

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51074

长期定位耕作方式对雨养小麦籽粒灌浆和产量形成的影响

尚云秋^{1,2} 赵竹^{1,2,*} 陈欢^{1,2} 丁永刚^{1,2} 乔玉强^{1,2} 李玮^{1,2}
张向前^{1,2,3} 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 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: 针对黄淮海雨养麦区季节性干旱制约小麦产量提升的现实问题, 开展耕作抗旱保墒技术实现小麦产量稳定的生理生态机制研究, 以期为区域抗旱耕作制度的优化提供依据。本研究基于 14 年的长期定位试验, 以济麦 22 为材料, 设置常年深耕结合秸秆还田(DT)、常年旋耕(RT)和常年少免耕(NT) 3 种耕作方式, 于 2018—2020 年度测定农田耗水特性、同化物转运与同化特征、籽粒灌浆参数、产量及其构成要素。结果表明, 0~60 cm 土层农田耗水总量在 DT、RT 和 NT 处理间无显著差异。然而, DT 的播种期至拔节期农田耗水量分别较 RT、NT 降低 19.64%~29.67% (2018—2019 年)和 5.12%~10.97% (2019—2020 年), 拔节期至成熟期农田耗水量分别提高 17.16%~45.38% (2018—2019 年)和 7.20%~12.74% (2019—2020 年)。2 年度花后同化干物质在 DT 和 RT 处理间无显著差异, 但是均显著大于 NT; 且 DT 的花后同化干物质对籽粒的贡献率较 RT、NT 分别提升 0.50~20.07 个百分点(2018—2019 年)和 4.32~16.29 个百分点(2019—2020 年)。Logistic 方程拟合结果表明, DT 在最大灌浆速率、平均灌浆速率及灌浆持续时间方面均优于 RT 和 NT。相关性分析进一步证实, 开花期至成熟期农田耗水量的增加是促进花后同化干物质积累、优化籽粒灌浆参数和提升籽粒产量的主要驱动因素。最终 DT 的产量在 2018—2019 年度相较于 NT 提高了 15.67%, 在 2019—2020 年度相较于 NT 和 RT 分别提高了 5.34%和 8.61%。因此, 相较于常年旋耕和少免耕, 深耕结合秸秆还田通过“前控后补”的农田耗水优势, 有效增强花后同化物积累及其向籽粒的转运效率, 显著提高灌浆速率和延长有效灌浆期, 协同优化穗数、穗粒数和千粒重, 是保障雨养小麦稳产增产的关键耕作模式。

关键词: 小麦; 耕作方式; 农田耗水特性; 灌浆速率; 产量

Effects of long-term tillage practices on grain-filling and yield formation in rain-fed wheat

Shang Yun-Qiu^{1,2}, Zhao Zhu^{1,2,*}, Chen Huan^{1,2}, Ding Yong-Gang^{1,2}, Qiao Yu-Qiang^{1,2}, Li Wei^{1,2}, Zhang Xiang-Qian^{1,2,3}, Cao Cheng-Fu^{1,2}, and Du Shi-Zhou^{1,2,*}

¹ Crop Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230001, Anhui, China; ² Anhui Provincial Key Laboratory of Crop Quality Improvement, Hefei 230001, Anhui, China; ³ State Key Laboratory for Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China

本研究由国家自然科学基金项目(32301447), 国家重点研究计划项目(2023YFD1900204), 安徽小麦良种联合攻关科研项目, 安徽省农业科学院青年英才计划项目(QNYC-202217)和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)资助。This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32301447), the National Key Research and Development Program (2023YFD1900204), the Anhui Collaborative Research Project for High-Quality Wheat Varieties, the Young Elite Program of Anhui Academy of Agricultural Sciences (QNYC-202217), and the Open Project Fund of the National Key Laboratory of Crop Stress Resistance and High-Efficiency Production (SKLCSRHPKF2025002).

* 通信作者(Corresponding authors): 赵竹, E-mail: zhaozhu0114@aliyun.com; 杜世州, E-mail: dsz315@sina.com

第一作者联系方式: E-mail: 15621567112@163.com

Received (收稿日期): 2025-08-12; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-11-28.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251127.1441.004>

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

Abstract: Seasonal drought remains a major constraint to yield improvement in the rain-fed wheat region of Huang-Huai-Hai. This study explores the physiological and ecological mechanisms by which tillage practices enhance drought resistance and conserve soil moisture to stabilize wheat production, aiming to provide a theoretical foundation for optimizing drought-resilient regional farming systems. Based on a 14-year long-term field experiment using the wheat cultivar Jimai 22, three tillage systems were compared: perennial deep tillage with straw incorporation (DT), perennial rotary tillage (RT), and perennial minimum/no tillage (NT). Field measurements during the 2018–2020 growing seasons included assessments of soil water consumption, assimilate translocation and assimilation dynamics, grain filling characteristics, and yield components. While total soil water consumption within the 0–60 cm soil layer did not differ significantly among DT, RT, and NT treatments, DT significantly reduced water consumption during the sowing-to-jointing period by 19.64%–29.67% (2018–2019) and 5.12%–10.97% (2019–2020) compared with RT and NT, and conversely increased water consumption during the jointing-to-maturity period by 17.16%–45.38% and 7.20%–12.74% in the respective years. No significant differences in post-anthesis dry matter assimilation were observed between DT and RT, but both were significantly higher than NT. Additionally, DT enhanced the contribution of post-anthesis assimilates to grain by 0.50–20.07 percentage points (2018–2019) and 4.32–16.29 percentage points (2019–2020) compared to RT and NT, respectively. Logistic equation fitting indicated that DT achieved higher maximum and mean grain filling rates and longer grain filling durations than both RT and NT. Correlation analysis further revealed that increased soil water consumption during the anthesis-to-maturity period was the primary driver for enhanced post-anthesis assimilate accumulation, improved grain filling parameters, and increased grain yield. Ultimately, DT resulted in a 15.67% yield increase over NT in 2018–2019, and yield improvements of 5.34% and 8.61% over NT and RT, respectively, in 2019–2020. Therefore, compared to rotary tillage and minimum/no-till systems, deep tillage with straw incorporation emerges as the most effective strategy for stabilizing and enhancing rain-fed wheat yields. This is achieved through a water management advantage characterized by early-stage water conservation and late-stage water supply compensation, which collectively enhance post-anthesis assimilate accumulation and translocation, significantly increase grain filling rates, prolong the effective grain filling period, and synergistically optimize yield components including spike number, kernels per spike, and thousand-kernel weight.

Keywords: wheat; tillage pattern; soil water consumption characteristics; grain filling rate; yield

小麦作为全球核心口粮作物,其稳定生产对粮食安全至关重要^[1]。然而,干旱胁迫是制约小麦产量可持续提升的关键环境限制因子^[2]。在气候变化背景下,干旱频发与强度增加,导致小麦成穗数减少、小花败育及灌浆期缩短等问题,严重制约产量潜力的发挥^[3-4]。灌溉虽是缓解干旱、保障高产的有效手段,但中国水资源严重短缺,人均占有量远低于世界平均水平^[5]。尽管水利设施持续完善,全国耕地灌溉面积仍仅占约 55.7%,近半耕地属无灌溉条件的雨养农业^[6]。因此,充分挖掘雨养小麦的生产潜力,是增强中国粮食供给韧性与可持续性的必然选择。

雨养小麦是指在干旱半干旱、半湿润偏旱及部分水利条件受限地区,主要依赖自然降水并配套相应农艺措施的小麦种植模式^[7]。黄淮海麦区部分地区因灌溉设施不足而形成大面积的雨养种植区。与西北旱作区不同,该区域年降水量相对充足,但其核心矛盾在于降水分布与小麦需水关键期错位,季节性干旱风险突出^[8]。尤其是在黄淮海麦区南部至长江中下游麦区北部的过渡地带,相较于黄淮海麦区其他区域,该地带降水较为丰沛,在正常年份下,自然降水基本可满足小麦全生育期的水分需求;而相较于长江中下游麦区其他区域,其渍害风险相对

较低,小麦稳产性相对较高^[9-10]。这一特点使得该区域长期以来对灌溉基础设施的投入相对不足,小麦生产对自然降水的依赖程度极高。然而,在全球气候变化加剧的背景下,该区域降水格局发生显著改变,季节性干旱事件频发且强度增加,已成为制约小麦生产的关键限制因子^[11]。一旦在小麦生育后期遭遇严重水分胁迫,由于缺乏有效的灌溉补充能力,产量将面临严重损失。因此,如何优化土壤蓄墒保墒技术,协同利用土壤水与降水资源,是该区域保障小麦产量稳定性的核心策略。

耕作模式是调控农田水分循环、实现自然降水高效利用的关键技术体系^[12]。优化的耕作措施通过改善土壤结构、增强蓄水保墒能力,有效协调小麦蓄水与供水矛盾,尤其在缓解花后干旱胁迫、提升产量方面表现出显著潜力^[13-15]。研究表明,保护性耕作如免耕结合秸秆覆盖,可提高播种和收获期土壤蓄水量,使休闲期蓄墒率提升 5.7%。这相当于构建了一个“土壤水库”,能够在降水丰沛期储存更多水分,从而在小麦花后需水关键期实现水分稳定供给^[16]。深耕通过打破犁底层,0~40 cm 土层含水量较免耕增加 9.3%~12.5%,尤其在少雨季节有效减轻水分亏缺对小麦生长的影响^[17]。这种水分条件的改善

直接促进小麦根系发育,生物量积累增加,并通过延缓灌浆后期叶片衰老,维持穗数、穗粒数及千粒重的稳定性,最终实现产量提升 8.0%~10.0%^[18]。秸秆还田与深耕的协同效应进一步增加了小麦生育季 0~100 cm 土层的土壤供水能力,明显改善了开花后小麦冠层的光能利用,促进干物质的积累与转运,使籽粒灌浆速率、粒重和产量分别显著提升^[19]。此外,“隔 2 年深松+少免耕”等优化模式能显著促进花后同化物向籽粒的转运,其花后同化物贡献率和灌浆速率均高于传统耕作,最终通过提高千粒重使产量增加 14.2%~19.4%^[20]。由此可见,优化耕作模式主要通过“扩容土壤水库、保蓄水分”和“优化水分利用、延缓衰老”,有效调和了小麦蓄水与供水的矛盾,显著缓解了花后干旱的不利影响,为雨养小麦稳产高产提供了有效途径。

然而,当前研究对耕作模式影响雨养小麦产量的内在生理机制仍缺乏系统量化。深耕结合秸秆还田、旋耕及少免耕等主流耕作方式如何调控籽粒灌浆动态,并进而影响产量构成,尚缺乏长期定位试验的实证依据。为此,本研究基于 14 年的长期定位试验,系统解析耕作抗旱保墒技术实现雨养小麦产量稳定的生理生态机制,以期为区域抗旱耕作制度的优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点概述

试验于 2018—2019 年和 2019—2020 年小麦生长季在安徽省亳州市蒙城县农业科技示范场

(33°17'N, 116°56'E)进行。该试验点处于温带半湿润季风气候区,2 年度有效降水量分别为 234.0 mm 和 283.6 mm, 10℃ 以上积温分别为 2017.0℃ 和 2107.5℃ (图 1)。供试土壤为砂姜黑土,钙质结核(砂姜)在 40~100 cm 土层随深度增加而富集,限制其有效土层深度不超过 1 m^[21]。该土壤黏粒含量高、结构紧实、透水性差且易板结,严重制约小麦根系生长及对水分养分的吸收。前茬作物为玉米(郑单 958),种植密度为 75,000 株 hm^{-2} ,施氮量为 240 kg hm^{-2} ,全生育期不灌溉,其他田间管理措施同常规高产田。

1.2 试验设计

长期定位试验采用完全随机设计,设 3 次重复,小区面积为 $2 \text{ m} \times 50 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$ 。试验自 2011 年起设置 3 种持续耕作处理:常年深耕结合秸秆还田(DT)、常年旋耕(RT)和常年少免耕(NT),具体作业流程见表 1。供试小麦品种为“济麦 22”,分别于 2018 年 10 月 13 日和 2019 年 10 月 5 日播种,播种量均为 187.5 kg hm^{-2} ,行距 18.4 cm,采用统一型号的 2BFGT-12(8)(220)B 型旋耕施肥播种机(国强,淮北市华丰机械设备有限公司)作业以控制误差。施肥方案为:基肥施用复合肥($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 15 : 15 : 15$) 750.0 kg hm^{-2} 与尿素 108.0 kg hm^{-2} ,拔节期追施尿素 235.5 kg hm^{-2} ,氮肥基追比为 6 : 4。小麦分别于 2019 年 5 月 28 日和 2020 年 5 月 31 日收获。全生育期不进行灌溉,以评估耕作处理的抗旱保墒效果,其他管理措施同常规高产田。小麦播种前 0~20 cm 耕层土壤基础养分状况见表 2。

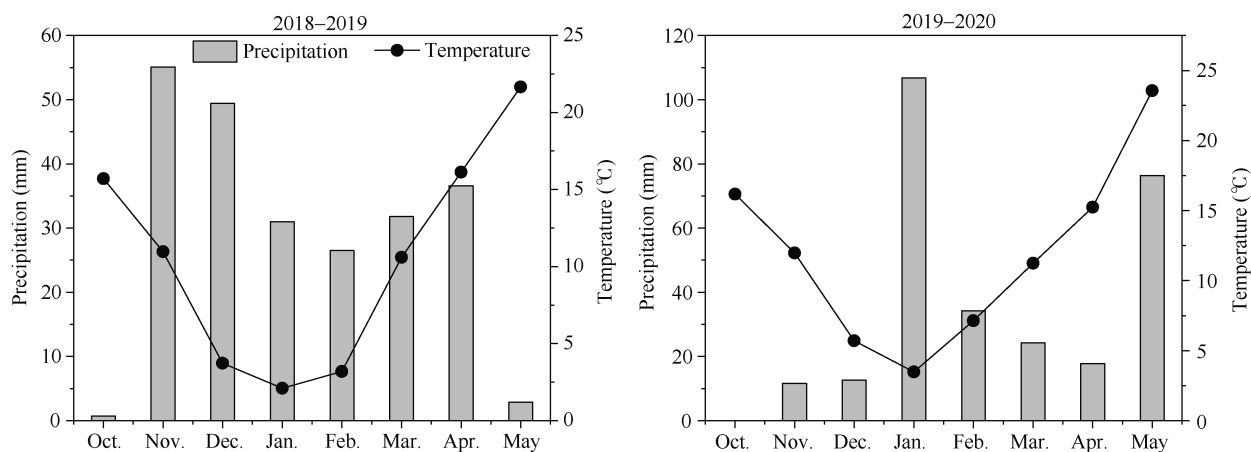


图 1 月平均降水量和气温

Fig. 1 Monthly average precipitation and temperature

表 1 不同耕作模式的作业程序
Table 1 Operation procedures of different tillage patterns

耕作模式 Tillage pattern	作业程序 Operation procedure
常年深耕结合秸秆还田 DT	前茬玉米秸秆离田进行粉碎→人工秸秆全量还田、撒施底肥→ILFQ330 铧式犁翻耕一遍, 深度 30 cm→豪丰 1GQNM-180 双轴灭茬旋耕机旋耕 2 遍, 深度 15 cm→2BFGT-12(8)(220)B 型旋耕施肥播种机播种→播后镇压 Previous crop maize straw was removed from the field and crushed → full-volume straw return and basal fertilizer application → one pass of deep ploughing was conducted to a depth of 30 cm using an ILFQ330 moldboard plough → two rounds of rotary tillage with a Haofeng 1GQNM-180 dual-axis stubble rotary machine at a depth of 15 cm → sowing carried out using a 2BFGT-12(8)(220)B type rotary tillage fertilizing seeder → the soil was compacted after sowing
常年旋耕 RT	前茬玉米秸秆离田→人工撒施底肥→豪丰 1GQNM-180 双轴灭茬旋耕机旋耕 2 遍, 深度 15 cm→2BFGT-12(8)(220)B 型旋耕施肥播种机播种→播后镇压 Previous crop maize straw was removed from the field → basal fertilizer application → two rounds of rotary tillage with a Haofeng 1GQNM-180 dual-axis stubble rotary machine at a depth of 15 cm → sowing carried out using a 2BFGT-12(8)(220)B type rotary tillage fertilizing seeder → the soil was compacted after sowing
常年少免耕 NT	前茬玉米秸秆离田→2BFGT-12(8)(220)B 型旋耕施肥播种机一次性完成施肥、旋耕、播种、覆土和镇压等多道机械化作业 Previous crop maize straw was removed from the field → the 2BFGT-12(8)(220)B type rotary tillage fertilizing seeder simultaneously accomplishes fertilizing, rotary tillage, sowing, soil covering, and compaction

DT: perennial deep tillage with straw incorporation; RT: perennial rotary tillage; NT: perennial minimum or no tillage.

表 2 0–20 cm 耕层土壤基础养分
Table 2 Basic nutrient contents in the 0–20 cm plow layer soil

年份 Year	耕作模式 Tillage pattern	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	碱解氮 Hydrolysable nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)
2011	试验前 Initial	21.19	1.29	101.42	28.97	217.09
2018–2019	DT	23.78 a	1.33 a	110.27 a	29.01 a	235.11 a
	RT	20.83 b	1.18 b	97.50 b	28.58 a	200.10 b
	NT	21.12 b	1.19 b	97.00 b	28.63 a	203.00 b
2019–2020	DT	23.24 a	1.35 a	107.33 a	29.11 a	230.58 a
	RT	21.13 b	1.20 b	97.32 b	28.87 a	190.43 b
	NT	21.07 b	1.24 b	97.56 b	29.00 a	197.50 b

处理同表 1。不同小写字母表示耕作方式间差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among tillage patterns ($P < 0.05$).

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农田耗水特性 于播种前、越冬期、拔节期、开花期和成熟期等小麦关键生育期利用环刀法每隔 10 cm 采集原状土壤样品, 采集土层深度为 60 cm, 用烘干法测定 0~60 cm 土层的土壤质量含水量, 并计算小麦各生育阶段的耗水量和农田总耗水量^[22]。土壤质量含水量(%) = (鲜土质量-干土质量) / 干土质量 × 100%。土壤贮水消耗量(S , mm) = $10 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i (GSWC_{i1} - GSWC_{i2})$, 式中, i 是土壤样品采集时的土层顺序, n 是总土层数, γ_i (g cm⁻³) 是第 i 土

层的土壤容重, h_i (cm) 是第 i 土层的深度, $GSWC_{i1}$ (%) 和 $GSWC_{i2}$ (%) 分别指前一时期和后一时期第 i 土层的质量含水量。农田耗水量(ET , mm) = $S + P + I - R - D + CR$, 式中, S (mm) 代表播种期至成熟期 0~60 cm 土层土壤贮水消耗量, I (mm) 和 P (mm) 分别代表小麦全生育季的灌水量和降水量。 CR (mm)、 R (mm) 和 D (mm) 分别表示上升至根区的土壤孔隙水、根区排水和地表径流, 但由于试验田地下水位低于 2.5 m, 地表坡度很小, 因此可以忽略这三者对农田总耗水的影响^[23-24]。

1.3.2 群体动态变化 于越冬期、返青期、拔节

期、开花期和成熟期进行群体数量调查,每个处理调查 0.5 m², 3 次重复,并计算出单位面积总茎蘖数。

1.3.3 干物质积累与转运 于开花期和成熟期随机选取长势一致的 20 个小麦单茎装入牛皮纸袋,3 次重复,于 105℃杀青 30 min, 80℃烘干至恒重,测定干物质积累量。单茎平均干物质积累量与单位面积总茎蘖数量的乘积即为单位面积干物质积累量。

花前干物质转运量(kg hm⁻²) =开花期干物质质量-成熟期营养器官干物质质量;

花前干物质转运量对籽粒的贡献率=花前干物质转运量/成熟期籽粒干物质质量×100%;

花后干物质同化量(kg hm⁻²) =成熟期干物质质量-花前干物质质量;

花后干物质同化量对籽粒的贡献率=花后干物质同化量/成熟期籽粒干物质质量×100%。

1.3.4 籽粒灌浆参数 于开花期选择生育进程基本一致的小麦穗进行标记,分别于花后 7、14、21、28、35 d 选取 10 个带有标记的麦穗,3 次重复,于 105℃杀青 30 min, 80℃烘干至恒重,测量千粒重。利用 logistics 方程对千粒重数据进行拟合,参照 Wu 等^[25]的方法计算籽粒灌浆持续时间(*T*)、达到最大籽粒灌浆速率所需的时间(*T*_{max})、最大灌浆速率下的粒

重(*W*_{max})、最大籽粒灌浆速率(*V*_{max})和平均灌浆速率(*V*_{mean})。

1.3.5 产量和水分利用效率 于成熟期,利用 1 m² 的铁框随机选取长势均匀一致的地块进行调查小麦穗数,并在铁框内随机选取连续 50 个单穗记录穗粒数,3 次重复。另取长势一致的 2 m²小麦进行测产,3 次重复,风干脱粒后测定千粒重(g)和籽粒重(kg),并用谷物水分测定仪测定籽粒含水量。小麦产量为调整籽粒含水量至 13.0%的籽粒重,即小区产量=实测产量×(1-籽粒含水量)/(1-13%)。水分利用效率为小麦产量与农田总耗水量的比值。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理,利用 SPSS 22.0、DPS 7.05 进行数据处理和分析,使用最小显著性差异法(LSD)在 *P* < 0.05 水平进行差异显著性检验,采用 Origin 2024b 绘图。

2 结果与分析

2.1 耕作方式对农田耗水特性的影响

如表 3 所示,土壤贮水与降水是本试验农田耗水的主要来源。土壤贮水消耗占总耗水量的比例为 10.35%~27.06%,而降水贡献率则达 72.94%~

表 3 耕作方式对农田耗水特性的影响
Table 3 Effects of tillage patterns on water consumption characteristics

年份 Year	处理 Treatment	土壤贮水 Soil storage water		降水 Precipitation		农田耗水量 Water consumption (mm)				总耗水量 Seasonal water consumption (mm)
		消耗量 Amount (mm)	比例 Proportion (%)	降水量 Precipitation (mm)	比例 Proportion (%)	播种期至 越冬期 Sowing to wintering stage	越冬期至 拔节期 Wintering to jointing stage	拔节期至 开花期 Jointing to anthesis stage	开花期至 成熟期 Anthesis to maturity stage	
2018–2019	DT	60.52 c	20.55 b	234.00	79.45 a	112.25 b	48.83 c	77.77 a	55.67 a	294.52 a
	RT	80.37 b	25.57 a	234.00	74.43 b	131.52 a	68.94 b	67.79 b	46.11 b	314.37 a
	NT	86.82 a	27.06 a	234.00	72.94 c	139.60 a	89.44 a	57.63 c	34.16 c	320.82 a
2019–2020	DT	32.73 c	10.35 c	283.60	89.65 a	33.68 c	166.03 a	58.51 a	58.11 a	316.33 a
	RT	35.66 b	11.17 b	283.60	88.83 a	45.23 b	165.25 a	57.03 a	51.76 b	319.26 a
	NT	44.16 a	13.47 a	283.60	86.53 a	56.75 a	167.56 a	51.08 b	52.36 b	327.76 a
方差分析 ANOVA	年份	***	***	—	***	***	***	***	***	*
	Year (Y)									
	耕作方式 Tillage pattern (T)	***	***	—	*	***	***	***	***	ns
	年份×耕作 方式 Y×T	***	***	—	ns	ns	***	***	***	ns

处理同表 1。不同小写字母表示耕作方式间差异显著。ns: 差异不显著; *、***分别表示在 0.05 和 0.001 水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among tillage patterns (*P* < 0.05). ns: no significant difference; * and *** mean significant difference at the 0.05 and 0.001 levels, respectively.

89.65%。总耗水量在不同处理间未达显著差异水平, 且播种期至拔节期农田耗水量显著高于拔节期至成熟期。2018—2019 年度, DT 的播种期至拔节期农田耗水量分别较 RT 和 NT 降低 19.64% 和 29.67%, 拔节期至成熟期农田耗水量分别提高 17.16% 和 45.38%; 2019—2020 年度, DT 的播种期至拔节期农田耗水量分别较 RT 和 NT 降低 5.12% 和 10.97%, 拔节期至成熟期农田耗水量分别提高 7.20% 和 12.74%。这表明, 耕作方式显著影响了小麦的农田耗水特性, 相比于常年旋耕和少免耕, 深耕结合秸秆还田有效增加了拔节期至成熟期的农田水分利用。

2.2 耕作方式对小麦茎蘖数的影响

如图 2 所示, 不同耕作方式下的小麦茎蘖数均

在拔节期达到最大值。相较于 DT, 2018—2019 年度 RT 和 NT 的茎蘖最大值分别提高 11.29% 和 11.57%, 2019—2020 年度 NT 的茎蘖最大值提高 3.23%。与此同时, RT 和 NT 相较于 DT 显著提高了开花期和成熟期穗数。在开花期群体数量方面, 2018—2019 年度 RT 和 NT 分别较 DT 提高 32.43% 和 34.61%, 2019—2020 年度则分别提高 6.78% 和 18.83%。在成熟期穗数方面, 2018—2019 年度 RT 和 NT 分别较 DT 提高 10.31% 和 7.59%, 2019—2020 年度则分别提高 6.63% 和 4.12%。以上结果表明, 耕作方式对小麦群体动态具有显著调控效应, 相比于深耕结合秸秆还田, 常年旋耕和少免耕的方式更有利于增加穗数。

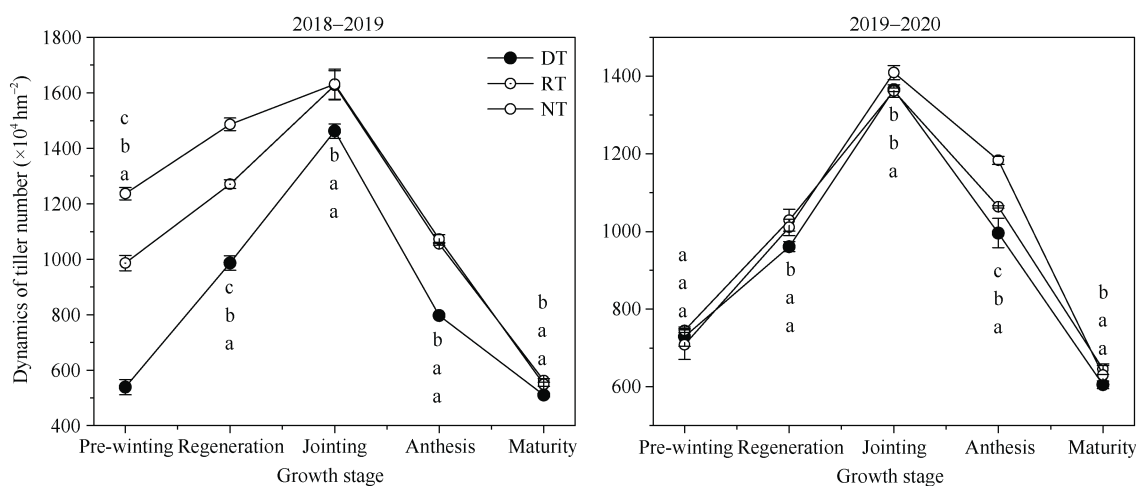


图2 耕作方式对小麦茎蘖数的影响

Fig. 2 Effects of tillage patterns on wheat tiller number dynamics

处理同表1。图中小写字母从上到下依次代表DT、RT和NT的显著性水平。

Treatments are the same as those given in Table 1. The arrangement of lowercase letters from top to bottom indicates the significance levels for DT, RT, and NT, respectively.

2.3 耕作方式对干物质积累与转运的影响

如表4所示, 2年度DT与RT的开花期单茎干物质积累量差异未达显著水平。然而, 相较于DT, RT的开花期和成熟期群体干物质在2018—2019年度分别提高26.38%和18.95%, 在2019—2020年度分别提高11.46%和5.76%。这与RT较高的群体数量有关。NT的开花期单茎干物质较DT在2018—2019年度和2019—2020年度分别降低17.43%和17.53%, 但其群体干物质在2018—2019年度较DT增加10.21%。这同样与NT较高的群体数量有关。但是, NT的成熟期群体干物质较DT在2018—2019年度和2019—2020年度分别降低7.33%和14.85%。此外, 2018—2019年度, DT的花前转运干物质质量分

别较RT和NT降低5.14%和22.81%, 花前转运干物质对籽粒产量的贡献率分别降低0.50和20.07个百分点; DT的花后同化干物质质量与RT无显著差异, 较NT提高80.62%, 花后同化干物质对籽粒的贡献率较RT和NT分别提升0.50和20.07个百分点。2019—2020年度, DT的花前转运干物质质量较RT和NT分别降低16.47%和25.98%, 花前转运干物质对籽粒产量的贡献率分别降低4.32和16.29个百分点; DT的花后同化干物质质量分别较RT和NT增加3.66%和54.69%, 花后同化干物质对籽粒的贡献率较RT和NT分别提升4.32和16.29个百分点。这表明, 深耕结合秸秆还田可以显著促进花前单茎干物质的积累和提高花后干物质的同化效率。

表 4 耕作方式对干物质积累与转运的影响
Table 4 Effects of tillage patterns on dry matter accumulation and remobilization

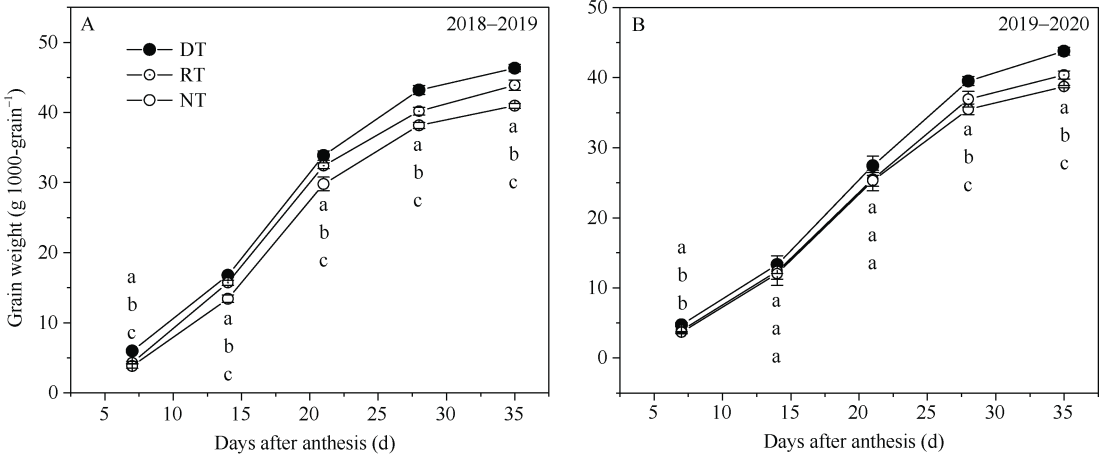
年份 Year	处理 Treatment	开花期 单茎干物质 Dry matter amount of single stem at anthesis (g stem ⁻¹)	开花期 干物质 Dry matter amount at anthesis (×10 ³ kg hm ⁻²)	成熟期 干物质 Dry matter amount at maturity (×10 ³ kg hm ⁻²)	花前转运 干物质 Pre-anthesis dry matter remobilization (×10 ³ kg hm ⁻²)	花前转运 干物质质量对籽粒 的贡献率 Contribution of pre-anthesis dry matter remo- bilization to grains (%)	花后同化 干物质 Post-anthesis dry matter assimilation (×10 ³ kg hm ⁻²)	花后同化干物 质量对籽粒的 贡献率 Contribution of post-anthesis dry matter assimilation to grains (%)
2018–2019	DT	1.09 a	8.72 c	12.82 b	4.06 c	49.77 b	4.10 a	50.23 a
	RT	1.04 a	11.02 a	15.25 a	4.28 b	50.27 b	4.24 a	49.73 b
	NT	0.90 b	9.61 b	11.88 c	5.26 a	69.84 a	2.27 b	30.16 c
2019–2020	DT	0.97 a	9.69 b	15.62 b	2.08 c	25.95 c	5.94 a	74.05 a
	RT	1.01 a	10.80 a	16.52 a	2.49 b	30.27 b	5.73 a	69.73 b
	NT	0.80 b	9.46 b	13.30 c	2.81 a	42.24 a	3.84 b	57.76 c
方差分析 ANOVA	年份 Year (Y)	ns	ns	***	***	***	***	***
	耕作方式 Tillage pattern (T)	**	***	***	***	***	**	***
	年份×耕作 方式 Y×T	ns	***	***	***	**	ns	ns

处理同表 1。不同小写字母表示耕作方式间差异显著。ns: 差异不显著; **, ***分别表示在 0.01 和 0.001 水平差异显著。
Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among tillage patterns ($P < 0.05$). ns: no significant difference; ** and *** mean significant difference at the 0.01 and 0.001 levels, respectively.

2.4 耕作方式对灌浆特性的影响

如图 3-A 和图 3-B 所示, 小麦花后 7~35 d 的粒重动态均表现为 DT 最高, RT 次之, NT 最低。花后 0~7 d, DT 的灌浆速率显著高于 RT 和 NT; 花后 14~21 d, 各处理的灌浆速率无显著差异; 花后 21~35 d, 除 2018—2019 年度 28~35 d 时段外, DT 的灌浆速率均保持最高(图 3-C, D)。通过对籽粒灌浆过程进行 Logistic 曲线拟合发现(表 5): $T_{\max}$ 表现出 NT 长于 DT

和 RT 的趋势, 在 2018—2019 年度达到显著水平; T 表现出 DT 长于 RT 和 NT 的趋势, 在 2018—2019 年度达到显著水平; $V_{\max}$ 在 2019—2020 年度表现出 DT 显著大于 RT 和 NT, 在 2018—2019 年度处理间差异未达显著水平; 2 年度 $W_{\max}$ 和 V_{mean} 均一致表现为 DT 处理较高。以上结果表明, 深耕结合秸秆还田在粒重、平均灌浆速率及灌浆持续时间方面表现出相对优势, 为高产奠定了基础。



(图 3)

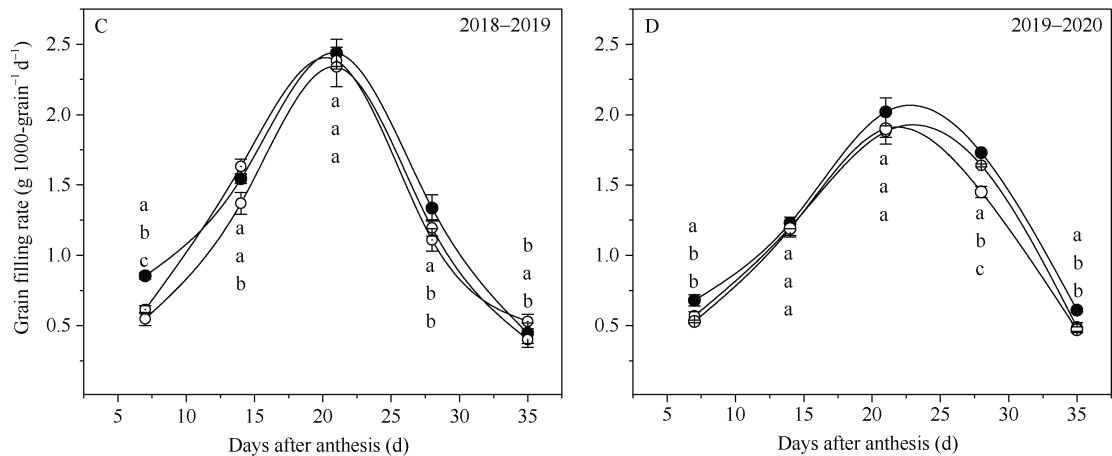


图 3 耕作方式对小麦粒重动态和灌浆速率的影响

Fig. 3 Effects of tillage patterns on wheat grain weight dynamics and grain filling rate

处理同表 1。图中小写字母从上到下依次代表 DT、RT 和 NT 的显著性水平。
Treatments are the same as those given in Table 1. The arrangement of lowercase letters from top to bottom indicates the significance levels for DT, RT, and NT, respectively.

表 5 耕作方式对小麦籽粒灌浆参数的影响

Table 5 Effects of tillage patterns on wheat grain filling parameters

年份 Year	耕作模式 Tillage pattern	增长曲线方程 Growth curve equation	$T_{\max}$ (d)	$W_{\max}$ (g 1000-grain ⁻¹)	$V_{\max}$ (g 1000-grain ⁻¹ d ⁻¹)	V_{mean} (g 1000-grain ⁻¹ d ⁻¹)	T (d)
2018–2019	DT	$y = 47.42 / (1 + 32.13 \times e^{-0.207x})$	16.73 b	23.71 a	2.46 a	1.21 a	38.87 a
	RT	$y = 44.05 / (1 + 42.74 \times e^{-0.226x})$	16.61 b	22.02 b	2.49 a	1.18 a	36.95 b
	NT	$y = 41.44 / (1 + 52.72 \times e^{-0.232x})$	17.07 a	20.73 c	2.41 a	1.12 b	36.82 b
2019–2020	DT	$y = 46.15 / (1 + 33.77 \times e^{-0.187x})$	18.82 a	23.05 a	2.16 a	1.06 a	43.30 a
	RT	$y = 42.35 / (1 + 37.77 \times e^{-0.194x})$	18.66 a	21.16 b	2.06 b	0.99 b	42.23 a
	NT	$y = 40.18 / (1 + 40.30 \times e^{-0.202x})$	18.91 a	20.75 b	2.10 b	1.01 b	42.98 a

处理同表 1。 $T_{\max}$: 达到最大灌浆速率所需时间; $W_{\max}$: 达到最大灌浆速率时的粒重; $V_{\max}$: 最大灌浆速率; V_{mean} : 平均籽粒灌浆速率; T : 籽粒灌浆持续时间。不同小写字母表示耕作方式间差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Table 1. $T_{\max}$: time for reaching maximum grain filling rate; $W_{\max}$: grain weight at maximum grain filling rate; $V_{\max}$: maximum grain filling rate; V_{mean} : average grain filling rate; T : duration of grain filling. Different lowercase letters indicate significant differences among tillage patterns ($P < 0.05$).

2.5 耕作方式对产量和水分利用效率的影响

如表 6 所示, 2018—2019 年度, DT 与 RT 的产量及千粒重差异均未达到显著水平; 然而, 相较于 DT 与 RT, NT 的千粒重显著降低 2.16%~2.94%, 产量亦显著降低 13.54%~15.40%。2019—2020 年度, DT 获得最高产量, RT 和 NT 的产量较 DT 分别显著降低 5.07%和

7.93%。就产量构成要素而言, 穗数均以 DT 为最低, 而 RT 与 NT 处理间差异不显著; 穗粒数则表现为 DT 显著高于 RT 与 NT, 后两者间差异同样不显著。在水分利用效率方面, 2 年度均呈现 DT > RT > NT 的规律。以上结果表明, 深耕结合秸秆还田通过显著增加穗粒数和千粒重, 获得高产和高水分利用效率。

表 6 耕作方式对小麦产量和水分利用效率的影响

Table 6 Effects of tillage patterns on wheat yield and water use efficiency

年份 Year	耕作方式 Tillage pattern	穗数 Spike number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm^{-2})	水分利用效率 Water use efficiency (kg $\text{hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)
2018–2019	DT	510.25 b	35.38 a	47.16 a	7232.78 a	24.56 a
	RT	562.79 a	32.92 b	47.54 a	7391.34 a	23.51 b
	NT	548.94 a	31.75 b	46.14 b	6253.13 b	19.49 c

(续表 6)

年份 Year	耕作方式 Tillage pattern	穗数 Spike number ($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Grain yield (kg hm^{-2})	水分利用效率 Water use efficiency ($\text{kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$)
2019–2020	DT	605.12 b	36.53 a	41.21 a	6613.42 a	20.91 a
	RT	645.13 a	33.25 b	41.10 b	6278.09 b	19.66 b
	NT	630.03 a	31.45 b	40.62 b	6089.21 c	18.59 c
方差分析 ANOVA	年份	***	ns	***	***	***
	Year (Y)					
	耕作方式	***	***	*	***	***
	Tillage pattern (T)					
	年份×耕作方式 Y×T	*	ns	ns	***	***

处理同表 1。不同小写字母表示耕作方式间差异显著。ns: 差异不显著; *, ***分别表示在 0.05 和 0.001 水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences among tillage patterns ($P < 0.05$). ns: no significant difference; * and *** mean significant difference at the 0.05 and 0.001 levels, respectively.

2.6 相关性分析

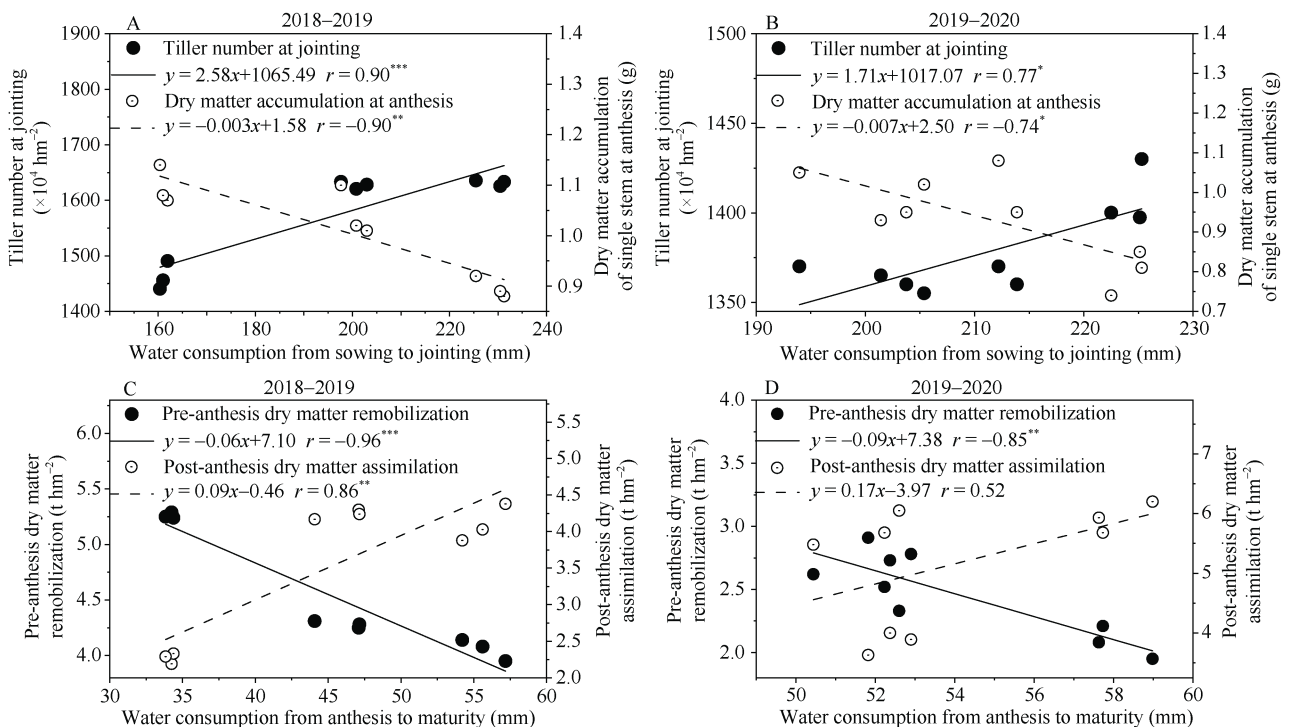
2.6.1 农田耗水量与干物质积累和转运的相关性分析

如图 4 所示, 农田耗水量与干物质积累和转运在年际间表现出规律一致的相关性。播种期至拔节期, 农田耗水量与拔节期最大茎蘖数呈显著正相关, 但是与开花期单茎干物质则呈显著负相关(图 4-A, B)。开花期至成熟期, 农田耗水量与花前干物质转运量呈显著负相关, 其与花后同化干物质在 2018—2019 年呈显著正相关以及在 2019—2020 年呈正相关趋势(图 4-C, D)。开花期单茎干物质与花前

干物质转运量在 2018—2019 年呈显著负相关, 而在 2019—2020 年呈负相关趋势, 但是其与花后同化干物质质量 2 年度均呈显著正相关(图 4-E, F)。这说明拔节期之前农田耗水量的增加有利于总茎蘖数的增加, 但是降低开花期单茎的干物质积累。然而, 在花后水分供应充足条件下, 优质单茎更能进一步促进花后同化物的积累。

2.6.2 干物质积累和转运与籽粒灌浆参数的相关性分析

如图 5 所示, 2 年度开花期单茎干物质与 0~7 d 起始灌浆速率(V_0)、 $W_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 及 V_{mean} 均呈正



(图 4)

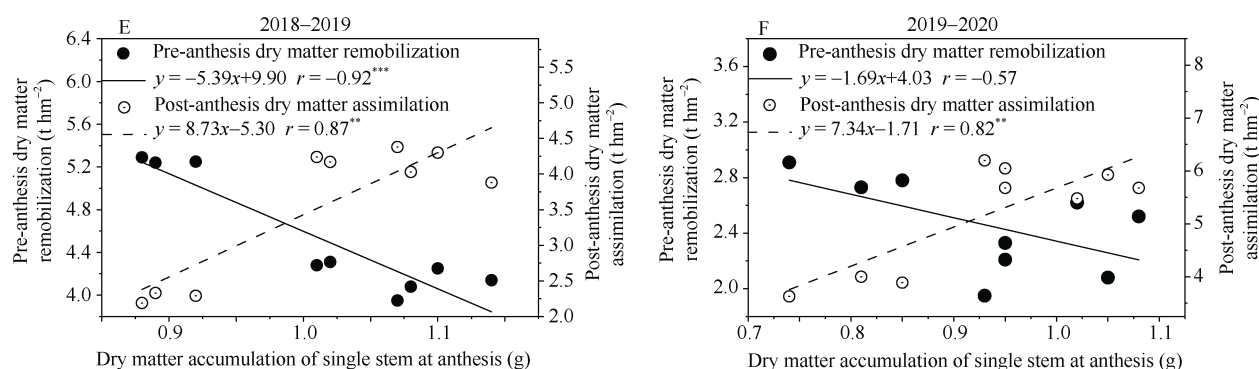


图4 农田耗水量与干物质积累和转运的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between water consumption and dry matter accumulation and remobilization

*、**、***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平相关性显著。

*, **, and *** mean significant correlation at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

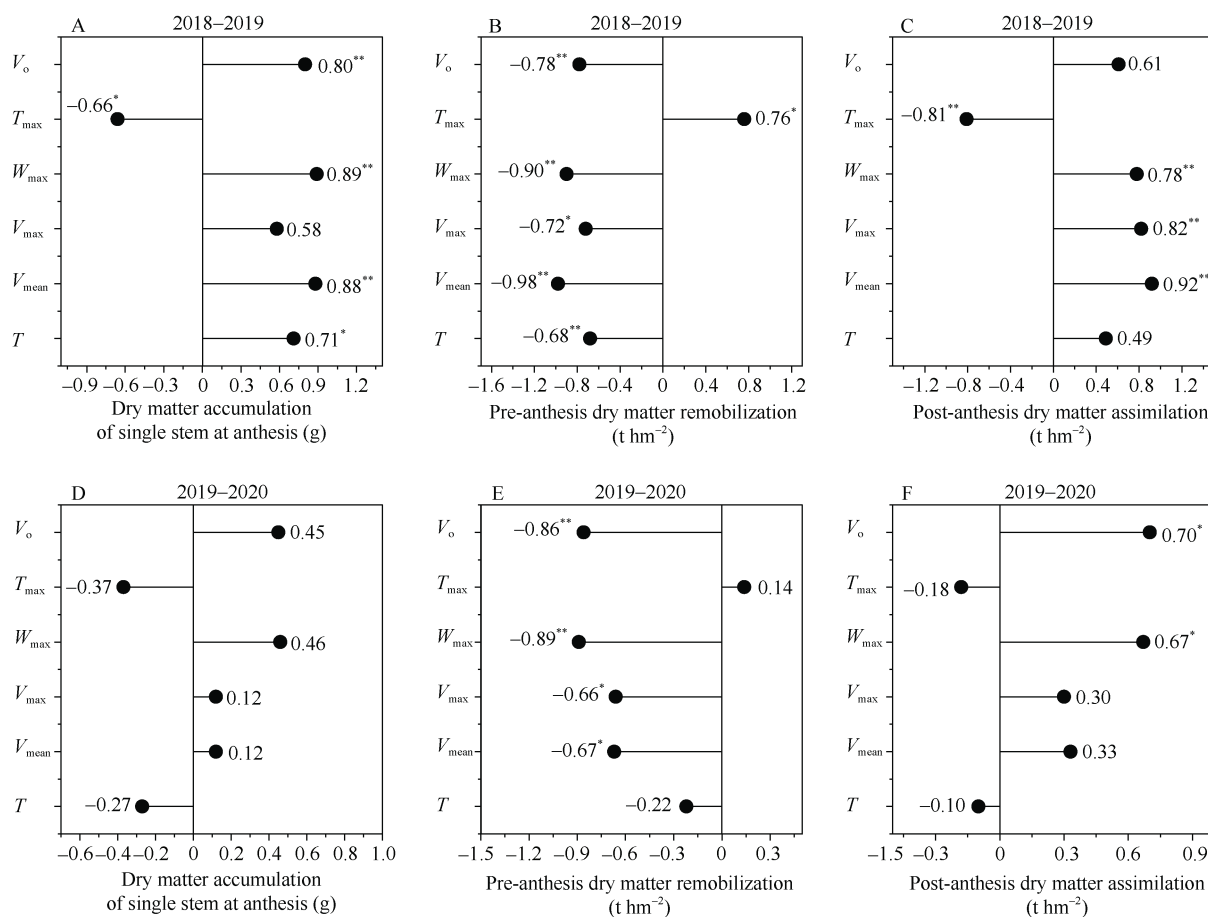


图5 干物质积累和转运与籽粒灌浆参数的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between dry matter accumulation, remobilization, and grain filling parameters

缩写同表 5。V₀: 起始灌浆速率。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平相关性显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 5. V₀: initial grain filling rate. * and ** mean significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

相关, 其中在 2018—2019 年度与 V_0 、 $W_{\max}$ 及 V_{mean} 的相关性达到显著水平; 2 年度开花期单茎干物质与 $T_{\max}$ 呈负相关, 且在 2018—2019 年度达显著水平; 与 T 的相关性年际间不一致, 但 2018—2019 年度呈

显著正相关(图 5-A, D)。2 年度花前转运干物质质量与 V_0 、 $W_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 及 V_{mean} 均呈显著负相关; 与 $T_{\max}$ 均呈正相关, 与 T 呈负相关, 且与 $T_{\max}$ 的相关性在 2018—2019 年度达显著水平(图 5-B, E)。2 年度花后

同化干物质质量则与 V_o 、 $W_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 、及 V_{mean} 均呈正相关; 与 $T_{\max}$ 呈负相关, 且在 2018—2019 年度达显著水平; 与 T 的相关性存在年际差异(图 5-C, F)。上述结果说明, 花前干物质转运调控 $T_{\max}$, 而开花期单茎干物质与花后同化积累则与 V_o 、 $V_{\max}$ 、及 V_{mean} 密切相关。

2.6.3 产量形成指标的相关性分析 如图 6 所示,

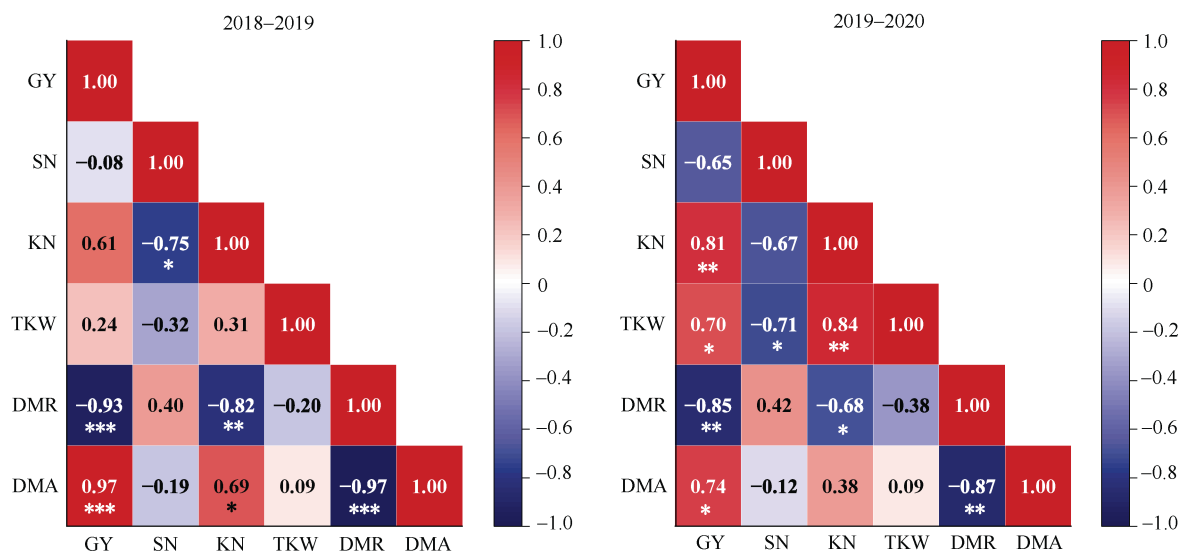


图 6 产量形成指标的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of yield formation indicators

GY、SN、KN、TKW、DMR 和 DMA 分别表示产量、穗数、穗粒数、千粒重、花前转运干物质质量和花后同化干物质质量。*、**、*** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平相关性显著。

GY, SN, KN, TKW, DMR and DMA represent the grain yield, spike number, grains per spike, 1000-grain weight, pre-anthesis dry matter remobilization, and post-anthesis dry matter assimilation, respectively. *, **, and *** mean significant correlation at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

3 讨论

3.1 耕作方式对农田耗水特性的影响

提升土壤蓄纳降水的能力并优化水分向生育后期分配, 是雨养小麦稳产增产的关键^[26]。本研究证实, 深耕结合秸秆还田通过形成“前控后补”的耗水模式, 显著提高了水分利用效率。该模式通过降低播种期至拔节期的无效耗水, 同时保障拔节至成熟期关键阶段的水分供给, 精准匹配了小麦的需水规律。前人多项研究也证实了这一结论的准确性。研究表明, 深耕通过打破犁底层、降低土壤容重, 显著提升了水分入渗能力, 有效扩容“土壤水库”, 将更多自然降水储存于深层土壤, 为作物后期生长提供了可靠的水分储备^[27-29]。同时, 秸秆还田促进了土壤团聚体形成, 增强了土壤持水能力, 有效抑制了水分蒸发, 发挥了“生物保水剂”的功能^[30-31]。这两方面的协同效应共同奠定了水分时空优化分配

2 年度产量均与花前转运干物质质量呈显著负相关, 与穗数呈负相关趋势; 而产量与花后同化干物质质量均呈显著正相关。产量构成要素分析表明, 产量与穗粒数及千粒重均呈正相关, 其中在 2019—2020 年度相关性达显著水平。这表明提高花后光合碳同化效率是实现穗粒数、千粒重与产量协同提升的关键途径。

的物理基础。此外, 本研究进一步发现, 深耕结合秸秆还田还可通过调控群体结构优化水分利用。与旋耕和少免耕相比, 深耕有效控制了前期无效分蘖数量, 这可能是深耕增加播种深度所导致^[32]。无效分蘖数量的减少有效降低了生长前期的无效蒸腾耗水^[33], 这使得有限的水分资源能够更多地保留至生殖生长阶段。在此基础上, 深耕结合秸秆还田形成的深厚耕作层与良好土壤结构促进了根系深扎, 使作物能够充分利用深层储水。当花后籽粒灌浆产生强烈蒸腾需求时, 优化的水分供给与之形成良性互动, 最终实现了土壤水分向灌浆关键期的有效转移, 为雨养小麦的高产稳产提供了可靠保障。

与深耕结合秸秆还田相比, 旋耕及少免耕处理在播种期至拔节期表现出更高的农田耗水量, 而在拔节期至成熟期耗水量则显著降低。这一结果与少免耕具有蓄水保墒效果的观点存在差异。前人研究

认为, 少免耕通过减少土壤扰动、切断毛细管并配合秸秆覆盖, 能有效抑制水分蒸发, 提升土壤蓄水能力^[34-35]。然而, 本研究中旋耕与少免耕处理均实施秸秆离田与灭茬作业, 导致地表覆盖缺失、土壤裸露, 苗期土壤蒸发强烈, 这是造成播种期至拔节期耗水量增加的重要原因。此外, 这 2 种耕作方式播种较浅, 促进了早期无效分蘖的发生, 进一步加剧了前期水分的无效消耗, 致使花后水分供给不足。至开花期后, 由于上层土壤水分已在前期大量耗散, 而深层土壤储水又未能有效补充, 少免耕处理在关键灌浆期常遭遇水分胁迫, 供水能力受限, 最终影响产量形成。本研究结果强调了秸秆覆盖与少免耕配套实施的重要性, 单纯减少耕作而不保持地表覆盖, 可能导致水分利用效率降低, 难以发挥少免耕在雨养农业中的蓄水保墒优势。

3.2 耕作方式对小麦籽粒灌浆的影响

小麦籽粒灌浆是决定产量的核心生物学过程, 其物质来源主要包括花前营养器官储存的光合同化物及花后光合产物^[36-37]。本研究显示, 籽粒灌浆参数与花前干物质积累呈负相关, 而与花后干物质同化呈正相关, 说明花后光合产物的积累是影响灌浆的主导因素, 这与花后同化物贡献 50.0%~70.0% 的籽粒产量的规律一致^[38-39]。本试验中, 深耕结合秸秆还田在平均灌浆速率和灌浆持续时间方面均显著优于旋耕和少免耕, 这与前人研究结论相符。这是因为深耕结合秸秆还田所形成的“前控后补”土壤水分调控模式, 有效缓解花后干旱胁迫, 有助于维持较高叶面积指数, 延长灌浆持续期并提升灌浆速率^[40-41]。尽管有研究指出免耕结合秸秆覆盖在灌浆的渐增期、快增期和缓增期等阶段均具有一定优势^[42], 但本试验中实施秸秆离田与灭茬作业, 削弱了其蓄水保墒效应, 导致该处理在灌浆性能上的表现不及深耕结合秸秆还田处理。

此外, 本研究进一步发现, 降低播种期至拔节期的农田耗水量有助于抑制无效分蘖, 从而提升开花期单茎干物质积累量, 为花后光合产物的高效形成奠定基础。这是因为高质量的茎蘖个体为维持花后光合同化酶活性提供了物质基础, 并通过优化冠层透光条件、延长花后叶片功能期, 有效增强花后光合能力, 促进光合产物向籽粒的高效转运^[19]。在本试验中, 与旋耕和少免耕相比, 深耕结合秸秆还田所形成的“前控后补”土壤水分调控模式, 在控制冬前无效分蘖、促进光合产物向优势茎蘖定向分配、

以及增加花前单茎生物量等方面作用更为显著。

3.3 耕作方式对小麦产量形成的影响

耕作方式对小麦籽粒产量的影响已有大量研究, 但结论因生态区、种植制度及管理措施的差异而存在不一致^[43-44]。多数研究支持深耕相对于少免耕和旋耕的增产效应, 其机制在于深耕能打破常年旋耕形成的犁底层, 改善土壤物理结构, 促进根系向深层下扎, 从而增强生育后期水分养分吸收能力, 最终提升穗粒数、千粒重及籽粒产量^[45-46]。值得注意的是, 深耕需配合秸秆还田才能在砂姜黑土区显著增产, 而单纯深耕效果有限^[47]。本试验结果与深耕增产的主流结论一致, 证实深耕结合秸秆还田是提升砂姜黑土区雨养小麦籽粒产量的有效模式。相比之下, 旋耕与少免耕处理在播种期至拔节期农田耗水量较高, 导致分蘖数量增加但单茎干物质积累降低, 加之花后土壤水分供应不足, 共同限制了花后干物质的同化与积累, 进而影响籽粒灌浆进程与产量形成。

耕作方式主要通过调控穗数、穗粒数、千粒重的协调性影响最终产量^[48-49]。但是耕作方式对产量三要素影响的现有结论存在分歧, 有研究指出, 深松主要通过增加穗数实现 12.4% 的增产^[50], 深耕则通过协同提升穗数和千粒重增产 10.3%^[13]; 也有研究发现, 浅旋耕相比深耕显著提高了穗数和千粒重, 最终增产达 41.0%^[51]。本试验深入揭示了深耕结合秸秆还田的增产效应, 一方面通过生育前期的适度水分调控, 抑制无效分蘖发生, 优化光合同化物向有效分蘖的分配, 显著提升穗粒数; 另一方面在花后灌浆关键期优化土壤水分供给, 增强花后同化物质积累及其向籽粒的转运效率, 提高籽粒灌浆速率并延长有效灌浆期, 从而显著增加粒重。最终, 协调优化穗数、穗粒数与千粒重, 驱动籽粒产量显著提升。

4 结论

本研究结果表明, 深耕结合秸秆还田较常年旋耕和少免耕处理具有显著的水分调控优势, 具体表现为播种期至拔节期农田耗水量显著降低, 而拔节期至成熟期耗水强度显著提高, 形成独特的“前控后补”水分利用模式。该模式有效协调了小麦全生育期水分供需平衡, 通过抑制前期无效蒸腾、增强中后期水分利用, 显著促进花后光合产物的积累与向籽粒的高效转运, 同时提高灌浆速率并延长灌浆持

续时间,最终通过协同优化穗数、穗粒数和千粒重,实现籽粒产量的显著提升。因此,深耕结合秸秆还田可作为雨养小麦稳产增产的关键耕作技术,研究结果可为区域抗旱耕作制度的优化提供理论依据。

References

- [1] Luo X M, Yang Y M, Lin X L, et al. Deciphering spike architecture formation towards yield improvement in wheat. *J Genet Genom*, 2023, 50: 835–845.
- [2] 赵鸿, 蔡迪花, 王鹤龄, 等. 干旱灾害对粮食安全的影响及其应对技术研究进展与展望. *干旱气象*, 2023, 41(2): 187–206.
Zhao H, Cai D H, Wang H L, et al. Progress and prospect on impact of drought disaster on food security and its countermeasures. *J Arid Meteor*, 2023, 41(2): 187–206 (in Chinese with English abstract).
- [3] Xue R, Jiang Y, Li H, et al. Review of advancements and challenges in delayed irrigation: enhancing crop water productivity and sustainable crop production. *Agric Water Manag*, 2025, 318: 109739.
- [4] Zeng R Y, Lin X M, Welch S M, et al. Impact of water deficit and irrigation management on winter wheat yield in China. *Agric Water Manag*, 2023, 287: 108431.
- [5] Si Z Y, Qin A Z, Liang Y P, et al. A review on regulation of irrigation management on wheat physiology, grain yield, and quality. *Plants*, 2023, 12: 692.
- [6] 国家统计局. 2024 中国统计年鉴. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm>.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook in 2024. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm> (in Chinese).
- [7] 居辉, 李三爱, 严昌荣. 我国北方旱区雨养小麦生产潜力研究. *中国生态农业学报*, 2008, 16: 728–731.
Ju H, Li S A, Yan C R. Potential productivity of rain-fed wheat in dry farmlands of North China. *Chin J Eco-Agric*, 2008, 16: 728–731 (in Chinese with English abstract).
- [8] Fang Q X, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: current status and agronomic management options. *Agric Water Manag*, 2010, 97: 1102–1116.
- [9] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 冬小麦种植区域的可能变化对黄淮海地区农业水资源盈亏的影响. *地理研究*, 2017, 36: 861–871.
Hu S, Mo X G, Lin Z H. Impacts of possibility planting region change for winter wheat on agricultural water surplus and deficit in Huang-Huai-Hai Region. *Geogr Res*, 2017, 36: 861–871 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王亚飞, 李世景, 徐萍, 等. 黄淮和长江中下游冬麦区小麦品种(系)农艺性状及其聚类分析. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28: 395–404.
Wang Y F, Li S J, Xu P, et al. Agronomic traits and cluster analysis of winter wheat varieties (lines) in the Huanghuai and the middle/lower reaches of the Yangtze River wheat areas. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 395–404 (in Chinese with English abstract).
- [11] Qin P H, Xie Z H, Zou J, et al. Future precipitation extremes in China under climate change and their physical quantification based on a regional climate model and CMIP5 model simulations. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38: 460–479.
- [12] 张玉娇, 王浩, 王淑兰, 等. 小麦/玉米轮作旱地长期耕作的保墒增产效应. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 126–136.
Zhang Y J, Wang H, Wang S L, et al. Soil moisture preservation and improving of crop yield in dry land under long-term wheat/maize rotation. *Trans CSAE*, 2018, 34(12): 126–136 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王永华, 刘焕, 辛明华, 等. 耕作方式与灌水次数对砂姜黑土冬小麦水分利用及籽粒产量的影响. *中国农业科学*, 2019, 52: 801–812.
Wang Y H, Liu H, Xin M H, et al. Effects of tillage practices and irrigation times on water use efficiency and grain yield of winter wheat in lime concretion black soil. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 801–812 (in Chinese with English abstract).
- [14] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2014, 47: 3359–3371.
Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, et al. Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system. *Sci Agric Sin*, 2014, 47: 3359–3371 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 等. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 102–109.
Zhang K, Liu Z D, Qiang X M, et al. Effects of tillage and irrigation on water use and yield of winter wheat and summer maize. *Trans CSAE*, 2019, 35(17): 102–109 (in Chinese with English abstract).
- [16] 祁小平, 李广, 袁建钰, 等. 保护性耕作对陇中旱作麦田蓄水保墒效果和产量的影响. *干旱区研究*, 2022, 39: 312–321.
Qi X P, Li G, Yuan J Y, et al. Effects of conservation tillage on the water storage, moisture conservation, and yield of dry-land wheat fields of central Gansu Province. *Arid Zone Res*, 2022, 39: 312–321 (in Chinese with English abstract).
- [17] 刘战东, 刘祖贵, 宁东峰, 等. 深松耕作对玉米水分利用和产量的影响. *灌溉排水学报*, 2015, 34(5): 6–12.
Liu Z D, Liu Z G, Ning D F, et al. Effects of subsoiling tillage on water utilization and yield of maize. *J Irrig Drain*, 2015, 34(5): 6–12 (in Chinese with English abstract).
- [18] 谢迎新, 靳海洋, 李梦达, 等. 周年耕作方式对砂姜黑土农田土壤养分及作物产量的影响. *作物学报*, 2016, 42: 1560–1568.
Xie Y X, Jin H Y, Li M D, et al. Effect of annual tillage practices on soil nutrient and crop yield in lime concretion black soil farmland. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 1560–1568 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王庆源, 陈甜, 于振文, 等. 长期定位耕作模式对小麦 ^{13}C 同化物分配和籽粒产量形成的影响. *应用生态学报*, 2024, 35: 926–932.
Wang Q Y, Chen T, Yu Z W, et al. Effects of long-term positioning tillage on ^{13}C assimilate distribution and grain yield formation in wheat. *Chin J Appl Ecol*, 2024, 35: 926–932 (in Chinese with English abstract).
- [20] 陈甜, 于振文, 石玉, 等. 不同耕作模式下麦田土壤温室气体排放和小麦产量. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29: 8–17.
Chen T, Yu Z W, Shi Y, et al. Soil greenhouse gas emission and

- yield in wheat fields under different tillage patterns. *J Plant Nutr Fert*, 2023, 29: 8–17 (in Chinese with English abstract).
- [21] 陈月明, 高磊, 张中彬, 等. 淮北平原砂姜黑土区砂姜的空间分布及其驱动因素. *土壤学报*, 2022, 59: 148–160.
- Chen Y M, Gao L, Zhang Z B, et al. Spatial distribution of Shajiang content in Shajiang black soil of Huaibei Plain and its influencing factors. *Acta Pedol Sin*, 2022, 59: 148–160 (in Chinese with English abstract).
- [22] Abrisqueta I, Abrisqueta J M, Tapia L M, et al. Basal crop coefficients for early-season peach trees. *Agric Water Manag*, 2013, 121: 158–163.
- [23] Ali M H, Hoque M R, Hassan A A, et al. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. *Agric Water Manag*, 2007, 92: 151–161.
- [24] Thorup-Kristensen K, Salmerón Cortasa M, Loges R. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses? *Plant Soil*, 2009, 322: 101–114.
- [25] Wu Q, Wang Y Z, Chen T T, et al. Soil nitrogen regulation using clinoptilolite for grain filling and grain quality improvements in rice. *Soil Tillage Res*, 2020, 199: 104547.
- [26] Wang D. Water use efficiency and optimal supplemental irrigation in a high yield wheat field. *Field Crops Res*, 2017, 213: 213–220.
- [27] Tian S Z, Ning T Y, Wang Y, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China. *Soil Tillage Res*, 2016, 163: 207–213.
- [28] Li P F, Ma B L, Wei X F, et al. Deeper root distribution and optimized root anatomy help improve dryland wheat yield and water use efficiency under low water conditions. *Plant Soil*, 2024, 501: 437–454.
- [29] 张妍妍, 李迎, 刘树辰, 等. 深松耕作条件下滴灌对冬小麦花后干物质积累及灌浆特性的影响. *作物学报*, 2025, 51: 3065–3079.
- Zhang Y Y, Li Y, Liu X C, et al. Effects of drip irrigation on post-anthesis dry matter accumulation and grain-filling characteristics of winter wheat under subsoiling tillage. *Acta Agron Sin*, 2025, 51: 3065–3079 (in Chinese with English abstract).
- [30] 鞠梦倩, 王杰, 李心月, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对土壤全氮和小麦产量的影响. *中国土壤与肥料*, 2025(4): 97–106.
- Ju M Q, Wang J, Li X Y, et al. Effects of different tillage methods and straw returning to soil on soil total nitrogen and wheat yield. *Soil Fert Sci China*, 2025(4): 97–106 (in Chinese with English abstract).
- [31] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agron J*, 2000, 92: 1096–1103.
- [32] 李明, 李朝苏, 刘森, 等. 耕作播种方式对稻茬小麦根系发育、土壤水分和硝态氮含量的影响. *应用生态学报*, 2020, 31: 1425–1434.
- Li M, Li C S, Liu M, et al. Effects of different tillage and sowing practices on root growth, soil moisture, and soil nitrate nitrogen content of wheat after rice. *Chin J Appl Ecol*, 2020, 31: 1425–1434 (in Chinese with English abstract).
- [33] Shang Y Q, Lin X, Li P, et al. Effects of supplemental irrigation at the jointing stage on population dynamics, grain yield, and water-use efficiency of two different spike-type wheat cultivars. *PLoS One*, 2020, 15: e0230484.
- [34] 田肖肖, 吕慎强, 张亮, 等. 免耕覆盖有效提高夏玉米产量及水氮利用效率. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23: 606–614.
- Tian X X, Lyu S Q, Zhang L, et al. No-tillage with straw mulching could increase grain yield, water and nitrogen use efficiencies of summer maize. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23: 606–614 (in Chinese with English abstract).
- [35] 曹永刚, 徐龙龙, 柴强, 等. 水氮减量条件下地膜玉米免耕轮作小麦的水分利用特征. *中国农业科学*, 2023, 56: 2660–2672.
- Cao Y G, Xu L L, Chai Q, et al. Water use characteristics of wheat rotated after No tillage plastic film mulching maize with reduced water and nitrogen. *Sci Agric Sin*, 2023, 56: 2660–2672 (in Chinese with English abstract).
- [36] 马尚宇, 王艳艳, 刘雅男, 等. 播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28: 375–385.
- Ma S Y, Wang Y Y, Liu Y N, et al. Effect of sowing date, planting density, and nitrogen application on dry matter accumulation, transfer, distribution, and yield of wheat. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 375–385 (in Chinese with English abstract).
- [37] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累、转运及分配的影响. *作物学报*, 2008, 34: 1027–1033.
- Ma D Y, Guo T C, Wang C Y, et al. Effects of nitrogen application rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1027–1033 (in Chinese with English abstract).
- [38] Arduini I, Masoni A, Ercoli L, et al. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *Eur J Agron*, 2006, 25: 309–318.
- [39] Zhiipao R R, Pooniya V, Kumar D, et al. Above and below-ground growth, accumulated dry matter and nitrogen remobilization of wheat (*Triticum aestivum*) genotypes grown in PVC tubes under well- and deficit-watered conditions. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1087343.
- [40] Sang X G, Wang D, Lin X. Effects of tillage practices on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat under different soil moisture conditions. *Soil Tillage Res*, 2016, 163: 185–194.
- [41] 陈翔, 唐志伟, 翁颖, 等. 不同秸秆还田技术模式对冬小麦强弱势粒灌浆特性的影响. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 128–137.
- Chen X, Tang Z W, Weng Y, et al. Effects of straw returning modes on the superior/inferior grain filling of winter wheat. *Trans CSAE*, 2024, 40(12): 128–137 (in Chinese with English abstract).
- [42] Liu Y, Sui Y W, Gu D D, et al. Effects of conservation tillage on grain filling and hormonal changes in wheat under simulated rainfall conditions. *Field Crops Res*, 2013, 144: 43–51.
- [43] Du C L, Li L L, Effah Z, et al. Different tillage and stubble management practices affect root growth and wheat production in a semi-arid area. *Plant Soil*, 2024, 502: 211–225.
- [44] Alsamin B, El-Hendawy S, Refay Y, et al. Integrating tillage and mulching practices as an avenue to promote soil water storage, growth, production, and water productivity of wheat under deficit irrigation in arid countries. *Agronomy*, 2022, 12: 2235.

- [45] 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. 农业工程学报, 2015, 31(10): 167–173.
Xie Y X, Jin H Y, Meng Q Y, et al. Deep tillage improving physical and chemical properties of soil and increasing grain yield of winter wheat in lime concretion black soil farmland. Trans CSAE, 2015, 31(10): 167–173 (in Chinese with English abstract).
- [46] Khan S, Anwar S, Yu S B, et al. Soil water consumption, water use efficiency and winter wheat production in response to nitrogen fertilizer and tillage. PeerJ, 2020, 8: e8892.
- [47] 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. 植物营养与肥料学报, 2020, 26: 276–284.
Han S, Wu J, Li M, et al. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment. J Plant Nutr Fert, 2020, 26: 276–284 (in Chinese with English abstract).
- [48] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 等. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2018, 51: 2489–2503.
Zhao Y L, Liu W L, Cheng S X, et al. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil. Sci Agric Sin, 2018, 51: 2489–2503 (in Chinese with English abstract).
- [49] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析. 农业工程学报, 2015, 31(22): 7–15.
Zheng K, He J, Li H W, et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in northern China. Trans CSAE, 2015, 31(22): 7–15 (in Chinese with English abstract).
- [50] 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. 应用生态学报, 2017, 28: 1211–1218.
Zhai Z, Li Y Y, Zhang L, et al. Effects of short-term deep vertically rotary tillage on topsoil structure of lime concretion black soil and wheat growth in Huang-Huai-Hai Plain, China. Chin J Appl Ecol, 2017, 28: 1211–1218 (in Chinese with English abstract).
- [51] 王健波, 严昌荣, 刘恩科, 等. 长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21: 296–305.
Wang J B, Yan C R, Liu E K, et al. Effects of long-term no-tillage with straw mulch on photosynthetic characteristics of flag leaves and dry matter accumulation and translocation of winter wheat in dryland. J Plant Nutr Fert, 2015, 21: 296–305 (in Chinese with English abstract).