

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2022.01093

水氮减量对地膜玉米免耕轮作小麦主要光合生理参数的影响

徐龙龙 殷文 胡发龙 范虹 樊志龙 赵财 于爱忠 柴强*

甘肃省干旱生境作物学重点实验室 / 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 地膜玉米免耕结合水氮减量对小麦稳产增产的作用已经验证, 但其形成的光合生理机制研究仍比较薄弱。2018—2020 年, 采用裂区设计, 设置地膜玉米免耕(NT)和传统耕作(CT)两种耕作方式, 传统灌水(I_2 , $2400 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$)和传统灌水减量 20% (I_1 , $1920 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$) 2 个灌水水平和施纯 N 225 kg hm^{-2} (N_3)、 180 kg hm^{-2} (N_2)和 135 kg hm^{-2} (N_1) 3 个施氮水平。结果表明, 耕作措施、施氮水平对小麦叶面积指数、光合势、SPAD 值、光合速率均有显著影响; 灌水水平对光合速率影响显著。全生育期平均来看, NT 较 CT 显著提高了小麦叶面积指数、光合势、SPAD 值、光合速率, 分别提高 14.5%~44.1%、13.2%~16.3%、7.4%~9.0%、14.5%~24.2%; 与 I_2 相比, I_1 小麦光合速率显著降低了 6.5%~13.6%。 N_1 较 N_3 叶面积指数、光合势、SPAD 值、光合速率分别显著降低了 6.4%~13.6%、7.5%~12.7%、6.0%~10.2%、7.5%~17.5%, N_2 与 N_3 无显著差异。耕作措施、施氮水平、灌水水平三者均对小麦干物质积累量和籽粒产量影响显著。NT 较 CT 分别显著提高 13.4%~16.5%和 9.0%~13.4%; I_1 较 I_2 分别显著降低 6.5%~6.7%、4.3%~7.4%; 与 N_3 相比, N_1 处理分别显著降低 10.0%~11.9%、12.6%~19.4%, N_2 与 N_3 无显著差异。关联矩阵分析表明, 地膜玉米免耕结合水氮减量通过延缓小麦 SPAD 值的降低, 延长光合时间, 提高小麦的光合势和光合速率从而实现增产。

关键词: 免耕; 水氮减量; 小麦; 光合势; 光合生理参数

Effect of water and nitrogen reduction on main photosynthetic physiological parameters of film-mulched maize no-tillage rotation wheat

XU Long-Long, YIN Wen, HU Fa-Long, FAN Hong, FAN Zhi-Long, ZHAO Cai, YU Ai-Zhong, and CHAI Qiang*

Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract: The effect of no-tillage combined with water and nitrogen reduction of mulching maize on the stability and increase of wheat yield has been verified, but the research of the photosynthetic physiological mechanism of its formation is still relatively weak. From 2018 to 2020, the split zone design was adopted, and two farming methods of film-mulched corn no-tillage (NT) and traditional tillage (CT) was arranged with two irrigation levels of traditional irrigation (I_2 , $2400 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$) and traditional irrigation reduce 20% (I_1 , $1920 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$) and three nitrogen application levels of 225 kg hm^{-2} (N_3), 180 kg hm^{-2} (N_2) and 135 kg hm^{-2} (N_1). The results showed that farming measures and nitrogen application level had significant effects on wheat leaf area index, photosynthetic potential, SPAD value, and photosynthetic rate; irrigation level had significant effects on photosynthetic rate. During the whole growth periods, compared with CT, NT increased wheat leaf area index, photosynthetic potential, SPAD value, and photosynthetic rate by 14.5%–44.1%, 13.2%–16.3%, 7.4%–9.0%, and 14.5%–24.2%, respectively; Compared with I_2 , the photosynthetic rate of wheat I_1 decreased by 6.5%–13.6%. Compared with N_3 , the leaf area index, photosynthetic potential, SPAD value,

本研究由甘肃省基础研究创新群体项目(20JR5RA037), 中央引导地方科技发展专项(ZCYD-2020-1-4), 国家自然科学基金项目(32101857), 甘肃省科技计划项目(20JR5RA037, 20JR5RA025), 国家公益性行业(农业)科研项目(201503125-3)和甘肃农业大学伏羲青年人才培养计划项目(Gaufx-03Y10)资助。

This study was supported by the Innovation Group of Basic Research in Gansu Province (20JR5RA037), and the Central Government will Guide Local Science and Technology Development Projects (ZCYD-2020-1-4), and the National Natural Science Foundation of China (32101857), the Science and Technology Project of Gansu Province (20JR5RA037, 20JR5RA025), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503125-3), and the Fuxi Young Talents Fund of Gansu Agricultural University (Gaufx-03Y10).

* 通信作者(Corresponding author): 柴强, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

第一作者联系方式: E-mail: XL15109315778@163.com

Received (收稿日期): 2020-12-03; Accepted (接受日期): 2021-04-14; Published online (网络出版日期): 2021-06-09.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210609.1335.016.html>

and photosynthetic rate of N_1 decreased by 6.4%–13.6%, 7.5%–12.7%, 6.0%–10.2%, and 7.5%–17.5%, respectively. There was no significant difference between N_2 and N_3 . Cultivation measures, nitrogen application level, and irrigation level all had significant effects on dry matter accumulation and grain yield in wheat. Compared with CT, NT increased by 13.4%–16.5% and 9.0%–13.4%; Compared with I_2 , I_1 decreased by 6.5%–6.7% and 4.3%–7.4%; Compared with N_3 , the dry matter accumulation and grain yield of N_1 decreased by 10.0%–11.9% and 12.6%–19.4%, respectively, and there was no significant difference between N_2 and N_3 . Correlation matrix analysis showed that the combined water and nitrogen reduction of no-tillage maize mulching could delay the decrease of wheat SPAD value, prolonged the photosynthetic time, and increased the photosynthetic potential and photosynthetic rate of wheat to increase yield.

Keywords: no-tillage; water and nitrogen reduction; wheat; photosynthetic potential; photosynthetic physiological parameters

小麦作为我国主要的粮食作物,对维护国家粮食安全举足轻重^[1],研究小麦产量形成机制,对提高其生产效率意义重大。我国西北地区水资源供应紧张,过度施肥等问题突出,特别是小麦生产施氮量偏高,氮肥利用率仅为 20%~40%^[2],解决水、肥投入与产量之间的矛盾是该区小麦生产面临的重大课题。研究表明,作物叶片光合速率的高低是产量形成的基础,叶面积指数、叶绿素相对含量和光合势的大小也与产量密切相关^[3-5]。研究水肥减量条件下小麦光合生理与小麦产量形成的相关关系,可为建立水肥节约小麦高产栽培技术提供重要理论支撑。作物光合源的大小和光合作用的强弱受到耕作措施、覆盖方式及土壤水肥供应能力的直接影响^[6-7]。免耕覆盖能改善作物群体结构,提高叶面积指数,光合有效辐射和叶绿素相对含量,同时还可延缓叶绿素的降解,延长光合时间,提高光合速率^[8-9]。通过水氮互作调节作物光合生理特性,是实现高产的重要措施^[10-11],适宜的土壤水分和氮肥供应能显著提高作物群体叶面积指数,并能延缓叶片衰老,有利于作物保持较高的光合速率,适度减少施氮量及水分供应不会降低作物光合速率^[12-13]。水氮运筹是优化小麦生理特征的重要措施,适宜的水氮配比还可促进小麦茎叶生长,提高叶面积指数,延长绿叶功能期,防止早衰,增进灌浆期同化物向籽粒转运,提高产量^[14];一般认为,花后水分胁迫是抑制光合作用的重要环境因素,小麦旗叶的光合速率会随着土壤含水量的减少而降低^[15]。有研究表明,开花后轻度水分胁迫时冬小麦 P_n 会升高,且能较长时间保持较高的光合速率,有利于籽粒产量的提高;适量施氮可显著提高叶片光合速率,部分弥补因缺水导致的光合速率降低的损失^[16]。不难发现,基于耕作措施或者水肥互作的作物光合特性响应研究比较深入,而将耕作措施、水肥减量集成于同一系统,探讨集成技术的产量效应及产量形成光合生理机制的研究仍比较薄弱,使得生产中缺乏进一步

优化该技术、挖掘其增产稳产潜力的理论依据。为此,本研究在河西绿洲灌区设置不同水氮组合,探讨地膜玉米免耕和传统耕作对小麦群体、叶片水平光合生理特征的影响,解析不同组合影响小麦产量的主要机制,以期为进一步优化绿洲灌区新型高效小麦生产技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在甘肃省武威市甘肃农业大学绿洲农业试验站进行,该区为典型的大陆性荒漠气候,年均降水量不足 170 mm,年蒸发量约 2000~3500 mm,资源性缺水严重。小麦是该区主要粮食作物之一,以传统深翻耕为主生产,普遍连作。

1.2 试验设计

于 2018—2020 年进行田间试验,其中 2018 年为预备试验,覆膜玉米灌水、施肥等田间管理措施保持一致。2018 年玉米收获后,覆膜玉米免耕处理小区地膜的完整度保持在 70%以上;传统耕作处理在玉米收获后回收残膜并深翻耕;2019 年免耕直接穴播小麦。同时布置 2020 年小麦种植的预备试验,覆膜玉米灌水、施肥等田间管理措施与 2018 年相同;2020 年免耕直接穴播小麦。

试验为三因素裂区试验,主区为耕作措施,设地膜玉米免耕(NT)和传统耕作(CT);裂区为灌水水平,设传统灌水(I_2 , 2400 $m^3\text{ hm}^{-2}$)和传统灌水减量 20% (I_1 , 1920 $m^3\text{ hm}^{-2}$);裂-裂区为施氮水平,分别是传统施氮(N_3 , 225 $kg\text{ hm}^{-2}$)、传统施氮减量 20% (N_2 , 180 $kg\text{ hm}^{-2}$)和传统施氮减量 40% (N_1 , 135 $kg\text{ hm}^{-2}$)。共 12 个处理,每处理 3 次重复,小区面积 52 m^2 。

小麦品种为“陇春 30”。2019 年,3 月 17 日播种,7 月 18 日收获;2020 年,3 月 20 日播种,7 月 20 日收获。化肥全部做基肥。不同处理灌冬储水 1200 $m^3\text{ hm}^{-2}$,苗期、孕穗期和灌浆期各灌水一次, I_2 处理分别灌 750、900 和 750 $m^3\text{ hm}^{-2}$, I_1 处理分别灌 600、

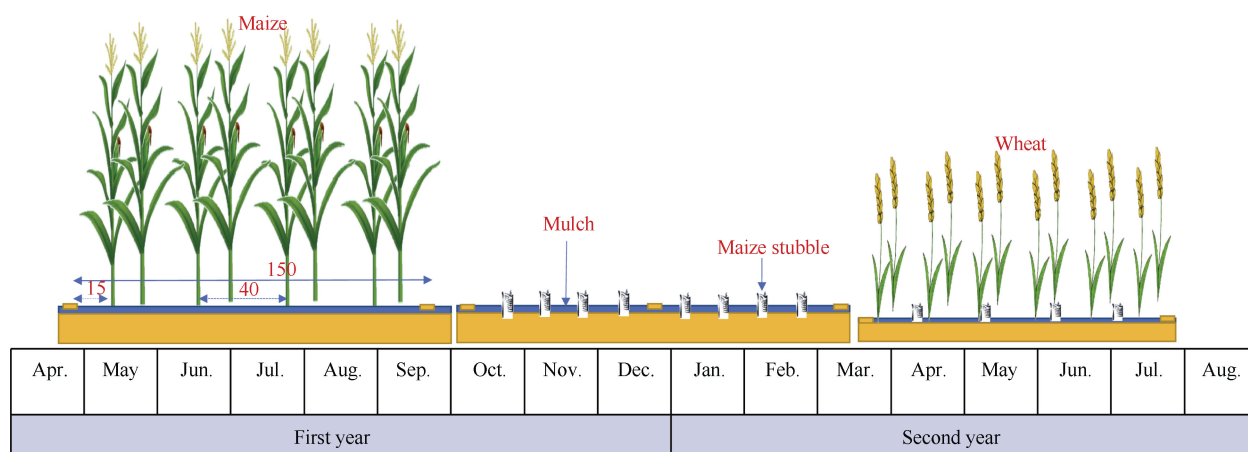


图 1 地膜玉米免耕轮作小麦示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mulch maize no-till rotation wheat

试验采用全膜覆盖, 地膜宽 150 cm, 玉米种植 4 行(行距 40 cm), 玉米收获后, 保留地膜完整度 70%以上, 第 2 年采用穴播的方式种植春小麦, 密度为 465 万株 hm^{-2} 。

In the experiment, the whole film was covered, the mulch was 150 cm wide, and 4 rows (row spacing 40 cm) of maize were planted. After the corn was harvested, the mulch integrity was retained above 70%. In the second year, spring wheat was planted by hill-planting method, with a density of 4.65 million plants hm^{-2} .

720 和 600 $\text{m}^3 \text{hm}^{-2}$ 。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 干物质积累量 小麦出苗后每 15 d 测定 1 次地上部生物量。随机选取 20 株小麦植株样, 105℃ 杀青 1 h, 80℃ 下继续烘干至恒重后称重。

1.3.2 叶面积指数(LAI) 用长宽法测定, 每 15 d 测定一次^[17]。

$$\text{LAI} = K \times \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i)$$

式中, K 为校正系数, 取 0.83, a 和 b 分别为叶片的长和宽, i 为叶片个数。

1.3.3 光合势(LAD)

$$\text{LAD} = \sum_{i=1}^n (\text{LAI}_i \times D_i)$$

式中, LAI_i 为第 i 个生育阶段的平均 LAI, D_i 为第 i 个生育阶段所持续天数。

1.3.4 小麦叶片叶绿素值(SPAD) 每个小区选择有代表性的小麦叶片 10 片, 出苗后每 15 d 用日本美能达 SPAD-502 叶绿素计直接测定 SPAD 值, 并计算其平均值^[17]。

1.3.5 旗叶光合速率(P_n)测定 小麦开花期选择晴朗无风的早晨, 在 9:00—11:00 使用 Li-6400 便携式光合作用测定系统(美国 Li-Cor 公司)测定旗叶的光合速率(P_n)。

1.3.6 产量 按小区单独收获计产。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2010 整理和汇总数据,

SPSS 19.0 进行显著性分析(Duncan's multiple range tests, $P < 0.05$)、主效应检验及互作效应分析。

2 结果与分析

2.1 小麦光合参数对耕作措施、灌水及施氮量的响应

2.1.1 不同耕作措施下小麦叶面积指数对水氮减量的响应 小麦拔节期(5 月 20 日)之后, 叶面积指数受耕作措施、施氮水平影响显著; 灌水水平和施氮水平间的交互作用显著; 灌水水平全生育期内无显著影响(图 2)。地膜玉米免耕较传统耕作小麦平均叶面积指数提高 14.5%~44.1%, 其中拔节期之前、拔节至孕穗期以及孕穗期至灌浆期提高比例分别为 14.5%~37.7%、17.9%~41.4%、24.8%~44.1%; 减量 40%施氮较传统施氮小麦平均叶面积指数降低了 6.4%~15.8%, 减量 20%施氮与传统施氮处理无显著差异。小麦开花期(5 月 27 日)叶面积指数达到最大值, 地膜玉米免耕较传统耕作提高 12.9%~27.4%, 减量 40%施氮较传统施氮小麦叶面积指数降低了 13.6%~20.4%, 减量 20%施氮与传统施氮处理差异不显著。将免耕和减量灌水、施氮相结合, 应用于春小麦生产模式中, 可提高其叶面积指数。

2.1.2 不同耕作措施下小麦光合势对水氮减量的响应 耕作措施($P_T < 0.05$)、施氮水平($P_N < 0.05$)对小麦光合势影响显著, 而灌水水平对其影响不显著(图 3)。灌水水平和施氮水平间的交互作用显著

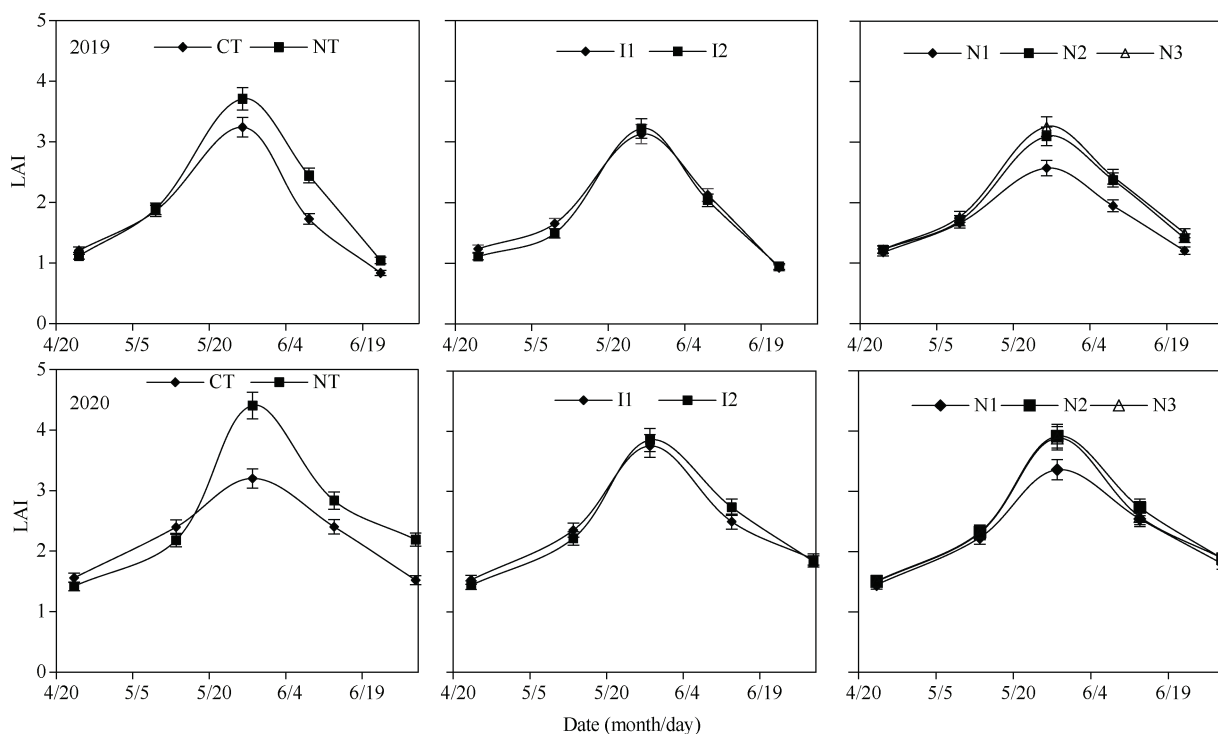


图 2 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦全生育期叶面积指数动态变化

Fig. 2 Dynamic variation of leaf area index (LAI) of wheat in different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns

NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n=3$)。

NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n=3$).

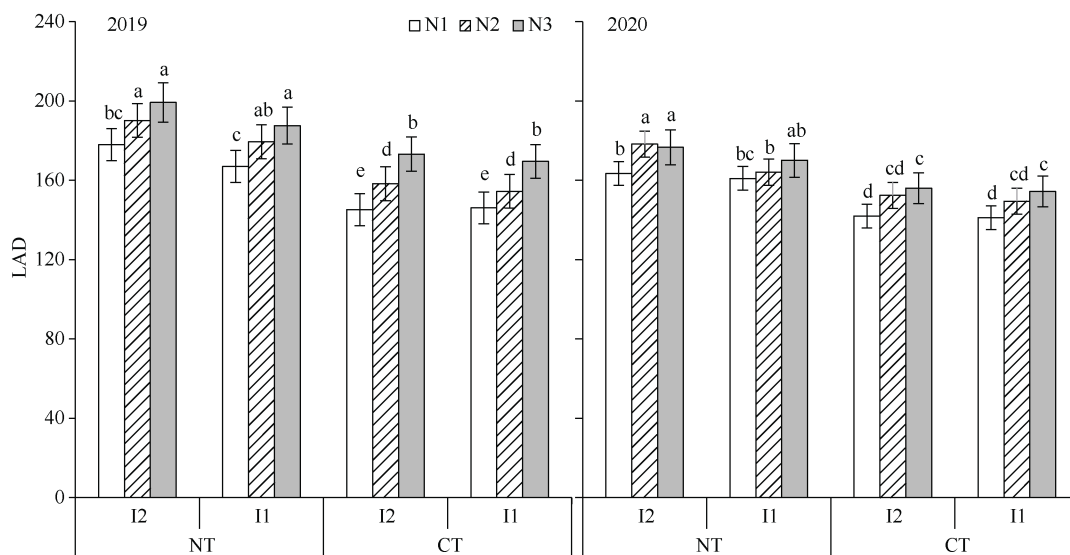


图 3 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦光合势

Fig. 3 LAD of wheat in different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns

NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n=3$)。图中不同字母表示不同处理间差异显著。

NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n=3$). Different letters in the figure indicate significant differences between different treatments.

($P_{1 \times N} < 0.05$)。地膜玉米免耕较传统耕作小麦光合势提高 13.2%~16.3%。随着施氮水平的降低, 小麦光合势呈现递减趋势, 减量施氮 40%较传统施氮降低 7.5%~12.7%, 减量施氮 20%与传统施氮差异不显著。比较相同耕作措施下不同水氮互作的小麦光合势, 传统灌水施氮减量 20%处理与低灌水传统高、中施氮处理差异不显著。免耕低灌较传统耕作高、低灌分别提高 9.9%~12.7%与 11.2%~12.9%。免耕低施氮较中、高施氮分别降低 5.5%~7.2%与 6.9%~12.1%, 但免耕中施氮较传统中、高施氮分别提高 7.5%~10.3%与 4.5%~6.6%。其中, 地膜玉米免耕结合灌水施氮均减量 20%与传统耕作及传统灌水与施氮的光合势无显著差异。说明与传统耕作高施氮高灌水相比, 地膜玉米免耕可节省 20%灌水与施氮。

2.1.3 不同耕作措施和水氮减量模式对小麦叶片叶绿素相对含量(SPAD)的影响 小麦全生育期 SPAD 值动态如图 4。全生育期内, 耕作措施、施氮水平对小麦旗叶 SPAD 值影响显著, 灌水水平对其无显著影响, 灌水水平和施氮水平间的交互作用显著。地膜玉米免耕较传统耕作小麦 SPAD 值提高 7.4%~9.0%, 其中拔节期之前、拔节至孕穗期、孕穗至灌浆期提高比例分别为 5.2%~6.1%、9.6%~11.8%、5.7%~6.7%。随着施氮量的减少, 小麦叶片 SPAD 值呈现降低趋势。减量 40%施氮较减量 20%及传统施氮春小麦拔节至孕穗期叶片 SPAD 值分别降低 4.5%~6.1%、6.0%~10.2%, 但减量 20%施氮与传统施氮处理间差异并不显著。将地膜玉米免耕与减量施氮和减量灌水同步集成于小麦生产模式中, 增强了春小麦叶片 SPAD 值。

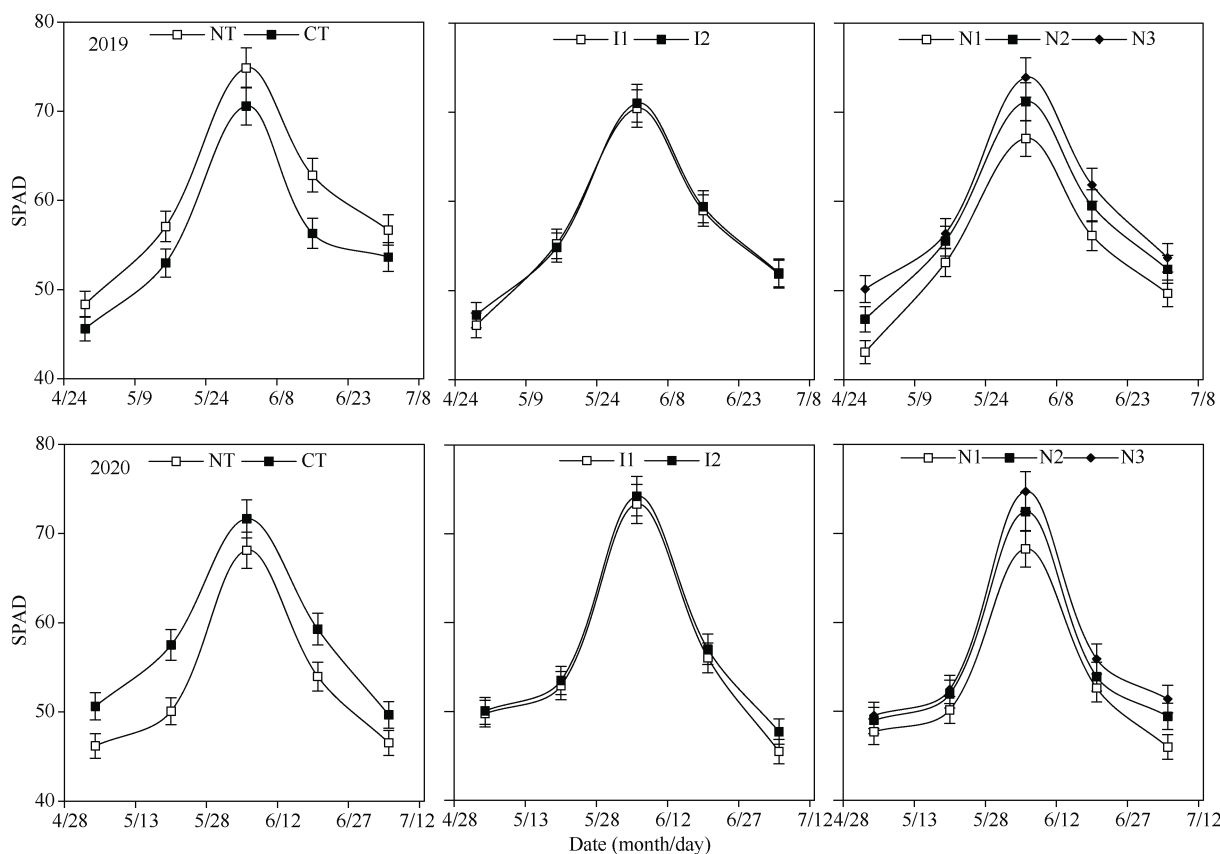


图 4 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦旗叶的 SPAD 值

Fig. 4 SPAD values of flag leaves of wheat under different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns

NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n=3$)。

NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n=3$).

2.1.4 不同耕作措施及水氮减量模式对小麦开花期光合速率的影响 如图 5, 耕作措施对小麦光合速率影响显著 ($P_T < 0.05$), 地膜玉米免耕较传统耕作小麦光合速率提高 14.5%~24.2%; 与传统灌水量相比, 减量灌水显著降低光合速率, 下降了 6.5%~13.6%; 减量 40%施氮较减量 20%及传统施氮光合速率分别降低了 6.2%~13.2%与 7.5%~17.5%, 说明减量施氮显著降低了小麦的光合速率, 但减量 20%施氮与传统高施氮处理间无显著差异。免耕条件下, 减量灌水比传统灌水光合速率降低 2.4%~10.4%, 比传统耕作高、低灌水分分别提高 2.1%~8.7%和 15.5%~16.2%。免耕低施氮较中、高施氮光合速率分别降低 12.1%~19.6%与 10.4%~27.3%, 但免耕中施氮较传统中、高施氮光合速率分别提高 10.9%~24.2%与 6.0%~19.9%。尤其是免耕高灌中施氮和免耕低灌高施氮比传统耕作高灌高施氮光合速率分别提高 12.2%~17.9%与 10.1%~12.5%; 免耕低灌中施氮则与传统耕作高灌高施氮无显著差异。说明在传统耕作措施下, 减少灌水和施氮量均使小麦光合速率有所降低, 而地膜玉米免耕可消除减量 20%灌水和施氮量与传统灌水传统施氮量之间的差异。

2.2 不同耕作措施和水氮减量模式对小麦干物质积累量和籽粒产量的影响

2.2.1 不同耕作措施小麦干物质积累量对水氮减量的响应 比较不同处理干物质积累总量发现, 耕作措施、施氮水平、灌水水平均对其影响显著(图 6)。灌水水平和施氮水平之间交互作用显著。小麦干物质积累量在免耕措施下较传统耕作显著增加 13.4%~16.5%。其中拔节期至孕穗期、孕穗期至灌浆初期以及灌浆初期至成熟期分别增加 7.6%~15.3%、6.5%~16.6、8.6%~13.4%; 随着施氮水平的降低, 小麦的干物质积累量同样呈现出递减的趋势。减量施氮 40%较减量施氮 20%和传统施氮分别降低了 7.3%~11.1%、10.0%~11.9%。在拔节期至孕穗期、孕穗期至灌浆初期以及灌浆初期至成熟期, 减量施氮 40%较减量施氮 20%分别降低了 8.5%~10.4%、3.4%~12.3%、3.5%~11.7%; 较传统施氮分别降低了 6.9%~14.0%、4.3%~13.9%、6.7%~11.8%; 减量施氮 20%与传统施氮无显著差异。在开花期(6 月 13 日)之后, 传统耕作、减量灌水以及减量施氮 40%处理相较于地膜玉米免耕、传统灌水和传统施氮均出现显著降低, 而减量施氮 20%处理与传统施氮无差异。

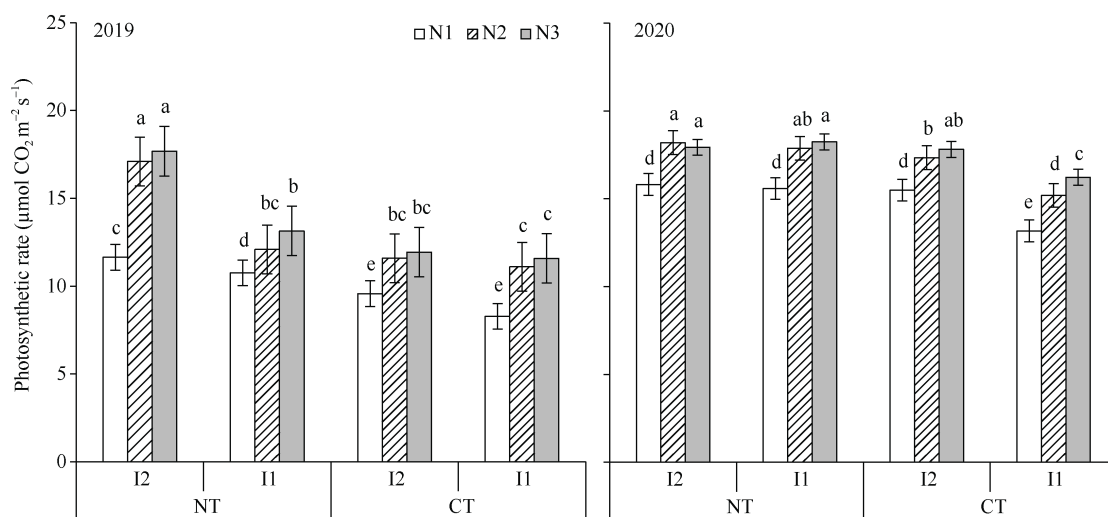


图 5 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦旗叶的光合速率

Fig. 5 Photosynthetic rate of flag leaves of wheat under different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns

NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n = 3$)。图中不同字母表示不同处理间差异显著。

NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n = 3$). Different letters in the figure indicate significant differences between different treatments.

比较同一耕作措施下不同水氮模式的小麦干物质积累总量, 传统灌水中施氮处理与低灌水传统高、中施氮处理差异不显著。免耕低灌较传统耕作高、低灌分别提高 6.4%~11.2%与 9.8%~19.2%。免耕低施氮较中、高施氮分别减少 7.2%~8.1%与 5.1%~12.6%, 与传统耕作中、高施氮无显著差异。以上结果说明, 通过将耕作措施、覆盖方式、水氮供应相结合可以保持并提高小麦的干物质积累量。特别是地膜玉米免耕结合灌水、施肥均减量 20%仍可以保持与传统模式下小麦相当的干物质积累量。

2.2.2 不同耕作措施和水氮减量模式对小麦籽粒产量的影响 耕作措施 ($P_T < 0.05$)、灌水水平 ($P_I < 0.05$)、施氮水平 ($P_N < 0.05$) (图 7) 以及灌水水平与施氮水平 ($P_{I \times N} < 0.05$) 二者的互作皆对小麦籽粒产量有显著影响。地膜玉米免耕较传统耕作处理小麦增产 9.0%~13.4%; 减量灌水 20%较传统灌水减产 4.3%~7.4%; 减量施氮 40%较传统施氮减产 12.6%~

19.4%, 减量施氮 20%和传统施氮无显著差异。

比较同一耕作措施下不同水氮减量模式下小麦籽粒产量, 灌水水平对产量影响显著。地膜玉米免耕措施下, 减量灌水 20%较传统灌水减产 6.2%~9.4%。而传统耕作措施下, 减量灌水 20%较传统灌水减产 8.7%~12.1%。免耕减量灌水 20%较传统耕作减量灌水 20%增产 10.5%~15.1%, 与传统耕作传统灌水无显著差异。免耕减量 40%施氮较减量施氮 20%和传统施氮分别减产 9.2%~15.0%、10.3%~16.5%。免耕减量施氮 20%较传统耕作传统施氮、减量施氮 20%分别增产 5.1%~13.3%和 9.7%~15.4%。尤其是免耕高灌水中施氮和免耕低灌水高施氮分别比传统耕作措施高灌水高施氮增产 7.7%~14.0%和 3.4%~4.0%。地膜玉米免耕配以减量灌水、施氮可达到与传统耕作传统灌水、施氮相当的籽粒产量, 较传统耕作等量灌水、施氮水平具有增产效应。

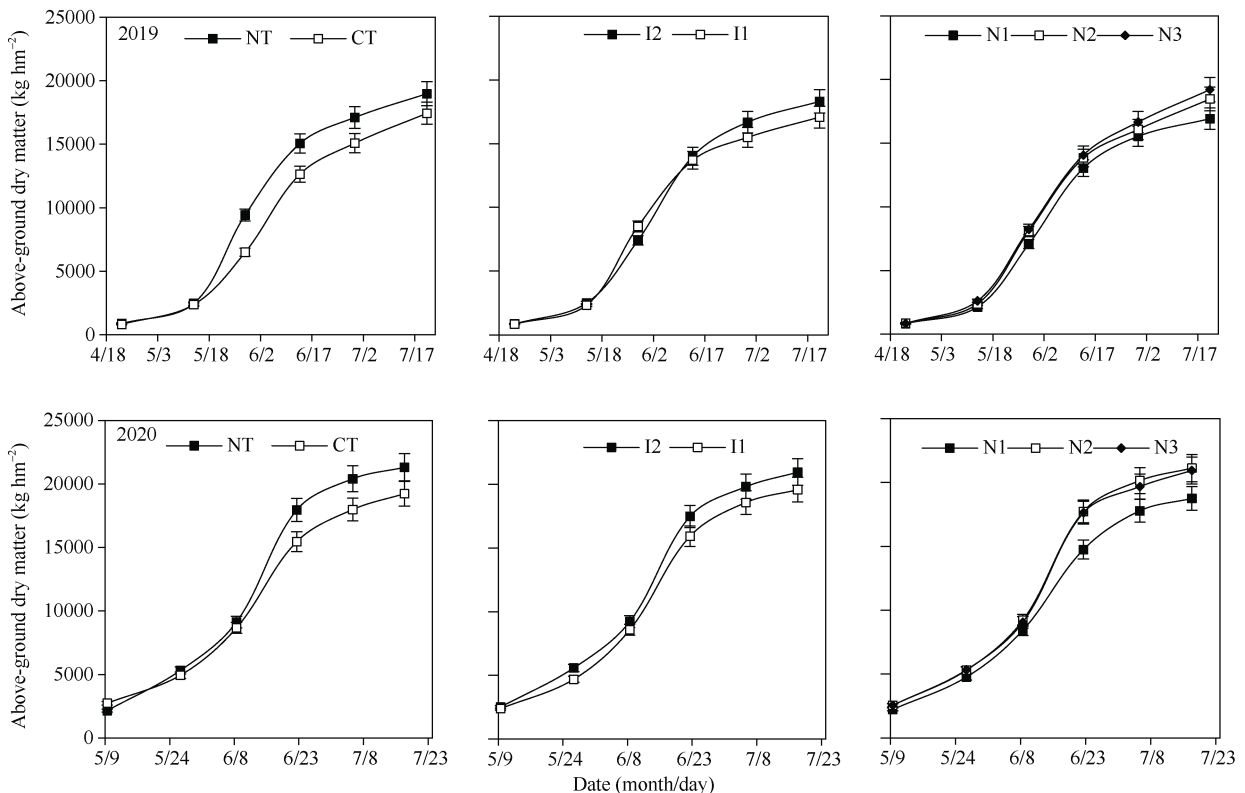


图 6 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦干物质积累动态

Fig. 6 Dynamic variation of dry matter accumulation of wheat in different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns

NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n=3$)。

NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n=3$).

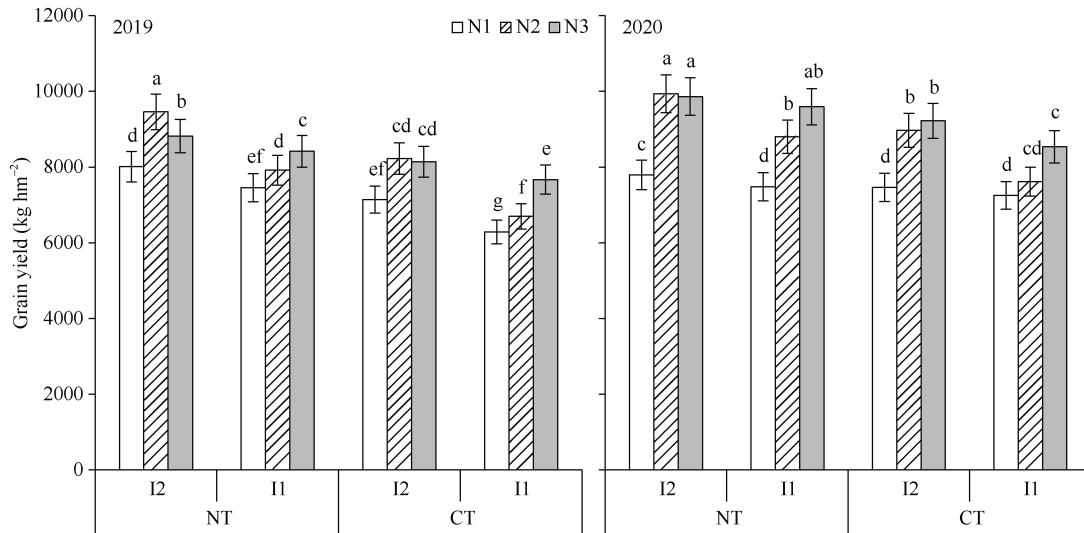


图 7 不同耕作措施和水氮减量模式下小麦产量
Fig. 7 Wheat yield under different tillage practices and water-nitrogen decrement patterns
NT: 地膜玉米免耕; CT: 传统耕作; I₂: 传统灌水(2400 m³ hm⁻²); I₁: 传统灌水减量 20% (1920 m³ hm⁻²); N₃: 传统施氮(225 kg hm⁻²); N₂: 传统施氮减量 20% (180 kg hm⁻²); N₁: 传统施氮减量 40% (135 kg hm⁻²)。误差线表示标准差($n = 3$)。图中不同字母表示不同处理间差异显著。
NT: no tillage with plastic mulching; CT: conventional tillage with plastic mulching; I₂: conventional irrigation (2400 m³ hm⁻²); I₁: reduced 20% irrigation (1920 m³ hm⁻²); N₃: conventional nitrogen application (225 kg hm⁻²); N₂: reduced 20% nitrogen (180 kg hm⁻²); N₁: reduced 40% nitrogen (135 kg hm⁻²). The error bar indicates standard error ($n = 3$). Different letters in the figure indicate significant differences between different treatments.

表 1 小麦籽粒产量与光合速率、光合势及 SPAD 值的相关性及关联度分析
Table 1 Correlation and association degree analysis of grain yield with photosynthetic rate, photosynthetic potential, and SPAD in wheat

指标 Parameter	相关性 & 关联度分析 Correlation and association analysis	光合速率 P_n	光合势 LAD	叶绿素相对含量 SPAD
籽粒产量 Grain yield	相关性 Correlation	0.881**	0.835**	0.375
	关联度 Association degree	0.737	0.743	0.611
	排序 Ranking	2	1	3

**表示 0.01 水平下显著相关。 ** indicates significant correlations at the 0.01 probability level.

2.3 小麦籽粒产量与光合速率、光合势及 SPAD 值的相关性及关联度分析

为探明不同试验参数对小麦籽粒产量的影响程度, 由不同试验参数与其籽粒产量的相关性分析可知, 春小麦籽粒产量与光合速率和光合势呈极显著正相关(表 1), 而与 SPAD 无显著关系。说明可通过优化春小麦的光合速率以及光合势来提高其籽粒产量。由小麦不同试验参数与其籽粒产量的关联度分析可知, 影响春小麦籽粒产量的主导因素为光合势, 其次为光合速率, 而与 SPAD 值的关系最小, 说明可以通过优化春小麦光合势和光合速率从而提高其籽粒产量。本研究中, 免耕较传统耕作显著提高了小麦的光合势、光合速率以及 SPAD 值; 减量灌水对光合势和 SPAD 值无显著影响, 但显著降低了小麦的光合速率; 减量施氮使小麦光合势、光合速率

和 SPAD 值呈降低趋势, 但减量施氮 20%较传统施氮无显著差异。

3 讨论

3.1 不同耕作措施及水氮减量模式对小麦光合特性的影响

叶片光合能力是植物光合作用强弱的重要反映, 直接决定着植物生产力的高低。研究发现少耕、免耕覆盖能提高作物叶片光合作用^[8]。本试验中, 同一灌水及施氮处理下, 地膜玉米免耕较传统耕作增加了小麦的叶面积指数、光合势和光合速率的同时, 延缓了叶片衰老, 显著提高小麦的光合能力; 王磊等^[10]、王艺陶等^[18]和 Wu 等^[19]研究表明, 减少供水量导致冬小麦旗叶光合速率、蒸腾速率明显下降; 增施氮肥提高了小麦旗叶叶绿素含量和单叶水分利

用效率,施氮量越高,光合参数增加数值越大。本研究中,同一灌水水平下,随着施氮量的增加,小麦的光合参数呈现上升的趋势;同一氮素水平下,随着灌水水平的提高,小麦的光合参数也随之增加;这与前人的研究结果一致。但在地膜玉米免耕条件下,灌水和施氮均减量20%处理可以达到与传统耕作下传统灌水和施氮相当的叶面积指数、光合势以及光合速率;相同灌水和施氮条件下,地膜玉米免耕显著提高小麦的光合作用的主要原因是水分对生育期叶片的生理活性具有重要影响,适量灌水使得小麦旗叶的光合速率、蒸腾速率显著增大,可有效延缓小麦旗叶叶绿素的分解,显著促进光合产物积累和转运^[12,20];而免耕覆盖较低的土壤蒸发利于提高土壤蓄水保墒能力,为作物生育后期储存更多的水分与养分^[8]。同时可以提高土壤微生物活性,延缓地上部的衰老进程,改善功能叶片的光合特性,促进籽粒灌浆,从而提高产量。免耕覆盖结合适宜的水氮减量模式可以减缓叶片中SPAD值的降低幅度,延长生育后期叶片光合生理功能的持续期^[21],协调小麦根系和水、肥间的关系,减缓干旱胁迫对作物的影响,增大生育期干物质积累速率,增强籽粒“库”对有机物质的竞争力,提高开花期的干物质积累量和灌浆期籽粒重^[5,22]。

3.2 不同耕作措施及水氮减量模式对小麦产量的影响

小麦光合作用产生碳水化合物,干物质作为碳水化合物最终表现形态,其不同生育阶段的积累速率严重影响产量形成^[23]。水氮组合对小麦光合生理特性的影响反映在干物质积累动态变化与分配比例上,从而影响小麦产量。小麦开花前和开花后营养器官干物质积累转运是小麦籽粒形成产量的主要来源,研究发现^[21],灌水和施氮对小麦干物质积累转运产生显著影响,不同灌水量处理小麦干物质积累量存在差异,且干物质积累量随施氮量增加而增加;在正常生长条件下,生育期限量供水对小麦光合特性和干物质积累量的影响小于施用氮肥的作用,但通过水氮减量的作用改变能够调控小麦各生育时期的光合作用和干物质积累特征,恰当比例的水肥互作能够显著促进小麦生育期地上部分的生长,有利于光合产物的积累,为生育后期籽粒的形成奠定基础^[10]。本研究结果表明,免耕措施下减量灌水20%结合传统施氮和传统灌水结合减量20%施氮均获得最高籽粒产量,且二者差异不显著;免耕措施

下的籽粒产量显著高于传统耕作,说明试区小麦生产中采用免耕结合减量灌水或施氮可获得良好的增产效果,证实减量灌水施氮减量模式集成于免耕措施的可行性。覆膜免耕显著增产其原因在于,覆膜免耕方式优化了土壤理化特性,为小麦后期生长提供了良好的土壤水热环境^[8-9],结合适宜的水氮供应,有利于后期小麦光合产物向生殖器官的转运,同时延长灌浆时间,增加灌浆强度,促使籽粒大而饱满,最终实现增产^[19,23]。

3.3 地膜玉米免耕和水氮减量条件下小麦主要光合参数和产量的关系

近年来,人们对小麦的光合生理特性及其与最终产量的关系已经有了较为深入的研究。不少关于光合参数与作物产量关系的研究表明它们之间有正相关^[24-26]。本试验通过分析光合源和光合生理参数与小麦籽粒产量间的相互关系,结果表明,小麦的叶面积指数、光合势以及光合速率、SPAD值均与最终产量呈显著正相关,且按照贡献度排序为光合势>光合速率>SPAD值。这说明在小麦生育期间,可通过增大叶面积、提高叶绿素含量及其生育后期迟缓的衰退幅度,延长叶片光合作用的功能期,从而为后期积累较多的干物质;此外,开花期以后,光合源强、光合速率高的小麦植株可促进花前储存碳库的再转运,为保持最终较高的产量水平奠定了基础。

4 结论

地膜玉米免耕轮作小麦生产技术在西北绿洲灌区较传统耕作小麦露地条播具有明显的增产效应。在传统施氮量减量20%施氮水平(180 kg hm⁻²)、传统灌水减量20%(1920 m³ hm⁻²)条件下,地膜玉米免耕较传统耕作显著提高了小麦的叶面积指数、光合势以及光合速率,延缓叶片中叶绿素含量降解,延长了生育后期叶片光合生理功能的持续期,确保灌浆期小麦光合速率维持在较高水平,增强了小麦干物质积累能力,进而促进小麦的产量形成。

References

- [1] Yang X L, Gao W S, Shi Q H, Chen F, Chu Q Q. Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the Huang-Huai-Hai farming region. *Agric Water Manage*, 2013, 124: 20-27.
- [2] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 徐新朋, 周卫, 郑怀国. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征. *应用生态学报*, 2015, 26: 76-86.
- Chuan L M, He P, Zhao T K, Xu X P, Zhou W, Zheng H G.

- Nitrogen cycling and balance for wheat in China. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 76–86 (in Chinese with English abstract).
- [3] 刘祚昌, 赖世登, 余彦波, 安庆坤. 小麦光合速率和光呼吸与产量性状的关系. *中国农业科学*, 1980, 13: 11–15.
Liu Z C, Lai S D, Yu Y B, An Q K. correlation of photosynthetic characters with the yielding characters in wheat. *Sci Agric Sin*, 1980, 13: 11–15 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王虎兵, 曹红霞, 郝舒雪, 潘小燕. 温室番茄植株养分和光合对水肥耦合的响应及其与产量关系. *中国农业科学*, 2019, 52: 1761–1771.
Wang H B, Cao H X, Hao S X, Pan X Y. Responses of plant nutrient and photosynthesis in greenhouse tomato to water-fertilizer coupling and their relationship with yield. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 1761–1771 (in Chinese with English abstract).
- [5] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 葛均筑, 唐丽媛, 赵明. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化. *作物学报*, 2013, 39: 1284–1292.
Sun X F, Ding Z S, Hou H P, Ge J Z, Tang L Y, Zhao M. Post-anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1284–1292 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王帅, 杨劲峰, 韩晓日, 刘小虎, 战秀梅, 刘顺国. 不同施肥处理对旱作春玉米光合特性的影响. *中国土壤与肥料*, 2008, (6): 23–27.
Wang S, Yang J F, Han X R, Liu X H, Zhan X M, Liu S G. Effect of fertilizer application on photosynthetic traits of spring maize. *China Soils Fert*, 2008, (6): 23–27 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王建波, 严昌荣, 刘恩科, 陈保青, 张恒恒. 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, Chen B Q, Zhang H H. 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).
- [8] 李友军, 吴金芝, 黄明, 姚宇卿, 张灿军, 蔡典雄, 金轲. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2006, 22: 44–48.
Li Y J, Wu J Z, Huang M, Yao Y Q, Zhang C J, Cai D X, Jin K. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat. *Trans CSAE*, 2006, 22: 44–48 (in Chinese with English abstract).
- [9] 周瑜, 苏旺, 王舰, 屈洋, 高小丽, 杨璞, 冯佰利. 不同覆盖方式和施氮量对糜子光合特性及产量性状的影响. *作物学报*, 2016, 42: 873–885.
Zhou Y, Su W, Wang J, Qu Y, Gao X L, Yang P, Feng B L. Effects of mulching and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield traits in broom maize millet. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 873–885 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 赵斌. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响. *水土保持学报*, 2018, 32: 304–311.
Wang L, Dong S P, Liu P, Zhang J W, Zhao B. Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat. *J Soil Water Conserv*, 2018, 32: 304–311 (in Chinese with English abstract).
- [11] 段巍巍, 赵红梅, 郭程瑾, 肖凯, 李雁鸣. 夏玉米光合特性对氮素用量的反应. *作物学报*, 2007, 33: 949–954.
Duan W W, Zhao H M, Guo C J, Xiao K, Li Y M. Responses of photosynthesis characteristics to nitrogen application rates in summer maize (*Zea mays* L.). *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 949–954 (in Chinese with English abstract).
- [12] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 何在菊. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响. *作物学报*, 2015, 41: 1406–1415.
Li G H, Zhao B, Dong S T, Liu P, Zhang J W, He Z J. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 1406–1415 (in Chinese with English abstract).
- [13] Ercoli L, Lulli L, Mariotti M, Masoni A, Arduini I. Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *Eur J Agron*, 2008, 28: 138–147.
- [14] 马建辉, 张利霞, 姜丽娜, 王亚帆, 齐冰玉, 李春喜. 氮肥和密度对冬小麦光合生理和物质积累的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35: 674–680.
Ma J H, Zhang L X, Jiang L N, Wang Y F, Qi B Y, Li C X. Effect of nitrogen and density on photosynthetic physiology and matter accumulation of winter wheat. *J Triticeae Crops*, 2015, 35: 674–680 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张兴华, 高杰, 杜伟莉, 张仁和, 薛吉全. 干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响. *作物学报*, 2015, 41: 154–159.
Zhang X H, Gao J, Du W L, Zhang R H, Xue J Q. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of maize hybrids to at seedling stage. *Acta Agron Sin*, 2015, 41: 154–159 (in Chinese with English abstract).
- [16] 杨明达, 马守臣, 杨慎骄, 张素瑜, 关小康, 李学梅, 王同朝, 李春喜. 氮肥后移对抽穗后水分胁迫下冬小麦光合特性及产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26: 3315–3321.
Yang M D, Ma S C, Yang S J, Zhang S Y, Guan X K, Li X M, Wang T C, Li C X. Effects of postponing nitrogen application on photosynthetic characteristics and grain yield of winter wheat subjected to water stress after heading stage. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 3315–3321 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王一帆, 殷文, 胡发龙, 范虹, 樊志龙, 赵财, 于爱忠, 柴强. 间作小麦光合性能对地上地下互作强度的响应. *作物学报*, 2021, 47: 929–941.
Wang Y F, Yin W, Hu F L, Fan H, Fan Z L, Zhao C, Yu A Z, Chai Q. Response of photosynthetic performance of intercropped wheat to interaction intensity between above- and below-ground. *Acta Agron Sin*, 2021, 47: 929–941 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王艺陶, 衣莹, 章建新, 侯立白, 康建涛, 董祥开. 不同灌水处理对冬小麦冠层结构及光合特性的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(6): 63–66.
Wang Y T, Yi Y, Zhang J X, Hou L B, Kang J T, Dong X K. Effects of irrigation on winter wheat photosynthetic character and canopy structure. *Agric Res Arid Areas*, 2009, 27(6): 63–66 (in Chinese with English abstract).
- [19] Wu Y, Huang F, Jia Z, Ren X, Cai T. Response of soil water, temperature, and maize (*Zea may* L.) production to different plastic film mulching patterns in semi-arid areas of northwest China. *Soil Tillage Res*, 2017, 166: 113–121.

- [20] 郭翠花, 高志强, 苗果园. 花后遮阴对小麦旗叶光合特性及籽粒产量和品质的影响. 作物学报, 2010, 36: 673–679.
Guo C H, Gao Z Q, Miao G Y. Effect of shading at post flowering on photosynthetic characteristics of flag leaf and response of grain yield and quality to shading in wheat. *Acta Agron Sin*, 2010, 36: 673–679 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘志鹏, 陈曦, 杨梦雅, 赵颖佳, 肖凯. 氮量及减灌对冬小麦旗叶生理参数和细胞保护酶活性的影响. 麦类作物学报, 2018, 244: 53–60.
Liu Z P, Chen X, Yang M Y, Zhao Y J, Xiao K. Effect of nitrogen amount and limited irrigation on physiological features of flag leaf and cellular protective enzyme activities in wheat. *J Triticeae Crops*, 2018, 244: 53–60 (in Chinese with English abstract).
- [22] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 陈明灿, 李友军. 干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 1225–1237.
Xu G W, Lu D K, Wang H Z, Chen M C, Li Y J. Coupling effect of wetting and drying alternative irrigation and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of rice leaves. *J Plant Nutr Fert*, 2017, 23: 1225–1237 (in Chinese with English abstract).
- [23] 樊帆, 韩立朴, 刘祖昕, 王继师, 谢光辉. 氮素对干旱地区甜高粱碳水化合物和理论乙醇产量的影响研究. 中国农业大学学报, 2013: 28–36.
Fan F, Han L P, Liu Z X, Wang J S, Xie G H. Carbohydrates and predicted ethanol yield of different sweet sorghum cultivars at two nitrogen levels in arid region. *J China Agric Univ*, 2013: 28–36 (in Chinese with English abstract).
- [24] 谷艳芳, 丁圣彦, 高志英, 邢倩. 干旱胁迫下冬小麦光合产物分配格局及其与产量的关系. 生态学报, 2010, 30: 1167–1173.
Gu Y F, Ding S Y, Gao Z Y, Xing Q. The pattern of photosynthate partitioning in drought-stressed winter wheat and its relationship with yield. *Chin J Ecol*, 2010, 30: 1167–1173 (in Chinese with English abstract).
- [25] 郎有忠, 张祖建, 顾兴友, 杨建昌, 朱庆森. 水稻卷叶性状生理生态效应的研究: II. 光合特性、物质生产与产量形成. 作物学报, 2004, 30: 883–887.
Lang Y Z, Zhang Z J, Gu X Y, Yang J C, Zhu Q S. Physiological and ecological effects of crimp leaf character in rice (*Oryza sativa* L.): II. Photosynthetic character, dry mass production and yield forming. *Acta Agron Sin*, 2004, 30: 883–887 (in Chinese with English abstract).
- [26] 朱振家, 姜成英, 史艳虎, 吴文俊, 陈年来. 库源比改变对油橄榄产量及源叶光合作用的调节. 中国农业科学, 2015, 48: 546–554.
Zhu Z J, Jiang C Y, Shi Y H, Wu W J, Chen N L. Response of yield and leaf photosynthesis to sink-source ratio altering demand in olive. *Sci Agric Sin*, 2015, 48: 546–554 (in Chinese with English abstract).