

DOI: 10.12357/cjea.20230346

李瑞平, 谢瑞芝, 罗洋, 隋鹏祥, 郑洪兵, 明博, 王浩, 刘武仁, 郑金玉, 李少昆. 典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(1): 71-82

LI R P, XIE R Z, LUO Y, SUI P X, ZHENG H B, MING B, WANG H, LIU W R, ZHENG J Y, LI S K. Effects of conservation tillage methods on maize growth and yields in a typical black soil region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2024, 32(1): 71-82

典型黑土区不同保护性耕作方式对玉米生长发育及产量形成的影响*

李瑞平^{1,3}, 谢瑞芝², 罗洋¹, 隋鹏祥¹, 郑洪兵¹, 明博², 王浩¹, 刘武仁¹,
郑金玉^{1**}, 李少昆^{2**}

(1. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部东北作物生理生态与耕作重点实验室 长春 130033; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室 北京 100081; 3. 内蒙古农业大学农学院 呼和浩特 010019)

摘要: 实施保护性耕作对保护东北黑土和保障国家粮食安全具有重要意义。为明确东北典型黑土区保护性耕作对玉米产量的影响及其关键因素,开展了连续3年大田定位试验,设常规垄作秸秆不还田(CK)、免耕秸秆全量粉碎覆盖(T1)、免耕留高茬全量秸秆覆盖(T2)、少耕秸秆全量条带覆盖(T3)共4个处理,分析了不同处理对土壤理化特性及玉米生长发育、产量及其构成因素的影响。结果表明,与CK相比,保护性耕作处理(T1、T2和T3)0~20 cm耕层土壤有机质含量呈增加趋势;保护性耕作显著提高了播种至出苗期耕层土壤含水量,T1、T2和T3处理分别提高7.8%~30.4%、9.0%~18.7%和17.3%~20.0%,但显著降低土壤温度,分别降低2.56~3.11℃、2.02~2.27℃、0.94~1.93℃;分别延迟玉米出苗时间5~7 d、4~6 d和2 d;T3处理3年平均出苗率较CK增加3.2%,T1和T2处理出苗率分别降低4.3%和4.7%;T1、T2和T3处理均降低了苗期株高整齐度和植株干物质积累,但T3处理降低幅度明显小于T1和T2处理,6叶期之后干物质积累降低幅度逐渐减小;T1和T2处理显著降低玉米产量,降幅分别为7.5%~15.6%和5.5%~12.9%,T3处理产量与CK差异不显著。结构方程模型(SEM)揭示,保护性耕作通过调节土壤含水量和温度,间接影响玉米出苗时间、出苗率、穗数和百粒重,进而影响产量,也可通过直接影响出苗质量和产量构成因素进而影响产量。在东北典型黑土区,少耕秸秆全量条带覆盖(T3)不仅有利于提高土壤有机质含量,而且还有利于平衡土壤水分和温度矛盾,缩短出苗时间、提高出苗质量、高产稳产,是该区域适宜的保护性耕作方式。

关键词: 东北黑土区; 保护性耕作; 玉米产量; 土壤理化性质

中图分类号: 344.9

Effects of conservation tillage methods on maize growth and yields in a typical black soil region*

* 吉林省科技发展计划项目(20210202024NC)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA28080204)和国家重点研发计划项目子课题(2022YFD1500104-03)资助

** 通信作者: 郑金玉, 主要研究方向为耕作制度, E-mail: 15844052867@163.com; 李少昆, 主要研究方向为玉米高产栽培与耕作, E-mail: lishaokun@caas.cn

李瑞平, 主要研究方向为保护性耕作与秸秆还田。E-mail: ruipinghappy@126.com

收稿日期: 2023-06-21 接受日期: 2023-08-21

* This study was supported by the Science and Technology Development Plan Project of Jilin Province (20210202024NC), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA28080204), and the National Key Research and Development Program of China (2022YFD1500104-03).

** Corresponding authors: ZHENG Jinyu, E-mail: 15844052867@163.com; LI Shaokun, E-mail: lishaokun@caas.cn
Received Jun. 21, 2023; accepted Aug. 21, 2023

LI Ruiping^{1,3}, XIE Ruizhi², LUO Yang¹, SUI Pengxiang¹, ZHENG Hongbing¹, MING Bo², WANG Hao¹,
LIU Wuren¹, ZHENG Jinyu^{1**}, LI Shaokun^{2**}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changchun 130033, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 3. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: Implementation of conservation tillage is crucial for protecting black soil in Northeast China and ensuring national food security. A three-year field experiment was conducted to examine the impact of conservation tillage on maize yields and its key factors in a typical black soil region of Northeast China. Four treatments were designed, including conventional ridge tillage without straw mulching (CK), no-tillage with 100% crushed straw mulching (T1), no-tillage with high stubble and 100% straw mulching (T2), and reduced tillage with 100% straw strip mulching (T3). This study analyzed the physical and chemical properties of soil, maize growth, yields, and its components to assess the effects of different treatments on soil and maize yields. The results demonstrated that conservation tillage treatments (T1, T2, and T3) increased soil organic matter content in the 0–20 cm soil layer compared with the CK treatment. Additionally, conservation tillage significantly improved the soil water content during the sowing to seedling stages, while decreasing the soil temperature. T1, T2, and T3 treatments led to increases in the soil water content, ranging from 7.8% to 30.4%, 9.0% to 18.7%, and 17.3% to 20.0%, respectively. Meanwhile, the soil temperature decreased by 2.56 °C to 3.11 °C, 2.02 °C to 2.27 °C, and 0.94 °C to 1.93 °C, respectively. The data revealed that the emergence times of T1 and T2 were delayed by 5–7 days and 4–6 days, respectively. However, T3 only experienced a delay of two days. Over the three years, the average seedling emergence rate of T3 treatment increased by 3.2% compared to CK, whereas the emergence rates of T1 and T2 decreased by 4.3% and 4.7%, respectively. T1, T2, and T3 treatments reduced the uniformity of plant height and dry matter accumulation at the sixth leaf collar stage, with T3 treatment exhibiting a significantly smaller decrease than the T1 and T2 treatments. Additionally, dry matter accumulation after the sixth leaf collar gradually decreased in T3 compared to that in the other treatments. T1 and T2 significantly reduced the yield by 7.5% to 15.6% and 5.5% to 12.9%, respectively, over the course of three years. However, T3 treatment did not show a significant difference compared with CK. The structural equation model (SEM) indicated that conservation tillage indirectly affected yields by regulating soil water content and temperature, thereby influencing emergence time, emergence rate, ear number, and 100-kernal weight. Furthermore, conservation tillage can directly affect emergence quality and yield components, subsequently affecting yields. Therefore, T3 is an optimal conservation tillage practice for a typical black soil region of Northeast China. T3 not only improves soil organic matter content but also helps in adjusting the contradiction between soil moisture and temperature to shorten the emergence time, improve the quality of emergence, and stabilize yields.

Keywords: Black region of Northeast China; Conservation tillage; Maize yield; Soil physicochemical properties

中国东北(黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟市)位于世界上著名的四大黑土带之一“中国黑土带”。黑土是宝贵的土壤资源,其土壤有机质含量高,保肥、供肥能力强,为作物生长发育提供了有利条件,也为东北成为“中国最大的商品粮生产基地”奠定基础。东北被称作我国粮食安全的“压舱石”^[1],粮食总产量约占全国粮食总产量的 1/4,输出的商品粮占全国商品粮总量的 1/3^[2],其中玉米(*Zea mays*)播种面积占粮食作物播种面积的一半以上^[3]。

然而,该区域长期“重用轻养”的耕作制度加速了农田土壤退化,严重制约了东北地区农业可持续发展,甚至将导致东北粮食生产“压舱石”的作用发生动摇风险^[1],黑土退化引起学者们广泛关注^[4-6]和政府部门的高度重视。国内外实践证明,采用保护性耕作是防止土壤退化的有效途径。但是,在东北地区实际生产中保护性耕作条件下玉米产量的不确定性是影响其大面积应用的障碍因素之一。因此,揭示

黑土区保护性耕作对玉米产量的影响及其关键因素,对于保护黑土和确保国家粮食安全至关重要。

国内外一部分学者研究认为,少耕、免耕等保护性耕作能够提高玉米产量,特别是在干旱地区增产更显著^[7-9]; 邬小春等^[10]研究认为少耕能够提高穗粒数、百粒重和玉米产量;也有报道认为,保护性耕作即使降低玉米出苗率,但对产量没有负面影响,免耕留茬较常规翻耕增产 4.4%^[11],少耕(留茬深松)较翻耕、免耕和旋耕产量提高 11.3%~14.6%^[12]。另一部分学者认为,保护性耕作由于采用了少耕、免耕以及秸秆覆盖措施降低土壤温度,会影响作物前期生长发育,产量降低^[13-14],特别是在冷凉气候区免耕秸秆覆盖条件下影响更大^[15]。也有研究表明,实施保护性耕作措施作物产量平均增加 12.5%,但也有 10.9% 数据显示减产^[16]。当然,保护性耕作作物产量效应因作物种类、生态区域以及耕作措施不同而有所差异^[7,17]。

虽然前人关于保护性耕作对玉米产量的影响开展了大量研究,但对东北典型黑土区不同秸秆覆盖方式下少耕、免耕保护性耕作(特别是全量秸秆覆盖)对玉米产量影响的系统性研究还鲜有报道,且其影响玉米产量的关键因素尚不清楚。本研究通过大田定位试验,从耕层土壤理化特性、玉米生长发育视角,系统研究黑土区保护性耕作影响玉米产量的潜在机制,以期为东北黑土地保护性耕作技术应用提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2018—2020 年在吉林省农业科学院范家屯镇香山村试验站(43°45'N, 125°01'E; 海拔 120 m)进行,该地位于东北平原中部,属于典型黑土区,寒温带大陆性气候,雨热同季,年均降水量 560 mm,无霜期 140 d 左右,年均气温 4.5 °C。试验期间玉米生长季节日平均气温与降雨量见图 1,2018 年、2019 年和 2020 年 4—10 月降雨量分别为 555 mm、714

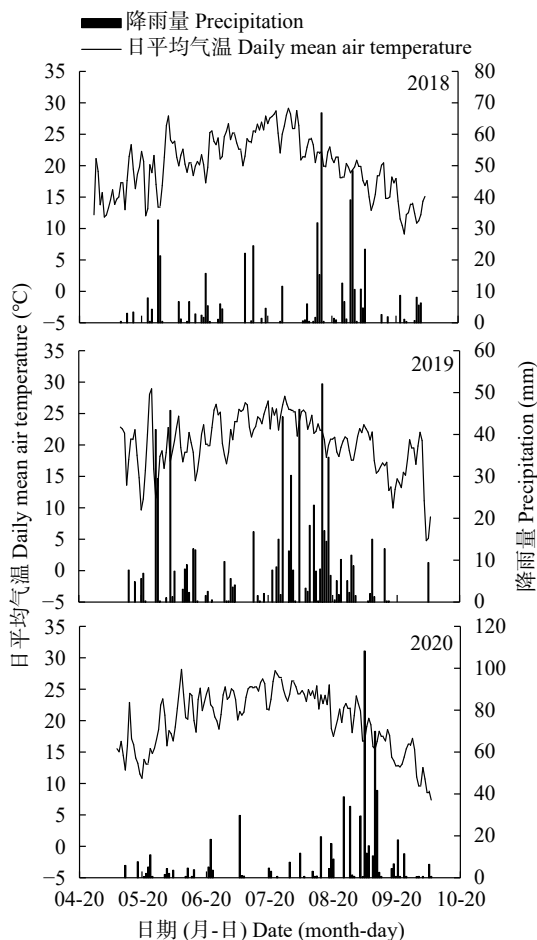


图 1 2018—2020 年玉米生育期间日平均气温与降雨量
Fig. 1 Daily mean air temperature and precipitation during the growth period of maize from 2018 to 2020

mm 和 633 mm,玉米生育期 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温分别为 3227 °C、3011 °C 和 3000 °C。试验区域为一年一熟制,玉米连作,常规耕作方式为灭茬旋耕起垄。试验实施前(2017 年 4 月)0~20 cm 耕层土壤容重 $1.39\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、有机质含量 $29.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $1.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $18.96\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效氮 $124.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $29.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $196.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、pH 6.11。

1.2 试验设计

定位试验始于 2017 年,共设 4 个处理:常规垄作秸秆不还田(CK)、免耕秸秆全量粉碎覆盖(T1)、免耕留高茬全量秸秆覆盖(T2)、少耕秸秆全量条带覆盖(T3),每个处理 3 次重复,每个小区 910 m^2 ($13\text{ m}\times 70\text{ m}$),随机区组排列。按照保护性耕作概念和内涵,CK 为传统耕作方式,其他 3 个处理属于保护性耕作方式,其中 T1 和 T2 属于免耕、T3 属于少耕。各处理秸秆处理与播种方法见表 1。

传统耕作方式在播种前整地时一次性施入底肥(复合肥, N、P、K 总含量 50%),施肥量纯 N $230\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 P_2O_5 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;其他处理在播种时采用免耕播种机一次性施入,施肥量与常规耕作方式一致。2018 年、2019 年播种密度为 6.0×10^4 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$,考虑到收获穗数偏低,2020 年播种密度调整为 6.5×10^4 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2018 年、2019 年和 2020 年播种日期分别为 4 月 26 日、5 月 9 日和 5 月 7 日。玉米品种为‘先玉 335’。

1.3 田间管理

播后苗前,采用阿特拉津+乙草胺为主的除草剂进行土壤封闭除草。6 月下旬防黏虫和玉米螟,2018 年采用机械喷施,2019 年和 2020 年采用无人机防治。

1.4 测试指标与方法

1.4.1 土壤理化特性

土壤容重:在玉米收获后采样环刀法^[18]测定 0~20 cm 耕层土样,3 次重复。

土壤有机质:玉米收获后“S”型 5 点取 0~20 cm 耕层土样,装入土袋带回试验室,置于阴凉处自然风干,采用重铬酸钾容量法-外加热法测定^[18]。

土壤含水量:采用 ZDR-20T 土壤水分温度记录仪监测玉米全生育期土壤含水量,每隔 1 h 记录一次,每个处理监测同一位置(植株间),每个小区记录监测土壤深度为 5 cm 和 15 cm,5 cm 和 15 cm 平均土壤含水量代表 0~20 cm 耕层土壤含水量。选取播种至出苗连续每天土壤含水量数据进行统计分析,2018 年、2019 年和 2020 年播种至出苗天数分别为 25 d、22 d 和 22 d。

表 1 不同处理具体操作过程
Table 1 Operation steps of different treatments

处理 Treatment	秸秆处理与耕整地 Residue management and tillage preparation	播种 Sowing
CK	秸秆不还田, 播种前20 d左右进行灭茬、旋耕、起垄和施肥作业, 并镇压达 到播种状态 Straw was not be returned to the field; stubble elimination, rotary tillage, ridging and fertilization operations were carried out about 20 days before sowing, and repression was carried out to achieve sowing status	采用机械播种, 播种后及时镇压 Mechanical sowing, timely repression after sowing
T1	机械收获时将全部秸秆粉碎, 粉碎后秸秆长度小于20 cm, 然后抛撒于地表 During mechanical harvest, all straws crushed less than 20 cm long were sprayed on the surface	翌年直接免耕播种, 同时一次性施入底肥 Direct no-till seeding in the following year with a one-time input of base fertilizer
T2	机械收获时留高茬20~30 cm, 上部秸秆全部粉碎喷撒于地表 During mechanical harvest, 20~30 cm high stubble was left, and the upper straw was pulverized and sprayed on the surface	与T1相同 Same as T1
T3	机械收获时将全部秸秆粉碎, 粉碎后秸秆长度小于20 cm, 然后抛撒于地表, 播种前采用秸秆归行机将秸秆清理为条带状, 宽度约为70~80 cm和50~60 cm (无秸秆) During mechanical harvest, all straws were pulverized with a length of less than 20 cm and sprayed on the surface. Before sowing, the straw were cleaned into strips with a width of about 70~80 cm and 50~60 cm (no straw) by straw cleaning machine	播种采用宽窄行模式, 播种时用免耕播种机在清理的50~60 cm无秸秆条带处播种(苗带宽度为40 cm), 同时一次性施入底 肥 The wide/narrow row mode was used for sowing, and the no-till seeder was used to sow in the 50~60 cm of cleared straw strip (the width of the strip was 40 cm), and the base fertilizer was applied at one time

土壤温度: 采用 Watch Dog B 系列防水纽扣记录仪 (B101 型) 测定, 测定时期、频次、土壤深度和位置与土壤含水量一致。选取播种至出苗无有效降雨 (≤ 5 mm) 连续 5 d 数据进行统计分析。

1.4.2 玉米生长发育指标

生育期: 准确记录各处理的播种期、出苗期、6 叶期、12 叶期、吐丝期、灌浆期、生理成熟期。以 50% 以上植株表现出某一生育时期特征时为判断标准^[19]。

出苗率: 出苗后, 各小区去掉两边行各 4 行和两地头各 10 m, 在有效区域内选取 10 m 记录其出苗总株数和应出苗株数, 5 次重复, 田间出苗率 (%) = 田间出苗数/理论出苗数 $\times 100$ 。

群体整齐度: 以株高变异系数的倒数衡量群体整齐度。在玉米 6 叶期, 每个小区随机选 5 垄, 每垄连续选取 10 株测量株高。

干物质测量: 在 6 叶期、12 叶期、吐丝期、灌浆期、生理成熟期测定。6 叶期每个小区连续测定 10 株, 其他时期每个小区连续测定 5 株。灌浆期和生理成熟期, 每株分别测定籽粒干重和植株干重 (包括茎秆、叶、穗轴)。植株切割成 15 cm 长段, 装入牛皮纸袋在烘箱 105 °C 下杀青 30 min, 然后在 75 °C 下烘干至恒重, 测定单株干物质重。

1.4.3 玉米产量及其构成因素

在玉米成熟期, 每个小区去掉两边行各 4 行和两地头各 10 m, 随机选取 3 个点, 每个点 4 行, 行长 7.7 m, 面积 20 m² 进行测产。调查有效穗数, 称穗鲜重, 计算单穗重。选取 20 个代表穗, 待风干后进行考种, 测定穗行数、行粒数、百粒重、籽粒含水率, 然后

计算标准含水率 (14%) 籽粒产量。

1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据处理和作图, 采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, 采用 Duncan 法进行显著性检验, 采用 AMOS 软件 (IBM SPSS AMOS 22.0) 建立影响产量形成的直接和间接影响因子的结构方程模型 (SEM)。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作对玉米产量及其构成因素的影响

如表 2 所示, 与 CK 相比, 2018—2020 年 T1 和 T2 处理产量降低 ($P < 0.05$), 分别降低 7.5% 和 5.5%、15.6% 和 12.9%、9.7% 和 11.8%。T3 处理产量与 CK 产量差异均不显著。2018 年不同保护性处理与 CK 穗数差异不显著, 但 2019 年和 2020 年 T1 处理穗数显著降低 ($P < 0.05$)。2018 年 3 个保护性处理、2019 年 T1 和 T2 处理及 2020 年 T2 处理的穗粒数显著低于 CK ($P < 0.05$), 3 年 T1 和 T2 处理的百粒重与 CK 差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。多重比较分析表明, 年份、处理对产量的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 二者之间互作对产量的影响达显著水平 ($P < 0.05$)。年份和处理对穗数的影响达极显著水平 ($P < 0.01$) 和显著水平 ($P < 0.05$), 但二者互作对穗数的影响未达显著水平。年份和处理对穗粒数的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 但二者互作对穗粒数无显著影响。年份和处理对百粒重的影响均达极显著水平 ($P < 0.01$), 二者互作对百粒重的影响达显著水平 ($P < 0.05$)。可见, 保护性耕作影响玉米产量、穗数、穗粒数和百粒重, T1 和 T2 处理显著降低产量, T3 处理与 CK 产量差

表 2 2018—2020 年不同处理玉米产量及产量构成因素差异
Table 2 Difference of maize yields and yield components under different treatments from 2018 to 2020

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	穗数 Ears number (×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数 Kernels number per ear	百粒重 100-kernel weight (g)
2018	CK	11 786.5±225.8a	5.21±0.13a	643.1±8.47a	37.9±0.30a
	T1	10 902.2±461.5b	5.14±0.19a	606.1±3.25c	36.0±0.74b
	T2	11 155.5±35.5b	5.12±0.04a	617.8±9.31bc	36.2±0.27b
	T3	11 309.0±150.2ab	5.21±0.15a	628.2±11.32b	37.1±0.49ab
2019	CK	11 092.2±144.6ab	5.08±0.04ab	673.7±13.16a	37.4±0.83a
	T1	9365.8±455.6b	4.85±0.07c	643.6±3.80b	34.3±0.11c
	T2	9658.7±198.8b	4.90±0.15bc	640.9±15.89b	35.8±0.50b
	T3	11 419.3±183.2a	5.27±0.06a	655.5±10.01ab	37.6±0.10a
2020	CK	10 854.3±197.9a	5.44±0.10a	652.9±5.88a	34.8±0.34a
	T1	9798.0±228.7b	5.21±0.11b	638.9±9.90ab	33.2±0.10b
	T2	9577.2±119.2b	5.13±0.04b	636.0±1.68b	33.3±0.31b
	T3	10 759.3±174.0a	5.46±0.09a	640.5±0.72ab	34.8±0.41a
变异来源 Source of variation	年份 Year (Y)	**	**	**	**
	处理 Treatment (T)	**	*	**	**
	Y×T	*	ns	ns	*

同列同一年份不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著, *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著, ns表示差异不显著。Values followed by different lowercase letters in the same column of the same year are significantly different among different treatments at $P<0.05$ level. * and ** indicate significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ probability levels, ns indicates no significance.

异不显著。

2.2 保护性耕作对土壤理化性质的影响

与 CK 相比, 保护性耕作处理中仅 2018 年 T3 处理显著降低 0~20 cm 土壤容重 ($P<0.05$), 其他保护性耕作处理对土壤容重均无显著影响 (表 3)。2018 年不同处理土壤有机质含量差异不显著, 但保护性耕作均有提高土壤有机质含量的趋势; 2019 年和 2020

年 T1 处理土壤有机质含量分别比 CK 提高 11.73% 和 13.17% ($P<0.05$), 2020 年 T2 处理提高 4.51% ($P<0.05$)。2018—2020 年 T1 处理较 CK 均显著提高土壤含水量 ($P<0.05$), 分别提高 7.8%、28.8% 和 30.4%; T2 和 T3 处理 2019 年和 2020 年较 CK 显著提高土壤含水量 ($P<0.05$), 其中 T2 处理分别提高 9.0% 和 18.7%, T3 处理分别提高 17.3% 和 20.0%。

表 3 2018—2020 年不同处理 0~20 cm 土壤理化性质差异
Table 3 Differences in physical and chemical properties of 0~20 cm soil under different treatments from 2018 to 2020

年份 Year	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	土壤有机质 Soil organic matter (g·kg ⁻¹)	土壤含水量 Soil water content (%)	土壤温度 Soil temperature (°C)
2018	CK	1.39±0.01a	29.88±1.08a	27.58±0.83b	12.10±0.36a
	T1	1.35±0.04ab	30.27±1.50a	29.73±0.89a	9.54±0.29c
	T2	1.38±0.06a	30.27±0.64a	29.02±0.87ab	9.83±0.29c
	T3	1.29±0.06b	30.57±0.39a	28.95±0.87ab	11.16±0.33b
2019	CK	1.36±0.02ab	24.29±0.64b	26.12±0.79d	15.13±0.45a
	T1	1.32±0.02b	27.14±0.64a	33.65±1.01a	12.02±0.36c
	T2	1.33±0.02ab	25.11±0.43b	28.48±0.86c	13.03±0.39b
	T3	1.36±0.03a	24.66±0.20b	30.63±0.92b	13.20±0.40b
2020	CK	1.39±0.01a	24.83±0.60c	21.36±0.05c	14.22±0.62a
	T1	1.36±0.06a	28.10±0.54a	27.85±0.19a	11.28±0.51b
	T2	1.38±0.05a	25.95±0.66b	25.36±0.33b	12.20±0.92b
	T3	1.37±0.02a	25.28±0.05bc	25.63±0.05b	13.94±0.76a
变异来源 Source of variation	年份 Year (Y)	ns	**	**	**
	处理 Treatment (T)	ns	**	**	**
	Y×T	ns	*	**	ns

同列同一年份不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著, *和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著, ns表示差异不显著。Values followed by different lowercase letters in the same column of the same year are significantly different among different treatments at $P<0.05$ level. * and ** indicate significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ probability levels, ns indicates no significance.

2018—2020 年 T1 和 T2 处理较 CK 显著降低土壤温度 ($P<0.05$), 其中 T1 处理分别降低 2.56℃、3.11℃ 和 2.94℃, T2 处理分别降低 2.27℃、2.10℃ 和 2.02℃; 2018—2019 年 T3 处理较 CK 显著降低土壤温度 ($P<0.05$), 分别降低 0.94℃ 和 1.93℃, 2020 年与 CK 差异不显著。总之, 保护性耕作对 0~20 cm 耕层土壤容重几乎无影响, 但土壤有机质含量呈增加趋势; 保护性耕作显著增加土壤含水量, 但显著降低土壤温度, 其中 T1 处理土壤含水量增幅最大、土壤温度降幅最高, T3 土壤温度降低幅度最低。多重比较显示, 年份、处理对土壤有机质的影响均达极显著水平 ($P<0.01$), 二者之间互作对土壤有机质的影响达显著水平 ($P<0.05$); 年份、处理以及二者之间互作对土壤

含水量的影响均达极显著水平 ($P<0.01$); 年份、处理对土壤温度的影响分别达到极显著水平 ($P<0.01$)。可见, 保护性耕作显著影响土壤有机质、土壤含水量和温度。

2.3 保护性耕作对玉米生育期的影响

与 CK 相比, 3 种保护性耕作处理均导致玉米生育期延迟, 主要是延迟了出苗时间, 随着生育进程推进, 不同保护性耕作处理玉米生育时期与 CK 差异逐渐缩小 (表 4)。3 年试验结果显示, T1、T2 和 T3 处理玉米出苗期分别延迟 5~7 d、4~6 d 和 2 d, 成熟期分别延迟 3~4 d、2~3 d 和 1~2 d。分析表明, 对于保护性耕作而言, 少耕(秸秆全量条带覆盖, T3) 有利于缩短与 CK 玉米生育时期差异。

表 4 2018—2020 年不同处理玉米各生育时期(月-日)的差异

Table 4 Difference in the date (month-day) of maize growth stages under different treatments from 2018 to 2020

年份 Year	处理 Treatment	播种期 Sowing date	出苗期 Emergence	吐丝期 Silking date	成熟期 Maturity
2018	CK	04-26	05-16	07-20	10-01
	T1	04-26	05-21	07-22	10-04
	T2	04-26	05-20	07-21	10-03
	T3	04-26	05-18	07-20	10-02
2019	CK	05-09	05-26	07-24	10-02
	T1	05-09	05-31	07-28	10-06
	T2	05-09	05-31	07-28	10-05
	T3	05-09	05-28	07-26	10-04
2020	CK	05-07	05-22	07-23	10-02
	T1	05-07	05-29	07-28	10-06
	T2	05-07	05-28	07-26	10-05
	T3	05-07	05-24	07-25	10-04

2.4 保护性耕作对玉米出苗率的影响

如表 5 所示, 2018 年不同处理玉米出苗率差异不显著, 但以 T2 处理玉米出苗率最低且变异系数(CV)最大(14.28%)。2019 年 T3 处理玉米出苗率显著高于其他处理 ($P<0.05$), CV 仅为 3.23%; T1 处理

玉米出苗率最低(78.8%)且 CV 最大(13.86%)。2020 年 T3 处理玉米出苗率最高, 其与 T2 处理差异达显著水平 ($P<0.05$)。不同处理间的 3 年平均出苗率依次为 T3>CK>T1>T2。与 CK 相比, T3 处理出苗率增加 3.2%, T1 和 T2 处理出苗率分别降低 4.3% 和 4.7%。

表 5 2018—2020 年不同处理玉米出苗率差异

Table 5 Difference of maize emergence rates under different treatments from 2018 to 2020

%

处理 Treatment	2018		2019		2020	
	出苗率 Emergence rate	变异系数 Coefficient of variation	出苗率 Emergence rate	变异系数 Coefficient of variation	出苗率 Emergence rate	变异系数 Coefficient of variation
CK	92.0±2.75a	2.99	80.1±5.03b	6.28	92.2±2.84ab	3.08
T1	88.2±6.53a	7.41	78.8±10.92b	13.86	86.4±7.06ab	8.18
T2	85.6±12.22a	14.28	80.8±5.55b	6.86	86.1±3.77b	4.38
T3	87.0±3.81a	4.38	92.3±2.98a	3.23	93.4±2.72a	2.92
变异来源 Source of variation	年份 Year (Y)		*			
	处理 Treatment (T)		*			
	Y×T		ns			

同列不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著, *表示在 $P<0.05$ 水平差异显著, ns 表示差异不显著。Values followed by different lowercase letters in the same column are significantly different among different treatments at $P<0.05$ level. * indicates significance at $P<0.05$ probability level, ns indicates no significance.

2.5 保护性耕作对玉米苗期株高整齐度的影响

3 年试验数据表明, CK 玉米株高整齐度均高于所有保护性耕作处理, 3 年株高整齐度大小顺序均表现为 CK>T3>T2>T1 (图 2)。与 CK 相比, 2018—2020 年 T1、T2 和 T3 处理苗期株高整齐度分别降低 35.7%、30.3% 和 24.6%, 17.1%、13.3% 和 1.0%, 37.1%、28.0% 和 11.4%。T1 和 T2 处理苗期株高整齐度显著降低 ($P<0.05$), 而 T3 处理在 2019 年和 2020 年降低幅度较小, 特别是 2019 年苗期株高整齐度基本与 CK 相同。

2.6 不同保护性耕作方式对玉米单株干物质积累的影响

与 CK 相比, 2018—2020 年不同生育时期, 除了 T3 在 2019 年成熟期和 2020 年 12 叶期单株干物质积累有所增加之外, 其他处理均呈降低趋势, 6 叶期降低幅度最大, T1、T2 和 T3 处理 6 叶期单株干物质积累分别降低 45.6%、32.5% 和 18.4%, 52.1%、67.6% 和 46.9%, 47.6%、36.9% 和 14.6% (表 6)。随着生育进程推进保护性耕作处理与 CK 之间的差异逐渐缩小, 在成熟期, 仅 2018 年 T1 处理与 CK, 2019 年 T1

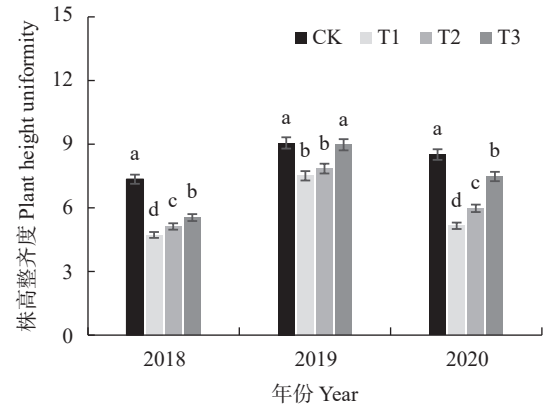


图 2 2018—2020 年不同处理玉米苗期株高整齐度差异
Fig. 2 Difference in uniformity of maize plant height under different treatments from 2018 to 2020

同一年份不同小写字母表示不同处理间在 $P<5\%$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the same year mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ probability level.

和 T2 处理分别与 CK 差异达显著水平, 其他处理与 CK 差异均未达显著水平。总体而言, 与 CK 相比, T1 和 T2 处理单株干物质积累降低幅度较大, T3 处理降低幅度较小。

表 6 2018—2020 年不同处理玉米干物质积累差异

Table 6 Difference in dry matter accumulation of maize under different treatments from 2018 to 2020 $g \cdot plant^{-1}$

年份 Year	处理 Treatment	生育时期 Growth stage				
		6叶期 Sixth leaf collar	12叶期 Twelfth leaf collar	吐丝期 Silking	乳熟期 Milking	成熟期 Maturity
2018	CK	10.44±1.09a	79.12±3.89a	180.14±13.34a	278.84±17.34a	385.32±15.94a
	T1	5.68±1.08c	47.64±4.75c	156.28±12.84b	244.84±26.80b	343.38±19.24b
	T2	7.05±0.89c	51.56±5.96bc	166.86±15.57ab	264.36±24.42ab	363.50±20.58ab
	T3	8.52±1.11b	55.66±4.50b	175.14±12.76ab	277.30±14.71a	376.64±15.38a
2019	CK	16.61±3.00a	103.27±6.73a	205.68±17.11a	306.08±13.11a	404.84±18.96a
	T1	7.96±0.75b	61.44±12.48b	159.96±13.11c	262.31±12.84c	353.35±33.53b
	T2	5.38±0.70c	66.45±9.32b	163.72±20.55c	273.64±19.28bc	364.34±28.69b
	T3	8.82±1.21b	97.72±12.34a	177.00±15.35bc	286.24±15.19ab	405.19±20.80a
2020	CK	6.16±1.21a	71.39±11.42a	207.31±24.81a	319.75±31.44a	412.52±32.50a
	T1	3.23±0.63b	42.96±8.52b	160.48±31.30b	272.17±28.80b	389.89±35.56a
	T2	3.89±0.60b	51.03±5.50b	180.63±29.25ab	289.00±32.98ab	382.13±30.02a
	T3	5.26±1.07a	75.50±7.76a	203.61±9.98a	313.03±23.72ab	390.65±24.42a

同列同一年份不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Values followed by different lowercase letters in the same column of the same year are significantly different at $P<0.05$ level.

2.7 保护性耕作影响玉米产量的直接因素和间接因素

如图 3a 所示, 通过对土壤容重、有机质含量、含水量和温度, 玉米出苗时间差、出苗率、株高整齐度、单株干物质积累, 以及玉米产量及其构成因素 (穗数、穗粒数和百粒数) 指标优化, 建立了耕作 (所有处理) 对玉米产量影响的结构方程模型 (SEM), 该模型整体拟合效果可接受 ($\chi^2/df=1.124$, $P=0.281$, RMSEA=0.078, GFI=0.999), 模型可以解释保护性耕

作对玉米产量影响总变化的 90%。模型结果表明, 土壤含水量 (SWC)、土壤温度 (ST)、出苗时间差 (PPD)、出苗率 (ER)、穗数 (EN)、穗粒数 (KN) 和百粒重 (100-W) 对玉米产量 (Yield) 具有显著的直接或者间接影响 ($P<0.05$), 其中穗数、百粒重、土壤温度和出苗时间差对产量具有极显著的直接影响 ($P\leq 0.01$), 并且穗数、百粒重和土壤温度分别与产量呈正相关 (标准化路径系数为 0.479***、0.537*** 和 0.433***), 出苗时

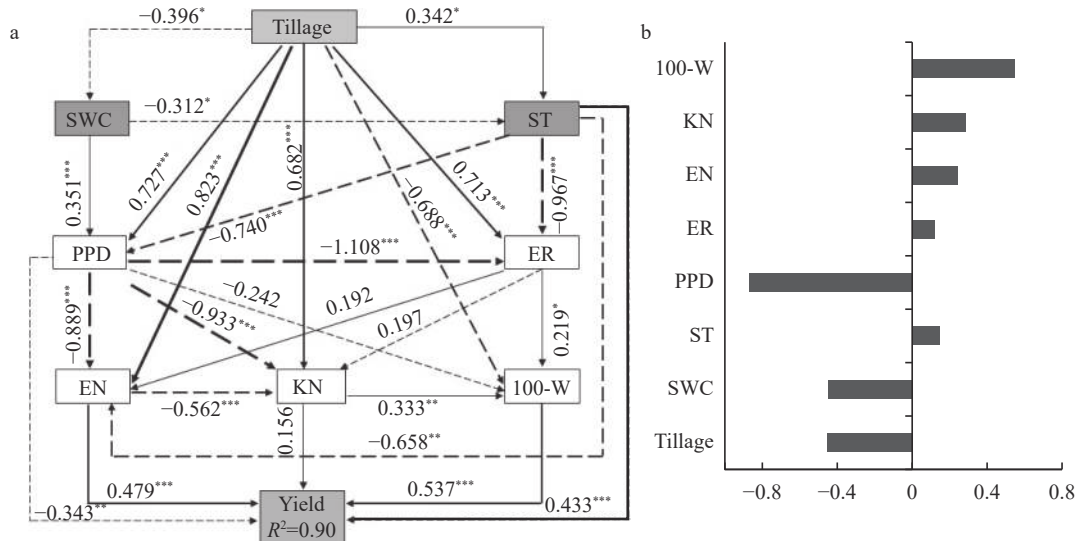


图 3 保护性耕作对玉米产量影响的结构方程模型 (a) 及标准化总效应 (b)

Fig. 3 Structural equation model (a) and standardized total effect (b) of conservation tillage on maize yield

图 a 中实线箭头和虚线箭头分别表示正相关和负相关, 线宽度表示影响关系强度, 与线相邻的数字为标准化路径系数。R² 表示自变量解释的比例。*表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$; ***表示 $P < 0.001$ 。Tillage: 耕作; SWC: 0~20 cm 土壤含水量; ST: 0~20 cm 土壤温度; PPD: 出苗时间差; ER: 出苗率; EN: 穗数; KN: 每穗粒数; 100-W: 百粒重; Yield: 籽粒产量。Solid and dotted arrows in the figure a indicate positive and negative relationships, respectively. Line width indicates the proportion of factorial contribution. Numbers adjacent to lines are the standardized path coefficients. R² indicates the strength of explanation by independent variables. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$. Tillage: tillage treatments; SWC: soil water content in 0–20 cm depth; ST: soil temperature in 0–20 cm depth; PPD: phenological period difference; ER: emergence rate; EN: ear number per hectare; KN: kernal number per ear; 100-W: 100 kernels weight; Yield: grain yield.

间差与产量呈负相关(标准化路径系数为 -0.343^{**}); 间接因素中耕作 (Tillage) 通过显著影响土壤温度和土壤含水量进而影响产量 ($P < 0.05$), 耕作也可以通过显著影响出苗时间差、出苗率、穗数、穗粒数和百粒重, 进而影响产量 ($P < 0.001$)。结构方程标准化后的总效应如图 3b 所示, 耕作、土壤含水量和出苗时间差对产量影响呈负效应, 而土壤温度、出苗率、穗数、穗粒数和百粒重对产量的影响呈正效应。换言之, 保护性耕作虽然提高了土壤含水量, 但是降低了土壤温度, 延迟出苗时间, 降低穗数和百粒重, 进而降低产量。

3 讨论

3.1 保护性耕作对土壤理化特性的影响

土壤容重是衡量土壤物理特性的最重要指标之一, 其影响土壤的孔隙分布、水气协调状况。不同的耕作方式会改变耕层土壤结构, 进而影响土壤容重。大多数学者认为, 免耕后会增加耕层土壤容重^[20-21], 也有学者认为免耕会降低土壤容重^[22], 还有学者认为土壤容重具有自调功能, 免耕后土壤容重变化不大^[23]。在本研究中, 与 CK 相比, 几乎所有保护性耕作处理对土壤容重未产生显著影响, 研究结果更接近“免耕后土壤容重变化不大”这一观点, 这可能与耕作年限

和测定土壤深度有关。有机质含量是评价土壤肥力的核心指标^[24], 是土壤中各种营养元素的重要来源。国内外学者^[22,25] 研究认为, 免耕后有利于土壤表层有机质积累, 提高土壤养分含量。本研究结果与前人研究结果一致, 保护性耕作处理 (T1、T2 和 T3) 均提高了耕层土壤有机质含量, 并且 T1 处理提高幅度最大。保护性耕作提高土壤有机质含量的原因有两个方面: 一是长期免耕或者少耕减少了对土壤的扰动, 而降低了土壤有机碳的矿化率, 从而增加土壤碳固持, 增加土壤有机质含量^[26]; 二是由于有秸秆覆盖于地表, 秸秆腐解后提高表层土壤有机质含量^[20,27]。遗憾的是, 在本研究中 2018 年土壤有机质含量与 2019 年和 2020 年非同一批次测试, 导致 2018 年土壤有机质含量数据总体高于 2019 年和 2020 年, 无法比较相同处理不同年度差异, 但是不影响相同年份不同处理之间比较。

土壤水分和土壤温度是影响玉米发育的重要因素, 不同耕作方式通过改变土壤结构和表面状况, 调节土壤水分和温度变化^[28]。学者们普遍认为, 保护性耕作措施更有利于保水、保墒^[29,14], 特别是在干旱区域效果尤为明显^[15], 其原因是秸秆覆盖降低了土壤水分蒸发, 免耕改善了土体孔隙状况, 促进了水分的保持与传输, 提高了土壤储水量和表层入渗率^[30]。保护

性耕作对土壤温度影响方面,大部分学者认为保护性耕作会降低土壤温度^[11,20,31];也有部分学者研究认为保护性耕作具有“增温”和“降温”双重效应,“增温效应”主要发生在冬季或者冷凉季节,而“降温效应”发生在夏季或者炎热季节^[32-33]。本研究结果显示,3种保护性耕作处理均提高了播种至出苗耕层土壤含水量,但降低了土壤温度,与前人研究结果“保护性耕作提高土壤含水量,降低土壤温度”观点一致。但与CK、T1和T2处理相比,T3处理能够较好地平衡土壤水分和温度的矛盾。

3.2 保护性耕作对玉米出苗质量及生长发育的影响

在保护性耕作条件下提高玉米出苗质量是高产、稳产的基础,学者们通常采用出苗率、株高、叶面积和干物质积累等指标评价出苗质量及苗期长势^[12,34-36]。张昊等^[35]在辽宁省昌图县研究表明,免耕(整秸秆覆盖)玉米出苗率显著高于传统垄作,出苗期延迟,6叶期之前生长发育有所滞后,植株长势较弱;6叶期之后玉米株高和叶面积均明显高于传统垄作,随着生育进程推进其优势越来越明显,产量增加22%以上。董智^[4]在吉林省梨树县研究显示,免耕秸秆覆盖降低了玉米株高、干物质积累、叶面积指数和产量,随着秸秆覆盖量的增加而增大,免耕全量秸秆覆盖减产幅度最大,两年平均减产1117 kg·hm⁻²。本研究中,所有保护性耕作处理均延迟了玉米出苗时间,导致整个生育期延迟,但T3处理玉米生育期更接近CK。该结论与前人研究结论基本一致,但出苗延迟后期效应不同,这可能与秸秆覆盖方式、试验区域和土壤类型等有关。本研究结果还表明,与CK相比,虽然T3苗期株高整齐度有所降低,但出苗率有所增加,与T1和T2处理相比,T3处理苗期株高整齐度和出苗率均有所提高,说明T3处理通过清理秸秆为条带状后提高了播种和出苗质量,为高产、稳产奠定基础。此外,T1、T2和T3处理在6叶期显著降低了单株干物质积累,在6叶期之后差异逐渐缩小,这一结果与前人研究结果类似,虽然T1、T2和T3玉米在生长发育后期并没有优于CK,但是在玉米成熟期,T3与CK之间差异不显著,进一步说明保护性耕作对玉米苗期生长发育影响更大,与T1和T2相比,T3更有利于促进玉米苗期生长和后期干物质积累。

3.3 不同保护性耕作方式对玉米产量的影响及关键因素

不同耕作方式可以通过改变土壤理化特性、水热状况等,进而对玉米生长发育和产量产生影响^[37]。在干旱气候区,免耕、少耕等保护性耕作能够提高

玉米产量主要归因于免耕、少耕提高了土壤含水量和蓄水性能^[7]。在冷凉气候区,免耕秸秆覆盖降低了土壤温度,影响玉米早期生长发育,进而降低产量^[29,36],在东北中东部和北部冷凉区会影响更大^[38],因为土壤温度会驱动作物生长发育的25%以上^[39]。在本研究中,T1和T2处理延迟玉米出苗时间主要原因是秸秆覆盖降低了土壤温度,导致玉米出苗时间和整个生育期延迟,穗数和百粒重降低,进而减产;此外,T1和T2处理除降低土壤温度外,秸秆全量覆盖会影响播种质量,从而导致出苗率和株高整齐度降低,而T3处理相对于T1和T2处理不仅可提高土壤温度,同时提高了播种质量,出苗率和株高整齐度提高,为高产、稳产奠定了良好基础。

虽然已有研究认为,传统翻耕较免耕增产主要归因于穗数增加^[40],但前人并未揭示在保护性耕作条件下影响玉米产量的潜在机制。本研究SEM模型揭示,在保护性耕作条件下穗数和百粒重是决定产量的直接因子,间接因子中保护性耕作通过影响土壤含水量和温度、出苗质量、穗数和百粒重进而影响产量;保护性耕作也可通过直接影响出苗质量和产量构成进而影响产量。此外,虽然保护性耕作可提高耕层土壤有机质含量,但SEM结构方程模型显示其对玉米产量未产生显著影响,这可能与影响玉米产量的因素复杂有关。此外,不同处理在年际间玉米产量高低顺序并不完全一致。总体而言,T3处理与CK产量差异不显著,且比T1和T2处理产量更高、稳产性更好,而T1和T2处理在年际间略有差异。可见,保护性耕作影响玉米产量原因较为复杂,在不同的生态区和年际间效应也不同,其生理生态机制有待于深入研究。

3.4 适宜于东北典型黑土区的保护性耕作方式

当今,在农业高质量发展背景下,保护性耕作研究成为了农业研究领域的焦点。但不同学者对保护性耕作的概念理解有所不同。根据国内外保护性耕作的定义及内涵,保护性耕作的核心是采用少耕、免耕,以及秸秆覆盖^[41-42]。免耕是在收获后至播种前无任何扰动土壤的耕作方式;而少耕是指与常规耕作相比,耕作次数和幅度等有所减少,能够起到降低风蚀和水蚀作用的耕作方式。在保护性耕作概念当中秸秆覆盖的内涵也比较丰富,其包括覆盖率、覆盖方式和秸秆类型等,秸秆覆盖率达到30%以上即符合保护性耕作标准。按照农业农村部《2022年东北黑土地保护性耕作行动计划技术指引》对保护性耕作的标准和要求,采用少耕或者免耕,具有一定的

秸秆或者根茬覆盖即可认为是保护性耕作。文件中对免耕和少耕有明确规定,其中少耕是指在播种前和播种中动土面积低于 50%,耕作深度不超过 10 cm,该文件中没有明确要求秸秆覆盖率超过 30%,可见该标准的保护性耕作范围更广。在本研究中,虽然 T3 处理采用了秸秆全量覆盖还田和免耕播种措施,但在秸秆归行作业过程中秸秆归行机对表土有破坏过程。并且,该处理对土壤有机质增加幅度也远低于 T1 和 T2 处理,因此在本研究中定义 T3 处理为少耕。

在东北地区推广保护性耕作时,因地制宜采用适宜的保护性耕作方式至关重要。前人研究表明,保护性耕作在干旱气候条件下增产效果更好^[7],东北地区气候条件和土壤类型差异较大,自西向东气候类型由西部半干旱、中部半湿润和东部冷凉湿润区转变。因此,分区施策、科学规划合理的区域耕作制度对保护黑土和发展可持续农业势在必行。此外,在同一地区不同秸秆覆盖量对产量影响较大^[14],免耕秸秆全量覆盖降低玉米产量 10% 以上,而免耕秸秆还田 70% 玉米产量与常规耕作差异不显著^[30]。本研究中,在相同秸秆还田量下,不同免耕、少耕效果也显著不同,少耕秸秆全量条带覆盖 (T3) 在本研究区域具有较好的适宜性。

4 结论

免耕秸秆全量粉碎覆盖 (T1) 和免耕留高茬全量秸秆覆盖 (T2) 显著降低玉米产量,少耕秸秆全量条带覆盖 (T3) 与 CK 产量差异不显著。在保护性耕作条件下影响玉米产量的原因较复杂,但穗数和百粒重是影响玉米产量的直接因子,保护性耕作通过调节土壤含水量和温度,间接影响出苗时间、出苗率、穗数和百粒重,进而影响产量,也可通过直接影响出苗质量和产量构成因素进而影响产量。总之,在东北典型黑土区,采取少耕秸秆全量条带覆盖 (T3) 有利于调节土壤水分和温度平衡,提高土壤质量及玉米出苗质量,有利于玉米高产稳产,是该区域适宜的保护性耕作方式。

参考文献 References

- [1] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358
HAN X Z, ZOU W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1341-1358
- [2] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193

- LI B G, LIU Z, HUANG F, et al. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(10): 1184-1193
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2022
- [4] YANG X M, ZHANG X P, DENG W, et al. Black soil degradation by rainfall erosion in Jilin, China[J]. Land Degradation & Development, 2003, 14(4): 409-420
- [5] LIU X B, ZHANG X Y, WANG Y X, et al. Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China[J]. Plant, Soil and Environment, 2010, 56(2): 87-97
- [6] 马守义, 景尚友. 美国农业保护性耕作技术的启示[J]. 黑龙江农业科学, 2016(12): 138-140
MA S Y, JING S Y. Enlightenment agriculture conservation tillage of America[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(12): 138-140
- [7] WANG X B, CAI D X, HOOGMOED W B, et al. Developments in conservation tillage in rainfed regions of North China[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 239-250
- [8] LI R, HOU X Q, JIA Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 101-109
- [9] SIHU A S, SEKHON N K, THIND S S, et al. Soil temperature, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) as affected by wheat straw mulch[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2007, 53(1): 95-102
- [10] 郭小春, 马向峰, 杨晓军, 等. 不同耕作方式对西北地区春玉米土壤物理性状及产量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(3): 127-134
WU X C, MA X F, YANG X J, et al. Effects of different tillage methods on soil physical properties and yield of spring maize in Northwest China[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(3): 127-134
- [11] ZHANG S X, CHEN X W, JIA S X, et al. The potential mechanism of long-term conservation tillage effects on maize yield in the black soil of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 84-90
- [12] 冯艳春, 罗洋, 李瑞平, 等. 耕作方式对玉米出苗率、干物质积累及产量的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 85-90
FENG Y C, LUO Y, LI R P, et al. Effect of different tillage systems on the seeding emergence rate, dry matter accumulation and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(5): 85-90
- [13] DRURY C F, TAN C S, WELACKY T W, et al. Red clover and tillage influence on soil temperature, water content, and corn emergence[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(1): 101-108
- [14] 董智. 秸秆覆盖免耕对土壤有机质转化积累及玉米生长的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013
DONG Z. Accumulation of soil organic matter and maize growing process by different stover mulching quantity in no-tillage system[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,

- 2013
- [15] TURMEL M S, SPERATTI A, BAUDRON F, et al. Crop residue management and soil health: a systems analysis[J]. *Agricultural Systems*, 2015, 134: 6–16
- [16] 谢瑞芝, 李少昆, 李小君, 等. 中国保护性耕作研究分析—保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1914–1924
XIE R Z, LI S K, LI X J, et al. The analysis of conservation tillage in China — Conservation tillage and crop production: reviewing the evidence[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1914–1924
- [17] 谢瑞芝, 李少昆, 金亚征, 等. 中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(2): 397–404
XIE R Z, LI S K, JIN Y Z, et al. The trends of crop yield responses to conservation tillage in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(2): 397–404
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
LU R K. *Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [19] 李少昆, 王振华, 高增贵. 北方春玉米田间种植手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011
LI S K, WANG Z H, GAO Z G. *Handbook of Field Planting of Spring Maize in Northern China*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011
- [20] 董智, 解宏图, 张立军, 等. 东北玉米带秸秆覆盖免耕对土壤性状的影响[J]. *玉米科学*, 2013, 21(5): 100–103, 108
DONG Z, XIE H T, ZHANG L J, et al. Effects of no-tillage practice with corn stalk mulching on soil properties in the northeast of China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(5): 100–103, 108
- [21] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1370–1380
WANG Y K, GUO Z C, ZHANG Z B, et al. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in Shajiang black soil (vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1370–1380
- [22] KUMAR S, KADONO A, LAL R, et al. Long-term no-till impacts on organic carbon and properties of two contrasting soils and corn yields in Ohio[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1798–1809
- [23] 李洪文, 陈君达, 高焕文. 旱地农业三种耕作措施的对比研究[J]. *干旱地区农业研究*, 1997, 15(1): 7–11
LI H W, CHEN J D, GAO H W. A comparison of three tillage methods in dryland farming[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1997, 15(1): 7–11
- [24] ADETUNJI A T, NCUBE B, MULIDZI R, et al. Management impact and benefit of cover crops on soil quality: a review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104717
- [25] 张兴义, 陈强, 陈渊, 等. 东北北部冷凉区免耕土壤的特性及作物效应[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2271–2277
ZHANG X Y, CHEN Q, CHEN Y, et al. Influences of no-tillage on soil and crop performance in the north cool region of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2271–2277
- [26] USSIRI D A N, LAL R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 39–47
- [27] 邱琛, 韩晓增, 陆欣春, 等. 东北黑土区玉米秸秆还田对土壤肥力及作物产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(3): 277–286
QIU C, HAN X Z, LU X C, et al. Effects of maize straw incorporation on soil fertility and crop production in the black soil region of northeast China[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(3): 277–286
- [28] 宋振伟, 郭金瑞, 邓艾兴, 等. 耕作方式对东北春玉米农田土壤水热特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 108–114
SONG Z W, GUO J R, DENG A X, et al. Effects of surface tillage regimes on soil moisture and temperature of spring corn farmland in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 108–114
- [29] CHEN Y, LIU S, LI H, et al. Effects of conservation tillage on corn and soybean yield in the humid continental climate region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 56–61
- [30] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 258–266
YANG Y H, WU J C, ZHANG J M, et al. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 258–266
- [31] LI R P, ZHENG J Y, XIE R Z, et al. Potential mechanisms of maize yield reduction under short-term no-tillage combined with residue coverage in the semi-humid region of Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: 105289
- [32] 陈素英, 张喜英, 刘孟雨. 玉米秸秆覆盖麦田下的土壤温度和土壤水分动态规律[J]. *中国农业气象*, 2002, 23(4): 34–37
CHEN S Y, ZHANG X Y, LIU M Y. Soil temperature and soil water dynamics in wheat field mulched with maize straw[J]. *Agricultural Meteorology*, 2002, 23(4): 34–37
- [33] YAN Q Y, DONG F, LOU G, et al. Alternate row mulching optimizes soil temperature and water conditions and improves wheat yield in dryland farming[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(11): 2558–2569
- [34] 丛聪. 耕作方式及有机物还田对黑土坡耕地土壤物理性质和玉米生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 34–39
CONG C. Effect of tillage practices and organic material application on soil physical properties and maize growth in sloping farmland of Mollisol[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 34–39
- [35] 张昊, 于海秋, 依兵, 等. 整秸秆覆盖免耕对土壤水热状况和玉米生长发育的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2011, 42(1): 90–93
ZHANG H, YU H Q, YI B, et al. Effect of whole straw-mulching no-tillage on soil water content and temperature and growth of maize[J]. *Journal of Shenyang Agricultural*

- University, 2011, 42(1): 90–93
- [36] 谷思玉, 朱玉伟, 郭兴军, 等. 不同耕作方式下黑土物理性状及其对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 2018, 33(4): 226–231
GU S Y, ZHU Y W, GUO X J, et al. Effects of different tillage ways on seedling growth of maize and soil physical properties in Mollisol region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(4): 226–231
- [37] 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
- [38] 蒋发辉, 钱泳其, 郭自春, 等. 基于Meta分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性: 以作物产量为例[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 935–952
JIANG F H, QIAN Y Q, GUO Z C, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of Northeast China: a meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4): 935–952
- [39] STONE P J, SORENSEN I B, JAMIESON P D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperate climate[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(2): 169–178
- [40] 王玉珑, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区小麦秸秆还田与耕作措施对玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(10): 2671–2679
WANG Y L, YU A Z, LYU H Q, et al. Effects of wheat straw returning and tillage practices on corn yield in oasis irrigation area[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(10): 2671–2679
- [41] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2702–2708
GAO W S. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2702–2708
- [42] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Conservation Agriculture: Three Principles of Conservation Agriculture[EB/OL]. [2022-05-15]. <http://www.fao.org/ag/ca/>