

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.12.037

保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应与玉米产量的影响

齐智娟^{1,2} 宋芳^{1,2} 张忠学^{1,2} 刘明^{1,2} 尹致皓^{1,2} 李鹭^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明保护性耕作对东北寒地黑土土壤水热状况和玉米产量的影响,基于秸秆全量还田和免耕播种为核心的黑土地保护性耕作方式,设置宽窄行秸秆全覆盖还田(FM)、均匀行秸秆全覆盖还田(LM)、秸秆旋耕全量还田(LX)和常规垄作秸秆离田(LN)4种模式,探究保护性耕作对寒地黑土土壤水热效应、玉米干物质量、产量构成及水氮利用效率的影响。结果表明:在玉米生育期内,保护性耕作能够显著提高土壤含水率,调节土壤温度,针对不同的气温变化,进行“增降温”。保护性耕作处理较LN处理0~60 cm土层平均土壤体积含水率增加27.28%~63.86%,气温最高时使平均土壤温度降低3.20%~7.63%,成熟期气温低时使平均土壤温度增加2.32%~5.37%。保护性耕作显著提高了水分利用效率(WUE)以及作物对氮素的吸收与利用,其中WUE较LN处理提高7.26%~12.90%,同时氮素吸收效率、氮素收获指数分别提高14.29%~42.86%、4.00%~12.00%。保护性耕作能够提高玉米产量,促进玉米干物质积累,玉米产量、干物质量分别较LN处理提高37.7~431.0 kg/hm²和2322.3~5451.7 kg/hm²,LM处理产量变异系数最小,产量最稳定。

关键词: 寒地黑土区; 保护性耕作; 土壤水热; 玉米产量; 水氮利用

中图分类号: S513 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0380-10 **OSID:** 

Effects of Different Conservation Tillage Methods on Soil Hydrothermal Condition as well as Maize Yield in Cold Black Soil Region

QI Zhijuan^{1,2} SONG Fang^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} LIU Ming^{1,2} YIN Zhihao^{1,2} LI Ao^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to determine the effect of conservation tillage practices on soil hydrothermal condition and maize yield in cold black soil region of Northeast China, four treatments (FM: wide-narrow row planting patterns with straw mulching; LM: well-distributed row planting patterns with straw mulching; LX: rotary tillage with straw returning; LN: conventional ridge cultivation) were designed based on the conservation tillage method with straw returning. The effect of different treatments on soil hydrothermal effects, dry matter mass, maize yield and water and nitrogen utilization in cold black soil region was investigated. The results showed that during the maize growth period, conservation tillage can significantly increase soil water content, adjust soil temperature, and “increase and cool down” according to different air temperature changes. The average soil water content of the 0~60 cm soil layer in the LM treatment was increased by 27.28%~63.86% than that of LN treatment. The average soil temperature was decreased by 3.20%~7.63% when air temperature was the highest, and increased by 2.32%~5.37% when the air temperature decreased at the mature stage. Conservation tillage practices significantly improved WUE and nitrogen uptake and utilization of maize during the growth period. Compared with LN treatment, LM treatment increased WUE by 7.26%~12.90%, while NUE and NHI were increased by 14.29%~42.86% and 4.00%~12.00%, respectively. Conservation tillage practices could effectively improve maize yield and promote the accumulation of dry matter. Compared

收稿日期: 2022-01-28 修回日期: 2022-03-09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1500802-6)和国家自然科学基金项目(51809042)
作者简介: 齐智娟(1987—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhijuanqi@neau.edu.cn
通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

with LN treatment, LM treatment increased maize yield and dry matter mass by 37.7 ~ 431.0 kg/hm² and 2 322.3 ~ 5 451.7 kg/hm², respectively. The LM treatment had the smallest yield variation coefficient and was the most suitable conservation tillage practice with stable yield in cold black soil region.

Key words: cold black soil region; conservation tillage; soil hydrothermal condition; maize yield; water and nitrogen utilization

0 引言

玉米是我国第一大作物,是确保国家粮食安全的重要支撑^[1]。东北地区是我国玉米主产区之一,该地区具有降水量集中,春季干旱多风,蒸发强烈,气温变化幅度大的气候特点,极易造成作物减产^[2]。因此探索适宜寒地黑土区玉米生长的良好水热环境,确保粮食稳产、增产是一项重要的研究课题。随着黑土地保护的重要性日益凸显,保护性耕作成为一种主要的耕作方式。研究东北寒地黑土区保护性耕作对土壤水热效应及玉米产量的影响,对于科学制定寒地黑土区玉米田稳产、增效的资源管理策略具有重要意义,也可为农业农村部提出的“东北黑土地保护性耕作计划(2020—2025)”战略目标的实现发挥重要技术支撑作用。

耕作方式主要通过对土壤不同形式和程度的扰动改变其内部通透性、土壤水分以及土壤温度等因素进而影响作物生产及产量^[3]。有研究表明,与传统耕作相比,免耕减少了农机作业次数,同时将作物残茬留在土壤表面让其自然分解,既能减少土壤侵蚀、提高土壤保水贮水能力、增加土壤有机质,又能改善土壤结构和通气性、有益于土壤微生物和动物活动,是实现黑土地保护与利用的重要技术手段^[4-5]。东北黑土区属于高纬度寒区,春季播种时地温低,易产生低温冷害^[6-8]。作物的秸秆和根在土中腐烂分解后,不但能形成矿化养分供给作物吸收利用,而且形成的腐殖质能够维持土壤的团粒结构,使土壤水气协调,进而改善土壤水热条件,降低土壤水分的无效蒸发和热量散失,利于作物根区形成的良好的水热环境,提高光合产物积累^[9],有研究表明,秸秆覆盖可以增加耕层土壤含水率 9.56% ~ 11.73%,全生育期平均降低土壤温度 1.75℃^[10]。免耕秸秆还田作为秸秆资源化利用最为有效的方法,是土壤培肥地力的主要途径^[11-13]。已有的研究表明,地表覆盖的秸秆分解速率低于翻入土壤中的秸秆,秸秆旋耕入土壤中可增大与土壤中微生物的接触,利于加速有机质的分解^[14]。长期秸秆还田可以增加土壤碳含量,减少肥料氮的投入^[15]。相同水肥条件下,秸秆还田处理的水肥利用率显著高于无秸秆还田处理,可以有效提高玉米各个时期的干物

质积累量^[16],已有研究表明秸秆还田能够增加玉米产量 1% ~ 8%,提高水分利用效率(WUE)8% ~ 11%^[17],增加干物质积累 11.3%,并且能够提高 11.2% 干物质积累速率^[18]。由此可见,目前关于黑土区保护性耕作的研究,多集中在不同秸秆还田方式对土壤理化性质及氮素吸收利用的影响上,关于不同耕作措施和秸秆还田方式对黑土玉米田土壤水热状况的影响鲜有报道。

本文结合东北黑土区农业耕作措施发展特点,通过设置不同保护性耕作模式研究玉米不同生育期不同深度土层土壤水热变化情况,分析秸秆还田方式对土壤水热变化的影响,明确不同保护性耕作措施的水热效应和玉米产量性状差异,为改善寒地黑土农田土壤水热条件、提高作物产量、保障作物健康生长提供技术方法和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4—10 月在黑龙江省水利科技试验研究中心(45°43'N,126°36'E)进行,平均海拔为 137 m。该试验地属中温带大陆性季风气候,四季分明,降水量集中,易发生春旱。试验站多年平均气温 -4 ~ 5℃,无霜期 130 ~ 140 d,年均降水量 400 ~ 650 mm,7—9 月降雨量占年降水量的 70%,多年平均蒸发量 796 mm。试验区位于东北典型黑土带,0 ~ 80 cm 土层土壤均为粉壤土。试验区 0 ~ 40 cm 土层土壤基础肥力如表 1 所示,试验区初始土壤温度及含水率如表 2 所示。0 ~ 100 cm 土层内平均田间持水率(占干土质量)为 28.57%^[19],0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 土层土壤容重分别为 1.20、1.25、1.25、1.32、1.28、1.27 g/cm³。

表 1 试验区 0 ~ 40 cm 土层土壤基础肥力
Tab.1 Basic fertility of 0 ~ 40 cm soil of experimental area

土层	速效氮	速效磷	速效钾	有机质	pH 值
深度/ cm	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (mg·kg ⁻¹)	质量比/ (g·kg ⁻¹)	
0 ~ 20	154.4	40.1	376.8	25.07	7.27
20 ~ 40	150.1	36.8	356.3	22.37	7.25

表 2 试验区初始土壤温度及体积含水率

Tab.2 Initial soil temperature and volumetric moisture content in experimental area

处理	10 cm		30 cm		60 cm	
	温度/	含水率/	温度/	含水率/	温度/	含水率/
	℃	%	℃	%	℃	%
FM	11.11	27.45	10.10	29.42	8.93	24.23
LM	11.39	25.46	9.58	31.40	7.83	31.29
LX	12.81	25.28	12.13	29.20	11.30	31.07
LN	13.21	29.38	12.95	28.77	11.93	29.29

1.2 试验设计

试验基于玉米秸秆全量还田和免耕播种为核心的黑土地保护性耕作方式,选择宽窄行秸秆全覆盖还田(FM)、均匀行秸秆全覆盖还田(LM)和秸秆旋耕全量还田(LX)3种模式,常规垄作秸秆离田(LN)为对照,试验处理设计示意图如图1(图中单位为cm)所示。宽窄行秸秆全覆盖还田模式采取宽行、窄行隔年交替种植,玉米秸秆直接覆盖还田,利用秸秆归行机对播种带的玉米秸秆进行整理归行,实现“边际休耕”。均匀行秸秆全覆盖还田模式为原垄作种植,秸秆直接集中覆盖垄沟的方式。秸秆旋耕全量还田模式在玉米收获时,将秸秆粉碎覆盖于地表,通过旋耕作业将粉碎后的玉米秸秆旋入表层土壤。

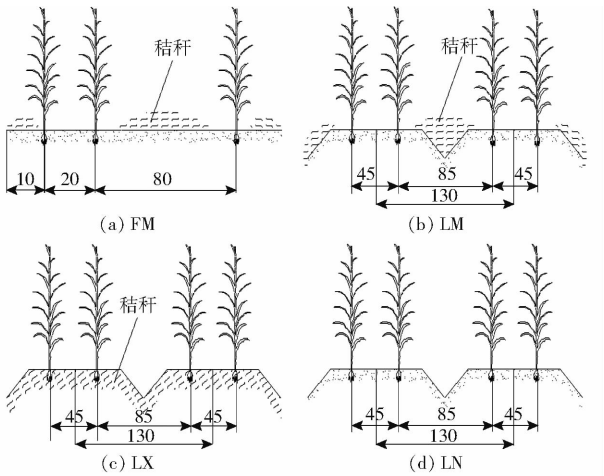


图 1 试验处理设计示意图

Fig.1 Schematics of experimental treatment design

各处理参考文献[20-22]设定,结合当地玉米种植经验,施用氮肥 250 kg/hm² (尿素,含 N 质量分数 46%),按照基肥 40%,拔节期 30%,灌浆期 30% 进行施用,P₂O₅ 和 K₂O 作为基肥施入,施用量均为 90 kg/hm²。采用全面试验设计方法,共计 4 个处理,每个处理 3 次重复,共计 12 个试验小区,随机排列,每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m)。供试玉米品种为“大龙 568”,种植密度为 67 500 株/hm²,株距 23 cm。试验区无灌溉,玉米生育期内日气温

与降雨量变化如图 2 所示。

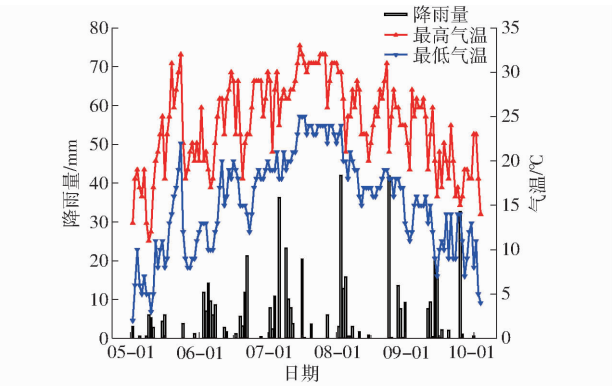


图 2 玉米生育期内气温和降雨量的日变化

Fig.2 Changes of daily air temperature and rainfall during maize growth period

1.3 测定指标与方法

含水率和温度测定:埋设 ET100 型土壤水热自动监测系统,实时监测田间土壤体积含水率和温度变化。监测时期从播种前开始到收获后结束,每 1 h 测定 1 次,数据采集仪自动记录。测定深度为 0 ~ 100 cm 土层,每 10 cm 一组数据。

产量及其构成测定:收获期取各小区中间 2 行进行测产,记录穗数,并随机选择 20 个果穗记录每穗行数和每行粒数,风干玉米穗部至质量恒定,进行脱粒、称量,并折算成籽粒含水率为 14% 的玉米籽粒产量。

耗水量计算:试验采用水量平衡法对玉米生育期耗水量(ET)进行计算,公式为

$$ET = \Delta W + P + I + G + R + F \quad (1)$$

式中 ΔW ——播种和成熟期间土壤储水量差值, mm

- P ——玉米生育期内有效降雨量, mm
- I ——生育期灌水量, mm
- G ——地下水补给量, mm
- R ——生育期地表径流量, mm
- F ——生育期根区深层渗漏量, mm

其中当降雨量大于当日参考蒸发蒸腾量的 0.2 倍时^[23],即为有效降水。试验区地下水埋深较大,超过 5 m,因此地下水补给量忽略不计^[24],且试验区地势平坦,无地表径流产生。根据 FAO56 分册^[23],可假定降雨或灌溉先补给根系层土壤水分至田间持水率,多余的水分即为深层渗漏损失量。

玉米水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (2)$$

式中 Y ——单位面积玉米产量, kg/hm²

玉米氮素利用效率计算:测定地上部干物质量和植株氮含量,成熟期则分营养器官和籽粒两部分

测定氮含量。相关参数计算公式分别为

$$NPE = \frac{Y}{N}$$
 (3)

式中 NPE ——氮肥生产效率,kg/kg
 N ——施氮量,kg/hm²

$$NUE = \frac{N_p}{N}$$
 (4)

式中 NUE ——氮素吸收效率,kg/kg
 N_p ——植株氮素积累量,kg/hm²

$$NHI = \frac{N_g}{N}$$
 (5)

式中 NHI ——氮素收获指数,kg/kg
 N_g ——籽粒氮素积累量,kg/hm²

$$NAE = \frac{Y_N - Y_0}{N}$$
 (6)

式中 NAE ——氮肥农学利用率,kg/kg
 Y_N ——施氮区籽粒产量,kg/hm²
 Y_0 ——不施氮区籽粒产量,kg/hm²

$$NAR = \frac{N_{PN} - N_{P0}}{N} \times 100\%$$
 (7)

式中 NAR ——氮素表观回收率,%
 N_{PN} ——施氮区植株氮素积累量,kg/hm²
 N_{P0} ——不施氮区植株氮素积累量,kg/hm²

1.4 数据分析

采用 OriginPro 2019 绘制图形;使用 SPSS 22.0 进行统计分析;图表中不同指标间差异采用单因素

方差分析,运用最小显著差异法 (Least significant difference, LSD) 进行多重比较 ($\alpha = 0.05$);产量构成要素之间的关系采用 Pearson 相关分析法进行分析。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作对土壤含水率的影响

不同保护性耕作方式下不同生育期土壤体积含水率变化如表 3 所示。随着玉米生育期的推进,土壤体积含水率有下降的趋势,FM 处理、LM 处理、LX 处理、LN 处理成熟期平均土壤体积含水率较苗期分别降低 12.19%、5.10%、10.32%、14.63%,全生育期 0~60 cm 土层土壤平均体积含水率由大到小依次为 LM 处理、LX 处理、FM 处理、LN 处理。LM 处理、LX 处理、FM 处理分别比 LN 处理高 63.86%、59.39%、27.28%,3 种保护性耕作处理中 LM 处理比 LX 处理、FM 处理高 2.80%、28.74%,LX 处理较 FM 处理高 25.23%。LM 处理、LX 处理以及 LN 处理各生育期不同土层土壤体积含水率均随土层的加深逐渐增加,LM 处理、LX 处理 30 cm 土层较 10 cm 土层土壤体积含水率增加 23.69%~116.79%、60 cm 土层较 30 cm 土层增加 0.46%~8.88%;相应土层 LN 处理增加 2.23%~35.99% 和 9.35%~32.7%。FM 处理各生育期下 30 cm 土层土壤体积含水率最高,较 10、60 cm 土层高 20.00%~40.74%。

表 3 不同保护性耕作方式下不同生育期土壤体积含水率

Tab.3 Soil water content of different growing stages in different treatments												%
处理	苗期			拔节期			抽灌期			成熟期		
	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm
FM	20. 80 ^a	25. 14 ^c	18. 58 ^c	20. 03 ^a	25. 53 ^b	18. 14 ^c	18. 28 ^a	23. 10 ^b	19. 25 ^b	17. 47 ^a	23. 04 ^b	17. 00 ^c
LM	21. 52 ^a	30. 04 ^a	30. 32 ^a	18. 12 ^b	29. 91 ^a	31. 02 ^a	18. 05 ^a	29. 42 ^a	30. 83 ^a	17. 21 ^{ab}	30. 28 ^a	30. 42 ^a
LX	22. 50 ^a	27. 83 ^b	30. 30 ^a	19. 15 ^a	29. 06 ^a	29. 90 ^b	16. 66 ^{ab}	29. 23 ^a	30. 78 ^a	13. 58 ^{bc}	29. 44 ^a	30. 07 ^a
LN	16. 21 ^b	16. 74 ^d	20. 10 ^b	14. 36 ^c	14. 76 ^c	16. 57 ^d	14. 36 ^b	14. 68 ^c	19. 48 ^b	12. 03 ^c	16. 36 ^c	17. 89 ^b

注: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。

2.2 保护性耕作对土壤温度的影响

不同保护性耕作方式下不同生育期土壤温度变化如表 4 所示。玉米苗期较其他生育期各个土层的温度偏低,苗期 LX 处理和 LN 处理下的平均土壤温度比 FM 处理、LM 处理高 3.40%~10.53%。在玉米拔节期,随气温的上升,土壤温度呈上升趋势。在玉米抽雄期和灌浆期(抽灌期)气温达到了整个生育期的峰值,此时 10 cm 土层 LN 处理土壤温度最高,较保护性耕作高 3.01%~7.05%,0~60 cm 土层平均土壤温度 LN 处理较 FM 处理、LM 处理、LX 处理分别高 6.88%、7.63%、3.20%。LM 处理比

LX 处理降低 4.31%,FM 处理比 LX 处理降低 3.59%,FM 处理与 LM 处理温度相差较小。玉米成熟期气温下降,土壤温度也相应降低,0~60 cm 土层平均土壤温度由大到小依次为 LM 处理、FM 处理、LX 处理、LN 处理,FM 处理、LM 处理、LX 处理较 LN 处理土壤温度分别高 3.18%、5.37%、2.32%,保护性耕作处理中 LM 处理较 FM 处理、LX 处理温度增加了 2.12%、2.96%,而 FM 处理与 LX 处理温度相差较小。成熟期同一处理不同深度土层的土壤温度差在 0.22%~3.91%之间,变化较小。除抽灌期 LX 处理 60 cm 土层、成熟期 LX 处理和

表 4 不同保护性耕作方式下不同生育期土壤温度

Tab.4 Soil temperature of different growing stages in different treatments

处理	苗期			拔节期			抽灌期			成熟期		
	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm	10 cm	30 cm	60 cm
FM	17.89 ^c	16.17 ^d	14.08 ^c	23.83 ^b	21.46 ^c	18.82 ^c	24.56 ^b	23.40 ^b	21.38 ^b	18.92 ^a	18.18 ^b	18.02 ^b
LM	18.81 ^b	17.36 ^b	13.10 ^d	24.45 ^a	22.08 ^b	19.28 ^b	24.27 ^b	23.09 ^b	21.50 ^b	18.93 ^a	18.75 ^a	18.61 ^a
LX	19.45 ^a	17.94 ^a	15.82 ^a	24.87 ^a	22.56 ^a	20.02 ^a	25.22 ^a	23.08 ^b	23.51 ^a	18.06 ^b	18.32 ^b	18.28 ^b
LN	19.23 ^a	17.18 ^c	14.48 ^b	23.60 ^c	21.52 ^c	18.85 ^c	25.98 ^a	24.45 ^a	23.66 ^a	17.49 ^c	18.05 ^c	17.88 ^c

LN 处理 30 cm 土层,其余处理各个土层土壤温度均随土层深度的增加而降低。

2.3 保护性耕作对耕层土壤水热动态变化的影响

如图 3 所示,保护性耕作处理耕层土壤体积含水率均高于 LN 处理,LM 处理耕层土壤体积含水率始终最高,各处理水热动态变化趋势基本相同。当发生降雨时,土壤含水率达到该段时期内的峰值。各处理耕层的土壤温度呈先增后减的变化趋势,7 月中下旬达到峰值,此时 LX 与 LN 处理温度高于 FM 处理和 LM 处理,各处理间耕层土壤温度变化相差较小。玉米全生育期内,玉米苗期、拔节

期前期和成熟期 LM 处理和 FM 处理温度较高,拔节期后期和抽灌期 LX 处理与 LN 处理温度较高。图 3 中耕层土壤温度随时间的变化规律与含水率的变化趋势相反,当土壤含水率升高时,土壤温度有所降低。

2.4 保护性耕作对玉米产量及其构成的影响

不同保护性耕作方式下玉米产量及其构成如表 5 所示。不同保护性耕作处理的穗行数、穗粒数均大于 LN 处理,分别较 LN 处理高 7.53%、3.74% ~ 9.35%。穗粒数由大到小依次为 LM 处理、LX 处理、FM 处理,LM 处理较 LX 处理、FM 处理增加穗粒数 3.95%、5.41%,LX 处理比 FM 处理增加穗粒数 1.40%,不同处理间的穗行数、穗粒数未达到显著水平($P>0.05$)。与 LN 处理相比,FM 处理、LM 处理、LX 处理百粒质量分别增加 4.09%、11.32%、4.40%,LM 处理较 LX 处理、FM 处理增加 6.63%、6.95%。不同处理玉米干物质量由大到小依次为 LM 处理、FM 处理、LX 处理、LN 处理,LM 处理、FM 处理、LX 处理较 LN 处理分别增加 5 451.7、4 151.0、2 322.3 kg/hm²,其中 LM 处理较 FM 处理、LX 处理分别增加 1 300.7、3 129.4 kg/hm²,FM 处理较 LX 处理增加 1 828.7 kg/hm²。对比不同处理的玉米产量,FM 处理、LM 处理、LX 处理较 LN 处理分别增加 166.3、431.0、37.7 kg/hm²,其中 LM 处理较 FM 处理、LX 处理产量增加 264.7、393.3 kg/hm²,FM 处理较 LX 处理增加 128.6 kg/hm²。LM 处理的百粒质量、干物质量和产量均最高。不同保护性耕

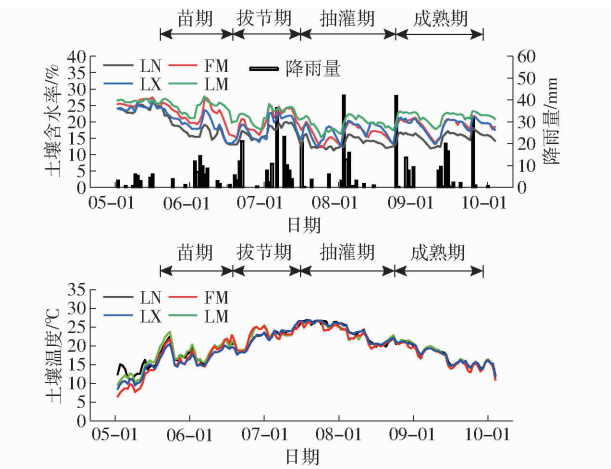


图 3 玉米生育期内降雨量及不同保护性耕作方式下耕层土壤含水率与温度

Fig.3 Rainfall during maize growing period and changes of soil moisture content and ground temperature in topsoil under different conservation tillage methods

表 5 不同保护性耕作方式下玉米产量及其构成

Tab.5 Maize yield and its composition factors in different treatments

项目		穗行数	穗粒数	百粒质量/g	干物质量/(kg·hm ⁻²)	产量/(kg·hm ⁻²)	变异系数/%
处理	FM	20.0 ^a	813.3 ^a	33.1 ^{ab}	29 097.0 ^a	12 832.3 ^{ab}	1.37 ^b
	LM	20.0 ^a	857.3 ^a	35.4 ^a	30 397.7 ^a	13 097.0 ^a	1.32 ^b
	LX	20.0 ^a	824.7 ^a	33.2 ^{ab}	27 268.3 ^{ab}	12 703.7 ^b	1.63 ^a
	LN	18.6 ^a	784.0 ^a	31.8 ^b	24 946.0 ^b	12 666.0 ^b	1.53 ^a
Pearson 相关系数	穗行数	1	0.752 ^{**}	0.270	0.279	0.440	
	穗粒数		1	0.328	0.383	0.487	
	百粒质量			1	0.639 [*]	0.221	
	干物质量				1	0.452	
	产量					1	

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

作方式下玉米产量的变异系数由小到大依次为 LM 处理、FM 处理、LN 处理、LX 处理,LM 处理变异系数最小,较 FM 处理、LN 处理、LX 处理降低 3.79%、15.91%、23.48%,FM 处理较 LX 处理显著降低 18.98%。通过 Pearson 相关性分析可以发现,果穗的行数与粒数在 0.01 水平上显著正相关,百粒质量与干物质量在 0.05 水平上显著正相关,穗行数与百粒质量、干物质量,以及产量与百粒质量 Pearson 相关系数绝对值在 0.1~0.3 的范围内,为弱相关关系,穗粒数与百粒质量、干物质量,产量与果穗行粒数、干物质量 Pearson 相关系数绝对值在 0.3~0.5 的范围内,为中度相关关系。

2.5 保护性耕作对水、氮利用率的影响

如表 6 所示,LN 处理生育期耗水最多,WUE 最

低,保护性耕作处理较 LN 处理生育期内耗水量显著减少 27~42 mm,WUE 显著提高 7.26%~12.90%。3 种保护性耕作处理中,FM 处理耗水量最多,WUE 最低,LM 处理耗水量最少,WUE 最高。FM 处理较 LM 处理耗水量增多 15 mm,WUE 降低 5.26%,LX 处理比 LM 处理耗水量增多 8 mm,WUE 降低 4.87%。氮素相关指标氮肥农学利用率、氮肥生产效率、氮素吸收效率、氮素收获指数、氮素表观回收率均是反映氮素利用效率的重要指标^[25],保护性耕作处理较 LN 处理分别提高 1.17%~10.53%、0.40%~3.56%、14.29%~42.86%、4.00%~12.00%、24.73%~92.58%。其中 LM 处理较 LX 处理各项指标分别高 9.25%、3.15%、25.00%、7.69%、54.39%。

表 6 不同保护性耕作方式下玉米水分利用效率、氮素利用率

Tab.6 Water use efficiency and nitrogen use efficiency of maize in different treatments							
处理	耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·m ⁻³)	氮肥农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥生产效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素吸收效率/ (kg·kg ⁻¹)	氮素收获指数/ (kg·kg ⁻¹)	氮素表观 回收率/%
FM	483 ^b	2.66 ^b	17.9 ^{ab}	51.3 ^{ab}	0.9 ^{ab}	0.52 ^{ab}	41.9 ^{ab}
LM	468 ^c	2.80 ^a	18.9 ^a	52.4 ^a	1.0 ^a	0.56 ^a	54.5 ^a
LX	476 ^b	2.67 ^b	17.3 ^b	50.8 ^b	0.8 ^{ab}	0.52 ^{ab}	35.3 ^{ab}
LN	510 ^a	2.48 ^c	17.1 ^b	50.6 ^b	0.7 ^b	0.50 ^b	28.3 ^b

3 讨论

保护性耕作技术是黑土地保护利用的一种重要技术措施,该项技术措施能够有效提高土壤蓄水抗旱保墒能力,从多角度出发改善农田土壤环境^[26],而土壤水热状况又是影响作物生长的重要因素^[27],因此探明保护性耕作对东北寒地黑土区土壤水热状况和玉米产量的影响尤为重要。

在本研究中,玉米全生育期内,保护性耕作处理 0~60 cm 土层平均土壤体积含水率较 LN 处理增加 27.28%~63.86%,与 LN 处理相比,FM 处理和 LM 处理表层覆盖的秸秆减少了太阳对地面的直接辐射,有效地阻挡了土壤水分蒸发^[28];LX 处理旋耕在土壤中的秸秆在腐解的过程中会吸收并保持水分,同时,秸秆还田能够降低玉米棵间蒸发量^[29]。保护性耕作处理 0~60 cm 土层平均土壤体积含水率由大到小依次为 LM 处理、LX 处理、FM 处理。与 FM 处理相比较,LM 处理、LX 处理起垄种植,降水较多时垄沟可以蓄积雨水,垄沟间易于形成土壤水势差,有利于调控土壤水分互渗、保蓄土壤水分。LM 处理含水率较 LX 处理高,原因为 LM 处理表层覆盖的秸秆阻碍了土壤与大气之间的水热交换,减少了土壤水分流失,而 LX 处理表层覆盖物较少,抑制土壤水分蒸发的效果不如 LM 处理好^[30]。成熟期 FM 处

理,LM 处理 10 cm 土层土壤体积含水率较 LX 处理、LN 处理高 26.73%~45.22%,这是因为进入成熟期后气温下降,降水较多,有秸秆覆盖的处理在植株耗水量几乎不发生变化的同时地表残余的秸秆降低了地表蒸发量,因此土壤含水率较高,LX 处理与 LN 处理地表裸露无遮挡物,阻挡地表蒸发的效果不如秸秆覆盖的效果好,因此含水率偏低,马永财等^[31]在探究秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响试验中得到了相同的结论。此外,保护性耕作处理全生育期内 10、30 cm 土层土壤体积含水率均显著高于 LN 处理,0~30 cm 平均体积含水率比 LN 处理高 45.05%~62.78%,这是因为 FM 处理、LM 处理、LX 处理受到了秸秆的影响,秸秆削弱了土壤与大气之间的水热交换作用,减少了水分蒸发,而 LN 处理水分流失严重致使土壤含水率较低^[32]。王钧等^[33]在研究中发现保护性耕作措施对 0~30 cm 土壤含水率的影响最为显著,这与本研究结果一致。陈昊等^[34]在分析不同秸秆还田方式对土壤理化性质的影响时发现,在相同的处理下土壤含水率随着土层深度的增加而增加,这与本试验中 FM 处理得到的结果不同,这可能是因为 FM 处理上层水分蒸发消耗较多,导致土壤下层水分不断向上层补给以供作物吸收利用^[35],导致该处理深层土壤的含水率较低。综上,保护性耕作方式尤其

以均匀行秸秆全覆盖还田能够更好地保持土壤水分,尤其是能够显著增加 0 ~ 30 cm 土层土壤水分含量。

土壤温度主要受太阳辐射、生物热量和地球内热的影响,与太阳辐射相比生物热量和地球内热对土壤温度的影响较小^[33],因此本试验土壤温度主要考虑源自太阳辐射的影响。苗期 FM 处理和 LM 处理 0 ~ 60 cm 土层平均土壤温度低于 LX 处理和 LN 处理 3.29% ~ 10.53%,这是由于苗期气温低,FM 处理与 LM 处理地表覆盖的秸秆阻挡了太阳辐射,使得土壤与大气之间的热量传递受到阻碍,而 LN 处理地表裸露,LX 处理表层覆盖物较少,热量传递受到的阻碍较小,土壤升温较快^[36]。随生育期的推进,气温升高,土壤温度也有所提升,到抽灌期,0 ~ 60 cm 土层平均土壤温度 LN 处理较保护性耕作高 3.20% ~ 7.63%,直到成熟期 LN 处理土壤温度逐渐降低,这可能是土壤温度是太阳辐射、大气温度与土壤热学性质相互作用的结果,抽灌期玉米已封冠太阳辐射无法直达地面,因此由太阳辐射引起的土壤温度变化各处理几乎相同,但是该时期降雨较多,受秸秆的影响抽灌期保护性耕作处理 0 ~ 60 cm 土层土壤平均体积含水率较 LN 处理高 24.98% ~ 61.41%,含水率升高、气温升高、棵间蒸发强度增大等因素导致土壤热学性质发生变化,从而引起保护性耕作处理的土壤温度降低^[37]。本研究中,当气温升高时保护性耕作处理土壤温度较 LN 处理显著降低,当成熟期气温降低时,保护性耕作处理土壤温度有了明显的升高,王顺霞等^[38]在针对不同覆盖处理对旱地玉米田土壤环境、玉米产量构成因素影响的分析中也发现了相同现象,这表明当气温上升至极点时保护性耕作可以起到降温的作用,而气温下降时,保护性耕作对于保持土壤温度能够起到一定的作用。在本研究中以 LM 处理的增降温效果最佳。土壤温度受太阳辐射的影响表层温度最高,热量由表层土壤向深层土壤传递,传递的过程中温度递减,进入抽灌期气温上升到极点以后开始下降,LX 处理和 LN 处理地表无覆盖层,土壤表层向空气中散失的热量远大于来自太阳辐射吸收的热量,因此 LX 处理与 LN 处理在抽灌期开始出现为表层土壤温度低于深层土壤温度^[37],而 FM 处理、LM 处理表层的秸秆覆盖层阻挡了热量的散失。有研究发现,当土壤温度过高时将会降低玉米根系的活性,影响玉米植株正常的生理活动以及对营养物质的吸收代谢,从而影响产量^[39],因此采用适宜的保护性耕作方式,改善作物生育期内土壤水热环境对促进作物生长具有重要意义。

研究发现,保护性耕作能够提高玉米产量^[40-41],并以变异系数来反映玉米产量的年际稳定性,即变异系数越小产量年际变化越平稳^[42]。在本研究中,保护性耕作处理较 LN 处理每公顷增加产量 0.30% ~ 3.40%,其中 LM 处理产量最高,LX 处理产量最低,Pearson 相关性分析中产量与干物质量相关系数为 0.452,为中度相关关系,保护性耕作处理较 LN 处理增加了 9.31% ~ 21.85% 干物质量。这是因为秸秆还田改善了土壤的水热状况,有利于玉米的生长,秸秆后期的增温效应有效延缓了植株根系衰老,延长了玉米植株对水分、养分的吸收利用,促进了干物质积累和产量的形成^[43]。LM 处理变异系数最小,产量年际变化最为平稳,LX 处理变异系数最大,产量年际变化最为波动,这可能是因为 LX 处理土壤里的秸秆增大了玉米出苗时的阻力,使产量变化较大,进而增大了变异系数^[44]。综上,保护性耕作能够增加玉米产量,维持玉米产量的稳定性,促进玉米干物质的积累,本研究中以均匀行秸秆全覆盖还田增量最多。

另有研究指出,秸秆还田能够提高水分利用效率,这是因为未腐解的残余秸秆能够吸收土壤中多余的水分,增加了土壤的贮水量^[45],关小康等^[46]指出,提高作物水分利用效率的关键在于采取合适的措施增加产量,降低耗水量。在本研究中,保护性耕作处理 WUE 均高于 LN 处理,这是因为秸秆还田可以有效保持土壤水分,降低无效耗水,从而提高 WUE^[47]。提高氮肥的利用率能够有效减少氮肥的损失、提高产量并且减轻环境污染^[48],本研究中,保护性耕作处理下氮肥农学利用率、氮肥生产效率、氮素吸收效率、氮素收获指数、氮素表观回收率均高于 LN 处理,其中 LM 处理各项氮素利用率均最高,除氮素收获指数外,FM 处理其余各项指标均高于 LX 处理。这表明保护性耕作能够有效促进植株氮素与籽粒氮素积累,秸秆覆盖还田较旋耕还田更能提高植株对氮素的吸收利用,该结果与已有研究结果一致^[49]。综上,保护性耕作能够提高水分利用效率,并促进植株、籽粒对氮素的吸收利用,以秸秆覆盖还田效果最佳。

4 结束语

基于大田试验,以常规耕作秸秆离田作为对照,探究了 FM 处理、LM 处理、LX 处理 3 种保护性耕作方式对东北寒地黑土区土壤水热状况和玉米产量的影响。结果表明:保护性耕作方式可以显著改善玉米生育期内土壤水热状况,优化玉米生长过程中土壤水热环境,具有良好的蓄水保墒、调节土壤温度的

作用。保护性耕作方式增加了玉米生育期内 0 ~ 60 cm 土层的土壤水分,其中 0 ~ 30 cm 土层土壤水分增加效果最为明显,同时也显著提高了玉米水分利用效率与植株对氮的吸收利用。保护性耕作方式的保温效应促进了玉米干物质与产量的积累。3 种保护性耕作方式中以均匀行秸秆全覆盖还田方式在改善玉米关键期土壤水热环境、促进玉米生殖生长和提高玉米产量方面效果最为显著,本试验可为东北寒地黑土区玉米种植过程中保护性耕作方式的选取提供参考。

参 考 文 献

[1] 陈玉洁,张平宇,刘世薇,等. 东北西部粮食生产时空格局变化及优化布局研究[J]. 地理科学,2016,36(9):1397-1407.
CHEN Yujie,ZHANG Pingyu,LIU Shiwei,et al. The spatio-temporal pattern change and optimum layout of grain production in the west of Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica,2016,36(9):1397-1407. (in Chinese)

[2] 杨俊彦. 东北地区耕地资源分析及对粮食生产影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2015.
YANG Junyan. Analysis of cultivated land in Northeast China and its impact on food production[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2015. (in Chinese)

[3] 李长卓. 基于 Meta 分析研究不同耕作方式对麦田 N₂O 排放的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
LI Changzhuo. Effect of different tillage methods on N₂O emissions from wheat fields based on Meta-analysis[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2020. (in Chinese)

[4] ALMARAZ J J,MABOOD F,ZHOU X M,et al. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in Southwestern Quebec[J]. Soil Science Society of American Journal,2006,73:113-119.

[5] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报,2021,52(10):1-15.
WANG Qingjie,CAO Xinpeng,WANG Chao,et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):1-15. (in Chinese)

[6] 宗英飞,杨学强,纪瑞鹏,等. 播种期温度变化对玉米出苗速率的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(9):70-74.
ZONG Yingfei,YANG Xueqiang,JI Ruipeng,et al. Influence of temperature changes on the seedling emergence rate of maize in sowing date[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2013,29(9):70-74. (in Chinese)

[7] 马树庆,王琪,于海,等. 东北地区玉米出苗速度与水热条件的关系及出苗期气象评估[J]. 生态学杂志,2013,32(8):2049-2055.
MA Shuqing,WANG Qi,YU Hai,et al. Maize emergence speed and its relationships with water and heat conditions in Northeast China and meteorological assessment of the maize emergence period[J]. Chinese Journal of Ecology,2013,32(8):2049-2055. (in Chinese)

[8] 杨德光,孙玉琚,IRFAN Ali Raza,等. 低温胁迫对玉米发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 东北农业大学学报,2018,49(5):1-8,44.
YANG Deguang,SUN Yujun,IRFAN Ali Raza,et al. Effect of low temperature stress on germination and physiological of maize seedling[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2018,49(5):1-8,44. (in Chinese)

[9] MONDAL S,CHAKRABORTY D. Global Meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity[J]. Geoderma,2021,405:2022.

[10] 张婉晴,王秀茹,周杨. 滴灌条件下秸秆覆盖与施肥对夏玉米水肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(6):139-146.
ZHANG Wanqing,WANG Xiuru,ZHOU Yang. Effects of straw mulching and fertilization on water and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(6):139-146. (in Chinese)

[11] SHEN J B,ZHU Q C,JIAO X Q,et al. Agriculture Green Development;a model for China and the world[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering,2020,7(1):5-13.

[12] WANG X J,JIA Z K,LIANG L Y,et al. Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dry land farming[J]. Field Crops Research,2018,218:11-17.

[13] LIU E K,YAN C R,MEI X R,et al. Long-term effect of chemical fertilizer,straw,and manure on soil chemical and biological properties in Northwest China[J]. Geoderma,2010,158:173-180.

[14] 张凤荣. 秸秆覆盖还田是基于自然的黑土地保护方案[J]. 中国土地,2021(8):10-12.
ZHANG Fengrong. Straw mulching is a natural black land protection scheme[J]. China Land,2021(8):10-12. (in Chinese)

[15] JIANG Y,QIAN H Y,HUANG S,et al. Acclimation of methane emissions from rice paddy fields to straw addition[J]. Science Advances,2019,5(1):eaau9038.

[16] 宋金鑫. 秸秆还田和氮肥施用量对膜下滴灌玉米生长发育及产量的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2019.
SONG Jinxin. Effects of straw returning field and nitrogen fertilizer application rate on growth and yield of maize under drip irrigation[D]. Changchun:Jilin Agricultural University,2019. (in Chinese)

[17] 杨晨璐,刘兰清,王维钰,等. 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[J]. 中国农业科学,2018,51(9):1664-1680.

- YANG Chenlu, LIU Lanqing, WANG Weiyu, et al. Effects of the application of straw returning and nitrogen fertilizer on crop yields, water and nitrogen utilization under wheat-maize multiple cropping system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(9): 1664 – 1680. (in Chinese)
- [18] 殷文, 陈桂平, 郭瑶, 等. 春小麦秸秆还田对后茬玉米干物质积累及产量形成的调控效应[J]. *中国生态农业学报*, 2020, 28(8): 1210 – 1218.
- YIN Wen, CHEN Guiping, GUO Yao, et al. Responses of dry matter accumulation and yield in a following maize crop to spring wheat straw returning [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8): 1210 – 1218. (in Chinese)
- [19] 王柏, 李芳花, 黄彦, 等. 寒地黑土区玉米高效调亏灌溉制度的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 113 – 115.
- WANG Bai, LI Fanghua, HUANG Yan, et al. Experimental study on the high efficiency regulated deficit irrigation scheduling of maize in the cold region and black soil [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(1): 113 – 115. (in Chinese)
- [20] 王立春, 赵兰坡, 朱平, 等. 不同施肥方式对黑土春玉米田硝态氮和铵态氮的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(12): 85 – 87.
- WANG Lichun, ZHAO Lanpo, ZHU Ping, et al. Effects of different fertilization methods on nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in black soil spring corn field [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(12): 85 – 87. (in Chinese)
- [21] 蔡红光, 梁尧, 闫孝贡, 等. 东北黑土区秸秆不同还田方式下玉米产量及养分累积特征[J]. *玉米科学*, 2016, 24(5): 68 – 74.
- CAI Hongguang, LIANG Yao, YAN Xiaogong, et al. Characteristics of maize yield and nutrient accumulation under different straw returning methods in black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(5): 68 – 74. (in Chinese)
- [22] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(11): 1456 – 1463.
- LÜ Yanjie, YU Haiyan, YAO Fanyun, et al. Effects of straw returning and nitrogen application on yield, greenhouse gas emissions and soil enzyme activities of spring corn in black soil region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11): 1456 – 1463. (in Chinese)
- [23] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M] // *Irrigation and Drainage Paper No 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome, Italy, 1998.
- [24] SEPASKHAH A R, KANOONI A, GHASEMI M M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58(1): 67 – 79.
- [25] 吴晓丽, 李朝苏, 汤永禄, 等. 氮肥运筹对小麦产量、氮素利用效率和光能利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1889 – 1898.
- WU Xiaoli, LI Chaosu, TANG Yonglu, et al. Effect of nitrogen management modes on grain yield, nitrogen use efficiency and light use efficiency of wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1889 – 1898. (in Chinese)
- [26] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. *中国科学院院刊*, 2021, 36(10): 1203 – 1215.
- AO Man, ZHANG Xudong, GUAN Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China [J]. *Journal of the Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1203 – 1215. (in Chinese)
- [27] 张鹏. 集雨限量补灌技术对农田土壤水温状况及玉米生理生态效应的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- ZHANG Peng. Effects of deficiency irrigation combined with ridge and furrow rainwater harvesting planting on soil temperature and moisture in farmland and on eco-physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [28] 申胜龙. 不同覆盖方式与覆盖量对土壤水热氮利用及夏玉米生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- SHEN Shenglong. Effects of mulching method and amount on soil moisture, temperature, nitrate nitrogen and summer maize growth [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018. (in Chinese)
- [29] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 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[J]. *生态学报*, 2011, 31(3): 777 – 783.
- GAO Fei, JIA Zhikuan, LU Wentao, et al. Effects of different straw returning amounts on soil moisture, maize growth and photosynthetic characteristics in arid regions of southern Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(3): 777 – 783. (in Chinese)
- [30] 胡亚瑾, 吴淑芳, 冯浩, 等. 覆盖方式对夏玉米土壤水分和产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2015, 36(6): 699 – 708.
- HU Yajin, WU Shufang, FENG Hao, et al. Effects of mulching methods on soil moisture and yield of summer maize [J]. *Chinese Agricultural Meteorology*, 2015, 36(6): 699 – 708. (in Chinese)
- [31] 马永财, 滕达, 衣淑娟, 等. 秸秆覆盖还田及腐解率对土壤温湿度与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 90 – 99.
- MA Yongcai, TENG Da, YI Shujuan, et al. Effects of straw mulching and decomposition rate on soil temperature and humidity and maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(10): 90 – 99. (in Chinese)
- [32] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(4): 75 – 80.
- WANG Zhen, FENG Hao. Effect of straw-incorporation on soil infiltration characteristics and soil water holding capacity [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(4): 75 – 80. (in Chinese)
- [33] 王钧, 李广, 聂志刚, 等. 保护性耕作下土壤水分变化特征模拟研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(1): 263 – 274.
- WANG Jun, LI Guang, NIE Zhigang, et al. Simulation on variation characteristics of soil water content under conservation

- tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 263–274. (in Chinese)
- [34] 陈昊, 饶继翔, 孙庆业. 秸秆还田方式对土壤理化性质的综合影响评价[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(4): 661–667.
CHEN Hao, RAO Jixiang, SUN Qingye. Comprehensive evaluation effects of straw returning methods on soil physical and chemical properties[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(4): 661–667. (in Chinese)
- [35] 李荣, 侯贤清, 吴鹏年, 等. 秸秆还田配施氮肥对土壤性状与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 289–298.
LI Rong, HOU Xianqing, WU Pengnian, et al. Effect of straw returning with nitrogen application on soil properties and water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 289–298. (in Chinese)
- [36] 付强, 马梓昇, 李天霄, 等. 北方高寒区不同覆盖条件下土壤温度差异性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 152–159.
FU Qiang, MA Ziao, LI Tianxiao, et al. Analysis of soil temperature difference under different coverage conditions in northern alpine region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 152–159. (in Chinese)
- [37] 冯浩, 刘匣, 余坤, 等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192–202.
FENG Hao, LIU Xia, YU Kun, et al. Effects of different mulching methods on soil water and heat and growth of summer maize [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 192–202. (in Chinese)
- [38] 王顺霞, 王占军, 左忠, 等. 不同覆盖方式对旱地玉米田土壤环境及玉米产量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(9): 134–137.
WANG Shunxia, WANG Zhanjun, ZUO Zhong, et al. Effects of difference mulching on the soil environmental and maize yield in rainfed land[J]. Journal of Arid land Resources and Environment, 2004, 18(9): 134–137. (in Chinese)
- [39] 李炳文. 山东玉米[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2001: 60–61, 300–302.
- [40] BANA S, PRIJONO S. The effect of soil management on the availability of soil moisture and maize production in dryland[J]. International Journal of Agriculture & Forestry, 2013, 3(3): 77–85.
- [41] 徐莹莹, 刘玉涛, 王宇先, 等. 黑龙江省西部地区秸秆还田方式对土壤性状及玉米产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(10): 9–13.
XU Yingying, LIU Yutao, WANG Yuxian, et al. Effects of straw returning method on soil properties and maize yield in western Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2021(10): 9–13. (in Chinese)
- [42] 徐欣, 王笑影, 鲍雪莲, 等. 长期免耕不同秸秆覆盖量对玉米产量及其稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 671–676.
XU Xin, WANG Xiaoying, BAO Xuelian, et al. Effects of long-term no-tillage and stover mulching on maize yield and stability [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 671–676. (in Chinese)
- [43] 徐莹莹, 王俊河, 刘玉涛, 等. 秸秆不同还田方式对土壤物理性状、玉米产量的影响[J]. 玉米科学, 2018, 26(5): 78–84.
XU Yingying, WANG Junhe, LIU Yutao, et al. Effects of different straw returning methods on soil physical properties and corn yield[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(5): 78–84. (in Chinese)
- [44] 张宇飞, 刘立志, 马昱萱, 等. 耕作和秸秆还田方式对玉米产量及钾素积累转运的影响[J]. 作物杂志, 2019(2): 122–127.
ZHANG Yufei, LIU Lizhi, MA Yuxuan, et al. Effects of tillage and straw returning methods on maize yield and potassium accumulation and transport[J]. Crops, 2019(2): 122–127. (in Chinese)
- [45] 张帅, 孔德刚, 常晓慧, 等. 秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6): 127–129.
ZHANG Shuai, KONG Degang, CHANG Xiaohui, et al. Effect of straw deep application on soil water storage capacity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6): 127–129. (in Chinese)
- [46] 关小康, 王静丽, 刘影, 等. 轮耕秸秆还田促进冬小麦干物质积累提高水氮利用效率[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 280–288.
GUAN Xiaokang, WANG Jingli, LIU Ying, et al. Rotational tillage straw returning to field promotes dry matter accumulation of winter wheat and improves water and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 280–288. (in Chinese)
- [47] 殷文, 柴强, 胡发龙, 等. 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[J]. 中国农业科学, 2019, 52(7): 1247–1259.
YIN Wen, CHAI Qiang, HU Falong, et al. Characteristics of soil water use in spring wheat fields under different straw returning methods in arid inland irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(7): 1247–1259. (in Chinese)
- [48] 吕广德, 米勇, 陈永军, 等. 氮肥运筹对玉米干物质及氮素积累转运和产量的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(1): 128–137.
LÜ Guangde, MI Yong, CHEN Yongjun, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation, dry matter accumulation, transport, and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 128–137. (in Chinese)
- [49] 张万锋, 杨树青, 刘鹏, 等. 秸秆覆盖方式和施氮量对河套灌区夏玉米氮利用及产量影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(21): 71–79.
ZHANG Wanfeng, YANG Shuqing, LIU Peng, et al. Effects of stover mulching combined with N application on N use efficiency and yield of summer maize in Hetao Irrigated District[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 71–79. (in Chinese)