

网络出版时间:2026-04-03

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260402.1334.002

基于 APSIM 模型的晋北饲用燕麦产草量与季后气候资源对未来气候情景下早播的响应

何世佳^{1,2,3}, 贾晓怡^{1,2,3}, 刘鹏^{1,2,3}, 成华强^{1,2,3}, 杨轩^{1,2,3}

(1. 山西农业大学草业学院, 山西太谷 030801; 2. 草地生态保护与乡土草种质创新山西省重点实验室, 山西右玉 037200;
3. 山西右玉黄土高原草地生态系统定位观测研究站, 山西右玉 037200)

摘要:为探讨未来气候变化条件下燕麦稳产和获取更多主栽作物季后气候资源的途径,基于 APSIM (agricultural production systems simulator)作物模型,通过将晋北地区 6 个地点播期提前 0、10、20、30 d,模拟评估在不同气候情景下饲用燕麦的产草量及季后气候资源对早播的响应。结果表明,在未来气候变暖背景下,适度早播(提前 10 d)可在燕麦产草量无显著损失的前提下,增加收获后至霜冻前的气候资源(季后积温 1 200~1 800 °C、降水 55~188 mm 和辐射量 861~1 523 MJ·m⁻²),从而提高气候资源利用效率。早播对燕麦产草量的直接影响较小,但有助于燕麦生产的稳定性与资源增效,因而适时早播可作为晋北地区应对气候变暖、提升资源利用效率的有效田间管理措施。

关键词:APSIM;饲用燕麦;播期调整;气候变化

中图分类号:S512.6;S314

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)05-0676-10

Response of Forage Oat Yield and Post-Season Climate Resources to Early Sowing under Future Climate Scenarios in Northern Shanxi Based on APSIM

HE Shijia^{1,2,3}, JIA Xiaoyi^{1,2,3}, LIU Peng^{1,2,3}, CHENG Huaqiang^{1,2,3}, YANG Xuan^{1,2,3}

(1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Grassland Ecological Protection and Native Grass Germplasm Innovation, Youyu, Shanxi 037200, China; 3. Shanxi Youyu Loess Plateau Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Youyu, Shanxi, 037200, China)

Abstract: To explore the stable yield of forage oats under future climate change conditions and to capture more climatic resources after the main crop season, based on the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) crop model, the sowing dates were adjusted to different degrees of advancement at six locations in northern Shanxi. The responses of forage oat yield and climatic resources to sowing date adjustments under different climate scenarios were simulated and evaluated. The results showed that under future climate warming, moderate early sowing (advanced by 10 days) can increase the climatic resources available after harvest and before the first frost, including accumulated thermal time (1 200–1 800 °C), precipitation (55–188 mm), and solar radiation (861–1 523 MJ·m⁻²), without significantly reducing the main-season forage yield. Consequently, the utilization efficiency of climatic resources was improved. Early sowing has a limited direct effect on forage yield, it demonstrates excellent performance in terms of forage yield stability and resource enhancement. Overall, appropriately advancing sowing dates is an effective field management strategy for adapting to climate warming and enhancing resource use efficiency.

收稿日期:2025-10-05

修回日期:2025-12-07

基金项目:山西重点研发计划项目(202402140601011);国家自然科学基金青年科学基金项目(32001404)

第一作者 E-mail:15048712840@163.com(何世佳)

通讯作者 E-mail:yangxuan2019@sxau.edu.cn(杨轩)

Keywords: APSIM; Forage oats; Sowing date adjustment; Climate change

自工业革命以来,全球地表温度已上升约 1.1℃,极端气候事件频发,严重威胁农业系统稳定性^[1]。中国北方农牧交错带生态脆弱,气候变化引起的水热资源重组正重塑区域饲草生产格局。以晋北为例,年均降水量不足 460 mm,且 70%~80%集中于汛期,其半雨养的农业模式面临生长季缩短与水资源短缺的双重压力^[2]。饲用燕麦(*Avena sativa*)因其适应性强、营养价值高,成为该区主导饲草,但其传统播期已难以适应气候变暖^[3-4]。同时,当地“一熟有余、两熟不足”的气候特征导致作物收获后至霜冻前的光热资源未充分利用,资源利用效率亟待提升。

作物物候变化受气候和农业管理的双重驱动,其中气候变化起主导作用,而管理措施可部分缓解其不利影响^[5-8]。播期调控作为应对气候变化的有效农艺措施,在不同地区展现出明显潜力^[9-18]。研究表明,在青藏高原地区,播期推迟 10~20 d 可缓解燕麦抽穗期高温胁迫,使水分利用效率提高 16%~23%^[18];而在华北平原,小麦早播能更充分利用春季土壤墒情,规避夏季干旱风险^[5]。然而,现有研究多聚焦于主茬作物产量对播期的响应,对早播条件下收获后至霜冻前的季后气候资源(积温、降水与辐射)的挖掘仍显不足。因此,构建基于本地化模型的播期优化方案,对晋北饲用燕麦稳产及资源高效利用具有重要意义。

APSIM (agricultural production systems simulator)模型作为开源农业系统模拟平台,整合了作物生理、土壤水碳动态与气候效应模块,在全球范围内广泛应用于评估作物生产、资源优化及气候变化适应策略^[19-28]。经晋北地区的本地化验证,该模型对饲用燕麦产量的模拟误差(normalized root mean square error, NRMSE<21%)小、一致性系数(willmott agreement index, $d > 0.90$)高,因而具备良好的应用可靠性^[2,27-28]。利用此模型前期模拟发现,在典型浓度通道 RCP8.5 (representative concentration pathways)情景下,2040—2069 年晋北燕麦产量可能增长 5.5%~23.2%,但 2070—2099 年部分站点将面临减产 22.8%的风险^[28]。因此,利用 APSIM 开展播期调控的情景分析,有助于识别适宜播期并评估资源利用效应。

本研究以晋北朔州 6 个典型站点为对象,基

于本地化校准的 APSIM 7.10 模型,系统评估历史及未来气候情景下早播对饲用燕麦产草量及稳定性的影响,定量解析收获后至霜冻前的积温、降水与辐射资源变化特征,明确兼顾主茬作物稳产与季后资源高效利用的优化播期阈值,以期为区域应对气候变化、构建弹性种植制度及探索一年两熟潜力提供理论依据,助力区域农牧业可持续发展。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

朔州位于黄土高原东北部,平均海拔 900~1 800 m,属于温带大陆性季风气候区。该地区四季分明,年日照时数 2 600~3 100 h,年平均气温 3.6~7.3℃,年降水量 360~460 mm,主要集中在 6—9 月份,占全年降水量的 70%~80%。朔州大部分地区为雨养农业,主要饲草作物为饲用燕麦。研究区域包括怀仁、平鲁、山阴、应县、右玉和朔城(表 1)。

1.2 APSIM 模型参数

APSIM 的模块化设计允许用户自定义参数,适用于全球不同农业系统分析^[18]。本研究采用 APSIM 7.10 版,先前已利用 APSIM 模型基于对玉米、马铃薯、燕麦和饲用大豆的实测数据进行了校准与验证模拟,证实其具有良好的适用性^[18-19]。本研究的模型参数设置与调整是基于晋北地区 APSIM 模型的相关研究结果^[18-20]。其中,作物及管理参数使用了饲用燕麦品种黑玫克的田间试验数据(表 2),右玉站点的土壤参数由田间试验测得(表 3),其余站点的土壤参数由中国土壤科学数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>;表 4、表 5)获得,各点气候参数由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)获得。

1.3 情景模拟

为探究提前播种的饲用燕麦在各站点的产草量差异,并评估未来气候情景下晋北农牧交错带更适宜的生产模式,本研究设置 4 个播期即分别在原来各站点传统播期(表 1)的基础上提前 0、10、20、30 d 播种(分别用 CK、S1、S2、S3 表示)。

以各点 1980—2009 年的气候条件为基准情景(1980s),所涉及的指标包括逐日降水量、逐日最高和最低气温以及逐日辐射量,逐日辐射量使用 Angstrom

表 1 朔州市 6 个站点的基础信息

Table 1 Basic information of six sites in Shuozhou

站点 Site	经度 Longitude/°	纬度 Latitude/°	海拔高度 Altitude/m	播种日期(月/日) Sowing date(month/day)
怀仁 Huairen	113.10	39.82	1 044.6	5/2
应县 Yingxian	113.17	39.57	1 000.7	5/4
右玉 Youyu	112.45	40.00	1 345.8	5/15
平鲁 Pinglu	112.27	39.52	1 409.4	5/13
山阴 Shanyin	112.82	39.50	1 045.0	5/4
朔城 Shuocheng	112.43	39.37	1 114.8	5/5

表 2 饲用燕麦的基本参数

Table 2 Basic parameters of forage oats

参数 Parameter	描述 Description	值 Value
tt_end_of_juvenile TTEJ	出苗到营养生长结束的积温 Thermal time required from emergence to end of juvenile/°C	210
tt_floral_initiation TTFI	始花期的积温 Thermal time required from floral initiation stage to flowering/°C	290
tt_flowering TTF	开花期的积温 Thermal time required in flowering to start of grain filling/°C	130
photop_sens	光周期敏感性指数 Photoperiod sensitivity	1.5
y_height	最大株高 Maximal plant height/mm	1 500
Rue	辐射利用效率 Radiation use efficiency/(g·MJ ⁻¹)	1.9
Vern_sens	春化敏感性指数 Vernalization sensitivity	3.0
tt_start_grain_fill	灌浆期所需积温 Thermal time for grain filling stage/°C	545
sla_max	最大比叶面积 Maximum specific leaf area for delta LAI	2 000~2 200
sla_min	最小比叶面积 Minimum specific leaf area for delta LAI	1 800

表 3 右玉站点土壤的基本参数

Table 3 Basic soil parameters in Youyu site

土层 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	风干系数 Air dry coefficient/ (mm·mm ⁻¹)	萎蔫系数 Wilting coefficient/ (mm·mm ⁻¹)	田间持水量 Field capacity/ (mm·mm ⁻¹)	饱和含水量 Saturated water content/ (mm·mm ⁻¹)
0~10	1.256	0.040	0.140	0.235	0.483
10~20	1.324	0.042	0.148	0.259	0.477
20~40	1.313	0.044	0.160	0.254	0.457
40~60	1.327	0.048	0.172	0.264	0.436
60~80	1.354	0.046	0.231	0.275	0.428
80~100	1.368	0.047	0.173	0.285	0.447
100~120	1.418	0.047	0.174	0.311	0.334

方程以日照时数计算。为考虑未来气候多变性，利用气象数据生产工具 ACSGTR(AgMIP climate scenario generation tools with R;www.agmip.org)生成未来气候情景(下文统称为时期)数据(表 6),以典型浓度通道 RCP8.5 对 2010—2039 年(2010s)、2040—2069 年(2040s)和 2070—2099 年(2070s)区间进行预测。1980s、2010s、2040s 和 2070s 区间的 CO₂ 浓度变化则参考国际应用系统分析研究所(IIASA)的 RCP 数据库确定(<https://tntcat.iiasa.ac.at/RcpDb/>),分别设定为 390、462、677 和 935 μmol·mol⁻¹。

1.4 饲用燕麦产草量稳定性及可持续性评估

采用变异系数(CV)表示情景模拟下饲用燕麦种植模式的多年产草量稳定性,衡量随着年际变化饲用燕麦平均产草量间的变异程度,其值越小,表明产草量稳定性越高。产草量可持续性采用产草量可持续性指数(SYI)来表征,指数越高则说明该系统具有更高的可持续性。

$$CV=\sigma/\bar{Y}$$

$$SYI=(\bar{Y}-\sigma)/Y_{\max}\times 100\%$$

式中, $\bar{Y}$ 为年单位面积的平均产草量(kg·hm⁻²),

表 4 各站点土壤类型及参数

Table 4 Soil types and parameters of each sites(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>)

土壤类型 Soil type	土壤深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g · cm ⁻³)	萎蔫系数 Wilting coefficient/ (mm · mm ⁻¹)	田间持水量 Field capacity/ (mm · mm ⁻¹)	饱和含水量 Field saturation/ (mm · mm ⁻¹)
夹白干栗土(怀仁) Light castanozems (Huairen)	0~20	1.396	0.042	0.184	0.473
	20~32	1.398	0.045	0.190	0.472
	32~79	1.405	0.065	0.262	0.470
	79~150	1.406	0.069	0.248	0.470
淡栗黄土(应县) Light castano cinnamon (Yingxian)	0~20	1.423	0.041	0.182	0.463
	20~65	1.422	0.046	0.179	0.463
	65~104	1.433	0.054	0.207	0.459
	104~150	1.430	0.045	0.199	0.461
浅钙积栗土(山阴/右玉) Light castanozems (Shanyin/Youyu)	0~16	1.405	0.091	0.294	0.470
	16~62	1.400	0.099	0.293	0.472
	62~104	1.406	0.104	0.275	0.469
	104~150	1.440	0.054	0.180	0.456
少姜红栗黄土(平鲁) Castano cinnamon (Pinglu)	0~5	1.419	0.090	0.170	0.465
	5~15	1.417	0.086	0.172	0.465
	15~62	1.416	0.084	0.169	0.466
	62~90	1.418	0.122	0.216	0.465
	90~128	1.560	0.119	0.236	0.411
	128~150	1.560	0.119	0.236	0.411
二合栗黄土(朔城) Castano cinnamon (Shuocheng)	0~23	1.428	0.104	0.211	0.461
	23~50	1.418	0.126	0.240	0.465
	50~90	1.410	0.130	0.252	0.468
	90~150	1.411	0.128	0.251	0.467

表 5 各土壤类型的养分含量及 pH

Table 5 Nutrient content and pH of different soil types

土壤类型 Soil type	土壤有机质 Soil organic matter/ (g · kg ⁻¹)	土壤有机碳 Soil organic carbon/%	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg · kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg · kg ⁻¹)	pH
夹白干栗土 Light castanozems	9.8	0.568	27.5	5.6	8.3
淡栗黄土 Light castano cinnamon	4.5	0.261	13.5	4.7	8.3
浅钙积栗土 Light castanozems	5.6	0.325	21.5	4.3	8.2
少姜红栗黄土 Castano cinnamon	9.4	0.545	30.0	12.0	8.7
二合栗黄土 Castano cinnamon	6.6	0.383	21.5	6.3	8.2

σ 为标准差(kg · hm⁻²), $Y_{\max}$ 为所有年份中的最大产草量(kg · hm⁻²)。

1.5 气候资源量化

为量化饲用燕麦收获后至霜冻前的季后气候资源,统计计算每年收获后至霜冻前的空闲天数、总降水量、平均太阳辐射量及 0℃ 以上积温等指标。

1.6 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件对模拟数据进行整理,使用 Origin 2021 制图软件制图。运用 SPSS 24.0 统计软件进行数据统计分析,对情景

模拟中的地点、气候情景、播期的效应进行检验,分别对相同气候情景中不同播期处理下的饲用燕麦产草量和季后气候资源,以及相同播期处理下不同气候情景的同类指标以 Duncan 法进行多重比较,采用单因素(ANOVA)进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 早播对未来气候条件下饲用燕麦产草量的影响

在 4 个时期,应县和怀仁站点燕麦产草量大小表现为 1980s<2010s<2040s<2070s,其余站点表现为 1980s<2010s<2070s<2040s(图 1)。

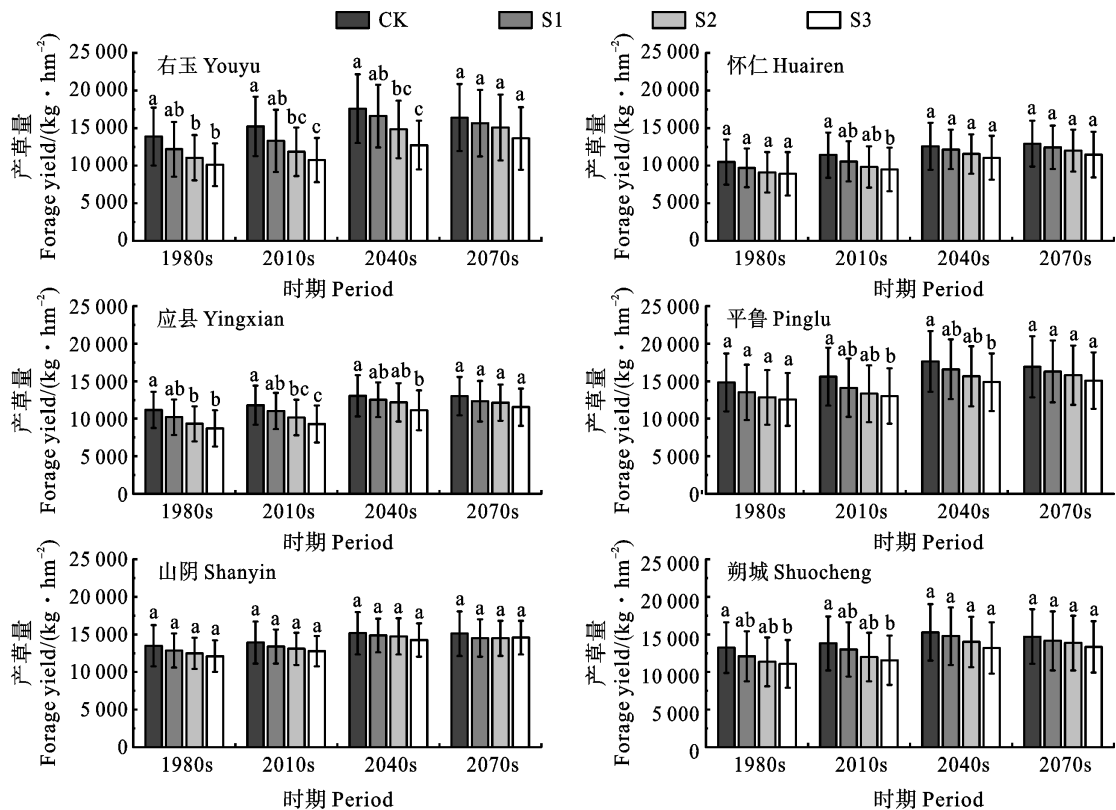
表 6 研究选取的 20 个全球气候模型
Table 6 Selected 20 global climate models for the study

全球气候模型 Global climate model	开发机构 Institute ID	国家 Country
ACCESS1-0	ACCESS	澳大利亚 Australia
bcc-csm1-1	BCC	中国 China
BNU-ESM	GCESS	中国 China
CanESM2	CCCMA	加拿大 Canada
CCSM4	NCAR	美国 USA
CESM1-BGC	NSF-DOENCAR	美国 USA
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE	澳大利亚 Australia
GFDL-ESM2G	NOAA GFDL	美国 USA
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL	美国 USA
HadGEM2-CC	NIMR/KMA	韩国 Korea
HadGEM2-ES	NIMR/KMA	韩国 Korea
Inmcm4	INM	俄罗斯 Russia
IPSL-CM5A-LR	IPSL	法国 France
IPSL-CM5A-MR	IPSL	法国 France
MIROC5	MIROC	日本 Japan
MIROC-ESM	MIROC	日本 Japan
MPI-ESM-LR	MPI-M	德国 Germany
MPI-ESM-MR	MPI-M	德国 Germany
MRI-CGCM3	MRI	日本 Japan
NorESM1-M	NCC	挪威 Norway

不同时期下各站点燕麦产草量整体上随播期提前而减少,即 $S3 < S2 < S1 < CK$ 。早播后各站点产草量在 2070s 均无显著性变化;在 2010s 时期下,除山阴外,其余 5 个站点的播期影响均显著($P < 0.05$),其中 $S3$ 较 CK 显著降低。

2.2 早播对未来气候条件下饲用燕麦产草量稳定性及可持续性的影响

对饲用燕麦产草稳定性与可持续性按不同地点进行分析(表 7)发现,在多数站点和时期下,饲用燕麦产草量变异系数(CV)的大小表现为 $S1 < CK < S2 < S3$,说明适当早播可增强饲用燕麦产草量的稳定性。从气候发展来看,不同播期下所有站点产草量的 CV 总体上呈现明显的缓慢下降趋势,说明在未来气候情景下,产草量的年际波动性预计将普遍减小,生产将变得更加稳定。各时期下 SYI 大小整体上表现为 $CK < S3 < S2 < S1$;随着气候的发展变化,绝大多数站点和播期处理下 SYI 值呈现上升趋势,且 3 种早播处理下 SYI 均大于 CK ,说明随着气候变化,适当的播期调控能稳定或提高饲用燕麦产草可持续性。



CK:传统播期;S1:早播 10 d;S2:早播 20 d;S3:早播 30 d。图柱上的不同字母表示同一情境下不同播期间差异在 0.05 水平下显著。下同。
CK:Normal sowing date; S1: Early sowing for 10 days; S2: Early sowing for 20 days; S3: Early sowing for 30 days. Different letters above the columns indicate significant differences among the sowing dates at 0.05 level. The same in figure 2.

图 1 各站点不同时期饲用燕麦年均产草量对早播的响应
Fig. 1 Response of average annual grass yield of forage oat to early sowing at each sites during different periods

表 7 各站点不同播期下饲用燕麦产草量的变异系数(CV)和可持续性指数(SYI)
Table 7 Coefficient of variation(CV) and sustainability index(SYI) of forage oat
yield across each sites dates under different sowing dates

站点 County	时期 Period	CK		S1		S2		S3	
		CV	SYI	CV	SYI	CV	SYI	CV	SYI
怀仁 Huairen	1980s	0.29	0.39	0.27	0.46	0.29	0.44	0.32	0.42
	2010s	0.26	0.43	0.25	0.46	0.28	0.45	0.30	0.45
	2040s	0.25	0.43	0.21	0.49	0.23	0.49	0.27	0.51
	2070s	0.24	0.45	0.23	0.48	0.23	0.48	0.26	0.48
平鲁 Pinglu	1980s	0.26	0.49	0.27	0.51	0.28	0.50	0.28	0.52
	2010s	0.25	0.53	0.27	0.49	0.28	0.50	0.28	0.51
	2040s	0.23	0.58	0.24	0.54	0.26	0.53	0.26	0.54
	2070s	0.24	0.52	0.25	0.50	0.25	0.54	0.25	0.54
山阴 Shanyin	1980s	0.20	0.54	0.18	0.64	0.17	0.60	0.17	0.61
	2010s	0.20	0.55	0.17	0.64	0.16	0.62	0.16	0.63
	2040s	0.19	0.56	0.15	0.63	0.16	0.61	0.16	0.62
	2070s	0.20	0.56	0.17	0.60	0.16	0.60	0.15	0.61
朔城 Shuocheng	1980s	0.25	0.53	0.27	0.46	0.29	0.49	0.29	0.44
	2010s	0.26	0.51	0.28	0.46	0.27	0.51	0.28	0.45
	2040s	0.25	0.53	0.26	0.48	0.24	0.52	0.26	0.48
	2070s	0.25	0.52	0.28	0.46	0.26	0.47	0.26	0.50
应县 Yingxian	1980s	0.22	0.52	0.23	0.52	0.25	0.48	0.28	0.49
	2010s	0.22	0.51	0.22	0.53	0.23	0.52	0.26	0.49
	2040s	0.21	0.51	0.18	0.57	0.21	0.55	0.24	0.53
	2070s	0.20	0.56	0.22	0.51	0.20	0.54	0.21	0.58
右玉 Youyu	1980s	0.28	0.71	0.30	0.70	0.27	0.73	0.28	0.72
	2010s	0.26	0.74	0.31	0.69	0.27	0.73	0.27	0.73
	2040s	0.26	0.74	0.25	0.75	0.26	0.74	0.26	0.74
	2070s	0.27	0.73	0.28	0.72	0.29	0.71	0.31	0.69

2.3 早播对未来气候条件下饲用燕麦收获后季后气候资源的影响

统计分析结果(表 8)显示,不同时期所有站点饲用燕麦收获后的空闲天数变化规律一致,大小均表现为 CK<S1<S2<S3;随着气候的发展,山阴 2010s 和 2040s、山阴 2040s 和 2070s、朔城 1980s 和 2010s、右玉 1980s 和 2010s、应县 1980s 和 2010s 无显著变化,其余各点不同时期的霜冻日期整体表现呈逐渐推迟趋势。早播后饲用燕麦收获后空闲天数增加幅度也在上升,1980s—2010s 的空闲天数变化较大,如平鲁站点在 CK 条件下由 39 d 增长至 54 d,增幅达 38%,而在 2010s—2040s,空闲天数增至 61 d。各站点收获后空闲天数的增长趋势随着气候持续发展在某些站点和时期的变化幅度较大,例如右玉站在 S3 条件下,空闲天数从 76 d(2010s)增至 86 d(2040s),

再增至 91 d(2070s)。对比 4 个时期的增长幅度,基础值低的寒冷地区增幅更大,如右玉站在 CK 条件下空闲天数从 34 d(1980s)增至 58 d(2070s),增幅高达 71%。与 CK 相比,早播处理(S1、S2、S3)收获后的空闲天数在不同时期保持相对稳定或略有增加,例如朔城站点的 S3 比 CK 在 1980s 多 38 d,在 2070s 多 34 d。

随着气候变化,各点燕麦收获后的积温呈现增加趋势即 1980s<2010s<2040s<2070s(图 2)。而在相同时期,随着早播天数的增加,各站点收获后的积温整体上呈增加趋势,表明早播始终是获得更多季后积温的有效方式。

与 1980s 时期相比,同一播期下各站点在 2070s 时期燕麦收获后的降水量均不同程度增加(表 9),其中右玉站在 CK 条件下降水量从 75 mm 增至 126 mm,增幅 68%,变化最大。具体看

来,从 1980s 到 2070s,降水量的增长过程并非线性,各站点 2010s 的降水量相对于 1980s 呈波动变化。同一播期下,各时期的降水量大小均表现为右玉<平鲁<山阴<应县<朔城<怀仁,右玉最干旱(1980s 的 CK 降水量为 75 mm),而怀仁、朔州相对湿润。在同一时期和站点下,不同播期降水量大小均表现为 CK<S1<S2<S3,说明通过播期调整可获取更多的季后降水。

随着气候的发展,CK 下所有站点的太阳辐

射量均呈现明显的增长趋势(表 10),但与降水类似,增长过程存在年代波动,并非单调递增,部分站点 2070s 的值相较 2040s 略有回落(如怀仁)。辐射量的空间分布与之前分析的燕麦收获后空闲天数高度一致,大小表现为右玉<平鲁<朔城<山阴<应县<怀仁。同一时期和站点下,不同播期辐射量大小均表现为 CK<S1<S2<S3。整体看来季后的平均太阳辐射量为 579~2 144 MJ·m⁻²,其中 S1 条件下为 861~1 523 MJ·m⁻²。

表 8 不同时期下燕麦收获后至霜冻的空闲天数

Table 8 Average number of days from oat post-harvest to first frost during different periods d

站点 Site	1980s					2010s					2040s					2070s				
	CK	S1	S2	S3	霜冻日 Day of frost	CK	S1	S2	S3	霜冻日 Day of frost	CK	S1	S2	S3	霜冻日 Day of frost	CK	S1	S2	S3	霜冻日 Day of frost
怀仁 Huaren	75	89	103	113	288	78	90	107	120	293	83	92	108	124	299	81	91	102	123	306
平鲁 Pinglu	39	52	64	68	263	54	69	83	93	280	61	74	87	102	288	72	81	90	106	298
山阴 Shanyin	49	58	70	80	258	66	77	93	106	283	76	84	97	113	291	77	87	97	113	299
朔城 Shuocheng	59	73	87	97	276	60	71	87	100	278	69	77	90	108	286	76	85	93	110	296
应县 Yingxian	66	79	94	105	282	70	80	97	110	287	77	86	99	115	294	75	87	97	115	301
右玉 Youyu	34	49	60	68	262	36	53	66	76	267	45	57	71	86	275	58	67	75	91	284

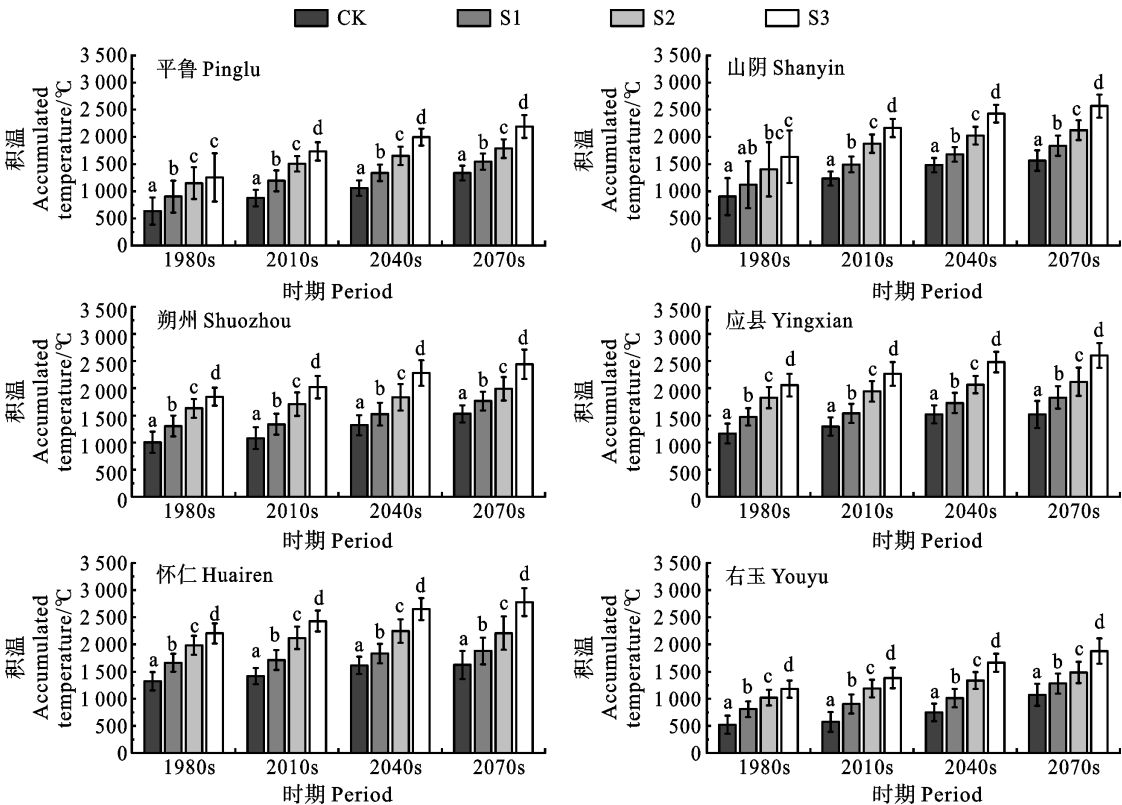


图 2 各站点在不同时期下 0℃ 以上积温变化

Fig. 2 Changes in accumulated temperature at various sites above 0℃ under different periods

表 9 不同时期燕麦收获后至霜冻前的平均降水量

Table 9 Average precipitation from oat post-harvest to first frost during different periods																	mm
站点 Site	1980s				2010s				2040s				2070s				
	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	
怀仁 Huairen	141	188	222	242	136	180	225	253	154	188	239	275	140	169	214	269	
平鲁 Pinglu	94	140	175	188	112	170	213	242	129	175	230	273	148	182	221	277	
山阴 Shanyin	103	143	175	200	124	163	209	236	145	178	223	263	140	179	215	257	
朔城 Shuocheng	124	183	228	253	127	174	223	261	149	188	241	289	155	196	234	282	
应县 Yingxian	118	167	206	231	119	162	205	241	141	181	214	259	134	173	209	256	
右玉 Youyu	75	132	177	193	73	138	191	213	98	144	211	251	126	163	202	256	

表 10 不同时期燕麦收获后至霜冻前的平均太阳辐射量

Table 10 Average solar radiation from oat post-harvest to first frost during different periods																	MJ · m ⁻²
站点 Site	1980s				2010s				2040s				2070s				
	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	CK	S1	S2	S3	
怀仁 Huairen	1235	1523	1810	2016	1255	1492	1836	2107	1324	1489	1817	2144	1234	1412	1640	2066	
平鲁 Pinglu	651	887	1114	1209	847	1113	1385	1591	951	1166	1418	1707	1084	1236	1405	1713	
山阴 Shanyin	827	1005	1262	1471	1090	1296	1629	1877	1212	1361	1634	1968	1189	1366	1577	1910	
朔城 Shuocheng	916	1161	1445	1639	919	1116	1427	1688	1044	1188	1432	1783	1116	1269	1422	1751	
应县 Yingxian	1108	1370	1688	1905	1161	1355	1704	1981	1258	1415	1686	2033	1169	1383	1594	1959	
右玉 Youyu	579	861	1071	1237	597	902	1172	1368	727	951	1231	1533	934	1097	1250	1579	

3 讨论

前人研究表明,提前播种是应对气候变化尤其是气候变暖的有效手段,适当的播期调整可充分利用春季水热资源,并缓解气候变化对春小麦生产的消极影响^[15,17,29]。高雪慧等^[24]认为,未来气候情景下,早播春小麦产量和生物量的提升幅度最高,而晚播春小麦的提升幅度最低。王亚士等^[14]的研究结果显示,播期推迟会导致燕麦生育期缩短,且早播可显著提升出苗率、株高、小穗数、鲜干比和草产量。本研究中,在未来情景下,饲用燕麦产草量相对历史基准期有所提高,说明适度的气候变化可能对作物生长有积极影响,这与前人研究结果相近,但早播燕麦的产草量小于正常播期的结果则与前人研究不同。单独将每个站点不同时期的饲用燕麦产草量进行对比发现,随着气候变暖,不同播期之间产草量差异逐渐减小,表明随着气候变暖加剧,早播对产草量的影响在减小。S1 造成的减产最小且与 CK 差异未达到显著水平,S1 的产草量在大部分地区较 CK 表现出较好的稳定性与可持续性,可增加季后气候资源,进一步证明在一定程度的气候变暖下,适当早播有助于提高饲用燕麦产草量的稳定性与可持续

性。综合来看,饲用燕麦产草量、产草量稳定性和可持续性指标来看,适当的早播是有效应对气候变化的田间管理手段,而在正常播期条件下,产草量虽较高,但稳定性与资源利用效率不及适当早播。本研究通过模型量化了中纬度旱区早播策略对季后气候资源的增效作用。晋北地区春季升温快且降水集中(4—5 月份降水占全年 30%~40%),早播可充分利用春季水热资源,与此同时适度提前播种对燕麦的产草量影响不大,但能显著提高季后气候资源。情景模拟揭示,在维持饲用燕麦主茬产草量无显著损失的前提下(减产<5%),随着未来气候变暖加剧,霜冻日呈现出逐渐推迟的趋势,与此同时,播期提前可显著提升燕麦收获后至霜冻前的气候资源。本研究通过整合有效积温、降水增量与太阳辐射变化,构建了季后资源评估框架:经量化计算,S1 条件下季后积温达 1 200~1 800 ℃,结合新增降水(55~188 mm),可支持短季作物种植。例如,饲用油菜生长季积温需不少于 1 000 ℃,生育期 60~80 d;箭筈豌豆(绿肥)耐低温性强,生长季积温仅需不少于 800 ℃;小白菜等速生叶菜生长季积温需不少于 700 ℃。在未来气候下,通过提前播种,可以为朔州地区作物布局提供更多的种植思路,使当地的农作

物种种植模式有更多选择。

有研究表明,燕麦早熟品种(如边锋)对早播响应更积极^[4]。马千虎^[18]在青藏高原的试验结果也显示不同燕麦品种对播期的敏感性存在差异。本研究的模型参数校准仅基于燕麦品种黑玫克,这可能导致低估早播策略的潜在效益。此外,APSIM模型尚未整合春季倒春寒、秋季早霜或极端高温事件的发生,而前人研究认为,晋北近10年早霜发生频率增加17%,可能削弱早播燕麦的稳定性^[28]。另有研究提出,低估或未考虑极端高温等可能使产量模拟产生偏差^[30-32]。在土壤水力学参数方面,本研究主要依赖数据库(如中国土壤科学数据库),田间实测仅覆盖右玉站点,也可能造成一定差异^[27]。后续研究需进行特性不同的品种田间试验并结合更新的作物模型,同时考虑极端气候事件的频率和强度,以提升情景模拟预测的准确性和适用性,确保策略制定长期有效。

4 结论

朔州饲用燕麦种植在应对未来气候变化尤其是气候变暖时,可以通过提前播期来获得更多季后气候资源,并进行二茬作物种植以获得更多的收益。本研究中,经过APSIM模拟,未来可通过早播来获取更多主栽作物季后气候资源,在6个地点的模拟试验中3种提前播期方案均能显著提高季后降水量、积温、辐射量等气候资源。综合考虑,将播期提前10 d在未来情景下收益更佳,其可在不对主栽作物产量造成显著减产的同时可以显著获取更多季后气候资源。

参考文献:

- [1] BONGAARTS J. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. IPCC [J]. *Population and Development Review*, 2024, 50(2): 577.
- [2] 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.
- [3] 杨 轩, 贾鹏飞, 侯青青, 等. 基于 APSIM 模型的未来气候中燕麦产量变化及对水分胁迫的敏感性[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(10): 20.
YANG X, JIA P F, HOU Q Q, *et al.* The evaluation of effects of future climate on forage oats yield and sensitivity to water stress based on agricultural production systems simulator [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(10): 20.
- [4] 叶雪玲, 甘 圳, 万 燕, 等. 饲用燕麦育种研究进展与展望[J]. *草业学报*, 2023, 32(2): 160.
- YE X L, GAN Z, WAN Y, *et al.* Advances and perspectives in forage oat breeding [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(2): 160.
- [5] 孙 爽, 杨晓光, 赵 锦, 等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响Ⅱ. 气候变化背景下中国冬小麦潜在光温适宜种植区变化特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(10): 1926.
SUN S, YANG X G, ZHAO J, *et al.* The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅱ. The variation of potential light-temperature suitable cultivation zone of winter wheat in China under climate change [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(10): 1926.
- [6] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(2): 224.
ZHAO Y X, XIAO D P, BAI H Z, *et al.* Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China [J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 224.
- [7] 马雅丽, 郭建平, 赵俊芳. 晋北农牧交错带作物气候生产潜力分布特征及其对气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(3): 818.
MA Y L, GUO J P, ZHAO J F. Spatial distribution of crop climatic potential productivity and its response to climate change in agro-pastoral ecotone in northern Shanxi Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(3): 818.
- [8] ENDALEW A A. Calibration and validation of CERES-wheat in DSSAT model for yield simulation under future climate in Adet, North Western Ethiopia [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2019, 14(8): 509.
- [9] 郭俊祥, 宋 宁, 刘传雪, 等. 播期提前对不同品种直播水稻秧苗素质形成的影响[J]. *中国种业*, 2021(3): 42.
GUO J X, SONG N, LIU C X, *et al.* Effect of advancing sowing date on seedling quality formation of different varieties of direct-seeding rice [J]. *China Seed Industry*, 2021(3): 42.
- [10] 白 帆, 杨晓光, 刘志娟, 等. 气候变化背景下播期对东北三省春玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(4): 480.
BAI F, YANG X G, LIU Z J, *et al.* Effects of sowing dates on grain yield of spring maize in the Three-Province of the Northeast China under climate change [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(4): 480.
- [11] 杜玉贤, 陈丽雪, 王丽宏, 等. 播期对冀西北寒旱区燕麦田杂草种群变化与饲草产量的影响[J]. *河北农业科学*, 2021, 25(6): 55.
DU Y X, CHEN L X, WANG L H, *et al.* Effects of sowing date on weed community change and forage yield in oat field in cold and arid region of northwest Hebei [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2021, 25(6): 55.
- [12] ZHENG B Y, CHENU K, FERNANDA DRECCER M, *et al.* Breeding for the future: What are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2899.
- [13] DUERI S, BROWN H, ASSENG S, *et al.* Simulation of winter wheat response to variable sowing dates and densities in a high-yielding environment [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2022, 73(16): 5715.

- [14]王亚士,曹宏,柴守玺,等.播期和施肥量对陇东地区2种饲用燕麦生产性能和营养品质的影响[J].草原与草坪,2023,43(2):75.
WANG Y S, CAO H, CHAI S X, *et al.* Effects of sowing date and fertilizer amount on production performance and nutritional quality of two forage oats in Longdong Area [J]. *Grassland and Turf*, 2023, 43(2): 75.
- [15]韩雪,刘强,王钧,等.基于 APSIM 模型的气候变化条件下播期对旱地春小麦产量影响研究[J].作物研究,2022,36(6):499.
HAN X, LIU Q, WANG J, *et al.* Effects of sowing date on dryland spring wheat yield under climate change based on APSIM model [J]. *Crop Research*, 2022, 36(6): 499.
- [16]HOLZWORTH D P, HUTH N I, DEVOIL P G, *et al.* APSIM—Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 327.
- [17]郝冠宇,刘强,王钧.基于 APSIM 模型的未来气候变化对干旱区雨养春小麦播期和种植密度的影响[J].软件工程,2024,27(3):46.
HAO G Y, LIU Q, WANG J. Impact of future climate change on the sowing date and planting density of rain-fed spring wheat in arid area based on APSIM model [J]. *Software Engineering*, 2024, 27(3): 46.
- [18]MA Q H, YOU Y L, SHEN Y Y, *et al.* Adjusting sowing window to mitigate climate warming effects on forage oats production on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 293: 108712.
- [19]孙昊蔚,马靖涵,王力.未来气候变化情景下基于 APSIM 模型的黄土高原冬小麦适宜种植区域模拟[J].麦类作物学报,2021,41(6):771.
SUN H W, MA J H, WANG L. Simulation of suitable planting area of winter wheat under climate change in the Loess Plateau based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(6): 771.
- [20]RICHETTI J, LAWES R A, WHAN A, *et al.* How well does APSIM NextGen simulate wheat yields across Australia using gridded input data? Validating Continental-Scale Crop Model Simulations [J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 158: 127212.
- [21]史鑫蕊,韩百书,王紫芊,等.基于 APSIM 模型模拟分析气候变化对不同熟性北方冬小麦生长和产量的影响[J].中国农业科学,2023,56(19):3772.
SHI X R, HAN B S, WANG Z Q, *et al.* Investigation on the effects of climate change on the growth and yield of different maturity winter wheat varieties in northern China based on the APSIM model [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(19): 3772.
- [22]王倩.我国冬小麦物候变化时空特征及基于 APSIM 模型的播种期适宜性评价[D].南京:南京师范大学,2020.
WANG Q. Spatiotemporal characteristics of winter wheat phenology and suitability evaluation of sowing date based on APSIM model in China [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2020.
- [23]刘沉默.旱作条件下 APSIM 模型的适应性评价及应用:以山西省为例[D].太谷:山西农业大学,2019.
LIU C M. Adaptability evaluation and application of APSIM model under dryland condition [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [24]高雪慧,刘强,王钧.基于 APSIM 模型播期对未来气候变化情景下旱地春小麦产量和生育期影响的模拟分析[J].麦类作物学报,2022,42(6):738.
GAO X H, LIU Q, WANG J. Simulation of sowing dates influencing on yield and growth period of spring wheat in dryland under future climate change scenarios based on APSIM model [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(6): 738.
- [25]CAMMARANO D, HOLLAND J, RONGA D, *et al.* Spatial and temporal variability of spring barley yield and quality quantified by crop simulation model [J]. *Agronomy*, 2020, 10(3): 393.
- [26]伍露,程陈,杨霁云,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.
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.
- [27]侯青青,成华强,朱敏,等.晋北两种饲草作物的 APSIM 模型参数敏感性分析[J].草地学报,2023,31(10):3114.
HOU Q Q, CHENG H Q, ZHU M, *et al.* Parameter sensitivity analysis on submodules of APSIM to two forages in northern Shanxi Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10): 3114.
- [28]成华强,侯青青,朱敏,等.气候变化与轮作制度对晋北饲用燕麦产草量的影响[J].作物学报,2024,50(10):2599.
CHENG H Q, HOU Q Q, ZHU M, *et al.* Effects of climate change and crop rotation system on forage oats yield in northern Shanxi Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(10): 2599.
- [29]刘强,高雪慧,王钧.不同降水年型下大气 CO₂ 浓度和温度对旱地春小麦产量的响应模拟[J].干旱地区农业研究,2023,41(2):230.
LIU Q, GAO X H, WANG J. Response simulation of CO₂ concentration and temperature on spring wheat yield in dryland under different precipitation types [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 230.
- [30]李林超.气候变化对作物生长和产量影响的模拟及不确定性研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
LI L C. Crop growth and yield predictions and uncertainty analysis under climate change [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [31]SUN T, HASEGAWA T, LIU B, *et al.* Current rice models underestimate yield losses from short-term heat stresses [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(2): 402.
- [32]杨伟才,毛晓敏.气候变化影响下作物模型的不确定性[J].排灌机械工程学报,2018,36(9):874.
YANG W C, MAO X M. Uncertainty of crop models under influence of climate change [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(9): 874.