

陇中旱农区不同耕作措施的 APSIM 模型构建及应用

赵 位^{1,2}, 李玲玲^{1,2}, 张元红^{1,2}, 祝 榛^{1,2}, 吴虎涛^{1,2}

(1. 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070; 2. 干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070)

摘 要: [目的] 为评估 APSIM 模型在陇中旱农区春小麦栽培及早作农田水分生产力模拟中的适用性, 探究保护性耕作和不同施氮情景对旱作春小麦产量及水分利用效率的影响。[方法] 基于甘肃农业大学定西旱作农业综合实验站长期保护性耕作定位试验(始于 2001 年), 设置传统耕作(T)、免耕(NT)、传统耕作+秸秆翻入(TS)及免耕+秸秆覆盖(NTS)4 个处理。通过 2024—2025 年田间观测数据对春小麦品种参数与土壤参数进行本地化校准和验证, 构建适用于本地地区的 APSIM 模型。在此基础上, 结合 2002—2025 年历史气象资料, 开展不同耕作措施及施氮梯度下春小麦产量、耗水量和水分利用效率的长期情景模拟, 并利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)及归一化均方根误差(NRMSE)等多项指标综合评价模型的模拟精度。[结果] 校准后的 APSIM 模型能够准确模拟春小麦的生长发育过程, 物候期的观测值与模拟值的 RMSE 为 0~4 d; 产量的平均 RMSE 和 NRMSE 分别为 59.3 kg/hm² 和 3.5%, 叶面积指数的平均 RMSE 和 NRMSE 分别为 0.2 m²/m² 和 16.0%。不同生育时期 0~200 cm 土层土壤水分的 NRMSE 为 1.6%~18.2%。基于校准后的 APSIM 模型, 系统评估长周期(24 a)条件下耕作措施与施氮水平对春小麦水分生产力的影响。结果表明, 春小麦水分生产力与耗水量随年际降雨量同步波动。其中, 免耕秸秆覆盖(NTS)处理表现最佳, 多年平均产量为 1 919.76 kg/hm², 水分利用效率为 5.6 kg/(hm²·mm), 在多数年份产量稳定、水分利用效率最高, 且在降水波动年份产量降幅最小, 是该地区较适宜的耕作方式。在 NTS 模式下进一步模拟不同施氮水平发现, 作物耗水量(ET)随施氮量增加而上升, 但过量施氮不仅无法进一步提高产量, 反而降低资源利用效率。[结论] 综合来看, 施氮量以不超过 112.5 kg/hm² 为宜。免耕秸秆覆盖(NTS)搭配合理施氮(112.5 kg/hm²), 是实现陇中旱农区春小麦高产稳产、提升资源利用效率的优化管理模式, 对该地区及类似生态区的农业可持续发展具有指导意义。

关键词: APSIM; 耕作措施; 土壤含水量; 情景模拟; 水分生产力

中图分类号: S344

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0265-12

Construction and Application of APSIM Model for Different Tillage Practices in Arid Agricultural Areas of Central Gansu

Zhao Wei^{1,2}, Li Lingling^{1,2}, Zhang Yuanhong^{1,2}, Zhu Zhen^{1,2}, Wu Hutao^{1,2}

(1. Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] To evaluate the applicability of the APSIM model in simulating spring wheat cultivation and water productivity in arid agricultural areas of central Gansu, and to investigate the effects of conservation tillage and different nitrogen application scenarios on the yield and water use efficiency of dryland spring wheat. [Methods] This study was based on a long-term conservation tillage experiment (initiated in 2001) at the Dingxi Comprehensive Experimental Station for Dryland Agriculture of Gansu Agricultural University. Four treatments were established: conventional tillage (T), no-tillage (NT), conventional tillage with straw incorporation (TS),

收稿日期: 2026-03-28

修回日期: 2026-04-21

录用日期: 2026-04-29

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-08-14

资助项目: 甘肃省基础研究创新群体项目(25JRRA807); 国家自然科学基金项目(32260549, 32572472); 甘肃农业大学引进人才专项(GAU-KYQD-2023-13)

第一作者: 赵位(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事旱作农业研究。E-mail: 3030727494@qq.com

通信作者: 张元红(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事旱区高效农作制度研究。E-mail: zhangyuanh@gsau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

and no-tillage with straw mulching (NTS). Using field observation data from 2024 to 2025, cultivar and soil parameters were locally calibrated and validated to construct an APSIM model suitable for this region. On this basis, combined with historical meteorological data from 2002 to 2025, long-term scenario simulations were conducted for spring wheat yield, water consumption, and water use efficiency under different tillage practices and nitrogen application gradients, and the simulation accuracy was comprehensively evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and normalized root mean square error (NRMSE). [Results] The calibrated APSIM model accurately simulated the growth and development of spring wheat, with RMSE between measured and simulated phenological periods of 0–4 days. The mean RMSE and NRMSE for yield and leaf area index were 59.3 kg/hm² and 0.2 m²/m², and 3.5% and 16.0%, respectively. The NRMSE for soil moisture in the 0–200 cm soil layer at different growth stages ranged from 1.6% to 18.2%. Based on the calibrated APSIM model, the effects of tillage practices and nitrogen application rates on the water productivity of spring wheat under long-term conditions (24 years) were systematically evaluated. The results showed that the water productivity and water consumption of spring wheat fluctuated synchronously with interannual precipitation. Among the treatments, NTS performed best, with a multi-year mean yield of 1 919.76 kg/hm² and a water use efficiency of 5.6 kg/(hm²·mm). It maintained stable yields in most years, achieved the highest water use efficiency, and showed the smallest yield decline in years with precipitation fluctuations, indicating that it was a suitable tillage practice for this region. Further simulations under the NTS regime showed that water consumption increased with nitrogen application rate, but excessive nitrogen application did not further increase yield and instead reduced resource use efficiency. [Conclusion] Overall, a nitrogen application rate not exceeding 112.5 kg/hm² is recommended. NTS combined with appropriate nitrogen application (112.5 kg/hm²) is an optimized management pattern for achieving high and stable yield of spring wheat and improving resource use efficiency in the arid agricultural areas of central Gansu, and it provides guidance for sustainable agricultural development in this region and similar ecological zones.

Keywords: APSIM; tillage practices; soil moisture content; scenario simulation; water productivity

Received: 2026-03-28

Revised: 2026-04-21

Accepted: 2026-04-29

Online(www.cnki.net): 2026-08-14

黄土高原作为我国重要的粮食生产基地,同时亦为全球水土流失最为严重的生态脆弱区之一,肩负着保障区域粮食安全与维持生态平衡的双重使命^[1]。小麦是该地区主要粮食作物,种植面积约 5×10^6 hm²,约贡献全国小麦总产量的10%。然而,在全球气候变暖背景下,该区域干旱事件频发、水资源短缺问题日益突出,加之灌溉条件严重不足,作物生长高度依赖自然降水^[2]。研究区位于黄土高原西部的陇中旱农区,年平均降水量250~600 mm,降水时空分布不均,超过50%的降水集中于6—8月,且多以强降雨形式出现,导致水分难以被作物有效利用^[3]。此外,长期依赖的传统耕作方式还进一步限制农田水分高效利用与作物产能提升,制约区域农业的可持续发展。在此背景下,发展保护性耕作技术已成为实现该地区农业资源高效利用与生产力稳定的重要途径。

近年来,相关机构和学者^[4-5]在陇中旱农区开展旱作农田保护性耕作田间试验研究,探索秸秆覆盖免耕、深松和旋耕等保护性耕作技术的蓄水保墒、土壤培肥和

增产增收效应,表明免耕秸秆覆盖能明显增加休闲期土壤储水能力,尤其是播前蓄水作用更为明显,是实现陇中黄土高原旱作小麦蓄水保墒最适宜的耕作方式。但已有研究大多是基于保护性耕作效应的田间试验研究,难以综合考虑气候、土壤、作物属性以及管理措施等影响因素,使得试验处理数量设置十分有限。随着计算机技术和理论的飞速发展,以计算机为基础的作物生长模型为农业生产和科学研究提供行之有效的新途径。

APSIM (agricultural production systems simulator)模型作为一种机理性强、适应性广的作物模拟平台,已被广泛用于作物生产力预测、气候变化效应评估及管理策略优化等方面^[6-7]。经过诸多学者^[8-9]对APSIM模型参数的本土化修正,APSIM模型已在国内外许多地区进行适应性评估和验证。同时,国内外学者利用APSIM模型对旱地小麦产量和水分生产力协同方面开展相关的模拟研究。Singh等^[10]利用APSIM模型准确预测地中海地区旱地小麦、大麦和油菜在高残留物(HR)和低残留物(LR)条件下的水分利用和谷物产

量;Fletcher等^[11]利用 APSIM 模型模拟澳大利亚西部旱区近 117 年水分对小麦产量空间格局的影响;Wu等^[12]利用 APSIM 模型模拟长期干旱胁迫对中国西南地区小麦产量的影响。在黄土高原地区,APSIM 模型已被验证能够准确模拟不同管理措施下的土壤含水量,并展现出在不同情境下预测作物产量的良好适用性^[13]。前人的研究主要集中于利用 APSIM 模型在旱地小麦产量等方面的预测,这些研究多聚焦于气候要素对产量的直接影响,对水分作为关键中间变量的系统模拟仍显不足,尤其在保护性耕作条件下 APSIM 模型的模块构建与应用研究较为薄弱。因此,本研究依托课题组在陇中旱农区设定的保护性耕作长期定位试验,开展 APSIM 模型的本地化校准与验证,评估其在西北半干旱区春小麦生长模拟中的适用性,进一步评估模拟长周期不同管理措施下旱作农田水分生产力的准确性,并探

究保护性耕作及不同施氮情景对旱作小麦产量及水分利用效率的影响,以期为该区域春小麦优化施肥与精准管理等工作提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托的长期定位试验位于甘肃省定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学旱作农业综合实验站(35°28'N,104°44'E),该站位于黄土高原西部,属中温带半干旱区。试验地海拔 1 971 m,年平均太阳辐射 592.9 kJ/cm²,年日照时间 2 476.6 h,年平均气温 6.4℃,≥0℃积温 2 933.5℃,≥10℃年积温达 2 239.0℃,无霜期约 140 d。站点多年平均降水量 391 mm,年蒸发量 1 531 mm,是典型的半干旱雨养农业区,试验期间温度和降水动态见图 1。试验地土壤类型为黄绵土,土层深厚,质地均匀。

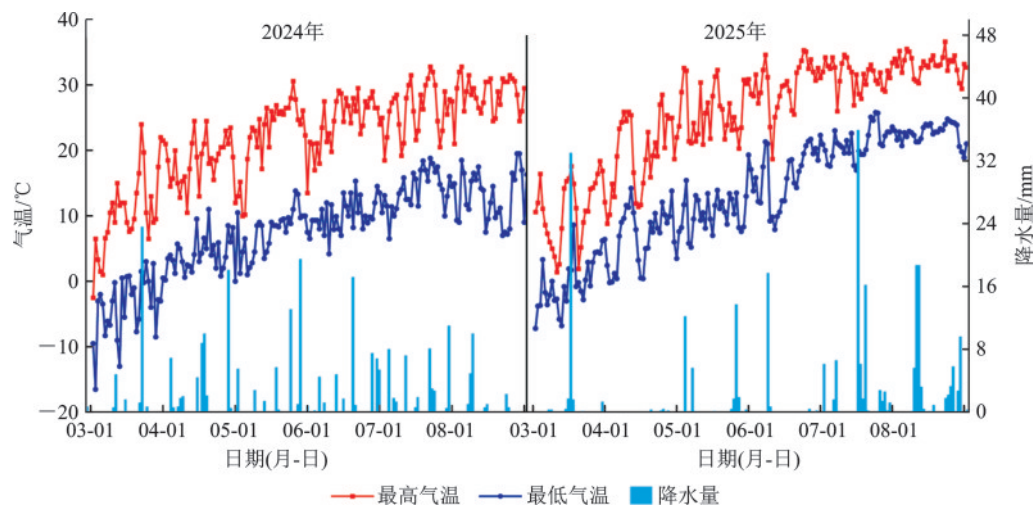


图 1 2024—2025 年试验点气温和降水量动态
Fig.1 Temperature and precipitation dynamics at experimental site (2024—2025)

1.2 田间试验设计

本试验依托始于 2001 年的长期定位试验,采用单因素随机区组设计,共设置 4 个耕作处理:传统耕作(T)、传统耕作+秸秆翻入(TS)、免耕(NT)及免耕+秸秆覆盖(NTS),各处理具体操作流程见表 1。每个处理重复 3 次,共 12 个小区,小区面积为 80 m²(4 m×20 m)。

表 1 试验处理及代码描述

Table 1 Experimental treatments and code descriptions		
代码	处理	具体操作
T	传统耕作	前茬作物收获后至土壤冻结前,进行三耕两耧
NT	免耕	全年不耕作,免耕播种机在播种时一次性完成施肥和播种
TS	传统耕作+秸秆翻入	操作同 T,但第 1 次耕作时将所有前茬作物秸秆翻入土壤
NTS	免耕+秸秆覆盖	操作同 NT,脱粒收获后全部作物秸秆覆盖在原小区

供试春小麦品种为当地主栽品种“定西 40 号”。春小麦播种量为 187.5 kg/hm²,行距 20 cm,各处理施纯氮(N)105 kg/hm²,磷(P₂O₅)105 kg/hm²,春小麦于 3 月中下旬播种,7 月下旬收获。

1.3 数据来源

本研究采用 APSIM 7.10 模型模拟陇中旱农区春小麦的产量和耗水特征等需要建立与当地条件相适应的数据库,主要包括:气象参数数据库、土壤参数数据库、作物生长参数数据库和田间管理数据库等。其中,2001—2025 年气象资料由试验站气象设备自动测定,逐日气象数据包括逐日降水量(mm)、逐日太阳辐射量(MJ/m²)、逐日最高气温(℃)和逐日最低气温(℃)。小麦生长发育特征、作物品种数据和田间管理数据及土壤数据(表 2)均来源于甘肃农业大学试验点实测数据。模型的作物品种参数参考李广等^[13]关于 APSIM 模型在陇中黄土丘陵沟壑

区适用性研究中的验证数据,通过“试错法”^[14]并结合 R 语言程序对春小麦品种遗传参数进行进一步调整,主要基于 R 语言构建以模型模拟值与田间实测值均方根误差为核心的损失函数,通过不断迭代计算以最小化模型模拟值与田间观测值之间的差异,从而确定参数的最优组合。模型校准与检验所需要的土壤水分与小麦物候期、叶面积、产量数据均来源于 2024—2025 年的田间实测,其余数据均由 APSIM 模型模拟获得。

表 2 土壤参数
Table 2 Soil parameters

土层深度/cm	土壤体 积质 量/(g· cm ⁻³)	pH	风干含 水量/ (mm· mm ⁻¹)	萎蔫 系数/ (mm· mm ⁻¹)	田间持 水量/ (mm· mm ⁻¹)	饱和含 水量/ (mm· mm ⁻¹)
0~5	1.29	8.1	0.01	0.09	0.27	0.46
5~10	1.23	8.2	0.01	0.09	0.27	0.49
10~30	1.32	8.3	0.05	0.09	0.27	0.45
30~50	1.20	8.4	0.07	0.09	0.27	0.50
50~80	1.14	8.3	0.07	0.09	0.26	0.52
80~110	1.14	8.3	0.07	0.10	0.27	0.52
110~140	1.13	8.3	0.07	0.11	0.27	0.48
140~170	1.12	8.3	0.07	0.13	0.27	0.53
170~200	1.11	8.3	0.07	0.15	0.27	0.53

1.4 APSIM 模型

1.4.1 模型描述 APSIM (agricultural production systems simulator)模型是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织和昆士兰州政府联合开发的作物系统模拟模型,是一个成功的旱地作物系统模型,可以用于模拟旱作农业系统中各主要组成的机理模型^[15]。APSIM 模型允许描述农业系统中关键组成部分的独立模块“插入”到平台中,研究者可以根据需要对独立模块进行灵活开发,近年来广泛应用于农作物生产与气候变化关系、水肥管理等方面^[16-17]。

1.4.2 模型校准 对作物遗传参数的校准主要是根据前人研究对供试品种的遗传参数范围进行大致设定,作为估计本试验作物遗传参数的基础数据。结合本试验观测数据,利用试错法并结合 R 语言程序对参数进行迭代优化,完成修订。

本研究以 2024 年不同耕作处理下的春小麦物候期、叶面积指数和土壤水分动态数据对模型参数进行率定,春小麦产量数据未用于参数优化,仅用于检验校准后模型对产量的拟合能力。完成率定后,进一步采用 2025 年独立田间观测数据对模型进行验证。

1.4.3 模型验证 模型的校准和验证主要选用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和一致性指数(D)^[18]。指标 R^2 、 D 反映模型模拟偏差,取值为 0~1,其中所得值越接近 1,说明模拟效果越佳;越接近 0,说明模拟效果越差。RMSE 评价模拟值和观测值的平均差异, RMSE 值越小,表示模拟值和观测值偏差越小; NRMSE 属于无量纲统计量,因此可用来比较不同单位数据的模拟精度, NRMSE 的值越小,说明模型模拟精度越高。一般认为,当 $NRMSE < 10\%$ 时,模型模拟精度极好;当 $NRMSE > 10\%$ 且 $< 20\%$ 时,模型模拟精度较好;当 $NRMSE > 20\%$ 且 $< 30\%$ 时,模型模拟精度一般;当 $NRMSE > 30\%$ 时,模拟精度较差。

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \overline{O})(S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \overline{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \overline{S})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

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

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\overline{S}} \times 100\% \quad (3)$$

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \overline{O}| + |S_i - \overline{S}|)^2} \quad (4)$$

式中: O_i 为田间实测值; S_i 为模型模拟值; $\overline{O}$ 和 $\overline{S}$ 分别为实测数据和模拟数据的平均值; n 为样本数量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2022 软件进行数据整理,通过 IBM SPSS Statistics 25 软件中单因素 ANOVA 检验下的 LSD 法 ($p < 0.05$) 进行显著性分析。采用 Origin 2021 软件进行线性拟合和图形绘制。

2 模型的应用与结果分析

2.1 APSIM 模型校准

本研究利用试错法并结合 R 语言程序对作物遗传参数进行迭代优化,结合春小麦大田试验对陇中旱农区普遍采用的小麦品种定西“40”号遗传参数进行率定。以 2024 年的大田观测数据为基础进行春小麦遗传参数调试,校准后的遗传系数见表 3。不同耕作处理间模拟和观测的春小麦拔节期、开花期、灌浆期的平均 RMSE 分别为 1.69、0.92、1.62 d,平均 NRMSE 分别为 6.48%、10.17% 和 5.21%(表 4)。不同耕种方式下春小麦叶面积指数模拟值和观测值的 R^2 为 0.938,平均 RMSE 为 0.32 m²/m², NRMSE 为 24.50%(图 2)。APSIM 模型对 2024 年免耕秸秆覆盖下不同土层的土壤水分动态的拟合效果较好, R^2 为 0.89~0.98,不同土层的 NRMSE 为 2.66%~18.18%(图 3)。

表 3 APSIM 模型中春小麦主要属性参数
Table 3 Main attribute parameters of spring wheat in APSIM

参数名称	参数值	单位
春化敏感系数	1.00	—
光周期敏感系数	2.00	—
单位茎秆干物质的籽粒数	25.00	个/g
灌浆期到成熟期的积温	585.00	℃
灌浆速率	2.30	mg/(grain·d)
分蘖重	1.22	g
单株重	4.00	g
株高	1 000.00	mm
最大谷粒重	0.045	g

2.2 APSIM 模型验证

校准后的 APSIM 模型,采用 2024 年未用于参数优化的产量数据对率定结果进行补充验证,并进一步利用 2025 年独立田间观测数据对模型进行验证。

2.2.1 物候数据 不同耕作措施下春小麦拔节期、开花期和灌浆期的物候期观测值与模拟值一致,拔节期、开花期和灌浆期平均 RMSE 分别为 1.95、0.73、

2.00 d, NRMSE 分别为 3.70%~9.32%、9.62%~16.59% 和 2.73%~8.56%(表 4)。值得注意的是,由于春小麦开花期较短,使其 NRMSE 误差偏大。

表 4 APSIM 模型物候期模拟结果指标统计与评价
Table 4 Statistics and evaluation of indicators for phenological-period simulation results of APSIM model

模型	年份	处理	拔节期		开花期		灌浆期	
			RMSE/ d	NRMSE/ %	RMSE/ d	NRMSE/ %	RMSE/ d	NRMSE/ %
模型 校准	2024	NT	1.71	6.59	1.15	12.8	1.63	5.25
		NTS	2.44	9.37	0.68	7.56	1.76	5.69
		TS	0.97	3.72	1.08	11.98	1.22	3.95
		T	1.62	6.24	0.75	8.34	1.85	5.96
		平均	1.69	6.48	0.92	10.17	1.62	5.21
模型 检验	2025	NT	2.38	8.82	0.63	10.54	2.65	6.96
		NTS	1.91	7.09	0.73	12.21	3.25	8.56
		TS	1.00	3.70	0.99	16.59	1.07	2.82
		T	2.52	9.32	0.58	9.62	1.04	2.73
		平均	1.95	7.23	0.73	12.24	2.00	5.27

注:RMSE 为均方根误差;NRMSE 为归一化均方根误差。

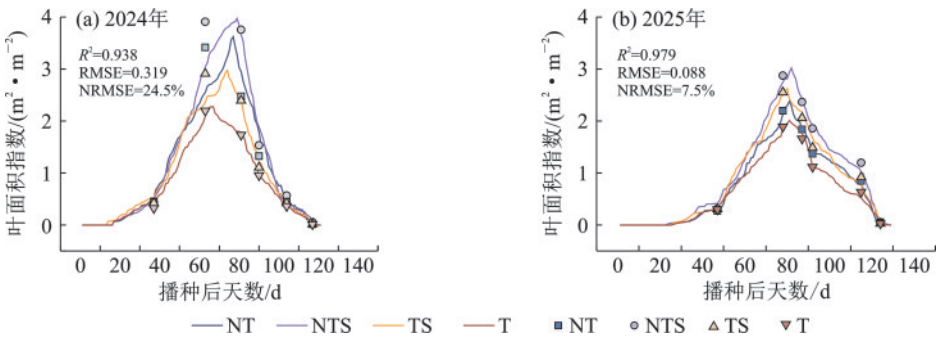


图 2 春小麦叶面积指数模拟值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison between simulated and measured leaf area index of spring wheat

2.2.2 籽粒产量 通过 2024—2025 年春小麦产量的模拟值和实测值对模型进行有效性检验,由图 4 可知,产量模拟值与实测值呈显著正相关,数据点均分布在±15% 误差线范围内,2 a 实测产量与模拟产量的决定系数(R^2)分别为 0.899 和 0.978,通过对其归一化处理,模型一致性指数(D)分别为 0.898 和 0.968。2 a 不同耕作产量模拟的 RMSE 均在 100 kg/hm² 以内, NRMSE 为 0.30%~5.20%,表明 APSIM 模型拟合效果良好,模拟的误差较小,可用于模拟陇中旱地春小麦产量(表 5)。

2.2.3 叶面积指数 不同耕作方式下春小麦叶面积指数的模拟值与实测值对比见图 2。2025 年春小麦叶面积指数的模拟值与实测值具有较高的一致性,不同处理下春小麦叶面积指数决定系数(R^2)为 0.978。平均 RMSE 为 0.09 m²/m², NRMSE 为 7.50%。模拟结果和田间实测结果在总体上表现出较好的一致性,能够较为准确地反映春小麦田间实际生长动态。

2.2.4 土壤水分变化动态 利用 APSIM 模型对 2025 年的春小麦全生育期不同耕作处理的土壤水分

动态进行模拟,得出不同深度的土壤水分动态变化特征。将小麦播种期、苗期、拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期、成熟期 0~200 cm 土层的平均体积含水量的实测值和模拟值进行比较分析,结果表明,4 种不同耕作处理的 RMSE 为 0.20~1.70 cm³/cm³, NRMSE 为 1.60%~14.80%(表 6)。

以免耕秸秆覆盖(NTS)为代表对农田土壤水分动态模拟结果进行分析,模拟与实测的土壤体积含水量对比见图 5。整体上,在春小麦生育时期的不同阶段,模型对土壤水分动态的模拟均表现出良好的一致性,各土层 NRMSE 值为 1.60%~14.80%,误差较小,表明模型具备可靠的模拟精度。分层验证结果显示,表层土壤(0~5、5~10 cm)的模拟值与实测值偏差相对明显,主要源于该层水分动态受降水、风力及覆盖物分布等外界环境因素影响最为直接,其本身实测准确性往往也较低。相比之下,深层土壤(50~200 cm)的模拟值与实测值拟合度较为契合,印证模型对土壤水分运移规律模拟的准确性。

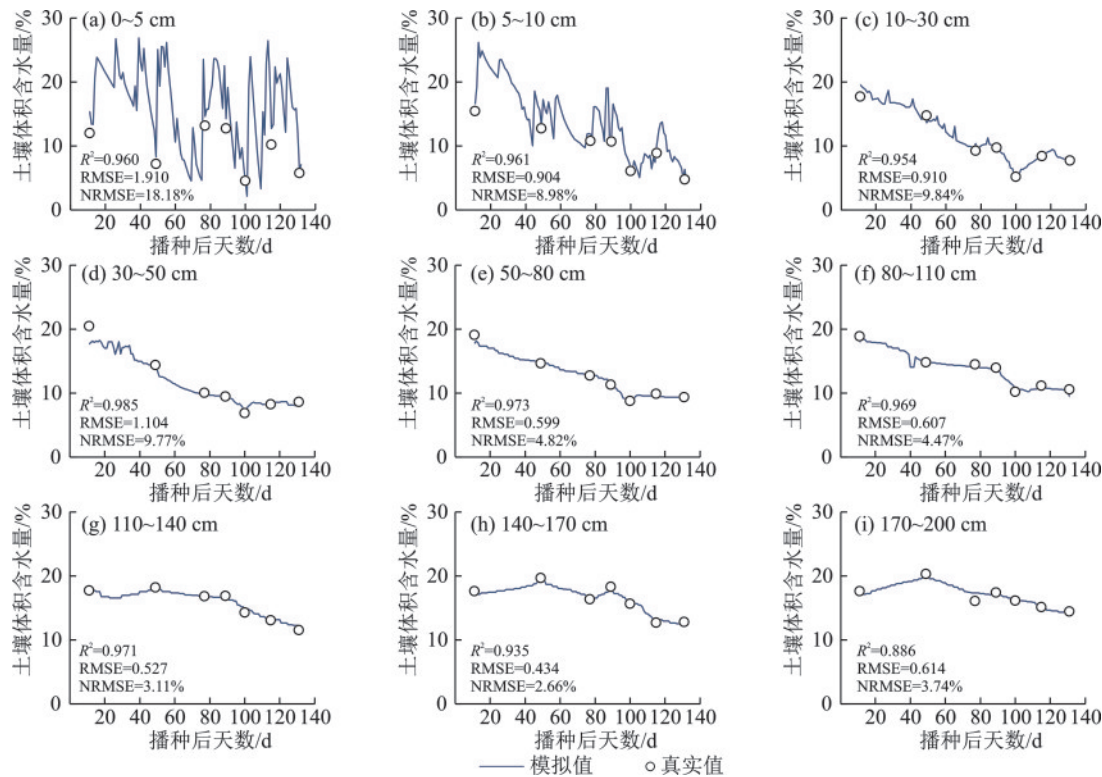


图 3 2024 年免耕秸秆覆盖条件下不同深度土壤体积含水量的模拟值与观测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and measured soil volumetric moisture content at different depths under no-tillage with straw mulching in 2024

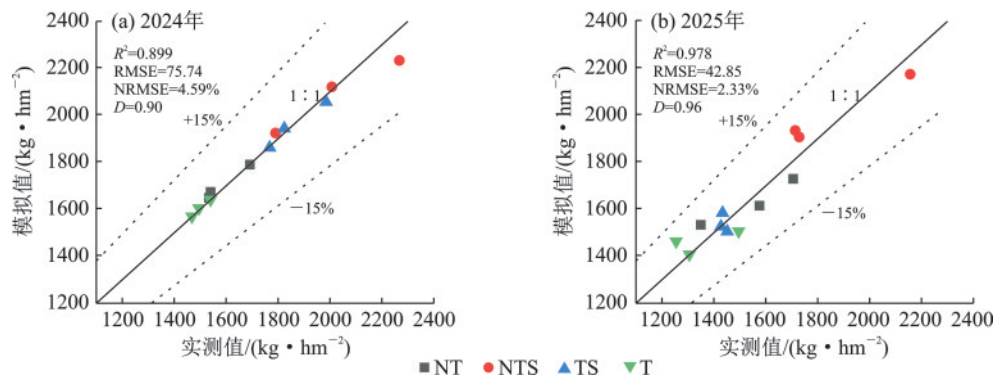


图 4 春小麦实测产量与模拟产量关系

Fig. 4 Relationship between measured and simulated yield of spring wheat

表 5 春小麦产量模拟结果与实测结果对比

Table 5 Comparison between simulated and measured yield of spring wheat

年份	处理	实测值/ (kg·hm ⁻²)	模拟值/ (kg·hm ⁻²)	误差/ %
2024	免耕(NT)	1 643.7	1 625.9	4.0
	免耕覆盖(NTS)	1 966.5	2 005.6	5.2
	翻耕覆盖(TS)	1 537.5	1 523.5	2.1
	传统耕作(T)	1 452.2	1 459.2	4.4
2025	免耕(NT)	1 688.7	1 703.9	1.2
	免耕覆盖(NTS)	2 121.8	2 092.9	4.3
	翻耕覆盖(TS)	1 959.0	1 944.7	1.1
	传统耕作(T)	1 601.3	1 604.9	0.3

注:2024 年产量数据未参与模型参数校准,仅用于校准后模型对产量模拟能力的评估;2025 年产量数据用于独立验证。NRMSE 为归一化均方根误差。

综合分析表明,根据春小麦物候期、产量、叶面积指数及土壤体积含水量的验证结果,校准后的 APSIM 模型可以准确地模拟陇中旱农区不同耕作条件下春小麦的生长过程、产量及土壤水分动态变化。

2.3 模型应用

2.3.1 应用场景 1:不同耕作措施下旱作农田水分生产力长周期模拟 利用校准后的模型评估长周期条件下春小麦不同耕作措施的水分生产力,探索耕作措施对旱农区春小麦水分生产力的影响。利用甘肃省定西市安定区李家堡镇长期历史气象资料(2002—2025 年),使用 APSIM 模型模拟该地区春小麦的耗水量(ET)和产量。

2.3.2 气候条件的年际变化 图 6 为 2002—2025 年试验点的气候年际变化,春小麦生育期内的关键气候因子,特别是降雨量存在显著波动。作物生育期

降雨量为 177.7~403.5 mm,变化幅度较大,多年平均
降水量为 273.1 mm。春小麦生育期的温度和太阳辐
射的年际变化较小,年平均最高气温和最低气温分
别为 20.2、7.9℃,平均太阳辐射为 18.4 MJ/m²。

表 6 不同耕作处理水分动态的 APSIM 模型模拟值与实测值的 RMSE 与 NRMSE 误差

Table 6 RMSE and NRMSE of simulated and measured values of soil moisture dynamics in APSIM model under different tillage treatments

误差	处理	0~5 cm	5~10 cm	10~30 cm	30~50 cm	50~80 cm	80~110 cm	110~140 cm	140~170 cm	170~200 cm
均方根误差 (RMSE)	免耕(NT)	1.206	1.118	1.059	1.572	0.881	0.938	0.775	0.931	0.733
	免耕覆盖(NTS)	0.806	1.434	0.758	1.058	0.934	1.344	0.611	0.256	0.865
	翻耕覆盖(TS)	0.770	0.864	1.661	1.056	0.673	1.017	0.548	0.387	0.452
	传统耕作(T)	1.065	1.315	1.328	1.581	1.694	1.648	1.043	1.121	0.923
归一化均方 根误差 (NRMSE)	免耕(NT)	14.8	10.8	8.8	10.5	5.6	6.0	4.8	5.9	4.7
	免耕覆盖(NTS)	9.2	14.1	6.1	7.8	6.2	8.7	3.7	1.6	5.1
	翻耕覆盖(TS)	8.9	7.7	10.9	7.6	4.7	6.3	3.3	2.3	2.9
	传统耕作(T)	10.7	12.9	8.9	11.2	11.3	9.7	6.4	6.7	5.4

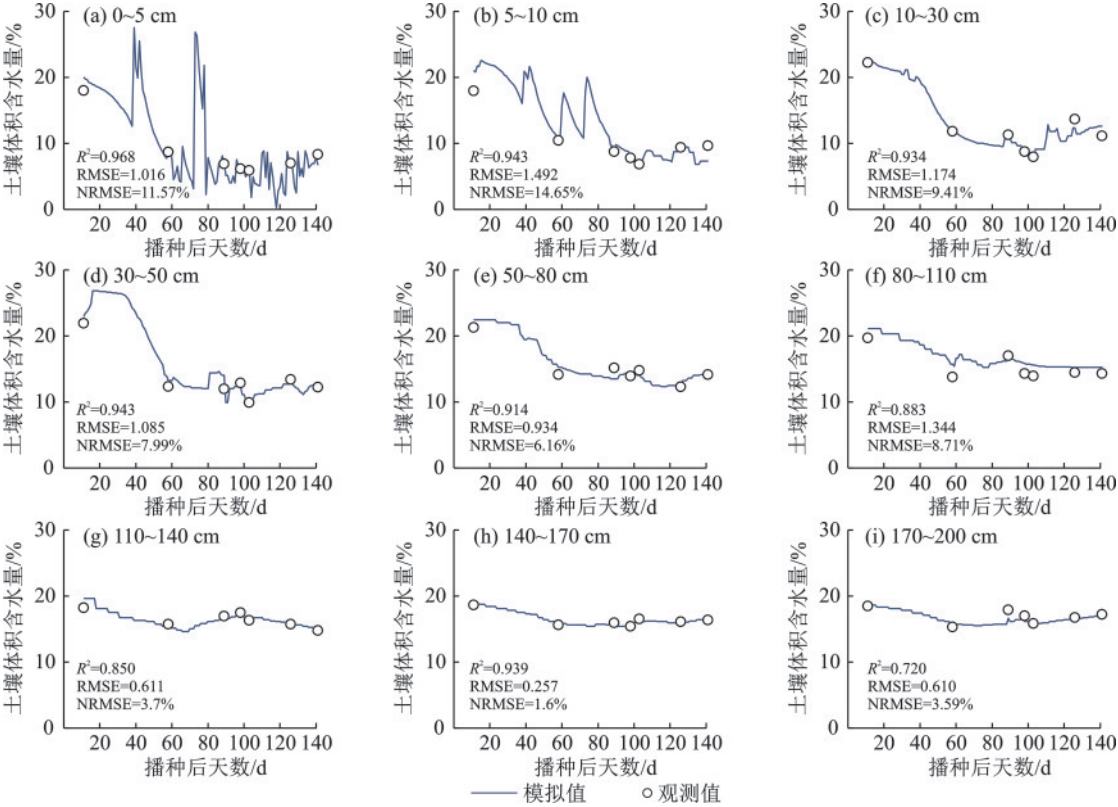


图 5 2025 年免耕秸秆覆盖条件下不同深度土壤体积含水量的模拟值与观测值对比

Fig.5 Comparison between simulated and measured soil volumetric moisture content at different depths under no-tillage with straw mulching in 2025

2.3.3 不同耕作措施下模拟水分生产力的长期变化
利用历史气象数据对 2002—2025 年的春小麦籽
粒产量进行模拟(图 7)可知,各处理产量的年际变化
虽受降水制约,但不同耕作措施的产量稳定性差异
显著,NTS 处理在多数年份都表现出产量优势,且在
降水波动年,产量降幅也较低。不同耕作措施下,春
小麦产量为 774.2~2 347.20 kg/hm²,传统耕作(T)、
免耕(NT)、传统耕作+秸秆翻入(TS)、免耕+秸秆
覆盖(NTS)产量的平均值分别为 1 309.83、1 482.14、
1 572.22、1 919.76 kg/hm²。

模拟结果显示,耗水量(ET)和水分利用效率
(WUE)在年际间也随降雨量变化,在长周期模拟结
果中,T、NT、TS、NTS 变化范围分别为 183.6~
437.5、194.2~454.3、226.2~456.7、233.0~468.1 mm,各
处理下的 ET 平均值分别为 310.5、328.5、345.1、357.1
mm。WUE 的变化与春小麦产量的变化一致,不同
耕作下春小麦 WUE 的变化范围为 2.72~8.04 kg/
(hm²·mm),NTS 处理的 WUE 变化范围为 3.82~8.04
kg/(hm²·mm),T、NT、TS、NTS 各处理的平均值分
别为 4.47、4.92、4.93、5.6 kg/(hm²·mm)。

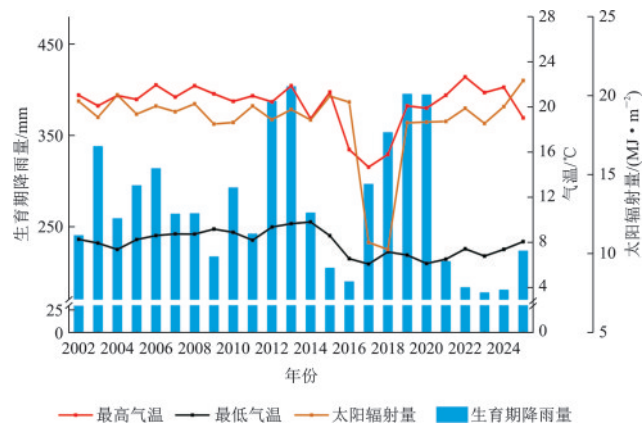


图 6 试验点气候条件的年际变化特征

Fig.6 Interannual variation characteristics of climate conditions at experimental site

结合正态分布分析(图8)可知,NTS处理的耗水量、产量的中位数显著高于其他处理,且上四分位数处于较高区间,NT、T处理产量处于较低水平,且数据分布集中,离散程度较低。NTS处理的水分利用

效率中位数也明显高于NT、TS、T处理。综上所述,免耕秸秆覆盖(NTS)处理能较好地协同耗水量与产量的关系,进而在年际降水波动中保持较高的产量稳定性,显著优于其他耕作措施。

2.3.4 应用场景 2:不同施氮情景下旱作农田水分生产力长周期模拟 基于本地化校准的模型,进一步以免耕秸秆覆盖(NTS)耕作为基础耕作措施(情景模拟结果1),设置由0~212.5 kg/hm²的氮肥梯度,增量为12.5 kg/hm²,共18个施氮水平。模拟过程中,施氮方式、施用时期及田间管理措施均与长期定位试验保持一致,即所有氮肥均在播种期一次性基施,以保证不同施氮水平之间仅存在施氮量这一单一变量差异。利用2002—2025年试验地的长期历史气象资料,模拟免耕秸秆覆盖(NTS)下不同施氮梯度春小麦的耗水量(ET)、产量和水分利用效率(WUE),探究长周期不同施氮梯度对春小麦水分生产力的影响,为优化该地区农业生产管理措施提供一定的科学依据。

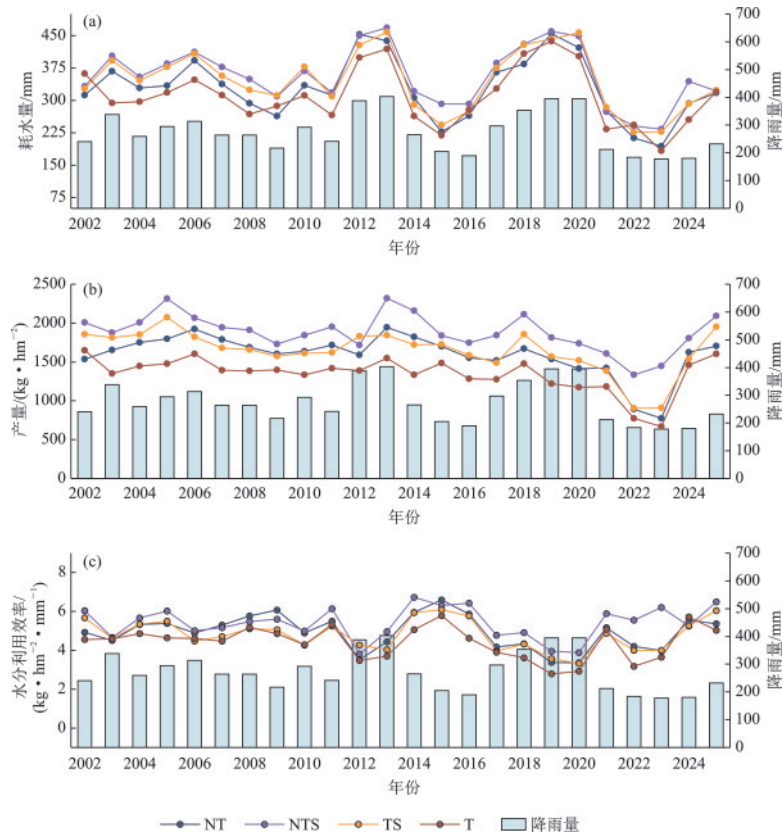


图 7 长周期下不同耕作措施春小麦耗水量和水分生产力模拟

Fig.7 Simulation of water consumption and water productivity of spring wheat under different tillage practices over long-term simulation

由图9可知,春小麦产量对氮肥响应显著,随着施氮量从N₀(0 kg/hm²)提升到N₉(112.5 kg/hm²),春小麦产量显著提高,继续增加氮肥至N₁₀,春小麦产量处于平稳阶段,再增加氮肥,春小麦产量开始下降,可能是过量氮肥遏制了春小麦的生长。从多年平均产量看,NTS处理在N₉施氮量下产量达到最大值

(1 957.53 kg/hm²)。耗水量随施氮梯度的变化表现为持续增加,施氮量超过N₁₀后,耗水量增量明显平缓。WUE变化趋势在不同施氮梯度下与产量变化相似,随施氮梯度呈先升后降的单峰曲线,峰值出现在适中的施氮区间(N₈~N₁₀),当施氮过量时,产量趋于下降但仍维持高耗水,导致水分利用效率下降。

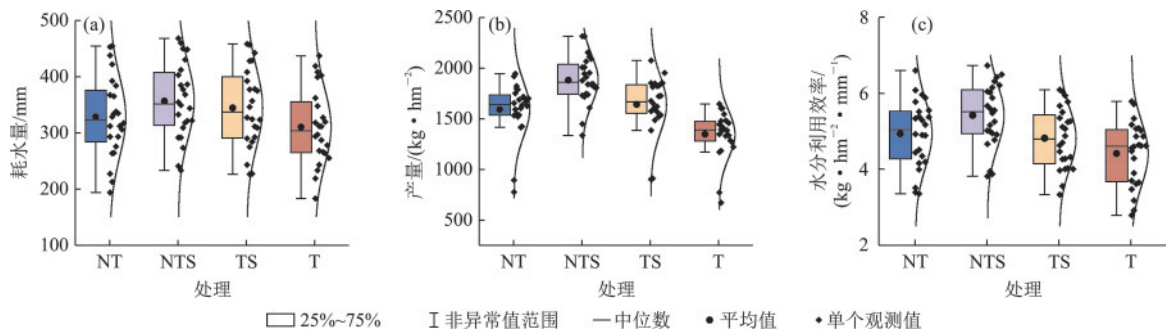


图8 基于箱线图与正态分布的不同耕作处理下作物耗水量、产量及水分利用效率比较

Fig.8 Comparison of crop water consumption, yield, and water use efficiency under different tillage treatments based on boxplots and normal distributions

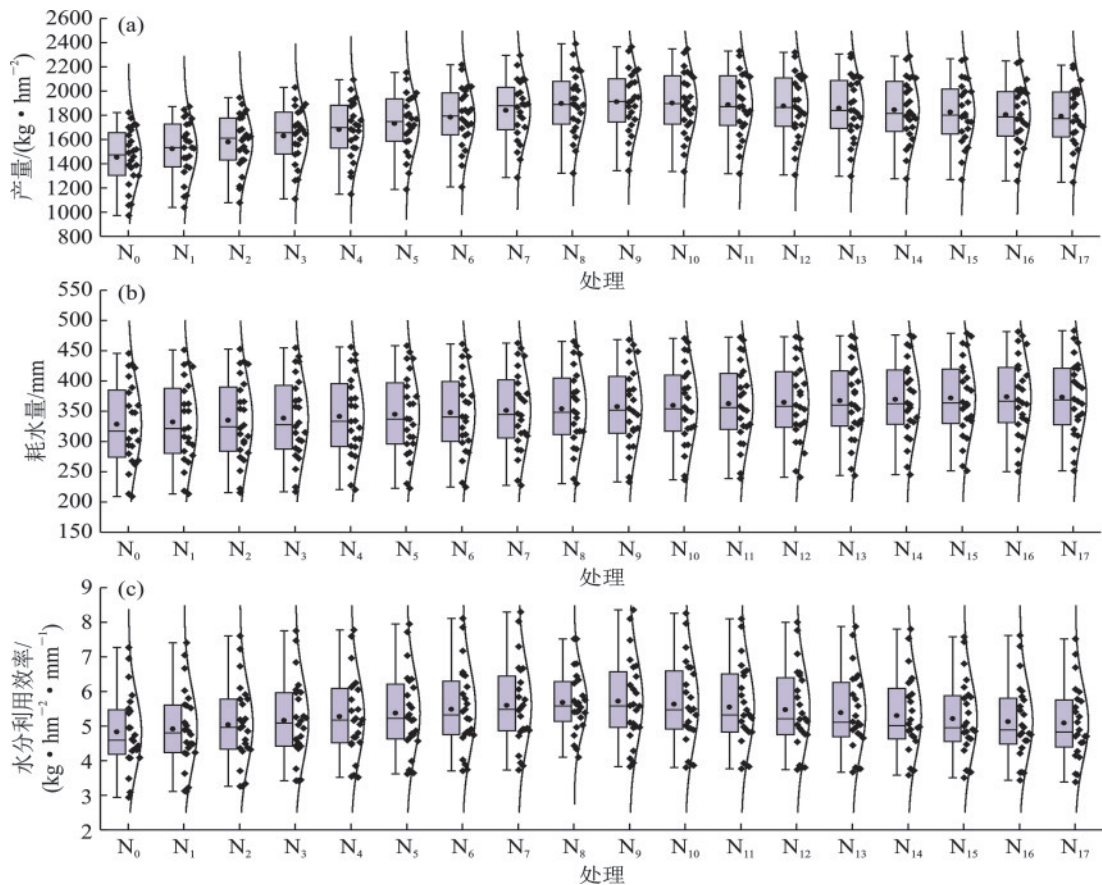


图9 不同施氮情景下春小麦水分生产力变化

Fig.9 Variations in water productivity of spring wheat under different nitrogen application scenarios

3 讨论

3.1 产量与土壤水分验证

本研究为 APSIM 模型模拟旱作农田作物生长、粮食产量和土壤水分动态对耕作措施 的响应提供证据。APSIM 模型较为准确地预测旱作农田春小麦的物候期,不同耕作条件下 2024—2025 年的拔节期、开花期及灌浆期的模拟值与观测值之间的差异在可接受范围内,不同耕作的平均 RMSE 均 <4 d,与王钧等^[19]在黄土高原地区的研究结果一致。通过 2 a 模型模拟产量的校准与检验来看,评价指标均表现出较高的一致性,不同耕作下春小麦 2 a 产量的 R^2 分别

为 0.899 和 0.978,平均 RMSE 在 100 kg/hm² 以内, NRMSE 为 0.3%~5.2%,一致性指数 (D) 为 0.898~0.968。2 个试验年份叶面积指数观测值和模拟值的 R^2 分别为 0.938 和 0.978, RMSE 为 0.09~0.32 m²/m², NRMSE 为 7.5%~24.5%。APSIM 模型在模拟土壤水分动态方面表现较为出色,不同耕作措施和土层深度的 NRMSE 为 1.6%~14.8%,与前人^[20-21]利用 APSIM 模型模拟不同耕作措施下春小麦生长发育和土壤水分动态的适用性研究结果一致。

尽管 APSIM 模型在春小麦生长发育和产量形成的大多数指标上表现出较高精度,但本研究中各

指标和处理的模拟精度仍与前人研究存在一定差异,可能与试验地点生态条件、供试品种特性及管理细节不同而呈现差异。如模型低估春小麦前期的叶面积指数,可能原因是本研究地气候干旱少雨,而春小麦叶面积形成对短期降雨过程和群体生长状况较为敏感,本研究观测年份较少、观测时点有限,难以完全捕捉冠层快速变化过程。在土壤水分方面,模型在模拟表层土壤含水量的准确性略低于深层,主要源于该层水分动态受降水、风力及覆盖物分布等外界环境因素影响最为直接,其本身实测准确性往往也较低。与前人研究相比,本研究对物候、叶面积指数、产量和土壤水分进行多指标综合验证,为后续长期水分生产力与施氮情景模拟提供更可靠的模型基础。综合考虑结果来看,APSIM 模型可以用于指导陇中旱农区及类似地区的农业生产实践。

3.2 水分生产力的长周期模拟

基于 APSIM 模型对陇中旱农区春小麦水分生产力开展的 20 a 以上长周期模拟试验,有效弥补短期试验在揭示气候波动响应与耕作措施后效方面的局限性,为评估不同耕作模式在年际降水变异条件下的稳定性提供可靠依据。长期模拟结果表明,降雨对不同耕作处理的春小麦籽粒产量影响显著,与张凯等^[22]利用 APSIM 模型模拟不同降水和温度水平对春小麦产量的影响研究结果一致。而在不同耕作处理中,产量也表现出较大差异。其中,免耕秸秆覆盖(NTS)处理在维持产量稳定与提升水分利用效率方面表现最为突出,在年际降雨量变异较大的背景下,NTS 处理也表现出产量变异系数最低、降幅最小。由此可见,NTS 处理在降水波动年份表现出更强的产量韧性,凸显其应对气候风险的巨大潜力。

NTS 处理表现出的优势可能源于其对土壤水分和养分条件的持续改善。罗珠珠等^[23]研究指出,以免耕为代表的保护性耕作措施,能改善耕地土壤质量和提高土壤蓄水保肥能力,进而提高作物产量和水分利用效率,是实现农业可持续发展的有效途径;祁小平等^[24]的研究也进一步指出,免耕秸秆覆盖处理具有显著的蓄水保墒作用,能够满足春小麦生长需求,达到节水增产的效果。本研究发现,NTS 处理的优势不仅体现在提高土壤贮水量上,更在于增强有限降水向作物生产耗水的转化效率,使更多水分被用于作物蒸腾和干物质积累,而非无效蒸发损失。因此,NTS 处理虽表现出相对较高的耗水量,但其产量和水分利用效率同步提升,最终表现出更优的综合生产效应。

旱作农业主要依赖自然降水进行生产,水分供给不足和利用效率偏低是制约作物高产稳产的重要因

素。NTS 处理可以减少土壤水分蒸发,显著提高春小麦水分利用效率。但本研究也发现,任何保护性耕作措施对水分的调控能力都存在效能上限,从长周期模拟结果来看,即便在最优的 NTS 措施下,水分利用效率依然受到当年降水格局的强烈制约,其年际波动范围表明任何耕作措施对水分的调控能力均存在限度,难以完全补偿早年下的降雨亏缺。因此,保护性耕作能够缓解水分胁迫,而非彻底弥补早年降水短缺。郭素蓝等^[25]的研究也指出,任何耕作措施对水分的调控能力都是有限的,无法完全克服早年的水分胁迫。

3.3 不同施氮情景的长期模拟

氮肥施用量对旱地作物产量形成具有重要影响,大量研究^[26-27]表明,合理施用氮肥可以促进作物稳产增产,但是过量施用氮肥会造成作物产量下降和环境污染。本研究在不同耕作措施下春小麦水分生产力长期模拟的基础上,聚焦免耕秸秆覆盖措施并设置不同的氮肥梯度,评估保护性耕作条件下施氮量对春小麦水分生产力的影响。长期情景模拟结果表明,随着施氮量的增加,春小麦生育期耗水量呈现增加的趋势,前人的研究结果也表明施氮提高小麦的耗水量,随着施氮量的增加,耗水量强度呈先增加后减少的趋势^[28]。在本研究中,春小麦产量与水分利用效率呈现出单峰变化,在低氮投入阶段,随着施氮量的提升,产量提升显著,水分利用效率也得以同步提升,当施氮量超过 $N_9(112.5 \text{ kg/hm}^2)$ 梯度后,产量进入平台期并随之下降,但作物耗水量仍维持高位甚至略有增加,导致水分利用效率降低,与前人^[29]研究发现的过量施氮导致作物生长与产量下降的结果相吻合。这表明高施氮量的投入并不会使作物的水分生产力持续增加,还可导致减产与水分浪费的问题和风险。

APSIM 模型能够综合气候、土壤、作物及管理措施等因素,对春小麦生长与旱作农田水分生产力进行模拟,是研究农作物生长的一种有效手段。然而,模型模拟毕竟是在一个较为理想的设定下进行,难以考虑各种影响因素,其模拟过程中仍存在不足之处。一方面,本研究模型校准与验证主要基于 2024—2025 年 2 a 的田间观测数据,且物候数据集中于关键生育阶段,总体样本量仍然偏小,对不同年型气候条件和极端环境情景的覆盖尚显不足,可能对模型参数的稳定性及结果外推产生一定影响,今后仍需要通过大量田间数据不断调试验证;另一方面,在本研究中仅考虑耕作、施氮量对农田水分生产力的影响,而现实中作物生长还受到病虫害、气象灾害等因素的影响,后续应进一步完善相关情景设置,以提升模型对实际生产条件模拟的准确性。

4 结 论

1)通过对 APSIM 模型的本地化校准和验证,结果显示 APSIM 模型对陇中旱农区春小麦物候期、叶面积、产量和土壤水分动态进行了较高精度的预测,证实其在研究区具有较好的模型拟合度与适应性。

2)不同耕作措施长期模拟结果显示,免耕秸秆覆盖(NTS)的多年平均产量和水分利用效率分别达到 1 919.76 kg/hm²和 5.6 kg/(hm²·mm),表现为通过优化土壤水分保存与利用过程,实现产量与水分利用效率的协同提升,是适宜该地区春小麦生产的最优耕作模式。

3)NTS 模式下开展的不同施氮水平长期模拟结果表明,最佳施氮量应不超过 112.5 kg/hm²,可以保证最佳产量与水分的高效利用。研究结果有助于当地科学制定春小麦管理措施,为当地农业可持续发展提供一定依据。

参考文献:

- [1] 刘晓琳,卢晓妍,秦张璇,等.退耕还林还草背景下黄土高原粮食生产系统可持续性的时空演变[J].农业工程学报,2022,38(10):249-257.
Liu Xiaolin, Lu Xiaoyan, Qin Zhangxuan, et al. Spatio-temporal changes of the sustainability of grain production system in the Loess Plateau based on Grain for Green Project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 249-257.
- [2] 陈云,李玉强,王旭洋,等.中国生态脆弱区全球变化风险及应对技术途径和主要措施[J].中国沙漠,2022,42(3):148-158.
Chen Yun, Li Yuqiang, Wang Xuyang, et al. Risk and countermeasures of global change in ecologically vulnerable regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 148-158.
- [3] Zhang Yuanhong, Yin Jiade, Guo Zenghui, et al. Simulation of soil water balance and crop productivity of long-term continuous maize cropping under high planting density in rainfed agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 312: e108740.
- [4] 邓超超,李玲玲,谢军红,等.耕作措施对陇中旱农区土壤细菌群落的影响[J].土壤学报,2019,56(1):207-216.
Deng Chaochao, Li Lingling, Xie Junhong, et al. Effects of tillage on soil bacterial community in the dryland farming area of central Gansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 207-216.
- [5] 祁小平,李广,闫丽娟,等.耕作和施肥方式对陇中旱作春小麦氮素利用与硝态氮残留的影响[J].麦类作物学报,2023,43(4):477-486.
Qi Xiaoping, Li Guang, Yan Lijuan, et al. Effects of tillage and fertilization methods on nitrogen use efficiency and nitrate residue of spring wheat in dry farming of central Gansu Province[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(4): 477-486.
- [6] 朱艳,汤亮,刘蕾蕾,等.作物生长模型(CropGrow)研究进展[J].中国农业科学,2020,53(16):3235-3256.
Zhu Yan, Tang Liang, Liu Leilei, et al. Research progress on the crop growth model CropGrow[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(16): 3235-3256.
- [7] Yin Jiade, Liang Jinyu, Hou Huizhi, et al. Modeling optimal nitrogen application rate and placement for maximizing wheat yield in a semi-arid environment using APSIM[J]. Agricultural Water Management, 2025, 321: e109896.
- [8] 何亮,赵刚,靳宁,等.不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J].农业工程学报,2015,31(14):148-157.
He Liang, Zhao Gang, Jin Ning, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 148-157.
- [9] Balwinder-Singh, Gaydon D S, Humphreys E, et al. The effects of mulch and irrigation management on wheat in Punjab, India: Evaluation of the APSIM model[J]. Field Crops Research, 2011, 124(1): 1-13.
- [10] Singh R J, Ward P R, Oliver Y. Modelling the long-term effects of wheat monoculture vs wheat in diversified crop sequences managed with varied crop residue amounts on water-use and grain yields in a Mediterranean dryland[J]. Plant and Soil, 2026, 524(1): 17-36.
- [11] Fletcher A L, Chen Chao, Ota N, et al. Has historic climate change affected the spatial distribution of water-limited wheat yield across western Australia? [J]. Climatic Change, 2020, 159(3): 347-364.
- [12] Wu Lu, Feng Liping, Li Yizhuo, et al. A yield-related agricultural drought index reveals spatio-temporal characteristics of droughts in southwestern China[J]. Sustainability, 2019, 11(3): e714.
- [13] 李广,黄高宝,William Bellotti,等.APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J].生态学报,2009,29(5):2655-2663.
Li Guang, Huang Gaobao, Bellotti W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the loess hill-gullied region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2655-2663.
- [14] 蒲锦琳,王俊,王科锋,等.基于 APSIM 模型的降水和温度变化对秸秆覆盖冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2024,40(21):101-109.
Pu Jinlin, Wang Jun, Wang Kefeng, et al. Response of

- winter wheat yield under straw mulching in dryland to precipitation and temperature using APSIM model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(21): 101-109.
- [15] Keating B A. APSIM's origins and the forces shaping its first 30 years of evolution: A review and reflections [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(3): e24.
- [16] Pasquel D, Cammarano D, Roux S, et al. Downscaling the APSIM crop model for simulation at the within-field scale [J]. Agricultural Systems, 2023, 212: e103773.
- [17] Meier E, Lilley J, Kirkegaard J, et al. Management practices that maximise gross margins in Australian canola (*Brassica napus* L.) [J]. Field Crops Research, 2020, 252: e107803.
- [18] Vogeler I, Cichota R, Langer S, et al. Simulating water and nitrogen runoff with APSIM [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: e105593.
- [19] 王钧, 李广, 聂志刚, 等. 陇中黄土高原区旱地春小麦产量对干旱胁迫响应的模拟研究 [J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 494-506.
- Wang Jun, Li Guang, Nie Zhigang, et al. Simulation study of response of spring wheat yield to drought stress in the Loess Plateau of central Gansu [J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 494-506.
- [20] 聂志刚, 冯仰强, 董莉霞, 等. 不同降水年型下温度升高对旱地春小麦产量的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(7): 1151-1158.
- Nie Zhigang, Feng Yangqiang, Dong Lixia, et al. Effect of temperature increase on dryland spring wheat yield in different precipitation years [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7): 1151-1158.
- [21] 茹晓雅, 李广, 陈国鹏, 等. 不同降水年型下水氮调控对小麦产量及生物量的影响 [J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1725-1734.
- Ru Xiaoya, Li Guang, Chen Guopeng, et al. Regulation effects of water and nitrogen on wheat yield and biomass in different precipitation years [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(11): 1725-1734.
- [22] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 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 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊1): 161-170.
- Zhang Kai, Wang Runyuan, Feng Qi, et al. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S1): 161-170.
- [23] 罗珠珠, 蔡立群, 李玲玲, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 171-176.
- Luo Zhuzhu, Cai Liqun, Li Lingling, et al. Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 171-176.
- [24] 祁小平, 李广, 袁建钰, 等. 保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响 [J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 312-321.
- Qi Xiaoping, Li Guang, Yuan Jianyu, et al. Effects of conservation tillage on the water storage, moisture conservation, and yield of dry-land wheat fields of central Gansu Province [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 312-321.
- [25] 郭素蓝, 杜媛, 王琳, 等. 施肥对旱地农田土壤水分及玉米产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2025, 31(5): 915-925.
- Guo Sulan, Du Yuan, Wang Lin, et al. Effects of fertilization on soil moisture and maize yield in dryland farmland [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2025, 31(5): 915-925.
- [26] 常甜, 谷晓博, 蔡文璟, 等. 适宜种植密度和施氮量对提高冬小麦产量和水氮利用效率的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 56-68.
- Chang Tian, Gu Xiaobo, Cai Wenjing, et al. Effects of suitable fertilizer-N application rate and planting density on increasing yield, water and nitrogen use efficiency of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(24): 56-68.
- [27] 吕广德, 王超, 靳雪梅, 等. 水氮组合对冬小麦干物质及氮素积累和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2593-2603.
- Lyu Guangde, Wang Chao, Jin Xuemei, et al. Effects of water-nitrogen combination on dry matter, nitrogen accumulation and yield of winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2593-2603.
- [28] Wang Ning, Zhang Tonghui, Cong Anqi, et al. Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: e108566.
- [29] 马瑞琦, 常旭虹, 刘安康, 等. 减量施氮协同提升强筋小麦产量和品质 [J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 172-187.
- Ma Ruiqi, Chang Xuhong, Liu Akang, et al. Coordinated improvement of yield and quality of strong gluten wheat by reducing exogenous nitrogen application [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2023, 29(1): 172-187.