

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.020

引用格式:刘鹏,贾晓怡,何世佳,等.基于APSIM模型评估山西中北部“苜蓿-玉米”轮作模式产量与降水的匹配度[J].草地学报,2026,34(6):2173—2183

LIU Peng, JIA Xiao-yi, HE Shi-jia, et al. Assessment of Yield-Rainfall Matching Degree of the Alfalfa-maize Rotation System in Central and Northern Shanxi Based on the APSIM Model[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2173—2183

基于 APSIM 模型评估山西中北部“苜蓿-玉米” 轮作模式产量与降水的匹配度

刘 鹏^{1,2}, 贾晓怡^{1,2}, 何世佳^{1,2}, 徐洪雨^{1,2}, 杨 轩^{1,2*}

(1. 山西农业大学草业学院, 山西 晋中 030801; 2. 草地生态保护与乡土草种质创新山西省重点实验室, 山西 晋中 030801)

摘要:本研究拟评估山西中至北部紫花苜蓿-籽实玉米轮作的可持续性,并筛选最优模式。为此,本研究基于多点试验数据校准 APSIM(Agricultural Production System Simulator)模型,开展历史情景(1985—2014)与未来情景(2021—2050, 2051—2080)长期模拟,比较 6A(6年苜蓿)、5A1C(5年苜蓿1年籽实玉米)、4A2C(4年苜蓿2年籽实玉米)。结果表明:模型对产量与生物量拟合良好(归一化均方根误差 $<20\%$)。未来情景下,6A 当量产量显著高于 5A1C 与 4A2C($P<0.05$),较 5A1C 在 2020s 与 2050s 分别增 9.45% 与 12.12%,较 4A2C 增 23.02% 与 28.49%;历史情景下 6A 的单循环当量产量也最高(59.98 t·hm⁻²)。降水匹配度:玉米 >0.6 ;苜蓿 5—8 月 >0.8 ,4、9、10 月偏低,灌溉需求高;未来情景匹配度显著提升($P<0.05$),但 4—5 月 6A 低于 4A2C。综上,未来采用 6A 可获最高土地生产力,但春季需强化灌溉;4A2C 在产出与用水上更稳健,为优化山西饲草种植与适应性选择提供依据。

关键词:紫花苜蓿;玉米;轮作;气候变化;APSIM

中图分类号:S344.14

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2173-11

Assessment of Yield-Rainfall Matching Degree of the Alfalfa-maize Rotation System in Central and Northern Shanxi Based on the APSIM Model

LIU Peng^{1,2}, JIA Xiao-yi^{1,2}, HE Shi-jia^{1,2}, XU Hong-yu^{1,2}, YANG Xuan^{1,2*}

(1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi Province 030801, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Grassland Ecological Protection and Native Grass Germplasm Innovation, Jinzhong, Shanxi Province 030801)

Abstract: This study aimed to assess the sustainability of alfalfa-grain maize rotations in central-northern Shanxi Province, China, and to screen the optimal management strategies. The Agricultural Production System Simulator (APSIM) model was calibrated using multi-site experimental data and employed to simulate long-term historical (1985—2014) and future climate scenarios (2021—2050; 2051—2080). Three rotation systems were compared: 6A (6-year continuous alfalfa), 5A1C (5-year alfalfa+1-year grain maize), and 4A2C (4-year alfalfa+2-year grain maize). The results indicated that the model performed well in simulating yield and biomass (Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE $<20\%$). Under future climate scenarios, the equivalent yield of 6A was significantly higher than that of 5A1C and 4A2C ($P<0.05$), which were increased by 9.45% and 23.02% compared to 5A1C in the 2020s and 2050s, respectively and increased by 23.02% and 28.49% compared to 4A2C. Furthermore, 6A achieved the highest single-cycle equivalent yield (59.98 t/hm²) under the historical scenarios. Regarding precipitation matching, values exceeded 0.6 for maize and were >0.8 for alfalfa during May - August. However, the matching degree was lower in April, September-

收稿日期:2025-08-11;修回日期:2025-12-21

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(32001404);山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ26)资助

作者简介:刘鹏(2000-),男,汉族,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事田间粮草耦合与模型应用研究,E-mail: 18137573069@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: yangxuan2019@sxau.edu.cn

ber, and October, indicating substantial irrigation requirements. The precipitation matching were significantly improved by future scenarios ($P < 0.05$), though the values of 6A remained lower than 4A2C during April and May. In conclusion, 6A maximized land productivity under future climates with enhanced irrigation in spring conversely. 4A2C offers a more balanced combination of productivity and water use efficiency. Our results could support the strategies of optimized forage and adaptive rotation strategy in Shanxi.

Key words: Alfalfa; Maize; Crop rotation; Climate change; APSIM

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)具有卓越的饲用价值和经济价值,是全球广泛种植的豆科饲料作物,享有“牧草之王”的美誉。当前,山西省畜牧业正处于转型发展阶段,市场对高品质、高标准紫花苜蓿饲草的需求持续增强,供应已出现短缺,亟需扩大种植规模。与此同时,气候变化引发的一系列灾害更对紫花苜蓿生产的扩大与种植推广构成了显著障碍;因此,设计一套适用于当地、且具有推广价值的紫花苜蓿种植模式具有重要的现实意义。

目前,山西省紫花苜蓿的种植模式以长期单作为主,存在土壤干层的风险(即深层土壤水分过度消耗),不利于可持续生产^[1]。研究表明,将紫花苜蓿与当地常见作物进行合理轮作更有利于提高土地生产力和生产效率^[2]。玉米(*Zea mays* L.)作为山西省种植规模最大的粮食作物,与紫花苜蓿轮作种植能有效提高土壤水分保持能力,为后续作物生长提供充足水分^[3]。在气候变化背景下,降水格局的改变对苜蓿和玉米的生长及产量影响尤为显著^[4]。研究普遍认为,气候变化将导致降水量及其时空分布发生显著变化,直接影响作物生长周期内的水分供需平衡^[5-7]。紫花苜蓿与玉米根系结构的显著差异,水分利用特征差异较大^[8],实行轮作可使两者在水分利用上形成互补,有助于优化土壤水分的空间分布和利用效率,分散和降低气候变化带来的整体风险,增强农业系统对气候变化的适应能力^[9-10]。轮作系统在水分利用方面的互补优势,及其应对未来气候变化的实际效果尚需在长时间尺度进行量化评估,而作物模型是探究未来气候变化对复杂轮作系统效应的有力工具。农业生产系统模拟器(Agricultural Production System Simulator)是种结合多个作物模型的平台^[11],可基于气象数据、土壤属性、作物特性及农田管理措施,模拟包括玉米、紫花苜蓿、小麦、棉花等作物生产对不同环境条件的响应^[4,12-13]。利用APSIM模型,研究者能够有效预测作物在不同环境胁迫下的产量变化,显著降低研究的复杂性和成本^[14-15]。

基于此,本文拟以山西地区紫花苜蓿-籽实玉米轮作系统为研究对象,结合气候预测模型数据和田

间观测数据,利用APSIM模型探究未来气候条件下:紫花苜蓿-籽实玉米轮作的降水匹配度于各月份降水条件下的变化;作物产量及灌溉需水量对不同种植模式和气候情景的响应。研究结果可为山西地区构建切实可行、适应气候变化的紫花苜蓿-籽实玉米轮作策略提供理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以山西省的晋中市太谷区、晋北地区朔州市的右玉县及山阴县为主要研究区,均属于温带大陆性季风气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,雨热同期,降水分布极度不均。太谷区、右玉县和山阴县的多年平均降水量分别为458,419和428 mm,且三个地点的昼夜温差均较大,年平均气温分别为9.5℃~10.5℃、2.9℃~6.1℃和4.8℃~7.9℃。太谷、右玉和山阴的年平均日照时数为2500~2700 h。总体而言太谷因其地理位置偏南,相对湿热,山阴、右玉相对干冷,其中右玉最为寒冷。

1.2 田间试验设计

大田试验一为紫花苜蓿种植试验,于2021—2023年于山西农业大学太谷草品种试验基地开展^[16]。试验选用3个“WL”系列紫花苜蓿品种,包括WL168HQ、WL343HQ及WL440HQ(购买于北京正道生态科技有限公司)和3个国产品种,分别为‘草原2号’、‘肇东’、‘新疆大叶’(购于甘肃大业牧草科技有限责任公司)。试验地共设6个处理(品种),每个处理共9个重复,各品种的小区面积为9 m²,随机分布。各品种均于2021年6月中旬播种,播种深度为3 cm,行距为50 cm,播种密度为30 kg·hm⁻²。

大田试验二为轮作模式实验^[17],于2020—2023年于山西右玉黄土高原草地生态系统国家定位观测研究站开展,试验区根据当地气候条件、种植历史设置了4个包含玉米作物的模式:玉米-饲用燕麦(*Avena sativa* L.)轮作、玉米-秣食豆(*Glycine max*

(L.) Merr.) 轮作、玉米-马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 轮作及玉米连作。在多生产模式设计的基础上,设 2 个不同的轮作时间序列对应各轮作模式。玉米-饲用燕麦轮作,表示于 2020 年分别播种饲用燕麦和玉米,次年轮换,其余轮作模式以此类推。田间试验部分的小区数总计为(5 个轮作模式×2 个时间序列+1 个连作模式+1 个休闲处理)×3 个重复= 36 个小区,随机区组设计。

1.3 数据来源

情景模拟基于 APSIM7.10 开展,主要使用气

象模块、土壤模块、作物模块、和管理模块,田间试验的气象数据和历史气象数据均取于中国气象局科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>),包括逐日最高气温(℃)、逐日最低气温(℃)、逐日降水量(mm)、逐日日照时间(h)和逐日太阳辐射(MJ·m⁻²)等,其中逐日太阳辐射使用埃斯屈朗方程计算^[18]。土壤数据包括分层土壤容重、饱和持水量、萎蔫系数、风干系数、田间最大持水量、和土壤 PH 等,由实验测定所得。作物管理数据主要包括品种、播种密度、播种深度、播种时间、行距、灌溉和收获等,均来自于大田实测。

表 1 各站点的土壤试验前基本参数^[16]

Table 1 Basic soil parameters of site^[16]

土壤深度 Soil depth/mm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	萎蔫系数 Bar lower/ (mm·mm ⁻¹)	田间持水量 Field capacity/ (mm·mm ⁻¹)	饱和含水量 Field saturation/ (mm·mm ⁻¹)	风干系数 Airdry coefficient/ (mm·mm ⁻¹)	地点 Site
0~10	1.256	0.140	0.235	0.483	0.011	右玉
10~20	1.324	0.148	0.259	0.477	0.012	右玉
20~40	1.313	0.160	0.254	0.457	0.014	右玉
40~60	1.327	0.172	0.264	0.436	0.018	右玉
60~80	1.354	0.231	0.275	0.428	0.016	右玉
80~100	1.368	0.173	0.285	0.447	0.017	右玉
100~120	1.418	0.174	0.311	0.334	0.017	右玉
0~10	1.370	0.110	0.320	0.420	0.040	晋中
10~20	1.370	0.110	0.330	0.430	0.040	晋中
20~40	1.320	0.140	0.360	0.450	0.040	晋中
40~60	1.310	0.150	0.370	0.450	0.040	晋中
60~80	1.280	0.170	0.390	0.460	0.050	晋中
80~100	1.260	0.180	0.400	0.470	0.050	晋中
100~120	1.280	0.190	0.390	0.460	0.040	晋中
0~10	1.276	0.137	0.226	0.466	0.012	山阴
10~20	1.345	0.144	0.257	0.498	0.014	山阴
20~40	1.323	0.152	0.254	0.531	0.015	山阴
40~60	1.364	0.166	0.264	0.521	0.017	山阴
60~80	1.374	0.223	0.268	0.478	0.017	山阴
80~100	1.369	0.189	0.254	0.423	0.018	山阴
100~120	1.422	0.197	0.345	0.364	0.018	山阴

1.4 APSIM 模型验证

前期研究中,APSIM 模型基于 2021—2023 年田间试验一的测定数据对紫花苜蓿品种(WL168 HQ、WL343HQ、WL440HQ)参数进行了校准并验证,归一化均方根误差(Normalized Root Mean Squared Error,NRMSE)为 10.81%~14.98%,一致性指数(Index of Agreement,D)为 0.90~0.94^[16];基于 2020—2021 年田间试验二的测定数据对玉米品种参数(利合 228)进行了校准并验证了该模型的精确性,结果显示归一化均方根误差为 11.15%^[17];以上数据已说明该模型描述紫花苜蓿与籽实玉米

生产的能力较好。

本研究进一步基于 2022—2023 年的田间试验数据进行验证模拟,并采用 RMSE、NRMSE 与 D 指数判定模型模拟玉米作物的籽粒产量及地上生物量的精确度。RMSE 和 NRMSE 反映了模拟值与实测值的绝对误差和相对误差,其值越小说明模拟效果越好。D 值可以量化模型模拟值的上升下降趋势的准确性。各指标计算方法如下:

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{sim})^2}}{Y_{obs}} \quad (2)$$

$$D = 1 - \frac{\sum (S_i - O_i)^2}{\sum (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

式(1)至式(3)中, S_i 为模拟值, O_i 为实测值, $\bar{O}$ 为实测平均值, $\bar{S}$ 为模拟平均值, n 为样本数。

1.5 情景模拟

本研究将在 APSIM 验证结果良好的前提下进行长期气候情景模拟,以评估气候变化对晋中地区苜蓿和籽实玉米生产的潜在影响,分析未来气候情景下降降水时间分布与作物需水的匹配程度。本研究基于 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) 全球气候模式生成的三个站点气候情景,并模拟三种生产模式的长期生产,分别为:紫花苜蓿-籽实玉米模式(5A1C、4A2C),紫花苜蓿(6A)。每种模式均为6年循环,如5A1C为五年紫花苜蓿连续收获,第六年种植籽实玉米。参考田间试验的管理设置播期、播种深度、密度和行距等参数。三个站点的土壤数据均来自于田间试验测定。初始土壤含水量设置为田间持水量的80%,采用连续模拟进行模拟,即初始条件不重置。

未来气候预测数据集通过CMIP6中的全球气候模式(Global Climate Model)获得降尺度的气候情景,涵盖三个时段:历史情景(1985—2014年,1980s)和两个预测情景(2021—2050年,2020s、2051—2080年,2050s)。其中,历史情景数据用于偏差校正和未来数据校准,而预测情景则选取了SSP5-8.5情景。本研究选用的GCM为ACCESS-CM2, CMCC-CM2, FGOALS-g3, MIROC6 和 NorESM2逐日尺度数据,并针对研究区进行了情景数据降尺度处理,主要包括最高气温、最低气温、降水量、地表向下短波辐射,并通过书写 APSIM. Met 文件将日尺度气候数据转化为 APSIM 所需要的气候数据。

1.6 数据计算

1.6.1 作物产量 本研究于长期模拟结果中输出所有情景和生产模式中紫花苜蓿与籽实玉米的逐年产量。模拟紫花苜蓿收获规则为每个花期收获,如10月10日前未达到花期则强制收获;籽实玉米的收获基于模型的默认成熟规则,即当作物达到生

理成熟期时自动触发收获。为了量化计算紫花苜蓿和籽实玉米的当量产量,使用以下公式来计算食物当量^[19],从而计算出当量产量,食物当量的计算遵循娄珊宁等^[20]确立的转换系数。

$$FEU = \frac{H}{1585} + \frac{P}{77.0} \quad (4)$$

$$\text{苜蓿当量产量} = \text{玉米产量} \times \left(\frac{\text{玉米FEU}}{\text{苜蓿FEU}} \right) \quad (5)$$

式(4)、(5)中, FEU 为饲草的食物当量, H 为单位重量(100g)食物中的能量, P 为单位重量(100g)食物中的蛋白质含量。

1.6.2 作物需水量 作物需水量是指作物处于土壤水分充沛和土壤肥沃条件下,作物生长发育过程中所需要消耗的水量,其值为土壤蒸发、作物蒸腾以及组成植株体的水量之和。但因组成植株体的水量较少(小于总水量1%),一般将高产条件下的土壤蒸发和作物蒸腾之和作为作物需水量。本研究基于情景模拟量化作物需水中的土壤蒸发量和作物蒸腾量。

$$ET_c = E_s + E_p \quad (6)$$

式(6)中, ET_c 为作物需水量; E_s 为土壤蒸发量; E_p 为作物蒸腾量。

1.6.3 灌溉需水量 灌溉需水量由作物需水量减去有效降水量计算得出,计算公式为:

$$I_s = ET_c - P_e \quad (7)$$

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.02P)}{4.17}, & P < 83 \\ 4.17 + 0.1P, & P \geq 83 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、(8)中 ET_c 为日作物需水量, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$; P_e 为日有效降水量, mm ; P 为日降水量, mm ; I_s 为灌溉需水量, mm 。

1.6.4 降水匹配度 作物降水与需水匹配度,是指自然降水满足作物生长水分需求的程度。APSIM 模型在模拟作物产量形成时,充分考虑了作物不同生育期对水分需求的差异,作物被划分为一系列离散的、有序的生育阶段来表示作物的生育期(玉米:1.999~10;紫花苜蓿:1.999~6)。使用模型模拟的作物生育期内月总需水量与月总有效降水量的比值,来精确反映当地降水分配与作物每月生长需水的匹配程度。

$$\tau = \begin{cases} \frac{P_e}{ET_c}, & P_e < ET_c \\ 1, & P_e \geq ET_c \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中, τ 为该月降水与作物需水的匹配度,

无量纲; P_i 该月总有效降水量,mm; ET_i 该月总作物需水量,mm。

1.7 数据处理

本研究利用 Microsoft Excel 2019 对数据进行输入与整理,以不同轮作方式为处理,以所有年份中的情景模拟输出的逐年产量作为重复,以不同的预测情景为处理,以所有轮作方式中的情景模拟输出的需水、降水及降水匹配度作为重复,使用 SPSS 26 选择 t 检验进行差异显著性分析,使用科研绘图软件 Origin 2021 绘图。

表 2 2022—2023 年玉米籽粒产量实测值和 APSIM 模型模拟值的比较

Table 2 Comparison of biomass and yield of maize in 2022—2023 with the simulated values of the APSIM model

测定项目 Measured item	年份 Year	测试指标 Validation index		
		RMSE/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	NRMSE/%	d
玉米籽粒产量 Maize yield	2022	1651.93	16.81	0.8001
	2023	2325.66	19.08	0.6752
玉米生物量 Maize biomass	2022	952.92	9.19	0.9728
	2023	3071.50	19.89	0.9206

2.2 不同情景下各区域气候变化趋势

对于籽实玉米来说,2020s 比 1980s,生育期降水平均提高 94.04 mm,平均气温提高 5.79℃。站点降水提升幅度中,山阴最大(69.49%),右玉最小(14.85%),晋中为 46.92%。2050s 相比 2020s,生育期降水平均减少 16.22 mm,整体减少幅度约

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型验证指标

验证结果表明,2022 年玉米籽粒产量实测值和模拟值的 RMSE 为 $1651.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,NRMSE 为 16.81%;生物量实测值和模拟值的 RMSE 为 $952.92 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,NRMSE 为 9.19%,d 值为 0.8001~0.9728(表 2)。2023 年籽粒产量的 RMSE 为 $2325.66 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,NRMSE 为 19.08%;生物量的 RMSE 为 $3071.50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,NRMSE 为 19.89%,d 值为 0.6752~0.9206(表 2)。

4.87%,温度平均提高 1.77℃(表 3)。对于苜蓿来说,2020s 比 1980s,生育期降水平均提高 230.87 mm,平均气温提高 4.95℃。站点降水提升幅度中,晋中最大(65.89%),右玉最小(25.85%),山阴为 37.51%。其中,右玉的气温提升高达 6.45℃,为各站点最高(表 3)。

表 3 三个年代的生育期内平均降水和平均温度

Table 3 Average precipitation and temperature during the growing season across three decades

作物 Crop	站点 Site	年均生长季降水 Average precipitation/mm			平均温度 Average temperature/℃		
		1980s	2020s	2050s	1980s	2020s	2050s
玉米 Maize	山阴	193.31	327.66	313.60	18.46	23.75	25.65
	右玉	304.48	349.68	322.71	17.09	25.01	27.07
	晋中	218.65	321.23	313.60	20.22	24.39	25.75
苜蓿 Alfalfa	山阴	510.09	701.41	748.09	9.45	11.84	13.27
	右玉	553.86	697.02	754.07	5.80	12.25	13.49
	晋中	543.51	901.63	931.55	9.04	15.06	16.38

2.3 不同气候情景对当量产量的影响

结果表明,在未来情景下(2020s 和 2050s),太谷相较于山阴,平均当量产量高出 18.15%~43.83%,山阴相较于右玉,平均当量产量高出 17.52%~31.84%(图 1),在历史情景下,山阴的当量产量最高。在两个未来情景实施 6A 的当量产量显著高于 5A1C 和 4A2C ($P<0.05$),在 2020s 和 2050s 时期,实施 6A 相较于 5A1C 和 4A2C,2020s 增产 9.45% 和 23.02%,2050s 增产 12.12% 和 28.49%。在历史情景实施 6A 相较于 5A1C 和 4A2C 增产 7.17% 和 13.58%。

统计分析显示,对于两个未来情景(2020s 和 2050s),不同处理间的当量产量存在显著差异($P<0.01$),历史情景下山阴地区存在显著差异($P<0.05$)(图 1A)。

2.4 不同情景下紫花苜蓿的降水匹配度

5—8 月份降水基本可以满足苜蓿生长所需,均值在 0.8 以上;9 月和 10 月难以满足;0.5 左右则需要额外浇水灌溉;4 月几乎无法满足,均在 0.5 以下。右玉和山阴在 9、10 月的降水匹配度更低(图 2A、B、C)。

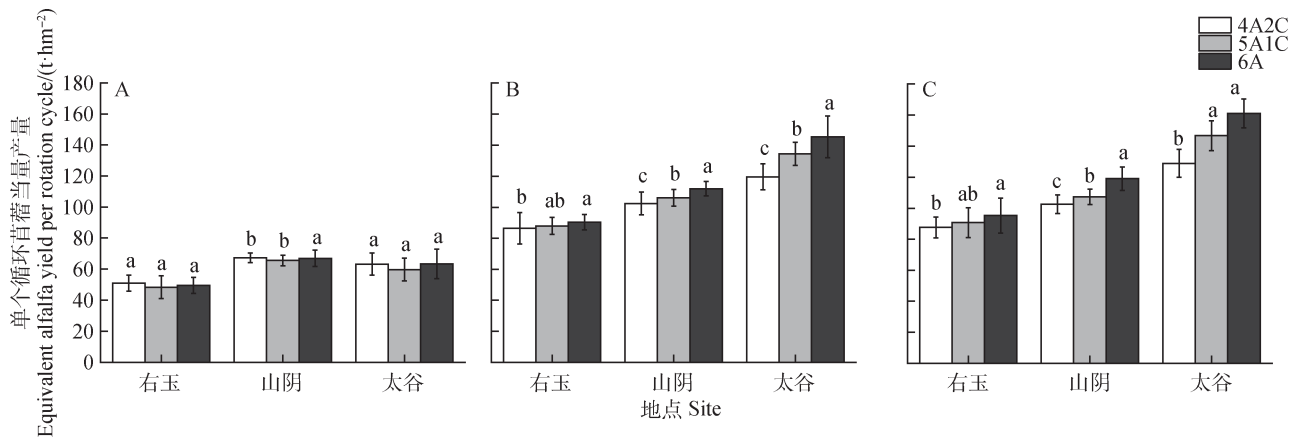


图1 三个年代的单个循环紫花苜蓿当量产量

Fig. 1 Equivalent alfalfa yield per rotation cycle across three decades

注: 4A2C, 4年苜蓿—2年籽实玉米轮作; 5A1C, 5年苜蓿—1年籽实玉米轮作; 6A, 6年苜蓿。A, 1980s; B, 2020s; C, 2050s

Note: 4A2C, 4 years of alfalfa-2 years of maize rotation; 5A1C, 5 years of alfalfa-1 year of maize rotation; 6A, 6 years of alfalfa. A, 1980s; B, 2020s; C, 2050s

三个地区的降水在2020s的匹配度比1980s平均高出15.03%, 2050s比2020s高出3.67%, 且太谷的降水在未来情景出现明显的前移, 即7、8月份随着时间的推移, 8月降水匹配度有降低的趋势, 而5、6月份则有提高的趋势。对于不同处

理来说, 6A处理在4—5月的需水量更大, 因此降水匹配度相较于其他两个处理情景, 5A1C低7.21%, 4A2C低11.16%; 4A2C整体的平均降水匹配度达0.74, 是三个处理中最高的(图2A、B、C)。

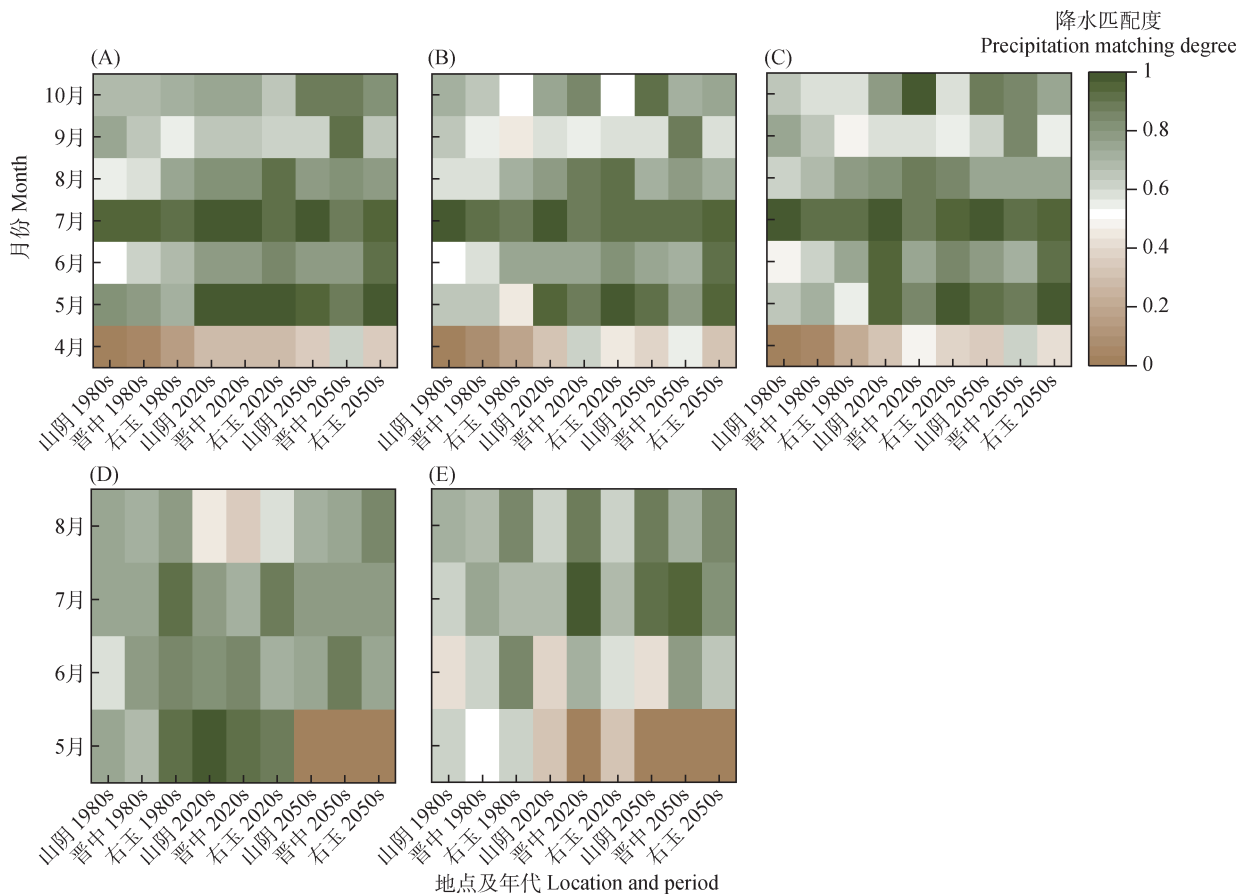


图2 玉米及苜蓿的降水匹配度

Fig. 2 Precipitation matching degree for maize and alfalfa

注: A, 4A2C 苜蓿; B, 5A1C 苜蓿; C, 6A 苜蓿; D, 4A2C 玉米; E, 5A1C 玉米

Note: A, alfalfa in 4A2C; B, alfalfa in 5A1C; C, alfalfa in 6A; D, maize in 4A2C; E, maize in 5A1C

2.5 不同情景下籽实玉米的降水匹配度

图2中的0值为输出无结果的赋值。玉米生长季内的降水基本可以满足其生长所需,均值在0.6以上,少数年份可达到0.8以上;6月的降水匹配度随着时间的推移有降低的趋势,而8月份则有提高的趋势(图2-D,E)。对不同处理来说,太谷地区5A1C处理的玉米降水匹配度比4A2C高了6%;而山阴、右玉地区玉米的降水匹配度则是4A2C优于5A1C,山阴地区高出24.09%,右玉地区高出18.71%。

2.6 不同情景下紫花苜蓿的灌溉量

4月和9月紫花苜蓿的灌溉需水量较大均值可达42 mm;各个地区的最高点出现在2020s的4月和9月(图3)。与1980s相比,2020s在春、秋季(4、5、9、10月)的灌溉用水需求增加10~20 mm,而在夏季(6—8月)平均减少5~8 mm。与2020s相比,2050s在春秋季节灌溉用水减少10~15 mm,夏季灌溉增加3~5 mm,同时该情景夏季自然降水相对更多,太谷地区的增加量最高,达8~10 mm。

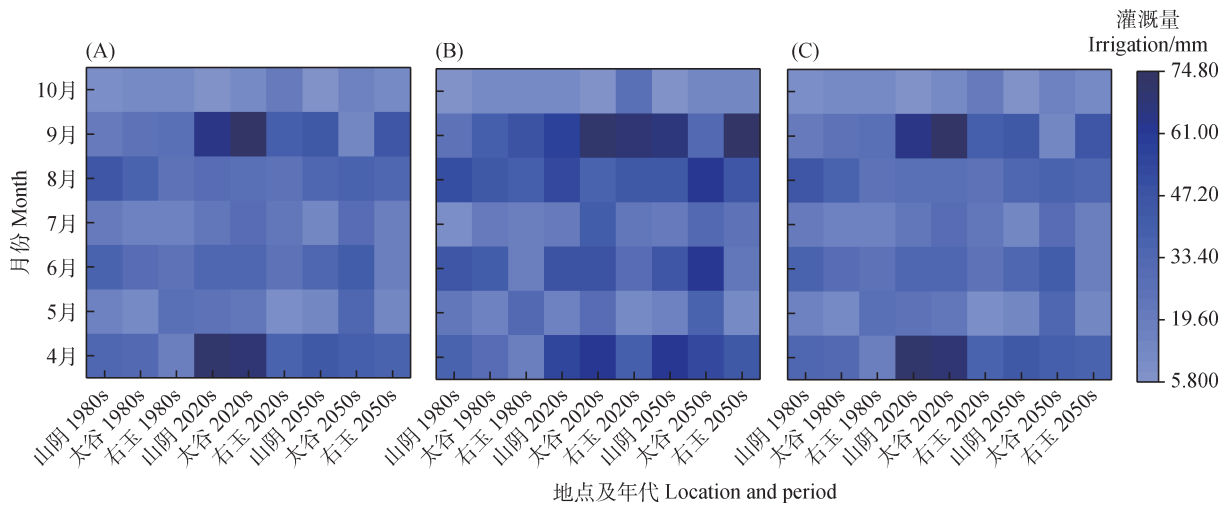


图3 紫花苜蓿生长季的灌溉量

Fig. 3 Irrigation amount during the alfalfa growing season

注:A, 4A2C紫花苜蓿;B, 5A1C紫花苜蓿;C, 6A紫花苜蓿

Note: A, alfalfa in 4A2C; B, alfalfa in 5A1C; C, alfalfa in 6A

2.7 不同情景下籽实玉米的灌溉量

与1980s相比,2020s在6月和7月需要增加10~13 mm的灌溉用水,而8月减少3~5 mm;与2020s相比,2050s在8月的灌溉用水进一步减少4~5 mm,而6月和7月的灌溉用水则增加约8~10 mm(图4)。

3 讨论

3.1 模型验证与不确定性

为分析未来气候变化下苜蓿-籽实玉米轮作体系的降水匹配度及灌溉量响应,本研究在模型校准的基础上,利用2022—2023年研究区内的实测数据对APSIM模型进行了验证。通常,为确保模型输出结果的可信度,要求模拟值与实测值的归一化均方根误差(NRMSE)不超过30%^[15]。本研究的验证结果表明,APSIM模型模拟研究区内籽实玉米产量及生物量的NRMSE均小于20%,表明模拟效果较好,但与校准阶段的验证指标仍存在差异。这主要

源于两方面原因:其一,2022年降水模式较为极端,5—6月降水稀少(92.2 mm),而7—8月降水过多(305.8 mm),导致模型在该时段模拟值偏高^[21];其二,2023年玉米播种后未能及时灌溉,且早期生育期内降水不足,影响了玉米出苗,也造成了一定误差。此外,作物模型对病虫害及杂草的描述较为缺失,模拟的作物生产处于最理想状况,这也可能导致模拟值与实测值之间存在差距。

3.2 未来气候特征与区域敏感性

气候模式是评估气候变化的重要基础,但多数模式通常存在空间分辨率不够精确、系统性偏差等问题^[22],且常高估降水天数并低估暴雨的影响^[23]。在此背景下本研究基于CMIP6数据整理归纳了三个站点未来气候变化情景,结果表明:未来三个站点生长季内降水和平均气温均呈上升趋势。相较于1980s,2020s生长季平均降水增加了约200 mm,平均气温升高了约4℃;而2050s相较于2020s,生长

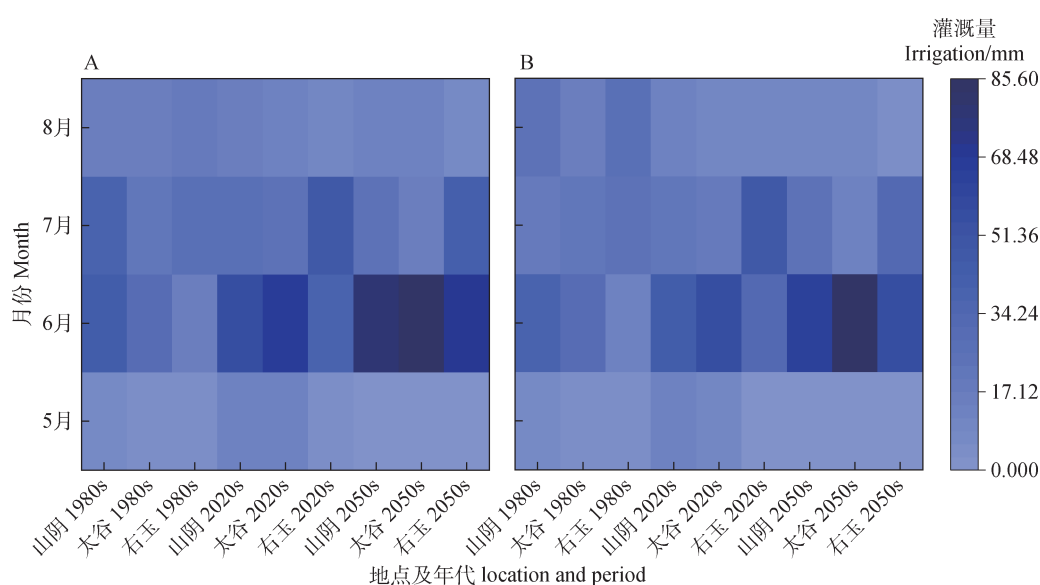


图 4 玉米生长季的灌溉量

Fig. 4 Irrigation amount during the maize growth season

注:A, 4A2C 玉米; B, 5A1C 玉米

Note: A, maize in 4A2C; B, maize in 5A1C

季平均降水进一步增加约 40 mm, 平均气温升高约 1.3℃。此升温幅度高于全球平均水平^[24], 说明研究区作物生产在未来更易受到气候变化威胁, 亟需开展系统的长期生产稳定性评估。

本研究所关注的研究区域中, 紫花苜蓿通常采用春播的种植方式, 以规避冬季低温导致的幼苗死亡风险, 提高植株越冬率。对于紫花苜蓿-籽实玉米轮作系统来说, 较为常见的管理模式为终止紫花苜蓿的耕作后, 经过冬季休闲并于次年春季播种籽实玉米; 本研究关注的轮作序列(如 5A1C, 4A2C)正是基于此类茬口衔接模式。这种基于传统经验的茬口衔接模式, 易受到春季气候不稳定性的影响, 如“倒春寒”等极端事件。对于紫花苜蓿而言, 尽管春播可在一定程度规避种植当年的冬季低温损害, 但植株在早春期间遭遇极端天气时同样可能遭受冻害; 而暖化的未来气候或可在一定程度减轻“倒春寒”等的天气威胁。

3.3 轮作产量响应与机理解释

本研究基于 APSIM 模型定量分析了不同轮作制度、不同站点下苜蓿当量产量在未来预测情景中的变化趋势。结果表明: 在 1980s、2020s 和 2050s 时期, 6A(单循环种植 6 年苜蓿)的单循环产量高于 5A1C(5 年苜蓿+1 年籽实玉米)和 4A2C(4 年苜蓿+2 年籽实玉米)。未来情景下, 温度升高会缩短玉米生育期, 减少干物质积累时间, 导致产量下降^[25]。

此外, 升温会提高农田蒸发速率, 进一步影响作物水分供给, 从而加剧产量下降趋势^[26]。对于苜蓿而言, 作为多年生饲草作物, 其生长季较长, 可在整个无霜期内生长。虽然高温导致的生育期缩短会降低其单茬产量, 但未来情景中降水量的增加有利于整体产量提升。总体而言, 降水增加带来的增产效益强于高温造成的减产影响^[27]。

另外, 本研究方差分析结果显示, 同一地点不同轮作处理下的当量产量存在差异。具体而言, 右玉地区不同处理间差异显著($P < 0.05$), 而太谷地区差异十分显著($P < 0.01$); 但两地点的总体变化趋势相同, 表明地点因素对处理效应的影响有限。因此, 在所有情景下, 选择 6A(单循环种植 6 年苜蓿)的产量最高, 5A1C 次之。6A 处理所得当量产量最高, 主要原因是其避免了因种植玉米而导致的苜蓿地翻耕, 使得多年生苜蓿深广的根系能够持续利用深层土壤水分, 最大化利用整个生长季的光热资源。但高年限的紫花苜蓿种植会持续消耗深层土壤水分, 导致土壤干层加剧^[28]。

此外, 紫花苜蓿连作带来的自毒效应(如残茬分解毒素与根系分泌物累积)会随连作年限增加而加剧, 影响土壤微生态及自身根系功能^[29]。相较于, 5A1C 和 4A2C 处理通过引入一年生籽实玉米使种植模式的复杂度提高, 不仅能缓解连作带来的自毒效应, 生长季较短、耗水模式与紫花苜蓿形成差异化的玉米在收获后的土地休闲期也可提供土壤

水分恢复的窗口,是该类轮作模式维持长期水分平衡与土壤环境健康的关键。因此,尽管单循环(6年)的当量产量略低,但引入玉米的轮作模式从系统可持续性角度看更具优势。

3.4 降水匹配度与灌溉需求

不同生育时期遭受干旱胁迫会对植物造成不同程度的影响^[30]。山西地区籽粒玉米生长季通常在5—9月之间,该时期内降水变化较小(平均为75.34 mm)。然而,从前后两个时期灌溉量的变化可知,降水发生了后移现象,即从6—7月向8—9月偏移(图4)。更多的降水集中在8—9月份,而非玉米抽穗、灌浆等关键需水期的7月份;这导致关键生育时期缺水的风险提高,降低了降水匹配度(图2),迫使植株需要更多灌溉水以维持生产稳定,总体对山西地区的玉米生产产生不利影响。随着温度上升,玉米生育期也会缩短^[31]:如情景模拟显示,2062年的春玉米因高温导致生长季缩短至不足3个月,于7月份即结束生产;而降水又集中在8月之后,造成关键生育时期严重缺水,大幅降低籽粒产量。在这种情况下,采取6A种植方法是最优选择。

总体而言,降水后移和气温升高的气候变化特征显著降低了玉米的降水匹配度,同时延长了玉米的播种窗口期,因此可通过调整播期来适应降水模式的改变。然而,播期调整可能产生的次生效应,及其对种植模式调整的复合影响,仍需进一步研究与探讨。紫花苜蓿作为多年生植物,其生长季横跨春、夏、秋三季。未来预测情景下,其生长季内降水增加量较大(平均增加234.62 mm),灌溉量呈现低于历史情景的趋势。情景模拟结果还显示,4月和9月的灌溉用水需求较多,且未来情景高于历史情景(图3)。造成此现象的原因是:未来情景的升温加剧了土壤水分蒸发,同时暴雨频次显著增加^[32]。虽然整体降水量提高,但局部暴雨可能造成时间分布不均,增加了局部干旱风险并降低了降水匹配度^[33]。相较于历史情景,未来情景下5月和6月的降水匹配度有所降低,7月基本持平,而8月、9月和10月则有所提高;这表明月降水量呈现出从历史情景的5—6月向未来情景的8—10月偏移的现象。紫花苜蓿的根系较深,可达3~4 m^[34],因此水分利用能力较强。但本研究区域属于半干旱雨养农业区,雨水通常难以渗透至2 m以下土层^[35],连续多年的苜蓿生产会严重消耗土壤水分,导致土壤干层

加剧^[28]。

综上,6A处理在降水匹配度方面的表现较低,需要额外补充更多灌溉水;而紫花苜蓿与单季作物轮作则有助于土壤干层水分的逐渐恢复^[36],故4A2C整体降水匹配度更高,在灌溉不便的旱作地区更适宜采用该模式。

4 结论

本研究在2022—2023年田间实测数据的支持下验证了APSIM模拟籽实玉米产量和生物量的精度(NRMSE为9.19%~19.89%),并证实了气候变暖与降水后移会缩短作物生育期并在玉米的生殖生长期放大水分缺口(降水匹配度下降10%~15%)。综合历史与未来情景,6年苜蓿轮作(6A)在当量产量与土地生产力方面最优,但需加强春季与关键期灌溉,防范局部暴雨致渍涝造成的产量波动;灌溉受限或典型旱作区宜采用4A2C以提升降水利用率与稳产性。本研究明确了气候变化下轮作优选与水管理要点,为山西节水灌溉制度优化、抗旱品种布局与适应性种植提供了一定的依据。

参考文献

- [1] 高瑞,牛伊宁,何仁元,等. 不同种植年限苜蓿地球囊霉素相关土壤蛋白含量及其影响因素[J]. 草业科学,2024,41(3): 700-708
GAO R, NIU Y N, HE R Y, et al. Content and factors influencing glomalin-related soil protein of alfalfa fields at different growing ages[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(3): 700-708
- [2] 郑敏娜,康佳惠,龚瑞杰,等. 不同苜蓿-粮食作物(饲草)轮作模式对土壤细菌群落组成及其生态功能影响[J]. 草地学报, 2025, 33(5): 1387-1397
ZHENG M N, KANG J H, GONG R J, et al. Effects of various alfalfa-crop (forage) rotation patterns on bacterial community composition and ecological function prediction[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1387-1397
- [3] LEE J, KIM H J, PARK S. The effects of legume rotation on water use efficiency in maize production[J]. Agricultural Water Management, 2018, 202: 104-113
- [4] PENG Y X, ZHANG F X, ZHANG S, et al. Using APSIM to optimize corn nitrogen fertilizer application levels in alfalfa-corn rotation system in Northeast China[J]. Field Crops Research, 2024, 318: 109596
- [5] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M].

- Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 157-159
- [6] ELLIOTT J, DERYNG D, MÜLLER C, et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111: 3239-3244
- [7] ARIAS P, BELLOUIN N, COPPOLA E, et al. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary[R]. 2021
- [8] DARYANTO S, WANG L, JACINTHE P A. Global synthesis of the effects of mulching on crop yield[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 25-35
- [9] TITTONELL P, GILLER K E. When yield gaps are poverty traps: the paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture[J]. *Field Crops Research*, 2013, 143: 76-90
- [10] WANG B, WANG G Y, VAN DAM J, et al. Diversified crop rotations improve crop water use and subsequent cereal crop yield through soil moisture compensation[J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 294: 108721
- [11] 蒙继华, 王亚楠, 林圳鑫, 等. 作物生长模型研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(2): 1-15, 27
- MENG J H, WANG Y N, LIN Z X, et al. Progress and perspective of crop growth models[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(2): 1-15, 27
- [12] ZHENG J H, ZHANG S. Decomposing the total uncertainty in wheat modeling: an analysis of model structure, parameters, weather data inputs, and squared bias contributions[J]. *Agricultural Systems*, 2025, 224: 104215
- [13] LI Z, MENEFFEE D, YANG X, et al. Simulating productivity of dryland cotton using APSIM, climate scenario analysis, and remote sensing[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 325: 109148
- [14] 伍露, 程陈, 杨霏云, 等. 基于 APSIM 模型的不同降水年型下春小麦水氮管理模式优化研究[J]. *麦类作物学报*, 2025, 45(1): 103-111
- WU L, CHENG C, YANG F Y, et al. Optimization of water and nitrogen management mode for spring wheat under different precipitation year types based on APSIM model[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(1): 103-111
- [15] 蒲锦琳, 王俊, 王科锋, 等. 基于 APSIM 模型的降水和温度变化对秸秆覆盖冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(21): 101-109
- PU J L, WANG J, WANG K F, et al. Response of winter wheat yield under straw mulching in dryland to precipitation and temperature using APSIM model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(21): 101-109
- [16] 朱敏, 牛帅帅, 侯青青, 等. 山西晋中盆地紫花苜蓿生产对水分和气温的响应[J]. *草地学报*, 2024, 32(1): 207-218
- ZHU M, NIU S S, HOU Q Q, et al. The response of alfalfa production in Jinzhong Basin, Shanxi Province to water and air temperature[J]. *Acta Agraria Sinica*, 2024, 32(1): 207-218
- [17] YANG X, JIA P F, HOU Q Q, et al. Quantitative sensitivity of crop productivity and water productivity to precipitation during growth periods in the Agro-Pastoral Ecotone of Shanxi Province, China, based on APSIM[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 283: 108309
- [18] 童成立, 张文菊, 汤阳, 等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(3): 165-169
- TONG C L, ZHANG W J, TANG Y, et al. Estimation of daily solar radiation in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(3): 165-169
- [19] 张莉敏, 栗如祥, 张梦月, 等. 刈割时期对粮饲兼用小麦产量及品质的影响[J]. *陕西农业科学*, 2025, 71(8): 20-28
- ZHANG L M, LI R X, ZHANG M Y, et al. Effects of cutting period on yield and quality of grain-forage dual-purpose wheat[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 71(8): 20-28
- [20] 娄珊宁, 侯扶江, 任继周. 用食物当量评价草地农业的生产力[J]. *草业学报*, 2019, 28(12): 1-16
- LOU S N, HOU F J, REN J Z. Evaluation of grassland agricultural productivity by food equivalent unit[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 1-16
- [21] KIVI M S, BLAKELY B, MASTERS M, et al. Development of a data-assimilation system to forecast agricultural systems: A case study of constraining soil water and soil nitrogen dynamics in the APSIM model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 820: 153192
- [22] DING Y M, WANG W G, ZHUANG Q L, et al. Adaptation of paddy rice in China to climate change: the effects of shifting sowing date on yield and irrigation water requirement[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 228: 105890
- [23] 潘聪聪. 黄淮海地区夏玉米干旱灾害风险评估及预估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018: 43-47
- FAN C C. Drought risk assessment and prediction of summer maize in the Huang-Huai-Hai region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018: 43-47
- [24] PAPALEXIOU S M, RAJULAPATI C R, CLARK M P, et al. Robustness of CMIP6 historical global mean temperature simulations: trends, long-term persistence, autocorrelation, and distributional shape[J]. *Earth's Future*, 2020, 8(10): e2020EF001667
- [25] 宋艳玲, 周广胜, 郭建平, 等. 不同播期对玉米先玉 335 产量和品质的影响[J]. *应用气象学报*, 2024, 35(5): 619-628
- SONG Y L, ZHOU G S, GUO J P, et al. Influence of different sowing dates on yield and quality of corn Xianyu 335[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2024, 35(5): 619-628
- [26] 杨芳欣, 张雅静, 张向前, 等. 北方农牧交错区滴灌梯度对玉米吐丝期光合特征及干物质积累的影响[J]. *山西农业科学*, 2025, 53(1): 55-63
- YANG F X, ZHANG Y J, ZHANG X Q, et al. Impact of drip irrigation gradient on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation of maize at tasseling-silking stage in northern agro-pastoral ecotone[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2025, 53(1): 55-63

- [27] 何玉龙,杨增增,杨晓霞,等. 甘肃酒泉灌区12个紫花苜蓿品种的生产性能和营养品质综合评价[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250313.1029.002>, 2025-03-13/2026-05-22
- HE Y L, YANG Z Z, YANG X X, et al. Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 12 alfalfa varieties in Jiuquan Irrigation District, Gansu [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1069.S.20250313.1029.002>, 2025-03-13/2026-05-22
- [28] ZHAO W W, FANG X N, DARYANTO S, et al. Factors influencing soil moisture in the Loess Plateau, China: a review [J]. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2018, 109(3/4): 501-509
- [29] 张静怡, 韩海斌, 尹强, 等. 紫花苜蓿连作障碍研究进展[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 135-143
- ZHANG J Y, HAN H B, YIN Q, et al. Advanced in continuous cropping obstacles of alfalfa [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 135-143
- [30] FU Y, SHEN X, LI W, et al. Spatial and temporal evolution characteristics of meteorological drought in the northwest of Yellow River basin and its response to large-scale climatic factors [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2022, 13(12): 4283-4301
- [31] 任贺靖, 路凯超, 蔡甲冰, 等. 基于水热耦合的冬小麦-夏玉米产量响应与变化预测[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(2): 429-443, 484
- REN H J, LU K C, CAI J B, et al. Yield responses and predictions of future change for winter wheat-summer maize based on water-heat coupling [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(2): 429-443, 484
- [32] 高爽, 丁一民, 朱磊, 等. 基于AquaCrop模型的玉米需水和降水匹配度变化特征研究[J]. *节水灌溉*, 2023(6): 51-59
- GAO S, DING Y M, ZHU L, et al. Research on the matching degree of maize water demand and precipitation based on AquaCrop model [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(6): 51-59
- [33] 李孟蔚, 栾青, 张宁, 等. 2000—2019年吕梁市植被NDVI时空动态及其影响因素分析[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 248-254
- LI M W, LUAN Q, ZHANG N, et al. Analysis of spatiotemporal dynamics and influencing factors of vegetation NDVI in Lüliang city from 2000 to 2019 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 248-254
- [34] 宋丽萍. 黄土高原草田轮作系统田间水分蒸散特性及土壤水分恢复效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016: 32-36
- SONG L P. The characteristics of evapotranspiration and soil water recharging in lucerne-crop rotation on the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016: 32-36
- [35] 罗珠珠, 李玲玲, 牛伊宁, 等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿地土壤干燥化特征及适宜种植年限[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3059-3065
- LUO Z Z, LI L L, NIU Y N, et al. Soil dryness characteristics of alfalfa cropland and optimal growth years of alfalfa on the Loess Plateau of central Gansu, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3059-3065
- [36] 张恒宇, 安娟, 吴元芝, 等. 黄土高原典型植被条件下土壤剖面水、碳分布季节变化研究[J]. *中国水土保持*, 2024(3): 39-45
- ZHANG H Y, AN J, WU Y Z, et al. Seasonal variation of water and carbon distribution in soil profile of typical vegetation conditions on the Loess Plateau [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(3): 39-45

(责任编辑 彭露茜)