

尚云秋, 童士贤, 付保保, 等. 不同耕作和播种模式对砂姜黑土区小麦产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(7): 1370-1377.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2026.07.008

不同耕作和播种模式对砂姜黑土区小麦产量的影响

尚云秋^{1,2}, 童士贤³, 付保保³, 胡梦娇³, 丁永刚^{1,2}, 陈欢^{1,2}, 乔玉强^{1,2}, 张向前^{1,4},
李玮^{1,2}, 赵竹^{1,2}, 曹承富^{1,2}, 杜世州^{1,2}

(1.安徽省农业科学院作物研究所,安徽 合肥 230001; 2.农作物品质改良安徽省重点实验室,安徽 合肥 230001; 3.安徽省农垦集团夹沟农场有限公司,安徽 宿州 234000; 4.西北农林科技大学作物抗逆与高效生产全国重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘要: 本研究以皖垦麦 22 为材料,设置深耕+旋耕+无驱动耙条播机(W1)、深耕+旋耕+立轴式驱动耙条播机(W2)、深耕+旋耕+横轴式驱动耙旋播施肥一体机(W3)和横轴式驱动耙旋播施肥一体机直接播种(W4) 4 种处理,系统分析了不同耕作和播种模式对砂姜黑土区小麦出苗质量、群体数量、农田耗水量及产量的影响。结果表明,W1 处理、W2 处理和 W4 处理小麦播种深度为 3.0~5.0 cm,小麦出苗质量较高;W3 处理小麦播种深度过深,导致田间出苗率和基本苗数显著低于其他处理($P<0.05$)。但是 W3 处理小麦开花期平均单茎干物质积累量和穗粒数显著高于 W1 处理($P<0.05$),导致 W3 处理小麦产量显著高于 W1 处理($P<0.05$)。W4 处理小麦产量与 W1 处理无显著差异($P>0.05$)。相关性分析结果表明,播种深度过深时,群体数量降低,但开花期平均单茎干物质积累量提高,从而导致穗粒数与产量增加。因此以高产为目标时,宜采用深耕+旋耕+横轴式驱动耙旋播施肥一体机模式。若以稳产和作业效率为主要目标,宜采用横轴式驱动耙旋播施肥一体机直接播种模式。本研究为砂姜黑土区小麦种植技术体系构建提供了理论依据。

关键词: 小麦; 砂姜黑土; 耕作方式; 播种机; 产量

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2026)07-1370-08

Effects of different tillage and sowing patterns on wheat yield in lime concretion black soil areas

SHANG Yunqiu^{1,2}, TONG Shixian³, FU Baobao³, HU Mengjiao³, DING Yonggang^{1,2}, CHEN Huan^{1,2},
QIAO Yuqiang^{1,2}, ZHANG Xiangqian^{1,4}, LI Wei^{1,2}, ZHAO Zhu^{1,2}, CAO Chengfu^{1,2}, DU Shizhou^{1,2}

收稿日期: 2025-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32301447); 国家重点研究计划项目(2023YFD1900204); 安徽省农业科学院青年英才计划项目(QNYC-202217); 作物抗逆与高效生产全国重点实验室开放课题基金项目(SKLCSRHPKF2025002); 安徽省涡阳县国家现代农业产业园创建科技提升项目; 安徽小麦良种联合攻关科研项目

作者简介: 尚云秋(1994-), 男, 山东枣庄人, 博士, 助理研究员, 主要从事小麦生理生态与高产优质高效栽培研究。(E-mail) shangyunqiu1234@163.com

通讯作者: 杜世州, (E-mail) dsz315@sina.com

(1. Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Crop Quality Improvement, Hefei 230001, China; 3. Anhui Agricultural Reclamation Group Jiagou Farm Co., Ltd., Suzhou 234000, China; 4. State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In this study, Wankenmai 22 was used as the test wheat variety. Four treatments were established: deep tillage + rotary tillage combined with non-driven rake drill seeder (W1), deep tillage + rotary tillage combined

with vertical shaft driven rake drill seeder (W2), deep tillage + rotary tillage combined with horizontal shaft driven rake rotary seeding and fertilization integrated machine (W3), and direct sowing with horizontal shaft driven rake rotary seeding and fertilization integrated machine (W4). The effects of different tillage and sowing modes on wheat seedling emergence quality, population quantity, grain yield and farmland water consumption in lime concretion black soil areas were systematically analyzed. The results showed that the sowing depth of W1, W2 and W4 treatments was 3.0–5.0 cm, with high seedling emergence quality. The sowing depth of W3 treatment was excessively deep, which significantly reduced the field emergence rate and basic seedling number compared with other treatments ($P<0.05$). However, W3 treatment presented significantly higher average dry matter accumulation per stem and grain number per spike at the anthesis stage than W1 treatment ($P<0.05$), ultimately resulting in a notably higher grain yield in W3 treatment ($P<0.05$). There was no significant difference in wheat yield between W4 and W1 treatments ($P>0.05$). Correlation analysis indicated that excessive sowing depth reduced crop population quantity, but increased average dry matter accumulation per stem at anthesis, thereby improving grain number per spike and grain yield. Therefore, the mode of deep tillage + rotary tillage combined with horizontal shaft driven rake rotary seeding and fertilization integrated machine is recommended to achieve high yield. For the goals of stable yield and high operation efficiency, the direct sowing mode adopting horizontal shaft driven rake rotary seeding and fertilization integrated machine is preferable. This study provides a theoretical basis for the construction of wheat cultivation technology systems in lime concretion black soil regions.

Key words: wheat; lime concretion black soil; tillage method; seeder; yield

砂姜黑土是黄淮海及江淮地区的典型土壤类型^[1],该类型的土壤生产力水平中等偏下,其小麦种植长期采用深耕+旋耕+机械条播模式。该模式通过深耕改善土壤物理结构、旋耕细化表层土壤、机械条播保障群体数量,有利于实现高产^[2-4]。但该模式作业环节多、机具配套复杂、农耗时间长,难以适应砂姜黑土区适耕期短、易涝易旱的田间条件^[5-7]。复式作业机(旋耕、施肥、播种、镇压一体)可显著提升播种效率、灵活应对墒情变化^[5],然而砂姜黑土黏粒含量高、耕层紧实、透水性差、易板结^[8],严重制约了复式作业机的作业效果。

播种机与耕作方式的匹配程度,直接影响作物出苗质量、群体建成及产量形成^[9-11]。虽然复式作业机受黏土制约,但通过优化配套的耕整地方式(如调整耕作深度、组合松土部件等),可能缓解这一矛盾。因此,有必要研究不同耕整地方式与播种机型的互作效应。本研究在砂姜黑土区设置不同耕整地方式与播种机型的组合,以期筛选与砂姜黑土相适配的耕作方式,为该区域小麦种植技术体系构建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概述

于2023–2024年在安徽省宿州市夹沟镇夹沟农场(33°9'N, 117°7'E)进行试验,该地区属温带半

湿润季风气候,月平均降水量与气温如图1所示。小麦生长季有效降水量243.3 mm,播种期至返青期降水量179.8 mm,返青期至开花期降水量55.5 mm,开花期至成熟期降水量8.0 mm。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温1723.0 $^{\circ}\text{C}$ 。试验田土壤类型为砂姜黑土,前茬作物为玉米。小麦播种前,0~20 cm深度土壤pH值6.5,有机质含量29.8 g/kg,全氮含量1.2 g/kg,碱解氮含量119.0 mg/kg,速效钾含量150.0 mg/kg,速效磷含量38.4 mg/kg。

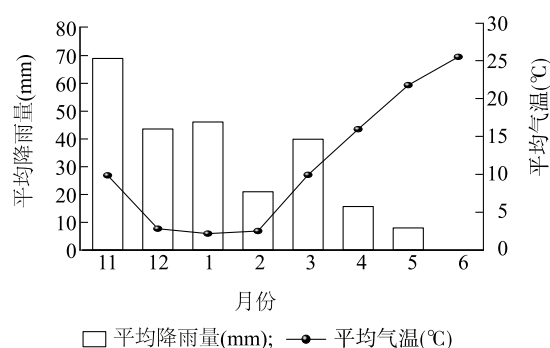


图1 月平均降雨量和平均气温

Fig.1 Monthly average rainfall and temperature

1.2 试验设计

如表1所示,试验选用3种小麦条播机:无驱动耙条播机、立轴式驱动耙条播机、横轴式驱动耙旋耕施肥一体机(可一次性完成施肥、旋耕、播种、覆土

和镇压)。基于上述 3 种条播机的设备配置及其作业条件,共设置 4 种机械化耕播模式:深耕+旋耕+无驱动耙条播机(W1)、深耕+旋耕+立轴式驱动耙条播机(W2)、深耕+旋耕+横轴式驱动耙旋播施肥一体机(W3)和横轴式驱动耙旋播施肥一体机直接播种(W4)。试验区域面积为 2 856.0 m²。耕整地和基肥施用方式如表 2 所示。

表 1 所用机械信息

Table 1 Information of the machinery used in this study

机械	生产厂家	型号	行距 (cm)	工作幅宽 (m)	作业深度 (cm)	驱动耙 类型	施肥 装置
无驱动耙条播机	河北农哈哈机械有限公司	2BXF-24	17.0	4.2	—	无	无
立轴式驱动耙条播机	雷肯农业机械(青岛)有限公司	Saphir 7	15.0	3.0	>12.0	立轴式	无
横轴式驱动耙旋播施肥一体机	泗县农丰农业机械有限公司	2BFG-16	18.0	2.8	>12.0	横轴式	有
铧式犁	郑州市龙丰农业机械装备制造有限公司	1LYF-J440	—	1.6	25.0~30.0	—	—
双轴灭茬旋耕机	河南豪丰农业装备有限公司	1GQNM-180	—	1.8	>12.0	—	—
撒肥机	石家庄农业机械股份有限公司	2BFY-28	—	4.2	—	—	有

表 2 耕作和播种模式

Table 2 Tillage and sowing patterns

处理	小麦条播机类型	耕整地方式	基肥施用方式
W1	无驱动耙条播机	翻耕 1 遍,旋耕 2 遍	翻耕前撒肥机撒施
W2	立轴式驱动耙条播机	翻耕 1 遍,旋耕 2 遍	翻耕前撒肥机撒施
W3	横轴式驱动耙旋播施肥一体机	翻耕 1 遍,旋耕 2 遍	翻耕前撒肥机撒施
W4	横轴式驱动耙旋播施肥一体机	无前置耕整地	复式一体机直接作业

1.3 测定方法

1.3.1 露籽率 于小麦播种后,各处理随机选取 10 个观测点,每个观测点面积为 1 m²,调查播种后未被土壤覆盖、暴露在地表的种子的比例。露籽率=暴露在地表的籽粒数/播种的籽粒数×100%。

1.3.2 播深与出苗率 于小麦三叶期,各处理选取 3 个长势均匀一致的区域,调查 1 m²内的出苗数,并计算田间出苗率,田间出苗率=出苗数/实际播种的种子数×100%。每个测定区域调查 15 株小麦种子至地表的深度,即为播深。出苗均匀度的计算公式为:出苗均匀度=(1-出苗数的标准偏差/出苗数)×100%。

1.3.3 群体数量 于小麦越冬期、返青期、拔节期、开花期和成熟期,各处理选取 3 个长势均匀一致的

供试小麦品种为皖垦麦 22,播种日期为 2023 年 11 月 1 日,收获日期为 2024 年 6 月 3 日。全生育季施用纯氮 264.0 kg/hm²,基肥施用专用生物膜保持性肥料(N:P₂O₅:K₂O=26:10:9)750 kg/hm²,拔节期追施尿素(含氮量 46.0%)150 kg/hm²。播种后采用小麦专用微喷带灌水 10.0 mm。

区域,调查 1 m²内的茎蘖数。

1.3.4 干物质积累与转运 于小麦开花期和成熟期,选取 20 个小麦植株去除根部,于 105 ℃杀青 30 min 后,于 80 ℃烘干至恒质量并称质量。开花期茎鞘、叶片和穗轴+颖壳干质量分别计为 A₁、A₂和 A₃,成熟期茎鞘、叶片、穗轴+颖壳和籽粒干质量分别计为 M₁、M₂、M₃和 M₄。

开花期平均单茎干物质积累量(g)=A₁+A₂+A₃;
开花期干物质积累量(kg/hm²)=(A₁+A₂+A₃)×
开花期群体数量;

成熟期干物质积累量(kg/hm²)=(M₁+M₂+M₃+
M₄)×成熟期群体数量;

成熟期营养器官干物质积累量(kg/hm²)=
(M₁+M₂+M₃)×成熟期群体数量;

成熟期籽粒干物质积累量(kg/hm²)= M_4 ×成熟期群体数量;

开花前干物质转运量(kg/hm²)= 开花期干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量;

开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率=开花前干物质转运量/成熟期籽粒干物质积累量×100%;

开花后干物质积累量(kg/hm²)= 成熟期干物质积累量-开花期干物质积累量;

开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率=开花后干物质积累量/成熟期籽粒干物质积累量×100%。

1.3.5 土壤耗水特性 于小麦播种前、越冬期、拔节期、开花期和成熟期进行土壤含水量测定。在各处理选择3个长势均匀且地势平整的位置,分别用环刀法取0~40 cm土层的土壤样品,按每10 cm深度分层取样。用烘干法测定土壤含水量,并计算土壤贮水量和农田耗水量^[12]。

土壤含水量=(鲜土质量-干土质量)/干土质量×100%

$$\text{土壤贮水量(mm)} = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i \theta_i$$

$$\text{农田耗水量(mm)} = \Delta S + P + I$$

式中, i 为土壤样品所在土层, n 为总土层数, γ_i 为第*i*层的土壤容重, h_i 为第*i*层的土壤深度, θ_i 为第*i*层的土壤含水量。 ΔS 为阶段初期与阶段末期土壤贮水量的差值, I 和 P 分别为生育期内灌水量和有效降水量。因试验田地势平坦,且地下水埋深2.5 m以下,故未考虑毛细管上升水、深层渗漏和地

表径流的影响^[13-14]。

1.3.6 产量及其构成要素 于小麦成熟期,在各处理选取3个长势均匀一致的地块,利用1 m²的铁框调查穗数,并在铁框内连续选取50个小麦单穗记录穗粒数。另选取2 m²地块收获麦穗,重复3次。风干后,脱粒并测定千粒质量(g)和籽粒质量(kg),用谷物水分测定仪测定籽粒含水量。小麦产量按籽粒含水量13.0%折算,计算公式为:小区产量=实测产量×(1-籽粒含水量)/(1-13%)。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理,利用 SPSS 22.0 和 DPS 7.05 进行统计分析,利用最小显著性差异法(LSD)进行差异显著性检验,利用 Origin 2024b 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作和播种模式对小麦播种和出苗质量的影响

如表3所示,W2处理小麦播种深度、田间出苗率、出苗均匀度和基本苗数与W1处理相比均无显著差异($P>0.05$)。W3处理小麦播种深度显著高于W1处理($P<0.05$),W3处理露籽率、田间出苗率、出苗均匀度和基本苗数均显著低于W1处理($P<0.05$)。W4处理小麦播种深度显著低于W3处理($P<0.05$),W4处理小麦田间出苗率、出苗均匀度和基本苗数均显著高于W3处理($P<0.05$)。

表3 不同耕作和播种模式对小麦出苗质量的影响

Table 3 Effects of different tillage and sowing modes on wheat seedling emergence quality

处理	播种量 (kg/hm ²)	播种深度 (cm)	露籽率 (%)	田间出苗率 (%)	出苗均匀度 (%)	基本苗数 (×10 ⁴ ,1 hm ²)
W1	220.0a	3.0c	7.8b	85.0a	91.9a	437.5a
W2	225.0a	3.0c	13.8a	83.7a	90.6a	461.9a
W3	222.5a	6.5a	1.1c	57.2c	74.3b	325.9b
W4	222.5a	5.0b	0.8c	76.1b	92.2a	433.9a

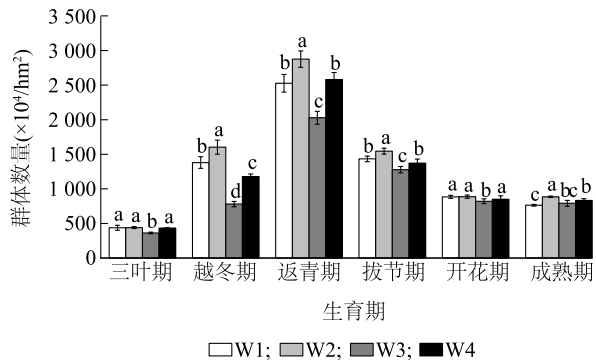
W1处理、W2处理、W3处理、W4处理见表2。同一列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同耕作和播种模式对小麦群体数量和干物质生产的影响

2.2.1 不同耕作和播种模式对小麦群体数量的影响 如图2所示,W2处理小麦越冬期和返青期群体数量均显著高于W1处理($P<0.05$),W3处理小麦越冬期和返青期群体数量均显著低于W1处理

($P<0.05$),W4处理小麦越冬期和返青期群体数量均显著高于W3处理($P<0.05$),W2处理小麦拔节期和成熟期群体数量均显著高于W1处理($P<0.05$),W3处理小麦拔节期和开花期群体数量均显著低于W1处理($P<0.05$),W3处理小麦成熟期群体数量与W1处理无显著差异($P>0.05$),W4处理

小麦拔节期和开花期群体数量均显著高于 W3 处理 ($P<0.05$), W4 处理小麦成熟期群体数量与 W3 处理无显著差异 ($P>0.05$)。



W1 处理、W2 处理、W3 处理、W4 处理见表 2。同一生育期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 不同耕作和播种模式对小麦群体数量的影响

Fig.2 Effects of different tillage and sowing modes on wheat population quantity

2.2.2 不同耕作和播种模式对小麦干物质积累与转运的影响 如表 4 所示, W2 处理小麦开花期平均单茎干物质积累量和开花期干物质积累量与 W1

处理相比均无显著差异 ($P>0.05$), W2 处理小麦成熟期干物质积累量显著高于 W1 处理 ($P<0.05$)。W3 处理小麦开花期平均单茎干物质积累量和成熟期干物质积累量均显著高于 W1 处理 ($P<0.05$)。W4 处理小麦开花期平均单茎干物质积累量和开花期干物质积累量均显著低于 W3 处理 ($P<0.05$), W4 处理小麦成熟期干物质积累量显著高于 W3 处理 ($P<0.05$)。进一步分析干物质向籽粒的分配特征发现, W2 处理小麦开花前干物质转运量及开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率均显著低于 W1 处理 ($P<0.05$), W2 处理小麦开花后干物质积累量及开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率均显著高于 W1 处理 ($P<0.05$)。W3 处理小麦开花前干物质转运量及开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率、开花后干物质积累量及开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率与 W1 处理相比均无显著差异 ($P>0.05$)。W4 处理小麦开花前干物质转运量及其开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率显著低于 W3 处理 ($P<0.05$), W4 处理小麦开花后干物质积累量及开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率显著高于 W3 处理 ($P<0.05$)。

表 4 不同耕作和播种模式对小麦干物质积累与转运的影响

Table 4 Effects of different tillage and sowing modes on dry matter accumulation and translocation of wheat

处理	开花期平均单茎干物质积累量 (g)	开花期干物质积累量 (kg/hm ²)	成熟期干物质积累量 (kg/hm ²)	开花前干物质转运量 (kg/hm ²)	开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率 (%)	开花后干物质积累量 (kg/hm ²)	开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率 (%)
W1	1.441b	12 746.4ab	17 648.0c	4 285.1a	46.6a	4 901.6b	53.4c
W2	1.408b	12 486.1ab	20 346.2a	2 591.8b	24.8b	7 860.1a	75.2b
W3	1.599a	13 127.7a	18 580.2b	4 484.6a	45.1a	5 452.5b	54.9c
W4	1.340c	11 400.5b	19 770.7a	1 223.7c	12.8c	8 370.2a	87.2a

W1 处理、W2 处理、W3 处理、W4 处理见表 2。同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

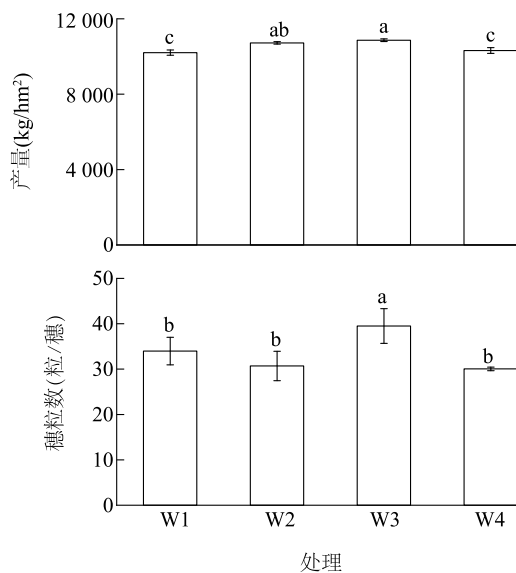
2.3 不同耕作和播种模式对农田耗水量和小麦产量的影响

2.3.1 不同耕作和播种模式对农田耗水量的影响 如图 3 所示, 播种期至返青期, W1 处理、W2 处理和 W3 处理小麦农田耗水量无显著差异 ($P>0.05$), W1 处理、W2 处理和 W3 处理小麦农田耗水量均显著高于 W4 处理 ($P<0.05$)。返青期至开花期, W1 处理、W2 处理和 W4 处理小麦农田耗水量无显著差异 ($P>0.05$), 但 W3 处理小麦农田耗水量显著高于 W4 处理 ($P<0.05$)。开

花期至成熟期, W1 处理和 W2 处理小麦农田耗水量无显著差异 ($P>0.05$), 但 W1 处理和 W2 处理小麦农田耗水量均显著高于 W3 处理 ($P<0.05$) 以及均显著低于 W4 处理 ($P<0.05$)。从全生育季来看, W1 处理、W2 处理和 W3 处理小麦农田耗水量无显著差异 ($P>0.05$), W1 处理和 W4 处理小麦农田耗水量无显著差异 ($P>0.05$), 而 W2 处理和 W3 处理小麦农田耗水量显著低于 W4 处理 ($P<0.05$)。

2.3.2 不同耕作和播种模式对小麦产量及其构

成要素的影响 如图4所示,W2处理小麦穗粒数和千粒质量与W1处理相比均无显著差异($P>0.05$),而W2处理小麦产量、穗数显著高于W1处理($P<0.05$)。W3处理小麦产量和穗粒数均显著高于W1处理($P<0.05$),但其小麦穗数和千粒质量与W1处理均无显著差异($P>0.05$);W3处理小麦产量和千粒质量与W2处理相比均无显著差异($P>0.05$),而W3处理小麦穗数显著低于W2处理($P<0.05$),W3处理小麦穗粒数显著高于W2处理($P<0.05$)。W4处理小麦产量和穗粒数均显著低于W3处理($P<0.05$),W4处理小麦穗数和千粒质量与W3处理相比均无显著差异($P>0.05$)。



W1处理、W2处理、W3处理、W4处理见表2。图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

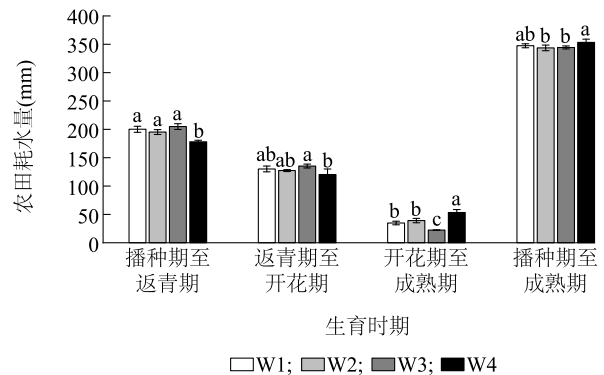
图4 不同耕作和播种模式对产量及其构成要素的影响

Fig.4 Effects of different tillage and sowing modes on wheat yield and its components

2.4 相关性分析

2.4.1 小麦出苗质量与群体发育的相关性分析

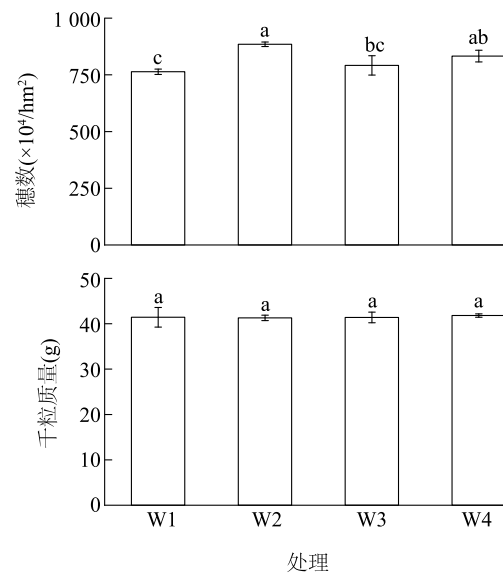
如表5所示,小麦播种深度与露籽率、田间出苗率、出苗均匀度、返青期群体数量呈极显著负相关($P<0.01$),小麦播种深度与开花期群体数量呈显著负相关($P<0.05$)。小麦露籽率与返青期群体数量、开花期群体数量呈显著正相关($P<0.05$),小麦田间出苗率与返青期群体数量呈显著正相关($P<0.05$)。小麦出苗均匀度与返青期群体数量呈极显著正相关



W1处理、W2处理、W3处理、W4处理见表2。同一生育时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图3 不同耕作和播种模式对小麦农田耗水量的影响

Fig.3 Effects of different tillage and sowing modes on farmland water consumption of wheat



($P<0.01$),与开花期群体数量呈显著正相关($P<0.05$),与开花期平均单茎干物质积累量呈显著负相关($P<0.05$)。

2.4.2 农田耗水量与小麦群体发育的相关性分析

如表6所示,小麦播种期至开花期农田耗水量与开花期平均单茎干物质积累量、开花期干物质积累量、开花前干物质转运量、开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率均呈极显著正相关($P<0.01$),与开花后干物质积累量及其对籽粒产量的贡献率呈极显著

负相关 ($P < 0.01$)。小麦开花期至成熟期农田耗水量与开花前干物质转运量及其对籽粒产量的贡献率呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与开花后干物质积累量及其对籽粒产量的贡献率呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 5 小麦出苗质量与群体发育的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of wheat seedling emergence quality and population development

类别	播种深度	露籽率	田间出苗率	出苗均匀度
播种深度	1.00	-0.81 **	-0.79 **	-0.77 **
返青期群体数量	-0.80 **	0.64 *	0.63 *	0.82 **
开花期群体数量	-0.70 *	0.58 *	0.51	0.61 *
开花期平均单茎干物质积累量	0.48	-0.22	-0.46	-0.64 *
开花期干物质积累量	0.06	0.12	-0.16	-0.36

* 表示相关性显著 ($P < 0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

表 6 农田耗水量与群体发育特征的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of farmland water consumption and population development characteristics

类别	播种期至开花期农田耗水量	开花期至成熟期农田耗水量
开花期群体数量	-0.25	-0.34
开花期平均单茎干物质积累量	0.88 **	-0.46
开花期干物质积累量	0.77 **	-0.66 *
开花前干物质转运量	0.89 **	-0.83 **
开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率	0.86 **	-0.86 **
开花后干物质积累量	-0.80 **	0.79 **
开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率	-0.84 **	0.80 **

* 表示相关性显著 ($P < 0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

2.4.3 小麦产量与干物质积累量、农田耗水量的相关性分析 如表 7 所示, 小麦产量与开花期平均单茎干物质积累量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与开花期至成熟期农田耗水量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。小麦穗数与开花前干物质转运量、播种期至开花期农田耗水量均呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与开花后干物质积累量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。小麦穗粒数与开花期平均单茎干物质积累量、开花前干物质转运量均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与开花后干物质积累量、开花期至成熟期农田耗水量均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。小麦穗粒数与播种期至开花期农田耗水量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。

表 7 小麦产量与干物质积累量、农田耗水量的相关性分析

Table 7 Correlation analysis of wheat yield with dry matter accumulation and farmland water consumption

类别	产量	穗数	穗粒数	千粒质量
开花期平均单茎干物质积累量	0.60 *	-0.35	0.65 *	-0.15
开花期干物质积累量	0.47	-0.29	0.48	-0.21
开花前干物质转运量	0.26	-0.63 *	0.68 *	-0.20
开花后干物质积累量	-0.16	0.78 **	-0.64 *	0.20
播种期至开花期农田耗水量	0.48	-0.61 *	0.74 **	-0.24
开花期至成熟期农田耗水量	-0.58 *	0.41	-0.67 *	0.13
播种期至成熟期农田耗水量	-0.44	-0.11	-0.32	0.07

* 表示相关性显著 ($P < 0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P < 0.01$)。

3 讨论与结论

3.1 不同机械耕作播种模式对小麦播种出苗质量的影响

播种深度是影响小麦出苗质量与群体发育的重要因素, 播种深度受耕作方式与播种机型的交互影响。砂姜黑土黏重、易板结、可耕性差, 导致种植在砂姜黑土上的小麦对播种深度更敏感^[15-16]。本研究中, W1 处理、W2 处理小麦播种深度为 3.0 cm, W4 处理小麦播种深度为 5.0 cm, W3 处理小麦播种深度达 6.5 cm, W1 处理、W2 处理小麦田间出苗率显著高于 W4 处理 ($P < 0.05$), W4 处理小麦田间出苗率显著高于 W3 处理 ($P < 0.05$)。这是因为 W2 处理的立轴式驱动耙垂直入土, 通过横向旋转破碎土块, 从而精准把控播种深度。而 W3 处理的横轴式驱动耙在粘重土壤中纵向旋转易产生大孔隙, 导致种子下陷, 播种深度过深, 最终导致出苗率显著下降^[17-19]。相关性分析结果显示, 小麦播种深度与返青期群体数量、开花期群体数量均呈显著负相关 ($P < 0.05$), 表明播种深度对群体结构具有调控作用。虽然 W3 处理小麦播种深度过大导致群体数量偏低, 但通过减少无效分蘖显著提高了开花期单茎干物质积累量, 通过增加单株生长量来弥补群体数量不足, 从而维持了较高的产量^[20]。

3.2 不同机械耕作播种模式对小麦群体构建与干物质积累的影响

作物干物质积累与分配受播种深度、群体结构及水分供应的综合调控。深播可促进小麦扎根, 增

强植株对深层水分和养分的吸收能力;而浅播则有利于小麦出苗,形成合理群体结构,从而增加开花后干物质积累量^[21-22]。W3 处理小麦播种深度较深,出苗延迟、群体数量受限,但是在小麦开花前积累了较多的干物质,并且开花前干物质转运对籽粒产量的贡献率较高,从而使产量提升。W4 处理开花后干物质积累量主导产量形成,其开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率显著高于其他处理($P<0.05$)。相关性分析结果表明,开花后干物质积累对籽粒产量的贡献率与开花期至成熟期农田耗水量呈极显著正相关($P<0.01$)。W4 处理对土壤扰动小,有利于保持土壤结构完整性,从而维持小麦生育中后期的根系活力,增强根系对深层土壤水分的吸收能力。因此,在全生育期尤其是开花后阶段,W4 处理能够维持较高的农田耗水量,为小麦开花后干物质积累提供了水分保障,有利于籽粒灌浆。

3.3 砂姜黑土区适宜的机械耕作播种模式选择

深耕配合横轴式驱动耙旋播施肥一体机模式,能够改善根系生长环境,促进个体发育,增加穗粒数与千粒质量,从而实现增产,适合在水肥条件较好的区域应用。免耕直播可减少作业环节,有利于抢时播种,同时保墒效果较好。因此,在农时紧张或土壤湿黏(不严重积水)条件下,采用横轴式驱动耙旋播施肥一体机免耕直播模式,可实现稳产。不过,长期免耕直播可能导致土壤紧实度增加、养分表层富集等问题,建议与深耕措施轮换使用。

参考文献:

- [1] 李德成,张甘霖,龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤,2011,43(4):623-629.
- [2] 韩 上,武 际,李 敏,等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):276-284.
- [3] 白 伟,孙占祥,张立祯,等. 耕层土壤虚实结构优化春玉米根系形态提高水分利用效率[J]. 农业工程学报,2019,35(21):88-97.
- [4] 翟 振,李玉义,张 莉,等. 短期深旋松对黄淮海沙姜黑土耕层结构及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(4):1211-1218.
- [5] 赵凌天,咸云宇,刘光明,等. 不同机械化耕播模式对冬小麦幼苗质量和产量的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(17):31-38.
- [6] 陈 欢,曹承富,孔令聪,等. 长期施肥下淮北砂姜黑土区小麦产量稳定性研究[J]. 中国农业科学,2014,47(13):2580-2590.
- [7] Qiao S C, Harrison S P, Prentice I C, et al. Optimality-based modelling of wheat sowing dates globally[J]. Agricultural Systems,2023,206:103608.
- [8] 谢迎新,靳海洋,孟庆阳,等. 深耕改善砂姜黑土理化性状提高小麦产量[J]. 农业工程学报,2015,31(10):167-173.
- [9] 李福建,徐东忆,吴 鹏,等. 耕播方式对稻茬小麦籽粒产量、养分吸收和利用的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(3):338-347.
- [10] 陈检锋,陈 华,付利波,等. 免耕覆盖下不同氮磷钾配比对旱地小麦产量效益和养分利用的影响[J]. 农学报,2020,10(2):50-55.
- [11] 刘水苗,关小康,刘长硕,等. 适宜耕作模式提高黄淮海平原冬小麦产量并改善土壤水肥状况[J]. 农业工程学报,2023,39(18):82-91.
- [12] Abrisqueta I, Abrisqueta J M, Tapia L M, et al. Basal crop coefficients for early-season peach trees[J]. Agricultural Water Management,2013,121:158-163.
- [13] Ali M H, Hoque M R, Hassan A A, et al. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat[J]. Agricultural Water Management,2007,92:151-161.
- [14] Thorup K K, Cortasa M S, Loges R. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? [J]. Plant Soil,2009,322:101-114.
- [15] 王明凯,郭自春,张中彬,等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报,2019,56(6):1370-1380.
- [16] 李成玉,程思贤,马海彬,等. 豫南砂姜黑土水浇地不同产田土壤理化性状及其与作物产量的相关性[J]. 河南农业科学,2023,52(4):74-81.
- [17] Liu G X, Han J G. Seeding establishment of wild and cultivated *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. under different seeding depths[J]. Journal of Arid Environments,2008,72:279-284.
- [18] 樊 明,沈强云,魏亦勤,等. 不同播种方式和播深对宁夏引黄灌区滴灌春小麦生长及产量的影响[J]. 山西农业科学,2025,53(1):48-54.
- [19] 何 进,李洪文,陈海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(4):1-19.
- [20] 豆利岭,刘庆峰,王 宁,等. 不同土壤和播种深度下稻秸淋洗对小麦出苗及生长发育的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):106-110.
- [21] Azam G, Wickramarachchi K, Scanlan C, et al. Deep and continuous root development in ameliorated soil improves water and nutrient uptakes and wheat yield in water-limited conditions[J]. Plant and Soil,2025,512:1405-1420.
- [22] 邵立威,张喜英,陈素英,等. 花后脱叶对冬小麦产量形成和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(1):21-26.

(责任编辑:成纾寒)