

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51067

基于 APSIM 模型的长期免耕秸秆覆盖对旱地小麦增产效应研究

乔宇馨¹ 李程越² 康晓玉³ 张鑫琪¹ 贾绍辉⁴ 刘倩⁴ 曹亚丽⁴
史鑫蕊¹ 郝兴宇^{1,*} 李萍^{1,*}

¹ 山西农业大学农学院 / 有机旱作山西省重点实验室, 山西太原 030031; ² 山西农业大学信息科学与工程学院, 山西晋中 030600; ³ 鞍山市气象局, 辽宁鞍山 114014; ⁴ 临汾市尧都区农业机械发展中心, 山西临汾 041000

摘要: 传统旋耕、翻耕模式会造成旱作区水肥流失。开展少、免耕措施影响旱地小麦土壤水分及产量的研究对旱地小麦节水稳产意义重大。本研究在山西省临汾市尧都区开展 2 个生长季的旱作小麦试验, 试验处理为 2 种耕作方式: 免耕秸秆覆盖方式(no-tillage, NT)和旋耕秸秆还田方式(rotary tillage, RT), 小麦品种为“晋麦 102”, 利用冬小麦田的土壤蓄水量、各生育时期生物量和产量等数据对 APSIM-Wheat 模型进行校准和验证, 用校验后的 APSIM-Wheat 模型模拟临汾市尧都区 39 年历史气象条件下冬小麦生长发育、土壤水分和产量的变化, 分析不同降水年型和不同耕作方式对小麦产量、麦田土壤蓄水量和水分利用效率的影响。平水年、丰水年和欠水年免耕秸秆覆盖处理较旋耕秸秆还田处理使小麦产量分别增加 31.1%、21.0%和 28.5%, 而休闲期土壤蓄水效率分别增加 26.6%、35.9%和 37.5%, 水分利用效率分别增加 29.0%、10.0%和 9.9%。但小麦生育期蒸散量在 2 种耕作方式下无明显差异。2 个处理下的小麦产量均与休闲期降水量及年降水量呈显著正相关。免耕秸秆覆盖方式下小麦产量与休闲期蓄水效率呈显著正相关, 而旋耕秸秆还田方式下相关性不显著。免耕秸秆覆盖还田主要通过提高休闲期土壤蓄水效率提高黄土高原区旱作小麦产量, 是黄土高原旱作小麦稳产的有效耕作措施。

关键词: 耕作方式; APSIM 模型; 冬小麦; 土壤蓄水效率; 产量

Study on the effects of long-term no-tillage straw mulching on wheat yield improvement in dryland areas based on the APSIM model

Qiao Yu-Xin¹, Li Cheng-Yue², Kang Xiao-Yu³, Zhang Xin-Qi¹, Jia Shao-Hui⁴, Liu Qian⁴, Cao Ya-Li⁴, Shi Xin-Rui¹, Hao Xing-Yu^{1,*}, and Li Ping^{1,*}

¹ College of Agriculture, Shanxi Agricultural University / Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture of Shanxi Province, Taiyuan 030031, Shanxi, China; ² College of Information Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, Shanxi, China; ³ Anshan Meteorological Bureau, Anshan 114014, Liaoning, China; ⁴ Yaodu District Agricultural Machinery Development Center, Linfen 041000, Shanxi, China

Abstract: Traditional rotary tillage and plowing practices often lead to water and nutrient loss in dryland farming regions. Investigating the effects of minimum and no-tillage practices on soil moisture and wheat yield in dryland systems is therefore crucial for water conservation and yield stability. This study conducted two growing seasons of dryland wheat experiments in Yaodu district, Linfen city, Shanxi province, using two tillage methods: no-tillage with straw mulching (NT) and rotary tillage with straw incorporation (RT). The wheat variety used was “Jinmai 102”. The APSIM-Wheat model was calibrated and validated using observed data on soil water storage, biomass, and yield at various growth stages. The validated model was then employed to simulate the growth, soil moisture dynamics, and yield of winter wheat over 39 years of historical meteorological data in Yaodu. The impacts of different annual precipitation patterns and tillage methods on wheat yield, soil water storage, and water use efficiency (WUE) were analyzed. Compared with rotary tillage, no-tillage with straw mulching increased wheat yield by 31.1%, 21.0%, and 28.5% in normal, wet, and dry years, respectively. During the fallow period, soil water retention improved by 26.6%, 35.9%, and

本研究由山西省重点实验室建设项目(Z135050009017-3-13)资助。

This study was supported by the Project of Shanxi Province Key Laboratory Construction (Z135050009017-3-13).

* 通信作者(Corresponding authors): 郝兴宇, E-mail: haoxingyu1976@126.com; 李萍, E-mail: lipinghxy@126.com

第一作者联系方式: E-mail: 1460831683@qq.com

Received (收稿日期): 2025-07-14; Accepted (接受日期): 2026-01-22; Published online (网络出版日期): 2026-02-04.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260204.1332.012>

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

37.5%, and WUE increased by 29.0%, 10.0%, and 9.9%, respectively. However, there was no significant difference in evapotranspiration during the wheat growing period between the two tillage methods. Under treatment NT, wheat yield was significantly positively correlated with both fallow-period and annual precipitation. Moreover, under NT, yield was significantly correlated with soil water retention during the fallow period, whereas no such correlation was observed under RT. Overall, no-tillage with straw mulching enhances dryland wheat yield on the Loess Plateau primarily by improving soil water retention during the fallow period, making it an effective tillage strategy for yield stability in this region.

Keywords: tillage practice; APSIM model; winter wheat; soil water storage efficiency; yield

小麦是中国及世界最重要的粮食作物之一。黄土高原气候干旱少雨, 年均降水量400 mm左右。山西地处黄土高原东部, 处于中国的东西水分梯度带和南北热量梯度带的交叉区, 是气候变化的敏感地带^[1], 山西雨季在夏季, 其他季节降雨不足, 干旱多有发生。耕作方式的不同往往会改变土壤有机碳的形成和分解过程, 从而塑造不同的土壤环境^[2], 最终影响作物的生长发育。传统耕作方式(如旋耕、翻耕等)容易破坏土壤结构, 造成土壤水分通过地表蒸发大量损失, 降低水分利用效率^[3]。近年来, 保护性耕作技术(如少耕、免耕与秸秆覆盖等)在越来越多的地区得到推广与应用^[4-7]。这类技术不仅能改善土壤结构, 还具有蓄水保墒的功能, 对促进作物生长与优化水分利用具有重要作用, 已成为当前干旱地区实现节水增产的关键手段^[3,8]。例如, 免耕能够减少对土壤的扰动, 有利于构建稳定的土壤耕层, 显著提高耕层土壤含水量^[9-10]。免耕有助于增强土壤对降雨的入渗与保肥能力, 进而提高旱地冬小麦的产量^[11-12]。然而, 目前的研究多聚焦于保护性耕作对土壤蓄水保墒效果和作物产量的短期影响, 关于不同降雨年型下耕作方式对土壤蒸发、土壤蓄水效率及水分利用效率等方面的长期效应, 仍缺乏系统的认识。如何建立合理的耕作制度、最大限度的蓄存天然降水、减少水土流失和无效蒸发, 是山西省小麦栽培实现高产稳产的重要目标^[13-14]。推广免耕技术, 提高土壤蓄水保水能力, 缓解耕地退化, 对耕地可持续发展有重要的现实意义^[12]。

大田试验存在周期长、工作量大、长期定位试验成本高等缺点, 且由于试验标准差异及人工取样的准确性等问题, 不同年份和不同试验站点之间常会出现误差及重复性较差等问题。现有的长期定位试验更多关注作物产量、土壤结构和微生物群落等指标, 对土壤蓄水效率、土壤蒸发等指标的测定年限有限, 不能系统地解释耕作措施对作物产量的影响机制^[15-17]。作物模型具有高效、客观、可重复和成本低等优势, 是较为重要的研究手段和预测工具,

应用前景广阔^[18-19]。利用作物模型量化耕作方式对土壤水平衡及作物生长过程的影响, 可以弥补长期定位试验中土壤蒸发、土壤蓄水效率等指标测定年份有限等问题, 是制定合理耕作措施的重要工具^[20]。目前可用于模拟不同耕作方式下作物生长过程与土壤水分运动的作物模型主要包括APSIM、DNDC、RZWQM、EPIC、APEX等。与其他模型相比, APSIM模型在多过程耦合的精细化、长期累积效应的捕捉、管理措施的灵活性等方面具有明显优势, 并已在不同地区进行了广泛验证^[18]。Yadav等^[21]运用APSIM模型对印度恒河平原小麦主产区不同耕作系统下, 免耕秸秆覆盖和传统翻耕秸秆翻压管理措施下的作物物候、生物量、产量及土壤水热动态进行了模拟, 模型获得了较好的模拟效果。Chaki等^[22]运用APSIM模型对孟加拉国西部东恒河平原稻麦系统不同环境下保护性耕作和传统耕作管理措施下的物候、产量、土壤硝态氮动态及土壤水分变化进行了模拟, 模型模拟效果较好。目前已有研究对黄土高原地区不同耕作措施下的土壤蓄水及产量影响进行了报道, 但其长期影响效应尚不明确^[23]。基于APSIM模型在该地区的长期模拟, 可为系统解释耕作措施对旱作农田土壤水分储量及产量长期效应提供支持。

本研究在山西省临汾市尧都区保护性耕作长期定位试验站田间试验基础上, 利用2020—2022年2季旱作冬小麦生长发育、土壤理化特性、气象数据和小麦耕作、施肥等田间观测数据对APSIM模型进行校准和验证, 实现作物模型的本土化。利用本土化的APSIM模型开展1977—2016年(39年)历史年份的小麦生长发育模拟, 分析不同降水年型和2种耕作措施对旱作冬小麦产量、土壤蓄水效率和冬小麦水分利用效率等的影响, 探究保护性耕作对旱作农田的蓄水保墒效果, 揭示免耕秸秆覆盖耕作措施在黄土高原旱作麦区的增产机理。本研究可为黄土高原东部旱作麦区耕作措施优化提供理论依据, 并为黄土高原旱作小麦区产量提升及降水资源高效利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究的田间试验于2020年9月到2022年6月进行, 涵盖2个小麦生长季。试验在山西省临汾市尧都区底镇城隍村保护性耕作长期定位试验站(36°03'36"N, 111°66'10"E)开展, 该试验站建于1992年。该地区气候为温带大陆性气候, 海拔高度约为550 m, 年均气温、年平均降水量和年均蒸发量分别为12.6℃、550 mm和1933.1 mm, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 有效积温约为4400℃ d。季风气候明显, 降雨集中在7月到9月。试验地土壤为粉沙壤土, 种植作物为旱地冬小麦一年一作, 小麦收获后到小麦播种前为休闲期无作物种植, 全年雨养无灌溉^[23]。本研究设置2个耕作处理, 分别为: (1) 旋耕秸秆还田(RT): 6月中旬冬小麦收获后将小麦秸秆粉碎并撒于地表, 长度约为15~20 cm, 7月中旬进行旋耕还田处理, 旋耕深度约为10~15 cm。(2) 免耕秸秆覆盖(NT): 6月中旬小麦收获时留高茬(25~30 cm), 其余秸秆粉碎(长度约为15~20 cm)后撒于地表, 覆盖还田, 冬小麦播种前不进行耕作。2020年9月测定旋耕秸秆还田处理和免耕秸秆覆盖处理土壤耕层有机质含量分别为12.20 g kg⁻¹和14.12 g kg⁻¹,

全氮含量分别为0.69 g kg⁻¹和0.74 g kg⁻¹。试验小麦品种为“晋麦102”, 由山西省农业科学院小麦研究所和临汾继农种业有限公司共同培育, 为半冬性中熟旱地冬小麦, 抗寒耐旱。2年冬小麦田间试验分别于2020年9月25日和2021年9月30日播种, 于2021年6月15日和2022年6月18日收获。2种耕作处理的施肥及其他管理均一致, 播前底施纯氮90 kg hm⁻²、磷肥(P₂O₅) 120 kg hm⁻²和钾肥(K₂O) 30 kg hm⁻²。冬小麦播种行距均为20 cm, 播种密度为210 kg hm⁻² ^[24]。

1.2 测定指标

对2020—2022年试验站2种耕作方式下冬小麦主要生育时期、土壤含水量、冬小麦生物量和产量进行测定。

土壤剖面理化性质测定: 于2020年9月对免耕和旋耕处理下的土壤剖面开展理化性质测定, 人工挖掘一个1 m×2 m、深1.2 m的土壤剖面。按土层分层取样: 0~40 cm土层每10 cm取一层, 40~120 cm土层每20 cm取一层, 共计8层。用环刀每层取土用于测定土壤容重、田间持水量和饱和含水量等, 自封袋密封保存各层土样用于测定萎蔫系数及土壤营养等理化性质, 作为模型模拟土壤基础参数(表1)。

表 1 土壤基础参数
Table 1 Soil physical properties

土层深度 Soil depth (cm)	土壤容重 Bulk density (g cm ⁻³)		田间持水量 Field capacity (cm ³ cm ⁻³)		萎蔫系数 Wilting point (cm ³ cm ⁻³)		饱和含水量 Saturated water content (cm ³ cm ⁻³)	
	RT	NT	RT	NT	RT	NT	RT	NT
0~10	1.203	1.302	0.254	0.260	0.051	0.053	0.438	0.407
10~20	1.460	1.435	0.260	0.260	0.051	0.053	0.309	0.319
20~30	1.460	1.502	0.260	0.245	0.053	0.038	0.298	0.290
30~40	1.536	1.504	0.243	0.245	0.053	0.038	0.284	0.300
40~60	1.460	1.473	0.240	0.230	0.057	0.031	0.299	0.307
60~80	1.375	1.414	0.230	0.180	0.045	0.040	0.324	0.429
80~100	1.470	1.503	0.110	0.135	0.043	0.039	0.303	0.341
100~120	1.417	1.468	0.100	0.130	0.040	0.033	0.329	0.328

RT: 旋耕; NT: 免耕。RT: rotary tillage; NT: no-tillage.

土壤含水量测定: 在2020—2021年小麦生长季, 于播前、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期测定土壤含水量; 在2021—2022年小麦生长季, 于播前、抽穗期、灌浆期和成熟期测定。测定深度为0~200 cm土层, 每个耕作处理设3次重复^[24]。

生物量和产量测定: 于2020—2021年冬小麦的拔节期、开花期和灌浆期, 以及2021—2022年小麦的抽穗期和灌浆期, 进行地上部分生物量测定, 每

个处理随机取3个1 m²的样点, 取样后烘干至恒重, 称量地上部干物质重。两季小麦成熟后测定小麦生物量和产量, 每处理同样选取3个1 m²的样点, 将全部植株自然风干后测定地上部分总生物量, 手工脱粒、称重, 计算冬小麦单位面积产量^[24]。

1.3 气象数据来源

2020—2022年数据来源于临汾市气象局尧都区实测气象数据, 历史模拟年份1977—2016年的气象

数据来自中国气候数据网, 运行模型所需要的气象数据包括逐日最高气温、最低气温、逐日太阳辐射量和降水量等气象要素, 逐日太阳辐射量利用日照时数、地理纬度计算^[25]。

1.4 降水年型的划分

为了研究不同耕作方式下降水对小麦生长发育的影响, 根据该试验区的历史年份降水资料, 用小麦种植周期年的降水量, 第1年7月份到第2年6月份共12个月, 即休耕期(小麦收获后的休耕期为7月至9月) + 生长季(10月至翌年6月), 来划分降水年型(欠水年、平水年和丰水年)^[26], 计算公式为:

$$DI = (P - M) / \sigma \tag{1}$$

式中, DI 为干旱指数, P 为年降水量, M 为多年平均降水量, σ 为多年平均降水量的标准差。 $DI \leq -0.35$ 为

欠水年, $-0.35 < DI < 0.35$ 为平水年, $DI \geq 0.35$ 为丰水年。历史年份降水年型划分结果见表2。

1.5 APSIM-Wheat 模型的校准及验证

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator)是由澳大利亚联邦科工组织与昆士兰州政府联合开发的模块化、机理型农业系统模拟平台, 是全球应用最广泛的作物与农田生态系统模型之一^[27]。

将2年的大田冬小麦试验数据分成2组, 2020—2021年试验数据用于APSIM-Wheat模型的参数校准, 2021—2022年试验数据用于模型的验证。采用试错法对作物参数进行校准, 用于参数校准和验证的小麦数据包括两季不同耕作措施下的小麦生育期、生物量、产量和土壤蓄水量等^[24]。校准后的冬小麦参数如表3。

表 2 历史年份降水年型的划分
Table 2 Classification of precipitation patterns in historical years

年型 Year type	平水年 Normal year	丰水年 Wet year	欠水年 Dry year
年份 Year	1977–1978	1982–1983	1979–1980
	1978–1979	1985–1986	1980–1981
	1981–1982	1988–1989	1984–1985
	1983–1984	1989–1990	1986–1987
	1990–1991	1993–1994	1987–1988
	1996–1997	1995–1996	1991–1992
	1998–1999	2003–2004	1992–1993
	2002–2003	2005–2006	1994–1995
	2009–2010	2007–2008	1997–1998
	2011–2012	2013–2014	1999–2000
	2012–2013	—	2000–2001
	2014–2015	—	2001–2002
	2015–2016	—	2004–2005
	—	—	2006–2007
	—	—	2008–2009
	—	—	2010–2011
合计(年) Total (year)	13	10	16

表 3 APSIM-Wheat 模型中校准后的小麦生长参数
Table 3 Calibrated wheat growth parameters in the APSIM-Wheat model

参数 Parameter	描述 Description	参数值 Parameter value
tt_emergence (°C)	播种至出苗所需的有效积温 Thermal time from planting to emergence	40
tt_end_of_juvenile (°C)	出苗至幼年期结束所需的有效积温 Thermal time from emergence to juvenile	545.1
tt_floral_initiation (°C)	幼年期至花原基分化所需的有效积温 Thermal time from juvenile to initiation	613.7

(续表 3)

参数 Parameter	描述 Description	参数值 Parameter value
tt_flowering (°C)	花原基分化完成到开花期所需的有效积温 Thermal time from initiation to flower	331.8
startgf_to_mat (°C)	灌浆期启动到籽粒生理成熟所需的有效积温 Thermal time from filling to maturity	332.3
vern_sens	春化敏感性 Sensitivities to vernalisation	3.1
photop_sens	光周期敏感性 Sensitivities to photoperiod	2.5
grains_per_gram_stem (grains g ⁻¹)	单位茎秆干重形成的籽粒重 Grain weight per gram stem	25
max_grain_size (g)	单个籽粒的最大潜在重量 Maximum weight per grain	0.032
Phyllochron (°C)	叶热间距 Phyllochron	80

1.6 APSIM-Wheat 模型模拟性能的评价

通过对冬小麦各生育时期、生物量、产量及麦田土壤蓄水量的模拟值和实测值进行计算用于评估作物模型对冬小麦生长发育的模拟能力。本研究选择了目前国际上通用的评价指标来检验模型的模拟效果^[27]。利用决定系数(the coefficient of determination, R^2)、均方根误差(root mean square error, $RMSE$)和标准化均方根误差 $nRMSE$ (计算方法分别见公式2、公式3和公式4)作为检验指标^[28]。1:1拟合图用于比较实测值与模拟值的一致性。

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n}} \quad (3)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, P_i 和 O_i 分别表示模拟值和实测值, $\bar{P}$ 和 $\bar{O}$ 分别表示模拟平均值和实测平均值, n 为样本数。 R^2 越接近1, 模型模拟的稳定性就越好; $RMSE$ 反映的是模拟值与实测值之间的平均偏差程度, $nRMSE$ 表示模拟值和实测值之间的相对误差, $nRMSE$ 值越小, 模拟值和实测值之间的偏差越小, 模拟效果就越好^[29]。

1.7 历史气象条件下的长期模拟

利用校验好的APSIM模型进行长期模拟, 耕作方式采用旋耕秸秆还田(RT)和免耕秸秆覆盖(NT) 2个处理, 历史气候数据采用临汾市尧都区1977—

2016年气象数据。共完成78次模拟(2种耕作方式×39年)。每年均种植同一小麦品种“晋麦102”, 播种日期均设定为9月28日, 长期模拟期间2个处理的施肥、播种、耕作和秸秆等田间管理均与试验年份一致。冬小麦在生理成熟期自动完成收割。

1.8 土壤蓄水量、休闲期土壤蓄水效率、生育期蒸散量和水分利用效率的计算

利用校验好的APSIM模型模拟历史气候条件下多年(1977—2016年)临汾市尧都区县底镇城隍村不同耕作措施下冬小麦的生长情况, 将模型输出的冬小麦产量、土壤含水量结合实际降水量等数据根据以下公式计算不同耕作措施下土壤蓄水量、休闲期土壤蓄水效率、生育期蒸散量和水分利用效率:

$$S = D \times \theta \times \rho \times 10 \quad (5)$$

式中, S 、 D 、 θ 、 ρ 分别为土壤蓄水量(mm)、土壤深度(cm)、土壤含水量($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)、土壤容重(g cm^{-3})。

$$E_f = \frac{S_s - S_h}{P_f} \times 100\% \quad (6)$$

式中, E_f 、 S_s 、 S_h 和 P_f 分别代表休闲期土壤蓄水效率(%)、播种时的土壤蓄水量(mm)、上一季小麦收获时的土壤蓄水量(mm)和休闲期的降水量(mm)。

$$ET = S_s - S_h + P_g \quad (7)$$

式中, ET 、 S_s 、 S_h 和 P_g 分别代表生育期蒸散量(mm)、播种时的土壤蓄水量(mm)、收获时的土壤蓄水量(mm)和生育期的降水量(mm)。

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (8)$$

式中, WUE 、 Y 和 ET 分别代表水分利用效率($\text{kg hm}^{-2} \text{mm}^{-1}$)、籽粒产量(kg hm^{-2})和生育期蒸散量(mm)。

2 结果与分析

2.1 APSIM 模型校准与验证

利用实测的土壤蓄水量、小麦生育期、生物量和产量对APSIM-Wheat模型进行了校准与验证。总体来看, 决定系数 R^2 值在0.99以上, 归一化均方根误差 $nRMSE$ 值在20%以下, 说明该模型模拟效果较好, 可以用于历史年份的长期模拟(图1)。

2.2 耕作方式与降水年型对小麦产量的影响

1977—2016年小麦产量的模拟结果显示, 免耕秸秆覆盖下小麦的平均产量较旋耕秸秆还田方式下提高26.8%。在不同降水年型下, 免耕秸秆覆盖

方式下的小麦产量均高于旋耕秸秆还田方式。平水年、丰水年和欠水年免耕秸秆覆盖方式下小麦产量较旋耕秸秆还田方式分别提高31.1%、21.0%和28.5% (图2)。

2.3 耕作方式与降水年型对休闲期土壤蓄水效率的影响

免耕秸秆覆盖处理下的休闲期土壤平均蓄水效率比旋耕秸秆还田处理下提高33.6%。平水年、丰水年和欠水年免耕秸秆覆盖措施下的休闲期土壤蓄水效率比旋耕秸秆还田措施下分别提高26.6%、35.9%和37.5% (图3)。

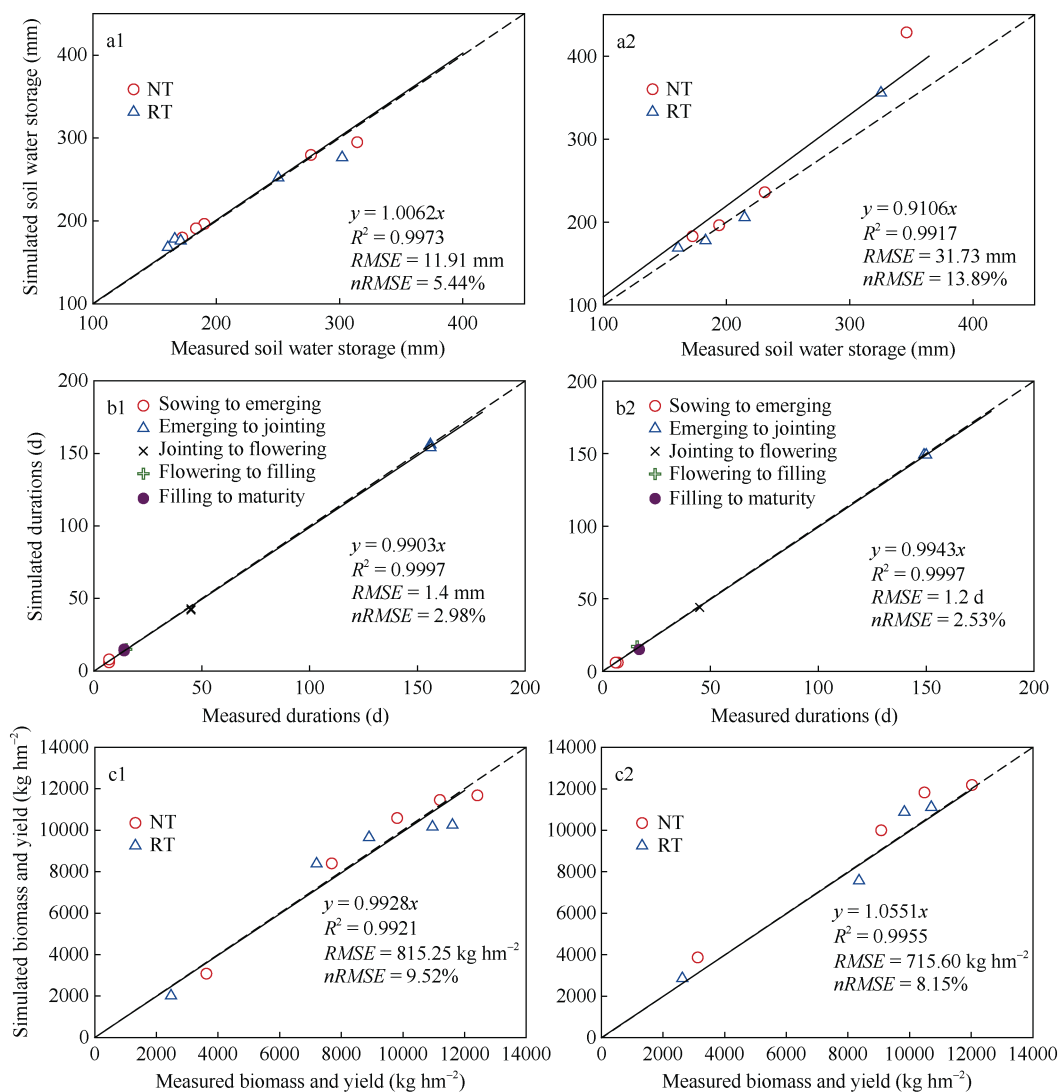


图 1 小麦土壤蓄水量、各生育期天数、生物量和产量模拟值与实测值的比较

Fig. 1 Comparison between simulated and measured values of soil water storage, growth stage duration, biomass, and yield in wheat. a1、b1、c1 为校准结果, a2、b2、c2 为验证结果。图中虚线为 1 : 1 线; 实线为拟合线。NT: 免耕; RT: 旋耕。

a1、b1、c1: calibration results; a2、b2、c2: validation results. The dotted line represents the 1 : 1 line; the solid line represents the fitted regression line. NT: no-tillage; RT: rotary tillage.

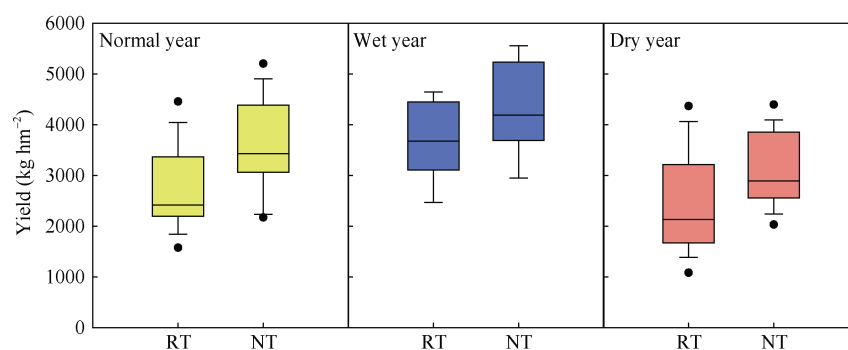


图2 不同耕作方式对冬小麦产量的影响

Fig. 2 Effects of different tillage treatments on wheat yield

NT: 免耕; RT: 旋耕. NT: no-tillage; RT: rotary tillage.

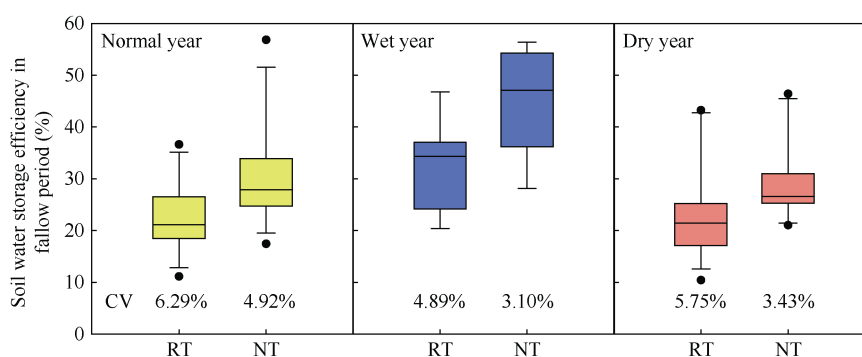


图3 不同耕作方式对休闲期土壤蓄水效率的影响

Fig. 3 Effects of different tillage treatments on soil water storage efficiency during the fallow period

NT: 免耕; RT: 旋耕; CV: 变异系数. NT: no-tillage; RT: rotary tillage; CV: coefficient of variation.

2.4 耕作方式与降水年型对生育期蒸散量和水利用效率的影响

不同耕作方式下小麦生育期蒸散量差异不大。

在丰水年, 免耕方式下小麦生育期蒸散量平均值略高于旋耕方式, 而在平水年和欠水年, 免耕处理下的蒸散量平均值略低于旋耕方式(图4)。

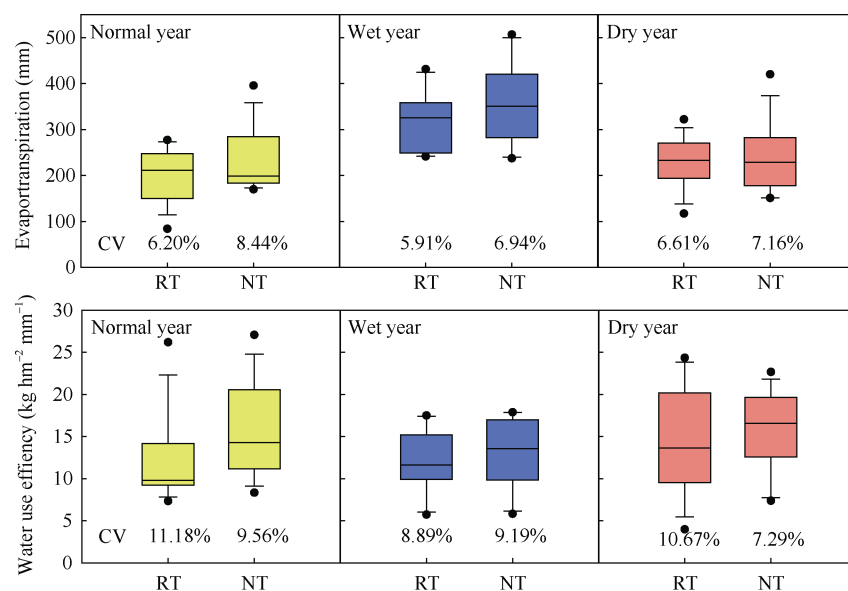


图4 不同耕作方式对小麦生育期蒸散量和水利用效率的影响

Fig. 4 Effects of different tillage treatments on evapotranspiration and water use efficacy during the wheat growing period

NT: 免耕; RT: 旋耕; CV: 变异系数. NT: no-tillage; RT: rotary tillage; CV: coefficient of variation.

免耕方式下小麦水分利用效率比旋耕方式平均提高 15.7%, 平水年、丰水年和欠水年分别提高 29.0%、10.0%和 9.9% (图4)。

2.5 不同耕作方式下小麦产量与降水量、蒸散量、水分利用效率及休闲期土壤蓄水量的关系

39年历史年份模拟数据分析表明, 2种耕作方式

下旱作小麦产量和休闲期降水量及年降水量均呈显著正相关(图5)。在旋耕处理下, 旱作小麦产量在低于 600 mm降水量时随降水量增加增幅较小, 在降水量超过 600 mm后随降水量增加增幅较大, 而在免耕处理下, 旱作小麦产量随降水量增幅均较高(图6)。2种耕作方式下旱作小麦产量与生长季降水量相关性

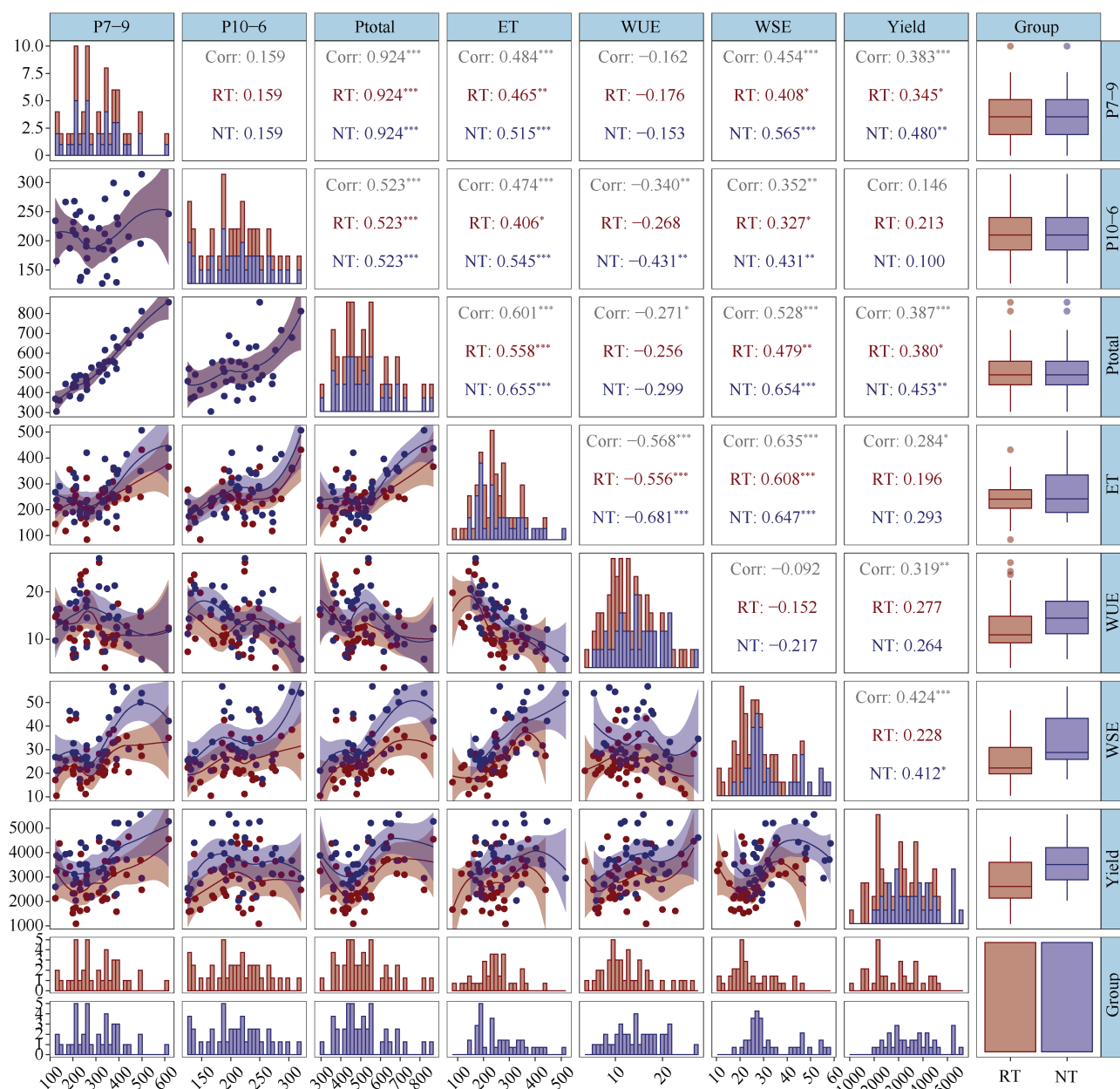


图 5 不同耕作方式下小麦产量与降水量、生育期蒸散量、水分利用效率及休闲期土壤蓄水效率的相关性分析

Fig. 5 Correlation between wheat yield and precipitation, evapotranspiration, water use efficiency and soil water storage efficiency during the fallow period

NT: 免耕; RT: 旋耕; P7-9: 休闲期降水量; P10-6: 小麦生长季降水量; Ptotal: 全年降水量; ET: 生育期蒸散量; WUE: 水分利用效率; WSE: 休闲期蓄水效率。*代表相关性显著($P < 0.05$); **代表相关性极显著($P < 0.01$); ***表示相关性极显著($P < 0.001$)。

NT: no-tillage; RT: rotary tillage; P7-9: precipitation during the fallow period; P10-6: precipitation during the wheat growing season; Ptotal: annual precipitation; ET: evapotranspiration during the growing season; WUE: water use efficiency; WSE: fallow period precipitation storage efficiency; * indicates a significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates a highly significant correlation ($P < 0.01$); *** indicates a highly significant correlation ($P < 0.001$).

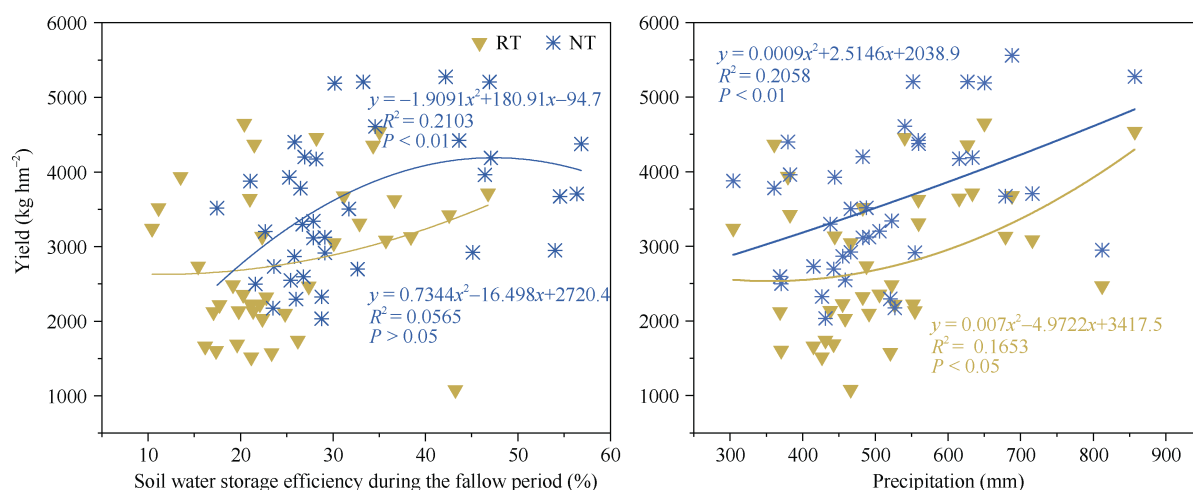


图6 小麦产量与年降水量、休闲期土壤蓄水效率的关系

Fig. 6 Relationship between wheat yield and annual precipitation, and soil water storage efficiency during the fallow period

NT: 免耕; RT: 旋耕。NT: no-tillage; RT: rotary tillage.

均不显著。在不区分处理的条件下,旱作小麦产量与生育期蒸散量、水分利用效率呈显著正相关。在免耕处理下,旱作小麦产量与休闲期蓄水效率呈显著正相关,但在旋耕处理下二者的相关性不显著(图5)。免耕措施下旱作小麦产量随休闲期蓄水效率的增加增幅较快,在达到最高值4000 kg hm⁻²后不再增加,而旋耕处理下旱作小麦产量随休闲期蓄水效率的增加增幅较小(图6)。该研究表明,免耕措施下旱作小麦产量高于旋耕措施的主要原因是免耕方式下休闲期蓄水效率较高(图3、图5和图6)。

3 讨论

保护性耕作结合覆盖管理措施可保持土壤水分、调节耕层土壤水热状况、提高作物产量。张盼峰等^[30]研究表明,与传统耕作相比,11年免耕覆盖和15年免耕覆盖小麦分别增产19.2%和27.6%,表现为实施保护性耕作的年限越长,增产效果就越显著,且长期免耕覆盖可以提高春小麦产量的稳定性和可持续性。本研究中免耕秸秆覆盖下小麦的平均产量高于旋耕还田,且不同降水年型下均为免耕产量高于旋耕,这与张盼峰等^[30]的研究结果一致。免耕秸秆覆盖虽有明显的增产效果,但也存在潜在局限。部分研究指出,免耕覆盖可能导致农田表层土壤硬实,不利于小麦根系下扎^[31],导致小麦生长期耗水量不稳,造成小麦水分利用效率降低^[32]。但本研究结果表明,无论何种降水年型,免耕秸秆覆盖方式下休闲期土壤蓄水效率均显著高于旋耕秸秆还田方式,这可能与当地土壤质地偏沙,长期免耕条件下并

未形成坚硬的犁底层,因此其蓄水量和产量均高于旋耕处理。

少、免耕等保护性耕作能改善土壤物理结构,增加土壤蓄水能力^[33],从而增加作物产量^[34-36]。免耕模式一方面通过减轻对土壤结构的扰动促进水稳性团聚体的形成,另一方面通过秸秆覆盖减少地表与空气的直接接触,二者协同减少土壤水分蒸发、改善降雨入渗效率,尤其在黄土高原小麦休闲期(夏季雨季)能高效蓄存降水,显著提高休闲期土壤蓄水效率^[36-38]。而传统耕作因频繁扰动土壤,会加剧水分蒸发,不利于水分保蓄^[37-38]。本研究发现,免耕秸秆覆盖相较于旋耕秸秆还田可提高旱作小麦休闲期土壤蓄水效率,且不同降水年型均为免耕秸秆覆盖耕作方式效果较好。免耕秸秆覆盖下,休闲期土壤蓄水效率的提高,一方面是由于减少了土壤表面的无效蒸发,另一方面还为小麦生长提供了更多的水分,促进了作物蒸腾作用。此外,蒸发减小而蒸腾增加,二者的抵消效应也可能是本研究中不同耕作方式下小麦生育期蒸散量无显著差异的原因。

降水量是影响旱作农业区小麦产量的主要限制因子。大量研究表明,休闲期降水是影响旱作麦田土壤蓄水量及产量的关键因素^[39-40]。本研究中旱作小麦产量和休闲期降水量及年降水量均呈显著正相关,这与前人的研究结果一致。旋耕方式下小麦产量与休闲期蓄水效率相关性不显著,免耕方式下二者则呈显著正相关,且免耕措施下,随休闲期土壤蓄水效率的增加小麦产量增幅较大(图5和图6)。由此推测,免耕秸秆还田主要通过提高休闲期土壤蓄水

效率提高黄土高原区旱作小麦产量(图3、图5和图6)。另外, 本研究发现, 平水年免耕处理小麦产量较旋耕处理的增幅比丰水年和欠水年更高(图2)。在丰水年, 无论采用何种耕作方式, 充足的降水基本可以满足小麦的生长需求, 因此, 尽管免耕土壤含水量高, 但在丰水年其产量增幅反而小于平水年。在降水受限的干旱年份, 虽然免耕处理的土壤储水量高于旋耕处理, 但增加的水分供给仍不足以完全满足作物需水要求, 其形成产量效益也有限。这一效应与Shi等^[23]对山西闻喜小麦休闲期不同耕作措施影响旱地小麦产量的研究结果类似。

本研究仅用一个小麦品种2年的田间试验数据对APSIM模型进行作物参数校准和验证。由于田间观测限制, 模型模拟过程中没有考虑其他因素(包括小麦品种、气象灾害及病虫害)对小麦生长发育的影响。另外, 气象数据、田间管理数据和土壤数据等输入数据的测定误差及精度也会导致模型输出结果的不确定性^[41]。因此, 该模型是否适用于其他冬小麦品种及其他地区还有待深入研究及验证。

4 结论

本研究利用不同耕作模式下旱作冬小麦产量、生物量和土壤蓄水量等数据对 APSIM 模型进行了校准与验证, 得到了较好的模拟效果。长期模拟结果表明, 与传统旋耕相比, 免耕秸秆覆盖可提高旱作麦田休闲期土壤蓄水效率、增加小麦产量、提高水分利用效率, 且不同降水年型均为免耕秸秆覆盖耕作方式效果较好。不同耕作方式下小麦生育期蒸散量差异较小。旱作小麦产量与休闲期降水量及年降水量均呈显著正相关。免耕方式下旱作小麦产量与休闲期蓄水效率呈显著正相关, 但旋耕方式下二者相关性不显著。综上可知, 免耕覆盖还田主要通过提高休闲期土壤蓄水效率进一步提高黄土高原区旱作小麦产量, 是黄土高原地区旱作小麦增产栽培的有效措施之一。

References

- [1] 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. 生态环境学报, 2019, 28: 1313–1321.
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. Ecol Environ Sci, 2019, 28: 1313–1321 (in Chinese with English abstract).
- [2] Lal R, Negassa W, Lorenz K. Carbon sequestration in soil. Curr Opin Environ Sustain, 2015, 15: 79–86.
- [3] Shi X R, Liu X W, Jing J Y, et al. Long-term no tillage straw mulching increased soil water and nitrogen storage in dryland wheat on the Loess Plateau, but may increase dissolved organic nitrogen leaching. Field Crops Res, 2025, 322: 109705.
- [4] 张玉娇, 李军, 郭正, 等. 渭北旱塬免耕/深松轮耕麦田产量和土壤水分对施肥的响应模拟. 作物学报, 2015, 41: 1726–1739.
Zhang Y J, Li J, Guo Z, et al. Simulation of responses of yield and soil moisture to fertilization in wheat fields under no-tillage rotation on the Weibei dry plateau. Acta Agron Sin, 2015, 41: 1726–1739 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张统帅, 闫丽娟, 李广, 等. 免耕和秸秆覆盖对旱作区土壤氮素、水分和春小麦产量的影响. 浙江农业学报, 2020, 32: 1329–1341.
Zhang T S, Yan L J, Li G, et al. Effects of no tillage and straw mulching on soil nitrogen, water content and yield of spring wheat in dryland farming area. Acta Agric Zhejiangensis, 2020, 32: 1329–1341 (in Chinese with English abstract).
- [6] 卢彩云, 罗锡文, 李洪文, 等. 我国保护性耕作的发展与政策建议. 中国工程科学, 2024, 26(2): 103–112.
Lu C Y, Luo X W, Li H W, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China. Strateg. Study CAE, 2024, 26(2): 103–112 (in Chinese with English abstract).
- [7] 谢炜, 贺鹏, 马宏亮, 等. 秋闲期秸秆覆盖与施磷对冬小麦氮素吸收利用的影响. 作物学报, 2024, 50: 440–450.
Xie W, He P, Ma H L, et al. Effects of straw mulching from autumn fallow and phosphorus application on nitrogen uptake and utilization of winter wheat. Acta Agron Sin, 2024, 50: 440–450 (in Chinese with English abstract).
- [8] Adil M, Lu S Q, Yao Z J, et al. No-tillage enhances soil water storage, grain yield and water use efficiency in dryland wheat (*Triticum aestivum*) and maize (*Zea mays*) cropping systems: a global meta-analysis. Funct Plant Biol, 2024, 51: FP23267.
- [9] 刘家魁, 吴保瑞, 焦艳艳, 等. 我国土地耕作现状及未来发展趋势. 现代农业科技, 2016(1): 246–247.
Liu J K, Wu B R, Jiao Y Y, et al. Current status and future development trend of land tillage in China. Mod Agric Sci Technol, 2016(1): 246–247 (in Chinese).
- [10] Zheng C Y, Yu Z W, Shi Y, et al. Effects of tillage practices on water consumption, water use efficiency and grain yield in wheat field. J Integr Agric, 2014, 13: 2378–2388.
- [11] 白重九, 王健波, 董雯怡, 等. 长期免耕旱作对冬小麦生长季土壤剖面有机碳含量的影响. 中国农业气象, 2021, 42: 169–180.
Bai C J, Wang J B, Dong W Y, et al. Effects of long-term no-tillage on soil organic carbon contents of winter wheat in different soil layers and growth period. Chin J Agrometeorol, 2021, 42: 169–180 (in Chinese with English abstract).
- [12] Mitchell J P, Singh P N, Wallender W W, et al. No-tillage and high-residue practices reduce soil water evaporation. Cal Ag, 2012, 66: 55–61.
- [13] 陈梦楠. 旱作麦田休闲期轮耕对土壤水分耗与产量形成的影响. 山西农业大学硕士学位论文, 山西太谷, 2017.
Chen M N. Effects of Rotational Tillage in Fallow Period on Soil Water Storage and Consumption and Yield Components of Dryland Wheat. MS Thesis of Shanxi Agricultural University, Taigu,

- Shanxi, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [14] 曹碧芸, 赵剑敏, 余少波, 等. 休闲期轮耕对旱地小麦群体质量与产量的影响. 山西农业科学, 2020, 48: 560–565.
- Cao B Y, Zhao J M, Yu S B, et al. Effects of rotation tillage on wheat population quality and yield in dryland. *J Shanxi Agric Sci*, 2020, 48: 560–565 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨娜, 王珂, 席吉龙, 等. 长期定位免耕和施有机肥对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响. 节水灌溉, 2020(10): 61–65.
- Yang N, Wang K, Xi J L, et al. Effects of long-term no-tillage and manure on soil water and winter wheat yield in dryland. *Water Sav Irrig*, 2020(10): 61–65 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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. 西北农业学报, 2018, 27: 1023–1031.
- 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. *Acta Agric Boreali Occid Sin*, 2018, 27: 1023–1031 (in Chinese with English abstract).
- [17] 邵运辉, 吕军杰, 李俊红, 等. 长期免耕覆盖对旱地小麦-玉米周年产量及水分利用的影响. 河南农业科学, 2020, 49(12): 17–23.
- Shao Y H, Lyu J J, Li J H, et al. Effects of long-term no-tillage with straw mulching on annual yield and water use of wheat and maize. *J Henan Agric Sci*, 2020, 49(12): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- [18] 冯仰强, 聂志刚, 王钧, 等. 基于 APSIM 模型研究不同降水年型下降水变化对旱地小麦产量的影响. 作物研究, 2021, 35(2): 108–111.
- Feng Y Q, Nie Z G, Wang J, et al. Based on APSIM model to study the influence of different precipitation years on the yield of dryland wheat. *Crop Res*, 2021, 35(2): 108–111 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郭晓霞, 刘景辉, 田露, 等. 免耕轮作对内蒙古地区农田贮水特性和作物产量的影响. 作物学报, 2012, 38: 1504–1512.
- Guo X X, Liu J H, Tian L, et al. Effects of no-tillage with rotation on soil water retaining properties and crop yield in Inner Mongolia. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1504–1512 (in Chinese with English abstract).
- [20] Liu S, Gao Y R, Lang H L, et al. Effects of conventional tillage and no-tillage systems on maize (*Zea mays* L.) growth and yield, soil structure, and water in loess plateau of China: field experiment and modeling studies. *Land*, 2022, 11: 1881.
- [21] Yadav B, Sharma D, Yadav R, et al. Simulation of soil water-heat dynamics and crop growth in wheat conservation agriculture systems based on the APSIM model. *Sci Rep*, 2021, 11: 18923–18934.
- [22] Chaki A K, Gaydon D S, Dalal R C, et al. How we used APSIM to simulate conservation agriculture practices in the rice-wheat system of the Eastern Gangetic Plains. *Field Crops Res*, 2022, 275: 108344.
- [23] Shi X R, Li C, Li P, et al. Deep plowing increases soil water storage and wheat yield in a semiarid region of Loess Plateau in China: a simulation study. *Field Crops Res*, 2024, 308: 109299.
- [24] 张鑫琪. 基于 APSIM 模型的长期免耕秸秆覆盖对旱地小麦增产机制研究. 山西农业大学硕士学位论文, 山西太谷, 2023.
- Zhang X Q. Research on the Mechanisms of Yield Enhancement in Dryland Wheat under Long-term No-till with Straw Mulching Based on the APSIM Model. MS Thesis of Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi, China, 2023 (in Chinese with English abstract).
- [25] Asseng S, van Keulen H, Stol W, et al. Performance and application of the APSIM nwheat model in the Netherlands. *Eur J Agron*, 2000, 12: 37–54.
- [26] Guo S L, Zhu H H, Dang T H, et al. Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma*, 2012, 189/190: 442–450.
- [27] Maharjan G R, Prescher A K, Nendel C, et al. Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil Tillage Res*, 2018, 180: 210–221.
- [28] Tang J Z, Wang J, Fang Q X, et al. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China. *Eur J Agron*, 2018, 98: 82–94.
- [29] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 等. 气孔导度模型在北方农牧交错带的适用性评价: 以马铃薯和油菜为例. 应用生态学报, 2016, 27: 3585–3592.
- Huang M X, Wang J, Tang J Z, et al. Suitability of four stomatal conductance models in agro-pastoral ecotone in North China: a case study for potato and oil sunflower. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27: 3585–3592 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张盼峰, 汪江涛, 焦念元, 等. 轮耕与隔畦灌溉对麦玉两熟作物生长和水分利用效率的影响. 作物杂志, 2013(6): 118–122.
- Zhang P F, Wang J T, Jiao N Y, et al. Effects of rotational tillage and alternate border irrigation on crops growth and water use efficiency of wheat-maize double crops. *Crops*, 2013(6): 118–122 (in Chinese with English abstract).
- [31] Glab T, Kopec S. Effect of soil compaction on root system morphology and yields of meadow fescue (*Festuca pratensis*). *Pol J Environ Stud*, 2009, 18: 219–225.
- [32] Hewins D B, Sinsabaugh R L, Archer S R, et al. Soil-litter mixing and microbial activity mediate decomposition and soil aggregate formation in a sandy shrub-invaded Chihuahuan Desert grassland. *Plant Ecol*, 2017, 218: 459–474.
- [33] Huang G B, Chai Q, Feng F X, et al. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in arid north-west China. *J Integr Agric*, 2012, 11: 1286–1296.
- [34] 李荣, 侯贤清, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响. 农业机械学报, 2019, 50(8): 289–298.
- Li R, Hou X Q, Wu P N, et al. Effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency. *Trans CSAM*, 2019, 50(8): 289–298 (in Chinese with English abstract).
- [35] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 等. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响. 农业工程学报, 2007, 23(2): 48–53.
- Han B, Li Z J, Wang Y, et al. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield. *Trans CSAE*, 2007, 23(2): 48–53 (in Chinese with English abstract).
- [36] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 夏休闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94–100.
- Hou X Q, Li R, Han Q F, et al. Effects of different tillage patterns

- during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency. *Trans CSAE*, 2012, 28(3): 94–100 (in Chinese with English abstract).
- [37] Du Preez C C, Steyn J T, Kotze E. Long-term effects of wheat residue management on some fertility indicators of a semi-arid Plinthosol. *Soil Tillage Res*, 2001, 63: 25–33.
- [38] Tao Z Q, Li C F, Li J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in northern Huang-Huai-Hai valley. *Crop J*, 2015, 3: 445–450.
- [39] Xue L Z, Khan S, Sun M, et al. Effects of tillage practices on water consumption and grain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the Loess Plateau of China. *Soil Tillage Res*, 2019, 191: 66–74.
- [40] Feng Y, Lin W, Yu S B, et al. Effects of fallow tillage on winter wheat yield and predictions under different precipitation types. *PeerJ*, 2021, 9: e12602.
- [41] Bai H Q, Wang J, Fang Q X, et al. Does a trade-off between yield and efficiency reduce water and nitrogen inputs of winter wheat in the North China Plain? *Agric Water Manag*, 2020, 233: 106095.