

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.31082

气候变化与轮作制度对晋北饲用燕麦产草量的影响

成华强 侯青青 朱敏 杨轩*

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: 本研究旨在探究适合晋北地区饲用燕麦(*Avena sativa* L.)轮作制度及各区域饲用燕麦产量对气候变化和轮作制度的响应。为此, 基于已验证的 APSIM (Agricultural Production System sIMulator) 设定 3 种轮作制度, 即 O-O (饲用燕麦连作)、P-O (马铃薯-饲用燕麦轮作)、M-O (玉米-饲用燕麦轮作), 结合气候模型对晋北 18 个站点进行模拟研究。结果表明: APSIM 可有效模拟晋北地区玉米, 马铃薯和饲用燕麦的生产, 归一化均方根误差 NRMSE 小于 21%, 一致性系数 d 大于 0.90; 平鲁、神池、左云饲用燕麦产草量高(16,020~20,817 kg hm⁻²); 对比 MID 与 BAS 时期, 各站点 O-O、M-O、P-O 饲用燕麦产草量增加 5.49%~23.20%; 对比 END 和 MID 时期, 代县、大同等 10 站点 O-O、M-O 和 P-O 的饲用燕麦产草量提高 0.27%~9.15%, 繁峙仅 O-O 产草量显著下降 22.76%; P-O 系统有更多的季后土壤水分留存, 多数情况下实行该系统更利于饲用燕麦高稳产; 土壤储水能力较差但植物可利用水分较高的阳高点, 易因预测情景的降雨量提高弥补燕麦生长旺盛期被利用的水分, 利于耗水较多的 O-O。综上, 本研究结果有助于挖掘晋北区域饲用燕麦生产对区域气候变化的响应机制, 并为饲用燕麦高产、稳产的科学管理提供理论基础。

关键词: 饲用燕麦; 轮作; 晋北农牧交错带; 气候变化; APSIM

Effects of climate change and crop rotation system on forage oats yield in northern Shanxi province

CHENG Hua-Qiang, HOU Qing-Qing, ZHU Min, and YANG Xuan*

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

Abstract: To investigate the suitability of crop rotation systems involving forage oats (*Avena sativa* L.) and their response to climate change in northern Shanxi province, this study utilized the validated APSIM (Agricultural Production System sIMulator) climate model. Three planting patterns were employed: O-O (continuous cropping of forage oats), P-O (rotation of potato and forage oats), and M-O (rotation of maize and forage oats). Scenario simulations were conducted at eighteen sites. The results demonstrated the effective simulation of maize, potato, and forage oats production in northern Shanxi Province using APSIM. The normalized root mean square error (NRMSE) values were below 21%, while the Willmott agreement index (d) values exceeded 0.90. The highest forage oats yield was observed in Pinglu, Shenchì, and Zuoyun, ranging from 16,020 to 20,817 kg hm⁻². The forage yield of O-O, M-O, and P-O systems in the mid-period (MID) exhibited an increase of 5.49% to 23.20% compared to the base period (BAS). In the end period (END), the forage oats yield in Daixian, Datong, and 10 other locations improved by 0.27% to 9.15% compared to the MID period, while it decreased by 1.84% to 4.10% in Zuoyun, Shuozhou, Youyu, and Shenchì. Notably, the forage yield of O-O in Fanshi was 22.76% lower in the END period compared to the MID period. The P-O system exhibited superior soil water retention compared to other systems after the growing seasons, making it more effective in achieving high and

本研究由国家自然科学基金青年科学基金项目(32001404)和山西农业大学科技创新基金项目(2020BQ26)资助。

This study was supported by the Youth Science Foundation of National Natural Science Foundation of China (32001404) and the Science and Technology Innovation Fund of Shanxi Agricultural University (2020BQ26).

* 通信作者(Corresponding author): 杨轩, E-mail: yangxuan2019@sxau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: 13033466023@163.com

Received(收稿日期): 2023-12-22; Accepted(接受日期): 2024-06-20; Published online (网络出版日期): 2024-07-09.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240707.1825.002>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

stable forage oats production in most cases. For the Yanggao site, which had poor soil water storage capacity but high plant available water, the projected high precipitation conditions would compensate for the relatively high-water consumption in the O-O system. Overall, the findings of this study contribute to understanding the response mechanism of forage oats production to regional climate change in northern Shanxi Province and provide a theoretical basis for the scientific management of high and stable forage oats production.

Keywords: forage oats; crop rotation; Agro-Pastoral Ecotone of northern Shanxi; climate change; APSIM

饲用燕麦(*Avena sativa* L.)是我国仅次于青贮玉米和苜蓿的第三大饲草作物^[1],其特点是粗蛋白含量高、消化率较高、相对饲用价值较高、碳水化合物含量丰富^[2],并含有大量的微量元素、矿物质、维生素等营养成分^[3]。晋北地区是我国北方农牧交错带的重要部分,出于畜牧业的需求和农业结构调整的需求,饲用燕麦作为主要饲草作物被广泛种植。

近几十年来,我国北方农牧交错带以温度升高和降水减少为主^[4],且未来往暖湿化方向发展^[5],而温度升高往往会引发极端天气,前人研究推断当气候暖化 1℃,极端天气事件的概率就会增加一倍^[6],极大限制饲用燕麦的产草^[7]。同时,不同区域的土壤与气候条件所产生的差异对作物生产力有很大影响。有研究表明,陕西省关中盆地的玉米和小麦生产潜力最大,陕北高原次之,秦巴山区最小^[8]。安徽省稻茬麦产量变幅为 3048.60~5685.60 kg hm⁻²,总体产量从北往南产量逐渐递减^[9]。内蒙古不同生态区玉米整体产量表现为喀喇沁旗最大,五原县次之,土默特右旗最小^[10]。晋北地区纬度与海拔跨度大,地区条件差异显著,受气候变化的影响也不一;而目前在晋北饲用燕麦的区域适应性研究较少,缺乏精准种植饲用燕麦的理论依据与应用实例。

草田轮作是晋北应用较广泛的轮作制度,有助于合理利用土地资源并改善土壤肥力,对当地实现农牧业可持续生产具有重要意义^[11]。前人研究结果表明草田轮作对农田系统的诸多效益,并对作物产量也存在显著效应。白春利等^[12]研究发现草田轮作模式可以增加牧草产量,提高单位面积土地经济效益。柴继宽^[13]研究发现燕麦-豌豆-胡麻轮作对比燕麦连作显著提高了产草量。为评估晋北各地区实行基于饲用燕麦生产的草田轮作的具体效应,可采用结合作物模型的研究方法以提供长期数据以支持风险性评估和可持续管理^[14]。其中,于世界范围内得到广泛验证与应用的农业生产系统模型(agricultural production system sIMulator, APSIM)^[15],已于饲用燕麦生产评估方面开展了研究与应用,如 Ojeda 等^[16]基于 APSIM 研究一年生牧草系统燕麦-玉米双作物对比苜蓿连作的产草量,结果表明燕麦-玉米双

作物有利于产草量增加;Pembleton 等^[17]模拟燕麦饲草生产对温度、CO₂和降水的响应,结果表明在所有情境下燕麦产草量增加 6.1%~35.9%。前人研究证明 APSIM 对模拟气候变化影响农作物生长发育、产量及农田水分平衡等方面有较好效果^[18],便于探究晋北饲用燕麦生产的区域适应性,及其对轮作制度、气候变化的响应。

研究团队在之前的工作中发现,APSIM 模拟晋北地区饲用燕麦、马铃薯、玉米生产的模拟精度均较高,2020—2021 年 3 种作物产量的实测值与模拟值之间的 NRMSE 为 3.74%~15.84%^[19]。因此,本研究拟基于已在晋北验证和应用的 APSIM 模型定量分析饲用燕麦在晋北各区域的适应性,探究适合晋北地区饲用燕麦的轮作制度以及研究各区域饲用燕麦产量对气候变化和种植方式的响应,为晋北饲用燕麦的高产、稳产提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

晋北地区位于黄土高原东北边缘,区域内平均海拔高度 900~1800 m,属于温带半干旱气候,年日照时数 2400~2960 h,年平均气温 4.2~9.8℃之间,年平均降水量 360~460 mm,主要集中在夏秋季的 6 月至 9 月,占全年降水量的 70%~80%。晋北大部分地区为雨养农业,主要饲草作物为饲用燕麦,研究区域包括大同各站点(大同、广灵、浑源、灵丘、天镇、阳高和左云),朔州站点(怀仁、平鲁、山阴、朔州、应县和右玉)以及忻州部分站点(代县、繁峙、河曲、偏关和神池)。

1.2 APSIM 模型参数

APSIM 是由澳大利亚联邦科工组织以及昆士兰州政府的农业生产系统组(APSRU)开发的模拟农业生产过程的机理模型^[19]。本研究基于 APSIM 7.10 版进行,主要包括作物模块、气象模块、土壤模块与管理模块,通过连接中央引擎的关键模块取模拟各种植物、动物、土壤、气候和管理交互系统^[20]。

所需输入的土壤参数(表 1)及饲用燕麦品种参数(表 2)由 2020—2021 年于右玉进行的田间试验所

测定^[21-24]。播种期为 5 月上旬, 8 月下旬至 9 月上旬收获, 播种量为 180 kg hm⁻², 行距为 25 cm。试验期间每年于播种期灌溉 50 mm, 以抽穗期及乳熟期测定的地上生物量实测数据用于对 APSIM 进行参数校准与验证。先前的研究结果表明 APSIM 模拟该地区雨养条件下饲用燕麦生产的能力较强, 对地上生物量(产草量)受环境影响而变化的模拟效果较好^[19]。

为进一步验证模型的精准性, 本研究基于 2022 年的田间试验数据, 采用标准均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和威尔莫特一致性指数(Willmott agreement index, *d*)判断模型对作物产量以及地上生物量的适用性。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

小。*d* 值可则量化模型估计模拟值上升或下降趋势的准确性。

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

(1)

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

(2)

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

(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。

表 1 研究区土壤基本参数^[22]
Table 1 Basic soil parameters in the study area^[22]

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 2 饲用燕麦、玉米、马铃薯的基本参数^[22]
Table 2 Basic parameters of maize, potato, and forage oats modules^[22]

作物 Crop	参数 Parameter	描述 Description	值 Value
饲用燕麦 (黑攻克) Forage oats (Haymaker)	tt_end_of_juvenile	生长期结束至初花期积温 Thermal time from end of juvenile to floral initiation (°C d)	210
	tt_floral_initiation	初花期至盛花期积温 Thermal time from floral initiation to flowering (°C d)	290
	tt_flowering	盛花期至灌浆期积温 Thermal time from flowering to 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
	y_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
	y_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
玉米 (利合 228) Maize (Lihe 228)	tt_emerg_to_endjuv	出苗至生长期结束积温 Thermal time from emergency to end of juvenile (°C d)	200
	tt_flower_to_start_grain	盛花期至灌浆期积温 Thermal time from flowering to grain filling (°C d)	170
	tt_flower_to_maturity	盛花期至成熟期积温 Thermal time from flowering to maturity (°C d)	570
	leaf_init_rate	花期前叶片分化积温 Degree days to initiate each leaf primordium until floral init (deg day) (°C d)	27

(续表 2)

作物 Crop	参数 Parameter	描述 Description	值 Value
玉米 (利合 228) Maize (Lihe 228)	y_height	最大株高 Maximal plant heigh (mm)	3000
	rue	辐射利用效率 Radiation use efficiency (g MJ ⁻¹)	1.85
	photoperiod_crit1	光周期临界值 1 Photoperiod critical value 1 (h)	12.5
	photoperiod_crit2	光周期临界值 2 Photoperiod critical value 2 (h)	20.0
	photoperiod_slope	光周期斜率 Photoperiodslope	0.1
	potKernelWt	潜在千粒重 Potential thousand seed weight	260
马铃薯 (希森 6) Potato (Xisen 6)	y_tt_emergence	出苗期至营养生长期积温 Thermal time from end of juvenile to floral initiation (°C d)	460
	tt_earlytuber	块茎形成期至块茎膨大期积温 Thermal time from floral initiation to flowering (°C d)	510
	tt_senescing	块茎膨大期与淀粉积累期积温 Thermal time from senescing to maturity (°C d)	850
	x_pp_emergence	苗期光周期 Photoperiod of seedling stage (h)	12
	y_height	最大株高 Photoperiod sensitivity (mm)	500
	y_rue	辐射利用效率 Radiation use efficiency (g MJ ⁻¹)	1.2–2.5
	x_stem_wt	茎干重 Stem weight per plant (g plant ⁻¹)	6.0
	tt_vegetative	营养生长期结束积温 Thermal time for vegetative stage(°C d)	20
	tt_senesced	茎叶完全衰老积温 Thermal time for senesced (°C d)	5.0
	shoot_rate	随胚芽鞘长度增加的积温量 Thermal time increase with depth for coleoptile (°C d mm ⁻¹)	0.75

1.3 情景模拟

为探究不同轮作制度的饲用燕麦在18个试点(表 3)的产量差异, 评估未来气候情景下晋北农牧交错带更适宜的生产模式, 本研究基于全球气候模式(GCM)生成的气候情景模拟 3 种生产模式, 即: 玉米-饲用燕麦模式(M-O)、马铃薯-饲用燕麦模式(P-O)、饲用燕麦连作模式(O-O), 轮作模式为二年二熟, 例如 M-O, 第一年种植玉米, 第二年轮作饲用燕麦。为保证每年都有饲用燕麦收获, 模拟结果均衡可比, 本研究为 M-O 和 P-O 设定 2 种轮作序列, 即 M-O (第一年种植玉米)和 O-M (第一年种植燕麦), P-O (第一年种植马铃薯)和 O-P(第一年种植燕麦)。参考田间试验设置管理参数, 包括播期(根据当地调查和媒体报道获取, 模拟播种规则为播种窗口 5 d 内累计降水 10 mm 播种, 否则于窗口最后一天播种)、播种深度、密度和行距。除右玉(田间试验测得)外的 17 个站点的土壤数据来自中国土壤科学数据

库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>; 表 4 和表 5), 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, 各年初始条件不重置。

为考虑未来气候多变性, 以各点 1980—2009 年(BAS)的气候条件为基准情景, 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, 使用 Angstrom 方程以日照时数计算逐日辐射量^[25]。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^[22], 并基于 CMIP5 中 20 个全球气候模式(表 6), 以典型浓度通道 RCP8.5 (Representative Concentration Pathways)对 2040—2069 年(MID)和 2070—2099 年(END)区间进行预测。BAS、MID 和 END 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 mg kg⁻¹。

表 3 晋北地区 18 个站点的基础信息
Table 3 Basic information of 18 sites in northern Shanxi

站点 Site	所属市 City	经度 Longitude (°)	纬度 Latitude (°)	海拔高度 Altitude (m)	播种日期 Sowing date (month/day)
天镇 Tianzhen	大同 Datong	114.05	40.43	1014.7	04/28–05/18
广灵 Guangling	大同 Datong	114.27	39.75	977.8	04/26–05/16
灵丘 Lingqiu	大同 Datong	114.18	39.45	938.7	04/25–05/15
阳高 Yanggao	大同 Datong	113.77	40.37	1050.3	04/27–05/17
大同 Datong	大同 Datong	113.42	40.08	1052.6	04/27–05/17

(续表 3)

站点 Site	所属市 City	经度 Longitude (°)	纬度 Latitude (°)	海拔高度 Altitude (m)	播种日期 Sowing date (month/day)
怀仁 Huairen	朔州 Shuozhou	113.10	39.82	1044.6	04/22-05/12
浑源 Hunyuan	大同 Datong	113.67	39.72	1079.2	04/29-05/19
应县 Yingxian	朔州 Shuozhou	113.17	39.57	1000.7	04/24-05/14
繁峙 Fanshi	忻州 Xinzhou	113.27	39.17	933.9	04/24-05/14
右玉 Youyu	朔州 Shuozhou	112.45	40.00	1345.8	05/05-05/25
左云 Zuoyun	大同 Datong	112.70	40.00	1336.3	05/05-05/25
平鲁 Pinglu	朔州 Shuozhou	112.27	39.52	1409.4	05/03-05/23
神池 Shenchì	忻州 Xinzhou	112.20	39.10	1525.4	05/07-05/27
山阴 Shanyin	朔州 Shuozhou	112.82	39.50	1045.0	04/24-05/14
朔州 Shuozhou	朔州 Shuozhou	112.43	39.37	1114.8	04/25-05/15
代县 Daixian	忻州 Xinzhou	112.90	39.02	859.7	04/19-05/09
河曲 Hequ	忻州 Xinzhou	111.22	39.37	1036.0	04/18-05/08
偏关 Pianguan	忻州 Xinzhou	111.50	39.43	1051.7	04/24-05/14

表 4 土壤类型及参数

Table 4 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, 大同, 浑源) Light castanozems (Huairen, Datong, Hunyuan)	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, 神池, 代县) Light castano cinnamon (Yingxian, Shenchì, Daixian)	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(左云, 山阴) Light castanozems (Zuoyun, 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, 繁峙, 河曲) Castano cinnamon (Pinglu, Fanshi, Hequ)	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
5 二合栗黄土(朔州, 天镇, 广灵, 灵丘, 偏关) Castano cinnamon (Shuozhou, Tianzhen, Guan- gling, Lingqiu, Pianguan)	128-150	1.560	0.119	0.236	0.411
	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
6 浅钙积栗土(阳高) Light castanozems (Yanggao)	90-150	1.411	0.128	0.251	0.467
	0-20	1.410	0.047	0.173	0.467
	20-38	1.420	0.052	0.186	0.466
	38-120	1.420	0.067	0.203	0.465
	120-150	1.420	0.062	0.217	0.465

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
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
6 浅钙积栗土 Light castanozems	8.4	0.487	28.5	9.7	8.4

表 6 研究选取的 20 个全球气候模式

Table 6 20 selected global climate models (GCM) of this study

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

1.4 产量差计算

为定量评估各轮作制度和气候变化之间的产量差异。计算 M_{P-O} (马铃薯-饲用燕麦轮作与饲用燕麦连作, 饲用燕麦的产量之差)、 M_{M-O} (玉米-饲用燕麦轮作与饲用燕麦连作, 饲用燕麦的产量之差)与 M_{P-M} (马铃薯-饲用燕麦轮作与玉米-饲用燕麦轮作, 饲用燕麦的产量之差), $M_{END-BAS}$ (END 与 BAS 饲用燕麦的产量之差)、 $M_{END-MID}$ (END 与 MID 饲用燕麦的产量之差)与 $M_{MID-BAS}$ (MID 与 BAS 饲用燕麦的产量之差)。产量差值为正, 说明该点更适宜前一轮作制度或气候条件; 反之, 差值为负, 说明该点更适宜后一轮作制度或气候条件。

1.5 产量风险评估

产量稳定性采用变异系数^[26] (Coefficient of Variation, CV)进行对比分析, 该值越小表明稳定性越高。

$$CV = \sigma / M \tag{4}$$

式中, σ 和 M 分别表示产量的标准差和平均值。

计算产量可持续性 (Sustainable Yield Index,

SYI), SYI 的值越大可持续性越强, 产量风险越小。

$$SYI = (M - \sigma) / M_{\max} \tag{5}$$

式中, $M_{\max}$ 为试验年份中的最大值。

1.6 数据处理

本研究利用 Microsoft Excel 2019 对数据进行输入与整理, SPSS 26 进行差异显著性分析, 使用科研绘图软件 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型验证

验证结果表明(表 7), 玉米籽粒产量和地上生物量实测值与模拟值间的 RMSE 分别为 221.52 和 986.80 kg hm⁻², NRMSE 分别为 2.96%和 5.58%, d 值为 0.9976 和 0.9658; 马铃薯块茎产量和地上生物量实测值与模拟值的 RMSE 分别为 841.49 和 259.46 kg hm⁻², NRMSE 分别为 20.50%和 11.49%, d 值为 0.9517 和 0.9947; 饲用燕麦地上生物量实测值与模拟值的 RMSE 为 427.64 kg hm⁻², NRMSE 为 3.32%, d 值为 0.9854。

表 7 3 种作物产量、地上生物量实测值与模拟值之间的验证指标
Table 7 Indices of validation between measured and simulated yields, aboveground biomass of the three crops

作物 Crop	测定项目 Measured item	测试指标 Validation index		
		RMSE (kg hm ⁻²)	NRMSE (%)	<i>d</i>
玉米 Maize	籽粒产量 Grain yield	221.52	2.96	0.9976
	地上生物量 Biomass	986.80	5.58	0.9658
马铃薯 Potato	块茎产量 Tuber yield	841.49	20.50	0.9517
	地上生物量 Biomass	259.46	11.49	0.9947
饲用燕麦 Oats	地上生物量 Biomass	427.64	3.32	0.9854

2.2 各区域的气候变化情况

对晋北 18 站点饲用燕麦生育期(5 月至 9 月)的预测气候条件进行统计。由表 8 可知, MID 相比 BAS, 生育期降水平均提高 34.69 mm, 温度平均提高 2.88℃。应县的降水提高幅度最大, 为 11.27%, 大同最小, 为 9.11%, 神池均温提升幅度最大, 为 17.62%, 河曲最小, 为 14.17%。END 相比 MID, 生育期降水平均提高 6.32 mm, 温度平均提高 2.13℃。天镇降水提高幅度最大, 为 3.76%, 右玉最小, 为 0.33%, 右玉均温提高幅度最大, 为 11.32%, 河曲最小, 为 9.23%。

2.3 不同区域对饲用燕麦产量的影响

根据产量高低将 18 个站点分为 3 部分(表 9)。低产量区域: 河曲、怀仁、应县; 中产量区域: 代县、大同、繁峙、广灵、浑源、偏关、山阴、朔州、天镇、阳高; 高产量区域: 灵丘、平鲁、神池、右玉、左云。3 个等级区域的平均产量分别为 12,121~15,840 kg hm⁻²、14,006~17,786 kg hm⁻²和 15,880~19,771 kg hm⁻²。

2.4 各区域不同轮作制度对饲用燕麦产量的影响

阳高实行 O-O 相比 P-O 和 M-O 于 MID 增产 2.22%和 7.24%, 于 END 增产 5.66%和 9.12% (图 1)。

表 8 BAS、MID 与 END 期间生育期平均降水(mm)和平均温度(℃)
Table 8 Mean precipitation (mm) and mean temperature (℃) during the growth period of BAS, MID, and END

站点 Site	平均降水 Mean precipitation (mm)			平均温度 Mean temperature (℃)		
	BAS	MID	END	BAS	MID	END
代县 Daixian	351.73	383.78	391.31	19.91	22.75	24.85
大同 Datong	305.99	339.87	344.52	19.22	22.09	24.22
繁峙 Fanshi	334.77	367.96	377.17	19.71	22.57	24.69
广灵 Guangling	323.36	357.00	369.67	18.84	21.73	23.83
河曲 Hequ	316.88	348.50	351.75	20.37	23.25	25.40
怀仁 Huairen	298.99	332.14	337.14	19.88	22.75	24.87
浑源 Hunyuan	337.44	372.35	382.15	18.42	21.33	23.46
灵丘 Lingqiu	359.90	397.85	410.97	19.27	22.15	24.26
偏关 Pianguan	335.59	372.37	373.75	20.06	22.95	25.08
平鲁 Pinglu	338.55	375.50	377.67	17.32	20.18	22.32
山阴 Shanyin	297.87	330.64	332.96	19.39	22.25	24.39
神池 Shenchì	378.77	418.52	425.89	16.28	19.15	21.28
朔州 Shuozhou	336.90	371.21	374.61	18.76	21.65	23.80
天镇 Tianzhen	323.85	358.48	371.96	18.69	21.60	23.70
阳高 Yanggao	320.46	355.04	366.23	18.72	21.63	23.74
应县 Yingxian	299.33	333.06	336.48	19.65	22.50	24.63
右玉 Youyu	337.96	375.74	376.99	16.19	19.05	21.21
左云 Zuoyun	336.16	373.83	376.42	17.52	20.40	22.55

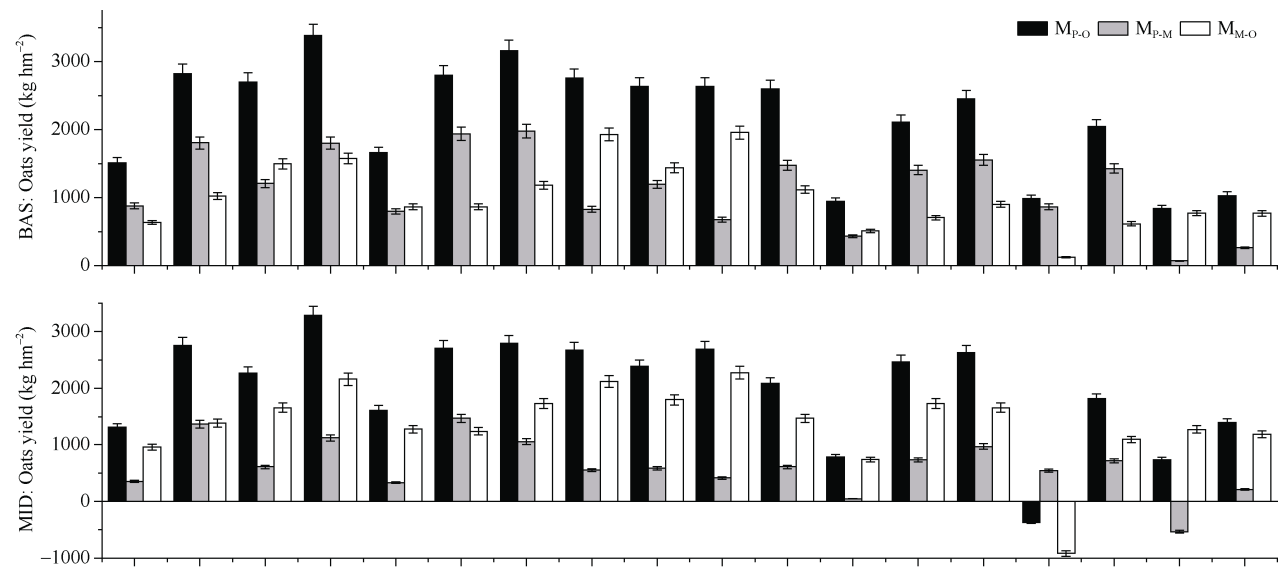
BAS、MID、END 分别代表 1980–2009 年, 2040–2069 年和 2070–2099 年。
BAS, MID and END represent 1980–2009, 2040–2069, and 2070–2099, respectively.

表 9 晋北地区各点饲用燕麦产量分布图
Table 9 Distribution map of forage oats yield for the selected sites of northern Shanxi province

站点 site	M-O: 饲用燕麦产量			P-O: 饲用燕麦产量			O-O: 饲用燕麦产量		
	M-O: Forage oats yield (kg hm ⁻²)			P-O: Forage oats yield (kg hm ⁻²)			O-O: Forage oats yield (kg hm ⁻²)		
	BAS	MID	END	BAS	MID	END	BAS	MID	END
代县 Daixian	14,107	15,269	15,331	14741	16,229	16,516	15,620	16,582	16,680
大同 Datong	12,927	14,249	14,419	13,946	15,633	16,185	15,749	17,003	17,245
繁峙 Fanshi	14,303	15,769	12,180	15,798	17,421	17,964	17,005	18,034	18,498
广灵 Guangling	13,411	14,837	14,876	14,988	16,997	17,567	16,790	18,117	18,504
河曲 Hequ	12,485	13,353	13,486	13,348	14,630	15,124	14,144	14,964	15,545
怀仁 Huairen	11,703	13,357	13,573	12,570	14,598	15,520	14,507	16,065	16,762
浑源 Hunyuan	14,574	15,986	15,855	15,754	17,720	17,692	17,732	18,774	18,702
灵丘 Lingqiou	15,070	16,387	16,551	16,999	18,505	18,770	17,828	19,059	19,254
偏关 Pianguan	13,518	15,175	16,563	14,958	16,969	17,048	16,153	17,557	17,649
平鲁 Pinglu	16,020	18,128	17,563	17,976	20,401	20,312	18,652	20,817	20,683
山阴 Shanyin	14,031	15,458	15,577	15,150	16,925	17,114	16,626	17,538	17,615
神池 Shenchì	16,733	19,482	18,842	17,243	20,225	19,632	17,677	20,273	19,728
朔州 Shuozhou	14,649	15,709	15,294	15,351	17,435	17,292	16,758	18,169	17,960
天镇 Tianzhen	13,689	14,912	15,175	14,587	16,565	17,282	16,143	17,537	17,961
阳高 Yanggao	14,851	17,118	18,287	14,975	16,201	16,759	15,840	16,746	17,053
应县 Yingxian	12,174	13,490	13,482	12,788	14,586	14,687	14,216	15,304	15,213
右玉 Youyu	14,909	18,045	16,935	15,680	19,318	18,691	15,750	18,785	18,060
左云 Zuoyun	17,004	18,527	18,166	17,773	19,709	19,326	18,036	19,921	19,456

O-O: 饲用燕麦连作; M-O: 玉米饲用燕麦轮作; P-O: 马铃薯饲用燕麦轮作; BAS、MID、END 分别代表 1980–2009 年, 2040–2069 年, 2070–2099 年。

O-O: continuous cropping of forage oats; M-O: maize-forage oats rotation; P-O: potato-forage oats rotation; BAS, MID, and END represent 1980–2009, 2040–2069, and 2070–2099, respectively.



(图 1)

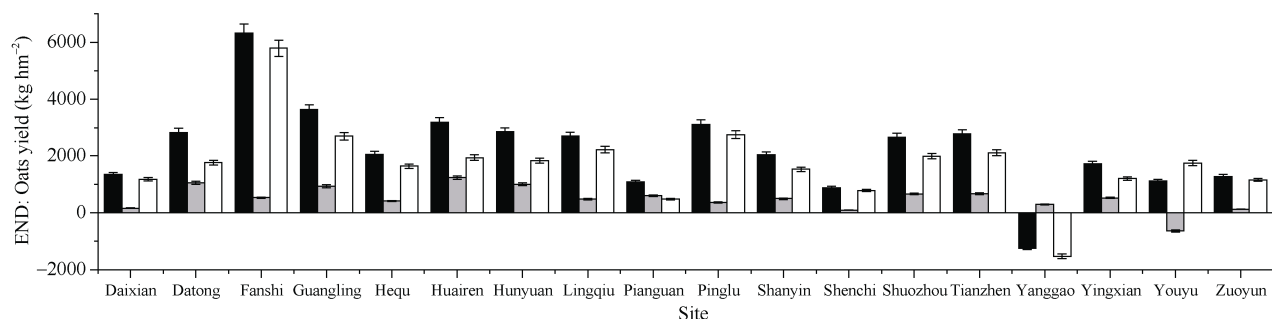


图 1 各站点不同轮作制度下饲用燕麦的产量差

Fig. 1 Yield gap of forage oats under different crop rotation system in selected sites

缩写同表 9。Abbreviations are the same as those given in Table 9.

右玉于 MID 和 END 时期实行 M-O 更有利, 相比 O-O 和 P-O, MID 时期增产 13.23% 和 2.83%, END 时期增产 19.78% 和 3.49%。END 时期繁峙实行 O-O 对比 P-O 和 M-O, 产草量分别降低 34.15% 和 32.2%。而其余站点各时期实行 O-O 时, 相比 P-O 和 M-O 减产 3.90%~20.13% 和 0.82%~16.51%。O-O 对比 P-O

时, 除代县、偏关、神池、左云、阳高外, 其余站点的产量显著降低 ($P < 0.05$); 而 O-O 对比 M-O 时, 仅繁峙、广灵、灵丘点有显著降低 ($P < 0.05$)。

2.5 不同气候对饲用燕麦产量的影响

各模式下饲用燕麦产量对预测气候变化的响应基本一致(图 2)。MID 相比 BAS, O-O、M-O 和 P-O

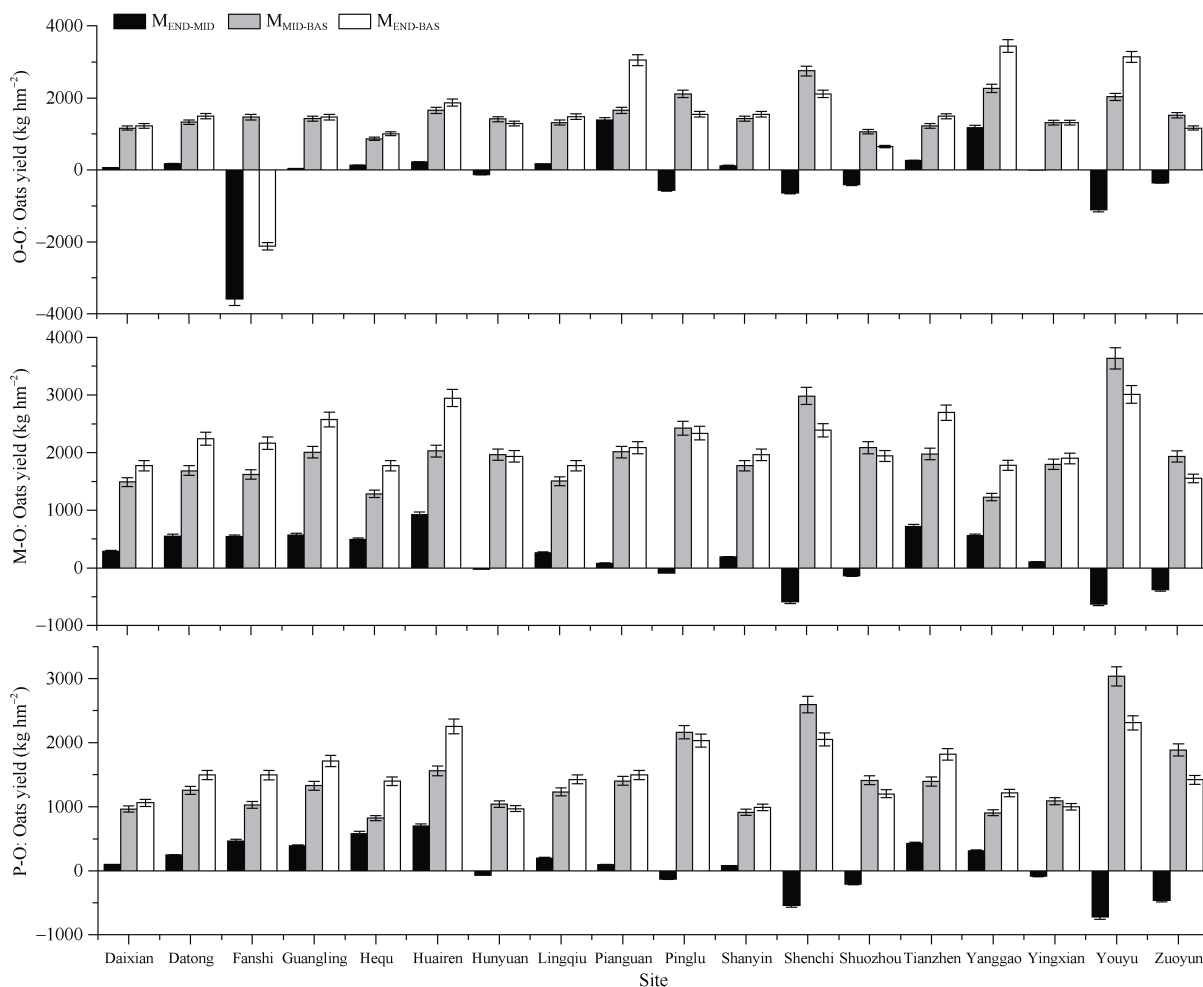


图 2 各站点不同气候条件下饲用燕麦的产量差

Fig. 2 Yield gap of forage oats under different climatic conditions in selected sites

缩写同表 9。Abbreviations are the same as those given in Table 9.

的产量分别提高 6.95%~17.10%、8.19%~23.20%和 5.49%~19.27%，其中阳高、右玉、左云、神池点的产量提升显著($P < 0.05$)。END 相比 BAS、O-O、M-O 和 P-O 的产量分别提高 4.41%~23.14%、8.74%~23.47%和 5.47%~15.55%，其中偏关、左云、神池、阳高增产显著($P < 0.05$)。

END 相比 MID，大同市(除左云、浑源)、朔州市(除平鲁、朔州、应县、右玉)、忻州(除繁峙、神池)各点产量也有一定提升：O-O、M-O 和 P-O 分别提高 0.27%~9.15%、0.41%~6.37%和 0.43%~4.34%。浑源、平鲁、应县产量相比 MID 几乎无差距，而左云、朔州、右玉、神池点的平均产量则略为降低，O-O、M-O 及 P-O 分别平均为 4.10%、2.24%和 1.84%。此情况下，繁峙点

O-O 的平均产量下降幅度最大，达 22.76% ($P < 0.05$)。

2.6 饲用燕麦产量的变异系数(CV)和可持续性指数(SYI)

饲用燕麦产量的 CV 趋势为代县、浑源、平鲁、山阴、神池、左云(0.14~0.16)<大同、繁峙、灵丘、朔州、应县(0.18~0.20)<广灵、河曲、怀仁、偏关、天镇、阳高、右玉(0.21~0.25) (表 10)。对不同轮作制度来说，CV 的总体趋势为 P-O (0.17)<M-O (0.19)<O-O (0.22)，按气候情景排列则为 END (0.18)<MID (0.19)<BAS (0.20)。但河曲、神池、左云于 BAS 和 MID(分别为 0.24、0.14、0.14)的基本一致并且比 END 时期更小；且应县和偏关 MID 时期的 CV 更小，分别为 0.22 和 0.17 (表 10)。

表 10 各站点不同轮作制度和气候变化下饲用燕麦产量的变异系数(CV)和可持续性指数(SYI)
Table 10 Coefficient of Variation (CV) and Sustainable Yield Index (SYI) of forage oats yield under different crop rotation system and climate change in selected sites

站点 County	时期 Period	M-O: 饲用燕麦产量 M-O: Forage oats yield		P-O: 饲用燕麦产量 P-O: Forage oats yield		O-O: 饲用燕麦产量 O-O: Forage oats yield	
		CV	SYI	CV	SYI	CV	SYI
代县 Daixian	BAS	0.16	0.62	0.15	0.67	0.19	0.57
	MID	0.15	0.68	0.15	0.68	0.17	0.66
	END	0.14	0.70	0.14	0.69	0.17	0.61
大同 Datong	BAS	0.24	0.52	0.18	0.63	0.25	0.48
	MID	0.21	0.61	0.17	0.68	0.22	0.59
	END	0.19	0.61	0.16	0.64	0.22	0.51
繁峙 Fanshi	BAS	0.20	0.59	0.17	0.65	0.21	0.60
	MID	0.19	0.64	0.17	0.67	0.19	0.59
	END	0.17	0.65	0.16	0.68	0.21	0.54
广灵 Guangling	BAS	0.23	0.55	0.21	0.62	0.23	0.56
	MID	0.22	0.59	0.20	0.65	0.24	0.55
	END	0.20	0.64	0.18	0.67	0.23	0.56
河曲 Hequ	BAS	0.23	0.55	0.25	0.55	0.24	0.51
	MID	0.21	0.57	0.26	0.50	0.26	0.48
	END	0.24	0.53	0.26	0.54	0.28	0.47
怀仁 Huai ren	BAS	0.25	0.46	0.21	0.53	0.26	0.42
	MID	0.22	0.50	0.19	0.55	0.23	0.49
	END	0.19	0.56	0.18	0.61	0.22	0.48
浑源 Hunyuan	BAS	0.19	0.60	0.14	0.66	0.20	0.55
	MID	0.15	0.68	0.15	0.70	0.17	0.63
	END	0.16	0.67	0.14	0.69	0.17	0.63
灵丘 Lingqiu	BAS	0.19	0.63	0.14	0.67	0.21	0.57
	MID	0.17	0.60	0.13	0.65	0.21	0.59
	END	0.16	0.65	0.12	0.70	0.25	0.53
偏关 Pianguan	BAS	0.24	0.51	0.21	0.57	0.24	0.48
	MID	0.22	0.53	0.20	0.57	0.24	0.48
	END	0.22	0.52	0.20	0.56	0.25	0.53

(续表 10)

站点 County	时期 Period	M-O: 饲用燕麦产量 M-O: Forage oats yield		P-O: 饲用燕麦产量 P-O: Forage oats yield		O-O: 饲用燕麦产量 O-O: Forage oats yield	
		CV	SYI	CV	SYI	CV	SYI
平鲁 Pinglu	BAS	0.15	0.68	0.11	0.73	0.19	0.62
	MID	0.14	0.71	0.12	0.73	0.20	0.63
	END	0.13	0.71	0.12	0.74	0.21	0.55
山阴 Shanyin	BAS	0.20	0.59	0.14	0.69	0.20	0.55
	MID	0.16	0.65	0.13	0.70	0.19	0.59
	END	0.14	0.71	0.12	0.69	0.18	0.60
神池 Shenchi	BAS	0.13	0.72	0.12	0.74	0.16	0.62
	MID	0.14	0.68	0.14	0.69	0.14	0.68
	END	0.15	0.69	0.15	0.69	0.17	0.63
朔州 Shuozhou	BAS	0.20	0.61	0.16	0.69	0.22	0.56
	MID	0.18	0.62	0.16	0.66	0.21	0.59
	END	0.18	0.65	0.14	0.70	0.22	0.55
天镇 Tianzhen	BAS	0.27	0.48	0.24	0.54	0.28	0.46
	MID	0.23	0.58	0.23	0.58	0.26	0.53
	END	0.21	0.54	0.21	0.56	0.27	0.49
阳高 Yanggao	BAS	0.25	0.52	0.22	0.58	0.22	0.54
	MID	0.24	0.58	0.20	0.62	0.21	0.55
	END	0.20	0.62	0.18	0.65	0.22	0.54
应县 Yingxian	BAS	0.22	0.54	0.17	0.65	0.23	0.51
	MID	0.18	0.64	0.16	0.67	0.21	0.57
	END	0.17	0.64	0.15	0.62	0.18	0.58
右玉 Youyu	BAS	0.23	0.52	0.20	0.59	0.26	0.55
	MID	0.18	0.63	0.20	0.61	0.24	0.57
	END	0.17	0.63	0.21	0.59	0.24	0.58
左云 Zuoyun	BAS	0.12	0.74	0.12	0.70	0.19	0.61
	MID	0.12	0.73	0.12	0.74	0.19	0.64
	END	0.12	0.67	0.12	0.67	0.20	0.61

缩写同表 9。Abbreviations are the same as those given in Table 9.

SYI 的趋势为大同、河曲、怀仁、偏关、天镇、阳高、右玉(0.51~0.59)<繁峙、广灵、灵丘、山阴、朔州、应县(0.60~0.64)<代县、浑源、平鲁、神池、左云(0.65~0.68) (表 10)。不同轮作制度下, SYI 的排列为 O-O (0.56)<M-O (0.61)<P-O (0.64); 但河曲、左云 M-O 的 SYI 更高, 分别为 0.55 和 0.71。MID 和 END 情景的平均 SYI 分别为 0.62 和 0.61, 略高于 BAS (0.59)。广灵、怀仁、灵丘、偏关、山阴、朔州、阳高于 END 时期的 SYI 相对较高, 为 0.54~0.67; 而河曲、神池则于 BAS 时期更高, 为 0.54~0.69 (表 10)。

3 讨论

3.1 产量指标的 APSIM 模拟验证

在模型校准的基础上, APSIM 模拟 2020、2021

年晋北地区饲用燕麦、玉米、马铃薯产量与地上生物量指标的 NRMSE 为 3.74%~15.84%, 在此基础上本研究利用 2022 年田间试验实测数据对 APSIM 模型模拟 3 种作物生产的适应性进行了进一步的验证。2022 年的结果表明模型模拟饲用燕麦、玉米相关指标的 NRMSE 均小于 6%, 模拟马铃薯净产量与地上生物量的 NRMSE 小于 21%。具有一定模拟差异的原因主要在于模型未能完全描述生产环境或处理所造成的指标, 但验证指标仍显示总体模拟效果较好^[26]。在验证的年份中, 2020 年的气候生产条件较为适宜, 而 2021 年较为干旱且 8 月至 9 月降水较低(133.0 mm), 而 2022 年气候条件极端, 同期降水又过高(305.8 mm), 对各作物生产造成了重要影响; 但在 3 年气候条件截然不同的年份中, 经校准

的 APSIM 模拟作物产量、生物量时均有较高的精准度,可知其能有效模拟晋北地区玉米、马铃薯和饲用燕麦的生产。前人研究也认为,该模型框架可以描述多种作物于不同气候条件下的生产状况,具有较高的可信度,适用于长期情景模拟研究^[5,27-29]。

3.2 晋北各站点的饲用燕麦产量

本研究定量分析了晋北各点饲用燕麦产量对预测情景的变化,并结合稳定性和可持续性指标明确了各点饲用燕麦生产的适宜性。研究结果显示土壤参数对晋北地区饲用燕麦产量的影响不显著,气候条件是影响其产量的主要因素,其中平鲁、神池、左云、灵丘、右玉五点为高产站点。而平鲁、神池、左云点不仅产量高,且稳定性和可持续性也最好,这可能是由于该三点温度相对较低且降雨相对较高,这种凉爽湿润的气候更适宜燕麦生长^[30],产草量也更高更稳定。灵丘点的气候为炎热潮湿,但高降水缓和了高温对燕麦生产的负面影响,使该点饲用燕麦产量较高,生产稳定性和可持续性也较好^[31]。右玉点虽然产量相对高,但是稳定性和可持续性均较差,原因可能为该点降水仅处中等水平,但总体气温与地温过低,对出苗与物质积累过程产生影响,从而存有较大年际差异^[32]。而中产站点燕麦产量的稳定性和可持续性也较差,这是由于地区的温度相对较高而降水中等(如偏关),或温度适中但降水较低(如山阴)引起的。另外结果也显示,低产量站点(河曲、怀仁、应县)的温度都相对较高,降水相对较低;朱彩芬等^[33]的研究分析朔州市燕麦种植的适宜情况,结果表明怀仁、应县温度高,日照时数短相对不适合种植燕麦,从而使得本研究中此类站点饲用燕麦产草量的稳定性和可持续性差。

3.3 轮作制度对饲用燕麦产量的影响

本研究的结果也表明,相比 O-O 连作系统,与玉米、马铃薯进行轮作可提高饲用燕麦产量,并提高生产稳定性和可持续性。有针对不同轮作制度对燕麦产量影响的研究表明,燕麦-豌豆-胡麻轮作对比燕麦连作显著提高了产草量^[13],且其他作物轮作可降低系统的潜在耗水量,从而提高季后土壤水分留存^[34]。正如本研究中,P-O 和 M-O 对比 O-O 饲用燕麦收获期土壤储水量分别高 9.53 mm 和 5.47 mm;且马铃薯生产结束后相比玉米和饲用燕麦收获期土壤储水量高 16.97 mm 和 48.30 mm,这也导致在晋北各站点更适合实行 P-O。另外,MID,END 时期的阳高点 O-O 对比 P-O 和 M-O 饲用燕麦分别增产

2.22%和 7.24%,5.66%和 9.12%,这可能是因为阳高点的可利用的土壤水分,即萎蔫系数与持水量的差值较大^[35](表 4)。因此预测情景由于降雨的增加,易对耗水较多的 O-O 系统的土壤水分亏缺有显著补偿^[36],致使产草量更高。

3.4 气候变化条件对饲用燕麦产量的影响

气候变化是影响饲用燕麦生产的主要因素之一。本研究选取了 20 个全球气候模式对晋北 18 个站点进行预测,分析未来气候的变化趋势,研究结果显示研究区未来气候总体呈现暖湿化趋势,且随时间的推移更加急剧化(表 7)^[5,37]。

在本研究中,MID 相比 BAS 各轮作制度的饲用燕麦产量均有一定提高,且增温增雨的条件对年景不佳的生长季有较大的积极作用^[31],也因此预测情景下产量的稳定性和可持续性也更好。另外,河曲、神池、左云点产量的 CV 于 BAS 和 MID 中相同。其中,河曲点的气温相对为最高,而年际降水量的变率较大,从而造成较大的年际产量差异;即使 CO₂ 浓度升高能够提高作物的光合速率,产生“肥料效应”^[38],但预测的高气温条件对植物的光合作用和生育期长度也有负面影响^[39],导致产量的年际差异仍较大。对于神池、左云来说,在 BAS 温度降水均相对适宜,MID 情景中温度与降水均有一定的增加但仍可为燕麦生长的适宜条件^[33],而 CO₂ 产生的“肥料效应”更明显,年均产量的差距较小。

对比 END 与 MID 时期,大部分站点的饲用燕麦产量有增加趋势,仅左云、朔州、右玉、神池 4 点饲用燕麦的平均产量有一定降低。主要原因是该 4 个点在 MID 时期的温度最适宜,而 END 时期温度的相对提升幅度较大(> 2℃)致使其生长季缩短,降水的提升幅度却很小(< 8 mm),导致产量有一定的降低趋势^[40]。结果还显示,END 的生产稳定性比 MID 略好,但可持续性稍差,原因在于 END 时期各点的气温进一步提高,单日最高温超过 35℃的天数有所增加,超过该温度时 APSIM 判定会抑制燕麦的干物质积累速率,从而在一定程度降低了最高产量并缩小了年际差异。齐安银等^[41]研究认为饲用燕麦喜凉爽,不适宜于炎热的地区生产,这表明 APSIM 对饲用燕麦生长机制的描述符合实际。应县和偏关 MID 时期较 END 时期的 CV 更大,分别为 0.22 和 0.17,原因为有高温增幅度的同时降水却变化较小,从而导致年际间产量的稳定性下降。

3.5 不确定性

由于环境条件对作物生长发育影响极为复杂, 本研究尚存一定的不确定性。首先, 由于不同品种在不同区域的表现不同^[42-43], 各地区应选择最适宜的品种进行种植生产, 而本研究选用品种黑玫克饲用燕麦作为区域模拟对象, 未考虑区域内品种的多样性以及区域间品种的差异。其次, 基于 APSIM 的情景模拟未考虑病虫害以及杂草对作物的影响, 也存在一定局限性。另外, 本研究的预测气候数据来源于气候模型, 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 CMIP6 进行情景数据的预测, 并结合极端气候概率增加的背景^[44]分析晋北主要作物的生产变化趋势。

4 结论

验证结果表明, APSIM 模型模拟饲用燕麦、玉米和马铃薯的地上生物量及作物产量时, 模拟值与实测值之间的 NRMSE 均小于 21%, 一致性系数 d 均大于 0.90, 总体模拟效果较好, 可有效模拟晋北地区玉米、马铃薯和饲用燕麦的生产。情景模拟结果表明, 平鲁、神池、左云三点饲用燕麦产草量总体最高(16,020~20,817 kg hm⁻²), 风险最小。MID 的饲用燕麦产草量相比 BAS 增加了 5.49%~23.20%, 其中阳高、右玉、左云、神池四点的产草量提升显著($P < 0.05$); END 时期, 代县、大同等 10 个站点饲用燕麦产草量相比与 MID 增加 0.27%~9.15%, 左云、朔州、右玉、神池则略为降低。P-O 产草量总体较高(平均 17,390 kg hm⁻²), 风险较小, 绝大多数情况下对饲用燕麦高稳产更有利。

References

- [1] 石永红, 高鹏, 方志红, 赵祥, 韩伟, 魏江铭, 刘琳, 李锦臻. 15 个进口饲用燕麦品种炭疽病的抗病性评价及损失分析. 草业学报, 2023, 32(9): 130-142.
Shi Y H, Gao P, Fang Z H, Zhao X, Han W, Wei J M, Liu L, Li J Z. Evaluation of resistance to *Colletotrichum cereale* and analysis of loss in a field of fifteen imported oat cultivars. *Acta Pratac Sin*, 2023, 32(9): 130-142 (in Chinese with English abstract).
- [2] 闫庆忠. 燕麦草的饲用价值及加工方式. 特种经济动植物, 2022, 25: 138-140.
Yan Q Z. Feeding value and processing mode of oat grass. *Special Econ Anim Plant*, 2022, 25: 138-140 (in Chinese).
- [3] 刘欢欢, 郭雁华, 张巧娥, 梁小军. 燕麦草营养价值评定方法的研究进展. 饲料研究, 2019, 42(7): 110-113.
Liu H H, Guo Y H, Zhang Q E, Liang X J. Research progress of nutritive value assessment method of oat grass. *Feed Res*, 2019, 42(7): 110-113 (in Chinese with English abstract).
- [4] Tang J, Wang J, He D, Huang M X, Pan Z H, Pan X B. Comparison of the impacts of climate change on potential productivity of different staple crops in the agro-pastoral ecotone of North China. *J Meteorol Res*, 2016, 30: 983-997.
- [5] 唐建昭, 肖登攀, 柏会子. 未来气候情景下农牧交错带不同灌溉水平马铃薯产量和水分利用效率. 农业工程学报, 2020, 36(2): 103-112.
Tang J Z, Xiao D P, Bai H Z. Yield and water use efficiency of potato at different irrigation levels in agro-pastoral ecotone under future climate change. *Trans CSAE*, 2020, 36(2): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- [6] Myhre G, Alterskjær K, Stjern C W, Hodnebrog Ø, Marelle L, Samset B H, Sillmann J, Schaller N, Fischer E, Schulz M, Stohl A. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Sci Rep*, 2019, 9: 16063.
- [7] 侯青青, 成华强, 朱敏, 杨轩, 夏方山. 晋北两种饲草作物的 APSIM 模型参数敏感性分析. 草地学报, 2023, 31: 3114-3122.
Hou Q Q, Cheng H Q, Zhu M, Yang X, Xia F S. Parameter sensitivity analysis on submodules of APSIM to two forages in northern Shanxi province. *Acta Agrest Sin*, 2023, 31: 3114-3122 (in Chinese with English abstract).
- [8] 王莺莺, 张依婧, 李飞, 吕妍. 作物生产潜力变化的区域差异: 以陕西省为例. 干旱区地理, 2019, 42: 615-624.
Wang Y Y, Zhang Y J, Li F, Lyu Y. Regional difference in crop production potential change: a case study of Shaanxi province. *Arid Land Geogr*, 2019, 42: 615-624 (in Chinese).
- [9] 何贤芳, 赵莉, 刘泽, 汪建来. 安徽稻茬小麦产量差异性与生产限制因子构成解析. 北方农业学报, 2020, 48(1): 123-128.
He X F, Zhao L, Liu Z, Wang J L. Analysis of yield difference and production restriction factors of rice stubble wheat in Anhui province. *J Northern Agric*, 2020, 48(1): 123-128 (in Chinese with English abstract).
- [10] 杨绣娟, 孙继颖, 高聚林, 刘剑, 孟繁盛, 张悦忠, 温晓亮, 王志刚, 于晓芳, 刘文翔, 王彦淇. 不同生态条件下氮肥对玉米干物质积累、氮素分配及产量的影响. 华北农学报, 2023, 38(3): 108-120.
Yang X J, Sun J Y, Gao J L, Liu J, Meng F S, Zhang Y Z, Wen X L, Wang Z G, Yu X F, Liu W X, Wang Y Q. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, nitrogen distribution and yield of maize under different ecological conditions. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2023, 38(3): 108-120 (in Chinese with English abstract).
- [11] 尹国丽, 蔡卓山, 陶茸, 吴芳, 陈建纲, 师尚礼. 不同草田轮作方式对土壤肥力、微生物数量及自毒物质含量的影响. 草业学报, 2019, 28(3): 42-50.
Yin G L, Cai Z S, Tao R, Wu F, Chen J G, Shi S L. Effects of different crop rotations on soil nutrient, microorganism abundance and soil allelochemical levels in alfalfa. *Acta Pratac Sin*, 2019, 28(3): 42-50 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白春利, 赵和平, 师永明, 丁海君, 刘思博. 荒漠草原区“草田轮作”模式及牧草高效种植技术. 畜牧与饲料科学, 2019, 40(8): 47-49.
Bai C L, Zhao H P, Shi Y M, Ding H J, Liu S B. A rotation mode of crop and grass in desert grassland area and high-efficient cultivation technique of herbage. *Anim Husb Feed Sci*, 2019, 40(8): 47-49.

- 47–49 (in Chinese with English abstract).
- [13] 柴继宽. 轮作和连作对燕麦产量、品质、主要病虫害及土壤肥力的影响. 甘肃农业大学博士学位论文, 甘肃兰州, 2012.
Chai J K. Effects of Crop Rotation and Continuing on Productivity, Quality, Pests and Diseases of Oats and Soil Fertility. PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China, 2012 (in Chinese with English abstract).
 - [14] 秦鹏程, 姚凤梅, 曹秀霞, 张佳华, 曹倩. 利用作物模型研究气候变化对农业影响的发展过程. 中国农业气象, 2011, 32: 240–245.
Qin P C, Yao F M, Cao X X, Zhang J H, Cao Q. Development process of modeling impacts of climate change on agricultural productivity based on crop models. *Chin J Agrometeorol*, 2011, 32: 240–245 (in Chinese with English abstract).
 - [15] 沈禹颖, 南志标, Bellotti B, Michael R, 陈文, 邵新庆. APSIM 模型的发展与应用. 应用生态学报, 2002, 13: 1027–1032.
Shen Y Y, Nan Z B, Bellotti B, Michael R, Chen W, Shao X Q. Development of APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) and its application. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13: 1027–1032 (in Chinese with English abstract).
 - [16] Ojeda J J, Caviglia O P, Irisarri J G N, Agnusdei M G. Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. *Agric For Meteorol*, 2018, 259: 1–10.
 - [17] Pembleton K G, Cullen B R, Rawnsley R P, Harrison M T, Ramilan T. Modelling the resilience of forage crop production to future climate change in the dairy regions of Southeastern Australia using APSIM. *J Agric Sci*, 2016, 154: 1131–1152.
 - [18] Wang E L, Xu J H, Smith C J. Value of historical climate knowledge, SOI-based seasonal climate forecasting and stored soil moisture at sowing in crop nitrogen management in south eastern Australia. *Agric For Meteorol*, 2008, 148: 1743–1753.
 - [19] Yang X, Jia P F, Hou Q Q, Zhu M. 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. *Agric Water Manag*, 2023, 283: 108309.
 - [20] Keating B A, Meinke H. Assessing exceptional drought with a cropping systems simulator: a case study for grain production in northeast Australia. *Agric Syst*, 1998, 57: 315–332.
 - [21] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, McCown R L, Freebairn D M, Smith C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur J Agron*, 2003, 18: 267–288.
 - [22] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 朱敏. 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. 中国草地学报, 2022, 44(10): 20–29.
Yang X, Jia P F, Hou Q Q, Zhu M. The evaluation of effects of future climate on forage oats yield and sensitivity to water stress based on Agricultural Production Systems Simulator. *Chin J Grassland*, 2022, 44(10): 20–29 (in Chinese with English abstract).
 - [23] 杨轩, 贾鹏飞, 侯青青, 朱敏. 北方农牧交错带气候变化对粮草轮作生产的影响. 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, Zhu M. 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 Shanxi Agric Univ (Nat Sci Edn)*, 2022, 42(1): 77–89 (in Chinese with English abstract).
 - [24] 杨轩, 栗国梁, 贾鹏飞, 侯青青, 夏方山. 不同降水年型下饲用燕麦产量对降水变化的响应研究. 畜牧与饲料科学, 2023, 44(1): 80–90.
Yang X, Li G L, Jia P F, Hou Q Q, Xia F S. Responses of forage oat yields to precipitation changes under different precipitation year patterns. *Anim Husb Feed Sci*, 2023, 44(1): 80–90 (in Chinese with English abstract).
 - [25] Wang J, Wang E, Yin H, Feng L P, Zhao Y X. Differences between observed and calculated solar radiations and their impact on simulated crop yields. *Field Crops Res*, 2015, 176: 1–10.
 - [26] 刘霞霞, 李扬, 王靖, 黄明霞, 白蕤, 宋扬, 胡琦, 张佳莹, 陈仁伟. 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. 中国农业科学, 2022, 55: 1917–1937.
Liu X X, Li Y, Wang J, Huang M X, Bai R, Song Y, Hu Q, Zhang J Y, Chen R W. Adaptability evaluation of staple crops under different precipitation year types in four ecological regions of Inner Mongolia based on APSIM. *Sci Agric Sin*, 2022, 55: 1917–1937 (in Chinese with English abstract).
 - [27] Ma Q H, You Y L, Shen Y Y, Wang Z K. Adjusting sowing window to mitigate climate warming effects on forage oats production on the Tibetan Plateau. *Agric Water Manag*, 2024, 293: 108712.
 - [28] Pembleton K G, Rawnsley R P, Jacobs J L, Mickan F J, O'Brien G N, Cullen B R, Ramilan T. Evaluating the accuracy of the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) simulating growth, development, and herbage nutritive characteristics of forage crops grown in the south-eastern dairy regions of Australia. *Crop Pasture Sci*, 2013, 64: 147–164.
 - [29] Peng Y, Zhang F, Han W, Li Z Z, Zhang S, Cao S M, Weng W H, Chen S. Modeling long-term nitrogen utilization under alfalfa-corn rotation in Northeast China. *Field Crops Res*, 2024, 309: 109313.
 - [30] 赵金龙, 汪进欣, 马力文. 基于 GIS 的宁夏皮燕麦种植气候适宜性分析. 农学学报, 2021, 11(9): 79–84.
Zhao J L, Wang J X, Ma L W. Climate suitability analysis of oat planting based on GIS in Ningxia. *J Agric*, 2021, 11(9): 79–84 (in Chinese with English abstract).
 - [31] 王鹤龄. 增温和降水变化对半干旱区春小麦影响及作物布局对区域气候变化的响应研究. 甘肃农业大学博士学位论文, 甘肃兰州, 2014.
Wang H L. Effects of Warming and Precipitation on Spring Wheat in the Semi-arid Region, and Response of Crop Layout on Regional Climate Change. PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
 - [32] 马雪琴, 赵桂琴, 龚建军. 播期与氮肥对燕麦种子产量构成要素的影响. 草业科学, 2010, 27(8): 88–92.
Ma X Q, Zhao G Q, Gong J J. Effect of sowing date and nitrogen fertilizer on seed yield and its components of oats in alpine area. *Pratac Sci*, 2010, 27(8): 88–92 (in Chinese with English abstract).

- [33] 朱彩芬, 温建雅, 梁艳, 唐丽娜, 朱叶. 朔州市人工燕麦草生育期气候因子适宜度分析. 中南农业科技, 2023, 44(9): 73–76. Zhu C F, Wen J Y, Liang Y, Tang L N, Zhu Y. Analysis on the suitability of climate factors during the growth period of artificial oat grass in Shuozhou City. *South-Central Agric Sci Technol*, 2023, 44(9): 73–76 (in Chinese).
- [34] Musokwa M, Mafongoya P L, Chirwa P W. Monitoring of soil water content in maize rotated with pigeonpea fallows in South Africa. *Water* (Basel), 2020, 12: 2761.
- [35] 周谷, 李秧秧, 樊军. 利用植物气体交换参数确定萎蔫系数的方法. 土壤学报, 2023, 60: 776–786. Zhou G, Li Y Y, Fan J. Determination of wilting coefficient by using the plant gas exchange parameters. *Acta Pedol Sin*, 2023, 60: 776–786 (in Chinese with English abstract).
- [36] 李阳阳, 费聪, 崔静, 王开勇, 马富裕, 樊华. 滴灌甜菜对块根膨大期水分亏缺的补偿性响应. 作物学报, 2016, 42: 1727–1732. Li Y Y, Fei C, Cui J, Wang K Y, Ma F Y, Fan H. Compensation response of drip-irrigated sugar beets (*Beta vulgaris* L.) to different water deficits during storage root development. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1727–1732 (in Chinese with English abstract).
- [37] 方梓行, 何春阳, 刘志锋, 赵媛媛, 杨延杰. 中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势: 基于观测和模拟资料的综合分析. 自然资源学报, 2020, 35: 358–370. Fang Z H, He C Y, Liu Z F, Zhao Y Y, Yang Y J. Climate change and future trends in the Agro-Pastoral Transitional Zone in Northern China: the comprehensive analysis with the historical observation and the model simulation. *J Nat Resour*, 2020, 35: 358–370 (in Chinese with English abstract).
- [38] Leakey A D B, Ainsworth E A, Bernacchi C J, Rogers A, Long S P, Ort D R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. *J Exp Bot*, 2009, 60: 2859–2876.
- [39] 张春雨, 李彦生, 于镇华, 刘俊杰, 王光华, 刘晓冰, 吴俊江, 殷奎德, 金剑. 大气 CO₂ 浓度和温度升高影响作物产量的光合生理及分子生物学机制. 土壤与作物, 2021, 10(3): 256–265. Zhang C Y, Li Y S, Yu Z H, Liu J J, Wang G H, Liu X B, Wu J J, Yin K D, Jin J. Mechanism of photosynthetic physiology and molecular biology of crop yield as affected by elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature: a review. *Soil Crop*, 2021, 10(3): 256–265 (in Chinese with English abstract).
- [40] 张凯, 王润元, 冯起, 王鹤龄, 赵鸿, 赵福年, 阳伏林, 雷俊. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 1): 161–170. Zhang K, Wang R Y, Feng Q, Wang H L, Zhao H, Zhao F N, Yang F L, Lei J. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area. *Trans CSAE*, 2015, 31(S1): 161–170 (in Chinese with English abstract).
- [41] 齐安银, 曾庆晨, 李颜秘, 向达兵, 万燕, 邹亮. 饲用燕麦栽培技术研究进展. 成都大学学报(自然科学版), 2022, 41: 250–256. Qi A Y, Zeng Q C, Li Y M, Xiang D B, Wan Y, Zou L. Research progress on cultivation of forage oats (*Avena sativa*). *J Chengdu Univ* (Nat Sci Edn), 2022, 41: 250–256 (in Chinese with English abstract).
- [42] 李刚, 郑敏娜, 李荫藩. 饲用燕麦品种在晋北农牧交错区的生产性能和营养价值研究. 中国农业科技导报, 2021, 23(12): 42–53. Li G, Zheng M N, Li Y F. Comprehensive evaluation of production performance and nutritional value of forage oat varieties in northern Shanxi Province. *J Agric Sci Technol*, 2021, 23(12): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- [43] 刘夏琳. 四个饲用燕麦品种在晋北农牧交错带的农艺性状和品质比较分析. 山西农业大学硕士学位论文, 山西太谷, 2020. Liu X L. The Comparison and Analysis of Agronomic Traits and Quality among Four Forage Oats Varieties in the Agro-pastoral Ecotone of Northern Shanxi. MS Thesis of Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi, China, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [44] Qin P H, Xie Z H, Zou J, Liu S, Chen S. Future precipitation extremes in China under climate change and their physical quantification based on a regional climate model and CMIP5 model simulations. *Adv Atmosph Sci*, 2021, 38: 460–479.