麦类作物学报 2026,46(10):1399－1412
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.14

网络出版时间:2026-05-25
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260525.1038.004

基于 APSIM 模型的陇中旱地春小麦保护性耕作水分生产力模拟

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,甘肃兰州 730070;2.干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃兰州 730070)

摘 要:为探究长期保护性耕作对春小麦水分生产力的影响,评估不同降水年型下耕作措施的产量稳定性,依托甘肃农业大学定西旱作农业综合实验站 2001 年设立的长期保护性耕作定位试验,设置传统耕作(T)、免耕(NT)、传统耕作＋秸秆翻入(TS)、免耕＋秸秆覆盖(NTS)4 个处理,利用 2024—2025 年的田间试验数据对 APSIM 模型进行校准和验证,应用该模型对 2002—2025 年不同耕作措施下土壤有机碳及春小麦的水分生产力进行模拟。结果表明,APSIM 模型在研究区具有较好的预测精度和适应性,2024－2025 年春小麦物候期的观测值与模拟值的归一化均方根误差(NRMSE)均小于 15%;两年间不同耕作措施下春小麦产量模拟值与实测值均呈显著正相关,决定系数分别为 0.899 和 0.978,NRMSE 分别为 4.6%和 2.3%,一致性指数均大于 0.90;模型模拟的春小麦全生育期土壤储水量与实测值的 NRMSE 分别为 6.5%和 7.2%,说明该模型能够较准确模拟麦田土壤水分生产力相关指标。经长期(2002－2025)模拟,降水是影响该地区春小麦生产的关键因素。农田生产力的稳定性和可持续性在平水年最高,枯水年最低;丰水年和平水年间春小麦产量无显著差异,但均显著高于枯水年,增幅分别为 23.2%和 22.4%;不同降水年型下免耕秸秆覆盖表现出显著优势,具体表现为 0～30 cm 土层土壤有机碳储量以及春小麦产量和水分利用效率均高于其他耕作措施,且在应对水分不足时,表现出较好的产量稳定性与农田生产可持续性。综合来看,免耕秸秆覆盖是适宜当地作物高产、稳产的有效耕作措施。

关键词:陇中旱农区;春小麦;APSIM 模型;耕作措施;水分生产力

中图分类号:S512.1;S314 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1399-14

Simulation of Water Productivity under Conservation Tillage for Spring Wheat in Dryland Areas of Central Gansu Based on the APSIM Model

Zhao Wei[1,2], **Li Lingling**[1,2], **Zhang Yuanhong**[1,2], **Zhu Zhen**[1,2], **Wu Hutao**[1,2]

(1. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Aridland Crop Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To investigate the impact of long-term conservation tillage on spring wheat water productivity and evaluate yield stability under different precipitation patterns, this study utilised a long-term conservation tillage plot trial established in 2001 at the Dingxi Dryland Agriculture Comprehensive Experimental Station of Gansu Agricultural University. Four treatments were implemented: conventional tillage(T), no-tillage(NT), conventional tillage with straw incorporation(TS), and no-tillage with straw mulching(NTS). Field data from 2024－2025 were used to calibrate and validate the APSIM model, which was then applied to simulate soil organic carbon and spring wheat water productivity under different tillage practices from 2002 to 2025. The results showed that the APSIM model demonstrated good accuracy and adaptability in the study area, with the normalized root mean square

收稿日期:2026-02-07 修回日期:2026-03-07

基金项目: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 E-mail:3030727494@qq.com(赵 位)

通讯作者 E-mail:lill@gsau.edu.cn(李玲玲); zhangyuanh@gsau.edu.cn(张元红)

error(NRMSE) between observed and simulated phenological phase values of spring wheatt in 2024—2025 below 15%. Simulated spring wheat yield under different tillage practices showed significantly positive correlations with observed values over the two years, with coefficients of determination of 0.899 and 0.978, respectively. The NRMSE was 4.6% and 2.3%, respectively, and the coefficient of determination exceeded 0.90 in all cases. The NRMSE between model-simulated and observed soil water storage throughout the spring wheat growth period was 6.5% and 7.2%, respectively, indicating the model's capability to accurately simulate indicators related to soil moisture productivity in wheat fields. Long-term simulation results indicated precipitation was the key factor influencing spring wheat production in this region. Farmland productivity stability and sustainability peaked in normal-precipitation years and were lowest in drought years. Spring wheat yield showed no significant difference between wet and normal years but was markedly higher than that in drought years, with an increase rate of 23.2% and 22.4%, respectively. The no-tillage straw mulching(NTS) treatment demonstrated significant advantages under various tillage practices and precipitation patterns. Specifically, it exhibited higher organic carbon storage(0—30 cm), yield, and water use efficiency than other treatments. Moreover, it demonstrated superior yield stability and field sustainability when confronting water shortages. Over all no-tillage straw mulching is an effective tillage practice suitable for achieving high and stable crop yield in the local context.

Keywords: Arid farming region of central Gansu; Spring wheat; APSIM model; Tillage practices; Water productivity

干旱与降水分布不均是中国粮食安全与农业可持续发展面对的首要难题[1]。而水分作为作物进行生理代谢的重要成分,其亏缺将直接影响作物产量形成,尤其在水资源短缺的黄土高原旱作农业区表现尤为突出。该地区年均降水量仅 250～600 mm,且年际降水波动显著,年内降水分布不均,约 60～70%集中在 7—9 月份[2]。春小麦是该地区的主要粮食作物,但降雨时空分布与作物需水规律错位,严重限制了该地区春小麦生产的可持续性和稳定性。同时,不合理耕作破坏土壤结构,增加了土壤蒸发和有机质矿化,导致土壤水分和养分亏缺,加剧了水土流失[3-4]。因此,如何利用有限的降水和合理的耕作方法提高作物生产力是亟待解决的问题。

保护性耕作被认为能有效缓解水土流失,改善和维持农田生态环境,已成为半干旱区农业可持续发展的有效途径之一。近年来,在陇中旱区保护性耕作技术应用已经有了大量成果[5-7]。保护性耕作能够改善土壤理化性质,提高农田水分利用效率,实现保水、保肥和增产,有效促进农田生态系统的良性循环,提高资源利用率[8]。其中,秸秆覆盖作为一种有益的覆盖措施,不仅有助于调节土壤温度,提高土壤肥力,进而提升作物产量,还能减少地表径流,增强雨水入渗,在一定程度上缓解旱区降水不足对作物生长的影响[9]。

陇中黄土高原地区不同降水年型下小麦产量波动大,而产量变化是作物对田间管理措施的综合响应。但受限于传统田间试验时间跨度、地理位置、作物生长周期长等因素,难以全面评估保护性耕作措施的长期生态效应,而作物生长模型为定量评估提供了有效工具[10-11]。APSIM 模型能够整合气候、土壤、作物生理及环境因子,实现对农田生态系统中水分、养分变化及作物生长与产量形成过程的动态模拟,可以对保护性耕作在农业生产系统中的长期效应与可持续性进行有效评估[12-13]。近些年来,APSIM 模型在黄土丘陵区春小麦生长模拟适用性及气候变化效应分析的研究中得到了广泛应用[14-16]。但目前有关降水与不同耕作措施对土壤水分与春小麦产量之间的交互机理研究较少。因此,在陇中旱区特殊的气候条件下,评估长期保护性耕作在作物节水增产、产量稳定性和可持续性方面生态效应具有重要意义。

本研究依托甘肃农业大学定西旱作农业综合试验站的保护性耕作长期定位试验(始于 2001 年),在研究区春小麦相关参数本土化率定的基础上,对 APSIM 模型进行校准和验证,应用 APSIM 模型模拟分析了 2002—2025 年不同耕作措施对旱地春小麦水分生产力的影响,评估长期应用保护性耕作时在不同降水年型下春小麦产量的稳定性和可持续性,以期为半干旱区春小麦耕作

措施优化提供理论指导,以促进旱地农业的可持续发展。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区李家堡镇甘肃农业大学定西旱作农业综合实验站(35°28′N,104°44′E)。该站点位于黄土高原西部,属中温带半干旱区,为典型的雨养农业区。试验地海拔 1 971 m,年均太阳辐射 592.9 kJ·cm^{-2},年日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4 ℃,≥0 ℃积温 2 933.5 ℃,≥10 ℃年积温达 2 239.0 ℃,无霜期约 140 d。该站点模拟期间全年平均降水量(2002—2025)为 401.3 mm,春小麦生育期内平均降水量为 274.7 mm,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,质地均匀,贮水性能良好;耕层土壤容重 1.19 g·cm^{-3},pH 值 8.36,全氮含量 0.76 g·kg^{-1},全磷含量 1.77g·kg^{-1}。

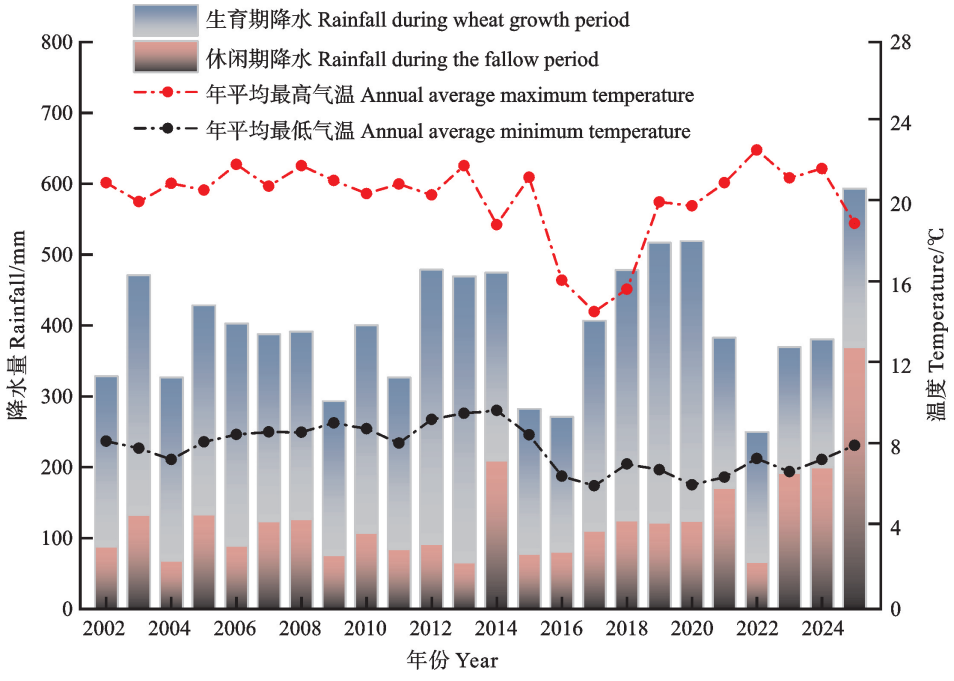


图 1　2002—2025 年模拟期间试验点降水及气温情况

Fig. 1　Rainfall and temperature conditions at test sites during the 2002－2025 simulation period

1.2　田间及情景模拟试验设计

1.2.1　保护性耕作定位试验处理设计

本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),前茬作物收获后至土壤冻结前,进行三耕两耱;传统耕作＋秸秆翻入(TS),操作方式同 T 处理,但第 1 次耕作时将所有前茬作物秸秆翻入土壤;免耕(NT),全年不耕作,免耕播种机在播种时一次性完成施肥和播种;免耕＋秸秆覆盖(NTS),整个试验期采取完全免耕,利用免耕播种机一次性完成施肥和播种,脱粒收获后全部作物秸秆覆盖在原小区。每个处理重复 3 次,共 12 个小区,小区面积为 80 m^2(4 m × 20 m)。供试春小麦为当地主栽品种定西 40 号。春小麦播种量为 187.5 kg·hm^{-2},行距 20 cm,各处理施纯氮(N)105 kg·hm^{-2},纯磷(P_2O_5)105 kg·hm^{-2},上述肥料全部作为基肥,与播种作业同步进行。春小麦于 3 月中下旬播种,7 月下旬收获。

1.2.2　情景模拟试验设计

基于 2024—2025 年的大田实测数据对 APSIM 模型进行参数校准和检验,在整个模拟过程中,除耕作措施因素发生改变,其他田间管理措施参数、作物参数与土壤参数均与大田试验保持一致。

为准确模拟不同耕作措施的蓄水保墒与增产固碳效应,在 APSIM 模型中通过设置土壤与管理模块的相关参数来区分 4 种耕作处理。参数主要通过耕作深度、耕作宽度、耕作速度、地表残茬混入比例、秸秆还田量、碳氮比根系吸水效率对不同耕作措施进行量化描述,各处理的关键参数设置与取值见表 1。

表 1 不同耕作处理部分参数及其取值

Table 1 Parameters and their values for different tillage treatments

参数名称 Parameter name	耕作方式 Tillage practice			
	NT	NTS	TS	T
耕作深度 Tillage depth/mm	0	0	200	200
耕作宽度 Tillage width/m	0	0	1.5	1.5
耕作速度 Tillage speed/(km · h^{-1})	0	0	7.2	7.2
土壤紧实度 Soil compaction	0	0	0.15	0.15
残茬混入比例 Proportion of stubble incorporated (0～1)	0	0	0.6	0.6
秸秆还田量 Straw return to the field/(kg · hm^{-2})	0	4 500	4 500	0
根系吸水效率 Root water uptake efficiency/(mm · mm^{-1})	0.09	0.09	0.07	0.07
碳氮比 Carbon-to-nitrogen ratio	30	30	30	30

1.3 模型与检验方法

1.3.1 APSIM 模型简介

APSIM(agricultural production system simulator)模型是可以用于模拟旱作农业系统中各主要组成的机理模型[19-20],可以结合土壤参数模块、作物参数模块、气候参数模块和管理参数模块来创建农业管理方案,以实现对不同气候、管理条件下农田生态系统作物的生长发育及产量形成和土壤变化过程的动态模拟。它可通过多年连续模拟,分析长期气候波动和变化对于农业生态系统的影响。APSIM 模型的特点之一就是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。近年来该模型已广泛应用于探究不同气候、区域下的作物生长差异,评估气候变化对作物生产的潜在风险、优化大田管理措施等方面[21-22]。

1.3.2 参数来源

本研究采用的模型是 APSIM 7.10,模型校准与检验所需要的小麦物候期、产量及土壤水分等数据均来源于 2024—2025 年的田间实测。其中,2002—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 · m^{-2})、逐日最高气温(℃)和逐日最低气温(℃);土壤数据库来源于田间实测及前人在研究区长期积累的土壤属性数据(表 2);小麦生长发育特征、品种数据和田间管理数据均来源于甘肃农业大学定西试验点实测数据。模型的作物品种参数参考李广等[17]关于 APSIM 模型在陇中黄丘陵沟壑区适用性研究中的验证数据,通过“试错法”[18]对春小麦品种遗传参数进一步调整(表 3),其余数据均由 APSIM 模型模拟获得。

1.3.3 模型检验方法

APSIM 模型的评价采用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、归一化均方根误差(NRMSE)和一致性指数(D)3 个标准统计参数来实现。其中,NRMSE 值越小,误差越小,模拟准确度越好;R^2 和 D 的值越接近 1,模型拟合程度和稳定性越好[23-24]。

表 2 试验点土壤理化参数

Table 2 Soil physicochemical parameters at the test site

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/(g · cm^{-3})	pH	田间持水量/(mm · mm^{-1})	饱和含水量/(mm · mm^{-1})	小麦水分吸收下限/(mm · mm^{-1})	有机碳含量/%
0～5	1.29	8.1	0.27	0.46	0.09	1.01
5～10	1.23	8.2	0.27	0.49	0.09	0.99
10～30	1.32	8.3	0.27	0.45	0.09	0.84
30～50	1.20	8.4	0.27	0.50	0.09	0.83
50～80	1.14	8.3	0.26	0.52	0.09	0.83
80～110	1.14	8.3	0.27	0.52	0.10	0.83
110～140	1.13	8.3	0.27	0.48	0.11	0.83
140～170	1.12	8.3	0.27	0.53	0.13	0.83
170～200	1.11	8.3	0.27	0.53	0.15	0.83

表 3　APSIM 中春小麦主要属性参数

Table 3　Parameters of the properties of wheat in APSIM

参数名称	参数值 Value	单位 Unit
春化敏感因子 Vernalization-sensitive factor	1.00	—
光周期敏感因子 Photoperiod-sensitive factor	2.00	—
单位茎秆干物质的籽粒数 Grains per stem	25.00	grains · g^{-1} · $stem^{-1}$
灌浆期到成熟期的积温 Accumulated temperature from grain-filling to maturity	585.00	℃ · d
灌浆速率 Filling rate	2.30	mg · $grain^{-1}$ · d^{-1}
单株重 Single plant weight	4.00	g
株高 Plant height	1 000.00	mm
最大谷粒重 Maximum grain weight	0.045	g

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

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

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

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

式中,O_i 为实测产量,S_i 为模拟产量,$\overline{O}$ 为实测产量的平均值,$\overline{S}$ 为模拟产量平均值。

1.4　数据处理

1.4.1　降水年型的划分

利用春小麦生育年概念,基于试验站统计 2002—2025 年春小麦生育年降水量,根据干旱指数(DI)划分枯水年、平水年、丰水年。

$$\mathrm{DI}=\frac{P-P_m}{\sigma}$$

枯水年:DI<0.35;平水年:−0.35<DI<0.35;丰水年:DI>0.35。式中 P 为生育年降水量(mm);P_m 为生育年平均降水量(mm);σ 为标准差[25]。

1.4.2　土壤贮水量(SW)计算

$$\mathrm{SW}=\sum_{i=1}^{n}(h_i\times p_i\times w_i)\times 10$$

式中,h_i 为第 i 个土层厚度(cm);p_i 为第 i 个土壤容重(g · cm^{-3}),w_i 为第 i 个土壤质量含水量,10 为单位换算系数,n 为土壤层次。

1.4.3　土壤有机碳(SOC)储量

$$\text{SOC 储量}=\sum_{i=1}^{n}(C_i\times d_i\times h_i)$$

式中,i 表示土壤土层;C_i 表示土壤有机碳含量(g · kg^{-1});d_i 表示土壤容重(g · cm^{-3});h_i 表示土壤深度(m)。

$$\text{土壤有机碳年均积累速率 } R_{\mathrm{SOC}}=\frac{\mathrm{SOC_e}-\mathrm{SOC_i}}{T}$$

式中,$\mathrm{SOC_e}$ 模拟最后一年的土壤有机碳储量;$\mathrm{SOC_i}$ 为模拟初始年份的土壤有机碳储量;T 为模拟总年限。

1.4.4　作物生产力稳定性和可持续性评估

利用变异系数 CV(coefficient of variation)和可持续产量指数 SYI(sustainable yield index)来评价不同耕作处理和不同降水年类型下的生产力稳定性和可持续性。其中,CV 值越小,表明稳定性越强;SYI 值越高,表明生产力可持续性越高[26]。计算公式为:

$$\mathrm{CV}=\frac{\sigma}{\overline{Y}}$$

$$\mathrm{SYI}=\frac{(\overline{Y}-\sigma)}{Y_{\max}}$$

式中,σ 为产量标准差(kg · hm^{-2});$\overline{Y}$ 为模拟产量平均值(kg · hm^{-2});$Y_{\max}$ 为历年产量最大值。

1.4.5　数据分析

采用 Microsoft Excel 2022 进行数据整理,通过 IBM SPSS Statistics 25.0 中单因素 ANOVA 检验下的 LSD 法($\alpha=0.05$)进行显著性分析。采用 Origin 2021 进行线性拟合和数据可视化。

2　结果与分析

2.1　APSIM 模型的适应性验证结果

2.1.1　物候期

经模型模拟,2024—2025 年春小麦物候期的模拟值与实测值基本一致。拔节期、开花期和灌浆期平均 RMSE 分别为 1.69～1.95、0.73～0.92 和 1.62～2.00 d,平均 NRMSE 分别为 6.85%、11.21% 和 5.24%。拔节期、开花期和灌浆期的观测值范围分别为 58～62、84～87 和 97～101 d(DOY 表示日序,指从播种起的天数),DOY 模拟值范围分别为 60～63、85～89 和 98～104 d,模拟值普遍比观测值晚 2～3 d,可能由于小麦生育期内降水较少,导致生育进程加快导致,且春小麦开花期较短,使得模拟精度较差(NRMSE 偏大)。

表 4 2024—2025 年 APSIM 模型物候期模拟结果指标统计与评价

Table 4 Indicator statistics and evaluation of the simulation results of the APSIM model for the phenological period from 2024 to 2025

项目 Item	年份 Year	拔节期 Jointing stage		开花期 Anthesis stage		灌浆期 Grain-filling stage	
		RMSE/d	NRMSE/%	RMSE/d	NRMSE/%	RMSE/d	NRMSE/%
模型校准 Model calibration	2024	1.69	6.48	0.92	10.17	1.62	5.21
模型检验 Model validation	2025	1.95	7.23	0.73	12.24	2.00	5.27
平均 Average		1.82	6.85	0.83	11.21	1.81	5.24

RMSE：均方根误差；NRMSE：归一化均方根误差。

RMSE: Root mean square error; NRMSE: Normalized root mean square error.

2.1.2 产量

试验区 2024—2025 年春小麦产量的实测值和模拟值均呈线性正相关，决定系数（R^2）分别为 0.899 和 0.978，一致性指数 D 均大于 0.9（图 2）。不同耕作处理产量模拟的 RMSE 均小于 100 kg·hm^{-2}，NRMSE 分别为 4.6%和 2.3%，表明 APSIM 模型模拟精度较高，在该地区有较高的预测准确性和适用性，可以用于产量的模拟。

2.1.3 土壤水分动态

选取了免耕秸秆覆盖措施（NTS）为代表，模拟了 2024—2025 年小麦全生育期 0～200 cm 土层土壤储水量的动态变化（图 3）。不同年份间 NTS 处理的土壤储水量模拟值与观测值间的 R^2 均大于 0.75，RMSE 分别为 21.43 和 25.90 mm，NRMSE 分别为 6.5%和 7.2%。结果表明，APSIM 模型中的土壤水分模块能够较为准确地模拟研究地区麦田的土壤水分动态变化。

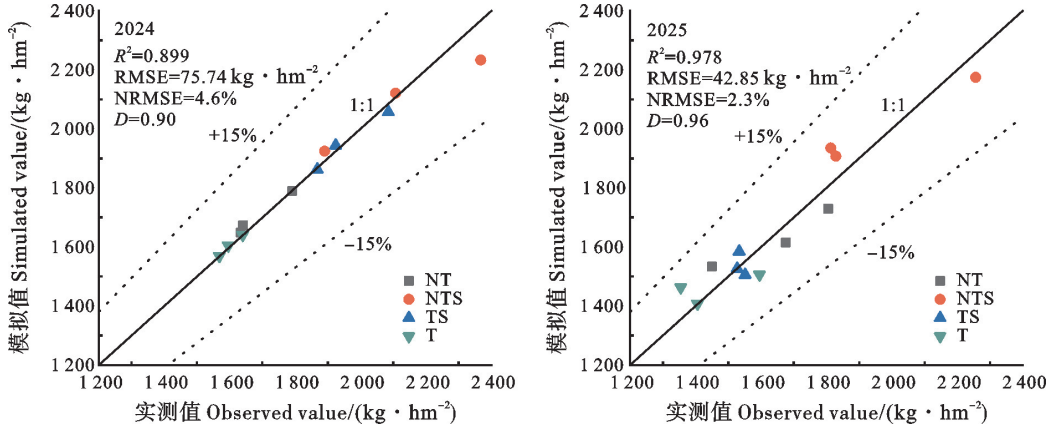


图 2 2024—2025 年春小麦实测产量与模拟产量的线性拟合关系

Fig. 2 Linear fit between measured and simulated values of spring wheat yield from 2024 to 2025

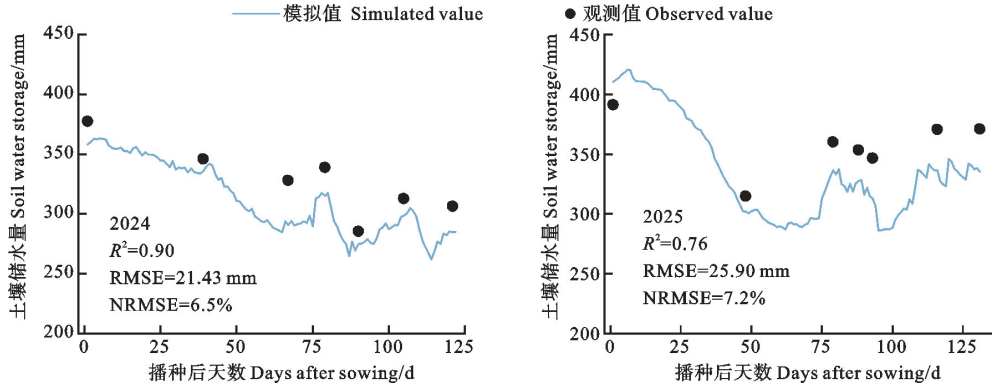
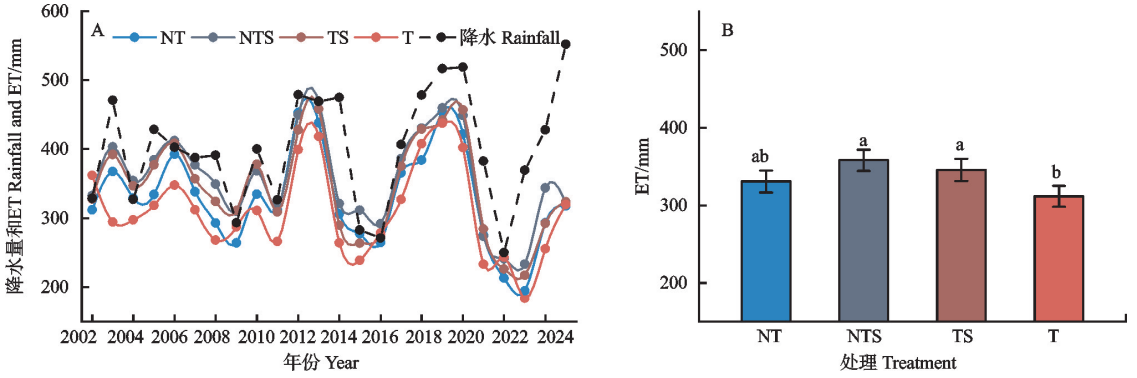


图 3 2024－2025 年 NTS 处理下 0～200 cm 土壤储水量

Fig. 3 Soil water storage from 0 to 200 cm under NTS treatment in 2024－2025

2.2　2002—2025 年不同耕作处理下小麦耗水量的变化动态模拟结果

模拟结果(图 1 和图 4)表明,不同耕作措施下旱地春小麦耗水量(ET)均随生育期降水量的变化而变化。在 24 年模拟结果中,T、NT、TS、NTS 处理的 ET 变化范围分别为 183.6～437.5、194.2～454.3、226.2～456.7 和 233.02～468.1 mm,ET 均值分别为 311.3、330.6、345.5 和 357.9 mm,标准差依次为 64.80、68.02、68.67 和 65.20 mm,变异系数分别为 20.81%、20.58%、19.88% 和 18.21%(表 5)。经统计分析,耕作措施对旱地春小麦 ET 的影响达到 0.05 显著水平,NTS 处理的 ET 值较 TS、NT、T 处理分别增加了 3.6%、8.3%和 14.9%。



图柱上不同小写字母表示处理间差异在 0.05 水平上显著。图 5～图 7 同。

Different small letters on the columns indicate significant difference among different ereatments on 0.05 level. The same in figure 5—figure 7.

图 4　2002—2025 年间不同耕作处理下春小麦耗水量(ET)的动态变化模拟结果

Fig. 4　Simulated dynamic changes in spring wheat water consumption(ET) under different tillage treatments from 2002 to 2025

表 5　2002—2025 年不同耕作处理的春小麦水分生产力的标准差和变异系数

Table 5　Standard deviation and coefficient of variation for spring wheat water productivity under different cultivation treatments from 2002 to 2025

处理 Treatment	耗水量 ET		产量 Grain yield		水分利用效率 WUE	
	标准差 SD/mm	变异系数 CV/%	标准差 SD/(kg·hm^{-2})	变异系数 CV/%	标准差 SD/(kg·hm^{-2}·mm^{-1})	变异系数 CV/%
NT	68.02	20.58	240.50	15.01	0.79	15.99
NTS	65.20	18.21	232.27	12.32	0.78	14.52
TS	68.67	19.88	253.86	15.40	0.79	16.24
T	64.80	20.81	208.81	15.50	0.84	18.90

2.3　2002—2025 年不同耕作处理下小麦产量与水分利用效率的变化动态模拟结果

在 2002—2025 年,不同耕作处理下旱地春小麦产量的模拟值随降水量的变化而剧烈变化(图 1 和图 5),春小麦产量的变化范围为 774.2～2 347.20 kg·hm^{-2},T、NT、TS、NTS 处理的产量平均值分别为 1 347.34、1 602.10、1 648.88 和 1 885.03 kg·hm^{-2},标准差分别为 208.81、240.50、253.86 和 232.27 kg·hm^{-2},变异系数分别为 15.50%、15.01%、15.40%和 12.32%(表 5)。虽然各耕作处理产量的年际变化受降水制约,但不同处理间产量稳定性差异显著,NTS 处理下春小麦多年平均产量较 T、NT、TS 处理分别提高了 39.91%、17.66%、14.32%,说明 NTS 处理在多数年份都表现出产量优势,且在降水波动年,产量受影响也较小。

不同耕作处理下春小麦 WUE 模拟值的变化范围为 2.72～8.04 kg·hm^{-2}·mm^{-1},NTS 处理的 WUE 变化范围为 3.82～8.04 kg·hm^{-2}·mm^{-1},T、NT、TS、NTS 处理的平均值分别为 4.44、4.95、4.87 和 5.38 kg·hm^{-2}·mm^{-1}(图 6),标准差分别为 0.84、0.79、0.79 和 0.78 kg·hm^{-2}·mm^{-1},变异系数分别为 18.90%、15.99、16.24%和 14.52%(表 5)。不同耕作处理对春小麦 WUE 的影响显著,NTS 处理的 WUE 较 T、NT、TS 处理分别提高了 21.06%、8.53%和 11.41%。

2.4　2002—2025 年不同耕作下土壤有机碳(SOC)储量的变化动态模拟结果

在 2002—2025 年,0～30 cm 土层 SOC 储量的不同处理模拟值变化趋势相似(图 7A)。2002

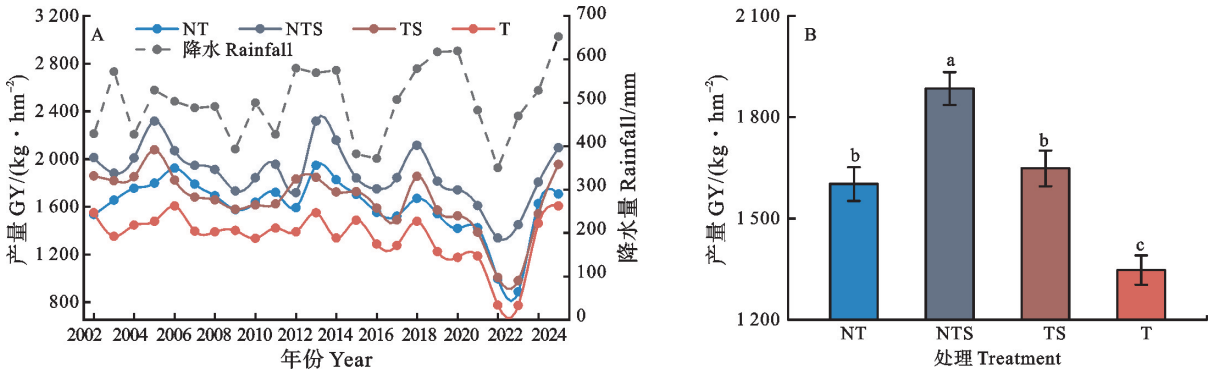


图 5 2002—2025 年不同耕作处理下春小麦产量的动态变化模拟结果

Fig. 5 Simulated dynamic changes in spring wheat yield under different tillage modes from 2002 to 2025

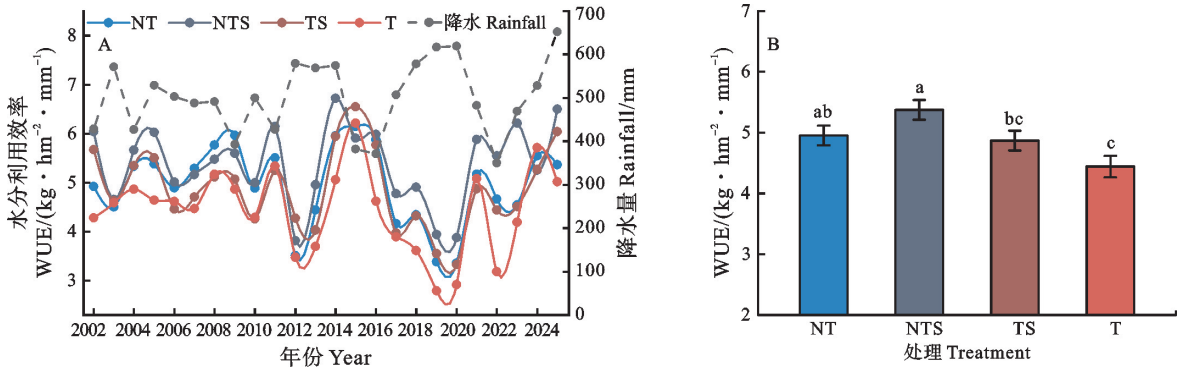


图 6 2002—2025 年不同耕作处理下春小麦水分利用效率(WUE)的动态变化

Fig. 6 Simulated dynamic changes in spring wheat water use efficiency(WUE) under different tillage treatments from 2002 to 2025

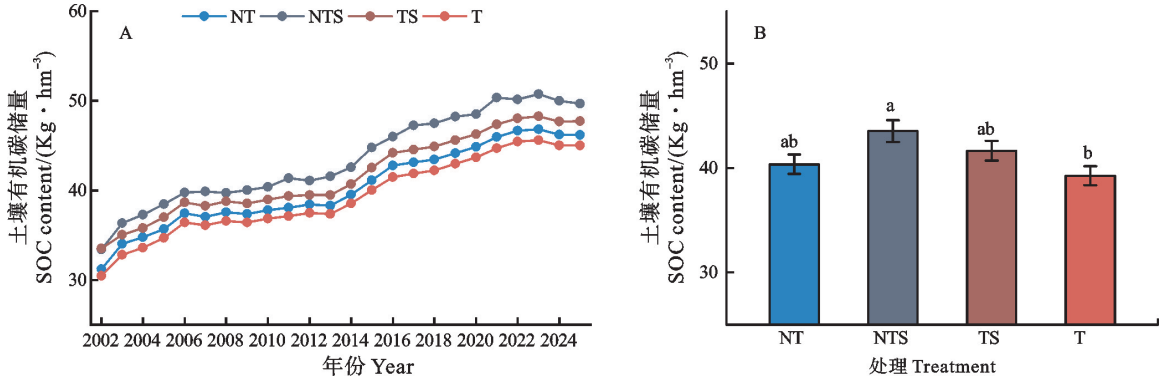


图 7 2002—2025 年不同耕作处理下麦田 0～30 cm 土壤有机碳(SOC)储量的动态变化结果

Fig. 7 Simulated changes of soil organic carbon(SOC) storage in wheat field at 0－30 cm depth under different tillage treatments from 2002 to 2025

年,NTS、TS、NT 和 T 处理的 SOC 储量分别为 33.42、33.50、31.20 和 30.45 kg · hm^{-2},2025 年分别为 49.70、47.71、46.17 和 44.99 kg · hm^{-2},积累速率分别为 0.68、0.59、0.62 和 0.61 kg · hm^{-2},多年 SOC 平均储量分别为 43.54、41.65、40.34 和 39.26 kg hm^{-2}(图 7B)。此外,NTS 和 TS 处理的 SOC 储量长期高于 NT 和 T 处理,说明秸秆覆盖增加了土壤稳定的碳投入;保护性耕作的平均 SOC 储量较传统耕作也呈增加趋势,其中 NTS 处理较 NT、TS、T 处理分别增加了 7.9%、4.6%和 10.9%,说明免耕结合秸秆覆盖可以更有效地增加 SOC 储量。

2.5 降水年型对春小麦 ET、产量和 WUE 的影响

降水年型对不同耕作处理下旱地春小麦 ET 的影响均达到显著水平($P<0.05$)(表 6 和图 8)。经模拟,枯水年、平水年和丰水年的平均 ET 分别为 277.0、323.2 和 403.0 mm,丰水年春小麦 ET 显著高于平水年和枯水年,其中丰水年 ET 较枯水年提升了 45.5%;丰水年和平水年间春小麦产量无显著差异,但与枯水年的产量存在显著差异,

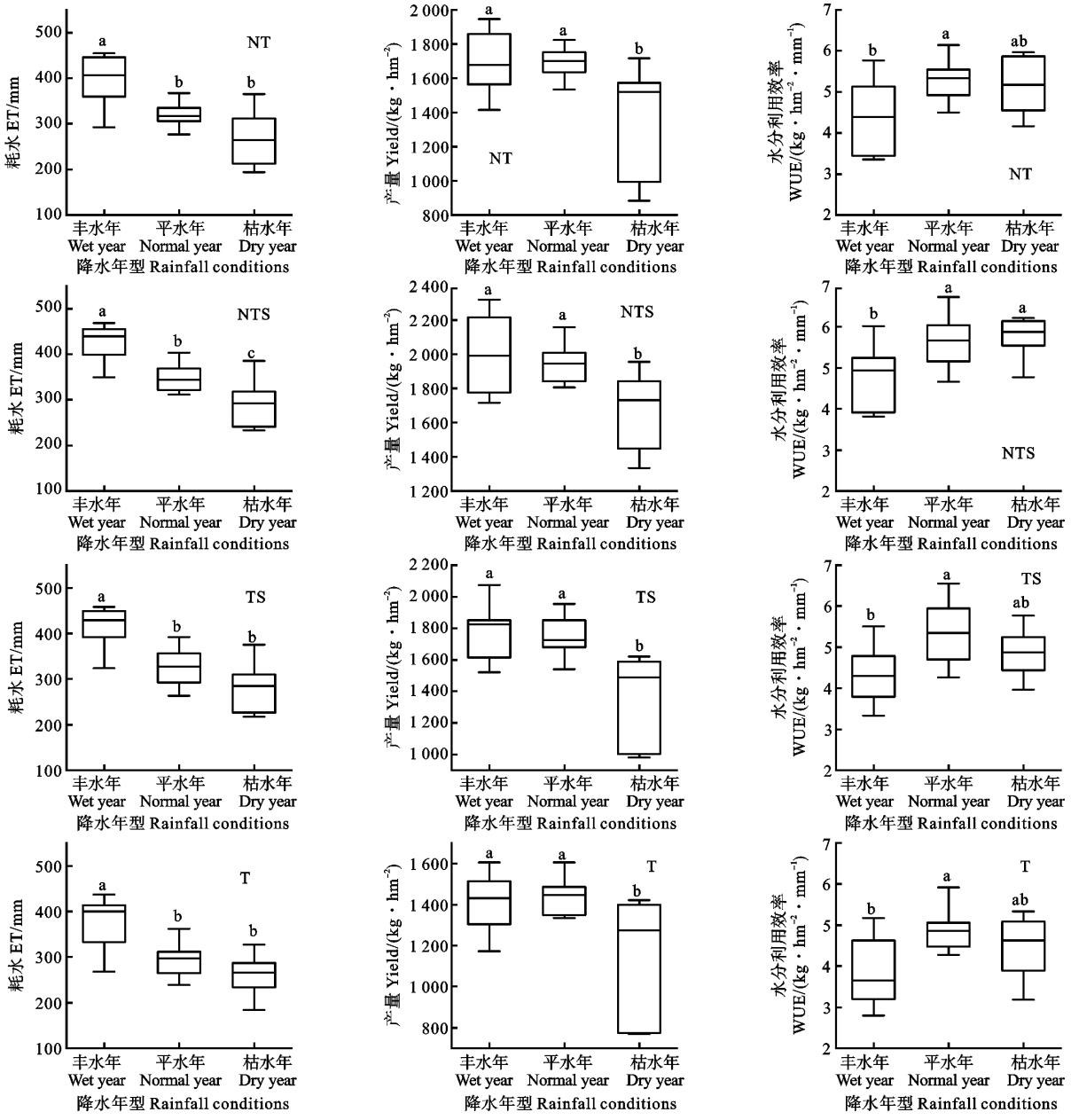
表 6　2002—2025 年不同降水年型下春小麦耗水量、产量及水分利用效率的模拟结果

Table 6　Simulated results in spring wheat water consumption, yield, and water use efficiency under different precipitation patterns from 2002 to 2025

降水年型 Rainfall conditions	ET/mm	产量 Yield/(kg · hm^{-2})	WUE/(kg · hm^{-2} · mm^{-1})
枯水年 Dry year	277.0c	1 395.60b	5.02a
平水年 Normal year	323.2b	1 708.62a	5.33a
丰水年 Wet year	403.0a	1 719.76a	4.33b

同列数值后不同字母表示不同降水年型间差异在 0.05 水平显著。

Different letters after the values within the same columns indicate significant difference among different rainfall conditions at 0.05 level.



图柱上不同字母表示同一耕作处理下不同降水年型间差异在 0.05 水平上显著。

Different letters on the columns indicate significant difference among different rainfall conditions under a same tillage treatment at 0.05 level.

图 8　不同耕作处理下旱地春小麦耗水量(ET)、产量及水分利用效率(WUE)的模拟结果

Fig. 8　Simulated results in water consumption(ET), yield, and water use efficiency(WUE) of dryland spring wheat under different tillage treatments

相较于枯水年分别提升了 23.2%和 22.4%；枯水年与平水年的 WUE 与丰水年存在显著差异，枯水年、平水年和丰水年的平均 WUE 分别为 5.02、5.33 和 4.33 kg·hm^{-2}·mm^{-1}。

2.6 降水年型及耕作措施对春小麦产量稳定性和可持续性的影响

从变异系数(CV)(图 9)看，不同耕作处理下春小麦产量稳定性随着降水年型的变化而呈现差异，产量 CV 表现为枯水年>丰年>平水年，且在平水年达到最低，表明平水年气候条件下各耕作处理的产量最稳定。枯水年春小麦产量 CV 值较丰水年和平水年分别降低了 86.6%和 212.1%。尽管在丰水年和平水年，不同处理间 CV 值差异不显著，但枯水年下 NTS 处理的 CV 值显著低于其他处理，相比 NT、TS、T 处理，稳定性分别提高了 42.8%、34.4%和 41.7%。

不同降水年的麦田可持续产量指数(SYI)表现为平水年>丰水年>枯水年，表明适宜的降水对春小麦产量可持续性具有积极影响。所有处理的 SYI 值在平水年最高，但处理间差异不显著(图 8)，丰水年和平水年的 SYI 值较枯水年分别增高了 14.5%和 20.9%。在枯水年，NTS 处理的 SYI 值较 NT、TS、T 处理分别提高了 18.4%、8.2%和 15.3%。综合来看，适宜的耕作措施可以提高农田生产力的可持续性，NTS 处理在保障旱地农业的长期稳定与可持续性方面表现优异。

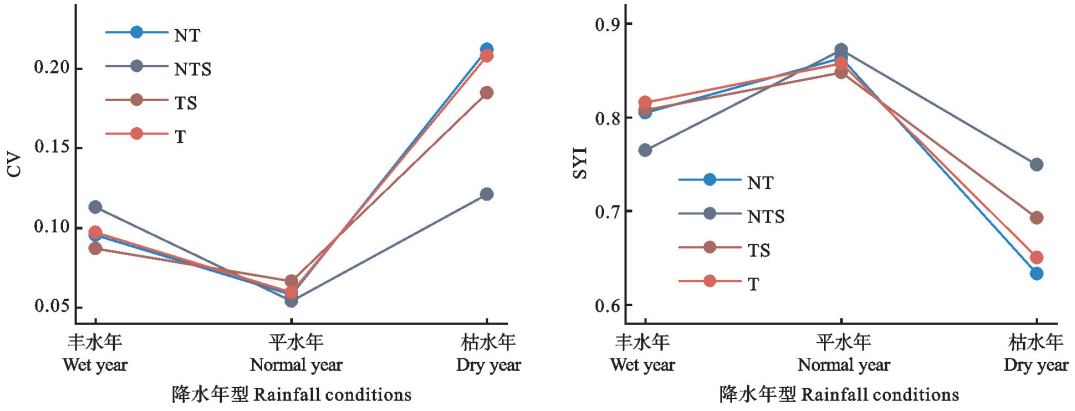


图 9 不同耕作措施下春小麦产量的变异系数(CV)与可持续产量指数(SYI)

Fig. 9 Variation coefficient(CV) and sustainable yield index(SYI) of spring wheat yield under different tillage measures

2.7 全生育期降水量与旱地春小麦水分生产力的相关性

全生育阶段的降水量对不同耕作处理的春小麦 ET、产量及 WUE 的影响均达到了显著水平($P<0.05$)(图 10)。在所有耕作措施下，ET 与春小麦全生育期降水量均呈现极显著正相关($P<0.01$)，NT、NTS、TS 和 T 处理下 R^2 分别为 0.882、0.862、0.893 和 0.742。旱地春小麦产量随全生期降水量的增加呈先上升后下降的趋势，处理之间 NTS 处理产量最高时对应的降水量大于其他处理，表明其在更高降水量下仍能维持产量增长，具有较好的增产潜力；相较于其他处理，T 处理的产量与降水量的关联性较弱。不同耕作处理下 R^2 分别为 0.401、0.399、0.428 和 0.274。旱地春小麦 WUE 随全生育期降水量的变化趋势呈现缓慢下降的趋势，不同耕作处理下 R^2 分别为 0.393、0.610、0.330 和 0.351。

3 讨论

APSIM 模型对陇中黄土高原地区小麦产量模拟具有较好的适用性，能预测不同环境条件和农业实践下的土壤水分动态、养分循环和作物生长。本研究利用 APSIM 模型对不同耕作处理下春小麦生长发育、产量和土壤水分动态进行了模拟，预测的旱作农田春小麦物候期、产量误差均在可接受范围内，基本与前人的验证结果保持一致[17,27]。然而，本研究的模拟结果仍有一些局限性，模型模拟的小麦物候比实际观测晚 2～3 d，这可能主要是由于本研究小麦生育期内降水较少，导致小麦提前成熟所致。有研究表明，在水分胁迫下，小麦会通过提前抽穗、缩短灌浆期实现“逃旱”策略[28]，而模块主要依据积温驱动发育进程，未能充分考虑到土壤水分对关键生育期转换的调控作用。通过对土壤动态水分的模拟值及实测值检验来看，春小麦生育期 0～200 cm 土壤贮水量

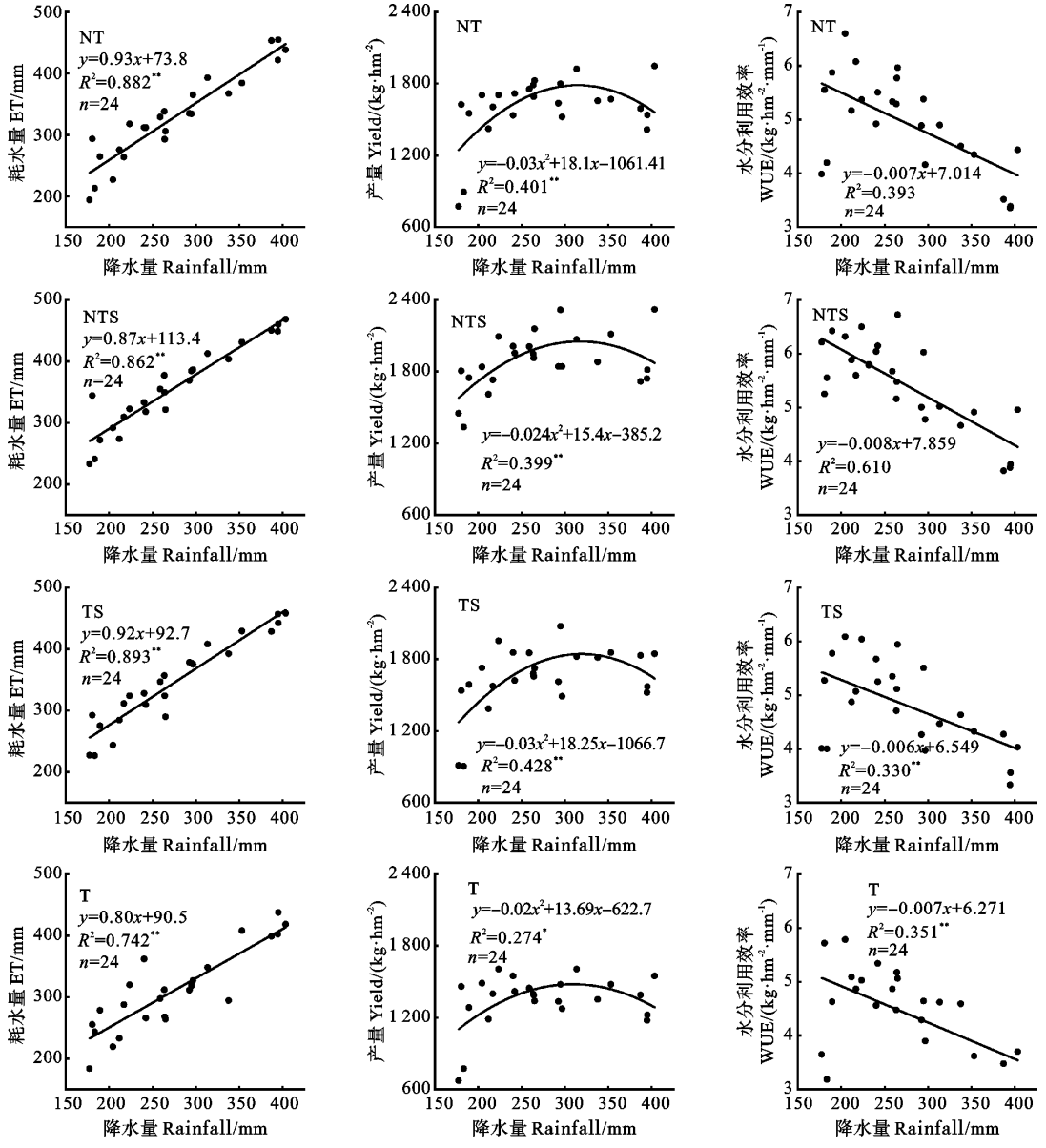


图 10　春小麦耗水量、产量及水分利用效率与降水量的关系

Fig. 10　Water consumption, yield, and water use efficiency of spring wheat in relation to rainfall

模拟结果与实测结果基本吻合,误差均在 10%以内,表明该模型能较好地模拟土壤水分动态变化,这与前人研究结果基本一致[29]。

陇中地区作为中国典型的干旱半干旱农业区,区域降水年际变化和季节分布差异大,因此造成不同年份之间作物生产力的差异较大,而降水对该区作物生产的影响远大于施肥、耕作、品种等因素的影响[30]。本研究也发现,降水是影响该地区春小麦水分状况的主要因素,产量与全生育期降水量呈抛物线关系,水分利用效率与全生育期降水量呈负相关。不同降水年型下,丰水年春小麦耗水量较枯水年提升了 45.5%,丰水年和平水年下产量无显著差异,但均显著高于枯水年,分别提升了 23.2%和 22.4%,表明在降水量不足的枯水年,春小麦产量受到严重限制。陈斐等[31]对黄土高原半干旱区对春小麦的研究认为,生长季降水与春小麦产量呈显著正相关,降水不足是影响产量的主要因素。干旱在春小麦的不同生育时期会对产量和品质造成不同的影响,尤其是在关键生育时期的水分缺乏,会导致生殖器官发育不良,严重影响最终产量[32]。丰水年产量与平水年差异不大,可能与降水达到一定阈值后水分条件不再是胁迫因素而导致的增产潜力受限有关,而丰水年常伴随强降水,一次性降水量过大时,超过土

壤入渗能力的水分会形成地表径流流失，导致无法被作物有效利用[33]。此外，可能因降水过多导致的土壤通气不良、杂草或病虫害增加等影响，丰水年反而限制了春小麦增产潜力，平水年的水分利用效率则显著高于丰水年。

在不同耕作处理中，免耕秸秆覆盖（NTS）处理表现出显著优势，多年平均产量和水分利用效率分别达到了 1 885.03 kg·hm^{-2} 和 5.38 kg·hm^{-2}·mm^{-1}，且 NTS 处理在不同降水年型下均表现出最高产量。长期模拟研究还发现 NTS 处理能显著增加 SOC 储量，这与之前报道的长期 NT 与秸秆还田相结合增加 SOC 储量和碳固存潜力的研究结果相似[34]。Xu 等[35]也指出 SOC 储存量与作物产量密切相关，是决定作物产量的最重要因素之一。NTS 表现出的优势一方面通过减少土壤扰动、调节土壤温度及提高土壤肥力来实现增产，另一方面通过有效改善土壤水分条件，促进作物对水分的吸收利用，从而实现作物生产力的协同提升。

与大多数作物模型一样，APSIM 模型对不同管理措施和不同时期作物生长过程的模拟敏感性存在差异，如相同降水年型下，小麦生育期内耕作措施影响土壤水分变化，进而导致产量存在差异，使得相同降水年型内产量存在波动[36-37]。土壤水分的有效供给能力对提升旱地作物生产力的稳定性和可持续性有着重要影响。本研究探讨长时间序列下不同降水年型的小麦产量变异性和可持续性，结果发现，春小麦产量的稳定性和可持续性在不同降水年型下存在显著差异，表现为平水年＞丰水年＞枯水年，平水年产量最为稳定，表明适宜的降水补充对农田生产的稳定性和可持续性有着积极影响。耕作措施对丰水年和平水年的稳定性没有显著影响，但在枯水年，春小麦产量的稳定性表现为 NTS＞TS＞NT＞T，NTS 处理展现出跨年型的稳健优势，尤其在枯水年其产量稳定性和可持续性显著优于其他处理。从长期效应来看，在干旱年份 NTS 能有效缓解水分不足，保证作物生育进程的稳定进行，有助于旱作农田的可持续发展。这与彭正凯等应用保护性耕作措施是旱作农业可持续发展的重要途径的研究结果一致[38]。本研究是基于作物生长模型将作物、土壤、气象和管理因子结果整合分析，着重探究了耕作与降水对春小麦水分生产力的直接影响，结果表明，不同耕作措施下春小麦因降水年型不同的稳定性确实存在差异，但是实际作物生长还受到其他多因素共同影响，如施肥、病虫害等。尽管 APSIM 模型在本研究中展现了良好的模拟性能，但在模拟不同耕作处理效应方面仍存在一定局限性：一方面模型对耕作处理的参数率定主要集中在秸秆管理、土壤扰动、地表覆盖等方面，但长期保护性耕作措施会对土壤结构、孔隙度、土壤生物活性等产生显著的累积效应，未来可结合机器学习等方法对土壤物理属性进行耦合分析；另一方面，不同耕作处理下土壤有机碳的长期累积及其对作物产量的反馈机制在模型中采用相对简化的经验参数，并未在本研究中深入涉及，今后需要通过大量田间数据不断调试验证，以便更精准地对田间生产管理进行风险评估。

4 结论

春小麦物候期、产量及土壤水分动态的模拟结果表明，APSIM 模型在陇中旱农区表现出较好的准确性与适用性。长期模拟结果显示，降水是影响该地区春小麦生产力的关键气候因子，不同降水年型下，平水年的春小麦产量稳定性和农田可持续性最高，枯水年最低，且丰水年与平水年下春小麦产量无显著差异，但均显著高于枯水年。长期免耕秸秆覆盖在提升土壤有机碳储量、维持产量稳定性和提高水分利用效率方面均表现最优，表现出较强的气候适宜性和农田生态系统韧性。因此，综合产量、稳定性及生态效益，免耕秸秆覆盖是适宜该区域实现春小麦高产稳产、提升农田可持续性的有效耕作措施。

参考文献：

[1]丁文喜. 中国水资源可持续发展的对策与建议[J]. 中国农学通报，2011，27(14)：221.
Ding W X. Strategy and recommendations on sustainable development of water resources in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*，2011，27(14)：221.

[2]邓浩亮，张恒嘉，田建良，等. 黄土高原半湿润农作区春玉米土壤环境和产量对种植方式的响应[J]. 水土保持学报，2019，33(5)：257.
Deng H L，Zhang H J，Tian J L，*et al*. Response of spring maize soil environment and yield to planting patterns in semi-humid region of the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*，2019，33(5)：257.

[3]梁改梅，吴文慧，李紫莲，等. 黄土保护性耕作对农田土壤结构、水分及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报，2025，39(6)：369.
Liang G M，Wu W H，Li Z L，*et al*. Effects of conservation

tillage in loess soil on farmland soil structure, water content, and maize yield [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(6): 369.

[4]张 燕,杨宪龙,马 媛,等. 黄土高原粮草轮作的土壤环境效应研究进展[J]. 中国科学:生命科学,2025. doi:10.1360/SSV-2025-0127

Zhang Y, Yang X L, Ma Y, *et al*. Research progress on soil environmental effects and mechanisms of forage-crop rotation on the Loess Plateau [J]. *Science China Life Sciences*, 2025. doi: 10.1360/SSV-2025-0127

[5]彭正凯,李玲玲,谢军红,等. 保护性耕作对陇中旱作农田水分特征的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(12):4022.

Peng Z K, Li L L, Xie J H, *et al*. Effects of conservational tillage on water characteristics in dryland farm of central Gansu, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4022.

[6]邓超超,李玲玲,谢军红,等. 长期不同耕作措施对黄绵土体积质量和作物水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报,2018,27(7):1023.

Deng C C, Li L L, Xie J H, *et al*. Effects of long-term different tillage practices on soil volumic mass and crop water use efficiency of loessal soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2018, 27(7): 1023.

[7]董 秀,张 燕,MUNYAMPIRWA Tito,等. 长期保护性耕作对黄土高原旱作农田土壤碳含量及转化酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2023,56(5):907.

Dong X, Zhang Y, Tito M, *et al*. Effects of long-term conservation tillage on soil carbon content and invertase activity in dry farmland on the Loess Plateau [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(5): 907.

[8]尚小龙,曹建斌,王 艳,等. 保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):191.

Shang X L, Cao J B, Wang Y, *et al*. Current situation and prospect of conservation tillage technology [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(6): 191.

[9]杨竣皓,骆永丽,陈 金,等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学,2020,53(21):4415.

Yang J H, Luo Y L, Chen J, *et al*. Effects of main food yield under straw return in China: A meta-analysis [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(21): 4415.

[10]巩敬锦,刘志娟,祝光欣,等. 基于 APSIM 模型的 2015-2100 年气候变化对中国玉米生产力影响[J]. 农业工程学报,2023,39(8):167.

Gong J J, Liu Z J, Zhu G X, *et al*. Effects of climate change on maize productivity in China during 2015 to 2100 based on APSIM model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 167.

[11]Wang S S, Wang D R, Liu T F, *et al*. Simulation of winter wheat growth dynamics and optimization of water and nitrogen application systems based on the AquaCrop model [J]. *Agronomy*, 2024, 14(1): 110.

[12]Holzworth D P, Huth N I, Devoil P G, *et al*. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 327.

[13]孙扬越,申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象,2019,40(7):444.

Sun Y Y, Shen S H. Research progress in application of crop growth models [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2019, 40(7): 444.

[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.

Pu J L, Wang J, Wang K F, *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.

[15]蒋腾聪. 黄土高原冬小麦生产对气候变化响应的模型模拟及不确定性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.

Jiang T C. Crop model simulations and uncertainty analyses for the responses of winter wheat production to climate change in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.

[16]聂志刚,李 广,王 钧,等. 利用 APSIM 模型分析不同播期和耕作方式对旱地小麦籽粒干物质积累的影响[J]. 应用生态学报,2021,32(3):913.

Nie Z G, Li G, Wang J, *et al*. Evaluating the effects of different sowing dates and tillage methods on dry-land wheat grain dry matter accumulation based on the APSIM model [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 913.

[17]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.

Li G, Huang G B, 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.

[18]尹嘉德,侯慧芝,张绪成,等. 基于 APSIM 模型分析不同降水年型下施氮深度对旱地小麦的产量效应[J]. 水土保持学报,2022,36(1):247.

Yin J D, Hou H Z, Zhang X C, *et al*. Analysis of effects of nitrogen application depths on yield of spring wheat in different precipitation years based on APSIM model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 247.

[19]赵彦茜,齐永青,朱 骥,等. APSIM 模型的研究进展及其在中国的应用[J]. 中国农学通报,2017,33(18):1.

Zhao Y Q, Qi Y Q, Zhu J, *et al*. Research progress of APSIM model and its application in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(18): 1.

[20]张均华,刘建立,张佳宝. 作物模型研究进展[J]. 土壤,2012,44(1):1.

Zhang J H, Liu J L, Zhang J B. Advances on crop models

[J]. *Soils*, 2012, 44(1): 1.

[21] Mamassi A, Nhamo N, Gummadi S, *et al*. Climate change and irrigation management shape crop resilience in UAE arid agriculture: APSIM model-driven assessment [J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 319: 109819.

[22] Zhao G, Bryan B A, Song X D. Sensitivity and uncertainty analysis of the APSIM-wheat model: Interactions between cultivar, environmental, and management parameters [J]. *Ecological Modelling*, 2014, 279(C): 1.

[23] Li R C, Ren C Y, Wu L K, *et al*. Fertilizing-induced alterations of microbial functional profiles in soil nitrogen cycling closely associate with crop yield [J]. *Environmental Research*, 2023, 231(Pt 2): 116194.

[24] Luo Z K, Wang E L, Xing H T, *et al*. Opportunities for enhancing yield and soil carbon sequestration while reducing N_2O emissions in rainfed cropping systems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 400.

[25] 刘 强, 高雪慧, 王 钧. 不同降水年型下大气 CO_2 浓度和温度对旱地春小麦产量的响应模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 230.
Liu Q, Gao X H, Wang J. Response simulation of CO_2 concentration and temperature on spring wheat yield in dryland under different precipitation types [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2): 230.

[26] 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.
Ru X Y, Li G, Chen G P, *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.

[27] 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.
Nie Z G, Feng Y Q, Dong L X, *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.

[28] 陈昕钰. 小麦根系的生长发育及其对氮素和干旱的响应机理研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
Chen X Y. Study on the growth and development of wheat roots and its response mechanism to nitrogen and drought [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.

[29] 聂志刚, 任新庄, 李 广, 等. 基于 APSIM 的黄土丘陵区旱地小麦气候适宜性评价[J]. 中国农业气象, 2017, 38(6): 369.
Nie Z G, Ren X Z, Li G, *et al*. APSIM-based evaluation of climate suitability on wheat in dryland in the hill-gullied region of the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(6): 369.

[30] 薛 亮, 袁淑杰, 王劲松. 我国不同区域气象干旱成因研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2023, 41(1): 1.
Xue L, Yuan S J, Wang J S. Progress and prospects of research on causes of meteorological drought in different regions in China [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2023, 41(1): 1.

[31] 陈 斐, 闫 霜, 王鹤龄, 等. 不同水分胁迫下的春小麦叶片气体交换参数和水分利用效率研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 821.
Chen F, Yan S, Wang H L, *et al*. Study on gas exchange parameters and water use efficiency of spring wheat leaves under different levels of water stress [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 821.

[32] 齐 月, 王鹤龄, 张 凯, 等. 气候变化对黄土高原半干旱区春小麦生长和产量的影响: 以定西市为例[J]. 生态环境学报, 2019, 28(7): 1313.
Qi Y, Wang H L, Zhang K, *et al*. Effects of climate change on growth and yield of spring wheat in semi-arid region of the Loess Plateau: A case study of Dingxi City [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(7): 1313.

[33] 汤鹏程, 徐 冰, 张晓敏, 等. 内蒙古阴山北麓区典型作物水分亏缺特征及其关键驱动因子响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(S2): 38.
Tang P C, Xu B, Zhang X M, *et al*. Water deficit characteristics of typical crops and responses to key driving factors in northern of Yinshan mountain, Inner Mongolia [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(S2): 38.

[34] Tian S Z, Wang Y, Ning T Y, *et al*. Continued No-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 212.

[35] Xu J, Han H F, Ning T Y, *et al*. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon, crop yield, and yield stability in a wheat-maize system [J]. *Field Crops Research*, 2019, 233: 33.

[36] Shnpd S, Takahashi T, Okada K. Evaluation of APSIM-wheat to simulate the response of yield and grain protein content to nitrogen application on an Andosol in Japan [J]. *Plant Production Science*, 2021, 24(4): 454.

[37] 王 妍, 张晓龙, 石嘉丽, 等. 中国冬小麦主产区气候变化及其对小麦产量影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(5): 723.
Wang Y, Zhang X L, Shi J L, *et al*. Climate change and its effect on winter wheat yield in the main winter wheat production areas of China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(5): 723.

[38] 彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 214.
Peng Z K, Li L L, Xie J H, *et al*. Effects of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 214.