

免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米 光合性能和产量的效应

鲁悦^{1,2}, 鲍雪莲^{2,3*}, 霍海南², 杨雅丽^{2,3}, 赵月², 解宏图^{2,3}, 梁超^{2,3}, 何红波^{2,3}

(1 辽宁大学生命科学院, 辽宁沈阳 110036; 2 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁沈阳 110016;

3 辽宁省现代保护性耕作与生态农业重点实验室, 辽宁沈阳 110016)

摘要:【目的】探究东北黑土长期免耕及不同秸秆覆盖还田量下玉米光合性能及产量的变化规律, 为科学应用免耕秸秆覆盖还田技术提供理论支撑。【方法】东北黑土区保护性耕作定位试验始于 2007 年, 设置 5 个处理, 分别为传统垄作秸秆不还田(对照, CT)及免耕配合当季收获玉米秸秆量的 0%、33%、67% 和 100% (NT-0、NT-33%、NT-67%、NT-100%) 还田。于 2021 年玉米苗期、拔节期和抽雄期, 测定玉米叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)等光合参数, 以及叶绿素含量和叶面积; 于成熟期, 测定籽粒产量及其构成因素。【结果】与 CT 处理相比, 4 个免耕秸秆覆盖处理不同程度地提高了苗期的 Pn, 以及拔节期和抽雄期玉米叶片的 Pn、Gs 和 Tr; NT-67% 和 NT-33%、NT-100% 处理还显著降低了拔节期和抽雄期的胞间二氧化碳浓度, 显著提升了抽雄期叶片的叶绿素含量 ($P < 0.05$)。NT-100% 处理在拔节期和抽雄期的光合效率最高, 光合性能显著优于其他处理, NT-67% 处理有个别指标略低于 NT-100%, 但仍与 CT、NT-0 和 NT-33% 处理差异显著。免耕结合秸秆覆盖还田提高了玉米穗的行粒数、百粒重和籽粒产量, NT-33%、NT-67%、NT-100% 处理的籽粒产量均显著高于 NT-0 和 CT 处理, 而后二者间差异不显著。净光合速率与产量之间存在显著正相关关系 ($P < 0.01$)。【结论】免耕结合秸秆覆盖还田能够提高玉米抽雄期的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 降低玉米光合作用的非气孔限制, 提高对胞间 CO₂ 的利用能力。秸秆覆盖量为 67%~100% 时, 提高净光合速率、叶绿素含量以及玉米行粒数、籽粒产量的效果突出, 是东北黑土区较为理想的耕作模式。

关键词: 免耕; 秸秆覆盖还田量; 玉米; 光合性能; 产量

Effects of different amounts of stover mulching on improving photosynthetic characteristics and yield of maize in Mollisol of Northeast China under long-term no-tillage

LU Yue^{1,2}, BAO Xue-lian^{2,3*}, HUO Hai-nan², Yang Ya-li^{2,3}, ZHAO Yue², XIE Hong-tu^{2,3}, LIANG Chao^{2,3}, HE Hong-bo^{2,3}

(1 College of Life Sciences, Liaoning University, Shenyang, Liaoning 110036, China; 2 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China; 3 Key Laboratory of Modern Conservation Tillage and Ecological Agriculture, Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: 【Objectives】 This study investigated maize yield and photosynthetic characteristics under the influence of stover mulching and long-term no-tillage in the mollisol of Northeast China. We aim to propose a suitable no-tillage and stover mulching technology system in the study region. 【Methods】 The conservation tillage field experiment started in 2007 with a single maize cropping system. The treatments included conventional tillage (CT) and no-tillage combined with stover mulching at 0%, 33%, 67%, and 100% of the harvested maize stovers, denoted as NT-0, NT-33%, NT-67%, and NT-100%, respectively. We measured the net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr), chlorophyll content, and leaf area at the maize

收稿日期: 2022-09-23 接受日期: 2023-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977048); 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28090100); 辽宁省揭榜挂帅项目(2021JH1/10400039-2); 沈阳市科学技术计划项目(21-116-3-03, 21-109-3-03)。

联系方式: 鲁悦 E-mail: 18846156285@163.com; * 通信作者 鲍雪莲 E-mail: baosl@iae.ac.cn

seedling, jointing, and tasselling stages in 2021. Maize yield and yield components were measured at the maturity stage. **【 Results 】** Compared with CT, the four no-tillage treatments improved the Pn of seedling stage, Pn, Gs, and Tr at the jointing stage and tasseling stage. NT-67%, NT-33% and NT-100% ($P<0.05$) decreased intercellular CO_2 concentration at the jointing or tasselling stages, while NT-67% and NT-100% maintained higher chlorophyll content at the tasselling stage. NT-100% recorded the highest photosynthetic efficiency at the jointing and tasselling stages, followed by NT-67%, with ($P<0.05$) higher values than CT, NT-0, and NT-33%. All the NT with stover mulching treatments (NT-33%, NT-67%, NT-100%) increased the kernel number per row, 100-kernel-weight, and grain yield, and there was no significant difference ($P>0.05$) in yield between NT-0 and CT. The Pn values were significantly ($P<0.01$) correlated with maize yield. **【 Conclusions 】** No-tillage combined with stover mulching is effective in increasing chlorophyll content, Pn, Gs, Tr, and the capacity of utilize intercellular CO_2 at the tasselling stage, which enhances maize yield. No-tillage combined with 67%–100% of the harvested maize stover showed a good potential for maize net photosynthetic efficiency, making it a promising approach under the no-tillage condition in the Mollisol of Northeast China.

Key words: no-tillage; quantity of stover mulching; maize; photosynthetic characteristics; yield

东北黑土地是我国最重要的商品粮生产基地, 粮食产量和调出量分别占全国总量的 1/4 和 1/3, 已成为我国粮食生产的“稳定器”和“压舱石”^[1-2]。但是, 长期传统垄作模式下重用轻养和不平衡的培肥措施导致黑土区总体肥力降低, 生产力不断下降^[3-4], 制约农业生产的可持续发展。目前, 以秸秆覆盖免耕为核心的保护性耕作是耕地保育和粮食产能提升的有效措施。此外, 东北地区也是我国最大的玉米秸秆产区, 占全国总产量的 34.6%^[5]。合理的耕作方式, 高效利用玉米秸秆资源对于稳产增产、资源节约、环境保护及农民增收十分必要。

光合作用是作物产量形成的物质基础, 籽粒产量大部分直接或间接来源于光合作用。叶片是植物进行光合作用的主要部位, 产量的增加与更优的光合性能、更高的叶绿素含量和更适宜的叶面积有关。耕作方式可以显著影响作物的光合性能^[6]。免耕秸秆覆盖还田作为一种保护性耕作措施, 通过调节环境要素^[7-8]影响光合性能, 进而影响作物生长和产量构成^[9-11]。Zhai 等^[12]经两年研究发现, 免耕增加了玉米光合作用的能力, 包括净光合速率和叶绿素含量等。Liu 等^[13]研究发现, 在中国东北黑土区, 免耕和不同量的秸秆覆盖还田均可改善玉米光合性能, 随着秸秆量的增加, 玉米叶片的光合能力逐步提高, 其中免耕结合 150% 秸秆还田效果最优。叶片叶绿素含量与光合性能紧密相关, 保持较高的叶绿素含量为光合速率提高奠定物质基础, 叶绿素含量在不同的耕作方式下存在显著差异^[14-15]。Zhang 等^[16]研究发现, 玉米叶绿素含量受秸秆覆盖影响显著, 全量秸秆覆盖下叶绿素含量最高。此外, 秸秆覆盖还

田能够增加玉米叶面积, 提高幅度与产量显著正相关^[17]。光合性能的优化、叶绿素含量的提高和叶面积的增加共同促进了玉米的增产。徐欣等^[18]对中国东北黑土区十余年的保护性耕作研究结果表明, 长期免耕秸秆覆盖还田能够提高玉米产量, 且秸秆全量还田处理提高幅度最大。Mhlanga 等^[19]的研究也证实了免耕对于产量的提高作用。

综上, 免耕秸秆覆盖还田改善作物光合性能, 进而提高产量。然而, 玉米光合性能受长期免耕秸秆覆盖还田的影响及其对不同秸秆还田量的响应程度还不明晰。本研究沿生育期的发展, 从光合性能的角度入手, 结合叶绿素含量和叶面积的变化, 对长期免耕结合不同量的秸秆覆盖还田的增产效果开展探究, 通过测定不同耕作方式和秸秆覆盖还田量下玉米的光合性能和产量构成要素, 明确免耕秸秆覆盖还田提高玉米光合性能, 协调产量构成因素间关系的作用, 探究东北黑土区适宜的种植模式和秸秆还田量, 以期为该地区秸秆资源的合理利用与玉米稳产增产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于吉林省四平市梨树县大房身乡高家村 (43°19'N, 124°14'E) 中国科学院沈阳应用生态研究所保护性耕作研发基地, 该基地位于吉林省西南部, 松辽平原中部腹地, 地势平坦, 海拔为 153 m。温带半湿润大陆性季风气候, 年平均气温为 6.9°C, 年降水量为 614 mm, 且主要集中在 6、7、8 月。无

霜期 135~145 天, 年平均日照时数为 2644.2 h, 有效积温 2900°C~3100°C。土壤类型为黑钙土, 土壤质地为壤质黏土。试验开始时耕层 (0—20 cm) 土壤理化性质为 pH 7.1、有机碳 11.3 g/kg、全氮 1.2 g/kg、全磷 0.38 g/kg、全钾 24.3 g/kg, 砂粒、粉粒和黏粒比例分别为 24.81%、47.65% 和 27.54%。试验期间月平均降水量和月平均气温变化见图 1。

1.2 试验设计

田间定位试验始于 2007 年, 试验开始前样地经多年传统垄作, 且以玉米单作为主。试验共设置 5 个处理: 传统垄作 (CT)、免耕秸秆不还田 (NT-0)、免耕秸秆 33% 还田 (NT-33%)、免耕秸秆 67% 还田 (NT-67%) 和免耕秸秆 100% 还田 (NT-100%), 每个处理 4 个重复, 共 20 个试验小区, 每个小区面积为 8.7 m×30 m, 随机区组排列。传统垄作处理为秋季移除全部秸秆, 不进行秸秆覆盖还田, 灭茬旋耕 (深度约 18~25 cm), 起垄作业。免耕秸秆覆盖还田处理为秋季收获留茬约 30 cm, 播种前将玉米秸秆按照不同处理所需还田量 (每年全量秸秆还田量约为 7500 kg/hm², 各免耕处理的秸秆还田量分别为 0%、33%、67% 和 100%) 覆于土壤表面。玉米品种为富民 58, 播种所用机械为德邦大为农机有限公司四行免耕播种机 (型号 2405), 在秸秆覆盖还田的情况下一次性完成精确播种、施肥和镇压作业。各处理均施用稳定性复合肥 (N-P₂O₅-K₂O 为 26-12-12) 920 kg/hm², 折合施氮 (N) 240 kg/hm²、磷 (P₂O₅) 110 kg/hm²、钾 (K₂O) 110 kg/hm²。

1.3 测定指标及其方法

1.3.1 光合参数和叶绿素含量测定 定位试验平稳运行 15 年后, 于 2021 年各小区内均匀选取长势正

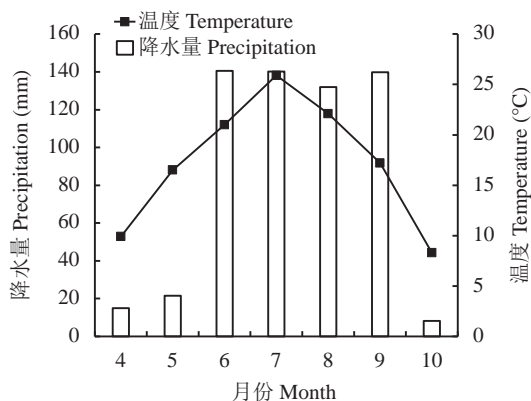


图 1 试验期间月平均降水量和平均气温

Fig. 1 Monthly average precipitation and temperature during the test period

常的 3 株玉米挂牌, 分别在玉米苗期 (6 月 23 日)、拔节期 (7 月 15 日)、抽雄期 (8 月 23 日) 晴朗无云天气 9:00—11:00 和 14:00—17:00 时间段, 使用光合仪 3051D (浙江托普云农公司) 测定玉米叶片净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率, 使用叶绿素仪 SPAD—502PLUS (浙江托普云农公司) 测定叶片 SPAD 值。

1.3.2 叶面积测定 分别于苗期、拔节期和抽雄期使用叶面积仪 YMJ—B (浙江托普云农公司) 测定挂牌植株第 6 片、第 8 片和穗下第 2 片叶的叶面积。

1.3.3 产量及其构成因素测定 在玉米成熟期 (10 月 27 日) 每个小区取 20 m² 样方, 人工计算出有效株数 (有效株数=总株数+双穗数-空秆数)。样方内随机取 20 穗样品, 用于计算平均穗籽粒重及含水量, 按常规方法测定穗行数、行粒数和百粒重, 根据有效株数计算 20 m² 样方内实际产量及单位面积产量 (14% 含水量)。

1.4 数据处理与分析方法

采用 Microsoft Excel 进行试验数据处理和绘制统计图表, 使用 IBM SPSS Statistics 20.0 进行相关统计分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行显著性检验, 并用 Duncan 法进行多重比较 ($P < 0.05$), 采用 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片光合性能的影响

2.1.1 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片净光合速率的影响 在 3 个玉米生育期, 4 个免耕处理的净光合速率均显著高于 CT 处理 ($P < 0.05$, 图 2a)。苗期免耕处理净光合速率以 NT-100% 处理最低, 且显著低于 NT-0 处理, NT-33%、NT-67%、NT-0 处理之间均无显著差异; 拔节期和抽雄期净光合速率均以 NT-100% 处理最高, NT-67% 处理在拔节期与 NT-100% 处理相当, 但抽雄期显著低于 NT-100% 处理 ($P < 0.05$)。

2.1.2 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片气孔导度的影响 苗期 CT、NT-0 和 NT-67% 处理的玉米叶片气孔导度显著高于 NT-33% 和 NT-100% 处理, 拔节期和抽雄期 NT-67% 处理的气孔导度与 NT-100% 处理无显著差异, 但均显著高于 NT-33%、NT-0 和 CT 处理 ($P < 0.05$, 图 2b)。

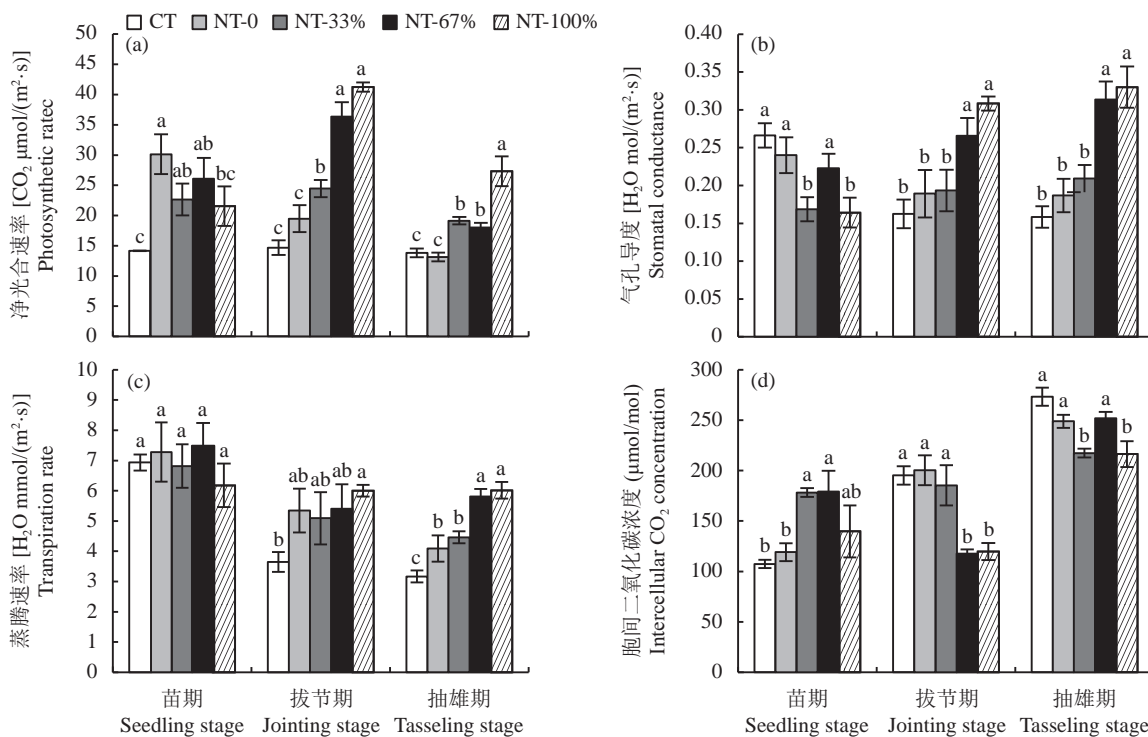


图 2 免耕结合不同量秸秆还田处理下的玉米叶片光合性能

Fig. 2 Photosynthetic index of maize leaf under no-tillage combined with different amounts of stover mulching

注: CT 表示传统垄作; NT-0、NT-33%、NT-67%、NT-100% 分别表示免耕配合秸秆覆盖还田量为收获秸秆的 0%、33%、67% 和 100%。柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CT represent conventional tillage; NT-0, NT-33%, NT-67%, and NT-100% represent the treatment of no-tillage combined with 0%, 33%, 67% and 100% of maize stover mulching. Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same period ($P < 0.05$).

2.1.3 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片蒸腾速率的影响 玉米苗期各处理叶片蒸腾速率无显著差异。拔节期, 4 个免耕处理间蒸腾速率差异不显著, 但 NT-100% 处理的蒸腾速率显著高于 CT 处理 ($P < 0.05$, 图 2c)。抽雄期, NT-100% 和 NT-67% 处理的蒸腾速率显著高于 NT-33% 和 NT-0 处理 ($P < 0.05$), 后二者又显著高于 CT 处理 ($P < 0.05$, 图 2c)。

2.1.4 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片胞间二氧化碳浓度的影响 除苗期外, 玉米胞间二氧化碳浓度基本与净光合速率的变化相反(图 2d)。苗期 3 个免耕秸秆还田处理的胞间二氧化碳浓度均高于 CT 处理, 而拔节期, NT-100% 处理的胞间二氧化碳浓度降低, NT-100% 和 NT-67% 处理均显著低于 NT-0、NF-33% 和 CT 处理 ($P < 0.05$), 抽雄期, NT-33% 和 NT-100% 处理显著低于其他处理。

2.1.5 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶片叶绿素含量的影响 图 3 显示, 在苗期和拔节期, 各处理间叶绿素含量差异不显著; 在抽雄期, NT-100% 和 NT-67% 处理的叶绿素含量显著高于 NT-33%、NT-0

和 CT 处理, 且 NT-33% 处理显著高于 NT-0 处理 ($P < 0.05$), 但 CT 处理与 NT-33% 和 NT-0 处理差异均不显著 ($P > 0.05$)。

综上, 仅仅免耕不能提高玉米叶绿素含量, 而免耕加秸秆覆盖能有效提高抽雄期的光合效率, NT-100% 和 NT-67% 处理的效果又显著高于 NT-33% 处理 ($P < 0.05$)。

2.2 免耕结合不同秸秆还田量对玉米叶面积的影响

图 4 表明, 在玉米苗期(测定第 6 片叶)、拔节期(测定第 8 片叶)和抽雄期(测定穗下第 2 片叶), 叶面积均随生育期的推进而增加, 但各处理间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 免耕结合不同秸秆还田量对玉米产量及其构成因素的影响

如表 1 所示, 免耕结合不同量秸秆覆盖还田对玉米的穗行数无显著影响, 但免耕结合秸秆覆盖还田处理的行粒数显著高于 CT 处理, 且 NT-67% 和 NT-100% 处理显著高于 NT-0 处理 ($P < 0.05$)。NT-100% 和 NT-67% 处理的百粒重显著高于 NT-33% 和

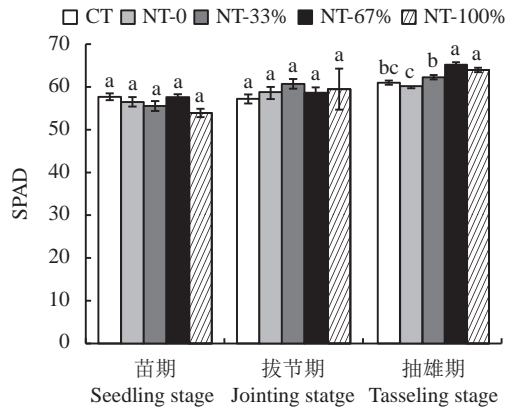


图 3 免耕结合不同量秸秆还田处理下的玉米 SPAD 值
Fig. 3 SPAD value of maize under no-tillage combined with different amounts of stover mulching

注: CT 表示传统垄作; NT-0、NT-33%、NT-67%、NT-100% 分别表示免耕配合秸秆覆盖还田量为收获秸秆的 0%、33%、67% 和 100%。柱上不同小写字母表示同一生育期处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CT represent conventional tillage; NT-0, NT-33%, NT-67%, and NT-100% represent treatment of no-tillage combined with 0%, 33%, 67% and 100% of maize stover mulching. Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same period ($P < 0.05$).

NT-0 处理, 而 NT-33% 和 NT-0 处理显著低于 CT 处理。表现在产量上, NT-100%、NT-67% 和 NT-33% 处理的籽粒产量显著高于 NT-0 和 CT 处理 ($P < 0.05$), 而 NT-0 和 CT 处理间差异不显著。

2.4 籽粒产量与光合效率指标之间的相关性

本研究发现, 净光合速率与气孔导度和蒸腾速率呈极显著正相关, 与胞间 CO_2 浓度显著负相关, 相关系数分别为 0.40、0.47、-0.32, 这表明玉米

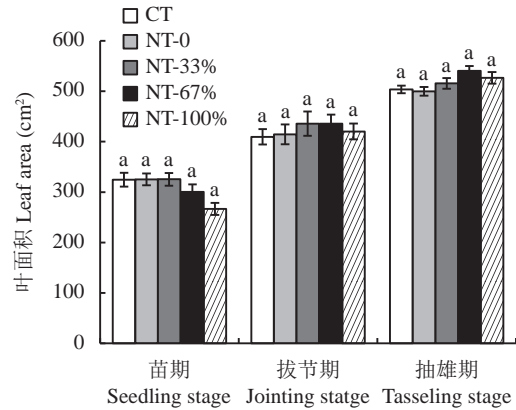


图 4 免耕结合不同量秸秆还田处理下的玉米叶面积
Fig. 4 Leaf area of maize under no-tillage combined with different amounts of stover mulching

注: CT 表示传统垄作; NT-0、NT-33%、NT-67%、NT-100% 分别表示免耕配合秸秆覆盖还田量为收获秸秆的 0%、33%、67% 和 100%。柱上相同小写字母表示同一生育期处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。

Note: CT represent conventional tillage; NT-0, NT-33%, NT-67%, and NT-100% represent the treatment of no-tillage combined with 0%, 33%, 67% and 100% of maize stover mulching. The small letters above the bars indicate no significant difference among treatments in the same period ($P > 0.05$).

4 个关键光合指标之间具有相关性, 且免耕结合秸秆覆盖还田通过提高玉米叶片胞间 CO_2 的利用率, 从而提高其净光合速率。籽粒产量与净光合速率呈显著正相关, 相关系数为 0.75, 与叶绿素含量、叶面积间均不存在显著的相关性, 这表明本研究测定指标中净光合速率对产量的影响最大, 免耕结合秸秆覆盖还田改善了玉米的光合性能, 提高了玉米籽粒产量。

表 1 免耕结合不同量秸秆还田处理下的玉米产量及其构成因素

Table 1 Maize yield and yield components under no-tillage combined with different amounts of stover mulching

处理 Treatment	穗行数 Kernel-row number per ear	行粒数 Kernel number per row	百粒重 100-kernel weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)
CT	16.22±0.52 a	33.44±0.65 d	33.11±0.59 a	10448.32±105.00 b
NT-0	17.33±0.29 a	34.67±0.58 cd	30.12±0.77 b	10427.52±35.36 b
NT-33%	16.50±0.44 a	36.25±0.71 bc	31.24±1.27 b	10817.99±100.00 a
NT-67%	17.00±0.46 a	37.92±1.01 ab	33.06±0.75 a	11121.40±122.73 a
NT-100%	16.25±0.56 a	39.25±0.82 a	33.60±0.78 a	11157.52±12.25 a

注: CT 表示传统垄作; NT-0、NT-33%、NT-67%、NT-100% 分别表示免耕配合秸秆覆盖还田量为收获秸秆的 0%、33%、67% 和 100%。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: CT represent conventional tillage; NT-0, NT-33%, NT-67%, and NT-100% represent treatment of no-tillage combined with 0%, 33%, 67% and 100% of maize stover mulching. Different small letters after data in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 玉米叶片光合性能

作物生产的实质是光合作用产生的干物质不断积累和运移的过程, 光合性能直接影响作物产量。更强的光合作用能力、更长的光合作用持续时间、更高的叶绿素含量以及合适的叶面积是玉米获得高产的重要因素^[20], 免耕和秸秆覆盖还田通过调节土壤性质^[21]以及田间温度、水分和通气状况等环境条件^[22-23], 影响上述因素, 进而促进产量的提高。

净光合速率反映植株叶片进行光合作用同化有机物的速率, 是表征其光合性能最直接的指标。本研究中, 传统垄作的净光合速率在各个生育时期均低于免耕和秸秆覆盖还田处理, 说明免耕和秸秆覆盖还田提高了玉米光合系统的运行状态^[13]。试验区 15 年的长期免耕和秸秆覆盖还田提高了土壤质量^[24], 使得免耕处理的净光合速率高于传统垄作。然而, 秸秆覆盖还田降低了玉米生育前期的土壤温度^[25-26], 所以苗期免耕秸秆不还田的净光合速率高于免耕秸秆覆盖还田处理。随着生育期的推进, 拔节期气温升高, 太阳辐射到地面的热量增加, 免耕秸秆部分还田和免耕秸秆 100% 还田处理的玉米生长不再受地温限制; 此外, 长期免耕秸秆覆盖还田的土壤养分供应优势开始凸显^[27]; 同时, 本平台已发表的试验结果表明, 免耕秸秆覆盖还田显著提高了土壤含水量^[28], 在生长旺盛的拔节期、抽雄期提高效果更为显著^[29], 且根系对土壤水分的吸收率相应提高^[30], 有助于向叶片输送更多的水分; 以上因素共同作用, 显著提高了拔节期玉米叶片的净光合速率, 表现为随着秸秆还田量的增加, 净光合速率显著增加, 免耕秸秆 100% 还田和免耕秸秆 67% 还田的净光合速率显著高于免耕秸秆 33% 还田、免耕秸秆不还田以及传统垄作。抽雄期, 免耕秸秆 100% 还田的净光合速率显著高于其他处理, 体现了免耕秸秆全量还田在玉米生育后期^[14]提高光合性能的显著优势^[31]。

降低植物光合作用的自身因素分为气孔因素和非气孔因素, 气孔因素是水分胁迫导致气孔导度下降, CO_2 进入叶片受阻, 蒸腾速率大幅降低^[32], 使得光合速率下降。本研究中, 拔节期和抽雄期气孔导度和蒸腾速率与净光合速率变化趋势一致, 即随着秸秆还田量的增加而增加, 表明免耕秸秆覆盖还田为玉米光合性能的改善提供了适宜的通气环境和水分条件^[33]。非气孔因素是由叶绿素体等光合器官的性能下降引起的^[34]。叶绿素含量的增加在一定程度上

可以改善光合性能^[35], 进而促进玉米光合产物的合成与积累^[36]。若胞间 CO_2 浓度变化趋势与光合速率和气孔导度一致, 则影响光合速率的自身因素主要为气孔因素, 反之则为非气孔因素。在本研究中, 拔节期和抽雄期, 胞间二氧化碳浓度的变化趋势与净光合速率的变化趋势相反, 而叶绿素含量与净光合速率的变化趋势相同, 均随秸秆还田量的增加而增加, 说明不存在气孔因素对玉米生长造成的限制, 免耕秸秆覆盖还田通过增加叶绿素含量, 降低了非气孔限制, 改善玉米光合性能, 最终提高了玉米净光合速率, 这一点与 Liu 等^[13]在中国东北黑土区进行的免耕秸秆还田对玉米光合性能和产量的影响研究结论一致。

此外, 根系对土壤水分的吸收有助于气孔张开和吸收更多的 CO_2 。与传统垄作相比, 免耕秸秆覆盖还田处理的气孔导度提高, 胞间 CO_2 浓度明显降低, 表明免耕秸秆覆盖通过改善根系吸收的水向叶片的传递而增强了叶片气孔导度, 从而提高了二氧化碳利用率。与传统垄作相比, 拔节期和抽雄期免耕秸秆覆盖还田处理的气孔导度更大, 蒸腾速率更高, 胞间 CO_2 浓度更低, 而净光合速率与气孔导度和蒸腾速率呈极显著正相关, 与胞间 CO_2 浓度显著负相关, 表明了免耕秸秆覆盖还田提高了胞间 CO_2 的利用率, 进而提高了净光合速率。许菁等^[14]通过中国中部地区 12 年长期保护性耕作定位试验, 也验证了免耕秸秆覆盖还田通过降低非气孔限制, 提高了玉米净光合速率。在玉米生育后期(抽雄期), 随着秸秆还田量的增加, 叶绿素含量逐渐增加, 说明免耕配合 67% 或 100% 的秸秆还田能够延缓叶片衰老、延长叶片功能期^[34], 有助于获得更长的光合作用持续时间, 增加后期干物质积累, 为籽粒灌浆提供充足的原料^[30]。

3.2 玉米植株叶面积、产量及其构成因素

叶片是玉米进行光合作用的主要器官, 合适的叶面积有助于改善玉米的光合性能^[20]。本研究中, 苗期不同处理叶面积差异不明显, 可能是由于苗期玉米生长受光影响较小, 其次由于较低的地温^[26]限制了秸秆覆盖还田处理的苗期生长。拔节期和抽雄期, 在长期免耕和秸秆覆盖还田的影响下, 免耕秸秆覆盖还田处理的叶面积略高于免耕秸秆不还田和传统垄作, 但差异不显著。综上, 在玉米生育期各处理间叶面积差异较小, 这主要是由于试验地 15 年长期免耕和秸秆覆盖还田对土壤的培肥作用^[37], 各处理土

壤中的养分均能保证玉米达到适宜的叶面积。

籽粒产量与净光合速率呈显著正相关,与叶绿素含量、叶面积间相关性均不显著,表明测定指标中净光合速率对产量的影响最大,免耕秸秆覆盖还田通过改善玉米的光合性能,促进其生长发育,进而获得高产^[38]。Chen 等^[39]通过位于中国东北黑土区的 10 年免耕定位试验研究发现,免耕结合秸秆覆盖还田能够有效促进玉米籽粒产量的提高。本研究中,与免耕秸秆不还田和传统垄作相比,试验区长期的高量秸秆覆盖还田提高了有机质和全氮等土壤养分含量^[27],免耕秸秆 100% 还田和免耕秸秆部分还田(免耕秸秆 67% 还田和 33% 还田)的籽粒产量较免耕秸秆不还田和传统垄作有显著提高,增产的主要原因是行粒数和百粒重的增加,穗行数无明显差异,与 Wang 等^[30]的结论一致。

4 结论

免耕结合秸秆覆盖还田可提高玉米抽雄期叶片的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率,降低光合作用的非气孔限制,提高对胞间 CO₂ 的利用能力。秸秆覆盖量为 67%~100% 时,提高净光合速率、叶绿素含量以及玉米行粒数和籽粒产量的效果突出,是东北黑土区较为理想的耕作模式。

参 考 文 献:

- [1] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[M]. 北京: 中国科学院, 2021.
Chinese Academy of Sciences. White paper on the black lands of Northeast China (2020)[M]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [2] 汪景宽, 徐香菇, 裴久渤, 李双异. 东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 695-701.
Wang J K, Xu X R, Pei J B, Li S Y. Current situation of cultivated land quality and opportunities and challenges in a mollisol of Northeast China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701.
- [3] Zhao X, Liu S L, Pu C, *et al.* Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 84: 67-75.
- [4] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041.
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [5] 左旭, 王红彦, 王亚静, 等. 中国玉米秸秆资源量估算及其自然适宜性评价[J]. 中国农业资源与区划, 2015, 36(6): 5-10.
Zuo X, Wang H Y, Wang Y J, *et al.* Estimation and suitability evaluation of corn straw resources in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2015, 36(6): 5-10.
- [6] 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(2): 296-305.
- [7] Choudhary S, Gajanand M C, Choudhary M S. Conservation agriculture and its impact on physical, chemical and biological properties of soil: A review[J]. International Journal of Biomedical Science, 2021, 8(2): 113-122.
- [8] Tebrügge F. Conservation tillage as a tool to improve soil-, water- and air quality[C]. International Congress on Mechanization & Energy in Agriculture, 2002: 83-86.
- [9] Sales C R G, Wang Y, Evers J B, *et al.* Improving C₄ photosynthesis to increase productivity under optimal and suboptimal conditions[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(17): 5942-5960.
- [10] Morales F, Ancin M, Fakhret D, *et al.* Photosynthetic metabolism under stressful growth conditions as a bases for crop breeding and yield improvement[J]. Plants, 2020, 9(1): 88.
- [11] Simkin A J, Faralli M, Ramamoorthy S, *et al.* Photosynthesis in non-foliar tissues: Implications for yield[J]. The Plant Journal, 2020, 101(4): 1001-1015.
- [12] Zhai L, Wang Z, Song S, *et al.* Tillage practices affects the grain filling of inferior kernel of summer maize by regulating soil water content and photosynthetic capacity[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106600.
- [13] Liu J, Liu L, Fu Q, *et al.* Effects of straw mulching and tillage measures on the photosynthetic characteristics of maize leaves[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019, 62(3): 851-858.
- [14] 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.
- [15] Imani R, Samdeliri M, Mirkalaei A M. The effect of different tillage methods and nitrogen chemical fertilizer on quantitative and qualitative characteristics of corn[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2022: 7550079.
- [16] Zhang X, Qian Y, Cao C. Effects of straw mulching on maize photosynthetic characteristics and rhizosphere soil micro-ecological environment[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2015, 75(4): 481-487.
- [17] Zhang Y, Wang J, Gong S, *et al.* Straw mulching enhanced the photosynthetic capacity of field maize by increasing the leaf N use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2019, 218: 60-67.
- [18] 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 671-676.
Xu X, Wang X Y, Bao X L, *et al.* Effects of long-term no-tillage and

- stover mulching on maize yield and its stability[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(3): 671–676.
- [19] Mhlanga B, Pellegrino E, Thierfelder C, *et al.* Conservation agriculture practices drive maize yield by regulating soil nutrient availability, arbuscular mycorrhizas, and plant nutrient uptake[J]. *Field Crops Research*, 2022, 277: 108403.
- [20] Yan Y, Hou P, Duan F, *et al.* Improving photosynthesis to increase grain yield potential: An analysis of maize hybrids released in different years in China[J]. *Photosynthesis Research*, 2021, 150(1): 295–311.
- [21] 侯建勋, 张水梅, 袁静超, 等. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性与酶活性的提升效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(4): 610–618.
- Hou J X, Zhang S M, Yuan J C, *et al.* Effects of maize straw-derived organic materials on improving soil nutrient availability and enzyme activities in a Mollisol[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 610–618.
- [22] Blanco-Canqui H, Ruis S J. No-tillage and soil physical environment[J]. *Geoderma*, 2018, 326: 164–200.
- [23] 刘萌, 付威, 樊军, 等. 耕作与覆盖措施对黄土塬区春玉米田土壤水汽传输的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 814–825.
- Liu M, Fu W, Fan J, *et al.* Effects of tillage and mulching methods on soil water and gas transport in spring maize field on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 814–825.
- [24] Li S, Hu M, Shi J, *et al.* Improving long-term crop productivity and soil quality through integrated straw-return and tillage strategies[J]. *Agronomy Journal*, 2021, 114(2): 1500–1511.
- [25] 陈素英, 张喜英, 孙宏勇, 邵立威. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 519–525.
- Chen S Y, Zhang X Y, Sun H Y, Shao L W. Cause and mechanism of winter wheat yield reduction under straw mulch in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 519–525.
- [26] Lu X, Li Z, Sun Z, *et al.* Straw mulching reduces maize yield, water, and nitrogen use in northeastern China[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(1): 406–414.
- [27] Yang Y L, Bao X L, Xie H T, *et al.* Frequent stover mulching builds healthy soil and sustainable agriculture in mollisols[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 326: 107815.
- [28] Deng F B, Wang H J, Xie H T, *et al.* Low-disturbance farming regenerates healthy deep soil toward sustainable agriculture - Evidence from long-term no-tillage with stover mulching in Mollisols[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 825: 153929.
- [29] 董智, 解宏图, 张立军, 等. 东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤性状的影响[J]. *玉米科学*, 2021, 27(5): 814–825.
- Dong Z, Xie H T, Zhang L J, *et al.* Effects of no-tillage practice with corn stalk mulching on soil properties in the Northeast of China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2021, 27(5): 814–825.
- [30] Wang Z, Sun J, Du Y, *et al.* Conservation tillage improves the yield of summer maize by regulating soil water, photosynthesis and inferior kernel grain filling on the semiarid Loess Plateau, China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(6): 2330–2341.
- [31] Guan D, Al-Kaisi M M, Zhang Y, *et al.* Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 89–97.
- [32] Faralli M, Matthews J, Lawson T. Exploiting natural variation and genetic manipulation of stomatal conductance for crop improvement[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2019, 49: 1–7.
- [33] Hayat F, Ahmed M A, Zarebanadkouki M, *et al.* Transpiration reduction in maize (*Zea mays* L) in response to soil drying[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 10: 1695.
- [34] Ghimire B, Timsina D, Nepal J. Analysis of chlorophyll content and its correlation with yield attributing traits on early varieties of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Journal of Maize Research and Development*, 2015, 1(1): 134–145.
- [35] Ozdemir E O, Sade B. Line×tester analysis of stomatal conductance, chlorophyll content, photosynthetic efficiency, and transpiration rate traits in maize[J]. *Maydica*, 2019, 64.
- [36] Luo X, Croft H, Chen J M, *et al.* Improved estimates of global terrestrial photosynthesis using information on leaf chlorophyll content[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2499–2514.
- [37] Hassan W, Li Y, Saba T, *et al.* Improved and sustainable agroecosystem, food security and environmental resilience through zero tillage with emphasis on soils of temperate and subtropical climate regions: A review[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(3): 530–545.
- [38] Knapp S, van der Heijden M G A. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3632.
- [39] Chen H H, Liu Y, Lü L, *et al.* Effects of no-tillage and stover mulching on the transformation and utilization of chemical fertilizer N in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213: 105131.