

冬小麦-夏玉米生产体系中播前耕作对夏玉米产量形成的影响

李霞, 任佰朝, 范霞, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要: 【目的】黄淮海夏玉米区是典型的一年两熟制种植制度区, 统筹研究冬小麦和夏玉米播前耕作对夏玉米产量形成的影响, 为冬小麦夏玉米周年高产高效生产耕作模式的改进提供科学依据。【方法】以郑单 958 (ZD958) 为试验材料, 设置冬小麦播前旋耕夏玉米播前免耕 (RN)、冬小麦播前翻耕夏玉米播前免耕 (MN) 与冬小麦播前翻耕夏玉米播前旋耕 (MR) 3 个试验处理, 其中 RN 作为对照 (CK), 研究冬小麦和夏玉米播前耕作对夏玉米产量及其构成因素、叶面积指数、干物质积累与分配和籽粒灌浆特性等的影响。【结果】冬小麦与夏玉米播前耕作均对夏玉米产量影响显著。与 RN 相比, MN 和 MR 处理夏玉米的叶面积指数、花后干物质积累量、花后干物质积累所占比例、籽粒最大灌浆速率分别提高 15.01%、21.14%、3.21%、15.00% 和 16.44%、24.92%、4.49%、12.60%, 即冬小麦播前翻耕提高了夏玉米叶面积指数、花后干物质积累及其向籽粒分配比例和籽粒最大灌浆速率, 进而提高穗粒数与粒重, 有利于产量提高。与 RN 相比, MN 和 MR 处理的产量分别提高 24.03% 和 30.61%。夏玉米播前旋耕对干物质向籽粒分配比例, 籽粒灌浆速率无显著影响, 但显著提高了出苗率, 进而增加群体数量, 提高产量; 与 MN 相比, MR 处理的出苗率提高 6.29%, 这是其产量较 MN 提高 5.23% 的主要原因。【结论】与冬小麦播前旋耕夏玉米播前免耕 (RN) 相比, 冬小麦播前翻耕夏玉米播前旋耕 (MR) 与冬小麦播前翻耕和夏玉米免耕 (MN) 均显著提高夏玉米的产量。尽管冬小麦播前翻耕夏玉米播前旋耕 (MR) 的产量较冬小麦播前翻耕和夏玉米免耕 (MN) 高 5.23%, 但结合生产实际, 冬小麦播前翻耕和夏玉米免耕播种 (MN) 更有利于该区域夏玉米的高产高效生产。

关键词: 冬小麦-夏玉米; 播前耕作; 干物质积累; 籽粒灌浆; 产量

Effects of Tillage Before Sowing of Winter Wheat and Summer Maize on Yield Formation of Summer Maize

LI Xia, REN Bai-zhao, FAN Xia, ZHAO Bin, DONG Shu-ting, LIU Peng, ZHANG Ji-wang

(Agronomy College of Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Taian 271018, Shandong)

Abstract: 【Objective】A typical double cropping of winter wheat and summer maize is practiced in Huang-Huai-Hai Plain. This study is to explore the effects of tillage methods before sowing both winter wheat and summer maize on yield formation of summer maize, to find which is helpful to improve the tillage system of double cropping for high yield and high efficiency in HuangHuaiHai Plain. 【Method】Summer maize hybrid Zhengdan958 (ZD958) was used as experimental materials. Three tillage treatments were designed in this study, including rotary tillage before sowing winter wheat and no-till before sowing of summer maize (RN), conventional tillage (mobile tillage by plow) before sowing of winter wheat and no-till before sowing of summer maize (MN), and conventional tillage before sowing winter wheat and rotary tillage before sowing of summer maize (MR). Effects of tillage treatments on yield, leaf area index (LAI), accumulation and distribution of dry matter, and grain filling characteristics of summer maize were investigated. 【Result】Results showed that tillage before sowing of both winter wheat and summer maize had significant effects on yield and yield components of summer maize. Compared with RN, LAI, dry matter (DM) accumulation after tasseling (VT), the ratio of DM after VT to total DM, and maximum grain filling rate (Gmax) in MR and MN increased by 15.01%,

收稿日期: 2014-04-17; 接受日期: 2014-07-03

基金项目: 国家“973”计划 (2015CB150404)、山东省现代农业产业技术体系项目 (SDAIT-01-022-05)、公益性行业 (农业) 科研专项 (201103003)

联系方式: 李霞, E-mail: bflxia@163.com. 通信作者张吉旺, Tel: 0538-8245838; E-mail: jwzhang@sdau.edu.cn

21.14%, 3.21%, 15.00% and 16.44%, 24.92%, 4.49%, 12.60%, respectively. So DM accumulation, DM after tasseling (VT), distribution of DM to kernels, weight of maximum grain filling rate (Wmax) and Gmax increased significantly after conventional tillage before sowing of winter wheat. As a result, kernel number and weight per ear increased, thus grain yield increased. Compared with RN, grain yield in MR and MN increased by 30.61% and 24.03%, respectively. Rotary tillage before sowing of summer maize had no significant effects on DM accumulation after VT and growing rate of grains, however, the emergence rate of summer maize increased significantly, which increased ear number per planting area, thus grain yield increased. Compared with MN, the emergence rate of summer maize in MR increased by 6.29%, and grain yield increased by 5.23%. 【Conclusion】 Compared with RN, grain yield of MR and MN increased significantly. Though the yield in MR was higher than that in MN, taking grain yield and machinery costs into account, the tillage system of conventional tillage before sowing of winter wheat and no till before sowing of summer maize maybe helpful for high yield and high efficiency of summer maize production in Huang-Huai-Hai Plain.

Key words: double cropping of winter wheat and summer maize; pre-planting tillage; dry matter accumulation; grain filling; grain yield

0 引言

【研究意义】适宜的耕作方式促进作物生长发育, 提高产量。作为夏玉米主产区的黄淮海平原是典型的一年两熟制种植制度, 统筹研究冬小麦夏玉米播前耕作对夏玉米产量形成的影响有重要意义。【前人研究进展】国内外学者关于不同耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响已有大量研究, 有研究表明由于土壤机械阻力等作用, 免耕的作物生长比常规耕作有延迟现象^[1], 免耕玉米苗期弱于翻耕处理, 但随玉米的进一步生长发育这种差异逐渐缩小^[2], 华北一年两熟区保护性耕作玉米出苗延迟 1—2 d, 但并未影响其生长^[3], 同时有研究表明, 留茬免耕玉米的最大干物质质量大于秋翻无覆盖处理^[4], 耕作措施对玉米籽粒灌浆强度也有显著的影响, 保护性耕作方式下授粉后 15 d 玉米灌浆速率明显加快^[5], 而与免耕相比, 翻耕能改良土壤物理性状、提高土壤有机质和氮素含量, 进而提高玉米产量^[6]。史忠强等^[7]在山东龙口试验表明, 耙耕秸秆还田比常规翻耕使玉米增产 14.15%, 与旋耕秸秆还田无明显差异, 而免耕秸秆覆盖减产 11.00%, 梁金凤等^[8]研究认为, 不同耕作方式和耕作深度对玉米产量无显著影响, 前人研究由于试验区域有差异, 结果不尽相同^[9-10]。【本研究切入点】一年一熟制是国外主要的种植制度, 国外对耕作方式的研究也多基于该种植制度^[11]。黄淮海平原是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟制种植制度, 目前, 该区以冬小麦播种前旋耕和夏玉米播种前免耕为主, 对该地区耕作制度的研究多集中在夏玉米或冬小麦播前耕作基础上, 将两者播前耕作统筹考虑的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究通过两年大田试验, 研究冬小麦-夏玉米周年生产中不同耕作方式对夏玉米产量形成的影响, 旨

在探讨冬小麦-夏玉米周年高产高效生产的耕作模式。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2011—2013 年在山东省泰安市马庄镇北苏村 (35°59'N, 117°00'E) 进行, 该区属典型的冬小麦-夏玉米一年两熟制区, 温带大陆性半湿润季风气候, 年平均气温 13℃, 全年平均 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的积温 4 731℃, 无霜期平均 195 d, 最长可达 241 d, 最短为 161 d, 年平均降水量 697 mm, 主要分布在 6 月至 8 月。土壤为黏壤土, 2011 年秋季试验前 0—30 cm 耕层土壤养分含量平均为: 有机质 15.71 g·kg⁻¹、全氮 1.12 g·kg⁻¹、速效磷 46.64 mg·kg⁻¹、速效钾 98.15 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

2011—2013 年连续 2 个冬小麦夏玉米生长季, 设置冬小麦旋耕夏玉米免耕 (RN)、冬小麦翻耕夏玉米免耕 (MN)、冬小麦翻耕夏玉米旋耕 (MR) 3 个处理, 其中 RN 作为对照 (CK), 每处理 3 次重复, 随机区组设计。冬小麦旋耕夏玉米免耕 (RN) 处理于冬小麦播前玉米秸秆机械粉碎还田, 撒施化肥后用 1GKN-200 旋耕机 (连云港市华云机械制造有限公司) 旋耕 2 遍播种, 旋耕深度 10 cm, 秸秆和表土形成混合层, 机械播种小麦, 小麦收获后留茬, 采用 2BYF 系列玉米施肥精密播种机 (山东宁联机械制造有限公司) 一次性完成播种、施肥和镇压作业, 地表形成沟、垄背的微地表, 玉米种、肥料播于垄沟内土壤中; 冬小麦翻耕夏玉米免耕 (MN) 处理于冬小麦播前玉米秸秆机械粉碎还田, 撒施化肥后用铧式犁翻耕 1 遍, 耕深 25 cm, 再用 1GKN-200 旋耕机 (连云港市华云机械制造有限公司) 旋耕 1 遍, 旋平后机械播种小麦, 小麦收获后留茬, 采用 2BYF 系列玉米施肥精密播种机 (山东宁联机

械制造有限公司)一次性完成播种、施肥和镇压作业,地表形成沟、垄背的微地表,玉米种、肥料播于垄沟内土壤中;冬小麦翻耕夏玉米旋耕(MR)于冬小麦播前玉米秸秆机械粉碎还田,撒施化肥后用铧式犁翻耕 1 遍,耕深 25 cm,再用 1GKN-200 旋耕机(连云港市华云机械制造有限公司)旋耕 1 遍,旋平后机械播种小麦,小麦收获后,撒施复合肥后用 1GKN-200 旋耕机(连云港市华云机械制造有限公司)旋耕 2 遍播种,旋耕深度 10 cm,秸秆和表土形成混合层,机械播种玉米。

选用主推品种郑单 958 为试验材料,密度为 67 500 株/hm²,玉米种植的行距 60 cm,株距 24 cm,分别于 2012 年 6 月 17 日和 2013 年 6 月 19 日播种,2012 年 10 月 3 日和 2013 年 9 月 27 日收获。氮(N)、磷(P₂O₅)和钾(K₂O)用量分别为 250、100 和 200 kg·hm⁻²,磷、钾肥在播前全部施入,氮肥在拔节期和大喇叭口期按照 4:6 的比例施用。分别于 2012 年 6 月 17 日、8 月 14 日,2013 年 6 月 20 日、8 月 11 日灌水,以水表控制灌水量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 夏玉米出苗率 播种后 21 d,每处理随机选取有代表性的 5 个样区,每样区包括并列的 5 行×10 m,记录调查样区夏玉米的出苗情况。

1.3.2 叶面积指数(LAI) 分别于拔节期(V6)、大喇叭口期(V12)、开花期(VT)、开花后 20 d(VT+20 d)、开花后 40 d(VT+40 d)与成熟期(R6)选择有代表性的植株,每处理 10 株,测定叶片的长和宽。

叶面积(LA, m²/plant)=叶片最大长度×最大宽度×0.75

叶面积指数(LAI)=单株叶面积×单位土地面积内的株数/单位土地面积

1.3.3 干物质积累与分配 分别于 V6、V12、VT、VT+20、VT+40 和 R6 时期,每处理随机取 5 个代表性植株,每株分茎和叶 2 部分或者茎、叶、粒、轴 4 部分烘干并称重,用于计算干物质的积累和分配。

1.3.4 籽粒灌浆动态 取长势一致的植株,于花后 5、10、15、20、25、30、40 和 50 d 各取 3 个果穗,剥取籽粒,测百粒鲜重(g),用排水法测定鲜籽粒体积(mL),杀青烘干后测百粒干重。用 Logistic 方程拟合籽粒灌浆过程。

1.3.5 籽粒产量 于夏玉米成熟期在每小区去除边行后,调查群体情况,分别记录群体总株数,双穗、空秆株数,随机收获双行中的连续 30 穗,自然风干后室内考种,得穗粒数及千粒重,计算夏玉米产量;于冬小麦成熟期在每小区去除边行后,每处理随机选取有代表性的 5 个样区,每样区面积 1 m×1 m,调查群体情况,随机收获每样区的连续 30 穗,自然风干后室内考种,得到穗粒数及千粒重,计算冬小麦产量。

夏玉米产量(kg·hm⁻²)=有效穗数(ears/hm²)×穗粒数×千粒重(g)×(1-含水量%)/(1-14%)/10⁶

冬小麦产量(kg·hm⁻²)=有效穗数(ears/hm²)×穗粒数×千粒重(g)×(1-含水量%)/(1-14%)/10⁶

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS15.0 软件处理数据和统计分析,以 SigmaPlot10.0 绘图。

2 结果

2.1 耕作方式对冬小麦-夏玉米产量及其构成的影响

从表 1 可以看出,冬小麦播前翻耕可以显著提高冬小麦产量,两年趋势一致。与 RN 相比,MN 2 年平均增产 24.65%,MR 平均增产 23.61%。

表 1 不同耕作方式对冬小麦产量的影响

Table 1 Effects of tillage treatments on the yield of winter wheat

年份	处理	产量	千粒重	穗粒数	穗数
Year	Treatment	Grain yield (kg·hm ⁻²)	1000-kernel weight (g)	Kernels No. per ear	Ears (ears/hm ²)
2012	RN	7319 b	39.47 a	36.20 a	5122500 b
	MN	9048 a	39.15 a	42.00 a	5502800 a
	MR	9048 a	39.15 a	42.00 a	5502800 a
2013	RN	7471 b	42.64 a	35.43 a	4945000 b
	MN	9390 a	42.88 a	42.13 a	5197100 b
	MR	9233 a	42.36 a	38.76 a	5623300 a

同一列标以不同小写字母的数值表示 5%水平差异显著;RN: 小麦播前旋耕玉米播前免耕,MN: 小麦播前翻耕玉米播前免耕,MR: 小麦播前翻耕玉米播前旋耕。下同

Values followed by a different small letter within a column are significantly different at 5% probability level. RN means rotary tillage before winter wheat seeding and no-tillage before maize seeding, MN means moldboard tillage before winter wheat seeding and no-tillage before maize seeding and MR means moldboard tillage before winter wheat seeding and rotary tillage before maize seeding. The same as below

从表 2 可以看出，冬小麦播前翻耕与夏玉米播前旋耕均可提高夏玉米产量，两年趋势一致。与 RN 相比，MN 2 年平均增产 24.03%，MR 平均增产 30.61%；与 MN 相比，MR 2 年平均增产 5.23%。此外，耕作对产量构成因素也有影响，冬小麦播前翻耕可显著提高夏玉米穗数、穗粒数与千粒重，夏玉米播前旋耕可显著提高穗数与千粒重。与 RN 相比，MN 穗数 2 年平均提高 4.28%，千粒重平均提高 5.33%，穗粒数平均提高 12.94%，MR 的穗数平均提高 9.19%，千粒重平均提高 7.18%，穗粒数平均提高 11.60%；与 MN 相比，

MR 2 年的穗数平均提高 4.71%。冬小麦播前翻耕与夏玉米播前旋耕可提高冬小麦与夏玉米周年产量，与 RN 相比，MN 2 年平均增产 24.27%，MR 平均增产 27.24%。

2.2 耕作方式对夏玉米群体构成的影响

出苗率受耕作方式影响显著。与 RN 相比，MN 出苗率无显著差异，MR 出苗率显著提高，2012 年和 2013 年，MR 较 RN 出苗率分别提高 9.46%和 6.46%。各处理空秆率也有显著差异，RN 的空秆率 2 年均最高，平均较 MN 高 111.55%，较 MR 高 49.25%。各处理双穗率差异不显著（表 3）。

表 2 不同耕作方式对夏玉米产量的影响
Table 2 Effects of tillage treatments on the yield of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	千粒重 1000-kernel weight (g)	穗粒数 Kernels	穗数 Ears (ears/hm ²)
2012	RN	7965 c	276 c	510 b	56505 c
	MN	10037 b	292 b	582 a	59145 b
	MR	11038 a	304 a	585 a	62100 a
2013	RN	9296 b	309 b	519 b	58029 c
	MN	11345 a	324 a	580 a	60289 b
	MR	11401 a	322 a	563 a	62957 a

表 3 不同耕作方式对夏玉米群体构成的影响
Table 3 Effects of tillage treatments on canopy components of summer maize

年份 Year	处理 Treatment	出苗率 Emergence rate (%)	空秆率 Barren rate (%)	双穗率 Double earshoot rate (%)	穗数 Ears (ears/hm ²)
2012	RN	87.75 b	7.14 a	2.54 a	56505 c
	MN	88.34 b	2.57b	1.75 a	59145 b
	MR	96.05 a	6.28 a	2.07 a	62100 a
2013	RN	89.26 b	5.23 a	1.35 a	58029 c
	MN	91.51 b	3.60 b	1.19 a	60289 b
	MR	95.03 a	2.83 b	0.98 a	62957 a

2.3 耕作方式对夏玉米穗部性状的影响

不同耕作方式对夏玉米果穗穗部性状有显著影响。冬小麦播前翻耕使雌穗长、穗粗、穗粒数和行粒数增加，秃顶长变短。与 RN 相比，MR 穗长增加 7.81%，穗粗增加 3.01%，穗行数增加 2.12%，行粒数增加 8.31%，秃顶长减少 49.78%；MN 的穗长增加 13.14%，穗粗增加 3.95%，穗行数提高 3.15%，行粒数增加 8.61%，秃顶长减少 55.41%（表 4）。

2.4 耕作方式对夏玉米叶面积指数的影响

由图 1 可知，2012—2013 年不同耕作方式对夏玉

米叶面积指数影响动态均呈单峰曲线变化，从 V6 到 VT+40 d，MR 与 MN 叶面积指数较 RN 显著提高。在 VT，MR 与 MN 的叶面积指数较 RN 分别提高 16.16%与 6.99%，MR 较 MN 提高 9.18%。MR 与 MN 的叶面积指数较 RN 分别提高 16.44%与 15.01%。

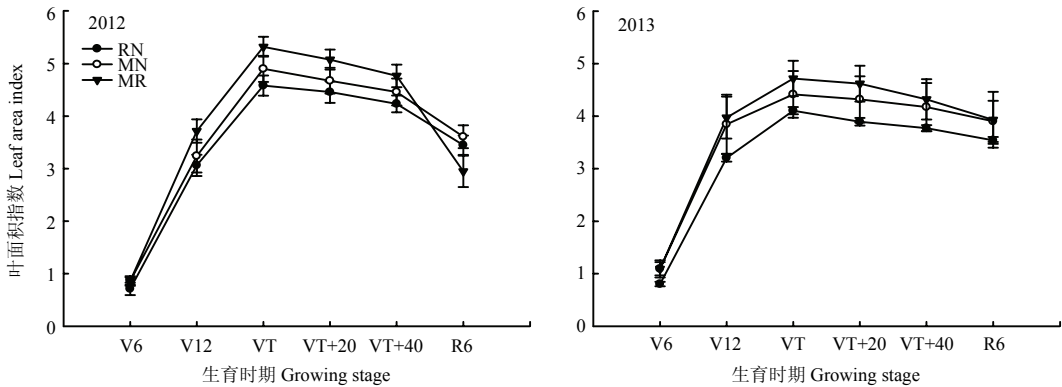
2.5 耕作方式对夏玉米干物质积累与分配的影响

2.5.1 干物质积累 由图 2 可知，2012—2013 年不同耕作方式下夏玉米单株干物质积累动态均呈 S 型曲线变化。2 年的干物质积累均表现为：MN 与 MR 的夏玉米单株干物质积累显著高于 RN。2012 年，MR

表 4 不同耕作方式对夏玉米穗部性状的影响

Table 4 Effects of tillage treatments on ear characters of summer maize

年份	处理	穗行数	行粒数	穗长	穗粗	秃顶长
Year	Treatment	Rows per ear	Kernels per row	Length of ear (cm)	Diameter of ear (cm)	Bald tip length (cm)
2012	RN	15.37 b	33.68 b	16.22 b	4.93 b	0.91 a
	MN	15.69 a	37.09 a	18.57 a	5.07 a	0.60 b
	MR	15.61 a	37.44 a	17.22 a	5.01 a	0.66 b
2013	RN	14.80 b	35.07 b	15.66 b	4.69 b	0.43 a
	MN	15.43 a	37.58 a	17.50 a	4.93 a	0.10 b
	MR	15.20 a	37.02 a	17.15 a	4.90 a	0.12 b



RN: 小麦播前旋耕玉米播前免耕, MN: 小麦播前翻耕玉米播前免耕, MR: 小麦播前翻耕玉米播前旋耕。V6: 拔节期, V12: 大喇叭口期, VT: 开花期, VT+20: 花后 20 天, VT+40: 花后 40 天, R6: 成熟期。下同
RN means rotary tillage before winter wheat seeding and no-tillage before maize seeding, MN means moldboard tillage before winter wheat seeding and no-tillage before maize seeding and MR means moldboard tillage before winter wheat seeding and rotary tillage before maize seeding. V6: jointing stage, V12: male tetrad stage, VT: flowering stage, VT+20: 20 days after flowering, VT+40: 40 days after flowering, R6: maturity stage. The same as below

图 1 不同耕作方式对夏玉米叶面积指数的影响

Fig. 1 Effects of different tillage treatments on leaf area index of summer maize at different growth stages

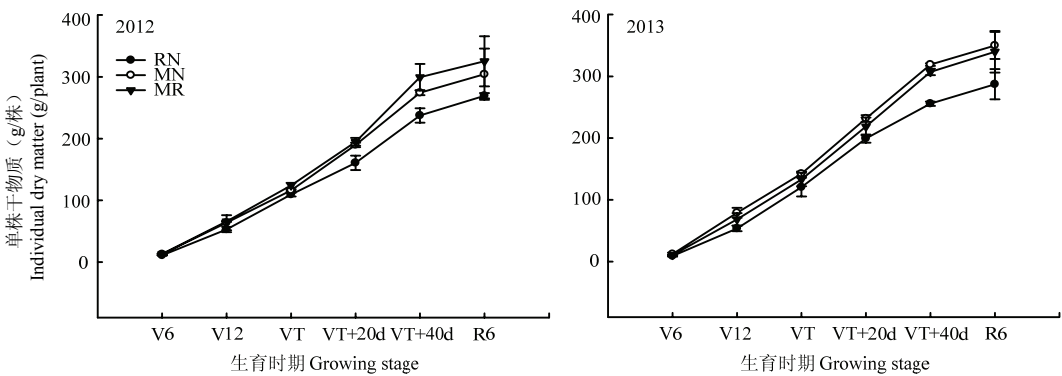


图 2 不同耕作方式对夏玉米单株干物质积累的影响

Fig. 2 Effects of different tillage treatments on individual dry matter accumulation of summer maize

的单株干物质积累量最高,较 RN 提高了 20.77%;其次为 MN,较 RN 平均提高了 12.96%;2013 年,MN 的单株干物质积累量最高,较 RN 提高了 21.85%;其次为 MR,较 RN 提高了 18.32%。

冬小麦播前翻耕后夏玉米群体干物质积累量显著提高(图 3)。2012 年,MR 的群体干物质积累量最高,较 RN 提高了 32.18%;其次为 MN,较 RN 提高了 13.70%;2013 年,MR 的群体干物质积累量最高,

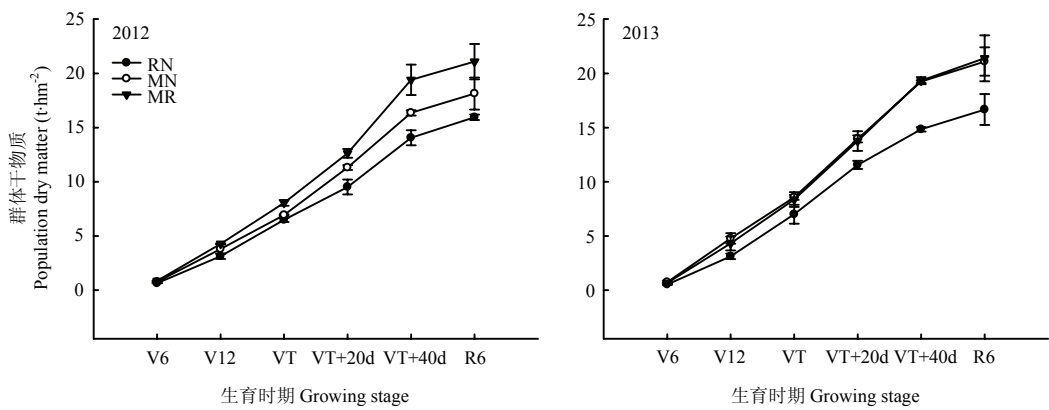


图3 不同耕作方式对夏玉米群体干物质积累的影响

Fig. 3 Effects of different tillage treatments on dry matter accumulation of summer maize

较 RN 提高了 28.37%；其次为 MN，较 RN 提高了 26.59%；2 年平均，MR 和 MN 的群体干物质积累量分别较 RN 高 30.28%和 20.15%。

2.5.2 干物质分配 冬小麦播前翻耕对夏玉米花前后干物质积累量及其比值有显著影响（表 5）。2012 年，MR 的花后单株干物质积累量及花后干物质积累量占总积累量比例较 RN 分别提高 25.65%和 4.03%，

MN 的花后单株干物质积累量及花后干物质积累量占总积累量比例较 RN 分别提高 17.57%和 4.07%；2013 年，MR 的花后单株干物质积累量及花后干物质积累量占总积累量比例较 RN 分别提高 24.19%和 4.94%，MN 的花后单株干物质积累量及花后干物质积累量占总积累量比例较 RN 分别提高 24.71%和 2.34%，MR 和 MN 的花后群体干物质积累量没有显著差异。

表 5 不同耕作方式对夏玉米花前花后干物质分配的影响

Table 5 Effects of tillage treatments on dry matter (DM) distribution pre- or post- VT of summer maize

处理 Treatment	2012			2013		
	花前 DM pre-VT (g/plant)	花后 DM after VT (g/plant)	花后占总积累量比例 Ratio of DM after VT to the total (%)	花前 DM pre- VT (g/plant)	花后 DM after VT (g/plant)	花后占总积累量比例 Ratio of DM after VT to the total (%)
RN	109.32 c	160.06 c	59.42 b	120.55 b	166.71 b	58.04 b
MN	116.10 b	188.18 b	61.84 a	142.10 a	207.91 a	59.40 a
MR	124.22 a	201.12 a	61.82 a	132.85 ab	207.03 a	60.91 a

不同处理成熟期干物质向各器官分配的比例不同，从表 6 中可以得出，2012 年，MR 的茎鞘、叶片、籽粒与穗轴占干物质总重的比例分别为 20.06%、12.52%、60.88%与 6.55%，较 RN 变幅分别为-0.99%、0.33%、0.79%与-0.12%；MN 的茎鞘、叶片、籽粒与穗轴占干物质总重的比例分别为 19.34%、12.66%、61.19%与 6.81%，较 RN 变幅分别为-1.71%、0.47%、1.10%与 0.14%。2013 年，MR 的茎鞘、叶片、籽粒与穗轴占干物质总重的比例分别为 29.09%、10.89%、53.16%与 6.86%，较 RN 变幅分别为 0.19%、-0.98%、0.33%与 0.46%；MN 的茎鞘、叶片、籽粒与穗轴占干物质总重的比例分别为 29.36%、11.46%、53.26%与

5.92%，较 RN 变幅分别为 0.45%、-0.41%、0.44%与 -0.48%。可见，MN 与 MR 的夏玉米籽粒积累所占比例高于 RN，冬小麦播前翻耕促进夏玉米干物质向籽粒分配。

2.6 夏玉米籽粒灌浆特性

用 Logistic 模型可以较好地拟合籽粒灌浆过程，通过 CurveExpert1.3 软件拟合得各处理 Logistic 方程，决定系数达到 0.9978—0.9989（表 7）。2012 年，各处理的籽粒灌浆参数 Tmax 和 P 无显著差异，Wmax 与 Gmax 以 RN 最小，MR 较 RN 分别提高 9.12%和 8.74%，MN 较 RN 分别提高 14.39%和 19.42%。2013 年各处理的变化趋势与 2012 年基本一致：MR 的 Wmax

表 6 不同耕作方式对夏玉米干物质分配的影响

Table 6 The effects of tillage treatments on the dry matter distribution on organs of summer maize at maturity

年份 Year	处理 Treatment	茎鞘 Stalk		叶片 Leaf		籽粒 Kernel		穗轴 Cob		总干重 Total matter (g/plant)
		干重	占总重比例	干重	占总重比例	干重	占总重比例	干重	占总重比例	
		Dry matter (g/plant)	Proportion in total dry matter(%)	Dry matter (g/plant)	Proportion in total dry matter (%)	Dry matter (g/plant)	Proportion in total dry matter (%)	Dry matter (g/plant)	Proportion in total dry matter (%)	
2012	RN	57.96 b	21.05	33.56 b	12.19	165.48 b	60.09	18.38 a	6.67	275.38 b
	MN	58.84 b	19.34	38.52 ab	12.66	186.20 ab	61.19	20.72 a	6.81	304.28 ab
	MR	65.26 a	20.06	40.72 a	12.52	198.06 a	60.88	21.30 a	6.55	325.34 a
2013	RN	83.04 b	28.91	34.08 b	11.86	151.75 b	52.83	18.38 b	6.40	287.26 b
	MN	102.75 a	29.36	40.11 a	11.46	186.43 a	53.26	20.72 ab	5.92	350.01 a
	MR	98.89 ab	29.09	37.01 a	10.89	180.69 a	53.16	23.30 a	6.86	339.88 a

表 7 不同耕作方式对夏玉米籽粒灌浆 Logistic 模拟方程和灌浆特征参数的影响

Table 7 Effects of different tillage treatments on logistic equation and characteristic parameters of summer maize grain filling

年份 Year	处理 Treatment	拟合方程 Fitted equation	特征参数 Characteristic parameter				R ²
			Tmax	Wmax	Gmax	P	
2012	RN	y=22.7962/[1+72.9340*exp(-0.1807x)]	23.74	11.40	1.03	33.20	0.9989
	MN	y=26.0786/[1+99.2882*exp(-0.1890x)]	24.32	13.04	1.23	31.74	0.9986
	MR	y=24.8859/[1+71.0838*exp(-0.1803x)]	23.65	12.44	1.12	33.27	0.9983
2013	RN	y=21.8416/[1+37.4390*exp(-0.1561x)]	23.21	10.92	0.85	38.43	0.9980
	MN	y=24.6452/[1+35.4568*exp(-0.1527x)]	23.37	12.32	0.94	39.30	0.9978
	MR	y=24.8221/[1+41.9148*exp(-0.1603x)]	23.30	12.41	0.99	37.43	0.9982

Tmax: 到达最大灌浆速率时的天数 (d); Wmax: 灌浆速率最大时的生长量 (g/100grains); Gmax: 最大灌浆速率 (g/100grains·d⁻¹); P: 籽粒灌浆活跃期 (d); R²: 决定系数

Tmax: Days of maximum grain filling; Wmax: Weight of maximum grain filling rate; Gmax: Maximum grain filling; P: Active grain filling period; R²: Correlation coefficient

与 Gmax 较 RN 分别提高 13.64%和 16.47%，MN 的 Wmax 与 Gmax 较 RN 分别提高 12.82%和 10.59%。可见，冬小麦播前翻耕影响夏玉米籽粒灌浆，籽粒最大灌浆速率 Gmax 提高，籽粒灌浆速率最大时的籽粒生长量 Wmax 提高，但达最大灌浆速率时的天数 Tmax 及灌浆活跃期天数 P 无显著差异。

3 讨论

适宜的耕作方式能够降低土壤容重与土壤紧实度，增加土壤孔隙度，提高土壤蓄水能力，促进作物生长发育，提高产量^[12-14]。黄淮海夏玉米区是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟制种植制度，以冬小麦播种前旋耕夏玉米播种前免耕为主，但长期旋耕与免耕造成该区土壤耕层变浅，养分表层富集^[15]。史忠强等^[7]研究表明，耙耕秸秆还田较常规翻耕玉米增产，与旋耕秸秆还田相比无明显差异，而免耕秸秆覆盖使玉米减

产。关于黄淮海平原耕作方式的研究多集中在夏玉米或冬小麦播前单季耕作基础上，本研究统筹考虑了冬小麦和夏玉米周年生产，研究表明，冬小麦播前翻耕在显著提高冬小麦（表 2）产量的基础上还能显著提高夏玉米产量。与 RN 相比，MN 平均增产 24.03%，MR 平均增产 30.61%；与 MN 相比，MR 平均增产 5.23%。

玉米产量主要由单位面积穗数、穗粒数和千粒重三因子决定，三者受环境因素影响较大^[16-17]。本研究结果表明，与 RN 相比，MN 和 MR 处理玉米的有效穗数、千粒重与穗粒数均显著提高；与 MN 相比，MR 的穗数显著提高。因此，冬小麦播前翻耕可显著提高夏玉米的有效穗数、穗粒数与千粒重，夏玉米播前旋耕可显著提高穗数与千粒重。夏玉米群体数量是产量形成的重要影响因素，耕作方式对夏玉米群体数量影响显著，主要表现在对夏玉米出苗率影响显著。以往

研究认为秸秆还田免耕影响作物出苗, 最终导致群体数量降低出现减产^[18-19], 本研究发现, 与 RN 相比, MR 出苗率显著提高, 最终导致穗数升高, 产量提高, MN 则主要由于空秆率显著降低, 最终导致穗数升高, 产量提高。叶面积指数是群体光合性能的体现, 本研究中 MR 与 MN 的叶面积指数较 RN 显著提高, 表明冬小麦播前翻耕在一定程度上提高了夏玉米的光合性能。干物质的积累是作物产量形成的基础, 干物质积累多少和向籽粒的分配量决定着产量的高低, 在一定范围内, 干物质积累量与产量正相关, 尤其在生育后期, 这一关系尤为明显^[20], 因此提高干物质积累量和向收获器官的分配比例可提高穗粒数与粒重并最终增加玉米产量^[21]。玉米整个生育进程中, 全株地上部干物质积累呈“S”型曲线^[22], 花前的干物质积累主要用于植株躯体的建成, 即根、茎、叶、幼穗等器官的形成与生长; 花后的干物质积累主要用于籽粒的形成, 提高花后干物质生产率是高产特性之一^[23-24]。本研究表明, MR 与 MN 的单株及群体干物质积累量较 RN 均显著提高, 花后单株干物质积累量及花后干物质积累量占总积累量比例较 RN 显著提高, 此外, 不同处理成熟期干物质向各器官分配的比例不同, 冬小麦播前翻耕处理 MN 与 MR 夏玉米籽粒积累所占比例高于冬小麦播前旋耕处理 RN, 说明冬小麦播前翻耕促进夏玉米干物质积累及向籽粒分配, 增加穗粒数与千粒重。玉米籽粒灌浆强度和速率决定玉米库容的充实程度, 进而决定玉米的粒重^[25]。玉米籽粒灌浆强度一般由品种决定, 但耕作措施起着显著的影响作用^[7,26]。适宜的耕作方式促进玉米籽粒灌浆, 提高穗粒数和粒重, 进而实现增产; 免耕或耕作过度则会影响籽粒灌浆, 导致玉米减产。郑会宇等^[5]研究表明, 授粉后 10 d 以前保护性耕作方式玉米籽粒灌浆速率没有优势, 授粉后 15 d 开始保护性耕作方式玉米灌浆速率明显加快, 并且显著高于秋翻无覆盖, 最终提高了粒重。本研究表明, 冬小麦播前翻耕影响夏玉米籽粒灌浆, 籽粒最大灌浆速率 G_{max} 升高, 籽粒灌浆速率最大时的籽粒生长量 W_{max} 升高, 但达最大灌浆速率时的天数 T_{max} 及灌浆活跃期天数 P 无显著差异, 与 RN 相比, MR 与 MN 的籽粒体积及鲜重在授粉后的 5—40 d 均较高, 从而获得较高粒重这与郑会宇等^[5]的研究结论不一致, 主要原因可能是地域差异, 本研究及史忠强等^[7]的研究均在黄淮海平原一年两熟种植区, 该区属半湿润半干旱农区, 且玉米生育期内降水较多, 而郑会宇等^[5]的研究则在一年一熟制的辽西地区, 辽西地

区属于旱作农区, 玉米播前耕作一般在秋天或春天进行, 保护性耕作在此区可减少水土流失, 减少地表径流, 利于玉米灌浆速率提高。

因此, 在黄淮海冬小麦与夏玉米播前耕作均对夏玉米产量形成有显著的影响, 统筹考虑冬小麦与夏玉米播前耕作有重要意义。与 RN 相比, MR 与 MN 均提高了夏玉米单株、群体及开花后干物质积累及向籽粒分配比例, 籽粒灌浆速率与群体数量, 进而提高穗粒数与粒重, 获得较高夏玉米产量; 与 MN 相比, MR 干物质向籽粒分配比例, 籽粒灌浆速率无显著差异, 但因出苗率高而群体数量显著提高, 进而产量最高。尽管 MN 夏玉米出苗率低对群体数量有一定影响, 但穗粒数与千粒重与 MR 无显著差异, 且冬小麦播前翻耕夏玉米播前免耕在保证冬小麦、夏玉米增产的基础上减少了机械耕作次数, 有节本增效的作用。在生产中可通过改进或者选择更合适的播种机提高播种质量, 或者适当提高播种量等措施, 提高出苗率保证群体数量。所以, 在本试验条件下冬小麦播前翻耕夏玉米播前免耕是黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟区较适宜的耕作方式。

4 结论

与冬小麦播前旋耕夏玉米播前免耕 (RN) 相比, 冬小麦播前翻耕夏玉米播前免耕 (MN) 和冬小麦播前翻耕夏玉米播前旋耕 (MR) 均提高了夏玉米花后干物质积累及其向籽粒分配的比例, 提高了籽粒最大灌浆速率 G_{max} , 进而提高穗粒数与粒重; MR 的出苗率提高, 是其产量高于 MN 的主要原因。尽管 MR 的产量较 MN 高 5.23%, 但综合考虑认为冬小麦播前翻耕和夏玉米免耕播种更有利于黄淮海夏玉米的高产高效生产。

References

- [1] Hughes K A, Horne D J, Ross C W, Julian J F. A 10 year maize/oats rotation under three tillage systems: plant population, root distribution and forage yields. *Soil and Tillage Research*, 1992, 22: 145-157.
 - [2] Karunatilake U, Van Es H M, Schindelbeck R R. Soil and maize response to plow and no-tillage after alfalfa-to- maize conversion on a clay loam soil in New York. *Soil and Tillage Research*, 2000, 55: 31-42.
 - [3] 吴士宏, 郑会宇. 不同耕作方式对玉米不同时期干物质积累的影响. 安徽农学通报, 2010, 16(24): 24, 103.
- Wu S H, Zheng H Y. Effects of different tillage on dry matter

- accumulation of maize. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(24): 24, 103. (in Chinese)
- [4] 周兴祥, 高焕文, 刘晓峰. 华北平原一年两熟保护性耕作体系试验研究. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 81-84.
- Zhou X X, Gao H W, Liu X F. Experimental study on conservation tillage system in areas of two crops a year in North China Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 6: 81-84. (in Chinese)
- [5] 郑会宇, 吴士宏. 不同耕作方式对玉米灌浆过程的影响试验初报. *安徽农学通报*, 2010, 16(24): 76-77, 106.
- Zheng H Y, Wu S H. Effects of different tillage on dry matter accumulation of maize. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(24): 76-77, 106. (in Chinese)
- [6] 李明德, 刘琼峰, 吴海勇, 汤睿. 不同耕作方式对红壤旱地土壤理化性状及玉米产量的影响. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1522-1526.
- Li M D, Liu Q F, Wu H Y, Tang R. Effects of different cultivation on soil physicochemical properties of upland red soils and maize yield. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1522-1526. (in Chinese)
- [7] 史忠强, 江晓东, 王芸, 宁堂原, 韩宾, 李增嘉. 少免耕对夏玉米灌浆过程和产量的影响. *山东农业科学*, 2007(1): 51-52, 56.
- Shi Z Q, Jiang X D, Wang Y, Ning T Y, Han B, Li Z J. Effects of minimum and no tillage on seed filling and yield of summer maize. *Shandong Agricultural Sciences*, 2007(1): 51-52, 56. (in Chinese)
- [8] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 宫少俊, 黄元仿. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 945-950.
- Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, Gong S J, Huang Y F. Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945-950. (in Chinese)
- [9] 李素娟, 陈继康, 陈阜, 李琳, 张海林. 华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究. *作物学报*, 2008, 34(2): 290-296.
- Li S J, Chen J K, Chen F, Li L, Zhang H L. Characteristics of growth and development of winter wheat under zero-tillage in North China Plain. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(2): 290-296. (in Chinese)
- [10] Cox W J, Zobel R W, Van Es H M, Otis D J. Tillage effects on some soil physical and physical and corn physiological characteristics. *Agronomy Journal*, 1990, 82: 812-860.
- [11] 孔凡磊, 袁继超, 张海林, 陈阜. 耕作方式对华北两熟区冬小麦生长发育和产量的影响. *作物学报*, 2013, 39(9): 1612-1618.
- Kong F L, Yuan J C, Zhang H L, Chen F. Effect of tillage practice on growth and development and yield of winter wheat in double cropping area in North China. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(9): 1612-1618. (in Chinese)
- [12] Abdou A S, Hossner L R, Unger P W, Stewart B A. Tillage and residue effects on root growth and yields of grain sorghum following wheat. *Soil and Tillage Research*, 1997, 44: 121-129.
- [13] Hammel J E. Long term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in northern Idaho. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 1515-1519.
- [14] Ladha J K. Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 854-864.
- [15] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 宁堂原, 郑延海, 史忠强. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48-53.
- Han B, Li Z J, Wang Y, Ning T Y, Zheng Y H, Shi Z Q. Effects of soil tillage and returning straw to soil on wheat growth status and yield. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 48-53. (in Chinese)
- [16] Hall A J, Vilella F, Trapani N, Chimenti C. The effects of water stress and genotype on the dynamics of pollen-shedding and silking in maize. *Field Crops Research*, 1982, 5: 349-363.
- [17] Fischer K S, Palmer F E. *The Physiology of Tropical Field Crops*. New York: Wiley, 1984: 213-248.
- [18] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 谢瑞芝, 高世菊. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素. *作物学报*, 2006, 32(3): 463-465.
- Li S K, Wang K R, Feng J K, Xie R Z, Gao S J. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463-465. (in Chinese)
- [19] 沈学善, 李金才, 屈会娟, 魏凤珍, 张一, 武文明. 砂姜黑土区小麦玉米秸秆全量还田对玉米抗倒性能的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(10): 2005-2012.
- Shen X S, Li J C, Qu H J, Wei F Z, Zhang Y, Wu W M. Effects of wheat and maize straw returned to the field on lodging resistance of maize in lime concretion black soil region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(10): 2005-2012. (in Chinese)
- [20] 张银锁, 宇振荣, Driessen P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转运的试验研究. *作物学报*, 2002, 28(1): 104-109.
- Zhang Y S, Yu Z R, Driessen P M. Experimental study of assimilate production, partitioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays*) under various environmental and management conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 104-109. (in Chinese)
- [21] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 王振林, 曹鸿鸣, 焦念元, 陈明灿. 残茬覆盖与耕作方式对夏玉米光合产物生产与分配的影响. *华北农学*

- 报, 2005, 20(3): 62-66.
- Fu G Z, Li C H, Wang J Z, Wang Z L, Cao H M, Jiao N Y, Chen M C. Effects of stubble mulch and tillage management on assimilating production and distribution in summer maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2005, 20(3): 62-66. (in Chinese)
- [22] 胡昌浩, 潘子龙. 夏玉米同化产物积累与养分吸收分配规律的研究: II. 氮、磷、钾的吸收、分配与转移规律. 中国农业科学, 1982, 15(2): 38-48.
- Hu C H, Pan Z L. Studies on the rules of assimilate accumulation and nutrient absorption and distribution in the summer maize plant II. Rules of accumulation, distribution and translation of nitrogen phosphorus and potassium. *Scientia Agricultura Sinica*, 1982, 15(2): 38-48. (in Chinese)
- [23] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 799-807.
- Li W J, He P, Jin J Y. Potassium nutrients on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 799-807. (in Chinese)
- [24] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 王艳群, 刘会玲, 薛世川. 不同供氮水平对玉米干物质和磷动态积累分配的影响. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 793-798.
- Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, Wang Y Q, Liu H L, Xue S C. Effects of different phosphorus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter phosphorus in maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 793-798. (in Chinese)
- [25] 范仲学, 王璞. 育苗移栽夏玉米灌浆特性研究. 玉米科学, 2001, 9(2): 47-49.
- Fan Z X, Wang P. Study on grain filling characteristics of transplanted summer maize. *Journal of Maize Science*, 2001, 9(2): 47-49. (in Chinese)
- [26] 张俊鹏, 孙景生, 刘祖贵, 高阳. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 501-506.
- Zhang J P, Sun J S, Liu Z G, Gao Y. Effect of moisture and mulching on filling characteristics and yield of summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 501-506. (in Chinese)
- (责任编辑 郭银巧, 杨鑫浩)