



# 秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量及干物质转运的影响

穆心愿<sup>1</sup>, 赵霞<sup>1</sup>, 谷利敏<sup>1</sup>, 冀保毅<sup>2</sup>, 丁勇<sup>1</sup>, 张凤启<sup>1</sup>, 张君<sup>1</sup>, 齐建双<sup>1</sup>, 马智艳<sup>1</sup>, 夏来坤<sup>1</sup>, 唐保军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 河南省农业科学院粮食作物研究所/河南省玉米生物学重点实验室, 郑州 450002; <sup>2</sup> 信阳农林学院, 河南信阳 464000)

**摘要:**【目的】科学客观评价秸秆直接还田的综合效应, 对提高秸秆资源利用率、促进农业绿色可持续发展意义重大。本研究在黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟区设置大田定位试验, 探究不同基因型夏玉米对秸秆还田量的响应, 为该区秸秆还田技术的综合评价和秸秆还田量的优化提供依据。【方法】试验于2017年10月至2018年10月在河南原阳进行, 采用裂区试验设计, 设置秸秆还田量和基因型两个因素。秸秆还田因素为主区, 设置4个秸秆还田量处理, 分别为秸秆不还田(S0)、半量秸秆还田(S1)、全量秸秆还田(S2)和倍量秸秆还田(S3); 基因型为副区, 供试品种分别为浚单20(XD20)和郑单958(ZD958)。分析2个品种在不同秸秆还田量处理下叶面积指数(LAI)、干物质积累与转运、产量性状的差异。【结果】与秸秆不还田处理相比, 秸秆还田能维持玉米花后较高的叶面积指数, 且基因型与秸秆还田量间存在显著的交互作用。玉米开花期, XD20和ZD958的LAI均随秸秆还田量的增加而增加, 在S3处理下最高。玉米成熟期, XD20和ZD958的LAI降幅随秸秆还田量增加而呈先降后升的趋势, XD20在S1处理下最低, ZD958在S2处理下最低; 且2个品种成熟期LAI随秸秆还田量增加呈先升后降的趋势, XD20在S1处理下最高, ZD958在S2处理下最高。花后较高的叶面积指数有利于玉米花后维持较高的干物质生产能力, 从而显著提高花后干物质积累量, 优化干物质积累与分配特性。基因型和秸秆还田量互作显著影响花前营养器官的干物质转运量(DMR)和转运率(DMRE)、花前干物质转运对籽粒干物质积累贡献率(DMRCG)、花后干物质积累量(DMAA)及其对籽粒干物质积累贡献率(DMAACG)。随秸秆还田量增加, XD20花前营养器官(茎鞘+叶片)的DMR、DMRE和DMRCG呈先降后升趋势, 均在S1处理下最低, 而花后DMAA和DMAACG则呈先升后降趋势, 均在S1处理下达到最高值; ZD958花前营养器官(茎鞘+叶片)的DMR、DMRE和DMRCG以及花后DMAA均呈先升后降趋势, 均在S2处理最高。玉米花后干物质积累量的增加, 有利于增加粒重, 进而提高籽粒产量。与S0处理相比, S1、S2和S3处理均提高了玉米籽粒产量, 但玉米籽粒产量并未随着还田量的增加而持续增加; XD20在S1处理下2年籽粒产量最高, 2年平均高于其他处理3.5%—17.7%, ZD958在S2处理下2年籽粒产量最高, 2年平均高于其他处理0.4%—16.8%。【结论】在黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟潮土区, 适量秸秆还田可延缓玉米生育后期叶片衰老进程, 优化玉米干物质积累与分配特性, 提高花后干物质积累量, 增加粒重, 进而提高玉米籽粒产量。但不同基因型玉米对秸秆还田量的响应有很大差异, 在推广秸秆还田时, 不仅要考虑秸秆还田量, 还要考虑作物遗传因素对秸秆还田效应的影响。

**关键词:** 秸秆还田量; 夏玉米; 基因型; 干物质; 转运

## Effects of Straw Returning Amount on Grain Yield, Dry Matter Accumulation and Transfer in Summer Maize with Different Genotypes

MU XinYuan<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>1</sup>, GU LiMin<sup>1</sup>, JI BaoYi<sup>2</sup>, DING Yong<sup>1</sup>, ZHANG FengQi<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>,  
QI JianShuang<sup>1</sup>, MA ZhiYan<sup>1</sup>, XIA LaiKun<sup>1</sup>, TANG BaoJun<sup>1</sup>

收稿日期: 2019-05-05; 接受日期: 2019-07-03

基金项目: 河南省农业科学院科研发展专项资金项目(YNK201710610)、河南省农业科学院优秀青年科技基金计划项目、河南省玉米产业技术体系建设专项(S2015-02-04)、国家公益性行业(农业)科研专项(201503130)

联系方式: 穆心愿, E-mail: muxinyuan@163.com. 赵霞, E-mail: zhaoxia1007@126.com. 穆心愿和赵霞为同等贡献作者。通信作者夏来坤, E-mail: xialaikun@126.com. 通信作者唐保军, E-mail: henan.maize@163.com

(<sup>1</sup>Cereal Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences/Henan Provincial Key Laboratory of Maize Biology, Zhengzhou 450002;

<sup>2</sup>Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, Henan)

**Abstract:** 【Objective】 Scientific and objective evaluation of the comprehensive effect of straw returning is important to improve the utilization rate of straw resources and to promote the green and sustainable development of agriculture. In this study, a field located experiment was conducted in wheat-maize cropping system on the North China Plain, to clarify the responses of different genotypes summer maize to various straw returning amounts. The purpose of this paper was to provide support for the comprehensive evaluation of the straw returning technology and for the optimization of straw returning amount. 【Method】 The experiment was conducted from October 2017 to October 2018 at Yuanyang, Henan province. The experimental design was a split plot. The main plot was four straw returning amount, no straw returning to field (S0), 50% amount of straw returning to field (S1), 100% amount of straw returning to field (S2) and 200% amount of straw returning to field (S3), and the subplot was genotype, including XD20 and ZD958. The differences in leaf area index (LAI), dry matter accumulation and transfer, and grain yield under different treatments were analyzed. 【Result】 Compared with no straw returning to field, the straw returning increased LAI after silking, and there was a significant interaction between genotypes and straw returning amount on LAI. At anthesis stage, the LAI of XD20 and ZD958 increased with the increasing of straw returning amount, and were the highest under S3 treatment. At maturity stage, with the increasing of straw returning amount, the decline in LAI for XD20 and ZD958 showed a trend of first decreasing and then increasing, and was the lowest under S1 for XD20 and S2 for ZD958. In addition, the LAI of XD20 and ZD958 at maturity stage showed a trend of first rising and then falling with the increasing of straw returning amount, and were the highest under S1 for XD20 and S2 for ZD958. Higher post-silking LAI was conducive to maintain higher post-silking dry matter production capacity, eventually significantly increased post-silking dry matter accumulation and optimize dry matter accumulation and distribution characteristics. The interaction of genotype and straw returning amount significantly affected the dry matter remobilization (DMR), dry matter remobilization efficiency (DMRE), contribution of dry matter remobilization to grain (DMRCG), dry matter accumulation after anthesis (DMAA) and contribution of dry matter accumulation after anthesis to grain (DMAACG). With the increasing of straw returning amount, DMR, DMRE and DMRCG of the vegetative organs (stem sheath + leaf) in XD20 firstly decreased and then increased, and were the lowest under S1 treatment. Meanwhile, DMAA and DMAACG showed an increasing trend first and then a decreasing trend, which were the highest under S1 treatment. The DMR, DMRE, DMRCG and DMAA of the vegetative organs (stem sheath + leaf) of ZD958 all showed an ascending and then descending trend with increasing of straw returning amount, and those were the highest under S2 treatment. The increase of dry matter accumulation was beneficial to increase grain weight and grain yield. Compared with S0 treatment, S1, S2 and S3 treatment improved the grain yield, but the grain yield did not increase continuously with the increasing of straw returning amount. For XD20, the highest grain yield was obtained under S1 treatment, which was 3.5% to 17.7% averagely higher than other treatments. For ZD958, the highest grain yield was achieved under S2 treatment, which was 0.4% to 16.8% averagely higher than other treatments. 【Conclusion】 Our results showed that, for wheat-maize cropping system on the North China Plain, appropriate amount of straw to the field could delay the leaf senescence process in the later growth stage of maize, optimize the dry matter accumulation and distribution characteristics, improve the post-silking dry matter accumulation and grain weight, and thereby improve the grain yield of maize. However, the responses of different maize cultivars to straw returning amount vary greatly. When promoting straw returning to the field, the effects of crop genetic factors on straw returning should also be considered.

**Key words:** straw returning amount; summer maize; genotypes; dry matter; remobilization

## 0 引言

【研究意义】我国是农业大国, 每年可产生约 9 亿多吨的农作物秸秆<sup>[1]</sup>。农作物秸秆是一种重要的生物物质资源, 如何科学、高效地利用该资源已成为我国农业可持续发展和环境保护面临的紧迫问题。作物秸秆蕴藏着大量有机质和营养元素, 将其直接或间接还田后既能改善土壤物理及生物状况, 还可以显著减少

农田化肥施用量<sup>[2-3]</sup>。近年来, 秸秆直接还田已成为增加土壤有机质含量、培肥地力的重要措施而被大面积推广应用。但在实际生产中, 秸秆还田存在配套技术不完善、量化不合理、操作不当等问题, 进而导致秸秆还田正负效应并存的生产现状<sup>[4-5]</sup>。深入了解秸秆还田的生理生态效应, 对优化秸秆还田技术及建立秸秆还田技术综合评价体系具有重要意义。【前人研究进展】秸秆还田一方面能改善土壤团粒结构<sup>[6-7]</sup>、增强土

壤渗水保水能力<sup>[8-9]</sup>, 补充土壤养分<sup>[10-11]</sup>、增加土壤碳库<sup>[12-13]</sup>, 改善土壤微生态环境<sup>[14-16]</sup>, 起到培肥土壤的作用; 另一方面还可以促进作物根系生长, 提高作物叶片净光合速率和蒸腾速率, 促进植株干物质积累, 有利于作物籽粒产量和水分利用效率的提高<sup>[17-20]</sup>。前人研究表明, 并不是秸秆还田量越高, 作物就会增产越多, 因秸秆还田对产量的影响受土壤类型、气候条件、还田方式、耕作方式、施肥以及水分管理等的综合影响, 在最适宜秸秆还田量上前人研究结果并不一致<sup>[4-5, 21-23]</sup>。殷文等<sup>[21, 24]</sup>研究表明, 在水资源短缺的河西绿洲灌区, 与传统低茬收割翻耕处理相比, 少耕秸秆覆盖还田具有保墒蓄水、抑制蒸发、协调作物需水矛盾的作用, 显著增加作物产量和水分利用效率。赵亚丽等<sup>[20, 25]</sup>研究表明, 在黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟区, 小麦季深耕/深松秸秆还田和玉米季免耕秸秆覆盖还田更有利于改善土壤结构及理化性质、增强土壤微生物活性、提高作物产量和水分利用效率。郭海斌等<sup>[26]</sup>研究表明, 在黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟区, 深耕加秸秆还田对壤土物理性状的改良效果和对作物的增产效果优于黏土。杨晨璐等<sup>[27]</sup>研究表明, 在陕西关中地区麦玉复种体系下, 长期秸秆全量还田配减量施氮在保证冬小麦及夏玉米维持较高产量的情况下, 还能显著改善作物水肥利用情况。在半干旱区, 周年高量秸秆粉碎还田处理(小麦秸秆  $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  + 玉米秸秆  $13\ 500\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 的土壤蓄水能力、水分利用率较中低量秸秆还田处理高, 作物增产幅度大<sup>[28]</sup>。在稻麦周年两熟模式下, 前人研究结果显示 50% 稻麦秸秆还田处理的土壤培肥效果明显, 小麦的增产效果最好<sup>[10]</sup>。不同株型夏玉米水分利用效率对秸秆覆盖的反应也有差异, 秸秆覆盖显著增加平展型和紧凑型玉米籽粒产量, 但对紧凑型玉米水分利用效率的提高作用要优于平展型<sup>[29]</sup>。不同小麦品种对秸秆还田的响应也有较大差异, 秸秆还田对分蘖成穗率强的小麦品种产量影响不大, 却显著降低了分蘖力弱的大穗型品种产量, 但秸秆还田能显著提高强筋小麦面粉的蛋白质含量, 延长弱筋小麦的面团形成时间和稳定时间, 改善小麦加工品质<sup>[30]</sup>。【本研究切入点】前人的研究多关注秸秆还田的方式、时间、数量、施肥等方面对秸秆还田效果的影响, 虽然已基本明确秸秆还田对作物生长发育和产量形成的影响以及对改良土壤的重要作用, 但作物遗传特性对秸秆还田效果的响应, 尤其是在黄淮海小麦-玉米一年两熟区不同基因型玉米的适宜秸秆还田量是否一

致, 尚缺乏系统研究。【拟解决的关键问题】本研究在黄淮海小麦-玉米一年两熟区, 设置了不同秸秆还田量的定位试验, 通过分析不同基因型夏玉米在不同秸秆还田量处理下叶片衰老特性、干物质积累转运特性和产量性状的差异, 研究秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量及干物质转运的影响, 探讨作物遗传特性对秸秆还田效果的响应, 为优化秸秆还田技术提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2017 年 10 月至 2018 年 10 月, 在河南省农业科学院现代农业科技试验示范基地(河南原阳,  $35^{\circ}01'\text{N}$ 、 $113^{\circ}42'\text{E}$ , 海拔  $63.40\ \text{m}$ ) 进行。该地区属于暖温带大陆性季风型气候, 多年平均气温  $14.5^{\circ}\text{C}$ , 降雨量  $549.9\ \text{mm}$ , 日照时数  $1\ 925.1\ \text{h}$ , 无霜期  $220\ \text{d}$ 。种植制度为小麦-玉米一年两熟轮作制, 试验地土壤类型为潮土, 耕层 ( $0-20\ \text{cm}$ ) 土壤基本化学性质为全氮含量  $1.17\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全磷含量  $0.76\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全钾含量  $19.36\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮含量  $52.35\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷含量  $85.99\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾含量  $226.35\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有机质含量  $8.21\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2017 和 2018 年 6 至 9 月份玉米生长季总降雨量分别为  $285.0\ \text{mm}$  和  $321.6\ \text{mm}$ , 低于历年 (1980—2018 年) 平均降雨量  $433.6\ \text{mm}$ , 生长季内自然降水分布不均, 需要补充灌溉。

### 1.2 试验设计与田间管理

试验在小麦玉米轮作制度上, 采用裂区试验设计, 设置秸秆还田量与玉米基因型两个因素。主因素为秸秆还田量处理, 对小麦季和玉米季设置相当的秸秆还田量, 共 4 个处理, 分别是无秸秆还田 ( $S_0$ )、半量秸秆还田 ( $S_1$ )、全量秸秆还田 ( $S_2$ ) 和倍量秸秆还田 ( $S_3$ )。秸秆还田量均按当季生产的地上部秸秆干物质质量为标准计算, 以当季各处理生产秸秆量的平均值作为全量秸秆还田量, 并以此为基础计算半量秸秆还田量和倍量秸秆还田量。在小麦和玉米成熟后, 对每个小区进行取样, 测定每个小区当季生产的地上部秸秆干物质质量, 用以计算平均秸秆量, 每年度产生平均秸秆量如表 1 所示。小麦和玉米成熟收获后,  $S_1$  处理各小区根据计算的秸秆还田量把小区内多余的秸秆人工移出试验地,  $S_3$  处理各小区根据计算的秸秆还田量把不足的秸秆量人工均匀撒施进去,  $S_2$  处理各小区根据计算的秸秆还田量多去少补,  $S_0$  处理则将夏玉米和冬小麦秸秆全部移出试验地。夏玉米秸秆经秸秆还

田机粉碎后,在冬小麦播种前结合土壤耕作翻入土壤进行秸秆翻埋还田;冬小麦秸秆经秸秆还田机粉碎后,地表覆盖还田,夏玉米贴茬播种。副因素为基因型,设置2个玉米品种,分别为郑单958(ZD958)和浚单20(XD20),播种密度为67 500株/hm<sup>2</sup>,行距60 cm。试验小区面积为36 m<sup>2</sup>(3.6 m×10 m),3次重复。

表1 每年度产生的平均秸秆量

Table 1 The total amount of maize and wheat straw each year

年度 Year	冬小麦季全量玉米秸秆 The total maize straw in winter wheat season (kg·hm <sup>-2</sup> )	夏玉米季全量小麦秸秆 The total wheat straw in summer maize season (kg·hm <sup>-2</sup> )
2015-2016	7816.5	8092.8
2016-2017	7661.1	8804.4
2017-2018	7566.2	7685.7

试验于2015年10月开始定位,共进行了6季,本研究为2017年和2018年的夏玉米季。肥料选用小麦和玉米专用复合肥,冬小麦氮磷钾施用量为N 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 97.5 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 45 kg·hm<sup>-2</sup>,在小麦播种时一次性基施;夏玉米氮磷钾施用量为N 210 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 45 kg·hm<sup>-2</sup>,于玉米拔节期一次性开沟施入。冬小麦于每年10月中旬播种,6月上旬收获,夏玉米于每年6月中旬播种,10月上旬收获。试验小区的其他田间管理同大田生产规范。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶面积指数(LAI) 于玉米开花期和成熟期,每小区选取5株有代表性、长势均匀一致的植株,在田间采用长宽系数法测量活体植株单株绿叶面积,计算叶面积指数(LAI)。

1.3.2 干物质积累量及转运 于玉米开花期和成熟期,各小区分别选取3株有代表性、长势均匀一致植株的地上部分,并将地上部植株进行分类。开花期分为茎鞘(茎秆+叶鞘)、叶片和雌穗3个部分,成熟期分为茎鞘(茎秆+叶鞘)、叶片、苞轴(苞叶+穗轴)和籽粒4个部分,然后把样品放入烘箱中105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重,冷却至室温后用百分之一天平称重,计算开花期营养器官干物质转运对籽粒干物质积累贡献率<sup>[31-32]</sup>。

开花期干物质转运量(g/plant)=开花期营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量;

开花期干物质转运率(%)=开花期干物质转运量/开花期营养器官干物质积累量×100;

开花期干物质转运对籽粒贡献率(%)=开花期干物质转运量/成熟期籽粒干物质积累量×100;

花后干物质积累量(g/plant)=成熟期干物质积累量-开花期干物质积累量;

花后干物质积累对籽粒贡献率(%)=100-开花期干物质转运对籽粒贡献率。

1.3.3 籽粒产量及其构成因素 于玉米成熟期收获测产。每小区选取中间两行收获全部果穗,并从中挑选出10穗有代表性的果穗,用于测定穗粒数和百粒重,然后全部果穗进行脱粒,并按14%含水量折算籽粒产量。

### 1.4 数据分析

用Microsoft Excel进行数据整理,用SPSS 19.0软件进行统计分析、处理间显著性检验(Duncan's)。

## 2 结果

### 2.1 秸秆还田量对不同基因型夏玉米叶面积指数(LAI)的影响

由表2可见,2个品种成熟期叶面积指数(LAI<sub>m</sub>)差异极显著,秸秆还田量对开花期叶面积指数(LAI<sub>a</sub>)和成熟期叶面积指数(LAI<sub>m</sub>)的影响均达到显著水平。开花期,相同秸秆还田量下,XD20的LAI与ZD958无显著差异;成熟期,4个秸秆还田量处理下,XD20的LAI均显著低于ZD958,2年平均分别低60.8%(S<sub>0</sub>)、43.6%(S<sub>1</sub>)、53.2%(S<sub>2</sub>)和66.7%(S<sub>3</sub>)。2017—2018年,XD20和ZD958开花期的LAI均随秸秆还田量的增加而增加,以S<sub>3</sub>处理最高。成熟期,随秸秆还田量的增加,XD20 2年LAI数据均呈先升后降的趋势,以S<sub>1</sub>处理最高,2年平均分别比S<sub>0</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>处理高出75.2%、8.8%、58.3%。ZD958在2018年成熟期的LAI随秸秆还田量的增加呈先升后降的趋势,以S<sub>2</sub>处理最高,且与S<sub>0</sub>处理差异显著。

开花至成熟期,各处理LAI均逐渐降低,同一秸秆还田量下,XD20的LAI降幅显著高于ZD958。另外,2个品种LAI的降幅均随秸秆还田量的增加呈先降低后上升的趋势,其中XD20在S<sub>1</sub>处理下降幅最小,ZD958在S<sub>2</sub>处理下降幅最小。2017年,XD20 4个秸秆还田量处理(S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>和S<sub>3</sub>)LAI降幅分别为80.7%、71.8%、75.1%和82.9%,ZD958分别为44.0%、43.1%、41.1%和44.2%。2018年,XD20 4个秸秆还田量处理(S<sub>0</sub>、S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>和S<sub>3</sub>)LAI降幅分别为77.3%、63.4%、65.3%和78.8%,ZD958分别为44.1%、35.0%、

表 2 秸秆还田量对不同基因型夏玉米叶面积指数（LAI）的影响

Table 2 LAI as affected by the summer maize genotypes and straw returning amount

基因型 Genotype	秸秆还田量 Straw returning amount	2017		2018	
		LAIa	LAI <sub>m</sub>	LAIa	LAI <sub>m</sub>
浚单 20 XD20	S0	3.42±0.31b	0.66±0.08b	3.30±0.19a	0.75±0.02b
	S1	4.11±0.49ab	1.16±0.06a	3.58±0.18a	1.31±0.05a
	S2	4.10±0.28ab	1.02±0.03ab	3.60±0.33a	1.25±0.07a
	S3	4.63±0.20a	0.79±0.04ab	3.64±0.31a	0.77±0.03b
	均值 Mean	4.06	0.91	3.53	1.02
郑单 958 ZD958	S0	3.32±0.08a	1.86±0.07b	3.11±0.13b	1.74±0.11b
	S1	3.71±0.09a	2.11±0.13ab	3.49±0.30ab	2.27±0.25a
	S2	3.75±0.37a	2.21±0.28ab	3.57±0.10ab	2.64±0.07a
	S3	4.05±0.17a	2.26±0.01a	3.89±0.11a	2.43±0.21a
	均值 Mean	3.70	2.11	3.52	2.27
方差分析 ANOVA ( <i>F</i> -value)	G	3.22	190.38**	0.01	188.16**
	S	3.99*	3.61*	1.99	11.05**
	G×S	0.25	1.65	0.52	3.33*

LAIa: 开花期叶面积指数; LAIm: 成熟期叶面积指数; G: 基因型主效应; S: 秸秆还田量主效应; G×S: 基因型与秸秆还田量的交互效应。不同小写字母表示同一列同一品种下不同秸秆处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。\*, \*\*分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著。下同  
LAIa: LAI at anthesis stage; LAIm: LAI at maturity stage; G: Main effect of genotypes; S: Main effect of straw returning amount; G×S: Interaction effect of genotypes and straw returning amount. Different letters in the same column mean significant differences among straw treatments under the same cultivar at 0.05 level. \*and\*\* represent significant at 0.05 and 0.01 probability levels. The same as below

26.1%和 37.5%。试验结果表明, 秸秆还田有利于玉米叶面积指数的提高及延缓后期衰老, 但不宜过量, 特别是 XD20, 倍量秸秆还田处理 (S3) 加速了其生育后期叶片衰老进程。

2.2 秸秆还田量对不同基因型夏玉米干物质积累与分配的影响

2 个品种开花期穗重和成熟期叶片重、苞轴重、籽粒重及总干物质重差异达到显著水平, 秸秆还田量则显著影响除成熟期叶片重外的其他指标, 基因型和秸秆还田量互作显著影响成熟期茎鞘重、籽粒重及总干物质重 (表 3)。同一秸秆还田量处理下, 2 个品种开花期叶片重、茎鞘重和总干物质重无显著差异, 但 XD20 成熟期叶片重、苞轴重、籽粒重和总干物质重显著低于 ZD958, 分别低了 27.7%、23.4%、9.5%和 13.2%。XD20 4 个秸秆还田量处理 (S0、S1、S2 和 S3) 开花期的叶片重和茎鞘重均无显著差异, 但随还田量增加基本呈逐渐上升趋势, 而穗重随还田量增加呈先升后降的趋势, 其中以 S1 处理最高; 与 S0 处理相比, XD20 在 S1、S2 和 S3 处理下的开花期总干物质重分别提高了 22.5%、

17.9%和 20.7%。ZD958 开花期的叶片重、茎鞘重、穗重和总干物质重均随秸秆还田量的增加而增加; 与 S0 处理相比, ZD958 在 S1、S2 和 S3 处理下的开花期总干物质重分别提高了 4.5%、25.5%和 33.4%。成熟期 2 个品种的叶片重、茎鞘重、苞轴重、籽粒重和总干物质重均呈现随秸秆还田量增加呈先升后降的趋势, 其中 XD20 在 S1 处理下最高, ZD958 在 S2 处理下最高。与 S0 处理相比, XD20 在 S1、S2 和 S3 处理下的成熟期总干物质重分别高出 30.6%、20.6%和 0.3%, ZD958 则分别高出 7.8%、26.1%和 20.7%。与花前干物质积累量的规律不同, 2 个品种花后干物质积累量均随还田量增加呈先升后降的趋势, 其中 XD20 表现为 S1>S2>S0>S3, ZD958 则表现为 S2>S3>S1>S0 (表 3—4)。试验结果表明, 秸秆还田有利于玉米干物质积累量的提高, 但不同秸秆还田量处理下花前和花后的干物质生产能力差异较大, 适宜秸秆还田量不仅提高了花前干物质生产能力, 而且还增加了花后干物质积累量, 过量秸秆还田虽能增加花前干物质积累量, 但降低了花后干物质生产能力。

表 3 秸秆还田量对不同基因型夏玉米干物质积累量的影响

Table 3 Dry matter accumulation as affected by the summer maize genotypes and straw returning amount

基因型 Genotype	秸秆还田量 Straw returning amount	开花期 Anthesis stage (g/plant)				成熟期 Maturity stage (g/plant)				
		叶片 Leaf	茎鞘 Stem+sheath	穗 Ear	总重 Total	叶片 Leaf	茎鞘 Stem+sheath	苞轴 Cob+husk	籽粒 Grain	总重 Total
浚单 20 XD20	S0	36.3±1.8a	41.2±2.1a	8.6±0.6b	86.1±4.5b	22.2±3.2ab	40.2±1.4ab	19.4±1.2b	118.7±1.3b	200.5±0.5b
	S1	40.9±2.0a	51.9±3.9a	12.7±1.2a	105.5±6.1a	28.3±1.7a	49.9±4.8a	26.7±3.1a	157.1±14.4a	261.9±23.4a
	S2	41.2±0.9a	49.2±3.3a	11.1±1.3ab	101.5±4.9ab	27.4±1.8ab	47.0±2.5ab	24.2±3.3ab	143.3±7.0ab	241.9±11.7a
	S3	42.0±2.5a	52.0±6.6a	10.0±1.4b	103.9±9.4ab	20.5±1.7b	37.6±2.6b	20.2±1.6b	122.9±7.9b	201.1±11.7b
	均值 Mean	40.1	48.6	10.9	99.3	24.6	43.7	22.4	135.5	226.4
郑单 958 ZD958	S0	34.0±1.4c	43.1±2.9c	6.7±0.1a	83.8±3.0b	30.8±2.3a	41.6±2.9b	26.7±1.9a	130.1±12.0b	229.2±13.2b
	S1	35.5±1.7bc	44.3±4.5bc	7.8±0.8a	87.6±6.0b	31.6±2.1a	42.0±5.8b	29.1±2.5a	144.3±2.0ab	247.0±11.7b
	S2	39.9±1.2ab	56.4±3.0ab	8.8±1.2a	105.2±1.8a	37.0±2.5a	55.4±2.7a	32.6±0.7a	164.0±3.0a	289.0±1.8a
	S3	42.2±0.5a	60.0±1.3a	9.6±0.7a	111.8±1.2a	36.6±2.1a	51.0±0.6ab	28.5±1.9a	160.5±2.8a	276.6±4.6a
	均值 Mean	37.9	51.0	8.2	97.1	34.0	47.5	29.2	149.7	260.5
方差分析 ANOVA (F-value)	G	2.83	0.82	14.22**	0.34	36.09**	2.71	19.63**	4.52*	13.53**
	S	6.16**	4.94**	3.83*	6.87**	2.30	3.38*	3.14*	5.00*	6.02**
	G×S	1.36	2.05	2.60	2.77	2.82	3.93*	0.98	5.31*	6.07**

2.3 秸秆还田量对不同基因型夏玉米干物质转运的影响

表 4 显示，品种间花前叶片和茎鞘的干物质转运量（DMR）和转运率（DMRE）、花前干物质转运对籽粒干物质积累贡献率（DMRCG）、花后干物质积累量（DMAA）及其对籽粒干物质积累贡献率（DMAACG）均有显著差异，秸秆还田量处理间花前茎鞘的 DMR、DMRE 和 DMRCG 以及花后的 DMAA 和 DMAACG 均存在显著差异，而基因型和秸秆还田量互作显著影响花前叶片和茎鞘的 DMR、DMRE 和 DMRCG 以及花后的 DMAA 和 DMAACG。XD20 花前叶片和茎鞘的 DMR、DMRE 和 DMRCG 均显著高于 ZD958，而 XD20 的 DMAA 和 DMAACG 则显著低于 ZD958。2 个品种花前叶片的 DMR 和 DMRE 均高于茎鞘，XD20 花前叶片的 DMR 和 DMRE 分别是茎鞘的 3.1 倍和 4 倍，ZD958 花前叶片的 DMR 和 DMRE 分别是茎鞘的 1.1 倍和 1.6 倍。2 个品种花前营养器官（叶片+茎鞘）干物质转运对籽粒干物质积累贡献率远小于花后干物质积累量对籽粒干物质积累贡献率，XD20 花前转运和花后同化贡献率占比分别为 15.6% 和 84.4%，ZD958 分别为 5.0%和 95.0%。结果表明，品种间干物质转运特性有较大差异，XD20 营养器官的转运量和转运率均高于 ZD958，特别是 XD20 叶片

干物质向籽粒的转运率过高，易造成其叶片早衰，不利于其后期叶片光合生产，影响花后干物质积累。

XD20 花前叶片的 DMR、DMRE 和 DMRCG 均随秸秆还田量的增加呈先降低后上升的趋势，其中 S1 处理最低，且 S3 处理显著高于 S0、S1 和 S2 处理；茎鞘的 DMR、DMRE 和 DMRCG 均随秸秆还田量的增加而增加，其中 S3 处理最高。ZD958 花前叶片的 DMR、DMRE 和 DMRCG 随秸秆还田量的增加呈先上升后降低的趋势，处理间差异不显著，其中 S2 处理最高；茎鞘的 DMR、DMRE 和 DMRCG 随秸秆还田量的增加呈逐渐上升的趋势，S3 处理最高。XD20 的 DMAA 和 DMAACG 随秸秆还田量的增加呈先上升后下降的趋势，其中 S1 处理最高；ZD958 的 DMAA 随秸秆还田量的增加呈先上升后下降的趋势，其中 S2 和 S3 处理显著高于 S0 和 S1 处理。结果表明，秸秆还田量对不同基因型玉米干物质转运特性的影响存在显著差异。与秸秆不还田相比，适量秸秆还田增加了 XD20 花后干物质的积累量而减少了花前叶片干物质向籽粒的转运，但过量秸秆还田却降低了花后干物质积累量，反而刺激了营养器官干物质向籽粒的转运；对 ZD958 来说，适量秸秆还田不仅提高了花后干物质积累量，还增加了花前营养器官干物质向籽粒的转运。

表 4 秸秆还田量对不同基因型夏玉米开花前后营养器官干物质转运的影响

Table 4 Dry matter transfer before and after anthesis and their contribution to grain dry matter as affected by the summer maize genotypes and straw returning amount

基因型 Genotype	秸秆还田量 Straw returning amount	花前 Before anthesis						花后 After anthesis	
		叶片 Leaf			茎鞘 Stem+sheath				
		DMR (g/plant)	DMRE (%)	DMRCG (%)	DMR (g/plant)	DMRE (%)	DMRCG (%)	DMAA (g/plant)	DMAACG (%)
浚单 20 XD20	S0	14.1±1.9b	39.2±4.6b	11.9±1.7b	1.0±0.4b	2.4±0.3b	0.8±0.1b	114.4±9.0b	87.3±2.0a
	S1	12.6±0.6b	30.9±1.3b	8.2±0.7b	2.0±0.8b	4.1±0.1b	1.4±0.4b	156.4±9.3a	90.5±1.3a
	S2	13.8±2.2b	33.4±5.0b	9.7±1.6b	2.3±0.3b	4.6±0.6b	1.6±0.2b	140.4±5.6ab	88.8±1.4a
	S3	20.5±3.0a	49.6±5.3a	16.9±3.2a	14.4±2.0a	27.5±1.2a	12.0±1.0a	97.2±8.9c	71.1±3.8b
	均值 Mean	15.3	38.3	11.6	4.9	9.7	4.0	126.9	84.4
郑单 958 ZD958	S0	3.2±0.9a	9.3±1.2a	2.6±0.5a	1.5±0.3c	3.5±0.5c	1.1±0.1c	145.4±6.9b	96.3±0.9a
	S1	3.9±0.7a	11.1±1.1a	2.9±0.4a	2.3±0.4bc	5.7±0.5bc	1.7±0.3bc	159.4±2.9b	95.3±0.7a
	S2	5.3±0.7a	12.5±1.9a	3.2±0.7a	4.6±0.5ab	7.8±0.9ab	2.8±0.4ab	183.8±1.5a	94.0±0.5a
	S3	3.3±0.5a	8.1±1.2a	2.0±0.3a	5.4±0.6a	9.2±1.6a	3.4±0.7a	164.8±6.0a	94.6±2.3a
	均值 Mean	3.9	10.3	2.7	3.5	6.5	2.3	163.4	95.0
方差分析 ANOVA (F-value)	G	103.05**	151.40**	75.22**	5.83*	27.52**	22.35**	27.86**	61.89**
	S	2.11	2.14	2.69	42.75**	135.89**	78.46**	4.41*	11.81**
	G×S	3.30*	4.89*	4.34*	18.26**	72.52**	43.98**	10.07**	10.50**

DMR：干物质转运量；DMRE：干物质转运率；DMRCG：干物质转运对籽粒干物质积累贡献率；DMAA：花后干物质积累量；DMAACG：花后干物质积累对籽粒干物质积累贡献率  
DMR: Dry matter remobilization; DMRE: Dry matter remobilization efficiency; DMRCG: Contribution of dry matter remobilization to grain; DMAA: Dry matter accumulation after anthesis; DMAACG: Contribution of dry matter accumulation after anthesis to grain

2.4 秸秆还田量对不同夏玉米品种籽粒产量与产量构成因素的影响

表 5 可见，品种间公顷穗数差异不显著，而 2017 年穗粒数及 2 年的百粒重和籽粒产量差异显著。XD20 2 年的百粒重和籽粒产量均显著低于 ZD958，2017 年分别平均低 12.3%和 10.4%，2018 年分别平均低 13.3%和 13.2%。秸秆还田量对公顷穗数和穗粒数无显著影响，但对百粒重和籽粒产量的影响达到显著水平。随秸秆还田量的增加，穗粒数呈逐渐增加趋势，而百粒重和籽粒产量呈先增加后降低的趋势。与 S0 处理相比，XD20 在 S1、S2 和 S3 处理下的籽粒产量 2 年平均高出 17.7%、13.7%和 9.0%，ZD958 则平均高出 5.1%、16.8%和 16.3%。表明秸秆还田有利于玉米产量构成要素及籽粒产量的提高，但不宜过量，其中半量秸秆还田处理（S1）更有利于 XD20 籽粒产量的增加，全量秸秆还田处理（S2）更有利于 ZD958 籽粒产量的增加。

3 讨论

3.1 秸秆还田量对不同基因型夏玉米产量的影响

秸秆还田作为农田改土培肥的技术之一，能改善土壤物理及水肥状况，有利于作物生长发育<sup>[17, 33, 18]</sup>。前人研究表明，秸秆还田有利于促进玉米穗粒数和百粒重的增加，提高产量<sup>[27, 24]</sup>，但产量并不会随着秸秆还田量的增加而一直增加，秸秆还田量过大增产幅度反而下降<sup>[34, 10, 22]</sup>，与本文研究结果一致。这可能是由于作物秸秆中 C/N 一般较高，秸秆还田会导致土壤 C/N 升高，特别是秸秆还田过量后，会导致土壤 C/N 失调，影响土壤微生物数量和活性，不仅造成秸秆腐解速率降低，还会导致微生物与作物争夺氮素，造成土壤供氮不足，影响作物产量的提高<sup>[35-36, 23]</sup>。不同试验条件下，秸秆还田量对作物产量影响的结果存在较大差异。钱凤魁等<sup>[34]</sup>研究表明，在东北半干旱区，秸秆还田量在 0—12 000 kg·hm<sup>-2</sup> 时，玉米产量呈

表 5 秸秆还田量对不同基因型夏玉米籽粒产量及产量构成因素的影响

Table 5 Yield and its components as affected by the summer maize genotypes and straw returning amount

基因型 Genotype	秸秆还田量 Straw returning amount	2017				2018			
		公顷穗数	穗粒数	百粒重	产量	公顷穗数	穗粒数	百粒重	产量
		Ear number (No./hm <sup>2</sup> )	Grain number per ear	100-grain weight (g)	Yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	Ear number (No./hm <sup>2</sup> )	Grain number per ear	100-grain weight (g)	Yield (kg·hm <sup>-2</sup> )
浚单 20 XD20	S0	66700a	509.4b	24.8b	6822.4b	66422a	484.3a	24.9b	6881.4b
	S1	66144a	545.5ab	27.2a	8065.3a	68645a	488.3a	27.2a	8062.6a
	S2	67256a	537.4ab	26.9a	7951.4a	65033a	507.7a	26.7ab	7626.0ab
	S3	65588a	567.8a	24.5b	7543.9ab	65866a	525.0a	25.2ab	7393.8ab
	均值 Mean	66422	540.0	25.7	7595.8	66492	501.3	26.0	7490.9
郑单 958 ZD958	S0	65866a	495.8a	28.5a	7729.0b	67311a	497.0a	28.9a	7885.4b
	S1	65088a	500.2a	28.7a	8210.7ab	66811a	506.0a	29.6a	8195.7b
	S2	67978a	503.2a	30.6a	8900.2ab	64810a	516.5a	30.8a	9340.6a
	S3	66811a	511.4a	29.5a	9058.9a	67423a	536.7a	30.7a	9102.0ab
	均值 Mean	66436	502.7	29.3	8474.7	66589	514.1	30.0	8630.9
方差分析 ANOVA (F-value)	G	0.12	4.69*	56.17**	8.71**	0.99	0.70	71.56**	20.41**
	S	0.44	1.77	4.76*	3.21*	0.73	1.39	3.93*	3.72*
	G×S	0.20	0.28	2.58	0.80	0.90	0.02	1.77	2.22

上升趋势,超过 18 000 kg·hm<sup>-2</sup>时产量呈下降趋势。折翰非等<sup>[37]</sup>研究发现,在降水量偏低的西北旱作区,双垄沟播玉米结合秸秆还田的还田量不应过高,还田量在 6 000—9 000 kg·hm<sup>-2</sup>时为宜,玉米产量及水分利用效率较高。在黄淮海麦玉两熟区,郭静等<sup>[38]</sup>研究结果显示,在砂姜黑土上,2/3 秸秆量深耕翻还田的秸秆还田效应最好,玉米产量最高;董亮等<sup>[39]</sup>研究表明,在潮土上,随秸秆还田量的增加,土壤养分含量和作物产量均呈先升后降的趋势,周年 100%秸秆还田量下小麦和玉米产量最高。综合前人研究结果可以看出,作物适宜秸秆还田量受土壤质地、气候条件、种植制度、具体的还田量等因素的影响。本试验条件下,秸秆还田有利于玉米产量的提高,但增产幅度随秸秆还田量的增加而先升后降,且不同基因型玉米出现最大增产幅度时的秸秆还田量存在差异,浚单 20 在半量秸秆还田下增产幅度最高,而郑单 958 在全量秸秆还田下增产幅度较高。由此可见,适宜秸秆还田量也与玉米基因型有关,不同基因型玉米间适宜作物增产的秸秆还田量有较大差异。这可能与不同基因型玉米碳氮代谢的差异和秸秆腐解过程中土壤氮素的消耗有关。茆建峰等<sup>[40]</sup>研究表明,郑单 958 的碳氮代谢协调性要优于浚单 20,郑单 958 较浚单 20 耐低氮。而随着秸秆还田量的增加,秸秆对土壤全氮消耗的缓冲

效果先增后减<sup>[10]</sup>,使得不同秸秆还田量下土壤氮素可利用性存在差异,这就造成不同氮效率玉米品种对秸秆还田量的响应不一致。

玉米产量水平的高低是产量三要素共同作用的结果,产量构成因素在产量形成中的作用与品种特性和环境条件有关<sup>[41]</sup>。从产量构成看,本研究结果表明玉米公顷穗数受秸秆还田量的影响相对较小,而穗粒数和百粒重则较易受其影响,这与郭静等<sup>[38]</sup>的研究结果保持一致。随秸秆还田量增加,玉米穗粒数增加,而百粒重则先增加后下降,浚单 20 在半量秸秆还田下百粒重最高,郑单 958 在全量秸秆还田下百粒重最高。由此可见,适宜秸秆还田量下,百粒重和穗粒数的协同增加是玉米增产的主要原因。有研究表明,过量秸秆还田会影响作物的出苗率和幼苗质量,造成有效穗数下降,如小麦和水稻<sup>[22]</sup>。而在秸秆还田条件下,影响玉米公顷穗数的主要原因是秸秆缠绕影响播种和茬口太高影响幼苗生长<sup>[42]</sup>。本试验条件下,玉米采用贴茬免耕播种方式,秸秆经秸秆还田机粉碎后覆盖还田,且播后及时浇蒙头水,各处理下玉米的出苗率和苗期质量无显著差异。秸秆粉碎覆盖还田有利于提高土壤含水率、平衡和改善耕层土壤温度,较好地满足玉米生长对土壤温度和水分的需求<sup>[43]</sup>。SHEN 等<sup>[29]</sup>研究表明,在旱作区,秸秆覆盖



可以改善土壤水分供给平衡, 提高紧凑型玉米籽粒产量和水分利用效率。

### 3.2 秸秆还田量对不同基因型夏玉米干物质积累与转运的影响

干物质积累与分配是玉米籽粒产量形成的重要因素<sup>[44]</sup>, 玉米花后干物质积累量与产量呈显著正相关<sup>[45]</sup>。游来勇等<sup>[22]</sup>研究表明, 秸秆还田有利于小麦生育后期干物质累积, 秸秆还田量与成熟期干物质累积量存在正效应。在本试验中, 不同秸秆还田量显著影响了玉米干物质积累, 秸秆还田促进玉米整个生育期的干物质积累, 随秸秆还田量增加, 花前干物质积累量增加, 但花后干物质积累量却呈先增加后降低趋势。这说明, 秸秆还田量与玉米花前干物质积累呈正相关关系, 但过量秸秆还田不利于玉米花后光合产物积累, 从而影响产量形成。分析原因可能是开花期前是玉米根茎叶等营养器官旺盛生长的营养生长阶段, 加上拔节期施肥和秸秆覆盖保水效果突出, 充足的土壤水肥条件更有利于玉米的生长发育。玉米生育后期是玉米籽粒灌浆的关键时期, 也是植株生理功能渐进衰退时期, 另外, 随着秸秆腐解对土壤氮素的消耗, 过量秸秆还田可能会造成玉米生育后期脱肥早衰, 影响光合产物积累。2 年结果表明, 玉米成熟期叶面积指数随秸秆还田量增加呈先升后降趋势, 而叶面积指数降幅呈先降后升趋势, 说明适量秸秆还田可以延缓玉米生育后期叶片衰老进程, 增强花后干物质生产能力, 有利于增加粒重。郑伟等<sup>[46]</sup>研究表明, 适量秸秆还田 ( $9\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 可显著抑制冬小麦灌浆中后期旗叶绿素降解, 提高旗叶超氧化物歧化酶活性和净光合速率, 而过量秸秆还田 ( $15\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 则加速了小麦叶片衰老。

相关研究表明, 不同基因型玉米间的光合特性、干物质积累转运及灌浆特性均存在显著差异<sup>[47-48]</sup>, 且不同基因型玉米对环境因素的响应会有不同<sup>[49-50]</sup>。茆建峰等<sup>[40]</sup>研究表明, 在低氮条件下, 郑单 958 营养器官氮优先向叶片转移, 能保持较好的持绿性; 浚单 20 在低氮条件下氮的吸收量较低, 缺乏优先供应叶片的机制, 易早衰。这就使得浚单 20 在不同土壤水肥条件下光合物质生产能力差异较大, 而郑单 958 差异较小。本试验中, 浚单 20 和郑单 958 干物质积累与分配对秸秆还田量的响应有较大差异, 半量秸秆还田最有利于浚单 20 提高花后干物质积累量及其对籽粒干物质积累贡献率, 而降低花前叶片干物质转移、延缓叶片衰老进程; 而全量秸秆还田不仅提高郑单 958 花

后干物质积累量, 还促进花前干物质的转运, 增加花前干物质转移量、转移率及其对籽粒干物质积累贡献率, 增加粒重, 更有利于籽粒产量的提高。前人研究证明, 还田秸秆在改善土壤肥力状况的同时, 也为病原菌提供能量和营养<sup>[51]</sup>, 随着秸秆还田量的增加, 土壤中病原菌初始菌源量增加, 使得作物感染病害的几率增加<sup>[52]</sup>。但作物对病原菌的抗性存在显著的基因型差异, 如郑单 958 对玉米茎基腐病表现出较好的抗性, 浚单 20 为高感品种<sup>[53]</sup>, 这就有可能造成秸秆还田下不同基因型玉米因抗性差异而产量表现不同。这可能是浚单 20 在倍量秸秆还田下生育后期早衰, 花后干物质积累量和粒重下降的主要原因之一。

综上所述, 秸秆还田量与玉米基因型间存在互作效应, 秸秆还田带来的土壤水肥状况和微生态环境的改变, 势必会影响玉米的生长发育及产量形成。本研究只选择了黄淮海地区 2 个代表性品种, 初步探讨了不同基因型夏玉米对秸秆还田量的响应, 而更多不同类型夏玉米品种与秸秆还田量之间的关系还有待进一步探讨, 以便更好指导秸秆还田和品种推广, 为推进秸秆资源的高效利用、玉米的绿色生产, 改善农业生态环境和促进农民增收提供科学依据。

## 4 结论

在黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟潮土区, 适量秸秆还田可延缓玉米生育后期叶片衰老进程, 优化玉米干物质积累与分配特性, 提高花后干物质积累量, 增加粒重, 进而提高玉米籽粒产量。不同基因型玉米适宜的秸秆还田量有明显差异, 浚单 20 在半量秸秆还田 (玉米秸秆约为  $3\ 840.6\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +小麦秸秆约为  $4\ 097.2\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 处理下籽粒产量最高, 而郑单 958 在全量秸秆还田处理下产量表现最好。

## References

- [1] CHEN X G. Economic potential of biomass supply from crop residues in China. *Applied Energy*, 2016, 166: 141-149.
  - [2] LIU E K, YAN C R, MEI X R, HE W Q, BING S H, DING L P, LIU Q, LIU S, FAN T L. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China. *Geoderma*, 2010, 158(3): 173-180.
  - [3] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 梁国庆, 周卫. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 1-21.
- SONG D L, HOU S P, WANG X B, LIANG G Q, ZHOU W. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting.

- Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 1-21. (in Chinese)
- [4] 陈浩, 张秀英, 郝兴顺, 吴玉红, 张春辉, 张选明. 秸秆还田对农田环境多重影响研究进展. *江苏农业科学*, 2018, 46(5):21-24.
- CHEN H, ZANG X Y, HAO X S, WU Y H, ZHANG C H, ZHANG X M. Research progress of multiple effects of straw returning on farmland environment. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(5): 21-24. (in Chinese)
- [5] 宫秀杰, 钱春荣, 于洋, 葛选良. 我国玉米秸秆还田现状及效应研究进展. *江苏农业科学*, 2017, 45(9):10-13.
- GONG X J, QIAN C R, YU Y, GE X L. Research progress on present situation and effect of China's corn straw returned to field. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(9): 10-13. (in Chinese)
- [6] LENKA N K, LAL R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126: 78-89.
- [7] 张鹏, 贾志宽, 王维, 路文涛, 高飞, 聂俊峰. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(8): 1513-1520.
- ZHANG P, JIA Z K, WANG W, LU W T, GAO F, NIE J F. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1513-1520. (in Chinese)
- [8] JALOTA S K, KHERA R, CHAHAL S S. Straw management and tillage effects on soil water storage under field conditions. *Soil Use and Management*, 2001, 17(4): 282-287.
- [9] 吕美蓉, 李增嘉, 张涛, 宁堂原, 赵建波, 李洪杰. 少免耕与秸秆还田对极端土壤水分及冬小麦产量的影响. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 41-46.
- LÜ M R, LI Z J, ZHANG T, NING T Y, ZHAO J B, LI H J. Effects of minimum or no-tillage system and straw returning on extreme soil moisture and yield of winter wheat. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 41-46. (in Chinese)
- [10] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响. *麦类作物学报*, 2016, 36(2):215-222.
- XU J L, HU N J, ZHU L Q. Effect of amount of annual straw returning on soil nutrients and yield in winter wheat field. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(2): 215-222. (in Chinese)
- [11] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 仇少君, 周卫, 何萍. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1441-1449.
- ZHAO S C, CAO C Y, LI K J, QIU S J, ZHOU W, HE P. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1441-1449. (in Chinese)
- [12] CHEN X F, LIU M, KUZYAKOV Y, LI W T, LIU J, JIANG C Y, WU M, LI Z P. Incorporation of rice straw carbon into dissolved organic matter and microbial biomass along a 100-year paddy soil chronosequence. *Applied Soil Ecology*, 2018, 130: 84-90.
- [13] ZHAO H L, SHAR A G, LI S, CHEN Y L, SHI J L, ZHANG X Y, TIAN X H. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system. *Soil & Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [14] BASTIAN F, BOUZIRI L, NICOLARDOT B, RANJARD L. Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(2): 262-275.
- [15] ZHAO J, NI T, XUN W B, HUANG X L, HUANG Q W, RAN W, SHEN B, ZHANG R F, SHEN Q R. Influence of straw incorporation with and without straw decomposer on soil bacterial community structure and function in a rice-wheat cropping system. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(11): 4761-4773.
- [16] ZHAO S C, LI K J, ZHOU W, QIU S J, HUANG S W, HE P. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [17] MU X Y, ZHAO Y L, LIU K, JI B Y, GUO H B, XUE Z W, LI C H. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78: 32-43.
- [18] 隋鹏祥, 张文可, 梅楠, 田平, 王英俨, 孙悦, 孟广鑫, 苏业涵, 齐华. 不同秸秆还田方式对春玉米产量、水分利用和根系生长的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(4):255-261.
- SUI P X, ZHANG W K, MEI N, TIAN P, WANG Y Y, SUN Y, MENG G X, SU Y H, QI H. Effects of different straw returning methods on spring maize yield, water use and root growth. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 255-261. (in Chinese)
- [19] 王红妮, 王学春, 赵长坤, 李军, 秦俭, 龙祖利. 油菜秸秆还田对水稻根系、分蘖和产量的影响. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1243-1252.
- WANG H N, WANG X C, ZHAO C K, LI J, QIN J, LONG Z L. Effects of oilseed rape straw incorporation on root, tiller and grain yield of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1243-1252. (in Chinese)
- [20] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响.

- 作物学报, 2014, 40(10): 1797-1807.
- ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, MU X Y, LI C H. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(10): 1797-1807. (in Chinese)
- [21] 殷文, 柴强, 胡发龙, 樊志龙, 范虹, 于爱忠, 赵财. 干旱内陆灌区不同秸秆还田方式下春小麦田土壤水分利用特征. 中国农业科学, 2019, 52(7):1247-1259.
- YIN W, CHAI Q, HU F L, FAN Z L, FAN H, YU A Z, ZHAO C. Characteristics of soil water utilization in spring wheat field with different straw retention approaches in dry inland irrigation areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(7): 1247-1259. (in Chinese)
- [22] 游来勇, 李冰, 王昌全, 杨娟, 白根川, 黄春. 秸秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响. 核农学报, 2015, 29(12):2394-2401.
- YOU L Y, LI B, WANG C Q, YANG J, BAI G C, HUANG C. Effects of different amount of straw incorporation on grain yield, nitrogen uptake and use efficiency in wheat-rice rotation system. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(12): 2394-2401. (in Chinese)
- [23] 张彬, 何红波, 赵晓霞, 解宏图, 白震, 张旭东. 秸秆还田量对免耕黑土速效养分和玉米产量的影响. 玉米科学, 2010, 18(2):81-84.
- ZHANG B, HE H B, ZHAO X X, XIE H T, BAI Z, ZHANG X D. Effects of crop-residue incorporation on no-tillage soil available nutrients and corn yield. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(2):81-84. (in Chinese)
- [24] 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强, 胡发龙, 郭瑶. 小麦秸秆还田方式对轮作玉米干物质累积分配及产量的影响. 作物学报, 2016, 42(5):751-757.
- YIN W, FENG F X, ZHAO C, YU A Z, CHAI Q, HU F L, GUO Y. Effects of wheat straw returning patterns on characteristics of dry matter accumulation, distribution and yield of rotation maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 751-757. (in Chinese)
- [25] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(6):1785-1792.
- ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, MU X Y, LI C H. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1785-1792. (in Chinese)
- [26] 郭海斌, 冀保毅, 王巧锋, 赵亚丽, 穆心愿, 薛志伟, 李潮海, 赵志杰. 深耕与秸秆还田对不同质地土壤物理性状和作物产量的影响. 河南农业大学学报, 2014, 48(4):505-511.
- GAO H B, JI B Y, WANG Q F, ZHAO Y L, MU X Y, XUE Z W, LI C H, ZHAO Z J. Effects of deep tillage and straw returning on soil physical properties and grain yield of different soil texture. *Journal of Henan Agricultural University*, 2014, 48(4): 505-511. (in Chinese)
- [27] 杨晨璐, 刘兰清, 王维钰, 任广鑫, 冯永忠, 杨改河. 麦玉复种体系下秸秆还田与施氮对作物水氮利用及产量的效应研究. 中国农业科学, 2018, 51(9):1664-1680.
- YANG C L, LIU L Q, WANG W Y, REN G X, FENG Y Z, YANG G H. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1664-1680.
- [28] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 韩清芳, 杨宝平, 侯贤清. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响. 生态学报, 2011, 31(3): 777-783.
- GAO F, JIA Z K, LU W T, HAN Q F, YANG B P, HOU X Q. Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid area of southern Ningxia. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 777-783. (in Chinese)
- [29] SHEN J Y, ZHAO D D, HAN H F, ZHOU X B, LI Q Q. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summermaize plants. *Plant, Soil and Environment*, 2012, 58(4): 161-166.
- [30] 张锋, 李鹏, 张风云, 李新华, 孙明柱, 高国强. 玉米秸秆还田对不同类型小麦产量和品质的影响. 山东农业科学, 2011(3):30-32, 36.
- ZHANG F, LI P, ZHANG F Y, LI X H, SUN M Z, GAO G Q. Effects of corn stalk returning on yield and quality of different types of wheat. *Shandong Agricultural Sciences*, 2011(3): 30-32, 36. (in Chinese)
- [31] 郑成岩, 崔世明, 王东, 于振文, 张永丽, 石玉. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响. 作物学报, 2011, 37(8): 1432-1440.
- ZHENG C Y, CUI S M, WANG D, YU Z W, ZHANG Y L, SHI Y. Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(8): 1432-1440. (in Chinese)
- [32] 周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 马玮, 赵明. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2129-2140.
- ZHOU B Y, SUN X F, DING Z S, MA W, ZHAO M. Effect of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize (*Zea Mays* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2129-2140. (in Chinese)
- [33] 高飞, 崔增团, 孙淑梅, 郭世乾, 付亲民. 甘肃中东部旱区秸秆还田量对土壤水分、玉米生物性状及产量的影响. 干旱地区农业研究,

- 2016, 34(5): 74-78.
- GAO F, CUI Z T, SUN S M, GUO S Q, FU Q M. Effects of straw returning on soil water, biological traits and yield of maize in the eastern arid region of Gansu. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 74-78. (in Chinese)
- [34] 钱凤魁, 黄毅, 董婷婷, 孙杰. 不同秸秆还田量对旱地土壤水肥和玉米生长与产量的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 61-65.
- QIAN F K, HUANG Y, DONG T T, SUN J. Effect of crop residue incorporation on soil moisture and nutrient and maize growth and yield of arid farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 61-65. (in Chinese)
- [35] CUCU M A, SAIDPULLICINO D, MAURINO V, BONIFACIO E, ROMANI M, CELI L. Influence of redox conditions and rice straw incorporation on nitrogen availability in fertilized paddy soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(5): 755-764.
- [36] 白建忠, 陈泽, 丁永锋, 张璐, 赵营. 秸秆还田量对水旱轮作作物产量和土壤肥力的影响. 土壤通报, 2017, 48(5): 1185-1191.
- BAI J Z, CHEN Z, DING Y F, ZHANG L, ZHAO Y. Effect of different straw incorporation rates on crops yields and soil fertility in the paddy-upland rotation system. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5): 1185-1191. (in Chinese)
- [37] 折翰非, 杨祁峰, 牛芬菊, 牛俊义, 熊春蓉, 徐文强. 不同秸秆还田量对旱地全膜双垄沟播土壤水分及玉米生长的影响. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 138-142.
- ZHE H F, YANG Q F, NIU F J, NIU J Y, XIONG C R, XU W Q. Effect of different straw treatments on soil water and growth of maize with film mulched double-furrow sowing in dry land. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(6): 138-142. (in Chinese)
- [38] 郭静, 周可金, 刘芳, 陈琳, 查道贵. 小麦秸秆还田量和还田方式对砂姜黑土地玉米生长发育的影响. 浙江农业学报, 2017, 29(4): 521-527.
- GUO J, ZHOU K J, LIU F, CHEN L, ZHA D G. Effects of returning amount and manner of wheat straw on maize growth in lime concretion black soil field. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(4): 521-527. (in Chinese)
- [39] 董亮, 田镇重, 王学君, 孙泽强, 郑东峰, 刘盛林, 董晓霞, 郭洪海, 罗加法. 秸秆还田量对小麦-玉米轮作中土壤理化性质及作物产量的影响. 安徽农业科学, 2016, 44(29): 107-109.
- DONG L, TIAN S Z, WANG X J, SUN Z Q, ZHENG D F, LIU S L, DONG X X, GUO H H, LUO J F. Effects of amount of returned-straw on soil physical and chemical properties, crop yield in wheat-maize rotation system. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(29): 107-109. (in Chinese)
- [40] 茆建峰, 董朋飞, 王秀玲, 刘卫玲, 李潮海. 氮肥运筹对不同夏玉米品种碳氮代谢协调性的影响. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2282-2293.
- CHANG J F, DONG P F, WANG X L, LIU W L, LI C H. Effect of nitrogen application on carbon and nitrogen metabolism of different summer maize varieties. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(12): 2282-2293. (in Chinese)
- [41] 柯福来, 马兴林, 黄瑞冬, 王传海, 徐安波. 高产玉米品种的产量结构特点及形成机制. 玉米科学, 2010, 18(2): 65-69.
- KE F L, MA X L, HUANG R D, WANG C H, XU A B. Characteristics of yield components and formation mechanism of high-yield maize hybrids. *Journal of Maize Sciences*, 2010, 18(2): 65-69. (in Chinese)
- [42] 高英波, 陶洪斌, 朱金城, 黄收兵, 徐彩龙, 盛耀辉, 王璞. 麦茬高度对机播夏玉米苗期生长及水分利用的影响. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3803-3810.
- GAO Y B, TAO H B, ZHU J C, HUANG S B, XU C L, SHENG Y H, WANG P. Effects of wheat stubble height on growth and water use efficiency of mechanized sowing summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(19): 3803-3810. (in Chinese)
- [43] 李潮海, 赵霞, 刘天学, 康伯铭. 麦茬处理方式对机播夏玉米的生态生理效应. 农业工程学报, 2008, 24(1): 162-166.
- LI C H, ZHAO X, LIU T X, KANG B M. Effects of different treatments of winter wheat residues on eco-physiological responses of mechanized sowing summer maize (*Zea mays* L.). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 162-166. (in Chinese)
- [44] 马赞花, 薛吉全, 张仁和, 张林春, 郝扬, 孙娟. 不同高产玉米品种干物质积累转运与产量形成的研究. 广东农业科学, 2010, 37(3): 36-40.
- MA Y H, XUE J Q, ZHANG R H, ZHANG L C, HAO Y, SUN J. Relationship between dry matter accumulation and distribution to yield of different maize cultivars. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2010, 37(3): 36-40. (in Chinese)
- [45] 谷岩, 胡文河, 王楠, 陈喜凤, 梁焯赫, 岳杨, 吴春胜. 不同产量潜力玉米品种群体生理参数研究. 玉米科学, 2011, 19(5): 73-77.
- GU Y, HU W H, WANG N, CHEN X F, LIANG X H, YUE Y, WU C S. Canopy physiological parameter in maize with different yield potentials. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 73-77. (in Chinese)
- [46] 郑伟, 张静, 刘阳, 温晓霞, 廖允成, 高茂盛. 低施肥条件下秸秆还田对冬小麦旗叶衰老的影响. 生态学报, 2009, 29(9): 4967-4975.
- ZHENG W, ZHANG J, LIU Y, WEN X X, LIAO Y C, GAO M S. Physiological effects of ploughing corn straw under soil on flag-leaf

- resistance of winter wheat under lowly applying fertilizer condition. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 9(29): 4967-4975. (in Chinese)
- [47] 钱春荣, 王荣焕, 赵久然, 于洋, 徐田军, 郝玉波, 姜宇博, 宫秀杰, 李梁, 葛选良. 不同熟期玉米干物质积累、分配与转运特征. *生态学杂志*, 2017, 36(8): 2177-2183.
- QIAN C R, WANG R H, ZHAO J R, YU Y, XU T J, HAO Y B, JIANG Y B, GONG X J, LI L, GE X L. Characteristics of accumulation, distribution and translocation of dry matter in maize hybrids differing in maturity duration. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(8): 2177-2183. (in Chinese)
- [48] 徐田军, 吕天放, 赵久然, 王荣焕, 陈传永, 刘月娥, 刘秀芝, 王元东, 刘春阁. 玉米生产上 3 个主推品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性. *作物学报*, 2018, 44(3): 414-422.
- XU T J, LÜ T F, ZHAO J R, WANG R H, CHEN C Y, LIU Y E, LIU X Z, WANG Y D, LIU C G. Photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and translocation, grain filling parameter of three main maize varieties in production. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(3): 414-422. (in Chinese)
- [49] 李建奇. 不同玉米品种的品质、产量差异及机理研究. *玉米科学*, 2007, 15(4): 13-17, 33.
- LI J Q. Study on quality and genetic affected yield and the mechanisms of different maize varieties. *Journal of Maize Sciences*, 2007, 15(4): 13-17, 33. (in Chinese)
- [50] 刘淑云, 董树亭, 胡昌浩, 白萍, 吕新. 玉米产量和品质与生态环境的关系. *作物学报*, 2005, 31(5): 571-576.
- LIU S Y, DONG S T, HU C H, BAI P, LÜ X. Relationship between ecological environment and maize yield and quality. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 571-576. (in Chinese)
- [51] SUGAHARA K, KATOH K. Comparative studies on the decomposition of rice straw and straw compost by plant pathogens and microbial saprophytes in soil. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, 38(1): 113-122.
- [52] ZHU H, WANG Z X, LUO X M, SONG J X, HUANG B. Effects of straw incorporation on *Rhizoctonia solani* inoculum in paddy soil and rice sheath blight severity. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(5): 741-748.
- [53] 范志业, 崔小伟, 施艳, 陈琦, 刘迪, 侯艳红, 李世民, 闫海霞, 袁刘正, 孙虎. 河南省玉米茎基腐病主要病原菌鉴定及主栽玉米品种的抗性分析. *河南农业科学*, 2014, 43(12): 87-90.
- FAN Z Y, CUI X W, SHI Y, CHEN Q, LIU D, HOU Y H, LI S M, YAN H X, YUAN L Z, SUN H. Identification of pathogens causing corn stalk rot and resistance test of main cultivars in Henan province. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2014, 43(12): 87-90. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)