

# 不同秸秆覆盖耕种模式对半干旱区玉米 生长发育及水分利用的影响

徐晨, 闫伟平, 张丽华, 赵洪祥, 孙宁,  
于江, 李斐, 孟祥盟, 谭国波, 边少锋

(吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部东北节水农业重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 研究合理的秸秆覆盖耕种模式是实现半干旱区秸秆覆盖条件下玉米绿色高效生产的重要途径。开展2 a大田试验, 设置传统耕作模式(CK)、秸秆覆盖模式(T1)、秸秆覆盖+深松模式(T2)、秸秆覆盖+碎混模式(T3)4个处理, 研究不同秸秆覆盖耕种模式对玉米根系伤流特性、光合特性、碳氮代谢相关酶活性、生长发育、产量及其构成因素和水分利用特性的影响。结果表明: 不同处理玉米根系伤流强度、伤流液中细胞分裂素(CTK)和生长素(IAA)含量均表现为T3>T2>CK>T1, 脱落酸(ABA)含量表现为T1>CK>T2>T3; 与CK和T1处理相比, T2与T3处理的CTK和IAA含量显著增加, ABA含量显著下降。玉米叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、表观叶肉导度(AMC)和叶片水分利用效率(WUEL)均表现为T3>T2>CK>T1, 气孔限制百分率( $L_s$ )表现为T3<T2<CK<T1, T3处理的 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、AMC和WUEL均显著高于T1处理, T1处理的 $L_s$ 显著高于其他3个处理。与T1处理相比, T3处理的RuBP羧化酶和PEP羧化酶活性均显著增加, 两年分别增加10.66%、5.54%和5.24%、6.78%; T2与T3处理的谷氨酰胺合成酶(GS)活性显著高于T1处理, T3处理的谷氨酸脱氢酶(GDH)活性显著低于T1处理。T2与T3处理的叶面积指数(LAI)显著高于CK和T1处理, 株高和干物质积累显著高于T1处理。与T1处理相比, T2和T3处理玉米产量两年分别提高了6.45%、12.13%和16.59%、19.39%; 年份与处理均对玉米产量产生显著影响, 两者的影响趋势相同。T2与T3处理玉米穗长、穗直径、百粒质量显著高于T1处理, 水分利用效率(WUE)均显著高于CK和T1处理。综上, 秸秆覆盖+碎混模式(T3处理)可作为吉林省半干旱区玉米绿色高效生产推荐技术模式。

**关键词:** 玉米; 秸秆覆盖; 生理特性; 产量; 水分利用; 半干旱区

**中图分类号:** S513; S341 **文献标志码:** A

## Effects of different straw mulching cultivation patterns on maize growth and water use in semi-arid areas

XU Chen, YAN Weiping, ZHANG Lihua, ZHAO Hongxiang, SUN Ning,  
YU Jiang, LI Fei, MENG Xiangmeng, TAN Guobo, BIAN Shaofeng

(Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences/ Northeast Key Laboratory of Water Saving Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural China, Changchun, Jilin 130033, China)

**Abstract:** Research on rational straw mulching cultivation pattern is an important way to achieve green and efficient maize production under straw mulching conditions in semi-arid areas. A two-year field experiment was conducted to study the effects of different straw mulching cultivation patterns on maize root bleeding characteristics, photosynthetic characteristics, activities of enzymes related to carbon and nitrogen metabolism, growth and development, yield and its components and water use characteristics by setting up four treatments of traditional farming pattern (CK), straw mulching pattern (T1), straw mulching and subsoiling pattern (T2), and straw mulching and

收稿日期:2022-12-23

修回日期:2023-02-17

**基金项目:** 吉林省农业科技创新工程项目(CXGC2021TD003); 吉林省科技发展计划项目(20220203006NC, 20220404011NC); 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-02-50)

**作者简介:** 徐晨(1987-), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 主要从事作物高效用水理论与技术研究。E-mail: 497836232@qq.com

**通信作者:** 边少锋(1963-), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事作物旱作节水栽培技术研究。E-mail: bsf8257888@sina.com

谭国波(1972-), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要从事作物旱作节水栽培技术研究。E-mail: tgb19720109@163.com

crushing and mixing pattern (T3). The results showed that the bleeding sap mass of maize roots and the contents of cytokinin (CTK) and auxin (IAA) in the bleeding sap demonstrated a trend of T3>T2>CK>T1, and the content of abscisic acid (ABA) displayed a trend of T1>CK>T2>T3. The content of CTK and IAA of T2 and T3 treatments increased significantly, while the content of ABA decreased significantly compared with CK and T1 treatments. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ), intercellular carbon dioxide concentration ( $C_i$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), apparent mesophyll conductance (AMC) and leaf water use efficiency (WUEL) of maize leaves all showed a trend of T3>T2>CK>T1, and the percentage of stomatal restriction ( $L_s$ ) demonstrated a trend of T3<T2<CK<T1. The activity of RuBP carboxylase and PEP carboxylase of T3 treatment increased significantly by 10.66%, 5.54% and 5.24%, 6.78% respectively in 2 years compared with T1 treatment. The activity of glutamine synthetase (GS) of T2 and T3 treatment was significantly higher than that of T1 treatment, and the activity of glutamate dehydrogenase (GDH) of T3 treatment was significantly lower than that of T1 treatment. The leaf area index (LAI) of T2 and T3 treatments were significantly higher than that of CK and T1 treatments. The plant height and dry matter accumulation of T2 and T3 treatments were significantly increased compared with T1 treatments. The maize yield of T2 and T3 treatments increased by 6.45%, 12.13%, 16.59% and 19.39% respectively in two years compared with T1 treatment. In addition, both year and treatment had significant effects on maize yield, with the same trend on maize yield. The spike length, spike diameter and 100-grain weight of maize were T3>T2>CK>T1, and the treatment of T2 and T3 was significantly higher than that of T1 treatment. The water use efficiency (WUE) of T2 and T3 treatment were significantly higher than that of CK and T1 treatment. To sum up, straw mulching and crushing and mixing pattern (T3 treatment) can be used as the recommended technical pattern for green and efficient maize production in semi-arid areas of Jilin Province.

**Keyword:** maize; straw mulch; physiological characteristics; yield; water use; semi-arid region

玉米是吉林省最重要的粮食作物,其总产量、单位面积产量和种植面积均居全国前列<sup>[1]</sup>。吉林西部地区属半干旱区,作为吉林省玉米主产区之一,该区域年均降雨量较少且时空分布不均,玉米生长发育常受干旱影响<sup>[2]</sup>。近年来,随着优质品种的育成和生产技术的进步,玉米产量逐年稳步增加,产生的秸秆量也逐年增加。作为现代农业生产中的关键技术之一,秸秆还田不仅可以提升土壤肥力<sup>[3]</sup>,改善土壤结构<sup>[4]</sup>,还可增加土壤酶活性和微生物数量<sup>[5-6]</sup>,促进玉米生长发育和产量形成<sup>[7]</sup>。因此,如何有效地利用秸秆资源、提升秸秆还田对作物生产的影响力成为目前的重要研究方向。

秸秆覆盖还田对保持土壤水分含量、减少土壤风水蚀具有一定作用<sup>[8]</sup>。Shen 等<sup>[9]</sup>研究发现,多年高量秸秆覆盖可提高紧凑型玉米产量及水分利用效率。随着秸秆覆盖还田技术的推广应用,以秸秆覆盖还田为基础的耕种模式也在发生变化。Tao 等<sup>[10]</sup>研究认为,秸秆覆盖还田配合不同耕作方式对玉米产量和水分利用效率影响较大,秸秆覆盖还田的效应高于耕作方式,采用 50% 秸秆覆盖量和深翻相结合的耕作方式更有利于提高玉米产量和水分利用效率。秸秆覆盖还田对作物根系的物理阻碍较小,不会影响根系的正常生长发育。姜英等<sup>[11]</sup>研

究发现,合理的耕作方式结合秸秆还田有利于促进玉米根系形态发育及耕层空间分布,从而优化干物质积累与分配特征,达到提高产量的目的;张文可等<sup>[12]</sup>发现,在秸秆还田措施下进行行间翻耕和隔行行间翻耕均能改善玉米根系分布形态,提高水分利用效率。根系化学信号会随着耕种模式的改变产生一定差异<sup>[13]</sup>,因此,研究玉米根系伤流特性的变化,有助于了解不同秸秆覆盖还田耕种模式下玉米根系的生长发育变化规律,明确其对光合作用、干物质积累和产量的调控作用。光合作用是作物干物质积累与转运的主要生理进程之一,作为籽粒形成过程中重要的生理指标,叶片净光合速率是玉米产量形成的关键<sup>[14]</sup>。合理的秸秆还田耕种模式可促进叶片光合作用,进而促进玉米产量形成<sup>[7]</sup>。玉米全生育期干物质和养分的积累、分配与转运决定了其产量,而不同秸秆覆盖还田耕种模式通过调节根系功能、地上部器官结构及叶片光合作用能力,可影响玉米干物质积累与分配<sup>[15]</sup>。齐翔鲲等<sup>[16]</sup>研究认为,通过长期定位试验,秸秆深翻配合春季深松,可有效促进黑龙江半干旱区玉米养分与干物质的积累和转运,增产效果优于其他处理。

目前,传统秸秆处理和耕作方式已很难满足吉林省半干旱区在保护土壤质量安全、保持耕地生态

环境健康发展和提高作物产量等方面的多重需求,将秸秆覆盖还田、浅埋滴灌、深松及秸秆碎混等具有广泛应用前景的耕作栽培技术相结合,在处理作物秸秆、减少水资源浪费和生态环境危害、提高作物产量等多方面具有一定优势。关于玉米不同秸秆覆盖耕种模式的研究多侧重于其对土壤理化性状<sup>[17]</sup>、土壤结构<sup>[4, 18]</sup>的影响等方面,对于不同覆盖模式下玉米根系及植株生长发育状况的研究较少。基于此,本研究通过分析不同秸秆覆盖还田耕种模式对玉米根系伤流特性、光合作用、叶片生理特性、干物质积累及产量的变化,探究秸秆覆盖耕种模式对玉米生长发育及水分利用的影响,以期探索合理有效的秸秆覆盖还田耕种模式,为吉林省半干旱区玉米高效绿色生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2021—2022年在吉林省农业科学院洮南综合实验站(122°82'E, 45°33'N)进行,该区域属北温带大陆性季风气候,年均日照时数3 005.3 h,年均有效积温3 000.5℃,2012—2022年年均降水量为377.9 mm,无霜期142 d,2021、2022年玉米全生育期(5~10月)≥10℃的有效积温分别为3 113.7、3 074.6℃,降水量分别为522.3、411.3 mm,降水年型均为丰水年<sup>[19]</sup>,日均温度和降水量见图1。土壤类型为淡黑钙土,试验前0~20 cm土层土壤全氮含量0.75 g·kg<sup>-1</sup>,全磷含量0.47 g·kg<sup>-1</sup>,全钾含量21.41 g·kg<sup>-1</sup>,水解性氮含量70.24 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量7.90 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量109.00 mg·kg<sup>-1</sup>,有机质含量12.9 g·kg<sup>-1</sup>,pH值7.9。前茬作物为玉米。

### 1.2 试验设计

供试材料为吉林省中西部地区大面积推广种植的玉米品种‘富民985’,生育期约128 d,播种日

期分别为2021年4月30日和2022年5月8日,收获日期分别为2021年9月28日和2022年10月9日。试验采用随机区组设计,设传统耕作模式(CK)、秸秆覆盖模式(T1)、秸秆覆盖+深松模式(T2)、秸秆覆盖+碎混模式(T3)4个处理。各处理均于2020年秋季玉米收获后开始实施。前茬玉米收获后,CK处理秸秆全部离田,次年春季常规起垄播种;其余3个处理秸秆粉碎至≤10 cm长度后,全部覆盖于地表,翌年春季,T1处理将种植带上的秸秆归至两侧后进行播种,T2处理将秸秆归至两侧,在覆盖带进行30 cm深松后进行播种,T3处理使用中耙机和旋耕机将粉碎的秸秆碎混于0~20 cm土层土壤后进行播种。

CK处理采用均匀垄种植,垄宽60 cm,T1、T2和T3处理采用平作种植;各处理种植密度均为60 000株·hm<sup>-2</sup>,共设4个大区,每个大区长60 m、宽9.6 m,面积576 m<sup>2</sup>。CK处理采用沟灌进行补水作业,T1、T2和T3处理均采用浅埋滴灌进行补水补肥作业,滴灌带埋深5 cm,铺设于种植带一侧。各处理具体设置方式见图2。播种前每公顷施用底肥为纯N 90 kg、纯P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg、纯K<sub>2</sub>O 90 kg,拔节期追施纯N 90 kg·hm<sup>-2</sup>。为保证玉米正常生长发育,灌溉制度基于每年的自然降水情况设置,灌溉情况见表1,田间管理方式同当地生产田。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合参数 选择晴朗少云的天气,利用Li-6400XT光合作用测定系统(Li-Cor公司),于开花期在每个大区中随机选择3个区域进行取样,每个取样区域选择5株长势基本一致的玉米测定穗位叶的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ ),表现叶肉导度 $AMC = P_n/C_i$ ,叶片水分利用效率 $WUE_L = P_n/T_r$ ,气孔限制值 $L_s = (1 - C_i/C_a) \times 100\%$ , $C_a$ 为仪器进气口CO<sub>2</sub>浓度,测定前设定为400 μmol·mol<sup>-1</sup>。

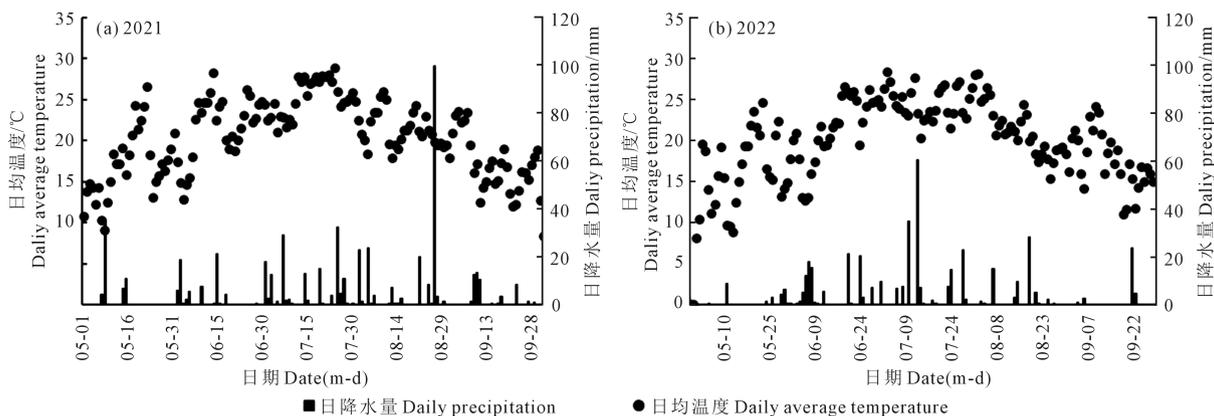


图1 2021—2022年玉米全生育期日均温度与降水量

Fig.1 Daily average temperature and precipitation during the whole growth period of maize in 2021 and 2022

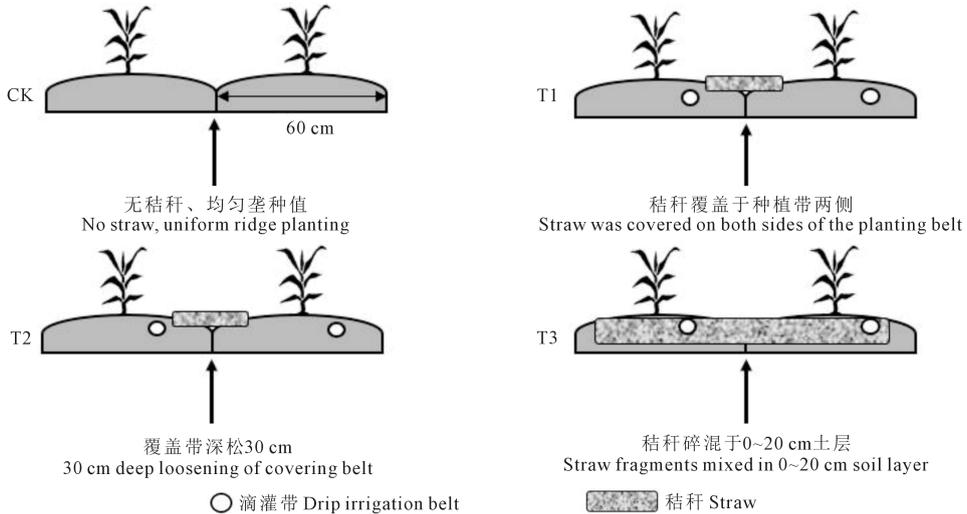


图 2 处理春季设置方式示意图

Fig.2 Schematic diagram of handling spring setting mode

表 1 2021—2022 年试验灌溉情况表

Table 1 List of experimental irrigation situation in 2021 and 2022

年份 Year	处理 Treatment	灌溉日期 Irrigation date (m-d)	单次灌溉定额 Single irrigation quota/mm	总灌溉定额 Total irrigation quota/mm
2021	CK	05-05	20	60
		06-23	20	
		07-31	20	
	T1, T2, T3	05-05	10	30
		06-23	10	
2022	CK	05-15	30	90
		06-28	30	
		08-05	30	
	T1, T2, T3	05-15	20	60
		06-28	20	
		08-05	20	

1.3.2 叶片碳氮代谢相关酶活性 于开花期在每个大区中随机选择 3 个取样区域 15 株长势基本一致的玉米,取穗位叶在液氮中冷冻保存,采用酶联免疫吸附法测定叶片的谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸脱氢酶(GDH)、RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶活性<sup>[20]</sup>。

1.3.3 根系伤流特性 于开花期在每个大区中随机选择 3 个取样区域 15 株长势基本一致的玉米,取样前准备脱脂棉、保鲜袋和皮筋套,称量其总干重,计为  $W_0$ ;在距离地面 5 cm 处横切玉米植株,使用准备好的脱脂棉和保鲜袋将切割后植株的裸露横切面包裹好,用皮筋套封好保鲜袋,取样开始时间记为  $T$ ,包裹 4~6 h 后,取下脱脂棉称量其鲜重  $W_1$ ;玉米根系的伤流强度 =  $(W_1 - W_0) / T$ <sup>[21]</sup>。测定后将伤流液挤出,采用酶联免疫吸附法测定根系伤流液中细胞分裂素(CTK)、脱落酸(ABA)及生长素(IAA)

含量。

1.3.4 生长发育指标及干物质积累 于拔节期、开花期和成熟期在每个大区内选择 5 株玉米,使用直尺测量株高和每一片展开叶的、宽,计算单株玉米叶面积,叶面积指数(LAI) = 单株玉米叶面积/单株玉米所占土地面积;测定后分解装袋,在烘箱中 80℃ 条件下烘干至恒重,使用电子天平测定玉米的单株干物质积累量。

1.3.5 产量及其构成因素 于成熟期,在每个大区中选择 5 个 10 m<sup>2</sup> 未经取样的区域,收获全部玉米,每个样区选取 10 穗进行考种,测定穗长、穗直径、百粒质量及穗粒数<sup>[14]</sup>;全部脱粒后按 14% 含水量计算各处理籽粒产量,并折算为公顷产量。

1.3.6 水分利用特性 按水量平衡公式计算生育期耗水量(ET),  $ET = \text{播前 } 0 \sim 120 \text{ cm 土层土壤贮水量} - \text{收获后 } 0 \sim 120 \text{ cm 土层土壤贮水量} + \text{生育期内降水量} + \text{生育期灌溉定额}$ ,作物水分利用效率  $WUE = \text{产量} / ET$ 。

## 1.4 数据处理

所有数据为 5 次重复的平均值,采用 Excel 2016 进行作图,SAS 9.0 数据处理系统进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米的光合特性

玉米叶片开花期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、AMC 和 WUEL 均呈 T3>T2>CK>T1 的变化趋势, $L_s$  均呈 T3<T2<CK<T1 的变化趋势(表 2),各指标下 T2 与 T3 处理间均无显著差异。T3 处理的  $P_n$  显著高于 CK 和 T1 处

理,2021年和2022年分别显著增加8.20%、17.55%和9.90%、24.26%。T2和T3处理的 $G_s$ 在2021年显著高于CK和T1处理,T3处理的 $G_s$ 在2022年显著高于其他3个处理。与T1处理相比,T2、T3处理的 $C_i$ 在2021年和2022年分别显著增加8.52%、10.49%和13.33%、15.72%。T3处理的 $T_r$ 和 $AMC$ 在两个年份均显著高于T1处理,T3处理的 $WUEL$ 在2021年显著高于T1处理。T1处理的 $L_s$ 显著高于CK、T2、T3处理,2021年和2022年分别增加10.75%、14.46%、18.40%和19.84%、36.06%、45.46%。

## 2.2 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米叶片的碳氮代谢酶活性

由表3可知,玉米叶片的RuBP羧化酶、PEP羧化酶和GS酶活性均呈T3>T2>CK>T1的变化趋势,GDH酶活性呈T1>CK>T2>T3的变化趋势。与T1处理相比,T2和T3处理的RuBP羧化酶活性在2021年分别显著增加了7.30%和10.66%,T3处理

在2022年显著增加了5.54%。T2、T3处理的PEP羧化酶在2021年和2022年分别较T1处理显著增加3.77%、5.24%和4.31%、6.78%。T2与T3处理之间、CK与T1处理之间的RuBP羧化酶与PEP羧化酶活性均无显著差异。T2与T3处理的GS活性在2021年和2022年均显著高于T1处理,CK与T1处理间无显著差异。T3处理的GDH活性显著低于T1处理,CK、T1和T2处理的GDH活性间均无显著差异。

## 2.3 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米的根系伤流特性

由图3可知,两个年份玉米开花期根系伤流强度呈T3>T2>CK>T1的变化趋势,T2和T3处理在2021年的根系伤流强度均显著高于CK和T1处理,4个处理的伤流强度在2022年均无显著性差异。与CK和T1处理相比,T2、T3处理的伤流强度在2021年分别增加了14.56%、24.21%和22.33%、32.63%。

表2 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米光合特性的变化

Table 2 Changes of photosynthetic characteristics of maize under different straw mulching cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	$P_n$ / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$G_s$ / ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$C_i$ / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$T_r$ / ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$AMC$ / ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$WUEL$ / ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$L_s$ / %
2021	CK	33.55±0.60bc	0.50±0.02b	238.58±8.99ab	3.87±0.06ab	0.141±0.003ab	8.66±0.18ab	36.38±2.40b
	T1	30.88±0.40d	0.48±0.01b	223.92±5.24b	3.79±0.19b	0.138±0.005b	8.16±0.53b	40.29±1.40a
	T2	35.13±1.36ab	0.53±0.01a	243.00±6.91a	3.93±0.08ab	0.145±0.010a	8.94±0.44ab	35.20±1.84b
	T3	36.30±2.06a	0.55±0.02a	247.40±7.26a	4.01±0.08a	0.147±0.005a	9.06±0.69a	34.03±1.94b
2022	CK	33.14±0.32b	0.47±0.01b	270.23±8.57b	3.76±0.12b	0.123±0.005b	8.81±0.21a	27.93±2.29b
	T1	29.31±0.79c	0.44±0.01c	249.49±6.20c	3.44±0.12c	0.118±0.005c	8.52±0.29a	33.47±1.65a
	T2	35.28±1.17ab	0.50±0.02b	282.75±7.49ab	3.94±0.12ab	0.125±0.001ab	8.95±0.27a	24.60±2.00bc
	T3	36.42±2.10a	0.53±0.02a	288.70±13.91a	4.05±0.10a	0.126±0.009a	9.01±0.72a	23.01±3.71c

注: $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、 $AMC$ 、 $WUEL$ 、 $L_s$ 分别表示净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、表观叶肉导度、叶片水分利用效率、气孔限制值;同一年份同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note:  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $C_i$ ,  $T_r$ ,  $AMC$ ,  $WUEL$ , and  $L_s$  represents net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular carbon dioxide concentration, transpiration rate, apparent mesophyll conductance, leaf water use efficiency, and limiting value of stomata, respectively. The same column of data in the same year with different lowercase letters indicates a significant difference between treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

表3 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米叶片碳氮代谢相关酶活性的变化

Table 3 Changes of enzyme related to carbon and nitrogen metabolism activities in maize leaves under different straw mulching cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	RuBP羧化酶/( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ) RuBP carboxylase	PEP羧化酶/( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ) PEP carboxylase	谷氨酰胺合成酶/( $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Glutamine synthetase	谷氨酸脱氢酶/( $\text{mU} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Glutamate dehydrogenase
2021	CK	60.20±2.68ab	4.88±0.29ab	9.45±0.37b	320.15±27.23ab
	T1	58.64±1.81b	4.77±0.19b	9.19±0.09b	336.38±12.14a
	T2	62.92±4.56a	4.95±0.19a	9.89±0.18a	314.97±28.80ab
	T3	64.89±5.16a	5.02±0.28a	10.09±0.17a	304.01±8.16b
2022	CK	71.69±1.49ab	4.99±0.04bc	11.86±0.10ab	321.71±16.20ab
	T1	70.27±1.82b	4.87±0.10c	11.52±0.24b	336.86±8.50a
	T2	72.04±0.80ab	5.08±0.04ab	11.91±0.17a	315.31±8.11ab
	T3	74.16±0.84a	5.20±0.10a	12.07±0.15a	306.25±9.43b

由表 4 可知,根系伤流液中 CTK 和 IAA 含量均呈 T3>T2>CK>T1 的变化趋势,ABA 含量呈 T1>CK>T2>T3 的变化趋势。T2 与 T3 处理 CTK 和 IAA 含量均显著高于 CK 和 T1 处理,CK 和 T1 处理的 ABA 含量均显著高于 T2 和 T3 处理,3 种内源激素含量在 T2 与 T3 处理间均无显著差异。

#### 2.4 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米的生长发育特征

由图 4~6 可以看出,两个年份各个时期玉米叶面积指数、株高和干物质积累量均表现为 T3>T2>CK>T1 的变化规律,T2 与 T3 处理之间无显著差异。T2 与 T3 处理的 LAI 在 2 a 间两个生育时期均显著高于 CK 和 T1 处理,CK 处理在两年开花期均显著高于 T1 处理,与 T1 处理相比,CK、T2、T3 处理在 2021 年和 2022 年开花期分别增加了 2.94%、5.88%、

7.22%和 3.91%、7.82%、9.22%(图 4)。T2 与 T3 处理的株高在 2021 年拔节期和 2022 年成熟期均显著高于 CK 和 T1 处理,在其他生育时期均显著高于 T1 处理(图 5)。T2 与 T3 处理较 T1 处理显著增加,两年平均分别增加 3.83%、6.83%。

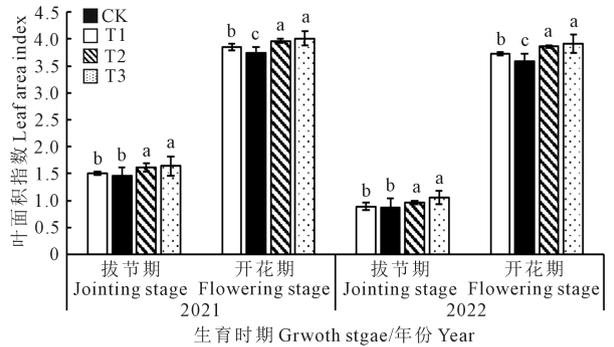
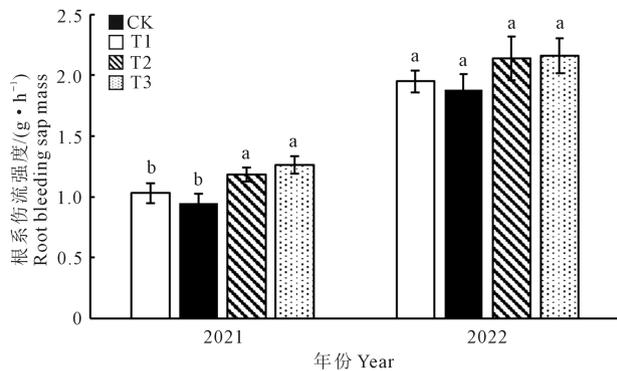


图 4 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米叶面积指数 (LAI) 的变化

Fig.4 Changes of maize leaf area index (LAI) under different straw mulching cultivation patterns



注:同一年份不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ),下同。

Note: Different lowercase letters in the same year indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ), the same below.

图 3 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米根系伤流强度的变化

Fig.3 Changes of root bleeding sap mass of maize under different straw mulching cultivation patterns

表 4 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米根系伤流液中激素含量的变化(2022 年)

Table 4 Changes of hormone contents in root bleeding sap of maize under different straw mulching cultivation patterns (2022)

处理 Treatment	细胞分裂素含量 Cytokinin content $/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	脱落酸含量 Abscisic acid content $/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	生长素含量 Auxin content $/(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$
CK	10.33±0.22b	63.66±1.10b	18.06±0.23b
T1	9.80±0.05c	65.37±1.04a	17.92±0.16b
T2	10.66±0.22a	61.57±0.46c	18.55±0.37a
T3	10.73±0.23a	61.51±0.72c	18.80±0.16a

注:同一列数据后不同小写字母表示在处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences between treatments ( $P<0.05$ ).

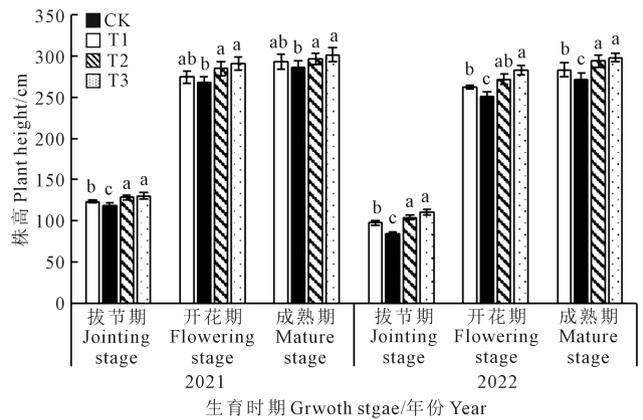


图 5 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米株高的变化

Fig.5 Changes of plant height of maize under different straw mulching cultivation patterns

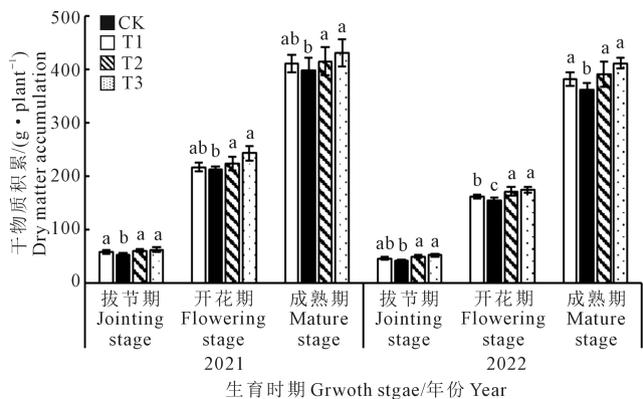


图 6 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米干物质积累的变化

Fig.6 Changes of dry matter accumulation of maize under different straw mulching cultivation patterns

## 2.5 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米产量及其构成因素

不同秸秆覆盖耕种模式对玉米产量的影响如表5所示,2 a产量变化规律均表现为 T3>T2>CK>T1。2021年,T2和T3处理玉米产量显著高于T1处理,分别增加6.45%和12.13%;2022年,T2和T3处理的玉米产量显著高于CK和T1处理,与CK和T1处理相比,T2处理分别增产7.02%和16.59%,T3处理分别增产9.59%和19.39%;2 a间T2与T3处理间玉米产量均无显著差异。由表5可知,年份和处理对玉米产量分别具有极显著( $P<0.01$ )和显著( $P<0.05$ )影响,但年份与处理互作对玉米产量的影响不显著,说明不同年份和不同秸秆覆盖耕种模式对玉米产量影响趋势是相同的,对产量的调节作用一致。

如表6所示,2 a中玉米的穗长、穗直径、百粒质量与穗粒数均呈 T3>T2>CK>T1 的变化趋势。T2与

表5 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米产量的变化

Table 5 Changes of maize yield under different straw mulching cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield/(kg·hm <sup>-2</sup> )
2021	CK	10051.26±229.33b
	T1	9622.20±95.52c
	T2	10242.62±357.31ab
	T3	10789.74±130.87a
2022	CK	10134.03±252.12b
	T1	9301.86±138.85c
	T2	10844.95±248.74a
	T3	11105.39±193.79a
年份 Year (Y)		**
处理 Treatment (T)		*
年份×处理 (Y×T)		ns

注: \*\*表示在0.01水平上差异显著( $P<0.01$ ), \*表示在0.05水平上差异显著( $P<0.05$ ), ns表示无显著差异。下同。

Note: \*\* means significant difference at the level of 0.01 ( $P<0.01$ ), \* means significant difference at the level of 0.05 ( $P<0.05$ ), and ns means no significant difference. The same below.

表6 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米产量构成因素的变化

Table 6 Changes of maize yield components under different straw mulching cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	穗长/cm Spike length	穗直径/cm Spike diameter	百粒质量/g 100-grain mass	穗粒数 Number of grains per spike
2021	CK	17.91±0.53ab	5.16±0.05a	31.73±0.45ab	631.22±12.71a
	T1	17.58±0.43b	5.07±0.07b	31.44±0.67b	621.47±15.63a
	T2	18.26±0.31a	5.19±0.06a	32.26±0.65a	639.93±10.33a
	T3	18.46±0.49a	5.25±0.08a	33.51±0.79a	640.88±15.59a
2022	CK	17.55±0.25ab	5.07±0.04b	32.03±0.25ab	612.35±17.62a
	T1	17.33±0.33b	4.98±0.06c	31.57±0.21b	602.67±19.74a
	T2	17.95±0.35a	5.21±0.07a	33.63±0.36a	620.56±18.66a
	T3	18.18±0.45a	5.30±0.05a	34.36±0.47a	626.73±11.08a
年份 Year (Y)		ns	ns	**	ns
处理 Treatment (T)		*	*	*	ns
年份×处理 (Y×T)		ns	ns	ns	ns

T3处理的穗长和百粒质量均显著高于T1处理,与T1处理相比,T2处理穗长2 a间分别增加3.87%和3.58%,T3处理分别增加5.01%和4.90%,T2、T3处理百粒质量分别增加2.61%、6.53%和6.58%、8.84%。T2、T3和CK处理穗直径在2021年显著高于T1处理,T2与T3处理穗直径在2022年显著高于CK和T1处理。4个处理的穗粒数间均无显著性差异,2 a中呈 T3>T2>CK>T1 的变化趋势。对于各指标而言,T2与T3处理间均无显著差异。由表6可知,年份仅对百粒质量产生极显著影响( $P<0.01$ ),处理对穗长、穗直径和百粒质量产生显著影响( $P<0.05$ ),年份与处理互作对上述4个指标影响不显著,说明不同年份不同覆盖耕种模式对产量构成因素的影响趋势一致。

## 2.6 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米水分利用特性

由表7可知,CK处理全生育期耗水量( $ET$ )显著高于其他3个处理,这是由于传统耕作模式生育期灌溉量较高。T2与T3处理的水分利用效率( $WUE$ )均显著高于CK和T1处理,与CK和T1处理相比,T2处理 $WUE$ 在2 a中分别提高8.22%和5.59%、13.05%和17.42%,T3处理则分别提高14.60%和11.82%、17.07%和21.60%。T2与T3处理间的 $ET$ 和 $WUE$ 均无显著性差异。年份对 $ET$ 和 $WUE$ 分别具有极显著( $P<0.01$ )和显著( $P<0.05$ )影响,处理对 $ET$ 和 $WUE$ 具有显著( $P<0.05$ )影响,年份与处理互作对播前贮水量、收获后贮水量、 $ET$ 和 $WUE$ 的影响均不显著,说明不同年份不同覆盖耕种模式对玉米水分利用特性指标的影响趋势一致。

表 7 不同秸秆覆盖耕种模式下玉米水分利用特性的变化

Table 7 Changes of water use characteristics of maize under different straw mulching cultivation patterns

年份 Year	处理 Treatment	播前土壤贮水量 Soil water storage before sowing/mm	收获后土壤贮水量 Soil water storage after harvest/mm	耗水量/mm ET	水分利用效率 WUE /(kg · mm <sup>-1</sup> · hm <sup>-2</sup> )
2021	CK	132.48a	132.87a	593.91a	16.92b
	T1	144.48a	142.45a	554.33b	17.34b
	T2	147.83a	140.79a	559.34b	18.31a
	T3	141.25a	137.18a	556.37b	19.39a
2022	CK	123.59a	118.14a	516.48a	19.62b
	T1	143.85a	122.75a	492.40b	18.89b
	T2	138.57a	120.93a	488.94b	22.18a
	T3	129.58a	117.49a	483.39b	22.97a
年份 Year (Y)	ns	ns	* *	*	
处理 Treatment (T)	ns	ns	*	*	
年份×处理 (Y×T)	ns	ns	ns	ns	

### 3 讨论

#### 3.1 不同秸秆覆盖耕种模式对玉米叶片光合参数的影响

大田作物光合作用变化与耕作栽培因素关系密切<sup>[22]</sup>,通过研究不同秸秆覆盖耕种模式下玉米光合作用,有助于了解不同耕种模式对玉米生长发育状况的影响,进一步解析特定耕种模式下玉米增产的关键因素。土壤水分是调控玉米光合作用强弱的关键<sup>[23]</sup>,覆盖还田作为吉林省半干旱区大面积推广应用的秸秆还田方式,其作用是防止土壤水分蒸发,调控植物叶片气孔开闭程度,改善叶肉细胞蒸腾作用并加强 CO<sub>2</sub> 供应,进而提高作物的光合能力<sup>[24]</sup>。

本研究发现,T3 处理(秸秆覆盖+碎混模式)开花期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$ 、 $AMC$  和  $WUE_L$  等光合参数均高于其他处理,但  $L_s$  低于其他处理,可能是由于 T3 处理在保证土壤水分的基础上,碎混于土壤的秸秆可有效地改善土壤结构,优化土壤理化性质,间接地促进了叶片光合作用,减少了叶片气孔性限制作用。刘浩等<sup>[25]</sup>研究也发现,秸秆覆盖配合碎混模式可提高玉米叶片光合作用。本研究还发现,T1 处理(秸秆覆盖模式)开花期的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_r$  等光合参数值低于其他覆盖模式处理,可能是由于秸秆覆盖虽对维持土壤水分有积极作用,但易导致土壤地温偏低<sup>[26]</sup>;且 T1 处理为免耕播种,秸秆对土壤理化性质影响较小<sup>[27]</sup>,其改善土壤状况的优势难以发挥,不利于提升玉米叶片光合作用。

#### 3.2 不同秸秆覆盖耕种模式对玉米叶片碳氮代谢酶活性的影响

RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶是植物叶片光合碳同化的关键酶,对于判断植物叶片固定 CO<sub>2</sub> 的能力

十分重要<sup>[28]</sup>,玉米是 C<sub>4</sub> 作物,两种酶均可以在 C<sub>4</sub> 途径中固定 CO<sub>2</sub><sup>[29]</sup>。本研究表明,T3 处理的 RuBP 羧化酶和 PEP 羧化酶活性显著高于 T1 处理,T2 处理在 2021 年也显著增加,上述两种酶活性与光合参数中  $P_n$ 、 $G_s$  和  $AMC$  的变化趋势基本一致,说明其活性增加对光合作用有一定的促进作用<sup>[30]</sup>,T3 处理蓄水保墒的同时还可改善土壤结构,促进玉米叶片的光合碳同化,使非结构性碳水化合物转化效率显著提升,对于缓解叶片衰老具有重要作用<sup>[31]</sup>。而 T1 处理虽能保持土壤水分,但秸秆地表覆盖可能会降低土壤温度,从而导致与暗反应活性相关的碳代谢酶活性下降,这与李文龙<sup>[31]</sup>的研究结果基本一致。

氮代谢是作物体内基本的代谢过程之一,与作物生长发育、籽粒产量和品质形成关系密切<sup>[32]</sup>。氮代谢是在酶催化下完成的,GS 作为氮素代谢的重要产物,在作物氮代谢过程中起着重要作用<sup>[33]</sup>;GDH 活性无法直接表征氮素代谢进程,但其是判断作物是否遭受逆境的重要指标<sup>[34]</sup>,当作物生长发育受到逆境影响时,体内 GDH 活性会显著提高,催化谷氨酸合成,增加作物体内氨基酸含量及渗透调节物质以抵御逆境<sup>[35]</sup>。同时,这两种酶也是蛋白质和氨基酸合成中的关键酶。本研究发现,T2 与 T3 处理的 GS 活性显著高于 T1 处理,可能是因为 GS 不仅参与氮代谢进程,催化氮代谢产物<sup>[36]</sup>,活性较高时还能参与部分糖代谢和其他多种代谢活动,T3 处理的覆盖耕种模式显著提高了玉米叶片的氮代谢进程,加快了氮的合成与转运速度。本研究还发现,T1 处理 GDH 含量高于其他处理,可能是秸秆覆盖地表会导致土壤温度偏低,不利于玉米氮代谢进程,使玉米叶片中 GDH 通过合成氨基酸等渗透调节物质抵御胁迫伤害<sup>[37]</sup>。

### 3.3 不同秸秆覆盖耕种模式对玉米根系伤流特性的影响

作物生长发育与根系活力密切相关,许多生长发育调控因子均在根系中产生<sup>[38]</sup>。研究发现,通过解析作物根系伤流特性变化,可了解应对不同环境条件时根系活力和根系的物质代谢能力<sup>[39]</sup>,以及作物对养分和水分的吸收状况<sup>[40]</sup>。伤流液中内源激素可调控玉米生长发育的每个过程,通过与环境因子间互作,调控作物对生物和非生物胁迫的适应性<sup>[41]</sup>。根系中的CTK与叶片衰老及地上部器官生长发育关系密切<sup>[42]</sup>,根系向上输送IAA可有效调控作物根冠比,影响作物的生理进程<sup>[43]</sup>,而ABA作为抑制性植物激素,在作物器官凋落时起到重要作用<sup>[44]</sup>,3种激素对作物光合相关参数均具有显著的调控作用<sup>[43]</sup>。本研究发现,玉米根系伤流强度、伤流液中CTK和IAA含量均呈T3>T2>CK>T1的变化趋势,ABA含量呈T1>CK>T2>T3的变化趋势,T3处理伤流液中CTK、IAA含量较高,ABA含量较低,说明该种模式下,玉米根系通过向地上部传导较多的CTK、IAA和较少的ABA来提高玉米抗逆性,延缓玉米衰老,延长玉米生殖生长期叶片光合作用时间,促使叶片制造更多的光合产物,有利于玉米产量增加。

### 3.4 不同秸秆覆盖耕种模式对玉米生长发育特征、产量及水分利用特性的影响

干物质积累和植株形态是判断玉米生长发育是否良好的直观指标,干物质积累作为玉米光合作用产物的最终形式,其积累特性与籽粒产量关系密切<sup>[45]</sup>。本研究表明,与CK和T1处理相比,T2与T3处理的LAI、株高及干物质积累均呈有所增加,说明秸秆覆盖配合不同耕种模式(深松和碎混)均可促进玉米生长发育,有效增加玉米叶片叶面积和株高,为干物质积累奠定基础,这与Feng等<sup>[46]</sup>研究结果基本一致。目前,吉林省半干旱区玉米单产已达到较高水平,但由于这一地区雨热同期,积温较吉林省中东部地区高,如在目前生产模式基础上加以改进,玉米产量水平仍有大幅提高的潜力<sup>[47]</sup>。本研究发现,2a中玉米产量及其构成因素均表现为T3>T2>CK>T1的变化趋势,T2与T3处理显著高于T1处理。与覆盖免耕措施相比,覆盖配合耕作提高了根系吸收养分能力,并通过伤流液向上更多地传导水分、内源激素等多种物质,使叶片光合作用和碳氮代谢能力增强,也是其促进玉米地上部植株生长发育和产量形成的主要原因。与本研究结果相似,不少学者通过长期定位试验,发现在我国东北半湿

润区<sup>[23, 48]</sup>和半干旱区<sup>[16]</sup>,采用合理的秸秆覆盖还田耕种模式可有效增加玉米产量。本研究发现,T2与T3处理的ET显著低于CK处理,WUE则显著高于CK和T1处理,且不同处理对玉米水分利用特性指标的影响趋势一致。可能是因为CK处理为无覆盖裸地种植,且单次灌溉量大,水分易蒸发散失;然而T3处理采取冬季秸秆覆盖和翌年春季秸秆碎混还田措施,能够有效地抑制土壤水分蒸发,增加土壤的蓄水保墒能力,故其生育期耗水量显著低于传统耕作模式,加之T3处理产量显著高于CK和T1处理,其WUE较后两个处理也显著提高。

本研究中,T2(秸秆覆盖+深松模式)与T3(秸秆覆盖+碎混模式)处理在大多数指标上差异并不显著,可能是由于各试验年份玉米全生育期降水量均在400 mm以上,超过了该地区玉米全生育期多年平均降水量,水分因素限制程度不足,不同秸秆覆盖耕种模式的优势无法有效区分,未来将继续在吉林省半干旱区开展定位研究,以期探索一套适合不同降水年型的节水高产玉米秸秆覆盖耕种技术模式。

## 4 结 论

与其他耕种模式相比,秸秆覆盖+碎混模式(T3处理)提高了玉米开花期叶片净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率、表观叶肉导度、叶片水分利用效率和叶片碳代谢相关酶(RuBP羧化酶和PEP羧化酶)、谷氨酰胺合成酶活性,降低了叶片气孔限制值和谷氨酸脱氢酶活性,增加了玉米根系伤流强度及伤流液中细胞分裂素、生长素含量,降低了伤流液中脱落酸含量,增加了不同生育时期叶面积指数、株高及干物质积累量,产量及其构成因子与水分利用效率也高于传统耕作模式(CK)和秸秆覆盖模式(T1)。秸秆覆盖+碎混模式在玉米增产的前提下,减少了水资源浪费,可作为吉林省半干旱区玉米绿色高效生产的推荐耕作技术。

### 参 考 文 献:

- [1] 王立春,王永军,边少锋,等.吉林省玉米高产高效绿色发展的理论与实践[J].吉林农业大学学报,2018,40(4):383-392.  
WANG L C, WANG Y J, BIAN S F, et al. Theory and practice for high yield, high efficiency and green development of maize in Jilin province[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2018, 40(4): 383-392.
- [2] GENG Y H, CAO G J, WANG L C, et al. Can drip irrigation under mulch be replaced with shallow-buried drip irrigation in spring maize production systems in semiarid areas of northern China? [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(5): 1926-1934.

- [3] 张丽华, 徐晨, 于江, 等. 半湿润区秸秆还田对土壤水分、温度及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 299-306.  
ZHANG L H, XU C, YU J, et al. Effects of straw returning on soil moisture, temperature and maize yield in semi-humid area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 299-306.
- [4] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1558-1570.  
ZHANG Y M, HU C S, CHEN S Y, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1558-1570.
- [5] 张乃文, 韩晓增, 朴勇杰, 等. 深翻和秸秆还田对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 178-185.  
ZHANG N W, HAN X Z, PIAO Y J, et al. Effects of deep tillage and straw returning on microbial community functional diversity in soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 178-185.
- [6] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 等. 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[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1785-1792.  
ZHAO Y L, GUO H B, XUE Z W, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [7] 张丽华, 栾天宇, 徐晨, 等. 半湿润区秸秆还田及耕作技术对土壤水分、玉米光合特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(3): 100-107.  
ZHANG L H, LUAN T Y, XU C, et al. Effects of straw returning and tillage techniques on soil moisture, photosynthetic characteristics and yield of maize in semi humid area[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(3): 100-107.
- [8] 崔宁波, 范月圆, 董晋. 玉米秸秆覆盖还田保护性耕作技术在东北地区的应用与发展路径[J]. 玉米科学, 2021, 29(6): 112-117, 126.  
CUI N B, FAN Y Y, DONG J. Application status and developing routes of maize straw mulching of conservation tillage technology in Northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(6): 112-117, 126.
- [9] SHEN J Y, ZHAO D D, HAN H F, et al. Effects of straw mulching on water consumption characteristics and yield of different types of summer maize plants[J]. Plant, Soil and Environment, 2012, 58(4): 161-166.
- [10] TAO Z Q, LI C F, LI J J, et al. Tillage and straw mulching impacts on grain yield and water use efficiency of spring maize in Northern Huang-Huai-Hai Valley[J]. The Crop Journal, 2015, 3(5): 445-450.
- [11] 姜英, 王峥宇, 廉宏利, 等. 耕作和秸秆还田方式对东北春玉米吐丝期根系特征及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3071-3082.  
JIANG Y, WANG Z Y, LIAN H L, et al. Effects of tillage and straw incorporation method on root trait at silking stage and grain yield of spring maize in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3071-3082.
- [12] 张文可, 苏思慧, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田模式对东北春玉米根系分布和水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2300-2308.  
ZHANG W K, SU S H, SUI P X, et al. Effects of straw incorporation modes on root distribution and water use efficiency of spring maize in Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2300-2308.
- [13] 郑洪兵, 罗洋, 李瑞平, 等. 耕作方式对根土关系的影响及 CT 技术在其研究上的应用[J]. 中国农学通报, 2021, 37(33): 83-87.  
ZHENG H B, LUO Y, LI R P, et al. Effect of tillage methods on interaction relationship of soil and root structure and application of CT technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(33): 83-87.
- [14] 徐晨, 张丽华, 赵洪祥, 等. 不同栽培模式下半干旱区玉米籽粒形成和叶片对光与 CO<sub>2</sub> 响应特性[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 1-10.  
XU C, ZHANG L H, ZHAO H X, et al. Characteristics of grain formation and leaf response to light and CO<sub>2</sub> in semi-arid region under different cultivation patterns[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 1-10.
- [15] 张丽华, 徐晨, 闫伟平, 等. 半干旱区地表覆盖方式对土壤水温效应及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2): 179-192.  
ZHANG L H, XU C, YAN W P, et al. Effects of surface mulching on soil water and temperature efficiency and maize yield in semi-arid area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2): 179-192.
- [16] 齐翔鲲, 安思危, 侯楠, 等. 耕作和秸秆还田方式对半干旱区黑土玉米养分积累分配与产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(12): 2214-2226.  
QI X K, AN S W, HOU N, et al. Effects of tillage and straw returning method on the nutrient accumulation, distribution and yield of maize in black soil of semi-arid region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(12): 2214-2226.
- [17] 何如, 张双羽, 杨彩红, 等. 绿洲灌区不同耕作模式对土壤性质的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3890-3902.  
HE R, ZHANG S Y, YANG C H, et al. Effects of tillage and cropping modes on soil properties in oasis irrigation area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3890-3902.
- [18] 高日平, 刘小月, 杜二小, 等. 垄膜沟播与秸秆还田对内蒙古黄土高原玉米农田土壤水分、酶活性及产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(11): 181-190.  
GAO R P, LIU X Y, DU E X, et al. Influences of ridge film and furrow sowing and straw returning on soil moisture, enzyme activity and yield of maize in loess plateau of Inner Mongolia[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(11): 181-190.
- [19] 冯浩原, 尹光华, 马宁宁, 等. 不同降水年型地下滴灌追氮对玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1250-1256.  
FENG H Y, YIN G H, MA N N, et al. Effect of subsurface drip irrigation and nitrogen supplement on maize yield in different precipitation years[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(12): 1250-1256.
- [20] 付景, 王亚, 杨文博, 等. 干湿交替灌溉耦合施氮量对水稻籽粒灌浆生理和根系生理的影响[J]. 作物学报, 2023, 49(3): 808-820.  
FU J, WANG Y, YANG W B, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on grain filling physiology and root physiology in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(3): 808-820.
- [21] 徐晨, 闫伟平, 孙宁, 等. 不同灌水处理对春玉米生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 7-14.  
XU C, YAN W P, SUN N, et al. The impacts of irrigation amount on physiological characteristics and yield of spring maize[J]. Journal of

- Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 7-14.
- [22] MAE T. Physiological nitrogen efficiency in rice; nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential[J]. Plant and soil, 1997, 196(2): 201-210.
- [23] ZHANG L H, ZHAO H X, XU C, et al. Effects of straw returning on soil moisture and maize yield in semi-humid area [J]. Cereal Research Communications, 2022, 50(3): 539-548.
- [24] 任娇, 于寒, 吴春胜, 等. 不同秸秆还田方式下玉米叶片光合、荧光特性及水分利用率的比较[J]. 分子植物育种, 2017, 15(12): 5241-5247.
- REN J, YU H, WU C S, et al. Comparison of photosynthetic, fluorescent properties and water use efficiency of maize in different ways of straw recycling[J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(12): 5241-5247.
- [25] 刘浩, 王美臣, 于玮淇, 等. 不同秸秆还田模式对冷凉区玉米生长发育及产量的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1-8.
- LIU H, WANG F C, YU W Q, et al. Effects of different straw returning modes on maize growth and yield in cold area[J/OL]. Molecular Plant Breeding: 1-8.
- [26] 戴皖宁, 王丽学, KHAN I, 等. 秸秆覆盖和生物炭对玉米田间地温和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 719-725.
- DAI W N, WANG L X, KHAN I, et al. Effects of straw mulching and biochar addition on soil temperature and maize yield[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3): 719-725.
- [27] 马国成, 蔡红光, 范围, 等. 黑土区玉米秸秆全量直接还田技术区域适应性探讨[J]. 玉米科学, 2022, 30(6): 1-6.
- MA G C, CAI H G, FAN W, et al. Technical features and regional adaptability of direct and whole maize straw manuring in black soil region[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(6): 1-6.
- [28] 孙娜, 魏珉, 李岩, 等. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(1): 80-88.
- SUN N, WEI M, LI Y, et al. Effects of light quality on carbon and nitrogen metabolism and enzyme activities in tomato seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(1): 80-88.
- [29] 刘耀权, 王林林, 李玲玲, 等. 施氮促进旱作覆膜玉米产量和水分利用效率的生理机制[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(2): 193-202.
- LIU Y Q, WANG L L, LI L L, et al. Physiological mechanism of nitrogen fertilization promoting yield and water use efficiency of dryland maize fields with plastic mulching[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(2): 193-202.
- [30] 杨恒山, 张雨珊, 葛选良, 等. 浅埋滴灌下不同滴灌量对玉米花后碳代谢和光合氮素利用效率的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2614-2624.
- YANG H S, ZHANG Y S, GE X L, et al. Effects of different amount of drip irrigation on carbon metabolism and photosynthetic nitrogen utilization efficiency of maize after anthesis under shallow buried drip irrigation[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(10): 2614-2624.
- [31] 李文龙. 栽培模式对黑龙江玉米光合生理、茎秆理化特性及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- LI W L. Effects of cultivation modes on photosynthetic physiology, stem physicochemical characteristics and yield of maize in Heilongjiang province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
- [32] 曹兵, 黄志浩, 吴广利, 等. 控释掺混肥一次性减量施用对夏玉米产量、氮肥利用和叶片氮代谢酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021, (3): 127-133.
- CAO B, HUANG Z H, WU G L, et al. Impact of controlled release blended fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and leaf enzyme activity of nitrogen metabolism of summer maize under single basal reduction application[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2021, (3): 127-133.
- [33] 徐晨, 边少锋, 赵洪祥, 等. 半干旱区优化栽培模式下玉米产量、生长发育及叶片生理特性研究[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 105-114.
- XU C, BIAN S F, ZHAO H X, et al. Study on yield, growth and development and leaf physiological characteristics of maize under optimized cultivation pattern in semi-arid area[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 105-114.
- [34] 夏光利, 董浩, 宋绪鹏, 等. 授高油玉米花粉对普通玉米籽粒蛋白积累及氮代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(7): 13-20.
- XIA G L, DONG H, SONG X P, et al. Influence of high-oil maize pollen to normal maize kernel protein accumulation and nitrogen metabolism related enzymes activities[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(7): 13-20.
- [35] 徐洪超, 商靖, 刘铭荟, 等. 氮代谢相关酶的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(4): 17-20.
- XU H C, SHANG J, LIU M H, et al. Research progress of enzymes related to nitrogen metabolism[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 17-20.
- [36] 庞茹月, 孔洁, 杨富军, 等. 栽培方式对夏直播花生功能叶片氮素代谢的影响[J]. 花生学报, 2021, 50(3): 34-39.
- PANG R Y, KONG J, YANG F J, et al. Study on the effects of cultivation modes on nitrogen metabolism in functional leaves of summer direct seeding peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2021, 50(3): 34-39.
- [37] MEDICI L O, MACHADO A T, AZEVEDO R A, et al. Glutamine synthetase activity, relative water content and water potential in maize submitted to drought[J]. Biologia Plantarum, 2003, 47(2): 301-304.
- [38] 任寒, 刘鹏, 董树亭, 等. 高温胁迫影响玉米生长发育的生理机制研究进展[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 109-115.
- REN H, LIU P, DONG S T, et al. Research advancements of effect of high temperature stress on growth and development of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 109-115.
- [39] 肖金川, 武志海, 徐克章, 等. 吉林省47年育成的水稻品种根系伤流液重量变化及其与剑叶光合速率的关系[J]. 植物生理学报, 2012, 48(5): 499-504.
- XIAO J C, WU Z H, XU K Z, et al. Changes of root bleeding sap weight and its correlation with flag leaf net photosynthetic rate in rice cultivars released 47 years in Jilin province of China[J]. Plant Physiology Journal, 2012, 48(5): 499-504.
- [40] 张玉姣, 徐克章, 陈展宇, 等. 不同年代大豆品种根系伤流液含氮化合物的变化[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(4): 469-475.
- ZHANG Y J, XU K Z, CHEN Z Y, et al. Changes of nitrogen compounds in root bleeding sap of soybean cultivars released in different years[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(4): 469-475.
- [41] SHEN Y O, ZHANG Y Z, LIN H J, et al. Effect of low phosphorus stress on endogenous hormone levels of different maize genotypes in seedling stage[J]. Journal of Biological Sciences, 2012, 12(5): 308-314.