

耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能 日变化和籽粒产量的影响

张向前^{1,2} 赵秀玲¹ 王钰乔¹ 濮超¹ 保尔江·马合木提³ 陈阜¹ 张海林^{1*}

(¹ 中国农业大学农学院/农业部农作制度重点实验室, 北京 100193; ² 内蒙古自治区农牧业科学院植物保护研究所, 呼和浩特 010031; ³ 新疆阿勒泰地区农业技术推广中心, 新疆阿勒泰 836500)

摘要 研究耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化的影响,对灌浆期干物质积累、转运以及产量形成具有重要的理论意义。本研究以中国农业大学吴桥实验站 2008 年设置的长期耕作定位试验为基础,分析了免耕秸秆不还田(NT)、免耕秸秆还田(NTS)、旋耕秸秆不还田(RT)、旋耕秸秆还田(RTS)、深松秸秆不还田(DT)、深松秸秆还田(DTS)、翻耕秸秆不还田(CT)和翻耕秸秆还田(CTS)耕作处理对冬小麦灌浆期旗叶光合特性日变化、光响应曲线和产量的影响。结果表明:不同耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶净光合速率日变化和气孔导度日变化的影响均呈双峰曲线变化趋势,秸秆还田下不同耕作方式的冬小麦旗叶净光合速率高于相应的秸秆不还田处理;各耕作方式对冬小麦旗叶胞间 CO₂ 浓度日变化的影响均呈“广口 V 型”双峰曲线变化趋势;除 DTS、RTS 和 RT 处理冬小麦旗叶的蒸腾速率日变化规律呈单峰曲线变化外,其他各处理冬小麦旗叶的蒸腾速率日变化均呈“双峰曲线”变化趋势。模拟的最大净光合速率以 DTS 处理最大,分别比 NT、DT、RT、CT、NTS、RTS 和 CTS 处理增加了 20.0%、21.7%、19.7%、21.5%、0.8%、12.1% 和 4.2%;秸秆还田条件下各处理的光响应曲线拟合程度均优于秸秆不还田处理。DTS 籽粒产量最高,RTS 次之,CTS 再次,CT 处理最小,DTS 处理的籽粒产量分别比 NTS、RTS、CTS、NT、DT、RT 和 CT 处理高 10.8%、1.3%、2.1%、5.4%、11.9%、12.4% 和 12.6%。通过光合速率和气孔导度日变化趋势可得,不同耕作方式下秸秆还田技术,特别是 DTS 和 NTS 处理可减缓光合午休现象,使冬小麦维持较高的光合速率,有利于干物质积累和产量的提高。

关键词 耕作方式; 冬小麦; 光合日变化; 光响应曲线; 产量

Effects of tillage practices on photosynthetic performance diurnal variation during filling stage and grain yield of winter wheat. ZHANG Xiang-qian^{1,2}, ZHAO Xiu-ling¹, WANG Yu-qiao¹, PU Chao¹, BAOER Jiang-mahemuti³, CHEN Fu¹, ZHANG Hai-lin^{1*} (¹College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University/Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China; ²Plant Protection Institute, Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; ³Altay Region Agricultural Technology Extension Center, Altay 836500, Xinjiang, China).

Abstract: Photosynthesis characteristics of winter wheat under different tillage practices during filling stage are vital for dry matter accumulation, transfer, and yield development. A field experiment, including no-till with residue removal (NT), no-till with residue retention (NTS), rotary tillage with residue removal (RT), rotary tillage with residue retained (RTS), subsoiling with residue removal (DT), subsoiling with residue retained (DTS), plow tillage with residue removal (CT), and plow tillage with residue retained (CTS) was conducted at Wuqiao experimental station of China Agricultural University since October 2008. The diurnal variation of photosynthetic characteristics of flag leaf, photosynthetic response curve, and crop yield under different tillage practices

本文由公益性行业(农业)科研专项(201503136)资助 This work was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest in China (201503136).

2016-07-07 Received, 2016-12-17 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hailin@cau.edu.cn

were evaluated during winter wheat filing stage in this study. The results showed that the net photosynthetic rate and stomatal conductance of flag leaf both diurnally varied with the bimodal curve, and the net photosynthetic rates were higher under treatments with residue retained than those under with residue removal. Diurnal variation of intercellular carbon dioxide concentration was observed with a “V-shaped wide mouth” bimodal curve under all treatments. Daily transpiration rate exhibited “double peak curve”, except for the “single peak curve” under DTS, RTS and RT. The stimulated net photosynthetic rate was increased by 20.0%, 21.7%, 19.7%, 21.5%, 0.8%, 12.1% and 4.2% under NT, DT, RT, CT, CTS, RTS, and CTS, compared with DTS, respectively. Photosynthetic response curves were fitted better under treatments with residue retained than under treatments with residue removal. As for crop grain yields, the highest one was observed under DTS, following by RTS and CTS, and the lowest under CT. Crop grain yield was increased by 10.8%, 1.3%, 2.1%, 5.4%, 11.9%, 12.4%, and 12.6% under DTS, compared with NTS, RTS, CTS, NT, DT, RT, and CT, respectively. Thus, residue retaining under different tillage practices (*e.g.* NTS and DTS) could mitigate the mid-day depression of photosynthesis, maintain a high photosynthetic rate of winter wheat, and improve the dry matter accumulation and crop production.

Key words: tillage practices; winter wheat; diurnal variation of photosynthesis; light-response curves; grain yield.

华北麦(小麦)-玉(玉米)两熟区是我国重要的粮食主产区,其粮食产量占全国粮食生产总量的三分之一^[1].同时,随着农作物产量不断提高,作物秸秆量也大幅度增加,而大量作物秸秆被弃置或露天焚烧不仅浪费资源,而且给该区带来了严重的环境问题^[2].秸秆还田不仅是保护性耕作技术的关键措施,也是秸秆综合利用的主要途径之一^[3-5].合理的耕作方式可以改善土壤耕层质量,培肥地力,增强土壤入渗和保水能力,提高作物产量^[6].国内外学者对不同耕作方式下土壤的物理性状、化学性状、微生物学性状,以及作物生长发育和产量已有大量研究^[6-9],但由于生态环境条件、气象因素、土壤状况、种植制度等因素的差异,造成了研究结果的不一致^[10-11].

光合作用是作物物质生产的基础,小麦产量的90%~95%来自光合作用过程中形成的光合物质,且籽粒产量的20%~30%来自旗叶光合作用^[12-13],因此,光合性能直接影响着作物的生长和产量形成.房清龙等^[14]研究了5种耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶光合作用参数日变化的影响,发现秸秆还田处理的叶绿素含量、光合速率和气孔导度比不还田处理高,差异显著;秸秆不还田处理的胞间CO₂浓度比秸秆还田处理高,并且秸秆还田处理可减缓光合午休现象,使冬小麦维持较高的光合速率.黄明等^[15]、李友军^[16]研究表明,与传统耕作相比,免耕覆盖和深松覆盖灌浆中期冬小麦的净光合速率略低,但提高了冬小麦灌浆中后期旗叶叶绿素含量、净光合速率和籽粒灌浆速率,促进了花后干物质积累和干物

质的转运,促使籽粒产量显著提高.但耕作方式对冬小麦光合性能的日变化规律、光响应曲线和产量的影响研究还较少,特别是对籽粒贡献最大的灌浆期光合性能的研究更少.因此,系统研究不同耕作方式下冬小麦灌浆期光合性能的变化规律,对提高小麦产量和耕作方式的合理运用具有一定的理论意义和实践价值.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究基于长期不同耕作方式的定位试验.该试验于2008年秋季在河北省沧州市吴桥县曹洼乡(37°36' N, 116°21' E)中国农业大学吴桥实验站进行.实验站位于华北平原东部,黑龙港流域中部,属温带半干旱大陆性季风气候,夏季高温,冬季寒冷,年平均气温在12.6℃左右,全年积温(≥0℃)4862.9℃,年降雨量约500 mm,且年内季节性分布不均,60%~70%的降雨量集中在6—8月,是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟区.供试土壤为冲积型盐化潮土,田间最大持水量为30.0%,试验初始0~20 cm土层土壤有机质含量为12.4 g·kg⁻¹、全氮含量为0.79 g·kg⁻¹、碱解氮含量为36.95 mg·kg⁻¹、速效磷含量为44.60 mg·kg⁻¹、速效钾含量为94.20 mg·kg⁻¹、pH值为7.67.

1.2 试验设计

试验处理包括:免耕秸秆不还田(NT)、旋耕秸秆不还田(RT)、深松秸秆不还田(DT)、翻耕秸秆不还田(CT)、免耕秸秆还田(NTS)、旋耕秸秆还田

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

符号 Code	处理 Treatment	耕作措施 Tillage practices
NT	免耕秸秆不还田 No-till with residue removal	夏玉米收获后将秸秆全部清除,采用免耕播种机一次性完成施肥、播种及镇压作业
DT	深松秸秆不还田 Subsoiling with residue removal	夏玉米收获后秸秆全部清除,然后撒施化肥,接着采用深松铲深松一遍(耕深 25~30 cm),后旋耕耱平后马上播种冬小麦
RT	旋耕秸秆不还田 Rotary tillage with residue removal	玉米收获后将秸秆全部清除,然后撒施化肥,旋耕机旋耕 2 遍(耕深 8~10 cm)后,马上播种冬小麦
CT	翻耕秸秆不还田 Plow tillage with residue removal	玉米收获后秸秆全部清除,然后撒施化肥,铧式犁翻耕 1 遍(耕深 15~20 cm),旋耕耱平后马上播种冬小麦
NTS	免耕秸秆还田 No-till with residue retention	玉米收获后秸秆全量还田,将秸秆粉碎(约 5~10 cm)并破除根茬,覆盖于地表,然后采用免耕播种机一次性完成播种、施肥及镇压作业
DTS	深松秸秆还田 Subsoiling with residue retained	玉米收获后秸秆粉碎全量还田,然后撒施化肥,接着采用深松铲深松一遍(耕深 25~30 cm),旋耕耱平马上播种冬小麦
RTS	旋耕秸秆还田 Rotary tillage with residue retained	玉米收获后秸秆全量粉碎(约 5~10 cm)还田,并破除根茬,然后撒施化肥,旋耕机旋耕 2 遍(耕深 8~10 cm),马上播种冬小麦
CTS	翻耕秸秆还田 Plow tillage with residue retained	玉米收获后秸秆粉碎全量还田,然后撒施化肥,铧式犁翻耕 1 遍(耕深 15~20 cm),旋耕耱平后播种冬小麦

(RTS)、深松秸秆还田(DTS)和翻耕秸秆还田(CTS)处理,每个处理重复 3 次,共 24 个小区,小区面积 222 m².夏玉米收获后,秸秆不还田处理的玉米秸秆全部移除,而还田处理下的玉米秸秆打碎均匀覆盖在地表,然后采取不同的耕作方式进行耕作.冬小麦采用联合收割机收获,根茬约为 30 cm,秸秆均匀覆盖在田间,秸秆不还田处理的冬小麦秸秆均被清除,均采用免耕直播播种夏玉米.各处理作物品种、灌溉、施肥量均相同,冬小麦品种为‘济麦 22’,除免耕处理的冬小麦播种量为 337.5 kg·hm⁻²外,其他各处理的冬小麦播种量均为 300 kg·hm⁻².冬小麦播种时尿素、磷酸二铵和硫酸钾施用量分别为 197、326 和 240 kg·hm⁻².各处理在拔节前均追施尿素 150 kg·hm⁻².夏玉米收获后田间具体处理方式如表 1.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 灌浆初期光合生理指标日变化测定 选择无风或微风晴天(2015 年 5 月 12 日),采用美国 LI-COR 公司的 LI-6400 便携式光合系统分析仪在 6:00—20:00 之间每隔 2 h 测定 1 次,每处理随机选取 6 株旗叶长势相当、叶面积大小差不多的植株进行测定,取平均值.为避免阳光随时间变化,在测定前利用 LI-6400 测出现有阳光强度,然后利用人工光源进行测定,分别测定不同处理植株旗叶的净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)等指标.

1.3.2 光响应曲线的测定 在灌浆中期选择 2 天无风晴天(2015 年 5 月 22 日—23 日)进行测定,取平均值.采用 LI-6400 人工光源提供 0~2000 μmol·m⁻²·s⁻¹(光强设定为:0、20、40、60、80、100、120、

140、180、200、400、600、800、1000、1200、1500、1800、2000 μmol·m⁻²·s⁻¹)的不同光强,每个光强下适应 1~2 min 后测定,重复 3 次.

1.3.3 冬小麦产量测定 冬小麦成熟期每处理取 2 m²地上部植株全部收获,重复 3 次,自然风干后测定生物产量和经济产量;在田间随机取代表性 30 株小麦进行考种,考察其穗粒数和千粒重,重复 3 次.

1.3.4 模拟方程 利用非直角双曲线(non-rectangular hyperbola equation)模型分析叶片净光合速率(P_n)与光合有效辐射(PAR)之间的关系^[17-18],其模拟公式为:

$$P_n = \{ Q \cdot PAR + P_{\max} - SQRT [(Q \cdot PAR + P_{\max}) (Q \cdot PAR + P_{\max}) - 4Q \cdot PAR \cdot K \cdot P_{\max}] \} / 2K - R_d$$

式中: P_{\max} 表示最大净光合速率; Q 表示表观量子效率; K 表示光响应曲线曲角; R_d 表示暗呼吸速率.

光补偿点(light compensation point, LCP)和光饱和点(light saturation point, LSP)的模拟公式为:

$$LCP = R_d / Q$$
$$LSP = (P_{\max} + R_d) / Q$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 18.0 软件处理数据和统计分析,以 Microsoft Excel 2013 和 SigmaPlot 12.5 软件绘图.利用 SPSS 18.0 软件进行方差分析和 LSD 差异法比较样本平均数差异的显著性.

2 结果与分析

2.1 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶净光合速率日变化的影响

不同耕作方式下冬小麦灌浆期旗叶净光合速率日变化均呈双峰曲线变化趋势(图1),且各处理都

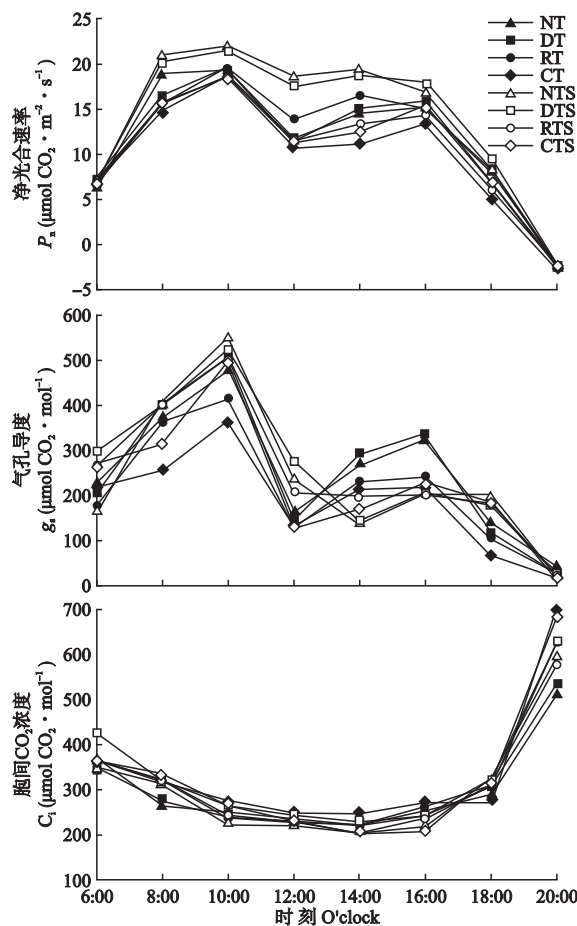


图1 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶净光合速率、气孔导度和胞间CO₂浓度日变化的影响

Fig.1 Effects of tillage practices on the daily variation of net photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration of flag leaf at grain filling stage of winter wheat.

NT: 免耕秸秆不还田 No-till with residue removal; DT: 深松秸秆不还田 Subsoiling with residue removal; RT: 旋耕秸秆不还田 Rotary tillage with residue removal; CT: 翻耕秸秆不还田 Plow tillage with residue removal; NTS: 免耕秸秆还田 No-till with residue retention; RTS: 旋耕秸秆还田 Rotary tillage with residue retained; DTS: 深松秸秆还田 Subsoiling with residue retained; CTS: 翻耕秸秆还田 Plow tillage with residue retained. 下同 The same below.

存在不同程度的光合午休现象.各耕作方式对净光合速率日变化的影响均表现为早晨和傍晚最低,但2个时间段各处理旗叶的净光合速率差异不显著;净光合速率均在10:00左右达到最大值,上午整体净光合速率要高于下午,秸秆还田处理均高于相对应的秸秆不还田处理.不同耕作方式冬小麦净光合速率在6:00—10:00之间上升较快,NT、NTS和DTS的净光合速率在8:00时几乎达到最大值,NTS和DTS的净光合速率在10:00—12:00之间降幅较小,12:00—14:00之间的光合午休现象不明显,净光合曲线峰值不明显,其他各处理净光合速率在10:00—12:00之间降低极为显著,出现明显的光合

午休现象.10:00 NTS处理的净光合速率最大,分别比NT、DT、RT、CT、DTS、RTS和CTS高13.6%、12.6%、16.9%、18.1%、2.3%、11.6%和11.4%;12:00净光合速率也以NTS处理最大,分别比NT、DT、RT、CT、DTS、RTS和CTS高58.5%、66.2%、60.9%、72.8%、6.9%、35.0%和69.2%;16:00 DTS的净光合速率最大,依次比NT、DT、RT、CT、NTS、RTS和CTS高6.3%~33.9%;NTS处理的日平均净光合速率最大,DTS次之,RTS再次,CT处理最小,其他各处理的大小顺序依次为NT、DT、CTS和RT.

2.2 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶气孔导度日变化的影响

耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶气孔导度日变化的影响与净光合速率变化趋势相同,也呈双峰曲线(图1),各处理两个峰值分别出现在10:00和16:00.除14:00、16:00和20:00左右秸秆还田各处理的气孔导度比相应秸秆不还田处理低外,其他各时间段秸秆还田处理的气孔导度均比相应秸秆不还田处理高.在6:00—10:00之间,不同处理的气孔导度均呈直线上升趋势,10:00左右达到最大值;在10:00—14:00之间,NTS、DTS和RTS3个处理的气孔导度呈逐渐下降趋势,14:00左右时降到最低,而其他各处理的气孔导度均在10:00—12:00之间下降剧烈,12:00左右降到最低,12:00—14:00之间缓慢回升.第一个峰值NTS处理的气孔导度最大,DTS次之,RTS再次,CT处理最小,其他处理位于4个处理之间,其大小顺序依次为DT、CTS、NT和RT;12:00 DTS处理的气孔导度最大,分别比NTS、RTS、CTS、NT、DT、RT和CT高68.2%、91.7%、114.0%、113.1%、16.9%、32.8%和119.2%;第二个峰值各耕作处理对冬小麦灌浆期旗叶气孔导度的影响大小顺序为DT>NT>RT>CTS>CT>DTS>RTS>NTS;DTS处理的日平均气孔导度最大,依次比DT、NT、RTS、NTS、CTS、RT和CT高2.2%~39.8%.

2.3 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶胞间CO₂浓度日变化的影响

不同耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶胞间CO₂浓度的影响趋势相同(图1),均呈先降低后升高的双峰曲线变化趋势,最大值分别出现在6:00和20:00左右,最小值出现在14:00左右,除早晨和傍晚秸秆还田条件下各耕作处理胞间CO₂浓度高于相应秸秆不还田外,其他各时间段均表现为秸秆还田条件下各耕作处理低于相对应秸秆不还田处理.在6:00和20:00时,不同耕作处理对冬小麦灌浆期

旗叶胞间 CO_2 浓度影响的大小顺序分别表现为:CT>NT>CTS>DTS>RTS>DT>NTS>RT 和 CT>CTS>RTS>DTS>NTS>RT>DT>NT;14:00 CT 处理的胞间 CO_2 浓度最大,比 NT、DT、RT、CTS、RTS、DTS 和 NTS 高 8.1%~25.7%;日平均胞间 CO_2 浓度的大小顺序为 CT>CTS>RTS>RT>DTS>NTS>NT>DT.

2.4 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率日变化的影响

各耕作处理冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率日变化规律除 DTS、RTS 和 RT 处理呈先升高后降低的单峰曲线变化趋势外,其他处理的蒸腾速率日变化均呈“双峰曲线”,且各处理峰值出现的时间存在较大差异,除 CT 和 CTS 处理冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率日变化的两个峰值明显外,其他处理第二个峰值均不明显(图2).DTS、RTS 和 RT 处理的冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率的最大值分别出现在 10:00、10:00 和 12:00 左右;CTS 处理的两个峰值分别出现在 12:00 和 16:00 左右,其他 4 个处理两个峰值分别出现在 10:00 和 14:00 左右.10:00 CT 处理的蒸腾速率最大,NTS 次之,DTS 再次,DT 处理最小,其他处理大小顺序依次为 RTS、CTS、RT 和 NT;12:00 RT 处理的蒸腾速率最大,分别比 NT、DT、CT、NTS、DTS、RTS 和 CTS 高 41.2%、42.7%、16.6%、80.1%、52.8%、14.8% 和 1.1%;16:00 各耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率影响的大小顺序表现为 CT>RT>CTS>NT>RTS>NTS>DT>DTS.CT 处理的日平均

蒸腾速率最大,依次比 RTS、CTS、RT、NT、NTS、DTS 和 DT 高 11.7%~31.4%.

2.5 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶光响应曲线的影响

利用非直角双曲线模型模拟的冬小麦灌浆中期旗叶净光合速率与光合有效辐射的关系可以看出(图3),各耕作处理在不同光强下的最大净光合速率对光强的响应呈现米氏响应规律.光照强度由 0 增加到 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各耕作处理冬小麦灌浆中期旗叶净光合速率呈直线迅速增长趋势,之后净光合速率增加缓慢,光照强度为 $400\sim600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,冬小麦旗叶净光合速率呈曲线式缓慢增长,光照强度大于 $600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,冬小麦旗叶净光合速率趋于平稳.

不同耕作方式下光响应曲线拟合较好(表2),均达到显著水平($P<0.05$),且秸秆还田条件下各耕作处理的光响应曲线拟合程度优于秸秆不还田处理,各耕作方式对光响应曲线参数的响应效应存在一定差异.由模拟的最大净光合速率可以看出,DTS 处理的最大净光合速率(P_{max})最大,为 $19.24\ \mu\text{mol}\ \text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,分别是 NT、DT、RT、CT、NTS、RTS 和 CTS 处理的 1.20、1.22、1.20、1.22、1.01、1.12 和 1.04 倍.模拟的暗呼吸速率(R_d)大小顺序为 CTS>RT>CT>DT>DTS>NT>NTS>RTS.光照强度小于 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各处理的表观量子效率(Q)为 DTS>

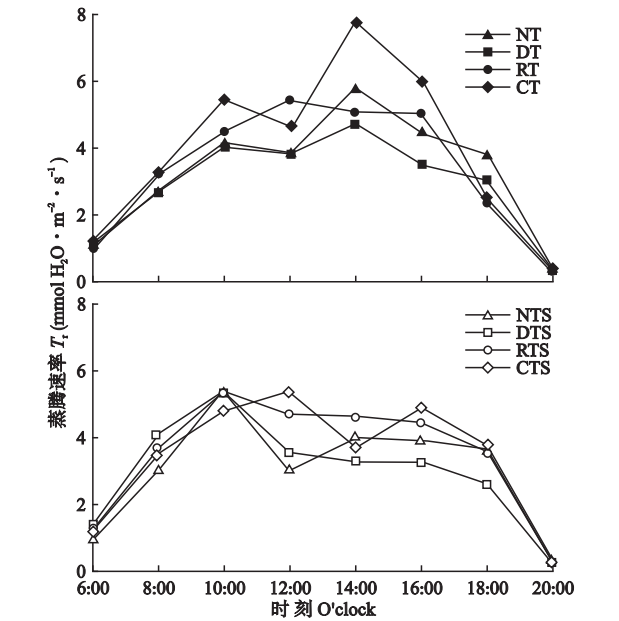


图2 耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率日变化的影响
Fig.2 Effects of tillage practices on the daily variation of transpiration rate of flag leaf at grain filling stage of winter wheat.

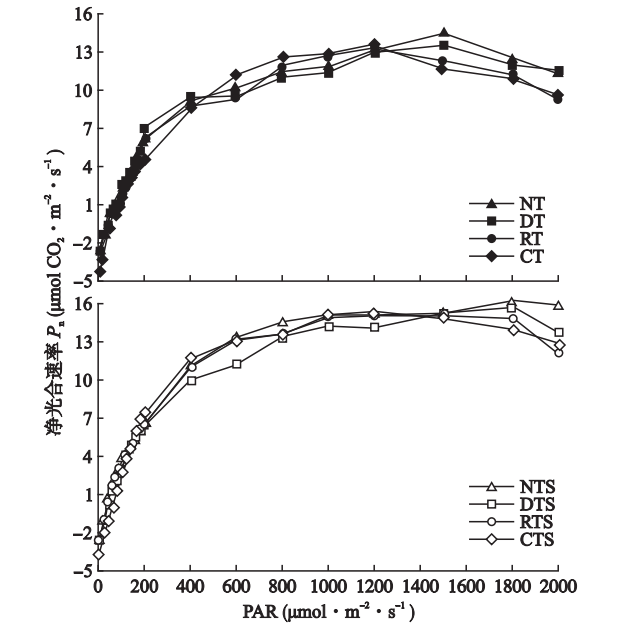


图3 不同耕作方式下冬小麦灌浆中期旗叶净光合速率的光响应
Fig.3 Responses of P_n to light in winter wheat flag leaves at middle filling stage under different tillage practices.

表 2 不同耕作方式下冬小麦灌浆中期旗叶光响应曲线模拟参数
Table 2 Simulation parameters of light response curves in winter wheat flag leaves at middle filling stage under different tillage practices

处理 Treat- ment	P_{\max} ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	K	Q ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R_d ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LSP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	LCP ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
NT	16.029	0.651	0.056	2.333	327.89	41.66	0.984 *
DT	15.814	0.710	0.058	2.740	319.90	47.24	0.986 *
RT	16.075	0.803	0.058	3.673	340.48	63.33	0.971 *
CT	15.832	0.896	0.049	3.541	395.37	72.27	0.971 *
NTS	19.090	0.661	0.058	2.026	364.07	34.93	0.999 *
DTS	19.240	0.337	0.069	2.461	314.51	35.67	0.994 *
RTS	17.165	0.769	0.059	1.974	324.39	33.46	0.983 *
CTS	18.459	0.878	0.067	3.754	331.54	56.03	0.992 *

* $P<0.05$.

CTS>RTS>NTS = DT = RT>NT>CT. 光响应曲线的曲角 (K) 以 CT 处理最大, CTS 其次, DTS 最小, 其他处理位于 3 处理之间. 不同处理的光饱和点 (LSP) 和光补偿点 (LCP) 大小顺序分别为: CT>NTS>RT>CTS>NT>RTS>DTS>DT 和 CT>RT>CTS>DT>NT>DTS>NTS>RTS.

2.6 耕作方式对冬小麦产量和经济系数的影响

秸秆还田与不还田对冬小麦有效穗数、籽粒产量和经济系数的影响较大 (表 3). CTS 处理的有效穗数最大, 分别比 NTS、DTS、RTS、NT、DT、RT 和 CT 高 33.1%、9.2%、9.3%、21.5%、13.0%、14.0% 和 3.5%, 方差分析结果表明, 除 DTS 和 NTS 两处理无显著差异外, 其他各处理之间均存在显著 ($P<0.05$) 和极显著差异 ($P<0.01$). DTS 处理的籽粒产量最高, 分别比 NTS、RTS、CTS、NT、DT、RT 和 CT 处理高 10.8%、1.3%、2.1%、5.4%、11.9%、12.4% 和 12.6%.

表 3 耕作方式对冬小麦产量和经济系数的影响
Table 3 Effects of tillage practices on yield and harvest index of winter wheat

处理 Treatment	有效穗数 Spike number ($\times 10^4 \text{ spike} \cdot \text{hm}^{-2}$)	籽粒产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	经济系数 Harvest index
NT	674f	8621c	0.54a
DT	725d	8121e	0.48c
RT	712e	8087e	0.51b
CT	791b	8070e	0.48c
NTS	615g	8205d	0.53ab
DTS	750c	9088a	0.53ab
RTS	749c	8971b	0.53ab
CTS	819a	8905b	0.50bc

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level.

除 DT 和 RT 间、RT 和 CT 间在 0.05 水平下以及 DT、RT 和 CT 之间在 0.01 水平下无显著差异外, 其他处理间均存在显著差异; 不同耕作处理的经济系数大小顺序为 NT>NTS = DTS = RTS>RT>CTS = DT = CT.

3 讨 论

土壤耕作可改变土壤物理结构, 从而引起土壤水、肥、气、热等的变化, 进而间接影响作物生长发育和光合产物合成、积累及转运. 秸秆还田不仅可以改善土壤肥力状况, 还可降低土壤水分蒸发, 起到一定的蓄水保墒作用, 从而影响土壤微生物数量、种类和酶活性, 进而影响作物光合生产能力^[19]. 本研究结果表明, 秸秆还田处理的光合日变化和光响应曲线拟合程度均优于秸秆不还田处理, 且各处理对不同光合生理指标影响的变化趋势基本相同, 但其峰值出现的时间与前人的研究结果存在一定差异. 这主要可能是耕作方式对土壤的蓄水保墒能力和小麦群体冠层温度的影响存在差异所引起的. 各耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶净光合速率和气孔导度日变化的影响均呈双峰曲线变化趋势, 说明各处理都存在光合午休现象. 这与侯贤清等^[20]和王维等^[21]研究结果相同. 不同耕作处理冬小麦灌浆期旗叶净光合速率和气孔导度的第一个峰值均出现在 10:00 左右, 下午净光合速率的峰值除 NTS、DTS 和 RTS 出现在 14:00 左右, 其他各处理的净光合速率峰值和气孔导度的第二个峰值均出现在 16:00 左右, 下午峰值出现的时间与前人研究结果存在一定差异^[21]. 各耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶胞间 CO_2 浓度日变化的影响均呈“广口 V 型”双峰曲线变化, 最大值分别出现在 6:00 和 20:00 左右, 最小值出现 14:00 左右; 各耕作处理蒸腾速率日变化规律除 DTS、RTS 和 RT 呈先升高后降低的单峰曲线变化趋势外, 其他各处理冬小麦灌浆期旗叶蒸腾速率日变化均呈双峰曲线变化规律, 其峰值出现的时间存在一定差异. 这与侯贤清等^[20]、王维等^[21]的研究结果有所不同, 可能是由于耕作方式和秸秆还田引起了土壤水分和冬小麦群体质量的不同而造成峰值出现的时间点不同. 各处理冬小麦群体净光合速率在 8:00—10:00 增加较快, 而 14:00—16:00 之间变化较平缓, 且上午净光合速率大于下午, 与房清龙等^[14]的研究结果相同. 从各时间点的净光合速率、气孔导度、日平均光合速率和日平均气孔导度可以看出, 秸秆还田耕作处理均高于秸秆不还田处理. 前人研究表明, 长期免

耕覆盖可有效提高土壤的蓄水保墒能力和光能截获能力,从而进一步提高小麦叶片的净光合速率、水分利用效率及干物质积累量^[22],本研究结果也可能是因为 NTS 处理的土壤水分和土壤养分较适宜,从而促进了光合作用提高、灌浆后期干物质的积累和转化。

低光照强度下,植物净光合速率对光照强度的响应曲线是评价植物光合特性的强有力工具^[23]。本研究对冬小麦灌浆中期旗叶光合曲线的拟合得出,表观量子效率(Q)为 0.049~0.069,小于理论上的最大值(0.08~0.125^[24]),为 DTS>CTS>RTS>NTS=DT=RT>NT>CT。各处理模拟的不同耕作方式下最大净光合速率的大小顺序依次为: DTS、NTS、CTS、RTS、RT、NT、CT 和 DT,由于拟合曲线的 $P_{n\max}$ 并不是最佳条件的 $P_{n\max}$,只是各耕作处理下的平均 $P_{n\max}$,而 $P_{n\max}$ 主要是由羧化速率决定的,即由最大同化力决定,因此与营养状况及由温度决定的酶活性有密切关系^[25],从而在一定程度上说明了各耕作方式对土壤质量改变的优劣程度和大小顺序。植物光补偿点和光饱和点的高低反映了其对弱光和强光适应能力的强弱^[16]。本研究不同处理的光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)大小顺序分别为:CT>NTS>RT>CTS>NT>RTS>DTS>DT 和 CT>RT>CTS>DT>NT>DTS>NTS>RTS。这表明 NTS、DTS 和 NT 处理的光饱和点和光补偿点均较低,即增强了对弱光的利用能力。

吴金芝等^[26]与韩宾等^[27]研究认为,免耕覆盖和深松覆盖能够提高植株干物质积累量,进一步增加对小麦籽粒源的供应,从而提高小麦穗粒数和千粒重,获得较高产量。侯贤清等^[20]对 3 年轮耕试验结果比较分析发现,两年深松一年免耕和两年免耕一年深松与传统耕作相比分别增产 12.0%和 6.9%。本研究表明,CTS 处理的有效穗数最大,CT 处理次之,NTS 处理最小,而籽粒产量以 DTS 处理最高,RTS 次之,CT 最小。这一结果与吴金芝等^[20,25-26]的研究结果相同。由于免耕播种质量较差,致使 NTS 的出苗率过低,加之秸秆覆盖于地表进一步影响冬小麦出苗,从而造成有效穗数极显著($P<0.01$)低于其他处理。虽然试验为保证免耕处理的基本苗,加大了播种量,但 NTS 和 NT 处理由于秸秆覆盖或土壤机械阻力和土壤通气较差,其基本苗仍然偏少。基本苗较低影响了冬小麦的有效穗数,从而影响了产量形成。而 DTS 增加了土壤水分,利于冬小麦群体的建成,而且还增强了花后旗叶光合特性,加之该处理的有效穗数较高,进而提高了该处理的产量。综合籽粒

产量、经济系数和有效穗数可以看出,秸秆还田处理冬小麦干物质向籽粒转移量比秸秆不还田处理明显,特别是 NTS 灌浆期冬小麦干物质向籽粒转移量更为明显。综合以上论述得出,可以通过改进免耕播种机具,提高免耕秸秆还田处理的出苗率,以保证冬小麦有效穗数的形成,为冬小麦产量的提高奠定基础。

不同耕作方式对作物生长和环境的影响具有较强的累积效应,甚至同一耕作方式对光合特性的影响在不同年际间也存在着一定差异^[12]。本研究是在连续进行了 6 年耕作方式和同一冬小麦品种的长期定位试验处理基础上测定,其研究结果在一定程度上能够反映耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶光合特性日变化和光响应曲线的影响规律。但不同耕作方式对冬小麦光合特性影响的原因可能与其测定时间、群体生长状况及环境之间的差异有关。所以,有关耕作方式对冬小麦灌浆期旗叶光合日变化规律及其光响应曲线调控的影响机制还有待于进一步研究。

本研究表明,秸秆还田条件下各耕作处理的光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率的日变化规律均优于秸秆不还田处理。利用非直角双曲线模型拟合的不同耕作方式下光响应曲线计算得出的特征参数可以看出,各耕作方式的光响应曲线拟合较好,均达显著水平($P<0.05$),且秸秆还田条件下各耕作处理的光响应曲线拟合程度优于秸秆不还田处理。综合各耕作处理的光合性能和光响应曲线的分析可以看出,NTS、DTS 和 NT 处理对弱光的利用能力较强,灌浆期的日平均净光合速率较大,灌浆期冬小麦干物质向籽粒的转移量较高,利于产量的形成。产量测定结果表明,DTS 处理的籽粒产量最高,分别比 NTS、RTS、CTS、NT、DT、RT 和 CT 处理高 10.8%、1.3%、2.1%、5.4%、11.9%、12.4%和 12.6%。通过光合特性、光响应曲线、籽粒产量和生态效益的分析可以看出,NTS 和 DTS 处理可延长冬小麦灌浆期的光合时间,提高净光合速率,减小“光合午休现象”,利于产量的形成。由于 NTS 处理的小麦群体数量较少,建议在生产上适当加大播种量和采用分蘖能力较强的小麦品种,在一定程度上可以弥补因出苗率差而导致的减产,进而充分发掘免耕秸秆还田处理的增产潜力。

参考文献

- [1] Yang XL, Gao WS, Shi QH, *et al.* Impact of climate change on the water requirement of summer maize in the

- Huang-Huai-Hai farming region. *Agricultural Water Management*, 2013, **124**: 20–27
- [2] Zhen L-S (甄丽莎), Gu J (谷洁), Gao H (高华), *et al.* Effect of straws, manure and chemical fertilizer on soil properties and crop yields. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2012, **32**(9): 1811–1818 (in Chinese)
 - [3] Gao W-S (高旺盛). Development trends and basic principles of conservation tillage. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(12): 2702–2708 (in Chinese)
 - [4] Chen D-D (陈冬冬), Gao W-S (高旺盛), Chen Y-Q (陈源泉). Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2007, **23**(10): 143–149 (in Chinese)
 - [5] Lian H-B (练宏斌), Huang G-B (黄高宝), Xie J-H (谢军红), *et al.* Effects of different tillage methods on flag leaf photosynthetic characteristics of spring wheat in semi-arid area. *Journal of Gansu Agricultural University* (甘肃农业大学学报), 2009, **44**(1): 64–68 (in Chinese)
 - [6] Yang X (杨雪), Pang H-C (逢焕成), Li Y-B (李轶冰), *et al.* Effects of deep rotary sub-soiling tillage on the physical properties and crop growth of the sticky loamy soil in North China. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2013, **46**(16): 3401–3412 (in Chinese)
 - [7] Huang G-B (黄高宝), Li L-L (李玲玲), Zhang R-Z (张仁陟), *et al.* Effects of no-tillage with stubble retention on soil temperature of rainfed spring wheat field. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2006, **24**(5): 1–4 (in Chinese)
 - [8] Glab T, Kulig B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*). *Soil and Tillage Research*, 2008, **99**: 169–178
 - [9] Wangder MM, Bidart MG, Aref S. Tillage impacts on depth distribution of total particulate organic matter in three Illinois soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**: 1704–1711
 - [10] Li Y-J (李玉洁), Wang H (王慧), Zhao J-N (赵建宁), *et al.* Effect of tillage methods on soil physico-chemical properties and biological characteristics in farmland: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(3): 939–948 (in Chinese)
 - [11] Kong F-L (孔凡磊), Yuan J-C (袁继超), Zhang H-L (张海林), *et al.* Effect of tillage practice on growth and development and yield of winter wheat in double cropping area in North China. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2013, **39**(9): 1612–1618 (in Chinese)
 - [12] Li Y-J (李友军), Wu J-Z (吴金芝), Huang M (黄明), *et al.* Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(12): 44–48 (in Chinese)
 - [13] Wang J-L (王建林), Qi H (齐华), Song H (宋辉). Characteristic of diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different nitrogen applications. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2008, **39**(6): 643–647 (in Chinese)
 - [14] Fang Q-L (房清龙), Lin Q (林琪), Liu Y-G (刘义国), *et al.* Effects of conservation tillage on diurnal variation of photosynthesis in grain filling stage and yield of winter wheat. *Journal of Agriculture* (农学学报), 2012, **2**(12): 1–6 (in Chinese)
 - [15] Huang M (黄明), Wu J-Z (吴金芝), Li Y-J (李友军), *et al.* Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2009, **25**(1): 50–54 (in Chinese)
 - [16] Li Y-J (李友军), Wu J-Z (吴金芝), Huang M (黄明), *et al.* Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of leaf and water use efficiency in winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(12): 44–48 (in Chinese)
 - [17] Tershima I, Saeki T. A new model for leaf photosynthesis incorporating the gradients of light environment and of photosynthetic properties of chloroplasts within a leaf. *Annals of Botany*, 1985, **56**: 489–499
 - [18] Matorin DN, Biscoe PV. A model for C3 leaves describing the dependence of net photosynthesis on irradiance. *Journal of Experimental Botany*, 1980, **120**: 29–39
 - [19] Zhao Y-L (赵亚丽), Guo H-B (郭海斌), Xue Z-W (薛志伟), *et al.* Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26**(6): 1785–1792 (in Chinese)
 - [20] Hou X-Q (侯贤清), Jia Z-K (贾志宽), Han Q-F (韩清芳), *et al.* Effects of rotational tillage on flag leaf photosynthetic characteristics and yield after anthesis of winter wheat in arid areas of southern Ningxia. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2011, **44**(15): 3108–3117 (in Chinese)
 - [21] Wang W (王维), Han Q-F (韩清芳), Lv L-X (吕丽霞), *et al.* Effects of different tillage patterns on photosynthetic characteristics and yield of dryland wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2013, **31**(1): 20–26 (in Chinese)
 - [22] Wang J-B (王健波), Yan C-R (严昌荣), Liu E-K (刘恩科), *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. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(2): 296–305 (in Chinese)
 - [23] Olsson T, Leverenz JW. Non-uniform stomata closure and the apparent convexity of the photosynthetic photon flux density response curve. *Plant, Cell & Environment*, 1994, **17**: 701–710

[24]

Sun X-S (孙旭生), Lin Q (林 琪), Zhao C-X (赵长星), *et al.* Effects of nitrogen application rate on light-response curves of flag leaves in super-high yielding winter wheat at grain filling stage. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(3): 1428–1437 (in Chinese)

[25]

Lu P-L (陆佩玲), Luo Y (罗 毅), Liu J-D (刘建栋), *et al.* Characteristic parameters of light response curves of photosynthesis of winter wheat in north China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 2000, **11**(2): 236–241 (in Chinese)

[26]

Wu J-Z (吴金芝), Huang M (黄 明), Li Y-J (李友军), *et al.* Effects of different tillage systems on the photosynthesis functions, grain yield and WUE in winter

wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2008, **26**(5): 16–21 (in Chinese)

[27]

Ha B (韩 宾), Li Z-J (李增嘉), Wang Y (王芸), *et al.* Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(2): 48–53 (in Chinese)

作者简介 张向前,男,1984 年生,博士研究生.主要从事保护性耕作与农田生态研究. E-mail: zhangxiangqian_2008@126.com

责任编辑 张凤丽

张向前, 赵秀玲, 王钰乔, 等. 耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响. 应用生态学报, 2017, **28**(3): 885–893

Zhang X-Q, Zhao X-L, Wang Y-Q, *et al.* Effects of tillage practices on photosynthetic performance diurnal variation during filling stage and grain yield of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(3): 885–893 (in Chinese)