

夏闲季不同耕作方式对豫西旱地小麦旗叶生理特性和产量的影响

赵雯馨, 黄明, 李友军, 吴金芝, 赵凯男, 张军,
李淑靖, 汪洪涛, 黄修利, 李爽, 李文娜

(河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:2018—2022年度,在豫西典型旱作区洛宁县梅窑村,采用大区设计于夏闲季设置传统翻耕(CP)、一次深翻(DP)、免耕覆盖(NT)和改进深松覆盖(OST)4种耕作方式,分析了不同耕作方式对土壤蓄水量、小麦不同灌浆时期旗叶生理特性、籽粒产量及其构成因素的影响。结果表明,夏闲季不同耕作方式对旱地土壤水分及旗叶生理特性和产量均有显著影响,但对旗叶生理特性的影响效应因灌浆时期而异。与CP相比,DP、NT和OST播种~成熟期0~200 cm土层平均土壤蓄水量分别显著提高4.1%、6.2%和13.2%。OST的旗叶净光合速率(P_n)较CP、DP和NT增加6.3%~114.4%。OST的旗叶超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性较其他处理分别增加0.3%~39.8%,10.3%~66.7%和5.6%~46.2%,但旗叶可溶性糖(SS)和游离脯氨酸(Pro)含量分别显著降低4.1%~31.8%和3.5%~53.4%。与CP相比,DP、NT和OST的4年小麦平均产量分别显著增加18.5%、11.5%和35.3%,且OST利于提高穗数和千粒重,DP利于提高穗粒数。相关分析结果表明,旱地小麦产量及其构成因素与旗叶生理参数的相关性因生长季、灌浆时期和测定指标而异,增加灌浆期旗叶CAT活性,以及灌浆中期、中后期旗叶 P_n 和SOD活性,降低灌浆期旗叶SS和Pro含量利于提高旱地小麦产量。综合来看,麦收后14 d左右深松并结合秸秆覆盖的耕作方式可提高播种时和生育期内土壤蓄水量,改善旗叶光合特性,提高抗性,进而提高籽粒产量,是利于旱地小麦高产的夏闲季耕作方式。

关键词:小麦;夏闲季;耕作方式;产量;生理特性;豫西旱地

中图分类号:S512.1;S341.1 **文献标志码:**A

Effects of different tillage practices on physiological characteristics in flag leaves and grain yield of wheat during the summer fallow season in dryland of Western Henan

ZHAO Wenxin, HUANG Ming, LI Youjun, WU Jinzhi, ZHAO Kainan, ZHANG Jun,
LI Shujing, WANG Hongtao, HUANG Xiuli, LI Shuang, LI Wenna

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: A field experiment was conducted to investigate the effects of different practices on soil moisture, physiological characteristics in flag leaves during the grain filling stage, and gain yield in Meiyao Village, Luoning County—a typical dryland in the southern Loess Plateau in 2018–2022. The tillage practices included conventional plowing (CP), once deep plowing (DP), no-tillage with straw mulching (NT) and optimized subsoiling with straw mulching (OST). Tillage in the summer fallow season significantly affected the soil moisture, and the physiological characteristics in flag leaves, grain yield of wheat in dryland, but the effects on the physiological characteristics varied in different grain filling stage. Compared with CP, the soil moisture in DP, NT and OST increased significantly by 4.1%, 6.2% and 13.2%, respectively, averaged from sowing to maturity. The flag leaf net photosynthetic

收稿日期:2022-08-30

修回日期:2023-02-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300400,2018YFD0300700);河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001)

作者简介:赵雯馨(1998-),女,河南伊川人,硕士研究生,研究方向为旱地小麦高产栽培技术。E-mail:zhaowenxin_1998@126.com

通信作者:黄明(1980-),男,河南新县人,副教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail:huangming_2003@126.com

李友军(1962-),男,河南宜阳人,教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail:lyj@haust.edu.cn

rate (P_n) in OST were increased by 6.3%~114.4% than that in CP, DP and NT. The superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities in flag leaves in OST were increased by 0.3%~39.8%, 10.3%~66.7% and 5.6%~46.2%, but the soluble sugar (SS) and proline (Pro) were significantly decreased by 4.1%~31.8% and 3.5%~53.4%, compared with other tillage practices during the whole grain filling stage. Compared with CP, the 4-year average yield in DP, NT and OST were significantly increased by 18.5%, 11.5% and 35.3%, respectively. OST were beneficial to increase spike numbers and 1000-grain weight, DP was beneficial to increase grains per spike. The correlation analysis results showed that the correlation between the grain yield and the physiological parameters in flag leaves varied according to growing season, grain filling stage and measured index. Increased CAT activity during the whole grain filling stage, as well as P_n and SOD activity during the medium, and medium and late grain filling stages and decreased SS and Pro content during the whole grain filling stage in flag leaves were beneficial to increase grain yield in dryland winter wheat. In conclusion, optimized subsoiling with straw mulching (OST), where subsoiling was conducted after about 14 days of previous wheat harvest and straw mulching during the summer fallow season improved the soil moisture at sowing and then during the growth stage, thereby improved flag leaf photosynthetic characteristics increased resistance, and ultimately increased the grain yield of wheat. Therefore, OST was an optimal tillage practice in summer fallow season for realizing high yields in dryland wheat.

Keywords: wheat; summer fallow season; tillage practice; grain yield; physiological characteristics; dryland in western Henan

我国旱地小麦面积约 $6.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 占全国小麦种植面积的三分之一, 其高产稳产对保障我国粮食安全具有重要意义。然而, 旱地普遍存在干旱缺水、土壤贫瘠和耕作栽培管理相对落后的问题, 不利于小麦产量的提高和稳定^[1]。小麦产量形成是一系列生理生化过程共同作用的结果, 如何促进小麦生理代谢以实现增产一直备受关注^[2]。冬小麦-夏休闲是我国旱地小麦产区的主要种植制度之一, 其生育期降水少且主要集中在夏休闲季, 麦季降水不足造成干旱频发, 导致小麦产量低而不稳。因此, 如何在夏休闲季采取合理的措施蓄集降水, 进而改善植株生理特性是提高旱地小麦产量的关键, 其中优化夏休闲期耕作方式是重要途径之一。

前人关于夏休闲期耕作措施对小麦产量形成的调控作用已有较多研究。郑凤君等^[3]研究表明, 夏休闲期免耕覆盖较传统翻耕显著增产 8.9%。赵杰等^[4]研究发现, 夏休闲期深翻较免耕可有效蓄积休闲期降水, 小麦产量显著提高 7.1%~12.0%。陈梦楠等^[5]研究表明, 夏休闲期深松较翻耕使土壤蓄水量增加 5.1%, 小麦产量显著提高 60.3%。金永贵等^[6]研究表明, 夏休闲期深翻和深松较免耕可提高土壤对降水的蓄积能力, 使小麦产量分别提高 5.1% 和 7.1%。王维等^[7]研究表明, 深松和免耕较翻耕处理小麦叶片的净光合速率(P_n) 分别提高 14.1% 和 6.3%, 产量提高 35.3% 和 23.5%。张鑫琪等^[2]研究表明, 免耕秸秆覆盖较旋耕可优化保护酶活性, 缓解细胞渗透失衡, 使小麦旗叶 P_n 显著提高 21.1%~46.0%, 产量

显著提高 46.3%。以上研究表明, 通过适宜的耕作措施可以改善小麦生育期水分状况及其生长特性以实现其增产, 但目前有关夏休闲季耕作对旱地小麦生理特性影响的报道较少。此外, 耕作效果还与其作业的时期有关。如赵红梅等^[8]研究表明, 麦收后 45 d 耕作处理的产量优于麦收后 15 d 耕作处理。张霞等^[9]结果表明, 深松/免耕隔年轮耕较连年翻耕使小麦增产 14.3%~19.3%。基于此, 本团队(河南科技大学旱地小麦资源高效利用团队)将深松时期从传统的 7 月底 8 月初提前到麦收后 14 d 左右适墒时进行, 改进了深松覆盖耕作技术。前期研究发现这种耕作技术利于蓄积 6—7 月的降水, 可提高播前和开花期的土壤水分含量, 促进小麦氮素吸收利用、干物质生产和籽粒产量形成, 显著提高水分利用效率和种植效益^[10-11], 但其对小麦生理特性的影响尚不明确。因此, 本研究在豫西典型旱地小麦产区设置夏休闲季传统翻耕、一次深翻、免耕覆盖和改进深松覆盖 4 种耕作方式, 研究其对小麦产量及其构成因素、灌浆期的旗叶 P_n 、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的影响, 分析产量与生理参数之间的关系, 以为旱地小麦高产栽培提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 9 月—2022 年 6 月在河南省洛阳市洛宁县梅窑村 (111°71'E, 34°47'N) 进行。试验地位于黄土高原南缘, 为典型的半湿润易旱区, 海

拔 560 m,年平均气温 13.7℃,2000—2022 年多年平均降水量为 576.7 mm,降雨主要集中在 6—9 月(图 1)。当地的主要种植制度是冬小麦-夏休闲。土壤为褐土,试验开始前 0~20 cm 土层土壤含有有机质 12.47 g·kg⁻¹、全氮 0.75 g·kg⁻¹、碱解氮 15.7 g·kg⁻¹、速效磷 23.23 mg·kg⁻¹,速效钾 197.25 mg·kg⁻¹。2018—2019、2019—2020、2020—2021 年度和 2021—2022 年度的夏闲季降水量分别为 290.5、448.2、304.6 mm 和 715.3 mm,生育期降水量分别为 107.0、205.3、276.0 mm 和 90.5 mm(图 1)。

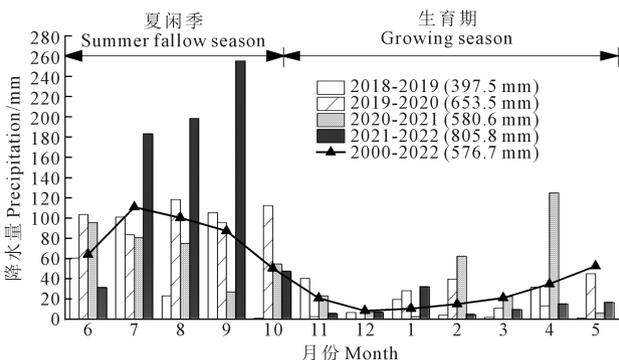


图 1 试验点试验期间逐月降水量

Fig.1 Monthly precipitation in the experimental site in 2018–2022

1.2 试验设计

试验设 4 种夏闲季耕作方式:(1)传统翻耕(CP):按当地农户习惯,前茬小麦收获时留茬 15 cm,秸秆全量还田,均匀覆盖于地表,在 7 月底 8 月初等雨翻耕,深度 25±3 cm,秸秆随翻耕掩埋于耕作层;(2)一次深翻(DP):耕作时间、秸秆处理方式同传统翻耕,深度为 35±3 cm;(3)免耕覆盖(NT):夏闲季不进行耕作,前茬小麦收获时留茬 15 cm,秸秆全量还田,均匀覆盖于地表;(4)改进深松覆盖(OST):秸秆处理方式同免耕覆盖,麦收后 14 d 左右有适量降雨时深松,间隔 35 cm,深度 35±2 cm。试验采用大区对比设计^[12],每个处理面积为 840 m²(120 m×7 m);于每个生长季的小麦 4 叶期,各处理划出 3 个具有代表性的 35 m²(7 m×5 m)采样区作为重复,即每个处理 3 次重复。分别于 2018 年 6 月 17 日、2019 年 6 月 15 日、2020 年 6 月 23 日和 2021 年 6 月 19 日进行深松,2018 年 7 月 29 日、2019 年 8 月 3 日、2020 年 7 月 31 日和 2021 年 8 月 10 日进行翻耕,2018 年 10 月 9 日、2019 年 10 月 13 日、2020 年 10 月 15 日和 2021 年 10 月 29 日播种,2019 年 6 月 7 日、2020 年 6 月 7 日、2021 年 6 月 5 日和 2022 年 6 月 6 日收获。2018—2019 年度供试品种为‘中麦 175’,夏闲季 2019—2020、2020—2021 年度和 2021—

2022 年度供试品种为‘洛旱 22’,播量分别为 187.5、187.5、225 kg·hm⁻²和 225 kg·hm⁻²。小麦播种前用施肥旋耕一体机将复合肥(N:P₂O₅:K₂O=25:12:8)均匀撒施并旋耕(15 cm)混入土壤,用量为 750 kg·hm⁻²。所有肥料全部基施,试验期间无灌溉,病虫害防治等其他管理同当地农户。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分 2020—2021 年度,分别在小麦播种前、拔节期、开花期和收获期,用土钻采集 0~200 cm 土层土样,20 cm 为一分层,105℃烘干法测定含水量,土壤蓄水量 WS(mm)计算公式如下:

$$WS = \sum (W_i \times D_i \times H_i)$$

式中, W_i 为第 i 土层土壤含水量(%); D_i 为第 i 土层土壤容重(g·cm⁻³); H_i 为第 i 土层厚度(cm)^[13]。

1.3.2 旗叶净光合速率(P_n) 分别于 2020—2021 年度小麦灌浆前期(5 月 4 日,花后 6 d)、灌浆中期(5 月 13 日,花后 15 d)和灌浆中后期(5 月 20 日,花后 22 d)以及 2021—2022 年度灌浆前期(5 月 6 日,花后 5 d)、灌浆中期(5 月 19 日,花后 18 d)和灌浆中后期(5 月 24 日,花后 23 d)晴朗无风的上午 9:00—11:00,用便携式光合测定系统 Li-6400XT(LICOR 公司,美国)测定旗叶 P_n ^[14]。测定时流速设为 500 μmol·m⁻²·s⁻¹,CO₂浓度控制在 400±2 μmol·mol⁻¹。每个样区测定具有代表性的旗叶 5 片,其平均值作为测定值。

1.3.3 旗叶生理指标 测定旗叶净光合速率的同时,每个取样区采集具有代表性的旗叶 30 片,液氮速冻处理后带回实验室,保存在-80℃超低温冰箱中待测。超氧化物歧化酶(SOD)活性采用 NBT 光还原法、过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法、过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外光度法测定,可溶性糖(SS)含量采用蒽酮比色法、游离脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮比色法测定^[15]。

1.3.4 籽粒产量及其构成因素 4 个年度小麦成熟期,每个处理采样区人工收割 3 个 1 m²(1 m×1 m)样方的植株,风干后脱粒称重,按 13%的籽粒含水量折算单位面积产量;另选 1 m²区域调查穗数,并收取有代表性的 20 个穗,测定穗粒数和千粒重。

1.4 统计分析

采用 Excel 2010 和 Origin 2022 软件进行数据分析和作图,利用 SPSS 17.0 统计分析软件进行差异显著性检验(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 夏闲季不同耕作方式对旱地麦田土壤蓄水量的影响

如图 2 所示,2020—2021 年度夏闲季不同耕作方式对 0~200 cm 土层土壤蓄水量有显著影响,但随着生育进程的推进处理间差异逐渐缩小。播种前,与 CP 相比,DP 可显著提高 140~180 cm 土层土壤蓄水量,NT 可显著提高 0~120 cm 土层土壤蓄水量,OST 可显著提高 0~200 cm 土层土壤蓄水量;与 DP 相比,NT 和 OST 的 0~200 cm 土层土壤蓄水量分别显著增加 6.7% 和 13.3%;与 NT 相比,OST 的 0~80 cm 土层土壤蓄水量降低 3.3%,但 80~200 cm 土层显著提高 14.1%,0~200 cm 土层土壤蓄水量显著提高 6.5%。在拔节期,与 CP 相比,DP、NT 和 OST 的 0~100 cm 土层土壤蓄水量显著提高,仅 OST 显著提高了 120~180 cm 土层土壤蓄水量,且显著高于其他处理,可为穗数和穗粒数的形成提供较充足的水分供应。由于开花前出现了 1 次高强度降雨(109.3 mm),各处理开花期的土壤蓄水量较拔节期有所增加,其中 OST 增加量最大,为 22.4 mm,表明 OST 在生育期也具有较弱的蓄水能力。在成熟期,各处理上层土壤(0~60 cm)蓄水量明显低于下层(80~200 cm),与 CP 相比,DP 和 NT 可显著提高 0~120 cm 土层土壤蓄水量 13.1% 和 4.1%,OST 可显著提高 0~200 cm 土层土壤蓄水量 9.1%;与 NT 相比,DP 和 OST 的 0~120 cm 土层土壤蓄水量分别显著提高 7.5% 和 10.8%;与 DP 相比,OST 处理 0~

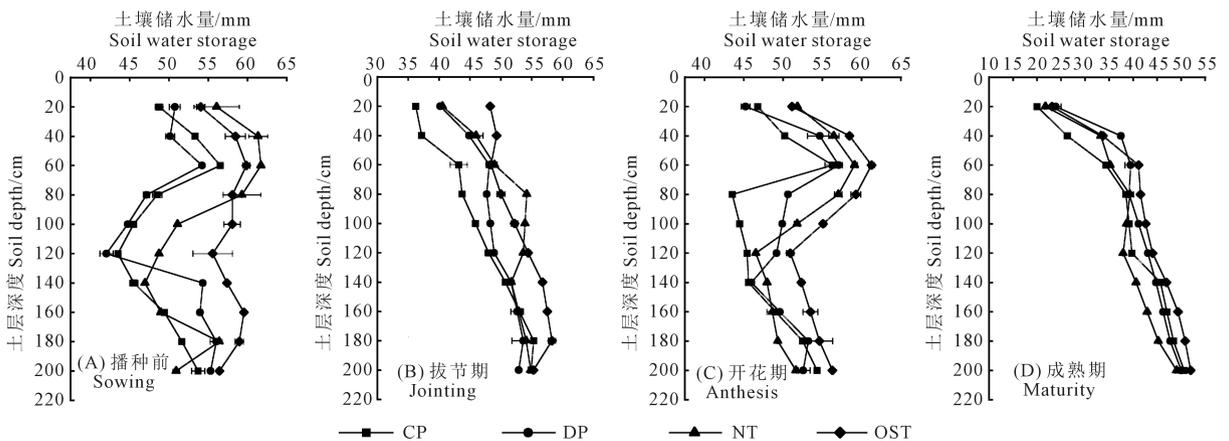
200 cm 土层土壤蓄水量显著提高 3.1%。OST 处理土壤蓄水量在 60~200 cm 土层最高,而 NT 处理在 120~200 cm 土层最低。综合来看,OST 处理播种~成熟期 0~200 cm 土层土壤平均蓄水量显著高于其他处理,且在深层多表现为显著提高,有改善旱地麦田土壤水分的作用。

2.2 夏闲季不同耕作方式对旱地小麦旗叶 P_n 的影响

夏闲季不同耕作方式对旱地小麦旗叶净光合速率的影响在不同灌浆时期表现不同。由图 3 可知,除 2020—2021 年度灌浆中后期外,不同处理对旗叶 P_n 有不同程度的影响。以 2 年均值看,与 CP 相比,DP 和 OST 处理旗叶 P_n 在灌浆前期分别显著提高 37.1% 和 55.9%,在灌浆中期分别显著提高 45.3% 和 76.8%,OST 在灌浆中后期也显著提高 37.8%;与 NT 相比,DP 和 OST 旗叶 P_n 在灌浆前期分别显著提高 30.9% 和 48.8%,灌浆中期分别显著提高 29.4% 和 57.4%,灌浆中后期仅 OST 显著提高 23.5%;与 DP 相比,OST 的旗叶 P_n 在灌浆前期、中期和中后期分别显著提高 13.7%、21.7% 和 31.6%。

2.3 夏闲季不同耕作方式对旱地小麦旗叶抗逆生理参数的影响

2.3.1 对旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性的影响 由图 4 可知,随着小麦灌浆进程的推进,各处理旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性均呈先升高后降低的趋势,且两年规律基本一致。分析 2 年平均旗叶 SOD 活性(图 4A、B)可知,与 CP 相比,DP 和 OST 在灌浆前期、中期及中后期分别显著提高 8.0% 和 14.3%、

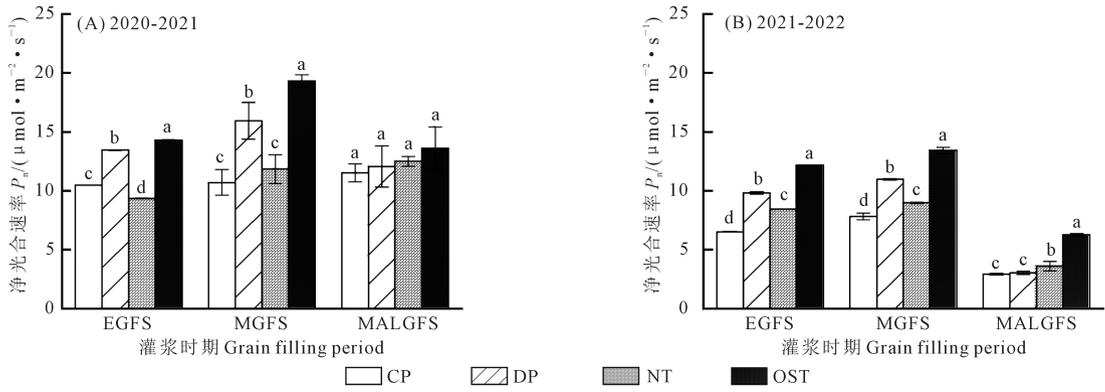


注:CP:传统翻耕;DP:一次深翻;NT:免耕覆盖;OST:改进深松覆盖。误差线表示标准差,下同。

Note: CP: Conventional plowing; DP: Once deep plowing; NT: No-tillage with straw mulching; OST: Optimized subsoiling with straw mulching. The error bar indicates standard deviation. The same below.

图 2 夏闲季不同耕作方式对 2020—2021 年度麦田土壤蓄水量的影响

Fig. 2 Effects of different tillage practices in summer fallow season on soil water storage of wheat filed in 2020–2021



注:EGFS:灌浆前期;MGFS:灌浆中期;MALGFS:灌浆中后期。不同字母表示同一灌浆时期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: EGFS: Early grain filling stage; MGFS: Medium grain filling stage; MALGFS: Medium and later grain filling stage. Different letters indicate significant differences among treatments during the same filling period ($P < 0.05$). The same below.

图 3 夏闲季不同耕作方式对 2020—2022 年度小麦旗叶净光合速率的影响
Fig.3 Effects of different tillage practices in summer fallow season on net photosynthetic rate in flag leaves of wheat in 2020-2022

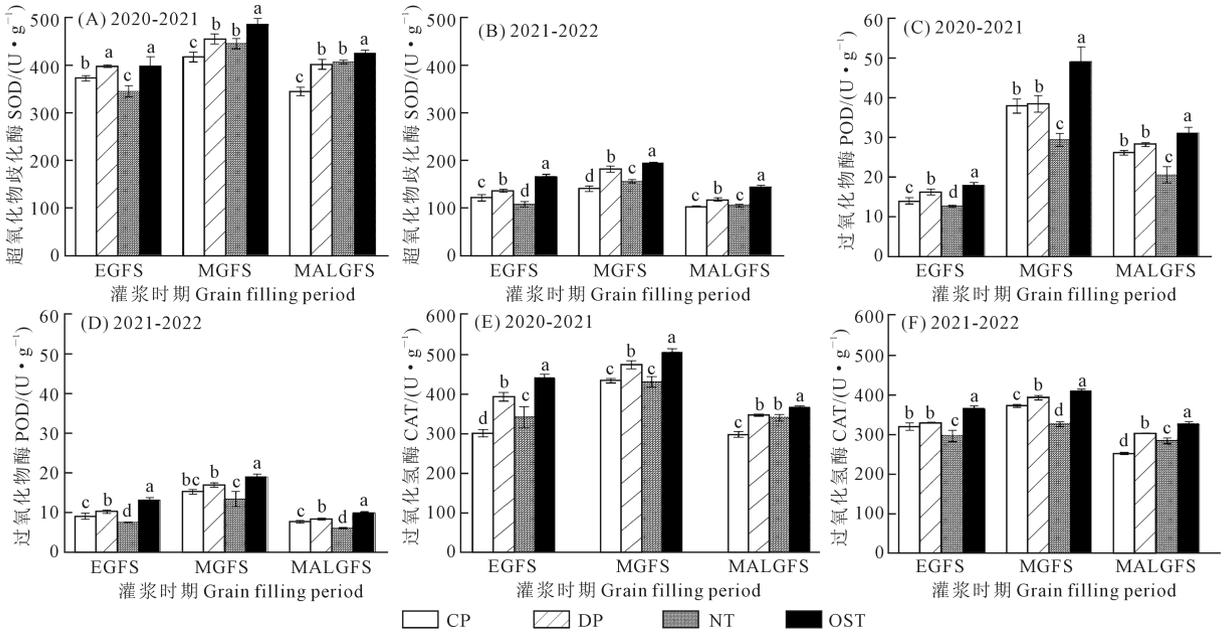


图 4 夏闲季不同耕作方式对 2020—2022 年度小麦旗叶抗氧化酶活性的影响
Fig.4 Effects of different tillage practices in summer fallow season on activities of antioxidant enzymes in flag leaves of wheat in 2020-2022

14.2%和 21.9%及 15.9%和 27.1%, NT 在灌浆前期显著降低 8.3%,在灌浆中期和后期分别显著提高 7.7%和 14.3%。与 NT 相比,DP 和 OST 在灌浆前期分别显著提高 17.8%和 24.7%,在灌浆中期分别显著提高 6.0%和 13.2%,OST 在灌浆中后期显著提高 11.3%。与 DP 相比,OST 在灌浆前期、中期和中后期分别显著提高 5.8%、6.8%和 9.7%。如图 4C、4D 所示,2 年灌浆期旗叶 POD 活性均表现为 OST>DP>CP>NT。从均值看,与 CP 相比,灌浆前期 DP 和 OST 分别显著提高 14.7%和 34.4%,NT 显著降低

12.4%;灌浆中期 NT 显著降低 19.4%,而 OST 显著提高 28.1%;灌浆中后期 DP 和 OST 分别显著提高 8.2%和 21.7%,但 NT 显著降低 21.0%。由图 4E、4F 可以看出,与 CP 相比,DP 和 OST 的 2 年平均旗叶 CAT 活性在整个灌浆均显著提高,增幅为 7.5%~29.6%,NT 仅在灌浆中后期显著提高 13.3%。与 DP 相比,OST 在灌浆前期、中期和中后期分别显著提高 11.3%、5.3%和 6.4%。

综上所述,OST 的旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性在整个灌浆期均显著高于其他处理。DP 较 CP 也

可显著提高旗叶 SOD 和 CAT 活性,以及 2020—2021 年度灌浆前期和 2021—2022 年度灌浆前期、中后期的旗叶 POD 活性。NT 较 CP 提高了灌浆中期和中后期的旗叶 SOD 活性,以及 2020—2021 年度灌浆前期和灌浆中后期的旗叶 CAT 活性,但降低了旗叶 POD 活性。

2.3.2 对旗叶 SS 和 Pro 含量的影响 随着灌浆进程推进,各处理小麦旗叶 SS 和 Pro 含量均呈现降低趋势,且不同夏闲季耕作方式间差异多达显著水平,两年的规律也基本一致(图 5)。从图 5A、5B 可

以看出,与 CP 相比,NT 和 OST 的旗叶 SS 含量在整个灌浆期均显著降低,2 年平均分别显著降低 7.3%~11.5%和 19.4%~26.2%;DP 在 2020—2021 年度灌浆前期和中后期无显著差异,而在 2021—2022 年度的整个灌浆期均显著降低。图 5C、5D 表明,与 CP 相比,DP、NT 和 OST 的旗叶 Pro 含量在灌浆前期分别显著降低 10.8%、7.1%和 26.0%,灌浆中期显著降低 23.8%、14.2%和 32.7%,灌浆中后期显著降低 19.6%、9.1%和 30.3%。可见,OST 在整个灌浆期均可保持较低的旗叶 SS 和 Pro 含量。

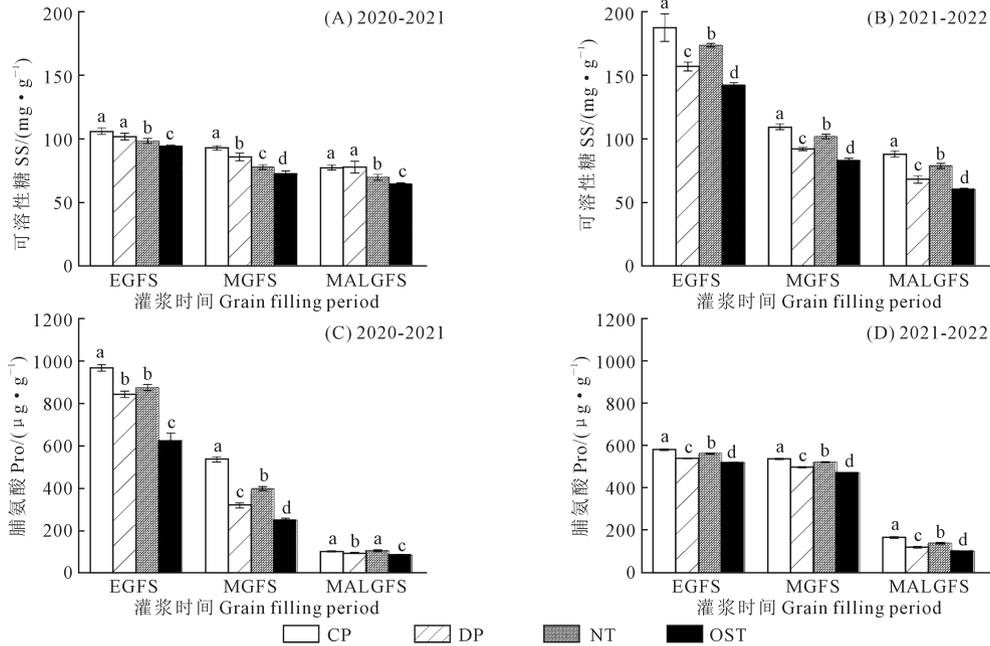


图 5 夏闲季不同耕作方式对 2020—2022 年度小麦旗叶可溶性糖和脯氨酸含量的影响

Fig.5 Effects of different tillage practices in summer fallow season on the content of SS and Pro in flag leaves of wheat in 2020–2022

2.4 夏闲季不同耕作方式对旱地小麦产量及其构成因素的影响

夏闲季耕作方式对旱地小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量均有极显著的影响,且对穗数、千粒重和产量的调控效应在不同年度表现不同(表 1)。降水量相对较少的 2018—2019 年度,与 CP 相比,DP、NT 和 OST 的穗粒数均显著提高,产量分别显著提高 10.8%、7.1%和 34.7%,穗数仅 OST 显著提高;与 NT 相比,DP 和 OST 的穗粒数和千粒重均显著提高,产量分别提高 3.5%和 25.8%;与 DP 相比,OST 仅穗数显著提高,产量显著提高 21.5%。降水量相对较多的 2019—2020 年度,与 CP 相比,DP、NT 和 OST 的产量构成因素均显著提高,产量分别提高 43.4%、32.1%和 43.3%;与 NT 相比,DP 和 OST 的穗数和穗粒数均显著提高,且 OST 的千粒重也显著提

高,从而使产量显著提高;与 DP 相比,OST 的穗粒数显著降低,千粒重显著提高,但穗数和产量无显著差异。生育期降水量最多的 2020—2021 年度,与 CP 相比,DP 和 OST 的穗数和穗粒数显著提高,NT 显著提高了穗数,但 DP、NT 和 OST 的千粒重均显著降低,NT 和 OST 的产量分别显著提高 5.6%和 16.3%;与 NT 相比,穗数 OST 显著提高而 DP 显著降低,穗粒数二者均显著提高,但千粒重无显著差异,产量 DP 显著降低 5.1%,OST 显著提高 16.3%。年降水量最高但生育期降水最少的 2021—2022 年度,与 CP 相比,DP、NT 和 OST 的产量构成因素均显著提高,产量分别显著提高 34.4%、6.9%和 49.5%;与 NT 相比,DP 和 OST 的穗数和穗粒数均显著提高,且 OST 千粒重也显著提高,分别显著增产 25.7%和 39.8%;与 DP 相比,OST 产量构成因素均显著提

高,从而增产 11.2%。

从 4 年均值看,小麦产量表现为 OST>DP>NT>CP。与 CP 相比,DP 的穗数、穗粒数、千粒重和产量分别显著提高 6.7%、12.9%、2.1% 和 18.5%,NT 提高 7.9%、3.9%、1.6% 和 11.5%,OST 提高 21.7%、12.5%、4.8% 和 35.3%。与 NT 相比,DP 仅穗粒数显著提高 8.6%,最终显著增产 6.2%;OST 的穗数、穗粒数、千粒重和产量分别显著提高 12.8%、8.3%、3.1% 和 21.3%。与 DP 相比,OST 的穗数、千粒重和产量分别显著提高 14.1%、2.6% 和 14.2%。可见,夏闲季采取不同耕作措施可以调控旱地小麦产量及其构成因素,DP 利于提高穗粒数,OST 较 DP 还可显著提高穗数和千粒重,从而显著提高产量。

表 1 夏闲季不同耕作方式对小麦产量及其构成因素的影响

Table 1 Effects of different tillage practices in summer fallow season on wheat grain yield and its components

年度 Year	耕作方式 Tillage practice	穗数 Spike number /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Grains per 1000-grain spike	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)
2018— 2019	CP	379bc	28.8c	43.2b	4710d
	DP	373c	31.6a	44.3a	5219b
	NT	385b	30.4b	43.7b	5044c
	OST	454a	31.8a	44.6a	6342a
2019— 2020	CP	294c	26.1d	41.3c	3523c
	DP	354a	30.5a	44.5b	5052a
	NT	340b	27.1c	45.0b	4655b
	OST	351a	28.9b	47.1a	5049a
2020— 2021	CP	367d	33.8b	50.0a	5930c
	DP	382c	37.3a	48.2b	5944c
	NT	417b	34.3b	47.9b	6260b
	OST	458a	36.6a	48.7b	7277a
2021— 2022	CP	343c	23.7d	42.1c	3513d
	DP	366b	27.4b	43.3b	4723b
	NT	352c	24.9c	42.8b	3756c
	OST	421a	29.1a	44.7a	5251a
4 年平均 4-year average	CP	346c	28.1c	44.2c	4419d
	DP	369b	31.7a	45.1b	5234b
	NT	373b	29.2b	44.9b	4929c
	OST	421a	31.6a	46.3a	5980a
F 值 F value					
耕作方式 Tillage practice (T)		762 **	85.7 **	38.6 **	792 **
年度 Year (Y)		810 **	423.4 **	308.2 **	1562 **
耕作方式×年度 T×Y		69 **	3.641 **	21.8 **	59.9 **

注:同列数据后的不同小写字母表示同年度处理间差异显著($P < 0.05$)。* 和 ** 分别表示显著性水平为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

Note: Different lowercase letters after the same column indicate significant differences among treatments in the same year ($P < 0.05$). * and ** indicate statistical significance of variance at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

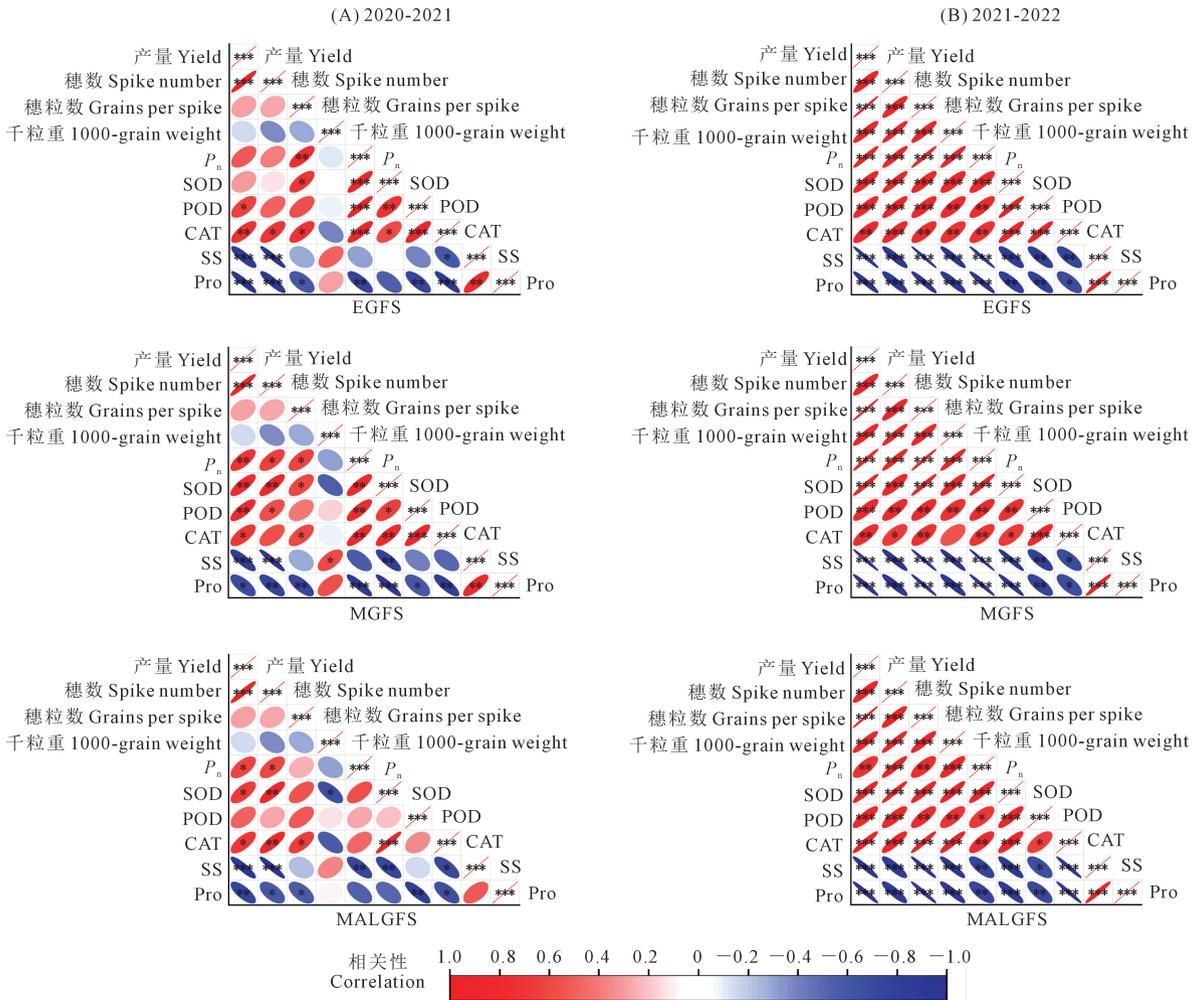
2.5 夏闲季不同耕作方式下小麦产量及其构成因素与旗叶生理参数的相关性

由图 6 可知,小麦产量及其构成因素与旗叶生理特性的相关性因生长季、灌浆时期和指标而异。在生育期降水较多的 2020—2021 年度,产量与灌浆前期旗叶 POD 和 CAT 活性,灌浆中期旗叶 P_n 及 SOD、POD、CAT 活性,灌浆中后期旗叶 P_n 及 SOD、CAT 活性呈显著或极显著正相关关系;穗数与灌浆前期旗叶 CAT 活性,灌浆中期旗叶 P_n 及 SOD、POD 活性,灌浆中后期旗叶 P_n 及 SOD、CAT 活性呈显著正相关关系;穗粒数与灌浆前期旗叶 P_n 及 SOD、CAT 活性,灌浆中期 P_n 及 SOD、CAT 活性,灌浆中后期 CAT 活性呈显著正相关关系,产量和穗数与整个灌浆期的旗叶 Pro 和 SS 含量均显著或极显著负相关,但千粒重与旗叶生理参数的相关性多未达到显著水平。在年降水量较多生育期降水较少的 2021—2022 年度,除千粒重与灌浆中期旗叶 CAT 活性不显著相关外,产量、穗数、穗粒数和千粒重与灌浆期旗叶生理参数均显著或极显著相关,其中,与旗叶 P_n 及 SOD、POD、CAT 活性正相关,与旗叶 SS 和 Pro 含量极显著负相关。

3 讨论

3.1 夏闲季不同耕作方式对旱地麦田土壤水分的影响

夏闲季耕作是为了促进自然降雨的蓄集和高效利用,更好地保障小麦生长发育,进而提高产量。本试验结果表明,一次深翻(DP)、免耕覆盖(NT)、改进深松覆盖(OST)较传统翻耕(CP)均有利于提高小麦播前以及拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,其中土壤蓄水保墒效果以 OST 最优,说明夏闲季深松有利于改善土壤水分状况,减少分蘖消亡,促进幼穗分化,从而获得较高的穗数和穗粒数,进而提高籽粒产量。张慧芋等^[16]研究也表明,休闲期深松较免耕显著提高播种期 0~300 cm 土层土壤蓄水量,蓄水效果可以延至开花期,从而增加小麦分蘖和穗数,使产量提高 12.0%~30.0%。毛红玲等^[17]研究表明,免耕和深松较翻耕可使小麦生育期 0~200 cm 土层平均土壤蓄水量分别增加 5.5% 和 4.5%,免耕的效果略优于深松。闫秋艳等^[13]研究发现,夏闲季深松较免耕可提高播前和返青期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,但优势仅在 100~200 cm 土层表现较为突出。这些研究说明深松和免耕提高土壤水分的作用在不同生产条件下表现不同。本研究条件下,NT 和 OST 较 DP 使小麦播前~成



注: *、**和***分别表示方差在 $P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$ 和 $P \leq 0.001$ 水平显著。

Note: *, ** and *** indicate statistical significance of variance at $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ and $P \leq 0.001$, respectively.

图 6 2020—2022 年度小麦产量与旗叶生理参数的相关性

Fig.6 Correlation between grain yield and physiological parameters in flag leaves of wheat in 2020–2022

熟期平均土壤蓄水量分别增加 2.1%和8.8%,OST 的效果优于 NT,且 OST 在深层土壤的保水效果突出,而 NT 的蓄水作用主要表现在 0~80 cm 土层,这与改进深松覆盖技术将深松时间提前,能更好地蓄积夏季降水有关^[12]。

3.2 夏闲季不同耕作方式对旱地小麦旗叶生理特性的影响

光合作用产生的碳水化合物是小麦产量形成最重要的物质来源,在灌浆期维持适宜的旗叶净光合速率利于提高小麦产量^[18]。本研究结果显示,OST、DP 和 NT 较 CP 均有利于改善小麦旗叶 P_n ,其中 OST 在整个灌浆期的效果均较优,从而获得最高的籽粒产量,这与 OST 在整个灌浆期均能保持较优的土壤水分条件有关。前人研究也表明,深松、免耕具有改善作物光合特性的作用^[19-20]。许菁等^[19]研究表明,深松和免耕较传统翻耕显著改善了冬小

麦生育后期旗叶光合性能。杨永辉等^[20]研究表明,深松、免耕相比传统耕作提高了冬小麦不同生育时期 0~100 cm 土层土壤蓄水量,具有改善旗叶光合特性的作用。本研究还发现,DP 和 NT 对旗叶 P_n 的影响因灌浆时期不同而异,其中,DP 在灌浆前期和中期具有改善 P_n 的作用,而 NT 在灌浆中后期的效果较优,这可能与 NT 灌浆期土壤耗水量较 DP 增加,增强了对土壤水分的利用能力有关,但其机理有待进一步探讨。

SOD、POD 和 CAT 具有清除植物体内活性氧的能力,较高的 SOD、POD 和 CAT 活性利于延缓植株衰老^[21],促进灌浆期的干物质积累转运分配,进而实现高产^[22]。江晓东等^[23]研究表明,免耕秸秆覆盖较传统翻耕可显著提高灌浆期小麦旗叶 SOD 和 POD 活性。王法宏等^[24]发现,深松较浅耕可提高小麦生育后期 SOD 和 POD 活性,籽粒增产 10.0%。

本研究中,OST 具有最优的旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性,是其获得最高产量的生理基础。其中,OST 旗叶 SOD 活性在灌浆中期较其他处理显著提高,在灌浆中后期显著高于 CP 和 DP;旗叶 POD 活性在灌浆中期显著增加;旗叶 CAT 活性在整个灌浆期都显著高于其他处理。说明在灌浆前期保持较高旗叶 POD 和 CAT 活性,在灌浆中期保持较高的旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性,在灌浆中后期保持较高的旗叶 SOD 和 CAT 活性对提高旱地小麦产量具有正向作用。Pro 和 SS 作为植物细胞内的渗透调节物质,可调节植株体内水分平衡,增强植物的抗逆性^[25]。植物体在遭受逆境时,会大量累积 Pro 以应对逆境^[26],光合产物 SS 向库(籽粒)的运转也会受阻而导致营养器官组织中的 SS 含量升高,较低的 Pro 和 SS 含量意味着植株遭受逆境程度低,光合产物向籽粒转运的能力强^[2]。本研究中,夏闲季不同耕作方式可以显著调控灌浆期旗叶 Pro 和 SS 含量,且总体表现为 CP>DP、NT>OST,其中 OST 较其他处理 2 年均值分别降低 11.7%~32.7% 和 9.2%~26.2%,说明改进深松覆盖可缓解小麦在灌浆期遭受的逆境胁迫,增强光合产物转运至籽粒的能力。然而,本研究中免耕覆盖下小麦旗叶抗逆酶活性和渗透调节物质含量较一次深翻有所降低,与前人发现的免耕利于提高抗氧化酶活性和渗透调节物质含量^[2,27]的结果不一致,其原因有待进一步研究。

3.3 夏闲季不同耕作方式对旱地小麦产量及其构成因素的影响

小麦产量由单位面积穗数、穗粒数和千粒重共同决定。本试验条件下,OST 的 4 年平均产量较其他处理显著增加 14.2%~35.3%,其增产的主要原因是穗数增加,增幅为 12.8%~21.7%;千粒重次之,增幅为 2.6%~4.8%。在渭北旱塬优化夏闲季耕作提高小麦产量的研究表明,夏闲季提前深耕方式的小麦产量比播种时深耕提高 12.0%~14.2%,主要原因同样是穗数增加 7.5%~9.5%^[26];在晋南旱地的研究表明,夏闲期深松较对照增产主要是因为穗数提高 1.0%~18.0%,千粒重也有所提高,但穗粒数变化不明显^[28],这与本研究中改进深松覆盖增产主要通过增加穗数、千粒重其次的结论相似。本研究还发现,DP 较 NT 穗数和千粒重无显著变化,而穗粒数和产量显著提高,表明 DP 较 NT 增产主要是通过提高穗粒数实现。这与孙敏等^[29]发现的深翻较免耕通过增加穗数、千粒重提高产量的研究结果不一致,可能是由于研究区域降水量不同所致。

3.4 小麦灌浆期旗叶生理特性与产量及其构成因素的关系

唐晓培等^[27]发现,在非充分灌溉下小麦产量与旗叶 P_n 显著正相关。曹传莉等^[30]对不同耕作方式的研究也表明,小麦产量与旗叶 CAT 活性呈极显著正相关关系。说明产量形成与旗叶生理状态关系密切。本研究中,小麦产量与灌浆期旗叶生理特性的相关性因测定指标、灌浆时期而异。其中,产量与整个灌浆期的旗叶 CAT 活性显著正相关、与旗叶 SS 和 Pro 含量显著负相关,与灌浆中期、中后期旗叶 P_n 显著正相关。说明提高旗叶 CAT 活性、降低旗叶 SS 和 Pro 含量、提高灌浆中期及中后期的旗叶 P_n 有利于提高旱地小麦产量。

小麦旗叶灌浆期生理特性与产量构成要素也有一定的关系。牛润芝等^[31]研究显示,灌浆期旗叶 P_n 与穗数呈极显著正相关关系,但与穗粒数和千粒重无显著相关关系。本研究表明,小麦旗叶生理特性与产量构成因素的相关性在不同生长季表现不同。在小麦正常成熟的 2021—2022 年度,产量、穗数、穗粒数和千粒重与灌浆期旗叶生理参数多表现为显著或极显著相关,其中,与旗叶 P_n 、SOD 和 POD 活性正相关,与旗叶 SS 和 Pro 含量负相关。说明在旱地小麦生产中,应注重改善小麦灌浆期光合特性和抗逆能力,降低 SS 和 Pro 含量。在生育期降水较多、产量较高、成熟期偏晚的 2020—2021 年度,多数旗叶生理指标与穗数和穗粒数的相关性达显著水平,这是由于在雨养旱地生产条件下,穗数和穗粒数高意味着水肥条件良好,而良好的水肥条件对改善旗叶生理特性有利。然而,旗叶生理参数与千粒重的相关性多未达到显著水平,这主要是因为 2020—2021 年度雨水较充足,小麦成熟期推迟,6 月的高温造成植株早衰,对于能改善旗叶生理特性、延缓衰老的改进深松覆盖处理情况更为严重,从而使传统耕作方式下千粒重最高,这也说明改善旗叶生理特性的同时还要预防干热风等逆境灾害引起的非正常成熟,才能保证小麦千粒重的提高。刘宏胜等^[32]的研究也表明,灌浆期小麦旗叶 POD 活性与千粒重无显著相关性。陶荣荣等^[33]在不同盐胁迫环境下的研究也证明小麦灌浆期旗叶 Pro 含量与产量及其构成因素无显著相关性。

4 结 论

夏闲季不同耕作方式可通过影响土壤水分而影响旱地小麦生理特性和产量,改进深松覆盖(OST)较一次深翻(DP)和免耕覆盖(NT)显著增

产,三者较传统翻耕(CP)均显著增产,但其对旗叶生理特性的调节效应不同。一次深翻较传统翻耕能改善多数旗叶光合特性,提高旗叶抗氧化酶活性,降低旗叶渗透调节物质含量。免耕覆盖可降低旗叶 Pro 和 SS 含量,优化灌浆中后期的旗叶光合特性,但也降低了旗叶抗氧化酶活性,特别是旗叶 POD 活性始终低于其他处理。改进深松覆盖能提高播前深层土壤蓄水量,并在生育期维持较优的土壤水分含量,从而提高旱地小麦旗叶 SOD、POD 和 CAT 活性,降低旗叶 SS 和 Pro 含量,改善旗叶光合特性,最终使籽粒产量较其他处理显著提高 14.2%~35.3%。综合来看,改进深松覆盖是旱地小麦高产栽培适宜的夏闲季耕作方式。

参考文献:

- [1] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(9): 34-44.
HUANG M, WU J Z, LI Y J, et al. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(9): 34-44.
- [2] 张鑫琪, 王迎宾, 郝兴宇, 等. 不同耕作方式对旱地小麦生长发育、生理代谢及产量的影响[J]. 激光生物学报, 2022, 31(3): 278-288.
ZHANG X Q, WANG Y B, HAO X Y, et al. Effects of different tillage methods on growth, physiological metabolism, and yield of wheat in dryland[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2022, 31(3): 278-288.
- [3] 郑凤君, 王雪, 李生平, 等. 免耕覆盖下土壤水分、团聚体稳定性及其有机碳分布对小麦产量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 596-607.
ZHENG F J, WANG X, LI S P, et al. Synergistic effects of soil moisture, aggregate stability and organic carbon distribution on wheat yield under no-tillage practice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 596-607.
- [4] 赵杰, 林文, 孙敏, 等. 休闲期深翻和探墒沟播对旱地小麦水氮资源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1307-1316.
ZHAO J, LIN W, SUN M, et al. Effects of deep ploughing during the fallow period and soil moisture-based furrow sowing on water and nitrogen utilization of dryland wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1307-1316.
- [5] 陈梦楠, 高志强, 孙敏, 等. 休闲期不同耕作模式对旱地麦田土壤水分、养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(5): 680-686.
CHEN M N, GAO Z Q, SUN M, et al. Effect of different tillage systems during fallow period on soil water, nutrient content and wheat yield in dryland[J]. Journal of Triticeae Crops, 2017, 37(5): 680-686.
- [6] 金永贵, 原亚琦, 林文, 等. 休闲期耕作方式对旱地麦田土壤性状及产量的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(3): 382-386.
JIN Y G, YUAN Y Q, LIN W, et al. Effects of cultivation in leisure period on soil properties and yield of dryland wheat field[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 382-386.
- [7] 王维, 韩清芳, 吕丽霞, 等. 不同耕作模式对旱地小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 20-26.
WANG W, HAN Q F, LV L X, et al. Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 20-26.
- [8] 赵红梅, 高志强, 赵维峰, 等. 休闲期耕作对旱地小麦籽粒蛋白质形成及其相关酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2): 331-338.
ZHAO H M, GAO Z Q, ZHAO W F, et al. Effect of tillage in fallow period on grain protein and its related enzyme activity in dryland wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2013, 33(2): 331-338.
- [9] 张霞, 张育林, 刘丹, 等. 种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 250-261.
ZHANG X, ZHANG Y L, LIU D, et al. Effects of planting methods and tillage systems on soil structure and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 250-261.
- [10] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(24): 5206-5219.
HUANG M, WU J Z, LI Y J, et al. Effects of tillage practices and nitrogen fertilizer application rates on grain yield, protein content in winter wheat and soil nitrate residue in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(24): 5206-5219.
- [11] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 264-271.
WU J Z, HUANG M, LI Y J, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield, water use efficiency and planting profit in winter wheat in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 264-271.
- [12] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(10): 1797-1807.
ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(10): 1797-1807.
- [13] 闫秋艳, 董飞, 贾亚琴, 等. 耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 222-228.
YAN Q Y, DONG F, JIA Y Q, et al. Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 222-228.
- [14] 周青云, 燕琪琦, 张宝忠, 等. 冬小麦不同冠层叶片光合蒸腾和水分利用效率变化特征及对灌溉的响应[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10): 1247-1255.
ZHOU Q Y, YAN Q Q, ZHANG B Z, et al. Variation characteristics of photosynthesis, transpiration and WUE of winter wheat leaves in different canopy layers and their response to irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(10): 1247-1255.
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 165-260.
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 165-260.
- [16] 张慧芋, 孙敏, 高志强, 等. 旱地麦田深松蓄水和覆盖播种土壤

- 水分变化与小麦籽粒蛋白质含量的关系[J]. 中国农业科学, 2018, 51(15): 2860-2871.
- ZHANG H Y, SUN M, GAO Z Q, et al. Relationship between soil water variation, wheat yield and grain protein and its components contents under sub-soiling during the fallow period plus mulched-sowing[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(15): 2860-2871.
- [17] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 44-51.
- MAO H L, LI J, JIA Z K, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 44-51.
- [18] 张占琴, 张力, 田海燕, 等. 不同前茬作物对小麦田土壤养分及小麦光合性能的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 30-41.
- ZHANG Z Q, ZHANG L, TIAN H Y, et al. Effects of different preceding crops on soil nutrient content and photosynthetic characteristics of wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(1): 30-41.
- [19] 许菁, 贺贞昆, 冯倩倩, 等. 耕作方式对冬小麦-夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 101-109.
- XU J, HE Z K, FENG Q Q, et al. Effect of tillage method on photosynthetic characteristics and annual yield formation of winter wheat-summer maize cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 101-109.
- [20] 杨永辉, 武继承, 李学军, 等. 耕作和保墒措施对冬小麦生育时期光合特征及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(5): 534-542.
- YANG Y H, WU J C, LI X J, et al. Impact of tillage and soil moisture conservation measures on photosynthetic characteristics and water use of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(5): 534-542.
- [21] KANG H M, CHEN K, BAI J, et al. Antioxidative system's responses in the leaves of six *Caragana* species during drought stress and recovery[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(6): 2145-2154.
- [22] 王贺正, 黄明, 张均, 等. 秸秆覆盖量对旱地小麦结实期抗氧化性的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(11): 96-104.
- WANG H Z, HUANG M, ZHANG J, et al. Effects of different quantities of straw mulch on oxidation resistance of dryland wheat at the grain-filling stage[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(11): 96-104.
- [23] 江晓东, 迟淑筠, 李增嘉, 等. 少免耕模式对冬小麦花后旗叶衰老和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, (4): 55-58.
- JIANG X D, CHI S J, LI Z J, et al. Effects of minimum tillage and no-tillage patterns on flag leaf senescence after anthesis and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, (4): 55-58.
- [24] 王法宏, 王旭清, 任德昌, 等. 土壤深松对小麦根系活性的垂直分布及旗叶衰老的影响[J]. 核农学报, 2003, 17(1): 56-61.
- WANG F H, WANG X Q, REN D C, et al. Effect of soil deep tillage on root activity and vertical distribution[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(1): 56-61.
- [25] 张平, 张慧, 刘俊娜, 等. 干旱及复水处理对抗旱性不同小麦品种/系苗期生理生化指标的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(12): 1795-1802.
- ZHANG P, ZHANG H, LIU J N, et al. Effects of drought and re-watering treatment on physiological and biochemical indexes of different drought-resistant wheat varieties/lines at seedling stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2020, 29(12): 1795-1802.
- [26] 方日尧, 赵惠青, 同延安. 渭北旱原冬小麦深施肥沟播综合效应研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(1): 49-52.
- FANG R Y, ZHAO H Q, TONG Y A. Research on integrated effect deep application of fertilizer and furrow-sowing winter wheat on Weibei rainfed highland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(1): 49-52.
- [27] 唐晓培, 杨丽, 冯冬雪, 等. 非充分灌溉下8个小麦品种旗叶光合与产量及水分利用效率的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 245-252, 265.
- TANG X P, YANG L, FENG D X, et al. Relationship between flag leaves photosynthesis and yield, water use efficiency of eight wheat varieties under deficit irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 245-252, 265.
- [28] 任爱霞, 孙敏, 王培如, 等. 深松蓄水和施磷对旱地小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3678-3689.
- REN A X, SUN M, WANG P R, et al. Effects of sub-soiling in fallow period and phosphorus fertilizer on yield and water use efficiency in dry-land wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3678-3689.
- [29] 孙敏, 温斐斐, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1459-1469.
- SUN M, WEN F F, GAO Z Q, et al. Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1459-1469.
- [30] 曹传莉, 仲延龙, 宋贺, 等. 耕作方式对小麦抗氧化酶和产量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(5): 883-887.
- CAO C L, ZHONG Y L, SONG H, et al. Effects of tillage methods on antioxidant enzyme activity and yield of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2019, 46(5): 883-887.
- [31] 牛润芝, 朱长伟, 姜桂英, 等. 豫北潮土区轮耕模式对小麦光合特性、产量及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(4): 182-189.
- NIU R Z, ZHU C W, JIANG G Y, et al. Effects of rotation tillage pattern on wheat photosynthetic characteristics, yield, and soil nutrients in fluvo-aquic soil in North Henan[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(4): 182-189.
- [32] 刘宏胜, 李映, 牛俊义, 等. 不同旱地春小麦品种(系)花后旗叶生理特性和籽粒产量的分析[J]. 土壤与作物, 2018, 7(3): 356-364.
- LIU H S, LI Y, NIU J Y, et al. Physiological characteristics of flag leaf after anthesis and grain yield from different spring wheat cultivars/lines in arid farmland[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(3): 356-364.
- [33] 陶荣荣, 陆钰, 于琪, 等. 盐逆境对不同耐盐性小麦花后生理特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 428-437.
- TAO R R, LU Y, YU Q, et al. Effects of salt stress on physiological characteristics and yield of different salt-tolerant wheat varieties[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3): 428-437.