

王晨旭, 李玥, 高玉红, 等. 基于 APSIM NG 模型的不同轮作对胡麻干旱的响应模拟及其抗旱调控机制[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(1): 74-80. DOI: 10. 20169/j. issn. 2095-2163. 24032507

基于 APSIM NG 模型的不同轮作对胡麻干旱的响应模拟及其抗旱调控机制

王晨旭¹, 李玥¹, 高玉红², 吴兵³, 武凌⁴, 周慧¹, 吴丽丽¹, 唐洁¹

(1 甘肃农业大学 信息科学技术学院, 兰州 730070; 2 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070;

3 甘肃农业大学 生命科学技术学院, 兰州 730070; 4 兰州交通大学 网络信息中心, 兰州 730070)

摘要: 本研究旨在分析西北半干旱地区胡麻在不同轮作模式下的干旱响应, 以优化胡麻的种植模式并提高其适应性和生产力。使用 2020~2022 年胡麻与马铃薯、小麦轮作实验, 利用 APSIM NG 模型构建胡麻单(连)作和轮作模型, 并添加了不同程度干旱胁迫, 考察不同干旱条件下胡麻的生物量、籽粒产量及土壤水分动态。模拟结果显示, 在不同程度干旱胁迫下, 与单(连)作相比, 胡麻与马铃薯、小麦轮作均能显著提高产量。随着干旱胁迫的加剧, 胡麻与小麦轮作展现出类似于马铃薯轮作的抗旱能力, 尤其是在中度到严重干旱胁迫下, 两者的表现趋于一致, 但胡麻与马铃薯轮作整体上表现出最好的产量和抗旱能力, 特别是在轻度至中度干旱胁迫条件下。本研究验证了胡麻轮作模型的适应性, 可以很好地模拟胡麻轮作, 可以解释超过 87% 的胡麻轮作产量、生育期的变异。在西北半干旱地区种植胡麻时, 采用轮作的耕作方式可以增加胡麻籽粒产量, 其中胡麻与马铃薯轮作整体上表现出最好的产量和抗旱能力, 特别是在轻度至中度干旱胁迫条件下。本研究的结果不仅为胡麻种植提供了有价值的信息, 还展示了 APSIM NG 模型在预测作物产量和抗旱能力方面的潜力。

关键词: APSIM NG; 胡麻; 轮作; 干旱胁迫; 土壤水分

中图分类号: S792.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2026)01-0074-07

Simulation of the response of different intercroops to drought in oilseed flax and its drought regulation mechanism based on the APSIM NG model

WANG Chenxu¹, LI Yue¹, GAO Yuhong², WU Bing³, WU Ling⁴, ZHOU Hui¹, WU Lili¹, TANG Jie¹

(1 College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2 College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

3 College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

4 Network Information Center, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The aim of this study is to analyze the drought response of oilseed flax under different crop rotation patterns in semi-arid northwestern China, in order to optimize the cultivation pattern of oilseed flax and improve its adaptability and productivity. Using the 2020~2022 crop rotation experiment of oilseed flax with potato and wheat, the APSIM NG model is used to construct single (continuous) and rotational crop models of oilseed flax with different degrees of drought stress added to investigate the biomass, grain weight and soil moisture dynamics of oilseed flax under different drought conditions. The simulation results show that under different degrees of drought stress, compared with single (continuous) cropping, oilseed flax rotation with potato and wheat could significantly increase the yield, and through one-way analysis of variance (ANOVA) analysis, it is found that with the intensification of drought stress, oilseed flax rotation with wheat shows drought-resistant ability similar to that of potato rotation, especially under moderate to severe drought stress, and their performances tend to converge. However, the oilseed flax and potato rotation overall show the best yield and drought tolerance, especially under mild to moderate drought stress, which is superior to the single (continuous) and wheat rotation patterns. This study verifies the adaptability of the oilseed flax rotation model, which could well simulate the oilseed flax rotation and can explain more than 87% of the variation in yield and fertility of the oilseed flax rotation. When growing huckleberry in the semi-arid region of Northwest China, huckleberry grain weight can be increased by using the rotation model huckleberry-potato-huckleberry and huckleberry-wheat-huckleberry, which tends to perform in the same way, but huckleberry-potato-huckleberry rotations show the best grain weight and drought tolerance as a whole, especially under mild to moderate drought stress conditions. The results of this study not only provide valuable information for oilseed flax cultivation, but also demonstrate the potential of the APSIM NG model in predicting crop yield and drought tolerance.

Key words: APSIM NG; oilseed flax; rotation; drought stress; soil moisture

基金项目: 国家自然科学基金(32060437); 甘肃省科技计划-自然科学基金重点项目(23JRRA1403)。

作者简介: 王晨旭(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 农业系统模拟模型研究。

通信作者: 李玥(1979—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 智慧农业与生态系统模拟, 大数据分析挖掘等研究。Email: liyue@gsau.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-25

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

0 引言

西北地区是中国重要的农业产区之一,属于典型的半干旱地区,但该地区经常受到干旱等极端气候的影响,导致许多农作物的产量大幅下降。特别是胡麻(*Linum usitatissimum* L.),作为中国五大油料作物之一^[1],其产量对于干旱等环境因素的响应尤为敏感。然而,关于胡麻在西北干旱地区增产的研究较少,特别是针对不同耕作模式下胡麻产量影响的探讨。

在应对农作物产量影响的策略中,轮作是一种有效的方法。作物轮作,即随着时间的推移农作物的顺序种植,在全球范围内被使用^[2]。科学合理的作物轮作是解决持续栽培障碍的有效措施,并协调了植物和土壤之间的关系。同时还减少了土壤中有害微生物的积累,改善了微生态环境、作物产量,从而实现了农业生产的可持续发展^[3-5]。研究表明,作物轮作增加了叶面积持续时间、干物质积累、种子与胡麻的连续种植方式,氮积累、水和氮的使用效率^[6-7]。然而,这些研究多集中在理论分析和田间试验上,而基于模型的研究仍相对有限。

APSIM(Agricultural Production System sIMulator)模型是一种机理模型,被广泛应用于作物生长模拟和土壤响应过程。目前 APSIM 在轮作系统的模拟方面已进行了多方面研究,例如,2021 年,古丽娜扎尔·艾力等学者^[8]利用 APSIM 对苜蓿-小麦轮作进行了建模。Tan 等学者^[9]在该模型中加入了水分胁迫。但这些研究主要集中于 APSIM 经典版上,对新一代 APSIM NG 模型的应用尚未充分开发。APSIM NG 模型代码不仅提高了执行速度,还支持跨平台

开发,使得在复杂的农业系统中对作物生长的模拟成为可能^[10]。然而,APSIM NG 在模拟机制上的改进同时带来了参数获取和模型建立的挑战。

鉴于此,本文利用 APSIM NG 模型,研究西北半干旱地区不同轮作模式对胡麻产量的影响。本研究旨在填补 APSIM 模型在胡麻作物应用上的研究空白,并探讨不同耕作模式下胡麻产量的潜在提升。这项研究不仅对理解胡麻在干旱地区的生长反应具有重要意义,也为实现胡麻产量的可持续增长提供了理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次试验基于 2013 年在甘肃省定西农科院油料作物研究站(34°26'N, 103°52'E)开始的长期定位试验,本论文的研究年限为 2020~2022 年。试验区的平均海拔 2 050 m,年平均气温为 6.3 °C,年日照时数 2 453 h,无霜期 140 d 左右,年均太阳辐射 592.9 kJ/cm²。过去 30 年的年平均降水量为 377 mm,年降水量不均匀,6~9 月降水量占 60%左右。试验地农田土壤为黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀。试验区 2020、2021 和 2022 年胡麻 3 个生长季的降水量依次为 319.5 mm、182.7 mm 和 207.4 mm,平均大气温度依次为 14.7 °C、15.6 °C 和 16.5 °C;小麦 3 个生长季降水量依次为 305.0 mm、181.4 mm 和 174.0 mm,平均大气温度依次为 14.1 °C、15.2 °C 和 15.8 °C;马铃薯 3 个生长季降水量依次为 401.1 mm、250.4 mm 和 217.6 mm,平均大气温度依次为 15.7 °C、16.8 °C 和 17.2 °C。土壤理化性状见表 1。

表 1 榆中试验区土壤理化性状

Table 1 Soil physicochemical properties in Yuzhong experimental areas

试验站	土壤类型	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	pH
定西	黄绵土	11.06	0.99	72.15	8.31	247.02	8.3

1.2 试验设计

轮作试验进行 3 种轮作,胡麻轮作作为对照,然后使用马铃薯与小麦、及胡麻进行轮作(见表 2)。实验采用甘肃农业大学农学院部分实验数据^[12]。

干旱胁迫试验包括对照组和干旱胁迫组,在试验的干旱胁迫部分,不同程度的干旱胁迫是通过控制降水量,将天气数据中的降水量数据按比例减少,再按建立好的胡麻轮作模型添加修改好的天气数据

文件,干旱胁迫设置 3 个处理,对照组(CK)模型使用原始降水量数据如下:

(1)轻度干旱(85%):模型使用 85%原始降水量数据。

(2)中度干旱(75%):模型使用 75%原始降水量数据和严重干旱。

(3)重度干旱(65%):模型使用 65%原始降水量数据。

表2 轮作实验的基本处理

Table 2 Basic treatments for crop rotation experiments

轮作模式	年份		
	2020	2021	2022
胡麻-胡麻-胡麻(FFF)(Solo)	胡麻(F)FF	胡麻 F(F)F	胡麻 FF(F)
胡麻-马铃薯-胡麻(FPF)	胡麻(F)PF	马铃薯 F(P)F	胡麻 FP(F)
胡麻-小麦-胡麻(FWF)	胡麻(F)WF	胡麻 F(W)F	胡麻 FW(F)

注:F表示胡麻,P表示马铃薯,W表示小麦

1.3 测定项目与方法

干物质积累量测定:在胡麻的苗期、现蕾期、盛花期、子实期和成熟期,按照5点采样法,在每个小区随机选取了15株植株。并于105℃恒温箱中杀青30min,然后80℃烘干至恒重,从而测定各器官的干物质积累量,进而根据基本株数换算每小区胡麻干物质积累量^[13]。

1.4 数据来源

主要包括气象、作物、土壤和与胡麻产量相关的数据。所需的气象数据由甘肃省气象局提供;土壤数据则来源于农业气象观测站和中国土壤数据库。相关作物 APSIM 遗传参数从文献中获得^[14-20]。至于品种参数和管理参数,则全部基于实际试验观测和测定得出。用于对 APSIM NG 建立的模型参数的调整及预测对比。

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 20.0 进行数据整理和分析处理,利用 Scidavis 作图。

1.5 模型构建

1.5.1 胡麻模型构建

利用 APSIM NG (<http://www.apsim.info/>) 软件中的 canola 作物构建的 oilseed flax 模拟模型。在 APSIM NG 中 Micromet 和 SoilArbitrator 都是 Apsim NG 中的固定模块^[21],可以很好地模拟地面与地下竞争,再调整好管理规则以构建轮作模拟模型。

马铃薯和小麦的参数取自中国西北地区参数标准值的均值上下50%,利用试错法调整参数。

1.5.2 轮作模型构建

轮作模型的构建,使用 Rotation management 管理模块(见图1)进行轮作的模拟,设置好作物轮作顺序,并根据实际作物种植管理设置好2种作物种植时间、播种量、施肥量等,构建好作物轮作模型。

利用 APSIM NG (<http://www.apsim.info/>) 软件中的 canola 作物构建的 oilseed flax 模拟模型,采用试错法对胡麻品种遗传参数(来源于<http://www.apsim.info/canola>和李玥等学者成果^[14])进行调整。为了减少调参过程的复杂性,利用 R 包

apsimx 中 optim_apsim 和 wop 函数,以及 RAGA 优化投影指标函数^[22],对遗传特性品种参数辅助调整(见表3)。

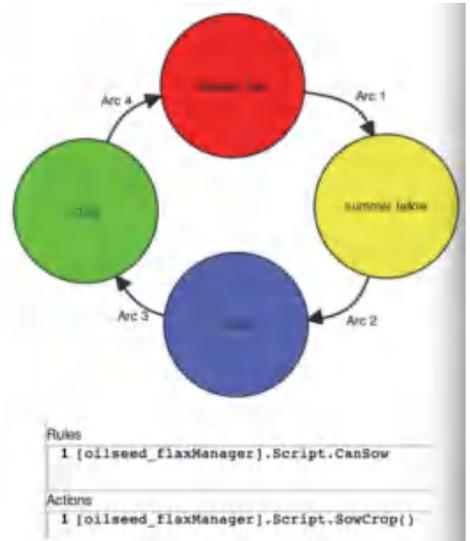


图1 轮作管理模块

Fig. 1 Rotation management module

1.6 模型检验方法

根据2020~2022年试验测量数据对模型进行检验,检验方法使用统计指标^[23-27]有:均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)和平均绝对误差(MAE)。

(1) RMSE。用于显示模型预测中的误差,计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} \quad (1)$$

(2) R^2 。用于评价模型的预测能力,计算公式为:

$$R^2 = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{e}} \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(S_i - \bar{S})}{\hat{\sigma}_{\hat{e}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

(3) MAE。是预测值与观测值之间绝对误差的平均值,计算公式为:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - \bar{M}| \quad (3)$$

其中, n 表示实测值的数量; M_i 表示实测值; S_i 为模拟值; \bar{M} 表示 M_i 的平均值; \bar{S} 表示 S_i 的平均值。

RMSE 和 MAE 越小、 R^2 越接近 1,模型测量值与预测值间误差越小,拟合效果越好。并且还可利用显著性差异分析不同间作与单作之前的差异。

表 3 胡麻对干旱胁迫响应的遗传参数

Table 3 Genetic parameters of caraway in response to drought stress

参数	参数项	描述	数值
遗传参数	辐射截获/(MJ · m ⁻²)	作物冠层内各器官单位时间所截获的辐射量	19.5
	辐射利用率/(g · MJ ⁻¹ · m ⁻²)	单位土地面积上一定时间内植物光合作用积累的有机物所含能量与同期照射到该地面上的太阳辐射量的比	1.4
	光合作用水分胁迫因子	影响光合作用的限制因子	0.6
	蒸腾效率系数	植物对水分的利用效率	0.005
	茎生长基数	成熟期株高	76
	每果粒数/粒	每株的籽粒数	7.6
	最大收获指数	最大收获指数	0.5
	绿色叶片消光系数	绿色叶片的消光系数	0.5
	硕果消光系数	硕果的消光系数	0.3
	调整参数	出苗延迟指数	作物出苗延迟指数
出苗速率		作物出苗速率	1
开花初期积温目标/(℃ · d)		开花初期积温需要达到的目标值	265
早期荚果发育积温/(℃ · d)		早期荚果发育积温需要达到的目标值	140
早期籽粒灌浆比例		早期籽粒灌浆比例	0.2
中后期籽粒灌浆比例		中后期籽粒灌浆比例	0.5
开花至成熟期积温/(℃ · d)		开花至成熟期积温	460
成熟到积温目标/(℃ · d)		成熟到积温目标	3

2 结果与分析

2.1 模型模拟检验

利用定西市 2020~2022 年试验中的实际产量, 验证 APSIM NG 模型模拟胡麻的各项参数的适宜性。模拟结果表明, 籽粒产量模拟结果 2020 和

2022 年胡麻与马铃薯轮作, RMSE 为 11.95 g/m², R² 为 0.871, MAE 为 11.94; 胡麻与小麦轮作籽粒产量模拟结果 2020 和 2022 年 RMSE 为 5.18 g/m², R² 为 0.982, MAE 为 4.14。表明胡麻轮作模型具有良好的模拟效果(见表 4)。

表 4 胡麻轮作模型评价

Table 4 Evaluation of oilseed flax rotation modeling

评价类型	轮作方式	年份	R ²	RMSE/(g · m ⁻² · d ⁻¹)	MAE
籽粒产量	胡麻与马铃薯轮作	2020/2022	0.871	11.95	11.94
	胡麻与小麦轮作	2020/2022	0.982	5.18	4.14
生育期	轮作	2020/2022	0.977	0.46	0.34

对于胡麻轮作模式, 胡麻与马铃薯、小麦生育期模拟结果相同, 回归方程为 $y = 0.924 4x + 0.655 1$, R² 值为 0.977, RMSE 值为 0.463 g/m²(如图 2 所示)。这一结果进一步证实了 APSIM 模型在模拟胡麻轮作生育期方面的有效性, 表明模拟轮作效果较好。

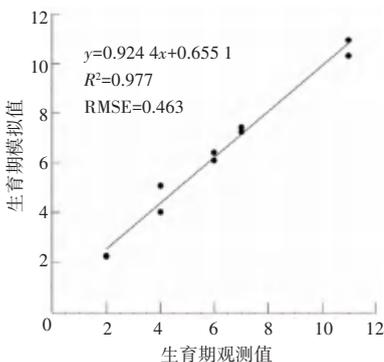


图 2 胡麻轮作生育期的 APSIM NG 模型模拟结果校准与验证

Fig. 2 Calibration and validation of APSIM NG model simulation results for oilseed flax rotation fertility periods

2.2 不同耕作方式对胡麻干旱的响应

通过设计胡麻连作、胡麻与马铃薯轮作和胡麻与小麦轮作实验, 探究在不同的耕作方式下, 胡麻的地上生物量和籽粒产量变化, 并在此基础上加入干旱胁迫试验, 探究在不同梯度降水量(CK、85%、75%、65%)下单作与 2 种轮作胡麻的地上生物量、籽粒产量、叶面积指数以及土壤含水量变化, 以分析哪一种种植方式能适应更干旱的条件。

2.2.1 不同耕作方式下胡麻籽粒产量变化与胡麻抗旱调控机制

通过对胡麻地上生物量、籽粒产量、土壤含水量的变化以及胡麻叶面积指数的变化综合分析可知, 籽粒产量均表现为轮作模式大于单作模式(如图 3、图 4 所示)。其中, 与马铃薯轮作的情况下, 胡麻在 CK、85%、75%、65% 降水条件下的籽粒产量分别比单作高出 36.09%、51.98%、122.30%、180.70%。

在与小麦轮作的情况下,胡麻在 CK、85%、75%、65%降水条件下的籽粒产量分别比单作高出 8.57%、20.26%、115.84%、213.07%。通过显著性差异分析,发现随着干旱胁迫的加剧,胡麻与小麦轮作展现出类似于马铃薯轮作的抗旱能力,尤其是在中度到严重干旱胁迫下,两者的表现趋于一致,但胡麻与马铃薯轮作整体上表现出最好的产量和抗旱能力,特别是在轻度至中度干旱胁迫条件下,其产量和抗旱能力均优于单(连)作和小麦轮作模式。所以在干旱胁迫条件下,选择与马铃薯轮作作为耕作模式可能是提高胡麻产量和抗旱能力的最佳选择。

2.2.2 不同耕作方式下胡麻土壤含水量对干旱胁迫的响应

本研究还评估了不同降水条件下,胡麻单(连)作与胡麻与马铃薯、小麦轮作模式对土壤含水量(SWTot)的影响(如图5所示),以探讨其对干旱的响应能力。不同耕作方式在不同干旱程度下的土壤含水量增长率见表5。由于前一年为轮作的非目标作物,所以分析基于原始降水量(CK条件)以及降水量减少至85%、75%、65%时的年初土壤含水量情况。由表5可以看出,轮作能有效提高土壤含水量,在正常降水与轻度干旱下,胡麻与马铃薯轮作能很好提升土壤含水量,随着干旱程度的增加,与小麦轮作对土壤含水量的提升更高。

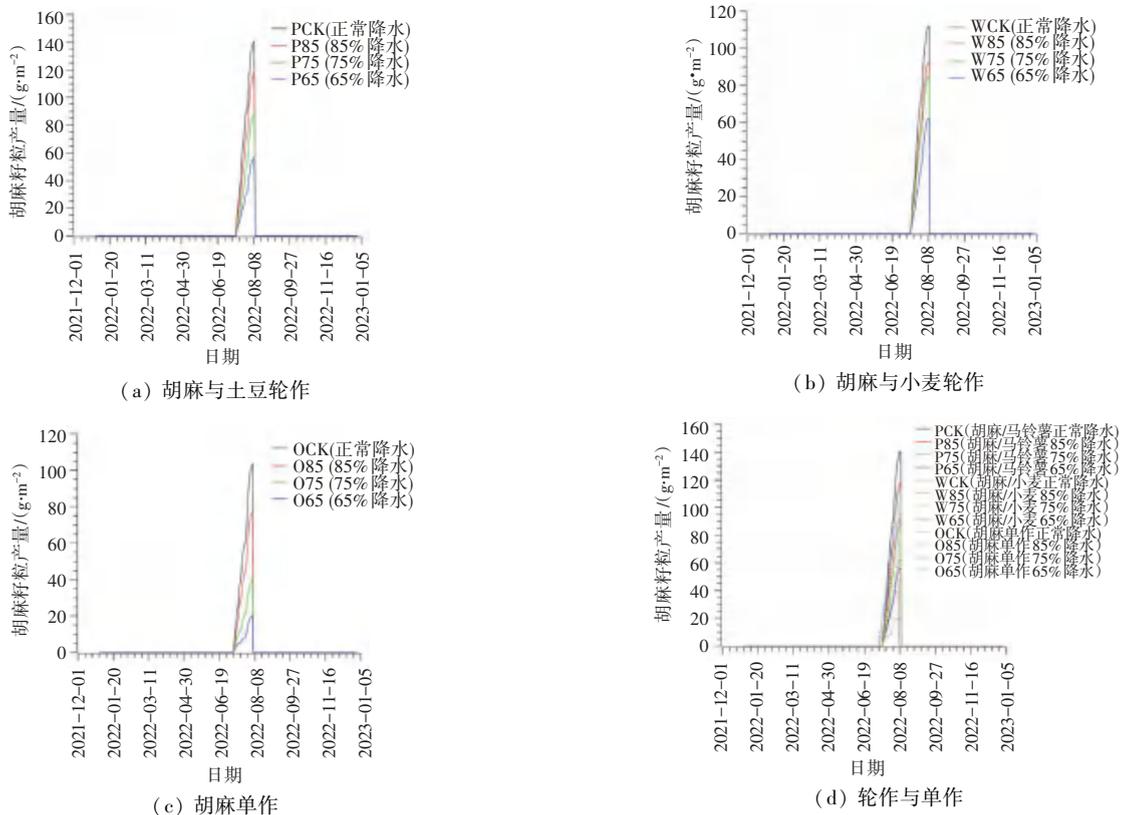


图3 不同干旱程度下胡麻轮作与单作籽粒产量变化

Fig. 3 Changes in grain weight of oilseed flax in rotation and monoculture under different drought levels

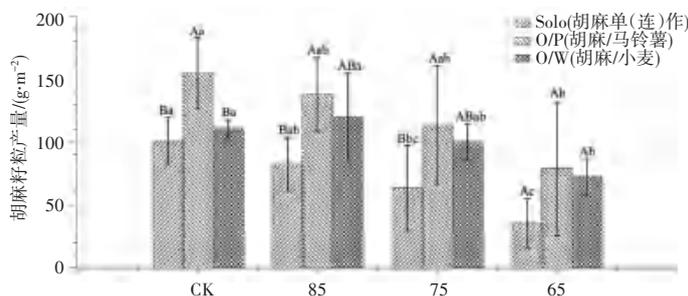


图4 不同耕作方式在不同干旱程度下对胡麻籽粒产量的影响

Fig. 4 Effect of different tillage practices on grain weight of oilseed flax under different drought levels

注:不同大写字母表示不同耕作方式之间存在显著性差异;不同小写字母表示不同干旱程度之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

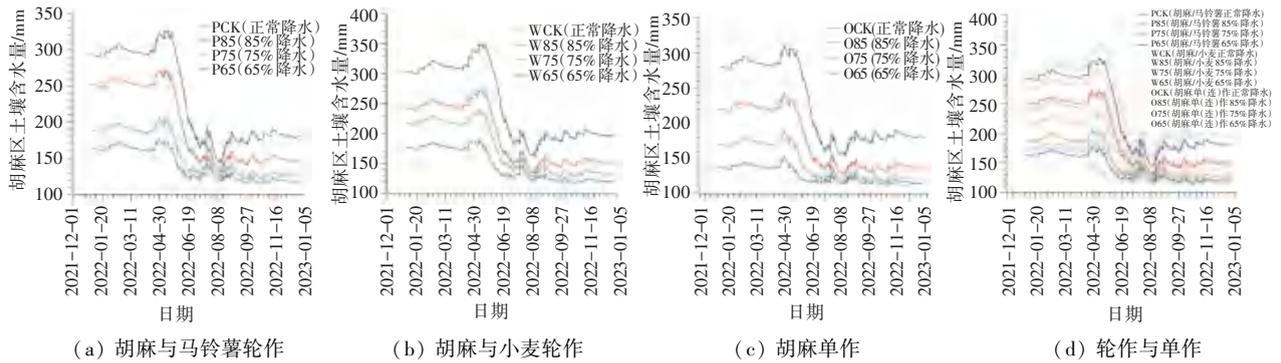


图 5 不同干旱程度下胡麻轮作与单作土壤含水量变化

Fig. 5 Changes in soil water content between oilseed flax rotation and monoculture under different degrees of aridity

表 5 不同耕作方式在不同干旱程度下的土壤含水量增长率

Table 5 Growth rates of soil water content under different degrees of drought for different tillage practices

干旱程度	耕作方式	土壤含水量增长率/%
正常降水 CK	胡麻和马铃薯轮作	4.67
	胡麻和小麦轮作	8.10
85%降水	胡麻和马铃薯轮作	14.59
	胡麻和小麦轮作	9.96
75%降水	胡麻和马铃薯轮作	11.33
	胡麻和小麦轮作	28.21
65%降水	胡麻和马铃薯轮作	19.89
	胡麻和小麦轮作	29.33

3 讨论

关于作物模型的研究,相比于李玥等学者^[17]利用 APSIM 构建了胡麻作物模型,结果表明 APSIM 可以很好地模拟胡麻的生长,本文利用新一代版本构建了胡麻单作及轮作模型,且模拟效果较好。在干旱胁迫方面,极端干旱的天气对胡麻产量的影响显著,这一点与 Inman-Bamber 等学者^[23]研究的甘蔗在水压力下的响应相似,其研究通过 APSIM 模型比较了树冠发育、根水提取、干物质以及蔗糖等测量和模拟过程,证明了 APSIM 能够模拟水分胁迫带来的压力和反应。王钧^[24]进行了干旱胁迫下小麦产量及土壤水碳氮演变特征的模拟研究,研究验证了 APSIM 模型对不同干旱胁迫下旱地春小麦生长发育过程以及土壤水、碳、氮运移过程的模拟能力。刘莹莹等学者^[13]研究了不同干旱程度下胡麻不同生育时期对干旱胁迫的响应,证明了 APSIM 模型在面对干旱胁迫的响应时表现出较好的拟合度和适应性,但是不同耕作模式对胡麻抗旱能力的影响并没有涉及,本文进行了弥补,研究了胡麻与马铃薯/小麦轮作下胡麻的产量变化、叶面积指数和土壤水分变化等。

此外,本研究观察到轮作模式显著改善了土壤

水分和营养状况。这一发现与崔政军^[12]的轮作系统研究相符,研究中报告了 PFW(F) 胡麻小麦轮作序列显著增加了土壤含水量。刘娟娟等学者^[25]的研究指出豆科植物与马铃薯轮作,能显著提高土壤含水量,支持了本文的研究结论。同样地,杨帆^[26]的研究中提到与小麦轮作的土壤含水量先降低后升高,轮作相比单作物连作可以更好地增加土壤含水量。任晶晶^[27]的研究中指出,对于不同降水量区域,轮作年限越长,土壤水分恢复越好,但是土壤恢复水平与降水量存在很大关系,降水越少的地区,土壤水分恢复速率越小,土壤水分得到恢复所需时间越久,这与本模拟试验结果一致。

总体来说,本研究不仅验证了轮作模式在提高作物产量方面的有效性,也展现了 APSIM 模型在模拟作物生长过程中的可靠性。然而,这项研究也存在不足:轮作作物种类与方式较少、较单一,轮作数据较少,后续可添加更多类型轮作试验。未来的研究应进一步探索不同轮作配置下的最优管理策略,并考虑更多的环境因素,如土壤类型和气候条件,使得模型不出现拟合情况,并确保得出更全面和具体的结论。在 APSIM NG 模型方面,并未对所有参数进行校准,后续实验还应对更多参数进行校准,以确定模型的准确性。

4 结束语

本研究通过使用 APSIM NG 模型,在定西市 2020~2022 年的数据基础上,成功构建并验证了胡麻轮作模型。结果表明,籽粒产量模拟结果 2020 和 2022 年胡麻与马铃薯轮作 R^2 为 0.871;胡麻与小麦轮作籽粒产量模拟结果 2020 年和 2022 年 R^2 为 0.982。对于胡麻轮作模式,胡麻与马铃薯、小麦生育期模拟结果相同, R^2 值为 0.977。这一结果进一步证实了 APSIM 模型在模拟胡麻轮作生育期方面

的有效性,表明胡麻轮作模型具有良好的模拟效果。在不同耕作方式下,胡麻与马铃薯、小麦的轮作模式表现出产量增加,尤其是胡麻与马铃薯对胡麻籽粒产量的提升高达 28.76%。同时发现随着干旱胁迫的加剧,胡麻与小麦轮作展现出类似于马铃薯轮作的抗旱能力,尤其是在中度到严重干旱胁迫下,两者的表现趋于一致,但胡麻与马铃薯轮作整体上表现出最好的产量和抗旱能力,特别是在轻度至中度干旱胁迫条件下。所以在干旱胁迫条件下,选择与马铃薯轮作作为耕作模式可能是提高胡麻产量和抗旱能力的最佳选择。

综上所述,本研究验证了胡麻轮作模型的适应性,可以很好地模拟胡麻轮作,能解释超过 87% 的胡麻轮作产量、生育期的变异。本研究证实,在西北半干旱地区种植胡麻、采用轮作模式时,可以显著增加胡麻作物产量和抗旱能力,尤其是与马铃薯轮作,在整体上表现出最好的产量和抗旱能力。

参考文献

- [1] SALEEM M H, ALI S, HUSSAIN S, et al. Flax (*Linum usitatissimum* L): A potential candidate for phytoremediation? Biological and economical points of view [J]. *Plants*, 2020, 9 (4): 496.
- [2] KAILE Z, GABRIEL M L, LIAO Huiling. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021(1): 156.
- [3] GILL K S. Crop rotations compared with continuous canola and wheat for crop production and fertilizer use over 6 yr [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2018, 98(5): 1139-1149.
- [4] LIU Zhuxiu, LIU Junjie, YU Zhenhua, et al. Long-term continuous cropping of soybean is comparable to crop rotation in mediating microbial abundance, diversity and community composition [J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 197: 104503.
- [5] MORAD M, MANOUCHEHR G A, EHSAN R, et al. Preliminary effects of crop residue management on soil quality and crop production under different soil management regimes in corn-wheat rotation systems [J]. *Agronomy*, 2021, 11(2): 302-328.
- [6] ZHAO Zhe, WANG Youqiang, SHI Jianqi, et al. Effect of balanced application of boron and phosphorus fertilizers on soil bacterial community, seed yield and phosphorus use efficiency of *Brassica napus* [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141644.
- [7] 王海娣, 吴兵, 高玉红, 等. 旱地胡麻同化物积累和分配与产量形成对轮作模式的响应 [J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44 (1): 158-167.
- [8] 古丽娜扎尔·艾力, 陶海宁, 王自奎, 等. 基于 APSIM 模型的黄土旱塬区苜蓿-小麦轮作系统深层土壤水分及水分利用效率研究 [J]. *草业学报*, 2021, 30(7): 22-33.
- [9] TAN Meixiu, GOU Fang, STOMPH T J, et al. Dynamic process-based modelling of crop growth and competitive water extraction in relay strip intercropping: Model development and application to wheat-maize intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2020, 246: 107613.
- [10] 张萌, 高艳梅, 张永清. 不同播种密度和灌溉管理下冬小麦 APSIM NG 模型的敏感性研究与模型校准验证 [J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(1): 102-112.
- [11] HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, et al. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2014, 12: 327-350.
- [12] 崔政军. 旱作农业区土壤有机碳库和作物生产力对胡麻轮作体系的响应机制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- [13] 刘莹莹, 李玥, 吴兵. 胡麻籽粒产量形成对于干旱胁迫的响应及其模拟模型研究 [J]. *作物研究*, 2023, 37(1): 14-21.
- [14] 李玥, 吴兵, 刘栋, 等. 胡麻产量形成模拟模型研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(9): 1246-1253.
- [15] 李玥, 武凌, 高珍妮, 等. 基于 APSIM 的胡麻光合生产与干物质积累模拟模型 [J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 57-66.
- [16] 李玥, 牛俊义, 吴兵, 等. 基于 APSIM 的胡麻陇亚杂 1 号的生育时期模拟模型 [J]. *核农学报*, 2015, 29(5): 972-979.
- [17] 李玥, 牛俊义, 谢亚萍, 等. 基于 APSIM 的油用亚麻叶面积指数模型构建 [J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(3): 329-335.
- [18] 杨萍. 胡麻/大豆间作体系氮素吸收利用特性及种间关系的研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [19] 杨萍, 李杰, 剡斌, 等. 胡麻/大豆间作体系下施氮对胡麻干物质积累和产量的影响 [J]. *中国油料作物学报*, 2015, 37(4): 489-497.
- [20] 王立光, 春雷, 陈军, 等. 胡麻/小麦间作与胡麻-小麦轮作对土壤理化特性及胡麻生长的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(12): 161-171.
- [21] HOLZWORTH D, HUTH N I, FAINGES J, et al. APSIM next generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 103: 43-51.
- [22] 付强. 数据处理方法及其农业应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23] INMAN - BAMBER N, EVERINGHAM Y, MUCHOW R. Modelling water stress response in sugarcane: Validation and application of the APSIM-Sugarcane model [EB/OL]. [2024-03-01]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113653423>.
- [24] 王钧. 干旱胁迫下小麦产量及土壤水碳氮演变特征的模拟研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
- [25] 刘娟娟, 石铭福, 孙得翔, 等. 轮作豆科植物对马铃薯连作土壤理化性质及酶活性的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2025, 60 (1): 97-104.
- [26] 杨帆. 轮作结合施肥对土壤有机碳组分及相关性状的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [27] 任晶晶. 黄土高原不同降水类型区苜蓿-粮食作物轮作效应模拟与比较研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.