

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.005

引用格式:何世佳,成华强,刘鹏,等.高温干旱复合事件对晋北饲用燕麦生产的影响[J].草地学报,2026,34(2):424—436
HE Shi-jia, CHENG Hua-qiang, LIU Peng, et al. Effects of Compound Drought and Hot Events on the Forage Oats Production of Northern Shanxi[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 424—436

高温干旱复合事件对晋北饲用燕麦生产的影响

何世佳^{1,2,3}, 成华强^{1,2,3}, 刘鹏^{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:为探究高温干旱复合事件(Compound drought and hot events, CH)对朔州饲用燕麦(*Avena sativa* L.)生产力及物候期的影响,并探讨为应对该类事件饲用燕麦的生育期积温需求应如何改变。为此,本研究基于验证的 APSIM (Agricultural Production System sIMulator)模型,结合气候模型对历史及未来情景下朔州市6个站点进行模拟分析。基于 APSIM 模型验证及情景模拟,2023 年地上生物量归一化均方根误差(Normalized root mean square error, NRMSE)9.19%, 2022—2023 年土壤水分 NRMSE 25.69%, 结果表明:未来晋北地区气候危害加剧,2070s 的 CH 频率、持续时间和强度总体升高且自东向西递减,导致发生 CH 年份的饲用燕麦产草量较多年平均低 2046.2 kg·hm⁻², 出苗至初花期和初花至盛花期分别延长 0.97 和 0.26 d;但通过站点气候优化选育改良品种可提升产草量 1.95%~23.65%。研究结果可为饲用燕麦应对 CH 提供理论基础,并为未来饲用燕麦的育种方向和生产管理提供一定的指导。

关键词:APSIM; 饲用燕麦; 高温干旱复合事件; 气候变化

中图分类号:S543+.7

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0424-13

Effects of Compound Drought and Hot Events on the Forage Oats Production of Northern Shanxi

HE Shi-jia^{1,2,3}, CHENG Hua-qiang^{1,2,3}, LIU Peng^{1,2,3}, YANG Xuan^{1,2,3*}

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

Abstract: To investigate the impact of compound drought and hot events (CH) on the productivity and phenology of forage oats (*Avena sativa* L.) in Shuozhou, and to explore how the accumulated temperature requirements during the growth period of forage oats should be adjusted for coping with such events, this study utilized validated APSIM (Agricultural Production System sIMulator) to conduct simulation analysis at six sites in Shuozhou within baseline and future scenarios in combination with climate model. Based on APSIM model validation (2023 aboveground biomass Normalized Root Mean Square Error: 9.19%, 2022—2023 soil moisture NRMSE: 25.69%) and scenario simulations, the results indicate that future climatic hazards in Northern Shanxi will be intensified. By the 2070s, the frequency, duration, and intensity of CH would generally increase with a decreasing trend from east to west. This led to a reduction in forage oat yield of 2046.2 kg·hm⁻² during CH-occurring years compared to the multi-year average. Furthermore, the durations from emergence to initial flowering and from initial flowering to full flowering were prolonged by 0.97 days and 0.26 days, respectively. However, optimizing cultivar selection based on site-specific climate conditions could increase forage yield by 1.95% to 23.65%. The results of this study could provide a theoretical basis for forage oats production to cope

收稿日期:2025-04-14;修回日期:2025-06-14

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:何世佳(1999-),男,汉族,硕士研究生,主要从事田间粮草耦合与模型应用方向研究,E-mail: 15048712840@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yangxuan2019@sxau.edu.cn

with CH, and offer some guidance for breeding strategy and field management of forage oats in the future.

Key words: APSIM; Forage oats; Compound drought and hot event; Climate change

极端气候事件是全球气候研究的重点^[1],中国近几十年来温度上升速度高于全球平均水平^[2],未来气候趋向暖湿,但区域差异显著^[3]。气候变暖加剧了极端天气事件的发生^[4],如高温干旱复合事件(Compound drought and hot events, CH)的频率和强度增加^[5]。研究表明,四川、山东等地在过去30至40年间CH事件风险上升^[6-7];山西省邻近的西北地区自1994年以来CH事件的严重性、范围和频率也有所增加^[8]。朔州地区位于山西省北部,近四十年来受到气候变化的影响,表现为夏季降水减少,秋季降水增多^[9],且极端高温事件增多,CH事件风险正在加剧^[10]。

CH会对水资源、生态环境、农业生产和社会经济产生重大影响^[11],并对作物的形态、呼吸和光合作用造成严重损害^[12-13]。CH事件可通过相互作用激活作物独特的基因和代谢途径,对作物的影响并非单一胁迫的简单叠加^[14-16]。饲用燕麦(*Avena sativa* L.)以其抗旱、耐寒和高产特性^[17],在山西省畜牧业中占据重要地位,2020年种植面积为1.05万公顷,干草产量5.12万吨^[18],是主要的夏季饲草作物,有着受CH事件而导致严重减产的风险^[19-20]。

目前,作物应对CH的策略主要包括躲避等抗逆性锻炼。研究表明,通过培育物候期改变的新品种并结合提前播种,可以避免作物在敏感生殖期遭受非生物胁迫,从而提高产量^[21-22]。为合理进行作物生产的可持续管理,有必要针对评估CH事件对饲用燕麦生产的影响进行综合的风险分析评估。农业生产系统模型(Agricultural production system simulator, APSIM)是评估CH事件风险和优化作物管理的重要工具^[23],尤其适用于模拟极端气候下的产量变

化^[24]。例如,Li等^[25]基于APSIM改变物候性状并结合农艺管理以避免澳大利亚东南部小麦开花期复合干热事件;Tefera等^[26]则通过APSIM调整扁豆的物候期和播种时间,减轻了霜冻、高温和水分胁迫的影响。可见,APSIM可用于研究CH事件对饲用燕麦的影响,通过模拟物候期调整探索应对策略,对饲用燕麦的可持续管理策略的制定具有重要意义。

研究团队前期工作表明,APSIM模型对晋北地区饲用燕麦生长的模拟具有较高精度^[23,27-30]。本研究将在验证APSIM模型适用性的基础上,结合气候模型分析朔州市历史与未来情景下CH的发生情况,及其对饲用燕麦生产力和物候期的影响,并探讨饲用燕麦生育期积温需求的调整策略,以应对CH事件的风险。研究结果将为饲草应对极端气候的机制研究提供理论依据,并为未来饲用燕麦育种和生产管理提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

朔州市位于山西省北部,地处北方农牧交错带,海拔1000~1450 m,温带半干旱气候。年日照时数2400~2960 h,饲用燕麦生育期(5—9月)日均气温16℃~20℃,年辐射量2800~3100 MJ·m⁻²·a⁻¹,年降水量290~340 mm,主要集中在5月至9月,占全年降水量的70%~80%。该地区以雨养农业为主,饲用燕麦为主要饲草作物。研究覆盖朔州市6个主要县(区):怀仁、平鲁、山阴、朔州、应县和右玉(表1)。

表1 朔州市6个站点的基础信息

Table 1 Basic information of 6 sites in Shuozhou

站点 Site	经度 Longitude/°E	纬度 Latitude /°N	海拔 Altitude/m	多年平均降水 Mean precipitation/mm	多年平均温度 Mean temperature/℃	多年平均辐射 Mean radiation/(MJ·m ⁻² ·a ⁻¹)
怀仁 Huairan	113.10	39.82	1044.6	298.99	19.88	2969.68
平鲁 Pinglu	112.27	39.52	1409.4	338.55	17.32	2864.43
山阴 Shanyin	112.82	39.50	1045.0	297.87	19.39	2951.20
朔州 Shuozhou	112.43	39.37	1114.8	336.90	18.76	2793.98
应县 Yingxian	113.17	39.57	1000.7	299.33	19.65	3001.22
右玉 Youyu	112.45	40.00	1345.8	337.96	16.19	3020.92

1.2 数据来源

气候情景以6个站点1980—2009年(1980s)的气候数据为基准情景,含逐日降水量、逐日最高、最

低温,由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)获得,逐日辐射量使用Angstrom方程以日照时数计算^[31]。未来气候情景数据则利用气象

数据生产工具 ACSGTR (AgMIP climate scenario generation tools with R; www.agmip.org) 生成^[23], 并基于第五次国际耦合模式比较计划 (Coupled model intercomparison project phase 5, CMIP5) 中 20 个全球气候模式 (表 2), 以典型浓度通道 RCP8.5 (Representative Concentration Pathways) 的 2040—2069 年 (2040s), 2070—2099 年 (2070s) 区间进行预测^[32]。1980s, 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, 677 和 935 ppm。

饲用燕麦以黑玫克为基准品种, 该品种的参数由 2020—2021 年于右玉进行的田间试验所测定 (表 3)。田间试验中饲用燕麦的播种量为 180 kg·hm⁻², 行距为 25 cm。情景模拟中各点播期设置根据当地调查和媒体报道获取 (怀仁为 4 月 22 日—5 月 12 日、平鲁为 5 月 3 日—5 月 23 日、山阴为 4 月 24 日—5 月 14 日、朔州为 4 月 25 日—5 月 15 日、应县为 4 月 24 日—5 月 14 日、右玉为 5 月 5 日—5 月 25 日)。

除右玉 (田间试验测得, 表 4) 外的 5 个县 (区) 的土壤数据来自中国土壤科学数据库 (<http://vdb3.soil.csdb.cn/>; 表 5、表 6)。6 个站点土壤 150 cm 的植物有效持水量 (plant available water holding

表 2 研究选取的 20 个全球气候模式

Table2 20 selected global climate models of this study

GCM	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

capacity, PAWC) 分别为: 怀仁 241.3 mm、平鲁 265.3 mm、山阴 192.3 mm、朔州 247.0 mm、应县 175.7 mm、右玉 157.5 mm。

表 3 饲用燕麦的基本参数^[28]

Table 3 Basic parameters of forage oats modules^[28]

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·d)	210
tt_floral_initiation TTFI	始花期的积温 Thermal time required from floral initiation stage to flowering/(°C·d)	290
tt_flowering TTF	开花期的积温 Thermal time required in flowering to start of grain filling/(°C·d)	130
photop_sens	光周期敏感性指数 Photoperiod sensitivity	1.5
y_height	最大株高 Maximal plant heigh/mm	1500
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·d)	545
sla_max	最大比叶面积 Maximum specific leaf area for delta LAI	2000—2200
sla_min	最小比叶面积 Minimum specific leaf area for delta LAI	1800

1.2.1 APSIM 模型验证 APSIM 是由澳大利亚联邦科工组织 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 和昆士兰州政府农业生产系统组 (Agriculture Production System Research Unit, APSRU) 开发的农业生产模拟模型^[33]。它是一个动态的、以日为时间步长的机理模型, 整合了作物、土壤、气候和管理模块, 通过中央引擎模拟种植系统。APSIM 模拟精度依赖于参数体系的层级校准。气候参数影响发育进程与胁迫

驱动, 气温变化决定积温积累, 降水首先作用于土壤, 改变土壤水分分配后再作用于植株的有机物合成过程^[34]。土壤参数是水分/养分胁迫的底层控制器, APSIM 模拟的描述中以水分运移参数描述土壤水肥的动态变化及作物的可利用水分、养分, 进而决定作物生长发育过程是否受到相关资源缺乏的胁迫^[35-36]。作物和管理参数也分别通过内因、外因影响模拟结果, 例如同化校准叶面积指数时, 生物量的推演精度可进一步提高, 而播期调整可改变关

表 4 右玉点的土壤基本参数^[28]
Table 4 Basic soil parameters in Youyu site^[28]

土壤深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ (g·cm ⁻³)	萎蔫系数 15 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)
0~10	1.256	0.140	0.235	0.483	0.011
10~20	1.324	0.148	0.259	0.477	0.012
20~40	1.313	0.160	0.254	0.457	0.014
40~60	1.327	0.172	0.264	0.436	0.018
60~80	1.354	0.231	0.275	0.428	0.016
80~100	1.368	0.173	0.285	0.447	0.017
100~120	1.418	0.174	0.311	0.334	0.017

表 5 各土壤类型及参数
Table 5 Soil types and parameters

土壤类型及序号 Type order and subtype of Chinese soil classification	土壤深度 Soil depth/ cm	容重 Bulk density/ (g·mm ⁻³)	萎蔫系数 15 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)
1 夹白干栗土(怀仁) Light castanozems (Huaren)	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
2 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
3 浅钙积栗土(山阴) Light castanozems (Shanyin)	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
4 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
5 二合栗黄土(朔州) Castano cinnamon (Shuozhou)	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 6 各土壤类型的养分含量及 pH
Table 6 Nutrient content and pH of different soil types

土壤类型序号 Type order and subtype of Chinese soil classification	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 值 pH value
1 夹白干栗土 Light castanozems	9.8	0.568	27.5	5.6	8.3
2 淡栗黄土 Light castano	4.5	0.261	13.5	4.7	8.3
3 浅钙积栗土 Light castanozems	5.6	0.325	21.5	4.3	8.2
4 少姜红栗黄土 Castano cinnamon	9.4	0.545	30.0	12.0	8.7
5 二合栗黄土 Castano cinnamon	6.6	0.383	21.5	6.3	8.2

键生育期遭受气候逆境的可能性^[36-37]。试错法对饲用燕麦品种参数进行校准并验证^[27]，
APSIM 模型已于 2020—2021 由田间试验利用 2022 年验证了模型的精准性^[29]。本研究于右玉试

验站进行,包含两个饲用燕麦轮作模式:饲用燕麦-玉米,饲用燕麦-马铃薯,试验期间记录生育期并测定关键生育期地上生物量的干鲜重^[30]。为进一步验证模型的精准性,本研究基于田间实验数据,采用标准均方根误差(Root mean square error, RMSE)、归一化均方根误差(Normalized root mean square error, NRMSE)和威尔莫特一致性指数(Willmott agreement index, d)判断模型对2023年饲用燕麦地上生物量和2022—2023年土壤储水量的适用性。RMSE和NRMSE反映模拟值与实测值的绝对误差与相对误差,其值越小,说明模拟值与实测值的偏差越小,表明模拟效果越好。 d 值则可量化模型估计模拟值上升或下降趋势的准确性。

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_i - \bar{X}| + |X_i - \bar{X}|)^2} \quad (3)$$

式中, X_i 为实测值, Y_i 为模拟值, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 别为实测值和模拟值的平均值; n 为样本数。

1.3 高温干旱复合事件的量化

为确定高温干旱复合事件CH对饲用燕麦产草量和物候期的影响,本研究对6个站点进行对基准品种黑玫克饲用燕麦生产的逐日模拟,包括1980s, 2040s和2070s情景。

采取被广泛接受的标准来定义高温和干旱事件,即用植物有效土壤水(Plant available soil water, PAW)阈值来定义饲用燕麦是否遭受水分胁迫,用日最高温度(T_x)阈值来定义是否发生热胁迫:以40%的PAWC作为区分作物水分胁迫的阈值^[38],当0~150 cm土壤剖面的PAW连续3天及以上低于该剖面的40%的PAWC时触发干旱事件。在APSIM-Oats中,日最高温度35℃为燕麦的热胁迫阈值,本研究以每日最高温连续三天或以上高于35℃,即发生一次高温事件。根据上述,CH定义为发生高温事件的同时发生干旱事件。

采用频率、持续时间、强度3个指标量化CH。CH发生的频率(CHF),即各情景模拟的30年间发生CH的年均次数;CH发生的年均持续时间(CHD;CH发生的强度(CHI),为日平均强度,即发

生CH的日强度(DCHI)总和除以总天数。

$$DCHI = \alpha \frac{40\% \times PAWC - PAW}{40\% \times PAWC} + (1 - \alpha) \frac{T_x - T_c}{T_s - T_c} \quad (4)$$

$$CHI = \frac{\sum_{i=1}^N DCHI}{N} \quad (5)$$

式中,PAWC为DUL与作物下限(萎蔫系数)的体积含水量之差^[39],PAW为日土壤体积含水量与作物下限的体积含水量之差, T_x 为日最高温, T_c 为高温阈值, T_s 为40℃^[26], α 为日干旱强度权重,取0.5。

1.4 情景模拟

为探究更适合未来气候及更能抵抗CH事件的饲用燕麦品种,并量化改变品种对产草的影响,需了解饲用燕麦物候期积温需求参数TTEJ(tt_end_of_juvenile,出苗到营养生长结束的积温)、TTFI(tt_floral_initiation,始花期的积温)TTF(tt_flowering,开花期的积温)与多年产草量的关系。

本研究通过改变TTEJ,TTFI,TTF的数值建立具有不同物候特性的虚拟品种,并对6个选定站点下各虚拟品种的饲用燕麦生产进行模拟。决定物候长度各积温参数的变化范围参考前人研究,设置为±10%~40%(以10%为步长)^[26]。输出模拟结果后,以黑玫克基准品种的产草量为中心进行聚类分析,并使用尺度函数对数据进行转换(-2到2尺度),择选对产草量影响较大的积温需求参数,以确定影响饲用燕麦产草量的关键物候期,进而分析关键物候期内CH的变化,并通过不同的参数值修改组合产生新的虚拟品种。

虚拟品种生成后,则进行第二部分情景模拟,即6个县(区)于未来气候条件下,虚拟品种的长期生产模拟,以筛选出各站点的最适品种。

所用尺度函数为:

$$x_1 = \frac{x - \min}{\max - \min} \times (m_x - m_i) + m_i \quad (6)$$

式中, x_1 为转换值,max和min为各时期饲用燕麦平均产草量的最大值和最小值, m_x 和 m_i 为指定区间的最大值和最小值,当 x 小于基准品种的产草量时,指定区间为 $[-2, 0]$,max为基准品种的产草量,当 x 大于基准品种的产草量时,指定区间为 $[0, 2]$,min为基准品种的产草量。

为保证出苗率,情景模拟中基于各站点的播种窗口设置播种规则:窗口5 d内累计降水10 mm播

种,否则于窗口最后一天播种,播种后灌溉 50 mm。播种深度、密度和行距参考田间试验设置管理参数。初始土壤储水量设置为田间持水量的 80%,情景模拟采用连续模拟进行模拟,各年初始条件不重置。

1.5 饲用燕麦新品种的增产率

为明确最适虚拟品种与基准品种的差异,采用增产率量化新品种的变化。

饲用燕麦增产率 =
$$\frac{\text{新品种产草量} - \text{基准品种产草量}}{\text{基准品种产草量}} \times 100\% \quad (7)$$

1.6 数据处理

本研究利用 Excel 2019 对数据进行输入与整理,以高温干旱复合事件作为处理,以发生 CH 年份

或所有年份中饲用燕麦的逐年产量作为重复,使用 SPSS 26 选择 t 检验进行差异显著性分析,*,**,和*** 则分别代表 $P<0.05$, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 。使用科研绘图软件 Origin 2021 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型验证

验证结果表明(表 7),2023 年饲用燕麦地上生物量实测值与模拟值的 RMSE 为 952.93 kg hm, NRMSE 为 9.19%,d 值为 0.9728。2022—2023 年 0~120 cm 土壤水分的实测值与模拟值的 RMSE 为 64.58 mm, NRMSE 为 25.69%,d 值为 0.5260。以上指标表明 APSIM 可以较为准确的模拟饲用燕麦地上生物量和 0~120 cm 土壤水分。

表 7 2023 年饲用燕麦地上生物量和 2022—2023 年土壤水分的实测值和 APSIM 模型模拟值的比较

Table 7 Comparison of biomass of forage oats in 2023 and soil water storage in 2022—2023 with simulated values of APSIM model

测定项目 Measured item	年份 Time	测试指标 Validation index		
		RMSE	NRMSE/%	d
饲用燕麦地上生物量 Oats biomass/(kg·hm ⁻²)	2023	952.93	9.19	0.9728
0~120 cm 土壤水分 0~120 cm soil water storage/mm	2022—2023	64.58	25.69	0.5260

2.2 TTEJ, TTFI, TTF 参数改变对产草量的影响

模拟不同水平物候期积温变化对饲用燕麦产草量的影响(图 1)。TTEJ 的改变对饲用燕麦产草量的影响最大,该值增加 10%~40% 的积温可最大程度的增加产草量;TTFI 改变对饲用燕麦产草量

的影响次之,该值增加 30%~40% 的积温对饲用燕麦增产的影响次之,增加 10%~20% 的积温则对饲用燕麦增产几乎无影响;TTF 改变对饲用燕麦产草量的影响最小,该值增加 10%~40% 时对饲用燕麦增产几乎无影响。

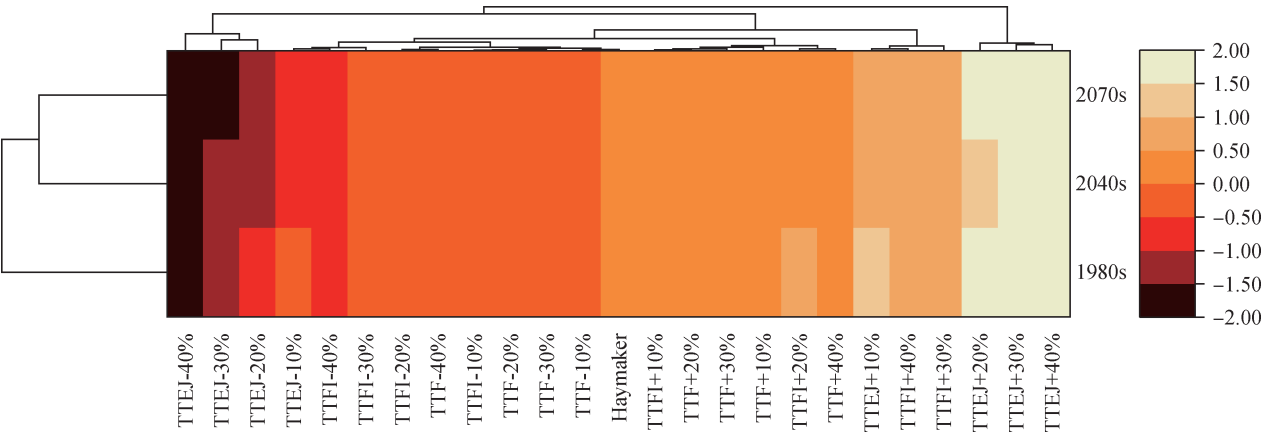


图 1 物候期(TTEJ、TTFI、TTF)积温变化对各时期饲用燕麦产草量的影响

Fig. 1 Effects of accumulated temperature changes at different phenological periods (TTEJ, TTFI, TTF) on forage oats yield
注: TTEJ, 出苗到营养生长结束的积温; TTFI, 始花期的积温, TTF, 开花期的积温

Note: TTEJ represents tt_end_of_juvenile, TTFI represents tt_floral_initiation, TTF represents tt_flowering

2.3 CH 的频率、持续时间和强度

由于 TTEJ、TTFI 对饲用燕麦产草量的影响较大

(图 2),且对应的生育期(出苗期至初花期,即饲用燕麦的营养生长期)于朔州各点均基本在 6—7 月之间,因此

仅统计该两个月的CHF,CHD及CHI。根据6点的平均值(图2),相比1980s的CHF,CHD,CHI(1.5次、0.16天、42.3%),2040s(由于平鲁、右玉2点在1980s未发生CH,因此CHI仅计算其余4点)分别增加12.3

次、1.76天、6%;相比2040s的CHF,CHD,CHI(13.8次、1.92天、50.8%),2070s分别增加39次、6.94天、1.2%。在区域上,CHF,CHD,CHI由东向西逐渐减小(怀仁、应县>山阴、朔州>平鲁、右玉)。

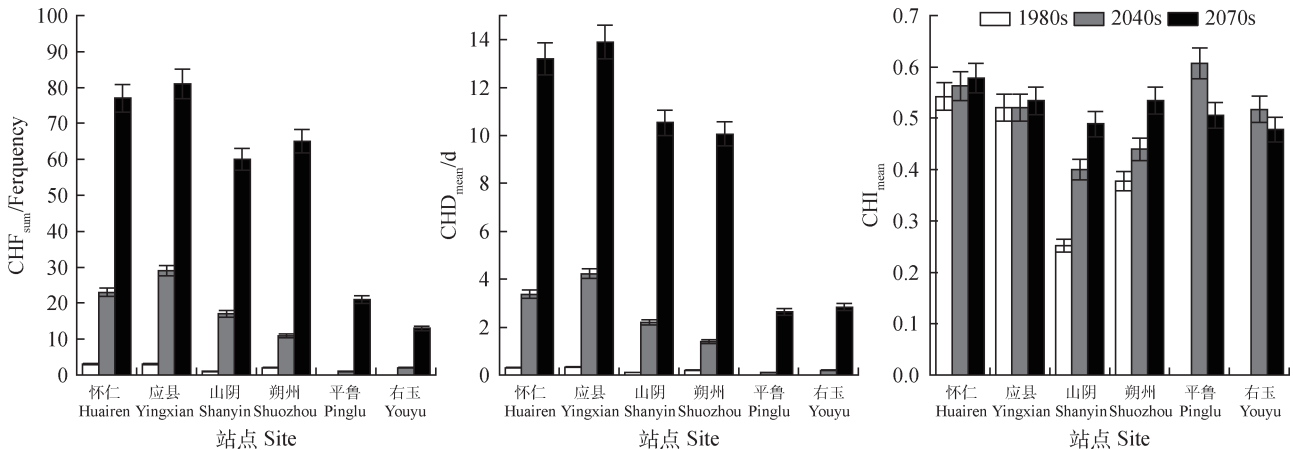


图2 CH的频率、持续时间和强度

Fig. 2 Frequency, duration and intensity of CH

注:CHF_{sum}表示30年间高温干旱复合事件发生的频率;CHD_{mean}表示30年间高温干旱复合事件发生的年均持续时间;CHI_{mean}表示发生高温干旱复合事件的日平均强度

Note: CHF_{sum} represents frequency of compound drought and hot events in 30 years; CHD_{mean} represents annual average duration of compound drought and hot events in 30 years; CHI_{mean} represents daily average intensity of compound drought and hot events

2.4 CH对饲用燕麦产量及物候期的影响

发生CH年份的饲用燕麦平均产草量为12 901.7 kg·hm⁻²,较多年平均值低2046.2 kg·hm⁻²(图3)。1980s怀仁、山阴、朔州、应县4点发生CH年份的平均产草量为11 492.1 kg·hm⁻²,较该时期多年平均值低1647.1 kg·hm⁻²。2040s情景下,6点发生CH事件的平均产草量为12 558.8 kg·hm⁻²,较同期多年平均值低3138.9 kg·hm⁻²;其中,右玉发生CH年份的平均产草量最低,仅为19 635.9 kg·hm⁻²,相对多年显著降低8408.7 kg·hm⁻²($P<0.001$)。2070s情景下,6点发生CH年份的平均产草量为14 735.7 kg·hm⁻²,较多年平均产草量低668.3 kg·hm⁻²;其中,平鲁发生CH时产草量平均为15 098.5 kg·hm⁻²,相对多年平均值减产幅度显著($P<0.05$),达到2464.6 kg·hm⁻²。

各发生CH的年份中,饲用燕麦生长期结束至初花期(End of juvenile to floral initiation, EJF)、初花至盛花期(Early flowering to flowering, EFF)的长度分别平均为56.12,14.77 d,较多年平均物候期分别延长0.97和0.26 d(图4)。与多年平均数据相比,1980s情景下,发生CH年份各站点EJF与EFF天数变化不一,部分站点缩短,怀仁EJF延长1.53 d;2040s多数站点EJF延长0.45~2.5 d,仅右玉缩短0.77 d,EFF在多数站点延长0.54~3.27 d,平鲁

与朔州略有缩短。2070s所有站点EJF与EFF均呈延长趋势,分别增加0.1~1.04 d和0.25~0.74 d。

2.5 新品种对未来气候及CH的响应

参考图2结果,为应对未来气候条件及CH的影响,调整TTEJ,TTFI数值0%~40%,共生成25个虚拟品种,挑选出适合6个站点各时期的虚拟品种(表8)。其中,各点最适应未来多年气候条件的品种,可提高2040s饲用燕麦平均产草量4.16%~23.08%,并提高发生CH年份的平均产草量13.84%~25.70%;最适品种还可提高2070s平均产草量10.61%~18.87%,并提高发生CH年份的平均产草量12.53%~19.07%。但平鲁与右玉点在2040s采用适应未来气候的品种时,发生CH年份的仍平均减产13.21%和1.94%。

所筛选的最适CH品种,可提高2040s的多年平均产草量1.25%~23.08%,并提高发生CH年份的平均产草量4.29%~25.70%。最适CH品种还可提高2070s多年平均产草量10.61%~18.87%,并提高发生CH年份的平均产草量12.53%~25.70%。其中,怀仁、山阴、应县3点适应未来气候和适应CH的虚拟品种一致,朔州、平鲁、右玉3点适应CH品种则在CH发生时的产草量表现明显更好。

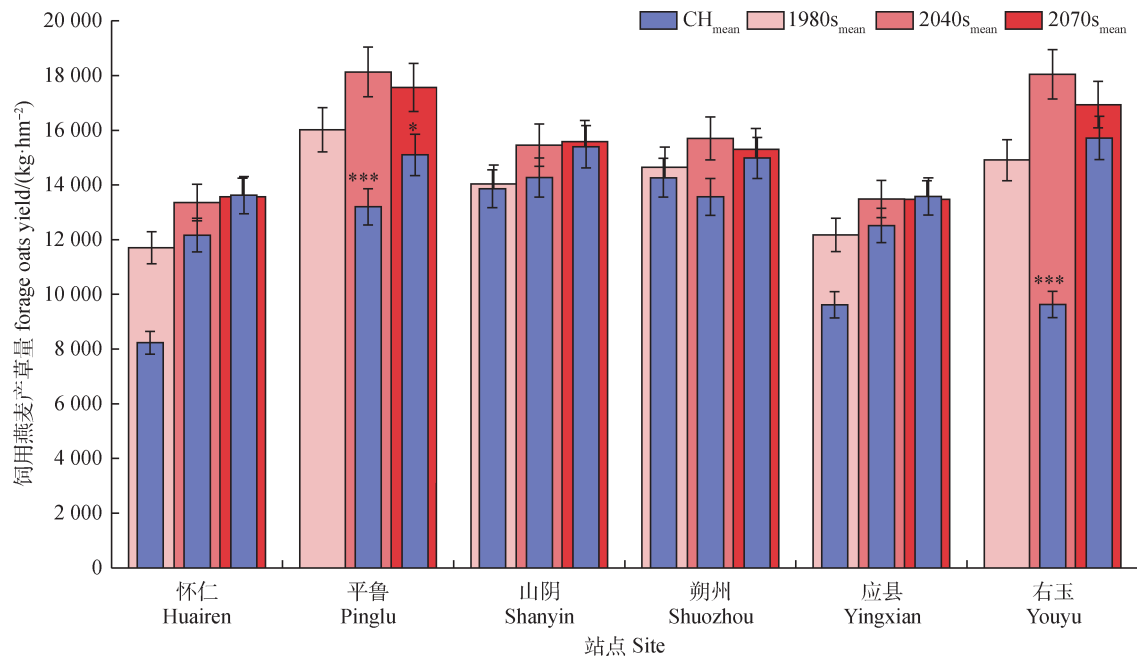


图 3 发生 CH 各年份与各时期饲用燕麦的平均值比较

Fig. 3 Comparison of average values of forage oats yield in each year and period when CH occurred

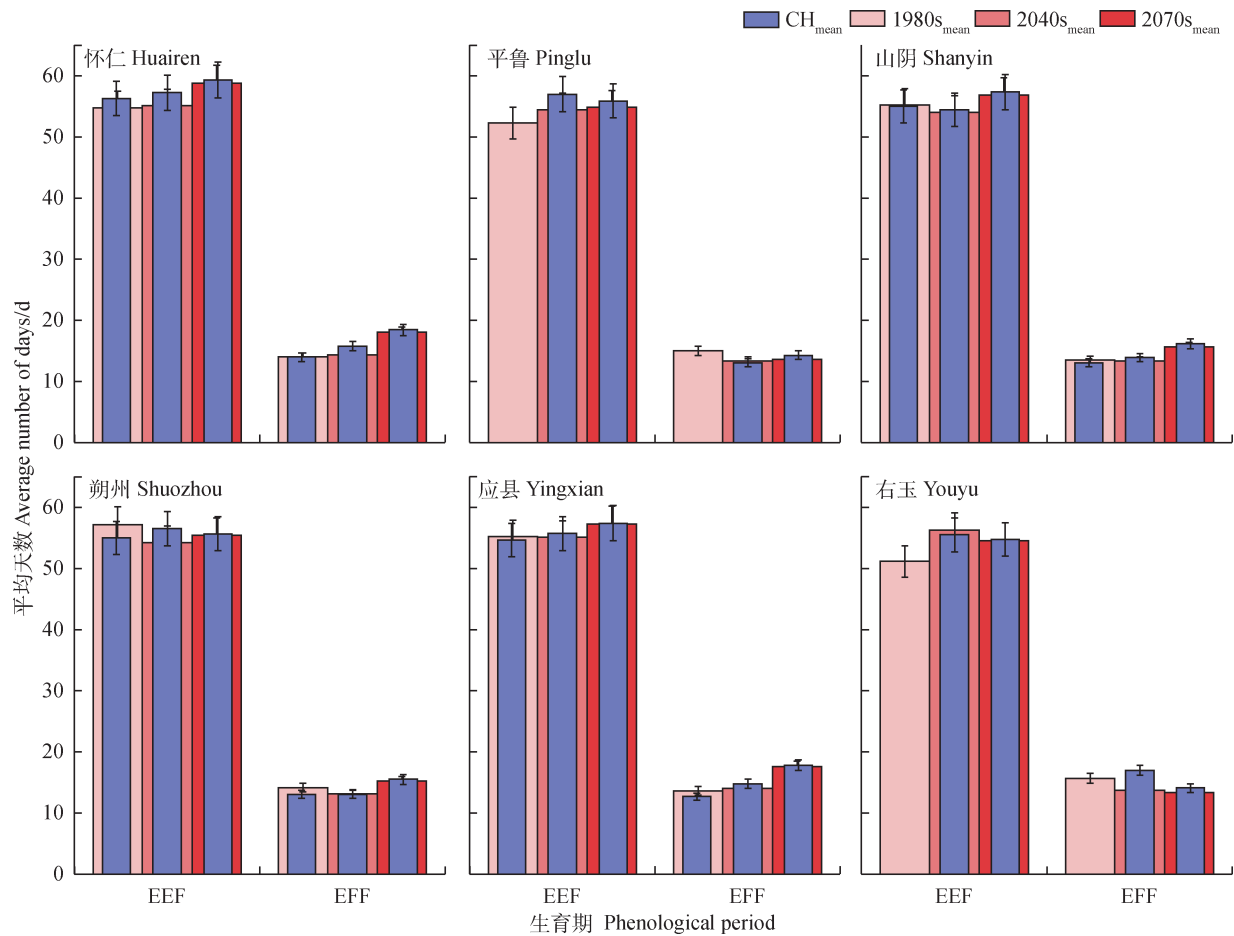


图 4 发生 CH 各年份与各时期饲用燕麦物候期的平均值比较

Fig. 4 Comparison of the average phenological period of forage oats in each year and period when CH occurred

注:EEF,生长期结束至初花期;EFF,初花至盛花期。* $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$

Note: EEF, End of juvenile to floral initiation; EFF, Early flowering to flowering. * $P<0.05$,** $P<0.01$,*** $P<0.001$

表 8 各地最适虚拟品种

Table 8 The most suitable virtual varieties by sites

站点 Site	气候情景 Climate scenario	适应未来气候品种 Future climate adapted varieties	物候期积温 Phenological accumulated temperature/(°C·d)			增产率 Yield increase rate/%		适应未来 CH 品种 Future CH adapted varieties	物候期积温 Phenological accumulated temperature/(°C·d)			增产率 Yield increase rate/%	
			TTEJ	TTFI	TTF	平均	CH		TTEJ	TTFI	TTF	平均	CH
怀仁 Huairan	2040s	nv20	273	406	130	23.08	17.84	nv20	273	406	130	23.08	17.84
	2070s	nv13	252	348	130	13.97	13.45	nv13	252	348	130	13.97	13.45
平鲁 Pinglu	2040s	nv13	252	348	130	9.75	-13.21	nv2	210	219	130	1.25	4.29
	2070s	nv15	252	406	130	12.60	12.26	nv14	252	377	130	12.40	13.75
山阴 Shanyin	2040s	nv24	294	377	130	17.29	13.84	nv24	294	377	130	17.29	13.84
	2070s	nv19	273	377	130	12.74	14.23	nv19	273	348	130	12.74	14.23
朔州 Shuozhou	2040s	nv20	273	406	130	20.08	17.44	nv22	294	319	130	19.96	17.92
	2070s	nv20	273	406	130	18.87	19.07	nv20	273	406	130	18.87	19.07
应县 Yingxian	2040s	nv23	294	348	130	21.19	25.70	nv23	294	348	130	21.19	25.70
	2070s	nv21	294	290	130	12.10	12.53	nv21	294	290	130	12.10	12.53
右玉 Youyu	2040s	nv5	210	406	130	4.16	-1.94	nv11	252	290	130	1.99	14.94
	2070s	nv14	252	377	130	10.61	15.46	nv14	252	377	130	10.61	15.45

3 讨论

3.1 APSIM 的适应性

在模型校准的基础上, APSIM 模拟 2020—2021 年晋北地区饲用燕麦地上生物量指标的 NRMSE 为 12.35%^[30], 2022 年为 3.32%^[29], 本研究进一步利用 2023 年田间试验实测数据, 对 APSIM 模型在饲用燕麦生产中的适应性进行了验证。结果表明, 2023 年模拟结果的 NRMSE 与前期研究存在一定差异, 其主要原因如下: 首先, 2023 年饲用燕麦播种后未能及时灌溉, 加之降水稀少, 影响了作物出苗^[40], 而 APSIM 模型未能充分反映该时期降水不足对出苗的影响; 其次, 2022 年同期降水充沛, 且已有研究表明该模型对湿润年型下麦类作物出苗的模拟精度较高^[41]。此外, 模型未考虑病虫害及杂草对作物的影响, 也是导致模拟差异的原因之一。

另外, 2022—2023 年土壤水分验证结果显示, 实测值与模拟值的 NRMSE 达到 25.69%, 显著高于 2020 年和 2021 年的 4.03% 和 6.05%^[27]。这一差异主要归因于 2022 年极端降水条件的影响: 5—6 月降水量仅为 92.2 mm, 而 7—8 月则高达 305.8 mm。研究表明, APSIM 模型在模拟极端降水事件时, 由于高估了水分入渗量, 导致模拟值普遍偏高^[42]。综合分析各评价指标, APSIM 模型在模拟饲用燕麦物质积累过程及田间水分运移方面表现出较好的适用性^[43], 但其对生产环境与作物生产相互作用的描述尚存在一定局限性。

3.2 CH 的频率、持续时间和强度的变化

本研究基于历史情景和未来情景的逐日气候数据, 采用频率 (CHF)、持续时间 (CHD) 和强度 (CHI) 三个指标对复合高温事件 (CH) 进行量化分析。研究结果表明, 温度升高是主导 CH 变化的关键因素, 导致未来情景下 6 个站点的平均 CHF, CHD 和 CHI 均呈现上升趋势^[44]。具体而言, 在 1980s, 右玉和平鲁当地温度较低, 未发生高温事件, 因此未出现 CH。然而, 在 2040s 情景下, 平鲁和右玉的 CHI 反而高于 2070s, 这主要因为 CHI 反映日均强度, 而 2040s 期间这两个站点分别仅发生 2 次和 1 次 CH 事件, 持续时间分别为 6 天和 3 天, 但在持续时间内高温强度较高。值得注意的是, 2070s 期间 CHF 和 CHD 均较 2040s 有所提高, 表明 2070s 的 CH 事件总体上更为严重。此外, 空间分析显示, 各站点的 CHF, CHD 和 CHI 呈现由东向西递减的趋势, 这与朔州市由东向西海拔逐渐升高的地形特征密切相关^[45]。海拔升高导致气温降低, 使得西部地区高温事件的发生频率相对较低。

3.3 CH 对饲用燕麦产草量及物候期天数的影响

本研究基于 APSIM 模型定量分析了朔州市 6 个站点在 1980s, 2040s 和 2070s 期间复合高温事件 (CH) 对饲用燕麦产草量的影响。研究结果表明, 发生 CH 年份的产草量较相应情景的多年平均值低 2046.2 kg·hm⁻²。这一现象主要归因于两个机制: 首先, CH 期间过高的气温加速了土壤水分蒸发^[46], 导致作物水分供应不足, 影响其正常生长发育; 其

次,高温增加了水汽压亏缺^[47],促使作物气孔关闭以减少水分散失,从而抑制光合作用,最终导致产量下降^[48]。然而,怀仁和应县两个站点的数据显示,发生CH年份的产草量并未低于多年平均值。这一反常现象可解释为:在2070s,虽然CH发生频率较高,但部分CH年份由于降水量充足,使得CHF,CHD和CHI相对较低,对产草量的负面影响较小^[49];而未发生CH的年份,由于降水量偏低,产草量反而较低。例如,在预测年份2086年,应县仅发生一次持续3天的CH事件,但生育期内降水量高达368.75 mm,产草量达到18900 kg·hm⁻²,高于多年平均值;而在预测年份2074年,应县未发生CH事件,但生育期降水量仅为202.45 mm,产草量则降至9769 kg·hm⁻²,低于多年平均值。值得注意的是,2040s是减产最为显著的情景。这可能是因为朔州西部地区作为饲用燕麦最适宜生长区^[29],在2040s期间CH发生频率较低,但发生CH的年份温度较高,且降水量增幅不及2070s,导致饲用燕麦受高温影响更为显著,产草量下降明显。

CH对作物物候期长度具有一定影响。本研究通过分析不同站点和时期的CH对物候期天数的影响,得出以下结论:发生CH年份的饲用燕麦物候期与各时期平均值相比,EJF和EFF均呈现延长趋势。这一现象主要归因于高温和干旱胁迫会延缓作物的发育进程^[50-51]。然而,各站点在发生CH年份的物候期变化表现出明显的空间异质性。以2040s为例,右玉站点发生CH年份的EJF较多年平均值略有缩短,而怀仁站点则呈现延长趋势。这种差异主要源于站点间的温度差异^[52]:在2040s饲用燕麦生育期内,右玉和怀仁的平均温度分别为19.05℃和22.75℃,存在显著差异。具体而言,右玉站点在发生CH年份(如2061年)的CHF和CHD较低(分别为1次和3天),主要起到了促进有效积温积累的作用;而怀仁站点在相同年份(2061年)不仅基础温度较高,且CHF和CHD也显著偏高(分别为5次和24天),导致日最高温度超过35℃的持续时间延长,加之水分胁迫,最终延缓了饲用燕麦的物候进程。

3.4 新品种筛选及对未来气候及CH的响应

情景模拟与尺度函数分析结果表明,TTEJ的变化对饲用燕麦的产草量的影响最大,而TTFI的变化对饲用燕麦的产草量的影响次之,但TTF的改

变对饲用燕麦产草量几乎无影响。主要原因在于形成地上生物量的关键期,即分蘖期、拔节期、抽穗期^[53]均为EJF阶段,先前的研究也表明参数TTEJ对饲用燕麦的产草量的影响较大^[28]。

本研究通过调整饲用燕麦产草量的关键参数TTEJ和TTFI,构建了25个虚拟品种,并对其进行定量定点分析,以筛选各站点中最适应未来气候情景及CH事件的品种。情景模拟结果显示,与基准品种相比,选择适宜的新品种在未来气候及CH条件下大多可实现增产。这一增产效应主要归因于针对各站点生产条件对EJF和EFF进行的优化调整,使饲用燕麦各生育期的积温需求和水分利用与未来气候变化导致的气温变化和降水分配模式相匹配^[54]。然而,右玉和平鲁两个站点的结果显示,适应未来多年平均气候的新品种在发生CH年份可能出现减产。这是因为在干旱地区,单纯调整物候期难以完全抵消气候变化带来的不利影响^[21]。因此,对于这些地区,选择具有较小叶面积或更高根系水分利用效率的品种,可能更有利于增强作物对高温和干旱的耐受能力^[55]。进一步分析表明,研究区域可划分为两种类型:怀仁、山阴和应县三个站点的未来平均气温较高(22.50℃±2.13℃)^[29],且CH发生频率较高,但产草量受CH影响较小,因此适应未来平均气候和CH的品种表现较为一致;而朔州、平鲁和右玉三个站点的未来平均气温相对较低(20.29℃±2.15℃),CH发生频率较低,但产草量受CH影响较大,因此更适宜选择专门适应CH的品种。

3.5 预测结果的不确定性

由于环境对作物生长发育影响极为复杂,本研究的结果尚存一定的不确定性。首先,APSIM模型框架未能充分考虑病虫害以及杂草对作物的影响^[43],同时也缺乏对作物受高温影响而可能产生的生理过程的描述,例如高温可能造成植株叶片气孔关闭的现象等^[56],这可能造成一定的预测结果误差,对于持续升温条件造成的负面影响有所低估。其次,本研究的未来气候数据源于气候模型预测,虽然多模型均值的方法可降低模拟结果的不确定性,但仍存在一定的预测偏差,后期研究将基于新版第六次国际耦合模式比较计划(Coupled model intercomparison project phase 6,CMIP6)进行情景数据的预测模拟^[57],其以共享社会经济路径(Shared

socioeconomic pathways, SSPs)为框架基础,整合了排放轨迹与土地利用变化的量化描述,可更全面评估饲草生产系统与气候变化的相互影响,提供用于量化适应性响应的预测数据。

4 结论

模型验证结果表明,基于2023年田间试验的模型验证显示饲用燕麦地上生物量的NRMSE为9.19%,0~120 cm土壤水分的NRMSE为25.69%,总体模拟效果较好。情景模拟结果表明,未来情景的CHF,CHD,CHI均有所提高,且2070s中各指标总体高于2040s;在区域上,CHF,CHD,CHI由东向西逐渐减少;发生CH的年份相比多年平均产草量低2046.2 kg·hm⁻²,且饲用燕麦的出苗至初花期、初花至盛花期时间略有延长;若结合站点气候,择优选取最适品种可使产草量提高1.25%~20.70%。

参考文献

- [1] 周波涛,钱进. IPCC AR6报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718
ZHOU B T, QIAN J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718
- [2] 巢清尘,李柔珂,崔童,等. 中国气候变化科学认识进展及未来展望——中国《第四次气候变化国家评估报告 第一部分》解读[J]. 中国人口资源与环境, 2023, 33(1): 74-79
CHAO Q C, LI R K, CUI T, et al. Scientific progress and future prospects in climate change: an interpretation of Part 1 of China's Fourth National Assessment Report on Climate Change[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(1): 74-79
- [3] ABDO A I, ABDELGHANY A E, WEI H, et al. Perspective of agricultural water safety under combined future changes in crop water requirements and climate conditions in China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2022, 148(3): 1629-1645
- [4] MYHRE G, ALTERSKJÆR K, STJERN C W, et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 16063
- [5] ZENG J N, LI H X, SUN B, et al. Summertime compound heat wave and drought events in China: interregional and sub-seasonal characteristics, and the associated driving factors[J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(7): 074046
- [6] 卫仁娟,潘妮,钟馨,等. 四川省极端高温干旱复合事件变化特征研究[J]. 水文, 2024, 44(6): 60-67, 75
WEI R J, PAN N, ZHONG X, et al. Study on the variation characteristics of extreme high temperature and drought compound events of Sichuan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2024, 44(6): 60-67, 75
- [7] 李瑞英,吕桂恒,郝晓雷,等. 鲁西南区域性高温干旱复合事件特征及危险性分析[J]. 中国农业气象, 2024, 45(6): 657-668
LI R Y, LV G H, HAO X L, et al. Characteristics and dangerous analysis on regional compound high temperature and drought events in southwest of Shandong Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2024, 45(6): 657-668
- [8] 钱潭锐,逯家彤,栗晓玲,等. 基于复合事件指数的西北地区高温干旱复合事件风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 82-89
QIAN T R, LU J T, SU X L, et al. Risk assessment of compound dry-hot events in northwest China based on compound event indexes[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2024, 35(1): 82-89
- [9] 解建强,宁松瑞,杜佩德,等. 朔州市干旱特征及其对农作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(26): 117-123
XIE J Q, NING S R, DU P D, et al. Analysis of drought characteristics and effect on crop yield in Shuozhou City[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(26): 117-123
- [10] 朱彩芬,胡桃花. 1957—2017年朔州气温变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2019, 35(23): 103-109
ZHU C F, HU T H. Temperature change characteristics in Shuozhou from 1957 to 2017[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(23): 103-109
- [11] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, VAN DEN HURK B J J M, et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 469-477
- [12] 江珊,吴龙英,赵宝生,等. 植物耐受高温胁迫的分子机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(9): 132-138
JIANG S, WU L Y, ZHAO B S, et al. Molecular mechanism of heat stress tolerance in plants: a review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(9): 132-138
- [13] 任洪雷,朱筱,张丰屹,等. 干旱胁迫的影响及抗旱性研究进展[EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240119.1548.002>, 2024-01-22/2025-04-14
REN H L, ZHU X, ZHANG F Y, et al. Effect of drought stress and research progress of drought resistance[EB/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240119.1548.002>, 2024-01-22/2025-04-14
- [14] 赵鸿,王润元,尚艳,等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 1-12
ZHAO H, WANG R Y, SHANG Y, et al. Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high temperature and drought stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 1-12
- [15] 侯燕红,生小燕,韩博,等. 干旱和高温胁迫下紫花苜蓿PEPC酶活性变化及其基因序列分析[J]. 草地学报, 2023, 31(2): 330-336
HOU Y H, SHENG X Y, HAN B, et al. Analysis of enzyme activity changes of alfalfa PEPC under drought and high temperature stresses and gene sequences[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(2): 330-336

- [16] 宋娅丽, 王克勤, 王莎, 等. 3种冷季型草坪草对持续干旱、高温及其互作的生理生态响应[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 705-717
SONG Y L, WANG K Q, WANG S, et al. Physiological responses of three kinds of cool season turfgrasses under continuous drought stress, heat stress and their interaction [J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 705-717
- [17] 闫庆忠. 燕麦草的饲用价值及加工方式[J]. 特种经济动植物, 2022, 25(12): 138-140
YAN Q Z. Feeding value and processing mode of oat grass[J]. Special Economic Animals and Plants, 2022, 25(12): 138-140
- [18] 周青平, 胡晓炜, 汪辉, 等. 燕麦在维护国家粮食安全中的重要作用[J]. 草业学报, 2024, 33(10): 171-182
ZHOU Q P, HU X W, WANG H, et al. The important role of oat in reinforcing the foundation of food security [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(10): 171-182
- [19] 刘雨佳, 张艺琼, 方一如, 等. 高温干旱复合胁迫对夏玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 气象与减灾研究, 2024, 47(1): 42-49
LIU Y J, ZHANG Y Q, FANG Y R, et al. Effects of combined high temperature and drought stress on the growth and yield formation of summer maize[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2024, 47(1): 42-49
- [20] 胡阳阳, 卢红芳, 刘卫星, 等. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 591-600
HU Y Y, LU H F, LIU W X, et al. Effects of high temperature and water deficiency during grain filling on activities of key starch synthesis enzymes and starch accumulation in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(4): 591-600
- [21] WANG B, FENG P Y, CHEN C, et al. Designing wheat ideotypes to cope with future changing climate in South-Eastern Australia[J]. Agricultural Systems, 2019, 170: 9-18
- [22] YAN H L, HARRISON M T, LIU K, et al. Crop traits enabling yield gains under more frequent extreme climatic events [J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152170
- [23] 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): 20-29
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): 20-29
- [24] 徐杨. 气象干旱与极端高温对中亚棉花产量的影响——以乌兹别克斯坦为例[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022: 5-20
XU Y. The Impact of Meteorological Drought and Extreme High Temperatures on Cotton Production in Central Asia: A Case Study of Uzbekistan[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022: 5-20
- [25] LI S Y, WANG B, LIU D L, et al. Can agronomic options alleviate the risk of compound drought-heat events during the wheat flowering period in southeastern Australia[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 153: 127030
- [26] TEFERA A T, O'LEARY G J, RAO S, et al. Identification of agro-phenological traits of lentil that optimise temperature and water limited flowering time and seed yield[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 155: 127138
- [27] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 等. 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, et al. 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
- [28] 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): 3114-3122
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): 3114-3122
- [29] 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): 2599-2613
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): 2599-2613
- [30] 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
- [31] WANG J, WANG E L, YIN H, et al. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields[J]. Field Crops Research, 2015, 176: 1-10
- [32] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(4): 485-498
- [33] 沈禹颖, 南志标, BILL BELLOTTI, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1027-1032
SHEN Y Y, NAN Z B, BELLOTTI B, et al. Development of APSIM (agricultural production systems simulator) and its application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1027-1032
- [34] 阮红燕. 气候变化对广西甘蔗生产潜力影响的模拟研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018: 15-25
RUAN H Y. Simulation Study on the Impact of Climate Change on Sugarcane Production Potential in Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 15-25
- [35] CICHOTA R, VOGELER I, SHARP J, et al. A protocol to build soil descriptions for APSIM simulations[J]. MethodsX, 2021, 8: 101566
- [36] GAYDON D S, WANG E, POULTON P L, et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia[J]. Field Crops Research, 2017, 204: 52-75
- [37] ZHANG Y X, WALKER J P, PAUWELS V R N. Assimila-

- tion of wheat and soil states for improved yield prediction: the APSIM-EnKF framework [J]. *Agricultural Systems*, 2022, 201:103456
- [38] CIAIS P, REICHSTEIN M, VIOVY N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. *Nature*, 2005, 437(7058):529-533
- [39] WANG B, LIU D L, ASSENG S, et al. Modelling wheat yield change under CO₂ increase, heat and water stress in relation to plant available water capacity in eastern Australia[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90: 152-161
- [40] 景芳, 刘彦明, 南铭, 等. 12个燕麦品种在黄土高原沟壑区生产性能及适应性[J]. *草业科学*, 2024, 41(5): 1175-1188
JING F, LIU Y M, NAN M, et al. Production performance and adaptability of 12 oat varieties in the Gully Region of Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2024, 41(5): 1175-1188
- [41] 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): 230-237, 265
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): 230-237, 265
- [42] 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
- [43] 刘霞霞, 李扬, 王靖, 等. 基于 APSIM 模型的内蒙古四大生态区不同降水年型下主要作物适应性评价[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(10):1917-1937
LIU X X, LI Y, WANG J, et al. Adaptability evaluation of staple crops under different precipitation year types in four ecological regions of Inner Mongolia based on APSIM[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 1917-1937
- [44] ZHANG Y, HAO Z C, FENG S F, et al. Changes and driving factors of compound agricultural droughts and hot events in Eastern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 263: 107485
- [45] 张彬, 郑新军, 王玉刚, 等. 1990—2022年天山北坡地区不同开垦年限耕层土壤盐分变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(9): 1435-1445
ZHANG B, ZHENG X J, WANG Y G, et al. Changes in the salt content of the plow layer soil during cultivation from 1990 to 2022 on the northern slope of the Tianshan Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(9): 1435-1445
- [46] MASSMAN J W. A non-equilibrium model for soil heating and moisture transport during extreme surface heating[J]. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2015, 8(3): 2555-2603
- [47] RODRIGUEZ D, SADRAS V O. The limit to wheat water-use efficiency in eastern Australia. I. Gradients in the radiation environment and atmospheric demand[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(4): 287
- [48] 张更喜, 王慧敏, 栗晓玲, 等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 339-346
ZHANG G X, WANG H M, SU X L, et al. Assessing the vegetation vulnerability of Loess Plateau under compound dry and hot climates [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(6): 339-346
- [49] 侯琼, 魏学占, 宋学峰. 不同水分因子对内蒙古典型草原牧草产量的影响[J]. *草业科学*, 2009, 26(2): 5-10
HOU Q, WEI X Z, SONG X F. Influence of different moisture factors on forage yield of Inner Mongolian typical steppe [J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 5-10
- [50] 刘琰琰, 史学家, 杜宏娟, 等. 西北酿酒葡萄物候模型优选及气候变化对物候期的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 138-147
LIU Y Y, SHI X J, DU H J, et al. Optimal selection of the phenological models for wine grapevine and the impact of climate change on phenology in northwest China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(12): 138-147
- [51] 晔蕾罕, 希吉日塔娜, 常虹, 等. 草地生态系统土壤与植被对极端干旱的响应研究进展[J]. *畜牧与饲料科学*, 2024, 45(2): 58-72
YE R H, XI J, CHANG H, et al. Research progress on the response of soil and vegetation to extreme drought in grassland ecosystems [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2024, 45(2): 58-72
- [52] 丁生喜, 丁亚男, 张千卉. 青海省青稞产业化发展水平评价[J]. *青海科技*, 2023, 30(3): 6-12
DING S X, DING Y N, ZHANG Q H. Evaluation on the development level of highland barley industrialization in Qinghai Province [J]. *Qinghai Science and Technology*, 2023, 30(3): 6-12
- [53] 刘逸均. 晋北地区饲草型燕麦适应性评价及复种研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022:10-20
LIU Y J. Adaptability Evaluation and Multi-cropping Research of Forage Oat in Northern Shanxi Region [D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022:10-20
- [54] 齐安银, 曾庆晨, 李颜秘, 等. 饲用燕麦栽培技术研究进展[J]. *成都大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3):250-256, 294
QIA Y, ZENG Q C, LI Y M, et al. Research progress on cultivation of forage oats (*Avena sativa*) [J]. *Journal of Chengdu University (Natural Science Edition)*, 2022, 41(3): 250-256, 294
- [55] MÄKINEN H, KASEVA J, TRNKA M, et al. Sensitivity of European wheat to extreme weather [J]. *Field Crops Research*, 2018, 222: 209-217
- [56] BAI H Z, XIAO D P, TANG J Z, et al. Evaluation of wheat yield in North China Plain under extreme climate by coupling crop model with machine learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 217: 108651
- [57] ZHANG Y, YE Z, CHEN F F, et al. Challenges in improving Arctic freshwater simulations: An evaluation of CMIP6 models in the Beaufort Gyre region [J]. *Ocean Modelling*, 2025, 197: 102565