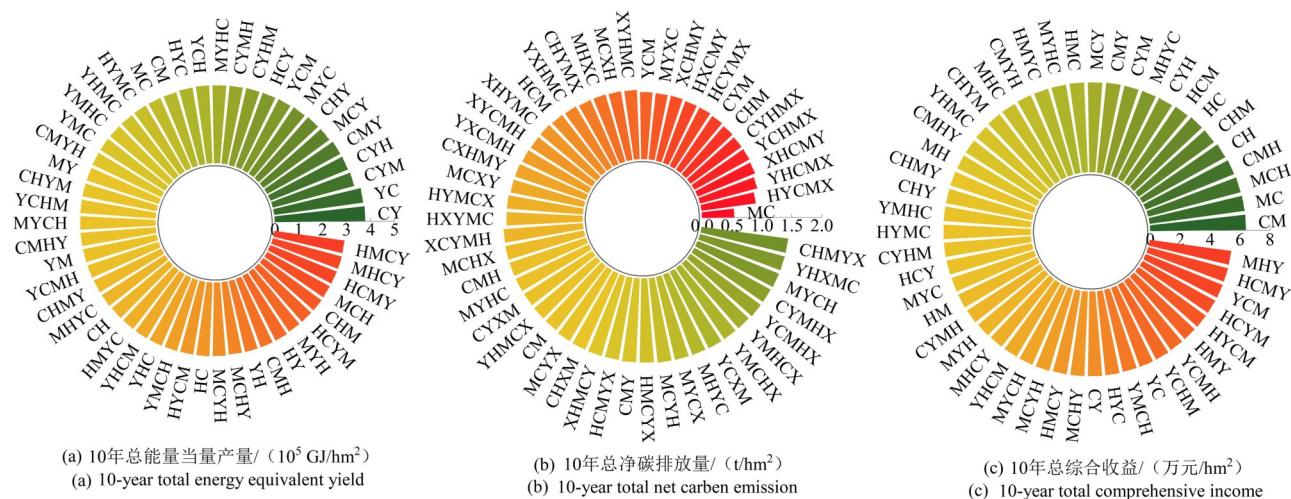


T1, 增温 2 °C; T2, 增温 4 °C; T3, 增温 6 °C; E1, 最大单次降水量 150 mm; E2, 最大单次降水量 300 mm; T1E1, 增温 2 °C, 最大单次降水量 150 mm; T1E2, 增温 2 °C, 最大单次降水量 300 mm。图 4 同。

T1, warming of +2 °C; T2, warming of +4 °C; T3, warming of +6 °C; E1, maximum single-event precipitation of 150 mm; E2, maximum single-event precipitation of 300 mm; T1E1, warming of +2 °C and 150 mm maximum precipitation; T1E2, warming of +2 °C and 300 mm maximum precipitation. The same as Figure 4.

图 1 8 种气候变化情景对 228 种轮作模式平均产能-生态和经济的影响

Fig. 1 Impacts of 8 climate change scenarios on the average productivity-ecological-economic benefits of 228 crop rotation patterns



文中轮作模式过多,将 228 种轮作模式的评价指标按数值大小排序后,选取数值最高的 50 种进行展示。图中 Y 代表燕麦, M 代表马铃薯, C 代表蚕豆, H 代表胡麻, X 代表休耕。下同。

The article includes too many crop rotation patterns. After ranking the evaluation indicators of the 228 crop rotation patterns by numerical value, the top 50 were selected for display. In the figure, Y represents Oat, M represents Potato, C represents Faba bean, H represents Flax, and X represents fallow land. The same below.

图 2 T1E1 气候情景下 228 种轮作模式的产能-生态-经济效益

Fig. 2 Productivity-ecological-economic benefits of 228 crop rotation patterns under T1E1 climate scenario

在 T1E2 气候情景下(图 3),蚕豆-燕麦、燕麦-蚕豆、蚕豆-燕麦-胡麻轮作模式的 10 年总能量当量产量在 228 种轮作模式中相对较高,分别为

3.78×10^5 、 3.76×10^5 和 3.50×10^5 GJ/hm²。马铃薯-蚕豆、胡麻-燕麦-蚕豆-马铃薯-休耕和燕麦-胡麻-蚕豆-马铃薯-休耕轮作模式的 10 年总净碳排放

量在 228 轮作模式中相对较低,分别为 0.79、1.10 和 1.16 t/hm²。蚕豆-胡麻、胡麻-蚕豆和马铃薯-蚕豆-

胡麻轮作模式的 10 年总综合收益在 228 种轮作模式中相对较高,分别为 6.37、6.25 和 6.24 万元/hm²。

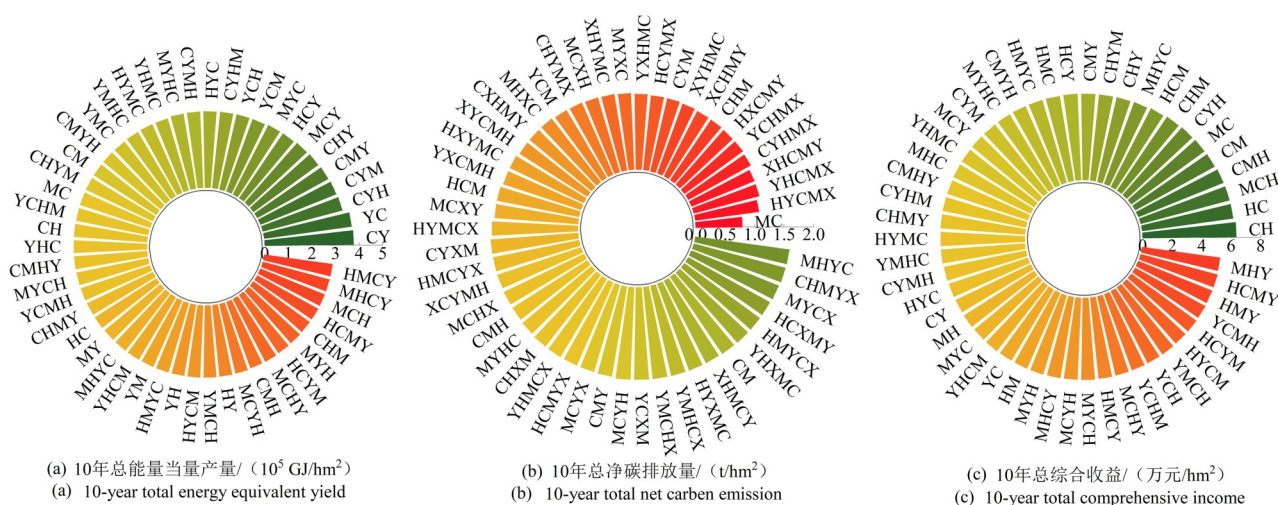


图 3 T1E2 气候情景下 228 种轮作模式的产能-生态-经济效益

Fig. 3 Productivity-ecological-economic benefits of 228 crop rotation patterns under T1E2 climate scenario

2.3 气候变化对 4 种作物能量当量产量的影响

不同气候变化趋势对 4 种作物的年平均能量当量产量具有差异性影响(图 4)。燕麦、马铃薯、胡麻和蚕豆 4 种作物的年平均能量当量产量均随气温升高而降低,T3 气候情景 4 种作物的年平均能量当量产量均最低,相比于 CK 分别降低了 31.73%、38.20%、20.31% 和 53.37%。燕麦、马铃薯和蚕豆

的年平均能量当量产量随降水改变而增加,E1 气候情景下 3 种作物的年平均能量当量产量均最高,相比于 CK 分别提升了 1.00%、40.07% 和 10.58%。胡麻的年平均能量当量产量随降水改变而降低,在 E1 气候情景下最低为 0.23×10⁵ GJ/hm²,相比于 CK 降低了 3.73%。

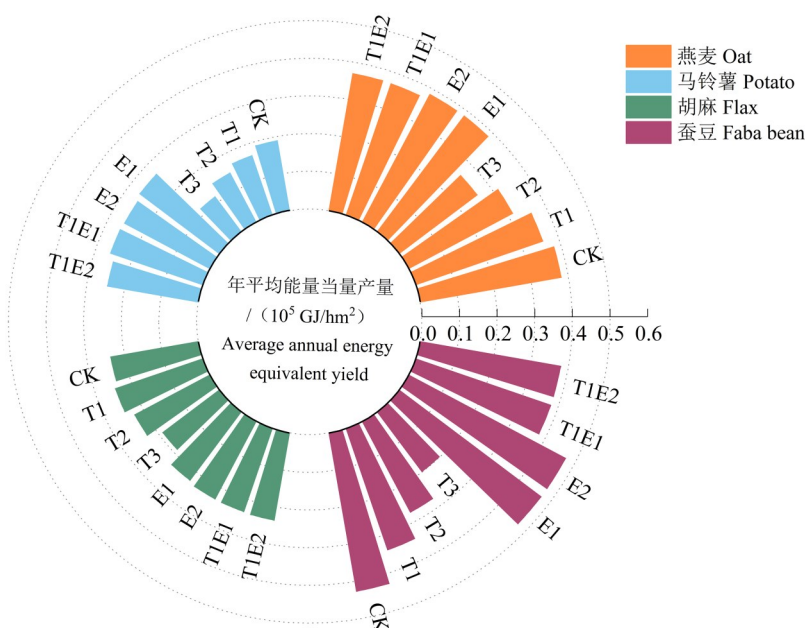


图 4 8 种气候变化情景下 4 种作物的年平均能量当量产量

Fig. 4 Average annual energy equivalent yield of 4 crops under 8 climate change scenarios

温度升高和极端降水耦合对燕麦、胡麻和蚕豆的年平均能量当量产量均产生了负面影响,T1E1气候情景下蚕豆的年平均能量当量产量最高为 0.38×10^5 GJ/hm²,相比于CK仍降低11.00%。温度升高和极端降水相耦合对马铃薯的年平均能量当量产量产生了正向作用,T1E1气候情景下马铃薯的年平均能量当量产量最高为 0.26×10^5 GJ/hm²,相比于CK提升了37.22%。

3 讨论

受地理和气候变化的影响,我国北方农牧交错带地区具有气候复杂多变、极端天气频发等特点^[35-36]。前期研究已结合轮作制度长期定位试验数据,证明了APSIM模型在模拟不同轮作模式上具有较好效果,产量模拟值与实测值间具有较强一致性^[28]。本研究利用经过验证的APSIM模型,模拟了北方农牧交错带地区2012—2021年8种气候情景下228种轮作模式的作物产量情况。模拟结果显示,随着温度和极端降水强度的增加,228种轮作模式的平均10年总能量当量产量呈现降低趋势,这与前人的研究结果一致^[37-39]。可能是土壤水分过多(如内涝、积水、洪水等)导致土壤缺氧,从而降低作物产量^[39]。温度升高则会加剧作物的产量变异性以及减产风险,这可能是较高的温度加快了作物的生长速度,缩短作物的生育期,导致潜在生物量积累和产量减少^[40]。北方农牧交错带是对气候变化极其敏感的地区,温度和极端降水强度的增加会显著影响不同轮作模式的作物产量。

气候因素会影响作物的生长、代谢过程和土壤微生物群落的活动,最终影响作物生长过程中的碳排放^[41]。本研究结果显示,相比CK,随着年平均温度的升高,228种轮作模式的平均10年总净碳排放量呈现上升趋势,这与前人的研究结果一致^[42]。升高的温度可能通过加速作物的光合作用和呼吸作用,导致二氧化碳和氧化亚氮等气体排放量增加^[43]。此外,极端降水强度的增加对228种轮作模式的平均10年总净碳排放量产生了正面影响,但排放量仍低于CK,这与前人的研究结果相近^[44-45]。一方面,增加的降水可能会减少土壤呼吸,由此产生的厌氧环境可能会抑制微生物群落的活动^[44]。另一方面,极端降水强度的增加可能导致更深的水渗

透和更长的保水时间,改善扩散和不稳定的有机基质可用性,从而提高土壤碳矿化速率,增加土壤碳排放^[46-47]。此外,未来气温升高和极端降水风险的增加,可能通过农民改变作物生产投入(例如种子、肥料、杀虫剂和劳动力等的增加)以减轻气候异常的潜在负面影响^[48-49]。预计上述变化将对农业生产的碳综合收益产生显著影响,同时导致生产成本增加。本研究结果也表明,在气候变化背景下农业碳综合收益总体呈下降趋势。

在降水资源短缺的北方农牧交错带地区,采用合理的多样化轮作模式可有效提高作物的资源利用效率,降低土壤风蚀,提高作物产量,从而更好地应对气候变化^[19]。杨轩等^[26]基于APSIM模型对北方农牧交错带地区年降水量和年均温变化的11种气候情景下4种作物组配的6种轮作模式进行了比较,结果发现玉米-燕麦轮作模式的产量较高。然而,对温度升高与极端降水耦合的气候背景下如何调整作物轮作种植模式仍缺乏深入探讨^[50]。本研究结果显示,在温度升高与极端降水耦合的气候情景下:10年总能量当量产量最高的蚕豆-燕麦轮作模式,相较于张北地区当前主要实行的马铃薯-燕麦和马铃薯-胡麻轮作模式,可分别提升22.46%和56.54%。10年总净碳排放量最低的马铃薯-蚕豆轮作模式,相较于张北地区当前主要实行的马铃薯-燕麦和马铃薯-胡麻轮作模式,可分别降低55.28%和54.90%。此外,蚕豆-马铃薯轮作模式的10年总综合收益最高,相较于当前张北地区主要实行的马铃薯-燕麦和马铃薯-胡麻轮作模式,可分别提升21.19和8.62%。因此,相较于当地目前主要实行的轮作模式,本研究提出的多样化轮作模式更适应未来北方农牧交错带的气候变化特征,可为该地区产能-生态-经济等多目标需求对应选择适宜的轮作模式提供理论依据。本研究中只应用APSIM模型进行了气候变化的模拟预测,但由于气候系统内部的自然变率和气候模式的不确定性,对作物的影响评估可能存在误差和不确定性,未来可通过多模型集合评估提高预测精度。

4 结论

本研究利用已经调参验证过的APSIM模型,模拟了北方农牧交错带地区8种气候变化情景下228种轮作模式2012—2021年的产量形成过程,并

对比分析了不同轮作模式的产能与生态经济效益。结果表明,温度和降水改变显著影响了4种作物的产量。228种轮作模式的能量当量产量、综合收益和土壤固碳量均随温度和极端降水强度的增加而减少,而净碳排放量随温度和极端降水强度的增加而增加。此外,综合分析2种温度升高和极端降水相耦合气候情景下的228种轮作模式,蚕豆-燕麦和燕麦-蚕豆轮作模式的能量当量产量相对较高,马铃薯-蚕豆和胡麻-燕麦-蚕豆-马铃薯-休耕轮作模式的净碳排放量相对较低,蚕豆-马铃薯和蚕豆-胡麻轮作模式的综合收益相对较高,以上6种轮作模式可为未来北方农牧交错带地区适宜的轮作模式推广提供种植参考。

参考文献 References

- [1] 蔡子怡,游庆龙,吴芳营,江志红,翟盘茂. 全球碳中和背景下中国气候与极端气候变化[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 73-84
Cai Z Y, You Q L, Wu F Y, Jiang Z H, Zhai P M. China's climate and extreme climate changes under the global carbon neutrality scenario [J]. *Science & Technology Review*, 2024, 42(19): 73-84 (in Chinese)
- [2] IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Working Group I Summary for Policymakers* [M/OL]. [2025-07-16]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
- [3] Wang J, Vanga S K, Saxena R, Orsat V, Raghavan V. Effect of climate change on the yield of cereal crops: A review[J]. *Climate*, 2018, 6(2): 41
- [4] Kuang X X, Liu J G, Scanlon B R, Jiao J J, Jasechko S, Lancia M, Biskaborn B K, Wada Y, Li H L, Zeng Z Z, Guo Z L, Yao Y Y, Gleeson T, Nicot J P, Luo X, Zou Y G, Zheng C M. The changing nature of groundwater in the global water cycle[J]. *Science*, 2024, 383(6686): eadf0630
- [5] Wang B F, Yang X L, Chen L, Jiang Y Y, Bu H Y, Jiang Y, Li P, Cao C G. Physiological mechanism of drought-resistant rice coping with drought stress[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(7): 2638-2651
- [6] Zhang Y J, Hao R F, Qin Y. Temporal and spatial variation of agricultural and pastoral production in the eastern section of the agro-pastoral transitional zone in northern China [J]. *Agriculture*, 2024, 14(6): 829
- [7] Jiang C, Wang F. Environmental change in the agro-pastoral transitional zone, northern China: Patterns, drivers, and implications[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, 13(2): 165
- [8] 马雯思,刘玮玮,赵宁,马超. 中国农牧交错带30年响应气候变异趋势分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(24): 279-284
Ma W S, Liu W W, Zhao N, Ma C. Trend analysis of climate variability in the agro-pastoral ecotone of China in the past 30 years [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(24): 279-284 (in Chinese)
- [9] 崔婷茹,韩桂娥,张立峰. 冀西北坝上地区近50a气候资源变化分析:以河北省张北县为例[J]. 山西农业科学, 2017, 45(5): 819-824
Cui T R, Han G E, Zhang L F. Analysis on the changes of 50 years climate resources on Bashang Region in north-west of Hebei: In the case of Zhangbei County [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017, 45(5): 819-824 (in Chinese)
- [10] 张江涛,何丽华,李江波,张成影,张美如,杨吕玉蕊,闫雪瑾,谢祥永,王海川,隆璘雪,黄浩杰. 河北“23.7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报, 2023, 46(6): 884-903
Zhang J T, He L H, Li J B, Zhang C Y, Zhang M R, Yang L, Yan X J, Xie X Y, Wang H C, Long L X, Huang H J. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23.7” extreme rainstorm in Hebei [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2023, 46(6): 884-903 (in Chinese)
- [11] Liang X Y, Jin X B, Han B, Sun R, Xu W Y, Li H B, He J, Li J. China's food security situation and key questions in the new era: A perspective of farmland protection [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2022, 32(6): 1001-1019
- [12] 娜日苏,梁庆伟,杨秀芳,项锴锋,于雪然,于洋. 科尔沁沙地不同苜蓿轮作模式效益分析[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2025(9): 128-133
Narisu, Liang Q W, Yang X F, Xiang K F, Yu X R, Yu Y. Benefit analysis of different alfalfa rotation systems in Horqin sandy land [J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2025(9): 128-133 (in Chinese)
- [13] 鲁一薇,李顺国,赵宇,崔纪菡,刘建军,夏雪岩. 绿豆-谷子轮作模式的产量与经济效益研究[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(22): 29-33, 59
Lu Y W, Li S G, Zhao Y, Cui J H, Liu J J, Xia X Y. Study on the yield and economic benefits of millet and mung bean rotation model [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2024, 52(22): 29-33, 59 (in Chinese)
- [14] 于台泽,贾良良,牛丽娟,王庆锁,李颖,张丹. 马铃薯轮作的生态和经济效益: 案例分析[J]. 中国马铃薯, 2020, 34(6): 337-349
Yu T Z, Jia L L, Niu L J, Wang Q S, Li Y, Zhang D. Ecological and economic benefits of potato rotation: A case study [J]. *Chinese Potato Journal*, 2020, 34(6): 337-349 (in Chinese)
- [15] 王怡然,孙芳,丁玓. 京津冀区域冀北地区“粮改饲”结构调整效益分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 158-165
Wang Y R, Sun F, Ding D. Benefit analysis of structural adjustment of “grain change feed” in north of Hebei Province of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(11): 158-165 (in Chinese)
- [16] 侯喜庆,禹桃兵,王培欣,臧华栋,曾昭海,杨亚东. 轮作模式对冬小麦土壤氮氧化微生物群落多样性和组成的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(23): 9900-9911
Hou X Q, Yu T B, Wang P X, Zang H D, Zeng Z H, Yang Y D. Diversity and composition of ammonia-oxidizing archaeal and bacterial communities in rhizosphere and bulk soils of winter wheat in crop rotations [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9900-9911 (in Chinese)
- [17] 秦舒浩,曹莉,张俊莲,师尚礼,王蒂. 轮作豆科植物对马铃薯连作土壤速效养分及理化性质的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1452-1458
Qin S H, Cao L, Zhang J L, Shi S L, Wang D. Effect of rotation of leguminous plants on soil available nutrients and physical and chemical properties in continuous cropping potato field [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1452-1458 (in Chinese)
- [18] Teixeira E I, de Ruiter J, Ausseil A G, Daigneault A, Johnstone P, Holmes A, Tait A, Ewert F. Adapting crop rotations to climate change in regional impact modelling assessments [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 785-795
- [19] 刘欢,熊伟,李迎春,杨笛. 气候变化对中国轮作系统影响的研究进展[J]. 中国农业气象, 2017, 38(10): 613-631
Liu H, Xiong W, Li Y C, Yang D. Advances of impacts and adaptation of climate change on crop rotations in China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(10): 613-631 (in Chinese)
- [20] Brown H, Huth N, Holzworth D. Crop model improvement in APSIM: Using wheat as a case study [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 100: 141-150

- [21] Huang J X, Ma H Y, Sedano F, Lewis P, Liang S L, Wu Q L, Su W, Zhang X D, Zhu D H. Evaluation of regional estimates of winter wheat yield by assimilating three remotely sensed reflectance datasets into the coupled WOFOST - PROSAIL model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 102: 1-13
- [22] Jiang T C, Liu J, Gao Y J, Sun Z, Chen S, Yao N, Ma H J, Feng H, Yu Q, He J Q. Simulation of plant height of winter wheat under soil Water stress using modified growth functions[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232: 106066
- [23] Holzworth D P, Huth N I, DeVoil P G, Zurcher E J, Herrmann N I, McLean G, Chenu K, van Oosterom E J, Snow V, Murphy C, Moore A D, Brown H, Whish J P M, Verrall S, Fainges J, Bell L W, Peake A S, Poulton P L, Hochman H Z, Thorburn P J, Keating B A. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 327-350
- [24] Jin K, Cornelis W M, Schiettecatte W, Lu J J, Yao Y Q, Wu H J, Gabriels D, De Neve S, Cai D X, Jin J Y, Hartmann R. Effects of different management practices on the soil - water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2): 131-144
- [25] Yang X, Zheng L N, Yang Q, Wang Z K, Cui S, Shen Y Y. Modelling the effects of conservation tillage on crop water productivity, soil water dynamics and evapotranspiration of a maize-winter wheat-soybean rotation system on the Loess Plateau of China using APSIM[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 166: 111-123
- [26] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 朱敏. 北方农牧交错带气候变化对粮草轮作生产的影响[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2022, 42(1): 77-89
Yang X, Jia P F, Hou Q Q, Zhu M. Investigating the impacts of climate change on the production of crop and forage rotational fields in the agro-pastoral interlaced zone in Northern-China [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2022, 42(1): 77-89 (in Chinese)
- [27] 谢鸿飞, 赵俊芳, 艾金龙, 彭慧文, 黄睿茜. 基于 APSIM 的华北平原不同种植模式下主要温室气体排放效应评估[J]. 中国农业气象, 2022, 43(12): 955-968
Xie H F, Zhao J F, Ai J L, Peng H W, Huang R X. Assessment of main greenhouse gas emission effects under different cropping patterns in North China Plain based on APSIM crop model [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022, 43(12): 955-968 (in Chinese)
- [28] 王思嘉, 贾蓉, 臧华栋, 葛军勇, 曹丽霞, 吴迪. 基于 APSIM 模型的北方农牧交错带轮作种植模式设计[J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(7): 87-95
Wang S J, Jia R, Zang H D, Ge J Y, Cao L X, Wu D. APSIM model-based design of crop rotation modes in agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024, 38(7): 87-95 (in Chinese)
- [29] 聂志刚, 李广, 王钧, 马维伟, 雒翠萍, 董莉霞, 逯玉兰. 基于 APSIM 模型旱地小麦叶面积指数相关参数的优化[J]. 中国农业科学, 2019, 52(12): 2056-2068
Nie Z G, Li G, Wang J, Ma W W, Luo C P, Dong L X, Lu Y L. Parameter optimization for the simulation of leaf area index of dryland wheat with the APSIM model [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(12): 2056-2068 (in Chinese)
- [30] 刘涛, 杨晓光, 高继卿, 何斌, 白帆, 张方亮, 刘志娟, 王晓煜, 孙爽, 万能涵, 陈曦. 吉林省梨树县不同作物产能及产能水分利用效率研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 97-104
Liu T, Yang X G, Gao J Q, He B, Bai F, Zhang F L, Liu Z J, Wang X Y, Sun S, Wan N H, Chen X. Production capacity and its WUE of different crops in Lishu county of Jilin Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(7): 97-104 (in Chinese)
- [31] 陈阜. 农业生态学[M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011
Chen F. *Agricultural Ecology* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011 (in Chinese)
- [32] 陈中督, 李凤博, 冯金飞, 周锡跃, 徐春春, 纪龙, 方福平. 长江下游地区稻麦轮作模式碳足迹研究: 基于生命周期评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(12): 81-90
Chen Z D, Li F B, Feng J F, Zhou X Y, Xu C C, Ji L, Fang F P. Study on carbon footprint for rice-wheat rotation system in the lower reaches of Yangtze River: Based on the life cycle assessment[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(12): 81-90 (in Chinese)
- [33] Li Y, Wang Y, He Q, Yang Y L. Calculation and evaluation of carbon footprint in mulberry production: A case of Haining in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1339
- [34] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 2004—2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1105-1114
Chen Z D, Xu C C, Ji L, Fang F P. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004-2015[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7): 1105-1114 (in Chinese)
- [35] 李敏敏, 延军平, 丁彩霞. 北方农牧交错带气候变化与旱涝响应特征[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 304-308
Li M M, Yan J P, Ding C X. Climate change and response characteristics of drought and flood in farming - pastoral ecotone of northern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(5): 304-308 (in Chinese)
- [36] Tang J Z, Wang J, Fang Q X, Dayananda B, Yu Q, Zhao P Y, Yin H, Pan X B. Identifying agronomic options for better potato production and conserving water resources in the agro-pastoral ecotone in North China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 272/273: 91-101
- [37] Tang J Z, Bai H Z, Zhang S H, Xiao D P, Zheng T Z, Liu D L, Wang B, Feng P Y. Adaptations of potato production to future climate change by optimizing planting date, irrigation and fertilizer in the Agro-Pastoral Ecotone of China[J]. *Climate Risk Management*, 2024, 44: 100604
- [38] Rezaei E E, Webber H, Asseng S, Boote K, Durand J L, Ewert F, Martre P, McCarthy D S. Climate change impacts on crop yields [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(12): 831-846
- [39] Li Y, Guan K Y, Schnitkey G D, DeLucia E, Peng B. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2325-2337
- [40] Fatima Z, Ahmed M, Hussain M, Abbas G, Ul-Allah S, Ahmad S, Ahmed N, Ali M A, Sarwar G, Haque E U, Iqbal P, Hussain S. The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 18013
- [41] Xing Y Y, Wang X K. Impact of agricultural activities on climate change: A review of greenhouse gas emission patterns in field crop systems[J]. *Plants*, 2024, 13(16): 2285
- [42] Moore C E, Meacham-Hensold K, Lemonnier P, Slattery R A, Benjamin C, Bernacchi C J, Lawson T, Cavanagh A P. The effect of increasing temperature on crop photosynthesis: From enzymes to ecosystems [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(8): 2822-2844
- [43] Muhammad I, Lv J Z, Wang J, Ahmad S, Farooq S, Ali S, Zhou X B. Regulation of soil microbial community structure and biomass to mitigate soil greenhouse gas emission[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 868862

- [44] Wen Y, Freeman B, Ma Q X, Evans C D, Chadwick D R, Zang H D, Jones D L. Raising the groundwater table in the non-growing season can reduce greenhouse gas emissions and maintain crop productivity in cultivated Fen peats[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121179
- [45] Sun Y R, Liu C, Zhao M, Liu L, Liang S Q, Wang Y J, Chen Y M. Influence of extreme rainfall events on soil carbon release in the Loess Hilly Region, China[J]. *CATENA*, 2023, 220: 106652
- [46] Zhao M, Guo S L, Wang R. Diverse soil respiration responses to extreme precipitation patterns in arid and semiarid ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103928
- [47] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 59: 72-85
- [48] Chen H, Wang J X, Huang J K. Policy support, social capital, and farmers' adaptation to drought in China[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 24: 193-202
- [49] Celikkol E B, Guven S E. In the presence of climate change, the use of fertilizers and the effect of income on agricultural emissions [J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): 1989
- [50] Zhang Q, Li J F, Singh V P, Xiao M Z. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 57-76

责任编辑:董金波



第一作者简介:王思嘉,中国农业大学资源与环境学院资源利用与植物保护专业硕士研究生,现为德国亥姆霍兹国家联合会于利希研究中心博士生。参与国家重点研发计划项目(2022YFD1901100)、中国气象局2024年决策气象服务专项经费研究项目,获“建行杯”第七届吉林省互联网+大学生创新创业大赛铜奖、中国农业大学硕士学业二等奖学金、中国农业大学“优秀共青团干部”称号。



通讯作者简介:吴迪,博士,中国科学院沈阳应用生态研究所研究员,博士生导师。主要从事土壤碳氮循环机理及全球气候变化生态学方面研究。目前主持国家自然科学基金项目、国家重点研发课题、中国科学院和省部级项目等纵向科研任务10余项。在*Global Change Biology*、*Soil Biology & Biochemistry*等主流国际期刊发表SCI论文50余篇。担任国际标准化组织(ISO)生物碳标准化技术委员会委员、农业农村部绿色发展中心绿色食品评审委员。