

徐芳,何建强,朱晓华,等. 利用 APSIM 模型评估播期和种植密度对关中玉米气候生产力的影响[J]. 陕西气象,2022(1):59-65.

文章编号:1006-4354(2022)01-0059-07

利用 APSIM 模型评估播期和种植密度对关中玉米气候生产力的影响

徐芳^{1,2,3},何建强^{1,2,4},朱晓华^{1,2,5},徐喜娟^{1,2},冯浩^{2,6},于强^{4,6}

(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. 国家知识产权局专利局专利审查协作四川中心,成都 610200;

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;

5. 西北有色勘测工程有限责任公司,西安 710038;

6. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:以陕西关中为研究区域,利用杨凌和长武的玉米试验数据校正和验证了 APSIM 模型,结合 1971—2010 年的气象数据,模拟了不同播期和种植密度情形下的玉米潜在生产力。结果显示: APSIM 模型在关中地区适应性较好。夏玉米潜在产量和雨养潜在产量分别为 8 756 和 4 236 kg/hm²,春玉米分别为 13 138 和 6 163 kg/hm²,通过灌溉最高可分别增产 52% 和 53%,而降雨量是制约该地区玉米生产的主要气候因子。适当推迟播期和提高种植密度可以有效提高玉米潜在产量和水分利用效率(water use efficiency, WUE)。其中,夏玉米潜在产量和雨养潜在产量最高可分别提高 20.0% 和 24.2%,春玉米可分别提高 21.7% 和 22.8%;夏玉米潜在 WUE 和雨养潜在 WUE 可分别提高 22.7% 和 20.8%,春玉米可分别提高 14.4% 和 20.0%。因此,同时优化播期和种植密度可以有效提高关中玉米的气候生产潜力。

关键词:玉米;气候生产潜力;APSIM;播期;种植密度;关中

中图分类号:S162.3:F326.11

文献标识码:A

玉米是陕西省重要的粮食作物,而关中地区是该省的玉米主产区^[1-2]。自 1978 年以来,该地区玉米单位面积产量呈现明显的增长趋势,平均每 10 a 产量增长率为 608 kg/hm²^[3]。气候是一个地区农业生产力的决定因素之一,有研究表明,降雨量是该地区影响玉米生长的重要气候因

子^[1,4];因此,为保证该地区玉米稳产高产,研究玉米在灌溉和雨养情景下的气候生产力以及探究不同管理措施对玉米生产力的影响具有重要意义。

随着气候变化及其不确定性成为农业生产研究的热点,利用模型评估作物的气候生产力可以同时涵盖多年和多种类型的气候情景,相对大田

收稿日期:2021-07-05

作者简介:徐芳(1994—),女,汉族,四川乐山人,硕士研究生,研究方向为农业生态系统模拟。

通信作者:何建强(1977—),甘肃天水人,教授,博士生导师,研究方向为农业生态系统模拟。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2019Z-5);陕西省重点研发计划重点产业创新链(群)-农业领域项目(2019ZDLNY07-03);西北农林科技大学人才专项资金(千人计划项目);高等学校学科创新引智计划(111 计划)(B12007)。

试验有限年型的局限性,作物模型展现出较大的优势^[5-6]。Meng等^[7]利用 Hybrid-Maize 模型,结合我国 1990—2009 年的观测气象数据,评估了我国玉米的平均生产潜力,结果表明全国玉米平均潜在产量和雨养潜在产量分别为 16.5 和 13.9 t hm²,通过灌溉玉米最大可增产约 15.5%。在关中地区,大多数研究还是基于田间试验研究玉米生产潜力,作物模型的应用相对较少,气候生产力的研究结果有限。基于田间试验结果评估模型在关中地区的适应性,结合多年的观测气象数据研究玉米的气候生产力具有较大研究价值。此外,大多数通过优化管理措施提高作物生产力的研究还集中在单因素变化,而研究同时调整多种措施的交互作用对提高作物生产力可能更具潜力^[8]。播期通常由当地的气候资源决定,适宜的播期有利于作物充分利用光、热和降水等气候资源,从而促进作物生长发育和产量形成^[1,9],同时,优化种植密度可以改善作物冠层结构和光热资源分布,从而改变作物生长发育模式^[10]。因此,本研究将首先基于田间试验数据评价 APSIM 模型在关中地区的适应性,然后利用验证后的 APSIM 模型,结合 1971—2010 年的观测气象数据,模拟该地区玉米的气候生产力,以及同时调整

播期和密度对玉米生产潜力的影响,从而为该地区玉米生产策略提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 数据来源

玉米田间试验分别在杨凌和长武进行,其中杨凌种植夏玉米品种“郑单 958”,实验数据为 2009—2012 年;长武种植春玉米品种“先玉 335”,实验数据为 2017—2018 年。管理参数包含不同的品种、播期、种植密度、施肥方式以及灌溉管理,试验观测指标包含玉米出苗期、开花期、成熟期和籽粒产量,主要用于校正和验证 APSIM 模型,具体的管理及试验数据见表 1。土壤持水特性通过土钻取样测定,深度为 1 m,每 20 cm 取样一次,均匀混合后采用烘干法测定,主要包含连续土层的容重、永久凋萎系数、田间持水量和饱和含水率(表 2)。两个站点 1971—2010 年的气象数据来源于中国气象局气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>),主要包括日降水量(mm)、日照时数(h)、最高气温和最低气温(°C),其中玉米生育期(播种期至成熟期)内多年平均气温分别为 24.11 °C 和 17.80 °C,平均太阳辐射分别为 18.12 MJ/m² 和 18.74 MJ/m²,平均降雨量分别为 362 mm 和 469 mm。

表 1 玉米田间试验具体信息

站点	品种	年份	播期(月-日)	成熟期(月-日)	施氮量	灌溉	密度
					/(kg/hm ²)	/mm(月-日)	/(株/m ²)
杨凌	郑单 958	2009—2012	06-10—06-13	09-29—10-02	82(基施) 55(追肥)	20(07-16), 20~30(07-28—08-06)	6,7.5
长武	先玉 335	2017—2018	04-26	09-17—09-23	225(基施)	0	6.5

表 2 玉米试验站点的土壤特性参数

土层 /cm	容重		永久凋萎点		田间持水量		饱和含水率	
	/(kg/cm ³)		/(mm ³ /mm ³)		/(mm ³ /mm ³)		/(mm ³ /mm ³)	
	杨凌	长武	杨凌	长武	杨凌	长武	杨凌	长武
0~20	1.270	1.270	0.110	0.066	0.282	0.277	0.510	0.506
20~40	1.390	1.350	0.066	0.098	0.279	0.287	0.490	0.472
40~60	1.400	1.300	0.110	0.110	0.289	0.289	0.480	0.476
60~80	1.370	1.250	0.110	0.110	0.291	0.290	0.470	0.468
80~100	1.370	1.250	0.110	0.110	0.272	0.275	0.540	0.536

1.2 模型模拟

1.2.1 APSIM 模型简介 APSIM (agricultural production systems simulator) 模型是由澳大利亚的联邦科工组织 (CSIRO) 以及昆士兰州政府的农业生产系统组 (APSRU) 联合开发的以日为步长的模拟农作物生产发育过程的机理模型^[11], 是可以精确模拟气候、土壤、农业管理措施以及品种特性对作物生产影响的有力工具^[12]。该模型输入主要包括气象数据、土壤数据、品种参数以及管理参数。使用 APSIM 7.7 版本模拟关中地区 1971—2010 年在不同管理情景下的玉米生产潜力。

1.2.2 模型的适应性验证 采用“试错法”调试 APSIM 模型的玉米品种参数, 主要包括不同品种玉米各生育期内所需积温、灌浆速率等参数 (表 3), 使玉米开花期、成熟期以及籽粒产量模拟值与观测值接近。分别利用 2009—2010 年杨凌夏玉米和 2017 年长武春玉米的试验数据, 校正 APSIM 模型, 采用 2011—2012 年夏玉米和 2018 年春玉米的试验数据验证模型。

表 3 玉米品种参数信息

品种参数	郑单 958	先玉 335
出苗期到拔节期所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	170	120
拔节期到始花期所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	30	30
开花期到灌浆初期所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	200	120
开花期到成熟期所需积温/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)	600	900
单株最大籽粒数/粒	700	660
潜在灌浆速率/($\text{mg}/(\text{粒} \cdot \text{d})$)	9.5	7.1
光周期/($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	10	8

1.2.3 模拟情景 潜在产量 (Y_p) 是指某一特定作物品种在没有水分和养分胁迫情况下, 仅受气象条件影响所能获得的最大产量; 雨养潜在产量 (Y_w) 通常指雨养情况下所能获得的潜在产量^[13-14]。 Y_p 和 Y_w 主要受温度、辐射和土壤特性的影响, 且 Y_w 还受降雨的影响^[15]。作物耗水量又称实际蒸腾蒸发量 (ET), 是指实际条件下作物获得一定产量时实际所消耗的水量, 而作物每消耗

单位水量获得的产量称为水分利用效率 (water use efficiency, WUE)^[16]。

本研究利用验证后的 APSIM 模型模拟不同管理情景下夏玉米和春玉米潜在和雨养情景下的潜在产量、耗水量和水分利用效率。为避免模型模拟中出苗失败的情形, 设置土壤剖面初始含水量为作物可用水量的 75%, 其中作物可用水量定义为凋萎含水率与田间持水量之间的差值。土壤剖面初始 NO_3 和 NH_4 含量分别设置为 $55 \text{ mg}/\text{m}^3$ 和 $8 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

充分灌溉情景下的模拟产量为潜在产量, 当土壤含水率比作物可用水量低 20 mm 时即进行自动灌溉, 直到土壤含水量等于作物可用水量, 以消除玉米生长过程中的水分胁迫。雨养情景下, 设置玉米全生育期内灌溉量为 0, 其他设置与充分灌溉情景相同, 此时的模拟产量为雨养潜在产量。模拟设置 4 个不同种植密度, 分别为 4、6、8、10 株/ m^2 , 其中 6 株/ m^2 是本地的常规种植密度, 夏玉米和春玉米的种植密度设置相同。此外, 设置 5 个不同播期, 以一周为间隔, 其中夏玉米播期分别设置 5 月 25 日 (S1)、6 月 1 日 (S2)、6 月 8 日 (S3)、6 月 15 日 (S4) 和 6 月 22 日 (S5); 春玉米播期分别设置 4 月 5 日 (S1'), 4 月 12 日 (S2'), 4 月 19 日 (S3'), 4 月 26 日 (S4') 和 5 月 3 日 (S5')。其中 6 月 8 日 (S3) 和 4 月 19 日 (S3') 分别是杨凌夏玉米和长武春玉米的常规播期。所有密度和播期共组成 20 种不同的交互情景。经过验证, 当施氮量大于 $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时, APSIM 模型模拟玉米产量变化不大。因此, 所有模拟情景下均设置施氮量为 $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 以消除养分胁迫。

1.2.4 模型评价统计指标 为了评估 APSIM 模型在关中地区的适应性, 在模型校正和验证过程中, 计算模拟值和观测值的均方根误差 (RMSE)^[17]、标准化均方根误差 (NRMSE)^[18] 和决定系数 (R^2)^[19] 来评价模型的适应性。RMSE 和 NRMSE 分别反映模拟值与观测值之间的绝对误差和相对误差, 值越小, 说明模拟效果越好; R^2 反应模拟值与观测值之间的一致性, 值越接近于 1, 说明模拟效果越好。

1.3 数据分析

采用多元线性回归模型方法分析雨养情况下的潜在产量与生育期内的平均温度、降雨量和太阳辐射之间的相关性,以探究该地区玉米产量的主要气候影响因子。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型的适应性

校正后 APSIM 模型的模拟结果显示,夏玉

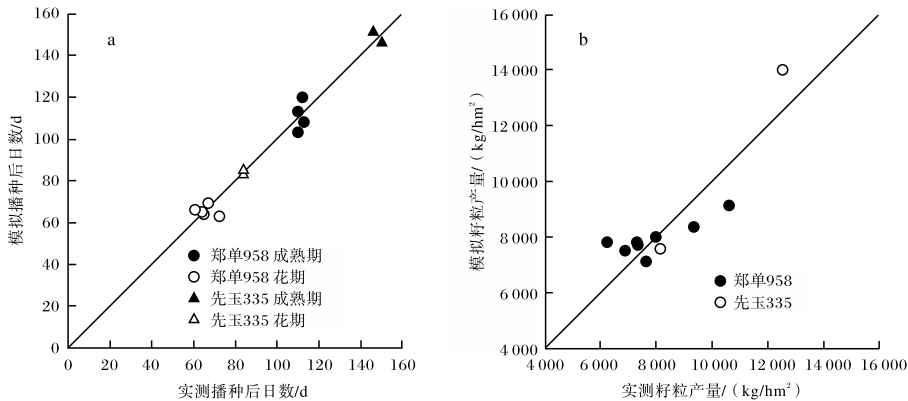


图1 关中春玉米和夏玉米播期—花期、播期—成熟期(a)和籽粒产量(b)的模型验证结果

2.2 常规播期和种植密度管理下玉米的灌溉生产潜力

利用校正后的 APSIM 模型模拟 1971—2010 年春玉米和夏玉米的生长过程,结果表明夏玉米多年平均 Y_p 和 Y_w 分别为 8 756 和 4 236 kg/hm² (图 2a),变异系数分别为 13.4%和 68.2%;春玉米多年平均 Y_p 和 Y_w 分别为 13 138 和 6 163 kg/hm² (图 2b),变异系数分别为 9.9%和 55.8%。通过灌溉,夏玉米和春玉米最高可增产约 52%和 53%。夏玉米和春玉米 Y_w 的年际变异明显大于 Y_p ,且降水较多年份的玉米产量显著高于较少年份,尤其是雨养情况。玉米 Y_w 与各气象因子的多元线性回归结果显示(表 4),夏玉米和春玉米的 Y_w 与生育期内降雨都呈现显著的正相关关系,而与温度、辐射没有明显的相关性。这表明降雨是该地区影响玉米生长发育的主要气象因子,降雨每增加 1 mm,夏玉米和春玉米分别约增产 14.7 和 18.0 kg/hm²。

多年玉米蒸发蒸腾量的模拟结果显示,充分灌溉条件下玉米耗水量明显大于雨养条件下(图 2c,图 2d)。夏玉米多年平均潜在 ET 和雨养潜在

米和春玉米生育期内所需的积温分别为 800 和 1 050 °C · d,夏玉米相对春玉米灌浆速率更快(表 3)。玉米开花期和成熟期模拟值和实测值的 R^2 为 0.98, RMSE 为 4 d(图 1a);籽粒产量模拟值和观测值也具有较好的一致性, R^2 为 0.76, NRMSE 为 12%(图 1b)。结果表明 APSIM 模型在关中地区具有较好的适应性,能够准确模拟玉米的生长发育和产量形成过程。

表 4 雨养产量与玉米生育期内气象因子的多元线性回归分析结果

种类	温度/°C	降雨/mm	辐射/(MJ/m ²)	R^2
夏玉米	105.3	14.7***	-207.9	0.87
春玉米	283.2	18.0***	-389.9	0.86

注:***表示通过 0.001 的显著性检验。

ET 分别为 454 和 318 mm,春玉米分别为 492 和 415 mm。为保证玉米正常生长发育,夏玉米和春玉米需要的灌溉水量分别为 136 和 77 mm。结果表明关中的雨养玉米受到水分胁迫严重,根据年际气候条件制定相应的灌溉制度具有重要意义。

在充分灌溉情景下玉米水分利用效率明显大于雨养情景(图 2e,图 2f)。夏玉米多年平均潜在 WUE 和雨养潜在 WUE 分别为 19.7 和 12.3 kg/(hm² · mm),春玉米分别为 27.3 和 14.3 kg/(hm² · mm)。通过充分灌溉,夏玉米和春玉米的水分利用效率可分别提高 7.4 和 13.0 kg/(hm² · mm)。在没有水分胁迫情形下玉米水分利用效率更高。可见,充分灌溉下作物根系能够充分吸水

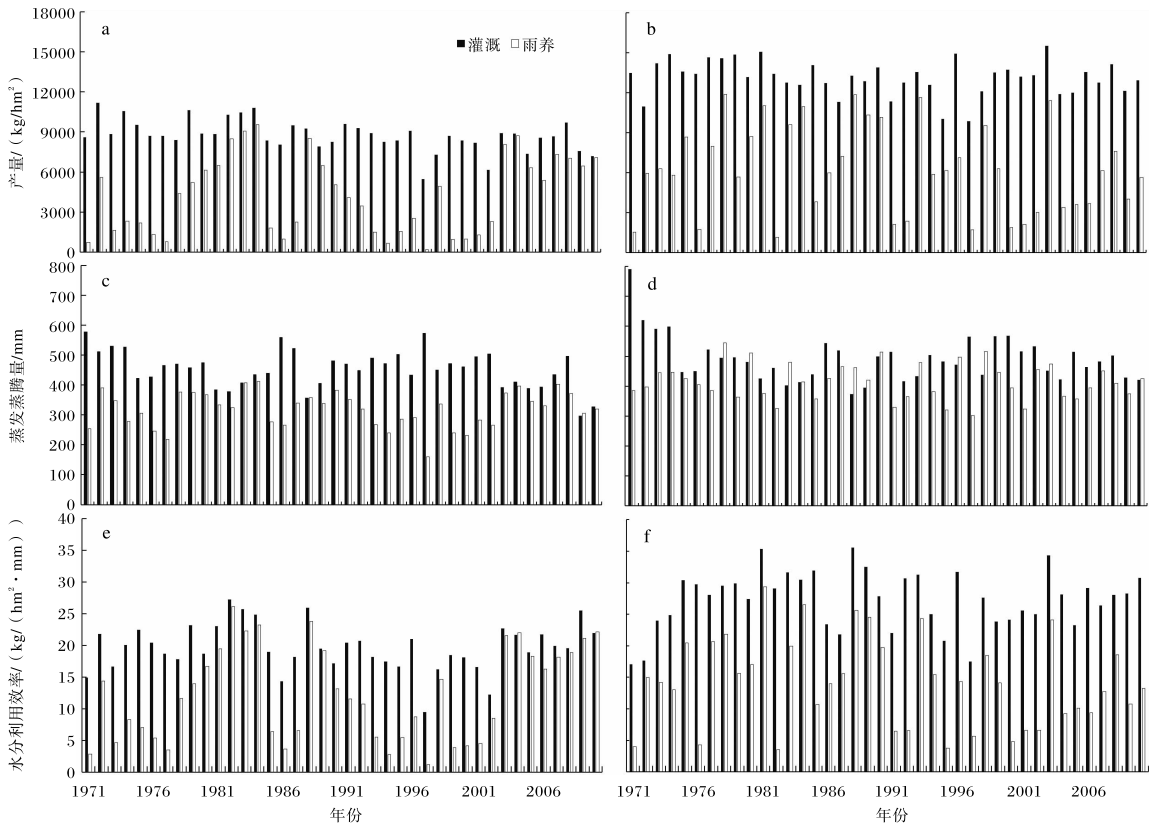


图2 模型模拟1971—2010年常规播期和密度情景下关中夏玉米(a、c、e)和春玉米(b、d、f)分别在充分灌溉和雨养情景下的籽粒产量、蒸发蒸腾量 and 水分利用效率

促进玉米代谢和生长;而干旱情形下由于根系吸水限制,玉米生长受到胁迫,从而产量形成也受到限制。

2.3 播期和种植密度交互作用对玉米生产的影响

相对常规播期和密度组合情景下玉米产量模拟结果,夏玉米和春玉米 Y_p 和 Y_w 均随着播期的延迟和种植密度的提高而增加(图 3a~图 3d)。当播期推迟 2 周和密度为 10 株/m² 时,夏玉米 Y_p 和 Y_w 分别最多增加 20.0%和 24.2%,春玉米分别最多增加 21.7%和 22.8%。

玉米耗水量随种植密度提高而增大,这主要是因为群体密度增大后,植株根系对土壤水分的竞争也相应增加;而对播期调整表现出差异性。随着播期延迟,夏玉米潜在 ET 呈现减小趋势(图 3 e~图 3h)。随着播期延迟同时降低种植密度,夏玉米潜在 ET 最多减少 10.2%;随着播期提前同时提高种植密度,潜在 ET 最多增加 7.1%。随着播期延迟,春玉米在低种植密度时,潜在 ET 呈增大趋势;而在高种植密度下,潜在 ET 呈下降

趋势。随着播期提前同时降低种植密度,春玉米潜在 ET 最多减少 7.9%;随着播期提前同时提高种植密度,潜在 ET 最多增大 14.2%。在雨养情况下,由于降雨量的限制,夏玉米和春玉米耗水量在不同播期和不同种植密度下的差异不大。

随着播期推迟和种植密度增大,水分利用效率呈现增大的趋势(图 3i~图 3l),当播期推迟 2 周和种植密度为 10 株/m² 时达到最大,夏玉米潜在 WUE 和雨养潜在 WUE 分别增大约 22.7%和 20.8%,春玉米增大约 14.4%和 20.0%。可见,水分利用效率对播期和种植密度的响应与产量表现出一致性,通过调整播期和种植密度可以同时提高夏玉米和春玉米水分利用效率。

3 结论

利用关中地区的玉米试验数据验证了 APSIM 模型在该地区具有较好的适应性。利用该模型模拟关中地区玉米生长发育结果显示,该地区夏玉米和春玉米在充分灌溉条件下的潜在产量分别为 8 756 和 13 138 kg/hm²,雨养潜在产量分

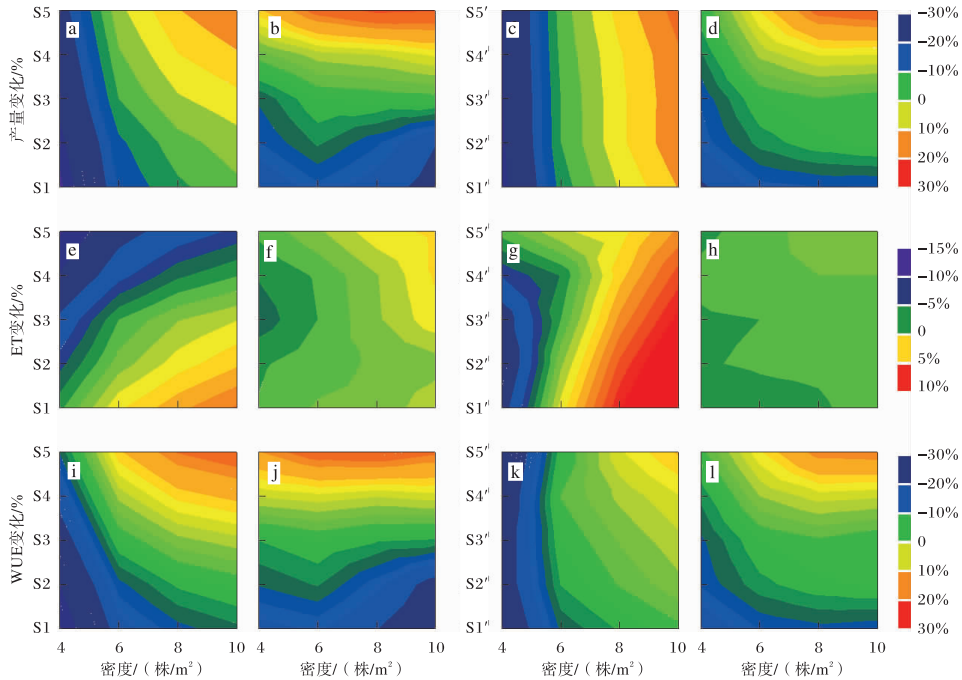


图3 模型模拟1971—2010年不同播期和密度组合情形下关中夏玉米在充分灌溉(a,e,i)和雨养情景(b,f,j)、春玉米在充分灌溉(c,g,k)和雨养情景(d,h,l)下相对常规播期和密度情景的产量、蒸发蒸腾量和水分利用效率的变化

别为4 236和6 163 kg/hm²,通过灌溉可分别增产约52%和53%,而降雨量是影响该地区玉米生长的主要气候影响因子。通过适当推迟播期和提高种植密度可以有效提高关中地区的玉米生产潜力,夏玉米潜在产量和雨养潜在产量最大可分别提高约20.0%和24.2%,春玉米最大可分别提高约21.7%和22.8%;玉米的水分利用效率也得到提高,夏玉米潜在水分利用效率和雨养潜在水分利用效率分别增大约22.7%和20.8%,春玉米分别增大约14.4%和20.0%。

总体而言,通过优化关中地区玉米播种日期和种植密度可以有效提高该地区玉米的气候生产潜力,而关中地区玉米生育期内降雨总量及分布时段不能充分满足玉米生产需求,干旱仍然是制约地区玉米生产的最重要因素。

参考文献:

- [1] 路海东,薛吉全,张德华,等. 陕西不同生态区玉米超高产的潜力和途径探索[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2007,10(4):20-24.
- [2] 李红梅,范建忠. 关中夏玉米生育期气象干旱特征分析[J]. 陕西气象,2015(4):1-5.
- [3] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴2019[M]. 北京:中国统计出版社,2019.
- [4] 马耀绒,谈会星,尹贞铃,等. 渭南玉米产量气象条件分析与预报模型研究[J]. 陕西气象,2020(2):34-37.
- [5] 陈鹏狮,米娜,张玉书,等. 气候变化对作物产量影响的研究进展[J]. 作物杂志,2009(2):5-9.
- [6] 赵彦茜,肖登攀,唐建昭,等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施[J]. 水土保持研究,2019,26(6):317-326.
- [7] MENG Q, HOU P, WU L, et al. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China [J]. Field crops research, 2013, 143(1): 91-97.
- [8] CUCULEANU V, MARICA A, SIMOTA C. Climate change impact on agricultural crops and adaptation options in Romania [J]. Climate Research, 1999, 12(2-3): 153-160.
- [9] WAHA K, VAN BUSSEL L, MÜLLER C, et al. Climate-driven simulation of global crop sowing

- dates [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2012, 21(2): 247-259.
- [10] CASAL J J, DEREGIBUS V A, SÁNCHEZ R A. Variations in tiller dynamics and morphology in *Lolium multiflorum* Lam. vegetative and reproductive plants as affected by differences in red/far-red irradiation [J]. *Annals of Botany*, 1985, 56(4): 553-559.
- [11] ASSENG S, KEATING B A, IRP F, et al. Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia [J]. *Field Crops Research*, 1998, 57(2): 163-179.
- [12] MCCOWN R L, HAMMER G L, HARGREAVES J N G, et al. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research [J]. *Agricultural Systems*, 1996, 50(3): 255-271.
- [13] EVANS L T, FISCHER R A. Yield potential: Its definition, measurement, and significance [J]. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1544-1551.
- [14] GRASSINI P, YANG H, CASSMAN K G. Limits to maize productivity in Western Corn-Belt: A simulation analysis for fully irrigated and rainfed conditions [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2009, 149(8): 1254-1265.
- [15] VAN ITTERSUM M K, RABBINGE R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations [J]. *Field Crops Research*, 1997, 52(3): 197-208.
- [16] 汪志农. 灌溉排水工程学 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [17] YANG J M, YANG J Y, LIU S, et al. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 127(5): 81-89.
- [18] HEINEMANN A B, VAN OORT P A J, FERNANDES D S, et al. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation [J]. *Bragantia*, 2011, 71(4): 572-582.
- [19] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 等. 基于 APSIM 模型分析播期和水氮耦合对油菜产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 2018(13): 134-143.