



温鑫雨,何进宇,李欣欣,李思凯,杨青青,杨海林,鲍宪远,张登毓. 粉垄耕作深度对玉米生长动态及水分利用效率的定量分析与模型验证[J]. 中国农业大学学报, 2026, 31(02): 13-24.

WEN Xinyu, HE Jinyu, LI Xinxin, LI Sikai, YANG Qingqing, YANG Hailin, BAO Xianyuan, ZHANG Dengyu. Effects of Fenlong tillage depth on the growth dynamics and water use efficiency of maize: Quantitative analysis and model validation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(02): 13-24.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.02.02

粉垄耕作深度对玉米生长动态及水分利用效率的定量分析与模型验证

温鑫雨¹ 何进宇^{1,2,3*} 李欣欣¹ 李思凯¹ 杨青青¹ 杨海林¹ 鲍宪远¹ 张登毓¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021;

3. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水重点实验室, 银川 750021)

摘要 为探究西北干旱地区玉米增产提质的最佳粉垄耕作深度, 2021年于宁夏暖泉农场开展大田试验, 以玉米品种‘天赐19号’为试验材料, 设置粉垄耕作深度为30(FL30)、40(FL40)、50(FL50)、60 cm(FL60)4个处理, 以传统旋耕15 cm为对照(CK), 观测玉米株高、茎粗、根系活力、产量构成和干物质积累等生物量的变化趋势, 分析不同粉垄深度对玉米生长动态及最终产量的影响, 基于实际耗水量和产量, 结合AquaCrop模型模拟冠层覆盖度与干物质分配, 测算粉垄耕作条件下玉米水分利用效率(WUE)。结果表明: 抽雄期, FL60的玉米株高为 285.6 ± 12.3 cm, 较CK增加9.4%, FL40的茎粗较CK增幅最大, 为6.76%; FL60的苗期根系活力较CK升高65.86% ($P < 0.05$), FL40的抽雄-成熟期根系活力较CK高24.31%~47.28%。FL60的穗长为 19.83 ± 2.05 cm、百粒重为 32.07 ± 2.26 g、籽粒产量达 15.73 ± 0.80 t/hm², 均为各处理最优, 较CK增产57.14%; FL60的WUE最高为59.62 kg/(hm²·mm), 较CK升高101.42%。AquaCrop模拟显示, FL60的冠层覆盖度(88%)与干物质积累(224.80 ± 15.78 g/株)也均为最优, 模型精度 $R^2 \geq 0.89$, NRMSE $\leq 8.52\%$ 。综上, 西北干旱地区实现玉米增产提质的最佳粉垄深度为50~60 cm。

关键词 粉垄; 玉米; 产量; 水分利用效率; AquaCrop模型

中图分类号 S152.7; Q945.11

文章编号 1007-4333(2026)02-0013-12

文献标志码 A

Effects of Fenlong tillage depth on the growth dynamics and water use efficiency of maize: Quantitative analysis and model validation

WEN Xinyu¹, HE Jinyu^{1,2,3*}, LI Xinxin¹, LI Sikai¹, YANG Qingqing¹, YANG Hailin¹,
BAO Xianyuan¹, ZHANG Dengyu¹

(1 School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2 Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China;

3 Key Laboratory of Internet of Water and Digital Water Governance of Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2025-03-25; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1900601-02-04); 宁夏回族自治区重点研发计划(2019BBF02006-01); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 温鑫雨(ORCID: 0009-0008-5512-9406), 硕士研究生, E-mail: 2381260003@qq.com

通讯作者: 何进宇(ORCID: 0000-0002-9712-8945), 副教授, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: hejinyu2017@163.com

Abstract To explore the optimal Fenlong tillage depth for increasing yield and improving quality of maize in arid regions of Northwest China, a field experiment was conducted in 2023 at Nuanquan Farm, in Ningxia. Taking maize variety ‘Tianci 19’ as the experimental material, four deep tillage treatments with depths of 30 (FL30), 40 (FL40), 50 (FL50), and 60 cm (FL60) were set up, with traditional rotary tillage 15 cm as the control (CK). By continuously monitored the changing trends of biomass indicators such as maize plant height, stem diameter, root activity, yield components, and dry matter accumulation, the influence law of different deep tillage depths on maize growth dynamics and final yield was obtained. Based on the actual water consumption and yield, combined with the simulation of canopy coverage and dry matter distribution by the AquaCrop model, the water use efficiency of maize under deep tillage conditions was further calculated. The results showed that: FL60 increased plant height by 9.4% (285.6 ± 12.3 cm) at tasseling stage compared to CK, while FL40 exhibited the highest stem diameter increment (6.76%). FL60 enhanced root activity by 65.86% ($P < 0.05$) at the seedling stage, and FL40 showed superior root vitality, with a 24.31%–47.28% increase from tasseling to maturity. FL60 achieved optimal yield components, including ear length (19.83 ± 2.05 cm), 100-grain weight (32.07 ± 2.26 g), and grain yield (15.73 ± 0.80 t/hm²), with a 57.14% yield increase over CK. FL60 also demonstrated the highest WUE (59.62 kg/hm²·mm), representing a 101.42% improvement compared to CK. AquaCrop simulations indicated that FL60 achieved the highest canopy coverage (88%) and dry matter accumulation (224.80 ± 15.78 g/plant), with high model accuracy ($R^2 \geq 0.89$, $\text{NRMSE} \leq 8.52\%$). In summary, the optimal recommended smashing-ridging depth for achieving increased yield and improved quality of maize under the experimental conditions is 50 to 60 cm in arid region of Ningxia.

Keywords Fenlong cultivation; maize; production; water use efficiency; AquaCrop model

玉米是宁夏回族自治区全区种植面积和规模最大的重要粮食作物,其中大部分种植地区都集中于引黄灌区^[1]。近年来,由于土壤环境和单一耕作方式等多方面因素的影响,玉米单产增长速率逐渐降低,种植区普遍出现土壤耕层逐渐变浅、土壤紧实度增加等问题,制约了玉米的生产^[2]。通过研究不同粉垄深度对玉米产量的影响机制,可为粉垄技术在玉米生产中推广提供理论依据。粉垄耕作变革了旱地传统耕作方法,可有效疏松耕作层土壤,提升土壤环境质量,提高作物单产与质量^[3]。因此,确定适宜的粉垄深度,对宁夏回族自治区玉米高效可持续生产具有重要意义。

已有研究表明,在新疆重盐碱地实施粉垄耕作可使土壤全盐含量下降 31.31%,棉花增产 48.80%;在陕西轻度盐碱地实施粉垄耕作可使土壤全盐含量降低 42.73%,夏玉米增产 34.83%^[4]。在宁夏回族自治区的砂质盐碱地实施粉垄耕作可使土壤容重降低 11.61%、孔隙度提升 12.75%^[5]。粉垄耕作可以促进玉米植株生长发育,对产量增益具有积极效应,其中以 50 cm 耕作深度下的后效表现尤为显著。然而,关于粉垄耕作后效的持续周期及最适耕作深度等关键问题,仍需进一步探究^[6]。因此,尽管粉垄耕作在盐碱地改良、作物增产及土壤物理性质优化等方面已显现积极效果,但其核心

技术参数耕作深度对作物生长的调控机制尚未完全明晰,且现有研究多聚焦于浅层耕作(≤ 40 cm)的短期效益^[7],对深层耕作(> 50 cm)的长期影响仍缺乏系统性探讨,有待深入研究。

针对宁夏北部干旱地区土壤板结、耕作层变浅导致玉米产量下降等问题,应用粉垄耕作技术,通过对比不同粉垄耕作深度对玉米生长特性、产量及水分利用效率的影响,揭示粉垄耕作对玉米产量等生长特性的影响机理,并通过 AquaCrop 模型进行辅助验证,可为典型干旱地区粉垄耕作技术应用推广和玉米产业可持续发展提供理论依据^[8]。AquaCrop 模型以作物-土壤-大气系统为基础,能够详细模拟玉米生长过程中土壤水分的动态变化、玉米的蒸腾蒸发过程以及玉米对水分的吸收利用情况^[9],通过量化这些过程,可清晰了解玉米在不同生长阶段、不同粉垄深度的水分消耗和利用效率的差异,评估玉米生产中水分利用效率的最优粉垄深度,为合理的水资源政策和耕作方式提供参考,实现水资源的高效利用和农业可持续发展^[10]。目前深粉垄在我国应用较为局限,针对干旱区玉米的粉垄耕作深度梯度效应的研究尚未见报道。本研究通过设置不同粉垄耕作深度处理,系统探究其对玉米生长、产量和水分利用效率的影响,并结合 AquaCrops 模型进行验证,旨在明确粉垄耕作深度对

干旱区玉米产量及水分利用效率的影响,并探索适宜的粉垄耕作深度,以期优化西北干旱区玉米高产高效粉垄耕作技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏回族自治区银川市宁夏农垦集团暖泉农场(106°11' E、38°42' N,海拔1 113 m),该地区属于典型干旱地区,中温带大陆性气候,年均降水量188 mm,2021年总降水量200.5 mm,蒸发量1 845 mm/年,2021年总蒸发量1 583 mm,年均气温10℃,平均最高气温为32℃,平均最低气温为5℃,全年日照时数2 726.9 h。试验地月降水量和气温,见图1,试验地供试土壤为砂壤土,0—60 cm土壤初始理化性质见表1。

1.2 试验设计

大田试验采用单因素随机区组试验,设置粉垄

耕作深度为30 (FL30)、40 (FL40)、50 (FL50)和60 cm(FL60)4个处理,以传统旋耕(耕深约15 cm)为对照(CK),每个处理重复3次,试验区长100 m,宽38 m,一共设置15个小区。

供试玉米品种为‘天赐19号’,购自甘肃武威甘鑫物种有限公司,该品种具有较好的抗病性和防虫性。2021年4月16日采用“自走分体式粉垄机”(广西农科院研发、广西五丰机械有限公司生产)进行粉垄作业,5月7日使用“播种-施肥-铺管”一体机进行玉米播种作业,种植模式为宽窄行,行距40 cm,垄距70 cm,播种量82 500粒/hm²,穴距22 cm,播种深度4 cm。灌溉水源就近引用黄河水,进行“沉沙-澄清-过滤”后进行滴灌水,全生育期内灌水14次,灌水定额为120 m³/hm²。试验周期为2021年5月7日播种,9月27日收获,生育期共143 d。试验地四周设置2 m的保护行防护。

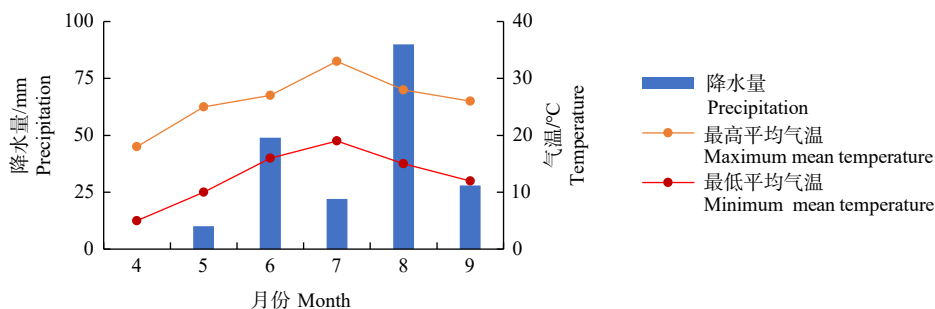


图1 试验地月降水量和气温

Fig. 1 Monthly precipitation and air temperature in test site

表1 土壤初始理化性质

Table 1 Initial physicochemical soil properties

指标 Index	土壤深度/cm Soil depth		
	0—20	>20—40	>40—60
初始含水率/% Water content	10.51	12.07	12.68
容重/(g/cm ³) Bulk density	1.38	1.39	1.37
全氮/(g/kg) Total nitrogen	0.76	0.47	0.28
碱解氮/(mg/kg) Alkaline nitrogen	37.65	30.23	28.50
速效磷/(mg/kg) Quick-acting phosphorus	17.34	15.52	15.30
速效钾/(mg/kg) Quick-acting potassium	100.03	95.74	85.60
有机质/(g/kg) Organic matter	19.32	17.43	12.07
水溶性盐/(g/kg) Water-soluble salt	0.83	0.81	0.91
pH	9.02	8.67	8.64

1.3 观测指标及方法

1.3.1 玉米生长特性和产量

在玉米各生育时期每个小区取3株长势相当、健康发育的玉米植株,分别在玉米的各个生育时期测量植株的株高与植株基部的茎粗,mm。使用TTC还原法^[11]测定玉米根系活力。

在玉米收获期内每个小区采集10穗玉米果穗进行考种,测量玉米的穗长、穗粗、穗重,并记录穗行数、行粒数,再测算每穗籽粒数和百粒重。计算玉米籽粒产量。在玉米收获期内每个小区从基部割取10株玉米,称量每个处理的植株质量,记为玉米刈割产量,t/hm²。

1.3.2 玉米的干物质积累

在玉米各生育时期,每个小区取5株健壮植株,带回实验室,按根、茎、叶分离后放入纸袋,先在105℃下杀青0.5h,后在80℃左右烘干至恒重,记录烘干后质量,kg/hm²。

1.3.3 玉米的水分利用效率

通过作物耗水量和产量计算各处理的水分利用效率^[12]。

作物耗水量的计算公式如下:

$$ET=R+U-F-\Delta w+I$$
 (1)

式中:ET,作物耗水量,mm;R,作物生育期降水量,mm;U,地下水补给量,mm;F,深层渗漏量,mm;

Δw ,作物收获后和试验地耕作播种前土壤储水量之差,mm;I,作物生育期灌水量,mm。根据试验地条件,上式可简化为,

$$ET=R-\Delta w+I-F$$
 (2)

水分利用效率的计算公式如下,

$$WUE=Y/ET$$
 (3)

式中:WUE,作物的水分利用效率,kg/(hm²·mm);Y,作物产量,kg/hm²;ET,作物生育期耗水量,mm。

1.4 数据分析

数据的整理和作图采用Microsoft Excel 2021进行,方差分析和主成分分析采用IBM SPSS 25.0进行,多重比较采用Duncan's法进行。

1.5 AquaCrop模型原理及参数

AquaCrop模型是一款广泛应用的作物模型,其通过土壤水分驱动模拟作物生长与产量形成过程,并综合考量气象、土壤、作物及管理措施等多因素的影响^[13]。该模型在环境与作物模拟中包含4个子模块:气候模块涵盖降水量、需水量、CO₂浓度及最高/最低气温;作物模块涉及生长周期与产量;管理模块包含灌溉及田间管理措施;土壤模块则包括土壤剖面与水平衡管理。用2021年各处理田间实测数据对模型参数进行调试与验证,经调试后的AquaCrop模型参数见表2。

表2 AquaCrop模型作物模块参数
Table 2 AquaCrop model crop module parameters

模型参数 Model parameter	取值 Value	单位 Unit	模型参数 Model parameter	取值 Value	单位 Unit
基底温度 T_{base}	5	℃	最大有效生根深度 Z_x	1.3	m
上限温度 T_{upper}	32	℃	根区膨胀的形状因子 R_{exshp}	1.4	m
初始覆盖度 C_{C0}	0.43%	%	作物系数 K_{cb}		
最大冠层覆盖度 C_{CX}	90.00%	%	作物蒸腾系数 $K_{cTr,x}$	0.66	
冠层衰减系数 C_{DC}	0.03	℃/d	标准水分生产力 WP	26	G/m ²
土壤最大蒸发系数 K_{ex}	0.32		参考收获指数 HI	40	%
最小有效生根深度 Z_{min}	0.3	m			

2 结果与分析

2.1 不同粉垄耕作深度对玉米生长特性的影响

2.1.1 对玉米株高的影响

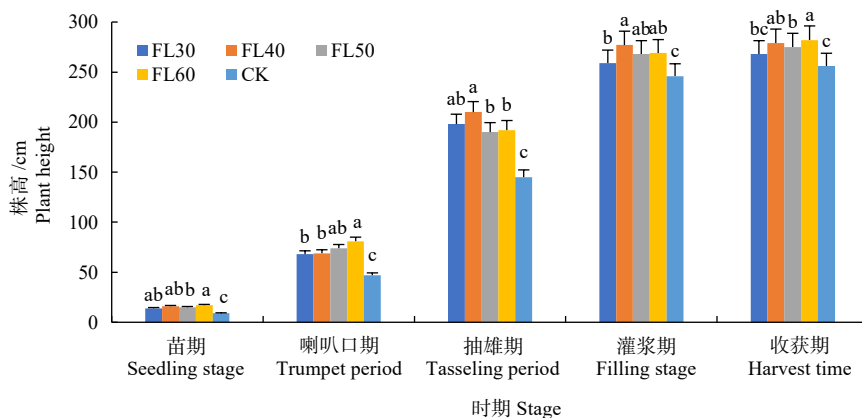
由图2可知,苗期-抽雄期各粉垄处理的玉米株高均呈持续增长趋势;其中,喇叭口-抽雄期增速最

快,抽雄期后株高趋于稳定。整个生育期各处理的株高由高到低为60(FL60)>40(FL40)>30(FL30)>50 cm (FL50)>对照(传统旋耕15 cm,CK);FL30、FL40、FL50、FL60分别比CK高3.75%、6.76%、1.8%、9.4%($P<0.05$)。可见,与CK相比,各粉垄耕作处理对玉米株高均具有显著的促进作用。

2.1.2 对玉米茎粗的影响

由图3可知,苗期-抽雄期各处理的玉米茎粗呈持续增长趋势;灌浆期后增速逐渐减慢至平缓;苗期和喇叭口期,各粉垄处理的玉米茎粗均无显著差

异;抽雄期后差异显著,其中FL50和FL60的茎粗均显著高于CK,整个生育期各处理的茎粗由高到低均为FL50>FL60>FL40>FL30>CK,说明粉垄耕作有利于玉米茎粗的增加。



FL30, FL40, FL50 和 FL60 分别为粉垄深度 30、40、50 和 60 cm。不同小写字母代表各处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。下同。

FL30, FL40, FL50 and FL60 refer to Fenlong depths of 30, 40, 50 and 60 cm, respectively. Different small letters represent significant differences among treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

图2 不同粉垄耕作深度处理的玉米株高变化

Fig. 2 The changes in maize plant height under different Fenlong cultivation depth treatments

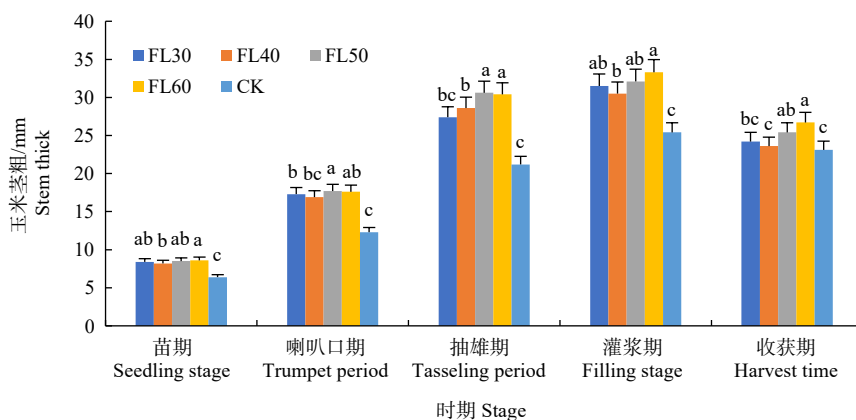


图3 不同粉垄耕作深度处理的玉米茎粗变化

Fig. 3 The changes in maize stem diameter under different Fenlong cultivation depth treatments

2.1.3 对玉米根系活力的影响

由图4可知,在苗期,FL60的玉米根系活力显著高于其他处理,较CK高65.86%;喇叭口期,FL30的玉米根系活力显著高于其他处理,FL50与CK基本一致,FL60略低于CK,FL40则显著高于CK,FL30和FL40分别比CK高出37.05%和11.03%;抽雄期,FL30和FL40根系活力均显著高于CK,FL50、FL60和CK间无显著差异;其中,FL30和FL40分别比CK高16.90%和24.31%;在玉米灌浆期,不同粉垄深度处理的玉米根系活力均显著高于CK,FL40与其余深

度粉垄处理的差异均达显著水平,各粉垄处理的玉米根系活力由大到小依次为FL40>FL30>FL60>FL50;玉米成熟期,不同粉垄深度处理的玉米根系活力也均显著高于CK,玉米成熟期各粉垄处理的根系活力由大到小依次为FL40>FL50>FL30>FL60。综上,粉垄处理对玉米根系活力有显著的促进作用,FL40的效果最好。

2.1.4 对玉米叶片数、穗位、籽粒含水率的影响

由表3可知,各粉垄处理的叶片数、穗位及籽粒含水率的差异均达显著水平($P < 0.05$)。FL40的叶

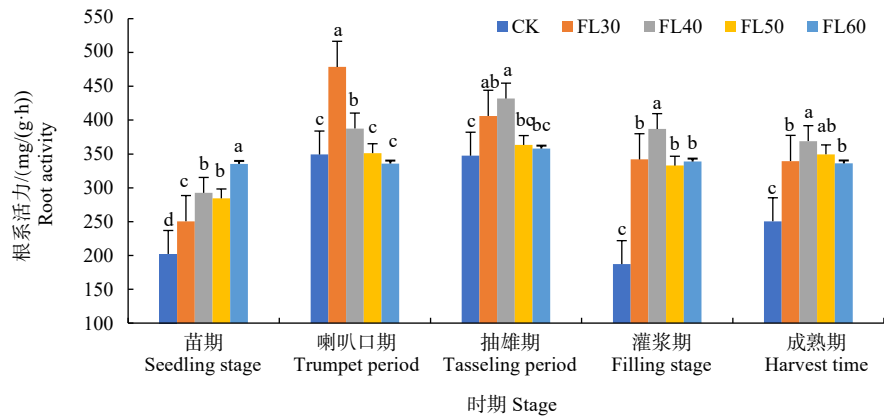


图4 不同粉垄耕作深度处理的玉米根系活力变化

Fig. 4 The change of maize root activity under different Fenlong tillage depths treatments

片数最多,较CK增加44.87% ($P<0.05$),其后依次为FL60、FL30和FL50,表明粉垄深度与叶片发育存在非线性剂量效应。穗位高度由高到低为FL40>FL60>FL30>FL50>CK,且与株高变化呈显著正相关($r=0.87, P<0.01$)。籽粒含水率测

定显示,成熟期FL50的籽粒含水率达(78.30±6.61)%,显著高于CK,且其变异系数最低(CV=8.44%);而CK的籽粒含水率波动显著(CV=60.15%),整体均值较各粉垄处理低18.61%,说明传统耕作可能加剧水分胁迫导致的籽粒脱水不均。

表3 不同粉垄耕作深度处理的玉米生长特性变化

Table 3 The changes in maize growth characteristics under different Fenlong depth treatments

处理 Treatment	叶片数 Number of blade	穗位/cm Panicle position	籽粒含水率/% Water content of maize
CK	8.38±1.10 ^c	88.34±6.21 ^b	59.70±35.91 ^a
FL30	11.81±1.27 ^a	99.90±11.70 ^{ab}	70.09±18.57 ^a
FL40	12.14±1.08 ^a	103.45±10.55 ^a	70.04±20.23 ^a
FL50	9.97±0.63 ^b	91.24±15.46 ^c	78.30±6.61 ^a
FL60	10.17±0.54 ^b	96.83±8.67 ^{bc}	74.99±2.09 ^a

2.1.5 对玉米产量的影响

由表4可知,FL30、FL40的玉米穗长与CK差异均不显著,FL50和FL60的穗长均显著高于其他处理,分别比CK高20.47%和18.04%;穗粗表现与穗长相似,仍以FL50、FL60为较高,分别比CK高13.91%和7.30%。除FL40的穗行数显著低于其他处理,其他各处理的差异均不显著。在穗粒重、百粒重方面,各处理由高到低均为FL60>FL50>FL30>FL40>CK。籽粒产量则表现为FL60>FL50>FL30,分别比CK增产57.14%、15.48%、和8.79%。刈割产量由高到低为FL60>FL50>FL40>FL30>CK,FL60的玉米刈割产量比CK增加42.66%。综合来看,各粉垄处理的穗行数、穗粒重、百粒重等产量构成因素均高

于传统耕作处理(CK),玉米产量得到了显著提升。此外,由于各粉垄处理下的玉米株高、茎粗也得到显著提升,生物量与刈割产量也显著高于传统耕作处理。

2.2 不同粉垄耕作深度对玉米干物质积累特征的影响

由图5可知,各粉垄耕作处理均显著影响玉米干物质积累动态,且效应随生育阶段变化。苗期,FL30的干物质积累量最高(较CK升高183.17%,下同),后面依次为FL40(133.94%)、FL60(64.96%)和FL50(51.31%);FL30与FL40、FL60均有显著差异,且显著高于FL50和CK。喇叭口期,各粉垄处理的干物质积累量均显著高于CK,FL40(37.48%)、FL60(30.51%)、FL30(28.30%)、FL50(20.92%),FL50与FL40差异显著。抽雄期,

表 4 不同粉垄耕作深度处理的玉米产量及产量构成因素

Table 4 The maize yield and yield components of maize under different Fenlong depth treatments

处理 Treatment	穗长/cm Spike length	穗粗/cm Spike thickness	穗行数 Number of row	行粒数 Number of grain in a row	穗重/g Spike weight
CK	16.46±1.31 ^b	41.11±1.81 ^c	14.89±1.05 ^a	33.22±4.55 ^c	136.14±28.33 ^d
FL30	17.42±1.24 ^b	44.11±3.33 ^b	14.89±1.45 ^a	38.44±2.24 ^{ab}	170.84±29.13 ^{bc}
FL40	17.66±1.47 ^b	41.44±1.51 ^c	13.33±1.00 ^b	37.33±5.00 ^b	151.77±39.06 ^{cd}
FL50	19.43±0.85 ^a	44.44±2.60 ^b	15.33±1.00 ^a	40.44±2.96 ^{ab}	200.80±36.79 ^{ab}
FL60	19.83±2.05 ^a	46.83±2.04 ^a	15.67±1.51 ^a	41.83±4.62 ^a	224.80±15.78 ^a

处理 Treatment	穗粒重/g Grain weight	百粒重/g Hundred grain weight	籽粒产量/t/hm ² Seed yield	刈割产量/t/hm ² Mowing yield
CK	116.63±25.96 ^d	24.59±1.17 ^c	10.01±1.12 ^c	45.26±8.03 ^b
FL30	150.24±25.35 ^{bc}	28.68±1.32 ^b	10.89±0.76 ^{bc}	48.56±2.51 ^b
FL40	138.51±34.02 ^{cd}	27.80±3.34 ^b	10.00±0.29 ^c	52.36±7.62 ^b
FL50	174.35±34.61 ^{ab}	28.93±1.99 ^b	11.56±0.25 ^b	52.65±5.60 ^b
FL60	199.15±11.71 ^a	32.07±2.26 ^a	15.73±0.80 ^a	64.57±4.53 ^a

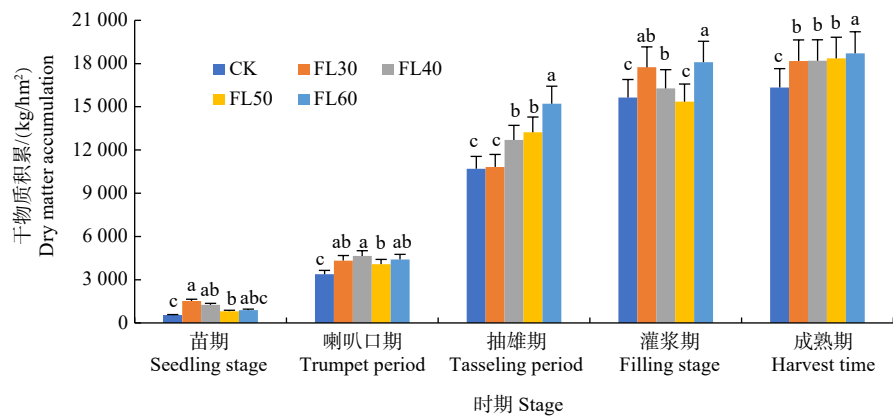


图 5 不同粉垄耕作深度处理的玉米干物质积累变化

Fig. 5 The change of dry matter accumulation under different Fenlong depth treatments

FL60的干物质积累量最高(较CK升高42.14%),显著优于FL50(23.65%)、FL40(18.64%)及FL30(1.17%);FL30与CK无显著差异。灌浆期,各处理间无显著差异,但FL60仍保持最高积累量。成熟期,FL60积累量显著高于其他处理(较CK提升11.29%~14.50%),FL50、FL40、FL30间无显著差异。综上,粉垄耕作对干物质积累的促进效应在生育前期(苗期-抽雄期)最为显著,FL60整体表现最优,成熟期干物质积累量由高到低为FL60>FL50>FL40>FL30>CK。

2.3 不同粉垄耕作深度对玉米水分利用效率的影响

由表5可知,在玉米生育期内,各处理的耗水量

由高到低依次为FL60、FL40、FL50、FL30,分别较CK降低76.71、69.06、53.37和28.66 mm。水分利用效率(WUE)以FL60最高,比CK高101.42%。综上,粉垄耕作可显著降低玉米耗水量,增加玉米的水分利用效率。

2.4 AquaCrop模型校准及验证

2.4.1 冠层覆盖度模拟

由图6可知,根据2021年田间试验数据校准评价指标决定系数(R^2)为 ≥ 0.73 ,均方根误差(RMSE)为0.416%~3.100%,NRMSE为12.75%~16.10%, $d \geq 0.99$,Nash效率系数(NSE)为0.69~0.78。校准后的AquaCrop模型具有较高的精准度,适用于模拟冠层覆盖度的变化规律。冠层覆

表5 不同粉垄耕作深度处理的玉米水分利用效率变化

Table 5 The changes in water use efficiency of maize under different Fenlong depth treatments

处理 Treatment	播前土壤 储水量/mm Soil water storage before sowing	生育期 降雨量/mm Rainfall in growth period	灌水量/mm Irrigation capacity	收获后土壤 储水量/mm Soil water storage after harvest	耗水量/mm Water consumption	水分利用效率/ (t/(hm ² ·mm)) WUE
CK	304.51	194.1	252	277.80±20.60 ^c	406.75±20.60 ^a	29.60±5.25 ^c
FL30	304.51	194.1	252	306.46±28.42 ^{bc}	378.09±28.42 ^{ab}	35.21±5.64 ^{bc}
FL40	304.51	194.1	252	346.85±17.16 ^a	337.69±17.16 ^c	31.75±2.14 ^c
FL50	304.51	194.1	252	331.17±14.13 ^{ab}	353.38±14.13 ^{bc}	40.33±2.90 ^b
FL60	304.51	194.1	252	354.51±10.93 ^a	330.04±10.93 ^c	59.62±3.53 ^a

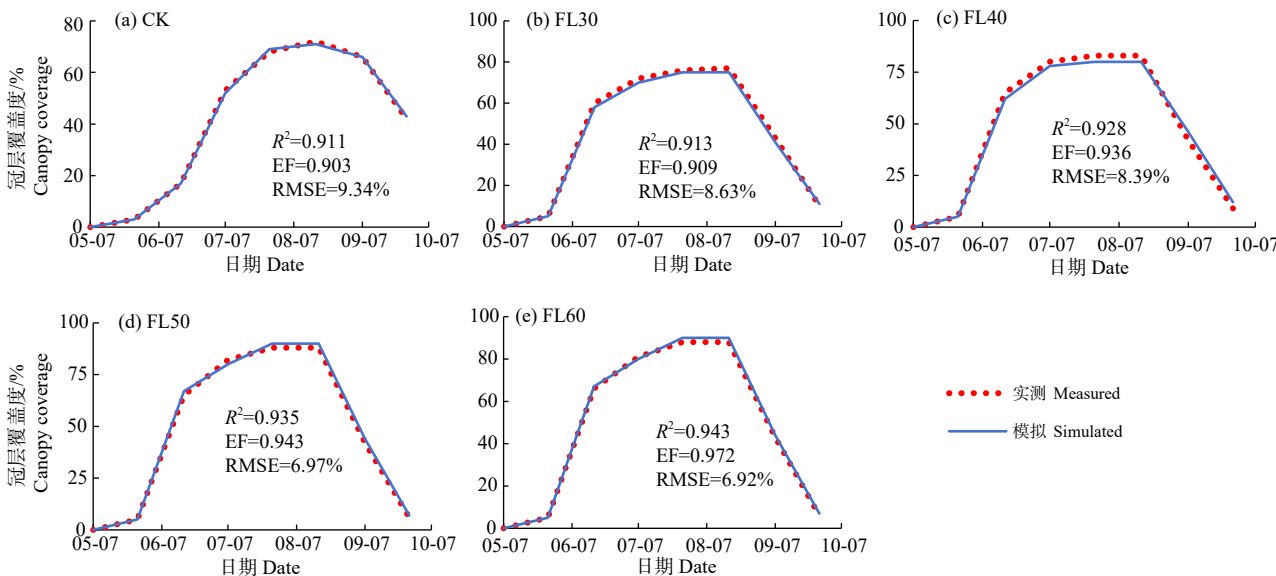


图6 不同粉垄耕作深度处理的玉米冠层覆盖度变化

Fig. 6 The change in maize canopy coverage under different Fenlong depth treatments

盖度模拟结果与实测结果相比,6—7月是冠层增长最快速的时期,即苗期-抽雄期是冠层增长最快速的时期,灌浆期会有一定的减缓然后趋向平稳。6—8月FL30、FL40的冠层覆盖度的实测值高于模拟值,7—9月FL50、FL60处理冠层覆盖度的模拟值高于实测值,CK的模拟值与实测值几乎相同。CK、FL30、FL40、FL50和FL60最大冠层覆盖度实测值分别为72%、77%、83%、88%和88%,应用MSE、NRMSE、 R^2 和NSE对结果进行评价得到 AquaCrop 模型中 CK、FL30、FL40、FL50和FL60最大冠层覆盖度模拟值分别为71%、75%、80%、90%和90%。

2.4.2 干物质和产量模拟

由图7可知,CK、FL30、FL40、FL50和FL60实

测产量分别为12.9、15.01、16.32、17.33和23.58 kg/hm²,模拟产量分别为12.2、20.62、21.43、22.68和22.97 kg/hm²。随着粉垄深度增加,玉米籽粒实测产量从10.01 t/hm²(FL30)逐步提升至15.73 t/hm²(FL60),其中FL60较CK增产82.91%,表明深粉垄60 cm(FL60)的增产效果最显著。随着粉垄深度增加,干物质积累量呈递增趋势,FL60的实测和模拟处理结果均为最高,分别为18.71和21.22 t/hm²,较CK升高14.5%,表明深粉垄对生物量积累具有持续促进作用。模型模拟结果表明,各粉垄处理的产量均显著高于传统耕作(CK),FL50与FL60差异不显著($P<0.05$)。

2.4.3 水分利用效率模拟

由表6可知,实测水分利用效率(WUE)随粉

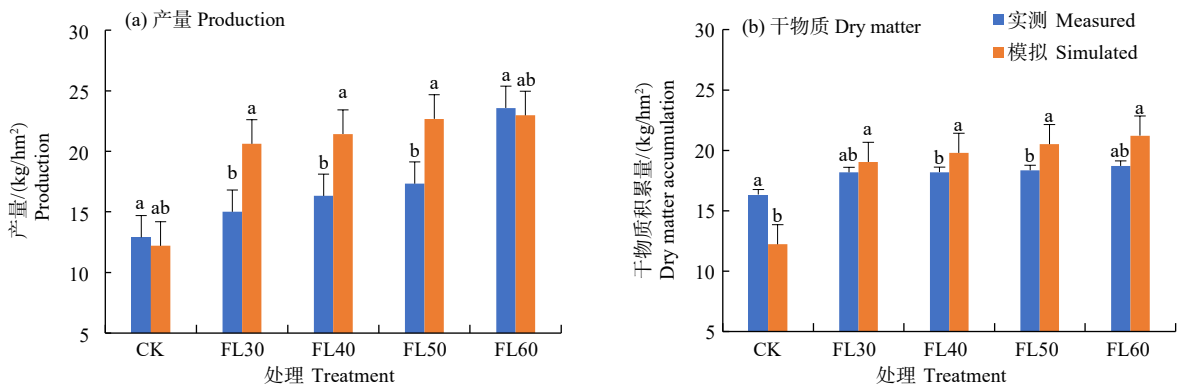


图 7 不同粉垄耕作深度处理的玉米产量和干物质变化

Fig. 7 The change in maize yield and dry matter under different Fenlong depth treatments

垄深度增加显著提升,FL60 较 CK 高 101.42%; 模型模拟值整体高于实测值,其中 FL40 和 FL50 偏差均较大,分别为 +65.8% 和 +27.9%。在不同粉垄深度处理中,FL60 的 WUE 最高、拟合程度较好,模拟值(58.02)与实测值(59.62)高度吻

合(误差仅 2.7%),EF=0.981,RNSE=6.75%,说明模型精度最优,表明深层粉垄 60 cm(FL60)的水分调控机制与模型假设高度匹配;且不同粉垄处理中的 WUE 都显著高于传统耕作处理(CK)。

表 6 不同粉垄耕作深度处理的玉米水分利用效率(WUE)变化

Table 6 The change in water use efficiency of maize under different Fenlong depth treatments

处理 Treatment	水分利用效率/(t/(hm²·mm)) WUE		R²	EF	RNSE/%
	实测 Measured	模拟 Simulated			
CK	29.60	23.89	0.873	0.886	9.230
FL30	35.21	44.06	0.876	0.894	8.520
FL40	31.75	52.63	0.884	0.898	8.140
FL50	40.33	51.57	0.895	0.996	6.810
FL60	59.62	58.02	0.894	0.981	6.754

3 讨 论

3.1 不同粉垄耕作深度对玉米生长特性及产量的影响

耕作措施在改善土壤环境与理化性质的同时,直接影响作物的生长特性及产量^[14],作物生长特性的优劣和产量大小是反映耕作措施对作物影响的主要指标^[15]。粉垄耕作对玉米的产量影响主要是通过提升玉米的穗粒数和穗粒重等产量构成因素达成的^[16]。本研究结果表明,粉垄耕作深度会显著影响玉米株高、茎粗及产量构成,其中耕深为 60 cm (FL60)的籽粒产量较 CK 高 57.14%($P<0.05$),这与深层耕作促进根系下扎、增强养分吸收能力的效

应密切相关^[17]。李浩等^[18]研究发现,粉垄耕作可以通过促进作物茎部细胞的增生与增殖,从而使茎秆增粗,实现作物产量提升;此外,粉垄耕作对于作物的出苗率也有很好的提升效果。杨博^[19]研究发现,粉垄耕作可以显著提升实验室环境条件下盐碱处理的高粱出苗率。陶星安等^[20]研究发现,相比传统耕作,粉垄耕作可使根系活力显著增加,根系阳离子交换量显著增加。可见,粉垄耕作是提升无覆盖措施下种子出苗率的有效耕作措施和途径之一。

值得注意的是,本研究中,在抽雄-成熟期 FL40 的根系活力较 CK 高 24.31%~106.67%,茎粗较 CK 增加 6.76%,为最优,表明中等深度粉垄(40 cm)在玉米生育中后期对植株抗倒伏及促进干

物质转运具有关键作用。这一结果与梁金凤等^[21]在北京土壤养分较低的地区进行的深松耕试验结果一致。深松耕有利于坚实犁底层的破除,有利于土壤进行水热交换,对玉米根系发育和产量的提高具有促进作用^[22]。本试验发现,FL60的增产效应最显著,可能归因于干旱区深层土壤蓄水能力的提升,王娟等^[23]研究发现,随着机械粉垄深度的增加,经过粉垄处理的土壤含水量、总孔隙度、土壤养分含量较对照均有所增加,能够实现增产增收的效果。盛勇创等^[24]通过观察广西甘蔗地不同粉垄深度的土壤孔隙结构发现,相较于粉垄浅耕,粉垄深耕可有效增加土壤不同孔径级别的二维和三维孔隙数量。粉垄耕作后效能促进玉米植株的生长,对提高玉米产量有一定作用,粉垄耕作深度为50 cm时,其后效较为明显^[25]。

另外,多项研究表明,粉垄耕作后,作物蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和净光合速率(P_n)都得以提升^[26]。这与叶片数量与单株叶面积的提升具有一定关系,在一定程度上可以提升玉米的光合效率^[27]。 P_n 的提升使作物在一定生育时期内可以合成更多的营养物质,增加作物的产量,提升作物的品质^[28]。

3.2 不同粉垄耕作深度对玉米水分利用效率的影响

Wei^[29]的研究证实,粉垄耕作在我国21个省份的20多种农作物上应用效果显著,已在多个主要农作物产区推广应用。该技术不仅能在不增加投入的情况下,使作物增产10%~30%、品质提高5%,还能将土壤保水能力提升1倍^[14]。粉垄深耕对土壤水分利用效率的影响主要体现在以下几个方面,首先,粉垄耕作通过改善土壤结构和环境,降低土壤的紧实度,提高土壤的持水能力,水分在土壤中的保持时间与传统旋耕相比更长,从而能够保证耕地在玉米的生育期内提供充足的水分^[30];另外,降低紧实度后的耕地土壤通过下渗不频繁的降水以及粉垄自然形成的“U”形槽的蓄水能力,使得浅层次和深层次土壤的含水率和储水量明显提升^[31]。在本试验中,各处理灌水量一致的情况下,处理越深玉米耗水量越低、水分利用效率越高,其中FL60在耗水量和水分利用效率都具有最佳的效果(表4),可以减少土壤水分的蒸发和散失,这与深层耕作减少地表蒸发、促进水分向根区深层渗透的机制相符^[22]。因此,在一定程度上,粉垄深耕不仅可提高土壤的储水能力,增加收获后土壤耕层储水量,而

且使得疏松的土壤中根系更易下扎和发育,提高了根系对水分的吸收效率,从而降低了作物的耗水量^[32]。在耗水量降低的情况下,即使是干旱的年份,玉米所在的土壤环境也可以持有一定的水分以保证玉米后期的生长和发育^[33]。综上,通过改善土壤对水分的保持和贮藏能力,可提高土壤的保水保墒效率,减少作物的耗水量,可以保证作物的稳产,也提升了作物的水分利用效率。这与李轶冰等^[34]的研究结果类似。

未来,应结合土壤微生物群落结构变化、作物根际微生态环境响应等挖掘粉垄促进作物生长的潜在生态路径,进一步完善粉垄技术理论体系,以推动其在农业可持续发展中的广泛应用与深度发展。

4 结 论

与传统旋耕(CK)相比,粉垄耕作可显著改善宁夏干旱地区玉米生长性状与生理指标,其中粉垄深度60 cm(FL60)效果最佳。籽粒产量较CK升高20.33%,FL60产量达1.05 t/667 m²,增幅57.14%;干物质积累在苗期与CK差异最显著,且于喇叭口期至抽雄期积累最快。在水分利用方面,粉垄耕作能提升蓄水能力与水分利用效率,FL60处理耗水量较CK减少22.51%,水分利用效率提高了101.42%。综上,在宁夏干旱地区玉米生产中,推荐粉垄耕作深度以50—60 cm为宜。

参考文献 References

- [1] 李新, 许志斌, 余奎军, 罗湘宁. 宁夏玉米产业的现状和发展[J]. 种子, 2009, 28(9): 104-106
Li X, Xu Z B, She K J, Luo X N. Status and development of maize industry in Ningxia Province[J]. *Seed*, 2009, 28(9): 104-106 (in Chinese)
- [2] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 李瑞平, 王浩, 李伟堂, 刘武仁, 齐华. 农田不同耕层构造对玉米生长发育及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 41-45, 95
Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, Li R P, Wang H, Li W T, Liu W R, Qi H. Effects of different tillage layer structures on growth and yield of maize in cropland zone in northeast of China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 41-45, 95 (in Chinese)
- [3] 韦本辉. 旱地作物粉垄栽培技术研究简报[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4330-4330
Wei B H. Research report on the cultivation technology of dry land crops in powder ridges[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(20): 4330-4330 (in Chinese)
- [4] Wei B H, Zhang Y S, Zhou J. Initial exploration on effect of saline-alkali land rebuilding and utilization by Fenlong cultivation[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(12): 2396-2400

- [5] 何进宇, 石伟业, 刘飞杨, 马巧梅, 杨艳, 杨佳鹤, 崔炬玮, 陈彦云. 粉垄耕作深度对旱区土壤关键物理性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 195-201, 228
He J Y, Shi W Y, Liu F Y, Ma Q M, Yang Y, Yang J H, Cui X W, Chen Y Y. Effects of Fenlong cultivation on soil key physical properties in arid areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 195-201, 228 (in Chinese)
- [6] 马玲芳, 王娟, 陈萍, 马文礼, 解艳玲, 贺萌萌, 鲍举文, 谷传申. 粉垄耕作后效对玉米生长及产量的影响[J]. 农业科学研究, 2024, 45(1): 44-49
Ma L F, Wang J, Chen P, Ma W L, Xie Y L, He M M, Bao J W, Gu C S. Effects of residual impacts of smash-ridging tillage on corn growth and yield [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 45(1): 44-49 (in Chinese)
- [7] 鄂继芳, 杨树青, 张万锋, 陈希, 谷秋莹. 耕作模式对苏打盐碱土结构稳定性与玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(6): 98-106
E J F, Yang S Q, Zhang W F, Chen N, Gu Q Y. Effects of tillage mode on structural stability and maize yield in soda saline alkali soils [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(6): 98-106 (in Chinese)
- [8] 王本龙, 周春生, 海珍, 娄雨欣. 不同耕作方式对松辽平原盐碱地土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(10): 247-253
Wang B L, Zhou C S, Hai Z, Lou Y X. Effects of different tillage methods on soil physicochemical properties and maize yield in the saline-alkali land of the Songliao plain [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(10): 247-253 (in Chinese)
- [9] 张萌, 田军仓. AquaCrop模型对不同灌溉定额下盐碱地青贮玉米生长模拟及适用性评价[J]. 节水灌溉, 2024(11): 10-17
Zhang M, Tian J C. Effects of different irrigation quotas on the growth of silage maize in saline-alkali land and evaluation of the applicability of AquaCrop model [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(11): 10-17 (in Chinese)
- [10] 张天赐, 李思璇, 陈彦云. 粉垄耕作对黄芪土壤养分及生长的影响[J]. 中国农学通报, 2024, 40(35): 43-48
Zhang T C, Li S X, Chen Y Y. Effects of smash ridging tillage on soil nutrients and growth of astragalus *membranaceus* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(35): 43-48 (in Chinese)
- [11] 王群, 王建, 张学林, 赵亚丽, 李潮海. 不同耕作模式下小麦玉米周年生产及土壤养分变化特征[J]. 河南农业大学学报, 2015, 49(4): 429-437
Wang Q, Wang J, Zhang X L, Zhao Y L, Li C H. Change characteristics of wheat and maize anniversary production and soil nutrient content under different rotation tillage patterns [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2015, 49(4): 429-437 (in Chinese)
- [12] 李浩, 黄金玲, 李志刚, 韦本辉, 陈晓茹, 韩世健, 梁晓莹, 李素丽. 粉垄耕作提高土壤养分有效性并促进甘蔗维管组织发育和养分吸收[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 204-214
Li H, Huang J L, Li Z G, Wei B H, Chen X R, Han S J, Liang X Y, Li S L. Fenlong tillage increase soil nutrient availability, and benefit vascular tissue structure and nutrient absorption of sugarcane [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 204-214 (in Chinese)
- [13] 苗芳芳. 不同耕作深度对土壤结构、水分及作物生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2021
Miao F F. Effects of soil structure, water and crop growth under different tillage depths [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021 (in Chinese)
- [14] 唐博文, 孟凡香, 孟波, 王瑾, 范一鸣. 基于AquaCrop模型的玉米产量与水分利用效率模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1224-1238
Tang B W, Meng F X, Meng B, Wang J, Fan Y M. Simulation of maize yield and water use efficiency based on the AquaCrop model [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(6): 1224-1238 (in Chinese)
- [15] 何进宇, 刘飞杨, 马波, 王斌. 不同旱作节水灌溉条件对土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 121-127
He J Y, Liu F Y, Ma B, Wang B. Effects of different irrigation conditions on soil physicochemical properties and rice yield [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(1): 121-127 (in Chinese)
- [16] 石伟业, 何文寿, 李惠霞, 何进宇, 陈彦云. 粉垄耕作对土壤理化性质和水稻生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 232-238
Shi W Y, He W S, Li H X, He J Y, Chen Y Y. Effects of silt ridge tillage on soil physicochemical properties and rice growth, and yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 232-238 (in Chinese)
- [17] 靳晓敏, 杜军, 沈润泽, 沈振荣, 解艳玲, 王玉民, 韦本辉. 宁夏引黄灌区粉垄栽培对玉米生长和产量的影响[J]. 农业科学研究, 2013, 34(1): 50-53
Jin X M, Du J, Shen R Z, Shen Z R, Xie Y L, Wang Y M, Wei B H. The effect of sumash-ridging cultivation technology on the growth and yield of corn in Yellow River irrigation district of Ningxia [J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 34(1): 50-53 (in Chinese)
- [18] 韦本辉, 申章佑, 周佳, 周灵芝, 胡泊, 张宪. 粉垄耕作改良盐碱地效果及机理[J]. 土壤, 2020, 52(4): 699-703
Wei B H, Shen Z Y, Zhou J, Zhou L Z, Hu B, Zhang X. Study on effect and mechanism of improving saline-alkali soil by Fenlong tillage [J]. *Soils*, 2020, 52(4): 699-703 (in Chinese)
- [19] 杨博. 粉垄耕作对盐碱地土壤性质及耐盐碱高粱生长的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020
Yang B. Effects of smash ridging on soil properties in saline alka land and the growth of saline alkali tolerant sorghum [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [20] 陶星安, 陈彦云, 李梦露, 夏皖豫. 粉垄耕作对玉米根系活力的影响[J]. 广东蚕业, 2021, 55(2): 17-18
Tao X A, Chen Y Y, Li M L, Xia W Y. Effects of Fenlong cultivation on the vitality of corn root systems [J]. *Guangdong Sericulture*, 2021, 55(2): 17-18 (in Chinese)
- [21] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 宫少俊, 黄元仿. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 945-950
Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, Gong S J, Huang Y F. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945-950 (in Chinese)
- [22] 杨佳鹤, 何进宇, 石伟业, 杨青青, 杨海林, 李王成, 何进勤, 陈彦云. 粉垄耕作对土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12): 237-253.
Yang J H, He J Y, Shi W Y, Yang Q Q, Yang H L, Li W C, He J Q, Chen Y Y. Effects of Fenlong cultivation on soil nutrients and enzyme activities [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12): 237-253 (in Chinese)
- [23] 王娟, 马玲芳, 陈萍, 罗园园, 康建宏, 马文礼. 盐渍化土壤下不同深度粉垄耕作对水稻性状及产量的影响[J]. 中南农业科技, 2023(9): 11-16
Wang J, Ma L F, Chen P, Luo Y Y, Kang J H, Ma W L. Effects of different depths of powder ridge tillage on rice characters and yield under saline soil [J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2023(9): 11-16 (in Chinese)
- [24] 盛勇创, 王释苇, 张硕, 王健豪, 常成, 张红霞, 黄金生, 甘磊. 不同粉垄深度对甘蔗地土壤孔隙结构的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 12-19
Sheng Y C, Wang S W, Zhang S, Wang J H, Chang C, Zhang H X, Huang J S, Gan L. Effects of different depths of Fenlong tillage on the soil pore structure in sugarcane field [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023, (9): 12-19 (in Chinese)
- [25] 陈萍, 罗园园, 马玲芳, 艾凤舞, 王娟, 鲍举文, 谢静波. 不同粉垄深度对常

- 年稻田土壤理化性状及产量的影响[J]. 宁夏农林科技, 2024, 65(9): 60-62, 66
- Chen P, Luo Y Y, Ma L F, Ai F W, Wang J, Bao J W, Xie J B. Effects of powder ridge ploughing on physic-chemical properties and yield of perennial rice field[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2024, 65(9): 60-62, 66 (in Chinese)
- [26] 王志丹, 刘吉利, 吴娜. 粉垄耕作对甜高粱光合生理特性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(1): 148-156
- Wang Z D, Liu J L, Wu N. Effects of fenlong tillage cultivation on the photosynthetic physiological characteristics and yield of sweet sorghum[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(1): 148-156 (in Chinese)
- [27] 李旭, 闫洪奎, 曹敏建, 王建辉, 李美, 于海秋, 王晓光. 不同耕作方式对土壤水分及玉米生长发育的影响[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 76-78, 81
- Li X, Yan H K, Cao M J, Wang J H, Li M, Yu H Q, Wang X G. Effects of different tillage managements on soil moisture and maize growth and development of maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(6): 76-78, 81 (in Chinese)
- [28] 李素丽, 黄金玲, 韦本辉, 梁晓莹, 陆睿杰, 王令强, 李志刚. 粉垄耕作对甘蔗光合生理特性及产量品质的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(3): 726-731
- Li S L, Huang J L, Wei B H, Liang X Y, Lu R J, Wang L Q, Li Z G. The effects of fenlong tillage on photosynthetic and photosynthetic physiological characteristics and yield and quality of sugarcane[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 726-731 (in Chinese)
- [29] Wei B H. Discussion on green development of Fenlong for yield increase, quality enhancing, water retaining and multiple use of natural resources[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(9): 1631-1637
- [30] 杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 杨威, 王丽萍, 刘霞, 张如鑫, 王麒麟. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 52-59
- Yang B, Qu Z Y, Sun H H, Yang W, Wang L P, Liu X, Zhang R X, Wang Q Y. The effect of smash-ridging cultivation on Properties of saline-alkali soil in hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 52-59 (in Chinese)
- [31] 张硕, 王松, 张钰, 张红霞, 韦本辉, 黄金生, 甘磊. 广西地区甘蔗粉垄与旋耕耕作方式下土壤孔隙特征变化[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 221-229
- Zhang S, Wang S, Zhang Y, Zhang H X, Wei B H, Huang J S, Gan L. Changes in soil pore characteristics under powder ridge tillage and rotary tillage in sugarcane field in guangxi region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(6): 221-229 (in Chinese)
- [32] 石伟业. 粉垄耕作对土壤理化性质和玉米、水稻生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022
- Shi W Y. Effects of fenlong tillage on soil physical and chemical properties and growth of maize and rice[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022 (in Chinese)
- [33] 杨雪, 逢焕成, 李轶冰, 任天志, 董国豪, 郭智慧, 王湘峻. 深旋松耕作法对华北缺水土壤质黏潮土物理性状及作物生长的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3401-3412
- Yang X, Pang H C, Li Y B, Ren T Z, Dong G H, Guo Z H, Wang X J. Effects of deep rotary sub-soiling tillage on the physical properties and crop growth of the sticky loamy soil North China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16): 3401-3412 (in Chinese)
- [34] 李轶冰, 逢焕成, 杨雪, 李玉义, 李华, 任天志, 董国豪, 郭良海. 粉垄耕作对黄淮海北部土壤水分及其利用效率的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7478-7486
- Li Y B, Pang H C, Yang X, Li Y Y, Li H, Ren T Z, Dong G H, Guo L H. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water and water use efficiency in northern China's Huang-Huai-Hai Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23): 7478-7486 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 温鑫雨, 宁夏大学土木与水利工程学院水利工程专业硕士研究生。参与国家重点研发项目(2021YFD1900601-02-04)和国家自然科学基金项目(U2243601-02-04), 在第四届“华维杯”全国大学生农业水利工程及相关专业创新设计大赛中获得三等奖。



通讯作者简介: 何进宇, 工学博士, 宁夏大学土木与水利工程学院副教授, 硕士生导师。美国加州州立大学访问学者, 中国水利水电科学研究院/宁夏水利科学研究院联合博士后, 入选“宁夏青年科技人才托举工程”。主要从事水利工程教学工作与农业水土资源高效利用方向研究。主持完成多项国家级、自治区级自然科学基金项目, 在《农业工程学报》《干旱地区农业研究》《西北农业学报》等期刊发表学术论文 20 余篇, 指导学生多次获得国家级和宁夏回族自治区奖励。